



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Life Sciences

**Evakuierung von Hochhäusern im Gefahrenfall –
Grundlagen und Systematik,
Optimierung unter Zuhilfenahme gebäudetechnischer Anlagen**

Bachelorarbeit

im Studiengang
Rettungsingenieurwesen/Rescue Engineering

vorgelegt von
Patrick Linn
Mat.-Nr. 1960109

Hamburg am 01. Juni 2012

Gutachter: Prof. Dr. Bernd Kellner (HAW Hamburg)

Gutachter: Dipl.-Ing. Karsten Foth (hhpberlin Ingenieure für Brandschutz GmbH)

Die Abschlussarbeit wurde betreut und erstellt in Zusammenarbeit mit der Firma
hhpberlin Ingenieure für Brandschutz GmbH

Erklärung

Ich versichere, dass ich meine Bachelorarbeit ohne Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Hamburg, den 01. Juni 2012

A handwritten signature in blue ink, reading "Patrick Lin". The signature is written in a cursive style with a large initial 'P' and 'L'.

Patrick L i n n

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beitragen haben, meinen Dank aussprechen. Zuallererst möchte ich mich recht herzlich bei Herrn Prof. Dr. rer. biol. hum. Bernd Kellner bedanken, der diese Arbeit betreut hat und mir wichtige Hilfestellungen und Ratschläge gab. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Karsten Foth für die Aufgabenstellung und seine Betreuung bedanken. Ein recht herzliches Dankeschön an dieser Stelle sei auch an Herrn Dipl.-Ing. Rolf Tilly gerichtet, der mir den nötigen fachlichen Hintergrund ermöglichte. Mein weiterer Dank gilt der Firma hhpberlin Ingenieure für Brandschutz GmbH, die mir die zur Analyse notwendige Software zur Verfügung gestellt hat. Zuletzt bedanke ich mich bei der für mich wichtigsten Person, meiner Ehefrau. Danke für alles!

Zusammenfassung

Der zunehmende Technisierungsgrad der Bauindustrie und die zur Verfügung stehenden hochwertigen Baustoffe ermöglichen es, Hochhäuser mit zunehmender Gebäudehöhe zu realisieren. Gleichzeitig steigt das Interesse, den nur begrenzt zur Verfügung stehenden Raum in Hochhäusern optimal zu nutzen. Dies hat zur Folge, dass immer mehr Hochhäuser vorgestellt werden, welche nur noch über einen innenliegenden Sicherheitstreppenraum erschlossen werden können. Diese Entwicklung wirft Fragen bezüglich der Personensicherheit auf, da mit der Einführung der Muster-Hochhaus-Richtlinie (MHHR) im Jahr 2008 ein innenliegender Sicherheitstreppenraum in Hochhäusern bis zu einer Höhe von 60 m als einziger Rettungsweg bauaufsichtlich zugelassen ist. Ein zweiter redundant geführter Rettungsweg, wie er nach der Muster-Hochhausrichtlinie (MHochR) aus dem Jahr 1981 üblich war, fehlt in der neuen konzeptionellen Betrachtung gänzlich. Die Erfordernis eines einzigen vertikalen Rettungsweges wird damit begründet, dass mit dem hohen technischen Standard in der Gebäudetechnik, die ständige Rauchfreihaltung eines innenliegenden Sicherheitstreppenraumes im Falle eines Brandes gewährleistet werden kann.

Aus der Thematik heraus beschäftigt sich diese Arbeit mit der Evakuierung von Hochhäusern im Gefahrenfall. Der Begriff Gefahrenfall umfasst dabei nicht nur die bauaufsichtlich akzeptierte Brandgefahr, sondern schließt Gefahrensituationen, wie sie beispielsweise aus einer Bombendrohungen heraus entstehen können, mit ein. Die Thematik wird dabei von der Frage geleitet, ob eine sichere und schnelle Evakuierung von Hochhäusern im Gefahrenfall möglich ist und die Rettungswege dazu ausreichend dimensioniert sind. Dazu wurden zunächst die bauaufsichtlichen Bemessungskriterien für Rettungswege der bisher geltenden MHochR 1981 und der neuen MHHR 2008 herausgearbeitet und mit internationalen Standards an den Beispielen der Staaten Großbritannien und den USA verglichen. Auf Basis der Bemessungskriterien der MHochR 1981 und der MHHR 2008 wurden dann zwei Gebäudemodelle entwickelt, um die unterschiedliche Rettungswegsituation in den Modellen darzustellen. Danach erfolgte die Diskretisierung der Gebäudemodelle in die Simulationssoftware PedGo, mit der die Personenstromanalyse durchgeführt wurde. Die Analyse erfolgte szenarienbasiert, mit dem Ziel, Personengefährdungen und Staus in den Modellen zu identifizieren. Die aus der Analyse ge-

wonnenen Ergebnisse wurden dazu eingesetzt, den Evakuierungsverlauf im Simulationsmodell nach MHHR insoweit zu optimieren, dass eine sichere und schnelle Evakuierung in einem Gefahrenfall möglich ist. Im Anschluss wurde untersucht, ob die Anwendung internationaler Bemessungskriterien für Rettungswege einen Einfluss auf die Evakuierungsdauer des Gebäudemodelles nach MHHR hat.

Als ein Ergebnis konnte ermittelt werden, dass eine schnelle Evakuierung im Gefahrenfall nicht ohne Personengefährdungen möglich ist. Demgegenüber ist in einem Brandfall die Evakuierung eines Brandgeschosses sowie des darüber und darunter liegenden Obergeschosses gefahrlos möglich. Weiterhin konnte ermittelt werden, dass eine phasenweise Evakuierung im Gefahrenfall eine sichere, aber keine schnelle Evakuierung ermöglicht. Gleichzeitig geht mit einer phasenweisen Evakuierung eine Verlängerung der Evakuierungsdauer einher. Insgesamt kann festgehalten werden, dass der Verzicht eines Rettungsweges eine Verschlechterung der Personensicherheit darstellt.

Inhaltsverzeichnis

Erklärung	I
Danksagung	II
Zusammenfassung	III
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XI
Abkürzungsverzeichnis	XII
Einheitenverzeichnis	XIII
1 Einleitung	1
2 Definitionen	4
2.1 Evakuierung	4
2.2 Räumung	4
2.3 Hochhaus	4
2.4 Gefahrenfall	5
2.5 Gebäudetechnische Anlagen	6
2.6 Flucht- und Rettungsweg	7
2.7 Personendichte	8
2.8 Retten	8
3 Rettungswege in Hochhäusern	9
3.1 Allgemeine Anforderungen	9
3.2 Prinzip des ersten und zweiten Rettungsweges	10
3.3 Bemessung der Rettungswege in Deutschland	11
3.3.1 Rettungswege nach MHochR	11
3.3.2 Rettungswege nach MHHR	12

3.4	Bemessung der Rettungswege im internationalen Vergleich	12
3.4.1	Großbritannien	12
3.4.2	Vereinigte Staaten von Amerika	15
3.5	Zusammenfassung	16
4	Grundlagen der Evakuierungsberechnung	18
4.1	Modelle zur Personenstromanalyse	18
4.1.1	Makroskopische Modelle	18
4.1.2	Mikroskopische Modelle	20
4.2	Kapazitätsanalyse als makroskopisches Modell	22
4.2.1	Eingangsparameter	22
4.2.2	Referenzwerte	22
4.2.3	Berechnung der Wegzeit	23
4.2.4	Berechnung der Passagezeit	24
4.2.5	Berechnung der Entfluchtungsdauer	24
4.3	Simulationssoftware PedGo als mikroskopisches Modell	25
4.3.1	Diskretisierung	25
4.3.2	Zelltypen	26
4.3.3	Agenten	29
4.3.4	Ausgabe der Ergebnisse	32
4.3.5	Bewertung der Ergebnisse	33
4.4	Ermittlung der Entfluchtungsdauer	34
4.5	Der Faktor Mensch bei der Evakuierung	39
4.5.1	Verhalten von Personen in normalen Situationen	39
4.5.2	Verhalten von Personen im Brandfall	40
4.5.3	Verhalten von Personen in panikartigen Situationen	40
4.6	Zusammenfassung	41
5	Gebäudemodelle und Diskretisierung	43
5.1	Gebäudemodelle	43
5.1.1	Kubatur	43
5.1.2	Nutzung	43
5.1.3	Rettungswege	44
5.1.4	Türen im Rettungsweg	45
5.1.5	Gebäudetechnische Anlagen	45
5.1.6	Personenbelegung	46
5.1.7	Evakuierungsszenarios	47

5.1.8	Gesicherter Bereich	48
5.2	Diskretisierung	48
5.2.1	Kubatur	48
5.2.2	Gebäudemodell nach MHochR	48
5.2.3	Gebäudemodell nach MHHR	49
5.2.4	Population	50
6	Ergebnisse	54
6.1	Szenario 1	54
6.1.1	Simulationsmodell nach MHochR	54
6.1.2	Simulationsmodell nach MHHR	58
6.1.3	Optimiertes Szenario	61
6.2	Szenario 2	65
6.2.1	Simulationsmodell nach MHochR	65
6.2.2	Simulationsmodell nach MHHR	69
6.2.3	Optimiertes Szenario	73
7	Diskussion	76
8	Entfluchtungsdauer im internationalen Vergleich	82
8.1	Gesamtevakuiierung	82
8.1.1	Bemessung der vertikalen Rettungswege	82
8.1.2	Gesamtentfluchtungsdauer	83
8.2	Phasenweise Evakuierung	83
8.2.1	Bemessung der vertikalen Rettungswege	83
8.2.2	Gesamtentfluchtungsdauer	83
9	Fazit	84
	Literaturverzeichnis	86
	Anhang A	90
	CD-Anhang	90

Abbildungsverzeichnis

3.1	Rettungshöhe einer Drehleiter	11
4.1	Darstellung eines Personenstromes [36]	19
4.2	Entfluchtungsmodelle im Überblick	21
4.3	Geometrie im Simulationsmodell [47]	26
4.4	Wandzellen im Simulationsmodell [47]	27
4.5	Treppenzellen und Sprungzellen im Simulationsmodell [47]	28
4.6	Richtungswahl auf Treppen im Simulationsmodell [47]	28
4.7	Türzellen im Simulationsmodell [47]	29
4.8	Ausgangszellen im Simulationsmodell [47]	29
4.9	Sub-Update eines Agenten in PedGo [47]	30
4.10	Histogramm eines Simulationsdurchlaufs [47]	33
4.11	Gehgeschwindigkeiten in der Ebene [51]	37
4.12	Zeitkomponenten der Gesamtentfluchtungsdauer	39
4.13	Bogenbildung an Ausgängen [36]	41
5.1	Grundriss einer Ebene im Simulationsmodell nach MHochR	49
5.2	Grundriss einer Ebene im Simulationsmodell nach MHHR	50
5.3	Parametereinstellungen im Simulationsmodell nach MHochR	51
5.4	Potenzialfeld im Simulationsmodell MHochR	52
5.5	Potenzialfeld im Simulationsmodell MHHR	52
5.6	Personenverteilung im Simulationsmodell nach MHochR	53
5.7	Personenverteilung im Simulationsmodell nach MHHR	53
6.1	Entfluchtungsauern der Obergeschosse im Simulationsmodell nach MHochR	55
6.2	16. Obergeschoss im Simulationsmodell MHochR zum Zeitpunkt $t = 110$ s	55
6.3	Personendichte im 7. Obergeschoss im Simulationsmodell MHochR	56
6.4	Personendichte im 6. Zwischengeschoss im Simulationsmodell MHochR	56
6.5	Personendichte im Erdgeschoss im Simulationsmodell MHochR	56

6.6	Histogramm der Gesamtentfluchtungsdauern für das Simulationsmodell MHochR (Szenario 1)	57
6.7	Evakuierungssituation im 8. Obergeschoss im Simulationsmodell MHRR zum Zeitpunkt $t = 129$ s	58
6.8	Entfluchtungsdauern und Staudauern in den Obergeschossen im Simulationsmodell MHHR	59
6.9	Personendichte im 12. Obergeschoss im Simulationsmodell MHHR	59
6.10	Personendichte im 11. Zwischengeschoss im Simulationsmodell MHHR	60
6.11	Histogramm der Gesamtentfluchtungsdauern für das Simulationsmodell MHHR (Szenario 1)	61
6.12	Entfluchtungsdauern und Staudauern in den Obergeschossen im optimierten Szenario 1	62
6.13	Evakuierungssituation im 11. Obergeschoss im optimierten Szenario 1 zum Zeitpunkt $t = 591$ s	63
6.14	Personendichte im 5. Obergeschoss im optimierten Szenario 1	63
6.15	Personendichte im 4. Zwischengeschoss im optimierten Szenario 1	63
6.16	Histogramm der Gesamtentfluchtungsdauern für das optimiertes Szenario 1	64
6.17	Gesamtentfluchtungsdauern für das Szenario 1 im Überblick	65
6.18	Gesamtentfluchtungsdauern der Obergeschosse für die Phase 1 im Simulationsmodell MHochR	66
6.19	Personendichte im 14. Obergeschoss in der Phase 1 im Simulationsmodell nach MHochR	66
6.20	Evakuierungssituation im 14. Obergeschoss in der Phase 1 im Simulationsmodell nach MHochR zum Zeitpunkt $t = 250$ s	67
6.21	Personendichte im 14. Obergeschoss in der Phase 2 im Simulationsmodell nach MHochR	67
6.22	Personendichte im 13. Zwischengeschoss in der Phase 2 im Simulationsmodell nach MHochR	67
6.23	Histogramm der Gesamtentfluchtungsdauern für die Phase 2 im Simulationsmodell MHochR (Szenario 2)	68
6.24	Gesamtentfluchtungsdauern der Obergeschosse in der Phase 1 im Simulationsmodell MHHR	69
6.25	Personendichte im 15. Obergeschoss (Brandgeschoss) in der Phase 1 im Simulationsmodell MHHR	70
6.26	Personendichte im 14. Obergeschoss in der Phase 1 im Simulationsmodell MHHR	70

6.27	Personendichte im 13. Zwischengeschoss in der Phase 1 im Simulationsmodell MHR	70
6.28	Personendichte im 10. Obergeschoss in der Phase 2 im Simulationsmodell MHR	71
6.29	Personendichte im 9. Zwischengeschoss in der Phase 2 im Simulationsmodell MHR	71
6.30	Evakuierungssituation im 8. Obergeschoss in der Phase 2 im Simulationsmodell MHR	71
6.31	Histogramm der Gesamtentfluchtungsdauern für das Simulationsmodell MHR (Szenario 2)	72
6.32	Histogramm der Gesamtentfluchtungsdauern für das optimierte Szenario 2	74
6.33	Gesamtentfluchtungsdauern des Szenario 2 im Überblick	75

Tabellenverzeichnis

2.1	Gefahrenmatrix	5
3.1	Anzahl der erforderlichen Rettungswege und Ausgänge aus einem Raum oder Geschoss [23]	13
3.2	Mindestbreite der Treppen bei phasenweiser Evakuierung [23]	14
3.3	Mindestbreite von Korridoren und Ausgängen in einem Geschoss [23]	14
3.4	Treppenbreiten nach [33, Ziffer 7.2.2.2.1.2 (B)]	15
3.5	Konstruktionsmerkmale von Treppen [33, Ziffer 7.2.2.2.1 (a) (modifiziert)]	15
3.6	Flucht- und Rettungswegbreiten im internationalen Vergleich [15, 20, 23, 33]	17
4.1	Parameter für die Kapazitätsanalyse [41, 48]	23
4.2	Mittlere Gehgeschwindigkeit auf Treppen [22]	38
6.1	Gesamtentfluchtungsdauern für das Simulationsmodell MHochR im Szenario 1	57
6.2	Gesamtentfluchtungsdauern für das Simulationsmodell MHHR im Szenario 1	60
6.3	Verzögerungsdauern der Obergeschosse im optimierten Szenario 1	62
6.4	Gesamtentfluchtungsdauern für das optimierte Szenario 1	63
6.5	Gesamtentfluchtungsdauern der Phase 2 für das Simulationsmodell MHochR im Szenario 2	68
6.6	Verzögerungsdauern der Obergeschosse im optimierten Szenario 2	73
6.7	Gesamtentfluchtungsdauern für das optimierte Szenario 2	73

Abkürzungsverzeichnis

AGBF	Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in der Bundesrepublik Deutschland
ARGEBAU	Arbeitsgemeinschaft der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister der Bundesländer
ArbStättV	Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung)
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DXF	Drawing Interchange Format
LBO	Landesbauordnung
MBO	Musterbauordnung
MHHR	Muster-Hochhaus-Richtlinie 2008
MHochR	Muster-Hochhausrichtlinie 1981
MVStättV	Muster-Versammlungsstätten-Verordnung
NFPA	National Fire Protection Association
PDF	Portable Document Format
RiMEA	Richtlinie für mikroskopische Entfluchtungsanalysen
SFPA	Society of Fire Protecting Engineers

Einheitenverzeichnis

ft.	foot ($\approx 0,3048$ m)
ft. ²	square foot ($\approx 0,0929$ m ²)
in.	Inch
lbf	pount-force ($\approx 4,448$ N)
m	Meter
N	Newton
m ²	Meter im Quadrat
s	Sekunde

1 Einleitung

Das erste Hochhaus der Welt, das „*Home Insurance Building*“, hatte eine Höhe von 42 m und wurde 1885 in Chicago errichtet [50]. Die im Nordosten der USA gelegene Stadt wird aus diesem Grund als die „*Wiege der Hochhauskultur*“ bezeichnet. Seit dieser Zeit hat die Höhe von Hochhäusern stetig zugenommen. Während in Deutschland in den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts Hochhäuser gerade einmal über eine Höhe von 100 m verfügten, erreichen sie heute bereits eine Höhe von 300 m. Stellt man einen internationalen Vergleich an, so findet man in Dubai das höchste Gebäude der Welt. Das „*Burj Khalifa*“ verfügt über 189 Stockwerke und weist eine Gebäudehöhe von 830 m auf [7]. Die fortschreitende Entwicklung in der Verfügbarkeit, Verarbeitung und Festigkeit von Baustoffen sowie der hohe Technisierungsgrad der Bauindustrie ermöglichen es, solche Bauvorhaben zu realisieren.

Mit steigender Gebäudehöhe verlängert sich der Rettungsweg und die Personengefährdung nimmt zu. In Deutschland werden aus diesem Grund an Hochhäuser hohe Anforderungen an die Ausgestaltung der Rettungswege gestellt und im baurechtlichen Regelwerk verbindlich festgeschrieben. Die dazu bisher geltende Muster-Hochhausrichtlinie aus dem Jahr 1981 sah für Hochhäuser bis zu einer Höhe von 60 m zwei Treppenräume als Rettungsweg vor. Mit der Neuerscheinung der Muster-Hochhaus-Richtlinie (MHHR) [20] im April 2008 genügt als Rettungsweg ein einziger Treppenraum in Form eines im Gebäude liegenden Sicherheitstreppenraumes¹. Auf einen zweiten redundant geführten Rettungsweg wird gänzlich verzichtet. Das Argument der für die Erarbeitung der MHHR zuständigen Fachkommission über den Verzicht eines Rettungsweges lautet, dass ein Sicherheitstreppenraum gegenüber einem „herkömmlichen“ Treppenraum durch sicherheitstechnische Maßnahmen ständig rauchfrei gehalten werden kann, obwohl die sichere Rauchfreihaltung von Sicherheitstreppenräumen bei unterschiedlichen Außentemperaturen als nicht nachgewiesen gilt [8].

Hat man allerdings die Ereignisse des 11. September 2001 in New York City vor Augen, stellt sich die Frage, was passiert, wenn ein Hochhaus in Deutschland von solch einem ähnlichen Ereignis betroffen ist. Ist dann die Kapazität der Rettungswege immer noch ausreichend? Wie

¹ Ein Sicherheitstreppenraum ist ein Treppenraum, in den kein Feuer und Rauch eindringen kann [16].

lange dauert es wohl, bis alle Flüchtenden in Sicherheit sind? Was passiert, wenn der einzige Rettungsweg ausfällt? Sicherlich lässt sich die Frage zunächst damit beantworten, dass Terroranschläge, wie sie in New York City stattfanden, kein für Hochhäuser in Deutschland gebäudetypisches Ereignis darstellen und aus diesem Grund auch keine erhöhten Anforderungen an das vertikale Rettungswegsystem gestellt werden müssen. Jedoch existieren für solche Gebäude weitaus mehr Bedrohungen als nur Terroranschläge. Beispielhaft sei hier der durch die Bauarbeiten am 3. März 2009 in Köln verursachte Gebäudeeinsturz des Stadtarchives genannt. Biologische und chemische sowie radioaktive Gefahren dürfen dabei nicht außer Acht gelassen werden. Vorweggenommen werden kann jetzt schon, dass es sicherlich aufgrund der vorherrschenden Rettungswegsituation zu Stauungen und hohen Räumungszeiten kommt. Ganz zu schweigen von den physischen und psychischen Belastungen, die bei den Flüchtenden ausgelöst werden.

Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich diese Arbeit mit der Evakuierung von Hochhäusern. Ziel der Untersuchung soll es sein, anhand von Simulationsmodellen die unterschiedliche Rettungswegsituation der rechtlichen Vorgaben der Musterhochhausrichtlinien darzustellen und einen gesteuerten und optimierten Evakuierungsverlauf insoweit zu entwickeln, dass Personengefährdungen ausgeschlossen werden können. Zur Entwicklung eines gesteuerten Räumungsablaufes soll dazu die in den Gebäuden vorhandene sicherheitstechnische Gebäudeausrüstung (z. B. Alarmierungsanlage) eingesetzt werden. Die Optimierung des Evakuierungsverlaufes soll auch im Hinblick auf einen möglichen Einsatz von Gebäudetechnik erfolgen.

Dazu werden in einem ersten Schritt die in dieser Arbeit verwendeten Begriffe definiert. Im zweiten Schritt werden die baurechtlichen Anforderungen an die Ausgestaltung der Rettungswege in Hochhäusern herausgearbeitet. Ein Vergleich mit den Vereinigten Staaten von Amerika und Großbritannien soll die internationalen Anforderungen an die Ausgestaltung von Rettungswegen in Hochhäusern darstellen. Im dritten Schritt werden die Grundlagen für eine Evakuierungsberechnung erarbeitet und die zur Ermittlung der Evakuierungsdauer anwendbaren Modelle vorgestellt. Danach folgt die Erklärung der in dieser Arbeit verwendeten Berechnungsverfahren. Im Weiteren wird auf den Faktor Mensch bei der Evakuierung eingegangen.

Im nächsten Schritt erfolgt die Beschreibung der Simulationsmodelle und die zur Analyse notwendigen Szenarien. Die Simulationsmodelle bilden dabei die Rettungswegsituation, die sich aus der entsprechenden Muster-Hochhaus-Richtlinie ergibt, ab. Im fünften Schritt werden die Simulationsergebnisse vorgestellt und diskutiert. Abschließend erfolgt eine Vergleichsrechnung eines Simulationsmodelles nach britischem Baurecht. Die Vergleichsrechnung soll untersuchen, ob die Anwendung der britischen Bemessungsgrundsätze für Rettungswege eine Verbesserung gegenüber dem deutschen Baurecht in Bezug auf die Evakuierungsdauer darstellt.

2 Definitionen

2.1 Evakuierung

Unter einer Evakuierung (lat. *evacuare* \triangleq „ausleeren“) wird nach [3] die „... *organisierte und kontrollierte Verlegung von Menschen oder Tieren aus einem gefährdeten Bereich in einen sicheren Bereich ...*“ verstanden. Der gefährdete Bereich umfasst dabei einen „... *Bereich, in dem Gefahren für Leben, Gesundheit, Umwelt und Sachen erkennbar sind ...*“ [3]. Gefährdete Bereiche können Teile von Gebäuden (z. B. Räume, Geschosse) sein oder ganze Gebiete umfassen [37]. Ein Bereich, „... *indem Personen vorübergehend vor einer unmittelbaren Gefahr für Leben und Gesundheit geschützt...*“ sind, kann als gesicherter Bereich verstanden werden [10].

2.2 Räumung

Als Räumung wird ein „... *schnelles in Sicherheit bringen von Menschen und Tieren aus einem akut gefährdeten Bereich...*“ verstanden [3]. Eine Räumung ist dadurch charakterisiert, dass sie unmittelbar und schnell aus einer akuten Gefahrenlage heraus geschieht. Die Räumung enthält gegenüber einer Evakuierung keine planerischen Elemente, sondern wird ad hoc durchgeführt.

2.3 Hochhaus

Als Hochhaus wird ein Gebäude bezeichnet, dessen Fußbodenoberkante des höchstgelegenen Geschosses in dem ein Aufenthaltsraum möglich ist, mehr als 22 m über der Geländeoberfläche im Mittel liegt [16]. Die Grenze von 22 m Höhe wird unter Fachleuten als Hochhausgrenze bezeichnet [29]. Mit zunehmender Gebäudehöhe nimmt die Rettungsweglänge und gleichzeitig die Anzahl der sich auf begrenztem Raum befindlichen Personen zu. Hochhäuser werden nach § 2 Abs. 4 Punkt 1 der Musterbauordnung (MBO) [16] als Sonderbauten und damit als „... *Anlagen und Räume besonderer Art oder Nutzung ...*“ bezeichnet.

An sie dürfen besondere Anforderungen gestellt werden, wenn zu erwarten ist, dass eine Gefahr für Leben und Gesundheit oder der natürlichen Lebensgrundlage existiert [16, § 51]. Unabhängig davon werden Hochhäuser in die Gebäudeklasse 5 eingestuft.

2.4 Gefahrenfall

Die Gefahr ist ein subjektiv empfundener Bedrohungszustand, der sich danach richtet, was in einer Gesellschaft toleriert oder auch als notwendiger Zustand erachtet wird. So werden z. B. seismographische Bewegungen von der Bevölkerung in Japan anders wahrgenommen, als dies in Deutschland der Fall ist. Je nach Art der Gefahr kann diese auf Menschen, Tiere, Sachwerte und/oder die natürliche Lebensgrundlage (Umwelt) wirken [37].

In der Tabelle 2.1 werden Gefährdungsmöglichkeiten und ihre Einwirkung auf Menschen, Tiere, Sachwerte (auch Gebäude) und Umwelt zusammenfassend dargestellt. Die Gefahrenmatrix erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Art der Gefahr	Mensch	Tier	Sachwert	Umwelt
Atemgifte	X	X		X
Atomare	X	X	X	X
Biologisch	X	X	X	X
Chemisch	X	X	X	X
Explosion	X	X	X	X
Elektrizität	X	X	X	
Einsturz	X	X	X	
Feuchtigkeit	X	X	X	
Feuer	X	X	X	X
Klima	X	X	X	X
Panik	X	X		
Schall	X	X		
Schädlinge	X	X	X	X
Terror	X	X	X	X

Tab. 2.1: Gefahrenmatrix

Der Begriff Gefahrenfall soll in dieser Arbeit einen Zustand, Umstand oder Vorgang beschreiben, der eine schädliche Einwirkung auf Menschen, Tiere und/oder Sachwerte haben kann.

2.5 Gebäudetechnische Anlagen

Hochhäuser verfügen über eine sicherheitstechnische Gebäudeausrüstung, die dazu dient, betroffene Personen in einem Brandgeschoss frühzeitig zu alarmieren, die Rettungswege vor dem Eindringen von Feuer und Rauch zu schützen und ausreichend lange zu beleuchten. Darüber hinaus leitet eine sicherheitstechnische Gebäudeausrüstung erste Löschmaßnahmen ein und unterstützt damit die Feuerwehr bei der Brandbekämpfung. Daneben dient die sicherheitstechnische Gebäudeausrüstung zur effektiven Informationsgewinnung für die Feuerwehr und ermöglicht eine schnelle Rettung mobilitätseingeschränkter Personen. Die sicherheitstechnische Ausrüstung ist an eine Sicherheitsstromversorgung angeschlossen, damit bei einem Netzausfall die Funktion der sicherheitstechnischen Gebäudeausrüstung gewährleistet bleibt. Die Funktionsfähigkeit wird durch wiederkehrende Prüfungen nachgewiesen und sichergestellt.

Zur sicherheitstechnischen Gebäudeausrüstung eines Hochhauses gehören (nach [20]):

- Feuerwehraufzüge inkl. Brandfallsteuerung
- Fahrschächte von Feuerwehraufzügen und Vorräume
- Druckbelüftungsanlagen
- automatische Feuerlöschanlagen
- Steigleitungen und Wandhydranten
- Brandmelde- und Alarmierungsanlagen einschließlich der Brandmeldezentrale
- Sicherheitsbeleuchtung
- Sicherheitsstromversorgungsanlagen
- Blitzschutzanlagen
- Gebädefunkanlagen
- Rauch- und Wärmeabzugsanlagen

Neben dem Begriff der sicherheitstechnischen Gebäudeausrüstung wird im Baurecht auch der Begriff der Technischen Anlage verwendet [18]. Die sicherheitstechnische Gebäudeausrüstung lässt sich unter dem anlagentechnischen Brandschutz subsumieren. Für die Bezeichnung sicherheitstechnische Gebäudeausrüstung soll in dieser Arbeit der Begriff gebäudetechnische Anlage als Synonym verwendet werden.

