

Entfluchtungssimulationen am rechnergestützten Modell für drei Sporthallen

Masterarbeit

Im Studiengang Bauingenieurwesen

des Fachbereichs 2

an der

HTW – Berlin

Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin

Frank Leymann

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Jochen Wittmann

Zweitprüfer: Dipl. Ing. Mario Koch

Berlin, 2011

Kurzfassung

Gegenstand der hier vorgestellten Arbeit ist die Evakuierung von Sport- und Versammlungsstätten in Gefahrensituationen. Zum einen wird in einem Vergleich von zwei verschiedenen Methoden der Unterschied von althergebrachter Methodik und moderner Computersimulation dargestellt, zum anderen werden mehrere Beispiele in Gutachtenform bereitgestellt, anhand derer diese Methoden nachvollzogen werden können. Betrachtet werden das Handrechenverfahren nach *Predtetschenski und Milinski* und die Software für Evakuierungssimulationen „PedGo“¹.

Abstract

Subject of the present study is the evacuation of sports and meeting facilities in hazardous situations. This master thesis compares the hand calculation approach by *Predtetschenski and Milinski* as a traditional method for the calculation of evacuation plans with a simulation by the software “PedGo”. In addition, several examples in terms of reports are provided to demonstrate the application of both methods.

¹ „PedGo“, *Software zur Simulation von Personenströmen im Landbereich*, TraffGo HT GmbH

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	2
Abstract.....	2
Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis	10
1 Einleitung.....	11
1.1 Überblick.....	11
1.2 Ziele.....	12
2 Stand der Technik.....	13
2.1 Was versteht man unter einer Evakuierungsberechnung?	13
2.2 Geschichtlicher Hintergrund	13
2.3 Erläuterung der Handrechnung	14
2.3.1 Allgemeines	14
2.3.2 Der Ansatz.....	14
2.3.3 Betrachtetes Objekt.....	20
2.3.4 Grundlagenermittlung für das Rechenverfahren.....	21
2.3.5 Ermittlung der Evakuierungszeiten einzelner Personengruppen	25
2.4 Diskussion der Ergebnisse	53
2.5 Erläuterung der Simulationssoftware „PedGo“	54
2.5.1 Allgemeines	54
2.5.2 Der Ansatz.....	55
2.5.3 Rahmenbedingungen.....	58
2.5.4 Betrachteter Beispielgrundriss	59
2.5.5 Der Editor.....	60
2.5.6 Die Simulation	65
3 Wertender Vergleich.....	71
3.1 Vergleich auf der Datenebene.....	71
3.1.1 Eingangswerte für die Handrechnung.....	71
3.1.2 Eingangswerte für die Evakuierungssoftware „PedGo“	71
3.1.3 Schlussfolgerung auf Datenebene	72
3.2 Vergleich auf der Ergebnisebene	73

3.2.1 Ergebnisse der Handrechnung	73
3.2.2 Ergebnisse der Evakuierungssoftware „PedGo“	73
3.2.3 Schlussfolgerung auf Ergebnisebene	78
4 Zusammenfassung und Ausblick	81
Anhang A: Beispielgutachten [REDACTED]	82
Anhang B: Beispielgutachten [REDACTED]	105
Anhang C: Beispielgutachten [REDACTED]	135
Anhang D: Aufgabenstellung	164
Glossar	166
Literaturverzeichnis	170
Erklärung	172

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	15
Darstellung eines Personenstromes nach Predtetschenski und Milinski.	
Abbildung 2.2:	16
Projektionsflächen der verschiedenen Personen in unterschiedlicher Kleidung.	
Abbildung 2.3:	17
Bereiche verschiedener Bewegungsformen in Abhängigkeit von q .	
Abbildung 2.4:	19
Fundamentaldiagramm nach Predtetschenski und Milinski.	
Abbildung 2.5:	20
Obergeschoss der Sportstätte in der [REDACTED] Berlin.	
Abbildung 2.6:	21
Erdgeschoss der Sportstätte in der [REDACTED] Berlin.	
Abbildung 2.7:	23
Personenverteilung im Obergeschoss mit zugeordneter Laufrichtung entlang des Flures.	
Abbildung 2.8:	24
Personenverteilung im Erdgeschoss mit den zugeordneten Rettungswegen.	
Abbildung 2.9:	25
Gesamtübersicht Obergeschoss. Grundlage der Einzelbetrachtungen.	
Abbildung 2.10:	26
Übersichtsplan Erdgeschoss. Grundlage der Einzelbetrachtungen.	

Abbildung 2.11:	26
Detailplan zu Personenstrom „A“.	
Abbildung 2.12:	31
Detailplan zu Personenstrom „B“.	
Abbildung 2.13:	32
Detailplan Obergeschoss zu Personenstrom „C“.	
Abbildung 2.14:	34
Detailplan Erdgeschoss zu Personenstrom „C“.	
Abbildung 2.15:	36
Detailplan zu Personenstrom „D“.	
Abbildung 2.16:	38
Detailplan zu Personenstrom „E“.	
Abbildung 2.17:	39
Detailplan Obergeschoss zu Personenstrom „F“.	
Abbildung 2.18:	41
Detailplan Erdgeschoss zu Personenstrom „F“ aus dem Obergeschoss und dem Mehrzweckraum.	
Abbildung 2.19:	44
Allgemeine Darstellung zur Personenstromvereinigung.	
Abbildung 2.20:	45
Darstellung der Personenstromvereinigung vor dem Ausgang „F“.	

Abbildung 2.21:	48
Detailplan Erdgeschoss zu Personenstrom „F“.	
Abbildung 2.22:	56
Die “Von Neumann Nachbarschaft“ (links) und die „Moore Nachbarschaft (rechts).	
Abbildung 2.23:	57
Programmablaufplan für ein Update mit t...Sub-Update-Schritt und n...maximale Geschwindigkeit eines Agenten. Ein Zeitschritt beträgt eine Sekunde.	
Abbildung 2.24:	58
Von „PedGo“ angesetzter Bewegungsalgorithmus für einen Agenten pro Zeitschritt.	
Abbildung 2.25:	59
Beispielgrundriss Erdgeschoss wie er in der DXF-Datei vorliegt.	
Abbildung 2.26:	60
Beispielgrundriss Obergeschoss wie er in der DXF-Datei vorliegt.	
Abbildung 2.27:	61
Ansicht der Benutzeroberfläche des Editors.	
Abbildung 2.28:	62
Ansicht „Color Coding“-Fenster des Editors.	
Abbildung 2.29:	62
Importierter Beispielgrundriss Erdgeschoss ohne Anpassungen.	
Abbildung 2.30:	63
Beispielgrundriss nach Anpassung der Geometrie.	

Abbildung 2.31:	64
Darstellung der Exit-Zellen vor dem Gebäudeausgang und die Routenfestlegung für den Raum mit den zwei Ausgängen, hier ist die Route über die linke Tür definiert.	
Abbildung 2.32:	65
Grundriss mit den Personenverteilungen, dargestellt durch die grünen Flächen innerhalb der Räume.	
Abbildung 2.33:	66
Ansicht der Menüoberfläche der Simulationsanwendung.	
Abbildung 2.34:	66
Beispiel einer Personenanfangsverteilung im Erdgeschoss, inklusive Türen-, Treppen-, Wand- und Ausgangszellen. Die roten Punkte entsprechen den zufällig verteilten Personen.	
Abbildung 2.35:	67
Beispiel einer Personenanfangsverteilung im Erdgeschoss, inklusive Türen-, Treppen-, Wand- und Ausgangszellen. Die roten Punkte entsprechen den zufällig verteilten Personen.	
Abbildung 2.36:	67
Einstellungsfenster für die Personenparameter.	
Abbildung 2.37:	69
Einstellungsfenster für die Ausgangszellen.	
Abbildung 2.38:	70
Zusammenspiel der einzelnen Ausgangsparameter. Direkthilfe der Software.	
Abbildung 3.1:	74
Evakuierungskurve zum Beispielgrundriss. Stellt dar, wie viele Personen zu welcher Zeit das Gebäude verlassen haben.	

Abbildung 3.2:	75
Ausschnitt aus der Auswertungsdatei der 500 Simulationsdurchläufe.	
Abbildung 3.3:	76
Häufigkeitsverteilung der 500 Simulationsdurchläufe für den Beispielgrundriss. Die grüne Säule zeigt das 95%-Quantil der Evakuierung.	
Abbildung 3.4:	77
Density-Plot vom Erdgeschoss des Beispielgrundrisses inklusive Zeitskala.	
Abbildung 3.5:	78
Momentaufnahme der 3D-Animation. Aus dem Beispielgrundriss im Erdgeschoss aufgenommen.	

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	27
Bewegungsparameter eines Personenstromes, für die verschiedenen Wegabschnitte, in Abhängigkeit von der Personendichte.	
Tabelle 2.2:	52
Zulässige Evakuierungszeiten ($t_{zul.}$) für Wohn- und vergleichbare Gebäude mit Räumen über 100 m ² Nettofläche.	
Tabelle 2.3:	54
Personenströme und zugehörige Evakuierungszeiten mit Unterscheidung in Stand- und Bewegungszeiten.	

1 Einleitung

1.1 Überblick

Die nachfolgende Arbeit behandelt die Simulation verschiedener Szenarien, wie sie im Brandfall auftreten könnten. Grund hierfür ist das gesteigerte Bestreben Bestandsturnhallen aus der Zeit der *DDR*, zusätzlich zum *Normalbetrieb* auch als Versammlungsstätten zu verwenden.

Veranstaltungen, z.B. Aufführungen, Tanzveranstaltungen, Versammlungen oder Ähnliches werden nicht erst seit heute in diesen Sporthallen abgehalten. Jedoch in Anbetracht der Vorfälle, die am 24. Juli 2010 auf der „Loveparade“ in Duisburg auf sich aufmerksam machten, wurde das Verlangen nach Sicherheit gesteigert. Die Öffentlichkeit und der Gesetzgeber verlangen zu Recht nach einer aufklärenden Sicherheitskontrolle in Form von Berechnungen oder Nachweisen, dass die angestrebte Umnutzung bzw. erweiterte Nutzung, unter den gegebenen baulichen Rahmenbedingungen sicher zu verwirklichen ist.

Hier tut sich die Problematik auf, dass es mit den vorhandenen *Handrechenmethoden* nur erschwert möglich ist, eine realitätsnahe mathematische Beschreibung der Situation zu erreichen. Die empirisch ermittelten Formeln sind zwar auf Hallen und ähnliche Objekte anwendbar, jedoch nicht konkret darauf zugeschnitten.

Wenn aber die Halle trotzdem als Veranstaltungsort genutzt werden soll und kein Interesse besteht, die stark einschränkenden Standardtabellen der zurzeit gültigen Regelungen und Vorschriften heranzuziehen, sollte man sich einer Simulation mit einer bereits vorhandenen Software bedienen.

1.2 Ziele

Ziel dieser Arbeit ist es, die Eingangswerte und die ermittelten Ergebnisse der verschiedenen Berechnungsmethoden gegenüberzustellen und hinsichtlich ihrer praktikablen Anwendbarkeit zu vergleichen. Folglich ist der Verfasser bestrebt, in erster Linie eine Zusammenstellung aller erforderlichen Parameter für die jeweilige Form der Berechnung zu erarbeiten und zu kommentieren.

Dabei wird insbesondere auf die Vorgehens- und Funktionsweise der Simulationssoftware „PedGo“ eingegangen.

Darüber hinaus beschäftigt sich die Arbeit ebenfalls mit der Handrechnung nach Predtetschenski und Milinski und gibt an einem Beispiel eine erläuterte Schritt-für-Schritt-Anleitung.

Der Zweck aller vorhandenen Berechnungsverfahren, sei es eine Handrechnung oder eine Computersimulation, ist es, die sogenannte Evakuierungsdauer zu ermitteln. Diese Vorgabe haben beide Methoden gemein.

2 Stand der Technik

2.1 Was versteht man unter einer Evakuierungsberechnung?

Bei der Evakuierungsberechnung handelt es sich um die Ermittlung einer Zeitspanne bzw. Dauer. Diese wird benötigt um Voraussagen treffen zu können, inwieweit eine Gruppe von Personen in einer bestimmten Zeit, von ihrem jeweiligen Aufenthaltspunkt in einem Objekt (Gebäude, Schiff, Zug oder Flugzeug) einen Ausgang oder sicheren Bereich erreicht. Die Notwendigkeit einer solchen Evakuierung oder auch Entfluchtung genannt, kann durch verschiedene Gefahrensituationen hervorgerufen werden. Hier ist als Hauptursache die Brandsituation zu nennen, welche in nahezu allen Fällen mit einer starken Rauchentwicklung einhergeht. [1] Bei Bränden in Gebäuden ist das Gefahrpotential für den Menschen durch Rauch und Gase weitaus höher einzuordnen, als durch die direkte Hitzeeinwirkung. Deshalb gibt es auch diverse Ansätze zur Berechnung der Rauchentwicklung bei verschiedenen Brandszenarien. Die dabei ermittelten Ergebnisse können den Evakuierungszeiten gegenübergestellt und mit ihnen verglichen werden. Dieser erlaubt Rückschlüsse über die Eignung von Gebäuden für bestimmte Zwecke.

2.2 Geschichtlicher Hintergrund

Die Ursprünge der Evakuierungsberechnungen liegen in den sechziger und siebziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts. Es handelt sich dabei um das Handrechenverfahren nach Roitman [2] und das Handrechenverfahren nach Predtetschenski und Milinski [3]. Wobei die zuletzt genannte Methode am häufigsten verwendet wurde. Allerdings werden diese Verfahren, seit Mitte der 1990er Jahre, zunehmend durch Computersimulationen verdrängt. Inwieweit diese Substitution bis zum heutigen Tage vorangeschritten ist, entzieht sich der Kenntnis des Verfassers. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass dieser Prozess, aufgrund fortschreitender Rechentechnik, andauert. Demnach kann festgehalten werden, dass zurzeit einige Ingenieurbüros mit den manuell erstellten Handrechnungen arbeiten und andere bereits mit etablierten Softwarelösungen.

2.3 Erläuterung der Handrechnung

2.3.1 Allgemeines

Im Folgenden stellt der Verfasser die gängige Handrechnung nach Predtetschenski und Milinski vor. Diese wurde in den siebziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts entwickelt. Zur Herleitung der benötigten Ausgangswerte wurden zahlreiche Versuche mit Testpersonen durchgeführt. Daraus wurden sogenannte Fundamentaldiagramme und diverse Formeln zur Bewegung der Personenströme abgeleitet, die der Berechnung zu Grunde liegen und im weiteren Verlauf ebenfalls erläutert werden. Trotz der Tatsache, dass alle zur Verfügung stehenden Quellen und Berechnungsbeispiele auf der selben Arbeit von Predtetschenski und Milinski beruhen, ergeben sich zahlreiche unterschiedliche Methoden und Vorgehensweisen, wobei sich der Verfasser eng an die Ausführungen von Dr.-Ing. Klaus Müller, Brandoberrat im Ruhestand, halten wird.

„Evakuierungsberechnungen dienen der Optimierung der Fluchtwege zur Vermeidung von Stau und oder Verzögerung!“ [4]

2.3.2 Der Ansatz

2.3.2.1 Vorüberlegungen

Das Ziel des Verfahrens ist, eine Evakuierungszeit für ein Gebäude zu bestimmen. Bei der Verfolgung dieses Ziels gibt es, den Gebäudetyp betreffend, keine Einschränkungen, da ausschließlich ein oder mehrere Personenströme betrachtet werden, welche sich den Gegebenheiten des Grundrisses, beim Verlassen des Objektes, in Form und Geschwindigkeit anpassen.

Predtetschenski und Milinski sind davon ausgegangen, dass der einzelne Mensch innerhalb einer Massenbewegung, im Weiteren *Personenstrom* genannt, kein nennenswertes Handlungspotential besitzt und somit in der Menge untergeht.

Betrachtet man einen realen Personenstrom, könnte man in etwa die Form einer Zigarre erkennen. Da sich im Kopf- und Schlußteil verhältnismäßig wenige Personen bewegen, wird dieser bei der Berechnung einfach vernachlässigt, indem die Personen aus diesen Teilen dem Hauptteil zugeordnet werden. Dadurch ergibt sich ein Rechteck, das als idealisierter Personenstrom angesehen wird.

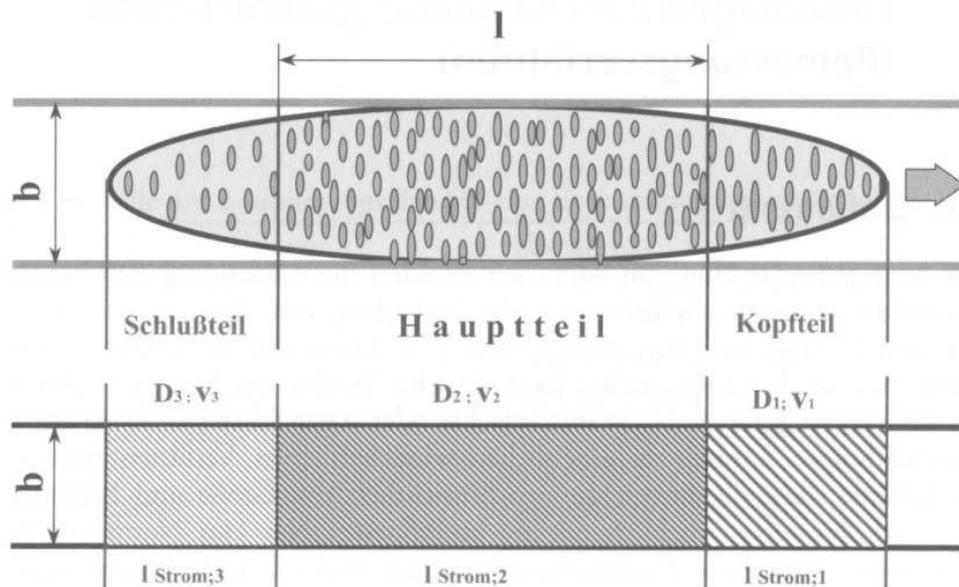


Abbildung 2.1: Darstellung eines Personenstromes nach Predtetschenski und Milinski. [5]

Dieser wird durch zwei Parameter definiert: die *Dichte* und die *Geschwindigkeit*, welche von der Dichte direkt abhängig ist. Je dichter ein Personenstrom, desto langsamer ist seine Bewegungsgeschwindigkeit. Jener Zusammenhang wurde von den beiden Wissenschaftlern durch zahlreiche Realversuche mit jungen Soldaten nachgewiesen und bildet die Grundlage des Verfahrens. Der Verfasser weist darauf hin, dass es verschiedene Arten der Bewegung gibt, nämlich Bewegung unter Gefahrenbedingung, unter Normalbedingung und komfortable Bedingung. Die verschiedenen Bewegungsarten haben unterschiedlichen Einfluss auf die Laufgeschwindigkeiten der Personen. In dieser Arbeit wird jedoch ausschließlich die Bewegung unter Gefahrenbedingung betrachtet.

2.3.2.2 Personenstromdichte

Die Dichte eines Personenstromes wird ermittelt, indem die Anzahl der Personen ins Verhältnis zur Fläche gesetzt wird, auf der sie sich befinden. Dabei ist darauf zu achten, dass es einen großen Unterschied macht, ob eine Person in Sommerkleidung, in Winterkleidung oder gar mit einem Koffer in der Hand, unterwegs ist. Um von Einfluss der Bekleidung, Gepäck und Kinder einzubeziehen, sind die verschiedenen Projektionsflächen mit Hilfe von einem *Flächenfaktor* zu berücksichtigen.

Alter, Bekleidung und Gepäck der Personen	Fläche f (m ²)	Faktor c
<i>Kind</i>	0,04 ... 0,06	0,4 ... 0,6
<i>Jugendlicher</i>	0,06 ... 0,09	0,6 ... 0,9
<i>Erwachsener</i>		
in Sommerkleidung bzw. Hauskleidung	0,100	1,00
in Übergangsstraßenkleidung	0,113	1,13
in Winterstraßenkleidung	0,125	1,25
<i>Erwachsener in Übergangsstraßenkleidung</i>		
mit leichtem Gepäck (z. B. Aktentasche)	0,180	1,80
mit einem Koffer	0,240	2,40
mit Rucksack	0,260	2,60
mit schwerem Gepäck (z. B. zwei Koffer)	0,390	3,90
mit einem Kind an der Hand	0,200	2,00
mit einem Kind auf dem Arm	0,260	2,60
mit einem Kind an der Hand (einschl. Gepäck)	0,320	3,20

Abbildung 2.2: Projektionsflächen der verschiedenen Personen in unterschiedlicher Kleidung. [5]

Die Personenstromdichte berechnet sie wie folgt:

$$D = \sum f \div (b \times l) \quad [\text{Pers.} / \text{m}^2]$$

mit: P... Anzahl Personen im Strom

b...Breite des Stromes, entspricht der Breite des Wegabschnittes

l...Länge des Stromes, entspricht der Länge des Wegabschnittes

$$\sum f = P \times f \quad [\text{m}^2]$$

2.3.2.3 Bewegungsintensität

Nachdem die Dichte und die Geschwindigkeit erfasst sind, werden diese Werte in eine weitere Größe überführt. Es handelt sich dabei um die *Bewegungsintensität*, vergleichbar mit der Massenstromdichte² aus der Hydraulik.

Die Bewegungsintensität ergibt sich aus:

$$q = D \times v \quad [\text{Pers.} / (\text{m} \times \text{s})]$$

mit: D...Personenstromdichte

v...Bewegungsgeschwindigkeit des Personenstromes

Aus den Beobachtungen der Experimente und den vorgestellten Überlegungen, leiteten Predtetschenski und Milinski eine Reihe von Bewegungsformen ab, welche, abhängig von der Dichte, in Abbildung 2.3 veranschaulicht sind.

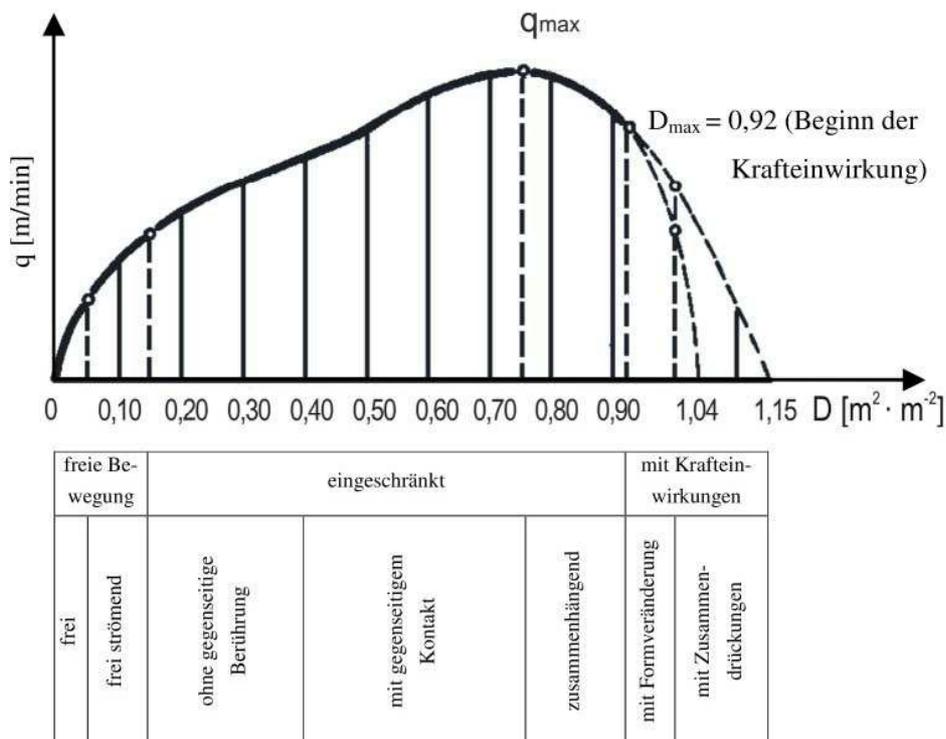


Abbildung 2.3: Bereiche verschiedener Bewegungsformen in Abhängigkeit von q . [5]

² Aus der Hydraulik: Die Massenstromdichte j berechnet sich zu: $j = \rho \times v$ [$\text{kg} / (\text{m}^2 \times \text{s})$], wobei ρ die Dichte und v die Geschwindigkeit darstellt.

Aus diesen Erkenntnissen heraus ist es möglich, auf eventuelle Stauungen vor Türen, Engstellen oder Treppen zu schließen. Dazu wird überprüft, ob die maximal mögliche Bewegungsintensität einer Tür oder eines anderen Wegabschnittes überschritten wird. Kurz gesagt wird kontrolliert, ob mehr Personen pro Zeiteinheit an den Folgewegabschnitt herantreten als dieser im Stande ist abzuführen. Wenn dies der Fall ist, steigt die Dichte vor und in dem Hindernis auf ein Maximum an. Nach Predtetschenski und Milinski kann ein Wert von 9,2 Personen pro Quadratmeter nicht überschritten werden, da sonst Formänderungen und Verletzungen die Folge wären. Des Weiteren wird ab einer Dichte von 7,0 Personen pro Quadratmeter die Bewegung dermaßen eingeschränkt, dass die Laufgeschwindigkeit rapide abfällt und damit eine Staubildung sehr wahrscheinlich ist.

2.3.2.4 Durchlassfähigkeit

Die letzte, zwingend benötigte Größe ist die *Durchlassfähigkeit* des Stromes. Wird durch den Vergleich der Bewegungsintensitäten, siehe Abschnitt 2.3.2.4, ein Stau prognostiziert, so kann über das Verhältnis zweier Durchlassfähigkeiten die Stauzeit ermittelt werden. Diese ist ein wichtiger Bestandteil, da sie in Addition mit den entsprechenden Laufzeiten die Gesamtevakuierungszeit eines Personenstromes verkörpert.

Die Durchlassfähigkeit berechnet sich wie folgt:

$$Q = D \times v \times b \quad [\text{Pers. / s}]$$

mit: D... Dichte des Personenstromes

v... Bewegungsgeschwindigkeit des Personenstromes

b... Breite des Stromes, das entspricht der Breite des Wegabschnittes

Werden die beiden Durchlassfähigkeiten des Personenstromes und des folgenden Wegabschnittes in der Gleichung gegenübergestellt, so erhält man die Dauer der Verzögerung mit:

$$t_{\text{Stau}} = P \times (1 \div Q_i - 1 \div Q_{i+1}) \quad [\text{s}]$$

mit: P... Anzahl Personen im Strom

Q_i ... Durchlassfähigkeit des aktuellen Wegabschnittes

Q_{i+1} ... Durchlassfähigkeit des folgenden Wegabschnittes

2.3.2.5 Das Fundamentaldiagramm

Das am häufigsten während der Berechnung verwendete Werkzeug ist das Fundamentaldiagramm, welches einen Zusammenhang zwischen der Bewegungsintensität und der Personenstromdichte herstellt. Es können die Werte für die einzelnen Wegabschnitte direkt abgelesen werden, sobald die Personenstromdichte bekannt ist.

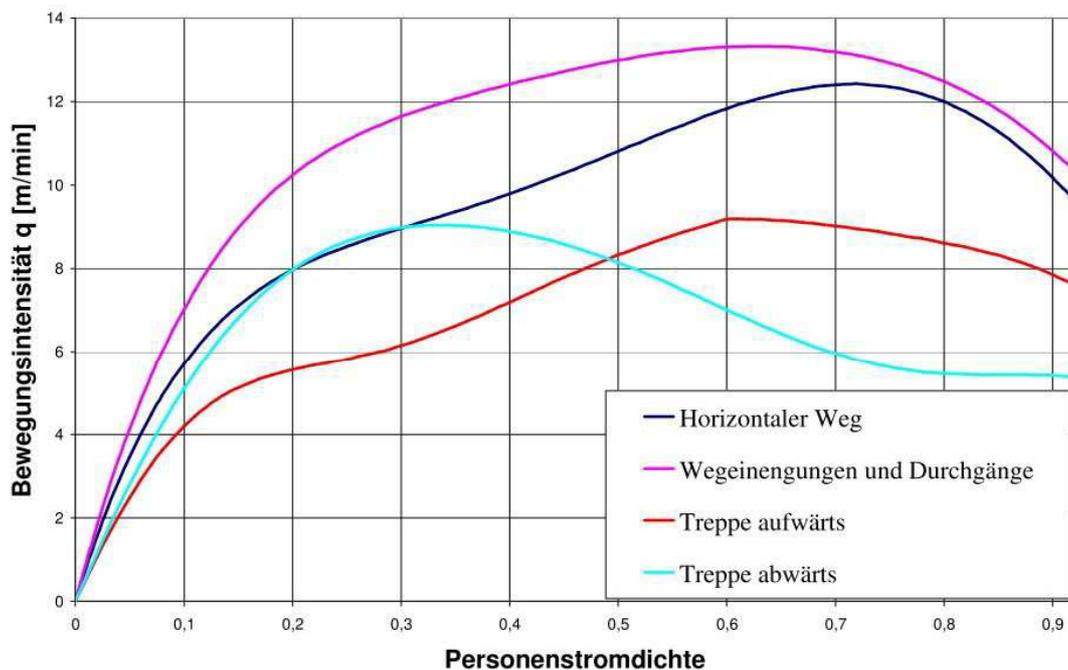


Abbildung 2.4: Fundamentaldiagramm nach Predtetschenski und Milinski. [12]

Genauere Informationen über die Anwendung der beschriebenen Formeln sowie der Diagramme und Tabellen können dem Abschnitt 2.3.5 entnommen werden.

2.3.3 Betrachtetes Objekt

Betrachtet wird die Sportstätte in der [REDACTED] Berlin. Es handelt sich um eine zweigeschossige Sporthalle. Im ersten Obergeschoss sind Umkleieräume und Sanitärbereiche angeordnet. Im Erdgeschoss befinden sich Umkleidemöglichkeiten, Sanitäranlagen, Technikräume, Lagerräume für Sportgeräte, Lehreraufenthaltsräume, ein Mehrzweckraum sowie die Halle. Zusätzlich verfügt das Erdgeschoss über zwei Zuschauertribünen, welche über einen separaten Gang erreicht werden können. Aus dem Gebäude führen acht Türen direkt ins Freie. Von diesen Ausgängen sind nur sieben als Fluchttüren vorgesehen. Die Südwesttür ist ausschließlich vom Tribünenzugang zu erreichen.

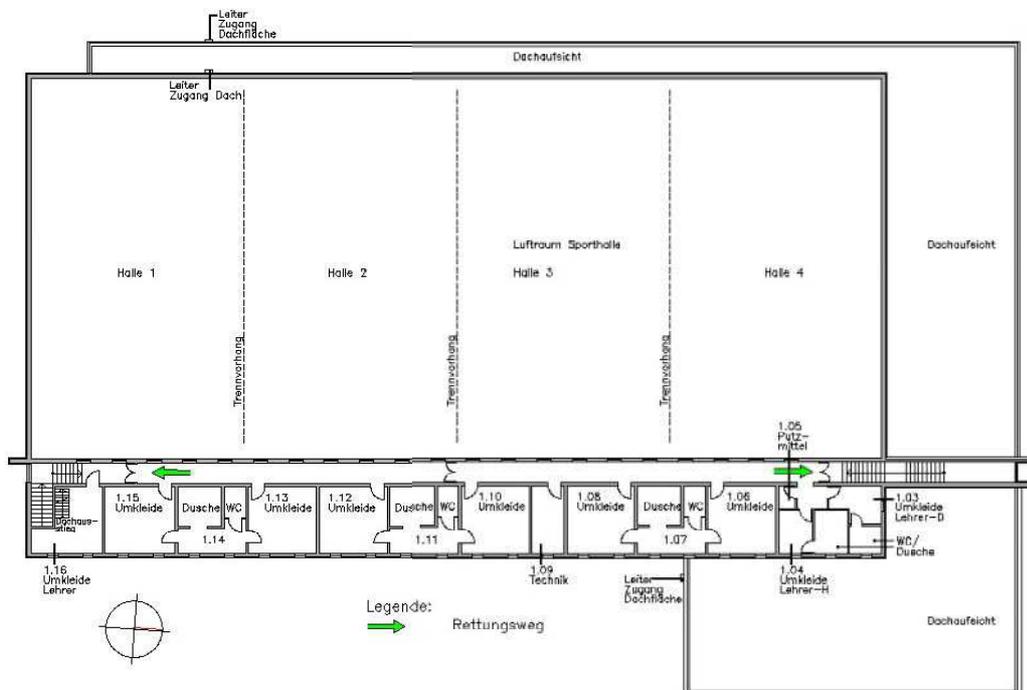


Abbildung 2.5: Obergeschoss der Sportstätte in der [REDACTED] Berlin.

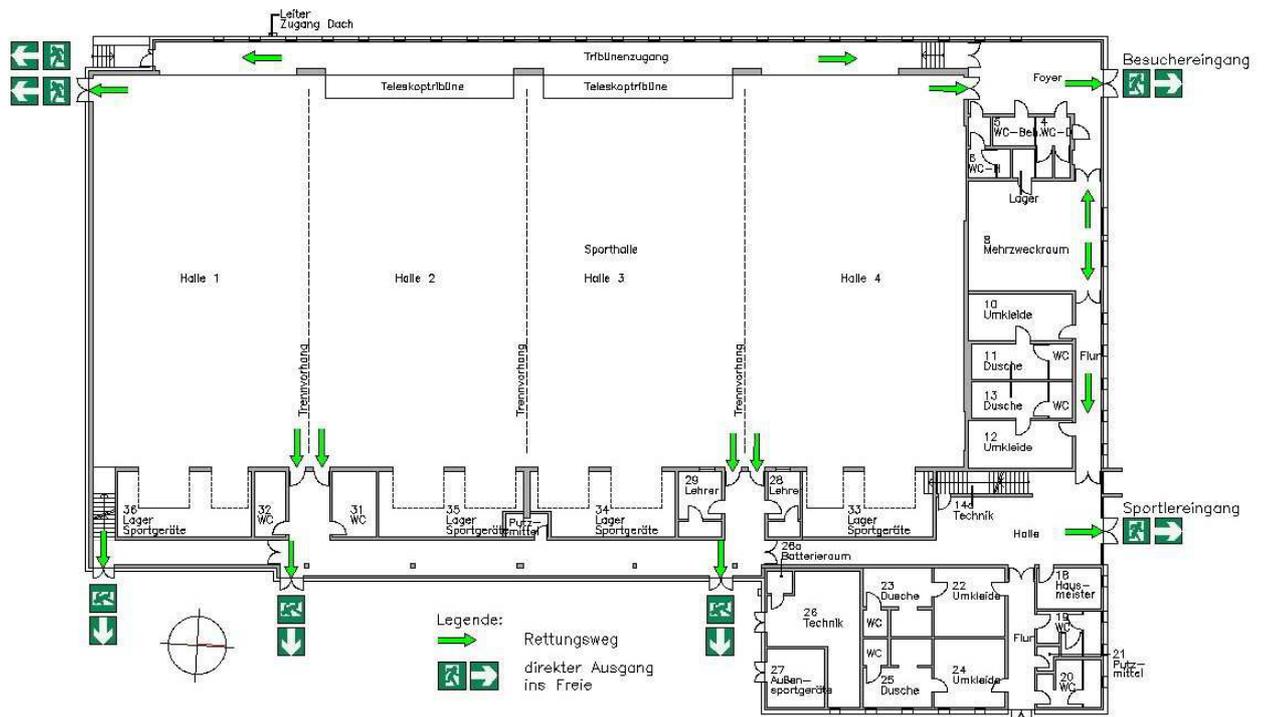


Abbildung 2.6: Erdgeschoss der Sportstätte in der [REDACTED] Berlin.

2.3.4 Grundlagenermittlung für das Rechenverfahren

2.3.4.1 Bestimmung des gewählten Rettungsweges

Zu Beginn werden die Grundrisse in verschiedene Sektionen unterteilt, um die im Gebäude befindlichen Personen den jeweiligen Fluchtwegen zuteilen zu können. Dies geschieht nach unterschiedlichen Gesichtspunkten, wie z. B.:

- Kenntnis des jeweiligen Evakuierungsweges
- Häufigkeit in der täglichen Benutzung
- Kürzeste Entfernung bis zum Evakuierungsausgang
- Wahrnehmung von Rauch als hindernder Faktor

Aufgrund dieser Aspekte existieren diverse Möglichkeiten der Fluchtwegbestimmung, von denen eine gewählt werden muss.

Annahme:

Alle Personen nehmen den jeweils kürzesten Weg ins Freie.

Begründung:

Es handelt sich um eine öffentliche Sportveranstaltung, bei der sich der Zuschaueraufenthalt auf die Tribünen beschränkt. Daraus ergeben sich nachstehende Schlussfolgerungen: Die Personen im Obergeschoss haben, wie in Abb. 1 dargestellt, nur zwei Fluchtrichtungen in Nord- und in Südrichtung des Gebäudes. Über die Treppen gelangen sie direkt auf die vorgesehenen Rettungswege. Gleiches gilt für die Besucher auf den Zuschauertribünen, die nicht zwingend über den Aufbau des Objektes Bescheid wissen, jedoch mangels vielfältiger Optionen, nur eine von zwei Richtungen wählen können. Die übrigen Personen beschränken sich auf den Hallenbereich und den Mehrzweckraum, es handelt sich um Sportler oder Personen, die mit den Gegebenheiten vor Ort vertraut sind. Hier werden Kenntnisse der Sportstätte vorausgesetzt und damit auch die Entscheidung für den kürzesten Fluchtweg.

2.3.4.2 Verteilung der Personen auf den Grundriss

Zunächst wird festgelegt, wie viele Personen sich in welchem Bereich des Gebäudes aufhalten, sofern dies nicht vom Auftraggeber vorgegeben wurde.

In diesem Beispiel gestaltet sich die Verteilung wie folgt:

- 150 Personen im Obergeschoss
- 200 Personen auf der Tribüne
- 50 Personen im Mehrzweckraum
- 200 aktive Sportler und Betreuer in der Halle

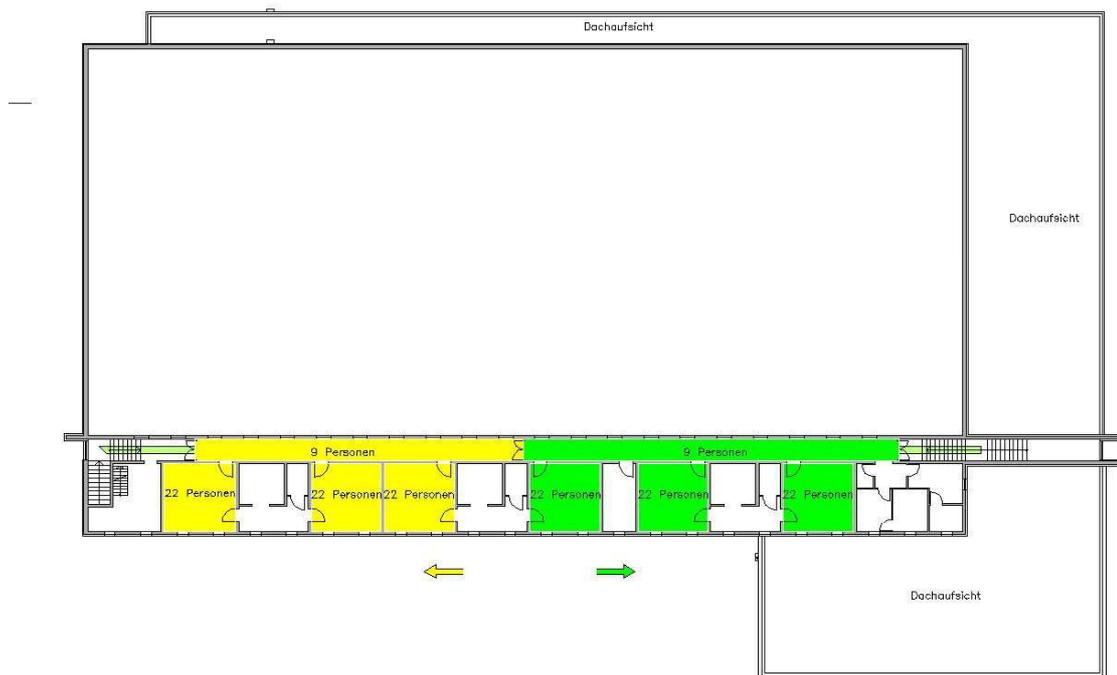


Abbildung 2.7: Personenverteilung im Obergeschoss mit zugeordneter Laufrichtung entlang des Flures.

Die 150 Personen werden gleichmäßig auf alle Aufenthaltsräume verteilt. Sanitärbereiche werden hiervon ausgeschlossen, da sie nicht als Aufenthaltsräume gelten.



Abbildung 2.8: Personenverteilung im Erdgeschoss mit den zugeordneten Rettungswegen.

Die gleiche Vorgehensweise wie im Obergeschoss wird auch auf das Erdgeschoss angewandt. Zusätzlich sind hier explizit die Routen der einzelnen Personengruppen dargestellt, mit den dazugehörigen Gebäudeausgängen. Außerdem sind die Ausgänge mit Großbuchstaben versehen. Diese dienen im weiteren Verlauf der Orientierung und finden sich in den Indizes der Berechnungen wieder.

2.3.4.3 Bestimmung aller notwendigen konstruktiven Abmessungen

Unter konstruktive Abmessungen fallen die Länge und Breite der Evakuierungswege sowie die Breite der Engstellen, z. B. Türen. In seltenen Fällen wird auch die Länge einer Engstelle benötigt. Diese ist jedoch in den meisten Fällen vernachlässigbar klein.

2.3.5 Ermittlung der Evakuierungszeiten einzelner Personengruppen

2.3.5.1 Allgemeine Anmerkung

Den einzelnen Gebäudeausgängen sind die Buchstaben A bis G zugeordnet. Jene werden im Text sowie in den Abbildungen zur Kenntlichmachung der Personenströme und deren zugehöriger Parameter verwendet.

Personenstromdichten (D) werden aufgerundet. Die Werte für die Bewegungsparameter Geschwindigkeit (v) und Intensität (q) werden aus den gerundeten Werten ermittelt, eine Interpolation erfolgt nicht.

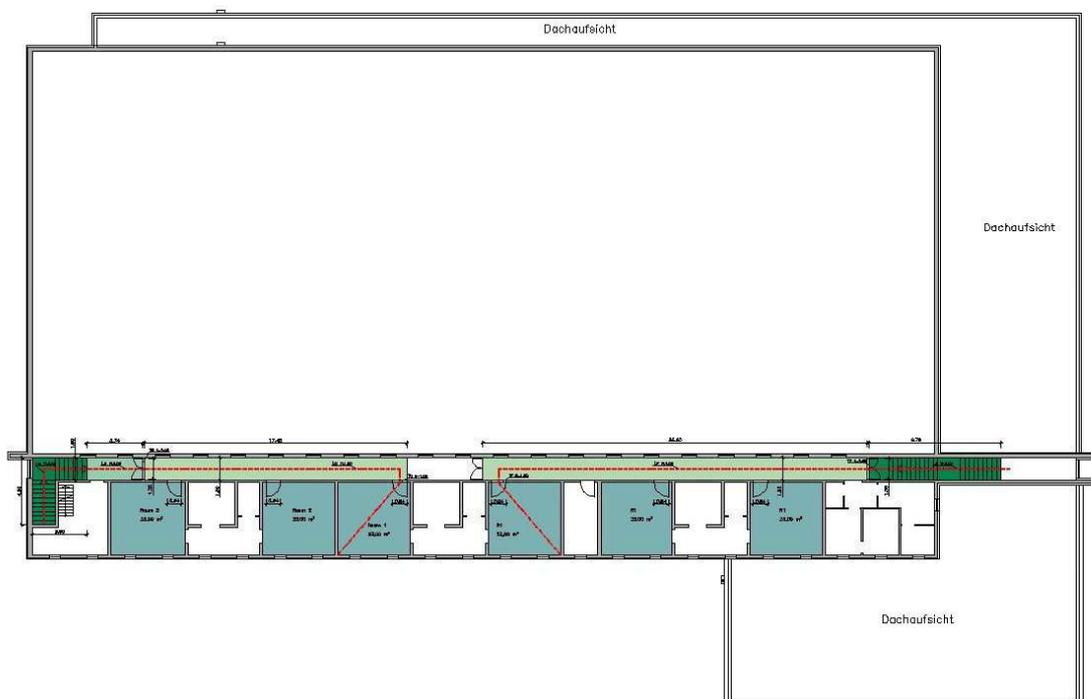


Abbildung 2.9: Gesamtübersicht Obergeschoss. Grundlage der Einzelbetrachtungen.



Abbildung 2.10: Übersichtsplan Erdgeschoss. Grundlage der Einzelbetrachtungen.

2.3.5.1 Personenstrom „A“

Es handelt sich hier um 100 Personen, die von der südwestlichen Tribüne über den zugehörigen Notausgang „A“ evakuiert werden.

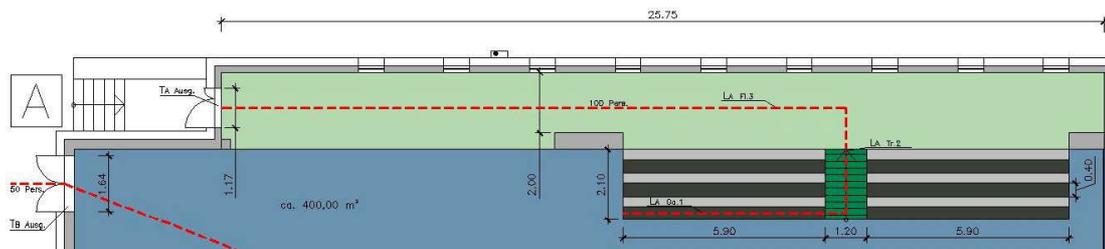


Abbildung 2.11: Detailplan zu Personenstrom „A“.

Laufzeit für das Verlassen der Tribünenreihe (A Ga.1)

Weglänge, $L_{A\ Ga,1}$ = 5,90 m

Breite, $b_{A\ Ga,1}$ = 0,40 m

Abschnittsfläche, $A_{A\ Ga,1}$ = $L \times b$ = $5,90 \times 0,40$ = 2,36 m²

Anzahl Personen, $N_{A\ Ga,1}$ = 17 Pers.

Des Weiteren wird ein Faktor (c) benötigt, zur Berücksichtigung der durch Personen eingenommenen Fläche. Diese hängt von der Kleidung, dem Gepäck oder eventuell vorhandenen Kindern ab. In diesem Fall wird $c = 1,13$ gesetzt, dass entspricht Personen in Übergangsstraßenkleidung wie z. B. Jeans und eine leichte Jacke.

Um die Gesamtevakuiierungsdauer für den jeweiligen Abschnitt ermitteln zu können, wird die am weitesten vom Ausgang entfernte Person betrachtet. Deren Lauf- und Stauzeiten wirken kumulativ und ergeben die Zeit, die benötigt wird, um in den sicheren Bereich zu gelangen.

Daraus folgt eine Personendichte:

$$D_{A\text{ Ga},1} = (N_{A\text{ Ga},1} \times c) \div A_{A\text{ Ga},1} = 17 \times 1,13 \div 2,36 = 8,14 \text{ Pers./m}^2$$

$$D_{A\text{ Ga},1} \approx 9,20 \text{ Pers./m}^2$$

Tabelle 2.1: Bewegungsparameter eines Personenstromes, für die verschiedenen Wegabschnitte, in Abhängigkeit von der Personendichte. [5]

Dichte des Personenstromes	Bewegungsparameter Geschwindigkeit (v_i) und Intensität (q_i) nach Art der Evakuierungswege							
	horizontale Wege		Türen, Durchgänge, Einengungen		Treppe, abwärts begangen		Treppe, aufwärts begangen	
(D_i) Pers. \cdot m 2	(v_i) m \cdot s $^{-1}$	(q_i) Pers. \cdot m $^{-1}$ \cdot s $^{-1}$	(v_i) m \cdot s $^{-1}$	(q_i) Pers. \cdot m $^{-1}$ \cdot s $^{-1}$	(v_i) m \cdot s $^{-1}$	(q_i) Pers. \cdot m $^{-1}$ \cdot s $^{-1}$	(v_i) m \cdot s $^{-1}$	(q_i) Pers. \cdot m $^{-1}$ \cdot s $^{-1}$
0,1	1,33	0,13	1,58	0,16	1,00	0,10	0,91	0,09
0,5	1,16	0,58	1,38	0,70	0,93	0,46	0,83	0,42
1	0,95	0,95	1,16	1,16	0,85	0,85	0,70	0,70
2	0,66	1,32	0,85	1,70	0,66	1,33	0,46	0,93
3	0,50	1,50	0,65	1,95	0,50	1,50	0,35	1,05
4	0,41	1,66	0,51	2,06	0,36	1,46	0,30	1,20
5	0,36	1,83	0,43	2,16	0,26	1,33	0,28	1,41
6	0,33	2,00	0,36	2,20	0,20	1,20	0,26	1,55
7	0,30	2,10	0,31	2,21	0,14	1,00	0,22	1,51
8	0,25	2,00	0,26	2,13	0,11	0,93	0,18	1,46
9,2	0,17	1,61	0,19	1,76	0,10	0,91	0,13	1,23

Mit $D_{A\text{ Ga},1} \approx 9,20 \text{ Pers./m}^2$ folgt aus Tabelle 1:

$$\begin{aligned} u_{A\text{ Ga},1} &= 0,17 \text{ m/s} \\ q_{A\text{ Ga},1} &= 1,61 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \\ t_{A\text{ Ga},1} &= L_{A\text{ Ga},1} \div u_{A\text{ Ga},1} = 5,90 \div 0,17 = 34,70 \\ & \approx \underline{\underline{35,00 \text{ s}}} \end{aligned}$$

Die Kontrolle auf Durchlassfähigkeit dient zur Aufdeckung von Stauungen. Im Groben handelt es sich um eine Gegenüberstellung der Durchlassfähigkeiten des betrachteten Bereichs mit dem nächsten, das heißt dem Folgebereich. Ist die Durchlassfähigkeit des folgenden Bereichs geringer als die des aktuellen, ist eine Staubildung anzusetzen.

