

# Personenstromanalyse der Entfluchtung

Paketposthalle München

ROM Technik

Objekt: Paketposthalle München Entfluchtung – aus der Halle

Datum: 10.11.2023

**© Copyright Rud. Otto Meyer Technik GmbH & Co. KG, 2025**

Inhalt und Struktur der Dokumentation sind urheberrechtlich geschützt. Die Vervielfältigung sämtlicher Inhalte und Struktur-elemente, insbesondere Texte, Textteile, Bildmaterial, Logos, Grafiken und Designelemente, soweit sie schutzfähig im Sinne des deutschen Urheberrechts sind, zu anderem als zum privaten oder sonstigen eigenen Gebrauch sowie deren Verbreitung und Veröffentlichung bedarf der vorherigen schriftlichen Zustimmung der Rud. Otto Meyer Technik GmbH & Co. KG.

Dies gilt nicht für Kopien, die für die interne Verwendung des o. g. Kunden bestimmt sind. Das erstellte Konzept hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit und ist ohne Gewähr. Irrtum und technische Änderungen vorbehalten. Alle technischen und kaufmännischen Kenndaten beruhen auf Schätzungen bzw. Prognosen. Länderspezifische Vorschriften sind zu beachten. Keine Haftungsübernahme.

## Inhalt

1) Aufgabenstellung .....	5
2) Räumungssimulationen – theoretischer Hintergrund .....	6
2.1) Räumungssimulationen und ihre Vorschriften .....	6
2.2) Leistungskriterien und Beurteilungswerte .....	7
2.2.1) Beurteilung der Räumungszeit .....	7
2.2.2) Beurteilung der Stauung .....	9
2.2.3) Fluchtwege .....	10
3) Merkmale des Modells .....	11
3.1) Simulationsszenario .....	11
3.2) Mikroskopische Modellierung .....	11
3.2.1) Gewähltes Modell – Mikroskopisches Modell .....	11
3.2.2) Anzahl der Simulationläufe und Datenanalyse .....	12
3.2.3) Geschlechts- und Altersverteilung .....	12
3.2.4) Reaktionszeit .....	13
3.2.5) Bewegungszeit und freie Geschwindigkeit .....	14
3.2.6) Verwendete Software - Pathfinder .....	15
3.3) Darstellung des Simulationsmodells, Personenbelegung, und Hauptfluchtwege .....	17
3.3.1) Model, Treppenhäuser und Ausgänge .....	17
3.3.2) Personenbelegung .....	19
4) Ergebnisse .....	22
4.1) Fluchtzeit .....	22
4.2) Nutzung der Ausgangstüren .....	24
4.3) Stauung .....	25
5) Fazit .....	30
6) Anhang: Durchführung von Entfluchtungssimulationen nach DIN 18009-2 .....	31

## Abbildungen

Abbildung 1. Zielsetzung von Räumungssimulationen.....	6
Abbildung 2. Zeitintervalle während eines Brandnotfalls.....	9
Abbildung 3. Bereitgestelltes .ifc-Modell der Paketposthalle.....	11
Abbildung 4. Alterwahrscheinlichkeitsverteilung. X-Achse – Alter, Y-Achse – relative Häufigkeit. ....	12
Abbildung 5. Darstellung der Wahrscheinlichkeitsdichte der logarithmischen Normalverteilung der Reaktionszeit.....	14
Abbildung 6. Verteilung der freien Gehgeschwindigkeit, X-Achse – Alter, Y-Achse – Freie Gehgeschwindigkeit in m/s.....	15
Abbildung 7. Darstellung der Methode zur Berechnung des Mittleren eines Messwertes in einer Messregion.....	16
Abbildung 8. Isometrische Ansicht des geometrischen Modells. ....	17
Abbildung 9. Draufsicht des geometrischen Modells. ....	18
Abbildung 10. Bezeichnung der Ausgangstüren des Theaters. Die grünen Linien stellen die Ausgangstüren dar. ....	19
Abbildung 11. Zufällige Personenbelegung der Halle. Blau -> Ältere Personen, Lila -> Rollstuhlfahrer und Orange -> Begleitpersonen. ....	20
Abbildung 12. Personenbelegung der Halle – voll besetzte Halle mit älteren Personen. ....	21
Abbildung 13. Verteilung der Fluchtzeit für die Halle. ....	22
Abbildung 14. Evakuierte Personen im Laufe der Zeit, Vergleich der schnellsten und langsamsten Evakuierungen. ....	23
Abbildung 15. Balkendiagramm mit der Nutzung der Ausgangstüren in einer einzigen Simulation.....	24
Abbildung 16. Prozentsatz der Nutzung der Ausgangstüren. ....	24
Abbildung 17. Personenstromraten durch a) die L5, L6, L8 und L11 (meistgenutzten) und b) die L1, L4, L10 und L12 (am wenigsten genutzten) Ausgangstüren. ....	25
Abbildung 18. Personendichte Farbkonvention.....	25
Abbildung 19. Lokale Personendichte für die längsten Stauungen: a) an den Ausgangstüren L2 und L3 und b) an der Ausgangstür L1, mit einer angepassten Farbkonvention bis zu 5 Personen/m <sup>2</sup> .....	28

## Tabellen

Tabelle 1. Werte für die Altersverteilung – Normalverteilung.....	12
Tabelle 2. Angenommene Werte für die Altersverteilung.....	13
Tabelle 3. Parameter des Gebäudes und der Personen zur Schätzung der Verteilung der Reaktionszeit.....	13
Tabelle 4. Minimale und maximale Werte für die Reaktionszeit jeder simulierten Person. ....	13
Tabelle 5. Parameter für die lognormale Verteilung der Reaktionszeit. ....	14
Tabelle 6. Vereinfachte Kategorien für die Altersverteilung. ....	15
Tabelle 7. Personenbelegung der Halle.....	20
Tabelle 8. Werte für die festgelegten Leistungskriterien für alle auftretenden Stauungen in der Entfluchtungssimulation des Theaters. ....	26

## 1) Aufgabenstellung

Die Paketposthalle in München hat ein 30 Meter hohe Struktur, auf einer Grundfläche von ca. 140 m x 110 m. Eine Räumungssimulation soll die signifikanten Räumungszeiten der Halle unter Berücksichtigung eines "Worst-Case Szenarios" – eine Vollbelegung der Halle mit 8000 älteren Personen – ermitteln und alle resultierenden Stauungen bei der Evakuierung aufzeigen.

Kapitel 2 fasst den theoretischen Hintergrund von Räumungssimulationen zusammen, Kapitel 3 gibt die Merkmale des Modells wie Simulationsszenarien, das gewählte Modell (mikroskopisches Modell) und verschiedene Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Personeneigenschaften an. Kapitel 4 stellt die Ergebnisse der Personenstromanalyse dar und Kapitel 5 enthält die Schlussfolgerungen.

## 2) Räumungssimulationen – theoretischer Hintergrund

### 2.1) Räumungssimulationen und ihre Vorschriften

Räumungssimulationen dienen der Überprüfung von Räumungskonzepten und der Personensicherheit im Gefahrenfall, z. B. bei einem Brand. Für diese Simulationen werden Personenstrommodelle implementiert, um die Nutzbarkeit der vorgesehenen Flucht- und Rettungswege zu überprüfen, Staubereiche zu identifizieren und die Ergebnisse zur Begründung von Planungsabweichungen oder Optimierungen zu nutzen. Solche Modelle können auch für die Planung von Veranstaltungen oder Fußgängerströmen verwendet werden.

Personenstrommodelle können einen makroskopischen oder einen mikroskopischen Schwerpunkt haben. Makroskopische Modelle berechnen die Bewegung großer Personengruppen unter Berücksichtigung aggregierter/homogener Daten wie die freie Gehgeschwindigkeit, Personendichte und Anzahl der Personen pro Gruppe. Im Gegensatz dazu simulieren mikroskopische Modelle die Bewegung einzelner Personen, wobei jeder Person einzigartige Parameter wie Körpergröße, Reaktionszeit und eine freie Gehgeschwindigkeit zugewiesen werden, die bestimmten Wahrscheinlichkeitsverteilungen gemäß den Standards entsprechen, wie sie später in diesem Dokument beschrieben werden. Diese Eingangsvariablen werden für jede Simulation randomisiert, was zu einer Varianz der Fluchtzeit führt.

Die Zeit, die für die gesamte Räumung benötigt wird, kann gemessen werden, und Engstellen und Staustellen können identifiziert werden, um weitere Konstruktionsänderungen vorzunehmen oder um bei der Festlegung organisatorischer Verfahren für Notfallevakuirungen zu helfen. Im Mittelpunkt steht dabei immer die Personensicherheit, die im Vorfeld virtuell getestet wird, um im Ernstfall das Unfallrisiko zu minimieren und eine Räumung mit ihren Engstellen besser vorbereiten zu können. Diese Simulationen haben einen Standardablauf, der in Baunormen und -vorschriften verankert ist.

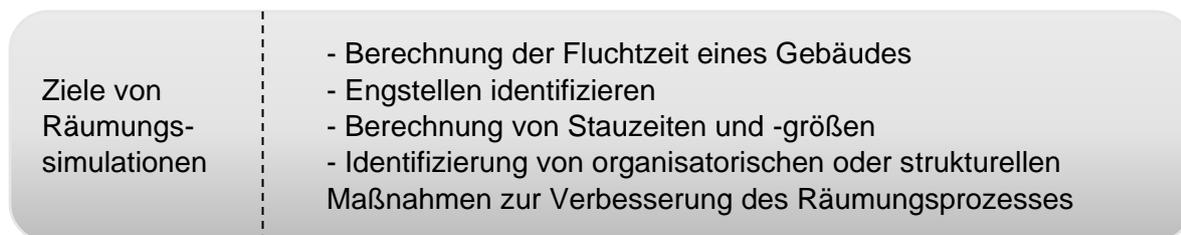


Abbildung 1. Zielsetzung von Räumungssimulationen.