2.6 Flucht- und Rettungsweg

Ein Fluchtweg dient zur Flucht einer Person aus einem gefährdeten Bereich in einen gesicherten Bereich. Der Fluchtweg muss dazu die flüchtende Person für die Dauer ihrer Flucht vor schädigenden Einwirkungen ausreichend lange schützen. Ein Fluchtweg beginnt von einer beliebigen Stelle innerhalb eines Gebäudes und endet in einem gesicherten Bereich. Der Fluchtweg wird von einer Person immer von innen nach außen begangen. Der Verlauf des Fluchtweges ist durch selbstleuchtende oder beleuchtete Sicherheitszeichen nach DIN 4844 [4] jederzeit erkennbar zu kennzeichnen.

Ein Rettungsweg dient zur Rettung von Personen durch Einsatzkräfte. Der Rettungsweg wird dazu von außen nach innen begangen. Häufig ist der Verlauf der Flucht- und Rettungswege identisch.

Flucht- und Rettungswege unterscheiden sich demnach nicht nur in der Laufrichtung, in der sie begangen werden, sondern auch in ihrem Zweck. Während Fluchtwege nur zur Flucht verwendet werden, dienen Rettungswege ausschließlich der Rettung von Personen durch Einsatzkräfte. Nach [43] sind Flucht- und Rettungswege „... *ununterbrochene und unverspernte Laufwege* ...“, die von einer beliebigen Stelle eines Gebäudes zu einem gesicherten Bereich führen.

In [16] wird ausschließlich der Begriff der Rettungswege verwendet. Bei näherer Betrachtung lässt sich erkennen, dass bspw. ein notwendiger Flur, der in [16] als Rettungsweg bezeichnet wird, sowohl Flucht- als auch Rettungsweg ist. Daraus kann geschlossen werden, dass die Bezeichnung Rettungsweg im baurechtlichen Sinn als Oberbegriff für Flucht- und Rettungswege steht.

In Anlehnung an [16] soll deshalb in dieser Arbeit die Bezeichnung Rettungswege als Oberbegriff für Flucht- und Rettungswege stehen.

2.7 Personendichte

Die Personendichte ρ ist allgemein definiert als die Anzahl der Personen, die sich auf einer Bezugsfläche von einem Quadratmeter befinden. Sie wird berechnet aus dem Quotienten aus der Anzahl der Personen und der betrachteten Bezugsfläche.

$$\rho = \frac{N}{A} \left[\frac{\text{Personen}}{m^2} \right] \quad (2.1)$$

ρ Personendichte $\left[\frac{\text{Personen}}{m^2} \right]$

N Anzahl der Personen

A Bezugsfläche $[m^2]$

2.8 Retten

Das Retten ist das „... Abwenden eines lebensbedrohlichen Zustandes von Menschen oder Tieren und/oder Befreien aus einer lebens- oder gesundheitsgefährdeten Zwangslage.“ [3]. Im Rettungswesen (Rettungsdienst) umfasst das Retten das „... Abwenden eines lebensbedrohlichen Zustandes durch lebensrettende Sofortmaßnahmen ...“ [2].

3 Rettungswege in Hochhäusern

3.1 Allgemeine Anforderungen

Nach § 3 Abs. 1 MBO [16] sind Anlagen „... so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürliche Lebensgrundlage, nicht gefährdet werden.“ Zur Sicherstellung dieser allgemeinen Anforderungen werden an bauliche Anlagen neben der Standsicherheit, dem Schutz gegen schädliche Einflüsse (z. B. durch Wasser, tierische Schädlinge oder physikalische Einflüsse), dem Wärme-, Schall- und Erschütterungsschutz, auch Anforderungen bezüglich des Brandschutzes gestellt. Diese werden in § 14 MBO wie folgt, definiert (nach [16]):

„Bauliche Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind.“

Die Brandgefahr wird im baurechtlichen Sinn als eine der Hauptgefahren angesehen, sodass sich aus den Anforderungen an den baulichen Brandschutz aus § 14 MBO vier wesentliche Schutzziele ableiten lassen:

1. Vorbeugung der Entstehung eines Brandes
2. Vorbeugung der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung)
3. Rettung von Menschen und Tieren bei einem Brand
4. wirksame Löscharbeiten

Daraus resultieren materielle Anforderungen an die Ausgestaltung von Rettungswegen, die Ausführung von tragenden und aussteifenden Bauteilen sowie die technische Gebäudeausrüstung eines Hochhauses.

Neben den materiellen Anforderungen an die Bauteile eines Hochhauses steht die Personensicherheit im Vordergrund.

Aus diesem Grund formulieren die baurechtlichen Anforderungen weitere Eckpunkte um die Personensicherheit zu erhöhen (nach [19]):

- Früherkennung eines Brandes
- automatische Alarmierung des Brandgeschosses
- automatische Weiterleitung einer Brandmeldung an die Feuerwehr
- schnelle Selbstrettung aus dem Gebäude
- ausreichend lange Begrenzung der Brandausbreitung möglichst auf ein Geschoss
- zügiger Löschangriff der Feuerwehr im Brandgeschoss

Als Sonderbau können nach § 51 MBO an Hochhäuser weitere Anforderungen oder Erleichterungen gestellt werden, wenn es darum geht, Leben, Gesundheit und die natürliche Lebensgrundlage nicht zu gefährden. Diese weiteren Anforderungen ergeben sich aus der durch die Fachkommission Bauaufsicht der ARGEBAU erarbeiteten Muster-Hochhaus-Richtlinie (MHHR) [20]. Diese Richtlinie löste im April 2008 die seit 1981 geltende Muster-Hochhausrichtlinie (MHochR) ab [15].

3.2 Prinzip des ersten und zweiten Rettungsweges

Damit eine sichere Selbstrettung von Personen und eine Fremdrettung durch Einsatzkräfte¹ möglich ist, werden Rettungswege redundant geführt. So müssen nach § 33 MBO [16] für jede Nutzungseinheit² mit mindestens einem Aufenthaltsraum in jedem Geschoss mindestens zwei voneinander unabhängige Rettungswege ins Freie vorhanden sein, was als das *Prinzip des ersten und zweiten Rettungsweges* verstanden werden kann.

Sind Nutzungseinheiten nicht im Erdgeschoss angeordnet, muss der erste Rettungsweg über eine notwendige Treppe³ führen. Der zweite Rettungsweg kann eine weitere notwendige Treppe sein oder eine mit Rettungsgeräten⁴ der Feuerwehr erreichbare Stelle der Nutzungseinheit.

¹ Der Begriff Einsatzkräfte wird hier als Sammelbegriff für den an einem Einsatz beteiligten Personenkreis der Polizei und Feuerwehr sowie anderer Hilfsorganisationen verwendet.

² Nutzungseinheiten sind bspw. Wohnungen, Praxen, selbstständige Betriebsstätten etc.

³ Eine notwendige Treppe führt in einem Zuge zu allen angeschlossenen Geschossen eines Gebäudes und befindet sich in einem eigenen durchgehenden Treppenraum (notwendiger Treppenraum).

⁴ Rettungsgeräte sind genormte vornehmlich zur Rettung von Menschen und Tieren eingesetzte Geräte der Feuerwehr, wie z. B. tragbare Leitern, Drehleitern.

Der zweite Rettungsweg ist nicht erforderlich, wenn die Rettung über einen sicher erreichbaren Treppenraum, in den Feuer und Rauch nicht eindringen können (Sicherheitstreppenraum) gewährleistet ist [16, § 33 - 35].

Bei Hochhäusern kann der zweite Rettungsweg nicht durch ein Rettungsgerät der Feuerwehr sichergestellt werden. Die Feuerwehren in Deutschland verfügen über das Rettungsgerät Drehleiter, welches eine maximale Rettungshöhe von 23 m aufweist und zur Rettung einer erhöhten Anzahl von Menschen und Tieren nicht geeignet ist. Je nach festgesetzter Höhe der Geländeoberfläche kann mit der Rettungshöhe einer Drehleiter die Brüstung des achten Obergeschosses eines Gebäudes erreicht werden. Daraus folgt, dass die Rettungswege eines Hochhauses ausschließlich baulich sichergestellt werden müssen. Die nachfolgende Abbildung 3.1 veranschaulicht die maximale Rettungshöhe einer Drehleiter.

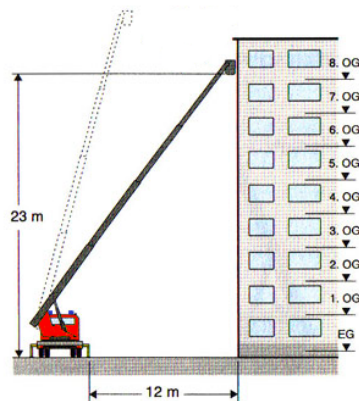


Abb. 3.1: Rettungshöhe einer Drehleiter

3.3 Bemessung der Rettungswege in Deutschland

Die Rettungswege eines Gebäudes gliedern sich in horizontal und vertikal verlaufende Rettungswege. In Hochhäusern erfolgt die Hauptschließung vertikal, sodass besonders die vertikalen Rettungswege für eine Flucht ausreichend bemessen sein müssen. Die baurechtlichen Anforderungen für die Bemessung der Längen und Breiten von Rettungswegen ergeben sich aus der Muster-Hochhaus-Richtlinie.

3.3.1 Rettungswege nach MHochR

In Hochhäusern, die nach der MHochR errichtet wurden, beträgt die lichte Breite eines jeden Teils von Rettungswegen mindestens 1,25 m. Von jedem Geschoss des Hochhauses müssen

zwei notwendige Treppen oder eine notwendige Treppe und ein Sicherheitstrepfenraum ins Freie führen. Sind zwei notwendige Treppen vorhanden, so sind diese entgegengesetzt anzuordnen, damit sie in verschiedenen Rauchabschnitten⁵ liegen. Jede notwendige Treppe ist von einer beliebigen Stelle einer Nutzungseinheit im Geschoss in höchstens 25 m Lauflänge (Rettungsweglänge) zu erreichen. Die Breite von Türen darf im Verlauf von Rettungswegen eingeschränkt werden, jedoch eine Breite von 1,10 m nicht unterschreiten [15].

3.3.2 Rettungswege nach MHR

Gegenüber der MHochR haben Teile von Rettungswegen in Hochhäuser, die nach der MHR beurteilt werden, eine lichte Breite von mindestens 1,20 m aufzuweisen [20, Ziffer 4.1.2]. Aus den Nutzungseinheiten und für Geschosse ohne Aufenthaltsräume, wie z. B. Keller- und Technikgeschosse, haben in jedem Geschoss mindestens zwei voneinander unabhängige bauliche Rettungswege ins Freie zu führen, jedoch genügt für Hochhäuser mit einer Höhe von bis zu 60 m an Stelle von zwei notwendigen Treppenräumen ein innenliegender Sicherheitstrepfenraum [20, Ziffer 4.2.1].

Von jeder Stelle eines Aufenthaltsraumes sowie eines Kellergeschosses muss mindestens ein Ausgang in einen notwendigen Treppenraum oder einen Vorraum eines Sicherheitstrepfenraumes oder ins Freie in höchstens 35 m Rettungsweglänge führen [20, Ziffer 4.3.2].

3.4 Bemessung der Rettungswege im internationalen Vergleich

3.4.1 Großbritannien

Das in Großbritannien geltende Baurecht gliedert sich in die „building regulations“ und die „approved documents“. Bei den „building regulations“ handelt es sich um die gesetzlichen Anforderungen an bauliche Anlagen. Die „approved documents“ stellen die praktische Umsetzung des britischen Baurechts, also der „building regulations“, dar. Es existieren 14 „approved documents“, die in ihrer Gesamtheit alle baurechtlich relevanten Themen (z. B. allgemeine Anforderungen an die Ausgestaltung von Gebäuden, Schall- und Wärmeschutz etc.) erfassen. Die Anforderungen an den vorbeugenden baulichen Brandschutz werden im „Approved document B - Fire Safety“ beschrieben. Die nachfolgend beschriebenen Bemessungsgrundlagen für Rettungswege gelten nicht für Schottland.

⁵ Unter Rauchabschnitten werden Teile eines Gebäudes verstanden, die gegen das Eindringen von Rauch abgeschottet sind.

Die vertikalen Rettungswege („vertical escapes“) in Hochhäusern („tall buildings“) werden ausschließlich über Treppen sichergestellt. Bei der Bemessung der Treppenbreite wird zwischen einer gleichzeitigen („simultaneous evacuation“) und einer phasenweisen Evakuierung („phased evacuation“) der Geschosse unterschieden. Gleichzeitig ist die Treppenbreite von der Anzahl der darauf angewiesenen Personen abhängig. Die Gesamtzahl an Treppen ergibt sich aus der Anzahl der Ausgänge aus den Geschossen [23, Ziffer 4.2]. Für Treppen, die von der Feuerwehr verwendet werden („firefighting stair“), ist eine Mindestbreite von 1,10 m vorgeschrieben. Nachfolgende Tabelle zeigt die erforderliche Anzahl von Rettungswegen und Ausgängen aus einem Raum oder Geschoss. Aus der Anzahl der Ausgänge ergibt sich die Mindestzahl von Treppen in einem Hochhaus.

Maximale Anzahl der Personen im Raum/Geschoss	Anzahl Rettungswege/Ausgänge im Raum/Geschoss
60	1
600	2
> 600	3

Tab. 3.1: Anzahl der erforderlichen Rettungswege und Ausgänge aus einem Raum oder Geschoss [23]

3.4.1.1 Treppenbreite für eine Gesamtevakuierung

Für den Fall einer gleichzeitigen Evakuierung aller Geschosse eines Hochhauses wird die Treppenbreite, wie folgt, bestimmt:

$$b = \frac{P - 15 + 15 \cdot n}{150 + 50 \cdot n} [m] \quad (3.1)$$

b Breite der Treppe [m]

P Anzahl zu rettender Personen

n Anzahl Geschosse

Dem Berechnungsverfahren liegt eine Mindestbreite der Treppen von 1,10 m zu Grunde [23, Ziffer 4.25].

3.4.1.2 Treppenbreite für eine phasenweise Evakuierung

Bei einer phasenweisen Evakuierung der Geschosse in einem Hochhaus kann die erforderliche Breite der Treppen aus Tabelle 3.2 entnommen werden. Die Tabelle berücksichtigt die Alarmierung des ersten Geschosses und danach die Evakuierung von nicht mehr als zwei Geschossen gleichzeitig.

max. Anzahl der Personen im Geschoss	min. Breite der Fluchttreppe [m]
100	1,0
120	1,1
130	1,2
140	1,3
150	1,4
160	1,5
170	1,6
180	1,7
190	1,8

Tab. 3.2: Mindestbreite der Treppen bei phasenweiser Evakuierung [23]

Alternativ kann die erforderliche Breite einer Treppe mit:

$$b = \frac{(P \cdot 10) - 100}{1000} [m] \quad (3.2)$$

b Breite der Treppe [m]

P Anzahl zu rettender Personen pro Geschoss

bestimmt werden. Die Mindestbreite von horizontalen Rettungswegen (z. B. Korridoren, Ausgängen) kann aus nachfolgender Tabelle 3.3 entnommen werden. In der Tabelle ist die maximale Anzahl der Personen in einem Geschoss der benötigten Mindestbreite des horizontalen Rettungsweegelementes gegenübergestellt.

max. Anzahl der Personen im Geschoss	min. Breite [m]
60	0,75
110	0,85
< 220	1,05
≥ 220	0,005 pro Person

Tab. 3.3: Mindestbreite von Korridoren und Ausgängen in einem Geschoss [23]

3.4.2 Vereinigte Staaten von Amerika

In den Vereinigten Staaten von Amerika wird bei der Bemessung von Fluchtwegen („means of egress“) der „Life Safety Code“ (NFPA 101) [33] der National Fire Protecting Association (NFPA) verwendet. Die NFPA ist eine auf dem Gebiet des Brandschutzes tätige Organisation mit Interessenvertretern aus Behörden, Feuerwehren, Versicherungen und Prüflaboren. Die NFPA empfiehlt die Erarbeitung von Normen und „Codes“ für den Bereich des Brandschutzes. Des Weiteren werden von ihr Richtlinien und Standards (NFPA-Arbeitspapiere) erarbeitet [6]. Ein durch die NFPA erarbeiteter „Code“ kann durch die Legislative in den Bundesstaaten der Vereinigten Staaten von Amerika eingeführt werden und ist damit verpflichtend anzuwenden. In einigen Staaten der USA wurde der „Life Safety Code“ eingeführt.

In der NFPA 101 werden die Rettungswege in horizontale und vertikale Rettungswege partitioniert. Die horizontalen Rettungswege („corridors“) müssen eine lichte Breite von mindestens 1,12 m (44 in.) aufweisen. Die erforderlichen Breiten für die vertikalen Rettungswege („protected stairs“) ergeben sich aus Ziffer 7.2.2.2.1.2 (B) NFPA 101, wonach sich die erforderliche Mindestbreite auf die kumulierte Zahl der Personen in einem Gebäude bezieht. Die Mindestbreiten sind in Tabelle 3.4 dargestellt.

Kumulierte Anzahl der Personen im Gebäude	Breite	
	[m]	[in.]
< 2000 Personen	1,12	44
≥ 2000 Personen	1,42	56

Tab. 3.4: Treppenbreiten nach [33, Ziffer 7.2.2.2.1.2 (B)]

Neben der Mindestbreite können aus NFPA 101 auch Maße für Setzstufen („risers“), Auftritte („tread depth“), lichte Höhen/Kopffreiheit („headroom“) im Treppenraum und die Höhe zwischen den Podesten entnommen werden. Die Maße für eine neu zu errichtende Treppe sind in Tabelle 3.5 ersichtlich.

Konstruktionsmerkmal („Feature“)	Maß („Dimensional Criteria“)	
	[m]	[ft./in.]
Max. Höhe der Setzstufe („height of risers“)	1,80	71 in.
Min. Höhe der Setzstufe	1,00	40 in.
Min. Tiefe des Auftritts („tread depth“)	2,80	110 in.
Min. lichte Höhe im Treppenraum („headroom“)	2,03	6 ft. 8 in.
Max. Höhe zwischen den Podesten („landings“)	3,66	12 ft.

Tab. 3.5: Konstruktionsmerkmale von Treppen [33, Ziffer 7.2.2.2.1 (a) (modifiziert)]

Nach Ziffer 7.2.1.1.2 NFPA 101 [33] muss jede Tür, die als Eingang oder Ausgang verwendet wird, so angeordnet sein, dass der Rettungsweg eindeutig ist und als solcher wahrgenommen werden kann. Dazu dürfen Türen in Fluchtwegen über keine geringere lichte Breite als 0,81 m (32 in.) aufweisen. Türen, die zu Treppenträumen führen, müssen über eine lichte Breite von mind. 1,42 m (56 in.) verfügen.

3.5 Zusammenfassung

Ein Vergleich der Länder untereinander zeigt, dass den erforderlichen Breiten der Rettungswege unterschiedliche Bemessungsansätze zugrunde liegen. In Deutschland lässt sich der Bemessungsansatz durch die Modulbreite nach DIN 13200-1 [1] erklären. Dabei kann der Ausgangsbreite von 1,20 m ein spezifischer Personenfluss von $1,39 \frac{\text{Personen}}{\text{s}\cdot\text{m}}$ zugeordnet werden [20, 19, 18, 17, 27]. Der spezifische Personenfluss gibt dabei an, wie viele Personen pro Sekunde einen Ausgang mit einer Breite von einem Meter passieren können.

In Großbritannien galt bis 1991 bei der Bemessung der Rettungswegbreite die „unit exit width“. Der Einheitsbreite wurde ein spezifischer Personenfluss zugeordnet. In den USA wurde das Verfahren der „unit exit width“ bis 1994 angewandt. Nach aktuellem Stand werden in Großbritannien die erforderlichen Breiten für Rettungswege aus Tabellenwerten entnommen oder mit Formeln ermittelt (siehe dazu Kapitel 3.4.1). In den USA kann die Breite von Rettungswegen ganz aus Tabellenwerten der NFPA 101 entnommen werden. Für die Bestimmung der Breite von Ausgängen oder Teilen von Rettungswegen ist jeweils die Gesamtzahl von Personen, die auf den Ausgang oder das Wegelement des Rettungsweges angewiesen sind, maßgeblich.

Aufgrund der Änderungen in der Bemessung von Rettungswegbreiten und der derzeitigen Datenlage zur Beziehung zwischen der Ausgangsbreite und dem spezifischen Personenfluss, kann keine Aussage über die Vergleichbarkeit der Bemessungsverfahren getroffen werden (vgl. auch [27]). Hier bedarf es weiterer Untersuchungen, die nicht Gegenstand dieser Arbeit sind.

Zusammenfassend können die ermittelten Mindestbreiten für horizontale und vertikale Wegelemente aus Tabelle 3.6 entnommen werden. In der Tabelle sind die unterschiedlichen Mindestbreiten von Wegelementen im Ländervergleich dargestellt.

Wegelement im Rettungsweg	Mindestbreite [m]			
	Deutschland		Großbritannien	USA
	MHochR	MHHR	AD B	NFPA 101
Flur / Korridor	1,25	1,20	1,05	1,12
Treppe	1,25	1,20	1,10 ¹ / 1,00 ²	1,12
Ausgang	1,10	1,20	1,05	0,81 ³ / 1,42 ⁴

Tab. 3.6: Flucht- und Rettungswegbreiten im internationalen Vergleich [15, 20, 23, 33]

- 1 gleichzeitige Alarmierung aller Geschosse
- 2 phasenweise Alarmierung der Geschosse
- 3 Türen im Rettungsweg
- 4 Türen zu Treppenräumen

4 Grundlagen der Evakuierungsberechnung

4.1 Modelle zur Personenstromanalyse

Zur Analyse einer Entfluchtung stehen mehrere Modelle zur Verfügung. Die Modelle lassen sich durch ihren methodischen Ansatz in zwei Hauptgruppen unterteilen:

- Makroskopische Modelle
- Mikroskopische Modelle

4.1.1 Makroskopische Modelle

In makroskopischen Modellen, auch als hydraulische Modelle bezeichnet, wird die Bewegung von Menschen als Personenstrom mit einem kompressiblen Gas oder einer Flüssigkeit verglichen. Die Bewegung und das Verhalten einzelner Personen innerhalb des Personenstromes wird nicht berücksichtigt. Die Berechnung wird „von Hand“ durchgeführt, weshalb diese Berechnungsverfahren auch als „Handrechenverfahren“ bezeichnet werden. Ihnen liegen aus empirischen Daten abgeleitete Formeln zu Grunde. Sie ermöglichen für einfache Geometrien schnelle Ergebnisse. Innerhalb der Gruppe der makroskopischen Modelle lassen sich die Kapazitätsanalyse und die dynamischen Strömungsmodelle sowie die Netzwerkmodelle unterscheiden.

Die Grundlage der Kapazitätsanalyse bilden Relationen, die die Kapazität eines Wegelementes (z. B. Flur, Treppe, Ausgang) in Abhängigkeit seiner Breite und Länge berücksichtigen [48]. Die zur Durchführung der Kapazitätsanalyse erforderlichen Werte der mittleren Gehgeschwindigkeiten des Personenstromes und des spezifischen Personenflusses sind vorgegeben. Lediglich die Art des Wegelementes (z. B. Flur, Treppe oder Ausgang) und die Art der Auslastung eines Wegelementes (Personendichte) sind erforderliche Eingabegrößen. Die Kapazitätsanalyse wird eingesetzt, um eine Entfluchtungsdauer abschätzen zu können [48]. Sie gibt damit Zeiten vor, in denen eine Evakuierung abgeschlossen sein muss [14]. Die Anwendung der Kapazitätsanalyse setzt voraus, dass alle Personen ausreichend mobil sind. Nicht

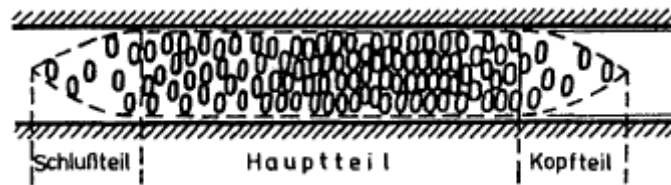


Abb. 4.1: Darstellung eines Personenstromes [36]

berücksichtigt werden Vereinigungen von Personenströme während oder Verzögerungsdauern vor Beginn einer Evakuierung. Als Beispiele für Kapazitätsanalysen sei die Kapazitätsanalyse nach [48] und die Kapazitätsanalyse nach NFPA 130, die für Entfluchtungsanalysen auf Bahnhöfen in den USA eingesetzt wird, genannt.

Bei dynamischen Strömungsmodellen werden örtliche Veränderungen der Dichte innerhalb eines Personenstromes in Abhängigkeit der Wegelemente berücksichtigt. Daraus resultiert eine Korrelation zwischen der Gehgeschwindigkeit und der Personendichte innerhalb des Stromes. Weiterhin berücksichtigen dynamische Strömungsmodelle die Abhängigkeit der Kapazität eines Wegelementes von der Personendichte. Die Kapazität ist definiert als die Anzahl der Personen, die innerhalb eines Zeitraumes ein Wegelement bestimmter Breite durchlaufen. Als bekanntestes Strömungsmodell sei hier die Berechnungsmethode nach [36] genannt. Es gilt als das Grundlagenwerk zur Personenstromanalyse. Die Grundlage bilden empirische Daten und die zuvor genannten Korrelationen. Dadurch können Werte wie Gehgeschwindigkeit und Durchlasskapazität in Abhängigkeit der Wegelemente aus einem umfangreichen Tabellenwerk entnommen werden. Eingangsgrößen sind die Dichte des betrachteten Personenstromes und die Breite des Wegelementes. Im weiteren Verlauf sind die Breite der Wegelemente auf dem Rettungsweg und die Korrelationswerte aus dem Tabellenwerk maßgeblich. Aus der Abbildung 4.1 kann die Darstellung eines Personenstromes nach [36] entnommen werden.

In Netzwerkmodellen werden die den Personenstrom beeinflussenden Wegelemente wie Flure, Treppen und Ausgänge als Knoten innerhalb eines Netzwerkes dargestellt. Die Eingabegrößen stellen die Länge und Breite der Wegelemente dar, die in den Knoten gespeichert werden. Innerhalb des Netzwerkes erfolgt die Berechnung der Durchlasskapazität der Knoten aufgrund der Beziehung zwischen Dichte und spezifischem Personenstrom. Netzwerkmodelle lassen Aspekte wie Mobilitätseinschränkungen von Personen und die Auswahl eines Rettungsweges zu [48]. Da der Rechenaufwand für Netzwerkmodelle dementsprechend hoch ist, werden für diese Modelle Computer eingesetzt. Als Beispiele für Netzwerkmodelle seien EXIT89 und EVACNET genannt.

4.1.2 Mikroskopische Modelle

Im Unterschied zu makroskopischen Modellen wird in mikroskopischen Modellen die Bewegung und Interaktion Einzelner berücksichtigt, weshalb die Modelle auch als Individualmodelle bezeichnet werden. Jede Person verfügt dabei über einen eigenen Parametersatz, der das Verhalten der Person charakterisiert. Mikroskopische Modelle sind computergestützte Simulationsprogramme. Die Individualmodelle lassen sich weiter in die Gruppe der kontinuierlichen und diskreten Modelle unterteilen.

In kontinuierlichen Modellen erfolgt die Berechnung in Zeit und Raum kontinuierlich. Die realitätsnahe Abbildung einer Geometrie erfolgt durch die Wahl einer geeigneten Zellgröße. Bei der Eingabe von Bewegungsparametern für Personen bestehen hohe Variationsmöglichkeiten. Sehr komplexe Gebäude lassen sich mit kontinuierlichen Modellen sehr gut darstellen. Die kontinuierlichen Modelle werden einzig und allein durch die zur Verfügung stehende Rechenkapazität beschränkt, da mit zunehmender Detailtreue der Geometrie und Variation der Bewegungsparameter der Rechenaufwand steigt. Als Beispiele für kontinuierliche Modelle können hier FDS+EVAC, ASERI und SIMULEX angeführt werden.

In diskreten Modellen (zelluläre Automaten) erfolgt die Darstellung der Geometrie und der Agenten im diskreten Raum. Jede Person wird durch eine Zelle repräsentiert. Die Personen bewegen sich innerhalb des Simulationsmodells von Zelle zu Zelle. Die Bewegungsmöglichkeit der Personen ist durch die Gitterstruktur begrenzt und erfolgt innerhalb eines endlichen (diskreten) Zeitschrittes in bestimmten Bewegungsalgorithmen („Hüpfregeln“). Die Gebäudegeometrie kann durch die vorgegebene Gitterstruktur nur annähernd abgebildet werden, wodurch es zu modellbedingten Ungenauigkeiten in der Darstellung kommt. Da die Berechnung innerhalb fester Zeitschritte in Form von Algorithmen erfolgt, liefern zelluläre Automaten gegenüber den kontinuierlichen Modellen schnellere Ergebnisse. Als Vertreter zellulärer Automaten gelten buildingEXODUS, EGRESS und PedGo.

Die Abbildung 4.2 zeigt abschließend die verfügbaren Entfluchtungsmodelle im Überblick.

