



Berlin University of Applied Sciences and Technology
Fachbereich VIII

Barrierefreie Entfluchtung aus Versammlungsstätten

Evakuierungssimulation heterogener Personenströme

Masterarbeit

von

Lina Hebig

zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Engineering (M.Eng.)

im Studiengang
Veranstaltungstechnik und -management

Matrikelnummer: 910813

Betreuer: Prof. Thomas Sakschewski

Gutachter: Dipl.-Math. José Méndez Omaña

Berlin, August 2023

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Relevanz des Themas	1
1.2 Ziel der Arbeit	2
1.3 Aufbau der Arbeit.....	2
2. Entfluchtung aus Versammlungsstätten.....	4
2.1 Sicherheitsplanung	4
2.2 Barrierefreiheit und Behinderung	6
2.3 Barrierefreies Bauen.....	7
2.3.1 Musterbauordnung.....	9
2.3.2 Musterversammlungsstättenverordnung	10
2.3.3 DIN 18040-1	11
2.4 Anforderungen und Maßnahmen einer barrierefreien Entfluchtung	12
3. Grundlagen der Evakuierungsberechnung.....	15
3.1 Entfluchtungsdauer.....	16
3.2 Entfluchungsablauf	19
3.2.1 Grundgrößen	19
3.2.2 Fundamentaldiagramm	21
3.2.3 Stau	22
3.3 Personenstrommodelle	24
3.3.1 Makroskopische Modelle.....	25
3.3.2 Mikroskopische Simulationssoftware.....	27
3.3.2.1 Räumliche Abbildung.....	28
3.3.2.2 Parameterwahl	30
3.3.2.3 Anwendung	31
3.4 Modellierung menschlichen Verhaltens.....	32
3.4.1 Fluchtwegwahl	32
3.4.2 Gruppenbildung	33
3.4.3 Verhalten in Menschenmengen.....	34
3.4.4 Heterogene Populationen	35
4. Simulationssoftware PedGo	37
4.1 Modell.....	37
4.2 Eingabeparameter	39
4.3 Ergebnis und Auswertung.....	41
5. Methodik zur Validierung der Simulation.....	43

5.1	Empirische Bewegungsstudie	43
5.1.1	Allgemein	43
5.1.2	Szenarien	44
5.1.3	Ergebnisse.....	46
5.2	Vergleichsparameter und Vorgehen.....	47
5.3	Modellierung der Geometrien.....	50
5.4	Parameterauswahl zur Modellierung der Population	51
5.4.1	Parameter der Referenzpopulation	51
5.4.2	Parameter der Rollstuhlfahrer-Population	52
6.	Simulationsergebnisse.....	54
6.1	Evakuierungsgraphen.....	54
6.1.1	Plausibilitätsprüfung anhand homogener Referenzpopulation.....	54
6.1.2	Anwendbarkeit der Referenzparameter und Kalibrierung für heterogene Gruppe	56
6.2	Parameteranpassung zur Annäherung der Evakuierungsgraphen	58
6.3	Personendichte, -fluss und -geschwindigkeit im Zeitverlauf	63
7.	Diskussion	69
7.1	Diskussion der Programm-Anwendung	69
7.1.1	Modellierung der Geometrien	69
7.1.2	Modellierung der Population	70
7.2	Diskussion der Simulationsergebnisse.....	72
7.3	Kritische Betrachtung der Forschung	79
8.	Fazit und Ausblick	82
	Literatur- und Quellenverzeichnis	I
	Abbildungsverzeichnis.....	VI
	Tabellenverzeichnis.....	VII
	Digitaler Anhang – Inhaltsverzeichnis.....	VIII
	Eidesstattliche Versicherung	IX

Abkürzungsverzeichnis

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
c/s	Zelle pro Sekunde
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DIN	Deutsches Institut für Normung
m/s	Meter pro Sekunde
MBO	Musterbauordnung
MVStättVO	Musterversammlungsstättenverordnung
RiMEA	Richtlinie für mikroskopische Entfluchtungsanalysen
SiME	Sicherheit für Menschen mit körperlicher, geistiger oder altersbedingter Beeinträchtigung
vfdb	Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes

1. Einleitung

Die vorliegende Arbeit thematisiert die Evakuierungssimulation heterogener Personenströme, bestehend aus Menschen mit und ohne motorische Behinderung, zur Ermöglichung einer barrierefreien Entfluchtung aus Versammlungsstätten.

1.1 Relevanz des Themas

Die barrierefreie und sichere Entfluchtung aus Versammlungsstätten ist Bestandteil der Sicherheitsplanung einer Veranstaltung zur Gewährleistung der Personensicherheit.¹ Die Sicherstellung der Barrierefreiheit durch entsprechende Gestaltung von Fluchtwegen mit Beachtung der Anforderungen behinderter Menschen ist in Gefahrensituationen für alle Beteiligten von Vorteil – vor allem in Gebäuden mit hohem Personenaufkommen wie Versammlungsstätten.²

Evakuierungssimulationen dienen unterstützend der Prognose und Analyse von Evakuierungsprozessen. Um die Entfluchtung heterogener Personenströme, bestehend aus Menschen mit und ohne Behinderung, realitätsnah prognostizieren zu können, muss diese unter Berücksichtigung individueller Fähigkeiten von entsprechender Simulationssoftware abbildbar sein.

Untersuchungen bezüglich der Plausibilität von Simulationen homogener Gruppen mit ähnlichen physischen Eigenschaften und der Vergleich mit empirischen Daten für unterschiedliche Szenarien und Gebäudegrundrisse existieren bereits. Die Simulation der Entfluchtung heterogener Gruppen findet jedoch bisher nur wenig Beachtung. Forschung zum menschlichen Bewegungsverhalten in Personenströmen existiert ebenfalls vor allem für homogene Gruppen³, sodass die Kalibrierung von Simulationssoftware oftmals nur anhand dieser Daten vorgenommen wird.

Auch die Simulationssoftware PedGo wurde innerhalb zahlreicher Testfälle und Vergleiche mit Studiendaten validiert⁴ – allerdings für Simulationen homogener Gruppen. Ob die Entfluchtung heterogener Personenströme innerhalb des Programms darstellbar ist und wie realitätsnah die Simulation ist, wurde nicht untersucht.

¹ vgl. § 42. MVStättVO

² vgl. Baunetz: Baulicher Brandschutz und Barrierefreiheit, s.a. (13.07.2023)

³ vgl. Georg et al.: The Influence of Wheelchair Users. 2019, S. 1

⁴ vgl. TraffGo HT GmbH: Validierung und Verifikation, 2018 (13.07.2023)

1.2 Ziel der Arbeit

Deswegen soll mithilfe dieser Arbeit die Frage beantwortet werden, inwiefern sich die Entfluchtung heterogener Gruppen aus Menschen mit und ohne motorische Behinderung aus Versammlungsstätten innerhalb der Simulationssoftware PedGo realistisch abbilden lässt. Das Ziel ist also die Validierung oder Falsifizierung der Simulation heterogener Personenströme durch die Software PedGo im Hinblick auf die Nutzung zur Prognose und Optimierung von Evakuierungsprozessen heterogener Populationen. Teil dessen ist die Identifikation von Einflussfaktoren auf die Bewegung heterogener Populationen und die Prüfung der Integration dieser innerhalb der Simulation.

Zusätzliches Ziel ist es, die Themengebiete der Räumung, Barrierefreiheit und Simulation in den Gesamtzusammenhang der Veranstaltungsplanung sowie den gesetzlichen Kontext einzuordnen, um so einen grundlegenden Überblick der Thematik zu schaffen. Ein Blick auf Barrieren und besondere Anforderungen von Menschen mit motorischer Behinderung bei der Entfluchtung soll zur Sensibilisierung des Themas beitragen.

Um diese Ziele zu erreichen, werden verschiedene Methoden eingesetzt: Zuerst wird eine Literaturstudie durchgeführt, um den theoretischen Kontext des Themas zu erfassen. Die anschließende Durchführung von Evakuierungssimulationen mit PedGo dient der Validierung der Software: Die Auswertung findet einerseits qualitativ in Form der Bewertung der Programmanwendung und andererseits quantitativ anhand des Vergleichs der Simulationsergebnisse mit empirischen Studiendaten statt.

1.3 Aufbau der Arbeit

Diese Masterarbeit gliedert sich insgesamt in acht Kapitel. Zuerst wird ein theoretisches Grundverständnis der Thematik geschaffen, welche sich zunächst entsprechend dem Titel dieser Arbeit in zwei Themengebiete einteilen lässt.

Zu Beginn findet eine Einordnung der Entfluchtung aus Versammlungsstätten in den Gesamtkontext der Veranstaltungsplanung statt. Die Betrachtung führt von der Definition des Begriffs Entfluchtung und der Bedeutung dieser in der Sicherheitsplanung über die Definition wichtiger Begriffe der Barrierefreiheit und Behinderung bis zu den rechtlichen Rahmenbedingungen barrierefreien Bauens. Abschließend werden besondere Anforderungen und Maßnahmen einer barrierefreien Entfluchtung (auch außerhalb der Simulation) betrachtet.

Der zweite Teil der Theorie umfasst die Grundlagen der Evakuierungsberechnung und die Bedeutung dieser im Kontext der Veranstaltungsplanung. Nach Definition der Grundbegriffe und Grundlagen werden unterschiedliche Personenstrommodelle vorgestellt

und die Modellierung menschlichen Verhaltens betrachtet – beides mit besonderem Blick auf heterogene Populationen.

Den Abschluss des theoretischen Teils bildet die Vorstellung der betrachteten Simulationssoftware PedGo zum Verständnis des zugrunde liegenden Modells, der variierbaren Eingabeparameter und der Möglichkeiten zur Ergebnisauswertung.

Auf Grundlage dieser Basis wird innerhalb der Methodik das geplante Vorgehen zur Validierung der Simulation und Beantwortung der Forschungsfrage vorgestellt: Zum Vergleich der Simulationsergebnisse mit empirischen Bewegungsstudien, welche zunächst vorgestellt werden, findet eine Festlegung von Vergleichsparametern und die Modellierung von Geometrie und Population der zu vergleichenden Szenarien statt.

Im sechsten Kapitel werden die Ergebnisse der in der Software durchgeführten Simulationen den Studienergebnissen gegenübergestellt. Die graphische Darstellung und schriftliche Analyse der Ergebnisse dienen der im folgenden Kapitel stattfindenden Diskussion: Diese beinhaltet sowohl die Bewertung der Anwendung des Simulationsprogramms als auch die Beurteilung der Simulationsergebnisse. Diese Ergebnisse werden zusammengefasst und zur Validierung der Simulation durch PedGo und damit zur Beantwortung der Forschungsfrage diskutiert. Zusätzlich werden die Grenzen der Forschung aufgezeigt.

Das Fazit fasst die bedeutsamsten Erkenntnisse zusammen, um die Forschungsfrage abschließend zu beantworten. Die Einordnung in den Gesamtkontext des Themas und ein Ausblick auf mögliche weiterführende Forschung folgen zum Schluss.

2. Entfluchtung aus Versammlungsstätten

Eingangs wird der Begriff der Entfluchtung definiert und abgegrenzt. Nach Definition der Richtlinie für mikroskopische Entfluchtungsanalysen (RiMEA) beschreibt die Entfluchtung allgemein das sichere Entkommen von Menschen aus einem gefährdeten Bereich und als gleichsetzbar mit den Begriffen Räumung und Evakuierung.⁵ Der Leitfaden der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes (vfdb) hingegen unterscheidet zwischen letzteren Begriffen: So wird die Evakuierung als das geplante Verlassen eines gefährdeten Gebiets verstanden⁶, wie beispielsweise bei Bombenentschärfungen oder im Katastrophenschutz. Die Räumung bezeichnet währenddessen die kurzfristige Flucht aufgrund einer unvorhersehbaren akuten Gefahr wie einem Brand⁷, z. B. aus Versammlungsstätten. Der Unterschied der Definitionen liegt hier also vor allem auf organisatorischer und räumlicher Ebene und in der Kurzfristigkeit. Die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) wiederum verwendet für eine organisierte Bewegung von einem unsicheren in einen sicheren Bereich das Wort Räumung statt Evakuierung und definiert sichere Bereiche als Ort mit vorübergehendem Schutz vor unmittelbarer Gefahr für Leib und Leben (z. B. benachbarte Brandabschnitte).⁸

Analog zur Definition der RiMEA werden innerhalb dieser Arbeit die Begriffe Entfluchtung, Räumung und Evakuierung synonym verwendet.

Dieses Kapitel beschreibt die Bedeutung der Entfluchtung innerhalb der Sicherheitsplanung von Veranstaltungen, definiert den Begriff der Barrierefreiheit und schafft einen Überblick über die Gesetze und Richtlinien des barrierefreien Bauens für Versammlungsstätten. Schließlich werden Anforderungen und Maßnahmen bezüglich der Entfluchtung mobilitätseingeschränkter Personen, der Anspruch auf Selbstrettung und alternative Möglichkeiten zur Fremdrettung (sowie die Auswirkung auf die Räumung von Versammlungsstätten) dargestellt.

2.1 Sicherheitsplanung

Dieses Kapitel dient der Einordnung und Bedeutung des Themas dieser Arbeit im Kontext der Veranstaltungssicherheit. Die Entfluchtung von Personen aus Versammlungsstätten ist ein wichtiger Teil der Sicherheitsplanung von Veranstaltungen. Im Folgenden wird die gesetzliche Verpflichtung zur Planung und Durchführung von Räumungen

⁵ vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 5

⁶ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 333

⁷ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 333

⁸ vgl. DGUV Information 205-033 „Alarmierung und Evakuierung“. 2019, S. 7 f.

dargestellt und ihre Bedeutung für die Personensicherheit erläutert. Am Ende des Kapitels folgt ein Überblick möglicher Störungstypen, welche zur Notwendigkeit einer Räumung führen können. Die Pflicht zur Erstellung eines Räumungskonzepts für Versammlungsstätten ist gesetzlich verankert:

§ 42 der Musterversammlungsstättenverordnung (MVStättVO) definiert: Bei Versammlungsstätten für über 1000 Besucher sind durch den Betreiber oder einen von ihm Beauftragten Maßnahmen festzulegen, welche eine Räumung im Gefahrenfall möglich machen, Menschen mit Behinderung berücksichtigen und entweder in einem separaten Räumungskonzept oder als Teil des Sicherheitskonzepts dargestellt werden.⁹

§ 43 fordert für Versammlungsstätten mit über 5.000 Besucherplätzen oder durch Notwendigkeit aufgrund der Art der Veranstaltung die Erstellung eines Sicherheitskonzepts und Einrichtung eines Ordnungsdienstes unter Leitung eines Ordnungsdienstleiters: Diese sind verantwortlich für die betrieblichen Sicherheitsmaßnahmen, darunter die Räumung der Versammlungsstätte im Gefahrenfall.¹⁰

Mithilfe der Räumung einer Versammlungsstätte kann auf sicherheitsrelevante Störungen reagiert werden, um Personenschäden zu vermeiden.¹¹ Sie beinhaltet als Teil des Crowd Controls die Steuerung der Personenströme zu sicheren Bereichen und die Kontrolle der jeweiligen Abläufe.¹² Eine Entfluchtung von Personen aus gefährdenden Bereichen wird als letztes Mittel notwendig, wenn andere Maßnahmen zur Abwehr von Störungen nicht ausreichen.¹³ Die Räumung ist somit eine entscheidende Maßnahme zur Gewährleistung der Personensicherheit im Gefahrenfall. Denn ein elementares Schutzziel der Planung von Veranstaltungen und damit des Sicherheitskonzepts ist die Besuchersicherheit.¹⁴ Der Besucher ist jedoch nicht nur Schutzziel, sondern ebenfalls Gefährdung: Das individuelle Publikumsverhalten und die Bewegung des Publikums innerhalb der Versammlungsstätten sowohl im Normal- als auch Gefahrenfall sind kritische Faktoren, welchen besondere Beachtung geschenkt werden muss.¹⁵

Zusätzlich zur Betrachtung aus brandschutztechnischer Sicht gibt es innerhalb von Versammlungsstätten neben Bränden diverse andere Gründe, welche eine Räumung notwendig machen können. Diese sind beispielsweise Explosionen, Gefahrgutaustritt,

⁹ vgl. § 42. MVStättVO

¹⁰ vgl. § 43. MVStättVO

¹¹ vgl. VDI 4062:2016-04

¹² vgl. Sakschewski und Paul: Veranstaltungsmanagement. 2017, S. 231 ff.

¹³ vgl. VDI 4062:2016-04

¹⁴ vgl. Arbeitsgruppe Veranstaltungssicherheit: Die Sicherheit einer Veranstaltung. 2017, S. 53

¹⁵ vgl. Sakschewski et al.: Sicherheitskonzepte für Veranstaltungen. 2019, S. 152

Naturereignisse, Bedrohungen¹⁶ (Bomben, Amok, Attentat, Geiselnahme) sowie Tod, Unfall, Verletzung oder Erkrankung einzelner oder mehrerer Personen und Gewalt¹⁷. Für weitere veranstaltungsbezogene Störungstypen sollte die Planung von Maßnahmen und ggf. eine Räumung der Versammlungsstätte erfolgen: Sabotage, Ausfall von Sicherheits- oder Kommunikationseinrichtung, problematisches Verhalten von Zuschauern oder Künstlern, abweichende Veranstaltungsabläufe, Störung von Verkehrswegen.¹⁸ Je nach Veranstaltungstyp können durch Gruppen anderer Meinungen, Unfälle oder rivalisierende Fangruppen weitere Störungen verursacht werden – beispielsweise bei politischen Kundgebungen oder sportlichen Events.¹⁹

Teil der Sicherheitsplanung sollte deshalb ein Krisenmanagement sein, welches Maßnahmen für Störungen oder Veranstaltungsabbrüche plant und ergreift, zum Beispiel die Aufforderung zur Räumung.²⁰ Die möglichen Gefährdungen und entsprechenden Maßnahmen müssen festgelegt und dokumentiert werden.²¹ Menschen mit Behinderung und anderweitig eingeschränkte Personen sind in Bezug auf Alarmierung und Evakuierung einzubeziehen: Die notwendigen Maßnahmen sind dabei abhängig von den Bedürfnissen und Fähigkeiten der Nutzer wie beispielsweise ihrer Mobilität.²² Der Nachweis und die Überprüfung der Wirksamkeit der geplanten Entfluchtung sollte im Vorhinein durch Evakuierungsübungen erfolgen.²³

2.2 Barrierefreiheit und Behinderung

Um die Entfluchtung aus Versammlungsstätten und das Thema Barrierefreiheit gemeinschaftlich zu betrachten, ist es zunächst wichtig, Barrierefreiheit und Behinderung zu definieren und ein Verständnis dieser Grundbegriffe zu schaffen.

Der erste Artikel der UN-Behindertenrechtskonvention definiert Menschen mit Behinderung als „Menschen, die langfristige körperliche, seelische, geistige oder Sinnesbeeinträchtigungen haben, welche sie in Wechselwirkung mit verschiedenen Barrieren an der vollen, wirksamen und gleichberechtigten Teilhabe an der Gesellschaft hindern können“²⁴. Die Definition von Behinderung innerhalb des Deutschen Sozialgesetzbuches orientiert sich hieran, fügt jedoch eine zeitliche Bedingung von Einschränkungen über

¹⁶ vgl. VDI 4062:2016-04

¹⁷ vgl. DGUV Information 215-310 „Sicherheit bei Veranstaltungen und Produktionen“. 2016, S. 11

¹⁸ vgl. Sakschewski et al.: Sicherheitskonzepte für Veranstaltungen. 2019, S. 122 f.

¹⁹ vgl. Sakschewski et al.: Sicherheitskonzepte für Veranstaltungen. 2019, S. 136

²⁰ vgl. Sakschewski und Paul: Veranstaltungsmanagement. 2017, S. 215

²¹ vgl. DGUV Information 205-033 „Alarmierung und Evakuierung“. 2019, S. 5

²² vgl. DGUV Information 205-033 „Alarmierung und Evakuierung“. 2019, S. 19

²³ vgl. VDI 4062:2016-04

²⁴ Beauftragter der Bundesregierung: Die UN-Behindertenrechtskonvention. 2018, S. 8

sechs Monaten²⁵ hinzu. Insgesamt ist es also die Kombination aus eigener Beeinträchtigung und gesellschaftlichen bzw. umweltbedingten Barrieren, welche eine Behinderung zu ebendieser machen.²⁶

Eine motorische Behinderung liegt vor, wenn das Bewegungsvermögen einer Person eingeschränkt ist: Oft sind Arme, Beine und Hände betroffen und die Verwendung von Hilfsmitteln wie Rollstühlen oder Gehhilfen notwendig.²⁷ In den Bereich der motorischen Behinderung fallen Geh-, Steh-, Greif- und Oberkörper-Behinderungen sowie Kleinwüchsigkeit.

Gleichberechtigte Teilhabe wird durch die Existenz von Barrieren verhindert.²⁸ Barrieren können sowohl räumlich als auch sozial, taktil, visuell, auditiv, hygienisch und stofflich sein.²⁹ Barrierefreiheit definiert im Gegensatz dazu die Abwesenheit dieser Barrieren und soll für Gleichberechtigung zwischen Menschen mit und ohne Behinderung sorgen. Als barrierefrei gilt etwas, sofern es für Menschen mit Behinderung gleichberechtigt, d. h. ohne Fremdhilfe und erschwerende Umstände, in üblicher Art nutzbar ist.³⁰

Die Herstellung gleichberechtigter Teilhabe von Menschen mit Behinderung kann mithilfe einer barrierefreien Gestaltung der Umgebung erzielt werden.³¹ Das nächste Kapitel widmet sich in diesem Sinne den Prinzipien des barrierefreien Bauens und den entsprechenden gesetzlichen Regelungen.

2.3 Barrierefreies Bauen

Im Hinblick auf die Simulation von Evakuierungen liegt der Fokus im Folgenden auf der räumlichen Barrierefreiheit des Bauens. Analog zur allgemeinen Definition der Barrierefreiheit bedeutet dies eine Berücksichtigung von Menschen mit Behinderung bei der Gestaltung von Veranstaltungsstätten, damit diese ohne Einschränkungen und Fremdhilfe zugänglich und nutzbar sind.³²

Bezüglich der Entfluchtung ist dabei nicht nur die Zugänglichkeit, sondern das Bauen sicherer Fluchtwege für alle Nutzer wichtig.³³ Der Umfang der für ein Gebäude getroffenen Maßnahmen ist vor allem abhängig von den Fähigkeiten der Nutzer, zum Beispiel

²⁵ vgl. § 2 Absatz 1 Satz 1 SGB IX

²⁶ vgl. Beauftragter der Bundesregierung: Die UN-Behindertenrechtskonvention. 2018, S. 5

²⁷ vgl. DIN 18040-1:2010-10

²⁸ vgl. UN-Behindertenrechtskonvention: Definition von Behinderung, s.a. (13.07.2023)

²⁹ vgl. VBG: Grundsätze des barrierefreien Planens und Gestaltens von Arbeitsstätten, s.a. (13.07.2023)

³⁰ vgl. § 4 BGG

³¹ vgl. § 8 BGG

³² vgl. DGUV Information 215-310 „Sicherheit bei Veranstaltungen und Produktionen“. 2016, S. 10

³³ vgl. Steinhofer: Barrierefreier Brandschutz – Evakuierungskonzepte für alle, 2019 (13.07.2023)

ihrer Mobilität.³⁴ Aus diesem Grund ist auf Menschen mit eingeschränkter Mobilität besondere Rücksicht bei der Gestaltung von Fluchtwegen zu nehmen: Diesbezüglich eingeschränkt sind jedoch nicht nur Gehbehinderte oder Rollstuhlfahrer³⁵, sondern häufig auch ältere Menschen.³⁶ Insgesamt werden Gebäude von Menschen mit verschiedensten Einschränkungen genutzt.³⁷ Aus diesem Grund werden in der DIN-Norm 18040 für barrierefreies Bauen unterschiedliche Bedürfnisse einbezogen: Beachtung finden Menschen mit Seh- oder Hörbehinderungen, kognitiven Einschränkungen und motorischen Behinderungen, genauso aber auch die Anforderungen von älteren Personen, Kindern und Menschen mit Kinderwagen oder Gepäck.³⁸ Je nach Art der Einschränkung werden andere Hilfsmittel gebraucht: Während Menschen mit sensorischen Behinderungen (wie Blindheit oder Taubheit) auf Orientierungshilfen angewiesen sind, benötigen andere Mobilitätshilfen.³⁹ Die Berücksichtigung aller verschiedenen Fähigkeiten und des Bedarfs durch Behinderung oder Alter mit verbundenen Einschränkungen gewährleistet die Gestaltung von Räumen für alle Menschen.⁴⁰

Zusätzlich kann in Gefahrensituationen vor allem in Gebäuden mit hohem Personenaufkommen, wie Versammlungsstätten, die Einhaltung der Barrierefreiheit und die entsprechende Gestaltung von Fluchtwegen mit Beachtung der Anforderungen behinderter Menschen für alle Beteiligten von Vorteil sein und Fluchtmöglichkeiten optimieren.⁴¹ Denn in Notsituationen können auch Menschen ohne Einschränkungen Schwierigkeiten, beispielsweise bei der Orientierung, haben.⁴²

Das Ziel des barrierefreien Bauens ist zusammengefasst die Gleichberechtigung, Selbstbestimmung und Unabhängigkeit aller Menschen jeden Alters. Die barrierefreie Gestaltung von Veranstaltungen ist nicht nur gesetzlich verankert, sondern ebenfalls ein Bestandteil der Nachhaltigkeit dieser.⁴³ Verschiedene Vorschriften und Normen regeln die barrierefreie Gestaltung öffentlicher Gebäude mit hohem Besucheraufkommen.⁴⁴

Es folgt eine Zusammenfassung dieser rechtlichen Rahmenbedingungen zum barrierefreien Bauen für Versammlungsstätten, die vor allem in Bauordnung und MVStättVO zu

³⁴ vgl. Göbell und Kallinowsky: Barrierefreier Brandschutz. 2016, S. 67

³⁵ Die in dieser Arbeit verwendeten Personenbezeichnungen beziehen sich auf alle Geschlechter.

³⁶ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 22

³⁷ vgl. Steinhofer: Barrierefreier Brandschutz – Evakuierungskonzepte für alle, 2019 (13.07.2023)

³⁸ vgl. DIN 18040:2012-10

³⁹ vgl. Baunetz: Baulicher Brandschutz und Barrierefreiheit, s.a. (13.07.2023)

⁴⁰ vgl. Barrierefrei.de: Was bedeutet Barrierefreiheit eigentlich, 2018 (13.07.2023)

⁴¹ vgl. Baunetz: Baulicher Brandschutz und Barrierefreiheit, s.a. (13.07.2023)

⁴² vgl. Boenke et al.: Organisatorische und bauliche Maßnahmen. 2011, S. 124

⁴³ vgl. Holzbaur: Nachhaltige Events. 2020, S. 26

⁴⁴ vgl. Boenke et al.: Organisatorische und bauliche Maßnahmen. 2011, S. 39

finden sind. Normen und Richtlinien ergänzen diese Regelungen. Eine Unterteilung relevanter Gesetze in barrierefreie und allgemeine Regelungen ist an dieser Stelle wenig sinnvoll, da Bemessungen – wie zuvor erläutert – der Nutzbarkeit aller Personen dienen und die entsprechenden Vorgaben sich überschneiden und ergänzen. Deswegen werden folgend ganzheitlich alle relevanten Rahmenbedingungen für die barrierefreie Entfluchtung aller Personen aus Versammlungsstätten aufgeführt.

2.3.1 Musterbauordnung

Gesetzliche Regelungen zum barrierefreien Bauen finden sich einerseits in den Landesbauordnungen der Bundesländer, welche sich an der Musterbauordnung (MBO) orientieren. Diese wird im Folgenden betrachtet.

Die MBO definiert Anlagen als barrierefrei, sofern Menschen mit Behinderung diese ohne Einschränkungen und ohne Fremdhilfe in üblicher Art nutzen können.⁴⁵ Als allgemeine Anforderung wird die Anordnung, Errichtung und Instandhaltung von Anlagen vor dem Hintergrund der öffentlichen Sicherheit und Ordnung sowie dem Schutz von Leben und Gesundheit deklariert.⁴⁶ Zu diesem Zweck wird die Beschaffenheit der Anlagen zur Ermöglichung der Rettung von Mensch und Tier im Brandfall gefordert.⁴⁷

Öffentliche Gebäude müssen in Bereichen mit Besucherverkehr barrierefrei sein: Dies gilt unter anderem explizit für Kultureinrichtungen sowie Sport- und Freizeitstätten, andere Räume müssen in erforderlichem Umfang und Toilettenräume und Stellplätze in erforderlicher Anzahl barrierefrei sein.⁴⁸ Die Berliner Landesbauordnung beispielsweise liefert an dieser Stelle explizite Angaben bezüglich der Dimensionierung und Beschaffenheit von Hauptzugang, Türen, Rampen, Zwischenpodesten, Treppen und Fluren.⁴⁹

Die MBO setzt zuvor genannte Regelung allerdings außer Kraft für den Fall, dass die Umsetzung nur mit unverhältnismäßigem Mehraufwand aufgrund von ungünstigen Geländeverhältnissen, existierender Bebauung, Sicherheitsaspekten oder eines ansonsten nicht erforderlichen Aufzugs möglich ist.⁵⁰ Ab welchem Punkt ein Mehraufwand unverhältnismäßig ist, wird hier jedoch nicht näher definiert.

⁴⁵ vgl. § 2 Absatz 9. MBO

⁴⁶ vgl. § 3 Absatz 1. MBO

⁴⁷ vgl. § 14. MBO

⁴⁸ vgl. § 50 Absatz 2 MBO

⁴⁹ vgl. § 50 Absatz 3 BO Bln

⁵⁰ vgl. § 50 Absatz 3. MBO

Zudem wird auf besondere Anforderungen und Erleichterungen für Sonderbauten unter anderem im Hinblick auf die barrierefreie Nutzbarkeit verwiesen: Die Gestattung von Erleichterungen ist aufgrund besonderer Art oder Nutzung des Gebäudes möglich.⁵¹

Die besonderen Anforderungen an Fluchtwege im Allgemeinen und bezüglich der Barrierefreiheit für den Sonderbau der Versammlungsstätte finden sich im Folgenden.

2.3.2 Musterversammlungsstättenverordnung

Während die MBO allgemeine Anforderungen an Gebäude stellt, konkretisiert die MVStättVO besondere Anforderungen für Veranstaltungsstätten. Folgend werden relevante Regelungen bezüglich der Fluchtwege und ihrer Dimensionierung als auch Regeln zur barrierefreien Gestaltung dieser aufgeführt. Flucht- und Rettungswege müssen den baurechtlichen Anforderungen entsprechen.⁵²

Die Führung der Rettungswege wird in § 6 geregelt: Alle Flucht- und Rettungswege müssen zu öffentlichen Flächen ins Freie führen und alle Teile, d. h. Gänge, Ausgänge, Flure und Treppen, freigehalten werden. Jedes Geschoss muss mindestens zwei unabhängige Fluchtwege aufweisen, bei mehr als 800 Besucherplätzen dürfen die zugehörigen Fluchtwege nur diesen zugeordnet sein. Das Vorhandensein zweier entgegengesetzter Ausgänge mit Fluchtwegen möglichst gleicher Breite bei Räumen mit über 100 Personen bzw. 100 m² Fläche ist verpflichtend. Im Brandfall begehbar Balkone, Dachterrassen und Außentreppen dürfen als Fluchtweg genutzt werden. Ebenso Foyers und Hallen, solange ein zweiter davon nicht abhängiger Fluchtweg existiert. Die Kennzeichnung aller Notausgänge und Fluchtwege ist Pflicht.⁵³

Bezüglich der Bemessung der Rettungswege darf die Entfernung eines jeden Besucherplatzes, jeder Stelle eines Flures oder Foyers bis zum nächsten Ausgang ins Freie nicht mehr als 30 Meter betragen: Die zulässige Entfernung erhöht sich in 5-m-Schritten bis zu einer maximalen Entfernung von 60 Metern pro 2,5 m Deckenhöhe (ab 5-m-Höhe) und die Breite aller Teile eines Fluchtwegs muss mindestens 1,2 Meter pro 200 Personen betragen.⁵⁴

Treppen dürfen eine Breite von 2,4 Meter nicht überschreiten und müssen beidseitig feste Handgriffe und geschlossene Stufen aufweisen; Wendeltreppen sind nicht

⁵¹ vgl. § 51. MBO

⁵² vgl. DGUV Information 215-310 „Sicherheit bei Veranstaltungen und Produktionen“. 2016, S. 26

⁵³ vgl. § 6. MVStättVO

⁵⁴ vgl. § 7. MVStättVO

erlaubt.⁵⁵ Die Öffnung von Türen muss leicht, in Fluchtrichtung und voller Breite möglich sein; Schiebetüren und Drehtüren sind nicht erlaubt.⁵⁶

Bei einer Anzahl von 5000 Besucherplätzen in Reihenbestuhlung sind ein Prozent bzw. mindestens zwei der Plätze für Rollstuhlfahrer einzuplanen und entsprechend zu markieren, bei mehr Besuchern sinkt der Anteil auf 0,5 Prozent.⁵⁷ Zudem ist eine von 12 Toiletten barrierefrei zu gestalten.⁵⁸ Die Anzahl an barrierefreien Kfz-Stellplätzen muss mindestens der Hälfte der barrierefreien Sitzplätze entsprechen⁵⁹ (siehe § 10).