Kontrolle auf Bewegungsverzögerung von der Tribüne zur Treppe:

$$q_{A\text{ Tr},2} = q_{A\text{ Ga},1} \times b_{A\text{ Ga},1} \div b_{A\text{ Tr},2} = 1,61 \times 0,4 \div 1,20 = 0,53 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$$

Für Treppe aufwärts begangen:

$$\begin{aligned} q_{A\text{ Tr},2} &= 0,53 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \leq q_{\text{max}} = 1,55 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \\ &\Rightarrow \text{keine Staubildung} \end{aligned}$$

Für den Übergang von einem Tribünengang auf die Tribünentreppe ist damit nachgewiesen, dass es zu keiner Staubildung kommt. Dieser hier sehr detailliert dargestellte Rechenschritt, wiederholt sich unabhängig von verschiedenen Gebäudeteilen, wie z. B. Treppen, Gängen, Türen etc. und wird im Folgenden verkürzt dargestellt. Das beinhaltet auch die Indizierungen der einzelnen Wegparameter. Der Index des jeweiligen Abschnitts wird nun in der Überschrift vorweggestellt und kann damit auf alle folgenden Parameter angewandt werden, wenn diese nicht anders benannt sind.

Laufzeit für den Wegabschnitt (A Tr.2)

$$\begin{aligned}
 L &= 2,10 \text{ m} \\
 b &= 1,20 \text{ m} \\
 A &= 2,10 \times 1,20 = 2,52 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Festlegung: Sobald die erste Person aus jeder Reihe die Tribümentreppe betritt, stellt sich die maximale Bewegungsintensität für die Treppe, aufwärts, ein.

Daraus folgt: $q_{\max} = 1,55 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$ und $v = 0,26 \text{ m/s}$ (aus Tab. 1)

$$\begin{aligned}
 t_{\text{Lauf}} &= L \div v = 2,1 \div 0,26 = 8,08 \text{ s} \\
 &\approx \underline{\underline{9,00 \text{ s}}}
 \end{aligned}$$

Kontrolle auf Bewegungsverzögerung im Übergang von der Tribümentreppe zum Tribünenzugang:

$$\begin{aligned}
 q_{A \text{ Fl.3}} &= q \times b \div b_{A \text{ Fl.3}} \\
 &= 1,55 \times 1,20 \div 2,00 = 0,93 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \\
 q_{A \text{ Fl.3}} &= 0,93 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \leq q_{\max} = 2,10 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \\
 &\Rightarrow \text{keine Staubildung}
 \end{aligned}$$

Laufzeit für den Wegabschnitt (A Fl.3)

$$\begin{aligned}
 L &= 19,00 \text{ m} \\
 b &= 2,00 \text{ m} \\
 A &= 19,00 \times 2,00 = 38,00 \text{ m}^2 \\
 \text{Anzahl Personen, N} &= 100 \text{ Pers.}
 \end{aligned}$$

Daraus folgt eine Personendichte:

$$\begin{aligned}
 D &= (N \times c) \div A = 100 \times 1,13 \div 38,00 = 2,97 \text{ Pers./m}^2 \\
 D &\approx 3,00 \text{ Pers./m}^2
 \end{aligned}$$

$\Rightarrow q = 1,50 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$ und $v = 0,50 \text{ m/s}$

$$t_{\text{Lauf}} = L \div v = 19,00 \div 0,50 = \underline{\underline{38,00 \text{ s}}}$$

Kontrolle auf Bewegungsverzögerung vom Tribünenzugang zur Ausgangstür T_A :

$$q_{TA \text{ Ausg.}} = q \times b \div b_{TA \text{ Ausg.}} = 1,50 \times 2,00 \div 1,17 = 2,56 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$$

$$q_{TA \text{ Ausg.}} = 2,56 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \geq q_{\max} = 2,21 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$$

⇒ **Staubildung**

Die Kontrolle hat eine Staubildung zum Resultat, folglich kommt es zu einer Verzögerung. Diese muss zeitlich erfasst werden und auf die Laufzeit der letzten Person in diesem Abschnitt addiert werden. Besagtes geschieht über die Durchlassfähigkeiten der einzelnen Wegabschnitte „Q“.

Berechnung der Stauzeit vor der Ausgangstür T_A :

$$Q = q \times b = 1,50 \times 2,00 = 3,00 \text{ Pers./s}$$

$$Q_{TA \text{ Ausg.}} = q_{TA \text{ Ausg.}} \times b_{TA \text{ Ausg.}} = 1,76 \times 1,17 = 2,06 \text{ Pers./s}$$

$$\begin{aligned} t_{\text{Stau } TA} &= N (1 \div Q_{TA \text{ Ausg.}} - 1 \div Q_{A \text{ Fl.3}}) \\ &= 100 (1 \div 2,06 - 1 \div 3,00) = 15,21 \text{ s} \\ &\approx \underline{\underline{16,00 \text{ s}}} \end{aligned}$$

Demnach beträgt die Stauzeit an der Ausgangstür „ T_A “ 16 Sekunden.

Durch Addition aller Lauf- und Stauzeiten erhalten wir die erforderliche Evakuierungsdauer für den Sektor „A“.

$$\begin{aligned} t_{A \text{ Ges.}} &= t_{A \text{ Ga.1}} + t_{A \text{ Tr.2}} + t_{A \text{ Fl.3}} + t_{\text{Stau } TA} \\ &= 35,00 + 9,00 + 38,00 + 16,00 = \underline{\underline{98 \text{ s}}} \end{aligned}$$

2.3.5.2 Personenstrom „B“

Es handelt sich hier um 50 Personen, die aus dem südwestlichen Hallenbereich über den Notausgang „B“ evakuiert werden.

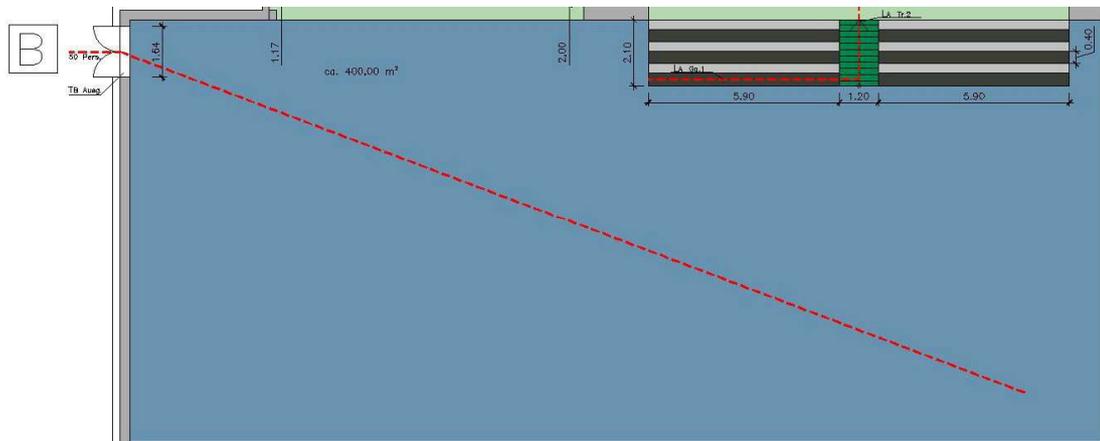


Abbildung 2.12: Detailplan zu Personenstrom „B“.

Laufzeit für das Verlassen des Hallenabschnittes über den Notausgang „B“ (T_B)

Weglänge, L_{\max}		= 32,00 m
Breite, b		= 13,50 m
Abschnittsfläche, A	= $30,00 \times 13,50$	= 405,00 m ²
Anzahl Personen, N		= 50 Pers.
D	= $50 \times 1,13 \div 405,00$	= 0,14 Pers./m ²
		$\approx 0,50$ Pers./m ²

$$\Rightarrow q = 0,58 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \text{ und } v = 1,16 \text{ m/s}$$

$$t_{\text{Lauf}} = 32,00 \div 1,16 \quad \underline{\underline{\approx 28,00 \text{ s}}}$$

Kontrolle auf Bewegungsverzögerung an der Ausgangstür T_B :

$$q_{T_B \text{ Ausg.}} = 0,58 \times 13,5 \div 1,64 = 4,77 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$$

$$q_{T_B \text{ Ausg.}} = 4,77 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \geq q_{\max} = 2,21 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$$

\Rightarrow **Staubildung**

Berechnung der Stauzeit vor der Ausgangstür T_B :

$$Q = 0,58 \times 13,5 = 7,83 \text{ Pers./s}$$

$$Q_{TB \text{ Ausg.}} = q_{TB \text{ Ausg.}} \times b_{TB \text{ Ausg.}} = 1,76 \times 1,64 = 2,28 \text{ Pers./s}$$

$$t_{\text{Stau TB}} = 50 (1 \div 2,28 - 1 \div 7,83) \approx \underline{\underline{16,00 \text{ s}}}$$

$$t_B \text{ Ges.} = 28,00 + 16,00 = \underline{\underline{44,00 \text{ s}}}$$

2.3.5.3 Personenstrom „C“

Es handelt sich hier um 75 Personen, die aus dem ersten Obergeschoss über die südöstliche Treppe und anschließend den Gebäudeausgang „C“ evakuiert werden.

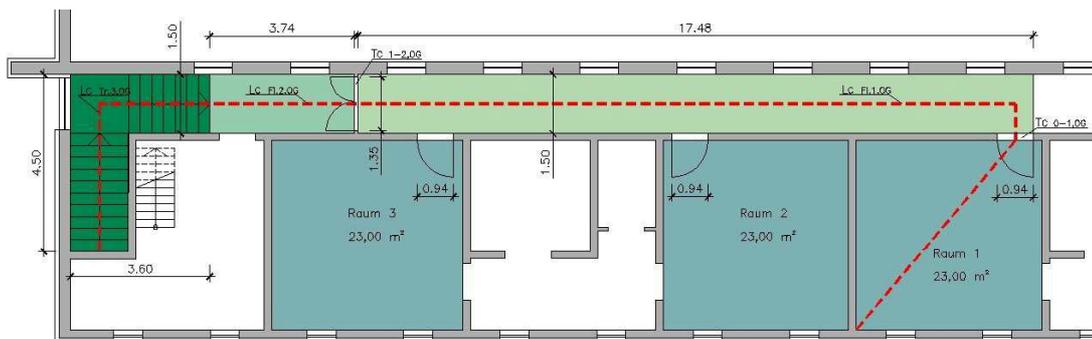


Abbildung 2.13: Detailplan Obergeschoss zu Personenstrom „C“.

Beginnend wird ein Raum des Obergeschosses betrachtet.

$$\text{Weglänge, } L = 6,30 \text{ m}$$

$$\text{Breite, } b = 4,80 \text{ m}$$

$$\text{Abschnittsfläche, } A = 23,00 \text{ m}^2$$

$$\text{Anzahl Personen, } N = 25 \text{ Pers.}$$

$$D = 25 \times 1,13 \div 23,00 \approx 2,00 \text{ Pers./m}^2$$

$$\Rightarrow q = 1,32 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \text{ und } v = 0,66 \text{ m/s}$$

$$t_{\text{Lauf}} = 6,30 \div 0,66 \approx \underline{\underline{10,00 \text{ s}}}$$

Kontrolle auf Bewegungsverzögerung an der Tür $T_{C\ 0-1,OG}$:

$$q_{TC\ 0-1,OG} = 1,32 \times 4,80 \div 0,94 = 6,74 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$$

$$q_{TC\ 0-1,OG} = 6,74 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \geq q_{\max} = 2,21 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$$

⇒ **Staubildung**

$$Q = 1,32 \times 4,80 = 6,34 \text{ Pers.}/\text{s}$$

$$Q_{TB\ \text{Ausg.}} = 1,76 \times 1,64 = 1,65 \text{ Pers.}/\text{s}$$

$$t_{\text{Stau } TC\ 0-1,OG} = 25 (1 \div 1,65 - 1 \div 6,34) \approx \underline{\underline{12,00 \text{ s}}}$$

Laufzeit für den Wegabschnitt (C Fl.1,OG)

Es gilt die Annahme, dass alle Personen aus den Räumen in den Flurabschnitt „C Fl.1,OG“ getreten sind und sich die Personenzahl auf 75 erhöht.

$$L = 17,48 \text{ m}$$

$$b = 1,50 \text{ m}$$

$$A = 26,22 \text{ m}^2$$

$$\text{Anzahl Personen, } N = 75 \text{ Pers.}$$

$$D_{LC\ \text{Fl.1,OG}} = 75 \times 1,13 \div 26,22 \approx 4,00 \text{ Pers.}/\text{m}^2$$

$$\Rightarrow q = 1,66 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \text{ und } v = 0,41 \text{ m/s}$$

$$t_{\text{Lauf}} = 17,48 \div 0,41 \approx \underline{\underline{43,00 \text{ s}}}$$

Kontrolle auf Bewegungsverzögerung an der Tür $T_{C\ 1-2,OG}$:

$$q_{TC\ 1-2,OG} = 1,66 \times 1,50 \div 1,35 = 1,84 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$$

$$q_{TC\ 1-2,OG} = 1,84 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \leq q_{\max} = 2,21 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$$

⇒ keine Staubildung

In diesem Fall entsteht kein Stau vor der Tür, die den Flurbereich „C Fl.1,OG“ vom Flurbereich „C Fl.2,OG“ trennt. Bedingt durch die gleiche Breite des Flures vor und nach der Tür darf angenommen werden, dass sich nach Passieren der Engstelle wieder die gleiche Bewegungsintensität „q“ einstellt. Daraus folgt, dass der Personenstrom ebenfalls über die gleiche Laufgeschwindigkeit verfügt.

$$\Rightarrow q = 1,66 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \text{ und } v = 0,41 \text{ m/s}$$

$$L_{C \text{ Fl.2,OG}} = 3,74 \text{ m}$$

$$t_{\text{Lauf}} = 3,74 \div 0,41 \approx \underline{\underline{10,00 \text{ s}}}$$

Kontrolle auf Bewegungsverzögerung an der Treppe $C_{\text{Tr.3,OG}}$:

$$q_{C \text{ Tr.3,OG}} = 1,66 \times 1,50 \div 1,50 = 1,66 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$$

$$q_{C \text{ Tr.3,OG}} = 1,66 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \geq q_{\text{max}} = 1,50 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$$

\Rightarrow **Staubildung**

Stauzeitberechnung für Treppe abwärts:

$$Q = 1,66 \times 1,50 = 2,49 \text{ Pers./s}$$

$$Q_{C \text{ Tr.3,OG}} = 0,91 \times 1,50 = 1,37 \text{ Pers./s}$$

$$t_{\text{Stau } C \text{ Tr.3,OG}} = 75 (1 \div 1,37 - 1 \div 2,49) \approx \underline{\underline{25,00 \text{ s}}}$$

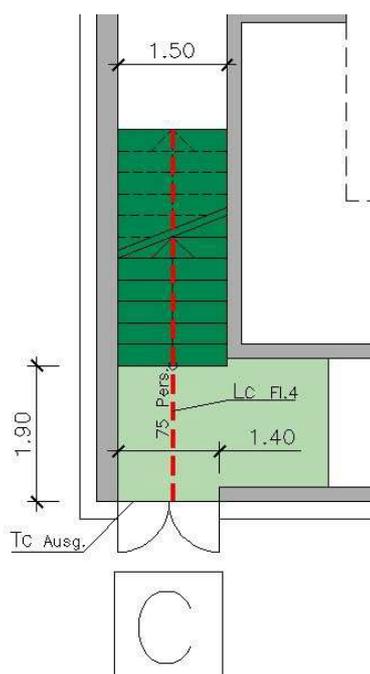


Abbildung 2.14: Detailplan Erdgeschoss zu Personenstrom „C“.

Laufzeit für den Wegabschnitt (C Tr.3,OG)

Im Anschluss an den Stau zur Treppe, ins Erdgeschoss, sinkt die Personendichte ab und wird mit $D = 3,00 \text{ Pers./m}^2$ angenommen und für die weitere Berechnung angesetzt.

$$\Rightarrow q = 1,50 \text{ Pers./}(\text{m} \times \text{s}) \text{ und } v = 0,50 \text{ m/s}$$

$$L = 6,60 \text{ m}$$

Mit einem Treppensteigungswinkel von ca. 32° ergibt sich:

$$L' = 6,60 \div \cos 32^\circ \approx 7,80 \text{ m}$$

$$t_{\text{Lauf}} = 7,80 \div 0,50 \approx \underline{\underline{16,00 \text{ s}}}$$

Kontrolle auf Bewegungsverzögerung zum Gang im Erdgeschoss $C_{\text{Fl.4}}$:

$$q_{\text{CFl.4}} = 1,50 \times 1,50 \div 1,50 = 1,50 \text{ Pers./}(\text{m} \times \text{s})$$

$$q_{\text{CFl.4}} = 1,50 \text{ Pers./}(\text{m} \times \text{s}) \leq q_{\text{max}} = 2,10 \text{ Pers./}(\text{m} \times \text{s})$$

\Rightarrow keine Staubildung

Laufzeit für den Wegabschnitt (C Fl.4)

$$L = 1,90 \text{ m}$$

$$B = 1,50 \text{ m}$$

$$\text{Anzahl Personen, N} = 75 \text{ Pers.}$$

$$q = 1,50 \text{ Pers./}(\text{m} \times \text{s}) \text{ und } v = 0,50 \text{ m/s}$$

$$t_{\text{Lauf}} = 1,90 \div 0,50 \approx \underline{\underline{4,00 \text{ s}}}$$

Kontrolle auf Bewegungsverzögerung zur Gebäudeausgangstür $T_{\text{C Ausg.}}$:

$$q_{\text{CFl.4}} = 1,50 \times 1,50 \div 1,40 = 1,60 \text{ Pers./}(\text{m} \times \text{s})$$

$$q_{\text{CFl.4}} = 1,50 \text{ Pers./}(\text{m} \times \text{s}) \leq q_{\text{max}} = 2,10 \text{ Pers./}(\text{m} \times \text{s})$$

\Rightarrow keine Staubildung

$$t_{\text{C Ges.}} = 10,00 + 12,00 + 43,00 + 10,00 + 25,00 + 16,00 + 4,00 = \underline{\underline{120,00 \text{ s}}}$$

2.3.5.4 Personenstrom „D“

Es handelt sich hier um 50 Personen, die aus dem südöstlichen Hallenbereich über den Notausgang „D“ evakuiert werden.

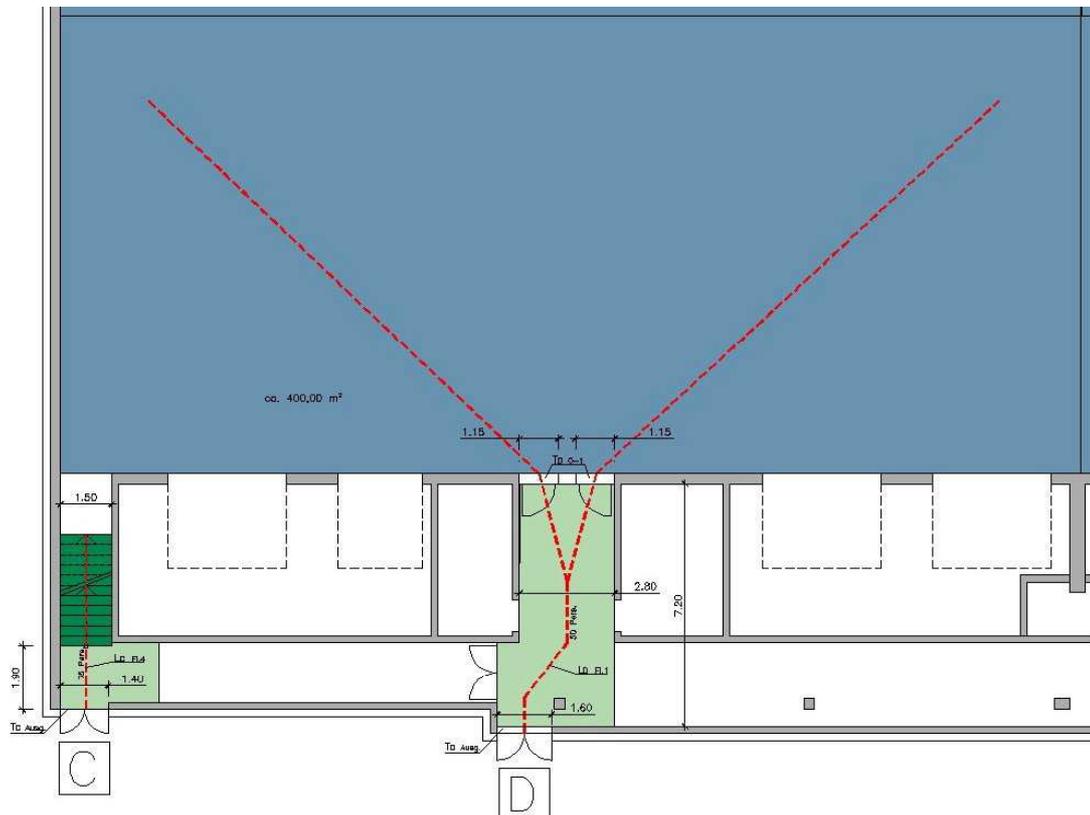


Abbildung 2.15: Detailplan zu Personenstrom „D“.

Laufzeit für das Verlassen des Hallenabschnittes über die Hallenausgangstüren (T_D 0.1)

Weglänge, L_{\max}		= 20,00 m
Breite, b		= 30,00 m
Abschnittsfläche, A	= $30,00 \times 13,50$	= 405,00 m ²
Anzahl Personen, N		= 50 Pers.
D	= $50 \times 1,13 \div 405,00$	= 0,14 Pers./m ² ≈ 0,50 Pers./m ²

$$\Rightarrow q = 0,58 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \text{ und } v = 1,16 \text{ m/s}$$

$$t_{\text{Lauf}} = 20,00 \div 1,16 \quad \underline{\underline{\approx 18,00 \text{ s}}}$$

Kontrolle auf Bewegungsverzögerung an der Hallentür:

$$q_{TD\ 0-1} = 0,58 \times 30,00 \div 2 \times 1,15 = 7,57 \text{ Pers./}(\text{m} \times \text{s})$$

$$q_{TD\ 0-1} = 7,57 \text{ Pers./}(\text{m} \times \text{s}) \geq q_{\max} = 2,21 \text{ Pers./}(\text{m} \times \text{s})$$

⇒ **Staubildung**

Berechnung der Stauzeit vor der Ausgangstür $T_{TD\ 0-1}$:

$$Q = 0,58 \times 30,00 = 17,40 \text{ Pers./s}$$

$$Q_{TD\ 0-1} = q_{TD\ 0-1} \times b_{TD\ 0-1} = 1,76 \times (2 \times 1,15) = 4,05 \text{ Pers./s}$$

$$t_{\text{Stau } TD\ 0-1} = 50 (1 \div 4,05 - 1 \div 17,40) \approx \underline{\underline{10,00 \text{ s}}}$$

Laufzeit für den Wegabschnitt (D Fl.1)

$$\text{Weglänge, } L_{\max} = 7,20 \text{ m}$$

$$\text{Breite, } b = 2,80 \text{ m}$$

$$\text{Abschnittsfläche, } A = 30,00 \times 13,50 = 20,16 \text{ m}^2$$

$$\text{Anzahl Personen, } N = 50 \text{ Pers.}$$

$$D = 50 \times 1,13 \div 20,16 = 2,48 \text{ Pers./m}^2$$

$$\approx 3,00 \text{ Pers./m}^2$$

$$q = 1,50 \text{ Pers./}(\text{m} \times \text{s}) \text{ und } v = 0,50 \text{ m/s}$$

$$t_{\text{Lauf}} = 7,20 \div 0,50 \approx \underline{\underline{15,00 \text{ s}}}$$

Kontrolle auf Bewegungsverzögerung an der Gebäudeausgangstür $T_{D\ \text{Ausg.}}$:

$$q_{LD\ Fl.1} = 1,50 \times 2,80 \div 1,60 = 2,63 \text{ Pers./}(\text{m} \times \text{s})$$

$$q_{LD\ Fl.1} = 2,63 \text{ Pers./}(\text{m} \times \text{s}) \geq q_{\max} = 2,21 \text{ Pers./}(\text{m} \times \text{s})$$

⇒ **Staubildung**

Berechnung der Stauzeit vor der Gebäudeausgangstür $T_{D \text{ Ausg.}}$:

$$Q = 1,50 \times 2,80 = 4,20 \text{ Pers./s}$$

$$Q_{TD \text{ Ausg.}} = 1,76 \times 1,60 = 2,81 \text{ Pers./s}$$

$$t_{\text{Stau } TD \text{ Ausg.}} = 50 (1 \div 2,81 - 1 \div 4,20) \approx \underline{\underline{6,00 \text{ s}}}$$

$$t_{D \text{ Ges.}} = 18,00 + 10,00 + 15,00 + 6,00 = \underline{\underline{49,00 \text{ s}}}$$

2.3.5.5 Personenstrom „E“

Es handelt sich hier um 50 Personen, die aus dem nordöstlichen Hallenbereich über den Notausgang „E“ evakuiert werden.

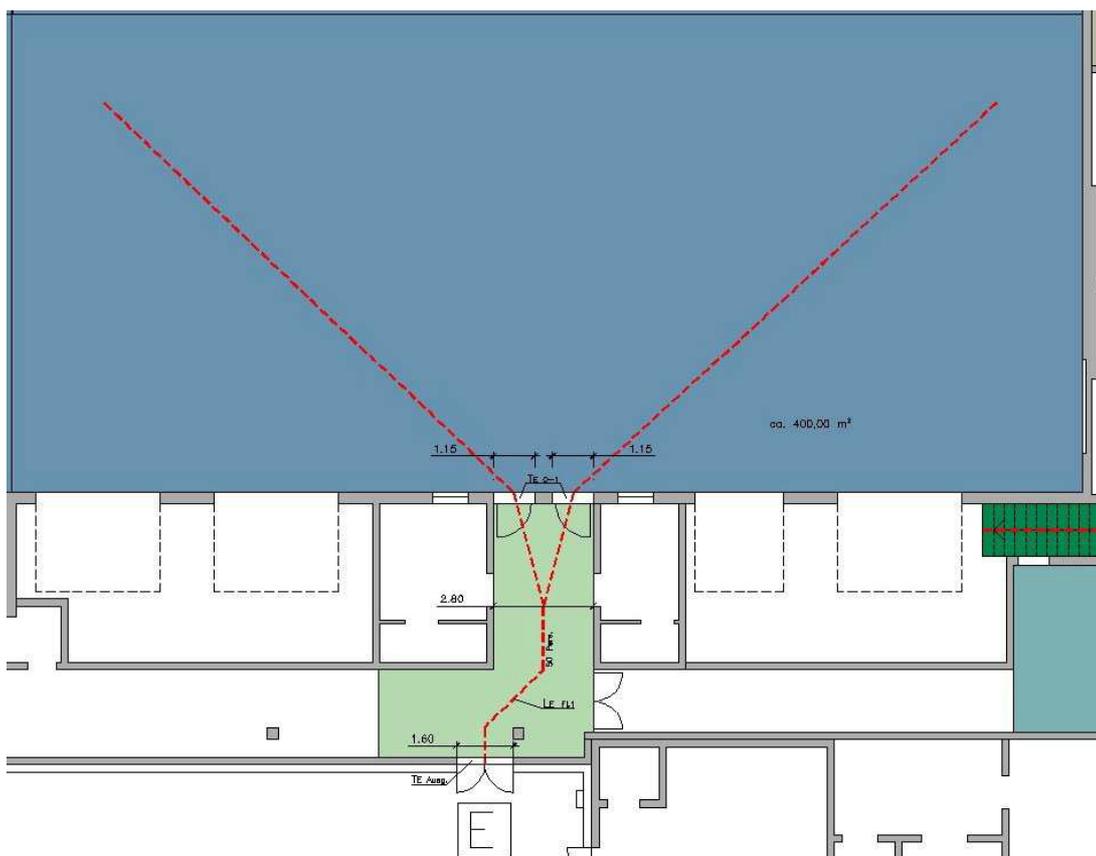


Abbildung 2.16: Detailplan zu Personenstrom „E“.

Hinsichtlich des sehr ähnlichen Rettungsweges und der gleichen Personenzahl wie Abschnitt „D“, kann hier eine annähernd identische Evakuierungszeit für Abschnitt „E“ angenommen werden. Demzufolge ist eine Berechnung nicht nötig. Die Gesamtzeit zur Räumung wird, aufgrund der etwas ungünstigeren Grundrissgeometrie gegenüber Abschnitt „D“, mit $t_{E \text{ Ges.}} \approx \underline{\underline{55,00 \text{ s}}}$ angenommen.

2.3.5.6 Personenstrom „F“

Es handelt sich hier um 75 Personen, die aus dem ersten Obergeschoss über die nordöstliche Treppe ins Erdgeschoss gelangen und weitere 25 Personen, aus dem Mehrzweckraum im Erdgeschoss. Im Anschluss vereinigen sich beide Personenströme zu insgesamt 100 Personen und werden über den Gebäudeausgang „F“ evakuiert.

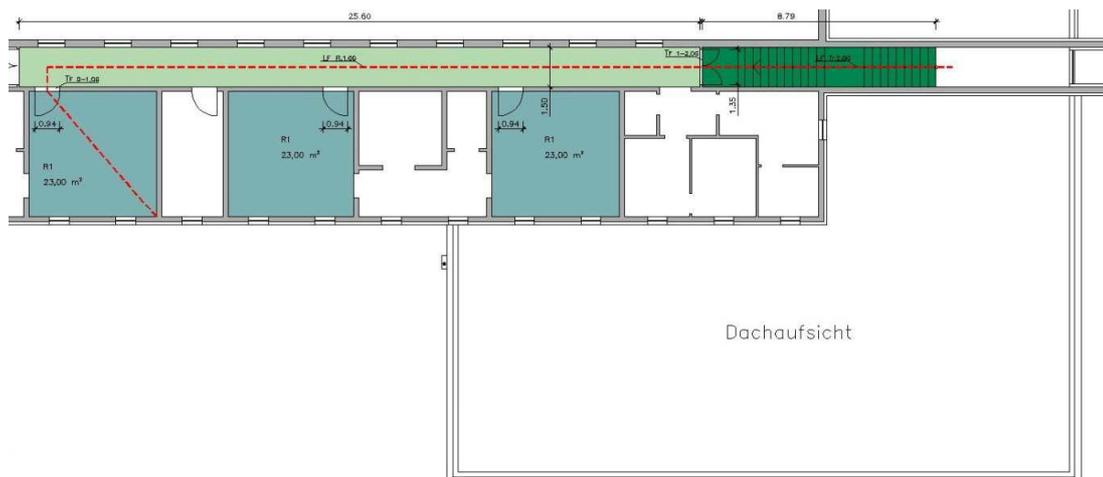


Abbildung 2.17: Detailplan Obergeschoss zu Personenstrom „F“.

Analog zu Abschnitt „C“:

Weglänge, L	= 6,30 m
Breite, b	= 4,80 m
Abschnittsfläche, A	= 23,00 m ²
Anzahl Personen, N	= 25 Pers.
D	= $25 \times 1,13 \div 23,00 \approx 2,00 \text{ Pers./m}^2$

$$\Rightarrow q = 1,32 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \text{ und } v = 0,66 \text{ m/s}$$

$$t_{\text{Lauf}} = 6,30 \div 0,66 \quad \approx \underline{\underline{10,00 \text{ s}}}$$

Kontrolle auf Bewegungsverzögerung an der Tür $T_{F0-1,OG}$:

$$q_{TC\ 0-1,OG} = 1,32 \times 4,80 \div 0,94 = 6,74 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$$

$$q_{TC\ 0-1,OG} = 6,74 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \quad \geq \quad q_{\text{max}} = 2,21 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$$

\Rightarrow **Staubildung**

$$Q = 1,32 \times 4,80 = 6,34 \text{ Pers./s}$$

$$Q_{TB\ \text{Ausg.}} = 1,76 \times 1,64 = 2,89 \text{ Pers./s}$$

$$t_{\text{Stau } TC0-1,OG} = 25 (1 \div 1,65 - 1 \div 6,34) \quad \approx \underline{\underline{5,00 \text{ s}}}$$

Laufzeit für den Wegabschnitt (F Fl.1,OG)

Es gilt die Annahme, dass alle Personen aus den Räumen in den Flurabschnitt „C Fl.1,OG“ getreten sind und sich die Personenzahl auf 75 erhöht.

$$\text{Weglänge, } L = 25,60 \text{ m}$$

$$\text{Breite, } b = 1,50 \text{ m}$$

$$\text{Abschnittsfläche, } A = 38,40 \text{ m}^2$$

$$\text{Anzahl Personen, } N = 75 \text{ Pers.}$$

$$D \approx 3,00 \text{ Pers./m}^2$$

$$\Rightarrow q = 1,50 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \text{ und } v = 0,50 \text{ m/s}$$

$$t_{\text{Lauf}} = 25,6 \div 0,50 \quad \approx \underline{\underline{52,00 \text{ s}}}$$

Kontrolle auf Bewegungsverzögerung an der Tür $T_{F 1-2,OG}$:

$$q_{F 1-2,OG} = 1,50 \times 1,50 \div 1,35 = 1,67 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$$

$$q_{TF 1-2,OG} = 1,674 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \leq q_{\max} = 2,21 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$$

⇒ keine Staubildung

Kontrolle auf Bewegungsverzögerung an der Treppe (F Tr.2,OG):

$$q_{F Tr.2,OG} = 1,50 \times 1,50 \div 1,50 = 1,50 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$$

$$q_{F Tr.2,OG} = 1,50 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \leq q_{\max} = 1,50 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$$

⇒ keine Staubildung

Laufzeit für den Wegabschnitt (F Tr2,OG)

Mit $q = 1,50 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$ und $v = 0,50 \text{ m/s}$:

$$L = 8,79 \text{ m}$$

Mit einem Treppensteigungswinkel von ca. 32° ergibt sich:

$$L' = 8,78 \div \cos 32^\circ \approx 10,36 \text{ m}$$

$$t_{\text{Lauf}} = 10,36 \div 0,50 \approx \underline{\underline{21,00 \text{ s}}}$$

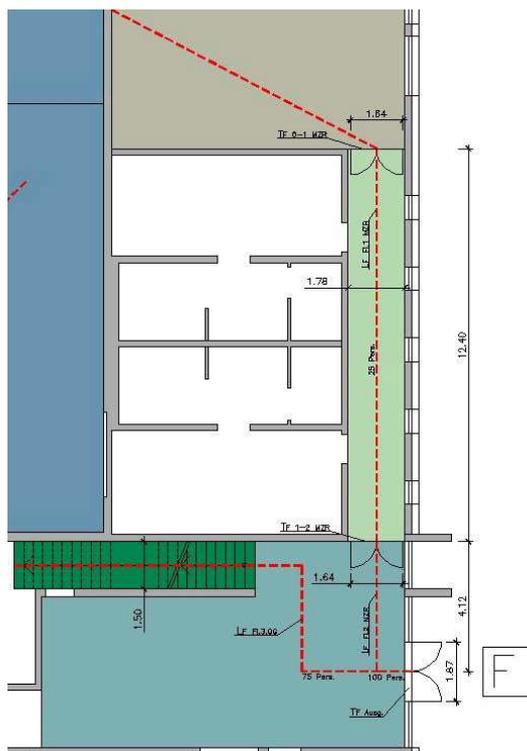


Abbildung 2.18: Detailplan Erdgeschoss zu Personenstrom „F“ aus dem Obergeschoss und dem Mehrzweckraum.

Laufzeit für den Wegabschnitt (F Fl.3,OG)

$$L \approx 5,00 \text{ m}$$

$$q = 1,50 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \text{ und } v = 0,50 \text{ m/s}$$

$$t_{\text{Lauf}} = 5,00 \div 0,50 \approx \underline{\underline{10,00 \text{ s}}}$$

An dieser Stelle erfolgt zuerst die Berechnung für den anderen Personenstrom, welcher sich ebenfalls zum Gebäudeausgang „F“ bewegt. Zu diesem Zweck wird der Mehrzweckraum, in dem sich 50 Personen befinden, in je 25 Personen auf der halben Grundrissfläche unterteilt.

Daraus folgt:

$$\text{Weglänge, } L = 9,10 \text{ m}$$

$$\text{Breite, } b = 9,16 \text{ m}$$

$$\text{Abschnittsfläche, } A \approx 35,00 \text{ m}^2$$

$$\text{Anzahl Personen, } N = 25 \text{ Pers.}$$

$$D = 25 \times 1,13 \div 35,00 \approx 1,00 \text{ Pers.}/\text{m}^2$$

$$\Rightarrow q = 0,95 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \text{ und } v = 0,95 \text{ m/s}$$

$$t_{\text{Lauf}} = 9,10 \div 0,95 \approx \underline{\underline{10,00 \text{ s}}}$$

Kontrolle auf Bewegungsverzögerung an der Tür (F 0-1,MZR):

$$q = 0,95 \times 9,16 \div 1,64 = 5,31 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$$

$$q = 5,31 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \geq q_{\text{max}} = 2,21 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$$

\Rightarrow **Staubildung**

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{MZR}} &= 0,95 \times 9,16 &= 8,71 \text{ Pers./s} \\
 Q_{\text{TF o-1,MZR}} &= 1,76 \times 1,64 &= 2,89 \text{ Pers./s} \\
 t_{\text{Stau TCo-1,OG}} &= 25 (1 \div 2,89 - 1 \div 8,71) &\approx \underline{\underline{6,00 \text{ s}}}
 \end{aligned}$$

Laufzeit für den Wegabschnitt (F Fl.1 MZR)

$$\begin{aligned}
 \text{Weglänge, L} &= 12,40 \text{ m} \\
 \text{Breite, b} &= 1,78 \text{ m} \\
 \text{Abschnittsfläche, A} &= 22,07 \text{ m}^2 \\
 \text{Anzahl Personen, N} &= 25 \text{ Pers.} \\
 \text{D} &\approx 2,00 \text{ Pers./m}^2 \\
 \Rightarrow q = 1,32 \text{ Pers./}(\text{m} \times \text{s}) \text{ und } v = 0,66 \text{ m/s} \\
 t_{\text{Lauf}} &= 12,4 \div 0,66 &\approx \underline{\underline{19,00 \text{ s}}}
 \end{aligned}$$

Kontrolle auf Bewegungsverzögerung an der Tür F_{1-2} MZR:

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{TF } 1-2 \text{ MZR}} &= 1,32 \times 1,78 \div 1,64 &= 1,43 \text{ Pers./}(\text{m} \times \text{s}) \\
 q_{\text{TF } 1-2 \text{ MZR}} &= 1,43 \text{ Pers./}(\text{m} \times \text{s}) \leq q_{\text{max}} = 2,21 \text{ Pers./}(\text{m} \times \text{s}) \\
 \Rightarrow &\text{keine Staubildung}
 \end{aligned}$$

Laufzeit für den Wegabschnitt (F Fl.2 MZR)

$$\begin{aligned}
 \text{L} &\approx 5,00 \text{ m} \\
 q = 1,32 \text{ Pers./}(\text{m} \times \text{s}) \text{ und } v = 0,66 \text{ m/s} \\
 t_{\text{Lauf}} &= 5,00 \div 0,66 &\approx \underline{\underline{8,00 \text{ s}}}
 \end{aligned}$$

An dieser Stelle würde nun die Vereinigung der beiden Personenströme folgen. Allerdings ist die Fläche des Flurbereichs groß genug, um das bisherige Verfahren, wie vorher gezeigt, fortsetzen zu können. Dieses bringt bei genauerer Betrachtung die höheren Evakuierungszeiten bzw. die schlechteren Werte und sollte der Personenstromvereinigung vorgezogen werden. Um aber die Vereinigung, rechnerisch einmal zu demonstrieren, wird diese hier eingeschoben. Die Ergebnisse fließen jedoch nicht in die Gesamtevakuierungszeit für Ausgang „F“ ein.

Personenstromvereinigung vor dem Ausgang „F“, nur zur Veranschaulichung:

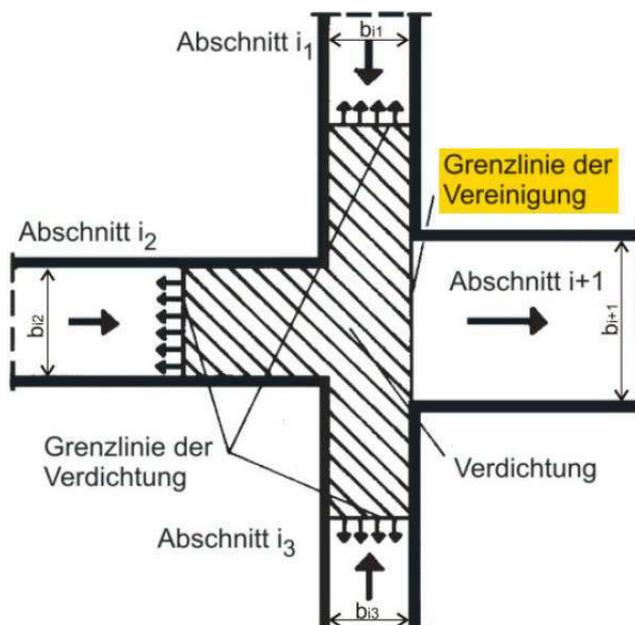


Abbildung 2.19: Allgemeine Darstellung zur Personenstromvereinigung. [5]

Es wird überprüft, ob die Durchlassfähigkeit an der *Grenzlinie der Vereinigung* mindestens gleich oder größer als die Summe der Durchlassfähigkeiten der beiden Gänge von Personenstrom „1“ und „2“ ist.

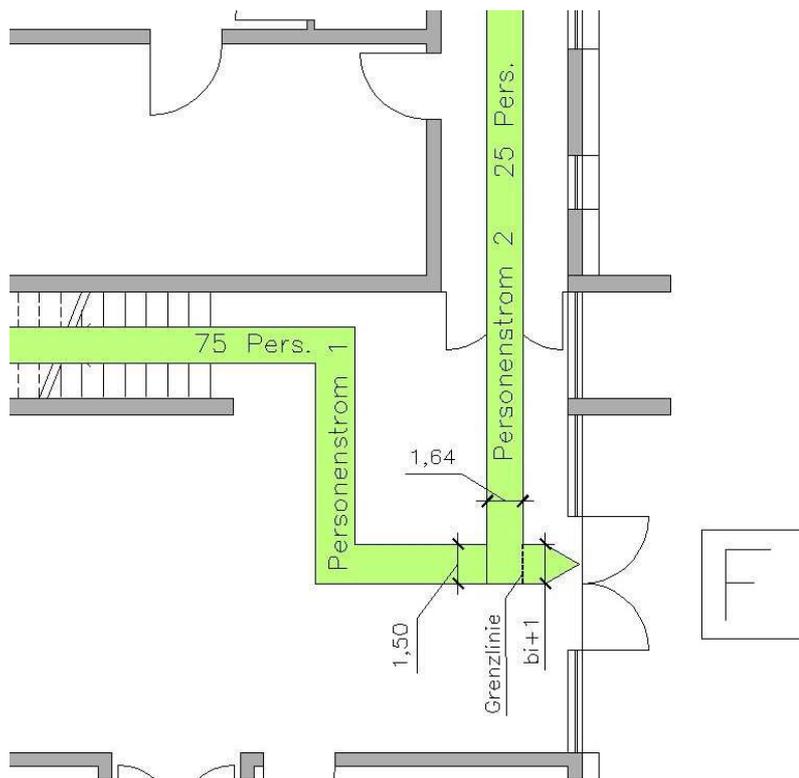


Abbildung 2.20: Darstellung der Personenstromvereinigung vor dem Ausgang „F“.

Personenstrom 1:

b_1	= 1,50 m
N_1	= 75 Pers.
q_1	= 1,50 Pers./ $(m \times s)$

Personenstrom 2:

b_2	= 1,64 m
N_2	= 25 Pers.
q_2	= 1,32 Pers./ $(m \times s)$

Damit ergeben sich folgende Werte für die Gebäudeausgangstür T_F :

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= q_1 \times b_1 &= 1,50 \times 1,50 &= 2,25 \text{ Pers./s} \\
 Q_2 &= q_2 \times b_2 &= 1,32 \times 1,64 &= 2,16 \text{ Pers./s} \\
 \Sigma Q &= Q_1 + Q_2 &= 2,25 + 2,16 &= 4,41 \text{ Pers./s} \\
 q_{TF \text{ Ausg.}} &= \Sigma Q \div b_{TF \text{ Ausg.}} &= 4,41 \div 1,87 &= 2,36 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \\
 q_{TF \text{ Ausg.}} &= 2,36 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) &\geq & q_{\max} = 2,21 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})
 \end{aligned}$$

⇒ **Staubildung**

$$\begin{aligned}
 Q_{TF \text{ Ausg.}} &= 1,76 \times 1,87 &= 3,29 \text{ Pers./s} \\
 t_{\text{Stau } TF \text{ Ausg.}} &= (75 + 25) (1 \div 3,29 - 1 \div 4,41) &\approx \underline{\underline{8,00 \text{ s}}}
 \end{aligned}$$

Die mit der Personenstromvereinigung zu erwartende Verzögerung liegt bei acht Sekunden. Diese wird nicht in die Gesamtevakuierungszeit über die Ausgangstür „F“ einbezogen.

Ermittlung der Laufzeit durch die Tür (TF Ausg.)

Nachdem die Laufzeiten für diesen Flurabschnitt bereits bekannt sind, 8,00 Sekunden für den *Wegabschnitt (F Fl.2 MZR)* und 10,00 Sekunden für den *Wegabschnitt (F Fl.3,OG)*, fehlt lediglich die Kontrolle auf Stau vor der Ausgangstür „F“ und ggf. die Stauzeitermittlung.

Annahme: Es befinden sich alle 100 Personen aus den Strömen „1“ und „2“ gleichzeitig im Flur.

$$\begin{aligned}
 \text{Breite, } b &= 6,50 \text{ m} \\
 \text{Abschnittsfläche, } A &= 30,00 \text{ m}^2 \\
 \text{Anzahl Personen, } N &= 100 \text{ Pers.} \\
 D &\approx 4,00 \text{ Pers./m}^2
 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow q = 1,66 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \text{ und } v = 0,41 \text{ m/s}$$

Kontrolle auf Bewegungsverzögerung an der Tür (F Ausg.):

$$q_{\text{TF Ausg.}} = 1,66 \times 6,50 \div 1,87 = 5,77 \text{ Pers./}(\text{m} \times \text{s})$$

$$q_{\text{TF Ausg.}} = 5,77 \text{ Pers./}(\text{m} \times \text{s}) \geq q_{\text{max}} = 2,21 \text{ Pers./}(\text{m} \times \text{s})$$

⇒ **Staubildung**

$$Q = 1,66 \times 6,50 = 10,79 \text{ Pers./s}$$

$$Q_{\text{TF Ausg.}} = 1,76 \times 1,87 = 3,29 \text{ Pers./s}$$

$$t_{\text{Stau TF Ausg.}} = (25 + 75) (1 \div 3,29 - 1 \div 10,79) \approx \underline{\underline{22,00 \text{ s}}}$$

Die Gesamtevakuiierungszeiten für die beiden Personenströme, über die Gebäudeausgangstür „F“, ergeben sich zu:

$$t_{\text{F OG Ges.}} = 10,00 + 5,00 + 52,00 + 21,00 + 10,00 + 22,00 = \mathbf{120,00 \text{ s}}$$

$$t_{\text{F MZR Ges.}} = 10,00 + 6,00 + 19,00 + 8,00 + 22,00 = \mathbf{65,00 \text{ s}}$$

Maßgebend für Abschnitt „F“ ist demzufolge $t_{\text{F OG Ges.}}$ mit 120,00 Sekunden.

$$t_{\text{F Ges.}} = \underline{\underline{\mathbf{120,00 \text{ s}}}}$$

2.3.5.7 Personenstrom „G“

Es handelt sich hier um 175 Personen, davon 100 von der nordwestlichen Tribüne, 50 aus dem nordwestlichen Hallenabschnitt und 25 aus dem Mehrzweckraum. Im Flurbereich vor der Gebäudeausgangstür „G“ vereinigen sich diese Ströme und werden über selbige evakuiert.