Gebäude in Deutschland unterliegen verschiedenen Normen und Vorschriften, die Aspekte wie bauliche Sicherheit, Brandschutz, Energieeffizienz, akustischer Komfort, Barrierefreiheit und technische Anlagen betreffen. Dazu gehören das Baugesetzbuch (BauGB), die Energieeinsparverordnung (EnEV) und ergänzende Vorschriften wie die Technischen Regeln für Arbeitsstätten (ASR) und die DIN-Normen für technische Standards (Deutsches Institut für Normung), die technische Anforderungen spezifizieren und damit die Vergleichbarkeit von Bewertungsparametern zwischen Analysen ermöglichen und die Nachweis- und Prüfverfahren festlegen.

Die Normenreihe DIN 18009 standardisiert die Anwendung von Ingenieurmethoden im Brandschutz. Für Räumungssimulationen ist das Verfahren in der Norm DIN 18009-2

„Brandschutzingenieurwesen - Teil 2: Räumungssimulation und Personensicherheit“ festgelegt.<sup>1</sup> Sie wurde mit dem Ziel erstellt, Räumungssimulationen und -analysen in Zukunft zu standardisieren und zu einer anerkannten Ingenieurpraxis zu machen. Die Norm wurde ab August 2022 übernommen, ihr ISO-Pendant, die ISO-Norm 20414, ab Oktober 2020. Vor der Verabschiedung der DIN-Norm wurden seit 2004 die Richtlinien der RiMEA Richtlinie und seit 2020 die ASR 2.3 Fluchtwege und Notausgänge verwendet. Diese ASR-Regelung ist für die Einhaltung von Mindesttürabständen und Flurbreiten von Fluchtwegen sinnvoll. Die Einhaltung von DIN-Normen ist freiwillig, erst wenn sie Bestandteil von Verträgen werden, sind sie verpflichtend.<sup>2</sup>

In der DIN 18009-2 geht es in erster Linie um die Festlegung von Verfahren zur Ermittlung von Räumungszeiten für einen ausgewählten Bereich eines betrachteten Gebäudes und zur Bewertung von Stauungen, indem die gerichtete Bewegung von Personen innerhalb des Gebäudes simuliert wird. Aufenthaltsbereiche, Verkehrswege und Fluchtwege innerhalb und außerhalb baulicher Anlagen können bewertet werden. Das Ziel ist erreicht, wenn alle Personen diesen Bereich verlassen haben, bevor die Auswirkungen eines Brandes die Flucht sichtbar erschweren. Es wird davon ausgegangen, dass die Nutzbarkeit der Flucht- und Rettungswege durch die Brandeinwirkung nicht beeinträchtigt wird, so dass die Modelle für das Laufverhalten der Personen durch den Brand nicht beeinflusst werden. Die Anforderungen an die Rettung und Brandbekämpfung durch Einsatzkräfte sind nicht Gegenstand dieser Norm.

## 2.2) Leistungskriterien und Beurteilungswerte

Die DIN 18009-2 Norm beschreibt eine Reihe von Verfahren und Variablen, die zur Bestimmung der Fluchtzeit und zur Analyse der Größe und Dauer von Stauungen mit Hilfe von Personenstromsimulationen verwendet werden. Um die Nutzbarkeit von Flucht- und Rettungswegen zu überprüfen, werden in der Norm Beurteilungsgrundlagen definiert. Innerhalb der Norm werden Beurteilungswerte anhand von Leistungskriterien wie Räumungszeiten, Stauzeit, Staugröße, Wartezeiten und Staudichte festgelegt. Für die Dokumentation und den Nachweis müssen diese Leistungskriterien einschließlich ihrer zeitlichen Veränderung und Unsicherheiten berechnet und ausgewiesen werden; der Bauherr kann für diese Kriterien spezifische Beurteilungswerte festlegen. Ob eine Stauung akzeptabel ist oder nicht, ist nicht allgemein festgelegt, und die zu diesen Leistungskriterien gehörenden Beurteilungswerte können anhand von Stauereignissen in speziellen Gebäuden ermittelt werden, die anhand der genannten Vorschriften überprüft werden.

Es wird empfohlen, dass die Simulationsszenarien realistisch sind und sowohl häufige als auch ungünstige Situationen abdecken, und es wird eine vorherige Abstimmung mit der genehmigenden/überprüfenden Stelle empfohlen, um sicherzustellen, dass alle erforderlichen Szenarien in den Räumungssimulationen berücksichtigt werden.

### 2.2.1) Beurteilung der Räumungszeit

Bei der Räumungszeit Nachweisführung wird die verfügbare Räumungszeit ( $\Delta t_{\text{verfügbar}}$ ) mit der erforderlichen Räumungszeit ( $\Delta t_{\text{erforderlich}}$ ) verglichen. Die verfügbare Räumungszeit wird unter Berücksichtigung der Gefahren des Brandszenarios ermittelt und stellt die Zeit dar, die für die Räumung seit Beginn der Brandgefahr zur Verfügung steht, bevor die Fluchtwege durch

---

<sup>1</sup> DIN 18009-2:2022-08. Brandschutzingenieurwesen – Teil 2: Räumungssimulation und Personensicherheit. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

<sup>2</sup> accu:rate GmbH. (13. 10 2021). DIN 18009-2 Räumungssimulationen. Von <https://www.accu-rate.de/wp-content/uploads/white-paper-DIN-18009-2.pdf> abgerufen

Feuer oder Rauch versperrt werden. Die erforderliche Räumungszeit ist die Zeit, die benötigt wird, um die letzte Person nach dem Beginn der Brandgefahr aus dem Gebäude zu evakuieren. Um eine erfolgreiche Räumung zu gewährleisten, muss die erforderliche Räumungszeit kürzer sein als die verfügbare Räumungszeit. Die verfügbare Räumungszeit hängt von der Gebäudegeometrie und den Brandeigenschaften ab und sollte vor der Durchführung der Personenstromanalyse für die zu prüfenden Szenarien ermittelt werden.

$$\Delta t_{\text{erforderlich}} \leq \Delta t_{\text{verfügbar}} \quad \text{Gleichung 1}$$

Nach DIN 18009-2 ist der Beurteilungswert für die Räumungszeit die Räumungszeitdifferenz ( $\Delta t_{\text{Rdiff}}$ ), die größer als 0 sein sollte, um die Sicherheit der Personen während der Räumung zu gewährleisten.

$$\Delta t_{\text{Rdiff}} = \Delta t_{\text{verfügbar}} - \Delta t_{\text{erforderlich}} \quad \text{Gleichung 2}$$

$$\Delta t_{\text{Rdiff}} \geq 0 \quad \text{Gleichung 3}$$

Die erforderliche Räumungszeit ( $\Delta t_{\text{erforderlich}}$ ) ergibt sich aus der Addition der Detektionszeit ( $\Delta t_{\text{Detektion}}$ ), der Alarmierungszeit ( $\Delta t_{\text{Alarm}}$ ), und der Fluchtzeit ( $\Delta t_{\text{Flucht}}$ ).

$$\Delta t_{\text{erforderlich}} = \Delta t_{\text{Detektion}} + \Delta t_{\text{Alarm}} + \Delta t_{\text{Flucht}} \quad \text{Gleichung 4}$$

Die Detektionszeit ( $\Delta t_{\text{Detektion}}$ ) ist die Zeit, die benötigt wird, um die Brandgefahr zu erkennen und hängt von der entsprechenden Infrastruktur ab. Bei automatischen Detektionssystemen kann angenommen werden, dass die Detektionszeit 120 s beträgt.<sup>3</sup> Die Alarmierungszeit  $\Delta t_{\text{Alarm}}$  ist die Zeit, die zwischen der Erkennung der Brandgefahr und der Alarmierung der Personen des Gebäudes vergeht. Einige Gebäude bevorzugen eine Zeitverzögerung, um Fehlalarme zu vermeiden.

Die Fluchtzeit ( $\Delta t_{\text{Flucht}}$ ) ist das Maximum der individuellen Fluchtzeiten, wobei die individuelle Fluchtzeit ( $\Delta t_{\text{Flucht},i}$ ) die Summe ihrer Reaktionszeit ( $\Delta t_{\text{Reaktion},i}$ ) und Bewegungszeit ( $\Delta t_{\text{Bewegung},i}$ ) ist. Im Gegensatz zur Detektions- und Alarmierungszeit kann die Fluchtzeit durch die Räumungssimulation berechnet werden. Daher beginnen die Simulationen mit der Annahme, dass die Detektions- und Alarmierungszeiten bereits bei  $t = 0$  s eingetreten sind und alle Personen den Alarm wahrgenommen haben (automatisches Alarmsystem).

$$\Delta t_{\text{Flucht}} = \max(\Delta t_{\text{Flucht},i}) = \max(\Delta t_{\text{Reaktion},i} + \Delta t_{\text{Bewegung},i}) \quad \text{Gleichung 5}$$

---

<sup>3</sup> DIN 18009-2:2022-08

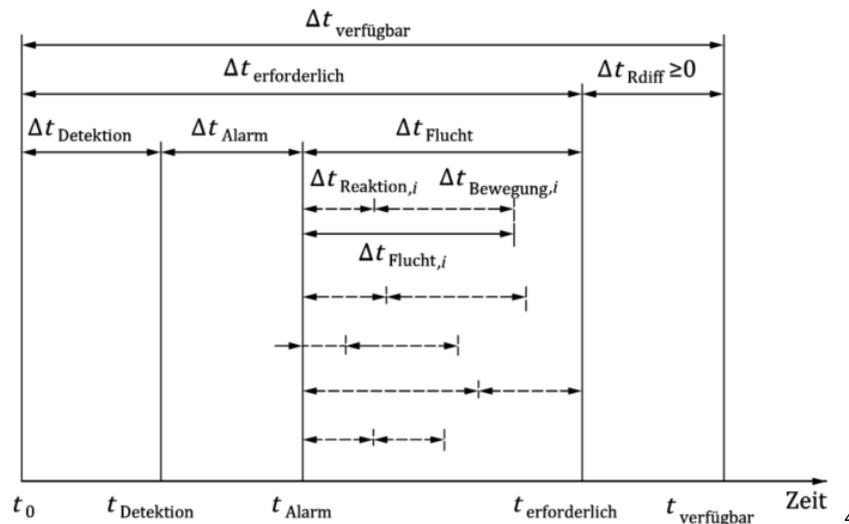


Abbildung 2. Zeitintervalle während eines Brandnotfalls.