2.3.3 DIN 18040-1

Bauordnung und Versammlungsstättenverordnung definieren grundsätzliche Anforderungen zur barrierefreien Gestaltung, liefern jedoch wenige konkrete Angaben. Aus diesem Grund ergänzt die DIN 18040-1 darüber hinaus mit spezifischen Richtwerten: Der erste Teil der DIN-Norm beschäftigt sich mit den Planungsgrundlagen des barrierefreien Bauens öffentlicher Gebäude. Das Ziel der Norm ist die barrierefreie Gestaltung baulicher Anlagen.⁶⁰ Hierfür werden die technischen Voraussetzungen geliefert. Die Norm beinhaltet einerseits Angaben und Bemessungen zur barrierefreien Infrastruktur: Dazu zählen Flure, Verkehrs- und Bewegungsflächen, Türen, Bodenbeläge, Aufzugsanlagen, Treppen, Fahrtreppen, Rampen und Rollstuhlabstellplätze.⁶¹ Aufgrund des Umfangs der technischen Spezifizierungen werden nachfolgend nur die für die Evakuierungssimulationen relevanten Regelungen explizit aufgeführt und konzentrieren sich dadurch auf die Dimensionierung von Fluchtwegen für motorisch eingeschränkte Menschen.

Konkret ist der Mehrbedarf an Bewegungsflächen angegeben: Flächen sind auf den größtmöglichen Platzbedarf, d. h. den von Rollstuhlfahrern und Menschen mit Gehhilfen, auszulegen. Folgende Abb. 1 stellt den Platzbedarf eines Rollstuhlfahrers graphisch dar. Bei gradliniger Fortbewegung „[a]usreichend groß ist eine Fläche von:

- 120 cm, wenn eine Richtungsänderung und Begegnung mit anderen Personen nicht zu erwarten ist, z. B. für Flur- und Rampenabschnitte;
- 90 cm Breite und geringer Länge, z. B. für Türöffnungen [...] und Durchgänge⁶².

⁵⁵ vgl. § 8. MVStättVO

⁵⁶ vgl. § 9. MVStättVO

⁵⁷ vgl. § 10 Absatz 7. MVStättVO

⁵⁸ vgl. § 12 Absatz 2. MVStättVO

⁵⁹ vgl. § 13. MVStättVO

⁶⁰ vgl. DIN 18040:2012-10

⁶¹ vgl. DIN 18040:2012-10

⁶² DIN 18040:2012-10

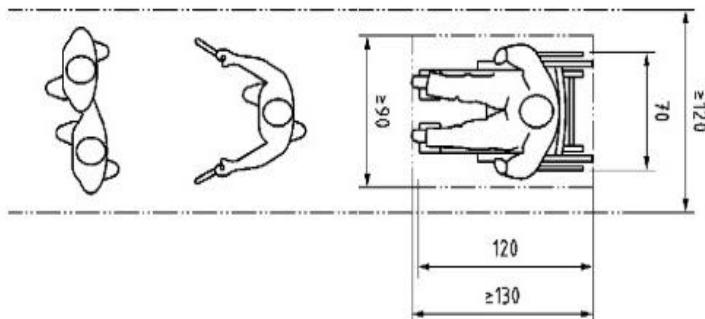


Abb. 1: Platzbedarf und Bewegungsfläche eines Rollstuhlfahrers (in cm) ⁶³

Zusätzlich müssen entsprechende Flächen stufen- und schwellenlos und ohne Treppen gestaltet werden und Flure bei Breite von 1,2 m ohne Richtungsänderung nach maximal 6 Metern Länge eine Möglichkeit zum Wenden bieten.⁶⁴

Weitere in der Norm enthaltene Anforderungen sind beispielsweise der Einbau leicht nutzbarer Türen, limitierte Neigungen von Rampen und geeignete, rutschhemmende Beschaffenheit von Bodenbelägen sowie Maße für Standflächen in Reihenbestuhlung⁶⁵ – diese Faktoren sind allerdings keine Bestandteile der hier durchgeführten Evakuierungssimulation und werden deswegen nicht erläutert. Neben den technischen Vorgaben zur Infrastruktur finden sich organisatorische Vorgaben zur Alarmierung und Evakuierung. Diese sind Teil des nächsten Kapitels.

2.4 Anforderungen und Maßnahmen einer barrierefreien Entfluchtung

Das Kapitel soll einen Überblick über die Anforderungen motorisch behinderter Personen bei der Entfluchtung aus Versammlungsstätten liefern und zudem bauliche und organisatorische Maßnahmen aufzeigen, um diesen im Sinne einer gleichberechtigten Teilhabe zu entsprechen. Die Prinzipien der Selbst- und Fremdrettung werden in diesem Zusammenhang erläutert.

Barrieren, welche einer reibungslosen Entfluchtung von Menschen im Gefahrenfall entgegenstehen, sollten im Sinne der Barrierefreiheit beseitigt werden. Diese können jedoch vielfältig sein und zum Beispiel entstehen durch fehlende Möglichkeiten zur Alarmierung von Personen oder Alarmierung nur einzelner Personengruppen, mangelnde Orientierung und bauliche Barrieren auf Fluchtwegen sind ebenso Hindernisse.⁶⁶ Während Barrieren einen Einfluss auf alle flüchtenden Personen haben können und unter Umständen eine Verzögerung des gesamten Fluchtablaufs mit sich bringen, stellen

⁶³ Quelle: DIN 18040:2012-10

⁶⁴ vgl. DIN 18040:2012-10

⁶⁵ vgl. DIN 18040:2012-10

⁶⁶ vgl. Boenke et al.: Organisatorische und bauliche Maßnahmen. 2011, S. 124

bauliche Barrieren für Menschen mit motorischer Behinderung teils unüberwindbare Hindernisse dar. Durch die Beachtung der Anforderungen von Rollstuhlnutzern mit erhöhtem Platzbedarf und geringer Mobilität werden Anforderungen anderer motorisch behinderter und gehender Menschen bei der Entfluchtung größtenteils abgedeckt.⁶⁷

Grundsätzliche Anforderungen von Menschen mit Behinderung bezüglich der Evakuierung stimmen mit denen von Menschen ohne Behinderung überein: Diese sind „kurze Fluchtwege, schnelles Eintreffen von Rettungskräften, geeignete Branddetektionssysteme und zuverlässige Informationen im Störfall“⁶⁸. Zusätzliche Anforderungen bezüglich der Fluchtweg- und Informationsgestaltung ergeben sich abhängig von Ortskenntnis und Kenntnis der Rettungsmöglichkeiten, Notfallübungen, Gruppenzugehörigkeit sowie Begleitpersonen und Hilfsmitteln (z. B. Rollatoren).⁶⁹

Das Behindertengleichstellungsgesetz definiert Barrierefreiheit als Zugänglichkeit ohne Fremdhilfe (siehe Kapitel 2.2). Dementsprechend ist im Sinne einer gleichberechtigten Teilhabe auch die Selbstrettung im Gefahrenfall allen Menschen gleichermaßen zu ermöglichen. Während die aktuelle Fassung der DIN 18040 die Fremdrettung „nicht zur Eigenrettung fähiger Personen“⁷⁰ empfiehlt, erweitert ein Normentwurf der DIN 18040 aus dem Jahr 2023, welcher 2024 veröffentlicht werden soll, die Anforderungen: So sollen Menschen mit Behinderung bei der Evakuierung so weit berücksichtigt werden, dass eine Selbstrettung auch bei verminderter Selbstrettungsfähigkeit ermöglicht und eine Fremdrettung nur im Ausnahmefall nötig wird.⁷¹

Die Entfluchtung von Menschen mit Mobilitätseinschränkung ist vor allem von ihren Fähigkeiten und dem Gebäude abhängig: Zur Gewährleistung der Selbstrettung sind bauliche Maßnahmen besonders für Menschen mit motorischen Behinderungen von großer Bedeutung.⁷² Die Gestaltung von Sonderbauten mit baulichen Fluchtwegen muss deswegen entsprechend vorgenommen werden: Jede Person sollte sich im Notfall selbst in einen sicheren Bereich retten können.⁷³ Grundvoraussetzung für die Selbstrettung ohne fremde Hilfe ist die Nutzbarkeit des ersten Fluchtwegs durch dessen barrierefreie Gestaltung. Bestenfalls ist auch der zweite Rettungsweg barrierefrei nutzbar.⁷⁴

⁶⁷ vgl. Boenke et al.: Organisatorische und bauliche Maßnahmen. 2011, S. 48

⁶⁸ Boenke et al.: Organisatorische und bauliche Maßnahmen. 2011, S. 47

⁶⁹ vgl. Boenke et al.: Organisatorische und bauliche Maßnahmen. 2011, S. 47

⁷⁰ DIN 18040:2012-10

⁷¹ vgl. Kraft: DIN 18040 Teil 1: Öffentliche Gebäude, 2023 (13.07.2023)

⁷² vgl. Simon et al.: Eingeschränkte Selbstrettungsfähigkeit. 2017, S. 153 f.

⁷³ vgl. Famers und Messerer: Ein Grundsatzpapier der Fachkommission Bauaufsicht. 2008, S. 3

⁷⁴ vgl. Boenke et al.: Organisatorische und bauliche Maßnahmen. 2011, S. 39

Das Einhalten der technischen Anforderungen der DIN 18040 gewährleistet in der Regel die Barrierefreiheit des Fluchtwegs.⁷⁵ Ohne die Einhaltung dieser Grundvoraussetzung ist eine Entfluchtung nur mit Fremdhilfe möglich.⁷⁶ Dies ist auch der Fall, wenn bei einer Entfluchtung notwendige Aufzüge im Brandfall nicht verwendet werden dürfen.⁷⁷

Eine Maßnahme, die Selbstrettung zu ermöglichen, sind Evakuierungsaufzüge, welche im Brandfall verwendet werden dürfen.⁷⁸ Diese befinden sich mit eigener Sicherheitsstromversorgung in notwendigen Treppenräumen oder separaten Räumen und sind mit der Brandmeldeanlage verbunden sowie gesondert zu beschildern.⁷⁹ Die Unterteilung eines Gebäudes in verschiedene Rettungsabschnitte mit unabhängigen Treppenräumen und Aufzügen kann ebenfalls die Nutzbarkeit erhalten und die Selbstrettung von motorisch behinderten Menschen ermöglichen.⁸⁰

Neben baulichen Maßnahmen leisten organisatorische einen Beitrag zur sicheren Evakuierung.⁸¹ Ist die Eigenrettung aufgrund von Treppen und der Abwesenheit von Evakuierungsaufzügen nicht möglich, ist die barrierefreie Möglichkeit zur Anforderung von Unterstützung zur Fremdrettung erforderlich.⁸² Möglich ist die Einrichtung sicherer Wartebereiche zum Zwischenaufenthalt⁸³ mit ausreichender Brand- und Rauchabschirmung, eindeutiger Beschilderung und Bereitstellung von Notrufeinrichtungen: Während die horizontale Bewegung zu sicheren Bereichen selbstständig geschieht, übernehmen Feuerwehr oder Evakuierungshelfer von dort die vertikale Evakuierung als Fremdrettung.⁸⁴ Eine weitere Möglichkeit zur Fremdrettung bei geringer Anzahl an auf Rettung angewiesener Personen ist die Verwendung von Evakuierungsstühlen: In Verbindung mit geschultem Personal, können motorisch behinderte Menschen vertikal auf Treppen entfluchtet werden.⁸⁵ Zusätzlich sind Wegeleitsysteme nach dem Zwei-Sinne-Prinzip hilfreich, durch das Ansprechen von zwei Sinnen kann die Orientierung optimiert werden.⁸⁶

Ziel ist es insgesamt, Menschen mit Behinderung zu ermöglichen, sich selbst zu retten oder möglichst schnell fremde Hilfe anzufordern.⁸⁷

⁷⁵ vgl. Boenke et al.: Organisatorische und bauliche Maßnahmen. 2011, S. 51

⁷⁶ vgl. Boenke et al.: Organisatorische und bauliche Maßnahmen. 2011, S. 39

⁷⁷ vgl. Baunetz: Baulicher Brandschutz und Barrierefreiheit, s.a. (13.07.2023)

⁷⁸ vgl. VDI 4062:2016-04

⁷⁹ vgl. VDI 6017:2015-08

⁸⁰ vgl. Steinhofer: Barrierefreier Brandschutz – Evakuierungskonzepte für alle, 2019 (13.07.2023)

⁸¹ vgl. Simon et al.: Eingeschränkte Selbstrettungsfähigkeit. 2017, S. 153

⁸² vgl. Boenke et al.: Organisatorische und bauliche Maßnahmen. 2011, S. 40

⁸³ vgl. DIN 18040:2012-10

⁸⁴ vgl. Steinhofer: Barrierefreier Brandschutz – Evakuierungskonzepte für alle, 2019 (13.07.2023)

⁸⁵ vgl. Gebürtig: Die Belange des Paragraphen 50 der Musterbauordnung. 2014, S. 33

⁸⁶ vgl. Steinhofer: Barrierefreier Brandschutz – Evakuierungskonzepte für alle, 2019 (13.07.2023)

⁸⁷ vgl. Boenke et al.: Organisatorische und bauliche Maßnahmen. 2011, S. 38

3. Grundlagen der Evakuierungsberechnung

Nachdem die Grundlagen der Entfluchtung aus Versammlungsstätten aus organisatorischer und gesetzlicher Sicht im Hinblick auf die Barrierefreiheit dargestellt wurden, definiert und erläutert dieses Kapitel die Grundlagen zur quantitativen Berechnung von Entfluchtungen. Hierfür sollen vorab Verpflichtung und Notwendigkeit der Evakuierungsberechnung erörtert und anschließend drei grundlegende Regelwerke zur Orientierung vorgestellt werden. Anschließend folgt ein Überblick über alle Inhalte des Kapitels.

Das Ziel der Berechnung ist die „Sicherstellung der Flucht und Rettung von Personen“⁸⁸ im Räumungsfall. Unterschiedliche Verfahren dienen durch Prüfung, ob getroffene Maßnahme, vorgesehene Fluchtwege sowie sichere Bereiche ausreichend sind, der Erstellung von Entfluchtungsnachweisen.⁸⁹

Die einfachste Methode stellt dabei das deskriptive Verfahren dar: Die Beschreibung der Einhaltung von Vorgaben der jeweiligen Landesbauordnung, Versammlungsstättenverordnung und Normen bezüglich zulässiger Fluchtwegbreite, -länge und -beschaffenheit, notwendiger Ausgänge und Personenkapazität (siehe 2.3) soll die Erfüllung der Anforderungen an Barrierefreiheit und Sicherstellung der Flucht aller Beteiligten belegen – ein Nachweis von Evakuierungs- und Staudauer ist dabei nicht möglich.⁹⁰ Die Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen in deskriptiver Form bietet eine grundlegende Orientierung zur Sicherstellung einer erfolgreichen Räumung, es sollte jedoch beispielsweise durch Ermittlung der Räumungszeiten auch die zeitliche und räumliche Dynamik betrachtet werden.⁹¹

Trotz verpflichtender Erstellung eines Räumungskonzepts (siehe Kapitel 2.1) ist weder innerhalb der MBO noch in der MVStättVO eine Pflicht zur zusätzlichen Berechnung oder Simulation einer möglichen Räumung zur Prüfung der getroffenen Sicherheitsmaßnahmen gegeben. Lediglich im Einzelfall nach Aufforderung durch die Genehmigungsbehörde ist dieser Nachweis vorzulegen.⁹² Dies kann zum Beispiel der Fall sein, wenn bei besonderer Nutzung von Sonderbauten Erleichterungen nach § 51 MBO (siehe 2.3.1) in Form von Abweichungen von geforderten Bemessungen gestattet werden sollen: Die DIN SPEC 91284 empfiehlt hier zum Nachweis die Verwendung von Entfluchtungsanalysen, ebenso für Orte mit einem hohen Personenaufkommen.⁹³ So empfehlen

⁸⁸ Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 14

⁸⁹ vgl. DEB: Richtlinie über die Sicherheit bei Veranstaltungen. 2021, S. 14

⁹⁰ vgl. Göbell und Kallinowsky: Barrierefreier Brandschutz. 2016, S. 196

⁹¹ vgl. Kneidl und Simon: Crowd Simulation als Planungswerkzeug für Veranstaltungen. 2021, S. 558

⁹² vgl. DEB: Richtlinie über die Sicherheit bei Veranstaltungen. 2021, S. 14

⁹³ vgl. DIN SPEC 91284:2012-04

sich vor allem für Sonderbauten Räumungsberechnungen als Teil eines Brandschutzkonzeptes.⁹⁴ Konkrete Anforderungen liegen hierfür jedoch nicht vor.⁹⁵

Zusätzlich steigt die „Notwendigkeit eines rechnerischen Nachweises [...] mit steigender Anzahl behinderter oder in der Mobilität eingeschränkter Nutzer [...]“⁹⁶. Durch den grundlegenden Anspruch auf Selbstrettung einer jeden Person können sich je nach Szenario deutlich abweichende Zeiten ergeben: Sobald grundsätzliche Zweifel aufgrund kritischer Verhältnisse wie der Anzahl oder Mobilität von Personen oder der Geometrie des Gebäudes existieren, ist prinzipiell eine Prüfung der Entfluchtung in Form von Evakuierungsberechnungen erforderlich.⁹⁷

Zur Standardisierung von Evakuierungsanalysen dienen hauptsächlich drei Regelwerke: Der Leitfaden für Ingenieurmethoden des Brandschutzes der vfdb liefert hauptsächlich brandschutztechnische Informationen, konzentriert sich jedoch in einem Kapitel auf rechnerische Nachweisverfahren zur Personenstromanalyse. Die Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen standardisiert den Einsatz computergestützter Nachweise der Evakuierung und definiert Kriterien für Szenarien und Eingabeparameter sowie Auswertung, Beurteilung und Dokumentation der Ergebnisse. Sie dient als Handreichung zur Erstellung von Räumungssimulationen. Die DIN-Norm 18009-2 thematisiert Räumungssimulation und Personensicherheit: Sie liefert allgemein anerkannte Regeln der Technik bezüglich der Berechnung von Räumungen für Gebäude zum Nachweis der Personensicherheit.

Innerhalb dieses Kapitels werden zunächst die Grundbegriffe der Evakuierungsberechnung und die bei Entfluchtungen kritischen Faktoren der Dauer und Stauungen erläutert sowie Richtwerte für diese genannt. Im Folgenden werden unterschiedliche Personenstrommodelle zur Berechnung dieser Faktoren vorgestellt. Zum Verständnis der zugrunde liegenden Bewegungen von Personen wird im Anschluss das menschliche Verhalten bei der Entfluchtung dargestellt.

3.1 Entfluchtungsdauer

Zur Berechnung und damit Bewertung der Räumung großer Gebäude mit vielen Personen dienen vor allem die Faktoren der Räumungszeit sowie die Analyse von Stauungen.⁹⁸ Die Räumungszeit ist das quantitative Beurteilungskriterium der Entfluchtung.⁹⁹

⁹⁴ vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 4

⁹⁵ vgl. VDI 4062:2016-04

⁹⁶ vgl. Göbell und Kallinowsky: Barrierefreier Brandschutz. 2016, S. 197 f.

⁹⁷ vgl. Göbell und Kallinowsky: Barrierefreier Brandschutz. 2016, S. 183

⁹⁸ vgl. Famers und Messerer: Ein Grundsatzpapier der Fachkommission Bauaufsicht. 2008, S. 4

⁹⁹ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 351

Sie wird innerhalb der RiMEA als Räumungszeit $t_{\text{Räumung}}$ und im vfdb-Leitfaden als erforderliche Räumungszeit $t_{\text{erforderlich}}$ bezeichnet. Die Begriffe folgen der gleichen Definition: Die Räumungszeit, das heißt die benötigte Dauer zur Entfluchtung, ist die Zeit innerhalb derer sich alle Personen selbstständig, ohne fremde Hilfe in einen sicheren Bereich begaben (können).¹⁰⁰ Grundsatz des Brandschutzes ist, dass die erforderliche Räumungszeit für jeden Gebäudebereich kleiner ist als die verfügbare Zeit, innerhalb derer keine Lebensbedrohung durch Rauch und Feuer besteht ($t_{\text{erforderlich}} < t_{\text{verfügbar}}$).¹⁰¹ Bezuglich der Räumung von Veranstaltungen entspricht dies einer Ermöglichung der Selbstrettung vor Eintreten kritischer bzw. die Personensicherheit gefährdender Zustände durch den Räumungsgrund, auch vor dem Eintreffen von Rettungskräften.

Die Gesamträumungsdauer setzt sich aus verschiedenen Einzeldauern zusammen, die sich bei der Entfluchtung von Personen summieren¹⁰², wie Abb. 2 graphisch darstellt.

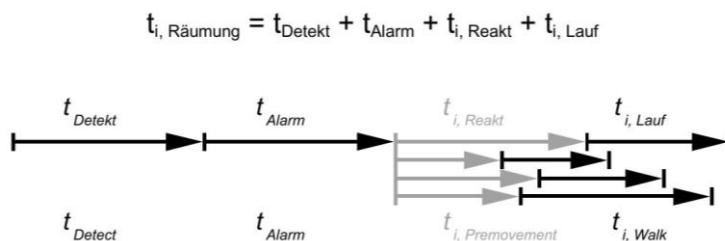


Abb. 2: Zeitkomponenten der individuellen Räumungszeit ¹⁰³

Die individuelle Räumungszeit $t_{i, \text{Räumung}}$ ist die Summe aus allgemeiner Detektions- und Alarmierungszeit und individueller Reaktions- und Laufzeit. Allgemein bedeutet in diesem Fall, dass die Zeit der Detektion und Alarmierung für alle Personen gleich ist, während Reaktions- und Laufzeiten dies nicht sind. Die Detektionszeit t_{Detekt} umfasst die Zeit von Entstehung bis Entdeckung des Räumungsgrundes (zum Beispiel dem Brand), darauf folgt die Alarmierungszeit t_{Alarm} , also die Zeit bis zur Auslösung eines Alarms, z. B. in Form einer Durchsage oder Sirene.¹⁰⁴ Die Reaktionszeit $t_{i, \text{Reakt}}$ ist individuell von der Person abhängig und beschreibt die Schnelligkeit des Reagierens auf das Signal durch Beginnen der eigenen Fluchtbewegung.¹⁰⁵ Die Zeit wird durch das Wahrnehmen des Alarms, dessen Interpretation und Handlungen wie die Orientierung und das Suchen und Warnen von Personen beeinflusst: Einflussfaktoren sind hier die Aufnahmefähigkeit und Ortskenntnis, die Gebäudekomplexität sowie die Qualität des Alarmierungssystems

¹⁰⁰ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 333

¹⁰¹ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 333

¹⁰² vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 334

¹⁰³ Quelle: RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 7

¹⁰⁴ vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 7

¹⁰⁵ vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 7

und gegebenenfalls des Brandschutzmanagements.¹⁰⁶ Die abschließende Laufzeit $t_{i, \text{Lauf}}$ ist ebenfalls individuell und umfasst die gesamte Zeit nach der Reaktion bis zum Erreichen des sicheren Bereichs.¹⁰⁷ Die Einflüsse durch Engstellen, Personendichte und individuelles Verhalten finden sich in Kapitel 3.2.3 sowie 3.4. Die Gesamträumungszeit $t_{\text{Räumung}}$ ist das Maximum aller individuellen Räumungszeiten, das bedeutet, sie entspricht dem Zeitpunkt, zu dem die letzte Person im sicheren Bereich angekommen ist und somit ihre Entfluchtung abgeschlossen hat.¹⁰⁸

Während Detektions- und Alarmierungszeit durch die Entfluchtung von Menschen mit Behinderung nicht beeinflusst werden, sind individuell abhängige Reaktions- und Laufzeiten durch eine eingeschränkte Mobilität ggf. beeinflusst. Bei der Räumung heterogener Gruppen ist der Einfluss dieser individuellen Faktoren auf die Gesamträumungszeit als Maximum aller individuellen Räumungszeiten zu beachten und einzubeziehen.

Während im Brandschutz die berechenbare Ausbreitung von Feuer und Rauch als wesentliches zeitliches Kriterium zur Kalkulation der verfügbaren Zeit dient und die erforderliche Räumungszeit begrenzt, existieren im Bereich der Veranstaltungsplanung allgemein weniger explizite Richtwerte für die zulässige Räumungszeit bei anderen auslösenden Gründen. Weder MBO noch MVStättVO liefern hier konkrete Werte. Bauordnungsrechtlich wird dem Kriterium der Räumungsdauer nur durch die Dimensionierung und Anordnung von Fluchtwegen und Ausgängen entsprochen¹⁰⁹ (siehe 2.3). Auch in der RiMEA existieren keine generellen Vorgaben für Räumungszeiten. Sie nennt lediglich aus einem früheren Kommentar der MVStättVO stammende Richtwerte für Tribünen, basierend auf reinen Flusszeiten ohne Stauungen.¹¹⁰ Die Richtlinie über die Sicherheit bei Veranstaltungen nennt eine komplette Räumung bei mehr als 5.000 Besuchern innerhalb von 15 Minuten im Freien und 6 Minuten in Gebäuden als anzustreben.¹¹¹ Prinzipiell sollte die zulässige verfügbare Räumungsdauer mit den Genehmigungsbehörden abgesprochen und die berechnete erforderliche Räumungszeit geringer sein: Entfluchtungszeiten ähnlicher regelkonformer Szenarien können hier Anhaltspunkt sein.¹¹²

¹⁰⁶ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 334

¹⁰⁷ vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 7

¹⁰⁸ vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 7

¹⁰⁹ vgl. Famers und Messerer: Ein Grundsatzpapier der Fachkommission Bauaufsicht. 2008, S. 4

¹¹⁰ vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 30

¹¹¹ vgl. DEB: Richtlinie über die Sicherheit bei Veranstaltungen. 2021, S. 14

¹¹² vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 13

3.2 Entfluchtungsablauf

Zusätzlich zum im vorherigen Kapitel erläuterten quantitativen Kriterium der Entfluchtung, der Räumungsdauer, ist der zeitliche Entfluchtungsablauf das qualitative Kriterium der Räumung: Die Bewertung der Grundgrößen der Personenbewegung im Hinblick auf Stauungen dient der Reduzierung der Gefährdung von Personen.¹¹³ Innerhalb dieses Kapitels werden zuerst die Größen der Personengeschwindigkeit, Personendichte und des Personenflusses mit zugehörigen Formeln zur Berechnung definiert und anschließend ihr Zusammenhang in Form von Fundamentaldiagrammen dargestellt. Abschließend wird die Staubbildung definiert und es werden Kriterien zur Identifikation und Beurteilung genannt.

3.2.1 Grundgrößen

Die **Geschwindigkeit v** ist der zurückgelegte Weg s pro Zeiteinheit t, die Angabe erfolgt in Metern pro Sekunde.¹¹⁴

$$v = \frac{s}{t} \left[\frac{m}{s} \right]$$

Die freie Gehgeschwindigkeit von Personen ist abhängig von individuellen Faktoren wie Alter, Mobilität und Geschlecht. Bezüglich der Geschwindigkeit in der Ebene empfiehlt die RiMEA die Verwendung von Werten basierend auf Weidmann: Demnach ist sie maximal im Alter von 21 Jahren sowie abnehmend mit steigendem Alter und aufgrund dessen mit 80 Jahren nur noch etwa halb so hoch (siehe Abb. 3).¹¹⁵ Die Geschwindigkeit von Personen mit beeinträchtigter Mobilität liegt laut RiMEA zwischen 0,46 m/s und 0,76 m/s und der Unterschied zwischen den Geschlechtern beträgt durchschnittlich 10,9 Prozent, sodass sich Frauen im Mittel mit 1,27 m/s und Männer mit 1,41 m/s bewegen.¹¹⁶

¹¹³ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 351

¹¹⁴ vgl. Ziemer: Mikroskopische Fundamentaldiagramme der Fußgängerodynamik. 2020, S. 8

¹¹⁵ vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 9

¹¹⁶ vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 9

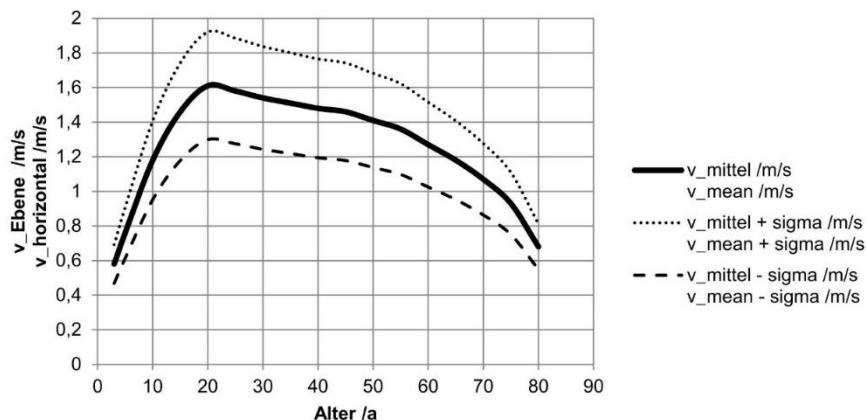


Abb. 3: Gehgeschwindigkeit in der Ebene, abhängig vom Alter¹¹⁷

Die freie Gehgeschwindigkeit kann während der Fortbewegung durch Engstellen und sich dadurch ergebende höhere Personendichten reduziert werden (siehe 3.2.3).

Die **Personendichte p** ergibt sich aus der Anzahl der Personen N pro Fläche A:¹¹⁸

$$p = \frac{N}{A} \left[\frac{P}{m^2} \right]$$

Der durchschnittliche Platzbedarf eines stehenden Menschen von $0,15 \text{ m}^2$ gibt somit das Maximum der Personendichte vor¹¹⁹: Bei dichtem Gedränge ist diese auf eine maximale Dichte von 6,6 Personen pro Quadratmeter limitiert. Zu einem kompletten Stillstand der Bewegung kommt es bereits ab einer Dichte von 5,4 Personen/ m^2 .¹²⁰ Durch den erhöhten Platzbedarf einzelner Personen in heterogenen Gruppen – aufgrund diverser Gründe wie Rollstühle, andere Mobilitätshilfen, Übergewicht etc. – ergibt sich eine abweichende (geringere) Maximaldichte.

Die anfängliche Personenzahl innerhalb eines Gebäudes und die daraus berechenbare Personendichte sind abhängig vom Grundriss und der Nutzung des Raums.¹²¹ Ist die Anzahl bzw. Initialverteilung der Personen nicht bekannt, bieten sowohl RiMEA als auch vfdb-Leitfaden Richtwerte zur Initialdichte für verschiedene Gebäudearten. Auch diese können durch einen erhöhten Platzbedarf einzelner Personen abweichen.

Der **Personenfluss J** beschreibt die Anzahl der Personen N pro Zeiteinheit t, welche eine festgelegte Messlinie überqueren.¹²² Der **spezifische Fluss Js** bezieht sich auf eine

¹¹⁷ Quelle: RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 10

¹¹⁸ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 354

¹¹⁹ vgl. Weidmann: Transporttechnik der Fußgänger. 1993, S. 16

¹²⁰ vgl. Weidmann: Transporttechnik der Fußgänger. 1993, S. 59

¹²¹ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 353

¹²² vgl. Ziemer: Mikroskopische Fundamentaldiagramme der Fußgängerdynamik. 2020, S. 8

Einheitsbreite von einem Meter, mithilfe des Werts lässt sich der Personenfluss innerhalb verschieden breiter Wegabschnitte vergleichbar machen:¹²³

$$J = \frac{N}{t} \left[\frac{1}{s} \right] \quad J_s = \frac{J}{b} \left[\frac{1}{m \cdot s} \right]$$

Die in dieser Arbeit verwendeten Methoden zur Messung der Grundgrößen werden innerhalb der Methodik erläutert.

3.2.2 Fundamentaldiagramm

Fundamentaldiagramme stellen den empirisch ermittelten Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit der Personen bzw. dem Personenfluss und der Personendichte dar. Aus verschiedenen experimentellen Untersuchungen und der Analyse von Räumungen wurden unterschiedliche Ergebnisse der Abhängigkeit beider Grundgrößen von der Personendichte gewonnen¹²⁴, es existieren somit verschiedene Fundamentaldiagramme. Aus diesem Grund unterscheidet sich der Verlauf teils deutlich (siehe Abb. 4).

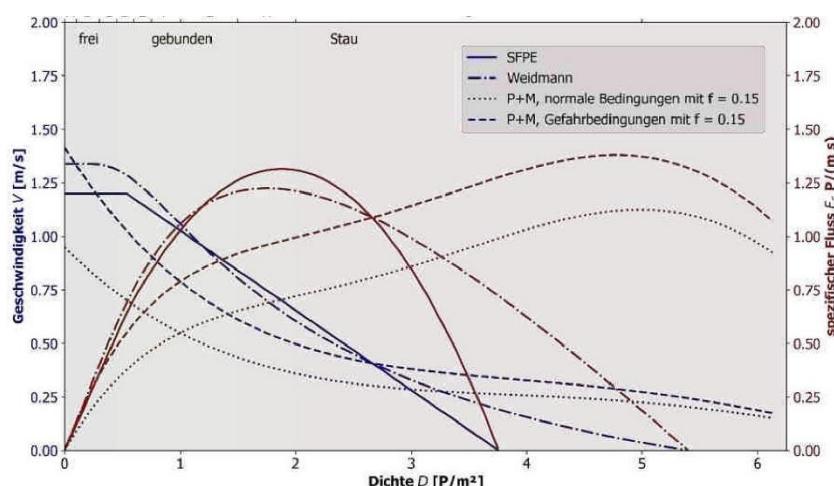


Abb. 4: Verschiedene Fundamentaldiagramme für ebene Wegabschnitte¹²⁵

Nach klassischem Verständnis für homogene Populationen haben die Diagramme gemein, dass die Bewegungsgeschwindigkeit der Personen bei geringer Dichte am höchsten ist und mit steigender Dichte abnimmt. Der Personenfluss steigt währenddessen bis zu einem jeweiligen Maximalwert und nimmt ab einer bestimmten Personendichte (je nach Fundamentaldiagramm verschieden) wieder ab. Bei zu hohen Dichten kommen Bewegung und Personenfluss zum Stillstand. Das Maximum eines Fundamentaldiagramms zeigt also, bei welcher Dichte der Personenfluss optimal ist, d. h. die Bewegung

¹²³ vgl. Schadschneider et al.: Evacuation Dynamics. 2009, S. 7

¹²⁴ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 342 f.