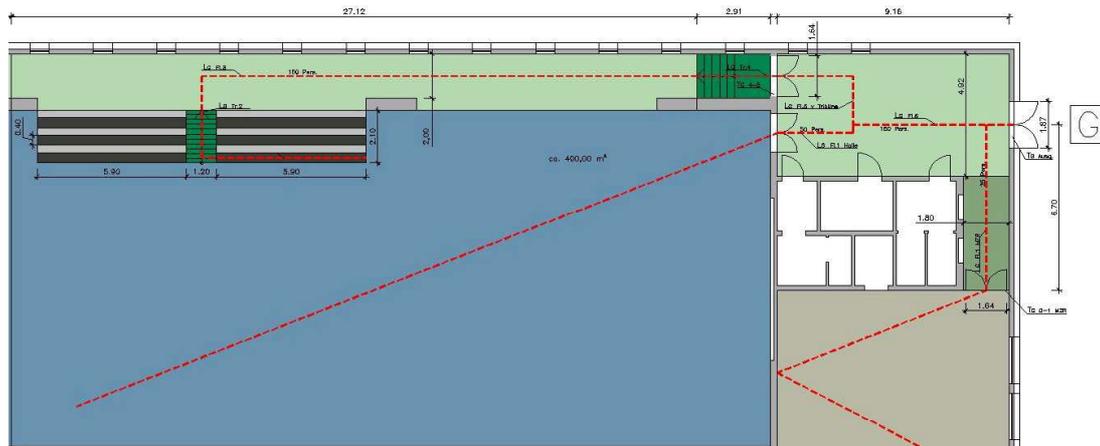


Abbildung 2.21: Detailplan Erdgeschoss zu Personenstrom „F“.

Teilpersonenstrom „Tribüne“

Laufzeit für das Verlassen der Tribünenreihe (G Ga.1)

$$\begin{aligned}
 L &= 5,90 \text{ m} \\
 b &= 0,40 \text{ m} \\
 A &= 2,36 \text{ m}^2 \\
 N &= 17 \text{ Pers.} \\
 D &= 17 \times 1,13 \div 2,36 \approx 9,20 \text{ Pers./m}^2 \\
 \Rightarrow q &= 1,61 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \text{ und } v = 0,17 \text{ m/s} \\
 t_{\text{Lauf.}} &= 5,90 \div 0,17 \approx \underline{\underline{35,00 \text{ s}}}
 \end{aligned}$$

Kontrolle auf Bewegungsverzögerung von der Tribüne zur Treppe:

$$\begin{aligned}
 q_{G \text{ Tr.2}} &= q_{G \text{ Ga.1}} \times b_{G \text{ Ga.1}} \div b_{G \text{ Tr.2}} = 1,61 \times 0,4 \div 1,20 = 0,54 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \\
 q_{A \text{ Tr.2}} &= 0,53 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \leq q_{\text{max}} = 1,55 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \\
 \Rightarrow &\text{ keine Staubildung}
 \end{aligned}$$

Laufzeit für den Wegabschnitt (G Tr.2)

$$L = 2,10 \text{ m}$$

$$b = 1,20 \text{ m}$$

$$A = 2,52 \text{ m}^2$$

Daraus folgt: $q_{\max} = 1,55 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$ und $v = 0,26 \text{ m/s}$ (aus Tab. 1)

$$t_{\text{Lauf.}} = L \div v \approx \underline{\underline{9,00 \text{ s}}}$$

Kontrolle auf Bewegungsverzögerung im Übergang von der Tribümentreppe zum Tribünenzugang:

$$q_{G \text{ Fl.3}} = 1,55 \times 1,20 \div 2,00 = 0,93 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$$

$$q_{G \text{ Fl.3}} = 0,93 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \leq q_{\max} = 2,10 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$$

⇒ keine Staubildung

Laufzeit für den Wegabschnitt (G Fl.3)

$$L = 20,00 \text{ m}$$

$$b = 2,00 \text{ m}$$

$$A = 40,00 \text{ m}^2$$

$$\text{Anzahl Personen, } N = 100 \text{ Pers.}$$

$$D = 100 \times 1,13 \div 40,00 \approx 3,00 \text{ Pers.}/\text{m}^2$$

⇒ $q = 1,50 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$ und $v = 0,50 \text{ m/s}$

$$t_{\text{Lauf.}} = 20,00 \div 0,50 = \underline{\underline{40,00 \text{ s}}}$$

Kontrolle auf Bewegungsverzögerung vom Tribünenzugang zur Treppe G Tr. 4:

$$q_{TG4-5} = 1,50 \times 2,00 \div 2,00 = 1,50 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$$

$$q_{TG4-5} = 1,50 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \leq q_{\max} = 1,50 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$$

⇒ keine Staubildung

Laufzeit für den Wegabschnitt (G Tr.4)

$$\Rightarrow q = 1,50 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \text{ und } v = 0,50 \text{ m/s}$$

$$L = 2,91 \text{ m}$$

Mit einem Treppensteigungswinkel von ca. 32° ergibt sich:

$$L = 2,91 \div \cos 32^\circ \approx 3,43 \text{ m}$$

$$t_{\text{Lauf}} = 3,43 \div 0,50 \approx \underline{\underline{7,00 \text{ s}}}$$

Kontrolle auf Bewegungsverzögerung von der Treppe zur Tür TG 4-5:

$$q_{\text{TG 4-5}} = 1,50 \times 2,00 \div 1,64 = 1,83 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$$

$$q_{\text{TG 4-5}} = 1,83 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s}) \leq q_{\text{max}} = 2,21 \text{ Pers.}/(\text{m} \times \text{s})$$

\Rightarrow keine Staubbildung

Anmerkung:

Im Flurbereich vor der Gebäudeausgangstür „G“ kommen die zwei vorgenannten Personenströme aus der Halle und dem Mehrzweckraum dazu. Es wird nun angenommen, dass besagte Ströme zeitgleich in diesem Flur aufeinandertreffen. Die Evakuierungszeit für den Personenstrom aus dem nordwestlichen Hallenbereich wird nicht berechnet. Bezugnehmend auf die anderen Hallenbereiche ist es unwahrscheinlich, dass die Evakuierungsdauer des „Tribünenstromes“ überboten werden kann, da die Wegabschnitte weniger und kürzer sind. Gleiches trifft auch auf den Mehrzweckraumstrom zu.

Wegen der großen Fläche des Flures, von ca. $45,00 \text{ m}^2$ wird, wie auch in Abschnitt 2.3.4.6, von der rechnerischen Personenstromvereinigung abgesehen und die Standardvorgehensweise über die erneute Ermittlung der Personenstromdichte gewählt, da diese die ungünstigeren Werte liefert und dadurch zur sicheren Seite tendiert.

Laufzeit für den Wegabschnitt (G Fl.5) und (G Fl.6)

Länge für beide zusammen:

$$\begin{aligned}
 L & \approx 9,00 \text{ m} \\
 b & = 4,92 \text{ m} \\
 A & \approx 45,00 \text{ m}^2 \\
 D & = 175 \times 1,13 \div 45,00 \approx 5,00 \text{ Pers./m}^2 \\
 \Rightarrow q & = 1,83 \text{ Pers./}(\text{m} \times \text{s}) \text{ und } v = 0,36 \text{ m/s} \\
 t_{\text{Lauf}} & = 9,00 \div 0,36 \approx \underline{\underline{25,00 \text{ s}}}
 \end{aligned}$$

Kontrolle auf Bewegungsverzögerung an der Tür (G Ausg.):

$$\begin{aligned}
 q_{\text{TG Ausg.}} & = 1,83 \times 4,92 \div 1,87 = 4,81 \text{ Pers./}(\text{m} \times \text{s}) \\
 q_{\text{TG Ausg.}} & = 4,81 \text{ Pers./}(\text{m} \times \text{s}) \geq q_{\text{max}} = 2,21 \text{ Pers./}(\text{m} \times \text{s}) \\
 \Rightarrow & \text{ **Staubildung** }
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q & = 1,83 \times 4,92 = 9,00 \text{ Pers./s} \\
 Q_{\text{TF Ausg.}} & = 1,76 \times 1,87 = 3,29 \text{ Pers./s} \\
 t_{\text{Stau TF Ausg.}} & = (100 + 50 + 25) \times (1 \div 3,29 - 1 \div 9,00) \approx \underline{\underline{34,00 \text{ s}}} \\
 t_{\text{G Ges.}} & = 35,00 + 9,00 + 40,00 + 7,00 + 25,00 + 34,00 = \underline{\underline{150,00 \text{ s}}}
 \end{aligned}$$

Übersicht aller Evakuierungszeiten der einzelnen Ausgänge:

$t_{A \text{ Ges.}}$	= 98,00 s
$t_{B \text{ Ges.}}$	= 44,00 s
$t_{C \text{ Ges.}}$	= 120,00 s
$t_{D \text{ Ges.}}$	= 49,00 s
$t_{E \text{ Ges.}}$	≈ 55,00 s
$t_{F \text{ Ges.}}$	= 120,00 s
$t_{G \text{ Ges.}}$	= <u>150,00 s</u>

Daraus ist zu entnehmen, dass Ausgang „G“ die maßgebende Evakuierungszeit stellt. Dementsprechend ist davon auszugehen, dass bei einer Gefahrensituation alle Personen innerhalb von $t_{\text{Evak.}} = 2:30$ Minuten das Gebäude verlassen haben.

Tabelle 2.2: Zulässige Evakuierungszeiten ($t_{\text{zul.}}$) für Wohn- und vergleichbare Gebäude mit Räumen über 100 m² Nettogröße.[5]

Nutzung der Bauwerke	Raumvolumen in m ³	Zulässige Evakuierungszeit in Sekunden (s) bei F 90
Wohn- und vergleichbare Gebäude, allgemein	... 5 000	60 (s)
	> 5 000	90 (s)
Sport-, Veranstaltungs- und Versammlungsstätten mit oder ohne Bühnen bzw. Podien	... 5 000	120 (s)
	... 20 000	180 (s)
Verkaufsstätten, Kaufhäuser	> 20 000	240 (s)
	... 5 000	90 (s)
	... 10 000	105 (s)
	... 20 000	120 (s)
	> 20 000	150 (s)

Die Hallenhöhe beträgt ca. 7 m, mit der Fläche der Halle von rund 1.700 m², ergibt sich ein Raumvolumen von 11.900 m³. Nach Tabelle 2 darf eine maximale Evakuierungsdauer $t_{\text{zul.}} \leq 180$ s angesetzt werden.

Damit gilt:

$$\underline{t_{\text{Evak.}} = 150,00 \text{ s}} \leq \underline{t_{\text{zul.}} = 180,00 \text{ s}}$$

Für die Sportstätte in der [REDACTED] Berlin, ist der Nachweis für die Unterschreitung der zulässigen Evakuierungsdauer erfolgreich abgeschlossen. Damit ist diese Halle durchaus in der Lage, Versammlungen dieser Größenordnung zu beherbergen.

2.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Interpretation der Ergebnisse gestaltet sich zuweilen schwierig, da die Genehmigung einer Massenveranstaltung nicht ausschließlich mit der zu unterbietenden, zulässigen Evakuierungsdauer steht und fällt, weiterhin sind die Stauzeiten zu beachten. In diesem Punkt gehen die Meinungen in der Fachliteratur weit auseinander. Einerseits können, Prof. Dr. Schreckenbergs zufolge, schon nach 15 Sekunden erste Panikphänomene auftreten [6], andererseits sind, nach Dr.-Ing. Geburtig, erst zusammenhängende Stauzeiten von 60 Sekunden und mehr unzulässig [7].

In Tabelle 3 werden die Gesamtzeiten über die einzelnen Ausgänge zusammenfassend dargestellt. Ebenfalls zu erkennen sind die Stauzeiten anteilig an der Gesamtzeit, sowie ihr prozentuales Verhältnis. Die letzte Zeile zeigt den maßgebenden Wert in Bezug auf die Evakuierungsdauer. Zudem beziehen sich die 34,00 Sekunden Stauzeit zusammenhängend auf ein Hindernis.

Tabelle 2.3: Personenströme und zugehörige Evakuierungszeiten mit Unterscheidung in Stand- und Bewegungszeiten.

Personenströme und Anzahl Pers.	Zeit Ges. in s	in Bewegung in s	im Stau in s	Stauanteil an Gesamtzeit in %
A	98,00	82,00	16,00	16,30
B	44,00	28,00	16,00	36,40
C	120,00	83,00	37,00	30,80
D	49,00	33,00	16,00	32,60
E	55,00	/	/	/
F	120,00	93,00	27,00	22,50
G	150,00	116,00	34,00	22,6

Diese Arbeit kann keinesfalls alle Möglichkeiten, die auftreten können, überspannen. Sei es eine Personenstromvereinigung auf einer Treppe, eine massive Personenzahl auf einem sehr kleinen Flurstück oder andere Besonderheiten. Will der Leser alle Facetten der Berechnung überblicken und verstehen, ist es unumgänglich sich mit der einschlägigen Fachliteratur³ zu befassen, welche sich, im Gegensatz zu dieser Arbeit, ausschließlich mit diesem Thema befasst.

2.5 Erläuterung der Simulationssoftware „PedGo“

2.5.1 Allgemeines

Betrachtet wird das Softwarepaket „PedGo“⁴ der „TraffGo HT GmbH / Duisburg“.⁵ Die Software entstand nach Abschluss des Forschungsprojektes „BYPASS“ [8], an dem unter anderem Mitarbeiter der TraffGo GmbH beteiligt waren.

Das Softwarepaket besteht aus den Einzelanwendungen „Editor“, „Simulation“ und „Viewer“, mit deren Hilfe eine vollständige Evakuierungssimulation durchgeführt und ausgewertet werden kann. Zur Verdeutlichung der nachfolgenden Ausführungen wird ein simpler Grundriss verwendet, in dem alle evakuierungsrelevanten Wegelemente enthalten sind. Damit der direkte Vergleich mit der in Kapitel 2.3.4 beschriebenen Handrechnung gezogen werden kann, sollte das Gutachten

³ Siehe hierzu Quellen [3], [4] und [5] im Literaturverzeichnis.

⁴ „PedGo“ Softwareversion 2.5.0.12

⁵ Internetverweis auf die TraffGo Website, Stand: 26.09.11; <http://www.traffgo-ht.com/de/index.html>

„Beurteilung der Rettungswegesituation “ aus dem Anhang verwendet werden.

2.5.2 Der Ansatz

2.5.2.1 Vorüberlegungen

Das Ziel der Simulationssoftware besteht darin, eine Evakuierungszeit für ein Gebäude zu bestimmen. Zusätzlich werden einige weiterführende Informationen ausgegeben (siehe dazu Kapitel 3.2.2).

Anders als bei dem Handrechenverfahren von Predtetschenski und Milinski werden bei der Simulation die Personen, im Folgenden *Agenten* genannt, als Individuen betrachtet. Das heißt, dass die Bewegung eines einzelnen Agenten auch Einfluss auf andere Agenten ausübt und dies in der Zeitermittlung berücksichtigt wird. Die Grundlage für eine solche Betrachtungsweise liefert, im Fall von „PedGo“, ein *zellularer Automat* [9]. Gegensätzlich zur Handrechenmethode ist ebenfalls, dass kein direkter Zusammenhang zwischen Dichte des Personenstroms und dessen Geschwindigkeit hergestellt wird. Berücksichtigt wird dies über den Algorithmus, der in den Abbildungen 2.23 und 2.24 zu sehen ist.

2.5.2.2 Die räumliche Diskretisierung und der zellulare Automat

Der zellulare Automat geht auf John von Neumann zurück und beschreibt ein diskretes, mathematisches Modell. Dabei wird ein unendlicher n-dimensionaler Raum in Zellen eingeteilt, von denen jede eine endliche Anzahl verschiedener Zustände annehmen kann. Der jeweilige Zustand einer Zelle zum Zeitpunkt t , ist eine Funktion der Zustände der Nachbarzellen zum Zeitpunkt $t-1$, wobei alle Zustände zeitgleich geändert werden. Nachbarzellen und Zeittakte können frei definiert werden. Im Fall von „PedGo“ erfolgt die räumliche Aufteilung des Grundrisses in Zellen mit je 40 Zentimeter Seitenlänge, daraus ergibt sich eine maximale Personendichte von 6,25 Personen pro Quadratmeter.

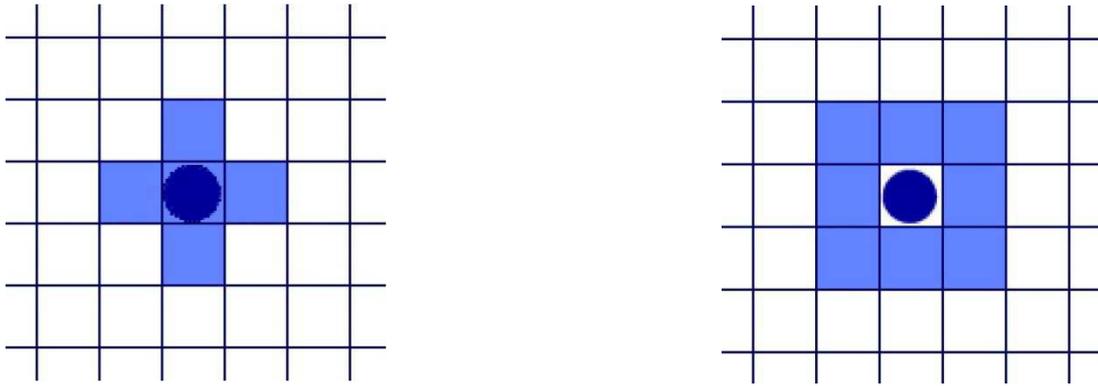


Abbildung 2.22: Die „Von Neumann Nachbarschaft“ (links) und die „Moore Nachbarschaft (rechts). [13]

In der Abbildung 2.22 sind zwei Beispiele für eine mögliche Nachbarschaft gezeigt. Es wird davon ausgegangen, dass die Moore Nachbarschaft Verwendung in der Simulationssoftware „PedGo“ findet.

Um zu gewährleisten, dass die Agenten sich kontinuierlich in Richtung der Ausgangszellen bewegen, wird für jede der acht Nachbarzellen eine Wahrscheinlichkeit, in Abhängigkeit des Potentialgefälles, des Schwankens⁶ und der Trägheit, berechnet. Wie letztendlich entschieden wird, welche der acht Nachbarzellen betreten wird, vorausgesetzt sie ist frei, ist dem Verfasser nicht ersichtlich, da sich mit steigendem Wert für die Schwankung die Wahrscheinlichkeiten der Nachbarzellen lediglich annähern, aber die Wertigkeiten nicht umgekehrt werden können. Ungeklärt ist demnach die Ermittlung der zu betretenden Zelle zwischen den berechneten Wahrscheinlichkeitswerten. Die Wahrscheinlichkeit für die Wahl der Zelle errechnet sich:

$$p_i = e^{[(P_i - P_0) + S] \div S}$$

mit: p_i ... Wahrscheinlichkeit für die Wahl der Zelle i

P_i ... Potentialwert der Zelle i

P_0 ... Potenzialwert der Zelle 0

S ... Wert für Schwanken aus den Personenparametern

⁶ siehe Personenparameter in Kapitel 2.5.6 „Die Simulation“

Durch die Trägheit, ein weiterer Personenparameter, wird die momentane Laufrichtung zusätzlich gewichtet.

2.5.2.3 Die zeitliche Diskretisierung

Wie der Grundriss in Zellen, so ist auch die Zeit vom Anfang bis zum Ende der Evakuierungssimulation in Zeitabschnitte gegliedert. Diese werden „Updates“ und „Sub-Updates“ genannt. Hierbei besteht ein Update aus mehreren Sub-Updates. Die Anzahl der Sub-Updates richtet sich nach der Maximalgeschwindigkeit aller Agenten. Pro Sub-Update werden alle Agenten um eine Zelle weiterbewegt, vorausgesetzt sie werden nicht blockiert. Dieser Ablauf wird solange wiederholt, bis alle Agenten ihre maximale Anzahl an Schritten erreicht haben oder gerettet wurden.

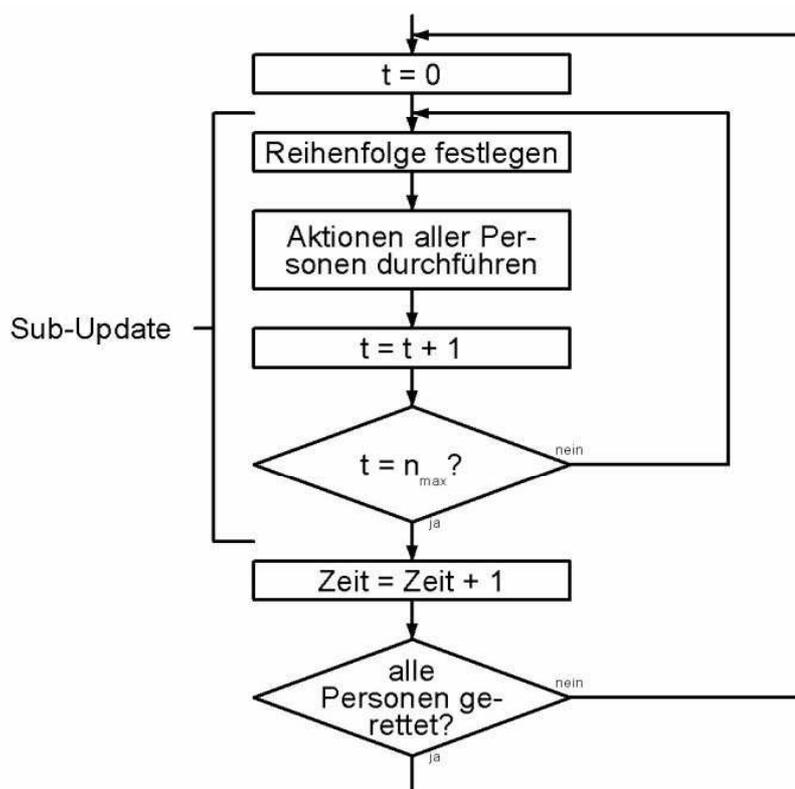


Abbildung 2.23: Programmablaufplan für ein Update mit t ...Sub-Update-Schritt und n ...maximale Geschwindigkeit eines Agenten. Ein Zeitschritt beträgt eine Sekunde. [10]

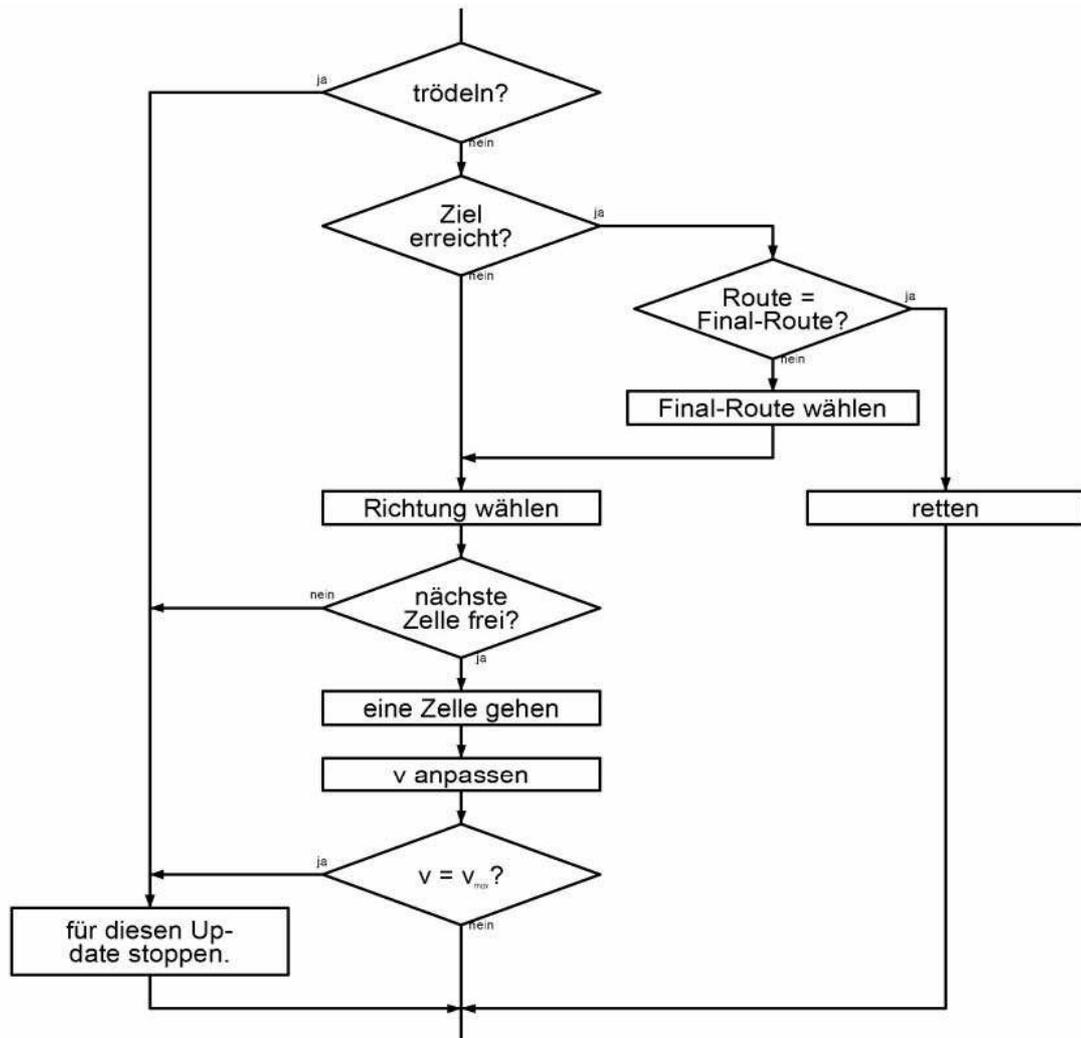


Abbildung 2.24: Von „PedGo“ angesetzter Bewegungsalgorithmus für einen Agenten pro Zeitschritt. [10]

Der in Abbildung 2.24 gezeigte Algorithmus ist im Programmablaufplan in Abbildung 2.23 an der Stelle „Aktionen für alle Personen durchführen“ einzusetzen und gibt damit den vollständigen, detaillierten Ablauf eines Updates wieder.

2.5.3 Rahmenbedingungen

Die Software arbeitet auf Grundlage eines Grundrisses der in einer DXF-Datei vorliegen muss. Diese Datei kann mit Hilfe von Zeichenprogrammen erstellt werden.

Folgende Punkte sind dabei zu beachten:

- Jedes Geschoss muss in einer eigenen DXF-Datei abgelegt sein.
- Die Etagen müssen jeweils mit der gleichen Gebäudeecke im Ursprung der Zeichnung liegen.
- Es sollten keine Schraffuren vorhanden sein, da es sonst zu erhöhtem Arbeitsaufwand kommen kann.

2.5.4 Betrachteter Beispielgrundriss

Zum besseren Verständnis der Software wird ein Beispielgrundriss herangezogen. Aus Gründen der Simplizität wird keiner der im Anhang beigefügten Grundrisse der Gutachten verwendet. Der in den beiden folgenden Abbildungen gezeigte Grundriss beinhaltet alle Wegabschnitte um einen guten Überblick über die Software zu erhalten.

Es handelt sich um ein zweigeschossiges Bürogebäude. Im Obergeschoss sowie im Erdgeschoss befinden sich je sechs Räume. Der durchgehende Flur verbindet alle Räume im Obergeschoss mit dem Treppenraum. Im Erdgeschoss werden durch den Flur alle Räume mit dem Treppenraum und dem Gebäudeausgang verbunden.

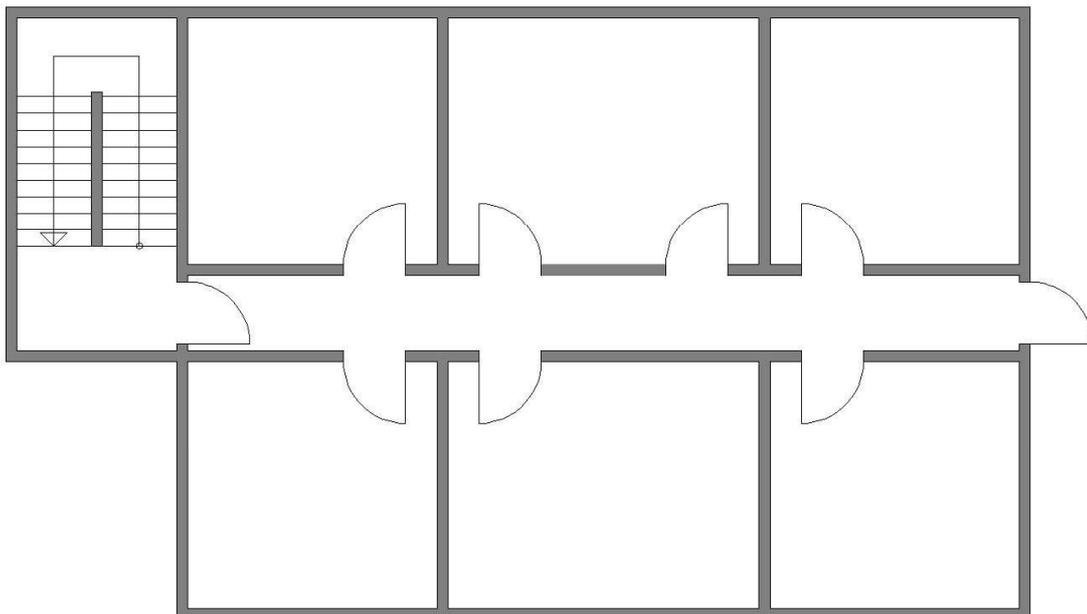


Abbildung 2.25: Beispielgrundriss Erdgeschoss wie er in der DXF-Datei vorliegt.

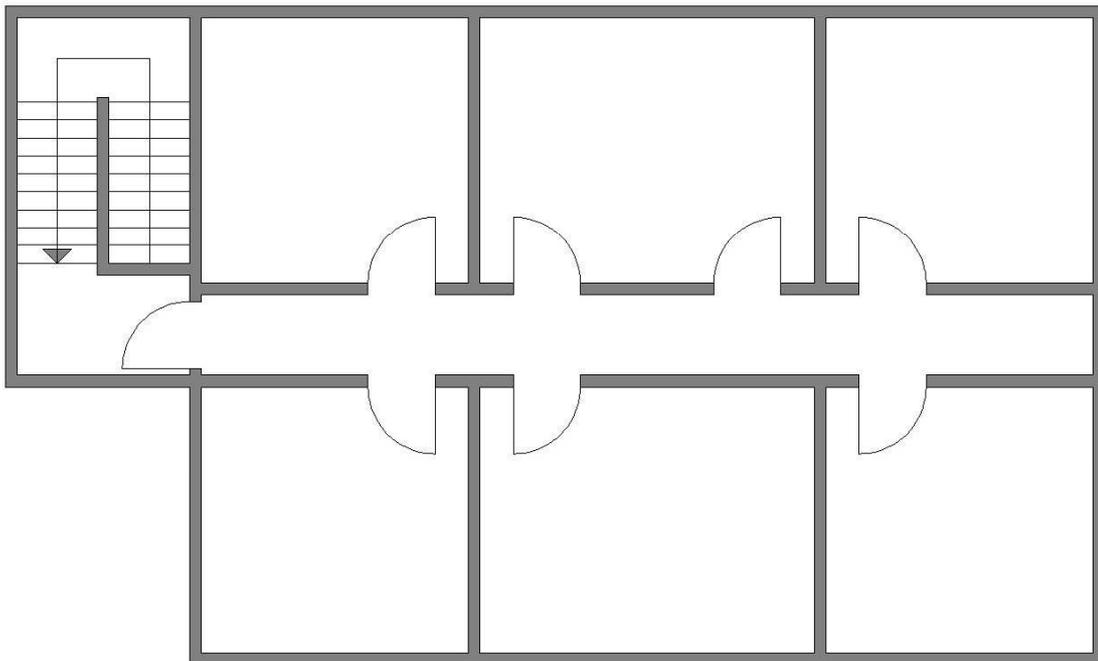


Abbildung 2.26: Beispielgrundriss Obergeschoss wie er in der DXF-Datei vorliegt.

Die Türbreiten betragen 1,0 m, außer im Verlauf des Rettungsweges und in den unteren Mittelräumen, dort sind sie mit 1,2 m Breite angesetzt.

2.5.5 Der Editor

Nach dem Öffnen der Anwendungsdatei „PedEd“ wird die DXF-Datei des Grundrisses über den Menüpunkt *Floor* importiert. Hierbei ist die Maßeinheit zu verwenden, die auch der Zeichnung zu Grunde liegt.

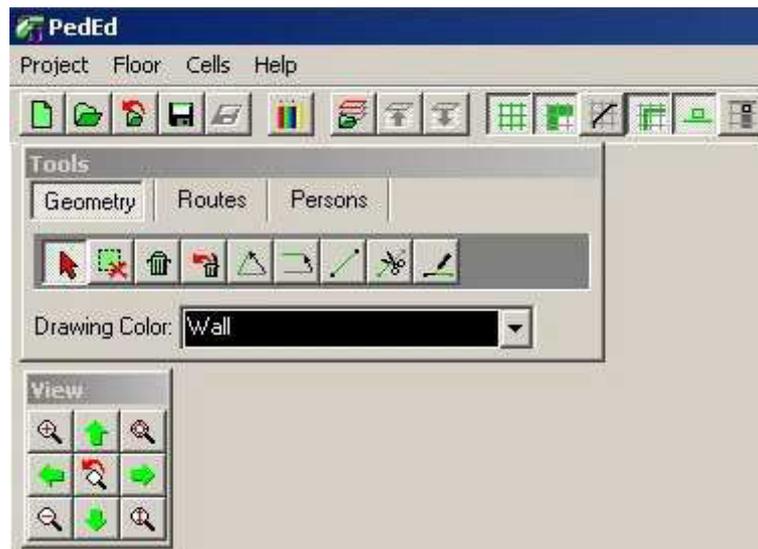


Abbildung 2.27: Ansicht der Benutzeroberfläche des Editors.

Die Zeichnung muss nun angepasst werden, damit sie von der Simulationssoftware verwertet werden kann. Dazu müssen alle Bauelemente, das heißt Wände, Türen, Fenster und sichere Bereiche in Form einer Farbkennung markiert werden. Dabei muss auf die Übereinstimmung der Maße von Ursprungszeichnung zu Editorzeichnung geachtet werden. Wegen der Diskretisierung der Abmessungen anhand eines 40-cm-Rasters, kann es zu einer Verfälschung der Grundrissmaße, aufgrund von Rundungsungenauigkeiten, kommen. Das ist genau dann problematisch, wenn einem Wegabschnitt eine größere Breite zugewiesen wird, als er tatsächlich hat. Ist ein Maß durch die Rasterung nicht einzuhalten, sollte immer der schlechtere Wert gewählt werden, um den schlechteren Fall zu berücksichtigen und damit auf der „sicheren Seite“ zu handeln. Die genannte Farbkennung kann individuell gewählt und in den Programmeinstellungen zugewiesen werden.

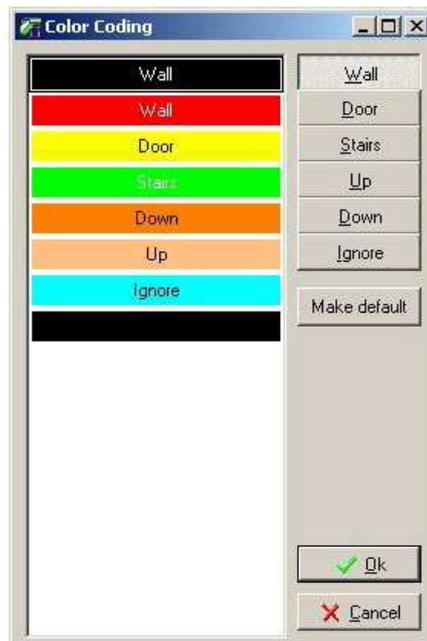


Abbildung 2.28: Ansicht „Color Coding“-Fenster des Editors.

Zur Veranschaulichung einige Grafiken, welche die einzelnen Schritte abbilden:

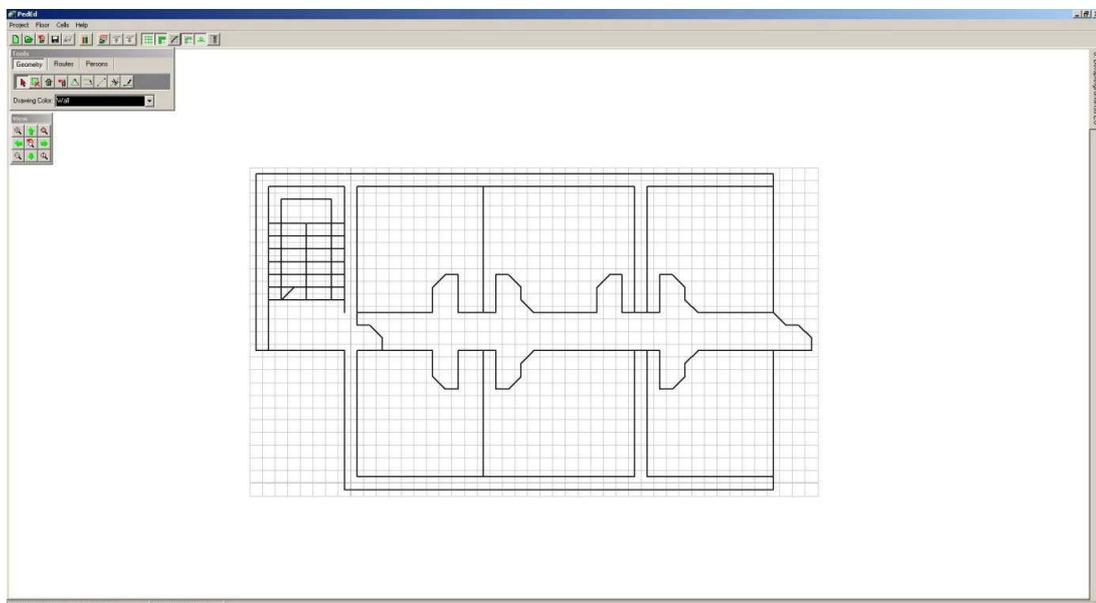


Abbildung 2.29: Importierter Beispielgrundriss Erdgeschoss ohne Anpassungen.

Deutlich zu sehen sind die Doppellinien der Wände, welche im Originalgrundriss die Wandstärken repräsentieren, in der Simulation jedoch überflüssig sind.

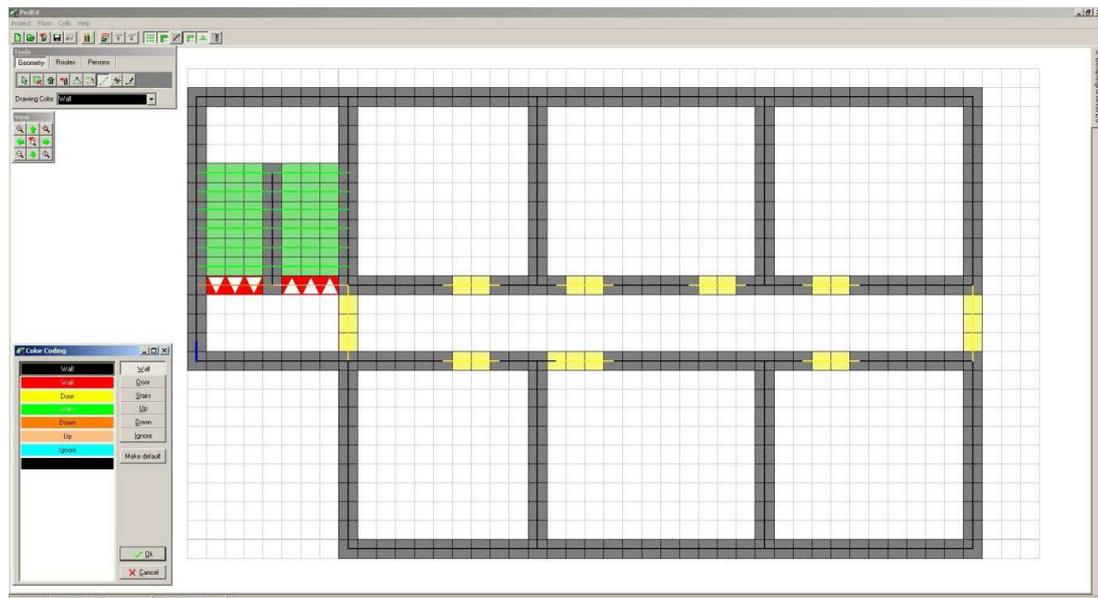


Abbildung 2.30: Beispielgrundriss nach Anpassung der Geometrie.

In Abbildung 2.30 ist der bearbeitete Grundriss zu sehen. Die überflüssigen Doppelwände wurden entfernt und alle wichtigen Wegabschnitte wurden über das Farbschema gekennzeichnet. Hier entspricht schwarz den Wandzellen, grün den sogenannten Treppenzellen, gelb den Türzellen und die rotweißen Pfeile weisen darauf hin, dass hier die Treppe aufwärts oder die Treppe abwärts beginnt, je nach Pfeilrichtung.

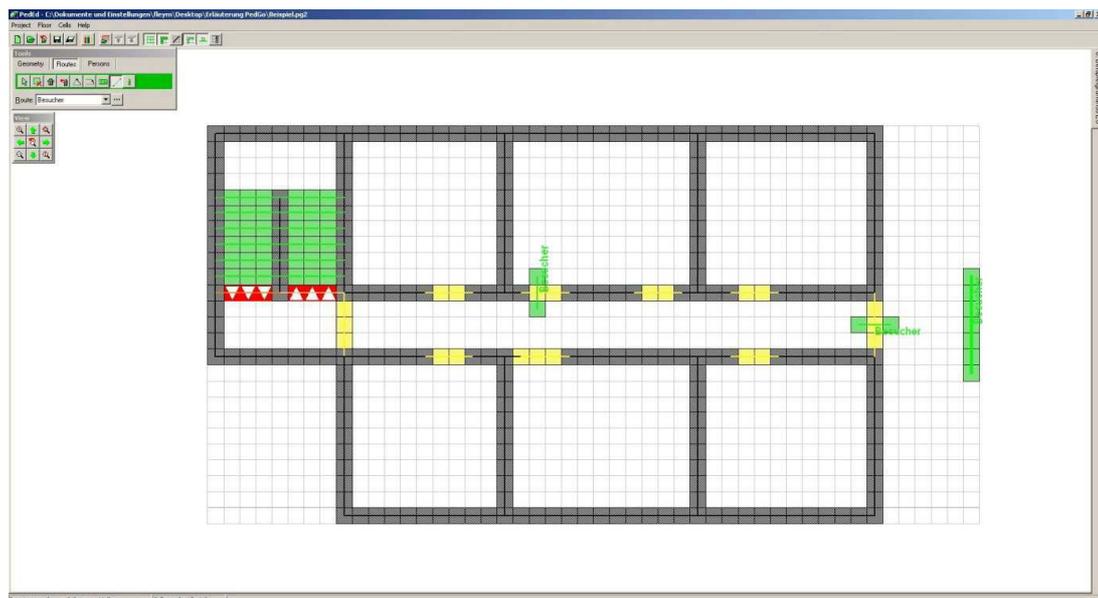


Abbildung 2.31: Darstellung der Exit-Zellen vor dem Gebäudeausgang und die Routenfestlegung für den Raum mit den zwei Ausgängen, hier ist die Route über die linke Tür definiert.

Nachdem der Grundriss für das Programm vorbereitet wurde, müssen die von den Personen bevorzugten Routen festgelegt werden. Die sicheren Bereiche vor den Ausgängen werden durch sogenannte *Exit-Zellen* markiert, was zusammen mit den *Routen* in Abbildung 2.31 dargestellt ist. Der Verfasser möchte noch darauf hinweisen, dass die Routen noch definiert werden und den, im nächsten Schritt definierten und erstellten, Personengruppen zugewiesen werden müssen.

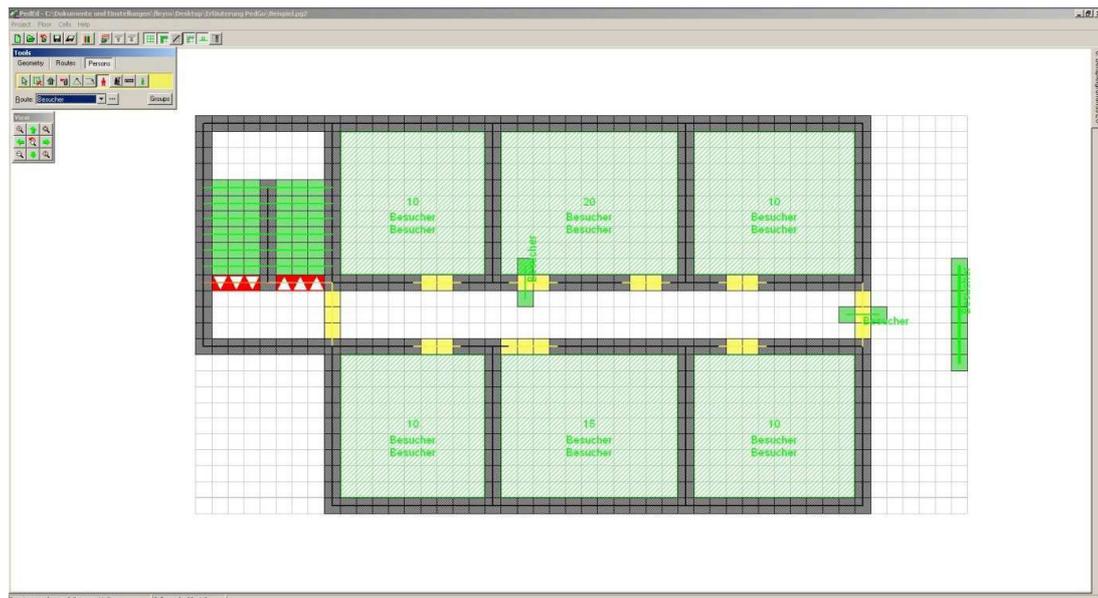


Abbildung 2.32: Grundriss mit den Personenverteilungen, dargestellt durch die grünen Flächen innerhalb der Räume.

In unserem Beispielfall wurden, im Erdgeschoss sowie im Obergeschoss, in jedem der äußeren Räume 10 Personen, im mittleren, oberen Raum 20 Personen und im mittleren unteren Raum 15 Personen angesetzt. Somit ist die Arbeit im Editor abgeschlossen und man kann zur Simulationsanwendung wechseln.

Anmerkung: Beim Obergeschoss wurde analog zum erläuterten Erdgeschoss verfahren. Folglich steht der Software das Erdgeschoss sowie das Obergeschoss zur Verfügung.

2.5.6 Die Simulation

Nach dem Öffnen des Simulationsprogrammes „PedGo“ ist die blanke Benutzeroberfläche sichtbar, wie sie in Abbildung 2.33 gezeigt wird.

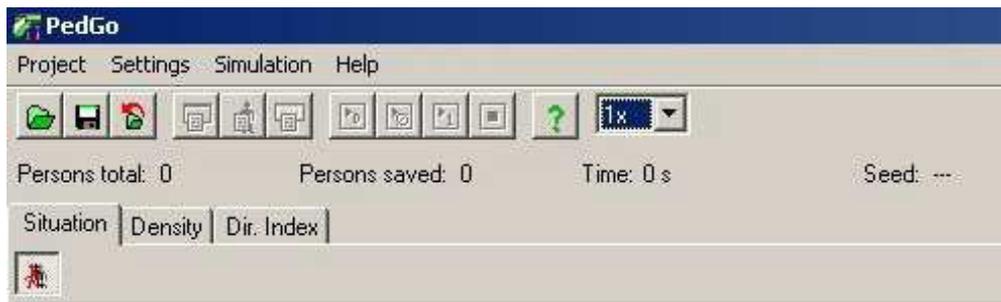


Abbildung 2.33: Ansicht der Menüoberfläche der Simulationsanwendung.

Die im Editor abgespeicherte Datei kann mit der Simulationsanwendung, wie z. B. ein Textdokument, geöffnet werden und wird in einem Pixelbild dargestellt, siehe Abbildungen 2.34 und 2.35.

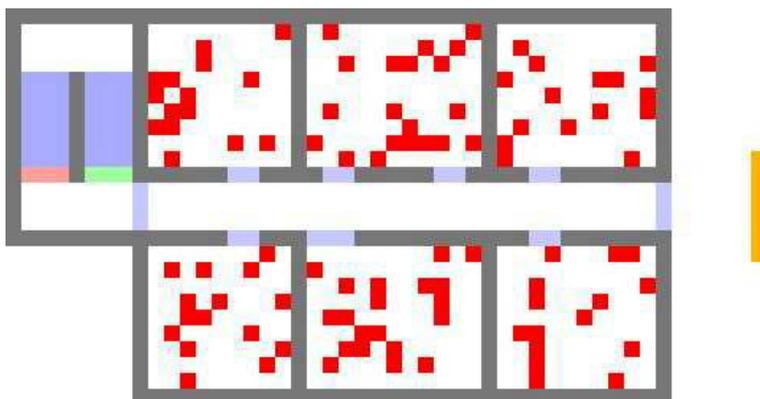


Abbildung 2.34: Beispiel einer Personenanfangsverteilung im Erdgeschoss, inklusive Türen-, Treppen-, Wand- und Ausgangszellen. Die roten Punkte entsprechen den zufällig verteilten Personen.

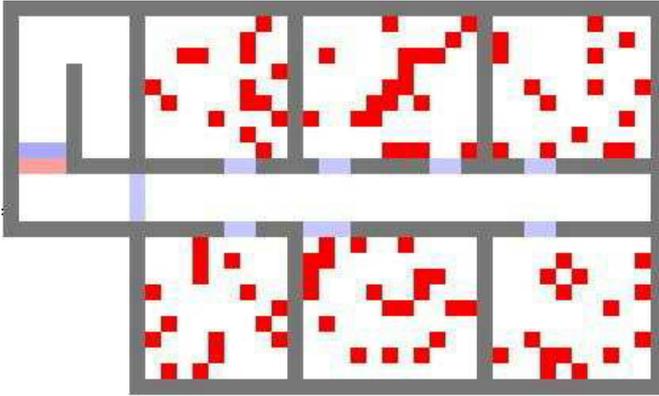


Abbildung 2.35: Beispiel einer Personenanfangsverteilung im Obergeschoss, inklusive Türen-, Treppen- und Wandzellen. Die roten Punkte entsprechen den zufällig verteilten Personen.