Was die Räumungszeiten betrifft, so wird bei dieser Untersuchung die Fluchtzeit  $\Delta t_{\text{Flucht}}$  berechnet, und es liegt am Auftraggeber, oder Brandschutzsachverständigen zu prüfen, ob diese Fluchtzeit für das Brandszenario niedrig genug ist oder ob eine Änderung der Planung erforderlich ist.

### 2.2.2) Beurteilung der Stauung

Eine Stauung liegt vor, wenn die Geschwindigkeit einer Person unter einen Grenzwert fällt, der typischerweise zwischen 0,2 und 0,8 m/s liegt, wie in der Norm DIN 18009-2 erwähnt. Hinsichtlich der Beurteilungswerte für Stauungen können die folgenden Leistungskriterien analysiert werden:

- Staustelle/Staubereich – Ort
- Staugröße – Maximale Anzahl der gleichzeitig beteiligten Personen
- Stauzeit – Dauer der Stauung (zwischen der ersten Person, deren Geschwindigkeit unter den Grenzwert fällt, und der letzten Person, deren Geschwindigkeit unter den Grenzwert fällt und die den Staubereich verlässt)
- Wartezeit – Maximale Verweildauer einer einzelnen Person in der Stauung (die maximale Zeit, die eine Person damit verbringt, sich mit einer Geschwindigkeit unterhalb des Grenzwerts zu bewegen)
- Staudichte – Mittlere Dichte der Personen in der Stauung

Die Kriterien werden berücksichtigt, wenn einzelne lokale Stauungen auftreten. Wenn getrennte Stauungen zu einer einzigen Stauung zusammengefasst werden, wird der größere der beiden Werte gemeldet.

Diese Leistungskriterien werden in dieser Untersuchung für alle auftretenden Stauungen angegeben, und es liegt am Auftraggeber, zu überprüfen, ob sie akzeptabel sind. Anhand der Ergebnisse kann der Auftraggeber entscheiden, ob Änderungen erforderlich sind oder ob er seine Routine und sein Verfahren für die Räumung festlegen möchte.

<sup>4</sup> DIN 18009-2:2022-08

Nach der RiMEA Richtlinie 3.0.0 liegt eine signifikante Stauung vor, wenn lokale Personendichten von über 4 Personen/m<sup>2</sup> über 10% des oberen Perzentils der Fluchtzeit liegt.<sup>5</sup>

### 2.2.3) Fluchtwege

Die Personen, die in der Räumungssimulation simuliert werden, müssen einen Ausgang wählen, zu dem sie sich entweder einzeln oder als Gruppe begeben, abhängig von der gewählten Simulationsart (mikro- oder makroskopisch). Die DIN 18009-2 Norm besagt, dass davon ausgegangen werden kann, dass die Personen den lokal kürzesten Weg benutzen. Allerdings können die Personen die Stauung bewerten und einen günstigeren Fluchtweg wählen. Zusätzlich können alternative Präferenzen für die Wahl des Fluchtweges (z.B. bekannte Routen oder Hauptverkehrsrouten) berücksichtigt werden. Die Auswahl der Routen sollte nicht verändert werden, um die Fluchtzeit zu optimieren, sondern um die Personenströme realistisch zu lenken.

---

<sup>5</sup> RiMEA (2016). RiMEA Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen, Version 3.0.0. URL: [https://rimeaweb.files.wordpress.com/2016/06/rimea\\_richtlinie\\_3-0-0\\_-\\_d-e.pdf](https://rimeaweb.files.wordpress.com/2016/06/rimea_richtlinie_3-0-0_-_d-e.pdf)

### 3) Merkmale des Modells

#### 3.1) Simulationsszenario

Die Untersuchung hat das Ziel, eine Räumung der Halle in der Paketposthalle zu simulieren, indem eine Personenstromanalyse mit anerkannter und leistungsfähiger Simulationssoftware gemäß der Norm DIN 18009-2 durchgeführt wird.

**Szenario:** Die Postpakethalle mit voller Kapazität (8000 Personen), besucht von älteren Personen, was als Worst-Case-Szenario gilt.

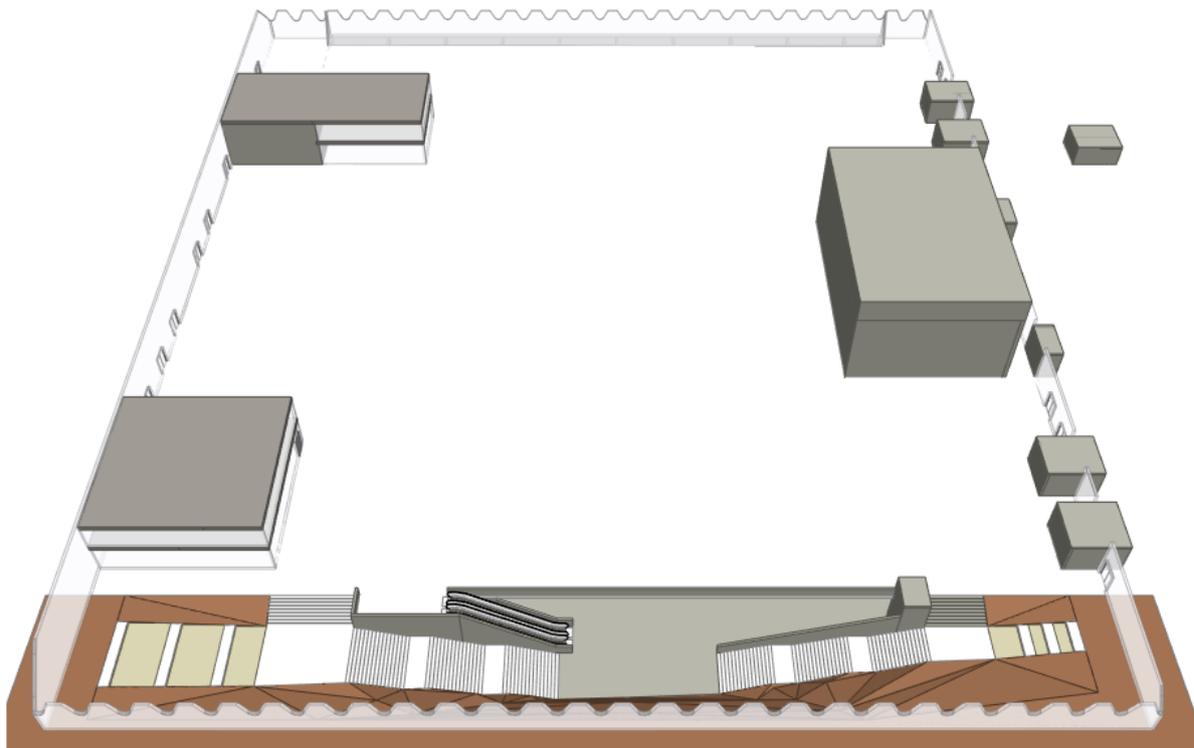


Abbildung 3. Bereitgestelltes .ifc-Modell der Paketposthalle, Quelle: Jürke Architekten

Die Grundfläche ist ca. 140 x 110 m. In Abbildung 3 repräsentiert die große graue Geometrie rechts die Decke des geplanten Theaters, das sich unterirdisch über acht Ebenen mit einer Tiefe von 22,5 m erstreckt.

#### 3.2) Mikroskopische Modellierung

##### 3.2.1) Gewähltes Modell – Mikroskopisches Modell

Die mikroskopische Modellierung umfasst die Modellierung einzelner Personen mit jeweils eigenen Merkmalen und Verhaltensweisen wie Körpergröße, freie Gehgeschwindigkeit, Reaktionszeiten und Präferenzen für den Fluchtweg. Diese Werte folgen Wahrscheinlichkeitsverteilungen und werden für jede Simulation randomisiert, was zu einer Varianz der Fluchtzeit führt.

Die mikroskopische Modellierung wurde für diese Untersuchung gewählt, weil sie detaillierter und präziser ist als ein makroskopisches Modell. Die kontinuierliche Modellierung (anstelle der diskreten) wurde gewählt, da die Grundrisse des Gebäudes verfügbar sind und somit genauere Ergebnisse erzielt werden können.