¹²⁵ Quelle: Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 343

der Personenströme am effektivsten, und welche Dichten als kritisch zu betrachten sind. Der unterschiedliche Verlauf verschiedener Fundamentaldiagramme ergibt sich aus Abweichungen bei der experimentellen Erforschung dieser: Unterschiedlich ausgeprägte Populationen in verschiedenen Versuchssituationen und die Anwendung verschiedener Messverfahren bei Übungen oder unter Laborbedingungen führen zu Abweichungen zwischen den Ergebnissen.¹²⁶

Laut Geoerg et al. stammen die Erkenntnisse zahlreicher Fundamentaldiagramme und damit das empirische Verhältnis von Geschwindigkeit, Personenfluss und Dichte aus Laborexperimenten mit homogenen Versuchsgruppen ohne Menschen mit Behinderungen. Zur Frage der Übertragbarkeit des Verhältnisses auf die Bewegung heterogener Gruppen zeigen sich in diesbezüglichen Untersuchungen Abweichungen. Fluss und Geschwindigkeit sind demnach nicht allein von der Dichte abhängig. Geringe Dichten führen nicht automatisch zu einer hohen Geschwindigkeit oder einem freien Fluss. Die fundamentale Geschwindigkeits-/Fluss-Dichte-Abhängigkeit kann also nicht zwangsläufig auf Situationen heterogener Gruppen übertragen werden.¹²⁷

Während die Abhängigkeit der Größen bei Handrechenverfahren vorgegeben wird und die Grundlage der Berechnung ist, ist das Fundamentaldiagramm bei Simulationen eine Möglichkeit zur Darstellung der Simulationsergebnisse abhängig von ausgewählten Eingabeparametern.¹²⁸ Der Zusammenhang innerhalb von Fundamentaldiagrammen als Ergebnis individueller simulierter Bewegungen von Personen kann zur Kalibrierung von Eingabeparametern und Validierung der Ergebnisse verwendet werden.¹²⁹

3.2.3 Stau

Zur Beurteilung des Entfluchtungsablaufs ist es notwendig, den Begriff Stau zu definieren sowie Kriterien zu dessen Identifikation und Bewertung zu benennen. Generell wirkt sich die Bildung von Staus nicht prinzipiell auf die Personensicherheit aus: Je nach Ausmaß und abhängig von der Geometrie, der Anzahl der Personen und der Reaktion dieser sind Stauungen nicht vermeidbar und akzeptabel.¹³⁰ In unübersichtlichen Bereichen sollten sie jedoch aufgrund der erhöhten Gefahr der Entstehung eines Staudrucks durch

¹²⁶ vgl. Kneidl et al.: Nachweisverfahren zur Personensicherheit bei Räumungen. 2019, S. 42 f.

¹²⁷ vgl. Geoerg et al.: The Influence of Wheelchair Users. 2019, S. 1

¹²⁸ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 345

¹²⁹ vgl. Klüpfel und Meyer-König: Modelle für die Berechnung von Personenströmen. 2005, S. 10

¹³⁰ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 351

nachrückende Personen vermieden werden.¹³¹ Zur Abschätzung des durch Stauungen entstehenden Risikos sollten mögliche Staus zuvor analysiert und beurteilt werden.¹³²

Die Identifikation eines Staus lässt sich makroskopisch mithilfe des Personenflusses vornehmen: Ist innerhalb eines Wegabschnitts der eingehende größer als der ausgehende (bzw. maximal mögliche) Personenfluss, entsteht ein Stau.¹³³ Dies kann z. B. vor Engstellen, Türen oder Treppen der Fall sein. Die Geschwindigkeit der Personen im Stau ist reduziert, die Dichte meist erhöht: Für Personen am Ende des Staus verlängert sich die Laufzeit und somit die Gesamtdauer der Räumung.¹³⁴

Die Betrachtung der lokalen Personendichte zur Bewertung der Personensicherheit in kritischen Situationen wird in der Praxis oft angewendet, denn bei 3 bis 5 Personen pro m^2 können temporäre lokale Stillstände entstehen und bei einem weiteren Anstieg ist ein Ausweichen und das Kompensieren des Drucks durch hinzukommende Personen nicht mehr möglich und somit die Sicherheit der Personen gefährdet.¹³⁵ In Berechnungsmodellen empfiehlt die vfdb trotzdem keine Identifikation von Stauungen mithilfe der Dichte, da diese je nach Ansatz entweder ein Vorgabewert ist oder aufgrund der unterschiedlichen maximal möglichen Personendichte abhängig vom verwendeten Modell und verschiedener Methoden zur Messung nicht einheitlich betrachtet werden kann.¹³⁶

Sowohl RiMEA als auch vfdb empfehlen die Identifikation eines Staus innerhalb von Simulationen stattdessen anhand der Geschwindigkeit der Agenten.¹³⁷ Als Schwellenwert wird die Grenzgeschwindigkeit v_{grenz} genannt, welche im zugehörigen Fundamentaldiagramm dem maximalen Fluss zugeordnet (siehe Abb. 5) und abhängig von verwendetem Modell, Szenario und Parametern ist: Sinkt die Geschwindigkeit unter diesen Wert, befindet sich der Agent im Stau (Reaktionszeiten vor der Fluchtbewegung sind hierbei ausgenommen).¹³⁸

¹³¹ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 351

¹³² vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 5

¹³³ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 351

¹³⁴ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 351 f.

¹³⁵ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 352 f.

¹³⁶ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 353

¹³⁷ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 352

¹³⁸ vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 5

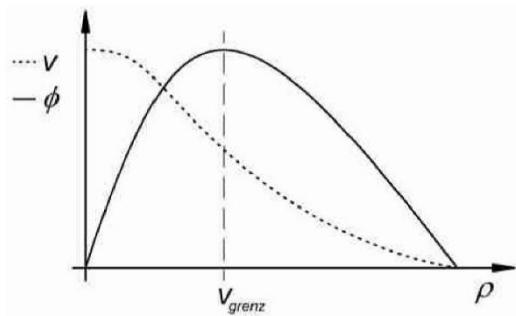


Abb. 5: Schematisches Fundamentaldiagramm ¹³⁹

Die Beschreibung eines identifizierten Staus kann nach RiMEA mithilfe der Existenzdauer, Ort und Ausdehnung, Stauzeiten einzelner Agenten, akkumulierter Stauzeiten, dem Einfluss auf die Räumungszeit oder der Staugröße in Form der Anzahl der beteiligten Personen erfolgen.¹⁴⁰

Die Bildung von Staus kann nicht nur aufgrund der Verzögerung der Entfluchtung, sondern ebenfalls wegen hoher Personendichten zu Gefährdungen führen: Neben der Identifikation und Beschreibung von Staus ist deswegen die Beurteilung dieser von Bedeutung.¹⁴¹ Als Kriterium eines signifikanten Staus gilt dabei die Wartezeit der Individuen aufgrund des reduzierten oder stillgelegten Personenflusses, das heißt die zeitliche Differenz zwischen einer Entfluchtung ohne Verzögerungen und der tatsächlichen Entfluchtszeit.¹⁴² Als kritisch gelten aufgrund der möglichen psychologischen Reaktion der Personen Zeiten oberhalb eines Schwellenwertes.¹⁴³ Innerhalb der Literatur ist hierfür jedoch kein expliziter Richtwert zu finden. Der vfdb-Leitfaden benennt einen Mangel an empirischen Daten zur Festlegung dieses situationsabhängigen Werts als Grund.¹⁴⁴ Bei der Beurteilung von Staus sollten Räumungsanlass, Motivation der Personen, Nutzungsart des Gebäudes, Szenarien-relevante Faktoren, Abweichung vom Baurecht und Ort und Ausdehnung des Staus beachtet werden.¹⁴⁵

3.3 Personenstrommodelle

Personenstromanalysen dienen der Ermittlung der zuvor erläuterten Beurteilungskriterien einer Entfluchtung: Anders als beim deskriptiven Verfahren ist mithilfe folgender Modelle die Berechnung der Evakuierungsdauer und teilweise der Stauzeiten zur quantitativen Beurteilung der Evakuierung möglich. Dazu wird der zeitliche Ablauf einer

¹³⁹ Quelle: RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 6

¹⁴⁰ vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 6

¹⁴¹ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 353

¹⁴² vgl. DIN SPEC 91284:2012-04

¹⁴³ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 353

¹⁴⁴ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 353

¹⁴⁵ vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 7

Entfluchtung mithilfe von Personenstrommodellen dargestellt. Diese umfassen dabei sowohl Berechnungen als auch Computer-Simulationen mit unterschiedlicher Komplexität zur Untersuchung von Entfluchtungen, sie beschränken sich jedoch nicht nur auf die Betrachtung von Evakuierungsprozessen, sondern können zur Analyse von Personen-Bewegungen im Allgemeinen verwendet werden¹⁴⁶, z. B. zur Prognose kritischer Personenaufkommen in Einlasssituationen.

Modelle im Allgemeinen dienen dem Zweck, vereinfachte Bilder der Realität zu erzeugen und anhand dieser Schlüsse für reale Situationen zu ziehen.¹⁴⁷ Verschiedene Personenstrommodelle bilden die Realität mehr oder weniger detailliert ab und lassen so eine Analyse von Entfluchtungen in unterschiedlichem Maße zu. Es wird zwischen zwei Hauptgruppen der Personenstrommodelle unterschieden: makroskopische Modelle und mikroskopische Individualmodelle bzw. Simulationssoftware.¹⁴⁸ Je nachdem welche Kriterien zur Bewertung der Entfluchtung betrachtet werden sollen, ist ein Modell mit entsprechenden Möglichkeiten in der Betrachtung auszuwählen.¹⁴⁹ Beide Modelltypen werden im Folgenden erläutert und ihre Eignung zur Darstellung von Entfluchtungen heterogener Gruppen diskutiert.

3.3.1 Makroskopische Modelle

Makroskopische Modelle, auch Strömungsmodelle oder Handrechenverfahren genannt, betrachten die Bewegung eines Personenstroms als Ganzes. Der Fluchtweg wird in verschiedene Wegabschnitte unterteilt und die Veränderung des Personenstroms von Raum zu Raum abschnittsweise berechnet.¹⁵⁰ Nach Gwynne und Rosenbaum folgen makroskopische Modelle einfachen Grundsätzen:

Die individuelle Mobilität und das Verhalten von Personen werden nicht einzeln beachtet, auch wenn sie die Bewegung beeinflussen. Durch gemittelte Werte wie die Anzahl der Personen und die Geschwindigkeit des Stroms erfolgt die Betrachtung eines gruppierten Personenstroms.

Alle Personen – als ein Personenstrom – beginnen gleichzeitig mit der Entfluchtung und es gibt keine zwischenzeitlichen Unterbrechungen aufgrund von Entscheidungen oder Handlungen einzelner.

¹⁴⁶ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 333

¹⁴⁷ vgl. Stachowiak: Allgemeine Modelltheorie. 1973, S. 128 ff.

¹⁴⁸ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 339

¹⁴⁹ vgl. Kneidl et al.: Räumungsberechnungen nach DIN 18009-2, 2022 (13.07.2023)

¹⁵⁰ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 339

Aufgrund festgelegter Berechnungsschritte bleibt das Ergebnis bei erneuter Berechnung dasselbe, solange weder das Szenario noch die Anfangsannahmen zu Geschwindigkeit, Platzbedarf etc. geändert werden. Es findet also keine Variation der Betrachtung statt.¹⁵¹

Makroskopische Modelle lassen sich grundsätzlich in zwei Kategorien unterteilen, mithilfe derer eine Abschätzung von Räumungszeiten erfolgt: vereinfachte Kapazitätsanalysen und dynamisch-hydraulische Flussmodelle.¹⁵²

Die Kapazitätsanalyse ist eine Möglichkeit zur Abschätzung von Räumungszeiten: Die Kapazität einzelner Wegabschnitte wie Treppen, Korridore und Ausgänge wird mithilfe der Länge und Breite dieser bestimmt und die Räumungszeit durch die horizontale Geschwindigkeit und den maximal zu erwartenden Personenstrom berechnet.¹⁵³ Ein typisches Verfahren ist das der NFPA-Norm 130. Kapazitätsberechnungen werden zur schnellen Plausibilisierung genutzt¹⁵⁴, beachten jedoch keine individuellen Merkmale von Personen oder Geometrie und auch ein Nachweis von Stauzeiten ist nicht möglich.¹⁵⁵

Dynamische Strömungsmodelle basieren auf dem empirisch ermittelten Zusammenhang zwischen Dichte und Geschwindigkeit der Bewegung, welcher in sogenannten Fundamentaldiagrammen (siehe 3.2.2) dargestellt wird.¹⁵⁶ Anhand dieses Zusammenhangs werden die Räumungszeiten einzelner Abschnitte des Fluchtwegs (horizontaler Gang, Treppe, Rampe, Engstellen) berechnet und zu einer Gesamträumungszeit summiert.¹⁵⁷ Mithilfe der Veränderung der Personendichten von Raum zu Raum lassen sich im Gegensatz zur einfachen Kapazitätsanalyse auch Vereinigungen von Personenströmen aus verschiedenen Wegabschnitten oder Zuschauerreihen berechnen.¹⁵⁸ Das bekannteste Verfahren ist das nach Predtetschenski und Milinski: Auf Basis der Personenanzahl und des Platzbedarfs der Personen, welcher anhand von Tabellen abgelesen werden kann (z. B. für Personen mit Winterkleidung oder Koffern), können abhängig von den Maßen der einzelnen Fluchtwegabschnitte die Personendichten und daraus die Räumungszeiten ermittelt werden.¹⁵⁹

Nach Kneidl werden makroskopische Berechnungen hauptsächlich zur Betrachtung einfacher Geometrien mit wenigen Abschnitten verwendet: Je komplexer Gebäude sind,

¹⁵¹ vgl. Gwynne und Rosenbaum: Employing the Hydraulic Model. 2016, S. 2120

¹⁵² vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 339

¹⁵³ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 340

¹⁵⁴ vgl. Kneidl et al.: Nachweisverfahren zur Personensicherheit bei Räumungen. 2019, S. 42

¹⁵⁵ vgl. Göbell und Kallinowsky: Barrierefreier Brandschutz. 2016, S. 192

¹⁵⁶ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 342

¹⁵⁷ vgl. Kneidl et al.: Nachweisverfahren zur Personensicherheit bei Räumungen. 2019, S. 42

¹⁵⁸ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 342

¹⁵⁹ vgl. Kneidl et al.: Nachweisverfahren zur Personensicherheit bei Räumungen. 2019, S. 42

desto höher ist der Aufwand. Die Räumungsdauer kann zwar berechnet werden, die Abbildung der Dynamik zwischen Personen innerhalb des Personenstroms ist jedoch nicht möglich.¹⁶⁰ Zudem werden Personen als ausreichend mobil angenommen.¹⁶¹

Makroskopische Modelle beruhen auf empirischen Grundlagen und sind als Handrechenverfahren leicht anwendbar. Es wird jedoch nur ein Personenstrom als Masse auf Basis gemittelter Werte betrachtet, individuelle Eigenschaften oder Verhaltensweisen von Personen finden keine Beachtung. Die Modelle eignen sich also nicht für die Berechnung von Entfluchtungen heterogener Gruppen, da Menschen mit unterschiedlichen motorischen Fähigkeiten nicht individuell betrachtet werden können. Abweichende Mobilität und Bewegungsgeschwindigkeiten sowie der erhöhte Platzbedarf von Rollstühlen und eine möglicherweise veränderte Interaktion mit anderen Personen innerhalb des Stroms werden vernachlässigt.

3.3.2 Mikroskopische Simulationssoftware

Mikroskopische Modelle betrachten die Entfluchtung von Personen nicht in Form eines zusammenhängenden Personenstroms, sondern als die Bewegung einzelner Individuen.¹⁶² Innerhalb dieses Kapitels sollen mikroskopische Modelle beschrieben und ihr Unterschied zu makroskopischen definiert werden. Es werden verschiedene Modelle und die Bedeutung der Parameterwahl innerhalb dieser dargestellt. Die Anwendung von Simulationen als Teil der Sicherheitsplanung von Veranstaltungen nimmt Rückbezug auf die bereits in 2.1 erläuterte Sicherheitsplanung. Die Eignung zur Darstellung der Entfluchtung heterogener Personenströme leitet den Fokus zurück von den theoretischen Grundlagen auf das Thema dieser Arbeit.

Mikroskopische Modelle, auch Individualmodelle genannt, finden in Form von Computersimulationsprogrammen Anwendung: Jedem simulierten Agenten werden individuelle Parameter zugeordnet, welche dessen Fähigkeiten und Verhalten darstellen und die resultierende Bewegung auf Basis eines vorgegebenen Algorithmus beeinflussen.¹⁶³ Hierdurch können individuelle Entscheidungen und abweichendes Verhalten während der Entfluchtung simuliert werden. Die Anfangsverteilung der Personen kann an die reale Situation angepasst vorgegeben werden. In den verschiedenen Durchläufen einer

¹⁶⁰ vgl. Kneidl et al.: Nachweisverfahren zur Personensicherheit bei Räumungen. 2019, S. 42

¹⁶¹ vgl. Göbell und Kallinowsky: Barrierefreier Brandschutz. 2016, S. 197 f.

¹⁶² vgl. DIN SPEC 91284:2012-04

¹⁶³ vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 5

Simulation werden die Charakteristika der Population den Agenten zufällig zugeteilt, um bei mehrfacher Berechnung eine realitätsnahe Streuung der Ergebnisse zu erzielen.¹⁶⁴

Die Algorithmen der Programme basieren auf Studien, Beobachtungen sowie Schadensfallauswertungen und versuchen menschliches Verhalten und Bewegung möglichst realitätsnah in Form mathematischer Modelle darzustellen: Es werden die Bewegung der Personen, ihre Interaktion untereinander sowie mit der Geometrie simuliert.¹⁶⁵

Mithilfe dieser Art der Modellierung kann die Entfluchtungsduer berechnet werden und eine Analyse von Stauungen im Hinblick auf Position, Zeitpunkt und Dauer stattfinden.¹⁶⁶ Bezuglich der in 3.1 erläuterten zeitlichen Anteile der Entfluchtung berechnen mikroskopische Modelle die Räumungszeit aus Reaktionszeit und Laufzeit aller Individuen.¹⁶⁷ Die Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Dichte ist anders als bei makroskopischen Modellen zuvor nicht festgelegt, sondern ein Ergebnis der Simulation: Durch die individuelle Bewegung und Interaktion der Agenten wird der Zusammenhang und damit die Räumung beeinflusst.¹⁶⁸

Der Vorteil von mikroskopischen gegenüber makroskopischen Modellen ist also die individuelle Betrachtung der Bewegung einzelner Personen. So ist nicht nur individuelles Verhalten abbildungbar, sondern auch die Interaktion der Personen untereinander. Zudem kann die Geometrie des Gebäudes detaillierter nachgebildet werden. Auf Ergebnisebene kann die Dynamik der gesamten Entfluchtung betrachtet werden: der zeitliche und räumliche Verlauf von Stauungen und Interaktionen wird abgebildet.¹⁶⁹ Auch für „komplexe [...] Geometrien mit sich vereinigenden Personenströmen“¹⁷⁰. Im Vergleich zu makroskopischen Modellen kann somit also nicht nur die Entfluchtungsduer, sondern auch die Bildung von Staus überprüft werden.¹⁷¹

3.3.2.1 Räumliche Abbildung

Es lässt sich zwischen zwei Arten der räumlichen Darstellung der Geometrie innerhalb von Individualmodellen unterscheiden: diskret und kontinuierlich.

Räumlich diskrete Modelle bilden die Geometrie in Form eines Zellgitters mit gleich dimensionierten Zellen ab, innerhalb dessen sich die Agenten von Zelle zu Zelle zu ihrem

¹⁶⁴ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 346

¹⁶⁵ vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 4

¹⁶⁶ vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 5

¹⁶⁷ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 334

¹⁶⁸ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 345

¹⁶⁹ vgl. Kneidl et al.: Nachweisverfahren zur Personensicherheit bei Räumungen. 2019, S. 42

¹⁷⁰ Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 347

¹⁷¹ vgl. Kneidl et al.: Räumungsberechnungen nach DIN 18009-2, 2022 (13.07.2023)

Ziel bewegen.¹⁷² Hindernisse sowie andere Agenten blockieren dabei einzelne oder mehrere Zellen: anhand dessen wird kalkuliert, wie sich die Personen bewegen.¹⁷³

Räumlich kontinuierliche Modelle diskretisieren, d. h. unterteilen, die Geometrie nicht. Der gesamte Raum wird kontinuierlich abgebildet und jede Position ohne Hindernisse kann betreten werden.¹⁷⁴ Begrenzend wirken die festgelegten Grenzen der Geometrie, nicht jedoch die Grenzen einzelner Zellen. Da die Prüfung von Personen und Hindernissen auf dem Laufweg der Agenten nicht zellenweise abgefragt wird, wie bei diskreten Modellen, sind raumkontinuierliche Modelle flexibler, jedoch auch rechenintensiver.¹⁷⁵

Abb. 6 zeigt schematisch den Unterschied zwischen der räumlichen Diskretisierung einer Geometrie und ihrer kontinuierlichen Abbildung.

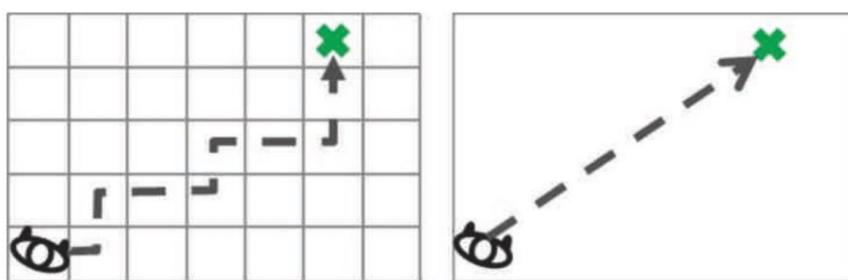


Abb. 6: Diskretisierte und kontinuierliche Geometrie ¹⁷⁶

Wie bereits angeschnitten, ist der Vorteil der Diskretisierung des Raums die geringere benötigte Rechenleistung und somit kürzere Dauer der Simulation.¹⁷⁷ Nachteil der Darstellung der Geometrie als Gitter ist allerdings, dass diese weniger exakt abgebildet werden kann und die maximale Personendichte aufgrund der Zellgröße limitiert ist: Die Abbildung von individuellem Platzbedarf, Körpergröße und Geschwindigkeit kann eingeschränkt sein und damit zu einer ungenauerer Modellierung der Bewegung führen.¹⁷⁸

Zusätzlich lassen sich Individualmodelle in drei Grundmodelle einteilen: Während kräftebasierte Social-Force-Modelle und entscheidungsbasierte Optimal-Steps-Modelle den kontinuierlichen Modellen angehören, sind zellulare Automaten raumdiskrete Modelle auf Basis eines Zellgitters.¹⁷⁹

¹⁷² vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 345

¹⁷³ vgl. Kneidl und Simon: Crowd Simulation als Planungswerkzeug für Veranstaltungen. 2021, S. 551

¹⁷⁴ vgl. Kneidl und Simon: Crowd Simulation als Planungswerkzeug für Veranstaltungen. 2021, S. 551

¹⁷⁵ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 345 f.

¹⁷⁶ Quelle: Kneidl und Simon: Crowd Simulation als Planungswerkzeug für Veranstaltungen. 2021, S. 552

¹⁷⁷ vgl. Kneidl und Simon: Crowd Simulation als Planungswerkzeug für Veranstaltungen. 2021, S. 552

¹⁷⁸ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 345

¹⁷⁹ vgl. Kneidl und Simon: Crowd Simulation als Planungswerkzeug für Veranstaltungen. 2021, S. 556

3.3.2.2 Parameterwahl

Es folgt ein Überblick über die Eingabekategorien von Simulationsprogrammen im Allgemeinen. Die detaillierte Erläuterung der Parameter bezüglich der Anwendung PedGo findet im Kapitel 4 statt. Richtwerte zur Wahl der entsprechenden Parameter zur Kalibrierung der Programme finden sich sowohl innerhalb des vfdb-Leitfadens als auch der RiMEA sowie den Handbüchern der jeweiligen Software.

Simulationsprogramme fordern bzw. erlauben die Eingabe von Parametern zur Individualisierung der Simulation. Sie lassen sich in drei Kategorien unterteilen¹⁸⁰:

Die Eingabe der Geometrie erfordert die Modellierung des Grundrisses mit allen für die Simulation bedeutsamen Elementen: Wände, Ausgänge, Hindernisse, nicht begehbarer Teile des Fluchtweges, Türen, Treppen und Rampen. Außerdem muss ggf. eine Unterteilung der Stockwerke stattfinden.

Die Eingabe-Kategorie der Population umfasst die Zuweisung von Eigenschaften und Fähigkeiten der Agenten. Sie wird als statistische Verteilung für alle Simulationsläufe festgelegt und sollte an vorliegende Daten angepasst werden. Hier werden in der Regel mindestens Werte für die Reaktionszeit, die freie Gehgeschwindigkeit, abhängig von der Mobilität, und die Anfangs- und Altersverteilung der Agenten eingegeben.

Die Eingabe von Routen beutetet die Vorgabe des vom Agenten gewählten Weges zum sicheren Bereich. Dabei können alle, einzelne, nächstgelegene oder bekannte Fluchtwägen vorgegeben werden. Zudem lassen sich Umentscheidungen aufgrund von Stau oder organisatorischer Maßnahmen durch Vorgabe der Routen einbeziehen.

Die Wahl der Parameter in den jeweiligen Eingabekategorien ist nach RiMEA auf Basis des realen Szenarios zu treffen und erfordert eine Begründung und Dokumentation.¹⁸¹ Abhängig vom jeweiligen Simulationsprogramm sind verschiedene Parameter einstellbar und somit verschiedene Aspekte des Verhaltens der Population beeinflussbar. Die Komplexität der Parameter und damit die Genauigkeit der Einstellmöglichkeiten unterscheidet sich je nach Modell.¹⁸² Die Wahl der Parameter ist ein entscheidender Faktor bezüglich der Aussagekraft von Simulationen.¹⁸³ Je sorgfältiger die Auswahl, desto realistischer die Abbildung einer Entfluchtung innerhalb des Modells.

Die Auswahl der Parameter ist vor allem bei von der Norm abweichenden Eigenschaften der Population von Bedeutung. Abweichende Gehgeschwindigkeiten aufgrund

¹⁸⁰ vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 8

¹⁸¹ vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 8

¹⁸² vgl. Kneidl und Simon: Crowd Simulation als Planungswerzeug für Veranstaltungen. 2021, S. 553

¹⁸³ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 347

eingeschränkter Mobilität müssen auch durch die Agenten abgebildet werden, um Gruppen-dynamik entsprechend zu beeinflussen. Die Auswirkungen menschlichen Verhaltens auf die Dynamik innerhalb von Gruppen und das Erfordernis der Modellierung dieser werden im nächsten Kapitel behandelt. Die Auswahl geeigneter Parameter zur Simulation innerhalb des Programms PedGo findet im Methodik-Kapitel 5 dieser Arbeit statt.

3.3.2.3 Anwendung

Zusammengefasst werden Räumungssimulationen zur Analyse, Überprüfung und Optimierung von Fluchtwegen und damit der Prüfung der Wirksamkeit von Evakuierungs-konzepten verwendet.¹⁸⁴ Sie sind damit als Teil der Sicherheitsplanung von Veranstaltungen ein wichtiges Werkzeug.

Neben der Prognose von Stauungen und Räumungszeiten und der Abhängigkeit dieser Faktoren von Dimensionierung der Fluchtwiege und Personenzahl können die Flucht-wegwahl einzelner Personen oder Gruppen sowie Verbesserungspotenziale durch organi-satorische oder bauliche Maßnahmen beurteilt werden.¹⁸⁵ Somit sind Simulationen zusätzliche zur Einhaltung von Gesetzen und Normen ein Nachweis zur Gewährleistung einer sicheren Entfluchtung aller Beteiligten.¹⁸⁶ Als Teil des vfdb-Leitfadens gelten sie als Ingenieurmethode zur Analyse von Räumungsvorgängen.¹⁸⁷ Durch stetige Weiterent-wicklung werden sie zuverlässiger, haben als mathematische Modelle trotzdem ihre Grenzen und können die Realität nie definitiv prognostizieren.¹⁸⁸

Es existiert eine Vielzahl an Programmen zur Simulation von Entfluchtungen: Beispiele raumdiskreter Modelle sind die Simulationsprogramme PedGo und buildingEXODUS, während beispielsweise ASERI, SIMULEX, crowd:it, Pathfinder und FDS+EVAC die Geometrie kontinuierlich abbilden.¹⁸⁹

Die vorliegende Arbeit betrachtet das auf einem diskreten mikroskopischen Modell ba-sierende Programm PedGo. Dies hat folgende Gründe: Die individuelle Abbildung ein-zelner Personen innerhalb mikroskopischer Modelle bietet die Grundlage zur Modellierung heterogener Gruppen (siehe 3.3.2). Diskrete Modelle bilden Geometrien vereinfacht ab und sparen damit Berechnungszeit, trotzdem sollten sie Entfluchtungen unterschiedlicher Populationen realistisch abbilden und reliable Ergebnisse erzielen, um als Prognose-Tool in der Sicherheitsplanung herangezogen zu werden. Diese Fähigkeit

¹⁸⁴ vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 4

¹⁸⁵ vgl. Walkenhorst: Praxiswissen Brandschutz. 2013, S. 85 f.

¹⁸⁶ vgl. Kneidl und Simon: Crowd Simulation als Planungswerkzeug für Veranstaltungen. 2021, S. 567

¹⁸⁷ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 333

¹⁸⁸ vgl. Walkenhorst: Praxiswissen Brandschutz. 2013, S. 85 f.

¹⁸⁹ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 346

wird innerhalb dieser Arbeit untersucht werden. Eine detaillierte Betrachtung der Software folgt in Kapitel 4.

3.4 Modellierung menschlichen Verhaltens

Innerhalb dieses Kapitels wird die Modellierung des menschlichen Verhaltens betrachtet. Es beinhaltet die Bedeutung der realitätsnahen Modellierung von Verhalten bezüglich der Aussagekraft von Simulationen und den Einfluss grundlegender menschlicher Verhaltensaspekte auf die Bewegung von Personenströmen. Anschließend wird eine Betrachtung der Besonderheiten bei heterogenen Gruppen vorgenommen.

Gesetze und Normen allein sind nicht in der Lage, soziale Einflüsse einzelner Situationen zu betrachten und individuelles Verhalten einzubeziehen.¹⁹⁰ Um die Evakuierung von Menschen aus einer Versammlungsstätte korrekt zu prognostizieren, muss sie innerhalb von Simulationen möglichst realitätsgerecht abgebildet werden.¹⁹¹ Da diese die Prognose von menschlichem Verhalten beinhalten, müssen individuelle menschliche Entscheidungen in Form mathematischer Modelle abgebildet werden.¹⁹² Steigende Rechenleistung und komplexere Simulationen bieten die Möglichkeit zur genaueren Modellierung menschlichen Verhaltens.¹⁹³ Um diese Möglichkeit nutzen zu können, muss das psychologische und soziale Verhalten eines Menschen betrachtet werden. Aus diesem Grund stellt das Kapitel folgend simulationsrelevante sozialpsychologische Theorien dar, welche das menschliche Verhalten bei der Entfluchtung beeinflussen.

Generell lässt sich sagen, das Verhalten von Personen ist individuell und abhängig von verschiedenen individuellen Merkmalen einzelner Personen: Dazu gehören ihre Demografie (Alter, Geschlecht, Nationalität), Mobilität (z. B. Behinderungen), Bedürfnisse und Erwartungen an das Event, emotionale und physiologische Verfassung und ihr Wissen bzgl. der Veranstaltung (z. B. Ablauf und Ortskenntnis).¹⁹⁴

3.4.1 Fluchtwegwahl

Die Wahl des Fluchtwegs ist nach Künzer abhängig von der Ortskenntnis der Personen: So verteilen sich Personen nicht gleichmäßig auf alle Ausgänge, sondern wählen bevorzugt den Ihnen bekannten Weg, also den Eingang. Grund hierfür ist die Gewohnheit: So werden einerseits regelmäßig gesehene Notausgangsschilder nicht mehr richtig

¹⁹⁰ vgl. Kneidl und Simon: Crowd Simulation als Planungswerkzeug für Veranstaltungen. 2021, S. 558

¹⁹¹ vgl. Kneidl und Simon: Crowd Simulation als Planungswerkzeug für Veranstaltungen. 2021, S. 546 f.