Falls im Editor Fehler begangen wurden, macht das Programm an dieser Stelle in Form von Fehlermeldungen darauf aufmerksam. Mit Hilfe des Editors muss im Nachhinein nachgearbeitet und angepasst werden, bis die Funktionstüchtigkeit gewährleistet ist. Bevor die Simulation gestartet werden kann, müssen noch Einstellungen an den Personenparametern vorgenommen werden.

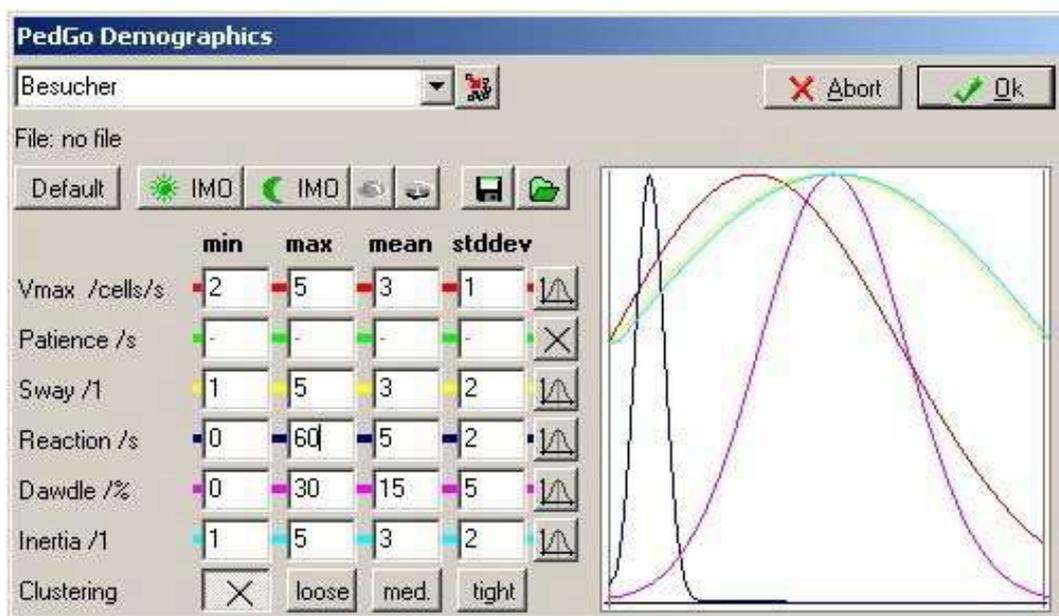


Abbildung 2.36: Einstellungsfenster für die Personenparameter.

Jeder Personengruppe im Grundriss können individuelle Parameter zugeordnet werden. Es kann gewählt werden, welche Parameter verwendet werden sollen und ob sie als Gleichverteilung oder als Standardnormalverteilung, mit Minimum, Maximum, Mittelwert und Standardabweichung, berücksichtigt werden sollen.

Bei den Parametern handelt es sich im Einzelnen um⁷:

<i>Laufgeschwindigkeit</i>	Geschwindigkeit, mit der sich die Agenten durch die verschiedenen Wegabschnitte bewegen.
<i>Geduld</i>	Stillstandszeit, die ein Agent maximal ausharrt, z. B. im Stau, bevor er versucht einen anderen Weg zu finden.
<i>Schwanken</i>	Genauigkeit, mit der ein Agent seiner Fluchtroute folgt, kann z. B. unter Alkoholeinfluss sinken.
<i>Reaktionszeit</i>	Zeit, die vergehen kann, bevor der Agent das Alarmsignal zur Evakuierung bemerkt und sich in Richtung Ausgang bewegt.
<i>Trödelwahrscheinlichkeit</i>	Wahrscheinlichkeit, mit der ein Agent den Rest eines Zeitschrittes ungenutzt verstreichen lässt.
<i>Trägheit</i>	Zielstrebigkeit, mit der ein Agent seine aktuelle Laufrichtung beibehält.
<i>Gruppenzusammenhalt</i>	Wie stark orientieren sich die Agenten aneinander, sozusagen <i>Gruppenzwang</i> .

Sind alle Personenparameter über die Eingabemaske festgelegt, existiert eine ähnliche Maske auch für die Ausgangszellen.

⁷ Frei nach [10]

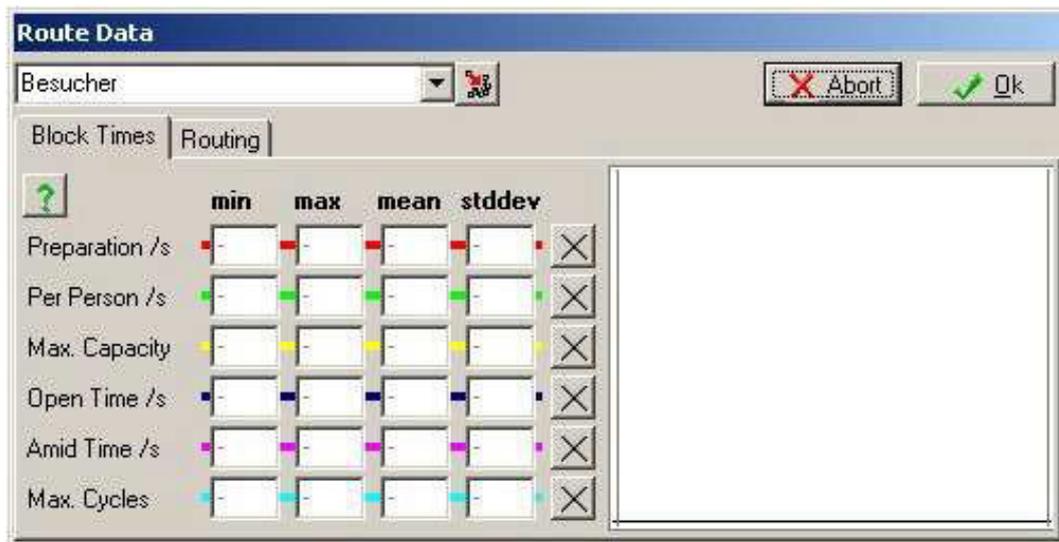


Abbildung 2.37: Einstellungsfenster für die Ausgangszellen.

Auch hier sind die Wahlmöglichkeiten zwischen Nichtverwendung, Gleichverteilung und Normalverteilung möglich. Für die Ausgangszellen sind folgende Parameter verfügbar:

<i>Preparation</i>	Dauer der Blockierungszeit der betroffenen Ausgangszelle ab Simulationsbeginn.
<i>Per Person</i>	Dauer, die ein Agent auf einer Ausgangszelle verbleiben muss, bevor er aus der Simulation genommen wird.
<i>Max. Capacity</i>	Maximale Anzahl an Agenten, die eine Zielzelle retten, das heißt aus der Simulation nehmen, kann.
<i>Open Time</i>	Zeit, die vergehen kann, bevor die betroffene Zielzelle deaktiviert wird und keine Agenten mehr aufnimmt.
<i>Amid Time</i>	Zeit bis zur Reaktivierung einer Ausgangszelle, nachdem sie durch <i>Max. Capacity</i> oder <i>Open Time</i> blockiert wurde.

Max. Cycles Gesamte Anzahl der Zyklen, in denen alle oben genannten Dauern, ausgenommen *Preparation*, wiederholt werden.

Zum besseren Verständnis sind die diversen Kombinationsverhältnisse der zuvor beschriebenen Ausgangsparameter in der untenstehenden Abbildung 2.38 grafisch veranschaulicht.

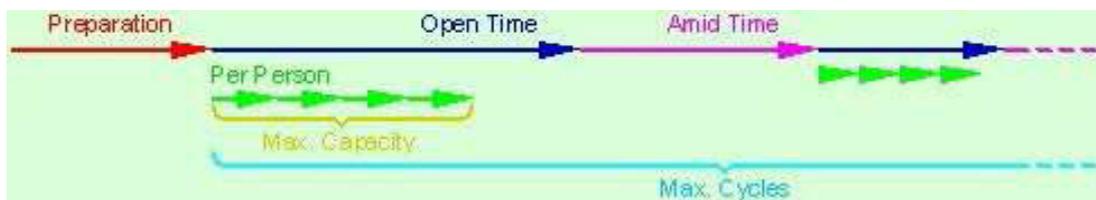


Abbildung 2.38: Zusammenspiel der einzelnen Ausgangsparameter. Direkthilfe der Software.

An dieser Stelle beginnt die eigentliche Simulation. Zur Kontrolle, ob alles nach Wunsch läuft, kann eine Einzelsimulation, die sogenannte „Quick-Demo“, gestartet werden.

Um aber auswertbare Ergebnisse zu erhalten, ist eine größere Anzahl an Simulationsdurchgängen nötig. Laut der TraffGo HT GmbH sind hier 500 Durchgänge oder mehr empfohlen, um eine ausreichende Menge zur statistischen Verwertbarkeit zu erlangen.

Anmerkung:

Wie im allgemeinen Teil erwähnt, ist die dritte Anwendung der „Viewer“, dieser wird jedoch erst im Abschnitt 3.2.2.2 betrachtet.

3 Wertender Vergleich

3.1 Vergleich auf der Datenebene

3.1.1 Eingangswerte für die Handrechnung

Die Anwendung des Handrechenverfahrens setzt die Kenntnis einiger Werte voraus, ohne die keine Evakuierungszeitberechnung möglich ist. Zunächst wird der Grundriss benötigt, oder zumindest das Wissen um die Längen und Breiten der einzelnen Wegabschnitte, die auf dem Weg nach Draußen von den Personenströmen passiert werden. Wie aus den vorherigen Kapiteln bereits bekannt, ist die Anzahl der zu rettenden Personen, sowie deren Verteilung im Grundriss und in diesem Zusammenhang das Alter, die Bekleidung und das Gepäck ein ausschlaggebendes Kriterium für die Gesamtdauer der Räumung. Sowohl sollte die Art der Bewegung, also unter Komfort-, Normal- oder Gefahrenbedingung als auch die Art des Bauwerks, z. B. Versammlungsstätte, Bürogebäude oder Wohngebäude und das Volumen der zu evakuierenden Räume, bekannt sein. Welchen Weg ein Personenstrom nehmen soll, muss der Nutzer selbstständig, durch entsprechende Überlegungen, festlegen.

Die restlichen Werte liefert das Verfahren in Form des Fundamentaldiagrammes nach Predtetschenski und Milinski und den daraus hervorgegangenen Tabellenwerten für die Bewegungsintensität, sowie die Laufgeschwindigkeit der Personenströme.

3.1.2 Eingangswerte für die Evakuierungssoftware „PedGo“

Der erfolgreiche Einsatz der Software setzt ähnliche Eingangswerte wie die Handrechnung voraus, mit dem Unterschied das diese weitaus präziser abgefragt werden. Der Grundriss ist selbstredend auch hier die Grundlage, wird jedoch vollständig eingepflegt, wie in Kapitel 2.5.4 erklärt. Mit dem importierten Grundriss sind alle Wegabschnittslängen, -breiten und Laufwege erfasst. Für die Simulation sind natürlich noch die Angaben bezüglich der Personenzahl und deren Aufenthaltsorte bedeutsam. Diese werden zeitgleich über eine Eingabemaske erfasst. Der eigentliche Unterschied, abgesehen von dem grundlegenden zwischen Software

und Papierrechnung in Bezug auf die Datenerfassung, ist die Anpassungsmöglichkeit der Personen- und Exit-Zellenparameter. Weil die Software in der Lage ist eine dynamische Berechnung beziehungsweise Simulation durchzuführen, müssen dementsprechende Grundlagen in Form von detaillierten Datensätzen vorhanden sein.

3.1.3 Schlussfolgerung auf Datenebene

Die Handrechnung nach Predtetschenski und Milinski weist bei der Erfassung der Eingangswerte zeitliche Vorteile gegenüber der Softwarevariante auf, da es nicht viel Zeit bedarf, die Abmessungen des Grundrisses mit allen Kenngrößen der einzelnen Wegabschnitte zu ermitteln. Ebenso ist es ein Leichtes mit ein wenig konzentrierter Vorüberlegung die gesamte Anzahl an Personen auf dem Grundriss zu verteilen und die Rettungsrouten festzulegen. Jene Tätigkeiten verlangen, aufgrund genannter Vorgehensweise aus Kapitel 2.5.4, bei der Eingabe in den Editor einen relativ großen Zeitaufwand und sind, auf Grund der zusätzlichen Parametereingaben, noch detaillierter auszuführen.

Demgegenüber steht jedoch die enorme Berechnungszeit des Handverfahrens, denn proportional zur Komplexität des Gebäudes, in Größe und Grundrissgestaltung, steigt zwangsläufig der Rechenaufwand. Dies geschieht in solch hohem Maße, dass der kleine Zeitvorsprung bei der Eingangswertermittlung schnell zunichte gemacht wird und damit die Software in punkto Zeit wirtschaftlicher ist.

Der Verfasser empfiehlt daher, die Handrechnung für überschlägige Berechnungen, z. B. einen Rettungsweg mit maximal zwei oder drei Wegabschnittsänderungen, heranzuziehen. Für alle weiteren Berechnungen hingegen der Simulation mittels Software den Vorzug zu geben. Dem geübten Nutzer des Handrechenmodells sollte es möglich sein, eine überschlägige Betrachtung einer Situation vor Ort ausführen zu können, was ebenfalls für den spontanen Einsatz des Modells spricht, um eine vorläufige Abschätzung zu erhalten.

3.2 Vergleich auf der Ergebnisebene

3.2.1 Ergebnisse der Handrechnung

Die von der Handrechenmethode erzeugten Ergebniswerte sind nicht sonderlich breit aufgestellt. Zum einen ist das Hauptergebnis zu nennen, die maximal anzunehmende Evakuierungszeit für ein betrachtetes Gebäude, zum anderen kann mit wenig Mehraufwand eine Wegabschnittsbreite bemessen werden. Kommt es während der Handrechnung an einer Stelle zu einer Staubildung mit inakzeptablen Stauzeiten, so kann, durch eine simple Umstellung der Stau-Kontrollformel⁸, die erforderliche Breite des nachfolgenden Abschnittes berechnet werden, um eine Staubildung zu verhindern. Demnach ist die Handrechnung gut geeignet, eine günstige Bemessung für Rettungswege in Abhängigkeit der zu rettenden Personenanzahl zu gewährleisten. Folglich sind die Ergebnisse, die aus dem Handrechenverfahren zu ziehen sind, lediglich die Evakuierungszeit, Orte und Zeiten der Staubildung und die erforderlichen Breiten der Wegabschnitte um diese Stauungen zu vermeiden.

3.2.2 Ergebnisse der Evakuierungssoftware „PedGo“

3.2.2.1 Auswertung der Mittelwertsimulation

An dieser Stelle wird zur Veranschaulichung wieder der Beispielgrundriss aufgegriffen, wie er in Kapitel 2.5.4 ff. behandelt wurde. Es kann vorweggenommen werden, dass die Ergebnispalette von „PedGo“ etwas breiter ausfällt als die der Handrechnung. Der erste Teil der vorgestellt wird, geht aus der Gesamtheit aller 500 Durchläufe der Simulation hervor und repräsentiert eine statistische Auswertung in Form einer Tabellenkalkulationsdatei⁹. Diese beinhaltet alle Werte jedes einzelnen Simulationsdurchgangs inklusive einer Auflistung, wie viele Agenten zu welcher Zeit gerettet wurden. Soll die Auswertung etwas anschaulicher gestaltet sein, kann mit wenig Aufwand und dem genannten Tabellenkalkulationsprogramm eine Serie von Diagrammen erzeugt werden. Als Beispiel und sinnvollste Möglichkeit hat der Verfasser hier die Evakuierungskurve des 95%-Quantils gewählt. Sind auf einem Grundriss mehrere Szenarien zu simulieren, ist natürlich auch die Darstellung der

⁸ Vgl. Abschnitt 2.3.5, Gleichung zur Kontrolle auf Staubildung vor einer Wegabschnittsänderung.

⁹ Im Fall von „PedGo“, eine *.xls Datei, welche sich mit MS-Excel öffnen lässt.

verschiedenen Evakuierungskurven in einem Diagramm möglich und zu empfehlen. Auf diese Weise werden die unterschiedlichen Verläufe optisch gut sichtbar werden.¹⁰ Dem Nutzer sind in dieser Hinsicht einige Wege offengehalten, um eine individuell passende Aufbereitung zu erlangen.

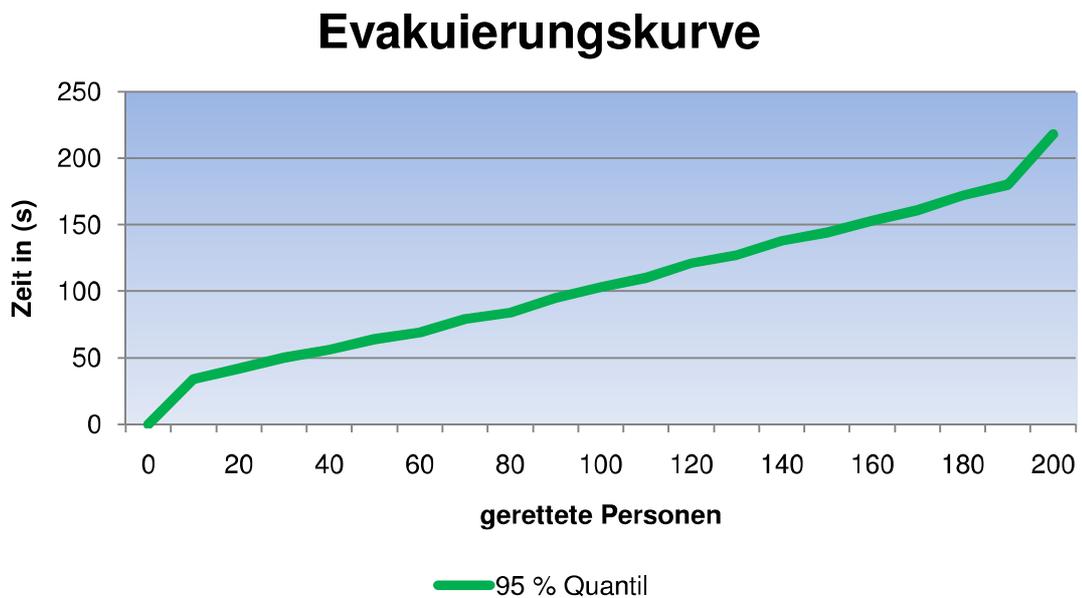


Abbildung 3.1: Evakuierungskurve zum Beispielgrundriss. Stellt dar, wie viele Personen zu welcher Zeit das Gebäude verlassen haben.

¹⁰ Siehe dazu die Auswertungen der Gutachten im Anhang.

Abbildung 3.2: Ausschnitt aus der Auswertungsdatei der 500 Simulationsdurchläufe.

Es werden noch weitere Dateien ausgegeben, wie z. B. eine Darstellung der Personenparameter in Tabellenform, die zuvor in der Simulation gewählt wurden und eine ähnliche Darstellung zu den Ausgangsparametern. Außerdem wird eine Bilddatei zur Verfügung gestellt, die anhand eines Säulendiagramms die Häufigkeitsverteilung aller Durchläufe über der Evakuierungsdauer abbildet.

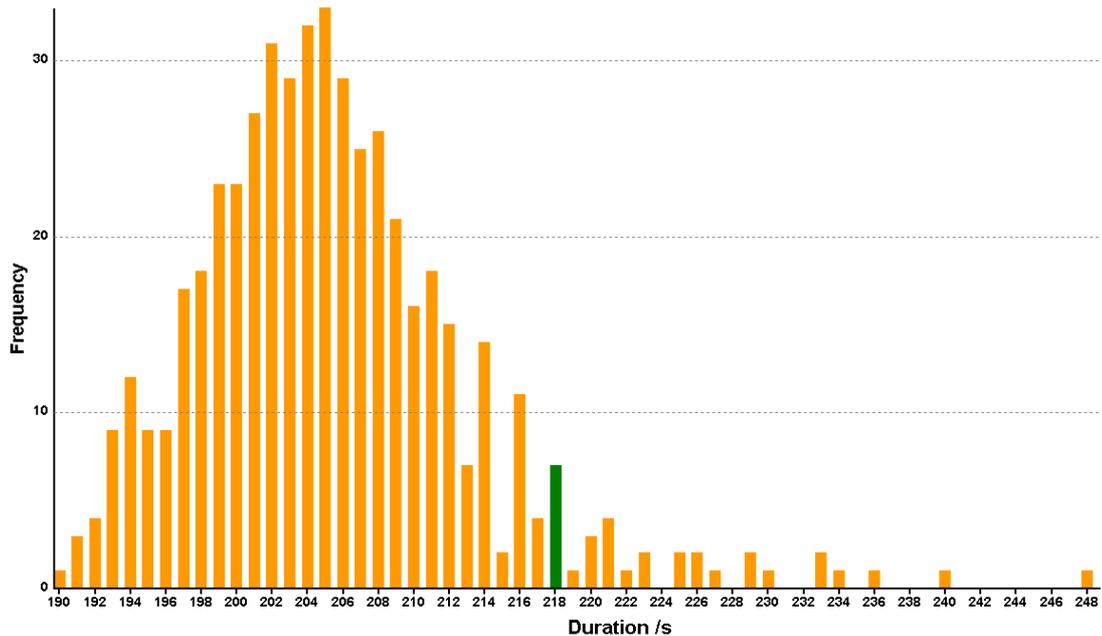


Abbildung 3.3: Häufigkeitsverteilung der 500 Simulationendurchläufe für den Beispielgrundriss. Die grüne Säule zeigt das 95%-Quantil der Evakuierung.

3.2.2.2 Auswertung der Einzelsimulation

Nachdem die statistische Auswertung abgeschlossen wurde, deren Ziel die Ermittlung der zu erwartenden Gesamtevakuiierungsdauer war, ist die Software ebenfalls für eine Einzelwertbetrachtung ausgelegt. Es kann jeder beliebige *Seed* als Startwert gewählt werden, wobei der zugehörige *Seed* des 95% Quantils eine logische Schlussfolgerung in Bezug auf die statistische Auswertung bietet.

Der Vorteil der Einzelsimulation besteht darin, dass eine Reihe an optischen Auswertungsmöglichkeiten geboten werden. Unter anderem eine Folge von Grafiken auf denen schrittweise die Entfluchtung nachzuvollziehen ist. Das Zeitintervall in dem diese *Screenshots* erfolgen, ist frei wählbar. Weiterhin wird ein sogenannter *Density-Plot* erstellt, aus dem einerseits die Orte der Staubildung und andererseits die Dauer dieser Staus abzulesen sind.

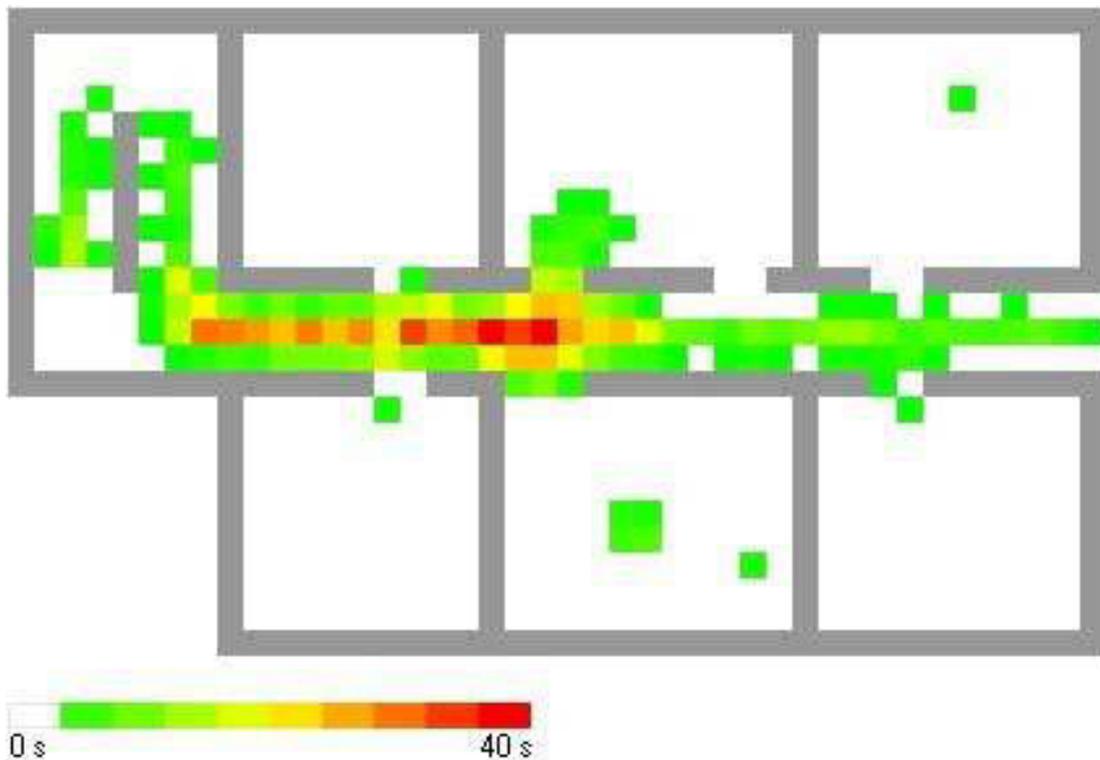


Abbildung 3.4: Density-Plot vom Erdgeschoss des Beispielgrundrisses inklusive Zeitskala.

Zu guter Letzt ist noch die 3D-Animation zu nennen, die es erlaubt den gesamten Grundriss frei zu drehen und zu neigen. Obwohl hier der gesamte Evakuierungsvorgang gut zu erkennen ist, bietet sich diese Art der Auswertung eher zu Demonstrationszwecken an, da hier die Optik den Nutzen überwiegt.

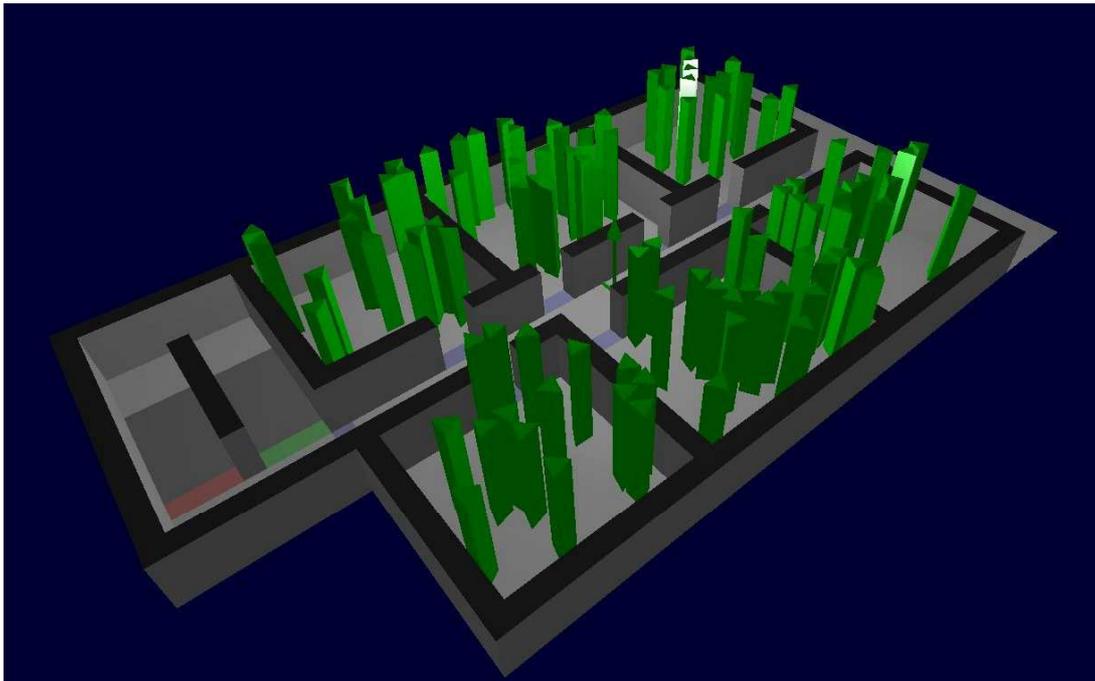


Abbildung 3.5: Momentaufnahme der 3D-Animation. Aus dem Beispielgrundriss im Erdgeschoss aufgenommen.

3.2.3 Schlussfolgerung auf Ergebnisebene

3.2.3.1 Aufwand

Mit steigender Komplexität der Räumlichkeiten ist der Aufwand für die Softwarebenutzung deutlich geringer als für die Handrechnung, vorausgesetzt das zu betrachtende Objekt ist komplizierter als ein Raum mit direktem Ausgang ins Freie. Ist der Nutzer erst vertraut im Umgang mit den Softwaretools, ist das Schaffen der benötigten Voraussetzungen, den Grundriss und verschiedene Personenparameter betreffend, vernachlässigbar, im Vergleich zum Zeitaufwand der Handrechnung. Die Handrechnung kann auf dem Gebiet der Abschätzungen im Vorfeld durchaus gute Dienste leisten, aber in den Ingenieurbüros ist die computergestützte Variante die bessere Wahl. Dieses bestätigt auch die aktuelle Trendentwicklung in diesem Bereich.

3.2.3.2 Kosten und Wirtschaftlichkeit

Der Verfasser verzichtet an dieser Stelle darauf, die Preisliste [11] für die Simulationssoftware „PedGo“ anzuführen, da diese sicherlich Schwankungen unterliegt und deshalb aktuell eingesehen werden sollte. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass das Handrechenverfahren in der Anschaffung günstiger ist, da es größtenteils autodidaktisch zu erlernen ist, die Software hingegen einmalige und laufende Kosten verursacht.

Daraus ergibt sich für die Wirtschaftlichkeit, dass bei regelmäßiger Anwendung ruhigen Gewissens auf die Simulationssoftware gesetzt werden kann, da die entstehenden Kosten durch gesteigerte Quantität, bei gleicher oder höherer Qualität der Auswertung, in kurzer Zeit gedeckt sind und sich ein Gewinn einstellen kann.

3.2.3.3 Aussagekraft

Im Vergleich der Ergebnisse ist deutlich zu erkennen, dass die Aussagekraft der Software um ein Vielfaches höher liegt als die der herkömmlichen Methode nach Predtetschenski und Milinski. Ungeachtet der optischen Erscheinung der Ergebnisdateien von „PedGo“ und den daraus erstellbaren Diagrammen, sind Änderungen am Grundriss oder den Personenparametern spontan möglich und die Resultate können am Monitor direkt verfolgt werden.

Der größte Unterschied liegt jedoch in den Verfahren selbst. Während die Handrechnung als Flussrechnung, das heißt auf makroskopischer Ebene, abläuft, ist die Simulation eine Entfluchtungsanalyse auf mikroskopischer Ebene, da hier die einzelnen Personen mit individuellen Eigenschaften betrachtet werden. Dadurch kommt es zu Diskrepanzen in den Ergebnissen. Daher die wiederholte Empfehlung des Verfassers, auf die Softwarevariante zurückzugreifen, solange kein unüblich simpler Grundriss geringer Ausdehnung vorliegt.

Es kann festgehalten werden, dass die Handrechnung alle geforderten Daten zum Ergebnis hat: das wären die Laufzeiten der Personen, die Stauzeiten inklusive der Staubereiche und sich daraus ergebend, die Gesamtevakuierungsdauer. Als kleiner Zusatz ergibt sich, dem Ablauf des Verfahren geschuldet, der Überblick über die

einzelnen Laufzeiten je Wegabschnitt, was aber keinen wirklichen Vorteil bringt, da diese Zeiten für die Gesamtsituation eher uninteressant sind.

In der Gegenüberstellung bekommt der Nutzer der Software ebenfalls die im vorigen Absatz genannten Ergebnisse geliefert und hat einige zusätzliche Möglichkeiten. Erwähnenswert ist hier der Überblick über die Teilevakuierungszeiten, welche zu einem beliebigen Zeitpunkt die Anzahl an bereits geretteten Personen wiedergeben können. Darüber hinaus können sogenannte *Logpoints* gesetzt und ausgelesen werden. Mit deren Hilfe bestimmte Datensätze bezüglich Wegabschnitten und den darin enthaltenen Agenten über einen definierten Zeitraum erfasst werden.

Um sich selbst einen umfassenden Überblick zu verschaffen, verweist der Verfasser auf die Auswertung der Handrechnung nach Predtetschenski und Milinski in den Abschnitten 2.3 und 2.4. Die Ergebnisse mit möglicher Darstellungsform für die Softwareauswertung sind dem Anhang A bis C zu entnehmen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Nachdem in der vorgelegten Abschlussarbeit eine Gegenüberstellung der beiden gängigsten Methoden zur Berechnung der Evakuierungszeit vorgenommen wurde, konnten die deutlichsten Vorteile bei der Simulationssoftware gefunden werden. Wie mit fortschreitender Rechentechnik zu erwarten, ist die computergestützte Ermittlung der Entfluchtungsdauer zeitlich effektiver und bietet mehr und grafisch bessere Auswertungsmöglichkeiten für den Kunden. Die Weiterentwicklung der Software sollte weiter vertieft werden, um auch in Zukunft den steigenden Anforderungen an Sicherheit, Zeit- und Personalsparnis und Darstellungs- und Präsentationsvielfalt für den Klienten entsprechen zu können. Die Anwendung des Handrechenmodells wird wahrscheinlich zukünftig weiter zurückgehen und früher oder später vollständig durch die Rechnersimulation abgelöst werden.

Abschließend soll darauf hingewiesen werden, dass die Gestaltungs- und Aufbereitungsmöglichkeiten der Simulationsergebnisse, als auch die der Handrechnung einen großen Spielraum lassen. Die hier vorgelegte Darstellungsweise ist nur *eine* Möglichkeit der Aufbereitung und sollte keineswegs als optimale Variante betrachtet, sondern vielmehr als Grundlage, bzw. Gedankenanstoß, für individuelle Weiterentwicklungen genutzt werden.

Anhang A



Beurteilung der Rettungswegesituation

Evakuierungssimulation

Objekt: Sporthalle [REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED] Berlin

Auftraggeber: [REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]

Auftragnehmer: DBS – Die Bausachverständigen
Sachverständigen-gesellschaft für ganzheitliche Analyse mbH
Rießerseestraße 10
12527 Berlin

Bearbeiter: Frank Leymann, B.Eng.
Pintschstraße 23
10249 Berlin



Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
1.1 Allgemeines	3
1.2 Stand der Technik	3
1.3 Prinzipien der Simulation.....	4
2. Szenarien	5
2.1 Randbedingungen.....	5
2.2 Grundrisse und dazugehörige Rettungswege	7
2.3 Personenverteilung im Objekt.....	8
4. Ergebnisse	10
4.1 Allgemein Erläuterungen	10
4.2 Simulationsergebnis Fall 1	11
Fazit (Fall 1):	13
4.3 Simulationsergebnis Fall 2.....	14
Fazit (Fall 2):	16
4.4 Simulationsergebnis Fall 3.....	17
Fazit (Fall 3):	19
4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse	20
5. Literatur und Informationen	22

1. Einleitung

1.1 Allgemeines

Bei einer Simulation handelt es sich um ein vereinfachtes mathematisches Modell der Realität. Dieses Modell kann mit zunehmender Komplexität auch immer präziser an die reale Vorgabe angenähert werden. Dies führt jedoch zu erhöhtem Aufwand bei der Anwendung der Simulationssoftware und ist damit ungeeignet für den Gebrauch in einem Ingenieurbüro, um alltägliche Simulationen im Bereich „Vorbeugender Brandschutz“ durchführen zu können.

Das Unternehmen „*TraffGo*“ hat mit der Simulationssoftware „*PedGo*“ einen Kompromiss gefunden, indem jegliche psychologischen Aspekte bei einer Evakuierungssituation außen vor gelassen werden. Die Personen bewegen sich entlang der vom Benutzer vorgegebenen Routen, mit festeingestellten Fortbewegungsparametern. Somit ist darauf hinzuweisen, dass die Simulation einen idealisierten Fall darstellt, welchen man auch als „*geordnete Evakuierung*“ bezeichnen könnte, da jedwede Art von Panik oder hysterischem Verhalten unberücksichtigt bleibt.

1.2 Stand der Technik

Bei der Planung von Fluchtwegen beschränkt man sich derzeit meist auf die geometrischen Eigenschaften und bedient sich einiger Handrechenmodelle, die zum Großteil alle auf die Ursprungswerke der Evakuierungsberechnungen, von Predtetschenski und Milinski, zurückzuführen sind. Bei eben genanntem Werk handelt es sich um ein Verfahren, welches auf einem hydraulischen Modell beruht, bei dem die zu rettenden Personen wie ein Fluid in Richtung der Ausgänge fließen. Ferner existieren Vorschriften, wie z.B. die Musterbauordnung, mit deren Hilfe die Fluchtwege ohne eine komplizierte Rechnung bemessen werden können. Diese Bemessungshilfen liefern jedoch Werte, die auf der „*sicheren Seite*“ liegen und somit, im Verhältnis zu den real benötigten Eigenschaften der Rettungswege, zu unwirtschaftlicheren Ergebnissen führen als mit einer modernen Simulation erreicht werden können. Des Weiteren ist die Handrechenmethode oftmals zeitaufwendiger als die Computersimulation, bei der Erstellung eines Gutachtens für ein komplettes

Gebäude. Folglich geht der Trend nicht nur bei besonderen Gebäuden oder Veranstaltungsräumlichkeiten in Richtung einer Evakuierungssimulation. Verständlicherweise werden nun immer mehr Objekte mit EDV-Unterstützung analysiert und bewertet. Die Grundlagen der Simulationssoftware PedGo basieren auf den Resultaten des Forschungsvorhabens „BYPASS“, welches unter der Leitung von Prof. Dr. Michael Schreckenber g durchgeführt wurde und die Evakuierungsanalyse von Fahrgast Schiffen zum Gegenstand hatte. Die gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen fließen in die Simulationssoftware PedGo ein, diese ist zudem von der See-Berufsgenossenschaft zertifiziert worden.

1.3 Prinzipien der Simulation

Es gibt verschiedene Arten der Computersimulation, unter anderem die „Diskrete Simulation“, welcher sich auch PedGo bedient. Die Diskretisierung bezieht sich hierbei auf die Gebäudegeometrie, da die begehbaren Flächen in Quadrate mit den Seitenlängen 40 cm unterteilt werden. Darüber hinaus handelt es sich um eine mikroskopische Simulationsmethode, d.h. den einzelnen „Agenten“ können individuelle Eigenschaften zugeordnet werden, diese beeinflussen das Bewegungsverhalten in unterschiedlicher Art und Weise. Die Agenten bewegen sich unter Berücksichtigung der verschiedenen festgelegten Parameter, wie z.B. der Gebäudegeometrie, den Personenkennwerten und den ggf. festgelegten Fluchtrouten zu den Ausgängen. Dabei wird die Simulation in Zeitintervalle zu je einer Sekunde unterteilt, innerhalb dieser Intervalle wird die Bewegung der Agenten durch sogenannte „Updates“ gesteuert. Für einen Simulationsdurchlauf bekommt man einen möglichen Ablauf der Entfluchtung inklusive einer entsprechenden Zeit, die benötigt wird das Gebäude zu räumen. Um eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zu erhalten, die der Realität möglichst nahe kommt, werden fünfhundert Durchläufe berechnet. Anschließend lassen sich detaillierte Daten ermitteln, indem beliebige Einzelrechnungen wiederholt werden können. Genauere Informationen zur Funktionsweise der Software und weitere Veröffentlichungen im Bereich Evakuierung sind auf der Webseite www.TraffGo-HT.com zu finden.

2. Szenarien

2.1 Randbedingungen

Um die Evakuierungsdauer abschätzen zu können, werden im Folgenden verschiedene Brandsituationen mit der Software PedGo der TraffGo GmbH simuliert und ausgewertet.

Die Sporthalle in der [REDACTED] Berlin soll mehrmals pro Jahr für größere Sportveranstaltungen genutzt werden. Während dieser Großveranstaltungen befinden sich, gemäß der Festlegung des [REDACTED] maximal 605 Personen im Gebäude.

Diese verteilen sich wie folgt im Objekt:

- ca. 150 Personen im Obergeschoss
- ca. 200 Personen auf der Tribüne
- ca. 50 Personen im Mehrzweckraum
- ca. 200 Sportler und Betreuer in der Halle
- 5 Rollstuhlfahrer (vier neben den Tribünen, einer im Mehrzweckraum)

Aufgrund der Tatsache, dass die Simulationssoftware PedGo keinerlei psychologische Aspekte berücksichtigt, wird von einer zügigen Entfluchtung mit einer Reaktionszeit zwischen 0 und 60 Sekunden ausgegangen. Demzufolge reagieren alle Personen innerhalb von 60 Sekunden nach Brandalarmierung.

Folgende Szenarien werden untersucht:

Fall 1: Brandereignis in der Halle im Bereich der Tribüne, **alle Ausgänge sind nutzbar**

Fall 2: Brandereignis im Foyer der Sporthalle, **Besucherausgang ist nicht nutzbar**

Fall 3: Brandereignis in einem Geräteraum, **Ausgang in diesem Bereich ist nicht nutzbar**

In allen drei Fällen gestaltet sich die Verteilung, wie oben angegeben, gleich und wird in den Abbildungen grafisch dargestellt. Des Weiteren werden in allen Fällen fünf Rollstuhlfahrer (vier neben den Tribünen und einer im Mehrzweckraum) berücksichtigt. Begleitpersonen müssen vorhanden sein.

In einigen der folgenden Fälle werden einzelne Ausgänge aufgrund der unterschiedlichen Brandsituationen nicht nutzbar sein, daher müssen die flüchtenden Personen auf anderen Wegen ins Freie gelangen. Dieser Umstand verlangt jedoch nach alternativen Rettungsrouten, welche vom Verfasser vorgegeben und somit unterstellt werden müssen. Bei der Wahl dieser Routen wird nach bestimmten Auswahlkriterien entschieden, diese beinhalten die Kenntnis des jeweiligen Evakuierungsweges, Häufigkeit in der täglichen Benutzung, kürzeste Entfernung bis zum Evakuierungsausgang und Wahrnehmung von Rauch als hindernder Faktor.

2.2 Grundrisse und dazugehörige Rettungswege

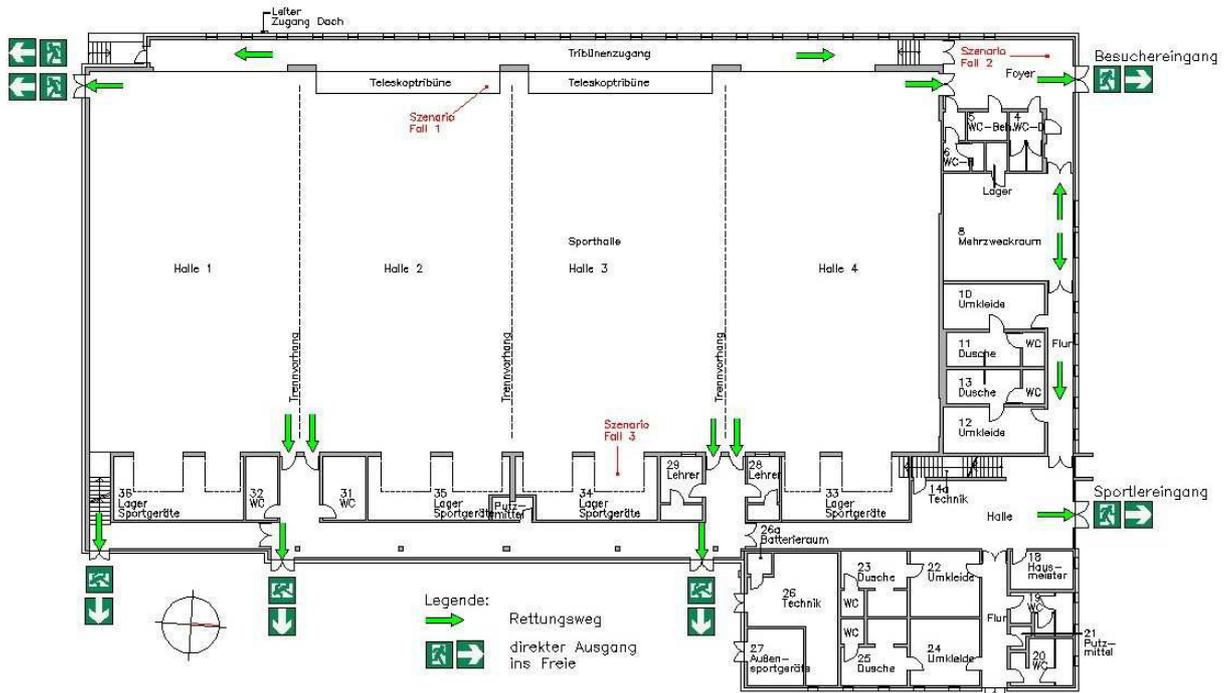


Abb. 1: Erdgeschoss mit Kennzeichnung der Rettungswege und nutzbaren Ausgänge ins Freie.

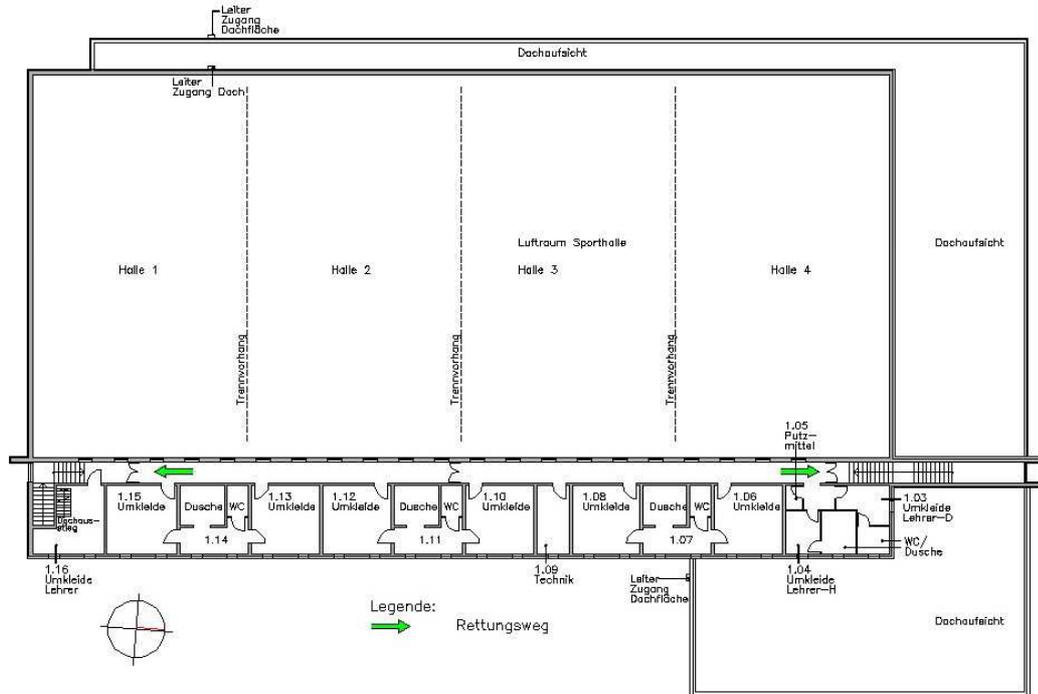
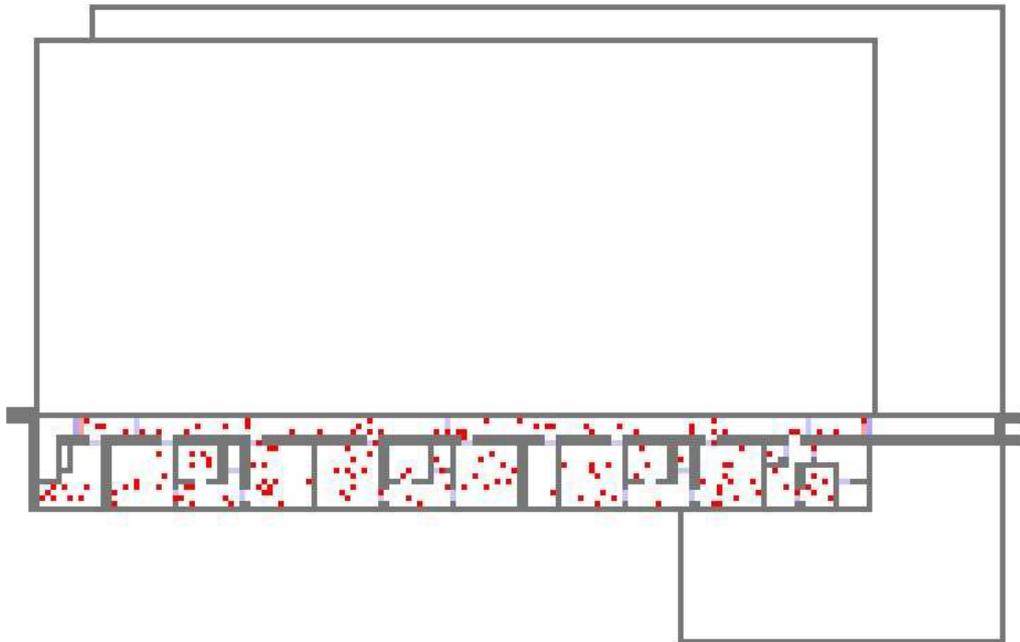
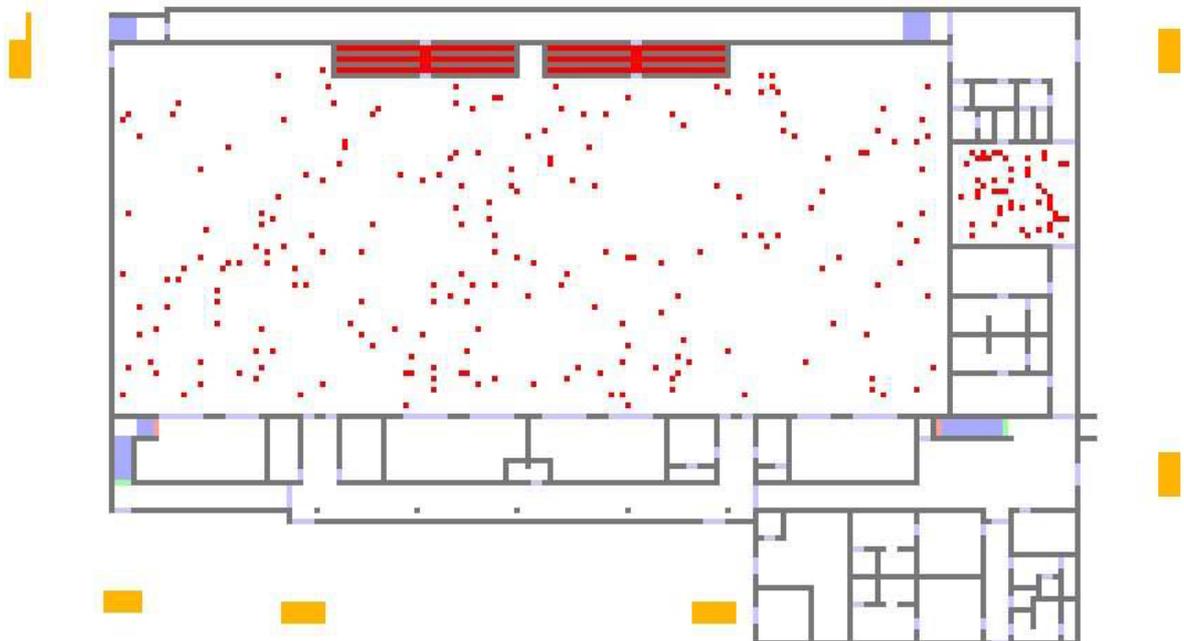


Abb. 2: Obergeschoss mit Kennzeichnung der Rettungswege.