### 3.2.2) Anzahl der Simulationsläufe und Datenanalyse

Um der Variation der Parameter-Rechnung zu berücksichtigen, sollte für jedes Szenario eine ausreichende Anzahl von Simulationsläufen für die statistische Analyse durchgeführt werden, wobei zehn Simulationen das Minimum darstellen. Falls zehn Simulationen die Ergebnisverteilung nicht angemessen wiedergeben, sollten mehr Simulationen durchgeführt werden. Für die Fluchtzeit ist der Mittelwert der Ergebnisse aus allen Simulationen nicht geeignet, eher sollte der obere Perzentilwert angegeben werden.<sup>6</sup>

Für diese Untersuchung und um die Verteilung der Fluchtzeit adäquater darzustellen, werden insgesamt 25 Simulationen durchgeführt.

### 3.2.3) Geschlechts- und Altersverteilung

Die Geschlechts- und Altersverteilung, die von der Norm DIN 18009-2 vorgeschlagen wird, ist die RiMEA-Standardpopulation. Sie besteht aus 50% Männern und Frauen und hat die folgende Alterswahrscheinlichkeitsverteilung.

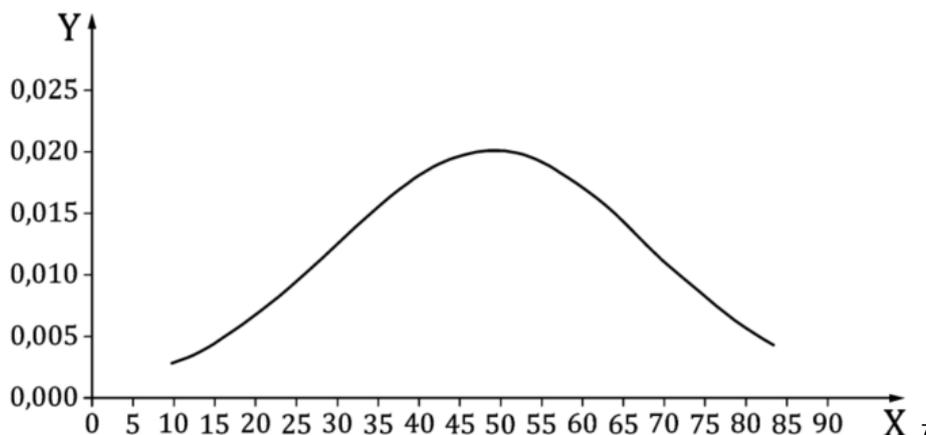


Abbildung 4. Alterwahrscheinlichkeitsverteilung. X-Achse – Alter, Y-Achse – relative Häufigkeit.

Tabelle 1. Werte für die Altersverteilung – Normalverteilung.

Min Alter	10
Max Alter	85
Mittelwert M	50
Standardabweichung SD	20

Kontinuierliche und diskretisierte Zusammensetzungen der Altersverteilung sind gemäß der Norm erlaubt, einschließlich der Wahl einer anderen Altersverteilung, falls dies für den Anwendungsfall erforderlich ist, wie z.B. Schulklassen oder Seniorenheimen. Für die Räumungssimulationen der Halle wird eine angepasste Altersverteilung von 50 bis 85 Jahren zugrunde gelegt, da das Worst-Case-Szenario ein traditionelles Treffen mit älteren Besuchern

<sup>6</sup> DIN 18009-2:2022-08

<sup>7</sup> DIN 18009-2:2022-08

betrifft. Diese Konzentration auf eine ältere Altersgruppe wird im Kontext der Fluchtsicherheit als konservatives Szenario betrachtet.

*Tabelle 2. Angenommene Werte für die Altersverteilung.*

Min Alter	50
Max Alter	85

### 3.2.4) Reaktionszeit

Die Reaktionszeit ( $\Delta t_{\text{Reaktion},i}$ ) berücksichtigt die Zeit, die jede Person benötigt, um den Alarm zu bemerken und zu interpretieren, sowie alle Handlungen, bevor sie beginnt, sich in einen sicheren Bereich zu begeben, z. B. Warnung und Suche nach anderen Personen. Sie hängt von der Art des Alarmsystems ab (ob alle Personen gleichzeitig alarmiert werden oder nicht), von der Art und Komplexität des Gebäudes und von den Merkmalen der Personen (ob sie wach sind, ihre Umgebung kennen oder nicht, und von der anfänglichen Personendichte).

Für die Räumungssimulation aus der Halle wird die Besucher als wach, jedoch mit ihrer Umgebung nicht vertraut betrachtet, da sie Erstbesucher sein könnten. Nur die Mitarbeiter der Halle sind in Brandschutzverfahren geschult. Es gibt die folgenden Eigenschaften:

*Tabelle 3. Parameter des Gebäudes und der Personen zur Schätzung der Verteilung der Reaktionszeit.*

Alarmierungssystem	A1 (automatisches Brandmeldesystem mit unmittelbarer Alarmierung der betroffenen Bereiche)
Gebäudekomplexität	B1 (einfacher Grundriss, überwiegend rechtwinklige Struktur, wenige Räume und eingeschossig)
Brandschutzmanagement	M2 (kleine Zahl gut geschulter Brandschutzhelfer)
Personencharakteristik	B (wach, unvertraut)

Da die gesamte Evakuierung in einem einzigen Geschoss stattfindet, wird die Gebäudekomplexität trotz eines unterirdischen Theaters als B1 angenommen. Gemäß Anhang B der Norm DIN 18009-2 würden die Mindest- und Höchstwerte der Reaktionszeit  $\Delta t_{\text{Reaktion},i}$  wie folgt lauten.

*Tabelle 4. Minimale und maximale Werte für die Reaktionszeit jeder simulierten Person.*

Min $\Delta t_{\text{Reaktion},i}$	60 s
Max $\Delta t_{\text{Reaktion},i}$	240 s

Die Norm ermöglicht die Annahme von Wahrscheinlichkeitsverteilungen, einschließlich Gleich- und Normalverteilungen. Die Reaktionszeiten auf Alarme sind in der Regel asymmetrisch verteilt, da mehr Personen eher schnell als langsam reagieren. Daher wird in diesem Fall eine logarithmische Normalverteilung angenommen, da sie die Reaktionszeiten bei einer Räumung adäquater wiedergibt. Die folgende Tabelle fasst die Parameter der lognormalen Wahrscheinlichkeitsverteilung der Reaktionszeit zusammen, gefolgt von einem Wahrscheinlichkeitsdichte-Diagramm dieser Verteilung.

Tabelle 5. Parameter für die lognormale Verteilung der Reaktionszeit.

Min $\Delta t_{\text{Reaktion},i}$	60 s
Max $\Delta t_{\text{Reaktion},i}$	240 s
$\mu$ (Mittelwert des natürlichen Logarithmus der Reaktionszeit)	$\ln(135,64 \text{ s})$
$\sigma$ (Standardabweichung des natürlichen Logarithmus der Reaktionszeit)	0,35

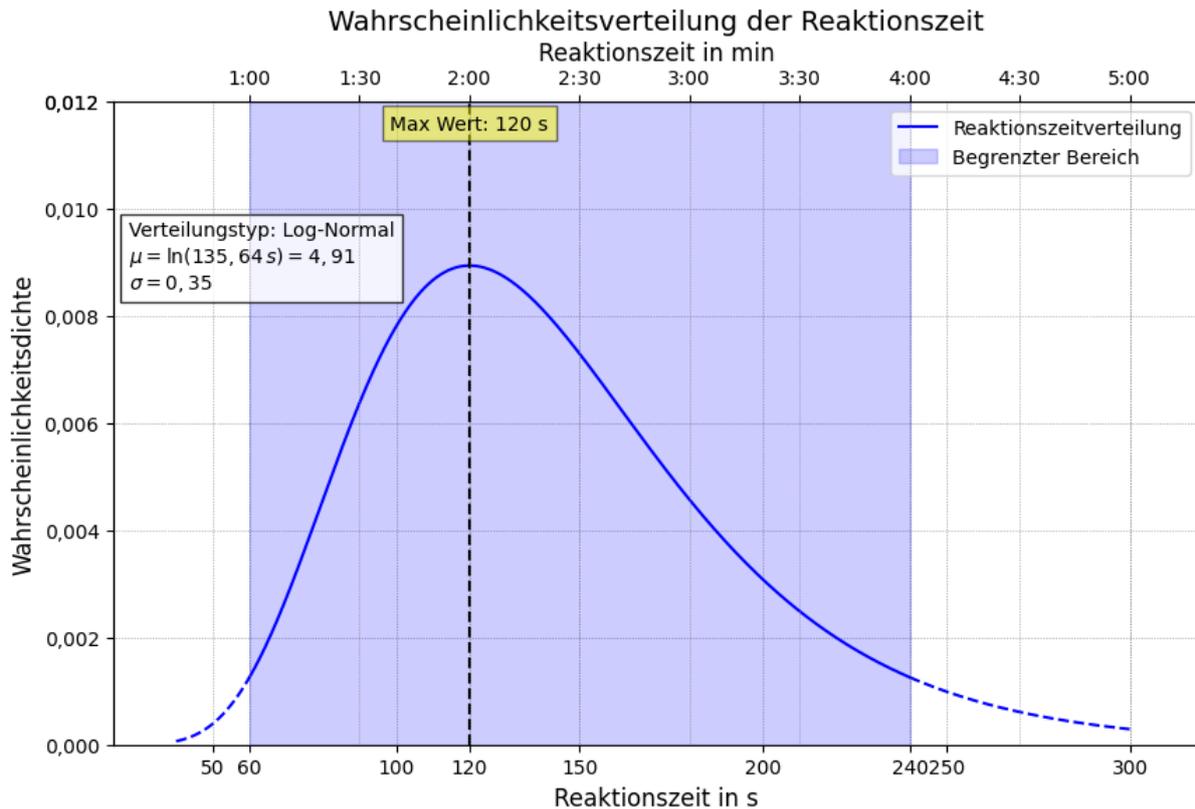


Abbildung 5. Darstellung der Wahrscheinlichkeitsdichte der logarithmischen Normalverteilung der Reaktionszeit.