¹⁹² vgl. Klüpfel und Meyer-König: Modelle für die Berechnung von Personenströmen. 2005, S. 2

¹⁹³ vgl. Hofinger et al.: Human factors in evacuation simulation, planning, and guidance. 2014, S. 609

¹⁹⁴ vgl. Künzer und Hofinger: Veranstaltungen und Besuchersicherheit. 2021, S. 522 ff.

wahrgenommen, zudem nutzen Menschen in Stresssituationen eher gewohnte Wege, um unbekannte zusätzliche Hindernisse zu vermeiden.¹⁹⁵

Zusätzlich zur Ortskenntnis spielen die Entfernung bis zum Ausgang und dessen wahrgenommene Beschaffenheit bezüglich Breite, Ebenmäßigkeit, Übersichtlichkeit und Ausleuchtung sowie die Wahrnehmung von Rauch oder Hindernissen sowie das Verhalten anderer Personen eine Rolle.¹⁹⁶ Denn der Mensch orientiert sich in solchen Situationen an anderen in seinem Umfeld, auch wenn dies eher von Nachteil ist.¹⁹⁷ Abschreckend wirken Alarmsicherungen an Notausgängen und eine schlecht sichtbare Beschilderung.¹⁹⁸ Hinzu kommt das Reaktionsverhalten einzelner Individuen auf Stauungen: Umentscheidungen bezüglich des gewählten Fluchtwegs werden je nach Person unterschiedlich getroffen.¹⁹⁹

Die Routenwahl lässt sich mithilfe von Leitsystemen und der Beschilderung der Fluchtwägen²⁰⁰ sowie Lenkung durch Personal oder Einsatzkräfte²⁰¹ beeinflussen.

3.4.2 Gruppenbildung

Menschliches Verhalten unterliegt nicht nur dem eigenen individuellen Verhalten, sondern ebenfalls sozialen Einflüssen in Gruppen und Menschenmengen untereinander. Studien zeigen, dass 70 % der Besucher Veranstaltungen nicht allein, sondern in Gruppen besuchen.²⁰²

Durch emotionale Identifikation fühlen sich Gruppenmitglieder stärker miteinander verbunden, helfen sich gegenseitig und halten einen geringen Abstand zueinander.²⁰³ Das Bewegungsverhalten einer Gruppe innerhalb von Menschenmassen ist anders als das von Einzelpersonen: Je größer die Gruppe, desto langsamer bewegt sie sich.²⁰⁴ Auch andere Gruppenmerkmale wie die Motivation, Organisation, Zusammengehörigkeit innerhalb der Gruppe sowie die Abgrenzung von und Interaktion mit anderen Gruppen wirken sich auf die Bewegung von Personenströmen und damit potenziell auf die

¹⁹⁵ vgl. Künzer et al.: Mythen der Entfluchtung. 2012, S. 5

¹⁹⁶ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 349 f.

¹⁹⁷ vgl. Künzer et al.: Mythen der Entfluchtung. 2012, S. 5

¹⁹⁸ vgl. Künzer et al.: Mythen der Entfluchtung. 2012, S. 5

¹⁹⁹ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 349 f.

²⁰⁰ vgl. Klüpfel und Meyer-König: Modelle für die Berechnung von Personenströmen. 2005, S. 5

²⁰¹ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 349 f.

²⁰² vgl. Moussaïd et al.: The walking behaviour of pedestrian social groups. 2010, S. 2

²⁰³ vgl. Künzer und Hofinger: Veranstaltungen und Besuchersicherheit. 2021, S. 525 f.

²⁰⁴ vgl. Moussaïd et al.: The walking behaviour of pedestrian social groups. 2010, S. 5

Personensicherheit aus.²⁰⁵ Zusätzlich warten Gruppenmitglieder aufeinander und helfen sich im Notfall – dies ist vor allem bei kleineren Gruppen und Familien der Fall.²⁰⁶

3.4.3 Verhalten in Menschenmengen

Eine andere Form der Identifikation beschreibt das Modell der sozialen Identität von Tajfel und Turner: Einzelpersonen innerhalb von Menschenmassen auf Veranstaltungen können sich größeren Gruppe zugehörig und dadurch mit anderen fremden Personen verbunden fühlen. Ebenso können sich die einzelnen Gruppen aber auch von anderen Gruppen abgrenzen wollen (z. B. gegnerischen Mannschaften). Es entsteht ein Zusammengehörigkeitsgefühl, welches ein kollektives Verhalten der Menschenmenge, bestehend aus Einzelpersonen, verursachen kann.²⁰⁷

Auch auf das Verhalten von Personen in Notfall- und Fluchtsituationen hat die soziale Identität einen Einfluss: Statt Panik sind häufig Hilfsbereitschaft und Kooperation in Menschenmassen zu beobachten.²⁰⁸ Denn Menschen verhalten sich in Notsituationen – anders als häufig angenommen – nicht grundsätzlich panisch und irrational, sondern im Gegenteil in vielen Fällen sozial.²⁰⁹ Massenpanik durch Konkurrenzdenken und irrationales Verhalten treten deswegen sehr selten auf.²¹⁰ Ereignisse mit Personenschäden oder Todesfällen aufgrund sehr hoher Personendichten werden oft fälschlich als Massenpanik deklariert, obwohl die Gefahr hauptsächlich durch schnelle Brandausbreitung oder andere Gründe in Kombination mit mangelhaften Fluchtmöglichkeiten entsteht.²¹¹

Insgesamt verhalten sich nach Schneider und Kirchberger etwa 10 bis 15 % der Personen in Notfallsituationen rational und ohne Hektik, sie fallen durch klares Agieren auf und übernehmen Führungsrollen. Circa 70 % und damit der Großteil reagiert zuerst erschrocken, teilweise betäubt, eher ruhig, kommt dann jedoch ins Handeln, leistet Hilfe und ist durch Anweisungen beeinflussbar. Nur 10 bis 15 % der Personen handeln unberechenbar, d. h. sie erstarren, wirken apathisch oder desorientiert, handeln sinnlos, flüchten hektisch oder schreien.²¹² Es reagiert also nur ein kleiner Teil mit panischem Verhalten.

Zur Erstellung realitätsnaher Simulationen ist es wichtig, die Gruppenzugehörigkeit und soziale Identität von Einzelpersonen entsprechend zu berücksichtigen.²¹³

²⁰⁵ vgl. Künzer und Hofinger: Veranstaltungen und Besucrsicherheit. 2021, S. 525 f.

²⁰⁶ vgl. Künzer und Hofinger: Veranstaltungen und Besucrsicherheit. 2021, S. 526

²⁰⁷ vgl. Tajfel und Turner: An integrative theory of intergroup conflict. 1979, S. 38 ff.

²⁰⁸ vgl. Künzer und Hofinger: Veranstaltungen und Besucrsicherheit. 2021, S. 528 f.

²⁰⁹ vgl. Künzer und Hofinger: Veranstaltungen und Besucrsicherheit. 2021, S. 531 f.

²¹⁰ vgl. Künzer et al.: Mythen der Entfluchtung. 2012, S. 7

²¹¹ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 350 f.

²¹² vgl. Schneider und Kirchberger: Evakuierungsberechnungen. 2007, S. 63

²¹³ vgl. Kneidl und Simon: Crowd Simulation als Planungswerzeug für Veranstaltungen. 2021, S. 548

3.4.4 Heterogene Populationen

Forschung bezüglich des menschlichen Verhaltens existiert vor allem zu homogenen Gruppen mit mobilen Personen.²¹⁴ Studien mit heterogenen Gruppen gibt es deutlich seltener: Aus diesem Grund ist weniger über das Verhalten innerhalb heterogener Populationen und die Übertragbarkeit des Verhaltens homogener Gruppen bekannt.²¹⁵

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Fortbewegung heterogener Gruppen langsamer stattfindet als die homogener²¹⁶ und der spezifische Fluss an Engstellen durch die Heterogenität der Population reduziert wird.²¹⁷ Untersuchungen zum Verhältnis zwischen Rollstuhlfahrern und gehenden Personen zeigen: Je höher der Anteil an Rollstühlen, desto geringer der Fluss bei sonst gleichen Bedingungen – bereits bei geringen Anteilen ab circa 1,5 %²¹⁸ sowie 2,35 %²¹⁹ ist dieser Effekt feststellbar.

Existierende Studien zeigen, dass die Entfluchtung heterogener Populationen nicht nur wegen reduzierter Geschwindigkeiten aufgrund geringerer Mobilität, sondern ebenfalls durch ein verändertes Verhalten aller beteiligten Personen beeinflusst wird. So stellen Sharifi et al. einen signifikanten Einfluss der physischen Erscheinung auf den Abstand fest: Personen, die auf eine Person mit sichtbarer Behinderung (Gehstock, Rollstuhl) folgen, reduzieren ihre Laufgeschwindigkeit um bis zu 30% und halten einen größeren Abstand. Das Bewegungsverhalten der folgenden Fußgänger passt sich den Personen mit Behinderung an, der Personenfluss ist geringer.²²⁰ Auch Pan et al. beobachten den erhöhten Abstand bei Beteiligung von Rollstuhlfahrern – sowohl nach hinten als auch nach vorne – sowie eine dadurch entstehende geringere Dichte innerhalb des Personenstroms und einen reduzierten Fluss.²²¹

Bei Experimenten Miyazakis zum Überholverhalten von Fußgängern bei Beteiligung eines einzelnen langsameren Rollstuhlfahrers wird die Reduzierung der Geschwindigkeit bei Überholung und anschließende Wiederaufnahme der Anfangsgeschwindigkeit festgestellt. Dies findet aufgrund des Abstandhaltens der Fußgänger untereinander und einer damit einhergehenden Anpassung der Geschwindigkeit statt. Je weniger konstant die Bewegung des Rollstuhls (z. B. manuell im Vergleich zu elektrisch) ist, desto mehr Fluktuation tritt in der Geschwindigkeit des Personenstroms auf.²²² Dies wird beim

²¹⁴ vgl. Hofinger et al.: Human factors in evacuation simulation, planning, and guidance. 2014, S. 607

²¹⁵ vgl. Geoerg et al.: The Influence of Wheelchair Users. 2019, S. 1

²¹⁶ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 347

²¹⁷ vgl. Daamen und Hoogendoorn: Emergency Door Capacity. 2012, S. 64

²¹⁸ vgl. Shimada und Naoi: An Experimental Study on the Evacuation Flow of Crowd. 2006, S. 7

²¹⁹ vgl. Pan et al.: Experimental study of pedestrian flow mixed with wheelchair users. 2020, S. 18 f.

²²⁰ vgl. Sharifi et al.: Time Headway Modeling and Capacity Analysis of Pedestrian Facilities. 2016, S. 8 f.

²²¹ vgl. Pan et al.: Fundamental diagram of pedestrian flow including wheelchair users. 2021, S. 24 ff.

²²² vgl. Miyazaki et al.: Behaviors of Pedestrian Group overtaking Wheelchair User. 2003, S. 3 f.

Durchgang einer Engstelle – trotz ausreichendem Platz zum Überholen – zusätzlich verstärkt: Je enger der Durchgang, umso stärker der Effekt und geringer der Fluss.²²³

In weiteren Beobachtungen wird zusätzlich eine erhöhte Interaktion zur Selbstorganisation der Bewegung durch die Engstelle als bei der homogenen Gruppe festgestellt.²²⁴ Ein höfliches und soziales Verhalten der Personen untereinander führt zusätzlich zu der geringeren Dichte.²²⁵ Zudem halten Personen in der heterogenen Population wahrscheinlicher an und warten (z. B. zum Vorlassen anderer).²²⁶ Dies führt nach Geoerg et al. zu einer größeren Variation der Laufgeschwindigkeit und inhomogenen Bewegungscharakteristik. Insgesamt werden weniger Überholvorgänge als in der homogenen Gruppe beobachtet, einerseits aufgrund des Verzichts auf Überholungen, andererseits aufgrund des fehlenden Platzes zur Überholung bei geringen Wegbreiten. Die Geschwindigkeit des langsameren Teils der Population bestimmt somit die Geschwindigkeit der folgenden Personen und führt zu einem konstanteren Fluss.²²⁷

Die Routenwahl kann durch Information im Vorrhinein optimiert und die Entfluchtungsdauer reduziert werden: Die Kommunikation des geeigneten barrierefreien Ausgangs ausschließlich an Rollstuhlnutzer kann aufgrund der schnelleren Reaktionsmöglichkeit und des Passierens des Ausgangs vor der Entstehung von Stauungen und somit eines geringeren Einflusses auf den gesamten Personenstrom weiteres Staupotenzial reduzieren.²²⁸ Zusätzlich zeigen sich Evakuierungsübungen in heterogenen Gruppen als sinnvoll: Während gehende Personen in ersten Studiendurchläufen mehr Abstand von Rollstuhlfahrern halten, entwickeln sie über mehrere Durchgänge zunehmend Verständnis der Rollstuhlbewegung, einhergehend mit einem natürlicheren Laufverhalten mit geringerem Abstand.²²⁹

²²³ vgl. Miyazaki et al.: Behaviors of Pedestrian Group overtaking Wheelchair User. 2003, S. 5

²²⁴ vgl. Geoerg et al.: How people with disabilities influence crowd dynamics. 2022, S. 14

²²⁵ vgl. Geoerg et al.: The Influence of Wheelchair Users. 2019, S. 11 f.

²²⁶ vgl. Geoerg et al.: How people with disabilities influence crowd dynamics. 2022, S. 10

²²⁷ vgl. Geoerg et al.: The Influence of Wheelchair Users. 2019, S. 6 ff.

²²⁸ vgl. Feliciani et al.: Efficiently informing crowds. 2020, S. 39

²²⁹ vgl. Feliciani et al.: Efficiently informing crowds. 2020, S. 40

4. Simulationssoftware PedGo

Innerhalb dieser Arbeit wird die Simulationssoftware PedGo der TraffGo GmbH betrachtet, welcher ein diskretes mikroskopisches Modell zugrunde liegt. Im Jahr 2001 entstanden aus wissenschaftlichen Erkenntnissen des Forschungsprojekts BYPASS am Lehrstuhl Physik von Transport und Verkehr der Universität Duisburg-Essen die TraffGo GmbH und das Programm PedGo.²³⁰ Dieses besteht aus drei einzelnen Anwendungen:

Mithilfe des Editors **PedEd** lassen sich innerhalb der Simulation betrachtete Grundrisse vorbereiten. Diese werden entweder manuell angelegt oder durch Import und Konvertierung von Vektordateien erzeugt. Innerhalb der Anwendung werden Anpassungen des Grundrisses bezüglich simulationsrelevanter Elemente sowie die Anfangsverteilung, Routenzuweisung und Gruppenzuordnung der Agenten vorgenommen. Innerhalb der Anwendung **PedGo** findet die eigentliche Simulation der Evakuierung statt. Dieser Teil des Programms stellt detaillierte Ergebnisse aus mehreren Rechendurchläufen in Form von Dateien zur Verfügung. Eine genaue Betrachtung des Modells, einstellbarer Parameter und der Auswertungsmöglichkeiten erfolgt in folgenden Unterkapiteln. Der Viewer **PedView** ermöglicht es, von der Simulation ausgegebene Abläufe dreidimensional zu visualisieren. Die Animation lässt sich mithilfe von Videofunktionen steuern. Eine Veränderung der Ansicht und die Erstellung von Screenshots sind möglich.

In dieser Arbeit werden die aktuellen Softwareversionen PedGo 2.7.1.0 und PedEd 2.6.0.0 verwendet. Im Folgenden werden das der Software zugrunde liegende Modell, die Eingabeparameter zur Modellierung der Population und die Möglichkeiten zur Ergebnisauswertung dargestellt.

4.1 Modell

PedGo basiert auf einem mikroskopischen Multi-Agenten-Modell auf Grundlage eines zellulären Automaten, welcher Agenten mit individuellen Eigenschaften, Verhalten und Zielen innerhalb eines diskreten Raums zeitlich ebenfalls diskret darstellt. Der Begriff des Multi-Agenten-Modells beschreibt dabei ein „System aus mehreren gleichartigen oder unterschiedlich spezialisierten handelnden Einheiten (Agenten), die kollektiv ein Problem lösen“²³¹.

Zur Diskretisierung des Raums wird der Grundriss in einzelne quadratische Zellen mit einer Fläche von 0,4 x 0,4 Quadratmetern unterteilt, die gemeinsam ein Gitter bilden,

²³⁰ vgl. TraffGo HT GmbH: Unser Unternehmen, 2018 (13.07.2023)

²³¹ vgl. TraffGo HT GmbH: PedEd PedGo PedView Benutzerhandbuch. 2013, S. 97 f.

innerhalb dessen sich die Agenten während der Simulation von Zelle zu Zelle bewegen. Die so entstehende Fläche von $0,16 \text{ m}^2$ pro Zelle soll die empirisch ermittelte durchschnittliche Standfläche einer Person innerhalb eines Staus (siehe 3.2.1) abbilden, daraus ergibt sich eine maximale Personendichte von $6,25 \text{ P/m}^2$ innerhalb des Modells.²³² Eine beispielhafte Darstellung der Übertragung eines Grundrisses in das diskrete Zellgitter ist in Abb. 7 dargestellt: Die Zellen können dabei nur zwei verschiedene Zustände annehmen, also entweder frei oder besetzt sein.

Die einzelnen Zellen des Grundrisses werden in verschiedene Typen unterteilt, um die Laufgeschwindigkeit der Agenten zu beeinflussen: Es existieren freie Zellen, welche die Bewegung der betretenden Agenten nicht beeinflussen; im Weg befindliche Objekte und Wände werden mithilfe von nicht betretbaren Wandzellen dargestellt; Tür- und Stufenzellen reduzieren die Geschwindigkeit im ersten Fall auf ein Viertel, im zweiten auf die Hälfte der Maximalgeschwindigkeit des Agenten.²³³ Zielzellen definieren das Ziel der Agenten am Ende ihrer Route, dort werden sie entweder gerettet oder verfolgen eine weitere Route. Die einzelnen Zelltypen werden je nach Konfiguration des Nutzers einer Farbe zugeordnet, die sie innerhalb der Geometrie farblich kennzeichnet.

Die Agenten bewegen sich anhand sogenannter Potenziale zu ihren Zielzellen – je weiter die jeweilige Zelle vom Ziel entfernt ist, desto höher ist ihr der Potenzialwert: Mithilfe der Werte aller umliegenden Zellen folgt der Agent primär der ihm zugewiesenen Route.²³⁴ Durch Routenzuweisung des Benutzers breitet sich das Potenzial innerhalb der Geometrie aus. Der Potenzialverlauf ist vor der Simulation vorhanden und einsehbar. Folgende Abb. 7 zeigt rechts den Potenzialverlauf eines Beispiel-Grundrisses:

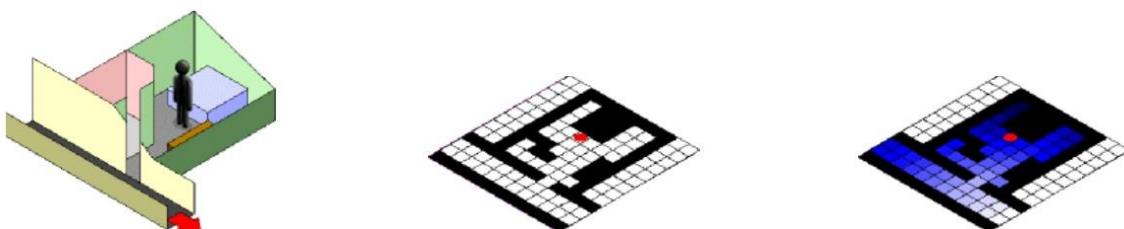


Abb. 7: Diskretisierung und Potenzialverlauf ²³⁵

Die Bewegung der Agenten innerhalb des diskreten Zellgitters folgt einem einheitlichen Algorithmus. Das Betreten aller Zellen außer Wandzellen ist möglich, solange sich dort kein anderer Agent befindet. Bei Stillstand oder Fortbewegung mit 1 c/s (einer Zelle pro

²³² vgl. TraffGo HT GmbH: PedEd PedGo PedView Benutzerhandbuch. 2013, S. 14 f.

²³³ vgl. TraffGo HT GmbH: PedEd PedGo PedView Benutzerhandbuch. 2013, S. 15 ff.

²³⁴ vgl. TraffGo HT GmbH: PedEd PedGo PedView Benutzerhandbuch. 2013, S. 21

²³⁵ Quelle: TraffGo HT GmbH: PedGo Überblick, 2018 (13.07.2023)

Sekunde) blockiert der Agent lediglich eine Zelle, während bei Geschwindigkeiten darüber alle Zellen, die der Agent innerhalb dieser Sekunde durchläuft, belegt sind.²³⁶

Die zeitliche Diskretisierung des Modells findet in Form von sogenannten Updates statt. Ein Update beinhaltet die Bewegungs-Reihenfolge einzelner Agenten innerhalb der Simulation. Das von PedGo genutzte Random-Shuffle-Update ermöglicht eine hohe Rechengeschwindigkeit: Während einer Sekunde, also einem Zeitschritt, finden mehrere Sub-Updates statt, wobei die Anzahl dieser Sub-Updates abhängig ist von der Maximalgeschwindigkeit der Population²³⁷, d. h. von der Geschwindigkeit des schnellsten Agenten (eine Geschwindigkeit von 5 Zellen/s entspricht somit 5 Sub-Updates). Jeder Agent bewegt sich eine Zelle pro Sub-Update, ist die folgende Zelle durch einen anderen Agenten blockiert oder die individuelle Schrittzahl pro Sekunde erreicht, bleibt er stehen.²³⁸

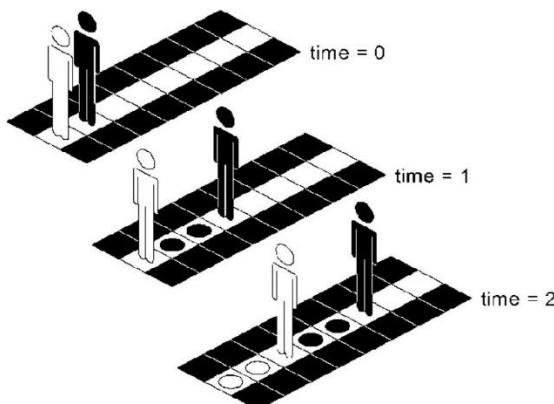


Abb. 8: Ablauf des Random-Shuffle-Updates ²³⁹

Abb. 8 stellt den Ablauf während zwei Updates zur Verdeutlichung bildlich dar: Wenn sich der schwarze Agent mit maximal 2 c/s bewegt, geht er während zwei Sub-Updates je eine Zelle weiter, das heißt zwei Zellen pro Update. Während der anderen drei Sub-Updates bleibt er innerhalb seiner Zelle. Befindet sich ein anderer Agent während des Updates im Weg, muss gewartet werden, bis dieser die Zellen freigegeben hat.²⁴⁰

4.2 Eingabeparameter

Das individuelle Verhalten und die Fähigkeiten einzelner Agenten lassen sich mithilfe verschiedener Parameter variieren. Dazu werden bestimmte Parameter-Vorgaben allen, einzelnen oder einer Gruppe von Agenten zugeordnet. Innerhalb eines Durchlaufs wird

²³⁶ vgl. TraffGo HT GmbH: PedEd PedGo PedView Benutzerhandbuch. 2013, S. 28

²³⁷ vgl. TraffGo HT GmbH: PedEd PedGo PedView Benutzerhandbuch. 2013, S. 31

²³⁸ vgl. TraffGo HT GmbH: PedEd PedGo PedView Benutzerhandbuch. 2013, S. 31

²³⁹ Quelle: TraffGo HT GmbH: PedEd PedGo PedView Benutzerhandbuch. 2013, S. 33

²⁴⁰ vgl. TraffGo HT GmbH: PedEd PedGo PedView Benutzerhandbuch. 2013, S. 33

auf Basis dieser Vorgaben jedem Agenten ein individueller Parametersatz zugeteilt und anschließend neu vergeben.

Zur individuellen Einstellung gibt es in PedGo sechs Parameter, die sich entweder gleich- oder normalverteilt zuordnen lassen. Bei der Gleichverteilung erfolgt die Parameterzuweisung durch Minimal- und Maximalwerte, während die Normalverteilung zusätzlich Mittelwert und Standardabweichung erfordert. Neben der eigenen Festlegung von Werten lässt sich der Parametersatz einer durchschnittlichen Standardpopulation auswählen. Abb. 9 zeigt das Dialogfenster zur Einstellung der Personenparameter mit voreingestellten Standard-Parametern.

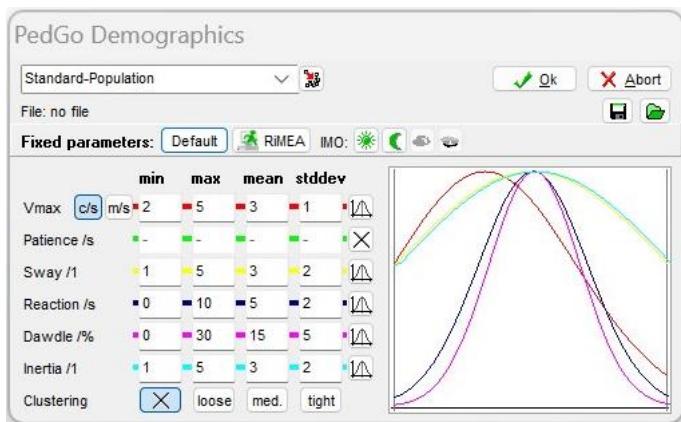


Abb. 9: Dialogfenster zur Parameter-Einstellung (eigene Darstellung)

Die Parameter zur Variation der Eigenschaften der Agenten sind folgende²⁴¹:

Der Parameter Geschwindigkeit (Vmax) steuert, wie weit sich ein Agent pro Sekunde maximal bewegt. Er kann wahlweise in Zellen pro Sekunde oder Meter pro Sekunde angegeben werden, wobei 1 c/s aufgrund der Zellendimensionierung 0,4 m/s entspricht.

Die Geduld (Patience) legt die Zeit in Sekunden fest, innerhalb derer ein Agent z. B. innerhalb eines Staus wartet, bis er einen anderen Weg zum Ziel einschlägt.

Das Schwanken (Sway) in Werten von 1 bis 10 bestimmt, mit welcher Genauigkeit ein Agent dem Potenzialverlauf folgt. Je höher der Wert, desto ähnlicher die Wahrscheinlichkeiten des Betretens der Nachbarzellen, das heißt, desto weniger hält der Agent sich an seine festgelegte Route.

Die Reaktionsdauer (Reaction) beeinflusst, wie schnell sich der Agent am Anfang der Entfluchtung in Bewegung setzt. Der Wert wird in Sekunden angegeben.

²⁴¹ vgl. TraffGo HT GmbH: PedEd PedGo PedView Benutzerhandbuch. 2013, S. 28

Die Trödelwahrscheinlichkeit (Dawdle) gibt einen prozentualen Wert für die Wahrscheinlichkeit des Stehenbleibens während eines Sub-Updates. Hiermit können zum Beispiel Orientierungsprobleme einer Person nachgebildet werden.

Die Trägheit (Inertia) eines Agenten mit einem Wert zwischen 1 und 10 bestimmt die Wahrscheinlichkeit des Beibehaltens seiner Laufrichtung trotz anderer Routenvorgabe.

Der letzte Parameter des Gruppenzusammenhalts (Clustering) wird nicht wie die anderen in numerischer Form definiert. Es kann wahlweise kein, ein loser, mittlerer oder enger Zusammenhalt festgelegt werden, welcher bestimmt, wie stark Agenten innerhalb einer Gruppe zusammenhalten und -gehen, um zum Ziel zu gelangen. So können zum Beispiel Familien mit einer engen Verbindung Beachtung finden.

4.3 Ergebnis und Auswertung

Nach Modellierung der Geometrie und Agenten sowie Festlegung von Parametern, Routen und Gruppen besteht, neben der Durchführung einer einfachen Demo-Simulation mit einem Durchlauf, die Möglichkeit, Mittel- und Einzelwertrechnungen durchzuführen.

Aufgrund der Tatsache, dass reale Entfluchtungen verschieden ablaufen, wird die Simulation vielfach durchlaufen, um eine stochastische Analyse aller Durchgänge durchführen zu können. Die Anzahl der Durchläufe ist nicht fest definiert und kann angepasst werden, allerdings wird eine Anzahl von 500 Läufen empfohlen, um statistisch sinnvoll auswertbare Ergebnisse zu erzeugen. Jeder simulierte Durchlauf stellt einen möglichen Evakuierungsvorgang dar. Aufgrund einer auf Basis der Vorgaben statistischen Neuverteilung der Parameter für jeden Durchlauf erzeugen verschiedene stochastische Entscheidungen und Verhaltensweisen der Agenten zu unterschiedlichen Zeitpunkten während der Durchläufe eine gewollte Streuung der Ergebnisse.²⁴²

Das Ergebnis der Mittelwertrechnung der Simulation ist die statistische Analyse der zuvor beschriebenen Streuung der Ergebnisse aus den Durchläufen. Mithilfe eines Diagramms (siehe Abb. 10) wird die Häufigkeitsverteilung der berechneten Evakuierungszeiten dargestellt. Der grüne Balken markiert die signifikante Dauer.²⁴³ Analog zur Definition der RiMEA ist die signifikante Dauer länger als 95 % aller simulierten Räumungszeiten und die mittlere Dauer der Mittelwert dieser.²⁴⁴

²⁴² vgl. TraffGo HT GmbH: PedEd PedGo PedView Benutzerhandbuch. 2013, S. 64

²⁴³ vgl. TraffGo HT GmbH: PedGo, 2018 (13.07.2023)

²⁴⁴ vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 8

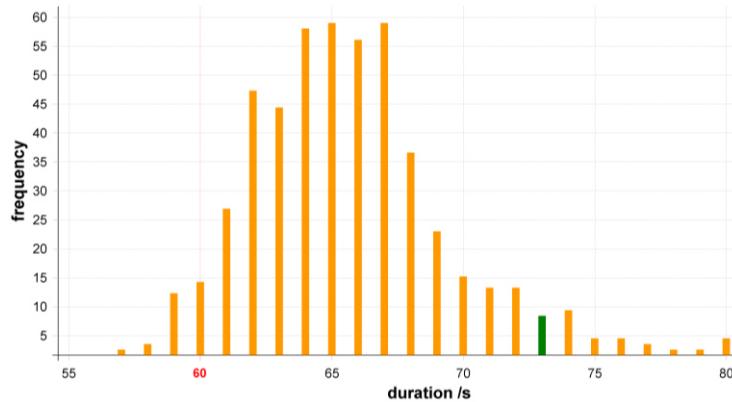


Abb. 10: Häufigkeitsverteilung der Ergebnisse (eigene Darstellung)

Die Ergebnisse werden durch PedGo in Form von Text-Dateien bereitgestellt. Eine Demographie-Datei mit den Parametern aller Agentengruppen und eine Routen-Datei geben die zuvor festgelegten Eingangsparameter wieder. Die Ergebnisdatei (seed) liefert Beginn und Ende der Simulation, die Anzahl der Durchgänge und Agenten sowie die tabellarische Dokumentation aller Durchläufe. Diese beinhaltet die jeweilige Dauer und den Verlauf der Entfluchtung in Form von Evakuierungszeiten für je zehn entflohe Agenten.

Nach der Mittelwertrechnung kann jeder der Läufe gezielt wiederholt werden, um ihn in der Einzelwertrechnung detaillierter zu betrachten. Sinnvoll ist dies für den mittleren, signifikanten, minimalen und maximalen Lauf, welche aus der Mittelwert-Ergebnisdatei entnommen werden. Folgend werden die in dieser Arbeit benötigten Ergebnisse und ihre Verwendung kurz aufgeführt, weitere Erläuterungen diesbezüglich finden sich in der Methodik.

Die Evakuierungskurve des betrachteten Durchlaufs wird auf Basis der Evac-Curve-Datei, welche die evakuierten Agenten in Abhängigkeit der Zeit liefert, separat in einem Tabellenkalkulationsprogramm erstellt. Mithilfe sogenannter Logpoints, welche im Editor PedEd innerhalb des Grundrisses platziert werden können, werden zusätzlich Agentenaufkommen, Dichte und Fluss über die Evakuierungszeit in bestimmten Bereichen, z. B. Räumen, gemessen. Diese werden als einzelne Datei ausgegeben, in der sich auch Größe und Position der festgelegten Bereiche kontrollieren lassen. Zusätzlich können die Trajektorien aller Agenten zur dreidimensionalen Visualisierung der Entfluchtung in PedView exportiert werden, um einzelne Durchläufe gesondert zu betrachten. Mithilfe der Darstellung als sogenannter Plot wird das Aufkommen verschiedener Agentendichten innerhalb des Grundrisses während des Durchlaufs betrachtet.

5. Methodik zur Validierung der Simulation

Nachdem im theoretischen Teil dieser Arbeit das thematische Grundwissen zu Entfluchtungen, Barrierefreiheit, Personenstrommodellen, der Modellierung menschlichen Verhaltens sowie der Simulationssoftware PedGo als Basis geschaffen wurde, beschreibt dieses Kapitel die Methodik der Arbeit:

Zur Validierung von Simulationsergebnissen dienen nach vfdb-Leitfaden unter anderem Vergleiche mit Räumungsexperimenten.²⁴⁵ Aus diesem Grund werden im Folgenden empirische Daten aus Bewegungsstudien mit von PedGo ermittelten Simulationsergebnissen verglichen. Die vergleichende Analyse zur Validierung der Simulation dient der quantitativen Beurteilung der Simulierbarkeit heterogener Gruppen. Zusätzlich erfolgt eine qualitative Bewertung der Software-Anwendung und Parameterwahl für den Nutzer bezüglich der Durchführung von Simulationen heterogener Personenströme.

Inhalte dieses Kapitels sind die Vorstellung der zum Vergleich herangezogenen Bewegungsstudie mit verwendeten Szenarien und relevanten Ergebnissen, die Festlegung von Vergleichsparametern, das Vorgehen zum Vergleich von Studie und Simulation, die Modellierung der entsprechenden Geometrien innerhalb der Software und die Auswahl der Eingabeparameter zur möglichst realitätsgereuen Modellierung der heterogenen Population. Anschließend folgt die Darstellung der Simulationsergebnisse im Vergleich mit den Studiendaten und die Diskussion der Anwendung des Programms sowie die der Ergebnisse zur Validierung oder Falsifizierung der Simulationsergebnisse.