2.3 Personenverteilung im Objekt



Obergeschoss



Erdgeschoss

Abb. 3: Beispiel einer Anfangsverteilung für alle drei Fälle – modellierter Grundriss mit Türen, Treppen, Personen und Ausgängen.

3. Personenparameter

Das Verhalten der Personen, innerhalb der Simulation, wird durch sechs verschiedene Parameter bestimmt. Die hier verwendeten Werte stellen einen durchschnittlichen Bevölkerungsquerschnitt dar und entsprechen einer statistischen Normalverteilung. Um die abweichenden Fortbewegungseigenschaften der Rollstuhlfahrer zu erfassen, wurden die Standardwerte entsprechend angepasst. Die Reaktionszeit nach Brandalarmierung wurde zwischen 0 und 60 Sekunden angesetzt.

Tab. 1: Parameter der normalen Personen für alle Fälle

	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standard- abweichung	Einheit
Laufgeschwindigkeit	2	5	3	1	Zellen/s
Geduld	-	-	-	-	s
Schwanken	1	5	3	2	Zellen
Reaktionszeit	0	60	30	10	s
Trödeln	0	30	15	5	%
Trägheit	1	5	3	2	%

Tab. 2: Parameter der Rollstuhlfahrer für alle Fälle

	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standard- abweichung	Einheit
Laufgeschwindigkeit	2	2	-	-	Zellen/s
Geduld	5000	5000	-	-	s
Schwanken	1	1	-	-	Zellen
Reaktionszeit	0	60	30	300	s
Trödeln	0	50	25	250	%
Trägheit	1	1	-	-	%

4. Ergebnisse

4.1 Allgemeine Erläuterungen

Um hinreichend präzise und realitätsnahe Resultate zu erhalten, müssen pro Szenario mehrere Simulationsdurchläufe erfasst werden. Diese werden in einer Mittelwertrechnung durchgeführt, welche in vorliegendem Gutachten jeweils 500 Simulationen je Brandfall umfasst. Weil es nicht zielführend wäre alle 500 Ergebnisse darzustellen, wird eine stellvertretende Simulation, mit einer Evakuierungsdauer größer oder gleich 95% aller Durchläufe, aus diesem Datenpool wiederholt. Anhand dieser Wiederholung können nun signifikante Staus und deren Auflösung grafisch dargestellt werden. Dazu werden Dichteplots herangezogen, die eine Zusammenfassung des gesamten Evakuierungsablaufs wiedergeben. Staus liegen in der Simulation dann vor, wenn die Personendichte gleich 4 P/m^2 oder höher ist.

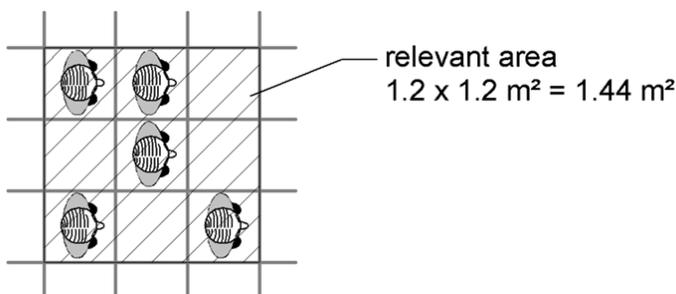


Abb. 4: Beispiel zur Verdeutlichung der Dichteberechnung im zellularen Gitter. Hier beträgt die Dichte etwa $3,5 \text{ P/m}^2$.

Das Programm berechnet zu jedem Zeitschritt die Dichte jeder Zelle, zeichnet den zeitlichen Verlauf der Dichteüberschreitungen auf und gibt diesen in einem grün-roten Farbverlauf in den Dichteplots wieder. Anhand dieser Übersicht können anschließend Aussagen über die Dauer der Staus und deren Auflösung getroffen werden.

4.2 Simulationsergebnis Fall 1

Brandereignis in der Halle, nahe den Tribünen. Alle Ausgänge sind nutzbar.

Nach 500 Simulationsdurchläufen ergeben sich die folgenden Zeiten:

Mittelwert [min:s]:	2:42
Standardabweichung [min:s]:	0:13
95% Quantil [min:s]:	3:06
Minimum [min:s]:	2:16
Maximum [min:s]:	3:31

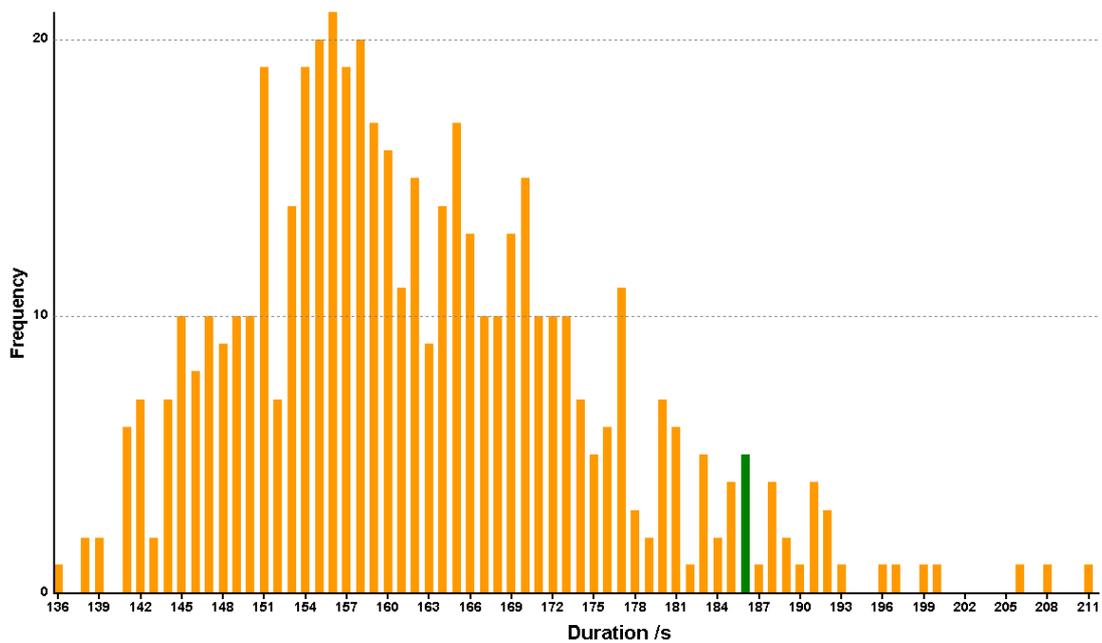


Abb. 5: Die Normalverteilung aller simulierten Entfluchtungsauern. Die grün markierte Säule stellt den 95 % Quantil Wert dar und wird für die Einzelbetrachtung verwendet.

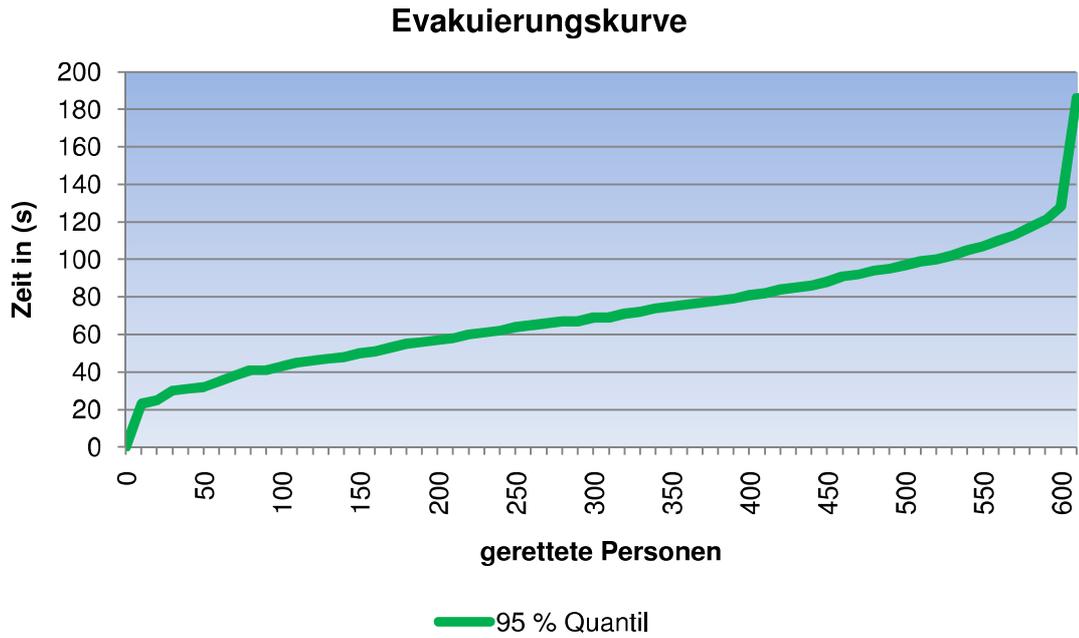


Abb. 6: Die Evakuierungskurve gibt an, wie viele Personen zu welcher Zeit gerettet wurden.

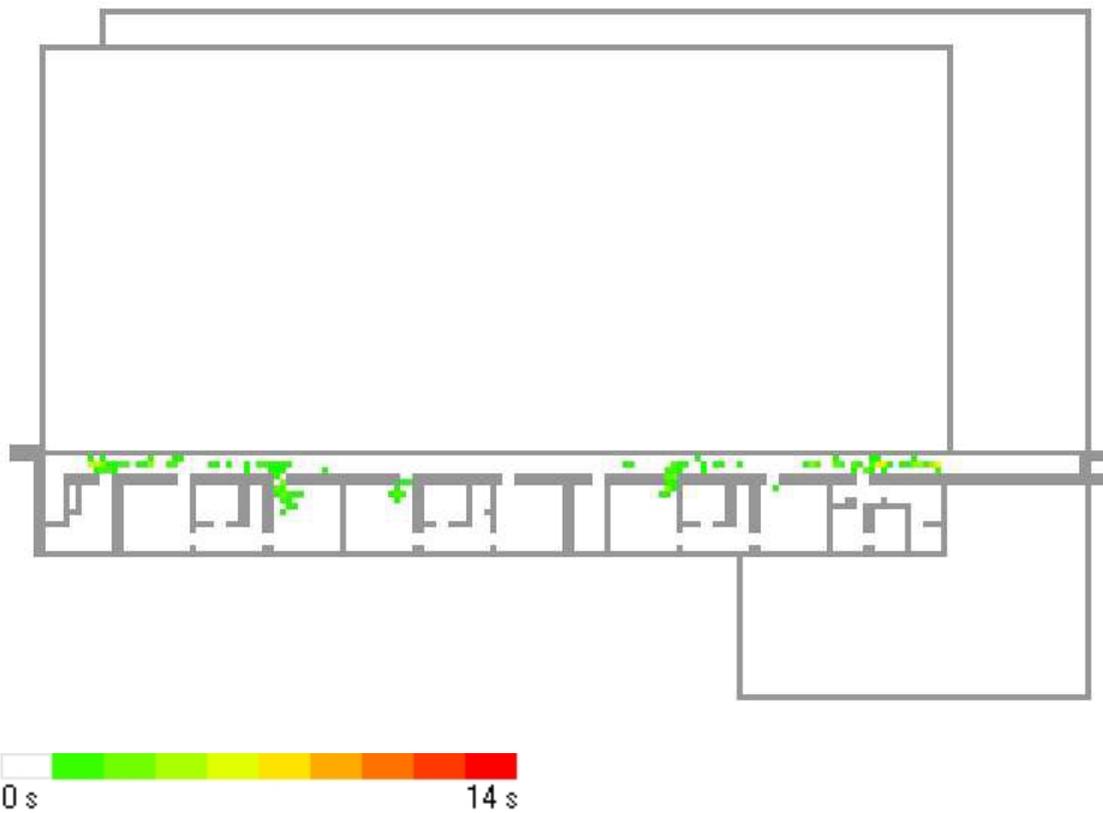


Abb. 7: Dichteplot des Obergeschosses, die Farbgebung von grün, über gelb bis rot kennzeichnet die Stellen und die Zeit bis zur Auflösung von Stauungen.

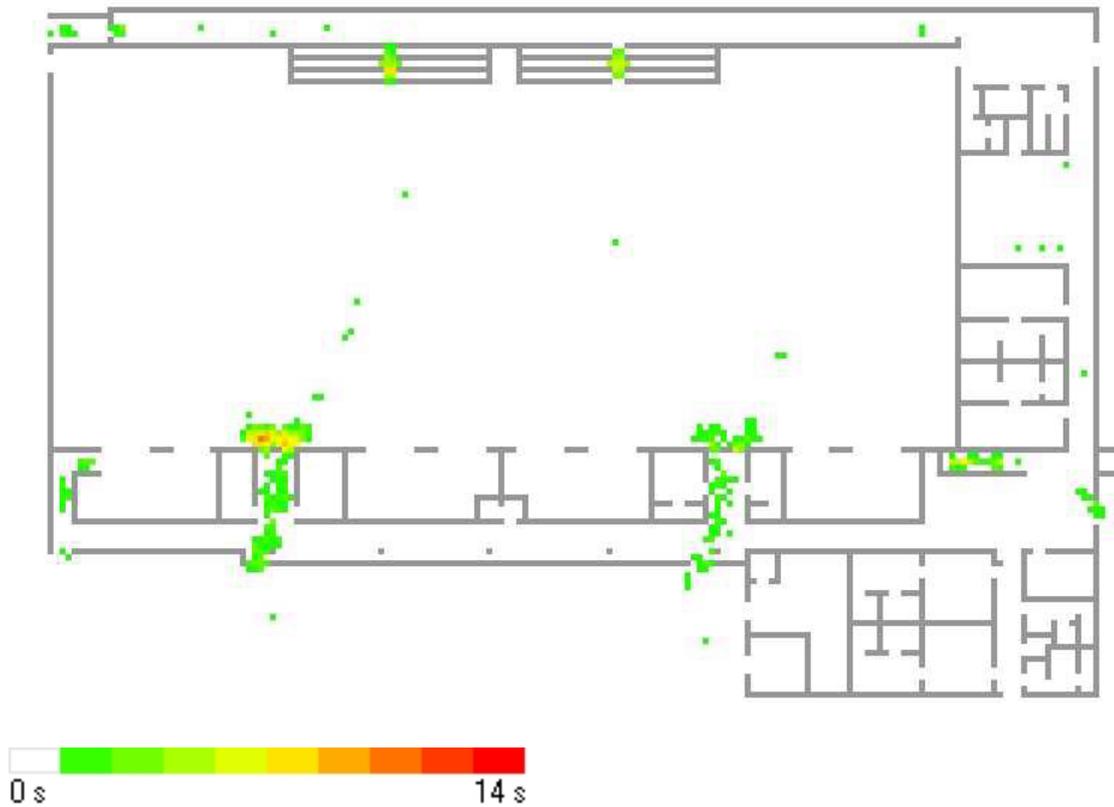


Abb. 8: Dichteplot des Erdgeschosses, die Farbgebung von grün, über gelb bis rot kennzeichnet die Stellen und die Zeit bis zur Auflösung von Stauungen.

Fazit (Fall 1):

Aus der Simulation geht hervor, dass nach 2:33 Minuten alle Personen die Halle und nach 3:06 Minuten das Gebäude und die Gefahrenzone verlassen haben. Dabei bildeten sich signifikante Staus lediglich im Erdgeschoss an den beiden östlichen Hallennotausgängen, jedoch lösten sich ausnahmslos alle Stauungen in weniger als 14 Sekunden auf. Unter der Voraussetzung, dass alle Ausgänge genutzt werden können, ist in 95 % aller Fälle mit einer Evakuierungszeit von 3:06 Minuten oder weniger zu rechnen.

4.3 Simulationsergebnis Fall 2

Brandereignis im Foyer des Besuchereingangs, dieser ist folglich nicht nutzbar.

Nach 500 Simulationsdurchläufen ergeben sich die folgenden Zeiten:

Mittelwert [min:s]:	2:44
Standardabweichung [min:s]:	0:13
95% Quantil [min:s]:	3:07
Minimum [min:s]:	2:18
Maximum [min:s]:	3:47

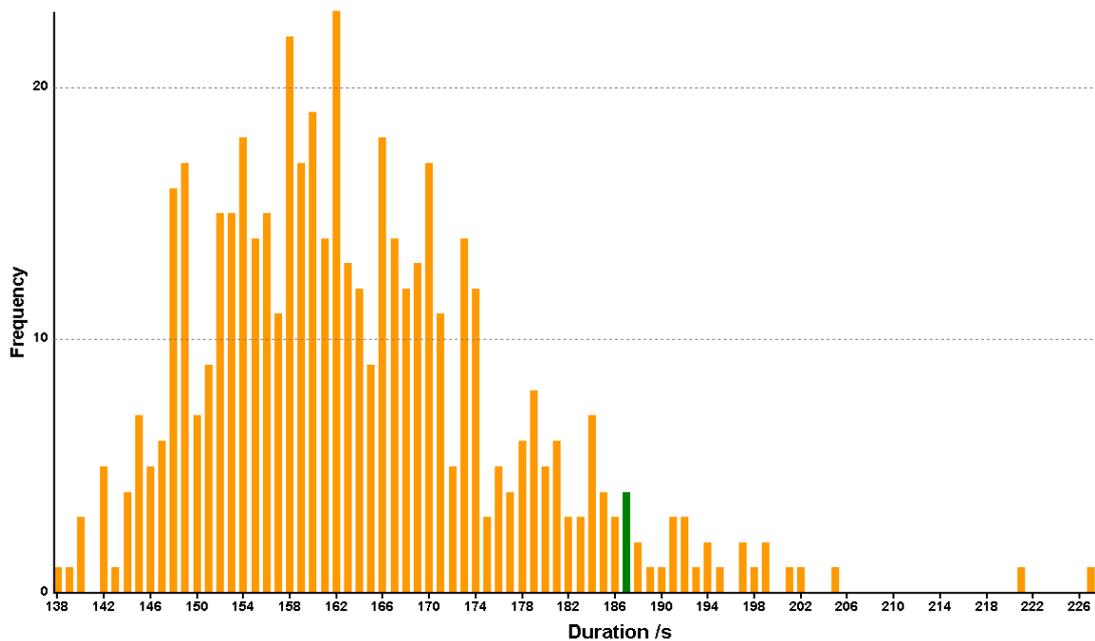


Abb. 9: Die Normalverteilung aller simulierten Entfluchtungsauern. Die grün markierte Säule stellt den 95 % Quantil Wert dar und wird für die Einzelbetrachtung verwendet.

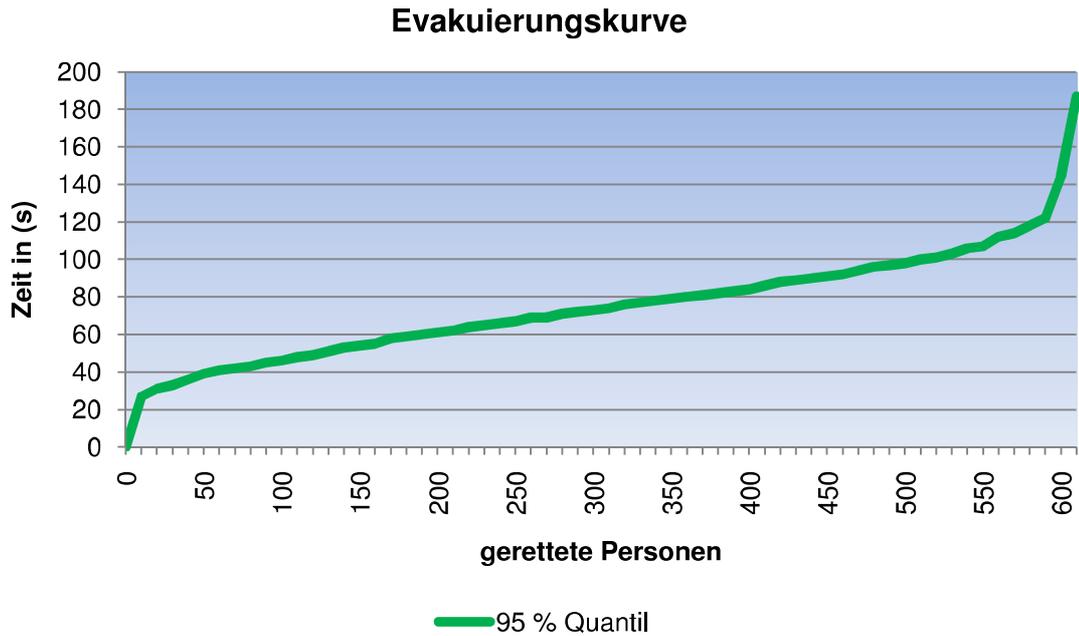


Abb. 10: Die Evakuierungskurve gibt an, wie viele Personen zu welcher Zeit gerettet wurden.

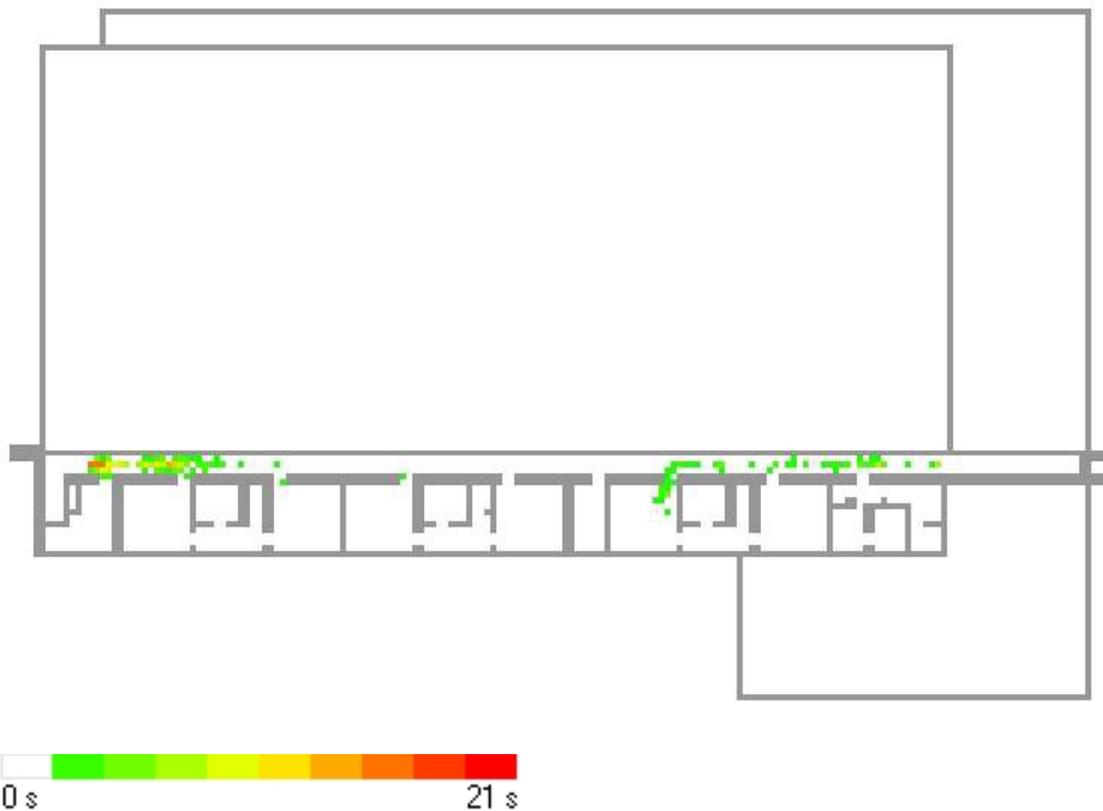


Abb. 11: Dichteplot des Obergeschosses, die Farbgebung von grün, über gelb bis rot kennzeichnet die Stellen und die Zeit bis zur Auflösung von Stauungen.

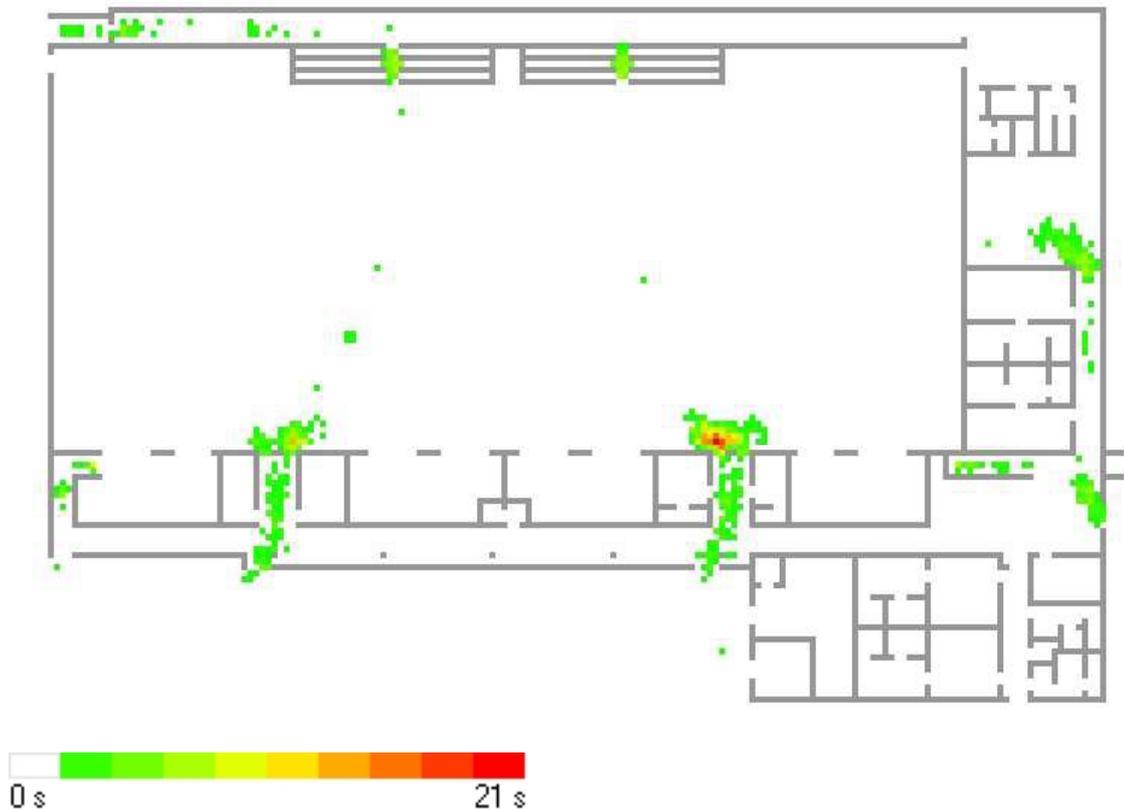


Abb. 12: Dichteplot des Erdgeschosses, die Farbgebung von grün, über gelb bis rot kennzeichnet die Stellen und die Zeit bis zur Auflösung von Stauungen.

Fazit (Fall 2):

Aus der Simulation geht hervor, dass nach 2:17 Minuten alle Personen die Halle und nach 3:07 Minuten das Gebäude und die Gefahrenzone verlassen haben. Dabei bildeten sich signifikante Staus im Erdgeschoss an den beiden östlichen Hallennotausgängen, der östlichen Tür des Mehrzweckraums sowie an der Haupteingangstür der Sportler an der Nordseite des Gebäudes, alle Stauungen werden in weniger als 21 Sekunden aufgelöst. Unter der Voraussetzung, dass der Besuchereingang nicht genutzt werden kann, ist in 95 % aller Fälle mit einer Evakuierungszeit von 3:07 Minuten oder weniger zu rechnen.

4.4 Simulationsergebnis Fall 3

Brandereignis in einem Geräteraum, Ausgang in diesem Bereich nicht nutzbar. Hierdurch fällt einer der östlichen Hallenausgänge weg.

Nach 500 Simulationsdurchläufen ergeben sich die folgenden Zeiten:

Mittelwert [min:s]:	2:38
Standardabweichung [min:s]:	0:12
95% Quantil [min:s]:	2:57
Minimum [min:s]:	2:15
Maximum [min:s]:	3:22

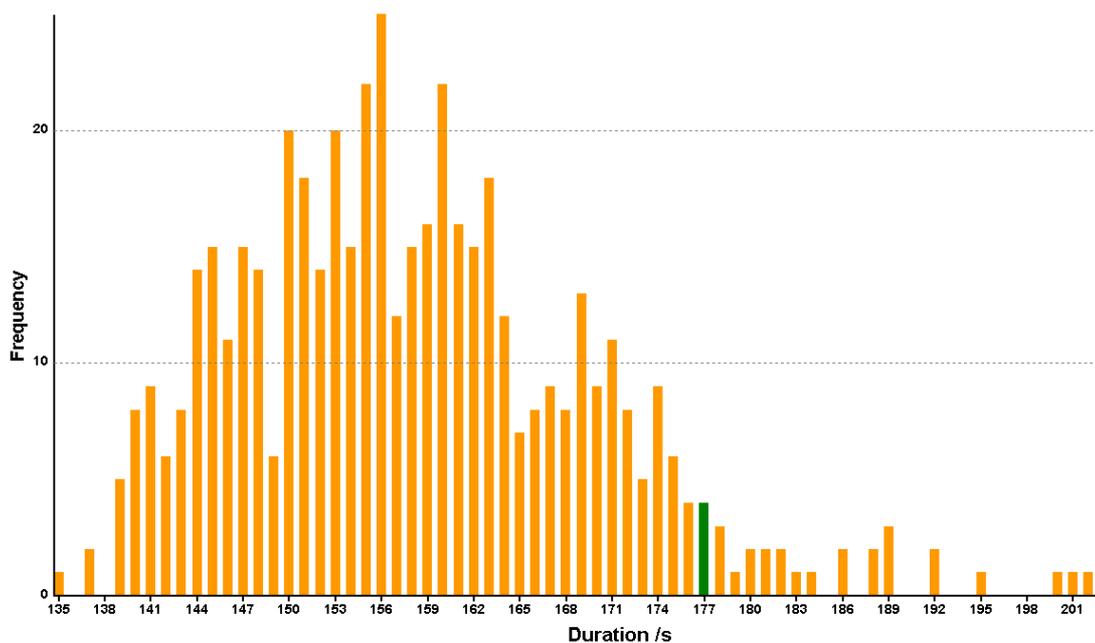


Abb. 13: Die Normalverteilung aller simulierten Entfluchtungsauern. Die grün markierte Säule stellt den 95 % Quantil Wert dar und wird für die Einzelbetrachtung verwendet.

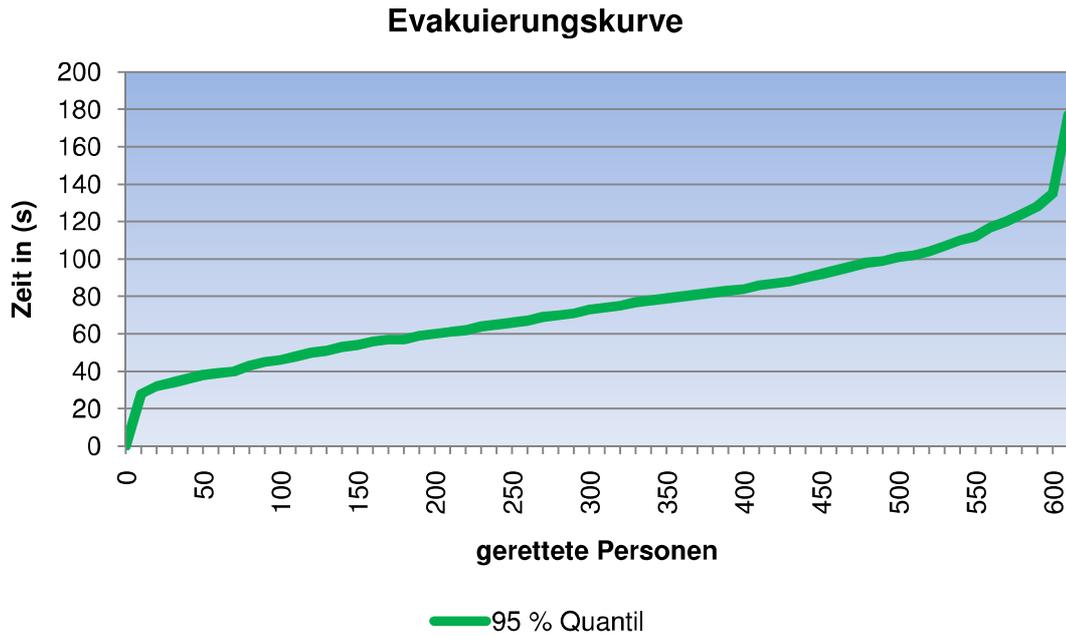


Abb. 14: Die Evakuierungskurve gibt an, wie viele Personen zu welcher Zeit gerettet wurden.

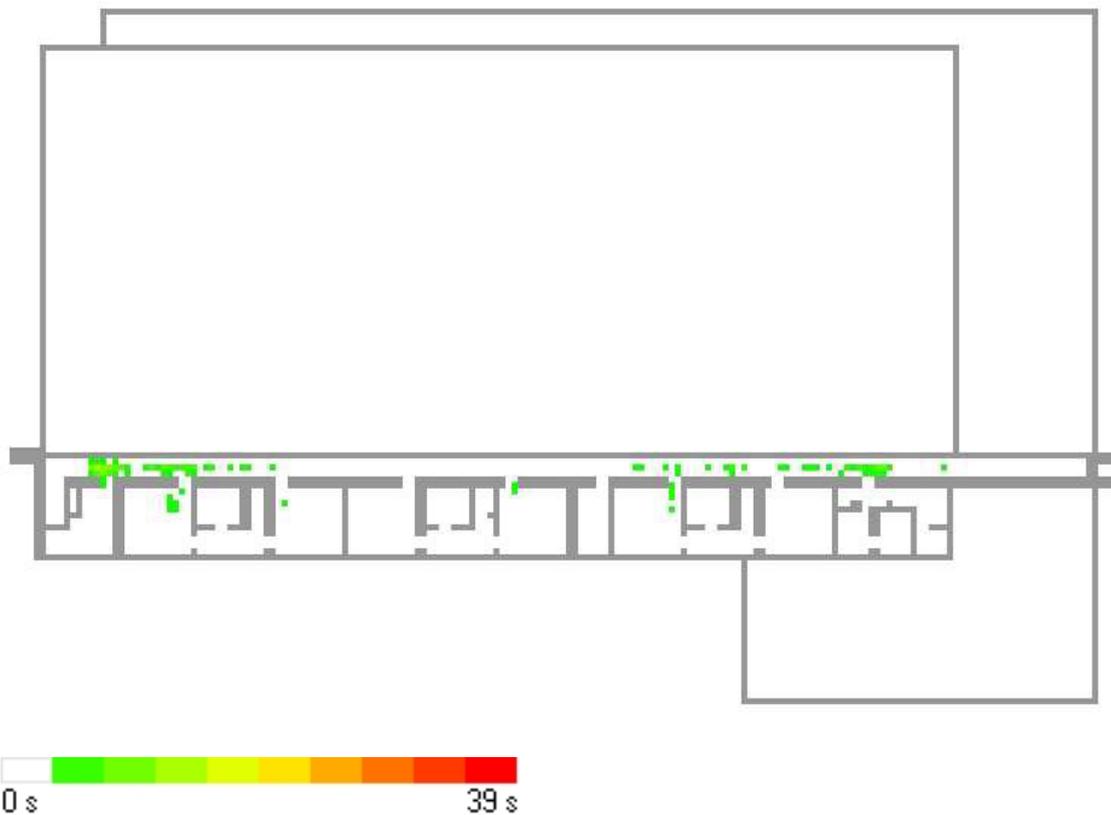


Abb. 15: Dichteplot des Obergeschosses, die Farbgebung von grün, über gelb bis rot kennzeichnet die Stellen und die Zeit bis zur Auflösung von Stauungen.

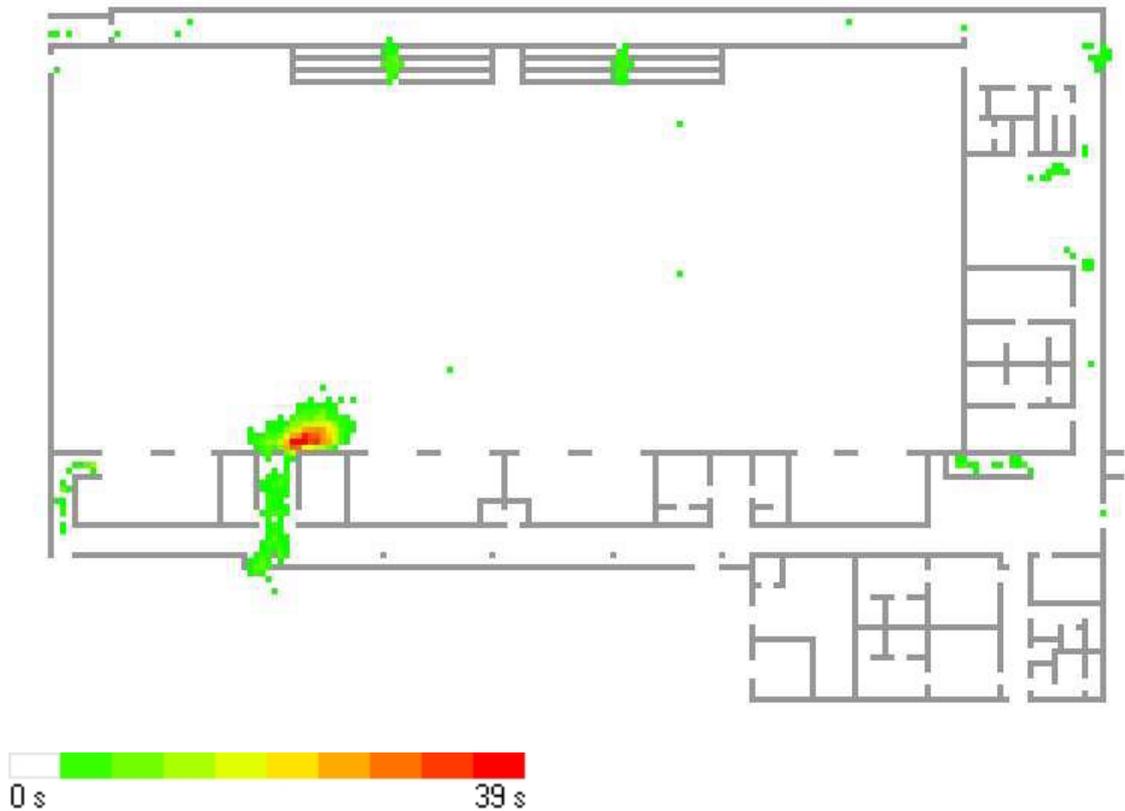


Abb. 16: Dichteplot des Erdgeschosses, die Farbgebung von grün, über gelb bis rot kennzeichnet die Stellen und die Zeit bis zur Auflösung von Stauungen.

Fazit (Fall 3):

Aus der Simulation geht hervor, dass nach 2:13 Minuten alle Personen die Halle und nach 2:57 Minuten das Gebäude und die Gefahrenzone verlassen haben. Dabei bildete sich ein signifikanter Stau im Erdgeschoss an dem mittleren östlichen Hallennotausgang, alle Stauungen werden in weniger als 39 Sekunden aufgelöst. Unter der Voraussetzung, dass der östliche Notausgang in der Nähe des Geräteraums nicht genutzt werden kann, ist in 95 % aller Fälle mit einer Evakuierungszeit von 2:57 Minuten oder weniger zu rechnen.

4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Evakuierungskurve (95 % Quantil) für alle Fälle

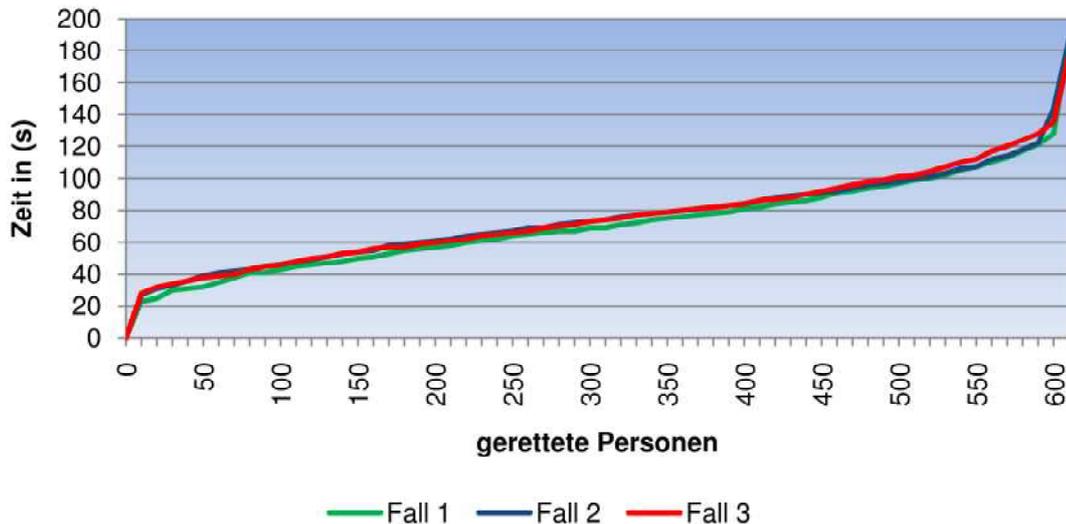


Abb. 17: Vergleich der Evakuierungskurven der Fälle 1, 2 und 3.

Abschließend kann festgehalten werden, dass alle **605 Personen** das Gebäude über die jeweils verfügbaren Rettungswege verlassen können. Die Fälle 1 (Abb. 5) und 2 (Abb. 9) unterscheiden sich kaum voneinander und ergeben längere Entfluchtungszeiten als Fall 3 (Abb. 13). Dementsprechend ist die **Halle nach 2:33 Minuten geräumt** und nach **3:07 Minuten** haben alle Personen **das Gebäude verlassen**. Signifikante Staus treten grundsätzlich an den östlichen Hallennotausgängen auf, die **Stauzeiten** liegen gemeinhin **unter 40 Sekunden**.

Die Ergebnisse dieses Gutachtens stellen lediglich Zeitwerte dar, die aussagen, wie viel Zeit benötigt wird um das Gebäude zu räumen. Für einen wertenden Vergleich, werden zudem noch die tatsächlich vorhandenen Zeiten, die zur Evakuierung im Ernstfall zur Verfügung stehen, benötigt. Erst nach diesem Schritt kann eine Einschätzung der Tauglichkeit bzw. Eignung der Sportstätte in der [REDACTED] Berlin, für Großveranstaltungen getroffen werden. Die Ermittlung dieser Werte ist jedoch nicht Bestandteil dieses Gutachtens.

Die hier ermittelte Evakuierungszeit ist die Zeit von der Alarmierung bis zum Erreichen des Freien bzw. eines sicheren Bereiches.

Die Evakuierungsberechnung mit Simulationssoftware wurde auf den jeweiligen Einzelfall und auf die Nutzung der konkreten baulichen Anlage zum Bearbeitungsstand abgestimmt. Bei Änderungen der Gegebenheiten und Voraussetzungen oder durch weitere Umplanungen wird eine Neubetrachtung der Evakuierungszeit notwendig.

5. Literatur und Informationen

- (1) *Abschlussbericht zum Projekt BYPASS*, [Prof. Dr. Michael Schreckenberg, Gerhard Mercator Universität Duisburg 2003]
- (2) *Neue physikalische Modellierungskonzepte*, [Dirk Helbing, Verkehrsdynamik, Springer Verlag 1996]
- (3) *Assessment and Analysis of Evacuation Processes on Passenger Ships by Microscopic Simulation*, [Tim Meyer-König, Hubert Klüpfel, Michael Schreckenberg, Pedestrian and Evacuation Dynamics, Springer Verlag]
- (4) *Evakuierungsberechnung – Evakuierung von Personen aus Gebäuden*, [Dr.-Ing. Klaus Müller, EIPOS e.V., 2004]

Dieses Sachverständigengutachten zur Beurteilung der Rettungswegesituation wurde nach bestem Wissen und Gewissen erstellt. Es ist ausschließlich ungekürzt in seinem gesamten Wortlaut zu verwenden. Eine Veröffentlichung, auch auszugsweise bedarf der schriftlichen Genehmigung. Dieses Gutachten, einschließlich aller Teile, ist Urheberrechtlich geschützt.

Die Evakuierungsberechnung umfasst 22 Seiten.

Berlin, den 27.07.2011

Verfasser:

Frank Leymann, B.Eng.

Anhang B



Anmerkungen zu Anhang B:

Der Entwurf der Grundrisse inklusive aller Merkmale und Angaben zu Besucherzahlen des folgenden Beispiels stammen von [REDACTED]. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass dem Verfasser die ausdrückliche Erlaubnis zur Verwendung dieser Daten erteilt wurde.

In der direkt anschließenden Evakuierungsberechnung werden, zu rein experimentellen Zwecken, auch höchst unwahrscheinliche Szenarien betrachtet, die so nicht in einem praxisnahen Gutachten vorkommen würden.

Beurteilung der Rettungswegesituation

Evakuierungssimulation

Objekt: Sporthalle [REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED] Berlin

Auftraggeber: [REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]

Auftragnehmer: DBS – Die Bausachverständigen
Sachverständigen-gesellschaft für ganzheitliche Analyse mbH
Rießerseestraße 10
12527 Berlin

Bearbeiter: Frank Leymann, B.Eng.
Pintschstraße 23
10249 Berlin



Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
1.1 Allgemeines	3
1.2 Stand der Technik	3
1.3 Prinzipien der Simulation.....	4
2. Szenarien	5
2.1 Randbedingungen.....	5
2.2 Grundrisse und dazugehörige Rettungswege	7
2.3 Personenverteilung im Objekt.....	8
3. Personenparameter	9
4. Ergebnisse	10
4.1 Allgemein Erläuterungen	10
4.2 Simulationsergebnis Fall 1	11
Fazit (Fall 1):	13
4.3 Simulationsergebnis Fall 2.....	14
Fazit (Fall 2):	16
4.4 Simulationsergebnis Fall 3.....	17
Fazit (Fall 3):	19
4.5 Simulationsergebnis Fall 4.....	20
Fazit (Fall 4):	22
4.6 Simulationsergebnis Fall 5 (unwahrscheinlicher Extremfall).....	23
Fazit (Fall 5):	25
4.7 Zusammenfassung der Ergebnisse	26
5. Literatur und Informationen	28

1. Einleitung

1.1 Allgemeines

Bei einer Simulation handelt es sich um ein vereinfachtes mathematisches Modell der Realität. Dieses Modell kann mit zunehmender Komplexität auch immer präziser an die reale Vorgabe angenähert werden. Dies führt jedoch zu erhöhtem Aufwand bei der Anwendung der Simulationssoftware und ist damit ungeeignet für den Gebrauch in einem Ingenieurbüro, um alltägliche Simulationen im Bereich „Vorbeugender Brandschutz“ durchführen zu können.