Diese Wahrscheinlichkeitsdichte folgt der Funktion:

$$f(t) = \frac{1}{t \sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{Gleichung 6}$$

### 3.2.5) Bewegungszeit und freie Gehgeschwindigkeit

Die Bewegungszeit ( $\Delta t_{\text{Bewegung},i}$ ) ist die Zeitdifferenz zwischen der Reaktionszeit der einzelnen Personen und dem Erreichen eines sicheren Bereichs. Sie hängt hauptsächlich von der freien Gehgeschwindigkeit ab, die wiederum eine Funktion des Alters ist, wie die folgende Abbildung zeigt.

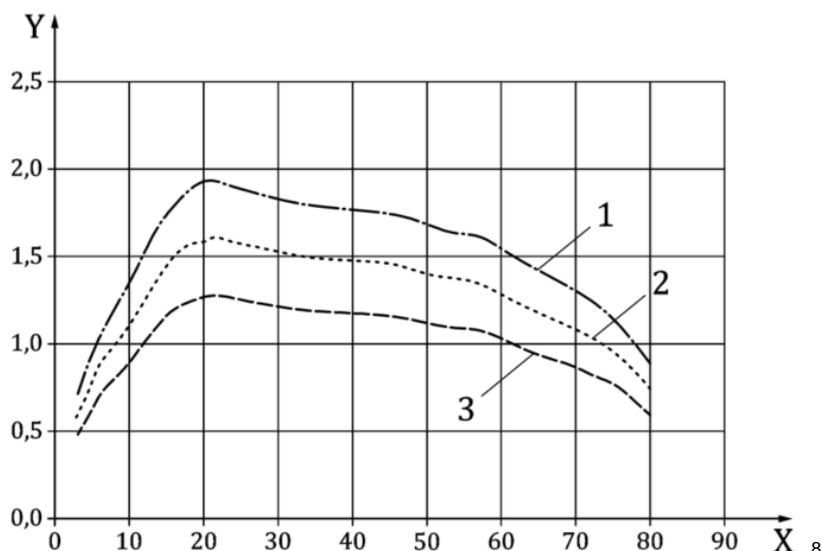


Abbildung 6. Verteilung der freien Gehgeschwindigkeit, X-Achse – Alter, Y-Achse – Freie Gehgeschwindigkeit in m/s.

Die Linien 1 und 3 stellen Abweichungen von 20 % von der mittleren freien Gehgeschwindigkeit der Linie 2 dar. Nach der Norm DIN 18009-2 kann diese Grafik wie folgt in drei Kategorien vereinfacht werden.

Tabelle 6. Vereinfachte Kategorien für die Altersverteilung.

Personengruppe	Mittelwert der Geschwindigkeit in der Ebene in m/s
unter 30 Jahre	1,60
30 bis 50 Jahre	1,48
über 50 Jahre	1,19

Eine Normalverteilung um die jeweiligen Mittelwerte sollte berücksichtigt werden, mit einer Standardabweichung von 20% vom Mittelwert. Andere Annahmen müssen begründet werden.

Da die gewählte Altersverteilung Besucher über 50 Jahre umfasst, wird die mittlere freie Gehgeschwindigkeit mit 1,19 m/s angenommen.

Treppen führen zu einer deutlichen Verringerung der Geschwindigkeit. Die Norm sieht vor, dass die Geschwindigkeit der Personen auf Treppen um die Hälfte reduziert wird, unabhängig davon, ob sie die Treppe hinauf- oder hinuntergehen. Es können auch andere reduzierte Geschwindigkeitsverteilungen verwendet werden.

### 3.2.6) Verwendete Software - Pathfinder

Die Räumungssimulationen werden mit der Software Pathfinder 2022.1 durchgeführt, die von Thunderhead Engineering Consultants, Inc. entwickelt wurde. Die Personen können entweder genau oder zufällig in ausgewählten Bereichen platziert werden und werden jeweils als Zylinder mit einer Hitbox (45,58 cm im Durchmesser und 1,83 m in der Höhe) simuliert. Der Durchmesser wird um den Faktor 0,7 verkleinert, wenn dies erforderlich ist, um durch kleine Lücken zu passen. Wie in den Verfahren der DIN 18009-2 gefordert, können jeder Person oder

<sup>8</sup> DIN 18009-2:2022-08

Personengruppe unterschiedliche freie Gehgeschwindigkeiten, geometrische Abmessungen, Reaktionszeiten, Ziele usw. zugeordnet werden. Für die Simulation wird ein Zeitschritt von 0,025 s verwendet; die Ausgabe ist eine 3D-Animation des Räumungsvorgangs und eine CSV-Ausgabe mit ausgewählten Leistungskriterien, mit einem Zeitschritt von 1 s.

Die Software bietet zwei Simulationsmodi, entweder den SFPE-Modus (Society of Fire Protection Engineers) oder den Steering-Modus. Der Steering-Modus ist komplexer und ahmt die menschliche Bewegung und das menschliche Verhalten genauer nach. Es wird eine Suchkurve erstellt, die auf dem lokal schnellsten Fluchtweg (nicht unbedingt dem kürzesten) basiert, mit dem Ziel, dass die Person einen sicheren Bereich erreicht. Die Person folgt dieser Kurve, gesteuert durch Lenkmechanismen und Kollisionskontrolle. Dieser Bewegungsmodus erlaubt Wegabweichungen bei Stauungen und vermeidet Überlagerungen/Überschneidungen von Personen. Für diese Untersuchung wird der Steering-Modus verwendet.

Die Leistungskriterien hinsichtlich Stauungen können mit der Pathfinder-Software berechnet werden. Vor der Simulation können interessierende Regionen ausgewählt werden; sie werden als Messregionen oder "Measurement Regions" bezeichnet. Die Aufteilung des Raums auf die Personen erfolgt mit Hilfe der Voronoi-Diagramm-Methode, die in der folgenden Abbildung dargestellt ist.

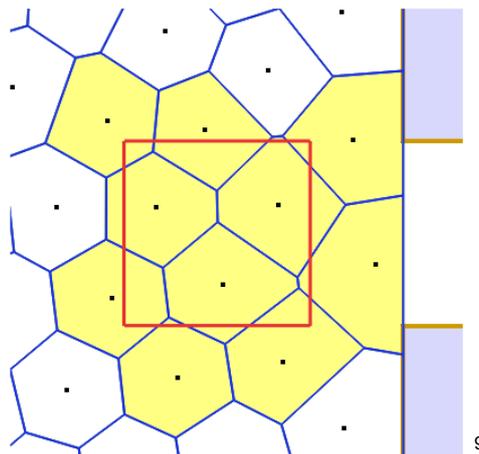


Abbildung 7. Darstellung der Methode zur Berechnung des Mittleren eines Messwertes in einer Messregion.

Die Dichte und die Geschwindigkeiten der Personen werden dann gewichtet gemittelt, je nachdem, wie viel Fläche von jeder Person innerhalb der Measurement Region liegt.

Pathfinder wurde auf verschiedene Weise validiert, u. a. durch Vergleiche seiner Vorhersagen mit experimentellen Daten und Beobachtungen von Räumungen in der Praxis. Es ist im "Leitfaden - Ingenieurmethoden des Brandschutzes" als geeignetes Werkzeug für die mikroskopische Modellierung aufgeführt. Eine detaillierte Beschreibung des Modellierungsansatzes für die Bewegung und das Routing der Agenten und der zugrundeliegenden Prinzipien findet sich im Benutzerhandbuch von Pathfinder. Für die Verifikation und Validierung des Modellierungsansatzes in Pathfinder sei auf das Dokument Verifikation und Validierung verwiesen. Darüber hinaus hat die SIMTEGO GmbH zusammen mit der IHK Ulm eine Validierung/Verifizierung der Pathfinder-Software anhand der in der RiMEA aufgeführten Testfälle durchgeführt. Die Ergebnisse wurden in Simulationen der RiMEA-Testfälle mit Pathfinder detailliert dokumentiert.

<sup>9</sup> Thunderhead Engineering. (2022). Pathfinder Technical Reference Manual. Von <https://support.thunderheadeng.com/docs/pathfinder/2022-1/technical-reference-manual/> abgerufen

### 3.3) Darstellung des Simulationsmodells, Personenbelegung, und Hauptfluchtwege

#### 3.3.1) Model, Treppenhäuser und Ausgänge

Die folgenden Abbildungen zeigen das Modell mit der folgenden Farbkonvention: Grün -> Ausgänge und Blau -> Räume.