5.1 Empirische Bewegungsstudie

Umfassende Bewegungsstudien mit heterogenen Gruppen wurden im Rahmen des Forschungsprojekts SiME durchgeführt. Im Folgenden werden das Projekt im Allgemeinen, die erfolgten Bewegungsstudien und die relevanten Ergebnisse vorgestellt.

5.1.1 Allgemein

SiME – ein Akronym für *Sicherheit für Menschen mit körperlicher, geistiger oder altersbedingter Beeinträchtigung* – ist ein 2019 abgeschlossenes, vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit 1,2 Mio. Euro gefördertes Forschungsprojekt: Ziel des Projekts war die Verbesserung der Personensicherheit bei Entfluchtung von Menschen mit oben genannten Behinderungen.²⁴⁶

²⁴⁵ Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 348

²⁴⁶ vgl. SiME: Das Vorschungsvorhaben, 2016 (13.07.2023)

Insgesamt umfasst es 12 Studien zum Bewegungsverhalten von Personen mit und ohne Behinderung in 145 Durchläufen. Dabei wurden mithilfe von 252 Teilnehmern homogen und heterogen zusammengesetzte Gruppen gebildet. Die Entfluchtung einer homogenen Referenzgruppe mit Menschen ohne Behinderung wurde mit derer von sechs heterogenen Gruppen verglichen, welche anteilig aus Teilnehmern mit Kognitionsstörungen, Rollstuhlnutzern, gehbehinderten, älteren, gemischt behinderten und heterogen behinderten Teilnehmern bestanden. Das Verhältnis von Menschen mit und ohne Behinderung innerhalb der untersuchten heterogenen Gruppen wurde an den Durchschnitt der Population in Deutschland angelehnt und deswegen auf etwa 10 % festgelegt.²⁴⁷

Im Folgenden wird der Fokus auf das Bewegungsverhalten der Subpopulation von Rollstuhlnutzern als stellvertretende heterogene Gruppe gelegt. Die genutzten Rollstühle werden dabei in Anlehnung an die vorliegenden empirischen Daten nicht spezifisch definiert und können somit elektrisch oder manuell steuerbar sein. Es handelt sich im Sinne einer realistischen Betrachtung der Bewegung um reale Rollstuhlfahrer.

5.1.2 Szenarien

Innerhalb der Studie fand die Betrachtung zweier unterschiedlicher Geometrien statt: Das Durchlaufen eines Korridors (Cor) und einer Engstelle in Form eines Flaschenhalses (Bot) mit einer konstanten Länge von 2,4 Metern (siehe Abb. 11 und Abb. 12).



Abb. 11: Szenarien – Flaschenhals (links) und Korridor (rechts) ²⁴⁸

²⁴⁷ vgl. Geoerg et al.: The Influence of Wheelchair Users. 2019, S. 2

²⁴⁸ Quelle: Geoerg et al.: The Influence of Wheelchair Users. 2019, S. 3

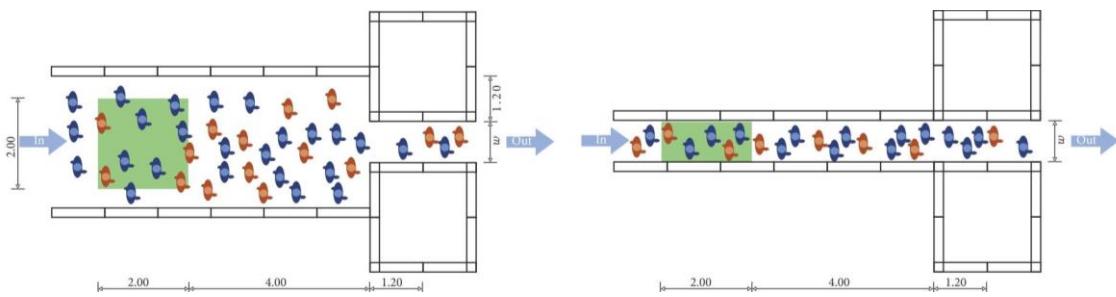


Abb. 12: Skizzen der Geometrien – Flaschenhals und Korridor ²⁴⁹

In den Durchläufen der Studie wurde die Breite ω des Ausgangs in 10-cm-Schritten zwischen 90 cm und 120 cm variiert. Diese Arbeit beschränkt sich unter Einhaltung der Anforderungen der MVStättVO auf die jeweiligen Durchgänge mit einer Fluchtwegbreite von 1,2 Metern. Beide Geometrien entsprechen damit hinsichtlich ihrer Dimensionierung den Vorgaben der MBO und MVStättVO (siehe 2.3).

Vor Beginn eines Durchlaufs befanden sich alle Probanden innerhalb eines ca. 30 m² großen Wartebereichs, der sich vor der aufgebauten Geometrie ($x(m) = [-18, -12]$) befand. Die Anfangsdichte betrug ca. 3 P/m² mit zufälliger Verteilung aller Teilnehmer in der Wartezone und die Konstruktion der Geometrien aus Holzpaneelen in Höhe von 2 m verhinderte ein anderweitiges Verlassen der Szenarien.²⁵⁰ Der sichere Bereich befand sich in beiden Szenarien hinter der Ziellinie ($x = 2,4$ m), während die Engstelle des Flaschenhals-Szenarios 2,4 m zuvor ($x = 0$ m) beginnt.

Jede Geometrie wurde von der homogenen Referenzpopulation (ref) und der heterogenen Population aus Rollstuhlfahrern und Personen ohne Behinderung (whe) durchlaufen. Zur Kontrolle von Abweichungen fand eine Wiederholung jedes Durchgangs statt; die Entfluchtung startete durch ein akustisches Signal.²⁵¹ Folgende Tab. 1 zeigt die Anzahl der Teilnehmer mit und ohne Behinderung für beide Szenarien. Der Anteil der Rollstuhlfahrer entspricht in den heterogenen Populationen ca. 7,6 Prozent.

²⁴⁹ Quelle: Geoerg et al.: The Influence of Wheelchair Users. 2019, S. 3

²⁵⁰ vgl. Geoerg et al.: The Influence of Wheelchair Users. 2019, S. 3

²⁵¹ vgl. Geoerg et al.: The Influence of Wheelchair Users. 2019, S. 2

Tab. 1: Anzahl der Teilnehmer pro Durchlauf ²⁵²

Durchlauf	Population	Anzahl ²⁵³
Bot_whe	Referenz	85 (83)
	Rollstuhl	7
Bot_ref	Referenz	69
	Rollstuhl	-
Cor_whe	Referenz	85 (86)
	Rollstuhl	7
Cor_ref	Referenz	68 (69)
	Rollstuhl	-

5.1.3 Ergebnisse

Die Aufzeichnung der Bewegungen fand durch neun hochauflösende Kameras an der Hallendecke mit 25 Frames pro Sekunde statt: Jeder Teilnehmer trug je nach Körpergröße eine farbige Kappe, somit konnte im Nachhinein eine automatische Extraktion der Positionen einer jeden Person während der Bewegung für jeden Frame stattfinden.²⁵⁴ Als Grundlage für weitere Forschung wurden die Ergebnisse in Form von Videos und Trajektorien öffentlich zur Verfügung gestellt.²⁵⁵ Innerhalb von umfassenden Textdateien sind für jeden Durchlauf die Bewegungskoordinaten jedes Versuchsteilnehmers pro Frame aufgelistet. Die innerhalb dieser Arbeit verwendeten Daten befinden sich im digitalen Anhang.

Zusätzlich wurde die freie Bewegungsgeschwindigkeit jedes Probanden gemessen und als Standardverteilung für jede Population in Form von Mittelwert [Standardabweichung; Minimum - Maximum] bereitgestellt:

Tab. 2: Freie Bewegungsgeschwindigkeit der Populationen ²⁵⁶

Durchlauf	Geschwindigkeit	Population
Heterogen (whe)	1,45 [0,17; 0,63 - 1,82]	Referenz
	0,96 [0,35; 0,45 - 1,41]	Rollstuhl
Homogen (ref)	1,47 [0,17; 1,08 - 1,86]	Referenz
	-	Rollstuhl

²⁵² Quelle: eigene Darstellung basierend auf Geoerg et al.: The Influence of Wheelchair Users. 2019, S. 4

²⁵³ Anmerkung: teilweise abweichende Personenanzahl bei Wiederholung des Durchgangs (in Klammern)

²⁵⁴ vgl. Geoerg et al.: The Influence of Wheelchair Users. 2019, S. 3 f.

²⁵⁵ Anmerkung: Zu finden in Geoerg et al.: Influence of individual characteristics. 2017

²⁵⁶ Quelle: eigene Darstellung basierend auf Geoerg et al.: The Influence of Wheelchair Users. 2019, S. 5

Insgesamt wurde eine starke Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit der Teilnehmer mit Behinderungen von ihren individuellen Merkmalen wie beispielsweise der Bewegungsfähigkeit und aufgrund derer eine hohe Standardabweichung festgestellt.²⁵⁷

5.2 Vergleichsparameter und Vorgehen

Dieses Kapitel stellt die Vergleichsparameter zur Ermöglichung des Vergleichs zwischen Studiendaten und Simulationsergebnissen vor. Anschließend wird das Vorgehen bezüglich der Vergleiche beschrieben.

Wie in Kapitel 3 erläutert, sind bei der Beurteilung von Entfluchtungen aus Versammelungsstatten zur Sicherstellung der Personensicherheit – auch vor dem Hintergrund der Selbstrettung – die Evakuierungsduer und der Entfluchungsverlauf von besonderer Bedeutung. Zur Bewertung dieser Kriterien im Hinblick auf die Abbildbarkeit der Entfluchtung werden folgende Vergleichsparameter herangezogen: GegenUbergestellt werden die Evakuierungsgraphen und die absolute Entfluchungsduer der Studie und Simulation sowie zusätzlich Personendichte, -fluss und -geschwindigkeit im Zeitverlauf.

Mithilfe des Evakuierungsgraphen und der daran abzulesenden Entfluchungsduer kann das Kriterium der Dauer bewertet werden. Zudem ist eine Beurteilung des Verlaufs der Entfluchtung und grundlegender Unterschiede möglich. Zur Darstellung der Evakuierungsgraphen der Studie erfolgt durch entsprechende Programmierung des Tabellenkalkulationsprogramms Excel die Auslesung der benötigten Daten aus circa 120.000 Koordinaten pro Lauf. Dabei werden die Zeitpunkte des Erreichens des sicheren Bereichs ($x \geq 2,4 \text{ m}$) jeder Person gespeichert und aufsteigend sortiert.

Die Betrachtung von Personendichte, -fluss und -geschwindigkeit im Zeitverlauf dient der detaillierten Begutachtung des Entfluchungsverlaufs. Zur Berechnung der Grundgrößen werden feste Messstellen definiert, innerhalb derer das Personenaufkommen zu jedem Zeitpunkt gemessen bzw. ausgelesen wird. Aus den Summenkurven des Ein- und des Austritts lassen sich die mittleren Grundgrößen berechnen. Folgende Tab. 3 definiert Position und Größe der Messstellen. Diese sind in Abb. 14 und Abb. 15 innerhalb der modellierten Geometrien sichtbar.

²⁵⁷ vgl. Geoerg et al.: The Influence of Wheelchair Users. 2019, S. 5 f.

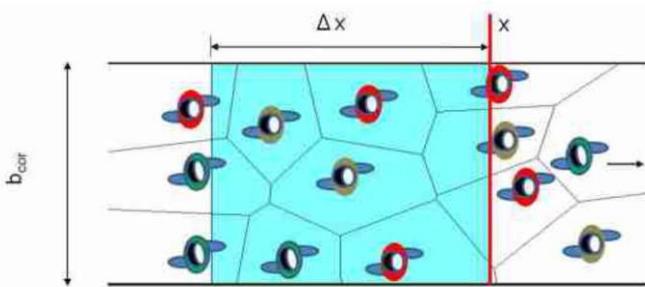
Tab. 3: Position und Maße der Messstellen (eigene Darstellung)

Szenario	Name	x-Position	Länge (Δx)	Breite (b_{cor})	Fläche
Korridor	Mess	-3,2 bis -1,2 m	2 m	1,2 m	2,4 m ²
Flaschenhals	MessEin	-6,8 bis -4,8 m	2 m	3,6 m	7,2 m ²
	MessAus	-2,4 bis -0,4 m	2 m	3,6 m	7,2 m ²
	MessEng	0,4 bis 2 m	1,6 m	1,2 m	1,9 m ²

Zur Begutachtung des Einflusses der Engstelle auf die Grundgrößen in der Flaschenhals-Situation befinden sich drei Messstellen am Eingang der Geometrie, am Ausgang vor der Engstelle und innerhalb der Engstelle. Die Messstelle des Korridors ist in Fluchtrichtung mittig positioniert. Anzumerken ist hier, dass abhängig von der Position der Messstellen und der eingenommenen Fläche die berechneten Grundgrößen variieren und somit zu anderen Ergebnissen und Interpretationen führen können.

Die „Messung“ der Studie erfolgt anhand der Auslesung der Zeitpunkte der Messlinien-Überschreitungen aus den Bewegungskoordinaten, erneut durch entsprechende Programmierung von Excel. In PedGo werden virtuelle Türen als Messlinien und Logpoints, welche das Personenaufkommen ausgegeben, in die Geometrie eingefügt (siehe Abb. 15). In beiden Fällen stimmen die Positionen der Messlinien und Flächen der Messstellen überein: Die Überprüfung ist innerhalb der Logpoints-Auswertung möglich.

Die Methodik zur Berechnung der mittleren Grundgrößen basiert auf den Messmethoden A-C nach Zhang.²⁵⁸ Abb. 13 zeigt schematisch eine Messstelle mit links befindlicher Eintrittslinie ($N_{in} = x - \Delta x$) und rechter Austrittslinie ($N_{out} = x$). Um Dichte und Geschwindigkeit zu berechnen, werden beide Messlinien betrachtet, für den Fluss lediglich letztere.

**Abb. 13: Schematische Darstellung einer Messstelle**²⁵⁹

Zur Berechnung der Dichte wird die Personenanzahl in der Messstelle zu jedem Zeitpunkt kalkuliert ($N = N_{in} - N_{out}$) und durch die Messstellenfläche $A = b_{cor} \cdot \Delta x$ geteilt:²⁶⁰

²⁵⁸ vgl. Zhang et al.: Transitions in pedestrian fundamental diagrams. 2011, S. 3 ff.

²⁵⁹ Quelle: Zhang et al.: Transitions in pedestrian fundamental diagrams. 2011, S. 5

²⁶⁰ vgl. Zhang et al.: Transitions in pedestrian fundamental diagrams. 2011, S. 6

$$\langle p \rangle_{\Delta x} = \frac{N}{b_{cor} \cdot \Delta x}$$

Die Geschwindigkeit einer Person berechnet sich aus der Länge Δx der Messstelle und der benötigten Zeit zum Passieren dieser, d. h. der Differenz zwischen Eintrittszeitpunkt t_{in} und Austrittszeitpunkt t_{out} .²⁶¹

$$\langle v \rangle_i = \frac{\Delta x}{t_{out} - t_{in}}$$

Zur Kalkulation des mittleren Personenflusses pro Sekunde wird die Anzahl der Personen, welche die hintere Messlinie x innerhalb eines Bezugsintervalls Δt passieren, betrachtet und durch dieses dividiert.²⁶²

$$\langle J \rangle_{\Delta t} = \frac{N_{\Delta t}}{t_{N_{\Delta t}}}$$

Die Verwendung eines Bezugsintervalls erfolgt, um große Fluktuationen des Flusses bei der Darstellung als Graph zu vermeiden (wie es bei Berechnung pro Sekunde der Fall ist). Statt eines Bezugsintervalls von $\Delta t = 10$ s nach Zhang²⁶³ wird ein 5-sekündiges Intervall verwendet, da aufgrund der kurzen Entfluchtung ansonsten Änderungen des Flusses graphisch kaum sichtbar sind. Die Flussbetrachtung erfolgt in Form des spezifischen Flusses, um einen Vergleich des Flusses für die verschiedenen Wegbreiten des Flaschenhalses zu ermöglichen.

Das Vorgehen zum Vergleich der empirischen Daten und Simulationsergebnisse ist Folgendes: Erster Schritt ist die Prüfung der grundlegenden Plausibilität der Simulation anhand der homogenen Population mithilfe der entsprechenden Evakuierungskurven. Daraufhin wird die Anwendbarkeit der Simulation ohne Parameteränderung auf die heterogene Gruppe sowie der Unterschied zur Simulation mit angepassten Parametern für die heterogenen Gruppe untersucht – ebenfalls anhand der Evakuierungskurven. Durch weitere Anpassung der Parameter wird anschließend eine Annäherung des Evakuierungsgraphen an den realen Entfluchtungsverlauf angestrebt und die Auswirkung beurteilt. Abschließend folgt die Betrachtung des simulierten Verlaufs von Dichte, Fluss und Geschwindigkeit im Vergleich zur realen Evakuierung. Nähere Erläuterungen diesbezüglich finden sich in den entsprechenden Kapiteln des Ergebnisteils.

²⁶¹ vgl. Zhang et al.: *Transitions in pedestrian fundamental diagrams*. 2011, S. 6

²⁶² vgl. Zhang et al.: *Transitions in pedestrian fundamental diagrams*. 2011, S. 3

²⁶³ vgl. Zhang et al.: *Transitions in pedestrian fundamental diagrams*. 2011, S. 7

5.3 Modellierung der Geometrien

Die beiden Geometrien beider Szenarien werden im Editor PedEd basierend auf den Maßen der Szenarien der Studie erstellt, um die Grundlage für einen direkten Vergleich zu schaffen. Simulationsrelevant sind die Dimensionierung der begehbaren Bereiche und des Wartebereichs der Population sowie die Positionierung der Zielzellen und Messlinien der Messstellen zur Auswertung der Ergebnisse.

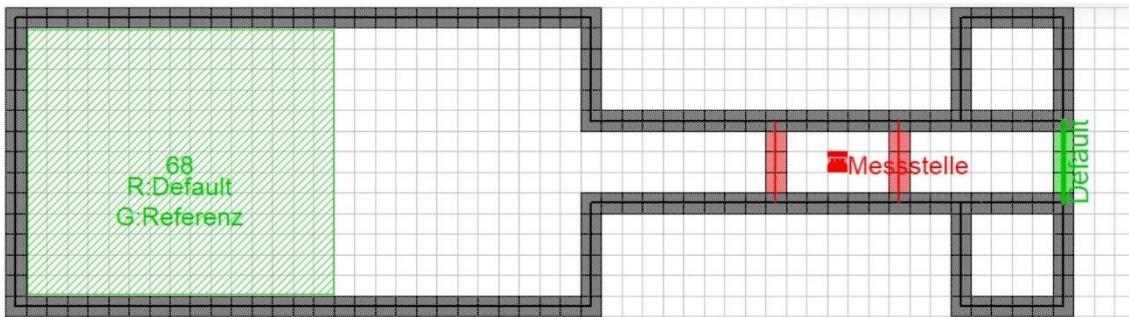


Abb. 14: Grundriss des Korridors in PedEd (eigene Darstellung)

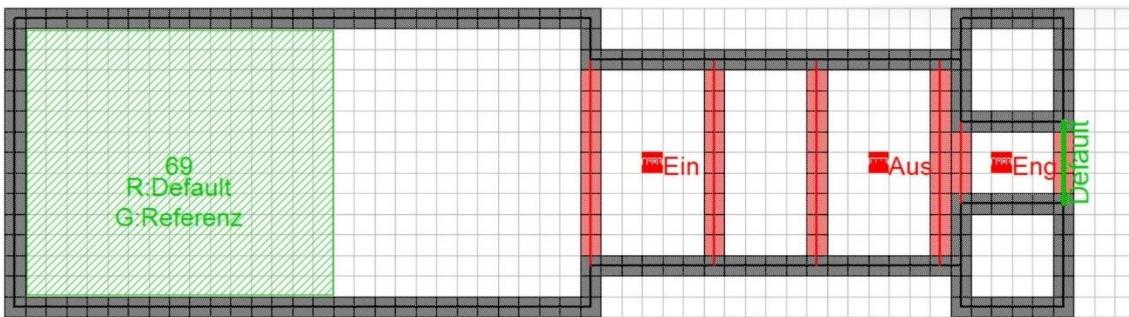


Abb. 15: Grundriss des Flaschenhals-Szenarios in PedEd (eigene Darstellung)

Obige Abb. 14 und Abb. 15 zeigen beide Grundrisse in PedEd: Wandzellen werden schwarz, Zielzellen grün und virtuelle Türen rot dargestellt. Anhand der Zellgröße sind die Breite ($b = 1,2 \text{ m}$) und Länge ($l = 2,4 \text{ m}$) des Engpasses zu erkennen. Die Zielzellen sind entsprechend dem sicheren Bereich der Studie positioniert. Die Startposition der Population (hier: Referenzpopulation) im Wartebereich wird durch die grün schraffierte Fläche sichtbar und entspricht mit zufälliger Verteilung auf circa 30 m^2 in korrektem Abstand zur Engstelle der Studiensituation. Die Anpassung der Teilnehmerzahl erfolgt entsprechend des jeweiligen Studiendurchlaufs (siehe Tab. 1). Die Modellierung der Messlinien wird mithilfe virtueller Türen realisiert, welche weder Geschwindigkeit noch Verhalten der Agenten beeinflussen, und das Agentenaufkommen durch dazwischen positionierte Logpoints gezählt.

Anzumerken ist die nicht exakt mögliche Darstellung der Geometrie aufgrund der Zellgröße von $40 \times 40 \text{ cm}$. Die Korridor- und Engstellenbreite von $1,2 \text{ m}$ und auch die Länge von $2,4 \text{ m}$ können als Vielfache von 40 cm exakt abgebildet werden. Der 6 m lange

Wartebereich mit einer Fläche von 30 m² kann jedoch nur mit einer Breite von 5,2 m (13 × 40 cm) statt 5 m nachgebildet werden.

5.4 Parameterauswahl zur Modellierung der Population

Wie bereits in den Grundlagenkapiteln 3.3.2 und 4.2 erläutert, ist die Wahl und Einstellung der Personenparameter ein wesentlicher Faktor der realitätsnahen Modellierung und somit Simulation einer Entfluchtung. Nach RiMEA müssen die verwendeten Parameter abhängig vom simulierten Szenario begründet, dokumentiert und mit entsprechenden Quellen belegt werden.²⁶⁴ Die Auswahl und RiMEA-konforme Begründung der Parameter zur Eingabe in die Simulationssoftware findet im Folgenden statt.

Zur Modellierung beider Populationen der heterogenen Gruppe werden zuerst die Parameter der Referenzpopulation festgelegt und diese anschließend für die Population der Rollstuhlfahrer angepasst.

Jede Simulation findet mit 500 Durchläufen statt, das heißt, die Personenparameter werden, basierend auf dieser Auswahl, je Simulation 500-mal unter den Agenten neuverteilt.

5.4.1 Parameter der Referenzpopulation

Zur Modellierung der Referenzpopulation wird die standardisierte Verteilung der Demographie-Parameter von PedGo zur Darstellung einer Durchschnittspopulation verwendet (siehe Abb. 9). Angepasst werden die Parameter der Reaktion und der Geschwindigkeit, wie folgende Tab. 4 mit der Parameterauswahl für die Referenzpopulation zeigt:

Tab. 4: Parameterauswahl – Referenzpopulation (eigene Darstellung)

	Einheit	Min	Max	Mean	Std-Dev.
Geschwindigkeit (Vmax)	c/s	2 / 3 ²⁶⁵	5	4	1
Geduld (Patience)	s	-	-	-	-
Schwanken (Sway)	1	1	5	3	2
Reaktion (Reaction)	s	0	0	0	0
Trödeln (Dawdle)	%	0	30	15	5
Trägheit (Inertia)	1	1	5	3	2

Die Anpassung der Geschwindigkeit erfolgt basierend auf der innerhalb der Studie gemessenen Geschwindigkeit der Referenzpopulation (Tab. 2). Die als Standardverteilung in Meter pro Sekunde (m/s) angegebenen Werte werden in Zellen pro Sekunde (c/s)

²⁶⁴ vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 8

²⁶⁵ Anmerkung: Unterschiedliche gemessene Laufgeschwindigkeit bei Durchlauf nur der Referenzpopulation und der Referenzgruppe mit Rollstuhlfahrern innerhalb der Studie (siehe Tab. 2)

umgerechnet, müssen dabei allerdings aufgrund der Zellgröße gerundet werden und sind deswegen nicht exakt eingebar. Die gemessene Geschwindigkeit der Referenzpopulation entspricht annährend der PedGo-Standardverteilung, ist jedoch minimal höher.

Die Reaktionszeit wird entsprechend einer schnellen Räumung nach Definition der RiMEA²⁶⁶ auf 0 Sekunden gesetzt, da aufgrund der von den Studienteilnehmern erwarteten Entfluchtung auf Signal ein gleichzeitiges Reagieren und damit hohes Personen-aufkommen angenommen wird.

Es erfolgt keine Einstellung einer Gruppenbildung, da es keine Kenntnis über Zusam-mengehörigkeiten unter den Versuchsteilnehmern gibt. Zudem werden aufgrund der Tat-sache, dass es innerhalb der untersuchten Geometrien nur einen Fluchtweg und nicht mehrere Räume mit verschiedenen Fluchtmöglichkeiten gibt, keine Routen vorgegeben.

5.4.2 Parameter der Rollstuhlfahrer-Population

Die Rollstuhlfahrer werden aufgrund ihrer abweichenden Bewegungseigenschaften in der Simulation als einzelne Population modelliert. Da innerhalb von PedGo keine direkte Auswahl von Rollstuhlfahrern oder Änderung des Flächenbedarfs einzelner Personen möglich ist, kann die Anpassung ausschließlich über die Parameter erfolgen. Zur Modellierung werden die zuvor erläuterten Parameter der Referenzpopulation angepasst. Fol-gende Tab. 5 zeigt die Parameter der Population aus Rollstuhlfahrern:

Tab. 5: Parameterauswahl – Rollstuhlfahrer (eigene Darstellung)

	Einheit	Min	Max	Mean	Std-Dev.
Geschwindigkeit (Vmax)	c/s	1	4	2	1
Geduld (Patience)	s	5000	5000	-	-
Schwanken (Sway)	1	1	1	0	0
Reaktion (Reaction)	s	0	0	0	0
Trödeln (Dawdle)	%	0	50	25	250
Trägheit (Inertia)	1	1	5	3	2

Auch hier erfolgt eine Anpassung der Geschwindigkeit basierend auf der gemessenen Geschwindigkeit der Studie (siehe Tab. 2), erneut werden die Werte durch Rundung in c/s umgerechnet. Die Reaktionszeit wird auch hier aufgrund einer schnellen Entfluchtung auf 0 Sekunden gesetzt.

Zur Anpassung der übrigen vier Parameter (Geduld, Schwanken, Trödeln und Trägheit) für Rollstuhlfahrer existieren weder Hinweise im Handbuch der Software noch Richtwerte zur Orientierung in der RiMEA oder dem vfdb-Leitfaden. Auch lässt sich keine

²⁶⁶ vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 9

entsprechende Forschung als wissenschaftliche Grundlage zur Begründung der Auswahl dieser Parameter finden.

Den einzigen Anhaltspunkt bietet die Veröffentlichung einer Evakuierungssimulation mit Rollstuhlfahrern von Klüpfel²⁶⁷, einem Mitgründer PedGos: Dementsprechend werden die restlichen Parameter darauf basierend angepasst. Die Benutzung der Parameter erfolgt innerhalb der Veröffentlichung jedoch ohne Begründung. Der Wert für die Geduld wurde darin sehr hoch angesetzt, wodurch bewirkt wird, dass auch in einem Stau keine Änderung des Fluchtwegs durch Agenten stattfindet. Der Parameter des Schwankens wurde auf ein Minimum reduziert, somit erfolgt die Bewegung gerichteter und der Agent folgt seinem Potenzialverlauf genau. Die Werte des Trödelns wurden erhöht, hierdurch wird das Stehenbleiben beispielsweise zur Orientierung wahrscheinlicher. Die Trägheit wurde nicht angepasst, sodass die Wahrscheinlichkeit des Beibehaltens der Laufrichtung gleich ist wie innerhalb der Referenzpopulation.

Für die Rollstuhl-Population wird aus gleichen Gründen wie zuvor keine Gruppenbildung und Routen-Vorgabe eingestellt.

²⁶⁷ Bendel und Klüpfel: Accessibility and Evacuation Planning. 2011, S. 708

6. Simulationsergebnisse

Innerhalb dieses Kapitels werden die Ergebnisse der durchgeföhrten Simulationen graphisch visualisiert und den Ergebnissen der Studie gegenübergestellt. Zuerst werden der Methodik entsprechend die Evakuierungsgraphen der homogenen, dann die der heterogenen Population betrachtet, anschließend eine weitere Anpassung der Parameter vorgenommen und schließlich erfolgt die Betrachtung der Grundgrößen Dichte, Fluss und Geschwindigkeit im Zeitverlauf der Fluchtbewegung.

Die betrachteten Diagramme sind in diesem Kapitel zur Ermöglichung eines übersichtlichen Vergleichs nebeneinander positioniert, eine größere Abbildung dieser befindet sich ebenso wie die zugrundeliegenden, von PedGo ausgegebenen Ergebnisdateien und die Daten der Studie im digitalen Anhang.

6.1 Evakuierungsgraphen

In diesem Teil des Kapitels erfolgt die vergleichende Darstellung der simulierten und realen Evakuierungsgraphen. Innerhalb folgender Diagramme sind jeweils die evakuierten Personen in Abhängigkeit zur Zeit dargestellt. Die schwarzen Graphen zeigen dabei jeweils die beiden Durchläufe der realen Entfluchtung der Studie, wobei der längere Lauf, d. h. der rechte Graph, immer der erste Durchgang ist. Die übrigen Graphen zeigen die prägnanten Durchläufe der Simulation: Von Bedeutung sind hier vor allem der mittlere und der signifikante Lauf (rot und blau), zusätzlich sind minimaler und maximaler Lauf abgebildet – zur besseren Sichtbarkeit der anderen in grau.²⁶⁸

6.1.1 Plausibilitätsprüfung anhand homogener Referenzpopulation

Zuerst erfolgt der Vergleich der Entfluchtung der homogenen Referenzpopulation innerhalb der Studie und der Simulation mit Referenzparametern (siehe 5.4) zur Prüfung der grundlegenden Plausibilität der Simulation. Folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse der Flaschenhals-Situation (links) und der Korridor-Situation (rechts)²⁶⁹:

²⁶⁸ Anmerkung: Darstellung des mittleren und signifikanten Laufs exakt pro Person, des minimalen und maximalen in 10-Personen-Schritten, sodass bei Letzteren aufgrund der interpolierten Punkte bereits ab t = 0 s eine Steigung sichtbar ist.

²⁶⁹ Anmerkung: Referenzpopulation (N = 68 / 69) in Studie kleiner als heterogene Population

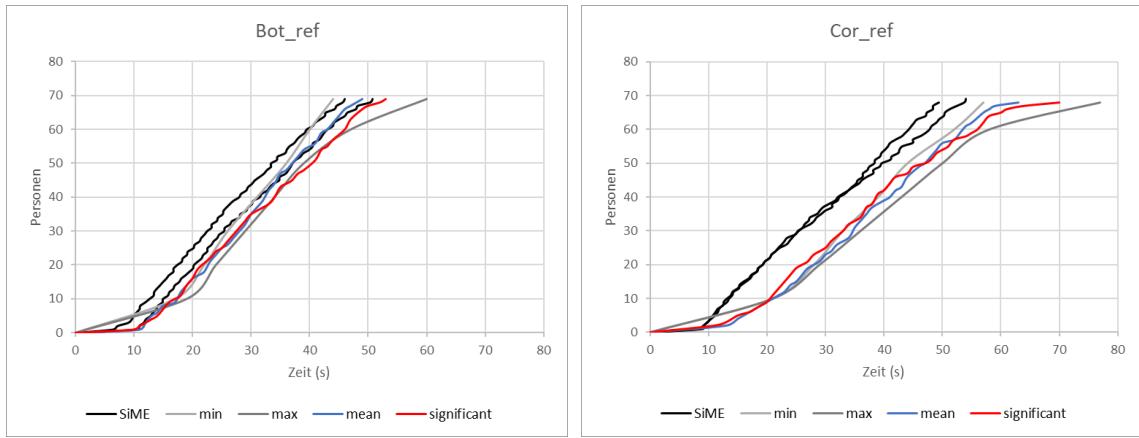


Abb. 16: Entfluchtung der Referenzpopulation mit Referenzparametern (eigene Darstellung)

Das linke Diagramm in Abb. 16 zeigt, dass bei der Simulation der **Flaschenhals**-Situation die berechnete mittlere und signifikante Evakuierungskurve dem ersten Studien-durchgang sehr ähnlich sind. So entspricht die mittlere Dauer der Dauer des ersten realen Durchlaufs mit einer Sekunde Abweichung ($t_{mean} = t_{SiME1} - 1$ s). Alle berechneten Zeiten sind mit Ausnahme des minimalen Laufs länger als die des zweiten Studiendurch-gangs. Die Entfluchtung beginnt sowohl in Realität als auch in der Simulation zum gleichen Zeitpunkt (1. Lauf) und verläuft weitgehend linear ohne deutliche Verzögerungen: Die stetige Steigung zeigt den stetigen Personenfluss. Die Graphen zeigen eine gute Abbildung der realen Situation durch die Simulation.