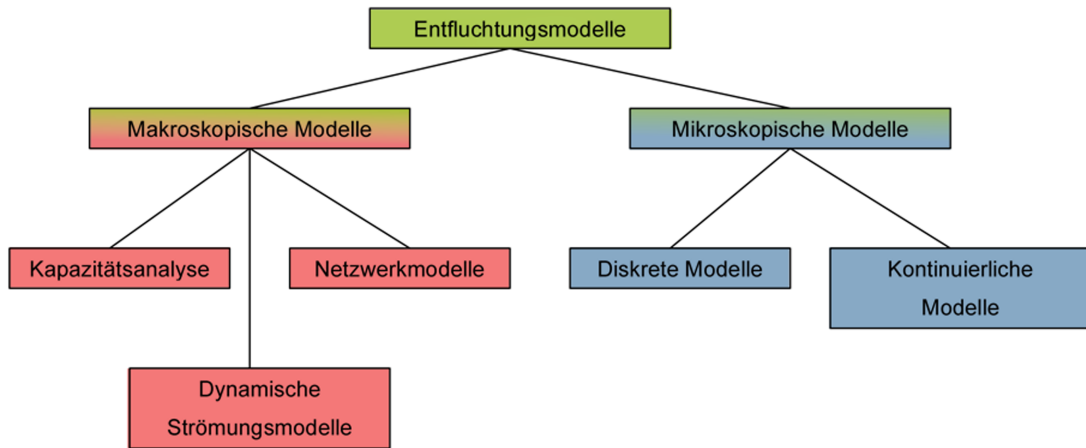


Abb. 4.2: Entfluchtungsmodelle im Überblick

4.2 Kapazitätsanalyse als makroskopisches Modell

4.2.1 Eingangsparmeter

Bei der Kapazitätsanalyse nach dem Ingenieurleitfaden[48] handelt es sich um ein Handrechenverfahren, welches auf der Analyse der Kapazitäten von Wegelementen auf einem zu analysierenden Weg beruht. Die Kapazitätsanalyse ermöglicht das Abschätzen eines Zeitraumes innerhalb dessen eine Evakuierung abgeschlossen sein muss (vgl. [48]).

Zur Durchführung der Kapazitätsanalyse ist der zu analysierende Rettungsweg in Wegelemente zu unterteilen. Als Wegelemente werden Flure, Treppen und Ausgänge (Türen) verstanden. Die Wegelemente werden durch ihre Breite und Länge charakterisiert. Dazu ist die Breite und die Länge eines jeden Wegelementes aus der Grundrissdarstellung zu entnehmen.

4.2.2 Referenzwerte

Zur weiteren Analyse werden für die Kapazitätsanalyse Referenzwerte für die Gehgeschwindigkeit der Personen und des spezifischen Personenflusses in Abhängigkeit des Wegelementes vorgegeben. Die Referenzwerte repräsentieren die aus empirischen Daten für ein typisches Szenario ermittelten Werte bei mittlerer Personendichte. Der mittleren Personendichte werden vier Auslastungsgrade zugeordnet (nach [41, 31]):

- Minimum ($\rho < 0,5 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$)
- Moderat ($\rho \approx 1 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$)
- Optimal ($\rho \approx 2 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$)
- „Crush“ - Extremsituation ($\rho \approx 3 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$)

Nach [48] wird empfohlen, die Auslastungsgrade Moderat oder Optimal zu wählen, da diese empirisch am besten fundiert sind. Darüber hinaus weisen sie nur geringe Streubreiten auf. Der Auslastungsgrad Crush entspricht Situationen wie z. B. Terroranschläge oder Ausfall von Rettungswegen und ist für eine Bemessung von Rettungswegen sowie der Abschätzung einer Entfluchtungsdauer ungeeignet.

In Tabelle 4.1 sind die für eine Kapazitätsanalyse erforderlichen Referenzwerte zusammenfassend dargestellt.

Wegelement	Auslastung	Personendichte [$\frac{Personen}{m^2}$]	Gehgeschwindigkeit [$\frac{m}{s}$]	spez. Personendichte [$\frac{Personen}{s \cdot m}$]
Treppe	Moderat	$\approx 1,0$	0,6	0,8
Treppe	Optimal	$\approx 2,0$	0,5	1,0
Korridor	Moderat	$\approx 1,0$	1,0	1,1
Korridor	Optimal	$\approx 2,0$	0,6	1,3
Tür	Moderat	$\approx 1,0$	1,0	0,9
Tür	Optimal	$\approx 2,0$	0,6	1,4

Tab. 4.1: Parameter für die Kapazitätsanalyse [41, 48]

4.2.3 Berechnung der Wegzeit

Im ersten Schritt zur Kapazitätsanalyse wird der Zeitraum, die eine Person auf dem zu betrachtenden Weg benötigen würde, berechnet. Dazu wird der Quotient aus dem zurückgelegten Weg und der für ein Wegelement benötigten Gehgeschwindigkeit gebildet. Es gilt:

$$t_{Weg} = \frac{l}{v} [s] \quad (4.1)$$

- t_{Weg} zurückgelegter Weg [s]
- l max. Länge des zurückgelegten Weges [m]
- v Gehgeschwindigkeit [$\frac{m}{s}$] (aus Tabelle 4.1)

Für die Länge des zurückgelegten Weges wird der Laufweg der Person von einer möglichen Startposition im Gefahrenbereich bis zum Endpunkt des betrachteten Weges berücksichtigt. Der Wert der Gehgeschwindigkeit für das entsprechende Wegelement ist aus der Referenztabelle 4.1 zu entnehmen. Enthält der zu analysierende Weg unterschiedliche Wegelemente, so ist die Zeit des zurückgelegten Weges für alle Wegelemente zu addieren.

4.2.4 Berechnung der Passagezeit

In einem zweiten Schritt wird die Passagezeit ermittelt. Für die Berechnung der Passagezeit gilt:

$$t_{Passage} = \frac{l}{v} + \frac{N}{\rho \cdot b} [s] \quad (4.2)$$

$t_{Passage}$	Passagezeit [s]
l	Länge des kürzesten Weges [m]
v	Gehgeschwindigkeit [$\frac{m}{s}$] (aus Tabelle 4.1)
N	Anzahl der Personen auf dem Wegelement
ρ	spezifischer Personenfluss [$\frac{Personen}{s \cdot m}$] (aus Tabelle 4.1)
b	Breite des Wegelementes [m]

Der kürzeste Weg entspricht dem Weg von einer möglichen Startposition eines Wegelementes bis zum Erreichen des Endes des betrachteten Wegelementes. Der erste Summand entspricht der Ankunft der ersten Person am Ende des Wegelementes. Der zweite Summand gibt die Zeitspanne an, die die letzte Person benötigen würde, um das Ende des Wegelementes zu erreichen. Besitzt der zu analysierende Weg mehrere Wegelemente unterschiedlicher oder gleicher Art, so ist für die Länge des kürzesten Weges die Summe aller kürzesten Wegstrecken zu bilden und mit der längsten Durchgangszeit der Wegelemente zu addieren.

4.2.5 Berechnung der Entfluchtungsdauer

Die mit der Kapazitätsanalyse zu ermittelnde Entfluchtungsdauer ergibt sich aus zwei Zeiten, der Wegzeit t_{Weg} und der Passagezeit $t_{Passage}$. Dabei wird im letzten Schritt die ermittelte Wegzeit der Passagezeit gegenübergestellt. Es gilt:

$$t_{Entfluchtung} = \max \begin{cases} t_{Weg} \\ t_{Passage} \end{cases} \quad (4.3)$$

Müssen bei der Entfluchtungsdauer weitere Zeiträume (z. B. Verzögerungsdauern) berücksichtigt werden, so sind diese Zeitspannen zur Entfluchtungsdauer zu addieren.

4.3 Simulationssoftware PedGo als mikroskopisches Modell

4.3.1 Diskretisierung

PedGo ist eine Simulationssoftware zur Analyse von Personenströmen. Das Softwarepaket besteht aus den drei Anwendungen PedEd, PedGo und PedView [47]. Bei der Softwareanwendung PedEd handelt es sich um einen Editor, indem die Diskretisierung und die Bearbeitung der Geometrie erfolgt. Die Durchführung der Simulation erfolgt mit dem Programmtool PedGo. Eine Darstellung der Simulationsergebnisse in Form einer 3D-Animation erfolgt im Simulationsprogramm PedView.

PedGo stellt ein gitterbasiertes Multi-Agenten-Modell dar. Die Grundlage bildet eine Gitternetzstruktur in Form von rechteckigen Zellen mit einer Kantenlänge von 0,40 m. Jede Zelle verfügt über einen Flächeninhalt von 0,16 m². Diese Fläche entspricht der Standfläche einer Person im dichten Gedränge eines Staus [26]. An jede Zelle grenzen acht Nachbarzellen an. Die Zellen verfügen innerhalb des Modelles über individuelle Informationen, die jede einzelne Zelle charakterisieren.

Die Personen, innerhalb der Simulation als Agenten bezeichnet, bewegen sich im Modell auf den dafür vorgesehenen Gitterflächen. Jeder Agent wird dabei durch eine Zelle repräsentiert und bewegt sich von Zelle zu Zelle in Richtung eines Ausganges. Die maximal mögliche Personendichte des Simulationsmodelles beträgt $6,25 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$.

Zur Implementierung einer Geometrie in PedGo bestehen zwei Möglichkeiten. Die erste Möglichkeit umfasst das Einlesen von Grundrissplänen in den Editor PedEd. Dazu können digitalisierte Grundrisspläne im Format *.DXF verwendet werden. Nach dem Import der Pläne besteht die Möglichkeit, die Grundrisse im Editor weiter zu bearbeiten. Die zweite Möglichkeit umfasst die vollständige Erstellung einer Geometrie in PedEd.

Die nachfolgende Abbildung 4.3 stellt das Prinzip der Diskretisierung am Beispiel eines Raumes dar.

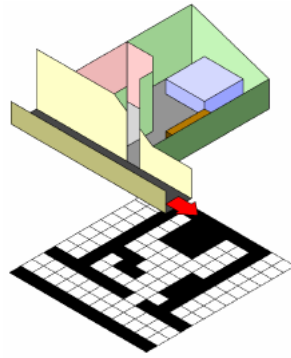


Abb. 4.3: Geometrie im Simulationsmodell [47]

4.3.2 Zelltypen

Die Darstellung der Geometrie im Simulationsmodell erfolgt mit Zelltypen. Es wird in einem Modell zwischen nachfolgenden Zelltypen unterschieden:

- Freie Zellen
- Wandzellen
- Treppenzellen
- Sprungzellen
- Türzellen
- Ausgangszellen

4.3.2.1 Freie Zellen

Freie Flächen, auf denen sich die Agenten innerhalb des Simulationsmodelles bewegen können, werden durch freie Zellen dargestellt. Sie stellen die Laufflächen der Agenten dar.

4.3.2.2 Wandzellen

Die Geometrie wird mit Wandzellen dargestellt. So können Wände, Hindernisse oder Einbauten im Modell abgebildet werden. Auf Wandstellen können sich die Agenten nicht bewegen. Darüber hinaus stellen Wandzellen für die Agenten physikalische Hindernisse dar. Die Abbildung der geometrischen Verhältnisse wird durch die vorgegebene Gitterstruktur von PedGo eingeschränkt und erlaubt nur eine realitätsnahe Darstellung im Modell. Die Abmessungen im

Simulationsmodell folgen der Kantenlänge der Gitterstruktur, sodass Wände mit einer Wanddicke von 0,40 m dargestellt werden. Aus diesem Grund ist besonders an Engstellen auf die Detailtreue des Modelles zu achten. Die Zellen vom Zelltyp „Wand“ werden im Simulationsmodell meist in grauer Farbe dargestellt. Die Abbildung 4.4 zeigt den Zelltyp „Wand“ und seine Diskretisierung im Simulationsmodell.

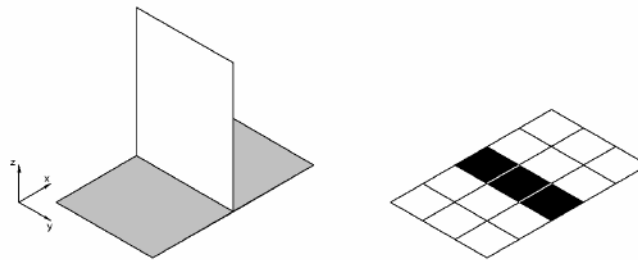


Abb. 4.4: Wandzellen im Simulationsmodell [47]

4.3.2.3 Treppenzellen

Die Treppenzellen dienen zur Darstellung von Treppen im Modell. Auf Treppenzellen verringert sich die ungehinderte Gehgeschwindigkeit der Agenten um die Hälfte. Mit Treppenzellen werden mehrere Geschosse miteinander verbunden. Die Treppenzellen müssen seitlich von Wandzellen begrenzt werden. Im Simulationsmodell werden Treppen im darunter liegenden Geschoss dargestellt und können in zwei Richtungen begangen werden. Die Zellen vom Typ „Treppe“ werden im Modell durch blaue Zellen repräsentiert.

4.3.2.4 Sprungzellen

Verbinden Treppen mehrere Geschosse, so müssen am Anfang und am Ende einer Treppe Sprungzellen angeordnet werden. Die Sprungzellen definieren die Richtung einer Treppe und die Stelle, an der ein Agent die Ebene wechseln muss, um in das nächste Geschoss zu gelangen. Abbildung 4.5 zeigt die Darstellung einer Treppe und das Äquivalent im Simulationsmodell. Die mit „S“ dargestellten Treppenzellen stellen Zellen vom Zelltyp „Treppe“ dar. Zellen mit der Zelleninformation „DN“ kennzeichnen Sprungzellen, an denen ein Agent in das darunter liegende Geschoss wechselt. Erreicht ein Agent die Zelle „UP“, wechselt der Agent in das darüber liegende Geschoss. Im Simulationsmodell werden die Sprungzellen „UP“ als grüne Zellen und „DN“ als rote Zellen dargestellt. Die Abbildung 4.6 veranschaulicht die Richtungswahl auf den Treppen.

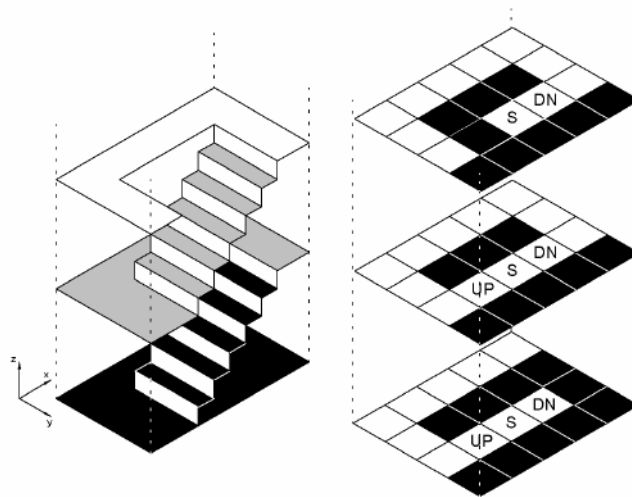


Abb. 4.5: Treppenzellen und Sprungzellen im Simulationsmodell [47]

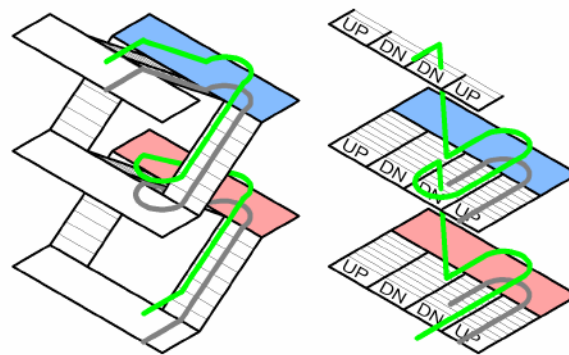


Abb. 4.6: Richtungswahl auf Treppen im Simulationsmodell [47]

4.3.2.5 Türzellen

Um Türen im Simulationsmodell abbilden zu können, werden Türzellen verwendet. In der Realität stellen Türen Engstellen dar, an denen sich die Gehgeschwindigkeit von Flüchtenden verringert. Um dies im Simulationsmodell abbilden zu können, verringern die Agenten programmseitig ihre Gehgeschwindigkeit auf ein Viertel ihrer maximalen Gehgeschwindigkeit in der Ebene. Die Türzellen werden im Modell in der Farbe Blau dargestellt. Die Abbildung 4.7 zeigt die Darstellung von Türzellen im Modell.

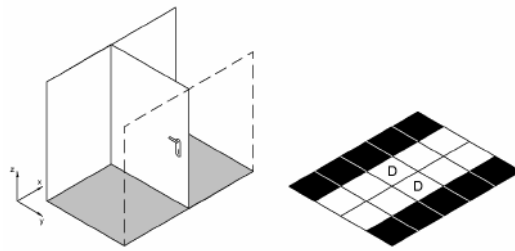


Abb. 4.7: Türzellen im Simulationsmodell [47]

4.3.2.6 Ausgangszellen

Die Ausgangszellen stehen im Simulationsmodell am Ende eines Rettungsweges. Die Agenten, die eine Ausgangszelle erreicht haben, werden aus der Simulation genommen und gelten als gerettet. Den Zellen vom Zelltyp „Ausgang“ können Intervall- und Blockierzeiten zugewiesen werden. Diese finden im maritimen Bereich Anwendung, wenn die Flucht von Passagieren zu Rettungsbooten auf Passagierschiffen simuliert wird. Hier sind die Besteigezeit und die maximale Kapazität der Rettungsboote maßgebliche Größen. In dieser Arbeit werden den Ausgangszellen keine Intervall- und Blockierzeiten zugewiesen. Weitere Erläuterungen zu den Intervall- und Blockierzeiten können aus [47] entnommen werden. Abbildung 4.8 zeigt die Darstellung einer Ausgangszelle im Modell. Die Zellen mit der Bezeichnung „E“ (Exit) kennzeichnen dabei die Ausgangszelle. Ausgangszellen erhalten im Simulationsmodell die Farbe Gelb.

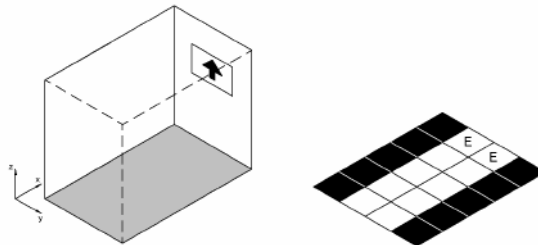


Abb. 4.8: Ausgangszellen im Simulationsmodell [47]

4.3.3 Agenten

4.3.3.1 Bewegung

Die Bewegung der Agenten im Simulationsmodell erfolgt auf freien Zellen, Treppen- und Sprungzellen sowie Tür- und Ausgangszellen. Wandzellen stellen für den Agenten ein phy-

sikalisches Hindernis dar und können durch den Agenten nicht betreten werden. Läuft ein Agent auf einer freien Zelle, blockiert er diese für einen Zeitschritt von einer Sekunde. Die Bedingungen für die Weiterbewegung erfolgen durch Bewegungsalgorithmen, die innerhalb des Zeitschrittes mehrmals durchlaufen werden („Sub-Updates“). Stellen die umliegenden Zellen für den Agenten kein Hindernis dar, z. B. durch einen weiteren Agenten oder Wandzellen, so wird er in zufälliger Weise eine Zelle weiter bewegt. Hat ein Agent seine maximale Gehgeschwindigkeit innerhalb des Zeitschrittes erreicht oder gilt er als gerettet, so wird er innerhalb des Zeitschrittes nicht mehr bewegt. In Abbildung 4.9 soll der Bewegungsalgorithmus für einen Agenten in Form eines Ausschnittes des Flussdiagramms dargestellt werden.

Auf dem Weg zu den Ausgangszellen orientiert sich ein Agent nach dem Potenzialfeld der ihn umgebenden Zellen. Das Potenzialfeld wird von den Ausgangszellen erzeugt und breitet sich über das gesamte Simulationsmodell aus. Je weiter eine freie Zelle von den Ausgangszellen entfernt liegt, desto geringer ist ihr Potenzialwert. Folgt ein Agent dem geringer werdenden Potenzialgefälle, so entspricht dies dem kürzesten Weg zur Ausgangszelle. Soll ein Agent einer zugewiesenen Ausgangsrouten folgen, wird das Potenzialgefälle im Modell so gesteuert, dass sich der Agent nur auf der definierten Route bewegt.

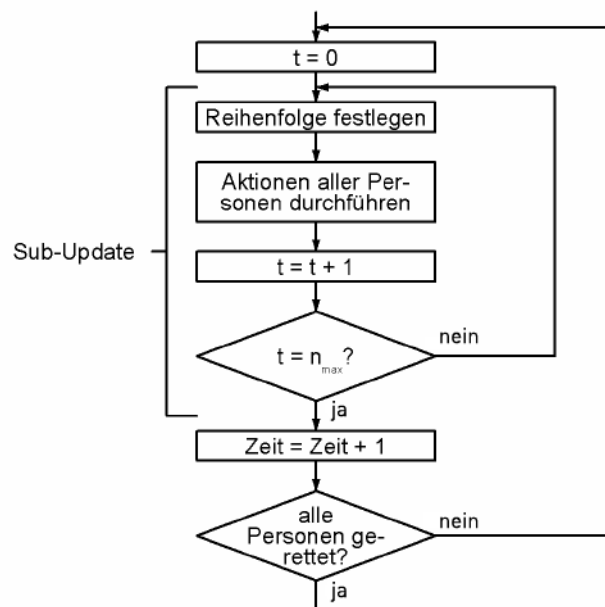


Abb. 4.9: Sub-Update eines Agenten in PedGo [47]

4.3.3.2 Parameter

Die individuelle Bewegung eines Agenten in der Simulation wird durch seinen Parametersatz repräsentiert. Dieser Parametersatz wird vor einem Programmdurchlauf neu vergeben, damit die stochastische Natur des natürlichen Bewegungsvorganges im Modell abgebildet werden kann. Im Parametersatz sind enthalten:

- Laufgeschwindigkeit
- Geduld („Patience“)
- Schwanken („Sway“)
- Reaktionszeit („Reaction“)
- Trödelwahrscheinlichkeit („Dawdle“)
- Trägheit („Inertia“)
- Gruppenzusammenhalt („Clustering“)

Die Laufgeschwindigkeit ist definiert als die maximale Anzahl der Zellen, welche ein Agent innerhalb einer Sekunde zurücklegen kann. Die Standardeinstellungen von PedGo sehen eine normalverteilte Laufgeschwindigkeit in den Grenzen von $2 \frac{\text{Zellen}}{\text{s}}$ bis $5 \frac{\text{Zellen}}{\text{s}}$ vor. Entsprechend der Gitterstruktur beträgt die Laufgeschwindigkeit damit zwischen $0,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bis $2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Die Laufgeschwindigkeit eines Agenten im Simulationsmodell wird in Form von Ampelfarben dargestellt. Die Farbe Rot bedeutet, dass ein Agent stillsteht. Ein Agent, der in der Farbe Grün dargestellt wird, bewegt sich mit der für ihn möglichen ungehinderten Gehgeschwindigkeit in der Ebene. Die Farbe Gelb signalisiert, dass sich ein Agent mit verminderter Gehgeschwindigkeit im Modell bewegt.

Bei der Geduld handelt es sich um den maximalen Zeitraum, die eine Person stillsteht, bevor sie sich „entscheidet“, einen in der entgegen gesetzten Richtung liegenden Rettungsweg zu erreichen. Der maximale Zeitraum der Geduld wird in Sekunden gemessen. In der Standardeinstellung des Parametersatzes ist kein Zeitraum für die Geduld vorgesehen.

Das Schwanken beschreibt die Genauigkeit, mit der sich ein Agent auf der ihm zugewiesenen Route bewegt. Je größer der Wert für das Schwanken ist, desto weniger hat das Potenzialgefälle einen Einfluss auf einen Agenten, sodass dieser ungerichteter Bewegungen ausführt. Das Schwanken ist eine dimensionslose Größe. Die Standardwerte des Schwankens liegen in den normalverteilten Grenzen von 1 bis 5.

Die Reaktionszeit ist die Dauer, die ein Agent nach Simulationsbeginn stehen bleibt, bis er sich in Richtung der Ausgangszellen oder auf der ihm zugewiesenen Route in Richtung des Ausganges bewegt. Die Reaktionszeit wird in Sekunden gemessen.

Ob ein Agent für den Rest eines Zeitschrittes (1 s) nach Ablauf des Bewegungsalgorithmus stehen bleibt oder weitergeht, wird mit dem Parameter der Trödelwahrscheinlichkeit in Prozentwerten ausgedrückt. In der Standardeinstellung wird die Trödelwahrscheinlichkeit normalverteilt in den Grenzen von 0 bis 30 % angegeben.

Die Trägheit gibt an, inwieweit eine Person ihre gegenwärtige Laufrichtung beibehält. Die Trägheit ist eine dimensionslose Größe. Je größer der Wert der Trägheit ist, desto mehr wird die Laufrichtung eingehalten. Die Trägheit wird in der Normaleinstellung der Software in den Grenzen von 1 bis 5 angegeben.

Das „Clustering“ gibt den Zusammenhalt einer Gruppe an und bestimmt, wie stark sich das Gruppenverhalten auf den einzelnen Agenten auswirkt. In der Standardeinstellung des Parametersatzes ist das Merkmal des Gruppenzusammenhaltes nicht aktiviert.

Neben der Möglichkeit, die Parameter normalverteilt anzunehmen, können diese auch gleichverteilt angenommen werden. Darüber hinaus können alle Personen zu Gruppen zusammengefasst werden, damit individuelles Verhalten von Personen innerhalb einer Gruppe in der Simulation annähernd genau abgebildet werden kann.

4.3.4 Ausgabe der Ergebnisse

Die Ausgabe der Simulationsergebnisse erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird durch die Simulationssoftware eine Mittelwertrechnung mit Standardabweichungen auf Basis einer Monte-Carlo-Simulation (stochastische Simulation) durchgeführt [30]. Die Werte werden mit einem „seed“ eindeutig und reproduzierbar gekennzeichnet. Da die Simulationssoftware PedGo auf einem stochastischen Modell aufbaut, erhält man für dasselbe Simulationsszenario unterschiedliche Ergebnisse. Um eine statistisch belastbare Aussage über die Ergebnisse zu erhalten, werden für jedes Szenario 500 Simulationsdurchläufe durchgeführt. Dabei handelt es sich um einen großen Stichprobenumfang, dessen Gesamtergebnis zu probabilistischen Ungenauigkeiten führt. Statistisch signifikant für die Ermittlung der Entfluchtungsdauer ist das 95 % Quantil. Das bedeutet, dass 95 % aller ermittelten Entfluchtungsdauern innerhalb des Quantils beendet sind. Nach [47] werden von PedGo standardmäßig 500 Simulationsdurch-

läufe durchgeführt, um mit dem von PedGo zugrundeliegenden Modell signifikante Ergebnisse zu ermitteln. Das 95 % Quantil wird nach [43] als signifikante Gesamtentfluchtungsdauer bezeichnet. Die Häufigkeitsverteilung der Simulationsergebnisse wird von PedGo in Form eines Histogramms ausgegeben, welches in Abbildung 4.10 beispielhaft für einen gesamten Simulationsdurchlauf mit 500 Einzelsimulationen abgebildet ist.

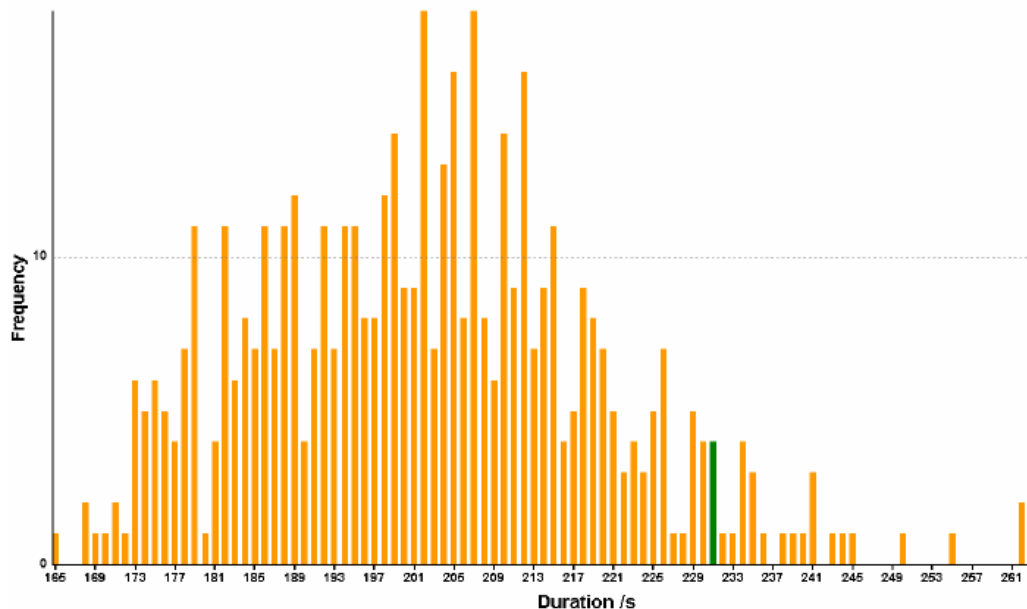


Abb. 4.10: Histogramm eines Simulationsdurchlaufs [47]

In Abbildung 4.10 ist die ermittelte Gesamtentfluchtungsdauer in der Farbe Grün dargestellt.

Im zweiten Schritt wird durch das gezielte Auswählen des 95 % Quantils die Einzelrechnung durchgeführt. Die Einzelrechnung kann in Form von Ausgabedateien, wie z. B. Bilddateien und Dichteplots, ausgewertet und analysiert werden.