Das Unternehmen „*TraffGo*“ hat mit der Simulationssoftware „*PedGo*“ einen Kompromiss gefunden, indem jegliche psychologischen Aspekte bei einer Evakuierungssituation außen vor gelassen werden. Die Personen bewegen sich entlang der vom Benutzer vorgegebenen Routen, mit festeingestellten Fortbewegungsparametern. Somit ist darauf hinzuweisen, dass die Simulation einen idealisierten Fall darstellt, welchen man auch als „*geordnete Evakuierung*“ bezeichnen könnte, da jedwede Art von Panik oder hysterischem Verhalten unberücksichtigt bleibt.

1.2 Stand der Technik

Bei der Planung von Fluchtwegen beschränkt man sich derzeit meist auf die geometrischen Eigenschaften und bedient sich einiger Handrechenmodelle, die zum Großteil alle auf die Ursprungswerke der Evakuierungsberechnungen, von Predtetschenski und Milinski, zurückzuführen sind. Bei eben genanntem Werk handelt es sich um ein Verfahren, welches auf einem hydraulischen Modell beruht, bei dem die zu rettenden Personen wie ein Fluid in Richtung der Ausgänge fließen. Ferner existieren Vorschriften, wie z.B. die Musterbauordnung, mit deren Hilfe die Fluchtwege ohne eine komplizierte Rechnung bemessen werden können. Diese Bemessungshilfen liefern jedoch Werte, die auf der „*sicheren Seite*“ liegen und somit, im Verhältnis zu den real benötigten Eigenschaften der Rettungswege, zu unwirtschaftlicheren Ergebnissen führen als mit einer modernen Simulation erreicht werden können. Des Weiteren ist die Handrechenmethode oftmals zeitaufwendiger als die Computersimulation, bei der Erstellung eines Gutachtens für ein komplettes

Gebäude. Folglich geht der Trend nicht nur bei besonderen Gebäuden oder Veranstaltungsräumlichkeiten in Richtung einer Evakuierungssimulation. Verständlicherweise werden nun immer mehr Objekte mit EDV-Unterstützung analysiert und bewertet. Die Grundlagen der Simulationssoftware PedGo basieren auf den Resultaten des Forschungsvorhabens „BYPASS“, welches unter der Leitung von Prof. Dr. Michael Schreckenber g durchgeführt wurde und die Evakuierungsanalyse von Fahrgast Schiffen zum Gegenstand hatte. Die gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen fließen in die Simulationssoftware PedGo ein, diese ist zudem von der See-Berufsgenossenschaft zertifiziert worden.

1.3 Prinzipien der Simulation

Es gibt verschiedene Arten der Computersimulation, unter anderem die „Diskrete Simulation“, welcher sich auch PedGo bedient. Die Diskretisierung bezieht sich hierbei auf die Gebäudegeometrie, da die begehbaren Flächen in Quadrate mit den Seitenlängen 40 cm unterteilt werden. Darüber hinaus handelt es sich um eine mikroskopische Simulationsmethode, d.h. den einzelnen „Agenten“ können individuelle Eigenschaften zugeordnet werden, diese beeinflussen das Bewegungsverhalten in unterschiedlicher Art und Weise. Die Agenten bewegen sich unter Berücksichtigung der verschiedenen festgelegten Parameter, wie z.B. der Gebäudegeometrie, den Personenkennwerten und den ggf. festgelegten Fluchtrouten zu den Ausgängen. Dabei wird die Simulation in Zeitintervalle zu je einer Sekunde unterteilt, innerhalb dieser Intervalle wird die Bewegung der Agenten durch sogenannte „Updates“ gesteuert. Für einen Simulationsdurchlauf bekommt man einen möglichen Ablauf der Entfluchtung inklusive einer entsprechenden Zeit, die benötigt wird das Gebäude zu räumen. Um eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zu erhalten, die der Realität möglichst nahe kommt, werden fünfhundert Durchläufe berechnet. Anschließend lassen sich detaillierte Daten ermitteln, indem beliebige Einzelrechnungen wiederholt werden können. Genauere Informationen zur Funktionsweise der Software und weitere Veröffentlichungen im Bereich Evakuierung sind auf der Webseite www.TraffGo-HT.com zu finden.

2. Szenarien

2.1 Randbedingungen

Um die Evakuierungsdauer abschätzen zu können, werden im Folgenden verschiedene Brandsituationen mit der Software PedGo der TraffGo GmbH simuliert und ausgewertet.

Die Sporthalle am [REDACTED] Berlin (fiktive Adresse der Halle) soll mehrmals pro Jahr für größere Veranstaltungen wie z.B. Theateraufführungen genutzt werden. Während dieser Großveranstaltungen befinden sich, gemäß der Festlegung des Bauherren, maximal 1500 Personen im Gebäude.

Diese verteilen sich wie folgt im Objekt:

- ca. 1242 Personen im Erdgeschoss auf die gesamte Bestuhlung
- ca. 225 Personen auf den Tribünen
- ca. 17 Personen im Mehrzweckraum
- 16 Rollstuhlfahrer im vorderen Bereich der Bestuhlung, links und rechts der Bühne

Aufgrund der Tatsache, dass die Simulationssoftware PedGo keinerlei psychologische Aspekte berücksichtigt, wird von einer zügigen Entfluchtung mit einer Reaktionszeit zwischen 0 und 60 Sekunden ausgegangen. Demzufolge reagieren alle Personen innerhalb von 60 Sekunden nach Brandalarmierung.

Folgende Szenarien werden untersucht:

Fall 1: Brandereignis im südlichen Teil der Halle, **alle Ausgänge sind nutzbar**

Fall 2: Brandereignis in der Nähe der WCs, **nordwestlicher Ausgang ist nicht nutzbar**

Fall 3: beliebiges Brandereignis, **südwestlicher Ausgang nicht nutzbar**

Fall 4: Brandereignis im nordöstlichen Besuchereingang, **dieser Ausgang ist nicht nutzbar**

Fall 5: Vermuteter „Worst-Case“, **Haupteingang** bei Evakuierung **nicht nutzbar**

In allen fünf Fällen gestaltet sich die Verteilung, wie oben angegeben, gleich und wird in den Abbildungen grafisch dargestellt. Des Weiteren werden in allen Fällen 16 Rollstuhlfahrer in der Nähe der vorderen Bestuhlung berücksichtigt. Die Plätze der zwingend erforderlichen Begleitpersonen sind in der zweiten Reihe, direkt dahinter vorgesehen.

In einigen der folgenden Fälle werden einzelne Ausgänge aufgrund der unterschiedlichen Brandsituationen nicht nutzbar sein, daher müssen die flüchtenden Personen auf anderen Wegen ins Freie gelangen. Dieser Umstand verlangt jedoch nach alternativen Rettungsrouten, welche vom Verfasser vorgegeben und somit unterstellt werden müssen. Bei der Wahl dieser Routen wird nach bestimmten Auswahlkriterien entschieden, diese beinhalten die Kenntnis des jeweiligen Evakuierungsweges, Häufigkeit in der täglichen Benutzung, kürzeste Entfernung bis zum Evakuierungsausgang und Wahrnehmung von Rauch als behinderender Faktor.

2.2 Grundrisse und dazugehörige Rettungswege

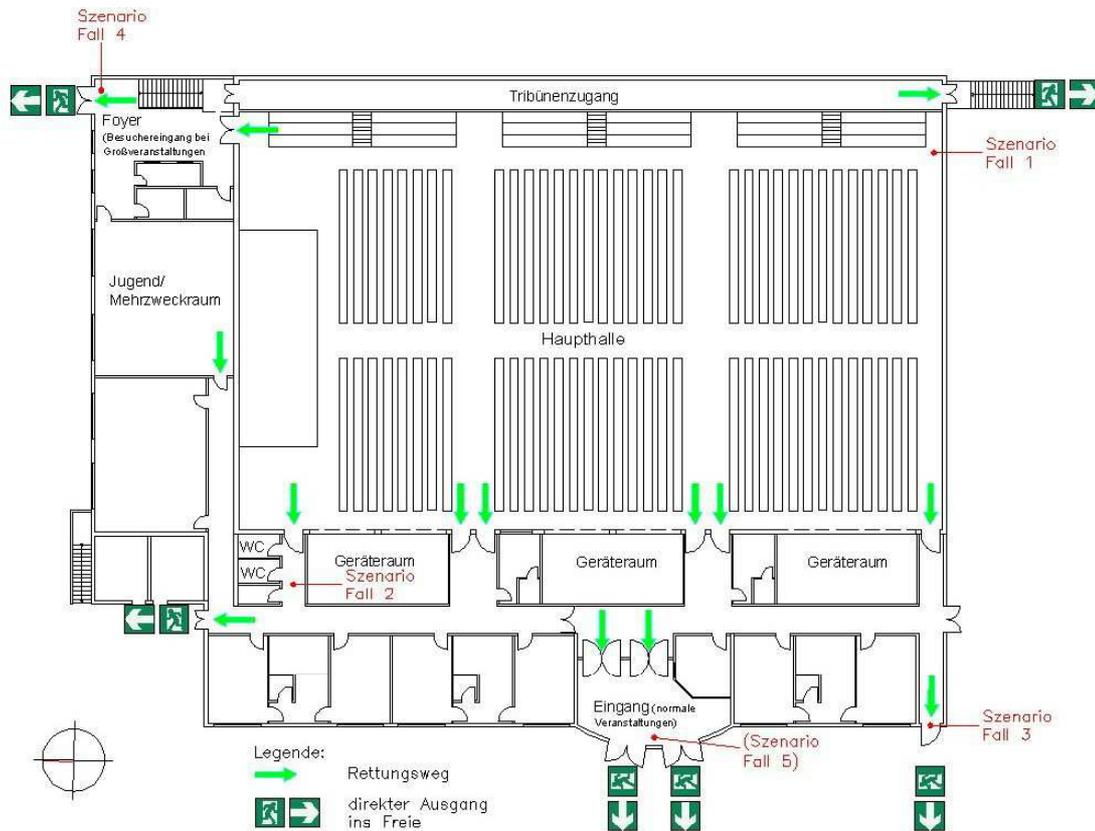
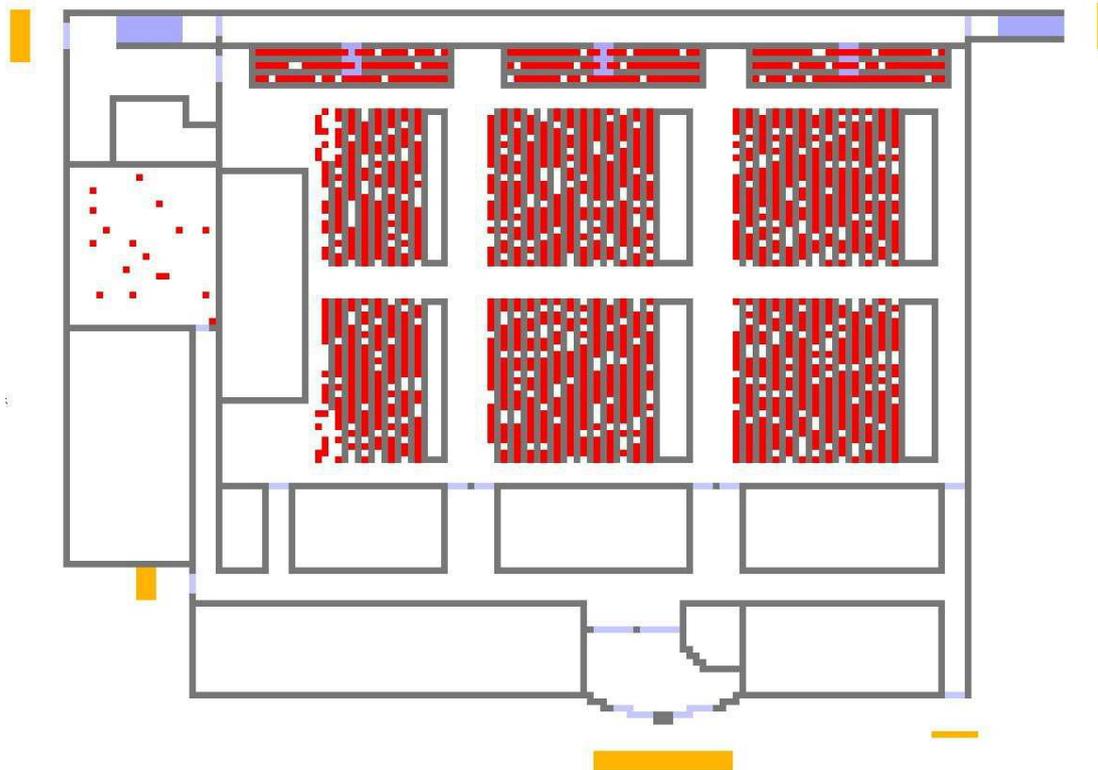


Abb. 1: Erdgeschoss mit Kennzeichnung der Rettungswege und nutzbaren Ausgänge ins Freie

2.3 Personenverteilung im Objekt



Erdgeschoss: 1500 Personen wie folgt verteilt:

davon: 1242 Personen in der Halle auf der Bestuhlung
225 Personen auf den Tribünen (75 je Tribüne)
16 Rollstuhlfahrer links und rechts der vorderen Bestuhlung
17 Personen im Mehrzweckraum

Abb. 3: Beispiel einer Anfangsverteilung für alle fünf Fälle – modellierter Grundriss mit Türen, Treppen, Personen und Ausgängen

3. Personenparameter

Das Verhalten der Personen, innerhalb der Simulation, wird durch sechs verschiedene Parameter bestimmt. Die hier verwendeten Werte stellen einen durchschnittlichen Bevölkerungsquerschnitt dar und entsprechen einer statistischen Normalverteilung. Um die abweichenden Fortbewegungseigenschaften der Rollstuhlfahrer zu erfassen, wurden die Standardwerte entsprechend angepasst. Die Reaktionszeit nach Brandalarmierung wurde zwischen 0 und 60 Sekunden angesetzt.

Tab. 1: Parameter der nicht gehbehinderten Personen für alle Fälle

	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standard- abweichung	Einheit
Laufgeschwindigkeit	2	5	3	1	Zellen/s
Geduld	-	-	-	-	s
Schwanken	1	5	3	2	Zellen
Reaktionszeit	0	60	30	10	s
Trödeln	0	30	15	5	%
Trägheit	1	5	3	2	%

Tab. 2: Parameter der Rollstuhlfahrer für alle Fälle

	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standard- abweichung	Einheit
Laufgeschwindigkeit	2	2	-	-	Zellen/s
Geduld	5000	5000	-	-	s
Schwanken	1	1	-	-	Zellen
Reaktionszeit	0	60	30	300	s
Trödeln	0	50	25	250	%
Trägheit	1	1	-	-	%

4. Ergebnisse

4.1 Allgemeine Erläuterungen

Um hinreichend präzise und realitätsnahe Resultate zu erhalten, müssen pro Szenario mehrere Simulationsdurchläufe erfasst werden. Diese werden in einer Mittelwertrechnung durchgeführt, welche in vorliegendem Gutachten jeweils 500 Simulationen je Brandfall umfasst. Weil es nicht zielführend wäre alle 500 Ergebnisse darzustellen, wird eine stellvertretende Simulation, mit einer Evakuierungsdauer größer oder gleich 95% aller Durchläufe, aus diesem Datenpool wiederholt. Anhand dieser Wiederholung können nun signifikante Stauungen und deren Auflösung grafisch dargestellt werden. Dazu werden Dichteplots herangezogen, die eine Zusammenfassung des gesamten Evakuierungsablaufs wiedergeben. Staus liegen in der Simulation dann vor, wenn die Personendichte gleich 4 P/m^2 oder höher ist.

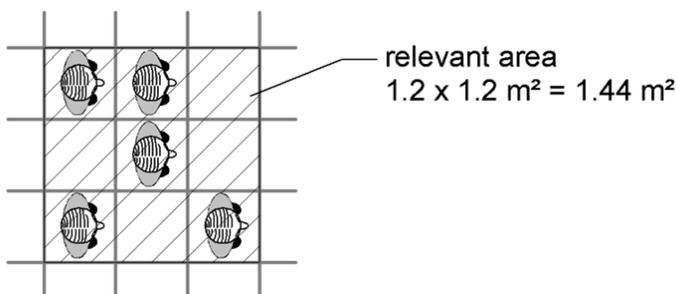


Abb. 4: Beispiel zur Verdeutlichung der Dichteberechnung im zellularen Gitter. Hier beträgt die Dichte etwa $3,5 \text{ P/m}^2$.

Das Programm berechnet zu jedem Zeitschritt die Dichte jeder Zelle, zeichnet den zeitlichen Verlauf der Dichteüberschreitungen auf und gibt diesen in einem grün-roten Farbverlauf in den Dichteplots wieder. Anhand dieser Übersicht können anschließend Aussagen über die Dauer der Staus und deren Auflösung getroffen werden.

4.2 Simulationsergebnis Fall 1

Brandereignis in der Halle, nahe den Tribünen. Alle Ausgänge sind nutzbar.

Nach 500 Simulationsdurchläufen ergeben sich die folgenden Zeiten:

Mittelwert [min:s]:	5:02
Standardabweichung [min:s]:	0:07
95% Quantil [min:s]:	5:14
Minimum [min:s]:	4:39
Maximum [min:s]:	5:29

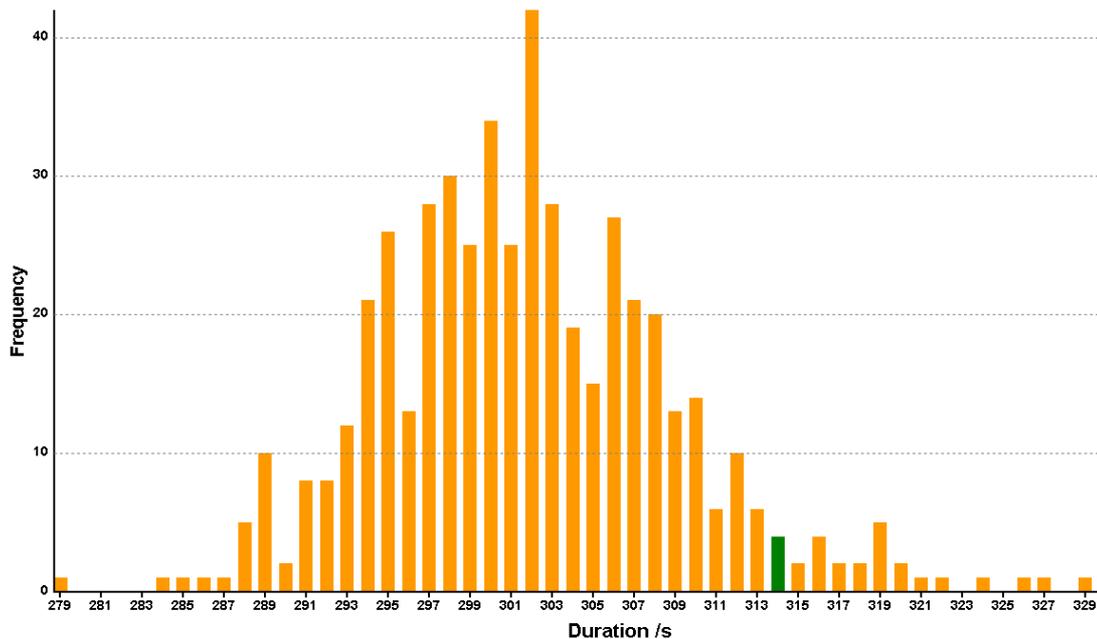


Abb. 5: Die Normalverteilung aller simulierten Entfluchtungsauern. Die grün markierte Säule stellt den 95 % Quantil Wert dar und wird für die Einzelbetrachtung verwendet.

Evakuierungskurve

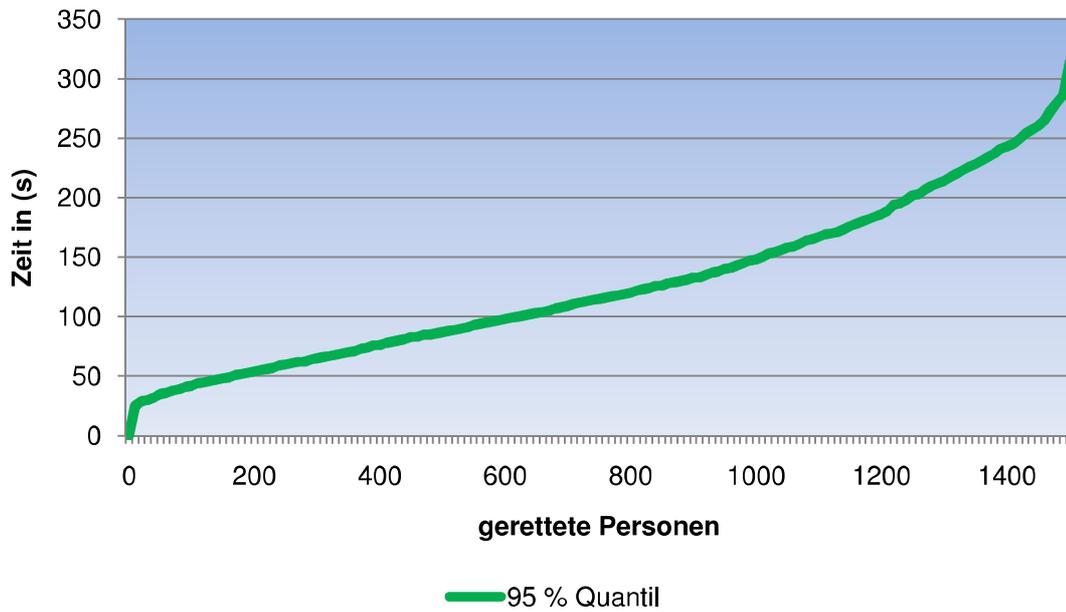


Abb. 6: Die Evakuierungskurve gibt an, wie viele Personen zu welcher Zeit gerettet wurden.

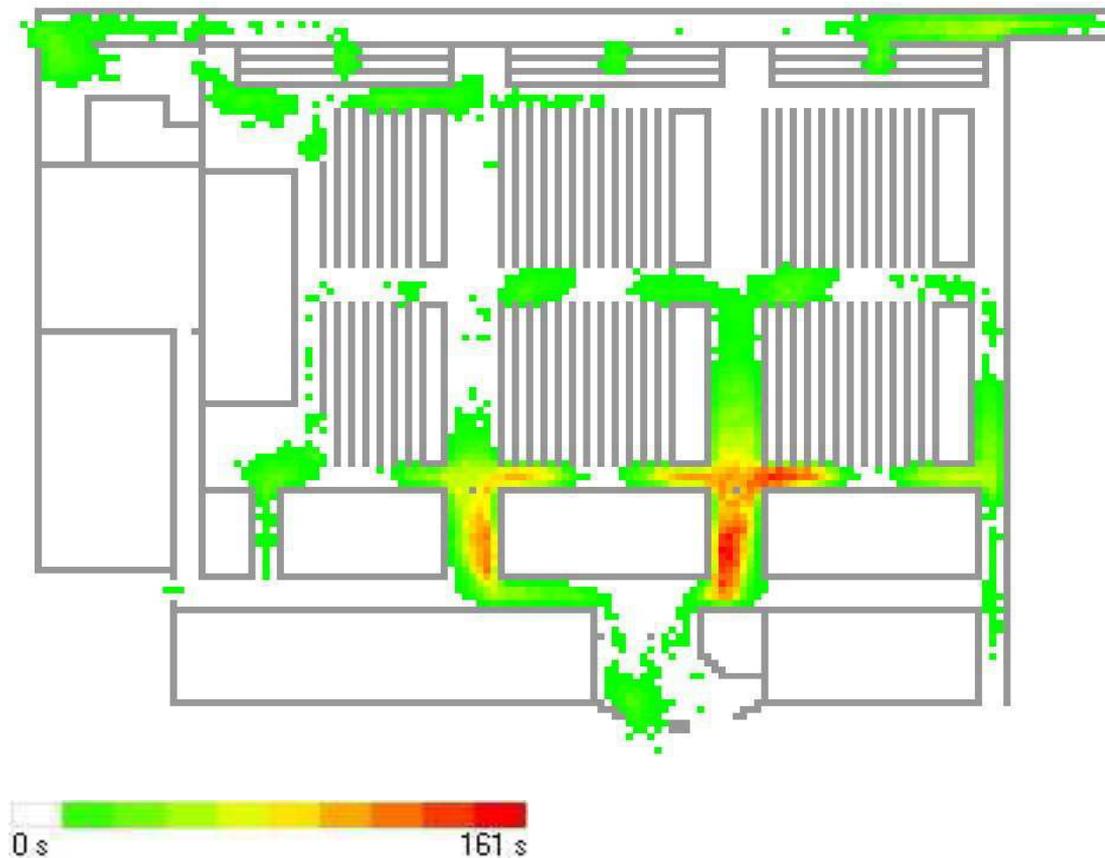


Abb. 7: Dichteplot des Erdgeschosses, die Farbgebung von grün, über gelb bis rot kennzeichnet die Stellen und die Zeit bis zur Auflösung von Stauungen.

Fazit (Fall 1):

Aus der Simulation geht hervor, dass nach 3:56 Minuten alle Personen die Halle und nach 5:14 Minuten das Gebäude und die Gefahrenzone verlassen haben. Dabei bildeten sich signifikante Staus lediglich an den beiden westlichen Hallenausgängen (Eingang für normale Veranstaltungen siehe Abb. 1), alle Stauungen lösten sich ausnahmslos in weniger als 2:41 Minuten auf. Unter der Voraussetzung, dass alle Ausgänge genutzt werden können, ist in 95 % aller Fälle mit einer Evakuierungszeit von 5:14 Minuten oder weniger zu rechnen.

4.3 Simulationsergebnis Fall 2

Brandereignis in der Umgebung des Nordwestlichen Hallenausgangs, dieser ist folglich nicht nutzbar.

Nach 500 Simulationsdurchläufen ergeben sich die folgenden Zeiten:

Mittelwert [min:s]:	5:24
Standardabweichung [min:s]:	0:08
95% Quantil [min:s]:	5:38
Minimum [min:s]:	5:06
Maximum [min:s]:	6:04

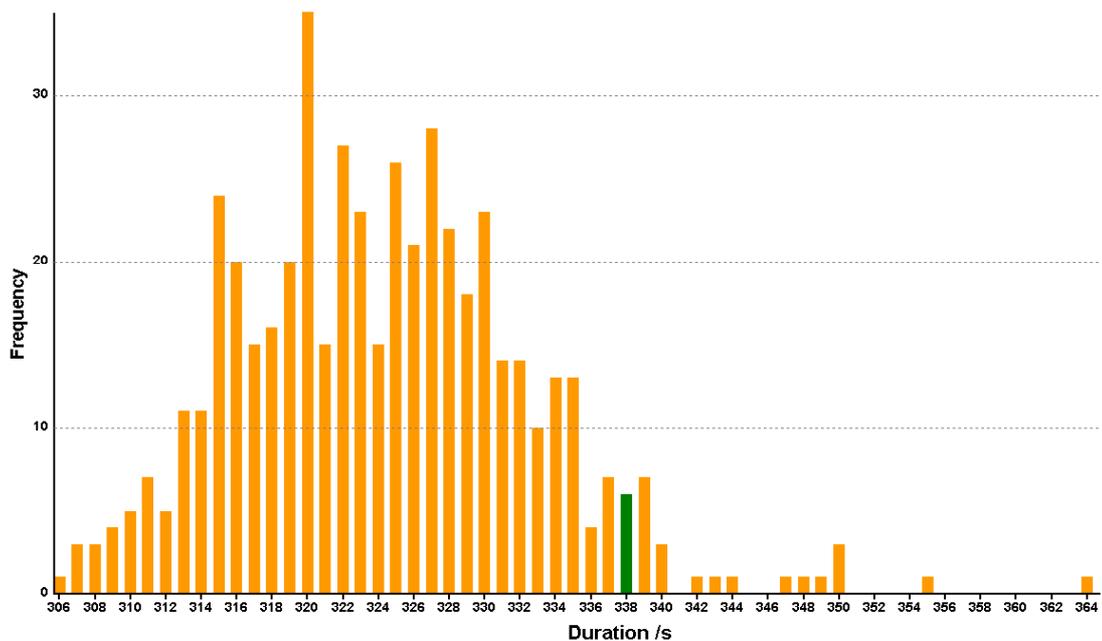


Abb. 8: Die Normalverteilung aller simulierten Entfluchtungsauern. Die grün markierte Säule stellt den 95 % Quantil Wert dar und wird für die Einzelbetrachtung verwendet.

Evakuierungskurve

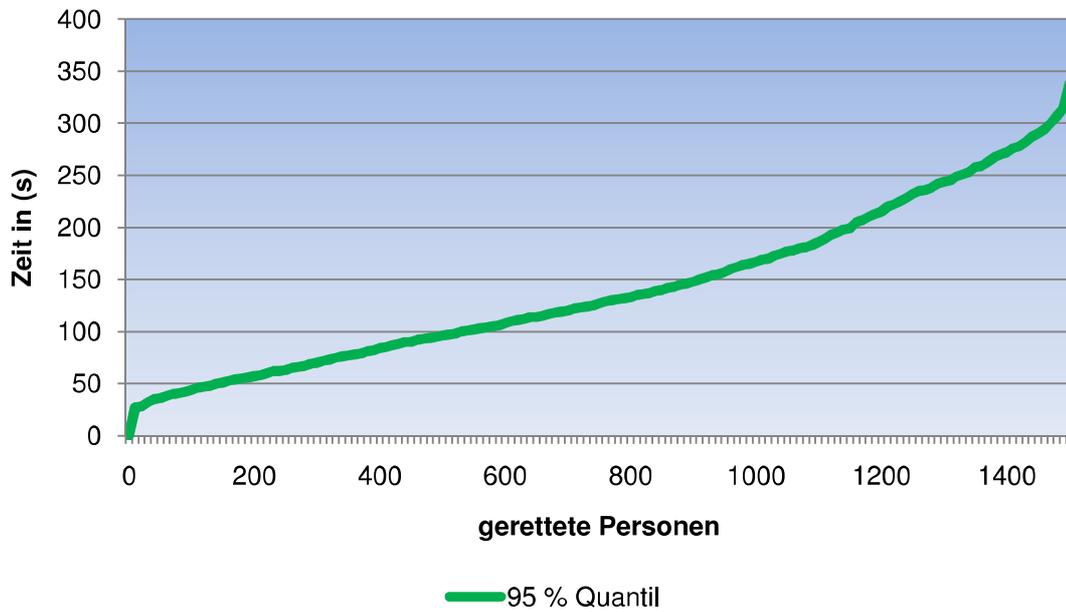


Abb. 9: Die Evakuierungskurve gibt an, wie viele Personen zu welcher Zeit gerettet wurden.

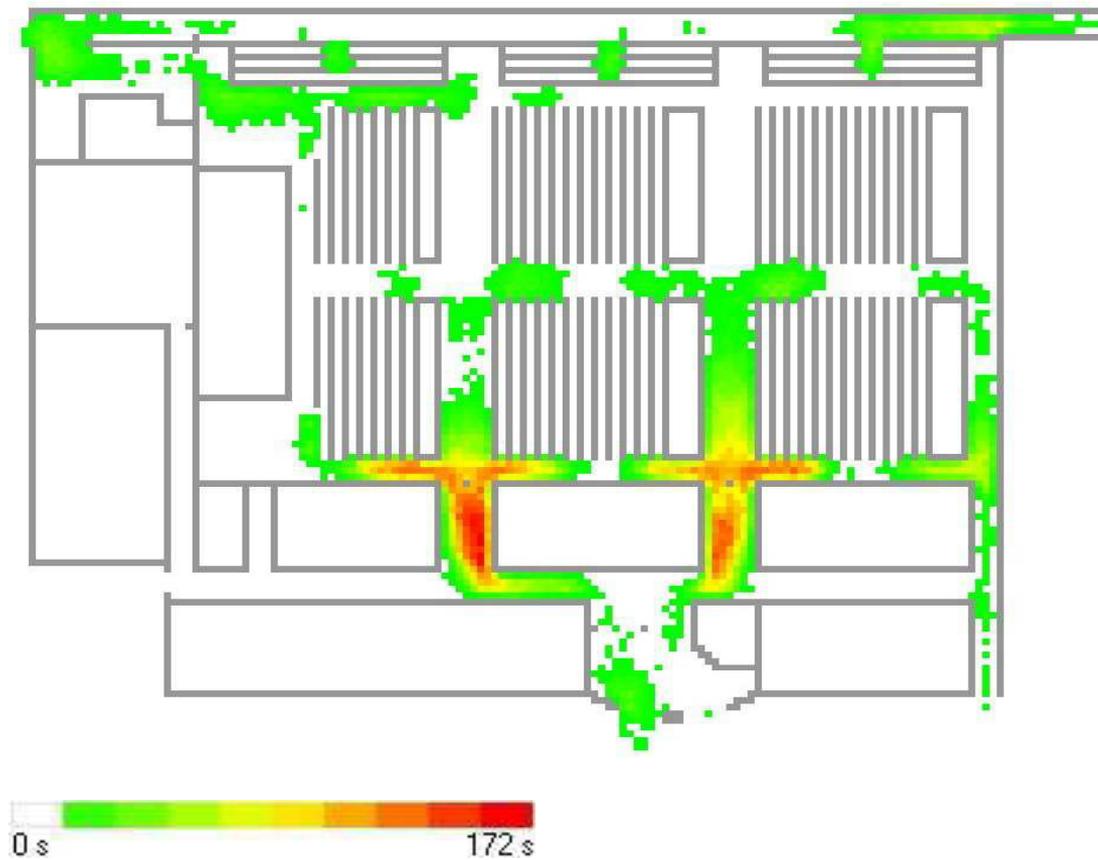


Abb. 10: Dichteplot des Obergeschosses, die Farbgebung von grün, über gelb bis rot kennzeichnet die Stellen und die Zeit bis zur Auflösung von Stauungen.

Fazit (Fall 2):

Aus der Simulation geht hervor, dass nach 4:06 Minuten alle Personen die Halle und nach 5:38 Minuten das Gebäude und die Gefahrenzone verlassen haben. Dabei bildeten sich signifikante Staus an den beiden westlichen Hallenausgängen (Eingang für normale Veranstaltungen siehe Abb. 1) und an dem südwestlichen Ausgang, alle Stauungen werden in weniger als 2:52 Minuten aufgelöst. Unter der Voraussetzung, dass der nordwestliche Eingang (Bühneneingang) nicht genutzt werden kann, ist in 95 % aller Fälle mit einer Evakuierungszeit von 5:38 Minuten oder weniger zu rechnen.

4.4 Simulationsergebnis Fall 3

Südwestlicher Gebäudenotausgang ist während einer Evakuierungssituation verschlossen und kann folglich nicht genutzt werden.

Nach 500 Simulationsdurchläufen ergeben sich die folgenden Zeiten:

Mittelwert [min:s]: 6:25

Standardabweichung [min:s]: 0:08

95% Quantil [min:s]: 6:38

Minimum [min:s]: 6:04

Maximum [min:s]: 6:54

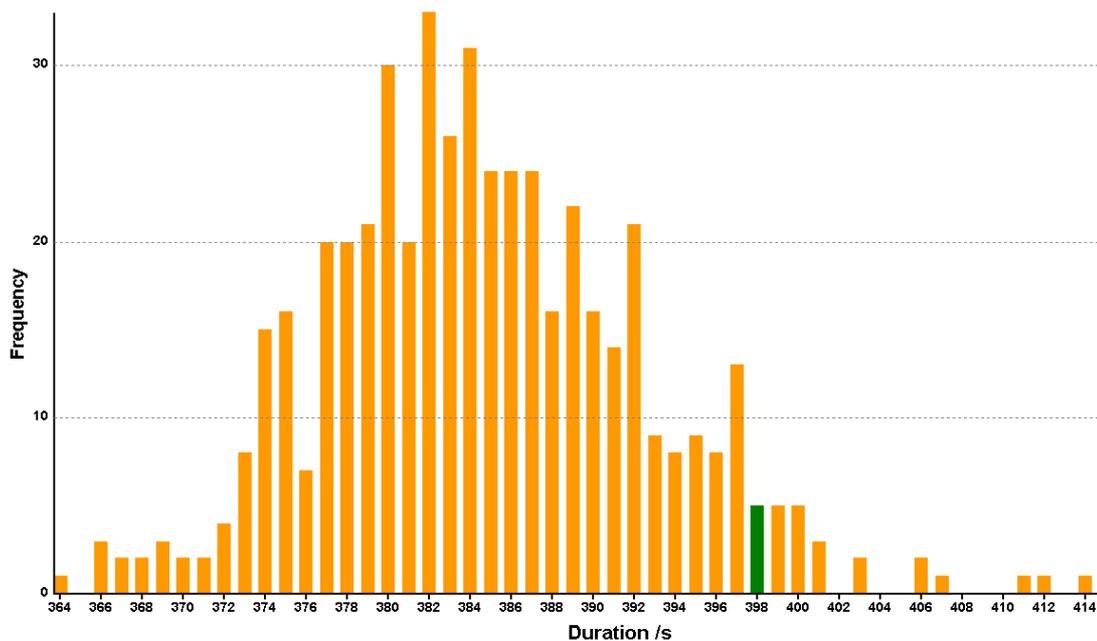


Abb. 11: Die Normalverteilung aller simulierten Entfluchtungsdauern. Die grün markierte Säule stellt den 95 % Quantil Wert dar und wird für die Einzelbetrachtung verwendet.

Evakuierungskurve

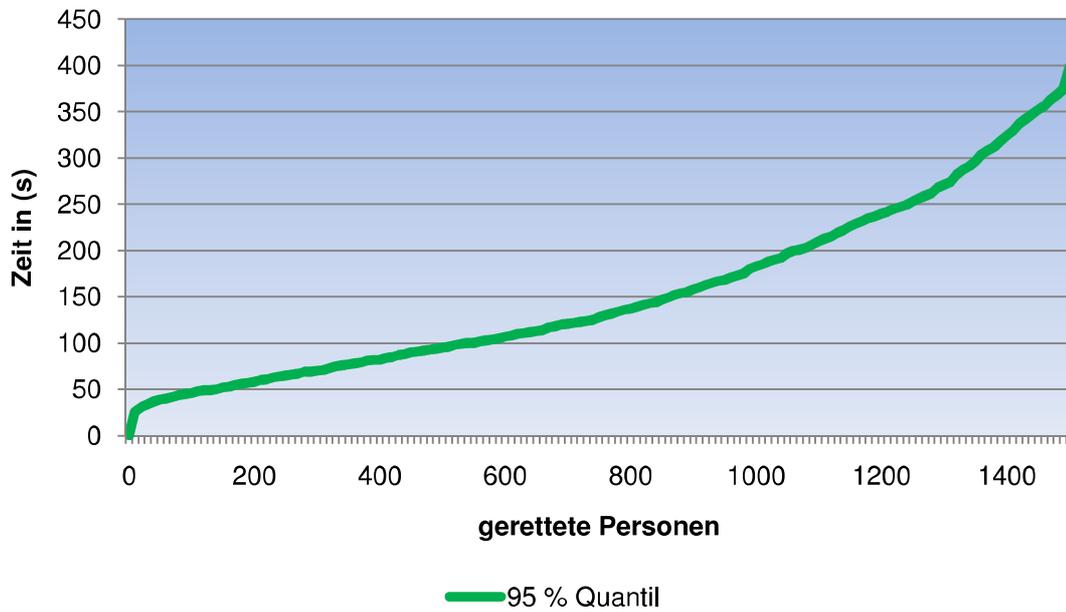


Abb. 12: Die Evakuierungskurve gibt an, wie viele Personen zu welcher Zeit gerettet wurden.

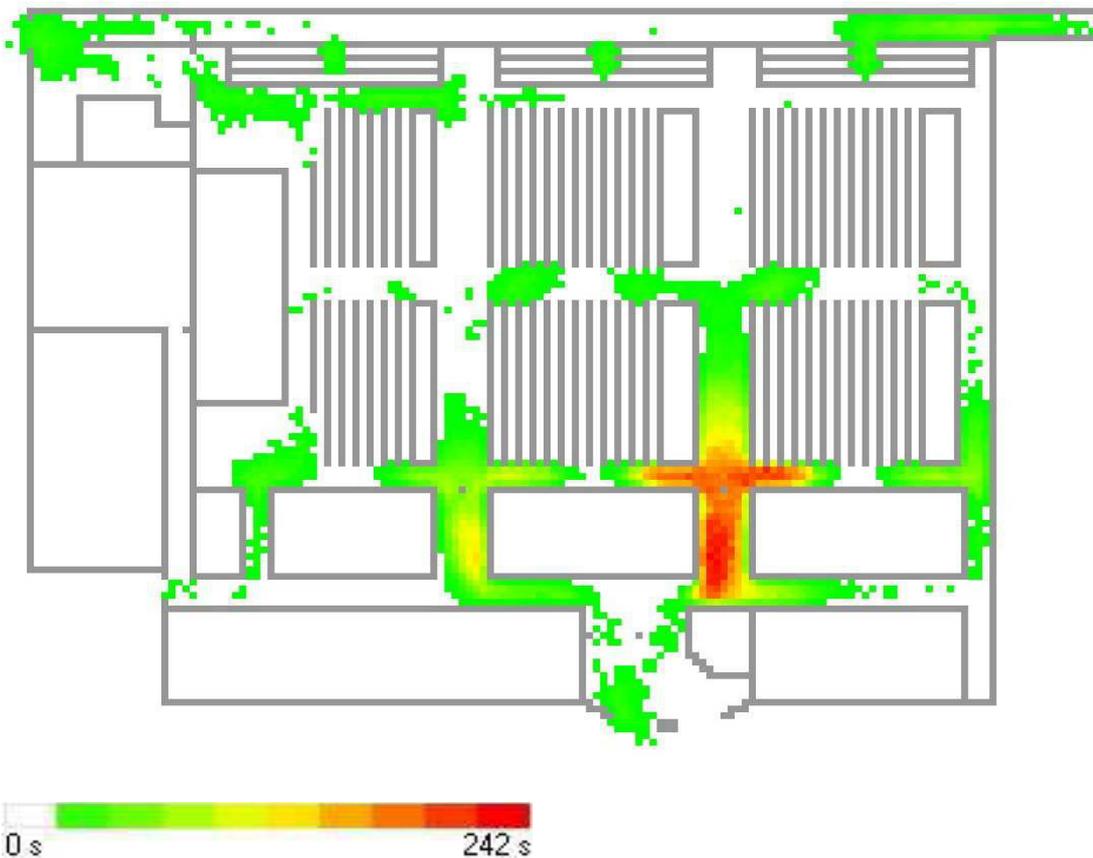


Abb. 13: Dichteplot des Obergeschosses, die Farbgebung von grün, über gelb bis rot kennzeichnet die Stellen und die Zeit bis zur Auflösung von Stauungen.

Fazit (Fall 3):

Aus der Simulation geht hervor, dass nach 5:30 Minuten alle Personen die Halle und nach 6:38 Minuten das Gebäude und die Gefahrenzone verlassen haben. Dabei bildete sich ein signifikanter Stau an einem der westlichen Hallenausgänge, alle Stauungen werden in weniger als 2:52 Minuten aufgelöst. Unter der Voraussetzung, dass der südwestliche Notausgang nicht genutzt werden kann, ist in 95 % aller Fälle mit einer Evakuierungszeit von 6:38 Minuten oder weniger zu rechnen.

4.5 Simulationsergebnis Fall 4

Brandereignis in der Umgebung des nordöstlichen Gebäudeausgangs (zusätzlicher Besuchereingang bei Großveranstaltungen), dieser ist folglich nicht nutzbar.

Nach 500 Simulationsdurchläufen ergeben sich die folgenden Zeiten:

Mittelwert [min:s]:	5:27
Standardabweichung [min:s]:	0:07
95% Quantil [min:s]:	5:40
Minimum [min:s]:	5:09
Maximum [min:s]:	6:06

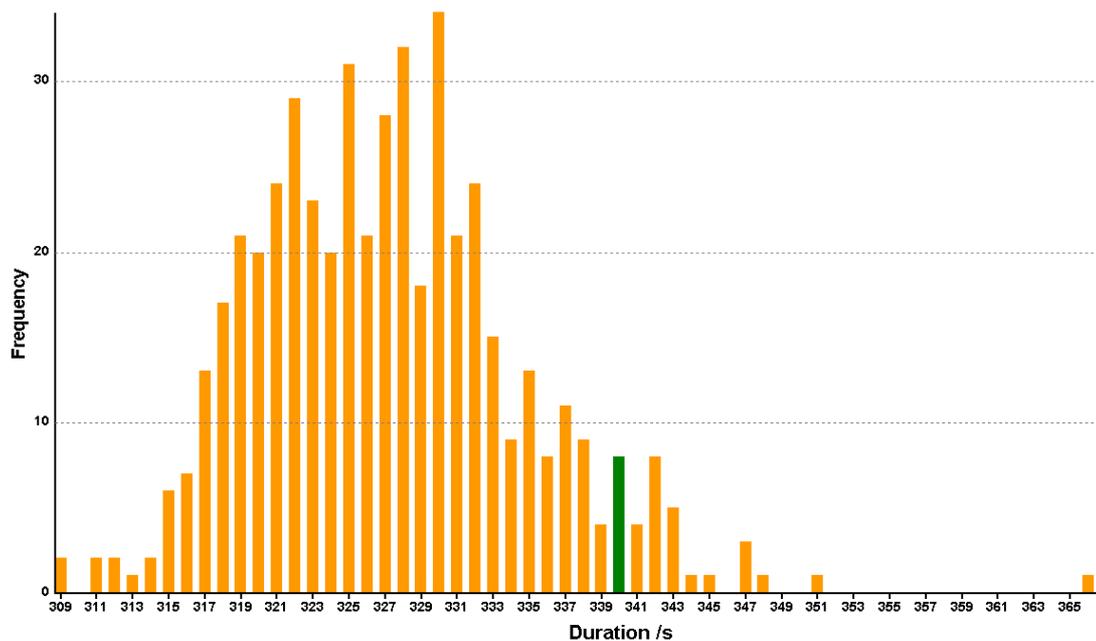


Abb. 14: Die Normalverteilung aller simulierten Entfluchtungsauern. Die grün markierte Säule stellt den 95 % Quantil Wert dar und wird für die Einzelbetrachtung verwendet.

Evakuierungskurve

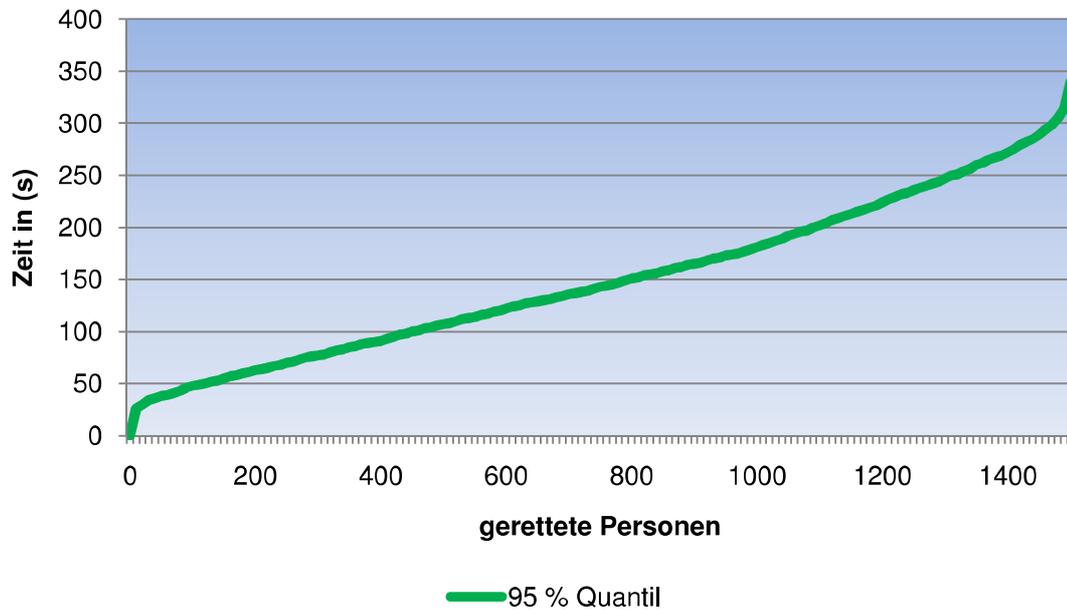


Abb. 15: Die Evakuierungskurve gibt an, wie viele Personen zu welcher Zeit gerettet wurden.