Die reale Entfluchtung aus dem **Korridor** dauert minimal länger als aus der Flaschen-hals-Situation ($t_{Evak} + 3$ s). Hier überschneiden sich die Evakuierungskurven beider realen Durchläufe anfangs, insgesamt dauert der erste Durchgang jedoch (wie in der Flaschen-hals-Situation) 5 Sekunden länger. Der lineare Verlauf wird auch hier linear durch die Simulation abgebildet, jedoch ist erst ab $t = 13$ s eine stärkere Steigung sichtbar, welche am Ende der Bewegung erneut abnimmt, sodass die kalkulierte Evakuierungszeit insge-samt höher ist ($t_{mean} = t_{SiME1} + 10$ s).

Die realen und berechneten Zeiten werden zusätzlich tabellarisch gegenübergestellt:

Tab. 6: Entfluchtdauer der Referenzpopulation (eigene Darstellung)

	Bot_ref	Cor_ref
mean	50 s	64 s
significant	54 s	71 s
min	44 s	57 s
max	60 s	77 s
SiME 1	51 s	54 s
SiME 2	46 s	49 s

Die Evakuierungsdauer wurde für die Flaschenhals-Situation minimal höher und für den Korridor zu hoch kalkuliert. Insgesamt entsprechen die simulierten Entfluchtungsverläufe annähernd den realen – sowohl in der Flaschenhals- als auch in der Korridor-Situation.

6.1.2 Anwendbarkeit der Referenzparameter und Kalibrierung für heterogene Gruppe

Zur Prüfung der Verwendbarkeit der Referenzparameter zur Simulation der heterogenen Population und zum Vergleich der Simulation nach Parameter-Kalibrierung folgt zunächst die Betrachtung der **Flaschenhals-Situation**: Es sind die Ergebnisse der unkalibrierten Simulation, d. h. mit Parametern der Referenzpopulation für alle Teilnehmer, und der kalibrierten Simulation mit angepassten Parametern für Rollstuhlfahrer (RiMEA-konform begründet, siehe 5.4) gegenübergestellt.

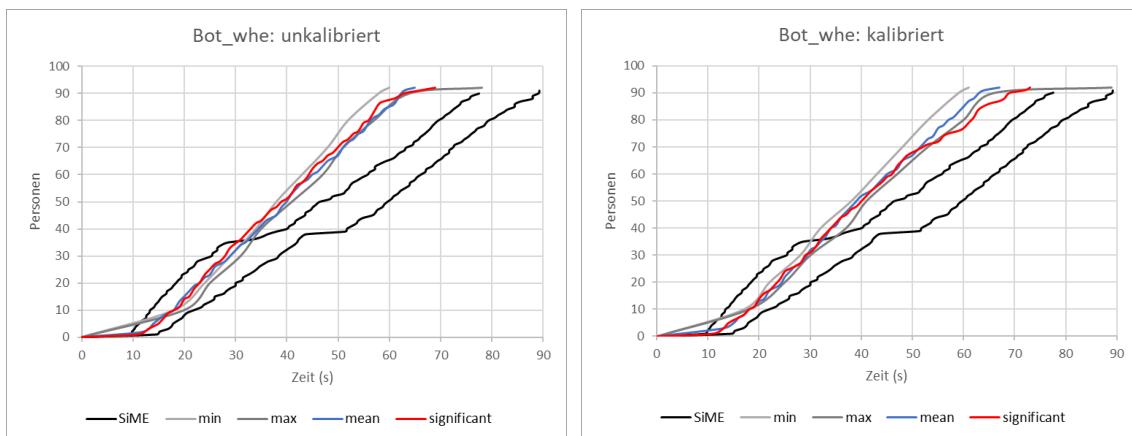


Abb. 17: Entfluchtung heterogener Population – Flaschenhals (eigene Darstellung)

Im Vergleich zur Evakuierung der Referenzpopulation lässt sich in Abb. 17 erkennen, dass die Entfluchtung der heterogenen Population in beiden realen Durchgängen eine weniger lineare Entfluchtungskurve aufweist. Beide reale Entfluchungen zeigen mit einem zeitlichen Versatz eine Verzögerung der Entfluchtung, sichtbar an der temporär geringen Steigung der Graphen – ab etwa 35 evakuierten Personen bei beiden Durchläufen ($t = 43\text{--}52$ s bei 1. Durchlauf).

Im Verlauf der **unkalibrierten Simulation** (links) ist eine deutliche Abweichung von der realen Entfluchtung zu sehen: Der Graph verläuft deutlich linearer und nicht wie in Realität mit Verzögerung. Die berechnete mittlere und signifikante Dauer sind hierdurch kürzer als die Dauer der realen Evakuierung. Selbst die berechnete maximale Dauer entspricht nur der kürzeren realen Dauer.

Im Vergleich zeigen auch die Graphen der **kalibrierten Simulation** (rechts) mit RiMEA-konformer Begründung der Parameter für Rollstuhlfahrer kaum einen Unterschied – sowohl im Verlauf als auch bezüglich der Dauer (siehe auch Tab. 7). Zwar wird der Graph

des signifikanten Simulationslaufs durch die Kalibrierung minimal dem zweiten, kürzeren realen Lauf angenähert, eine Abbildung der realen Bewegung wird trotzdem nicht erzielt: Dauer und Verlauf mit Verzögerung werden durch die deutlich linearer berechneten Evakuierungskurven nicht dargestellt. Zu sehen ist, dass der maximal berechnete Lauf trotz abweichenden Verlaufs die Dauer des ersten realen Laufs aufweist. Die Steigung des maximalen Graphen ab ca. $t = 65$ s zeigt, dass dies der Fall ist, weil die letzten drei Personen die Entfluchtung um etwa 24 s verzögern.

Ähnliche Beobachtungen können bei der Gegenüberstellung der kalibrierten und unkali-brierten Simulation der **Korridor-Situation** gemacht werden:

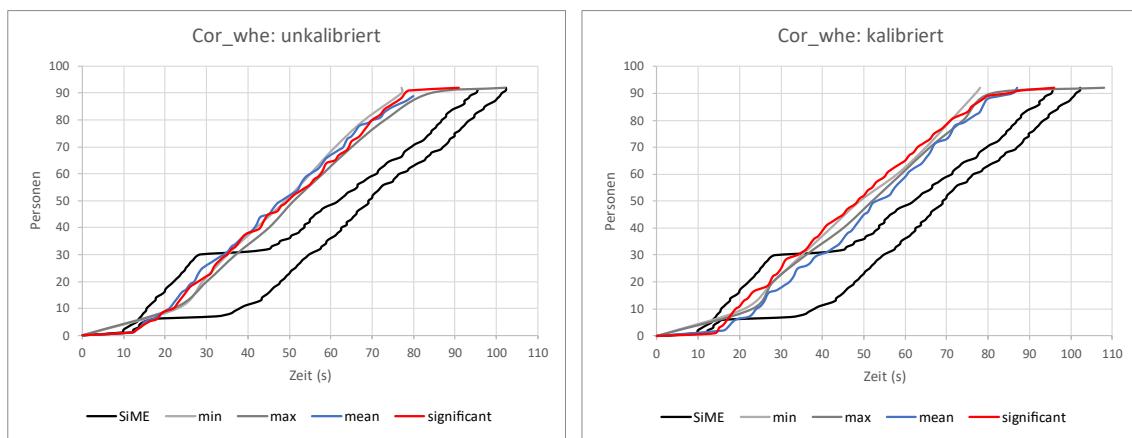


Abb. 18: Entfluchtung heterogener Population – Korridor (eigene Darstellung)

Auch hier ist der Verlauf der realen Entfluchtungen nicht linear, die Verzögerung tritt jedoch früher auf als in der Flaschenhals-Situation ($t = 28\text{--}45$ s bei Durchlauf 2). Insgesamt dauert die Entfluchtung des Korridors im ersten Durchlauf 4 s länger als im zweiten und 13 s länger als die Evakuierung der Flaschenhals-Situation.

Die **unkalibrierte Simulation** der Korridor-Entfluchtung weist eine deutlich linearere Evakuierungskurve auf und bildet die variierende Steigung der realen Durchläufe nicht ab. Trotzdem weicht die Dauer des signifikanten Laufs um nur 4 Sekunden von der des zweiten realen Durchgangs ab, da die Steigung – wie zuvor beim maximalen Lauf der Flaschenhals-Situation – am Ende stark abnimmt und einzelne Agenten die Dauer verzögern ($t = 78\text{--}92$ s). Aus diesem Grund entspricht die maximal berechnete Entfluch-tungszeit der realen Dauer des ersten Durchlaufs.

Auch hier ist nur eine minimale Annäherung der Graphen durch die **Simulation mit ka-librierten Parametern** zu beobachten: Verlauf und Steigung der Graphen ändern sich ebenfalls nicht und eine Abbildung der realen Verzögerungen ist nicht gegeben. Die kaluierten Zeiten erhöhen sich nur wenig und das erneut hauptsächlich aufgrund von Ver-zögerung durch wenige letzte Agenten bei signifikanter und maximaler Dauer. Aus

diesem Grund entspricht die signifikante Dauer hier (mit Abweichung von einer Sekunde) der kürzeren realen Evakuierung und die maximal berechnete Dauer übertrifft die Dauer des längeren realen Durchlaufs. Der Graph des mittleren Laufs beispielsweise zeigt keine so deutlich sinkende Steigung am Ende und prognostiziert aufgrund dessen eine zu kurze Entfluchtungszeit ($t_{mean} = t_{SiME2} - 10$ s).

Im Diagramm sichtbare Feststellungen zeigen sich auch in den absoluten Entfluchtungszeiten, welche in folgender Tabelle gegenübergestellt sind:

Tab. 7: Entfluchtungsdauer der heterogenen Population (eigene Darstellung)

	Bot_whe		Cor_whe	
	unkalibriert	kalibriert	unkalibriert	kalibriert
mean	66 s	68 s	85 s	88 s
significant	70 s	74 s	92 s	97 s
min	60 s	61 s	77 s	78 s
max	78 s	89 s	102 s	108 s
SiME 1		89 s		102 s
SiME 2		78 s		98 s

Tab. 7 zeigt, dass sich durch die Parameteranpassung sowohl in der Flaschenhals- als auch in der Korridor-Situation die berechneten Zeiten nur geringfügig erhöhen und die signifikante Dauer die reale Entfluchtungszeit nicht prognostiziert. Lediglich die maximal berechnete Dauer für beide Szenarien erreicht den Wert der längeren realen Entfluchtung. Die jeweilige signifikante Dauer der kalibrierten Simulationen kommt der kürzeren realen Dauer nah, liegt jedoch in beiden Fällen darunter und entsteht nur durch die verzögerte Entfluchtung weniger letzter Agenten.

Insgesamt lässt sich für beide Situationen feststellen, dass die unkalibrierte Simulation mit Referenzparametern keine Abbildung der realen Evakuierung ermöglicht. Gleichermaßen ist wegen der zu gering kalkulierten Dauer und des unpassenden Verlaufs bei der kalibrierten Simulation der Fall – trotz begründeter Anpassung der Parameter. Diese Feststellung wirft die Frage auf, ob weitere Parameteranpassungen eine Annäherung an die Graphen der realen Evakuierung ermöglichen. Dies wird im folgenden Kapitel betrachtet.

Eine genauere Betrachtung der Verzögerungen mithilfe des Personenflusses, der Dichte und Geschwindigkeit erfolgt in Kapitel 6.3.

6.2 Parameteranpassung zur Annäherung der Evakuierungsgraphen

Innerhalb dieses Kapitels erfolgt eine weitere Anpassung der Parameter zur Annäherung des Verlaufs der Evakuierungsgraphen der Simulation an die reale Entfluchtungskurve.

Dafür werden folgende Änderungen der kalibrierten Parameter vorgenommen, teilweise basierend auf Richtwerten anderer Veröffentlichungen (siehe Verweise):

Tab. 8: Parameteranpassungen – Flaschenhals (eigene Darstellung)

Nr.	Population	Anpassung	Richtwert
1	Rollstuhl	Geschwindigkeit: 2 c/s (gleichverteilt)	Bendel und Klüpfel ²⁷⁰
2	Rollstuhl	Geschwindigkeit: 2 c/s (gleichverteilt)	
	Referenz	Geschwindigkeit: PedGo-Standard	PedGo ²⁷¹
3	Rollstuhl	Geschwindigkeit: 2 c/s (gleichverteilt), Sway: 4 (gleichverteilt)	
	Referenz	Geschwindigkeit: PedGo-Standard	
4	Rollstuhl	Sway: 4 (gleichverteilt)	
5	Rollstuhl	Sway: 10, Inertia: 10 (gleichverteilt)	
6	Rollstuhl	Geschwindigkeit: 1 c/s (gleichverteilt)	RiMEA ²⁷² , Weidmann ²⁷³

Zur Untersuchung der Auswirkung der Parameteranpassungen zeigt folgendes Diagramm in Abb. 19 anhand des Evakuierungsverlaufs die Veränderung der Simulationsergebnisse. Der Vergleich wird zugunsten der Übersichtlichkeit anhand des signifikanten Verlaufs der Simulation durchgeführt, da dieser sich zuvor der realen Entfluchtung zeitlich am nächsten zeigte und die Verwendung durch die RiMEA empfohlen wird²⁷⁴. Innerhalb der Diagramme sind die zum Vergleich relevanten realen Entfluchtungsverläufe erneut schwarz dargestellt sowie die kalibrierte Simulation aus vorherigem Kapitel 6.1.2 rot. Die Darstellung der Evakuierungsgraphen mit Parameteranpassung erfolgt in 10-Personen-Schritten, die dem realen Verlauf nächste Anpassung wird exakt abgebildet.

²⁷⁰ vgl. Bendel und Klüpfel: Accessibility and Evacuation Planning. 2011, S. 707

²⁷¹ siehe Abb. 9: Dialogfenster mit PedGo-Standardparametern

²⁷² vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 9

²⁷³ vgl. Weidmann: Transporttechnik der Fussgänger. 1993, S. 40

²⁷⁴ vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 13

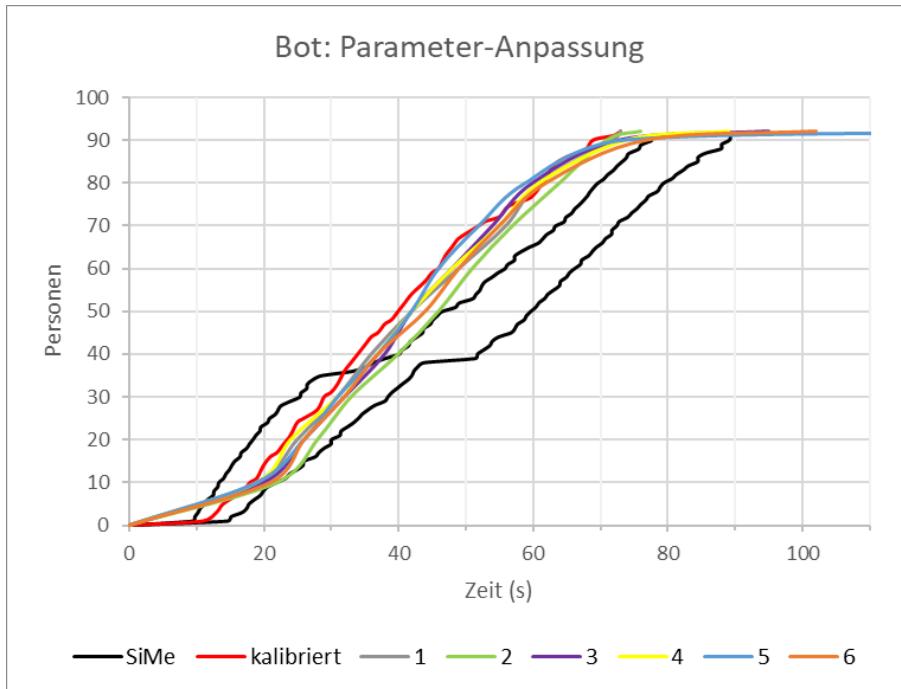


Abb. 19: Parameteranpassung – Flaschenhals (eigene Darstellung)

Das Diagramm in Abb. 19 zeigt für keine der Parameteranpassungen aus Tab. 8 einen deutlich veränderten Verlauf im Vergleich zur kalibrierten Simulation mit begründeten Parametern. Durch einige der Anpassungen zeigt sich eine leichte Annäherung an die reale Kurve, der Verlauf bleibt jedoch linear und die variierende Steigung der realen Evakuierungskurve wird nicht abgebildet.

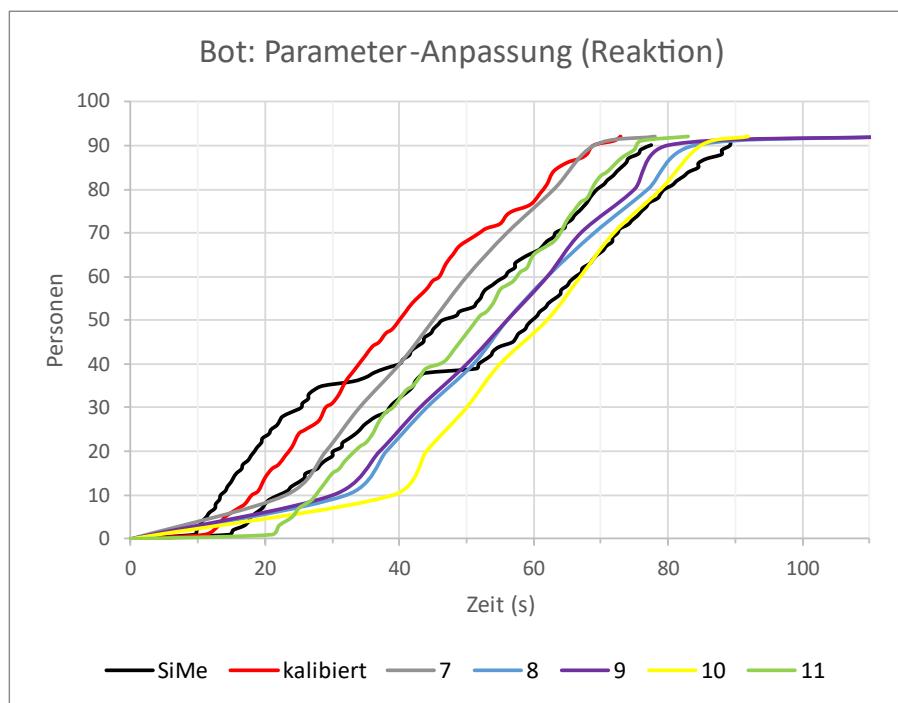
Durch Anpassung 2 der Geschwindigkeit (siehe Graph 2 in grün) nähert sich die Evakuierungskurve der zweiten, kürzeren realen Entfluchtung leicht an, bildet jedoch den Verlauf ebenfalls nicht ab und die berechnete Dauer ist zu kurz. Graph 4 durch Änderung des Sway-Parameters der Rollstuhl-Population erreicht durch eine geringere Steigung am Ende (Verzögerung durch einzelne Agenten) die reale längere Dauer des ersten Durchlaufs, kann aber ebenso den Verlauf nicht abbilden. Ersichtlich wird also, dass sich die Dauer der Entfluchtung innerhalb der Simulation durch die Reduzierung der Geschwindigkeit und Erhöhung der Parameter Sway und Inertia verlängern und damit der realen Dauer annähern lässt, den Evakuierungsverlauf ändert dies jedoch kaum.

Insgesamt ist mit den genannten Parameteranpassungen innerhalb der Simulation keine zufriedenstellende Anpassung des Evakuierungsverlaufs an die Realität möglich. Folgend wird deswegen die Anpassung des Parameters der Reaktionszeit vorgenommen und seine Auswirkung untersucht – einerseits basierend auf Richtwerten (siehe Verweise in Tab. 9), andererseits durch weitere Annäherung mithilfe intermediärer Werte. Die Anpassung der Reaktion wird für beide Populationen wie folgt vorgenommen:

Tab. 9: Parameteranpassungen der Reaktion für Flaschenhals (eigene Darstellung)

Nr.	Anpassung	Richtwert
7	Reaktion: (0, 10, 5, 2)	PedGo-Standard ²⁷⁵
8	Reaktion: (0, 60, 30, 300)	Bendel und Klüpfel ²⁷⁶
9	Reaktion: (0, 60, 0, 0)	RiMEA (zügige Räumung) ²⁷⁷
10	Reaktion: (0, 40, 20, 2)	
11	Reaktion: (0, 20, 10, 2)	

Die resultierenden Graphen in Abb. 20 zeigen, dass auch die Anpassung des Parameters der Reaktion keine Möglichkeit bietet, den Kurvenverlauf der realen Entfluchtung inklusive Verzögerungen nachzubilden. Jedoch kann eine größere Streuung der Ergebnisse beobachtet werden als durch die vorherigen Anpassungen: Durch Variation des Parameters werden die Reaktionen der Agenten teilweise verzögert, die Evakuierungsgraphen steigen später und werden dem realen Verlauf dadurch zeitlich angenähert.

**Abb. 20: Parameteranpassung der Reaktion – Flaschenhals (eigene Darstellung)**

Der bestmöglich an den realen Entfluchtungsverlauf angenäherte Graph entsteht durch Anpassung 11 (siehe Graph 11 in grün). Seine signifikante Dauer liegt zeitlich zwischen den Dauern beider realer Durchläufe, trotzdem ist keine Abbildung des realen Verlaufs

²⁷⁵ siehe Abb. 9: Dialogfenster mit PedGo-Standardparametern

²⁷⁶ vgl. Bendel und Klüpfel: Accessibility and Evacuation Planning. 2011, S. 707

²⁷⁷ vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 9

gegeben, denn auch dieser simulierte Graph verläuft nach wie vor linear. Im letzten Teil des Kapitels (siehe 6.3) folgt zusätzlich die detaillierte Betrachtung des Verlaufs von Personenfluss, -dichte und -geschwindigkeit dieser angenäherten Simulation.

Auf Basis der Erkenntnisse der Parameteranpassung für die Flaschenhals-Situation erfolgt die Anpassung der Reaktionszeit für beide Populationen innerhalb des Korridors:

Tab. 10: Parameteranpassungen – Korridor (eigene Darstellung)

Nr.	Anpassung
1	Reaktion: (0, 20, 10, 2)
2	Reaktion: (0, 30, 15, 2)

Das Diagramm in Abb. 21 zeigt, dass die zweite Anpassung der Reaktion den Verlauf des ersten realen Entfluchtungsdurchlaufs innerhalb des Korridors annährend abbildet. Dennoch lässt sich vor allem am Anfang der Entfluchtung ein Unterschied erkennen:

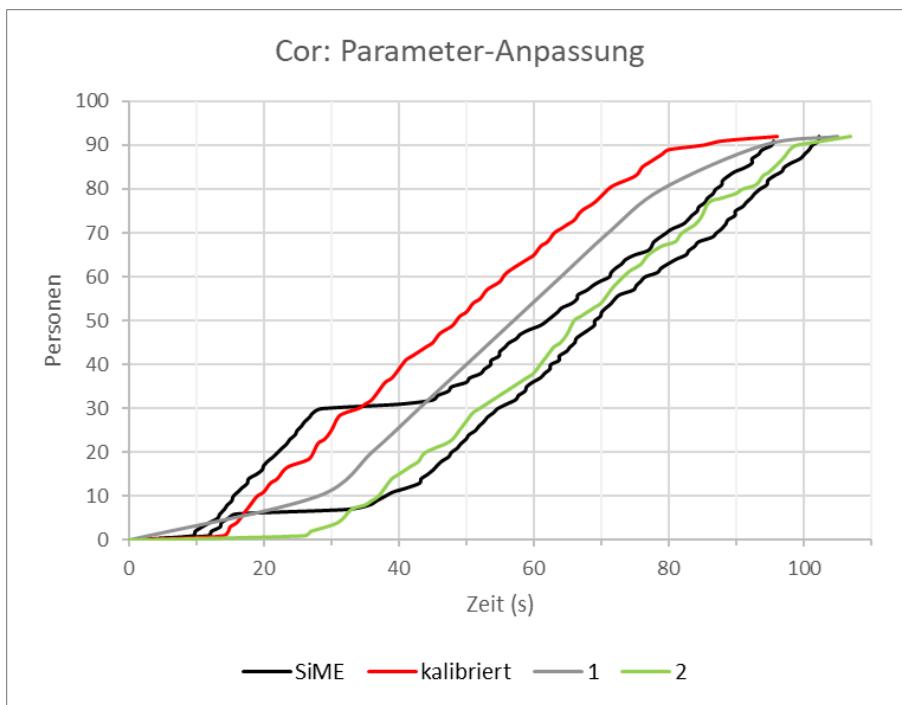


Abb. 21: Parameteranpassung – Korridor (eigene Darstellung)

Innerhalb der Simulation werden die ersten Agenten später ($t = 26$ s) evakuiert, der Graph nimmt anschließend einen linearen Verlauf, während in Realität im 1. Durchlauf bereits nach 15 s sechs Personen geflohen sind und die Steigung des Graphen daraufhin bis $t = 35$ s stagniert, bevor er wieder steigt. Trotz der guten Abbildung des ersten Durchgangs ab 35 s ist wie zuvor nur eine lineare Darstellung des Evakuierungsverlaufs möglich und die anfängliche Verzögerung wird nicht dargestellt. Eine deutliche Abweichung vom zweiten Durchlauf ist zu erkennen. Insgesamt ist die berechnete signifikante

Dauer durch Anpassung Nr. 2 länger als die Dauer des realen längeren Durchlaufs ($t_{sig} = t_{SiME1} + 5 \text{ s}$).

6.3 Personendichte, -fluss und -geschwindigkeit im Zeitverlauf

Für die in Kapitel 6.1 kalibrierte Simulation und die durch Parameteranpassung in 6.2 angenäherte Simulation werden der Verlauf von Dichte, Fluss und Geschwindigkeit über die Zeit betrachtet und ein Vergleich mit dem realen Verlauf dieser Grundgrößen vorgenommen. Dazu wird der erste, langsamere Durchlauf der Studien-Entfluchtung verglichen. Eine größere Version der Diagramme findet sich auch hier im digitalen Anhang.

Zuerst erfolgt die Betrachtung des **Korridors** an der festgelegten Messstelle (siehe Methodik): Die Diagramme zeigen von links nach rechts die Verläufe der realen Entfluchtung der Studie (Cor_SiME), der angepassten und angenäherten Simulation (Cor_nah) und der kalibrierten Simulation (Cor_kalibriert). Die schwarzen Graphen (MessIn und MessOut) zeigen jeweils die Summenkurven der Messlinien-Überschreitungen der Personen, das heißt des Ein- und Austritts in bzw. aus der Messstelle. Hieraus sind nach den in 5.2 genannten Formeln die Dichte, Fluss und Geschwindigkeit zu jedem Zeitpunkt berechnet, welche in folgenden Diagrammen der Abb. 22 grau, blau und gelb dargestellt sind.

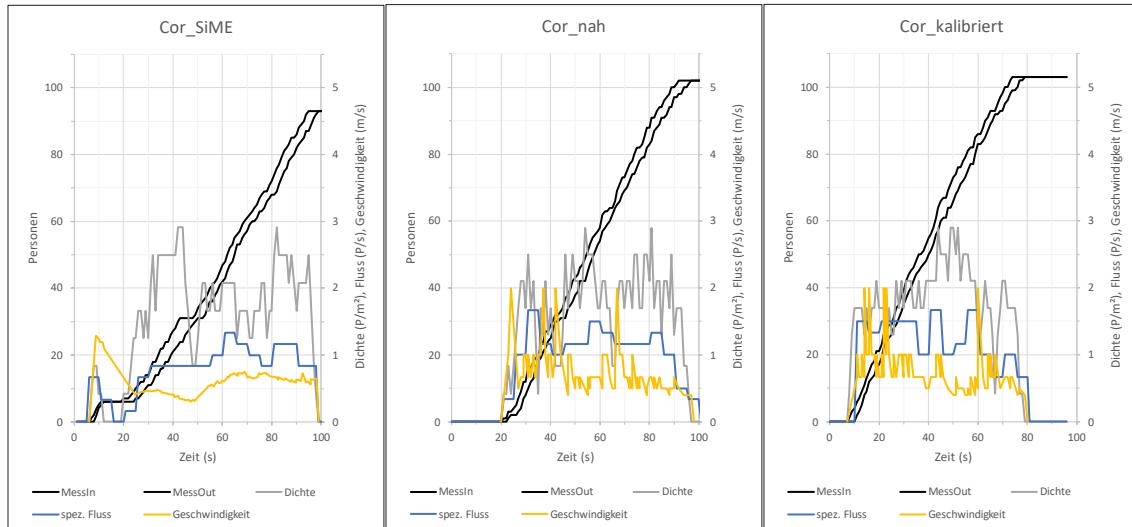


Abb. 22: Dichte, Fluss und Geschwindigkeit im Zeitverlauf – Korridor (eigene Darstellung)

Der Vergleich der Diagramme in Abb. 22 zeigt einen grundsätzlich ähnlichen Verlauf der Graphen: Dichte, Fluss und Geschwindigkeit steigen ab einem bestimmten Zeitpunkt, schwanken und sinken am Ende des Fluchtvorgangs wieder. Während die Entfluchtung des realen und angepassten Graphen etwa nach 100 s endet und die Grundgrößen deswegen ihren Nullpunkt erreicht haben, endet der kalibrierte Graph zu früh bei circa 80 s.

Auffällig und nicht in der Simulation abgebildet ist die Tatsache, dass in Realität bereits nach 6 s ein Personenfluss vorhanden ist, welcher mit einer erhöhten Geschwindigkeit der Personen einhergeht. Zum Zeitpunkt $t = 16$ s ist kein Fluss mehr vorhanden, dieser steigt ab $t = 20$ s jedoch erneut mit geringerer Steigung als in der Simulation. Diesen Unterschied zeigen auch die Summenkurven, welche bei beiden Simulationen linearer verlaufen als in Realität – wie bereits bei den zuvor betrachteten Evakuierungsgraphen.

Insgesamt ist der Personenfluss mit durchschnittlich 1 P/s in Realität etwas geringer als innerhalb der Simulation. Nach $t = 20$ s ist der Fluss zwar schwankend, aber immer vorhanden, dies ist auch innerhalb der Simulationen der Fall. Alle Größen unterliegen innerhalb der Simulation mehr Fluktuationen als in Realität: So lassen sich in der Geschwindigkeit einzelne Maxima von 2 m/s erkennen, ansonsten schwanken die Graphen der Simulationen wie real um etwa 0,75 m/s. Die reale Dichte unterliegt zudem größeren Schwankungen als in der Simulation. Das Maximum von circa 3 P/m² entspricht etwa den errechneten Maximaldichten.

Der Vergleich der kalibrierten und angepassten Simulation zeigt außer der zeitlichen Verschiebung keine deutliche Veränderung bezüglich des grundlegenden Verlaufs der Grundgrößen durch die Anpassung des Reaktion-Parameters. Im Diagramm der angepassten Simulation sind jedoch ein weniger starker Anstieg des Flusses zu Beginn und ein im Schnitt etwas geringerer Fluss (ca. 1,25 P/s) zu erkennen, wodurch die Entfluchtung etwa 20 s länger dauert. Dies entspricht einer Annäherung an die Realität, wie bereits am Evakuierungsgraphen in 6.2 beobachtet werden konnte.

Die Abbildung der Grundgrößen in der Simulation mit angepasstem Reaktions-Parameter entspricht annährend der Realität. Die frühe Entfluchtung einzelner Personen und anschließende Verzögerung zu Beginn der realen Entfluchtung wird allerdings nicht abgebildet.

Auffällig ist die erhöht gezählte Anzahl der Agenten an den Messlinien der Simulation durch die Logpoints in PedGo, erkennbar an den höheren Maxima der Personen-Summenkurven im Vergleich zur realen Entfluchtung. Dieser Fehler tritt sowohl innerhalb des Korridors als auch bei der folgenden Betrachtung der Flaschenhals-Situation auf, dort vor allem vor der Engstelle. Die Agentenzählung in MessEng ist korrekt. In beiden Szenarien verbessert eine Verschiebung der Messstellen diese falsche Zählung der Personen nicht, sondern erhöht sie zusätzlich. Somit gibt es keine Möglichkeit zur Verbesserung der Zählung, auch eine Filterung der nicht korrekten Durchgangszeiten ist nicht möglich. Die Entstehung und Auswirkung dieses Messfehlers auf die Ergebnisse werden innerhalb der Diskussion besprochen.

Die Betrachtung der **Flaschenhals**-Situation erfolgt anhand der innerhalb der Methodik genannten drei Messstellen am Eingang der Geometrie (MessEin), vor der Engstellen (MessAus) und innerhalb der Engstelle (MessEng). Die folgende Abb. 23 zeigt innerhalb jeder Zeile die zeitlichen Verläufe von Dichte, Fluss und Geschwindigkeit über die Zeit innerhalb dieser drei Messstellen. Die Darstellung der Diagramme entspricht der gleichen Reihenfolge wie die der Messstellen innerhalb der Geometrie – von links nach rechts der Fluchtbewegung folgend. Die horizontale Betrachtung ermöglicht somit die des Verlaufs der Entfluchtung. Die erste Zeile zeigt die Diagramme der realen Studien-Entfluchtung, die zweite die des angenäherten Verlaufs und die dritte die der kalibrierten Simulation. Ein vertikaler Vergleich der Zeilen untereinander ermöglicht den Vergleich der Grundgrößen innerhalb der Messstellen in Realität und den Simulationen.