4.3.5 Bewertung der Ergebnisse

Bei der Analyse der Ergebnisse steht insbesondere die Identifikation von Staus im Vordergrund. Dazu wird neben der Personendichte auch die Dauer einer Stauung über dem gesamten Simulationsverlauf beschrieben. Es werden Wegelemente analysiert, an denen die Personendichte einen Wert von $4 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$ überschreitet. Nimmt die Stauzeit einen Zeitraum von mehr als 10 % der Entfluchtungsdauer in Anspruch, hat sich nach [43] ein signifikanter Stau gebildet. Stauungen werden analysiert, da davon auszugehen ist, dass es bei einem Stillstand von

Personen zu Panikverhalten kommt, wenngleich es keine gesicherten Aussagen darüber gibt, wann allgemein gültige Kriterien für ein Panikverhalten erfüllt sind (vgl. [45]). Signifikante Stauungen werden programmseitig durch einen Dichteplot ausgegeben. Die Dichteplots dienen als Hilfestellung zur Identifikation von örtlichen Stauungen und geben nicht den Verlauf der Simulation wieder. Kommt es während der Simulation zu signifikanten Staus, so sind Maßnahmen zur Vermeidung zu treffen. Diese können bauliche oder organisatorische Maßnahmen sein. Bauliche Maßnahmen stellen bspw. die Veränderung der Wegbreite der Ausgänge dar. Organisatorische Maßnahmen sind u. a. die Bereitstellung von Evakuierungshelfern oder die Lenkung von Personenströmen zu bestimmten Ausgängen mit gebäudetechnischen Anlagen.

4.4 Ermittlung der Entfluchtungsdauer

Die Entfluchtungsdauer gibt an, wie lange die Evakuierung eines Gebäudes oder eines Raumes andauert, bis die letzte Person den als sicher definierten Bereich erreicht hat. Die Entfluchtung muss vor dem Eintritt eines schädigenden Ereignisses (z. B. Eintritt von Feuer und Rauch in den Rettungsweg) auf die Personen beendet sein. Nach [1] haben Zuschauer, welche sich im Freien aufhalten, in höchstens acht Minuten (mit Risikobetrachtung) in einem gesicherten Bereich zu sein. Für Zuschauer im Inneren eines Gebäudes gilt, dass sie innerhalb von zwei Minuten in einem gesicherten Bereich sein müssen. Nach [18] wird eine Durchlasskapazität eines Ausganges in Abhängigkeit seiner Breite als Maß für eine Entfluchtungszeit definiert. Der Breite des Ausganges liegt das Modulmaß von [1] zugrunde. Nach [17] benötigen 100 Personen eine Minute bis diese einen 1,20 m breiten Ausgang durchströmt haben. In der Schweiz werden für Stadien mit geschlossenem Dach und Räumen mit großer Personenzahl drei bis fünf Minuten als Entfluchtungsdauer genannt (aus [43]).

Der Nachweis der Entfluchtungsdauer von Gebäuden wird meist geführt, wenn diese keiner baurechtskonformen Ausgestaltung entsprechen und die Wirksamkeit von Kompensationsmaßnahmen nachgewiesen werden muss. Des Weiteren kann der Nachweis der Entfluchtungsdauer auch bei Sonderbauten zur Anwendung kommen, wo hohe Anforderungen an die Personensicherheit gestellt werden, wie z. B. bei Multifunktionsarenen.

Je mehr Personen evakuiert werden müssen, desto länger nimmt der Zeitraum der Entfluchtung in Anspruch. Das individuelle Verhalten der Personen während der Evakuierung kann dabei durch die individuelle Entfluchtungsdauer beschrieben werden. Die individuelle Entfluchtungsdauer umfasst die Summe der allgemeinen Detektions- und Alarmierungsdauer sowie der individuellen Reaktions- und Laufdauer jeder einzelnen Person (nach [43]):

$$t_{i,Entfluchtung} = t_{Detektion} + t_{Alarm} + t_{i,Reaktion} + t_{i,Lauf} [s] \quad (4.4)$$

$t_{i,Entfluchtung}$	Individuelle Entfluchtungsdauer [s]
$t_{Detektion}$	Detektionsdauer [s]
t_{Alarm}	Alarmierungsdauer [s]
$t_{i,Reaktion}$	Individuelle Reaktionsdauer [s]
$t_{i,Lauf}$	Individuelle Laufdauer [s]

Unter der Detektionsdauer wird der Zeitraum vom auslösenden Ereignis (z. B. der Entstehung eines Schadensfeuers) bis zum Entdecken der Gefahrenquelle (z. B. Detektion durch Brandmelder) verstanden. Die Alarmierungsdauer umfasst den Zeitraum vom Detektionszeitpunkt des Schadensereignisses bis zur Alarmierung der Personen (z. B. über eine Alarmierungseinrichtung) im gefährdeten Bereich. Die Zeiträume der Detektionsdauer und Alarmierungsdauer sind für alle Personen, die sich im gefährdeten Bereich befinden, gleich. Aus diesem Grund werden sie als allgemeine Detektions- und Alarmierungsdauer bezeichnet. Sie werden durch technische und organisatorische Maßnahmen beeinflusst. Im Allgemeinen wird als Detektions- und Alarmierungsdauer ein Zeitraum von zwei Minuten angesetzt.

Bevor sich Personen bei einer Evakuierung in Richtung der Ausgänge bewegen, müssen diese nach Ertönen eines Evakuierungssignales die Information verarbeiten. Meist beenden Personen ihre angefangene Arbeit und suchen aktiv nach weiteren Informationen, um ihr Verhalten der Situation anzupassen [32, 40]. Darüber hinaus konnte beobachtet werden, dass sich Personen in der Phase der Informationsgewinnung, dem Verhalten anderer Personen anpassen [40]. Wenn die Informationsgewinnung beendet ist und eine individuelle Entscheidung getroffen wurde, beginnt die Person mit der Fluchtbewegung in Richtung eines Ausganges. Dieser Zeitraum wird als individuelle Reaktionsdauer $t_{i,Reaktion}$ bezeichnet.

Die Reaktionsdauer wird von nachfolgenden Faktoren beeinflusst (nach [40]):

- Alter und Geschlecht
- soziale Rolle
- Gebäudeart und Architektur
- Aktivität im Gebäude
- Gebäudetechnik
- Wahrnehmung

Vor allem das Alter bestimmt die Wahrnehmung eines Alarmierungssignales. Darüber hinaus kann eine optische oder olfaktorische Wahrnehmung die Reaktionsdauer verkürzen. Weiterhin wird die Reaktionszeit von der Art der Alarmierung und der verwendeten Gebäudetechnik (optische Alarmierung, Sprachdurchsagen, Evakuierungshelfer) bestimmt. Die soziale Rolle jedes Einzelnen (z. B. als Reisender in einer Gruppe oder Familienvater) bestimmt, ob eine Fluchtbewegung oder ein aktives Handeln (z. B. unterstützen mobilitätseingeschränkter Personen, Löschversuche) im Vordergrund steht. In Gebäuden, welche der Büronutzung dienen, konnten Reaktionsdauern von 30 - 50 s festgestellt werden. In Wohngebäuden betrug die Reaktionsdauer am Tag bis zu 3 Minuten, während sie in der Nacht bis zu 10 Minuten betragen konnte [40, 41, 38].

Die individuelle Laufdauer ist die Dauer, die eine Person benötigt, um von einer beliebigen Position aus dem gefährdeten Bereich in einen gesicherten Bereich zu gelangen. Sie wird bestimmt aus dem Quotienten des zurückgelegten Weges und der Laufgeschwindigkeit. Die Laufgeschwindigkeit ist abhängig von:

- Alter und Geschlecht
- Mobilität
- Art des Weges
- Personendichte

Die Gehgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Alter soll Abbildung 4.11 nach [51] verdeutlichen. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die ungehinderte Gehgeschwindigkeit in der Ebene bis zum 20. Lebensjahr ihr Maximum erreicht und danach wieder abnimmt. Sind Personen mobilitätseingeschränkt, z. B. durch die Benutzung eines Gehstockes, so verringert sich ihre ungehinderte Bewegung in der Ebene.

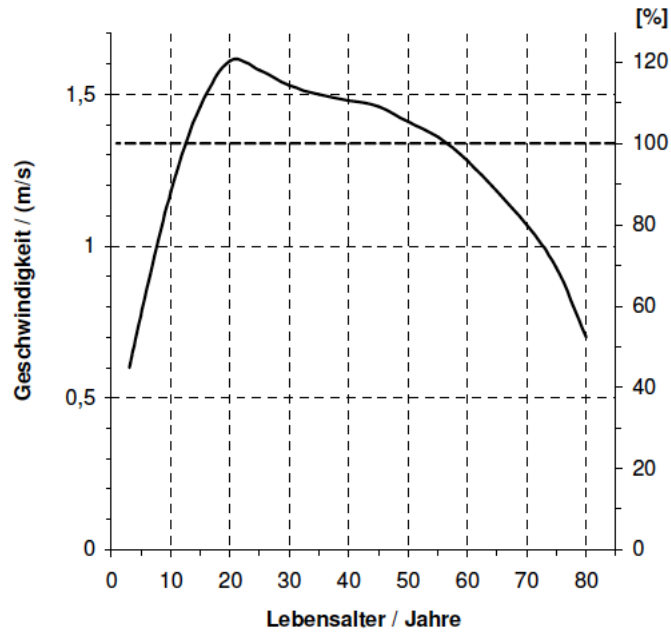


Abb. 4.11: Gehgeschwindigkeiten in der Ebene [51]

In der Ebene ist die Gehgeschwindigkeit höher als auf Treppen. Geht eine Person eine Treppe aufwärts, so bewegt sie sich langsamer, als wenn sie eine Treppe hinabsteigt. Eine jüngere Person geht auf Treppen schneller als eine ältere. Da aus dem Aufwärtsgehen einer Treppe ein höherer Energieverbrauch resultiert, verringern Personen ihre Geschwindigkeit beim Hinaufsteigen.

Aus der Tabelle 4.2 können die Gehgeschwindigkeiten auf Treppen in Abhängigkeit vom Alter und vom Steigungsverhältnis der Treppe entnommen werden. Auch das Steigungsverhältnis hat einen Einfluss auf die Gehgeschwindigkeit. Werden die Setzstufen kleiner, erhöht sich die Geschwindigkeit auf einer Treppe geringfügig. Bei guter körperlicher Verfassung kann eine Person in Abhängigkeit des Steigungsmaßes eine Gehgeschwindigkeit von $1,10 \frac{m}{s}$ beim Abwärtsgehen einer Treppe erreichen [41].

Personen	mittlere Gehgeschwindigkeit [$\frac{m}{s}$]			
	Treppe ab		Treppe auf	
< 30 Jahre	0,76 ¹	0,81 ³	0,55 ²	0,58 ⁴
30 - 50 Jahre	0,65 ¹	0,78 ³	0,50 ²	0,58 ⁴
> 50 Jahre	0,55 ¹	0,59 ³	0,42 ²	0,42 ⁴
mobilitätseingeschränkt	0,42		0,32	

Tab. 4.2: Mittlere Gehgeschwindigkeit auf Treppen [22]

- 1,2 Steigungshöhe 0,178 m/Auftrittsbreite 0,286 m
3,4 Steigungshöhe 0,152 m/Auftrittsbreite 0,305 cm

Neben den bislang genannten Faktoren hat auch die Personendichte sowohl in der Ebene als auch auf Treppen einen Einfluss auf die Gehgeschwindigkeit. Steigt die Personendichte an, so verringert sich die Gehgeschwindigkeit. Verringert sich hingegen die Personendichte, erreicht eine Person unterhalb einer Personendichte von $0,5 \frac{\text{Personen}}{m^2}$ ihre maximale Gehgeschwindigkeit [41]. Bei Personendichten von $3,8 \frac{\text{Personen}}{m^2}$ nach [24], $4 \frac{\text{Personen}}{m^2}$ nach [43] oder $4 - 5 \frac{\text{Personen}}{m^2}$ nach [41] kommt es zum Stillstand von Personen und es bildet sich ein Stau. Bei Großveranstaltungen, wie z. B. Rockkonzerten, konnten Personendichten von $8 \frac{\text{Personen}}{m^2}$ festgestellt werden. Bei dieser Personendichte bestehen keine Freiräume mehr zwischen den Personen [41].

Für die Ermittlung der Entfluchtungsdauer ist das Maximum der individuellen Entfluchtungs-dauern maßgeblich. Die für eine Evakuierung zu ermittelnde Entfluchtungs-dauer ergibt sich aus:

$$t_{Entfluchtung} = \max \{ t_{i,Entfluchtung} \} \quad (4.5)$$

Neben der Bezeichnung Entfluchtungs-dauer werden in der Literatur auch Begriffe wie Ent-leerzeit [27], Räumungszeit [32], Evakuierungszeit [44] oder Gesamtentfluchtungs-dauer [43] verwendet. In Anlehnung an [43] wird in dieser Arbeit der Begriff der Gesamtentfluchtungs-dauer verwendet.

Die nachfolgende Abbildung 4.12 zeigt zusammenfassend alle maßgeblichen Zeitabschnitte der Gesamtentfluchtungs-dauer. Aus der Abbildung kann entnommen werden, dass die Detektions- und Alarmierungs-dauer additive Größen darstellen und für alle an einer Evakuierung beteiligten Personen gleich sind. Reaktions- und Lauf-dauer stellen hingegen variable Größen dar und werden durch das individuelle Verhalten jedes Einzelnen bestimmt.

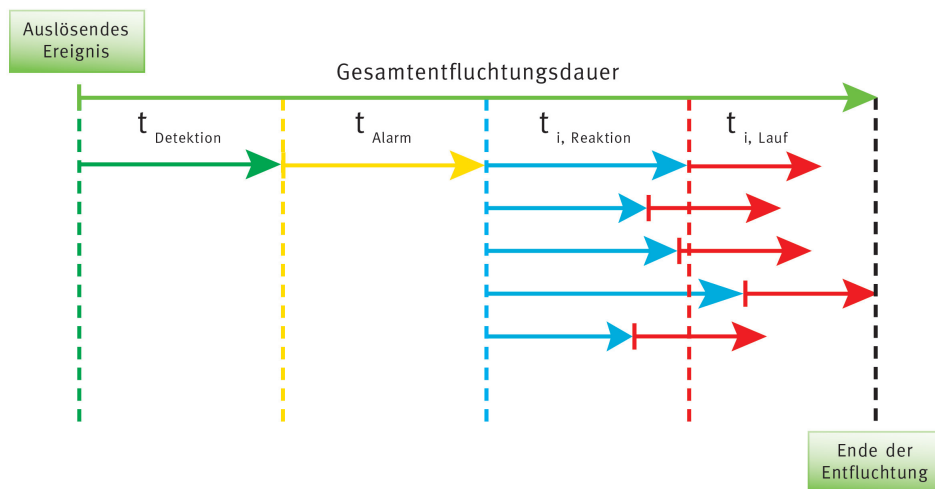


Abb. 4.12: Zeitkomponenten der Gesamtentfluchtungsdauer

4.5 Der Faktor Mensch bei der Evakuierung

Trotz vieler Möglichkeiten, das Individualverhalten von Personen während einer Evakuierung zu berücksichtigen, ist der Faktor Mensch bei der Ermittlung der Entfluchtungsdauer nicht vollständig erfassbar. Aus diesem Grund wird nachfolgend das Verhalten von Menschen anhand von drei beispielhaften Situationen beschrieben.

4.5.1 Verhalten von Personen in normalen Situationen

In normalen Alltagssituationen möchte eine Person einen anvisierten Ort auf dem schnellsten Weg erreichen. Dabei wird von Personen eine gerichtete Bewegung bevorzugt [36]. Lediglich wenn eine Person den Weg kreuzt, wird die Richtung verändert. Die mittlere Gehgeschwindigkeit bleibt unverändert, um das gewählte Ziel in einer bestimmten Zeit zu erreichen. Diese beträgt $1,34 \frac{m}{s}$ je nach Mobilität und physischem Zustand der Person [51]. Bei der Bewegung wird ein sicherer Abstand zu anderen Personen und zu Hindernissen (z. B. Wänden) eingehalten [21, 28]. Der Abstand zu anderen Personen wird kleiner, je größer die Personendichte ist. Der Abstand zu Hindernissen wird geringer, je mehr eine Person in Eile ist. An attraktiven Orten, also an Plätzen, an denen Menschen ein gemeinsames Interesse haben, steigt die Personendichte an. Personen, die sich kennen, bilden Gruppen und bewegen sich auch innerhalb einer Gruppe weiter. Die Bewegungsgeschwindigkeit einer Gruppe ist von der sich innerhalb der Gruppe mit der geringsten Bewegungsgeschwindigkeit bewegendem Person abhängig. Die Bewegung von Personen lässt sich in Form eines Polygonzuges darstellen.

4.5.2 Verhalten von Personen im Brandfall

Den Beginn einer Entfluchtungssituation stellt in den meisten Fällen das Ertönen eines Evakuierungssignales dar. Erst wenn Personen die gegenwärtige Situation als Evakuierungssituation wahrgenommen haben, beginnen sie nach weiteren Informationen zu suchen, um ihr Verhalten der Situation anzupassen. Es konnte beobachtet werden, dass Personen in öffentlichen Gebäuden das Alarmierungssignal für eine Evakuierung zunächst ignorierten, um nicht überzureagieren [40]. Meist orientieren sich Personen am Verhalten anderer Personen, die sich in ihrer Umgebung befinden. Ist die Informationsaufnahme abgeschlossen und die Situation als Entfluchtungssituation erkannt, beginnen Personen ihre gegenwärtige Gehgeschwindigkeit zu erhöhen. Als erstes Ziel wird der Weg gewählt, der den Personen am meisten bekannt ist. In aller Regel handelt es sich hierbei um den Weg, auf dem sie das Gebäude betreten haben. Als zweites Ziel werden die ausgeschilderten Rettungswege gewählt. Der Abstand zwischen den Personen wird infolge der erhöhten Gehgeschwindigkeit geringer. Die Gehgeschwindigkeit in Entfluchtungssituationen kann von $2 \frac{m}{s}$ bis $4 \frac{m}{s}$ betragen. Die Personen beginnen zu drängeln und der Körperkontakt nimmt zu. Infolge der zunehmenden Personendichte an Engstellen und Ausgängen kann es zu Stauungen kommen.

4.5.3 Verhalten von Personen in panikartigen Situationen

Personen, welche ein Alarmierungssignal überhört haben oder vom Verhalten anderer Personen überrascht werden, reagieren panikartig. Sie werden nervös und entwickeln einen „blinden Aktionismus“ [21, 28]. Als erste Reaktion erfolgt eine Erhöhung der gegenwärtigen Gehgeschwindigkeit in Richtung der Notausgänge [28]. Des Weiteren kann in panikartigen Situationen ein ausgeprägtes „Herdenverhalten“ beobachtet werden. Die Personen reagieren dabei nicht mehr rational, sondern entwickeln ihr natürliches Fluchtverhalten. Teilweise werden in dieser Situation auch Notausgänge nicht als solche erkannt, da das Herdenverhalten im Vordergrund steht. Nur geschultes und in Evakuierungssituationen eingewiesene Personen reagieren in einer solchen panikartigen Situation rational. Auf dem Weg zu den Ausgängen beginnen Personen mehr zu drängeln. Der Körperkontakt nimmt zu und die Personen beginnen untereinander physisch zu reagieren. Durch das Herdenverhalten werden Ausgänge ungleichmäßig ausgelastet, sodass es an den bevorzugten Ausgängen zu hohen Personendichten kommt. An den Ausgängen können Phänome wie die Bogenbildung und oszillierende Bewegungen beobachtet werden [28, 32, 36]. Darüber hinaus kann die ungleichmäßige Auslastung zur Verstopfung der Ausgänge führen. Daraus resultieren hohe Staudrücke von $4500 \frac{N}{m}$, welche dünne Stahlwände oder Wellenbrecher verbiegen oder umstoßen können [21]. Personen, die während einer panikartigen Situation zu Boden gehen, werden übersehen und über sie wird hinweggegangen.

Aus Abbildung 4.13 kann beispielhaft die Bogenbildung an einem Ausgang entnommen werden.

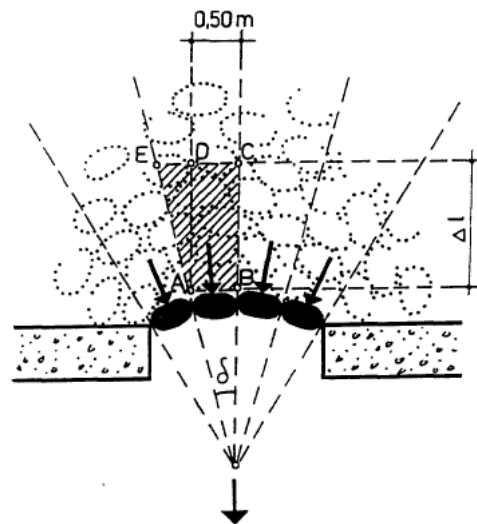


Abb. 4.13: Bogenbildung an Ausgängen [36]

Es ist nicht vollständig erfassbar, wann eine panikartige Situation entsteht. Meist wird als Grenzwert die Personendichte von $4 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$ genannt. Zu differenzieren ist sicherlich der physische Zustand der Personen und die Veranstaltungsart. Personen, welche sich z. B. nach einer Oper zu den Ausgängen bewegen, werden sich bei einer Personendichte von $4 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$ sicher anders Verhalten als Personen, die nach einem Open-Air Rockkonzert die Ausgänge ins Freie durchströmen.

4.6 Zusammenfassung

Die Hauptaufgabe einer Entfluchtungsanalyse besteht darin, Staubildungen an Engstellen und Ausgängen zu erkennen, um hohe Staudrücke und Personengefährdungen zu vermeiden. Dazu stehen eine Reihe von Entfluchtungsmodellen zur Verfügung. Je nach Anforderungen können die Entfluchtungsauern durch Handrechenverfahren oder durch Simulationssoftware ermittelt werden. Handrechenverfahren berücksichtigen nicht das Verhalten einzelner Individuen, sondern betrachten den Personenstrom während der Bewegung als Fluid. Hingegen ermöglichen Individualmodelle die Bewegung und die Abbildung Einzelner im Personenstrom. Im Modell werden die individuellen Bewegungen durch einen eigenen Parametersatz charakterisiert. Bei der Personenstromanalyse bedarf es der genauen Kenntnis des zur Anwendung kommenden

Modelles. Jedes Berechnungsmodell verfügt über Unsicherheiten und Einsatzgrenzen. Erst die genaue Kenntnis des eingesetzten Modelles ermöglicht die richtige Bewertung der ermittelten Ergebnisse.

Für die Ermittlung der Entfluchtungsdauer von Gebäuden existieren keine Grenzwerte. Der Nachweis einer Entfluchtungsdauer kann lediglich im Vergleich zu einem baurechtskonformen Gebäude durchgeführt werden, wenn es bspw. um die Wirksamkeit von Kompensationsmaßnahmen geht. Dazu wird zunächst eine Berechnung des baurechtskonformen Gebäudes durchgeführt und danach der Vergleich mit der Geometrie, die die Kompensationsmaßnahmen enthält, angestellt [45, 46]. Eine weitere Möglichkeit stellt der leistungsorientierte Nachweis mit implementiertem Sicherheitsmodell dar [46]. Allgemein gilt für den Nachweis, dass die Entfluchtungsdauer innerhalb eines zur Verfügung stehenden Zeitraumes (z. B. für die Dauer der Rauchfreihaltung) abgeschlossen sein muss, indem es zu keinen Personenschäden kommt. Darüber hinaus existieren keine ausreichenden Grenzwerte zur Quantifizierung von Stauungen. Über die Dauer von Staus lässt sich lediglich herausarbeiten, dass nach [18] die Anstehzeit vor einem Ausgang maximal zwei Minuten betragen darf.

Es kann nicht angenommen werden, dass Simulationsergebnisse den vollständigen Verlauf einer Evakuierung widerspiegeln. Die zur Anwendung kommenden Modelle können das menschliche Verhalten in Gefahrensituationen nicht vollständig erfassen, sodass man lediglich von einer fiktiven Evakuierungszeit sprechen kann (vgl. [44]).

5 Gebäudemodelle und Diskretisierung

5.1 Gebäudemodelle

5.1.1 Kubatur

Die Grundlage der Gebäudemodelle bildet ein Hochhaus mit einer Gebäudehöhe von 58,72 m. Als Gebäudehöhe wird nach [16] das Maß der Fußbodenoberkante des höchstgelegenen Aufenthaltsraumes über der Geländeoberfläche im Mittel verstanden. Da sich die Gebäudehöhe mehr als 22 m über der Geländeoberfläche im Mittel befindet, erfüllen die vorliegenden Gebäudemodelle den Tatbestand eines Hochhauses [16]. Darüber hinaus werden die Gebäudemodelle in die Gebäudeklasse 5 eingestuft [16, § 2 (3)].

Die Höhe der Gebäudemodelle erstreckt sich über jeweils 17 Obergeschosse. Die Geschosshöhe in den Modellen beträgt 3,67 m. Die Raumhöhe beträgt 3 m. Die Länge der Gebäudemodelle beträgt jeweils 53,60 m und die Breite 18,00 m. Dies entspricht einer Grundrissfläche von etwa 965 m² in jedem Gebäudemodell.

5.1.2 Nutzung

Im Erdgeschoss der Modelle ist der Ausgangsbereich angeordnet. Vom 1. bis zum 16. Obergeschoss wird ausschließlich eine Büro- und Verwaltungsnutzung angenommen. Das 17. Obergeschoss wird als Technikgeschoss verwendet. Diese Annahme wurde gewählt, da die Nutzung eines Hochhauses als Bürogebäude häufig vorzufinden ist [50]. In den Obergeschossen, die der Büro- und Verwaltungsnutzung dienen, befinden sich je Obergeschoss zwei Nutzungseinheiten. Zur Vermeidung weiterer baurechtlicher Anforderungen als Sonderbau (z. B. Anordnung notwendiger Flure etc.) wird die Fläche der Nutzungseinheiten auf 400 m² begrenzt [16, § 2 (4)].

5.1.3 Rettungswege

5.1.3.1 Gebäudemodell nach MHochR

Aus den baurechtlichen Vorgaben für Hochhäuser ergeben sich nach der MHochR und der MHHR unterschiedliche Anforderungen, die in den Modellen abgebildet werden. Das Gebäudemodell nach MHochR verfügt über zwei an den Außenwänden liegenden notwendigen Treppenträume, die alle Obergeschosse des Gebäudemodelles miteinander verbinden. Von jeder Nutzungseinheit kann ein Treppenraum über einen allgemein zugänglichen Flur, der eine Länge von 4,40 m und eine Breite von 1,20 m aufweist, in längstens 25 m erreicht werden [15, Ziffer 3.6.1]. Die Treppen sind als zweiläufige Treppen mit Halbpodest angeordnet. Die Podeste befinden sich auf der Höhe der Obergeschosse und zwischen den Obergeschossen auf halber Höhe. Die Länge der Treppen beträgt 2,80 m. Die Breite wird mit 1,20 m angenommen. Die Podeste in den Geschossen besitzen eine Länge von 4,40 m und eine Breite von 1,20 m. Die zwischen den Geschossen liegenden Podeste haben eine Länge von 2,80 m und eine Breite von 1,20 m.

Der lichten Breite der Wegelemente im Gebäudemodell nach MHochR liegt die Zellgröße des Simulationsmodelles PedGo zugrunde, sodass die Wegelemente mit einer geringeren Breite als der nach der MHochR geforderten Mindestbreite von 1,25 m angenommen werden. Dieser Ansatz stellt ein konservativer Ansatz dar.

5.1.3.2 Gebäudemodell nach MHHR

Gegenüber dem Gebäudemodell nach MHochR wird der Rettungsweg des Gebäudemodelles nach MHHR durch einen im Gebäudekern angeordneten innenliegenden Sicherheitstreppenraum sichergestellt (vgl. [20, Ziffer 4.2.1]). Aus den Nutzungseinheiten kann der innenliegende Sicherheitstreppenraum über einen notwendigen Flur, der beide Nutzungseinheiten miteinander verbindet, erreicht werden. Der notwendige Flur verfügt über eine Breite von 1,20 m und eine Länge von 10,40 m. Darüber hinaus verbindet der notwendige Flur die Nutzungseinheiten mit dem Aufzugsvorraum. Flüchtende Personen erreichen von jeder Stelle der Nutzungseinheit in max. 35 m Rettungsweglänge den Vorraum des innenliegenden Sicherheitstreppenraumes [20, Ziffer 4.3.2]. Der Vorraum weist eine Länge von 4,40 m und eine Breite von 1,20 m auf. Die Vorschaltung eines Vorraumes an einen innenliegenden Sicherheitstreppenraum erfüllt die Funktion einer Sicherheitsschleuse. Dadurch wird verhindert, dass Feuer und Rauch in den Sicherheitstreppenraum eindringen können. Die Vorräume wie auch die innenliegenden Sicherheitstreppenräume werden dazu mit einer Differenzdruckanlage ausgestattet [20, Ziffer 4.2.8].

Analog zum Modell nach MHochR weisen die Treppen und Podeste dieselben Längen und Breiten auf.

Die Breite eines jeden Teils von Rettungswegen im Gebäudemodell nach MHHR entspricht der nach [20] erforderlichen lichten Breite von mindestens 1,20 m.

5.1.4 Türen im Rettungsweg

5.1.4.1 Gebäudemodell nach MHochR

Nach [15] darf die Rettungswegbreite von 1,25 m an Türen im Zuge von Rettungswegen auf eine Breite von 1,10 m reduziert werden. Um den Effekt der gegenüber dem Rettungsweg verringerten Breite an Ausgängen abbilden zu können, werden im Modell alle Türen im Zuge von Rettungswegen mit einer Breite von 0,80 m angenommen. Der Breite von 0,80 m liegt die Gittergröße des Simulationsmodelles zugrunde. Darüber hinaus stellt dieser Ansatz eine konservative Annahme dar.