#### Isometrische Ansicht

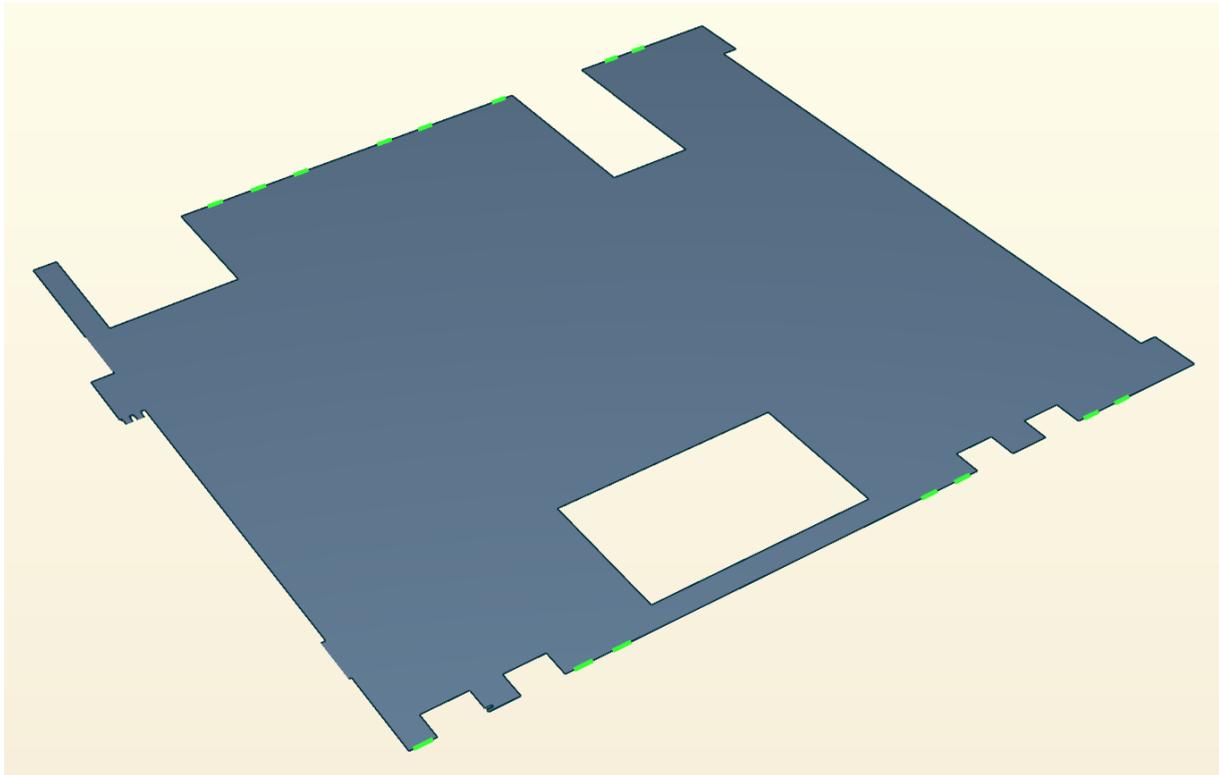


Abbildung 8. Isometrische Ansicht des geometrischen Modells.

## Draufsicht

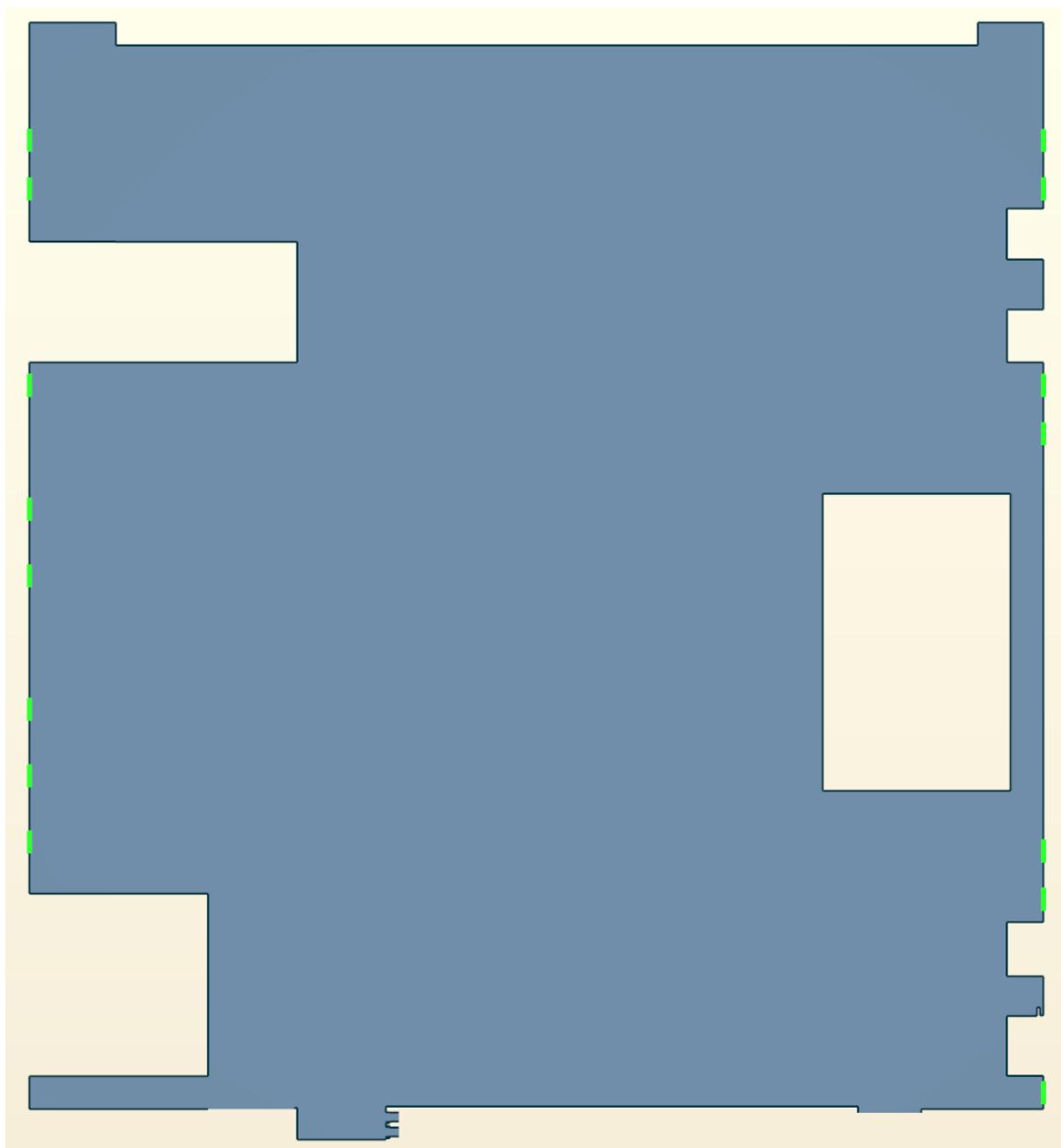


Abbildung 9. Draufsicht des geometrischen Modells.

Die Bodeninformationen wurden aus der bereitgestellten .ifc-Datei extrahiert, und die folgenden Ausgänge sind im Modell vorhanden:

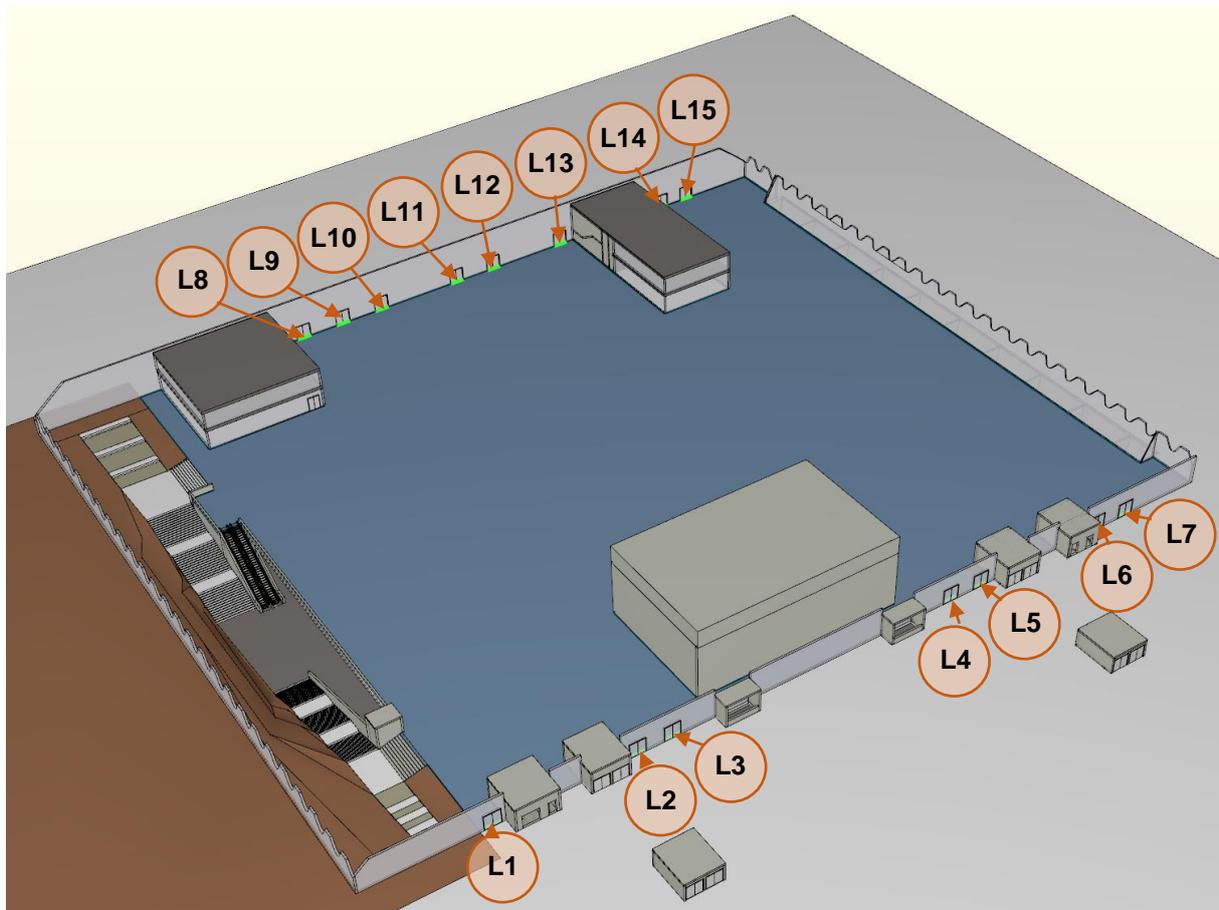


Abbildung 10. Bezeichnung der Ausgangstüren des Theaters. Die grünen Linien stellen die Ausgangstüren dar.