Simulationsergebnisse



Abb. 23: Dichte, Fluss, Geschwindigkeit im Zeitverlauf – Flaschenhals (eigene Darstellung)

Bei Betrachtung des Verlaufs der Grundgrößen innerhalb der Messstellen der realen Entfluchtung können folgende Beobachtungen gemacht werden: In der ersten Messstelle **MessEin** steigen Fluss und Geschwindigkeit zu Beginn (ab ca. 6 s) stark auf 1 P/s bzw. 1 m/s an und fallen danach bis $t = 69$ s annähernd exponentiell ab, während die Dichte konstant steigt, nach etwa 32 s ihr Maximum von circa 3 P/m² erreicht und danach wieder sinkt, bis sie nach 69 s ebenfalls ihren Nullpunkt erreicht. Die Messstelle wird somit von der letzten Person nach 69 s verlassen. Es herrscht zwischenzeitlich eine erhöhte, jedoch nicht kritische Dichte: Der Personenfluss kommt nicht zum Erliegen. Das Diagramm der zweiten Messstelle **MessAus** zeigt einen ähnlichen Geschwindigkeitsverlauf wie zuvor. Der Fluss ist mit leichten Schwankungen um 0,4 P/s durchschnittlich geringer, 41 s nach Beginn wird für etwa 5 s kein Fluss gemessen – dies geht einher mit einem lokalen Minimum der Dichte (0,5 P/m²), nicht jedoch mit einer Reduzierung der Geschwindigkeit und ist in beiden Summenkurven sichtbar. Insgesamt ist die Dichte mit einem Maximum von 2 P/m² geringer als in MessEin. In der Messstelle **MessEng** innerhalb der Engstelle unterliegen alle Grundgrößen deutlichen Schwankungen. Generell ist zu sehen, dass die durchschnittliche Geschwindigkeit mit etwa 1 m/s höher ist als in MessEin und MessAus, ebenso wie der Fluss mit ca. 1 P/s. Auch hier ist ein gemeinsames lokales Minimum von Fluss und Dichte (0 P/s und P/m²) um $t = 45$ s sichtbar. Ansonsten liegt die maximale Dichte wie in MessAus bei circa 2 P/m².

Beim (vertikalen) **Vergleich der Simulationsergebnisse** untereinander kann kein starker Einfluss durch die Anpassung der Reaktionszeit auf den grundlegenden Verlauf von Dichte, Fluss und Geschwindigkeit festgestellt werden: Die Verläufe der Grundgrößen sind in angepasster und kalibrierter Simulation sehr ähnlich. Der Unterschied ist eine Verschiebung von Bot_nah in Richtung der x-Achse und damit zeitliche Annäherung an den realen Ablauf, wie bereits am Evakuierungsgraph zu sehen. Deswegen folgt der Vergleich der realen Graphenverläufe mit der angepassten Simulation (Bot_nah).

Es kann festgestellt werden, dass die Personen-Summenkurven an allen drei Messstellen deutlich linearer sind als in Realität (wie auch bei den Evakuierungskurven). Die vergleichende Betrachtung der einzelnen Messstellen der Simulation ergibt Folgendes: An der Messstelle **MessEin** ist der Personenfluss temporär höher, jedoch kürzer vorhanden als in Realität, das heißt, die Agenten passieren die Messstelle deutlich schneller: Trotz des Eintretens des Personenstroms etwa zum selben Zeitpunkt findet der Austritt nach 50 s anstelle 70 s statt. Das etwas geringere Maximum der Dichte liegt bei 2,5 P/m², wird aber ebenfalls nach etwa 30 s erreicht. Die Geschwindigkeit steigt zu Beginn wie in Realität stark an und fällt anschließend: Es sind zwei abweichende Maxima von 2 m/s zu erkennen, ansonsten liegt die maximale Geschwindigkeit wie real bei 1 m/s. In der

Messstelle **MessAus** werden aufgrund des Logpoints-Messfehlers von PedGo 32 Agenten zu viel gezählt – acht in MessEin und korrekte Zählung in MessEng. Der Graph der Geschwindigkeit weist einen ähnlichen Verlauf wie in Realität auf, jedoch mit Maxima von 2 m/s bei Eintritt und Austritt des Personenstroms in bzw. aus der Messstelle. Die Aufenthaltsdauer des Personenstroms in der Messstelle ist erneut kürzer. Der Fluss ist etwas höher als in Realität (durchschnittlich circa 0,75 P/s), aber korrekt abgebildet geringer als in Messstelle MessEin. Das Maximum der Dichte ist mit 5 P/m² deutlich höher als in Realität: Dort liegt es bei 2 P/m² und ist im Vergleich zu MessEin nicht gestiegen – anders als hier. Die realen lokalen Minima von Dichte und Fluss werden in der Simulation nicht abgebildet. Die Grundgrößen unterliegen auch in **MessEng** der Simulation stärkeren Schwankungen, die Realität abbildend. Das Maximum der Dichte ist mit 3 P/m² höher, sowie auch der durchschnittliche Fluss. Es existiert auch hier kein Nullpunkt des Fluxes, wie es in Realität der Fall ist. Der erhöhte Fluss im Vergleich zu MessAus entspricht der Realität. Der Verlauf der Geschwindigkeit ist ähnlich und zeigt ab 40 s einen ähnlichen Durchschnitt, zu Beginn sind jedoch erneut Maxima von 2 m/s zu erkennen. Der Personenstrom verlässt die Messstelle etwa 7 s früher als im realen Verlauf.

Insgesamt tritt innerhalb der Simulation an allen Messstellen ein höherer Personenfluss auf, welcher allerdings jeweils kürzer vorhanden ist. Die Reduktion des Fluxes vor und der Anstieg nach der Engstelle wird jedoch abgebildet und der Geschwindigkeitsverlauf an den Messstellen in der Simulation ist der Realität ähnlich. Nicht korrekt ist die Abbildung der Dichte, besonders vor der Engstelle.

7. Diskussion

In diesem Kapitel erfolgt die Diskussion der vorherigen Ergebnisse. Ziel ist die Validierung oder Falsifizierung der Simulation für heterogene Ströme und somit die Beantwortung der Frage, inwiefern sich die Entfluchtung heterogener Gruppen aus Menschen mit und ohne Behinderung aus Versammlungsstätten mithilfe der Simulationssoftware PedGo abbilden lässt. Erster Teil ist die Diskussion der Anwendung des Programms für den Nutzer, anschließend werden die Simulationsergebnisse im Vergleich zu den Ergebnissen der Studie diskutiert. Dieses Kapitel abschließend folgt eine kritische Betrachtung bezüglich der Grenzen dieser Forschung.

7.1 Diskussion der Programm-Anwendung

Vor der ergebnisorientierten Diskussion der Simulation erfolgt die anwendungsorientierte Beurteilung des Programms: Die Möglichkeiten zur Modellierung der Geometrien innerhalb des Editors und der Population durch entsprechende Parameterwahl des Nutzers werden qualitativ bewertet.

7.1.1 Modellierung der Geometrien

Die Möglichkeit zur korrekten Modellierung der räumungsrelevanten Details der Geometrie ist ein Kriterium der Leistungsfähigkeit und Aussagekraft eines Personenstrommodells.²⁷⁸ Diesbezüglich können folgende Feststellungen gemacht werden:

Die Abbildung der Geometrien beider hier betrachteter Szenarien innerhalb des Zellgitters ist (mit Ausnahme des Wartebereichs mit einer Abweichung von 20 cm) möglich und wird damit als ausreichend genau bewertet. Allerdings kann die Abbildung in 40-cm-Schritten aufgrund der Zellgröße in anderen Fällen, beispielsweise bei Betrachtung von Engstellen mit abweichender Dimensionierung, möglicherweise problematisch sein und die Simulationsergebnisse im Hinblick auf die Erkennung von Stauungen beeinflussen. Ebenso ist die Positionierung der Zielzellen und damit Berechnung der Evakuierungsdauer eventuell nicht exakt möglich.

Durch die 0,16 m² großen Zellen, innerhalb derer sich die Personen im Modell fortbewegen, ist die Abbildung der Standfläche einer stehenden Person, nicht jedoch von Rollstuhlfahrern möglich: Unabhängig von Stau oder freier Bewegung liegt diese aufgrund der Größe eines Rollstuhls bei mindestens 1,20 x 0,9 m (siehe 2.3.3), etwa sechs PedGo-Zellen entsprechend. Die Berechnung der Personendichte ist dadurch nicht

²⁷⁸ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 346

korrekt möglich. Die maximal mögliche Dichte unter Anwesenheit von Rollstuhlfahrern liegt auch im Stau unter der Dichte ohne sie. Die innerhalb von PedGo anhand der Dichte vorgenommene Staubewertung ist damit ebenfalls inkorrekt.

Räumungsrelevant im Sinne der Barrierefreiheit sind zudem weitere innerhalb der DIN18040 (siehe 2.3.3) geregelte Elemente wie Türschwellen, Bodenbeschaffenheit, Steigungen etc., welche innerhalb der Geometrie nicht modelliert werden können, jedoch potenziell eine signifikante Auswirkung auf die Entfluchtungszeit von Rollstuhlfahrern und allen Beteiligten haben.

7.1.2 Modellierung der Population

Neben der Möglichkeit zur korrekten Modellierung der Geometrie sollte die Population mit individuellen Eigenschaften wie dem Platzbedarf, der Gehgeschwindigkeit und der Mobilität modelliert werden können, damit das Personenstrommodell als leistungsfähig und aussagekräftig bewertet werden kann.²⁷⁹

In diesem Zusammenhang kann festgestellt werden, dass als Vorlage nur der Standard-Parametersatz einer Durchschnittspopulation wählbar ist: Eine direkte Wahl von Rollstuhlfahrern oder Anpassung der Mobilität ist nicht möglich. Auch eine Möglichkeit zur Erhöhung des Flächenbedarfs auf sechs Zellen, um die fehlenden Überholungsmöglichkeiten sowie die Dichte richtig darzustellen, ist nicht gegeben. Eine Anpassung an abweichende Eigenschaften innerhalb heterogener Gruppen ist somit nur über die Variation der Parameter und damit eingeschränkt möglich.

Die Parameterwahl zur Modellierung von Rollstuhlfahrern ist für den Anwender schwer zu treffen: Diesbezüglich finden sich kaum Richtwerte im PedGo-Handbuch, der RiMEA oder dem vfdb-Leitfaden und auch an wissenschaftlichen Grundlagen bezüglich der Bewegung von Rollstuhlfahren zur konkreten Festlegung der Parameter mangelt es. Eine RiMEA-konforme Begründung der Parameter ist dadurch kaum möglich.

Nur hinsichtlich der Reaktionszeit im Allgemeinen und der Geschwindigkeit für mobilitätseingeschränkte Personen lassen sich in der RiMEA Richtwerte finden. Auffällig ist hier die deutliche Abweichung der in der Studie gemessenen Geschwindigkeit der Rollstuhlfahrer von der Empfehlung der RiMEA. Wie bereits in 3.2.1 erwähnt, wird für Personen mit beeinträchtigter Mobilität ein Richtwert²⁸⁰ vorgegeben. Betrachtet man allerdings die dafür angegebene Quelle, sind innerhalb derer lediglich

²⁷⁹ vgl. Zehfuß: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 2020, S. 346

²⁸⁰ vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 10

Geschwindigkeiten für mobilitätseingeschränkte Personen über 50 Jahren angegeben²⁸¹, nicht bezüglich jüngerer Personen mit Behinderung oder Rollstuhlfahrer. Ansonsten empfiehlt die RiMEA zur Auswahl der Geschwindigkeit die Verwendung der Werte nach Weidmann²⁸²: Dieser gibt die Geschwindigkeit von Rollstuhlfahrern in der Ebene mit 0,5 m/s an²⁸³ und liegt damit deutlich unter der Messung der Studien (siehe Tab. 2). Diese wiederum wird durch eine von Jeffery et. al. ähnlich gemessene Durchschnittsgeschwindigkeit von 1,11 m/s²⁸⁴ bekräftigt.

Zu bedenken ist, dass im Fall dieser Arbeit konkrete Messwerte der Geschwindigkeit zur Modellierung der Population vorlagen. Dies ist jedoch bei Durchführung von Simulationen nicht immer der Fall und die Auswahl sinnvoller Parameter wird durch die von Studienergebnissen abweichenden Richtwerte zusätzlich erschwert. Hier werden reliable und realistische Richtwerte benötigt. Hinzu kommt die nicht exakte Möglichkeit zur Eingabe der Geschwindigkeit aufgrund der Rundung in Zellen pro Sekunde – selbst wenn genaue Werte vorliegen.

Ein weiteres Kriterium realitätsnaher Simulation von Entfluchtungen ist die Abbildbarkeit der Interaktionsebene, das heißt die „Abbildung von sozialer Interaktion und dem Verhalten im Zusammenwirken mit der Umgebung“²⁸⁵. Während die Geometrie und Eigenschaften der Population beeinflussbar sind und sich (bedingt) an die tatsächliche Situation anpassen lassen, lässt sich das Verhalten zwischen den Agenten im Modell nicht ändern, obwohl dies zur Modellierung des menschlichen Verhaltens nötig wäre: Die Gruppenbildung innerhalb der Population und die Routenwahl lassen sich zwar definieren und damit allgemeine menschliche Verhaltensweisen (siehe 3.4) abhängig von der Situation teilweise anpassen, die veränderte Interaktion aller Personen bei der Entfluchtung unter Anwesenheit von Rollstuhlfahrern und in heterogenen Gruppen generell (siehe 3.4.4) ist jedoch nicht einstellbar bzw. implementiert.

Selbst die RiMEA weist eingangs darauf hin, dass die Berücksichtigung aller realen Einflüsse mit Blick auf das Verhalten des Menschen aufgrund des Mangels an wissenschaftlichen Erkenntnissen nicht möglich ist und nur durch statistische Variation auf Grundlage der Parameterwahl berücksichtigt wird.²⁸⁶ Zur Prüfung, ob dies zur Generierung realistischer Ergebnisse ausreicht, werden im Folgenden die Simulationsergebnisse diskutiert.

²⁸¹ vgl. International Maritime Organization: Guidelines on Evacuation Analyses. 2016

²⁸² vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 9

²⁸³ vgl. Weidmann: Transporttechnik der Fussgänger. 1993, S. 40

²⁸⁴ vgl. Rankin et al.: Individual muscle contributions to push and recovery subtasks. 2011, S. 1247

²⁸⁵ Kneidl und Simon: Crowd Simulation als Planungswerkzeug für Veranstaltungen. 2021, S. 549 f.

²⁸⁶ vgl. RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. 2022, S. 4

7.2 Diskussion der Simulationsergebnisse

Die Zusammenfassung und Interpretation der Simulationsergebnisse werden in diesem Kapitel vorgenommen und folgen der gleichen Struktur wie der des Ergebnisteils. Die entsprechenden Gliederungspunkte sind verknüpft.

Plausibilitätsprüfung anhand homogener Referenzpopulation

Insgesamt kann die Simulation der Entfluchtung der Referenzpopulation mit Referenzparametern in Flaschenhals- und Korridorsituation als passend bewertet werden. Der lineare Verlauf wird weitgehend linear abgebildet. Die berechnete signifikante Dauer übertrifft in beiden Szenarien beide reale Dauern und befindet sich jeweils näher am längeren, ersten Durchlauf in unbekannter Umgebung. Die Simulation entspricht damit der Realität ausreichend genau.

Anwendbarkeit der Referenzparameter und Kalibrierung für heterogene Gruppe

Die Simulation der heterogenen Population mit Referenzparametern ohne Parameter-Kalibrierung ermöglicht keine Darstellung der realen Evakuierung: Weder Dauer noch Verlauf des nicht linearen realen Graphen werden abgebildet. Diese Tatsache zeigt die Notwendigkeit der Parameter-Anpassung für die heterogene Teilpopulation.

Doch auch die Simulation der heterogenen Population mit Parameter-Kalibrierung führt entgegen der Erwartung nicht zur Abbildung des Realverlaufs. Es kann lediglich eine minimale Änderung des Graphenverlaufs und Annäherung der Dauer beobachtet werden. Der nicht lineare Verlauf der realen Entfluchtung mit Verzögerung wird weder in der Korridor- noch in der Flaschenhals-Situation abgebildet.

Anhand der Graphen wird für den maximalen und signifikanten Lauf beider Szenarien eine Verzögerung der Entfluchtdauer aufgrund einzelner Personen und dadurch Annäherung der berechneten Entfluchtszeit an die reale Dauer festgestellt. Bei Be- trachtung der entsprechenden Simulationen in PedGo ist zu beobachten, dass einzelne Agenten am Ende der Flucht orientierungslos durch die Geometrie schwanken, während alle anderen diese bereits verlassen haben, und die Entfluchtung damit verzögern.

In beiden Szenarien entspricht die maximale berechnete Dauer eher der Dauer des längeren Realdurchlaufs als die signifikante Dauer, weshalb auch bei kalibrierten Parametern die Verwendung dieses Werts als Richtdauer zu empfehlen ist.

Insgesamt ist die Abbildung der Entfluchtung der heterogenen Gruppe für keine der beiden Szenarien möglich – wie erwartet weder mit Referenzparametern noch entgegen der Erwartung mit angepassten, RiMEA-konform begründeten Parametern für die Teilpopulation der Rollstuhlfahrer.

Parameteranpassung zur Annäherung der Evakuierungsgraphen

Die Frage, ob weitere Parameteranpassungen eine Annäherung an Graphen der realen Entfluchtung ermöglichen, wird im Folgenden beantwortet. Es kann festgestellt werden, dass die Variation der Parameter **Geschwindigkeit, Sway und Inertia** – begründet oder nicht – keine Änderung des Verlaufs der Evakuierungsgraphen bewirkt, diese lediglich zeitlich der realen Dauer angenähert werden. Dies ist vor allem bei Maximierung der Parameter Sway und Inertia, welche das Schwanken und die Trägheit der Agenten verstärken (siehe 4.2), der Fall: Bei Betrachtung der Simulation kann, wie bereits zuvor, ein grundloses Hinterher-Schwanken einzelner weniger Agenten beobachtet werden – hier jedoch in höherem Maße.

Die Anpassung des Parameters der **Reaktion** für beide Teilpopulationen (Referenz und Rollstuhlfahrer) bietet eine Möglichkeit zur Annäherung des simulierten Verlaufs an die reale Evakuierungskurve. Die simulierte Korridor-Entfluchtung bildet mit entsprechend angepasster Reaktionszeit die längere reale Entfluchtung annährend ab, da diese weitgehend linear verläuft. Die anfängliche nicht lineare Verzögerung wird jedoch nicht abgebildet. Aus diesem Grund wird mit angänherter Kurve für die Flaschenhals-Situation zwar die signifikante Dauer korrekt kalkuliert, der Verlauf mit Verzögerungen kann jedoch erneut nicht abgebildet werden.

Die Annäherung an den realen Entfluchtungsverlauf erfolgt in diesem Fall zudem lediglich durch experimentelles Anpassen der Reaktionszeit – hier mit Wahl von Werten zwischen den Richtwerten (PedGo, RiMEA, Bendel und Klüpfel – siehe 6.2). Eine RiMEA-konforme Begründung der Parameter ist nicht möglich und die Parameterwahl damit wenig sinnvoll für die praktische Anwendung des Simulationsprogramms ohne reale Vergleichsdaten zur Kalibrierung.

Personendichte, -fluss und -geschwindigkeit im Zeitverlauf

Bezüglich der Messung der Grundgrößen ist folgendes anzumerken: Aufgrund der Länge der Messstelle von 2 m und der Ausgabe der Messlinien-Überschreitungen von PedGo in Sekunden liegt die maximal messbare Geschwindigkeit der Agenten innerhalb der Simulation bei 2 m/s. Die Ausgabe und Berechnung der Geschwindigkeit in Sekunden führt ebenfalls dazu, dass der Geschwindigkeitsverlauf der Simulation deutlicheren Schwankungen im Vergleich zum realen Verlauf unterliegt, da dieser mit 25 Frames pro Sekunde berechnet wird. Zusätzlich ist die Darstellung des Personenflusses innerhalb der Graphen abhängig vom gewählten Bezugsintervall: Je kleiner das Intervall, desto mehr Fluktuation tritt auf. Wird das Intervall zu groß gewählt, sind Schwankungen nicht sichtbar. Auch die Positionierung der Messlinien hat einen Einfluss auf das

Messergebnis: Je nachdem welche Position und Länge der Messstellen gewählt wird, variieren die gemessenen Personenzahlen und daraus berechneten Werte der Grundgrößen.

Insgesamt entspricht der Verlauf der Grundgrößen in der angepassten Simulation der Korridor-Situation annährend der Realität. Der Personenfluss ist in der Simulation jedoch etwas zu hoch, die Dichte konstanter. Im Vergleich zum kalibrierten ist der angepasste Verlauf der Realität entsprechender (wie in den Evakuierungsgraphen bereits deutlich): Die Dauer wird der realen Dauer – durch einen niedrigeren Personenfluss über den Zeitverlauf aufgrund der erhöhten normalverteilten Reaktionszeit und des dadurch teilweise verzögerten Laufbeginns der Agenten – angenähert.

Die Grundgrößenverläufe in der Messstelle des Korridors zeigen die fehlende Abbildung des realen Entfluchtungsbeginns mit geringem Anstieg, kurzzeitigem Ausbleiben und erneutem Anstieg des Flusses. Die Betrachtung der Videoaufnahme des Experiments (siehe Abb. 24) gibt Aufschluss über die reale Situation: Sechs vorauslaufende Personen verlassen bereits den Korridor, während der Hauptteil des Personenstroms sich hinter einem Rollstuhlfahrer mit geringerer Geschwindigkeit am Anfang des Korridors befindet.



Abb. 24: Videoaufnahmen der Korridor-Entfluchtung ²⁸⁷

Diese Situation bildet die Simulation nicht ab. Ein Grund hierfür ist der nicht anpassbare Platzbedarf innerhalb von PedGo: Bei einer Korridorbreite von 1,2 m ist die Überholung eines Rollstuhls in Realität kaum möglich, innerhalb der Simulation können aufgrund der Zellen- und Agentenbreite von 0,4 m trotzdem drei Agenten nebeneinander gehen, der Fluss ist somit höher und konstanter. Dies zeigt sich auch in der konstanteren Dichte in der Simulation, während in Realität die Dichte teilweise um 2 P/m² innerhalb von 5 Sekunden abnimmt und auf eine inhomogenere Bewegung als simuliert (und als in homogenen Gruppen stattfindend) hindeutet. Die maximalen Dichten in Realität und Simulation stimmen mit etwa 3 P/m² überein und erreichen damit keine kritischen Werte.

²⁸⁷ Quelle: eigener Screenshot basierend auf Geoerg et al.: Influence of individual characteristics. 2017

Während der Grundgrößen-Verlauf in der Simulation der Korridorsituation – aufgrund des real weitgehend linearen Verlaufs – annährend der Realität entspricht, sehen die Ergebnisse des Flaschenhalsszenarios anders aus. Insgesamt ist der angepasste Verlauf erneut der Realität etwas näher als der kalibrierte.

Für Geschwindigkeit und Fluss lässt sich ein ähnlicher Verlauf im Vergleich der Messstellen erkennen: In Realität sind eine leichte Abnahme des Fluxes vor der Engstelle sowie ein deutlicher Anstieg von Fluss und Geschwindigkeit nach der Engstelle zu beobachten. Währenddessen ist in der Simulation eine stärkere Abnahme des Fluxes und der Geschwindigkeit vor der Engstelle zu vermerken. Personenflux und Geschwindigkeit sind nach der Engstelle höher als zuvor – dies entspricht der Realität. Die Reduzierung von Fluss und Geschwindigkeit des gesamten Personenstroms vor der Engstelle wird somit prinzipiell simuliert.

Innerhalb aller drei Messstellen wird in der Simulation dennoch ein höherer Personenflux im Vergleich zur Realität gemessen, welcher jeweils über einen kürzeren Zeitraum vorhanden ist. Das bedeutet, dass sich der Personenstrom in Realität länger in den Bereichen der Messstellen befindet, als es simuliert der Fall ist. Dies geht in der Simulation mit einer erhöhten Geschwindigkeit, vor allem der Personen am Anfang des Personenstroms, einher. Zeitlich gesehen wird die Aufenthaltsdauer des Personenstroms innerhalb jeder Messstelle zu kurz prognostiziert – dies ist vor allem am Anfang der Fall – und damit der Gesamtverlauf der Entfluchtung nicht realitätsgetreu abgebildet.

Bezüglich der Dichte ist – im Gegensatz zur Abnahme der Dichte vor der Engstelle und anschließendem Stagnieren in Realität – in der Simulation ein deutlicher Anstieg vor und eine Abnahme nach der Engstelle zu sehen. Auffällig ist die deutlich höher kalkulierte Dichte vor allem in MessAus vor der Engstelle. Während die Dichte in MessEin mit einem Maximum von $2,5 \text{ P/m}^2$ noch knapp unter der realen liegt, befindet sich das Maximum in MessAus bei 5 P/m^2 statt 2 P/m^2 und ist damit 2,5-mal höher als in Realität. Diese in der Simulation temporär entstandene Dichte gilt aufgrund der Dauer von über 10 % der Gesamtentfluchungszeit in PedGo als Stau, wie auch der ausgegebene Dichteplot (siehe Abb. 25) zeigt. In Realität tritt eine vergleichbar kritische Dichte jedoch nicht auf. Das bedeutet, dass PedGo einen Stau vor der Engstelle detektiert, wo in Realität keiner ist.



Abb. 25: Dichteplot der Simulation (Bot_nah) im Flaschenhals (eigene Darstellung)

Gründe hierfür sind einerseits der nicht darstellbare Platzbedarf eines Rollstuhlfahrers und die deswegen in Realität geringere Dichte (siehe 7.1.2), andererseits eine in den Videoaufnahmen der entsprechenden Versuchsdurchläufe zu beobachtende gegenseitige Rücksichtnahme der Versuchsteilnehmer, welche nicht innerhalb der Simulation abgebildet wird.

Besonders deutlich wird dies an den lokalen Minima von Dichte und Fluss in den Messstellen MessAus und MessEng bei circa $t = 41$ s. Bei Betrachtung der realen Situation kann beobachtet werden, dass der Personenfluss temporär ausbleibt, und zwar aufgrund des Vorlassens eines Rollstuhlfahrers:



Abb. 26: Vorlassen eines Rollstuhlfahrers vor Engstelle ($t = 41$ s)²⁸⁸

²⁸⁸ Quelle: eigener Screenshot basierend auf Geoerg et al.: Influence of individual characteristics. 2017



Abb. 27: Vorrausfahren einen Rollstuhlfahrers durch Engstelle ($t = 45$ s) ²⁸⁹

Abb. 26 zeigt, wie eine Person mit grüner Kappe vor der Engstelle einen Rollstuhlfahrer mit pinker Kappe vorlässt (siehe Armbewegung). Abb. 27 zeigt die Situation 4 s später: Aufgrund der geringeren Geschwindigkeit des Rollstuhlfahrers haben die vorauslaufenden Personen die Engstelle bereits verlassen, die Dichte ist entsprechend gering. Die nachlaufenden Personen bewegen sich mit verringelter Geschwindigkeit aufgrund des Mangels an Platz zum Überholen, trotzdem ist wegen des Abstandhaltens der Nachfolgenden die Dichte vor der Engstelle nicht erhöht.

Das temporäre Erliegen des Personenflusses und die Verzögerung der Entfluchtung finden wegen des Vorlassens nicht aufgrund einer erhöhten Dichte statt, sind also von dieser unabhängig. Die klassische Abhängigkeit von Dichte und Fluss ist (anders als in Studien mit homogenen Populationen) nicht gegeben. Das Nicht-Überholen aufgrund der Blockierung der Engstelle durch den Rollstuhl kann in der Simulation (wie bereits im Korridor) aufgrund der Zell- und Agentengröße von PedGo nicht abgebildet werden. Aufgrund der nicht korrekten Abbildung des Entfluchungsverlaufs kalkuliert auch die angepasste Simulation die Gesamtdauer der Evakuierung zu kurz.

Die Beobachtungen bezüglich des Bewegungsverhaltens der Personen sind zusätzlich an den Trajektorien, welche anhand der Personenkoordinaten zu jedem Zeitpunkt die Wege aller Personen abbilden, sichtbar. Es ist zu sehen, dass sich der Großteil der Personen im gesamten Bereich vor der Engstelle nicht gerade, sondern schlängelnd vorwärtsbewegt, während diese in der Engstelle deutlich gerichteter geradeaus gehen (siehe Abb. 28), trotz ausreichend vorhandenem Platz.

²⁸⁹ Quelle: eigener Screenshot basierend auf Geoerg et al.: Influence of individual characteristics. 2017

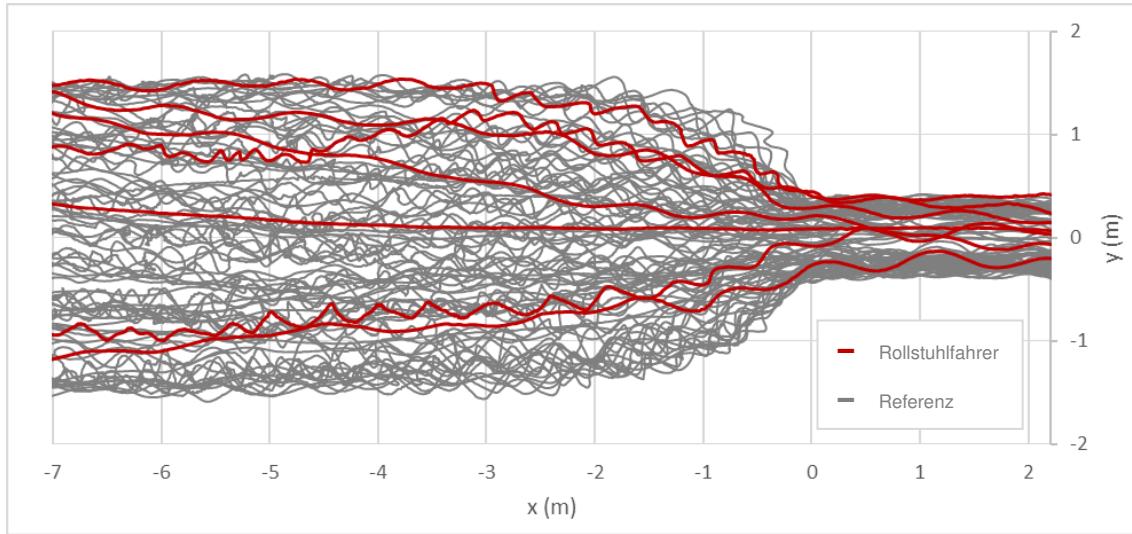


Abb. 28: Bewegungstrajektorien im Flaschenhals-Szenario (eigene Darstellung)

Mögliche Gründe hierfür sind das zurückhaltende und höfliche Verhalten vor der Engstelle (Abstandthalten, Warten und Vorlassen) bzw. allgemein das langsamere Gehen unter der eigenen freien Geschwindigkeit. Die anschließend gerader verlaufenden Trajektorien passen zu der höheren gemessenen Geschwindigkeit in der Engstelle. Die sichtbare, leicht schwankende Fortbewegung ist innerhalb von PedGo aufgrund der innerhalb der Zellen simulierten, geraden Bewegung der Agenten nicht bzw. nur als größere orthogonale Abweichung von der direkten Route darstellbar.

Zusammenfassend bildet in beiden Szenarien (Korridor und Flaschenhals) die durch den Reaktionsparameter angepasste Simulation den realen Verlauf besser ab, allerdings ist abgesehen von der angepassten Dauer durch leicht geringere Personenflüsse keine starke Änderung der Grundgrößen durch die Anpassung sichtbar. Die Abbildung der Korridor-Entfluchtung ist aufgrund des linearen Verlaufs in Realität ähnlicher – sowohl in Evakuierungskurven als auch in Verläufen der Grundgrößen. Die berechnete Evakuierungsduer des signifikanten Durchlaufs der angepassten Korridor-Simulation entspricht der realen Dauer. Im Gegensatz dazu zeigt der Verlauf der Grundgrößen der Flaschenhals-Situation innerhalb von Simulation und Realität zwar Ähnlichkeit, die Darstellung von Verzögerungen unabhängig von der Personendichte ist jedoch nicht möglich. Trotz Parameteranpassungen zeigt sich der Verlauf der simulierten Entfluchtung linear, die Evakuierungsduer wird zu kurz kalkuliert.

Dieses Ergebnis passt zu dem einer innerhalb des Projekts SiME vorgenommenen Studie bezüglich der Simulationssoftware Viswalk: Auch dort konnten für den Korridor

passende Parameter gefunden werden, um die Entfluchtung der heterogenen Population zu simulieren, während dies für das Flaschenhals-Szenario nicht möglich war.²⁹⁰

7.3 Kritische Betrachtung der Forschung

Im Folgenden werden die Begrenzungen und Einschränkungen der innerhalb dieser Arbeit durchgeführten Forschung kritisch betrachtet.

Bei der Betrachtung der Grundgrößen ist der im Ergebnisteil bereits erwähnte Messfehler der inkorrekt Agentenzählung an den Messstellen bzw. PedGo-Logpoints zu beachten, welcher eine exakte Berechnung der Grundgrößen nicht möglich macht. Bei Begutachtung der Simulationsdurchläufe in PedView fällt auf, dass einzelne Agenten sich kurzzeitig entgegen der Fluchtrichtung bewegen und dann weitergehen – auch innerhalb des Messbereichs: Dies führt dazu, dass einige Agenten die Messlinien mehrfach übertreten und mehrfach im Messbereich gezählt werden. Anhand der Formeln zur Berechnung der Grundgrößen (siehe 5.2) lässt sich ableiten, dass die falsche Zählung keinen Einfluss auf die Kalkulation der Dichte (P/m^2) hat, da hierfür die sich tatsächlich im Messbereich befindlichen Personen entscheidend sind. Der an der hinteren Messlinie gemessene Fluss (P/s) wird aufgrund der größeren detektierten Personenzahl als tatsächlich vorhanden jedoch erhöht berechnet. Die an den simulierten Geschwindigkeitsgraphen sichtbaren Maxima (2 m/s) entstehen vermutlich aufgrund innerhalb einer Sekunde in den Messbereich eintretender und an der gleichen Messlinie wieder austretender Agenten.