5.1.4.2 Gebäudemodell nach MHHR

Alle Ausgänge im Zuge von Rettungswegen weisen im Gebäudemodell die nach [20] geforderte Mindestbreite von 1,20 m auf.

5.1.5 Gebäudetechnische Anlagen

5.1.5.1 Gebäudemodell nach MHochR

Im Gebäudemodell nach MHochR wird eine Alarmeinrichtung angenommen, mit der die Personen im Falle einer Evakuierung in den Obergeschossen alarmiert und instruiert werden können [15, Ziffer 4.10]. Darüber hinaus ist im Gebäude eine Brandmeldeanlage mit nicht-automatischen Brandmeldern installiert, um im Brandfall das betroffene Obergeschoss zu alarmieren [15, Ziffer 4.8]. Die Auslösestellen für die Alarmeinrichtung und der nichtautomatischen Brandmelder befinden sich im allgemein zugänglichen Flur. Die Brandmeldezentrale und die Alarmeinrichtung werden im Raum der Brandmeldezentrale angenommen, was im Allgemeinen dem Feuerwehranlaufpunkt entspricht.

Des Weiteren sind im Gebäudemodell vier Aufzüge zur vertikalen Erschließung vorhanden. Ein Aufzug erfüllt die Anforderungen eines Feuerwehraufzuges, sodass er von jeder Stelle der Nutzungseinheit innerhalb von 50 m erreicht werden kann [15, Ziffer 4.2.1]. Feuerwehraufzüge

dienen zur Unterstützung der Feuerwehr bei der Brandbekämpfung, aber auch zur Rettung von Menschen oder Tieren sowie mobilitätseingeschränkten Personen.

5.1.5.2 Gebäudemodell nach MHHR

Die im Gebäudemodell befindlichen Personen werden bei einem Brand durch eine Brandmeldeanlage mit automatischen Brandmeldern in den Obergeschossen optisch und akustisch alarmiert [20, Ziffer 6.4.2]. Die Obergeschosse sind mit nichtautomatischen Brandmeldern flächendeckend ausgestattet (Vollschutz). Des Weiteren werden in den Obergeschossen Alarmierungs- und Lautsprecheranlagen angenommen, um im Evakuierungsfall den Personen Anweisungen geben zu können [20, Ziffer 6.4.3].

Darüber hinaus existieren analog zum Gebäudemodell nach MHochR vier Aufzüge zur vertikalen Erschließung des Gebäudes. Ein Aufzug wird als Feuerwehraufzug verwendet und kann von jeder Stelle einer Nutzungseinheit in höchstens 50 m erreicht werden (vgl. [20, 15]).

5.1.6 Personenbelegung

Für die Nutzung der Obergeschosse ist in den Gebäudemodellen ausschließlich eine Büronutzung vorgesehen. Die Nutzung eines Hochhauses zur Büro- und Verwaltungsnutzung stellt eine häufig vorzufindende Nutzung von Hochhäusern dar [50]. Für den Personenansatz in den Nutzungseinheiten wird der Flächenbedarf für eine Person an einem Bildschirmarbeitsplatz von 8 m² gewählt (vgl. [5, 49]). Nach Abzug der benötigten Verkehrsflächen nach ArbStättV ergibt sich eine Personenzahl von 44 Personen pro Nutzungseinheit, was einer Personendichte von $0,13 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$ entspricht. Demgegenüber wird in [48] eine Personendichte von $0,20 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$ für eine Büronutzung empfohlen. Dies entspricht einer Fläche für einen Bildschirmarbeitsplatz von 5 m², was nicht den geltenden Arbeitsschutzbestimmungen entspricht [11, 12]. In [43] wird eine Anfangsverteilung von $0,11 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$ empfohlen. Die Anfangsverteilung entspricht einer Fläche von 9 m² und entspricht einem Zellenbüro mit 1 bis 2 Personen pro Arbeitsplatz. Da die Personenbelegung in den Geschossen eine Grenzbetrachtung darstellen soll, wird für die nachfolgenden Untersuchungen eine Personendichte von $0,13 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$ gewählt. Die Personenbelegung in einem Obergeschoss entspricht damit 88 Personen. Die Gesamtzahl der zu evakuierenden Personen je Gebäudemodell beträgt 1408 Personen.

5.1.7 Evakuierungsszenarios

5.1.7.1 Szenario 1

Die Ermittlung der Entfluchtungsauern aus den Gebäudemodellen erfolgt szenarienbasiert. Das erste Szenario stellt die Gesamtevakuiierung der Gebäudemodelle im Gefahrenfall dar. Das Szenario soll eine vollständige Evakuierung eines Hochhauses in einer Gefahrensituation, bspw. wegen einer Bombendrohung, nachbilden. Dazu wird die Vollevakuierung über die in den Gebäudemodellen vorhandene Alarmierungseinrichtung ausgelöst. Nach Ertönen des Alarmierungssignales flüchten alle Personen aus den Nutzungseinheiten über die zur Verfügung stehenden Treppen zur Ausgangsebene im Erdgeschoss.

5.1.7.2 Szenario 2

In der ersten Phase des Szenario 2 kommt es infolge eines Brandereignisses zur Evakuierung des Ereignisgeschosses sowie des darunter und des darüber liegenden Obergeschosses. Die Auslösung des Evakuierungsalarmes erfolgt über die in den Gebäudemodellen installierte Brandmeldeanlage. Die Alarmierung des Brandgeschosses sowie des darunter und darüber liegenden Geschosses entspricht dem bauaufsichtlichen Brandschutzkonzept der MHHR, welches die Grundlage für die Dimensionierung der Rettungswege in Hochhäusern nach MHHR bildet [20, 19, Ziffer 4.1.2]. Um eine hohe Auslastung auf den Treppen zu simulieren, werden die Obergeschosse gleichzeitig alarmiert. Im Gebäudemodell nach MHochR erfolgt die Alarmierung der Geschosse im Brandfall nach den Vorgaben der MHHR, um eine Vergleichbarkeit der Modelle untereinander zu ermöglichen.

In der zweiten Phase erfolgt die Evakuierung der noch verbliebenen Obergeschosse. Es wird unterstellt, dass die Evakuierung der Restgeschosse aufgrund einer weiteren Gefahrenlage oder dem Erreichen des Kulminationspunktes durch die Anweisung der Feuerwehr erfolgt. Unter dem Kulminationspunkt wird aus feuerwehrtechnischer Sinn der Punkt verstanden, *„... an welchem die Lage zu entgleiten droht, also keine Kräfte oder nicht ausreichend Kräfte zur Verfügung stehen, die Initiative zu behalten oder das Ereignis eindämmen zu können.“* [50]. Analog zum Szenario 1 flüchten die Personen nach Ertönen des Alarmierungssignales oder nach Anweisung der Feuerwehr zur Ausgangsebene.

5.1.7.3 Optimiertes Szenario

Das optimierte Szenario entspricht einer möglichen schnelleren und sicheren Evakuierung des Gebäudemodells nach MHR. Dazu werden die in den Szenarien 1 und 2 auftretenden Stauungen und Personendichten identifiziert und ausgewertet sowie unter Zuhilfenahme eines gesteuerten Evakuierungsverlaufes minimiert.

5.1.8 Gesicherter Bereich

Als gesicherter Bereich wird ein Bereich oder ein Gebiet bezeichnet, in dem Personen und Tiere vorübergehend vor den Einwirkungen einer äußeren Gefahr geschützt sind (vgl. [10]). Der gesicherte Bereich grenzt unmittelbar an das Ende eines Rettungsweges an. Die Personen, die in den Gebäudemodellen den Ausgang im Erdgeschoss erreicht haben, befinden sich im gesicherten Bereich und können sich auf die angrenzenden öffentlichen Verkehrsflächen retten.

5.2 Diskretisierung

5.2.1 Kubatur

Die Implementierung der Gebäudemodelle in die Simulationssoftware PedGo erfolgt mit dem Editor PedEd [47]. Dazu werden die Obergeschosse der Gebäudemodelle als Ebenen im Simulationsmodell dargestellt. Die Ebenen werden von Wandzellen begrenzt, die die Außenwände der Gebäudemodelle darstellen. Weiterhin werden die Halbpodeste, welche sich auf halber Höhe zwischen den Obergeschossen befinden, durch Ebenen repräsentiert. In den Simulationsmodellen befinden sich somit jeweils 32 Ebenen, welche die Obergeschosse und die Zwischengeschosse abbilden.

5.2.2 Gebäudemodell nach MHochR

In den Ebenen, werden die vorhandenen Aufzüge und Aufzugsvorräume als Einbauten flächengleich abgebildet. Des Weiteren befinden sich die notwendigen Treppenräume an den Außenwänden. Vor den notwendigen Treppenräumen ist ein allgemein zugänglicher Flur angeordnet. Die Länge des Flures wird mit 10 Zellen zu je 0,40 m und einer Breite von drei Zellen à 1,20 m diskretisiert. An die notwendigen Treppenräume schließen Versorgungsschächte an, die flächengleich mit 13 Zellen in der Länge und 6 Zellen in der Breite abgebildet werden. Die in den Treppenräumen angeordneten zweiläufigen Treppen werden mit Treppenzellen zu je sieben Zellen diskretisiert. Am Start- und Endpunkt jeder notwendigen Treppe befinden sich Sprungzellen, die die Richtung der Treppen definieren. Die Treppen verbinden die Ebenen im

Simulationsmodell miteinander. Die zwischen den Treppenzellen angeordneten Podeste werden mit 11 Zellen in der Länge und mit drei Zellen in der Breite dargestellt. Die Halbpodeste weisen eine Länge von 7 Zellen zu je 0,40 m und eine Breite von 1,20 m, die mit 3 Zellen abgebildet wird, auf. Die Nutzungseinheiten in den Ebenen sind über eine Tür mit einer Breite von zwei Zellen zu je 0,40 m miteinander verbunden. Die Verbindung der Nutzungseinheiten entspricht der Forderung nach [15], wonach in jedem Obergeschoss zwei Treppen erreichbar sein müssen [15, Ziffer 3.6.1]. Eine Möblierung in den Nutzungseinheiten wird nicht abgebildet. Maßgeblich für die Entfluchtungsdauer ist die Durchflusskapazität der Ausgänge und der Treppen, sodass in den Ebenen auf eine Abbildung der Möblierung verzichtet werden kann. Die in den Rettungswegen vorhandenen Türen werden in Form von Türzellen in einer Breite von zwei Zellen à 0,40 m dargestellt. Die nachfolgende Abbildung 5.1 veranschaulicht die Darstellung einer Ebene im Simulationsmodell.

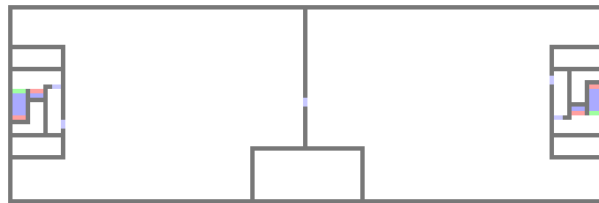


Abb. 5.1: Grundriss einer Ebene im Simulationsmodell nach MHochR

Aus der Abbildung 5.1 kann die Diskretisierung der Nutzungseinheiten sowie der im Rettungsweg vorhandenen Wegelemente (Türen, Flure und Treppen) entnommen werden.

5.2.3 Gebäudemodell nach MHHR

Analog zum Simulationsmodell nach MHochR werden die Obergeschosse und Zwischengeschosse als Ebenen dargestellt. Identisch ist die flächengleiche Abbildung der Aufzüge und Aufzugsvorräume. Der vertikale Rettungsweg aus den Nutzungseinheiten wird durch den innenliegenden Sicherheitstrepfenraum im Gebäudekern zwischen den Nutzungseinheiten abgebildet. Beide Nutzungseinheiten sind über einen notwendigen Flur mit dem Treppenraum des innenliegenden Sicherheitstrepfenraums verbunden. Der notwendige Flur wird mit 24 Zellen zu je 0,40 m in der Länge und mit drei Zellen zu je 0,40 m in der Breite diskretisiert. An die Wände des Sicherheitstrepfenraumes grenzen Versorgungsschächte an, die analog zum Simulationsmodell nach MHochR mit 13 Zellen in der Länge und 6 Zellen in der Breite abgebildet werden. Vor dem Sicherheitstrepfenraum ist ein Vorräum angeordnet, dessen Flächeninhalt dem der Vorräume im Simulationsmodell nach MHochR entspricht. Die in den Ebenen vorhandenen Podeste und Zwischenpodeste sowie die Treppen weisen exakt dieselbe Anzahl der

Zellen auf, wie sie bereits unter Punkt 5.2.2 beschrieben wurden. Identisch ist auch, dass keine Möblierung in den Ebenen dargestellt wird. Im Simulationsmodell nach MHHR werden die Türen in den Rettungswegen mit drei Zellen à 0,40 m diskretisiert. Die Abbildung 5.2 zeigt die Diskretisierung der Obergeschosse im Simulationsmodell.

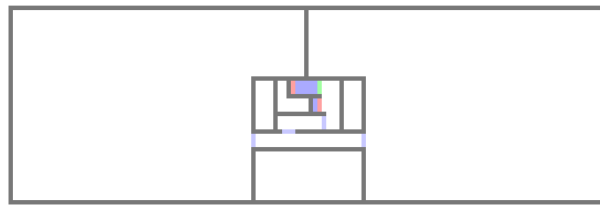


Abb. 5.2: Grundriss einer Ebene im Simulationsmodell nach MHHR

Analog zum Simulationsmodell nach MHochR kann aus Abbildung 5.2 die Diskretisierung der Wegelemente im Rettungsweg entnommen werden.

5.2.4 Population

5.2.4.1 Bewegungsparameter

Jeder Agent wird innerhalb der Simulation durch einen eigenen Parametersatz repräsentiert, der zu Beginn einer Simulation neu vergeben wird. Darüber hinaus können einzelne Agenten zu Personengruppen mit gleichen Eigenschaften zusammengefasst werden. Dies ermöglicht die Darstellung bestimmter Personengruppen in der Simulation und lässt bspw. Angestellte von Besuchern eines Gebäudes unterscheiden. Im vorliegenden Fall werden die Agenten stockwerksweise in Personengruppen zusammengefasst, um den Agenten unterschiedliche Reaktionsdauern zuweisen zu können.

Die Parameter lassen sich als Gleichverteilung oder als Normalverteilung über alle Personen wählen. Definiert werden die Parameter durch einen Minimal- und Maximalwert sowie bei einer Normalverteilung zusätzlich durch ihren Mittelwert und die Standardabweichung. Als Parametereinstellungen für die Agenten werden die von PedGo als Standard verwendeten Einstellungswerte übernommen. Lediglich bei der Reaktionszeit der Agenten wird eine gleichverteilte Reaktionsdauer von 0 bis 60 s angenommen, d. h. die Agenten beginnen innerhalb von einer Minute nach Alarmierung mit der Fluchtbewegung. Dies entspricht nach [41] der Reaktionsdauer in einem Bürogebäude. Darüber hinaus stellt eine gleichverteilte Reaktionsdauer von 0 bis 60 s den Fall einer zügigen Entfluchtung nach [43] dar. Mit dieser als kurz anzusehenden Reaktionsdauer wird gleichzeitig eine hohe Auslastung der baulichen

Rettungswege simuliert. Auf eine weitere Verteilung der Reaktionsdauern für eine schnelle und langsame Entfluchtung nach [43] wird verzichtet, da diese nicht der Realität entsprechen.

Die Veränderung eines Parametersatzes hat Einfluss auf die Art und Reihenfolge, wie sich ein Agent in der Simulation bewegt sowie auf die Dauer einer Entfluchtung. Da sich die Parameter Laufgeschwindigkeit, Geduld („Patience“), Schwanken („Sway“), Trödelwahrscheinlichkeit („Dawdle“) und Trägheit („Inertia“) auf das Fundamentaldiagramm des Simulationsmodelles unterschiedlich stark auswirken und das Verhalten der Agenten nicht vom Fundamentaldiagramm des Modelles abweichen soll, bleiben diese Parameterwerte in allen Simulationen unverändert. Darüber hinaus sind einige Parametereinflüsse auf das Fundamentaldiagramm nicht vollständig beschrieben und erklärbar [34]. Die nachfolgende Abbildung 5.3 zeigt beispielhaft die Parametereinstellung der Agenten des 15. Obergeschosses im Simulationsmodell nach MHochR.

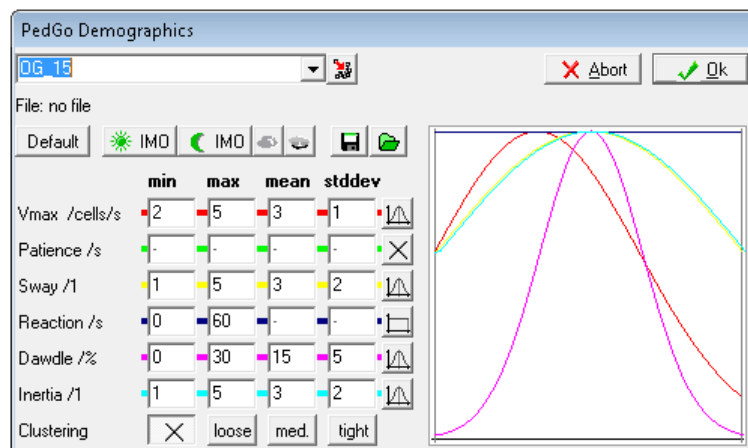


Abb. 5.3: Parametereinstellungen im Simulationsmodell nach MHochR

5.2.4.2 Routenzuweisung

Auf dem Weg aus den Nutzungseinheiten zu den in der Ausgangsebene angeordneten Rettungszellen¹ folgen die Agenten dem von den Rettungszellen ausgestrahlten Potenzialfeld. Diese Art der Bewegung stellt die „Wahl des kürzesten Weges“ dar, d. h. die Agenten erreichen die Ausgangsebene aus den Nutzungseinheiten heraus immer auf dem kürzesten Weg. Die Zuweisung des Potenzialfeldes erfolgt durch die Zuordnung der Agenten zur entsprechenden Rettungszelle.

Aus den Abbildungen 5.4 und 5.5 kann die Potenzialausbreitung der Simulationsmodelle nach MHochR und MHHR am Beispiel des 13. Obergeschosses entnommen werden.

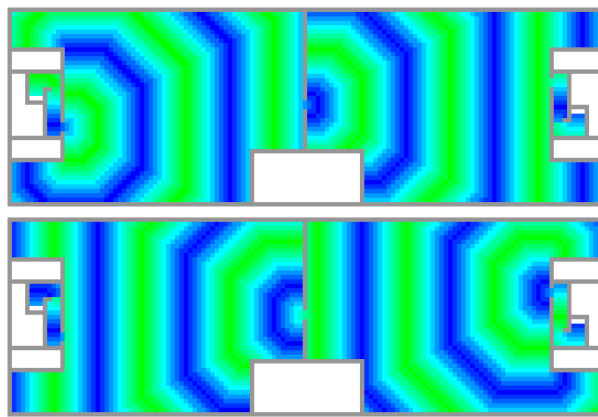


Abb. 5.4: Potenzialfeld im Simulationsmodell MHochR

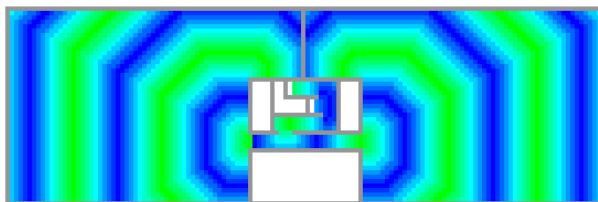


Abb. 5.5: Potenzialfeld im Simulationsmodell MHHR

¹ Als Rettungszellen können Ausgangszellen verstanden werden.

5.2.4.3 Verteilung der Agenten

Die Verteilung der Agenten in den Nutzungseinheiten erfolgt stochastisch, d. h. vor jedem Simulationsdurchgang erhält jeder Agent eine neue Position in der Nutzungseinheit zugewiesen.

Nachfolgende Abbildungen zeigen die Agentenverteilung in den Obergeschossen zu Simulationsbeginn.

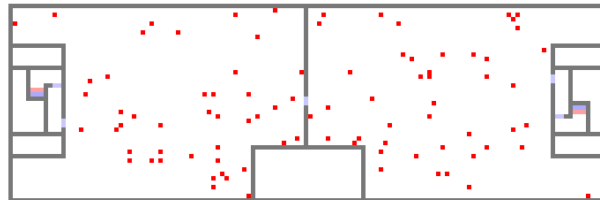


Abb. 5.6: Personenverteilung im Simulationsmodell nach MHochR

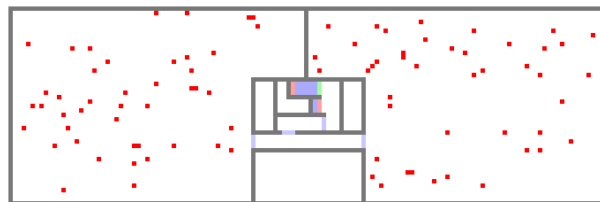


Abb. 5.7: Personenverteilung im Simulationsmodell nach MHHR

6 Ergebnisse

6.1 Szenario 1

6.1.1 Simulationsmodell nach MHochR

Der erste Agent erreicht 27 s nach Simulationsbeginn den Ausgang im Erdgeschoss. Der letzte Agent verlässt die Simulation nach 745 s (12:25 Minuten). Das 5. und das 12. Obergeschoss sind als erste Obergeschosse nach 102 s evakuiert. Danach folgen gleichzeitig das 6., 7., 9. und 10. Obergeschoss nach 103 s. Daraufhin ist das 15. Obergeschoss nach 105 s und das 13. Obergeschoss nach 106 s evakuiert. Das 1. Obergeschoss ist nach 107 s und das 3. Obergeschoss nach 108 s entfluchtet. Als letzte Obergeschosse folgen das 4., 14. und das 16. Obergeschoss. Diese sind nach maximal 110 s entfluchtet. D. h. nach 110 s befinden sich alle Agenten in den Treppenträumen.

Die Laufzeit eines Agenten mit ungehinderter Gehgeschwindigkeit vom 16. Obergeschoss bis zum Erdgeschoss beträgt 460 s (7:40 Minuten). Die Laufzeit von Geschoss zu Geschoss, gemessen von Podest zu Podest, beträgt im Mittel 29 s. Das Minimum der Laufzeiten beträgt 21 s. Als Maximum wurde eine Laufzeit von 38 s ermittelt.

Die nachfolgende Abbildung 6.1 zeigt zusammenfassend die Entfluchtungsauern der Obergeschosse.

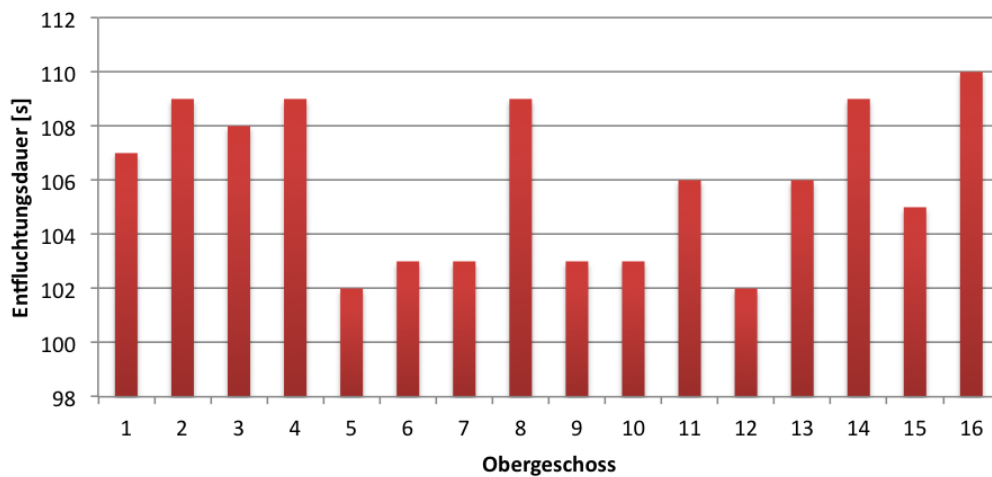


Abb. 6.1: Entfluchtungsdauern der Obergeschosse im Simulationsmodell nach MHochR

Die Entfluchtung der Obergeschosse soll am Beispiel des 16. Obergeschosses in der nachfolgenden Abbildung veranschaulicht werden. Die Nutzungseinheiten des 16. Obergeschosses waren mit Ablauf der 109. Sekunde entfluchtet. Wie die Abbildung 6.2 zeigt, verlässt der letzte Agent 110 s nach Simulationsbeginn das 16. Obergeschoss über den notwendigen Treppenraum.

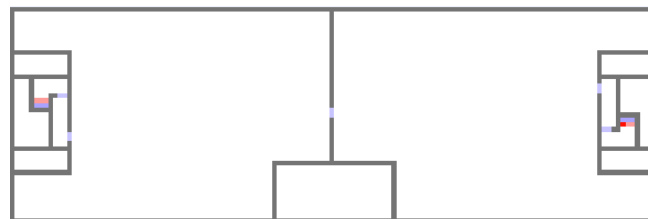


Abb. 6.2: 16. Obergeschoss im Simulationsmodell MHochR zum Zeitpunkt $t = 110$ s.

Vor den Ausgängen der allgemein zugänglichen Flure konnten während des gesamten Evakuierungsverlaufes keine signifikanten Staus festgestellt werden. Durch die Vereinigung der Personenströme in den Geschossen kommt es ab dem 9. Obergeschoss zu Personendichten von $4 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$ auf den Treppen. Die Personendichte von $4 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$ wird für die Dauer von mindestens 74 s (1:14 Minuten) erreicht. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Personendichte anhand eines Dichteplots des 7. Obergeschosses. Gleichzeitig kann die Personendichte des darunter liegenden Zwischengeschosses aus Abbildung 6.4 entnommen werden.

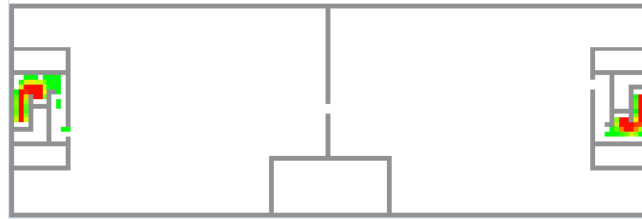


Abb. 6.3: Personendichte im 7. Obergeschoss im Simulationsmodell MHochR

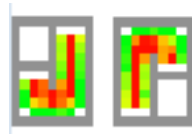


Abb. 6.4: Personendichte im 6. Zwischengeschoss im Simulationsmodell MHochR

Ab dem 1. Obergeschoss wird die Personendichte von $4 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$ nicht mehr erreicht, da sich alle Personenströme aus den Obergeschossen vereint haben. Die Abbildung 6.5 zeigt die Personendichte auf den Treppen zum Erdgeschoss.

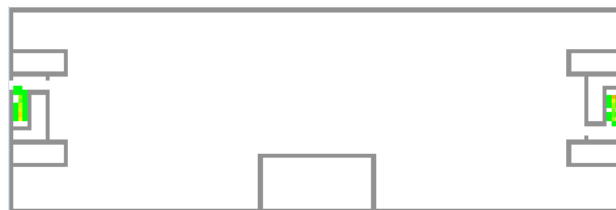


Abb. 6.5: Personendichte im Erdgeschoss im Simulationsmodell MHochR

Das Minimum der Gesamtentfluchtungsdauern beträgt 710 Sekunden (11:50 Minuten), das Maximum 768 s (12:48 Minuten). Der Mittelwert für einen Simulationsdurchlauf mit 500 Einzelsimulationen beträgt 730 s (12:10 Minuten). Die Standardabweichung beträgt 9 s.

Die nachfolgende Tabelle 6.1 zeigt die Simulationsergebnisse im Überblick.

statistischer Wert	Gesamtentfluchtungsdauer	
	[s]	[min]
Minimum	710	11:50
Maximum	768	12:48
Mittelwert	730	12:10
Standardabweichung	9	00:09
95 % Quantil	745	12:25

Tab. 6.1: Gesamtentfluchtungsdauern für das Simulationsmodell MHochR im Szenario 1

Aus dem Histogramm können die ermittelten Gesamtentfluchtungsdauern entnommen werden. Die für das Simulationsmodell ermittelte signifikante Gesamtentfluchtungsdauer ist in der Farbe Grün dargestellt.