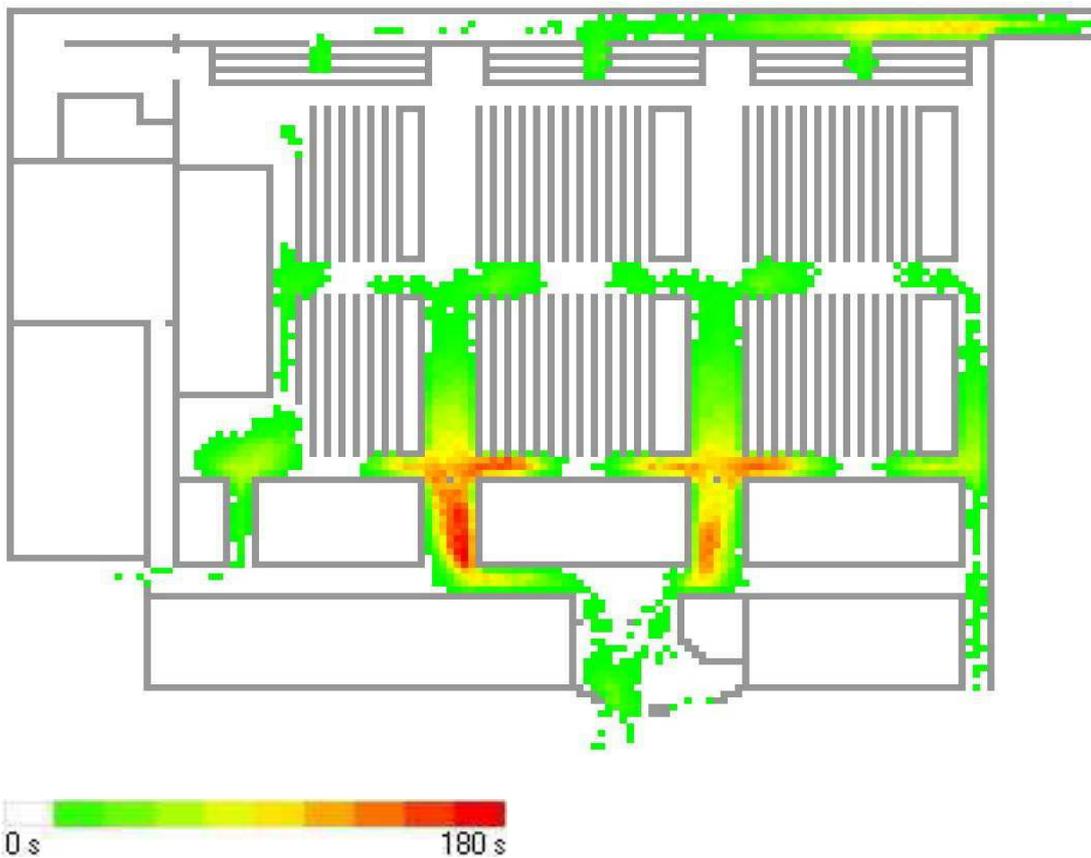


Abb. 16: Dichteplot des Obergeschosses, die Farbgebung von grün, über gelb bis rot kennzeichnet die Stellen und die Zeit bis zur Auflösung von Stauungen.

Fazit (Fall 4):

Aus der Simulation geht hervor, dass nach 4:09 Minuten alle Personen die Halle und nach 5:40 Minuten das Gebäude und die Gefahrenzone verlassen haben. Dabei bildeten sich signifikante Stauungen an den beiden westlichen Hallenausgängen und dem südlichen Tribünenausgang, alle Stauungen werden in weniger als 3:00 Minuten aufgelöst. Unter der Voraussetzung, dass der nordöstliche Gebäudeausgang nicht genutzt werden kann, ist in 95 % aller Fälle mit einer Evakuierungszeit von 5:40 Minuten oder weniger zu rechnen.

4.6 Simulationsergebnis Fall 5 (unwahrscheinlicher Extremfall)

Nordwestlicher „Besucher-Haupteingang“ ist während einer Evakuierungssituation nicht nutzbar.

Nach 500 Simulationsdurchläufen ergeben sich die folgenden Zeiten:

Mittelwert [min:s]:	9:01
Standardabweichung [min:s]:	0:07
95% Quantil [min:s]:	9:13
Minimum [min:s]:	8:41
Maximum [min:s]:	9:24

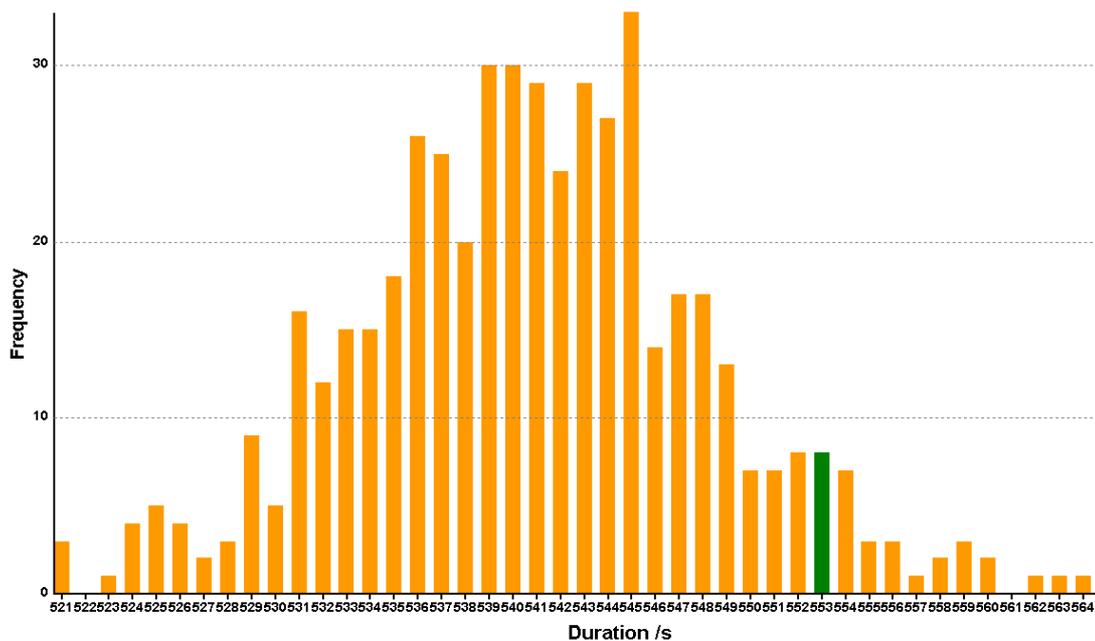


Abb. 17: Die Normalverteilung aller simulierten Entfluchtungsauern. Die grün markierte Säule stellt den 95 % Quantil Wert dar und wird für die Einzelbetrachtung verwendet.

Evakuierungskurve

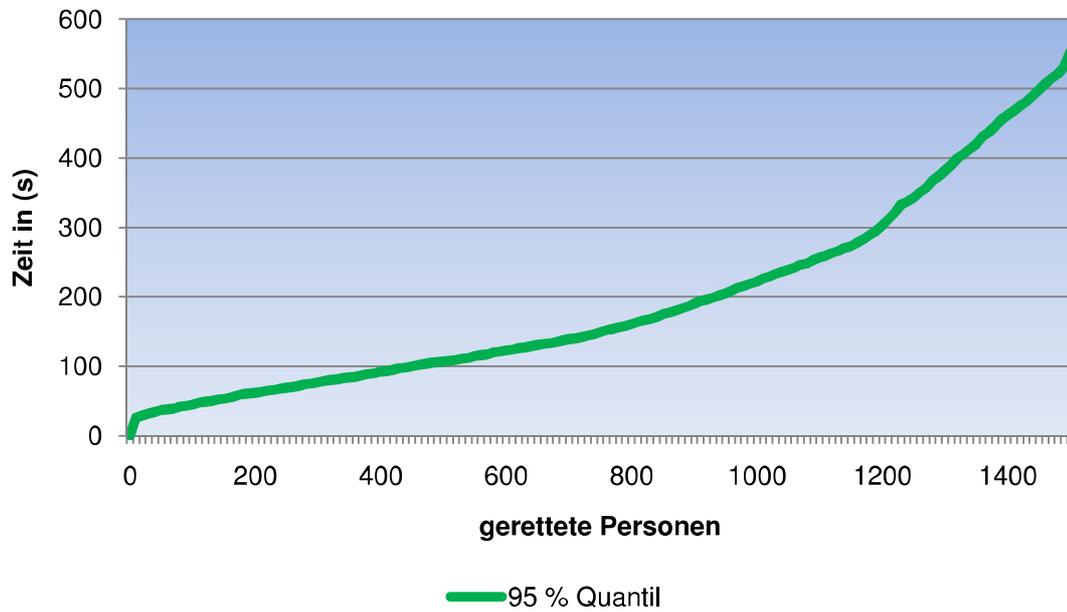


Abb. 18: Die Evakuierungskurve gibt an, wie viele Personen zu welcher Zeit gerettet wurden.

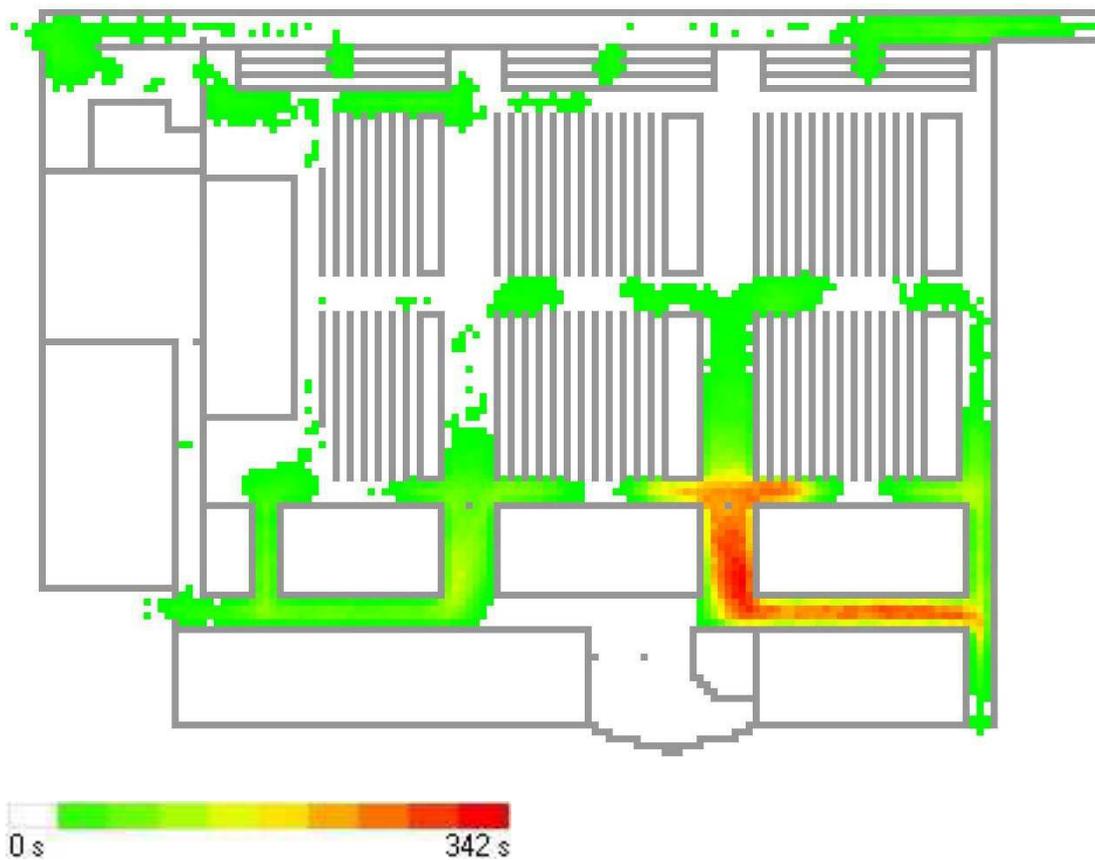


Abb. 19: Dichteplot des Obergeschosses, die Farbgebung von grün, über gelb bis rot kennzeichnet die Stellen und die Zeit bis zur Auflösung von Stauungen.

Fazit (Fall 5):

Aus der Simulation geht hervor, dass nach 6:43 Minuten alle Personen die Halle und nach 9:13 Minuten das Gebäude und die Gefahrenzone verlassen haben. Dabei bildete sich ein signifikanter Stau an einem der westlichen Hallenausgänge, dieser wird in weniger als 5:40 Minuten aufgelöst. In diesem Extremfall ist noch anzumerken, dass die Stauungen an den anderen Türen, im speziellen an den restlichen drei, westlichen Hallenausgängen, mit mindestens 1:30 Minuten zu Buche schlagen. Unter der Voraussetzung, dass der „Besucher-Haupteingang“ auf der Westseite des Gebäudes nicht genutzt werden kann, ist in 95 % aller Fälle mit einer Evakuierungszeit von 9:13 Minuten oder weniger zu rechnen.

4.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

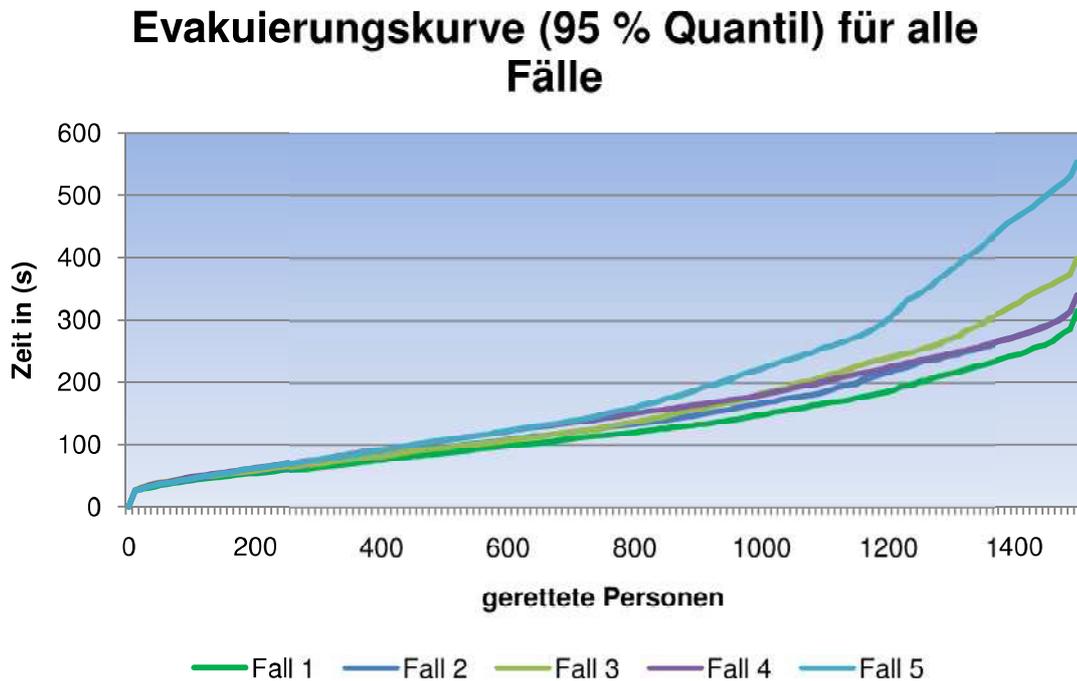


Abb. 20: Vergleich der Evakuierungskurven der Fälle 1 bis 5.

Abschließend kann festgehalten werden, dass alle **1500 Personen** das Gebäude über die jeweils verfügbaren Rettungswege verlassen können. Die Fälle „Fall 1“ (Abb. 5, 6), „Fall 2“ (Abb. 8, 9) und „Fall 4“ (Abb. 14, 15) unterscheiden sich kaum voneinander und ergeben die kürzeren Entfluchtungszeiten. Der „Fall 3“ (Abb. 11, 12) stellt bereits eine längere Zeit dar, die benötigt wird um das Gebäude zu räumen. Allerdings werden die vier genannten Fälle durch den „Worst-Case“, sprich „Fall 5“ (Abb. 17, 18), übertroffen. Demnach ist die **Halle nach 6:43 Minuten geräumt** und nach **9:13 Minuten** haben alle Personen **das Gebäude verlassen**. Signifikante Staus treten grundsätzlich an den westlichen Hallenausgängen auf, die **Stauzeiten** liegen gemeinhin **unter 5:42 Minuten**.

Die Ergebnisse dieses Gutachtens stellen lediglich Zeitwerte dar, die aussagen, wie viel Zeit benötigt wird um das Gebäude zu räumen. Für einen wertenden Vergleich werden zudem noch die tatsächlich vorhandenen Zeiten, die zur Evakuierung im Ernstfall zur Verfügung stehen, benötigt. Erst nach diesem Schritt kann eine Einschätzung der Tauglichkeit bzw. Eignung der Sportstätte am [REDACTED]

[REDACTED] Berlin, für Großveranstaltungen getroffen werden. Die Ermittlung dieser Werte ist jedoch nicht Bestandteil dieses Gutachtens.

Die hier ermittelte Evakuierungszeit ist die Zeit von der Alarmierung bis zum Erreichen des Freien bzw. eines sicheren Bereiches.

Die Evakuierungsberechnung mit Simulationssoftware wurde auf den jeweiligen Einzelfall und auf die Nutzung der konkreten baulichen Anlage zum Bearbeitungsstand abgestimmt. Bei Änderungen der Gegebenheiten und Voraussetzungen oder durch weitere Umplanungen wird eine Neubetrachtung der Evakuierungszeit notwendig.

5. Literatur und Informationen

- (1) *Abschlussbericht zum Projekt BYPASS*, [Prof. Dr. Michael Schreckenberg, Gerhard Mercator Universität Duisburg 2003]
- (2) *Neue physikalische Modellierungskonzepte*, [Dirk Helbing, Verkehrsdynamik, Springer Verlag 1996]
- (3) *Assessment and Analysis of Evacuation Processes on Passenger Ships by Microscopic Simulation*, [Tim Meyer-König, Hubert Klüpfel, Michael Schreckenberg, Pedestrian and Evacuation Dynamics, Springer Verlag]
- (4) *Evakuierungsberechnung – Evakuierung von Personen aus Gebäuden*, [Dr.-Ing. Klaus Müller, EIPOS e.V., 2004]

Dieses Sachverständigengutachten zur Beurteilung der Rettungswegesituation wurde nach bestem Wissen und Gewissen erstellt. Es ist ausschließlich ungekürzt in seinem gesamten Wortlaut zu verwenden. Eine Veröffentlichung, auch auszugsweise bedarf der schriftlichen Genehmigung. Dieses Gutachten, einschließlich aller Teile, ist Urheberrechtlich geschützt.

Die Evakuierungsberechnung umfasst 28 Seiten.

Berlin, den 15.09.2011

Verfasser:

Frank Leymann, B.Eng.

Anhang C



Beurteilung der Rettungswegesituation

Evakuierungssimulation

Objekt: Sporthalle [REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED] Berlin

Auftraggeber: [REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]

Auftragnehmer: DBS – Die Bausachverständigen
Sachverständigen-gesellschaft für ganzheitliche Analyse mbH
Rießerseestraße 10
12527 Berlin

Bearbeiter: Frank Leymann, B.Eng.
Pintschstraße 23
10249 Berlin



Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
1.1 Allgemeines	3
1.2 Stand der Technik	3
1.3 Prinzipien der Simulation.....	4
2. Szenarien	5
2.1 Randbedingungen.....	5
2.2 Grundrisse und dazugehörige Rettungswege	7
2.3 Personenverteilung im Objekt für „Szenario 1“	9
2.3 Personenverteilung im Objekt für „Szenario 2“	12
3. Personenparameter	14
4. Ergebnisse	15
4.1 Allgemein Erläuterungen	15
4.2 Simulationsergebnis Fall 1 (Szenario 1)	16
Fazit (Fall 1; Szenario 1):	18
4.3 Simulationsergebnis Fall 1 (Szenario 2)	19
Fazit (Fall 1; Szenario 2):	20
4.4 Simulationsergebnis Fall 2 (Szenario 1)	21
Fazit (Fall 2; Szenario 1):	23
4.4 Simulationsergebnis Fall 2 (Szenario 2)	24
Fazit (Fall 2; Szenario 2):	25
4.7 Zusammenfassung der Ergebnisse	26
5. Literatur und Informationen	28

1. Einleitung

1.1 Allgemeines

Bei einer Simulation handelt es sich um ein vereinfachtes mathematisches Modell der Realität. Dieses Modell kann mit zunehmender Komplexität auch immer präziser an die reale Vorgabe angenähert werden. Dies führt jedoch zu erhöhtem Aufwand bei der Anwendung der Simulationssoftware und ist damit ungeeignet für den Gebrauch in einem Ingenieurbüro, um alltägliche Simulationen im Bereich „Vorbeugender Brandschutz“ durchführen zu können.

Das Unternehmen „*TraffGo*“ hat mit der Simulationssoftware „*PedGo*“ einen Kompromiss gefunden, indem jegliche psychologischen Aspekte bei einer Evakuierungssituation außen vor gelassen werden. Die Personen bewegen sich entlang der vom Benutzer vorgegebenen Routen, mit festeingestellten Fortbewegungsparametern. Somit ist darauf hinzuweisen, dass die Simulation einen idealisierten Fall darstellt, welchen man auch als „*geordnete Evakuierung*“ bezeichnen könnte, da jedwede Art von Panik oder hysterischem Verhalten unberücksichtigt bleibt.

1.2 Stand der Technik

Bei der Planung von Fluchtwegen beschränkt man sich derzeit meist auf die geometrischen Eigenschaften und bedient sich einiger Handrechenmodelle, die zum Großteil alle auf die Ursprungswerke der Evakuierungsberechnungen, von Predtetschenski und Milinski, zurückzuführen sind. Bei eben genanntem Werk handelt es sich um ein Verfahren, welches auf einem hydraulischen Modell beruht, bei dem die zu rettenden Personen wie ein Fluid in Richtung der Ausgänge fließen. Ferner existieren Vorschriften, wie z.B. die Musterbauordnung, mit deren Hilfe die Fluchtwege ohne eine komplizierte Rechnung bemessen werden können. Diese Bemessungshilfen liefern jedoch Werte, die auf der „*sicheren Seite*“ liegen und somit, im Verhältnis zu den real benötigten Eigenschaften der Rettungswege, zu unwirtschaftlicheren Ergebnissen führen als mit einer modernen Simulation erreicht werden können. Des Weiteren ist die Handrechenmethode bei der Erstellung eines Gutachtens für ein komplettes Gebäude oftmals zeitaufwendiger als die

Computersimulation. Folglich geht der Trend nicht nur bei besonderen Gebäuden oder Veranstaltungsräumlichkeiten in Richtung einer Evakuierungssimulation. Verständlicherweise werden nun immer mehr Objekte mit EDV-Unterstützung analysiert und bewertet. Die Grundlagen der Simulationssoftware PedGo basieren auf den Resultaten des Forschungsvorhabens „BYPASS“, welches unter der Leitung von Prof. Dr. Michael Schreckenber g durchgeführt wurde und die Evakuierungsanalyse von Fahrgastschiffen zum Gegenstand hatte. Die gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen fließen in die Simulationssoftware PedGo ein. Diese ist zudem von der See-Berufsgenossenschaft zertifiziert worden.

1.3 Prinzipien der Simulation

Es gibt verschiedene Arten der Computersimulation, unter anderem die „Diskrete Simulation“, welcher sich auch PedGo bedient. Die Diskretisierung bezieht sich hierbei auf die Gebäudegeometrie, da die begehbaren Flächen in Quadrate mit den Seitenlängen 40 cm unterteilt werden. Darüber hinaus handelt es sich um eine mikroskopische Simulationsmethode, d.h. den einzelnen „Agenten“ können individuelle Eigenschaften zugeordnet werden. Diese beeinflussen das Bewegungsverhalten in unterschiedlicher Art und Weise. Die Agenten bewegen sich unter Berücksichtigung der verschiedenen festgelegten Parameter, wie z.B. der Gebäudegeometrie, den Personenkennwerten und den ggf. festgelegten Fluchtrouten zu den Ausgängen. Dabei wird die Simulation in Zeitintervalle zu je einer Sekunde unterteilt. Innerhalb dieser Intervalle wird die Bewegung der Agenten durch sogenannte „Updates“ gesteuert. Für einen Simulationsdurchlauf bekommt man einen möglichen Ablauf der Entfluchtung inklusive einer entsprechenden Zeit, die benötigt wird, das Gebäude zu räumen. Um eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zu erhalten, die der Realität möglichst nahe kommt, werden fünfhundert Durchläufe berechnet. Anschließend lassen sich detaillierte Daten ermitteln, indem beliebige Einzelrechnungen wiederholt werden können. Genauere Informationen zur Funktionsweise der Software und weitere Veröffentlichungen im Bereich Evakuierung sind auf der Webseite www.TraffGo-HT.com zu finden.

2. Szenarien

2.1 Randbedingungen

Um die Evakuierungsdauer abschätzen zu können, werden im Folgenden verschiedene Brandsituationen mit der Software PedGo der TraffGo GmbH simuliert und ausgewertet.

Die Sporthalle in der [REDACTED] Berlin soll mehrmals pro Jahr für größere Veranstaltungen wie z.B. Theateraufführungen genutzt werden. Während dieser Großveranstaltungen befinden sich, gemäß der Festlegung des Bauherren, maximal 450 Personen im Gebäude. Zudem werden 2 Szenarien unterschieden, „Szenario 1“ betrachtet den Zeitraum während einer Veranstaltung und „Szenario 2“ betrachtet den Zeitraum vor bzw. nach einer Veranstaltung. Das heißt, dass im „Szenario 1“ zwar mehr Personen im Gebäude sind, sich diese aber auf die größeren Flächen wie Sportfeld und Tribüne aufteilen. Im „Szenario 2“ sind jeweils 100 Personen in den Umkleidebereichen des Keller- und Obergeschosses angesetzt.

Diese verteilen sich wie folgt im Objekt:

Für Szenario 1:

OG 1:

- ca. 100 Personen in der Halle
- ca. 22 Personen im Umkleide- und Sanitärbereich

EG:

- ca. 196 Personen auf der Tribüne
- ca. 6 Rollstuhlfahrer links und rechts neben der Tribüne
- ca. 5 Personen im Umkleide- und Sanitärbereich

KG:

- ca. 100 Personen in der Halle
- ca. 22 Personen im Umkleide- und Sanitärbereich

Für Szenario 2:

OG 1:

- ca. 100 Personen im Umkleide- und Sanitärbereich

EG:

- keine Personen

KG:

- ca. 100 Personen im Umkleide- und Sanitärbereich

Aufgrund der Tatsache, dass die Simulationssoftware PedGo keinerlei psychologische Aspekte berücksichtigt, wird von einer zügigen Entfluchtung mit einer Reaktionszeit zwischen 0 und 60 Sekunden ausgegangen. Demzufolge reagieren alle Personen innerhalb von 60 Sekunden nach Brandalarmierung.

Folgende Fälle werden untersucht:

Fall 1: Alle Türen und Ausgänge nutzbar.

Fall 2: Westliches Treppenhaus nicht nutzbar, z.B. wegen Rauchbildung.

In beiden Fällen gestaltet sich die Verteilung, wie oben angegeben, gleich und wird in den Abbildungen grafisch dargestellt. Des Weiteren werden in allen Fällen 6 Rollstuhlfahrer in der Nähe der Tribüne im Erdgeschoss berücksichtigt (nur Szenario 1). Die Plätze der zwingend erforderlichen Begleitpersonen sind mit zusätzlicher Bestuhlung, direkt dahinter vorgesehen.

In einigen der folgenden Fälle werden einzelne Ausgänge bzw. Wegabschnitte aufgrund der unterschiedlichen Brandsituationen nicht nutzbar sein, daher müssen die flüchtenden Personen auf anderen Wegen ins Freie gelangen. Dieser Umstand verlangt jedoch nach alternativen Rettungsrouten, welche vom Verfasser vorgegeben und somit unterstellt werden müssen. Bei der Wahl dieser Routen wird nach bestimmten Auswahlkriterien entschieden, diese beinhalten die Kenntnis des jeweiligen Evakuierungsweges, Häufigkeit in der täglichen Benutzung, kürzeste Entfernung bis zum Evakuierungsausgang und Wahrnehmung von Rauch als behindernder Faktor.

2.2 Grundrisse und dazugehörige Rettungswege

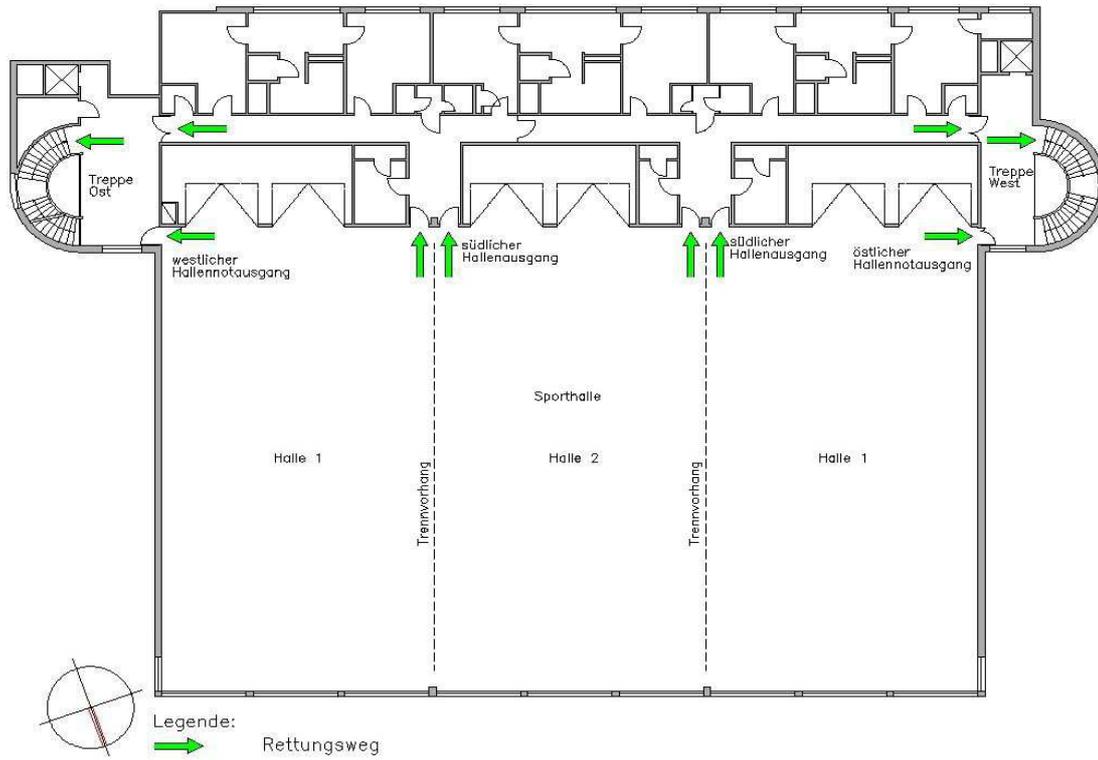


Abb. 1: Erstes Obergeschoss mit Kennzeichnung der Rettungswege

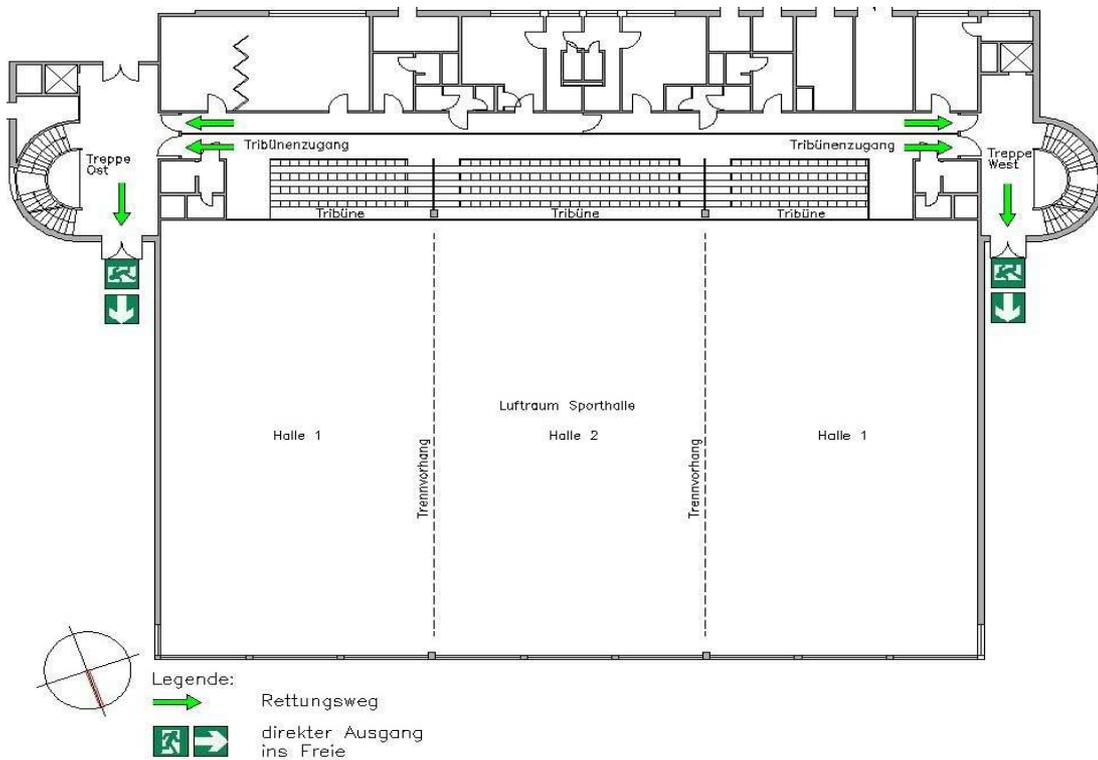


Abb. 2: Erdgeschoss mit Kennzeichnung der Rettungswege und nutzbaren Ausgänge ins Freie

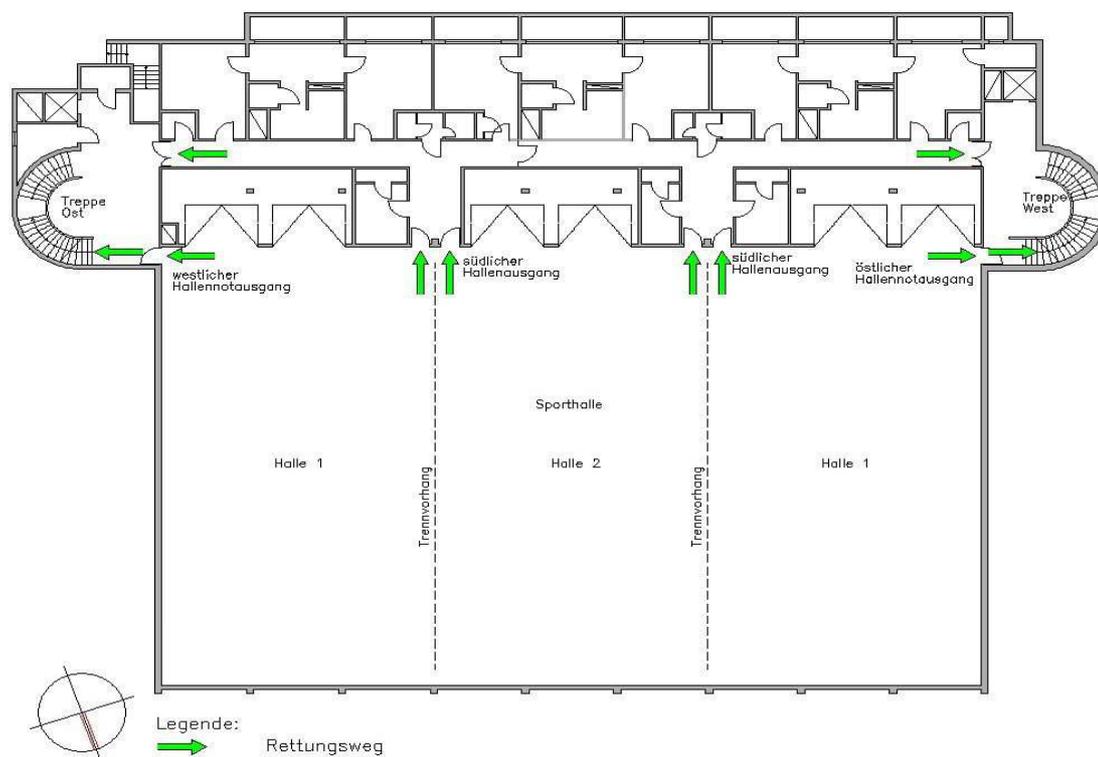
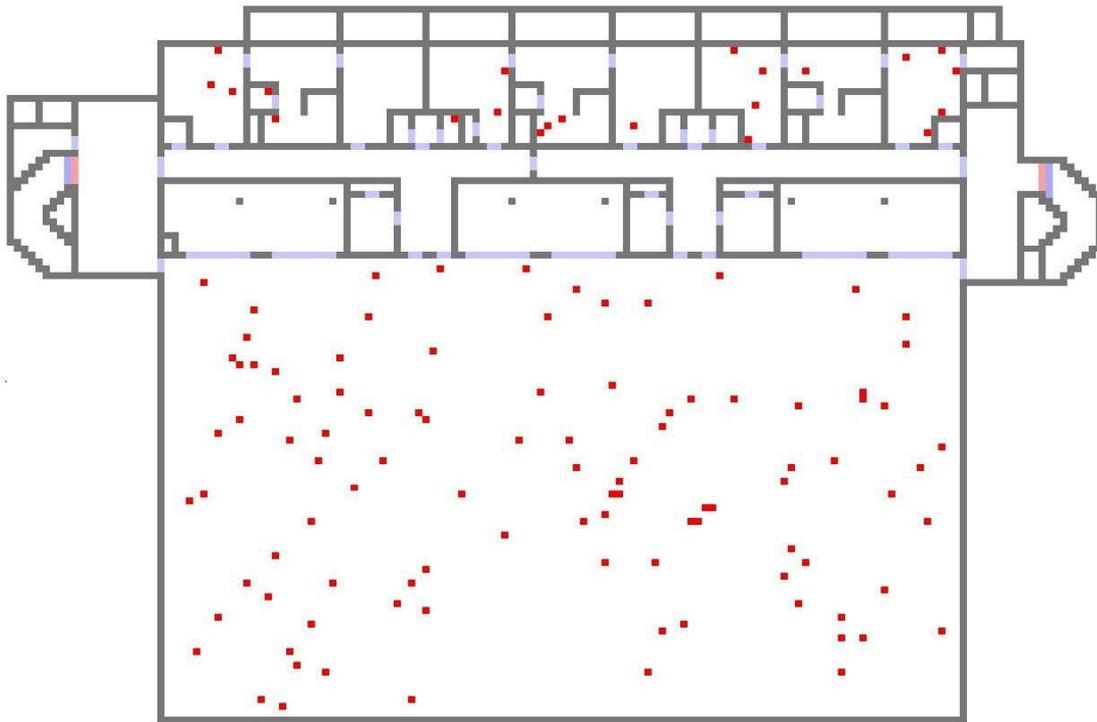


Abb. 3: Kellergeschoss mit Kennzeichnung der Rettungswege

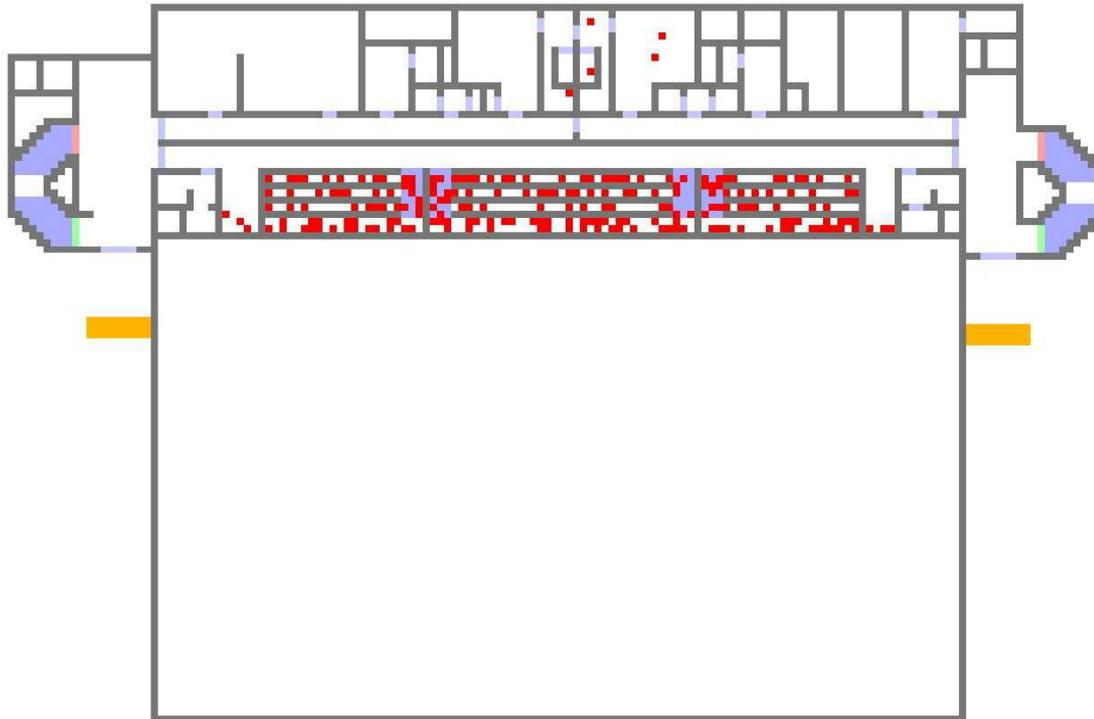
2.3 Personenverteilung im Objekt für „Szenario 1“



Erstes Obergeschoss: 122 Personen wie folgt verteilt:

davon: 100 Personen in der Halle auf dem Sportfeld
22 Personen im Umkleide- bzw. Sanitärbereich

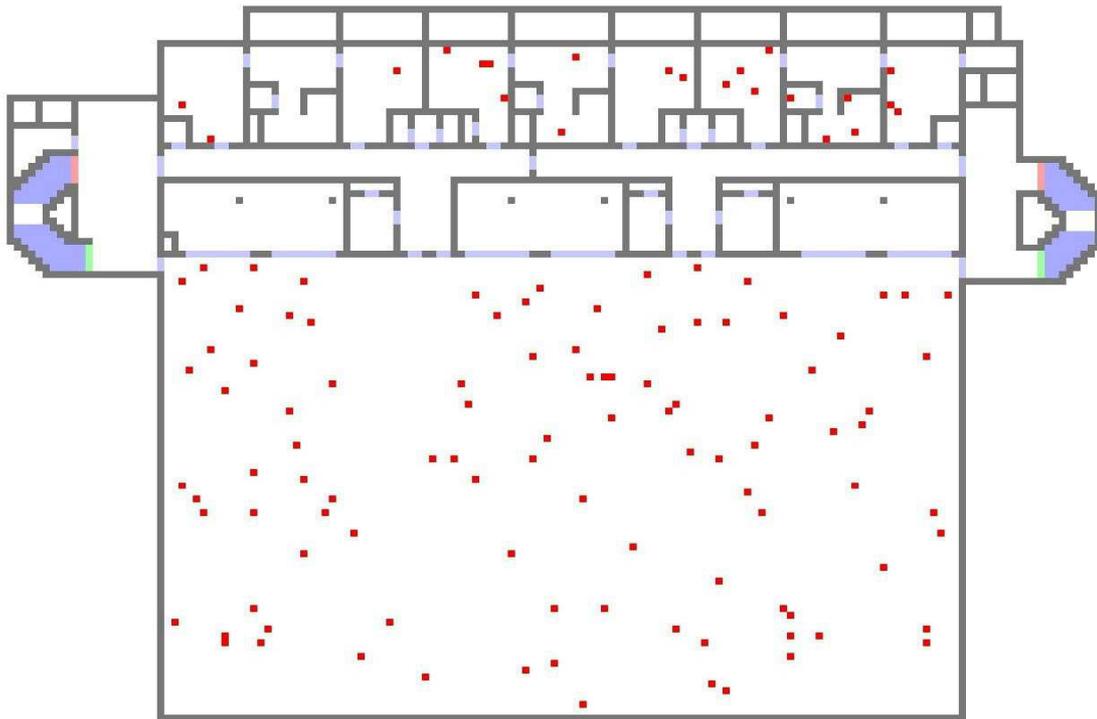
Abb. 4: Beispiel einer Anfangsverteilung für alle Fälle – modellierter Grundriss mit Türen, Treppen, Personen und Ausgängen



Erdgeschoss: 207 Personen wie folgt verteilt:

davon: 196 Personen auf der Tribüne
5 Personen im Umkleide- bzw. Sanitärbereich
6 Rollstuhlfahrer links und rechts neben der Tribüne

Abb. 5: Beispiel einer Anfangsverteilung für alle Fälle – modellierter Grundriss mit Türen, Treppen, Personen und Ausgängen



Kellergeschoss: 122 Personen wie folgt verteilt:
davon: 100 Personen in der Halle auf dem Sportfeld
22 Personen im Umkleide- bzw. Sanitärbereich

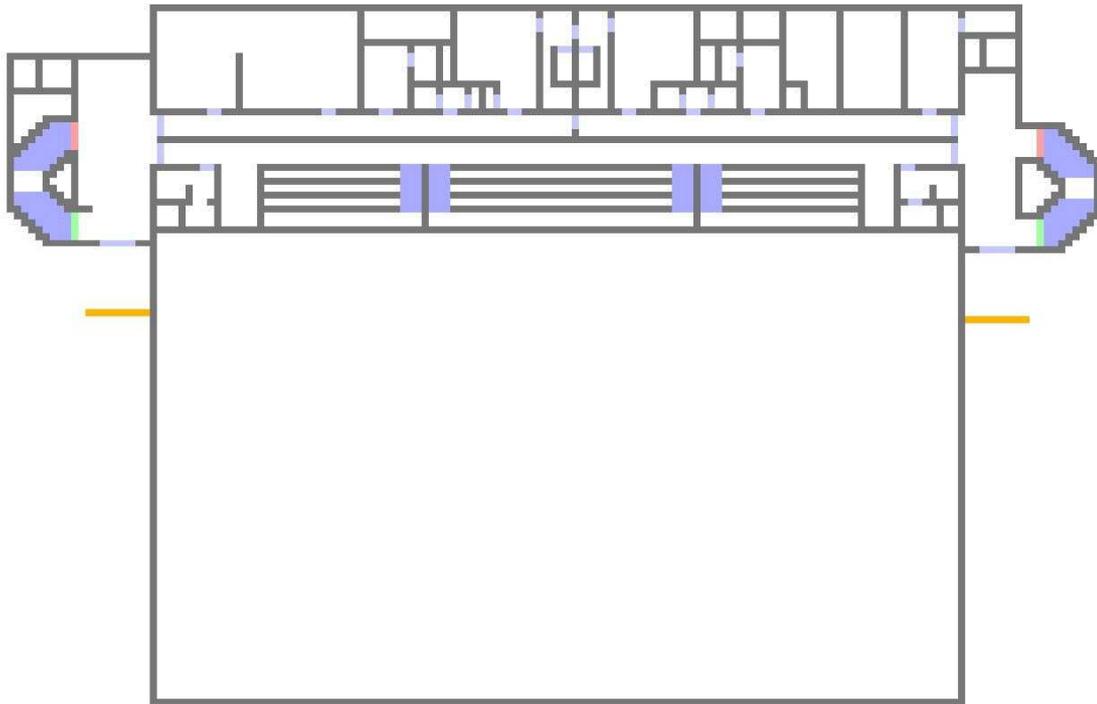
Abb. 6: Beispiel einer Anfangsverteilung für alle Fälle – modellierter Grundriss mit Türen, Treppen, Personen und Ausgängen

2.3 Personenverteilung im Objekt für „Szenario 2“



Erstes Obergeschoss: 100 Personen im Umkleide- und Sanitärbereich verteilt

Abb. 7: Beispiel einer Anfangsverteilung für alle Fälle – modellierter Grundriss mit Türen, Treppen, Personen und Ausgängen.



Erdgeschoss: Keine Personen vorhanden

Abb. 8: Beispiel einer Anfangsverteilung für alle Fälle – modellierter Grundriss mit Türen, Treppen, Personen und Ausgängen



Kellergeschoss: 100 Personen im Umkleide- und Sanitärbereich verteilt

Abb. 9: Beispiel einer Anfangsverteilung für alle Fälle – modellierter Grundriss mit Türen, Treppen, Personen und Ausgängen

3. Personenparameter

Das Verhalten der Personen, innerhalb der Simulation, wird durch sechs verschiedene Parameter bestimmt. Die hier verwendeten Werte stellen einen durchschnittlichen Bevölkerungsquerschnitt dar und entsprechen einer statistischen Normalverteilung. Um die abweichenden Fortbewegungseigenschaften der Rollstuhlfahrer zu erfassen, wurden die Standardwerte entsprechend angepasst. Die Reaktionszeit nach Brandalarmierung wurde zwischen 0 und 60 Sekunden angesetzt.

Tab. 1: Parameter der nicht gehbehinderten Personen für alle Fälle

	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standard- abweichung	Einheit
Laufgeschwindigkeit	2	5	3	1	Zellen/s
Geduld	-	-	-	-	s
Schwanken	1	5	3	2	Zellen
Reaktionszeit	0	60	30	10	s
Trödeln	0	30	15	5	%
Trägheit	1	5	3	2	%

Tab. 2: Parameter der Rollstuhlfahrer für alle Fälle (nur in Szenario 1 vorhanden)

	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standard- abweichung	Einheit
Laufgeschwindigkeit	2	2	-	-	Zellen/s
Geduld	5000	5000	-	-	s
Schwanken	1	1	-	-	Zellen
Reaktionszeit	0	60	30	300	s
Trödeln	0	50	25	250	%
Trägheit	1	1	-	-	%

4. Ergebnisse

4.1 Allgemeine Erläuterungen

Um hinreichend präzise und realitätsnahe Resultate zu erhalten, müssen pro Szenario mehrere Simulationsdurchläufe erfasst werden. Diese werden in einer Mittelwertrechnung durchgeführt, welche in vorliegendem Gutachten jeweils 500 Simulationen je Brandfall umfasst. Weil es nicht zielführend wäre alle 500 Ergebnisse darzustellen, wird eine stellvertretende Simulation, mit einer Evakuierungsdauer größer oder gleich 95% aller Durchläufe, aus diesem Datenpool wiederholt. Anhand dieser Wiederholung können nun signifikante Staus und deren Auflösung grafisch dargestellt werden. Dazu werden Dichteplots herangezogen, die eine Zusammenfassung des gesamten Evakuierungsablaufs wiedergeben. Staus liegen in der Simulation dann vor, wenn die Personendichte gleich 4 P/m^2 oder höher ist.