Grund für eine Abweichung der Grundgrößen (Fluss und Geschwindigkeit) nach oben kann also neben der inkorrekt Simulation auch der Logpoint-Messfehler sein, hauptsächlich vor der Flaschenhals-Engstelle. Die Thematik zeigt, dass PedGo nicht zur konkreten Betrachtung der Grundgrößen geeignet ist und der Anwender auf die Verwendung der standardmäßig ausgegebenen Ergebnisse, wie z. B. die Evakuierungskurve, zurückgreifen sollte. Die Erkenntnis stellt allerdings auch die Angabe des spezifischen Flusses innerhalb der von PedGo ausgegeben Logpoints-Datei in Frage und zeigt, dass Ergebniswerte vor Verwendung kritisch betrachtet werden sollten.

Der Anteil der Rollstuhlfahrer der heterogenen Population innerhalb der zum Vergleich herangezogenen Studie weicht mit 7,6 % von dem in der MVStättVO vorgegebenen Mindestanteil der zur Verfügung stehenden Plätze für Rollstuhlfahrer von 1 % ab. Hier stellt

²⁹⁰ vgl. Daniel Muthmann: Schlussbericht Verbundprojekt SiME. 2019, S. 24

sich die Frage, inwieweit bei geringerem Anteil überhaupt ein Einfluss auf die heterogene Gruppe vorhanden und der vorgenommene Vergleich relevant für die Praxis ist. Da innerhalb der Studie die Anzahl der Rollstuhlfahrer nicht variiert wurde und somit keine experimentellen Daten dazu vorliegen, ist eine Probe des Einflusses nur mithilfe der Simulation durchführbar. In Anbetracht dessen, dass die Simulation zuvor als die Entfluchtung nicht korrekt abbildend bewertet wurde und eine annähernd realistische Abbildung nur durch experimentelle Annäherung erzielt werden kann, ist es wenig sinnvoll, sich auf diesbezügliche Simulationsergebnisse zu verlassen.

Zu beachten ist hier, dass der innerhalb der MVStättVO geforderte Anteil an Rollstuhlfahrern von 1 % eine Mindestanforderung und die Anwesenheit einer größeren Anzahl möglich ist. Evakuierungssimulationen müssen somit auch realistische Ergebnisse für heterogene Gruppen mit höherem Anteil erzielen können. Hinzu kommt die Tatsache, dass selbst bei Anwesenheit von nur 1 % Rollstuhlfahrern auch andere Personen mit motorischen Einschränkungen wie ältere Personen, Personen mit Gehhilfen etc. Veranstaltungen besuchen: Kapitel 3.4.4 zeigt, eine Auswirkung auf das Bewegungsverhalten in heterogenen Gruppen besteht nicht nur durch Menschen im Rollstuhl, sondern auch durch andere Personen mit sichtbaren Einschränkungen (z.B. mit Gehstöcken). Die dort vorgestellten Studien zeigen außerdem das veränderte Bewegungsverhalten aller Beteiligten, das abweichende Geschwindigkeit-Dichte-Verhältnis und die inhomogene Bewegung in heterogenen Gruppen bei Anwesenheit von nur einem einzelnen Rollstuhlfahrer sowie einem geringen Anteil von Menschen im Rollstuhl (siehe 3.4.4).

Aus diesen Gründen ist das hier untersuchte Verhältnis zwar abweichend von den Mindestanforderungen der MVStättVO, eine Betrachtung zur Validierung der Simulation für heterogene Populationen trotzdem gerechtfertigt und notwendig. Weitere Forschung mit Beteiligung weniger oder einzelner Rollstuhlfahrer im Hinblick auf das veränderte Bewegungsverhalten aller Personen in heterogenen Strömen ist sinnvoll.

Abgesehen von der prozentualen Zusammensetzung der Population ist zu beachten, dass es sich bei Vergleichen mit experimentellen Daten um Einzelfallbetrachtungen handelt: Aufgrund der geringen Anzahl an Rollstuhlfahrern sind Situation und Ergebnisse stark abhängig von deren individuellen Eigenschaften und Verhalten. Es lassen sich hieraus zwar Schlüsse ziehen und Annahmen für die Übertragung auf andere Situationen treffen, Ergebnisse sind jedoch nicht allgemeingültig. Weitere Überprüfungen der Ergebnisse durch weitere Studien und vergleichende Simulationen für andere Szenarien mit heterogenen Populationen sind sinnvoll.

Zusätzlich ist zu bedenken, dass die in dieser Arbeit zum Vergleich verwendeten Daten unter Laborbedingungen erhoben wurden. Das Verhalten von Menschen in realen Notfallsituationen unter anderem Stresslevel kann abweichen. Hier sind weitere Vergleiche mit realen Evakuierungsbeobachtungen oder Räumungsübungen notwendig.

Es wurden zum Zweck des Vergleichs mit der vorhandenen Studie zwei einfache Geometrien begutachtet, die zwar den Anforderungen der MBO und MVStättVO sowie zwei typischerweise bei Entfluchtungen auftretenden Engstellen entsprechen, jedoch eine vereinfachte Betrachtung darstellen. Komplexere Geometrien mit mehreren Fluchtwegen und Ebenen und möglichen Barrieren wie Aufzügen und Treppen oder kritische, sich vereinigende oder bidirektionale Personenströme wurden innerhalb dieser Arbeit nicht betrachtet. Die Betrachtungen anderer und komplexerer Geometrien zur Validierung von PedGo im Hinblick auf Nutzung zur Prognose der Entfluchtung heterogener Gruppen ist sinnvoll. Andere Szenarien mit anderen Rahmenbedingungen können auch hier zu anderen Ergebnissen führen.

Insgesamt muss klar sein, dass es sich bei Simulationen um Prognosen möglicher Entfluchtsverläufe handelt, welche die Realität nicht exakt vorhersagen können. Die Häufigkeitsverteilung der Simulationsergebnisse zeigt die große Varianz möglicher Ergebnisse. Der unterschiedliche Verlauf des ersten und zweiten Durchgangs der Studie zeigt, dass selbst in Realität innerhalb kleiner Geometrien Dauer und Ablauf einer Entfluchtung voneinander abweichen können. Die Prognose individuellen menschlichen Verhaltens ist komplex: Einzelne Entscheidungen und Verhaltensweisen, abhängig von verschiedenen Faktoren innerhalb unterschiedlicher Situationen, können Einfluss auf die gesamte Entfluchtung haben.

Die Aussagekraft von Simulationen und die Beurteilung der Simulationsergebnisse ist zusätzlich abhängig von der Einschätzung und Einordnung der Ergebnisse durch den Anwender. Die zugehörigen Richtlinien bieten zwar Anhaltspunkte zur Bewertung der Grundgrößen, Stauungen und Evakuierungsdauer, konkrete Richtwerte zum direkten Vergleich verschiedener Szenarien mit variierender Komplexität existieren jedoch nicht.

8. Fazit und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war die Validierung oder Falsifizierung der Simulation heterogener Personenströme durch die Software PedGo im Hinblick auf die Nutzung dieser zur Voraussage und Optimierung von Evakuierungsprozessen heterogener Populationen.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurde zunächst ein grundlegendes Wissen zur barrierefreien Entfluchtung aus Versammlungsstätten und zur Evakuierungsberechnung geschaffen. Nach Vorstellung des Simulationsprogramms und der zur Validierung herangezogenen Bewegungsstudie wurde durch Festlegung von Vergleichsparametern sowie Modellierung der Geometrien und Populationen die Simulation vorbereitet. Anschließend wurden diverse Simulationen und Parameterkalibrierungen zur Validierung des Programms durchgeführt. Die Untersuchungen führten zu folgenden Ergebnissen:

- Es existiert wenig Forschung zum Bewegungsverhalten heterogener Gruppen. Diese zeigt allerdings, dass die Bewegung abweichend von der homogenen Gruppen ist: Veränderte Interaktionen aller Beteiligten und inhomogenere Bewegungsabläufe sowie ein Einfluss auch bei Anwesenheit weniger Rollstuhlfahrer wurden in vorherigen Studien beobachtet.
- Die Geometrie kann in PedGo nicht in jedem Fall exakt abgebildet werden. Der Platzbedarf ist nicht variierbar und damit die Abbildung eines Rollstuhls nicht möglich, wodurch Dichteberechnung und -bewertung innerhalb des Programms inkorrekt sind.
- Die Modellierung der Population ist nur über die Variation der Parameter, nicht über eine direkte Auswahl von Rollstuhlfahrern möglich. Die Parameterwahl gestaltet sich für den Nutzer aufgrund kaum vorhandener (teilweise fragwürdiger) Richtwerte und fehlender Forschung komplex. Es besteht zudem keine Möglichkeit zur Anpassung des veränderten Interaktionsverhaltens innerhalb heterogener Gruppen.

Die Simulationsergebnisse zeigten Folgendes:

- Die Abbildung der Entfluchtung einer homogenen Referenzpopulation durch PedGo ist passend. Die Notwendigkeit einer Parameter-Anpassung zur Abbildung der Entfluchtung der heterogenen Population zeigte sich durch die inkorrekte Abbildung ohne Kalibrierung.
- Eine Kalibrierung mit RiMEA-konform begründeten Parametern erwies sich nicht als sinnvoll, da lediglich eine minimale Annäherung der Evakuierungsdauer, jedoch keine Änderung des Verlaufs stattfand: Der Entfluchtungsverlauf der Simulation wird linear dargestellt, während die reale Entfluchtung Verzögerungen unterliegt.

- Mithilfe der Anpassung des Reaktions-Parameters ließ sich die durch die Simulation berechnete Evakuierungsdauer der Realität annähern, besonders für die Flaschenhals-Situation konnte jedoch keine Abbildung des nicht linearen Verlaufs erzielt werden. Die Parameteranpassung erfolgte zudem ohne RiMEA-konforme Begründung und somit ohne Mehrwert für die Anwendung des Programms ohne Möglichkeit zur Kalibrierung anhand einer realen Situation.
- Die zeitlichen Verläufe der Grundgrößen zeigen ebenfalls eine Annäherung an die Realität durch die Reaktions-Parameteranpassung aufgrund eines leicht geringeren Personenflusses, ansonsten änderten sich die Grundgrößen-Verläufe kaum. Der grobe Verlauf der Grundgrößen in der Simulation ist stimmig, die Dichte wird allerdings (vor allem im Flaschenhals) nicht korrekt kalkuliert. Verzögerungen unabhängig von der Dichte werden nicht abgebildet.

Insgesamt ist die Simulation in der Lage, die Evakuierungsdauer annäherungsweise zu berechnen: Hier ist jedoch zur Abschätzung der Entfluchtungszeit die maximal berechnete Zeit eher geeignet als die signifikante. Die Simulation zeigt jedoch sowohl im Verlauf der Evakuierungsgraphen als auch bezüglich der Grundgrößen deutliche Abweichungen: Vor allem in der Flaschenhals-Situation, aber auch zu Beginn der Korridor-Entfluchtung kann keine korrekte Abbildung der Realität erzeugt werden. Der nicht lineare Entfluchtungsverlauf aufgrund des veränderten Bewegungsverhaltens des gesamten Personenstroms unter Anwesenheit von Rollstuhlfahrern wird durch die Simulation nicht abgebildet.

Wie bereits in vorheriger Forschung zum Bewegungsverhalten von Personen in heterogenen Strömen festgestellt wurde, kann das klassische Verständnis des Verhältnisses von Fluss und Dichte nicht auf heterogene Ströme angewendet werden: Größere Abstände und verringerte Geschwindigkeiten unter Beteiligung von Menschen mit sichtbaren Behinderungen, veränderte Interaktionen aller Teilnehmer und gegenseitige Rücksichtnahme wie das Vorlassen von Rollstuhlfahrern und der Verzicht auf Überholungen führen zu einer geringeren Dichte und inhomogeneren Bewegung, die innerhalb der Simulation inkorrekt abgebildet wird. Verzögerungen, die nicht aufgrund hoher Dichten und eines deswegen reduzierten Personenflusses entstehen, konnten nicht abgebildet werden, sind bei heterogenen Gruppen aufgrund des zuvor beschriebenen Verhaltens aber existent. Die inhomogene Bewegung innerhalb der heterogenen Population konnte nicht simuliert werden.

Die Frage, inwiefern sich die Entfluchtung heterogener Gruppen aus Menschen mit und ohne Behinderung aus Versammlungsstätten mithilfe der Simulationssoftware PedGo

abbilden lässt, muss also aufgrund der Bewertung der Programmanwendung und Simulationsergebnisse wie folgt beantwortet werden: Die Nutzung der Software zur Vorher sage und Optimierung von Evakuierungsprozessen heterogener Gruppen wird aufgrund der zuvor beschriebenen Modelleinschränkungen als nicht geeignet bewertet.

Als Hilfsmittel zur Prognose von Räumungsdauer und Analyse von Stauungen heterogener Populationen darf menschliches Verhalten nicht vereinheitlicht werden. Die Anpassung des Agentenverhaltens an die veränderten Verhaltensaspekte aller Beteiligten – mindestens aber die Anpassung des abweichenden Platzbedarfs – zur Darstellung der resultierenden inhomogenen Bewegung muss möglich sein, um eine ganzheitliche Be trachtung der Entfluchtung von Menschen mit und ohne Behinderung zur Prognose dieser und der Optimierung der Personensicherheit zu ermöglichen.

Selbst geringe Abweichungen der Simulationsdauer von der realen Entfluchungszeit in kleinen Geometrien oder einzelnen Räumen könnten sich in Realität bei Entfluchtung über mehrere Räume und Stockwerke aufaddieren und somit zu fatalen Fehlprognosen führen. Gleiches gilt für nicht identifizierbare Stauungen und daraus resultierende, kritische Personendichten aufgrund nicht abbildbarer Bewegungsverläufe innerhalb der modellierten Population.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen die Notwendigkeit der Beachtung und Implementierung von variierenden Platzbedarfen, Interaktionen und Bewegungen heterogener Gruppen innerhalb der Simulationssoftware PedGo. Sie zeigen zudem, dass Menschen mit motorischen Behinderungen nicht über die geringe Anzahl der Personen relativiert oder lediglich mithilfe geringerer Geschwindigkeiten abgebildet werden können. Die Arbeit zeigt, dass die Validierung von Simulationsprogrammen nicht nur für homogene, sondern auch für heterogene Gruppen notwendig ist, um sicherzustellen, dass alle Menschen in Notsituationen sicher evakuiert werden können. Sie kann damit einen Beitrag zur Optimierung von Evakuierungsprozessen und somit der Personensicherheit leisten – sowohl für Menschen mit Behinderung als auch für alle Beteiligten.

Zusätzlich zu der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Fragestellung bietet weitere Forschung zur Evakuierungssimulation heterogener Populationen die Möglichkeit zur Optimierung der Personensicherheit für Menschen mit und ohne Behinderung. Abgesehen von der Notwendigkeit der weiteren Erforschung des veränderten Bewegungsver haltens in heterogenen Personenströmen im Vergleich zu homogenen, bieten sich folgende Untersuchungen an. Die Validierung der Simulation für Entfluchtungen komplexerer Geometrien, zum Beispiel ganzer Versammlungsstätten – auch anhand realer

Räumungsübungen, nicht nur durch Studien unter Laborbedingungen – ist sinnvoll. Zusätzlich können andere Zusammensetzungen heterogener Populationen, entweder mit variiertem Anteil an Menschen im Rollstuhl oder mit Menschen mit anderen Behinderungen (sensorische, geistige, andere motorische), untersucht werden. Hierzu können die ebenfalls im Forschungsprojekt SiME erhobenen Daten der Entfluchtungen mit anderen Behinderungen als Vergleich dienen. Weiterhin sind die Validierung anderer Simulationssoftware sowie der Vergleich mit den hier gemachten Ergebnissen interessant.

Literatur- und Quellenverzeichnis

Arbeitsgruppe Veranstaltungssicherheit: Die Sicherheit einer Veranstaltung. Eine Kultur der Verantwortung. Köln: AGVS, 2017

Barrierefrei.de: Was bedeutet Barrierefreiheit eigentlich, URL: www.barrierefrei.de/ratgeber/was-bedeutet-barrierefreiheit-eigentlich.html, 2018

Baunetz: Baulicher Brandschutz und Barrierefreiheit. Gesetzliche Vorgaben und Anforderungen für Rettungswege, URL: www.baunetzwissen.de/brandschutz/fachwissen/grundlagen/baulicher-brandschutz-und-barrierefreiheit-3478737, s.a.

Beauftragter der Bundesregierung: Die UN-Behindertenrechtskonvention. Übereinkommen über die Rechte von Menschen mit Behinderungen, URL: www.institut-fuer-menschenrechte.de/fileadmin/Redaktion/PDF/DB_Menschenrechtsschutz/CRPD/CRPD_Konvention_und_Fakultativprotokoll.pdf, 2018

Bendel, Judith und Klüpfel, Hubert: Accessibility and Evacuation Planning. Similarities and Differences. In Peacock, Richard et al.: Pedestrian and Evacuation Dynamics. S. 701–712. Boston: Springer, 2011

Boenke, Dirk et al.: Organisatorische und bauliche Maßnahmen zur Bewältigung von Notfallsituationen körperlich und sensorisch behinderter Menschen in Hochhäusern und öffentlichen Gebäuden mit hoher Benutzerfrequenz. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2011

Daamen, Winnie und Hoogendoorn, Serge: Emergency Door Capacity. Influence of Door Width, Population Composition and Stress Level. In *Fire Technology* Nr. 48. S. 55–71. DOI: 10.1007/s10694-010-0202-9, 2012

Daniel Muthmann: Schlussbericht Verbundprojekt SiME. Simulationsgestützte Entfluchtungsanalysen unter Berücksichtigung mobilitätseingeschränkter Personen, DOI: 10.2314/KXP:169381675X, 2019

DEB: Richtlinie über die Sicherheit bei Veranstaltungen für Organisatoren und Verantwortliche. Berlin: Deutscher Expertenrat Besuchersicherheit, 2021

DGUV Information 205-033 „Alarmierung und Evakuierung“. Berlin: DGUV, 2019

DGUV Information 215-310 „Sicherheit bei Veranstaltungen und Produktionen“. Berlin: DGUV, 2016

- Famers, Gabriele und Messerer, Joseph: Ein Grundsatzpapier der Fachkommission Bauaufsicht. „Rettung von Personen“ und „wirksame Löscharbeiten“ – bauordnungsrechtliche Schutzziele mit Blick auf die Entrauchung, URL: www.is-argebau.de/IndexSearch.aspx?method=get&File=b8a892y3y8b984808abb92b8y9ya8ayyb9y884b992a2a0a14949aba1494b80b8y0o0ywof25g1llk3sqfwyg2ny, 2008
- Feliciani, Claudio et al.: Efficiently informing crowds – Experiments and simulations on route choice and decision making in pedestrian crowds with wheelchair users. In *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. S. 484–503. DOI: 10.1016/j.trc.2020.02.019, 2020
- Gebürtig, Gerd: Die Belange des Paragrafen 50 der Musterbauordnung. In *Der Prüfingenieur*. S. 28–37, 2014
- Geoerg, Paul et al.: Influence of individual characteristics, DOI: 10.34735/PED.2017.1, 2017
- Geoerg, Paul et al.: The Influence of Wheelchair Users on Movement in a Bottleneck and a Corridor, DOI: 10.1155/2019/9717208, 2019
- Geoerg, Paul et al.: How people with disabilities influence crowd dynamics of pedestrian movement through bottlenecks, DOI: 10.1038/s41598-022-18142-7, 2022
- Göbell, Johannes und Kallinowsky, Steffen: Barrierefreier Brandschutz. Methodik – Konzepte – Maßnahmen. Köln: FeuerTrutz, 2016
- Gwynne, Steven und Rosenbaum, Eric: Employing the Hydraulic Model. In Hurley, Morgan: SFPE handbook of fire protection engineering. S. 2115–2151. 5. Aufl. New York: Springer, 2016
- Hofinger, Gesine et al.: Human factors in evacuation simulation, planning, and guidance. In *Transportation Research Procedia* Nr. 2. S. 603–611. DOI: 10.1016/j.trpro.2014.09.101, 2014
- Holzbaur, Ulrich: Nachhaltige Events. Erfolgreiche Veranstaltungen durch gesellschaftliche Verantwortung. 2. Aufl. Wiesbaden: SpringerGabler, 2020
- International Maritime Organization: Revised Guidelines on Evacuation Analyses for New and Existing Passenger Ships. London: IMO, 2016
- Klüpfel, Hubert und Meyer-König, Tim: Modelle für die Berechnung von Personenströmen und Evakuierungssimulationen. In VdS Fachtagung „Evakuierung und Räumung von Gebäuden“. S. 11–45. URL: www.traffgo-HT.com/downloads/pedestrians/downloads/publications/Kluepfel2005.pdf, 2005

Kneidl, Angelika et al.: Nachweisverfahren zur Personensicherheit bei Räumungen. In *FeuerTrutz Brandschutz-Magazin für Fachplaner* Nr. 10. S. 40–45, 2019

Kneidl, Angelika et al.: Räumungsberechnungen nach DIN 18009-2, URL: www.feuertrutz.de/raeumungsberechnungen-nach-din-18009-2-01022022, 2022

Kneidl, Angelika und Simon, Sophia: Crowd Simulation als Planungswerkzeug für Veranstaltungen. Von der psychologischen Theorie in die Praxis. In Ronft, Steffen: Eventpsychologie. S. 534–568. Wiesbaden: SpringerGabler, 2021

Kraft, Lilian: DIN 18040 Teil 1: Öffentliche Gebäude. Norm-Entwurf ist da, URL: www.bfb-barrierefrei-bauen.de/din-18040-teil-1-oeffentlich-zugaengliche-gebaeude-norm-entwurf/, 2023

Künzer, Laura et al.: Mythen der Entfluchtung. In vfdb: Tagungsband Jahresfachtagung 2012 der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes. S. 725. Köln: DFS, 2012

Künzer, Laura und Hofinger, Gesine: Veranstaltungen und Besuchersicherheit. Eine Einführung aus Sicht der Human Factors-Psychologie. In Ronft, Steffen: Eventpsychologie. S. 515–533. Wiesbaden: SpringerGabler, 2021

Miyazaki, Keiko et al.: Behaviors of Pedestrian Group overtaking Wheelchair User, URL: www.researchgate.net/publication/242421347_behaviors_of_pedestrian_group_overtaking_wheelchair_user, 2003

Moussaïd, Mehdi et al.: The walking behaviour of pedestrian social groups and its impact on crowd dynamics, DOI: 10.1371/journal.pone.0010047, 2010

Pan, Hongliang et al.: Experimental study of pedestrian flow mixed with wheelchair users through funnel-shaped bottlenecks, DOI: 10.1088/1742-5468/ab6b1c, 2020

Pan, Hongliang et al.: Fundamental diagram of pedestrian flow including wheelchair users in straight corridors. In *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* Nr. 3. S. 24. DOI: 10.1088/1742-5468/abe93f, 2021

Rankin, Jeffery et al.: Individual muscle contributions to push and recovery subtasks during wheelchair propulsion. In *Journal of Biomechanics* Nr. 7. S. 1246–1252. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2011.02.073, 2011

RiMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. Version 4.0.0 vom 28.04.2022. Düsseldorf: RiMEA, 2022

Sakschewski, Thomas et al.: Sicherheitskonzepte für Veranstaltungen. Grundlagen für Behörden, Betreiber und Veranstalter. 3. Aufl. Berlin, Wien, Zürich: Beuth, 2019

Sakschewski, Thomas und Paul, Siegfried: Veranstaltungsmanagement. Märkte, Aufgaben und Akteure. Wiesbaden: SpringerGabler, 2017

Schadschneider, Andreas et al.: Evacuation Dynamics. Empirical Results, Modeling and Applications. In Meyers, Robert: Encyclopedia of Complexity and Systems Science. S. 3142–3176. Berlin: Springer, 2009

Schneider, Ulrich und Kirchberger, Hubert: Evakuierungsberechnungen bei Brandergebnissen mittels Ingenieurmethoden. In Brandschutz Jahrbuch Arbeitsicherheit. S. 62–75, 2007

Sharifi, Mohammad et al.: Time Headway Modeling and Capacity Analysis of Pedestrian Facilities Involving Individuals with Disabilities. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. S. 41–51. DOI: 10.3141/2553-05, 2016

Shimada, Taku und Naoi, Hideo: An Experimental Study on the Evacuation Flow of Crowd Including Wheelchair Users. In *Fire Science and Technology* Nr. 25. DOI: 10.3210/fst.25.1, 2006

SiME: Das Vorschungsvorhaben, URL: www.sime-projekt.de/sime-projekt/DE/Projekt/projekt_node.html, 2016

Simon, Sarah et al.: Eingeschränkte Selbstrettungsfähigkeit im Kontext der brandschutztechnischen Gebäudeplanung. In vfdb Magazin Nr. 3. S. 150–158, 2017

Stachowiak, Herbert: Allgemeine Modelltheorie. Wien, New York: Springer, 1973

Steinhofer, Bernd: Barrierefreier Brandschutz – Evakuierungskonzepte für alle, URL: www.bfb-barrierefrei-bauen.de/evakuierungskonzepte/, 2019

Tajfel, Henri und Turner, John: An integrative theory of intergroup conflict. In Austin, William und Worchsel, Stephen: The social psychology of intergroup relations. S. 33–47. Monterey, CA: Brooks/Cole, 1979

TraffGo HT GmbH: PedEd PedGo PedView Benutzerhandbuch. Version 2.6.1. Duisburg: TraffGo, 2013

TraffGo HT GmbH: PedGo, URL: www.traffgo-ht.com/de/pedestrians/products/pedgo/pedgo/, 2018

TraffGo HT GmbH: PedGo Überblick, URL: www.traffgo-ht.com/de/pedestrians/products/pedgo/, 2018

TraffGo HT GmbH: Unser Unternehmen, URL: www.traffgo-ht.com/de/company/, 2018

TraffGo HT GmbH: Validierung und Verifikation, URL: www.traffgo-ht.com/de/pedestrians/validation/, 2018

UN-Behindertenrechtskonvention: Definition von Behinderung, URL: www.behindertenrechtskonvention.info/definition-von-behinderung-3121/, s.a.

VBG: Grundsätze des barrierefreien Planens und Gestaltens von Arbeitsstätten, URL: www.vbg.de/DE/3_Praevention_und_Arbeitshilfen/2_Themen/02_Arbeitsstaetten_gestalten/3_Leitfaden_BARRIEREFREIE_Arbeitsstaetten_planen_und_gestalten/2_Grundsaetze_und_Gestaltungsprinzipien/2_grundsaetze_und_gestaltungsprinzipien_node.html, s.a.

Walkenhorst, Holger: Praxiswissen Brandschutz. Sicherheitskonzepte. Köln: Feuer-Trutz, 2013

Weidmann, Ulrich: Transporttechnik der Fussgänger. Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs (Literaturauswertung). 2. Aufl. Zürich: IVT, 1993

Zehfuß, Jochen: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 4. Aufl. Münster, Braunschweig: vfdb, 2020

Zhang, J. et al.: Transitions in pedestrian fundamental diagrams of straight corridors and T-junctions. In *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* Nr. 6. DOI: 10.1088/1742-5468/2011/06/P06004, 2011

Ziemer, Verena: Mikroskopische Fundamentaldiagramme der Fußgängerodynamik. Empirische Untersuchung von Experimenten eindimensionaler Bewegung sowie quantitative Beschreibung von Stau-Charakteristika. Jülich: Forschungszentrum Jülich, 2020

Alle Internetquellen wurden zuletzt geprüft am 13.07.2023.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Platzbedarf und Bewegungsfläche eines Rollstuhlfahrers (in cm)	12
Abb. 2: Zeitkomponenten der individuellen Räumungszeit	17
Abb. 3: Gehgeschwindigkeit in der Ebene, abhängig vom Alter	20
Abb. 4: Verschiedene Fundamentaldiagramme für ebene Wegabschnitte	21
Abb. 5: Schematisches Fundamentaldiagramm	24
Abb. 6: Diskretisierte und kontinuierliche Geometrie	29
Abb. 7: Diskretisierung und Potenzialverlauf	38
Abb. 8: Ablauf des Random-Shuffle-Updates	39
Abb. 9: Dialogfenster zur Parameter-Einstellung.....	40
Abb. 10: Häufigkeitsverteilung der Ergebnisse.....	42
Abb. 11: Szenarien – Flaschenhals (links) und Korridor (rechts)	44
Abb. 12: Skizzen der Geometrien – Flaschenhals und Korridor	45
Abb. 13: Schematische Darstellung einer Messstelle	48
Abb. 14: Grundriss des Korridors in PedEd.....	50
Abb. 15: Grundriss des Flaschenhals-Szenarios in PedEd	50
Abb. 16: Entfluchtung der Referenzpopulation mit Referenzparametern	55
Abb. 17: Entfluchtung heterogener Population – Flaschenhals	56
Abb. 18: Entfluchtung heterogener Population – Korridor	57
Abb. 19: Parameteranpassung – Flaschenhals.....	60
Abb. 20: Parameteranpassung der Reaktion – Flaschenhals.....	61
Abb. 21: Parameteranpassung – Korridor	62
Abb. 22: Dichte, Fluss und Geschwindigkeit im Zeitverlauf – Korridor.....	63
Abb. 23: Dichte, Fluss, Geschwindigkeit im Zeitverlauf – Flaschenhals	66
Abb. 24: Videoaufnahmen der Korridor-Entfluchtung	74
Abb. 25: Dichteplot der Simulation (Bot_nah) im Flaschenhals	76
Abb. 26: Vorlassen eines Rollstuhlfahrers vor Engstelle (t = 41 s)	76
Abb. 27: Vorrausfahren einen Rollstuhlfahrers durch Engstelle (t = 45 s)	77
Abb. 28: Bewegungstrajektorien im Flaschenhals-Szenario.....	78

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Anzahl der Teilnehmer pro Durchlauf	46
Tab. 2: Freie Bewegungsgeschwindigkeit der Populationen	46
Tab. 3: Position und Maße der Messstellen	48
Tab. 4: Parameterauswahl – Referenzpopulation	51
Tab. 5: Parameterauswahl – Rollstuhlfahrer	52
Tab. 6: Entfluchtdauer der Referenzpopulation	55
Tab. 7: Entfluchtdauer der heterogenen Population	58
Tab. 8: Parameteranpassungen – Flaschenhals	59
Tab. 9: Parameteranpassungen der Reaktion für Flaschenhals	61
Tab. 10: Parameteranpassungen – Korridor	62

Digitaler Anhang – Inhaltsverzeichnis

- 1 Ergebnisdaten des Projekts SiME
 - Bor_ref, Bot_whe, Cor_ref, Cor_whe – je beide Durchläufe
- 2 PedGo-Ausgabedateien
 - Demographics, seed, Evac Curves, Logpoints
 - 2.1 Flaschenhals: Bot_ref, Bot_unkalibriert, Bot_kalibriert, Bot_nah
 - 2.2 Korridor: Cor_ref, Cor_unkalibriert, Cor_kalibriert, Cor_nah
 - 2.3 Parameteranpassungen (Kapitel 6.2)
- 3 Simulationsergebnisse: Diagramme (Kapitel 6)
 - 3.1 Evakuierungsgraphen (Kapitel 6.1)
 - 3.2 Parameteranpassung (Kapitel 6.2)
 - 3.3 Grundgrößen im Zeitverlauf (Kapitel 6.3)
- 4 Masterarbeit – Digitale Version
- 5 Kurzfassung und Abstract – Digitale Version

Eidesstattliche Versicherung

Ich, Lina Hebig, erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Quellenangaben und Zitate sind richtig und vollständig wiedergegeben und in den jeweiligen Kapiteln und im Literaturverzeichnis wiedergegeben. Die vorliegende Arbeit wurde nicht in dieser oder einer ähnlichen Form ganz oder in Teilen zur Erlangung eines akademischen Abschlussgrades oder einer anderen Prüfungsleistung eingereicht.

Mir ist bekannt, dass falsche Angaben im Zusammenhang mit dieser Erklärung strafrechtlich verfolgt werden können.

Diese Erklärung ist ausgefüllt mit der schriftlichen Abschlussarbeit im Dekanat des Fachbereichs, dem Sie angehören, einzureichen.

Bitte vollständig am PC oder deutlich lesbar in Druckbuchstaben ausfüllen.

■ Persönliche Daten	Matrikel-Nr. <u>910813</u>	Fachbereich <u>VIII</u>
Name	<u>Hebig</u>	
Vorname	<u>Lina</u>	
Studiengang	<u>Veranstaltungstechnik und -management (M.Eng.)</u>	

■ Erklärung der Studentin/des Studenten zur Abschlussarbeit

Ich versichere, dass ich

- meine Abschlussarbeit
 meinen Anteil an der als Gruppenarbeit gefertigten Abschlussarbeit

gilt nur für FB VI:

- meinen Abschlussfilm bzw. die Fotobücher
(nur für Audiovisuelle Medien Bachelor und Screen Based Media Bachelor)

selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Datum, Unterschrift Student/-in