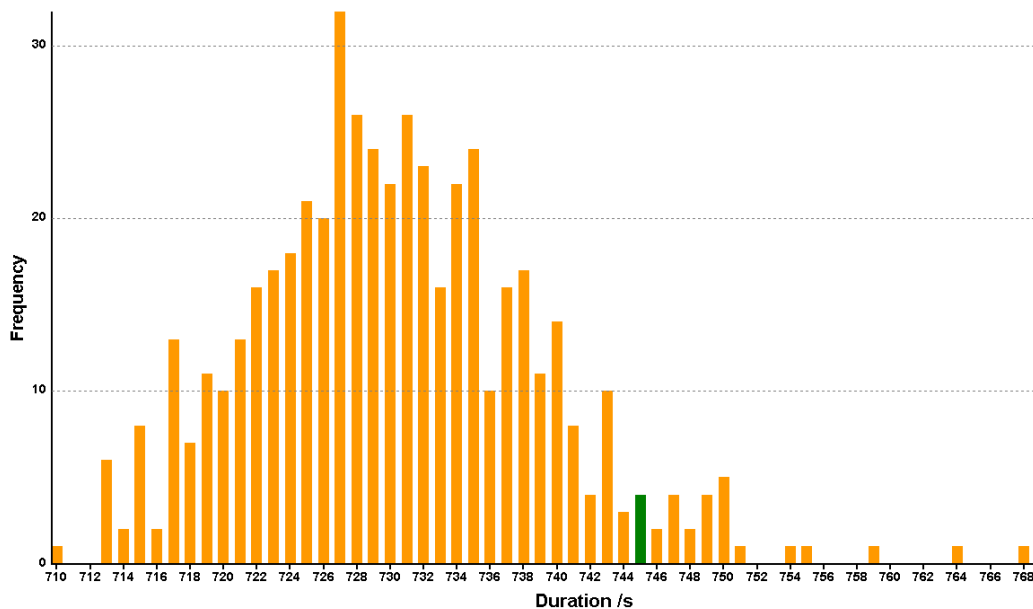


Abb. 6.6: Histogramm der Gesamtentfluchtungsdauern für das Simulationsmodell MHochR (Szenario 1)

Die signifikante Gesamtentfluchtungsdauer für das Gebäudemodell nach MHochR beträgt 745 s (12:25 Minuten). Die vergleichende Berechnung mit dem Handrechenverfahren ergibt eine Gesamtentfluchtungsdauer zuzüglich einer Reaktionsdauer von 60 s von insgesamt 800,13 s (13:21 Minuten) für eine moderate Auslastung ($\approx 1 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$) nach [48].

6.1.2 Simulationsmodell nach MHRR

Analog zum Simulationsmodell nach MHochR beträgt die Laufzeit eines einzelnen Agenten mit ungehinderter Gehgeschwindigkeit aus dem 16. Obergeschoss bis zum Erreichen des Ausganges im Erdgeschoss 460 s (7:40 Minuten). Die Laufdauern von Podest zu Podest betragen im Mittel 84,5 s (1:25 Minuten). Die Laufdauer erhöht sich im 15. Obergeschoss bis auf 359 s (5:59 Minuten), d. h. der letzte Agent, der das Podest des 15. Obergeschosses verlässt, benötigt 5:59 Minuten bis er das Podest des 14. Obergeschosses erreicht. Die Laufdauer der Agenten verringert sich mit abnehmender Geschosshöhe. Vom ersten Obergeschoss benötigt ein Agent 32 s bis er den Ausgang im Erdgeschoss erreicht hat.

Durch die Vereinigung der Personenströme in den Obergeschossen bilden sich in den Vorräumen Staus, die im Mittel 129,9 s andauern. Das Maximum der Staudauer wird im 8. Obergeschoss erreicht, wo der letzte Agent 252 s (4:12 Minuten) benötigt, um den Vorraum verlassen zu können. Die kürzeste Zeit benötigt ein Agent im 16. Obergeschoss. Er durchströmt den Vorraum innerhalb von 7 s. Die nachfolgende Abbildung 6.7 zeigt die Evakuierung eines Obergeschosses am Beispiel des 8. Obergeschoss. Der letzte Agent hat nach 129 s den notwendigen Flur verlassen und befindet sich im Vorraum zum Treppenraum.

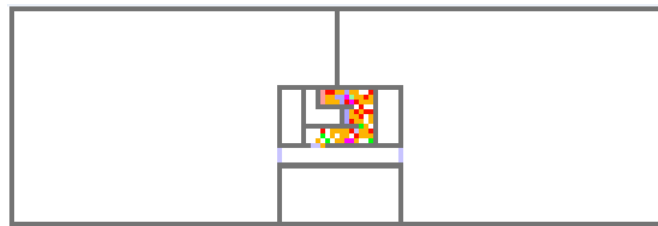


Abb. 6.7: Evakuierungssituation im 8. Obergeschoss im Simulationsmodell MHRR zum Zeitpunkt $t = 129$ s

Die ermittelten Evakuierungsdauern der Obergeschosse und die Staudauern in den Vorräumen können aus nachfolgender Abbildung 6.8 entnommen werden.

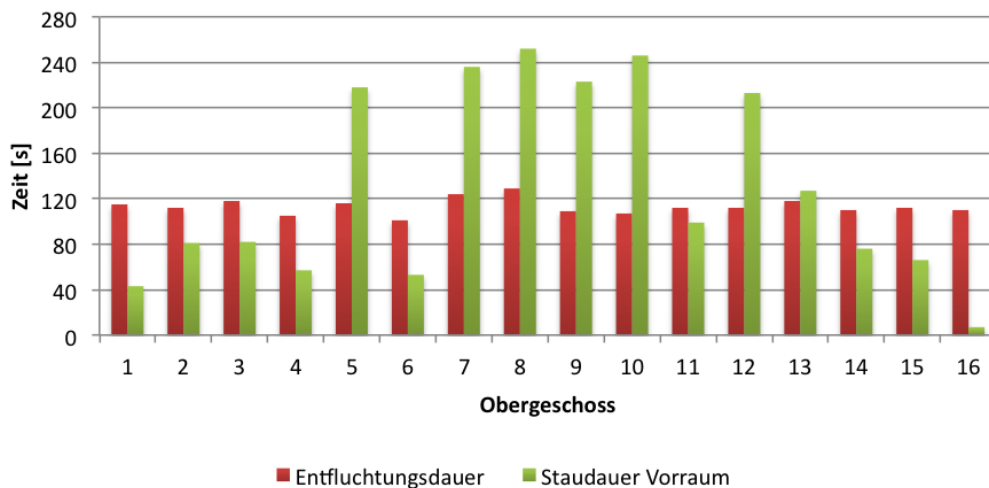


Abb. 6.8: Entfluchtungsdauern und Staudauern in den Obergeschossen im Simulationsmodell MHHR

Aus Abbildung 6.8 kann entnommen werden, dass nach 129 s alle Obergeschosse entfluchtet sind und sich alle Agenten im Sicherheitstredenraum oder dem dazugehörigen Vorraum befinden.

Die Personendichte von $4 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$ wird auf den Treppen des 14. Obergeschosses bis zum 1. Obergeschoss für die Dauer von mindestens 144 s (2:24 Minuten) überschritten. Analog zum Simulationsmodell nach MHochR sind ab dem 1. Obergeschoss keine Stauungen mehr zu erkennen. Die Agenten gelangen ab dem 1. Obergeschoss ungehindert zur Ausgangsebene im Erdgeschoss.

Die Personendichte auf den Treppen und den Zwischenpodesten wird am Beispiel des 12. Obergeschosses in den Abbildungen 6.9 und 6.10 gezeigt.

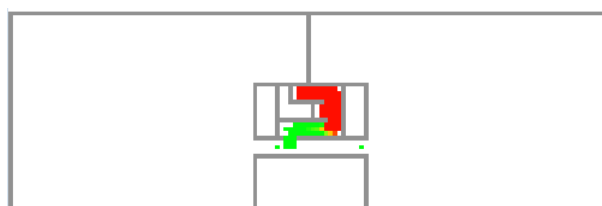


Abb. 6.9: Personendichte im 12. Obergeschoss im Simulationsmodell MHHR



Abb. 6.10: Personendichte im 11. Zwischengeschoss im Simulationsmodell MHHR

Das Minimum der ermittelten Gesamtentfluchtungsdauern aus 500 Simulationsdurchläufen beträgt 1385 Sekunden (23:05 Minuten), das Maximum 1465 s (24:25 Minuten). Als mittlere Gesamtentfluchtungsdauer konnte ein Zeitraum von 1412 s (23:44 Minuten) festgestellt werden. Die Standardabweichung beträgt 12 s. Zuzüglich einer Reaktionsdauer von 60 s wurde mit dem Handrechenverfahren eine Gesamtentfluchtungsdauer von 1549,07 s (25:50 Minuten) ermittelt.

Zusammenfassend sind die Ergebnisse des Simulationsdurchlaufes in Tabelle 6.2 dargestellt.

statistischer Wert	Gesamtentfluchtungsdauer	
	[s]	[min]
Minimum	1385	23:05
Maximum	1465	24:25
Mittelwert	1412	23:44
Standardabweichung	12	00:12
95 % Quantil	1444	24:04

Tab. 6.2: Gesamtentfluchtungsdauern für das Simulationsmodell MHHR im Szenario 1

Nachfolgendes Histogramm zeigt die ermittelten Gesamtentfluchtungsdauern.

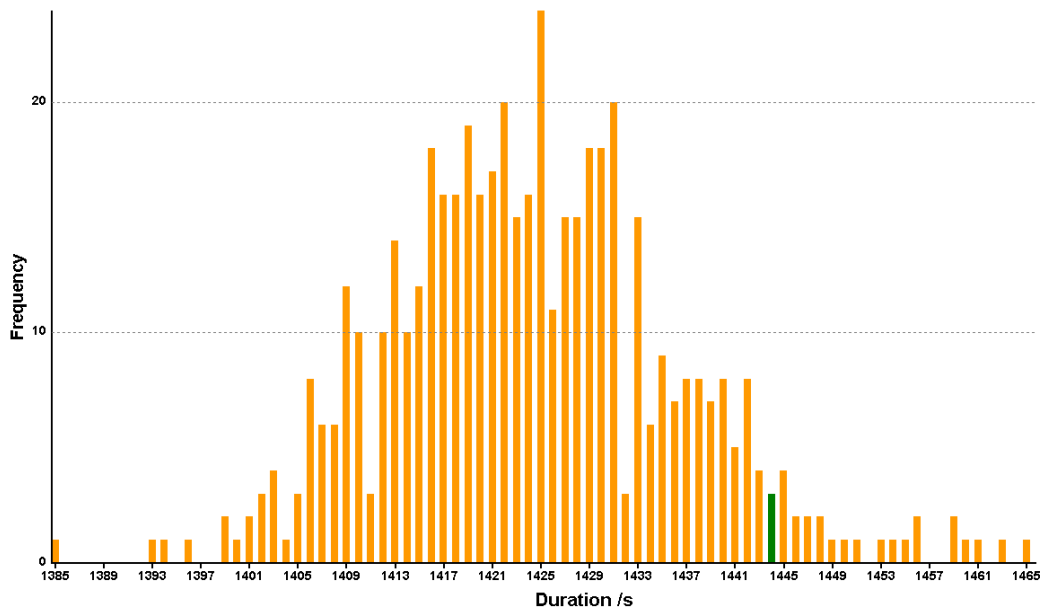


Abb. 6.11: Histogramm der Gesamtentfluchtungsauern für das Simulationsmodell MHHR (Szenario 1)

Für das Simulationsmodell nach MHHR beträgt die signifikante Gesamtentfluchtungsauer 1444 s (24:04 Minuten).

6.1.3 Optimiertes Szenario

Der Evakuierungsverlauf für den optimierten Fall stellt sich wie folgt dar: Zu Beginn der Simulation werden das erste und zweite sowie das 15. und 16. Obergeschoss gleichzeitig evakuiert. Danach folgen in einer zeitlichen Verzögerung von 180 s zunächst das 15. Obergeschoss und innerhalb von 90 s nacheinander „von oben nach unten“ die Geschosse 14 bis 10. Vom 9. Obergeschoss bis zum 5. Obergeschoss erhöht sich die Verzögerungszeit auf 120 s. Das erste und das zweite Obergeschoss sowie das dritte und das vierte Obergeschoss werden von „unten nach oben“ evakuiert. Der zeitliche Abstand der beiden ersten Obergeschosse zum dritten und vierten Obergeschoss beträgt 60 s.

Nachfolgende Tabelle 6.3 zeigt die ermittelten Verzögerungsdauern.

Geschoss	1	2	3	4	5	6	7	8
Verzögerungsdauer [s]	0	0	60	60	1140	1020	900	780
Geschoss	9	10	11	12	13	14	15	16
Verzögerungsdauer [s]	660	540	450	360	270	180	0	0

Tab. 6.3: Verzögerungsdauern der Obergeschosse im optimierten Szenario 1

Wie aus der Tabelle 6.3 entnommen werden kann, bewegt sich der letzte Agent 1200 s (20:00 Minuten) nach Auslösung der phasenweisen Evakuierung aus dem 5. Obergeschoss und verlässt das Gebäude nach 281 s (4:41 Minuten).

Das 1. Obergeschoss ist als erstes Geschoss 103 s nach Simulationsbeginn evakuiert. Die längste Evakuierungsdauer von 141 s konnte für das 11. Obergeschoss ermittelt werden. Die Evakuierungsdauern der Obergeschosse können aus Abbildung 6.12 entnommen werden. In der Abbildung sind die Entfluchtungsdauern den Staudauern gegenübergestellt.

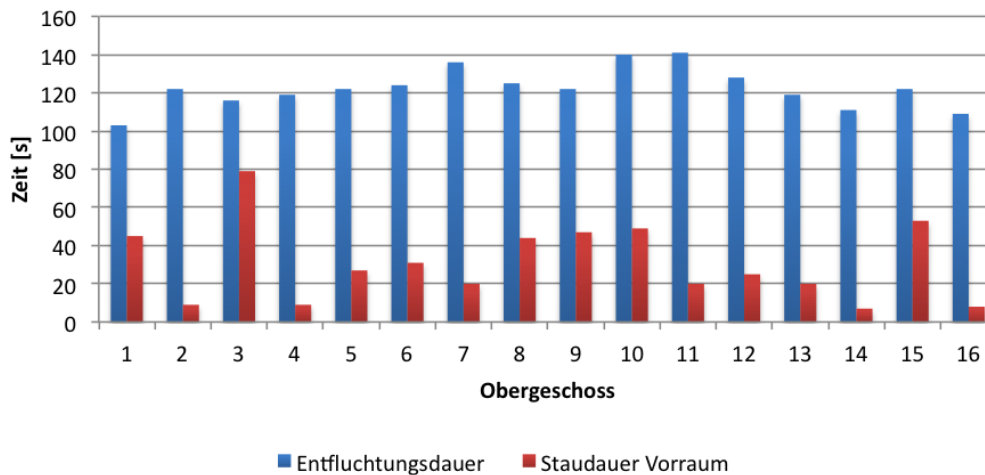


Abb. 6.12: Entfluchtungsdauern und Staudauern in den Obergeschossen im optimierten Szenario 1

Infolge der Optimierung wurde die Staudauer in den Vorräumen minimiert. Als kürzeste Staudauer wurde 8 s (16. Obergeschoss) und als längste Dauer 79 s (3. Obergeschoss) berechnet. Aus der nachfolgenden Abbildung kann der Evakuierungsverlauf des 11. Obergeschosses entnommen werden. Der letzte Agent erreicht 141 s nach Auslösung der Evakuierung im 11. Obergeschoss den Vorraum des innenliegenden Sicherheitstrepfenraumes.

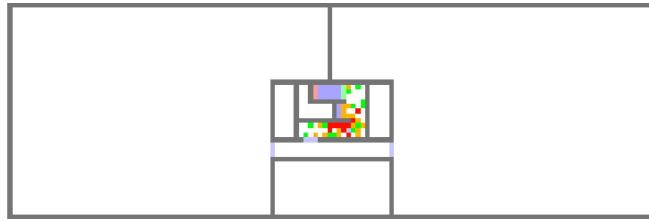


Abb. 6.13: Evakuierungssituation im 11. Obergeschoss im optimierten Szenario 1 zum Zeitpunkt $t = 591$ s

Im optimierten Szenario konnte kein signifikanter Stau an den Eingängen zum notwendigen Flur oder in den Vorräumen erkannt werden. Durch die Optimierung wurde in allen Obergeschossen die Personendichte von $4 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$ nicht überschritten. Beispielhaft wird die Personendichte am 5. Obergeschoss und dem 4. Zwischengeschoss gezeigt.

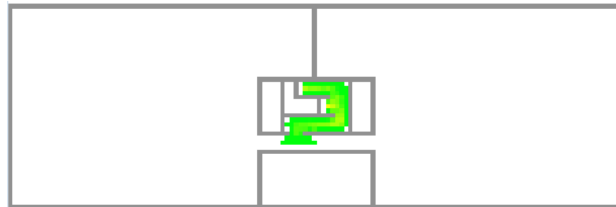


Abb. 6.14: Personendichte im 5. Obergeschoss im optimierten Szenario 1



Abb. 6.15: Personendichte im 4. Zwischengeschoss im optimierten Szenario 1

Die nachfolgende Tabelle 6.4 zeigt die für das optimierte Szenario ermittelten Gesamtentfluchtungsdauern im Überblick.

statistischer Wert	Gesamtentfluchtungsdauer	
	[s]	[min]
Minimum	1424	23:44
Maximum	1514	25:14
Mittelwert	1456	24:16
Standardabweichung	14	00:14
95 % Quantil	1481	24:41

Tab. 6.4: Gesamtentfluchtungsdauern für das optimierte Szenario 1

Die ermittelten Simulationsergebnisse können aus Abbildung 6.16 entnommen werden.

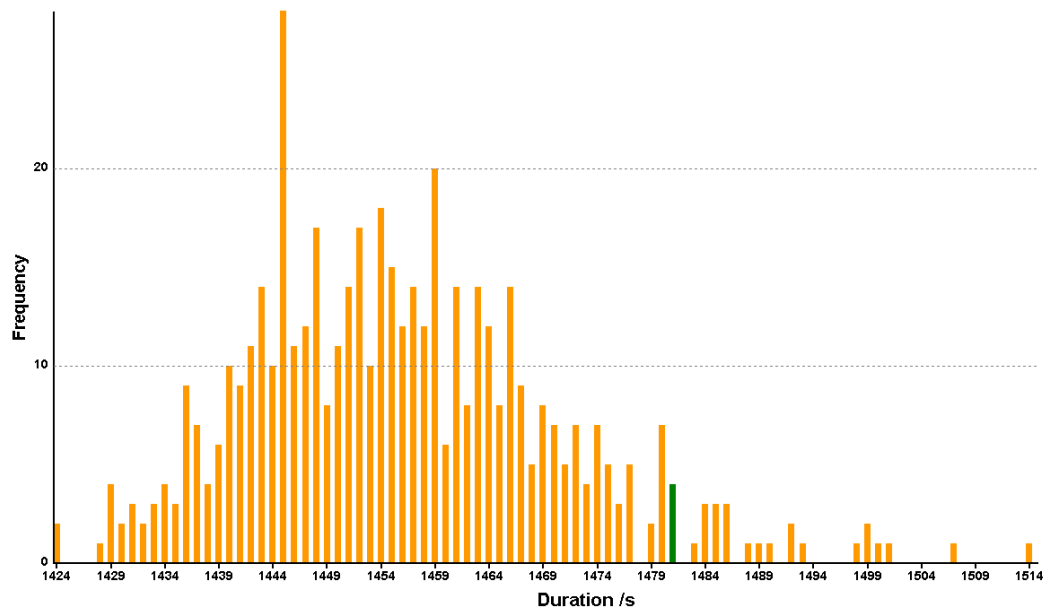


Abb. 6.16: Histogramm der Gesamtentfluchtungsdauern für das optimierte Szenario 1

Durch die Optimierung des Evakuierungsverlaufes wurde eine Verlängerung der signifikanten Gesamtentfluchtungsdauer gegenüber dem Simulationsmodell nach MHHR um 37 s festgestellt. Die signifikante Gesamtentfluchtungsdauer für das optimierte Szenario 1 beträgt damit 1481 s (24:41 Minuten).

Abschließend werden die ermittelten Simulationsergebnisse für das Szenario 1 in Abbildung 6.17 zusammenfassend dargestellt.

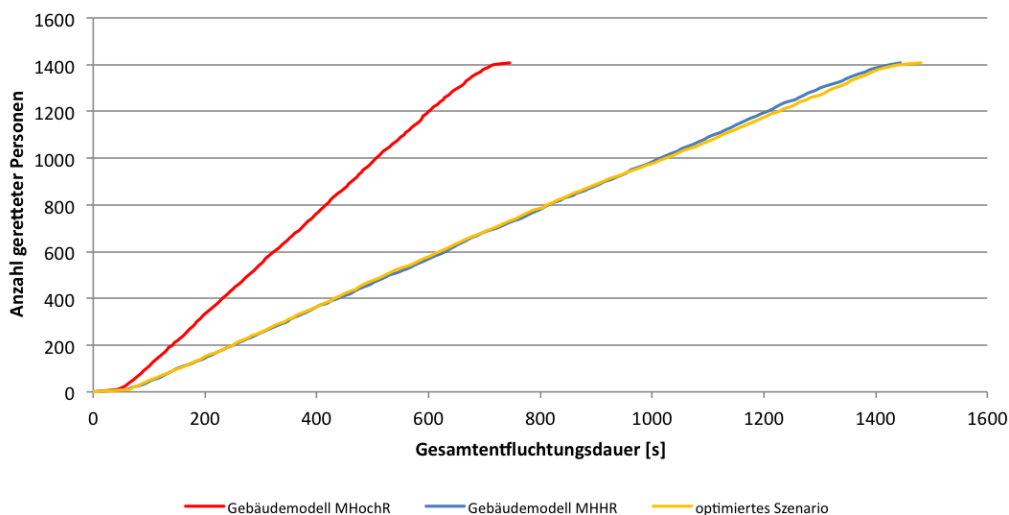


Abb. 6.17: Gesamtentfluchtungsdauern für das Szenario 1 im Überblick

6.2 Szenario 2

Im Vergleich zum Szenario 1 zeigen die Ergebnisse des Szenario 2 identische Verläufe. Daher werden nachfolgend die für die Bewertung des Szenarios signifikanten Ergebnisse herausgearbeitet.

6.2.1 Simulationsmodell nach MHochR

Als Gesamtentfluchtungsdauer in der ersten Phase des Szenarios konnte im Minimum 299 s (4:59 Minuten) und im Maximum 696 s (11:36 Minuten) festgestellt werden. D. h. die kürzeste Gesamtentfluchtungsdauer nahm die Entfluchtung des 1. Obergeschosses als Brandgeschoss in Anspruch. Die längste Gesamtentfluchtungsdauer benötigte die Entfluchtung des 15. Obergeschosses.

Nachfolgende Abbildung zeigt die für die Phase 1 ermittelten Gesamtentfluchtungsdauern. Mit dem Handrechenverfahren wurde in einer vergleichenden Rechnung zuzüglich einer Detektions- und Alarmierungsdauer von 120 s (2:00 Minuten) und einer Reaktionsdauer von 60 s (1:00 Minute) eine Gesamtentfluchtungsdauer von 618 s (10:18 Minuten) berechnet.

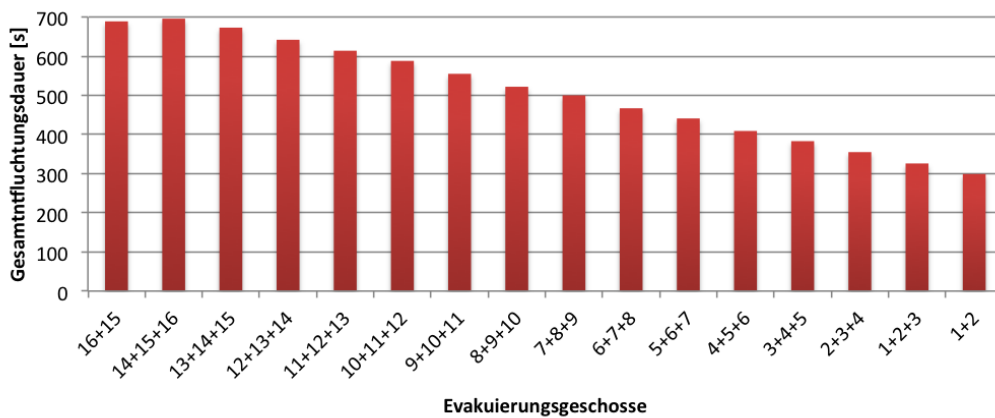


Abb. 6.18: Gesamtentfluchtungsdauern der Obergeschosse für die Phase 1 im Simulationsmodell MHochR

Im Verlauf der längsten Gesamtentfluchtungsdauer (siehe Abbildung 6.18) konnte auf den Wegelementen keine Personendichte von mehr als $4 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$ festgestellt werden. Nachfolgende Abbildung 6.19 zeigt die Personendichte im 14. Obergeschoss für den vorliegenden Fall.

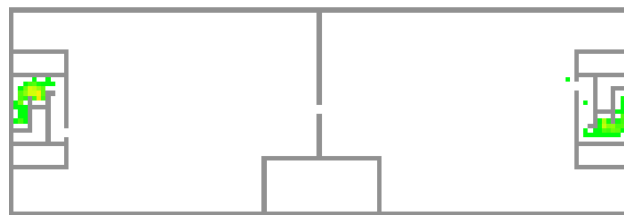


Abb. 6.19: Personendichte im 14. Obergeschoss in der Phase 1 im Simulationsmodell nach MHochR

Als Entfluchtungsdauern für die Brandgeschosse wurde ein Zeitraum von längstens 130 s (14. Obergeschoss) festgestellt. D. h. der letzte Agent erreichte in einem Brandgeschoss nach längstens 130 s nach Auslösung des Alarmes den notwendigen Treppenraum.

Die nachfolgende Abbildung 6.20 zeigt beispielhaft die Entfluchtung des 14. Obergeschosses 250 s (4:10 Minuten) nach Brandausbruch.

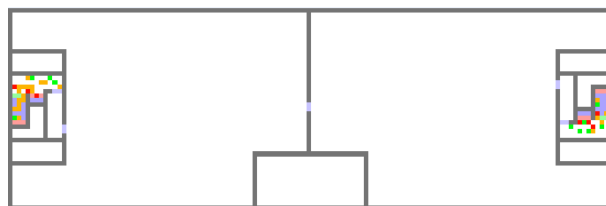


Abb. 6.20: Evakuierungssituation im 14. Obergeschoss in der Phase 1 im Simulationsmodell nach MHochR zum Zeitpunkt $t = 250$ s

Als Gesamtentfluchtungsdauer für die Evakuierung der noch verbliebenen Obergeschosse (Phase 2) wurde eine Dauer von 617 s (10:17 Minuten) ermittelt. Die Evakuierung der einzelnen Obergeschosse war frühestens 96 s und spätestens 121 s nach Auslösung des Evakuierungsalarms beendet. Die Auswertung der Personendichte zeigt, dass in den Obergeschossen und Zwischengeschossen der Grenzwert von $4 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$ für die Dauer von mindestens 61 s überschritten wird. Signifikante Staus vor den Ausgängen der Nutzungseinheiten konnten nicht identifiziert werden. Die Agenten flossen während der Personenstromanalyse kontinuierlich aus den Nutzungseinheiten ab.

In Abbildung 6.21 und 6.22 wird die Personendichte am Beispiel des 14. Obergeschosses und des 13. Zwischengeschosses dargestellt. Die Abbildungen zeigen die Evakuierungssituation bei einer zeitgleichen Alarmierung des 14., 15. und 16. Obergeschosses. Das 15. Obergeschoss stellt dabei das Brandgeschoss dar.

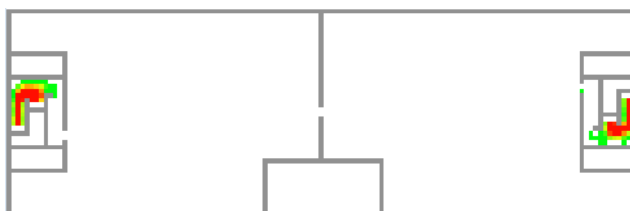


Abb. 6.21: Personendichte im 14. Obergeschoss in der Phase 2 im Simulationsmodell nach MHochR

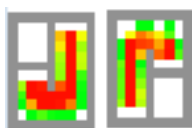


Abb. 6.22: Personendichte im 13. Zwischengeschoss in der Phase 2 im Simulationsmodell nach MHochR

Als mittlere Gesamtentfluchtungsdauer konnte ein Zeitraum von 603 s (10:03 Minuten) in den Grenzen von 586 s bis 629 s ermittelt werden. Die Standardabweichung für 500 Einzelsimulationen beträgt 7 s. Nachfolgende Tabelle zeigt die Ergebnisse im Überblick.

statistischer Wert	Gesamtentfluchtungsdauer	
	[s]	[min]
Minimum	586	9:46
Maximum	629	10:29
Mittelwert	603	10:03
Standardabweichung	7	00:07
95 % Quantil	617	10:17

Tab. 6.5: Gesamtentfluchtungsdauern der Phase 2 für das Simulationsmodell MHochR im Szenario 2

Zusammenfassend werden die ermittelten Gesamtentfluchtungsdauern der Phase 2 als Histogramm in Abbildung 6.23 dargestellt. Vergleichend wurde mit der Kapazitätsanalyse für eine moderate Auslastung der Wegelemente eine Gesamtentfluchtungsdauer von 662,63 s (11:03 Minuten) berechnet.