Alle Ausgangstüren aus der Halle, L1 bis L15, sind 260 cm breit.

### 3.3.2) Personenbelegung

Die Halle ist mit 8000 Personen gefüllt, deren Eigenschaften an die DIN 18009-2 Norm angepasst sind, mit einer Altersverteilung und freien Gehgeschwindigkeiten gemäß Abschnitt 3.2 dieses Berichts.

**Annahme:** Es wird angenommen, dass sich 32 Rollstuhlfahrer mit ihrer jeweiligen Begleitperson in der Halle befinden, dieselbe Anzahl wie bei der Räumungssimulation im Theater.

Die folgende Abbildung zeigt die Personenbelegung der Halle.

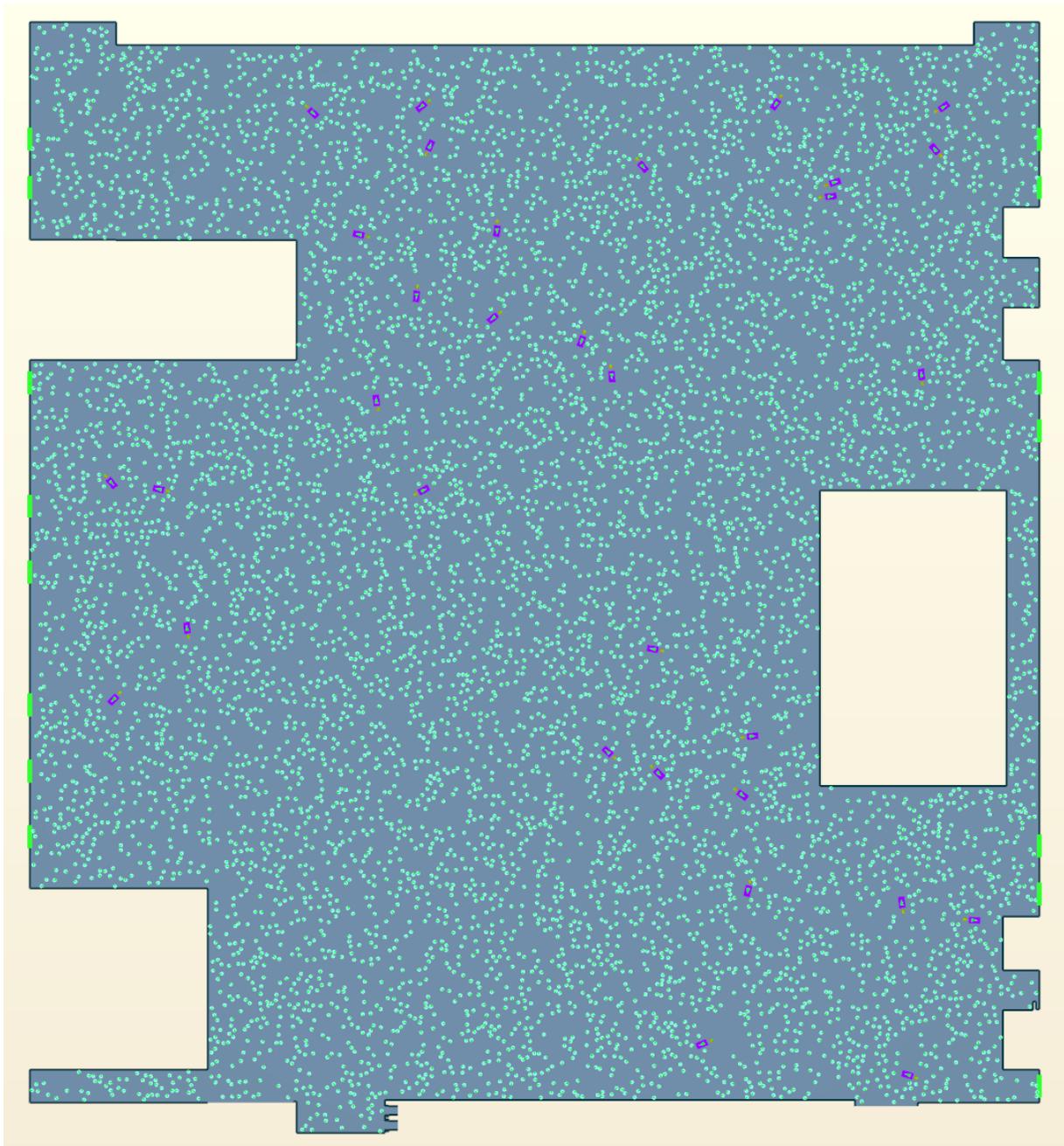


Abbildung 11. Zufällige Personenbelegung der Halle. Blau -> Ältere Personen, Lila -> Rollstuhlfahrer und Orange -> Begleitpersonen.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Personenbelegung.

Tabelle 7. Personenbelegung der Halle.

	Ältere Personen	Barrierefrei	Begleitpersonen
EG — Halle +0 m	7936	32	32
<b>Gesamt</b>	<b>8000</b>	<b>Personen</b>	

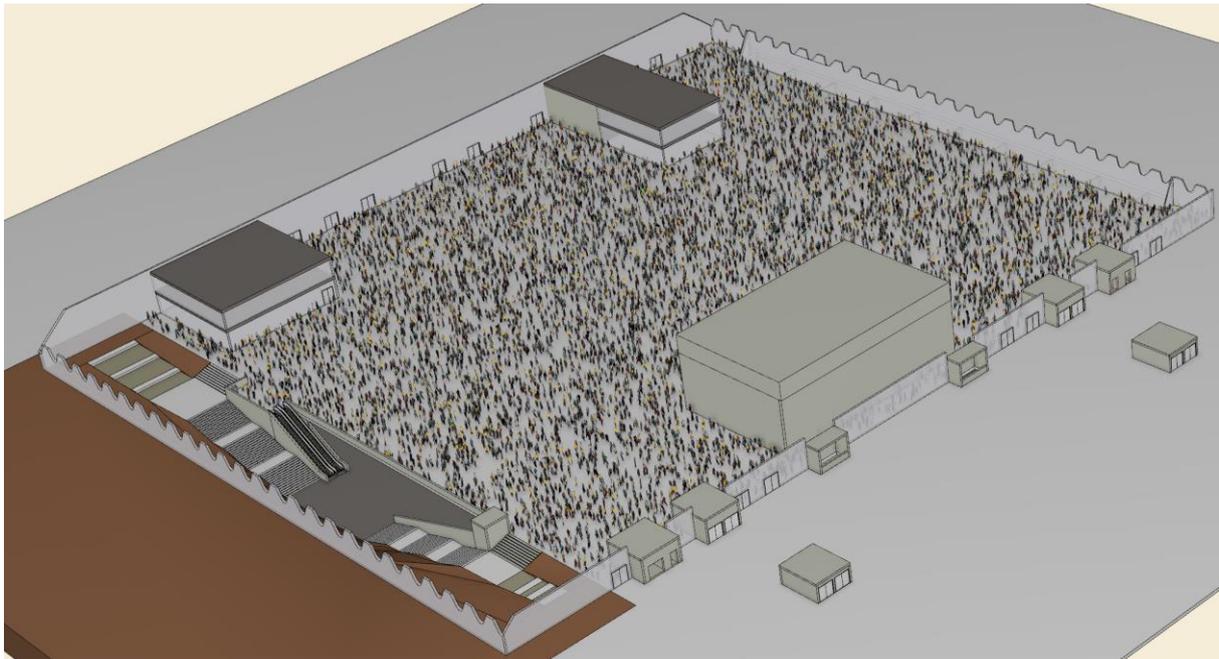


Abbildung 12. Personenbelegung der Halle – voll besetzte Halle mit älteren Personen.

## 4) Ergebnisse

### 4.1) Fluchtzeit

Wie in Abschnitt 3.2.2 erwähnt, wurden 25 Simulationen durchgeführt, wobei die Position, das Alter, die freie Gehgeschwindigkeit sowie die Reaktionszeit jeder Person entsprechend den Wahrscheinlichkeitsverteilungen variiert wurden. Die folgenden Abbildungen zeigen die relative Häufigkeit der Fluchtzeiten für die Halle.