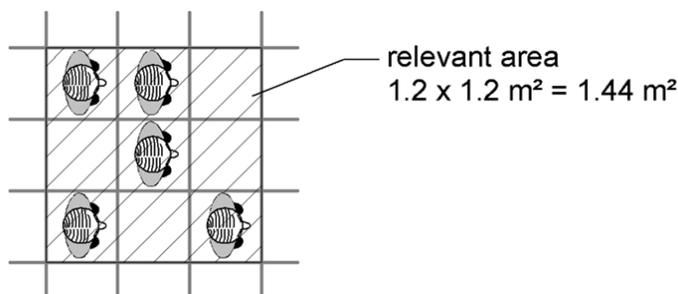


Abb. 10: Beispiel zur Verdeutlichung der Dichteberechnung im zellularen Gitter. Hier beträgt die Dichte etwa $3,5 \text{ P/m}^2$

Das Programm berechnet zu jedem Zeitschritt die Dichte jeder Zelle, zeichnet den zeitlichen Verlauf der Dichteüberschreitungen auf und gibt diesen in einem grün-roten Farbverlauf in den Dichteplots wieder. Anhand dieser Übersicht können anschließend Aussagen über die Dauer der Staus und deren Auflösung getroffen werden.

Auf Grund der Tatsache, dass dieses Gutachten in zwei Hauptszenarien gegliedert ist, nämlich „Szenario 1“ entspricht der Zeit während einer Veranstaltung und „Szenario 2“ entspricht der Zeit nach einer Veranstaltung, werden die Ergebnisse nun fallbezogen, jeweils für Szenario 1 und anschließend für Szenario 2 angeführt, sofern für den betrachteten Fall beide Szenarien zutreffen.

4.2 Simulationsergebnis Fall 1 (Szenario 1)

Alle Ausgänge sind nutzbar.

Nach 500 Simulationsdurchläufen ergeben sich die folgenden Zeiten:

Mittelwert [min:s]:	3:01
Standardabweichung [min:s]:	0:12
95% Quantil [min:s]:	3:23
Minimum [min:s]:	2:38
Maximum [min:s]:	3:59

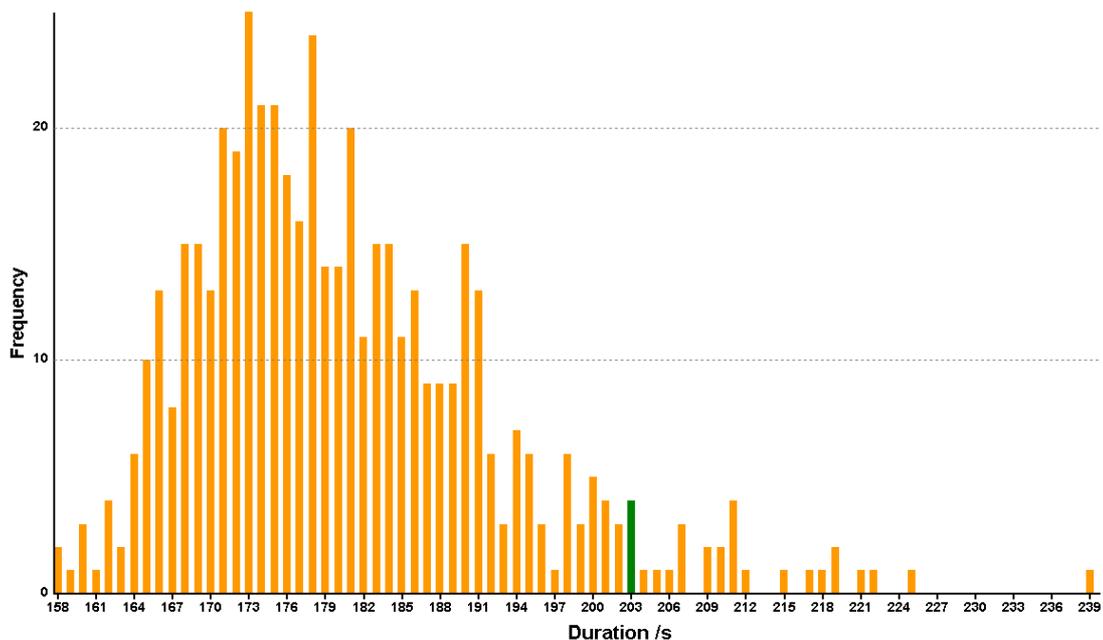


Abb. 11: Die Normalverteilung aller simulierten Entfluchtungsauern. Die grün markierte Säule stellt den 95 % Quantil Wert dar und wird für die Einzelbetrachtung verwendet.

Evakuierungskurve

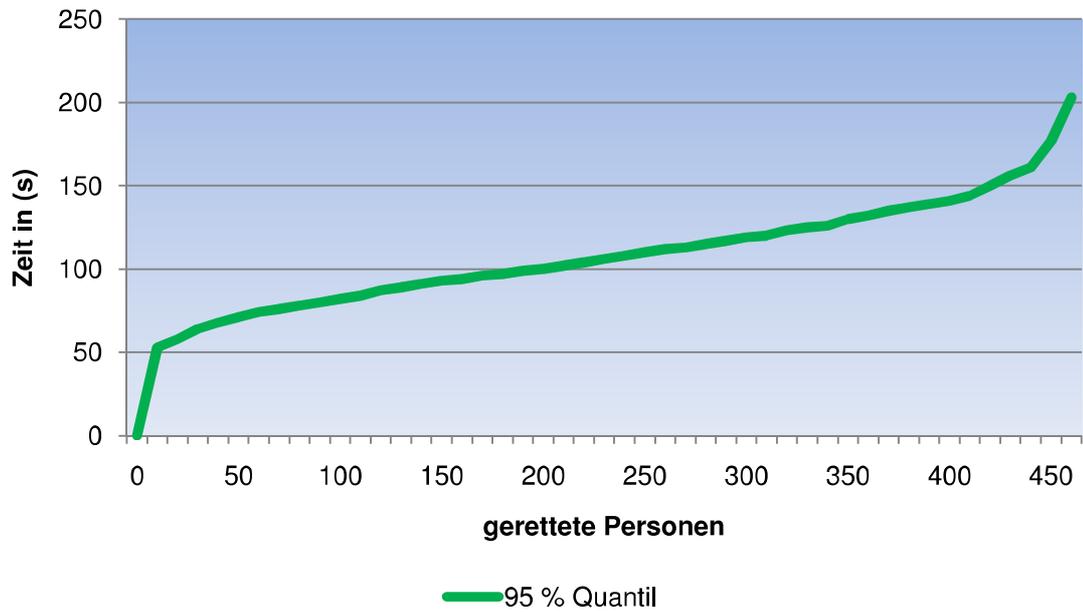


Abb. 12: Die Evakuierungskurve gibt an, wie viele Personen zu welcher Zeit gerettet wurden.

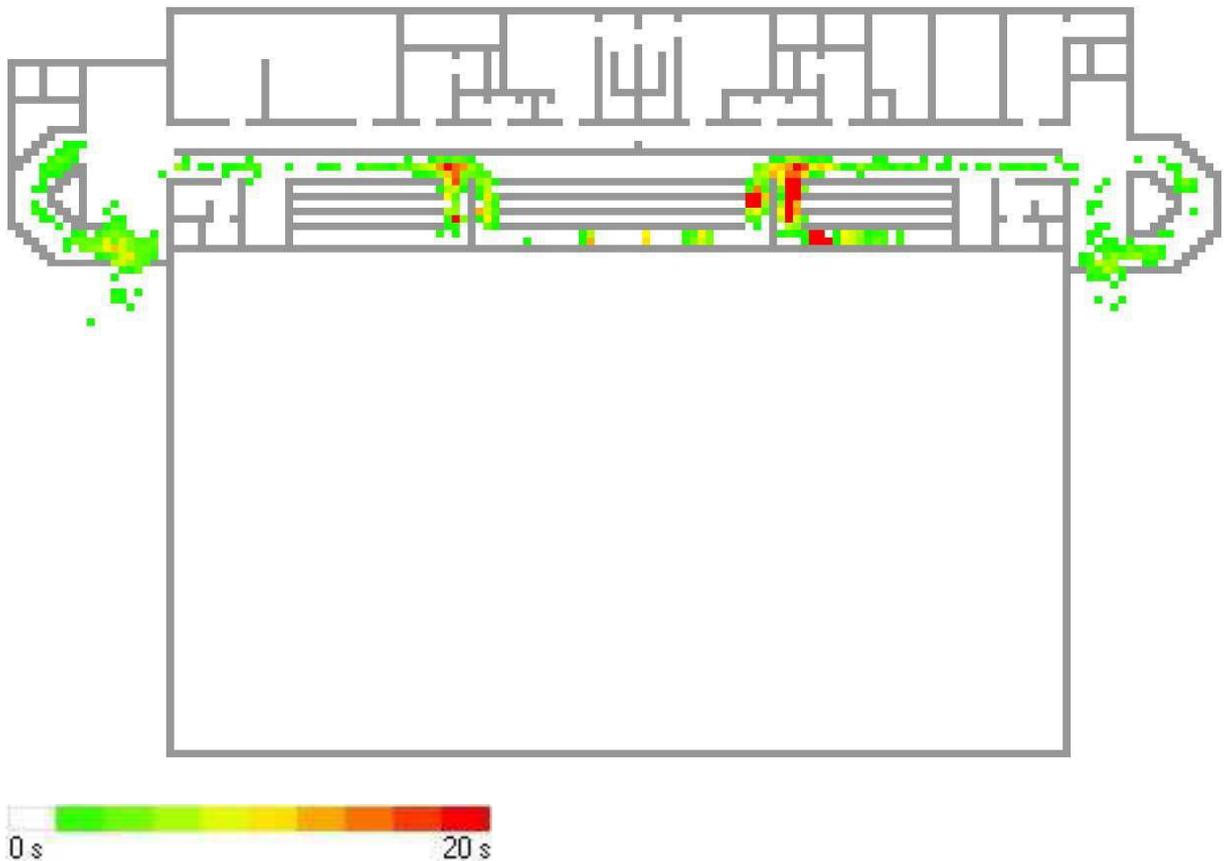


Abb. 13: Dichteplot des Erdgeschosses, die Farbgebung von grün, über gelb bis rot kennzeichnet die Stellen und die Zeit bis zur Auflösung von Stauungen.

Fazit (Fall 1; Szenario 1):

Aus der Simulation geht hervor, dass nach 1:45 Minuten alle Personen die Hallen und nach 3:23 Minuten das Gebäude und die Gefahrenzone verlassen haben. Dabei bildeten sich signifikante Staus lediglich auf den beiden Tribümentreppen und an den beiden Gebäudeausgängen im Westen bzw. Osten des Gebäudes. Alle Stauungen lösten sich ausnahmslos in weniger als 36 Sekunden auf. Unter der Voraussetzung, dass alle Ausgänge genutzt werden können, ist in 95 % aller Fälle mit einer Evakuierungszeit von 3:23 Minuten oder weniger zu rechnen.

4.3 Simulationsergebnis Fall 1 (Szenario 2)

Alle Ausgänge sind nutzbar.

Nach 500 Simulationsdurchläufen ergeben sich die folgenden Zeiten:

Mittelwert [min:s]:	2:56
Standardabweichung [min:s]:	0:14
95% Quantil [min:s]:	3:20
Minimum [min:s]:	2:21
Maximum [min:s]:	3:44

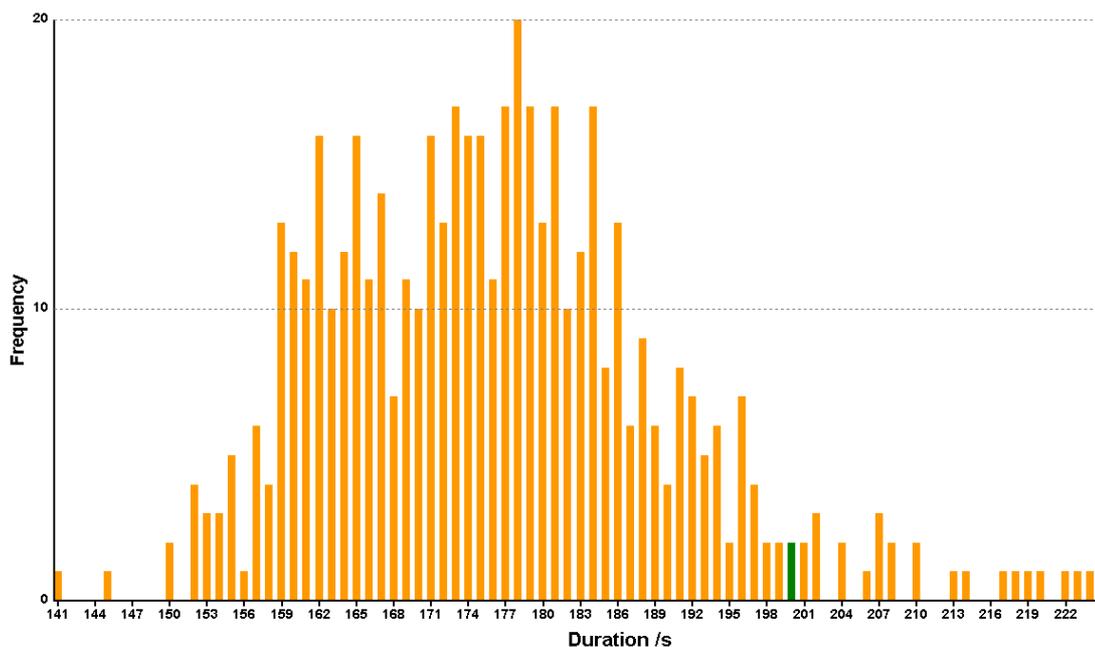


Abb. 14: Die Normalverteilung aller simulierten Entfluchtungsauern. Die grün markierte Säule stellt den 95 % Quantil Wert dar und wird für die Einzelbetrachtung verwendet.

Evakuierungskurve

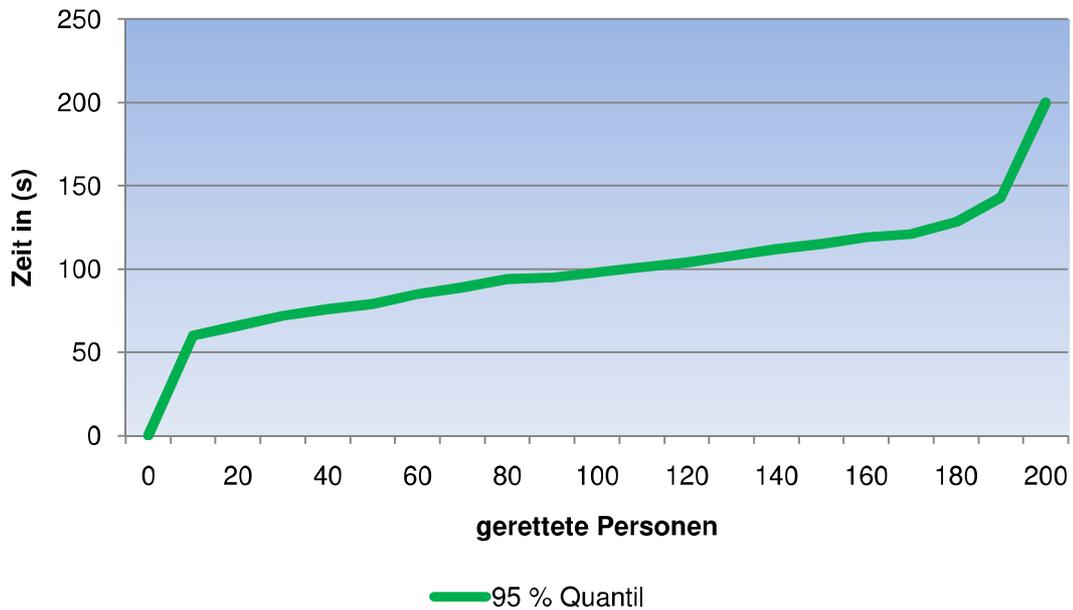


Abb. 15: Die Evakuierungskurve gibt an, wie viele Personen zu welcher Zeit gerettet wurden.

Fazit (Fall 1; Szenario 2):

Aus der Simulation geht hervor, dass alle Personen nach 3:20 Minuten das Gebäude und die Gefahrenzone verlassen haben. Dabei bildeten sich keine signifikanten Staus. Unter der Voraussetzung, dass alle Ausgänge genutzt werden können, ist in 95 % aller Fälle mit einer Evakuierungszeit von 3:20 Minuten oder weniger zu rechnen.

In diesem Fall, da es zu keinen Stauungen kommt, hängt die Evakuierungsdauer ausschließlich von der Bewegungsgeschwindigkeit der Personen und deren Weglänge ins Freie ab.

4.4 Simulationsergebnis Fall 2 (Szenario 1)

Der westliche Treppenraum ist während einer Evakuierungssituation aus keiner Etage zugänglich und kann folglich nicht genutzt werden. Dies könnte z.B. bei einer Rauchgasentwicklung im Treppenraum der Fall sein, was aber aufgrund der Sicherheitsbestimmungen des vorbeugenden Brandschutzes einen sehr unwahrscheinlichen Fall darstellt, hier jedoch trotzdem untersucht werden soll.

Nach 500 Simulationsdurchläufen ergeben sich die folgenden Zeiten:

Mittelwert [min:s]:	4:10
Standardabweichung [min:s]:	0:10
95% Quantil [min:s]:	4:27
Minimum [min:s]:	3:51
Maximum [min:s]:	5:01

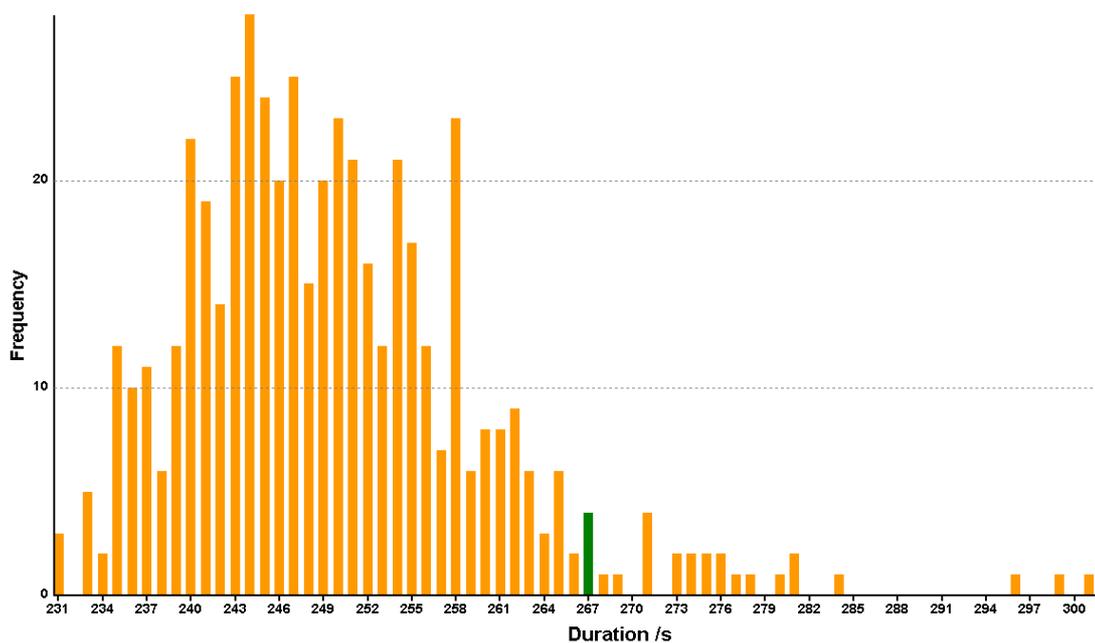


Abb. 16: Die Normalverteilung aller simulierten Entfluchtungsauern. Die grün markierte Säule stellt den 95 % Quantil Wert dar und wird für die Einzelbetrachtung verwendet.

Evakuierungskurve

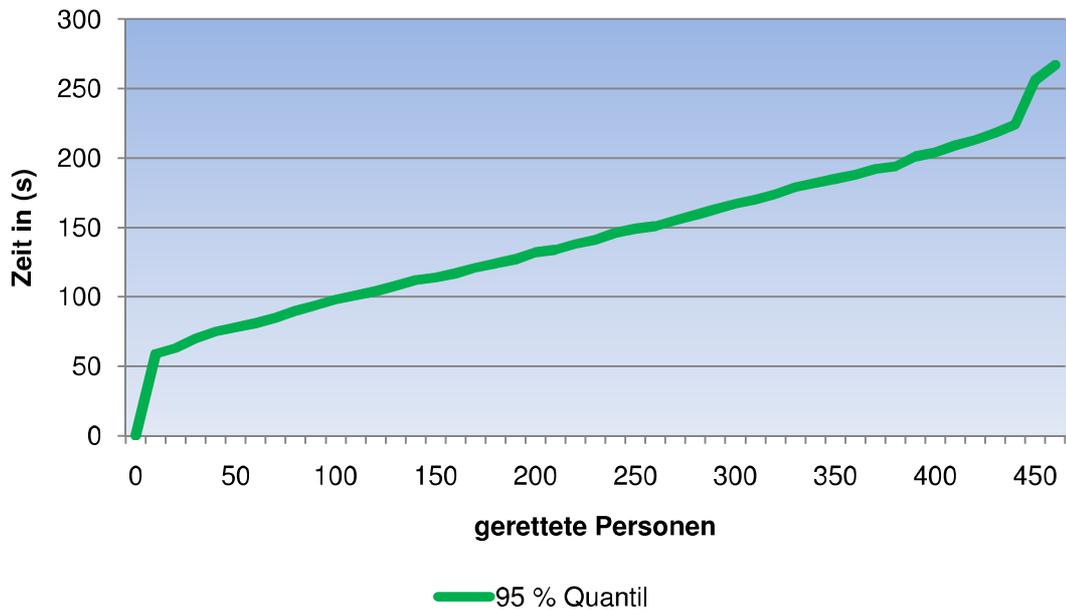


Abb. 17: Die Evakuierungskurve gibt an, wie viele Personen zu welcher Zeit gerettet wurden.

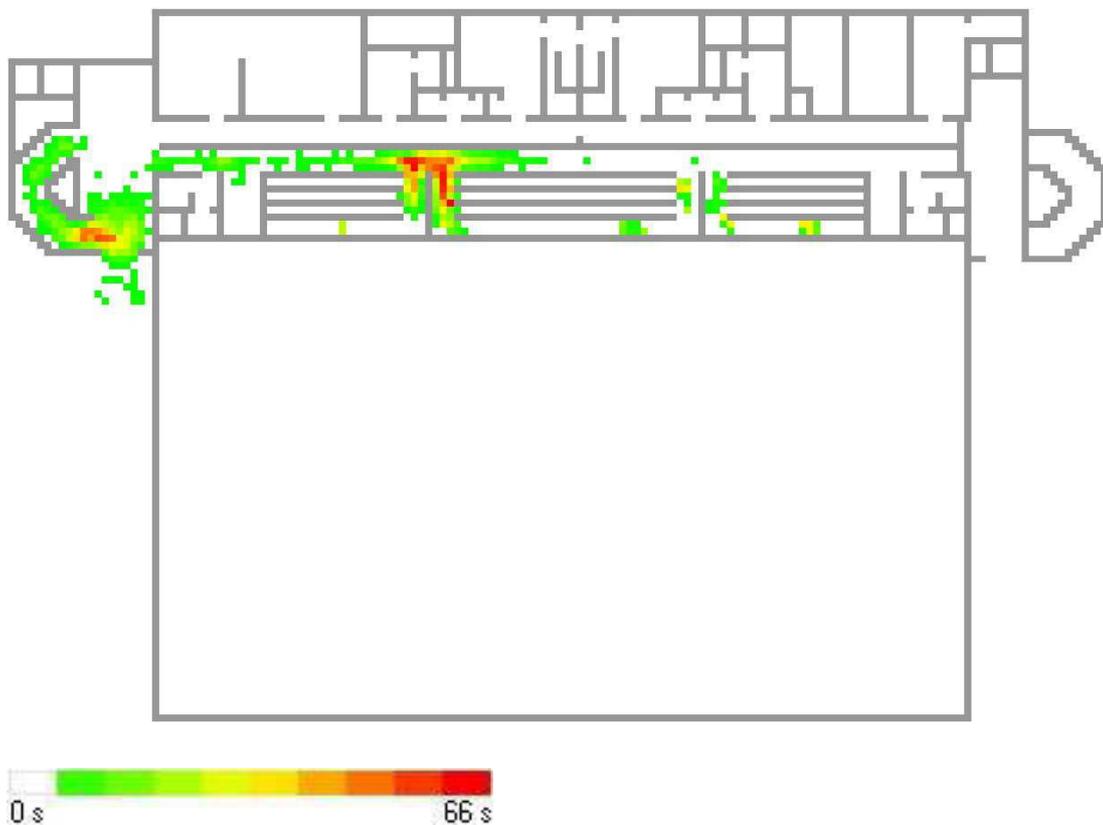


Abb. 18: Dichteplot des Obergeschosses, die Farbgebung von grün, über gelb bis rot kennzeichnet die Stellen und die Zeit bis zur Auflösung von Stauungen.

Fazit (Fall 2; Szenario 1):

Aus der Simulation geht hervor, dass nach 2:31 Minuten alle Personen die Halle und nach 4:27 Minuten das Gebäude und die Gefahrenzone verlassen haben. Dabei bildeten sich signifikante Stauungen an der östlichen Tribünenrampe, sowie an der östlichen Gebäudeausgangstür die Treppe hinauf bis in das erste Obergeschoss, alle Stauungen werden in weniger als 1:06 Minuten aufgelöst. Unter der Voraussetzung, dass der westliche Treppenraum nicht genutzt werden kann, ist in 95 % aller Fälle mit einer Evakuierungszeit von 4:27 Minuten oder weniger zu rechnen.

4.4 Simulationsergebnis Fall 2 (Szenario 2)

Der westliche Treppenraum ist während einer Evakuierungssituation, aus keiner Etage zugänglich und kann folglich nicht genutzt werden. Dies könnte z.B. bei einer Rauchgasentwicklung im Treppenraum der Fall sein, was aber aufgrund der Sicherheitsbestimmungen des vorbeugenden Brandschutzes einen sehr unwahrscheinlichen Fall darstellt, hier jedoch trotzdem untersucht werden soll.

Nach 500 Simulationsdurchläufen ergeben sich die folgenden Zeiten:

Mittelwert [min:s]:	4:10
Standardabweichung [min:s]:	0:10
95% Quantil [min:s]:	4:27
Minimum [min:s]:	3:51
Maximum [min:s]:	5:01

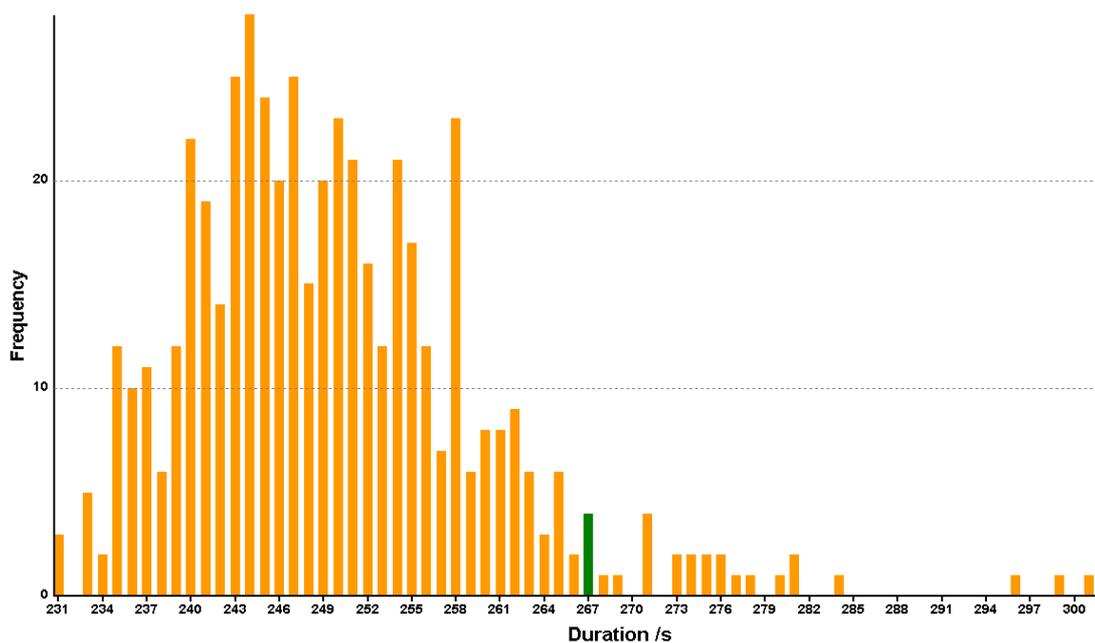


Abb. 19: Die Normalverteilung aller simulierten Entfluchtungsauern. Die grün markierte Säule stellt den 95 % Quantil Wert dar und wird für die Einzelbetrachtung verwendet.

Evakuierungskurve

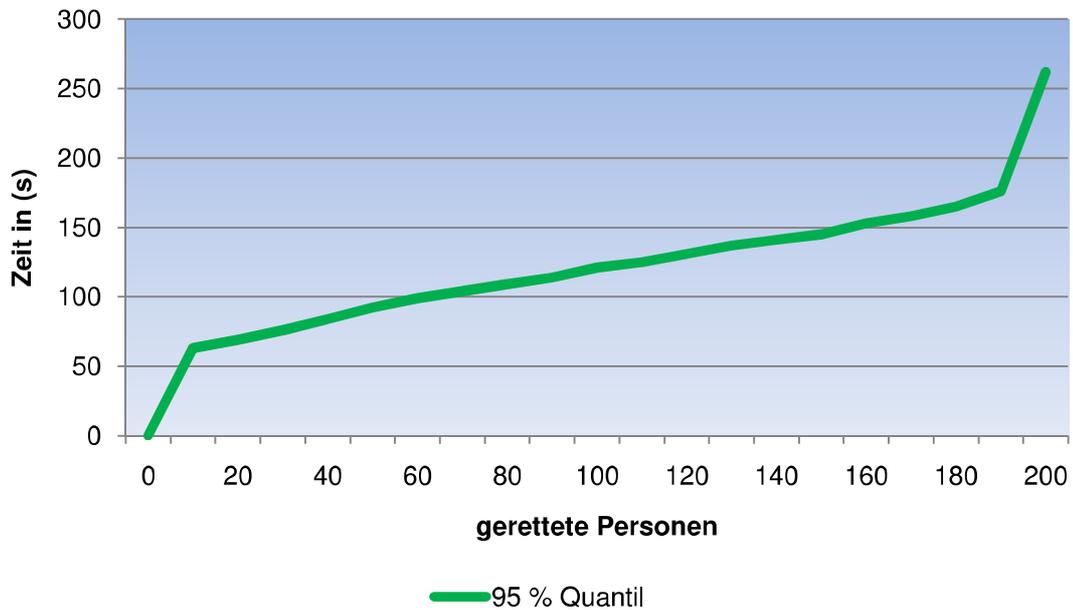


Abb. 20: Die Evakuierungskurve gibt an, wie viele Personen zu welcher Zeit gerettet wurden.

Fazit (Fall 2; Szenario 2):

Aus der Simulation geht hervor, dass alle Personen nach 4:22 Minuten das Gebäude und die Gefahrenzone verlassen haben. Dabei bildeten sich lediglich kleine Stauungen im östlichen Treppenraum, genauer auf den Treppen, die in das Erdgeschoss führen. Diese sind nicht aufgeführt, da sie mit einer Maximaldauer von 7 Sekunden vernachlässigbar klein sind. Unter der Voraussetzung, dass der westliche Treppenraum nicht genutzt werden kann, ist in 95 % aller Fälle mit einer Evakuierungszeit von 4:22 Minuten oder weniger zu rechnen.

In diesem Fall, da es zu keinen Stauungen kommt, hängt die Evakuierungsdauer ausschließlich von der Bewegungsgeschwindigkeit der Personen und deren Weglänge ins Freie ab.

4.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Evakuierungskurve (95 % Quantil) Szenario 1

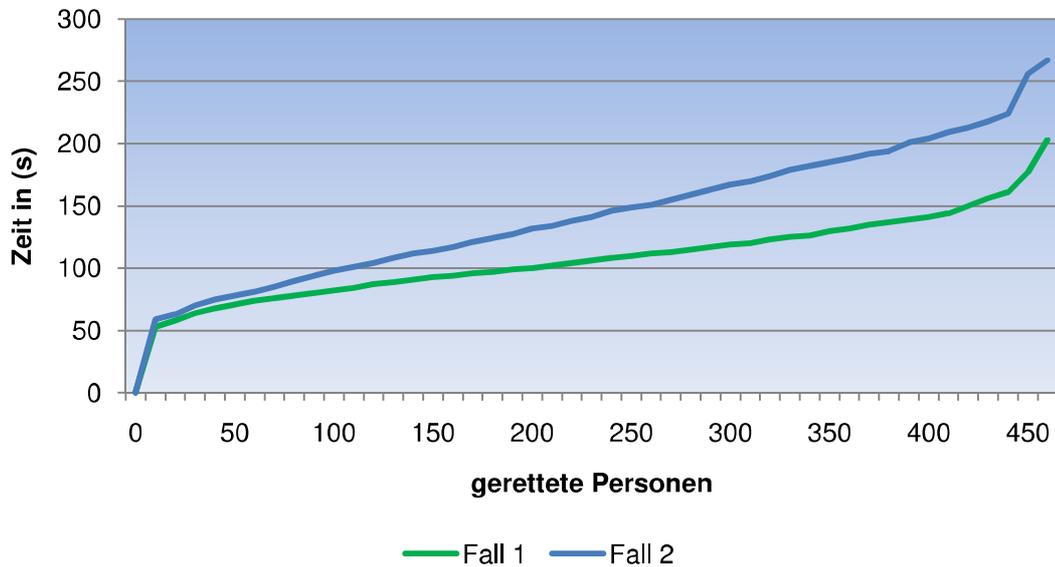


Abb. 21: Vergleich der Evakuierungskurven der Fälle 1 und 2 (Szenario 1)

Evakuierungskurve (95 % Quantil) Szenario 2

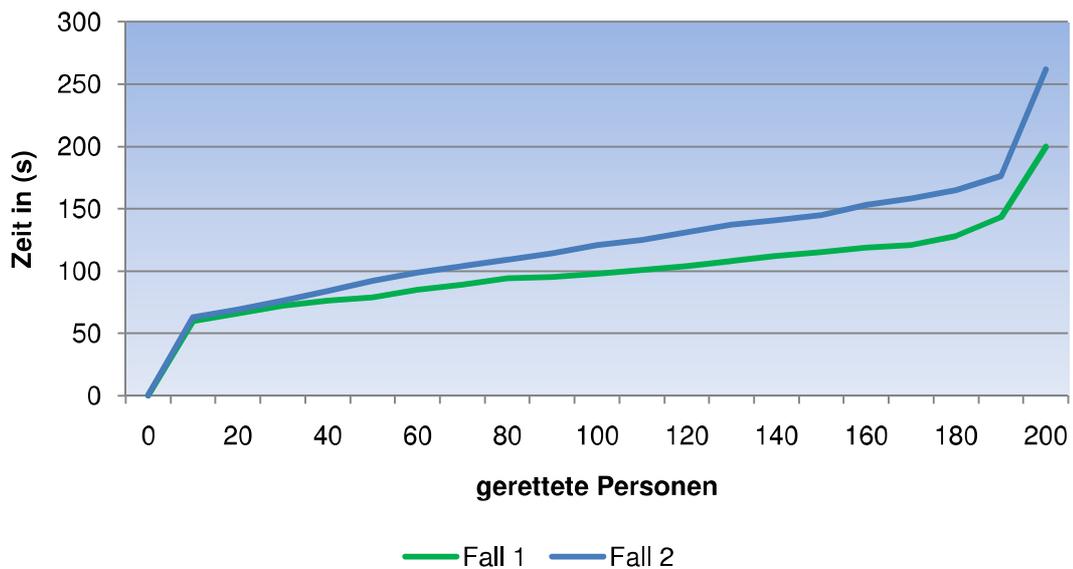


Abb. 22: Vergleich der Evakuierungskurven der Fälle 1 und 2 (Szenario 2)

Abschließend kann festgehalten werden, dass alle **451 Personen** (Szenario 1) bzw. **200 Personen** (Szenario 2) das Gebäude über die jeweils verfügbaren Rettungswege verlassen können. Im Vergleich aller Fälle und Szenarien untereinander, stellt sich heraus, dass „**Fall 2**“ in beiden Szenarien das schlechteste und damit maßgebende Resultat hervorbringt. Demnach ist die **Halle nach 2:31 Minuten geräumt** und nach **4:27 Minuten** haben alle Personen **das Gebäude verlassen**. Signifikante Staus treten grundsätzlich auf den Tribümentreppen im Erdgeschoss auf und im Falle des Wegfalls eines Treppenhauses an der noch begehbaren Ausgangstür und der angrenzenden Treppe. Die **Stauzeiten** liegen gemeinhin **unter 1:06 Minuten**.

Die Ergebnisse dieses Gutachtens stellen lediglich Zeitwerte dar, die aussagen, wie viel Zeit benötigt wird, um das Gebäude zu räumen. Für einen wertenden Vergleich werden zudem noch die tatsächlich vorhandenen Zeiten, die zur Evakuierung im Ernstfall zur Verfügung stehen, benötigt. Erst nach diesem Schritt kann eine Einschätzung der Tauglichkeit bzw. Eignung der Sportstätte in der [REDACTED] Berlin, für Großveranstaltungen getroffen werden. Die Ermittlung dieser Werte ist jedoch nicht Bestandteil dieses Gutachtens.

Die hier ermittelte Evakuierungszeit ist die Zeit von der Alarmierung bis zum Erreichen des Freien bzw. eines sicheren Bereiches.

Die Evakuierungsberechnung mit Simulationssoftware wurde auf den jeweiligen Einzelfall und auf die Nutzung der konkreten baulichen Anlage zum Bearbeitungsstand abgestimmt. Bei Änderungen der Gegebenheiten und Voraussetzungen oder durch weitere Umplanungen wird eine Neubetrachtung der Evakuierungszeit notwendig.

5. Literatur und Informationen

- (1) *Abschlussbericht zum Projekt BYPASS*, [Prof. Dr. Michael Schreckenberg, Gerhard Mercator Universität Duisburg 2003]
- (2) *Neue physikalische Modellierungskonzepte*, [Dirk Helbing, Verkehrsdynamik, Springer Verlag 1996]
- (3) *Assessment and Analysis of Evacuation Processes on Passenger Ships by Microscopic Simulation*, [Tim Meyer-König, Hubert Klüpfel, Michael Schreckenberg, Pedestrian and Evacuation Dynamics, Springer Verlag]
- (4) *Evakuierungsberechnung – Evakuierung von Personen aus Gebäuden*, [Dr.-Ing. Klaus Müller, EIPOS e.V., 2004]

Dieses Sachverständigengutachten zur Beurteilung der Rettungswegesituation wurde nach bestem Wissen und Gewissen erstellt. Es ist ausschließlich ungekürzt in seinem gesamten Wortlaut zu verwenden. Eine Veröffentlichung, auch auszugsweise bedarf der schriftlichen Genehmigung. Dieses Gutachten, einschließlich aller Teile, ist Urheberrechtlich geschützt.

Die Evakuierungsberechnung umfasst 28 Seiten.

Berlin, den 25.08.2011

Verfasser:

Frank Leymann, B.Eng.

Anhang D



HTW Berlin
Fachbereich 2
Umweltinformatik

htw.
Hochschule für Technik
und Wirtschaft Berlin
University of Applied Sciences

Aufgabenstellung zur Masterthesis

Entfluchtungssimulationen am rechnergestützten Modell für drei Sporthallen

von

Herrn Frank Leymann

Fluchtwege in öffentlichen Gebäuden müssen in Art und Kapazität für Notfälle dimensioniert werden. In der Arbeit von Herrn Leymann soll diese Aufgabe am Beispiel von Sporthallen, die neben deren Hauptnutzung auch für Veranstaltungen mit größeren Besucherzahlen ausgelegt werden müssen, behandelt werden.

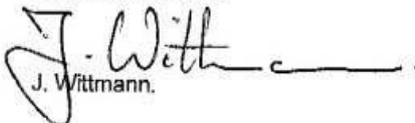
Die konventionelle Variante zur Kapazitätsberechnung von Fluchtwegen basiert auf relativ einfachen, pauschalisierenden Rechenvorschriften. Eine Alternative stellen rechnergestützte Entfluchtungsmodelle und entsprechende Simulationsrechnungen dar.

Nach Formulierung der Problemstellung und Einarbeitung in das Softwarepaket PedGo zur Fussgängersimulation soll der Bearbeiter an Hand von drei Beispielen, die vom externen Betreuer zur Verfügung gestellt werden, die Methodik der modellbasierten Modellrechnung demonstrieren.

Vorgehensweise, Art und Umfang des zur Simulation notwendigen Datenmaterials sowie Art, Umfang und Qualität der daraus abzuleitenden Modellergebnisse sollen in Bezug zur Lösung über eine konventionelle Entfluchtungsrechnung gesetzt und bewertet werden.

Die Arbeit soll in enger Zusammenarbeit mit der Firma „DBS – Die Bausachverständigen – Sachverständigengesellschaft für ganzheitliche Analyse mbh“ durchgeführt werden.

Berlin, 17.03.2011,


J. Wittmann.

Glossar

<i>Agent</i>	Simulierte Person in PedGo.
<i>Bewegungsintensität (q)</i>	Vergleichswert der Handrechnung zur Ermittlung von möglichen Stauorten in einem Grundriss. Sie charakterisiert die Kenetik des Personenstromes unabhängig von der Wegbreite. [5]
<i>DDR</i>	Deutsche Demokratische Republik. Staat im geteilten Deutschland von 1949 bis 1990.
<i>Density-Plot</i>	Stellt Schwellenwerüberschreitungen der kritischen Dichte von 4 P/m^2 in der Evakuierungssimulation PedGo dar.
<i>Dichte</i>	Auch Personenstromdichte, ist das Verhältnis aus der Personenanzahl zur Fläche des aktuell betroffenen Wegabschnittes. [5]
<i>Diskrete Simulation</i>	Auch Ablaufsimulation oder Ereignisgesteuerte Simulation, benutzt Zeitintervalle um Ergebnisse hervorzurufen, welche Ihrerseits den nächsten Systemzustand bestimmen.
<i>Durchlassfähigkeit</i>	Gibt an, wie viele Personen pro Zeiteinheit durch einen Wegabschnitt definierter Breite hindurchtreten können. [5]

<i>DXF-Datei</i>	Drawing Interchange File Format (DXF) ist ein von Autodesk spezifiziertes Dateiformat zum CAD-Datenaustausch
<i>Exit-Zellen</i>	Ausgangszellen der Software PedGo. Beim Betreten durch einen Agenten wird dieser aus der Simulation genommen und als gerettet angesehen.
<i>Flächenfaktor (f) oder (c)</i>	Rechenwert, der die zusätzlich beanspruchte Fläche von Kleidung , Gepäck und Anderem berücksichtigt.
<i>Floor</i>	Button in PedGo-Editor zum Import von Grundrissen
<i>Fundamentaldiagramm</i>	Diagramm, welches den Zusammenhang zwischen Personendichte und Personenfluss darstellt. [10]
<i>Gänge (Personenstromvereinigung)</i>	Angenommene Breite eines Personenstromes nach Betreten der Vereinigungsfläche, d. h. dem Flur in dem sich die Ströme treffen.
<i>Geschwindigkeit des Personenstromes</i>	Fortbewegungsgeschwindigkeit mit der sich der gesamte Strom in Richtung Ausgang bewegt.
<i>Grenzlinie der Vereinigung</i>	Imaginäre Linie, die als Berechnungsgrundlage dient um an ihr mehrere Personenströme zu vereinen.

<i>Gruppenzwang</i>	Auslöser für eine Veränderung des Verhaltens oder der Einstellung von Personen innerhalb einer überstimmenden Gruppe. Hier: Eine Art Gruppenzusammenhalt.
<i>Handrechenmethode</i>	Verfahren zur Berechnung einer Evakuierungsmethode, welches auf die Wissenschaftler Predtetschenski und Milinski zurückgeht.
<i>Logpoints</i>	Dienen der Aufzeichnung des Personenstromaufkommens in Abhängigkeit der Zeit für einen markierten Raum. [10] (PedGo)
<i>Normalbetrieb</i>	Unter Normalbetrieb ist hier der Schulsport und der Vereinssport zu bezeichnen.
<i>Personenstrom</i>	Masse von Personen die zu einem bestimmten Ziel streben bzw. strömen.
<i>Predtetschenski und Milinski</i>	Russische Wissenschaftler, haben bereits in den 1970er Jahren eine Methode zur Berechnung der Evakuierungsdauer erarbeitet.
<i>Routen</i>	Dienen zur Steuerung der Potentialausbreitung und legen damit indirekt fest, welche Türen und Ausgänge von den Agenten bevorzugt angelaufen werden. [10]
<i>Screenshots</i>	Abgespeicherter aktueller, grafischer Bildschirminhalt des Computers oder Teile davon. Wird meist als Bilddatei ausgegeben.

<i>Seed</i>	Hier: Startwert eines deterministischen Zufallszahlengenerators. Bei gleichem <i>Seed</i> erhält man immer die gleiche Zufallszahl.
<i>Sichere Seite</i>	Redewendung die zum Ausdruck bringen soll, dass <i>eine</i> der vorhandenen Optionen die Beste ist, weil sie für Mensch und Material die unbedenklichste Lösung bietet.
<i>Staukontrollformel</i>	Gleichung zur Gegenüberstellung der Bewegungsintensitäten zweier aufeinanderfolgender Wegabschnitte. (siehe Abschnitt 2.3.5)
<i>Update</i>	hier: Die Art und Reihenfolge, in der die Agenten vom Programm bewegt werden. Der Zeitschritt für ein Update beträgt bei PedGo eine Sekunde und besteht aus mehreren Sub-Updateschritten. [10]
<i>zellularer Automat</i>	Ist ein mathematisches System, das aufgrund einfacher Regeln ein hochkomplexes Verhalten zeigt. [13] „Jede Zelle prüft zu jedem Zeittakt die Aktivität ihrer Nachbarn und interagiert dann gemäß vorgegebener Regeln“ [13]

Literaturverzeichnis

- [1] Mayr, Battran: *Brandschutzatlas*, Feuertrutz GmbH, Verlag für Brandschutzpublikationen, Stand März 2011

- [2] Roitman, M. J.: *Die Evakuierung von Menschen aus Bauwerken*. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik, 1966

- [3] Predtetschenski, W.M.; Milinski, A.I.: *Personenströme in Gebäuden. Berechnungsmethoden für die Projektierung*, Köln-Braunsfeld: Verlagsgesellschaft Rudolph Müller, 1971

- [4] Dr.-Ing. Friedrich Mehl, *Grundlagen der Ingenieurmethoden im baulichen Brandschutz*, EIPOS Dresden e.V., 2010

- [5] Dr.-Ing. Klaus Müller, *Handbuch Evakuierung*, Erich Schmidt Verlag, 2009

- [6] Prof. Dr. Michael Schreckenberger, *Evakuierung und deren Simulation bei Gebäuden*, Referat an der Universität Hannover, Juni 2010

- [7] Dr.-Ing. Gerd Geburtig, *Mündliche Aussage*, Planungsgruppe Geburtig, Humboldtstraße 21, 99423 Weimar, August 2011

- [8] Prof. Dr. Michael Schreckenberg, *Abschlussbericht zum Projekt BYPASS*, Universität Essen-Duisburg, 2003
- [9] Internetverweis: Uni Linz, *Theorie der zellularen Automaten*, Stand: 26.09.11;

http://www.fim.uni-linz.ac.at/lva/rus/CellulareAutomaten/CA_Index.htm
- [10] PedEd, PedGo, PedView, AENEASed, AENEASsim, AENEASview, *Benutzerhandbuch*, Traffgo HAT GmbH, 2008
- [11] Internetverweis, *Preisliste der Software*, Stand 28.09.11:
<http://www.traffgo-ht.com>
- [12] U. Schneider; M. Oswald; C. Lebeda, *Evakuierung bei Brandereignissen*, Art der Abhandlung unbekannt, Datum unbekannt
- [13] Dipl. Math. Maria Oelinger, *Biologische Prinzipien in der Informatik*, Universität Bremen, 2003

Erklärung

Eidesstattliche Erklärung zur Masterarbeit

Ich versichere, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig und ohne unerlaubter Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Stellen, die inhaltlich oder wörtlich aus Veröffentlichungen stammen sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit lag in gleicher oder ähnlicher Weise noch keiner Prüfungsbehörde vor und wurde bisher nicht veröffentlicht.

Ort, Datum

Unterschrift