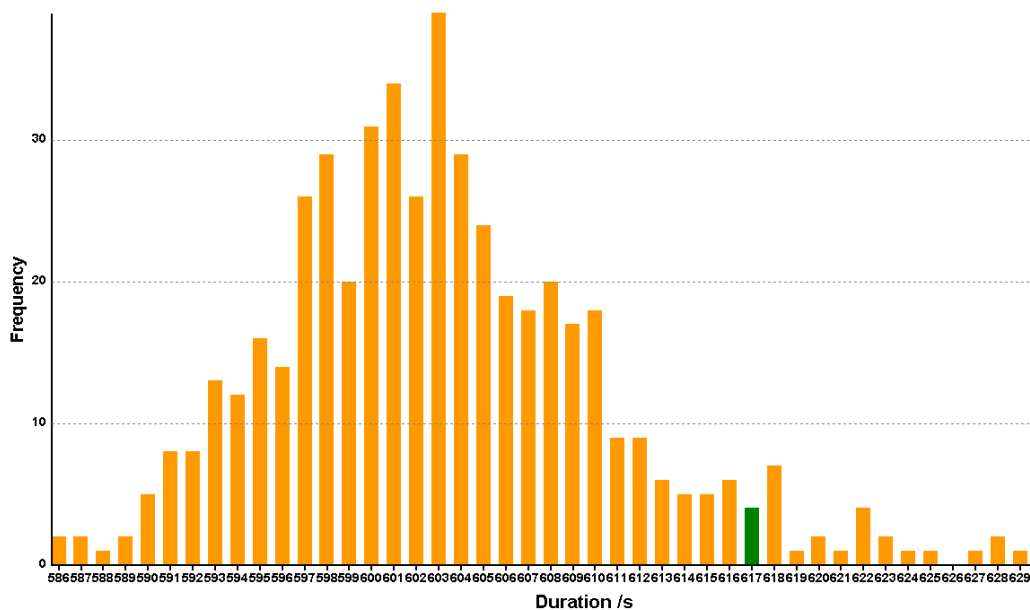


Abb. 6.23: Histogramm der Gesamtentfluchtungsdauern für die Phase 2 im Simulationsmodell MHochR (Szenario 2)

Die signifikante Gesamtentfluchtungsdauer für die Phase 2 im Simulationsmodell MHochR beträgt 617 s (10:17 Minuten).

6.2.2 Simulationsmodell nach MHHR

Als Gesamtentfluchtungsdauer für das Simulationsmodell nach MHHR konnte in der Phase 1 eine Dauer von längstens 847 s (14:07 Minuten) ermittelt werden. Die kürzeste Gesamtentfluchtungsdauer wurde, analog zum Simulationsmodell nach MHochR, für das 1. und das 2. Obergeschoss festgestellt und beträgt 367 s (6:07 Minuten). Mit dem Handrechenverfahren wurde eine Gesamtentfluchtungsdauer von 743 s (12:23 Minuten) berechnet.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die ermittelten Gesamtentfluchtungsauern im Überblick.

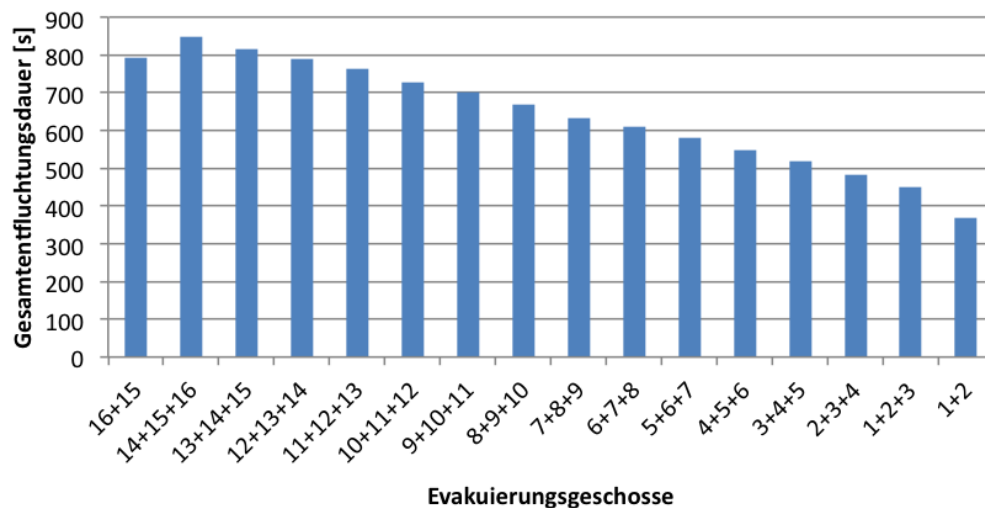


Abb. 6.24: Gesamtentfluchtungsauern der Obergeschosse in der Phase 1 im Simulationsmodell MHHR

Im Fall der längsten Gesamtentfluchtungsdauer (siehe Abbildung 6.24) kommt es während des Simulationsverlaufes zu signifikanten Staus im Treppenraum des Brandgeschosses. Die signifikante Personendichte von $4 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$ wird über einen Zeitraum vom mindestens 72 s (1:12 Minuten) im Treppenraum des Brandgeschosses und im darunter liegenden Obergeschoss überschritten.

Die Abbildungen 6.25 und 6.26 zeigen die Personendichte im 15. Obergeschoss und im darunter liegenden 14. Obergeschoss. Im vorliegenden Fall wurde ab dem 13. Zwischengeschoss

die Personendichte von $4 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$ nicht mehr erreicht, was aus Abbildung 6.27 entnommen werden kann.

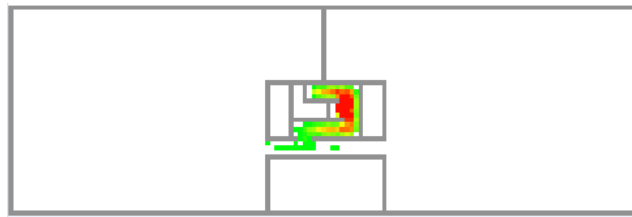


Abb. 6.25: Personendichte im 15. Obergeschoss (Brandgeschoss) in der Phase 1 im Simulationsmodell MHR

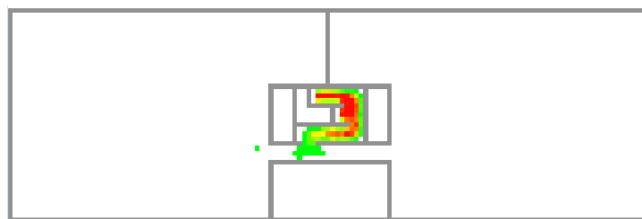


Abb. 6.26: Personendichte im 14. Obergeschoss in der Phase 1 im Simulationsmodell MHR



Abb. 6.27: Personendichte im 13. Zwischengeschoss in der Phase 1 im Simulationsmodell MHR

Als Entfluchtungsdauer für die Brandgeschosse wurde eine Dauer von längstens 113 s (1:53 Minuten) nach Brandalarm ermittelt. Bei einem Brandereignis im 1. Obergeschoss war das Brandgeschoss bereits nach 108 s (1:48 Minuten) geräumt.

Bei der Entfluchtung in der Phase 2 konnte bis zum 1. Obergeschoss eine Überschreitung der Personendichte von $4 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$ ermittelt werden. Die Personendichte wird über einen Zeitraum von 118 s (1:58 Minuten) überschritten.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Personendichte beispielhaft am 10. Obergeschoss. Vergleichend dazu ist das darunter liegende Zwischengeschoss dargestellt.

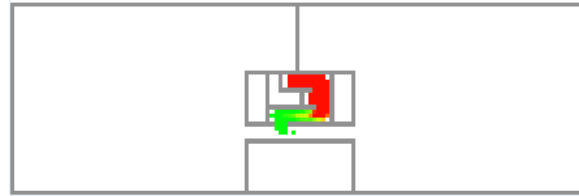


Abb. 6.28: Personendichte im 10. Obergeschoss in der Phase 2 im Simulationsmodell MHR



Abb. 6.29: Personendichte im 9. Zwischengeschoss in der Phase 2 im Simulationsmodell MHR

Die Obergeschosse sind in einem Zeitraum von längstens 123 s (8. Obergeschoss) entfluchtet. Die Staudauer in den Vorräumen beträgt im Maximum 362 s (6:02 Minuten).

Die folgende Abbildung zeigt die Entfluchtung des 8. Obergeschosses 123 s nach Simulationsbeginn. Der letzte Agent aus dem 8. Obergeschoss befindet sich im Vorraum und benötigt 6:02 Minuten bis er den Treppenraum erreicht hat.

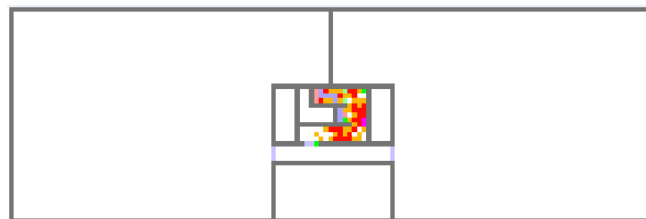


Abb. 6.30: Evakuierungssituation im 8. Obergeschoss in der Phase 2 im Simulationsmodell MHR

Die ermittelten Ergebnisse werden anhand des nachfolgenden Histogrammes veranschaulicht.

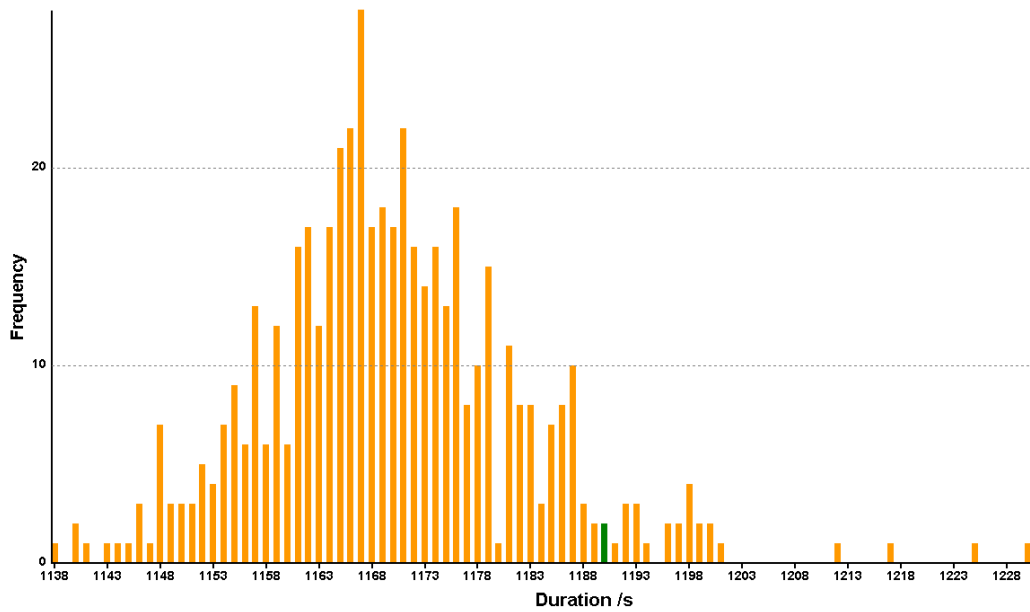


Abb. 6.31: Histogramm der Gesamtentfluchtungsauern für das Simulationsmodell MHR (Szenario 2)

Die signifikante Gesamtentfluchtungsauer für die zweite Phase des Szenarios beträgt 1190 s (19:50 Minuten). Mit dem Handrechenverfahren wurde eine Gesamtentfluchtungsauer von 1274,07 s (21:15 Minuten) für eine moderate Auslastung der Rettungswege ($\approx 1 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$) berechnet.

6.2.3 Optimiertes Szenario

Analog zum Szenario 1 verringert sich infolge der Optimierung die Personendichte im Treppenraum, sodass der Grenzwert von $4 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$ nicht überschritten wird. Die Optimierung folgt den Ergebnissen aus dem Szenario 1 und basiert auf denselben Verzögerungsdauern, die eine phasenweise Evakuierung der Obergeschosse ermöglicht. Die Verzögerungsdauern für die Entfluchtung der Obergeschosse können beispielhaft aus Tabelle 6.6 entnommen werden. Für die dargestellten Verzögerungsdauern wurde ein Brandereignis im 15. Obergeschoss angenommen.

Obergeschoss	1	2	3	4	5	6	7	8
Verzögerungsdauer [s]	0	0	60	960	840	720	600	480
Obergeschoss	9	10	11	12	13	14	15	16
Verzögerungsdauer [s]	360	270	180	0	0	—*	—*	—*

Tab. 6.6: Verzögerungsdauern der Obergeschosse im optimierten Szenario 2

(*) Geschosse bereits geräumt

Wie aus Tabelle 6.6 entnommen werden kann, beträgt die Verzögerungsdauer vom 11. Obergeschoss bis zum 9. Obergeschoss 90 s. Danach erhöht sich die Dauer um 30 s auf insgesamt 120 s. Als Entfluchtungsdauer der Obergeschosse wurden 137 s im Maximum (8. Obergeschoss) festgestellt. Das Maximum der Staudauer in den Vorräumen wurde um 350 s (5:50 Minuten) im Maximum reduziert. Der letzte Agent verlässt 17 Minuten nach Auslösung der phasenweisen Evakuierung das 4. Obergeschoss und erreicht die Rettungszelle im Erdgeschoss nach 219 s (3:39 Minuten).

Die für das optimierte Szenario ermittelten Gesamtentfluchtungsdauern aus 500 Einzelsimulationen können zusammenfassend aus Tabelle 6.7 entnommen werden.

statistischer Wert	Gesamtentfluchtungsdauer	
	[s]	[min]
Minimum	1187	19:47
Maximum	1271	21:11
Mittelwert	1216	20:16
Standardabweichung	13	00:13
95 % Quantil	1239	20:39

Tab. 6.7: Gesamtentfluchtungsdauern für das optimierte Szenario 2

Abschließend werden die Ergebnisse der Einzelsimulationen als Histogramm in Abbildung 6.32 dargestellt.

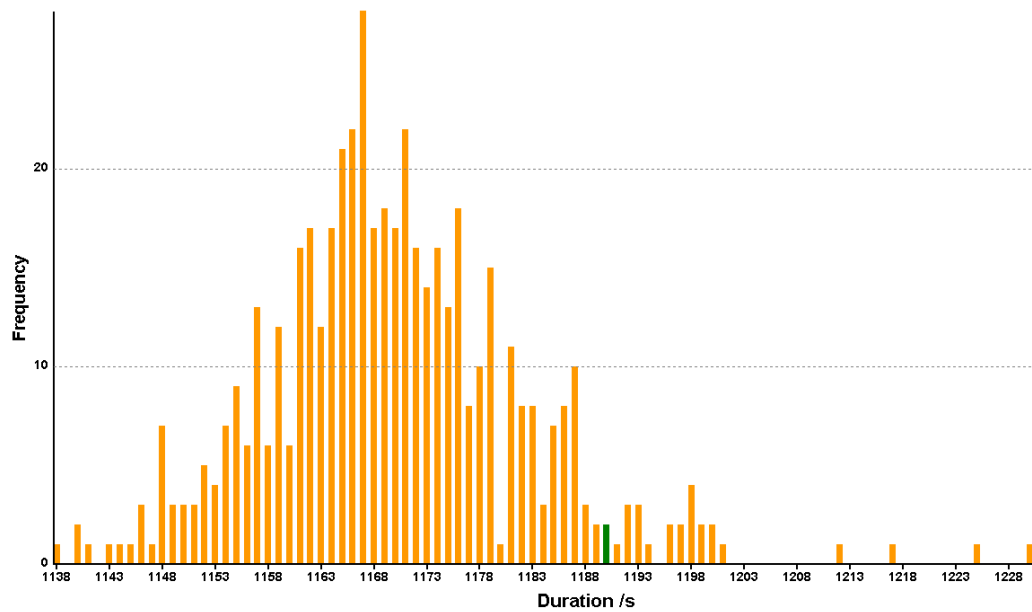


Abb. 6.32: Histogramm der Gesamtentfluchtungsauern für das optimierte Szenario 2

Als signifikante Gesamtentfluchtungsauer für das optimierte Szenario 2 wurde eine Dauer von 1239 s (20:39 Minuten) ermittelt.

Zusammenfassend werden die ermittelten Simulationsergebnisse des Szenario 2 in Abbildung 6.33 dargestellt.

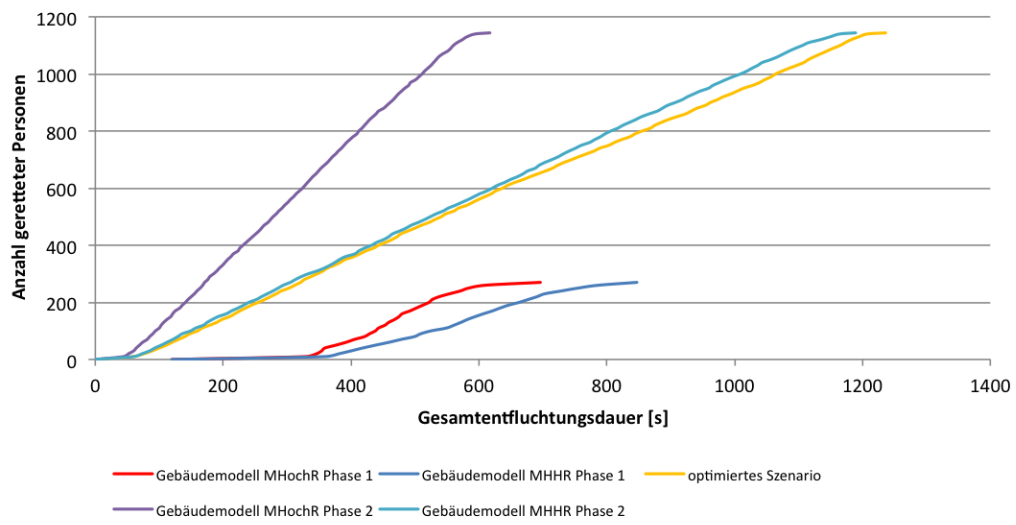


Abb. 6.33: Gesamtentfluchtungsauern des Szenario 2 im Überblick

7 Diskussion

Nach Beginn der Simulation bewegen sich die Agenten in den Simulationsmodellen nach einer gleichverteilten Reaktionsdauer von 60 s aus den Nutzungseinheiten in Richtung der Treppenträume. Die Reaktionsdauer entspricht einer zügigen Alarmierung nach RiMEA und ermöglicht gleichzeitig die Nachbildung einer starken Auslastung der Rettungswege in der Simulation [43]. Gleichzeitig entspricht die Reaktionsdauer dem für ein Bürogebäude üblichen Zeitansatz [41]. Hier ist anzumerken, dass die Reaktionsdauer einer Person vom „Trainingszustand“ abhängt. Eine Person, die regelmäßig an Evakuierungsübungen teilnimmt, entwickelt mit zunehmender Übungshäufigkeit eine Expertise. Die Folge daraus ist, dass die Person in Gefahrensituationen schneller reagiert und sich geordneter verhält. Neben der Expertise entscheidet gleichermaßen das verwendete Alarmierungssystem, ob eine Fluchtbewegung unverzüglich beginnt. In [41] werden für ein einfaches Alarmierungssystem (z. B. Brandmeldeanlage) und Personen ohne Übungserfahrung eine Reaktionsdauer von über 4 Minuten als Zeitansatz für eine Reaktionsdauer veranschlagt. Durch entsprechendes Training und die Bereitstellung von Evakuierungshelfern sowie unter Einsatz von gezielten Sprachdurchsagen können Reaktionsdauern von weniger als einer Minute erreicht werden [41, 31, 40, 39]. Die schnellste Möglichkeit eine Evakuierung einzuleiten stellt die Verwendung eines akustischen und optischen Alarmierungssystems dar, welches gleichzeitig durch Sprachdurchsagen eine Evakuierung des Gebäudes einleitet [41]. Eine sichere und schnelle Evakuierung im Gefahrenfall ist nur durch regelmäßig stattfindende Evakuierungsübungen und dem Einsatz von Evakuierungshelfern sowie der Vorhaltung der entsprechenden sicherheitstechnischen Gebäudeausrüstung möglich.

Die Entfluchtungsauern der Nutzungseinheiten betragen im Simulationsmodell nach MHochR maximal 130 s und für das Simulationsmodell nach MHHR maximal 123 s. In den optimierten Szenarios beträgt die Entfluchtungsauer aus den Nutzungseinheiten im Maximum 141 s. Für die Durchströmzeit an einem Ausgang mit einer lichten Breite von 1,20 m werden nach MVStättV zwei Minuten für 200 darauf angewiesene Personen angesetzt [18, 17, § 7]. Nach [1] wird für das Erreichen eines Ausganges am Ende eines Zuschauerbereiches in Gebäuden zwei Minuten vorgeschlagen. Es ist anzumerken, dass es keine maximal zulässigen Entfluchtungsauern für Hochhäuser gibt. Die nach [18] definierte Durchströmzeit eines Wegelementes

kann zwar als maximal zulässige Anstehzeit einer Person vor einem Wegelement interpretiert werden, jedoch handelt es sich um eine reine Durchströmzeit an einem Ausgang und andere Zeiträume, wie z. B. die Wegzeit eines Agenten, bleiben unberücksichtigt [27, 46]. Darüber hinaus werden Zeitdauern für mobilitätseingeschränkte Personen nicht berücksichtigt. Im Hinblick auf eine eindeutige Interpretation von Evakuierungszeiten aus Gebäuden oder Gebäudeteilen bedarf es der Festlegung von Entfluchtungsauern. Hierzu sind weitere Untersuchungen nötig, die nicht Gegenstand dieser Arbeit sein sollen. Die ermittelte Entfluchtungsdauer von maximal 141 s kann als unkritisch erachtet werden, da sich die letzte Person bereits im notwendigen Flur des Simulationsmodelles nach MHHR befindet, der durch zwei rauchdichte und selbstschließende Abschlüsse geschützt ist [20, Ziffer 4.3].

Als Folge des Wegfalles eines Rettungsweges bilden sich in den Vorräumen des Simulationsmodelles nach MHHR Staus. Als Stauzeiten konnten Dauern von bis zu 252 s im ersten Szenario und 366 s im zweiten Szenario festgestellt werden. D. h. der letzte Agent, der die Nutzungseinheit über den notwendigen Flur im Simulationsmodell nach MHHR verlassen hat, muss 6:06 Minuten im Vorräum verharren, bis er das Podest des Sicherheitstuppenraumes erreicht. Die Stauungen in den Vorräumen werden durch die Vereinigung der Personenströme im Treppenraum verursacht. Dadurch bildet sich ein Rückstau bis in die Vorräume hinein. Trotz der Verzögerung in den Vorräumen wurde die Personendichte von $4 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$ nicht überschritten. Darüber hinaus wurden keine Rückstauungen bis in die Nutzungseinheiten oder den notwendigen Flur im Simulationsmodell nach MHHR erkannt. Eine Stauzeit von über sechs Minuten in den Vorräumen stellt eine sehr hohe physische und psychische Belastung für die Flüchtenden dar und kann die Entwicklung von Angstzuständen (z. B. Agoraphobie) oder einer Panik fördern. Durch die Optimierung wurde eine Verringerung der Stauzeit in den Vorräumen im Maximum um 350 s (5:50 Minuten) erreicht.

Infolge der Vereinigung der Personenströme in den Obergeschossen wird der Grenzwert der Personendichte von $4 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$ überschritten. Besonders im Simulationsmodell nach MHHR kommt es zum Stillstand der Agenten auf den Treppen und vor den Treppenabgängen in den Obergeschossen. Die Personendichte wird im Szenario 1 lokal um mehr als 144 s (2:24 Minuten) überschritten. D. h. für einen Agenten beträgt der Zeitraum des Stillstehens in einem Personenstrom mehr als zwei Minuten. Durch das Stillstehen kann es infolge hoher spezifischer Drücke von bis zu $4500 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ zu Verletzungen und Bewusstseinsverlust kommen [13, 21]. Des Weiteren nimmt bei Personendichten $\geq 4 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$ die physische Interaktion der Personen bspw. durch Drängeln zu [21]. Darüber hinaus kann nicht ausgeschlossen werden, dass es bei Personendichten von $\geq 4 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$ zu Stürzen auf den Treppenstufen kommt. Wei-

terhin kann festgestellt werden, dass der Wegfall eines Rettungsweges die Staudauer um das 1,95-fache erhöht. Lediglich im Simulationsmodell nach MHochR stellte die Evakuierung der Brandgeschosse sowie der zeitgleichen Alarmierung eines darunter und darüber liegenden Obergeschosses keine Personengefährdung durch hohe Personendichten dar. Durch die Optimierung des Evakuierungsverlaufes konnte eine Verringerung der Personendichten auf den Treppen im Simulationsmodell nach MHHR erreicht werden. Der Grenzwert von $4 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$ wurde auf den Treppen nach der Optimierung nicht mehr erreicht.

Die Grundlage der optimierten Szenarios bildet eine zeitgesteuerte selektive Alarmierung der Obergeschosse, die auch als phasenweise Evakuierung bezeichnet wird [35, 25, 42, 41]. Zu einer phasenweisen Evakuierung stehen die „*top down*“- und die „*bottom up*“-Methode zur Verfügung. Bei der „*top down*“-Methode werden die Geschosse von oben nach unten evakuiert, während bei der „*bottom up*“-Methode die Evakuierung von unten nach oben durchgeführt wird. Bei der Entwicklung der optimierten Szenarios zeigte sich, dass durch eine gleichzeitige Anwendung der „*top down*“- und der „*bottom up*“-Methode die kürzeste Entfluchtungsdauer erzielt werden konnte. Gründe dafür liegen in der Möglichkeit, die am weitesten voneinander entfernten Obergeschosse zeitgleich zu alarmieren. Damit treffen während eines Evakuierungsverlaufes die sich an der Spitze eines Personenstromes bewegend Personen nicht auf das Ende eines sich davor bewegendes Stromes. Daraus resultiert, dass eine Vereinigung der Personenströme nicht stattfindet, was eine Verzögerung der Gehgeschwindigkeit und eine Verlängerung der Evakuierungsdauer zur Folge hätte. Dies entspricht der Charakteristik eines Personenstromes [32, 36].

Zur Optimierung des Evakuierungsverlaufes wurden mehrere Möglichkeiten der Entfluchtung simuliert. Dabei wurden die Ergebnisse einer Einzelgeschossalarmierung der einer Doppelgeschossalarmierung gegenübergestellt. Bei einer Einzelevakuierung der Obergeschosse in absteigender Folge (Einzelgeschossalarmierung) erhöhte sich die Gesamtentfluchtungsdauer. Im Fall einer Doppelgeschossalarmierung von oben nach unten erhöhte sich die Gesamtentfluchtungsdauer gleichermaßen. Mit einer versetzten Alarmierung von Obergeschossen, wie z. B. der gleichzeitigen Alarmierung gerader Obergeschosse und danach folgend der ungeraden Obergeschosse, konnte keine Annäherung an die Gesamtentfluchtungsdauer der nicht optimierten Szenarios erreicht werden. Gleichzeitig wurde die Kapazität der Treppenträume überschritten, was schnell zu hohen Personendichten auf den Treppen führte. Weiterhin konnte herausgearbeitet werden, dass eine Mischung aus Einzelgeschoss- und Doppelgeschossalarmierung die Entfluchtungsdauer verkürzt, wie dies die Ergebnisse der optimierten Fälle zeigen.

Als Verzögerungsdauer für die optimierten Szenarios wurden 90 s ermittelt, d. h. die zeitgesteuerte und selektive Alarmierung der Obergeschosse erfolgt nacheinander in absteigender Folge in einem zeitlichem Abstand von 90 s. Dadurch werden Staus vermieden, die durch die Vereinigung der Personenströme in den Treppenträumen stattfinden. Gleichzeitig verringert sich die Personendichte auf den Treppen. Die Verzögerungszeit ergibt sich aus der Summe der Reaktionsdauer und der Laufdauer pro Obergeschoss. Die Verzögerungsdauer erhöht sich im weiteren Verlauf auf 120 s, um das Aufschließen der Personenströme auf den Treppen an die vorangegangenen Ströme zu ermöglichen. Da sich die Verzögerungsdauer mit abnehmender Geschosshöhe erhöht, erreicht die Verzögerungsdauer im ersten Szenario eine Dauer von 1140 s (19 Minuten). Im Evakuierungsfall bedeutet dies, dass nach Auslösung der phasenweisen Evakuierung die letzte Person das 5. Obergeschoss nach 20 Minuten verlässt. Es kann nicht angenommen werden, dass Personen, die eine Evakuierung eines Gebäudes oder ein Feuer wahrnehmen, so lange im Geschoss verbleiben, bis der eigentliche Evakuierungsalarm erfolgt. In Situationen, in denen Personen von solchen Ereignissen überrascht werden, kann von einem „*blinden Aktionismus*“ [21, 28] der Beteiligten gesprochen werden. Die Personen würden unverzüglich mit der Flucht beginnen, was dem ureigenen Instinkt (Kampf- und Fluchtverhalten) entspricht [52]. Die ermittelte Verzögerungsdauer ermöglicht jedoch eine sichere Evakuierung aus dem Gebäude und vermeidet durch die gezielte zeitliche Steuerung der Personenströme eine Überschreitung der Personendichte um mehr als $4 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$, was als Grenzwert für die Entstehung einer Panik angesehen wird.

Eine vergleichende Betrachtung der Gesamtentfluchtungsdauern aller Szenarios zeigt, dass sich durch die Anordnung eines einzigen Treppentraumes die Dauer der Evakuierung im ersten Szenario von 745 s (12:25 Minuten) auf 1444 s (24:04 Minuten) erhöht. Im zweiten Szenario verlängert sich die Evakuierung in der ersten Phase um maximal 151 s (2:31 Minuten) und in der zweiten Phase der Evakuierung um 573 s (9:33 Minuten). Das bedeutet, dass eine Halbierung der Treppenträume die Gesamtentfluchtungsdauer um das 1,94-fache erhöht.

Nach Optimierung des Evakuierungsverlaufes erhöhte sich die Gesamtentfluchtungsdauer im Szenario 1 um 37 s auf 1481 s (24:41 Minuten). Im zweiten Szenario erhöhte sich die Gesamtentfluchtungsdauer für den optimierten Fall um 49 s auf 1239 s (20:39 Minuten). Diese Abweichungen ergeben sich aus den ermittelten Verzögerungsdauern, die unter der Berücksichtigung der statistischen Unsicherheiten für alle Obergeschosse gleich angesetzt wurden. Die Optimierung der Evakuierungsverläufe mit Hilfe der phasenweisen Evakuierung hatte damit eine Verlängerung der Gesamtentfluchtungsdauer zur Folge. Dieses Ergebnis stimmt mit den Feststellungen aus [14] überein. Der Einsatz von Bewegungssensorik in der Gebäudetechnik

nik könnte eine Minimierung der Verzögerungsdauer ermöglichen und damit die Gesamtentfluchtungsdauer im Gefahrenfall verringern. Hier bedarf es weiterer Untersuchungen, die nicht Gegenstand dieser Arbeit sind.

Die mit der Kapazitätsanalyse durchgeführten Handrechnungen zeigen im Vergleich zu den mit PedGo ermittelten Gesamtentfluchtungsdauern Abweichungen im Bereich von bis zu 46 s. Die Abweichungen ergeben sich aus der dem Verfahren der Kapazitätsanalyse zugrunde liegenden Schwankungsbreiten der empirischen Daten [48].

Die Ergebnisse des zweiten Szenarios zeigen, dass die Entfluchtung der Brandgeschosse im Simulationsmodell nach MHochR innerhalb der von der AGBF definierten Hilfsfrist [9] abgeschlossen ist. Es zeigt sich ebenfalls, dass nach der Erkundungs- und Entwicklungszeit der Feuerwehr auch die Brandgeschosse im Simulationsmodell nach MHHR entfluchtet sind. Während im Simulationsmodell nach MHochR eine gefahrlose Rettung aus den Brandgeschossen möglich ist, steigt die Personendichte im Simulationsmodell nach MHHR im Obergeschoss unterhalb des Brandgeschosses auf $4 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2}$ an. Es ist festzustellen, dass die Rettungswegbreite im Falle eines Brandereignisses im Simulationsmodell nach MHochR ausreichend dimensioniert ist. Die zeitverzögerte Alarmierung der über und unter dem Brandgeschoss gelegenen Obergeschosse im Simulationsmodell nach MHHR würde die Personendichte verringern und eine sichere Evakuierung innerhalb der Erkundungs- und Entwicklungszeit der Feuerwehr sicherstellen.

Als Grundvoraussetzung für die Evakuierung eines Gebäudes gilt, dass alle Rettungswege für die Dauer der Entfluchtung ausreichend lange zur Verfügung stehen müssen [16]. D. h. die Rettungswege müssen so lange die Flüchtenden vor den schädlichen Einwirkungen eines Brandes schützen, bis diese den sicheren Bereich erreicht haben. Während der Untersuchung wurde eine ständige Rauchfreihaltung der Rettungswege in der Simulation vorausgesetzt. Es blieb jedoch unberücksichtigt, dass mobilitätseingeschränkte Personen möglicherweise eine Flucht über die Treppen vornehmen könnten. Im Evakuierungsfall würde dies dazu führen, dass vorhandene Rettungswege für eine Flucht nicht mehr zur Verfügung stehen. Andere Hindernisse, wie z. B. Kinderwagen, würden denselben Effekt auslösen. Hier bedarf es dem Einsatz von geschulten Evakuierungshelfern, die im Evakuierungsfall gezielt Personenströme leiten und steuern und dazu beitragen, dass eine sichere Selbstrettung möglich ist.

Dem Konzept der phasenweisen Evakuierung liegt ein geordnetes Verhalten aller Beteiligten und die regelmäßige Durchführung von Evakuierungsübungen zu Grunde. Durch regelmäßig

stattfindende Räumungsübungen wird das Verlassen eines Hochhauses über die Treppen geübt. Neben dem Lerneffekt erhöhen regelmäßig stattfindende Übungen die Ortskenntnis und vermitteln ein Gefühl von Sicherheit. Meist sind in Hochhäusern als Erschließungssystem nur die Aufzüge bekannt, da diese täglich benutzt werden. Die regelmäßige Durchführung von Räumungsübungen liegt im Verantwortungsbereich des Betreibers eines Hochhauses. In den vorliegenden Simulationsmodellen wurde ein geordnetes Verhalten aller beteiligten Personen vorausgesetzt. Ungeordnete Bewegungen oder die unterschiedliche Auslastung von Rettungswegen wurde in den Simulationsmodellen nicht berücksichtigt. Es ist anzumerken, dass nur die regelmäßige Durchführung von Räumungsübungen ein geordnetes Verhalten von Personen in Evakuierungssituationen ermöglicht [52, 41].

8 Entfluchtungsdauer im internationalen Vergleich

Abschließend soll in diesem Kapitel die Gesamtentfluchtungsdauer des Gebäudemodelles nach MHHR mit dem Verfahren der Kapazitätsanalyse ermittelt werden, nachdem die für Rettungswege in Hochhäusern geltenden Bemessungskriterien des Approved Document B (AD-B) [23] auf das Modell angewendet wurden. Die Bemessungskriterien aus [23] wurden gewählt, da gegenüber dem Life Safety Code [33] bei der Bemessung der vertikalen Rettungswege zwischen einer gleichzeitigen und einer phasenweisen Evakuierung der Obergeschosse in einem Evakuierungsfall unterschieden wird (vgl. Kapitel 3.4.1). Dies ermöglicht eine Vergleichbarkeit der bereits in dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse. Anhand der Berechnungen soll gezeigt werden, welchen Einfluss die Bemessungskriterien auf die Anzahl und Breite der vertikalen Rettungswege sowie auf die Gesamtentfluchtungsdauer des Gebäudemodelles nach MHHR haben.

8.1 Gesamtevakuiierung

8.1.1 Bemessung der vertikalen Rettungswege

Aufgrund der im Gebäudemodell nach MHHR in jedem Obergeschoss vorhandenen Personenzahl von 88 Personen sind nach Tabelle 3.1 in jedem Obergeschoss zwei Ausgänge vorzusehen. Aus der Anzahl der Ausgänge in jedem Obergeschoss resultiert die erforderliche Mindestanzahl der vertikalen Rettungswege im Gebäude. Somit müssen im Gebäudemodell nach MHHR nach [23] mindestens zwei Treppen als vertikale Rettungswege zur Verfügung stehen. Die Vorhaltung eines einzigen vertikalen Rettungsweges („single escape stair“) ist nach [23] für das Gebäudemodell nach MHHR nicht gegeben.

Für die Ermittlung der notwendigen Treppenbreite wird die in Abschnitt 3.4.1.1 dargestellte Formel verwendet. Als notwendige Breite für eine Treppe werden 0,98 m für 704 darauf angewiesene Personen festgestellt. Da der Formel eine notwendige Mindestbreite der Treppen von 1,10 m zugrunde liegt, erhöht sich die Breite der Treppe auf 1,10 m. Darüber hinaus muss

eine Treppe für die Feuerwehr zur Rettung von Menschen oder Tieren und zur Brandbekämpfung vorgesehen werden („firefighting stair“). Die erforderliche Mindestbreite hierfür beträgt 1,10 m. Somit stehen als vertikale Rettungswege für eine Gesamtevakuierung zwei Treppen mit einer Breite von mindestens 1,10 m zur Verfügung.

8.1.2 Gesamtentfluchtungsdauer

Mittels Kapazitätsanalyse wurde als Gesamtentfluchtungsdauer für eine Gesamtevakuierung, unter Annahme einer moderaten Auslastung der Wegelemente und zuzüglich einer Reaktionsdauer von 60 s (1:00 Minuten), eine Dauer von 882,40 s (14:43 Minuten) berechnet. Die Anwendung der britischen Bemessungsregeln auf das Gebäudemodell nach MHHR verringert somit die Gesamtentfluchtungsdauer im Falle einer Gesamtevakuierung um 666 s (11:06 Minuten).

8.2 Phasenweise Evakuierung

8.2.1 Bemessung der vertikalen Rettungswege

Für eine phasenweise Evakuierung werden die in Tabelle 3.2 herausgearbeiteten Breiten verwendet. Als vertikale Rettungswege müssen, analog zu einer Gesamtevakuierung, mindestens zwei Treppen aus den Obergeschossen führen. Eine der Treppen wird als „firefighting stair“ angenommen. Aufgrund der Personenzahl von 88 Personen in jedem Obergeschoss, ergibt sich eine Mindestbreite von 1,00 m für eine Treppe. Für die zweite Treppe ist als „firefighting stair“ eine Mindestbreite von 1,10 m vorgeschrieben. Somit stehen zwei Treppen mit einer Mindestbreite von 1,00 m und 1,10 m als vertikale Rettungswege zur Verfügung.

8.2.2 Gesamtentfluchtungsdauer

Als längste Gesamtentfluchtungsdauer, zuzüglich einer Detektions- und Alarmierungsdauer von 120 s (2:00 Minuten) sowie einer Reaktionsdauer von 60 s (1:00 Minuten), wurde für die phasenweise Evakuierung der Obergeschosse 14, 15 und 16 eine Dauer von 633 s (10:33 Minuten) berechnet. Bei der Berechnung wurde das 15. Obergeschoss als Brandgeschoss angenommen. Die für die Rettungswege in Großbritannien geltenden Richtlinien verringern somit die Dauer der phasenweisen Evakuierung der Brandgeschosse im Maximum um 110 s (1:50 Minuten).

9 Fazit

Die Voraussetzung für eine effektive Evakuierung eines Gebäudes ist wirksamer vorbeugender Brandschutz, der sich durch eine gute Verzahnung von baulichen und organisatorischen sowie anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen auszeichnet. Zu den baulichen Brandschutzmaßnahmen zählen dabei u. a. ausreichend dimensionierte Rettungswege, deren Breiten für den höchst zu erwartenden Personenverkehr bemessen sind und für die Dauer einer Evakuierung ausreichend lange zur Verfügung stehen. Die organisatorischen Brandschutzmaßnahmen umfassen hingegen, dass eine Evakuierung im Gefahrenfall ohne Zeitverzögerung eingeleitet werden kann und ein geordneter Evakuierungsverlauf ohne Personenschäden möglich ist. Der anlagentechnische Brandschutz ermöglicht eine frühe Branderkennung und leitet eine Evakuierung ein. Gleichzeitig verhindert der Einsatz von Anlagentechnik, dass Rettungswege ständig vor Raucheintrag geschützt sind.

Die vorliegende Untersuchung hat gezeigt, dass die den Muster-Hochhaus-Richtlinien zugrunde gelegten Bemessungsgrundsätze für Rettungswege zur Evakuierung im Brandfall ausreichend dimensioniert sind. Im Vergleich dazu ist eine Evakuierung im Gefahrenfall, bspw. wegen einer Bombendrohung, nicht ohne Personengefährdung möglich. Besonders auf den Treppen, die das Herzstück des Erschließungssystems darstellen, kommt es während einer Gefahrenevakuierung zu hohen Personendichten. Hohe Personendichten gelten als Auslöser einer Massenpanik und verursachen hohe Staudrücke, die zu lebensbedrohlichen Verletzungen führen können. Daneben sind die flüchtenden Personen hohen psychischen Belastungen ausgesetzt.

Eine Möglichkeit Gefährdungen von Personen im Gefahrenfall zu vermeiden ist die Einleitung einer phasenweisen Evakuierung. Die Evakuierungsmethode bedarf jedoch der regelmäßigen Durchführung von Evakuierungsübungen und die Bereitstellung von Evakuierungshelfern, damit diese eine geordnete und sichere Selbstrettung aus dem Hochhaus ermöglichen. Darüber hinaus bedarf es des Einsatzes von sicherheitstechnischer Gebäudeausrüstung. Der gegenwärtige Stand der Technik ermöglicht die technische Umsetzbarkeit einer phasenweisen Evakuierung, insbesondere wenn es um die Auslösung und Steuerung des Evakuierungsverlaufes geht.

Im Hinblick auf die zeitliche Verlängerung einer Evakuierung, die infolge der phasenweisen Evakuierung erfolgt, bietet die Technik sicherlich die Möglichkeit die Dauer einer Evakuierung zu verringern. Der Einsatz von Bewegungssensorik in der Gebäudetechnik könnte ein möglicher Ansatz dafür sein. Hier bedarf es weiterer Untersuchungen, ob der Einsatz von sicherheitstechnischer Gebäudeausrüstung die Gesamtentfluchtungsdauer im Gefahrenfall optimiert. Festzuhalten ist, dass eine Optimierung eines Evakuierungsverlaufes nicht ohne einen hohen personellen und technischen Einsatz möglich ist.

Grundlegender erscheint aber die Sensibilisierung der Fachkommission der ARGEBAU für das Thema der Evakuierung in Hochhäusern. Gegenwärtig wird der Thematik Evakuierung im Baurecht nicht begegnet. Der Blick in die internationalen baurechtlichen Vorschriften zeigt, dass bspw. in Großbritannien die Bemessung der vertikalen Rettungswege in Hochhäusern in Abhängigkeit von der Evakuierungsmethode erfolgt. Die Berücksichtigung der MVStättV in der MHHR spiegelt bei der Bemessung der Rettungswegbreiten in Hochhäusern einen guten Ansatz wieder, jedoch sollte die Anwendung der MVStättV auf Versammlungsstätten wie Sportstätten o. ä. beschränkt bleiben. Hochhäuser stellen aufgrund ihrer Bauweise besondere Anforderungen an das Rettungswegsystem und die Personensicherheit, sodass für Hochhäuser eigene Bemessungsgrundsätze für Rettungswege gelten müssen. Die derzeitige Terrorlage mag zwar die gegenwärtige Notwendigkeit nicht ersichtlich machen, lässt aber dann die in der MBO 2002 als allgemeine Anforderungen definierten Grundsätze für bauliche Anlagen fragwürdig erscheinen. Die Berechnungen haben gezeigt, dass der bauliche Brandschutz in Hochhäusern den Bedürfnissen der Personensicherheit auf Rettungswegen angepasst werden muss. Bezüglich der Bemessungsgrundsätze für die Rettungswege in Hochhäusern bedarf es daher weitergehender Untersuchungen.

Abschließend kann festgehalten werden, dass der Wegfall eines Rettungsweges eine maßgebliche Verschlechterung des Status quo darstellt. Die vertikalen Rettungswege in Hochhäusern stellen die einzige Möglichkeit dar, ein Hochhaus sicher verlassen zu können. Daher müssen die vertikalen Rettungswege auch für einen Gefahrenfall in ausreichender Anzahl und Breite vorhanden sein.

Literaturverzeichnis

- [1] *E DIN EN 13200-1 Zuschaueranlagen - Teil 1. Allgemeine Merkmale für Zuschauerplätze.* Beuth Verlag. Berlin, April 2011.
- [2] *DIN 13050 Rettungswesen - Begriffe.* Beuth Verlag. Berlin, Februar 2009.
- [3] *DIN 14011 Begriffe aus dem Feuerwehrwesen.* Beuth Verlag. Berlin, Juni 2010.
- [4] *DIN 4844 Graphische Symbole - Sicherheitsfarben und Sicherheitszeichen.* Beuth Verlag. Berlin, Mai 2005.
- [5] *DIN 4543-1 Büroarbeitsplätze - Teil 1. Flächen für die Aufstellung und Benutzung von Büromöbeln. Sicherheitstechnische Anforderung, Prüfung.* Beuth Verlag. Berlin, September 1994.
- [6] <http://www.nfpa.org>, Zugriff: 23.02.2012.
- [7] <http://www.glassteelandstone.com/BuildingDetail/701.php>, Zugriff: 23.03.2012.
- [8] Albers, K.-J., Rahn, B. Strömungsverhältnisse in einem Sicherheitstrepfenraum. In *TAB - Technik am Bau*, 2003, S. 51 - 56.
- [9] Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in Deutschland (AGBF). *Qualitätskriterien für die Bedarfsplanung von Feuerwehren in Städten.* September 1998.
- [10] Ausschuss für Arbeitsstätten (ASTA). *Technische Regeln für Arbeitsstätten - ASR A2.3. Fluchtwege, Notausgänge, Flucht und Rettungsplan.* Dortmund, August 2007.
- [11] Bundesministerium der Justiz. *Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (ArbSchG).* August 1996, zuletzt geändert im Februar 2009.
- [12] Bundesministerium der Justiz. *Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit an Bildschirmgeräten (BildscharbV).* Dezember 1996, zuletzt geändert im Dezember 2008.

- [13] Dombrowsky W.-R., Pajonk, F.-G. Panik bei Großveranstaltungen. In *Notfall + Rettungsmedizin*, 2006, S. 280 - 286.
- [14] Dudenhausen, W. *Vergleichende Analyse und Bewertung von Räumungszeiten für Flughäfen und Bahnhöfe bei Bemessung der Rettungswege in Anlehnung an Versammlungs- bzw. Verkaufsstätten*. Diplomarbeit, Technische Universität Braunschweig - Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Braunschweig, August 2008.
- [15] Fachkommission Bauaufsicht. *Muster für die Richtlinien über die bauaufsichtliche Behandlung von Hochhäusern - Muster-Hochhausrichtlinie* -. 1981.
- [16] Fachkommission Bauaufsicht. *Musterbauordnung (MBO)*. 2002, zuletzt geändert im Oktober 2008.
- [17] Fachkommission Bauaufsicht. *Begründung und Erläuterung zur Muster-Versammlungsstättenverordnung - MVStättV*. Juni 2005.
- [18] Fachkommission Bauaufsicht. *Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (Muster-Versammlungsstättenverordnung - MVStättV)*. Juni 2005.
- [19] Fachkommission Bauaufsicht. *Erläuterungen zur Muster-Hochhaus-Richtlinie (MHHR)*. April 2008.
- [20] Fachkommission Bauaufsicht. *Muster-Richtlinie über den Bau und Betrieb von Hochhäusern (Muster-Hochhaus-Richtlinie - MHHR)*. April 2008.
- [21] Farkas, I.-J., Helbing, D., Molnár, P., Vicsek, T. *Simulation of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situation*. Springer-Verlag, Berlin, 2002.
- [22] Fruin, J. J. *Pedestrian Planning and Design*. Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, New York, 1971.
- [23] Government of the United Kingdom. *The Building Regulation 2010 - Approved Document B - Volume 2: Building other than Dwellinghouses*. 2010.
- [24] Hakonen, H., Siikonen, M.-L. Efficient evacuation methods in tall buildings. In *Elevator World*, Juli 2002, S. 78 - 83.
- [25] Hakonen, H., Siikonen, M.-L., Suis, T. *Evacuation Simulation of Tall Buildings*. CTBUH (Council on Tall Buildings and Urban Habital), Mai 2003.
- [26] Helbing, D. *Verkehrsdynamik. Neue physikalische Modellierungskonzepte*. Springer-Verlag, 1996.

- [27] Hoffmann, T., Kersken, M., Waldau, N. *Berechnung von Entleerzeiten für Fallbeispiele*. Fraunhofer IRB Verlag / Deutsches Institut für Bautechnik, Stuttgart [u.a.], 2006.
- [28] Jürgens-Ortega, A. G. *Modelling and Simulation of Building Evacuation in Emergency Conditions - An Agent Based Approach*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Oktober 2010.
- [29] Klingsohr, K., Messerer, J. *Vorbeugender baulicher Brandschutz*. Kohlhammer Verlag, Stuttgart [u.a.], 6. überarb. Aufl., 2002.
- [30] König, W. *Taschenbuch der Wirtschaftsinformatik und Wirtschaftsmathematik*. Harri Deutsch Verlag, Frankfurt, 2003.
- [31] Mowrer, F.-W., Nelson, H.-E. Emergency Movement. In *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Bethesda, Maryland, 2002, S. 3/367 - 3/380.
- [32] Müller, K. *Praxiswissen Brandschutz. Brandgefährdungsanalyse und Evakuierung*. E. Schmidt, Berlin, c 2005.
- [33] National Fire Protection Association (NFPA). *NFPA 101. Life Safety Code*. Quincy, MA, 2002.
- [34] Otto, M. *Evakuierungsberechnungen als Bestandteil der Risikoanalyse zur Erstellung von Brandschutzkonzepten und Nachweis für das Rettungswegkonzept*. Diplomarbeit, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät der Universität Leipzig am Lehrstuhl für Stahlbau und Holzbau, Leipzig, Januar 2005.
- [35] Pauls, J.-L. *Evacuation and Other Fire Safety Measures In High-Rise Buildings*. Ottawa, 1975.
- [36] Predtetschenski, W. M., Milinski A. I. *Personenströme in Gebäuden. Berechnungsmethoden für die Projektierung*. Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik, Berlin, 1. Aufl., März 1971.
- [37] Prendke, W.-D., Schröder, H. *Lexikon der Feuerwehr*. Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 3. Aufl., 2005.
- [38] Proulx, G. Evacuation Time and Movement in Apartment Buildings. In *Fire Safety Journal*, 1995.
- [39] Proulx, G. The Time Delay to Start Evacuation: Review of Fire Case Studies. In *5. International Symposium on Fire Safety Science*, Melbourne, Australia, 1997, S. 783 - 794.

- [40] Proulx, G. Occupant behaviour and evacuation. In *Hosser, D. (Hrsg.): Kurzreferate 9. Internationales Brandschutz-Symposium*, Braunschweig, 2001, S. 219 - 232.
- [41] Proulx, G. Movement of People. The Evacuation Timing. In *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Third Edition, Bethesda, Maryland, 2002, S. 3/342 - 3/366.
- [42] Proulx, G., Fahy, R. F. Evacuation of the World Trade Center. What went right? In *CIB-CTBUH International Conference on Tall Buildings*, Malaysia, October Nr. 290, 2003, S. 27 - 34.
- [43] RiMEA e. V. *Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen, Version 2.2.1*. Juni 2009.
- [44] Schneider, U. *Ingenieurmethoden im Brandschutz*. Werner Verlag, Köln, 2. Aufl., 2009.
- [45] Schneider, V. Modelle für die Flucht und Rettung von Personen. In *Hosser, D. (Hrsg.): Kurzreferate 9. Internationales Brandschutz-Symposium*, 2001, S. 233 - 258,.
- [46] Tilly, R. *Evakuierungsberechnungen vor dem Hintergrund baurechtlicher Vorschriften. Verfahren zur sicheren Anwendung von Evakuierungsberechnungen*. hhpberlin - Ingenieure für Brandschutz GmbH, September 2011.
- [47] TraffGo HT GmbH. *Benutzerhandbuch PedEd, PedGo, PedView, Version 2.5.2*. Duisburg, 2008.
- [48] Verein zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb). *Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes*. Mai 2009.
- [49] Verwaltungs-Berufsgenossenschaft (VBG). *Flächennutzung im Büro - Beispiele verschiedener Arbeitsplätze*. Hamburg, Februar 2000.
- [50] Von Kaufmann, F., Schmidt, F. *Hochhausbrandbekämpfung*. Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 1. Aufl., 2010.
- [51] Weidmann, U. *Transporttechnik der Fussgänger*. Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau (IVT), März 1993.
- [52] Wieland, A. *Leitfaden für eine Evakuierung und Gebäuderäumung. Vorbereitung für den Ernstfall*. WEKA-Praxislösungen. WEKA-Media, Kissing, Mai 2005.

Anhang A

CD-Anhang

1_ Bachelorarbeit_Patrick_Linn

Diese Datei enthält die *.PDF-Version der Bachelorarbeit.

2_ Berechnungen

Im Ordner *Berechnungen* befindet sich die Datei *Berechnungen.xlsx*. Diese kann mit Microsoft Excel geöffnet werden und enthält alle die zur Analyse und Bearbeitung verwendeten Berechnungen der Arbeit.

3_ Kubatur_MHochR

Der Ordner *Kubatur_MHochR* enthält das Simulationsmodell nach MHochR. Die Datei *SZ01.pg2* kann mit der Simulationssoftware PedGo geöffnet werden. Durch Öffnen der Datei im Editor PedEd kann die Diskretisierung des Modelles entnommen werden.

4_ Kubatur_MHHR

Das Simulationsmodell nach MHHR befindet sich im Ordner *Kubatur_MHHR*. Die dazugehörige Datei *SZ02.pg2* kann mit der Simulationssoftware PedGo geöffnet werden. Auch diese Datei kann im Editor PedEd geöffnet werden, um die Diskretisierung zu entnehmen.

5_ Szenario_1

In diesem Ordner befinden sich die Ergebnisse der Simulationsdurchläufe nach den Gebäudemodellen geordnet. Die einzelnen Unterordner enthalten die für das Gebäudemodell maßgeblichen Ergebnisse.

Aus der Datei *demographics.xls* kann die Parametereinstellung der Personengruppen entnommen werden. In der Datei *routedata.xls* sind die Parameter aller Routen dokumentiert. Die Ergebnisdatei *seed=001-500.xls* enthält die Ergebnisse der Mittelwertrechnung. Aus der Datei *seed=[Seed].xls* kann das Ergebnis der Einzelrechnung (signifikante Gesamtentfluchtungsdauer) entnommen werden.

Alle Dateien mit der Endung *.xls können mit Microsoft Excel geöffnet werden. Darüber hinaus befindet sich in den Unterordnern die Bilddokumentation sowie das Häufigkeitsdiagramm der Mittelwertrechnung. Des Weiteren befinden sich in den Unterordnern die Dichteplots, anhand derer die Auswertung der Personendichte in den Obergeschossen erfolgte.

5_1_Ergebnisse_MHochR

Der Unterordner enthält die Ergebnisdateien der Simulation.

5_2_Ergebnisse_MHHR

Der Ordner *5_2_Ergebnisse_MHHR* enthält die Ergebnisdateien der Simulation.

5_3_Ergebnisse_Optimiertes_Szenario

Der Unterordner enthält die Ergebnisdateien des optimierten Szenarios.

6_Szenario_2

Analog zum Szenario_1 befinden sich in diesem Ordner die Ergebnisse der Simulationsdurchläufe.

6_1_Ergebnisse_MHochR

Der Unterordner enthält die Ergebnisdateien der Simulation.

6_2_Ergebnisse_MHHR

Der Unterordner enthält die Ergebnisdateien des Gebäudemodells nach MHHR.

6_3_Ergebnisse_Optimiertes_Szenario

Der Ordner *6_3_Ergebnisse_Optimiertes_Szenario* enthält die Ergebnisdateien des optimierten Szenarios.

Index

A

Agent, 30, 31
Alarmierungsdauer, 35
Alltagssituation, 39
Approved Document B, 12
Ausgangszellen, 29

B

bauliche Anlagen, 9
baulicher Brandschutz, 9
Bewegungsalgorithmus, 30
Brandmeldeanlage, 45–47
Brandmelder, 45, 46
Brandschutz, 9

C

Clustering, 32

D

Detektionsdauer, 35
Dichteplot, 34
Diskrete Modelle, 20
Durchlasskapazität, 19
dynamische Strömungsmodelle, 19

E

Einsatzkraft, 10
Enfluchtungsdauer, 38
Entfluchtungsdauer, 24, 32, 34, 38, 54, 66,
70

Entfluchtungssituation, 40

Evakuierung, 4

F

Feuerwehraufzug, 45
Fluchtweg, 7
freie Zellen, 26

G

Geduld, 31
Gefahr, 5
gefährdeter Bereich, 4
Gefahrenfall, 5
Gehgeschwindigkeit, 36
Gesamtentfluchtungsdauer, 38, 56, 60, 68,
69
gesicherter Bereich, 34
gesicherter Bereich, 4, 7, 48
gleichzeitige Evakuierung, 13, 82
Gruppenzusammenhalt, 32

H

Handrechenverfahren, 22
Hochhaus, 4, 6, 10, 11, 43, 47
Hochhausgrenze, 4

I

Individualverhalten, 39
individuelle Entfluchtungsdauer, 35
individuelle Laufdauer, 36

individuelle Reaktionsdauer, 35, 36

K

Kapazitätsanalyse, 18, 22, 83

Kontinuierliche Modelle, 20

L

Laufgeschwindigkeit, 31

leistungsorientierter Evakuierungsnachweis,
42

Life Safety Code, 15

M

Makroskopische Entfluchtungsmodelle, 18

Mikroskopische Entfluchtungsmodelle, 20

Mittelwertrechnung, 32

Multi-Agenten-Modell, 25

N

Netzwerkmodelle, 19

notwendige Treppe, 10

notwendige Treppenraum, 44

notwendiger Flur, 44, 49

notwendiger Treppenraum, 48, 55

Nutzungseinheit, 10, 49, 52, 53

P

panikartige Situationen, 40

Parametersatz, 31, 50

Passagezeit, 24

PedGo, 25

Personenansatz, 46

Personendichte, 8, 33, 38, 41, 55, 59, 63,
67, 70

phasenweise Evakuierung, 13, 14, 83

Potenzialfeld, 30, 52

Potenzialwert, 30

R

Rauchabschnitt, 12

Räumung, 4

Reaktionszeit, 32, 50

Retten, 8

Rettungsgerät, 11

Rettungshöhe, 11

Rettungsweg, 7, 9–11, 44

Rettungszellen, 52

S

Schutzziele, 9

Schwanken, 31

Seed, 32

Sicherheitsmodell, 42

sicherheitstechnische Gebäudeausrüstung, 6

Sicherheitstreppenraum, 12, 44, 49

signifikante Gesamtentfluchtungsdauer, 33,
57, 61, 64, 72, 74

Signifikanter Stau, 34

Sonderbau, 4, 10

Sprungzellen, 27

Stau, 33

Staudruck, 40

T

Trägheit, 32

Treppe, 48, 49

Treppen, 13, 27, 37, 44

Treppenraum, 11

Treppenzellen, 27, 49

Trödelwahrscheinlichkeit, 32

Türzellen, 28

V

Verzögerungsdauer, 61, 73

W

Wandzellen, 26

Wegelement, 18, 19, 23

Wegzeit, 23, 24

Z

Zeitschritt, 30