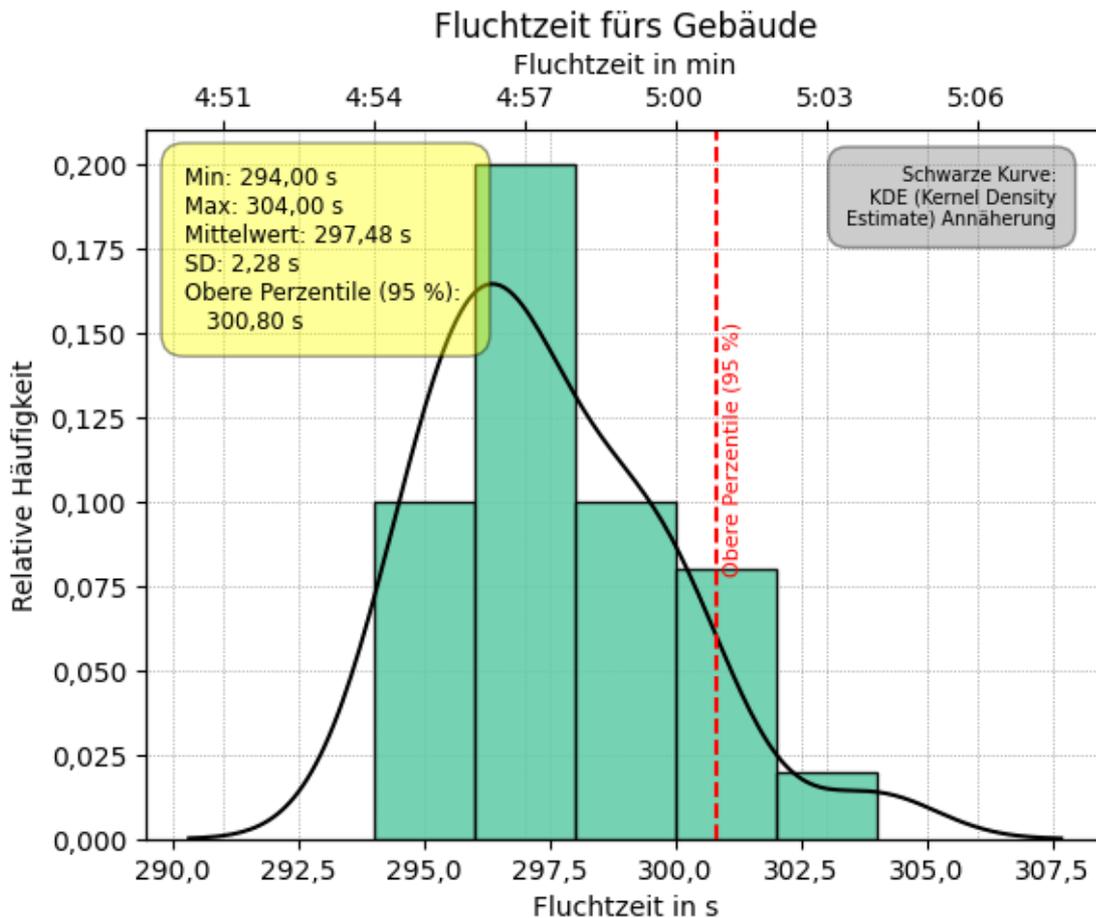


Abbildung 13. Verteilung der Fluchtzeit für die Halle.

Die Fluchtzeiten liegen überwiegend im Bereich von 294 bis 300 Sekunden, was in einer ausgeprägten Spitze resultiert. Diese enge Konzentration zeigt, dass der Evakuierungsprozess trotz Variationen in den individuellen Eigenschaften konsistent ist.

Das obere Perzentil der Fluchtzeit beträgt

$$\Delta t_{\text{Flucht}} = 5 \text{ min } 01 \text{ s}$$

Die folgende Grafik zeigt die Anzahl der evakuierten Personen pro Zeit für die langsamste und schnellste Evakuierung aus den 25 Simulationen.

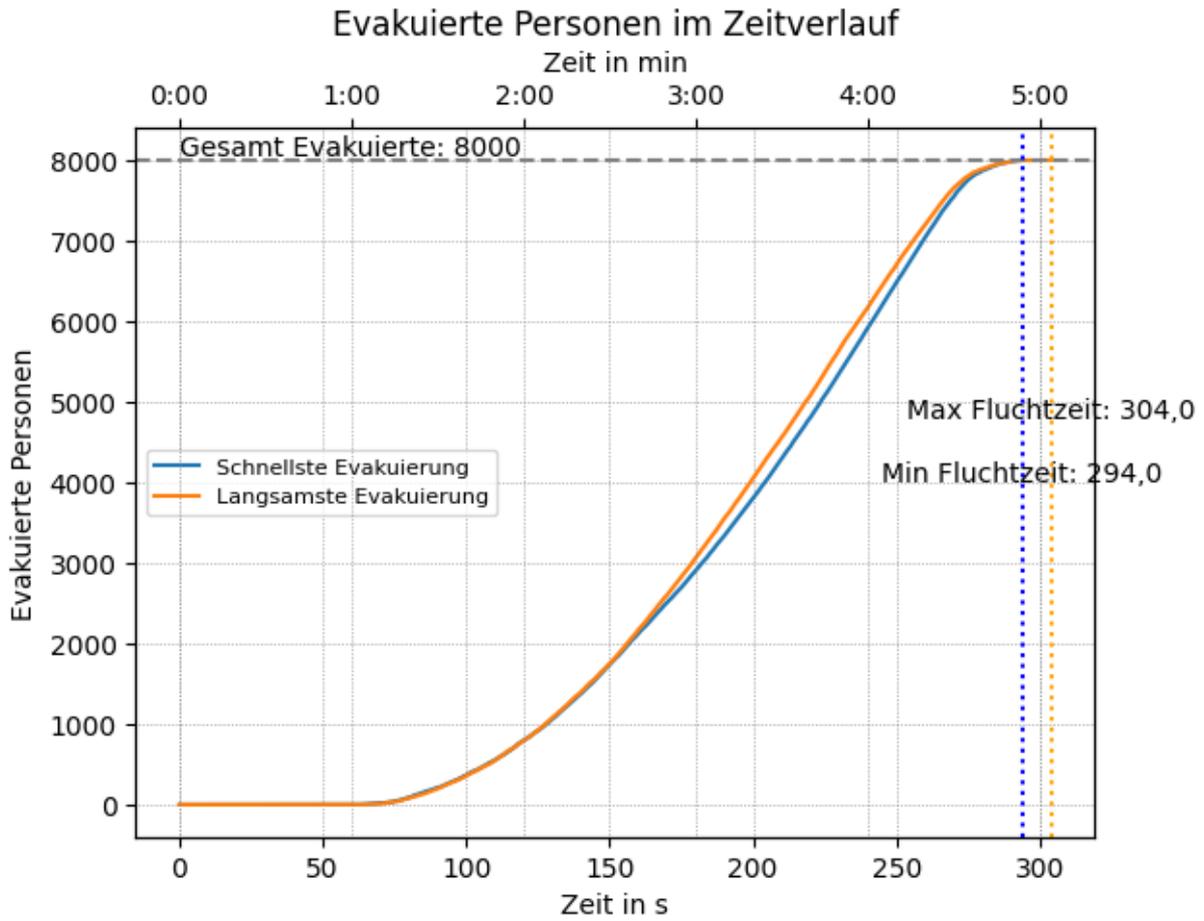


Abbildung 14. Evakuierte Personen im Laufe der Zeit, Vergleich der schnellsten und langsamsten Evakuierungen.

Während des Großteils des Evakuierungsprozesses scheint die Kurve der 'Schnellsten Evakuierung' (blau) langsamer voranzuschreiten als die der 'Langsamsten Evakuierung' (orange). Dennoch wird die schnellere Evakuierung gegen Ende bei ungefähr 294 Sekunden fertig, während das langsamere Szenario etwa 304 Sekunden benötigt. Obwohl es einen Unterschied von 10 Sekunden in den Abschlusszeiten gibt, ist dieser Unterschied im größeren Kontext relativ geringfügig.

## 4.2) Nutzung der Ausgangstüren

Das folgende Balkendiagramm zeigt die gesamte Nutzung der Ausgangstüren, um den sicheren Bereich außerhalb des Gebäudes zu erreichen.

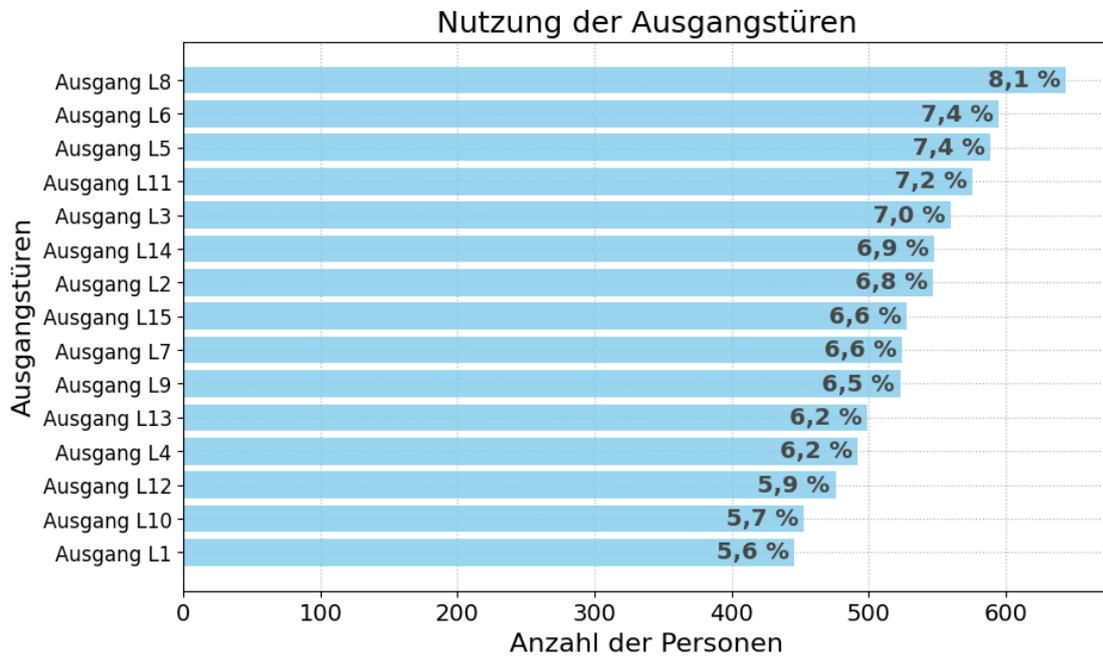


Abbildung 15. Balkendiagramm mit der Nutzung der Ausgangstüren in einer einzigen Simulation.

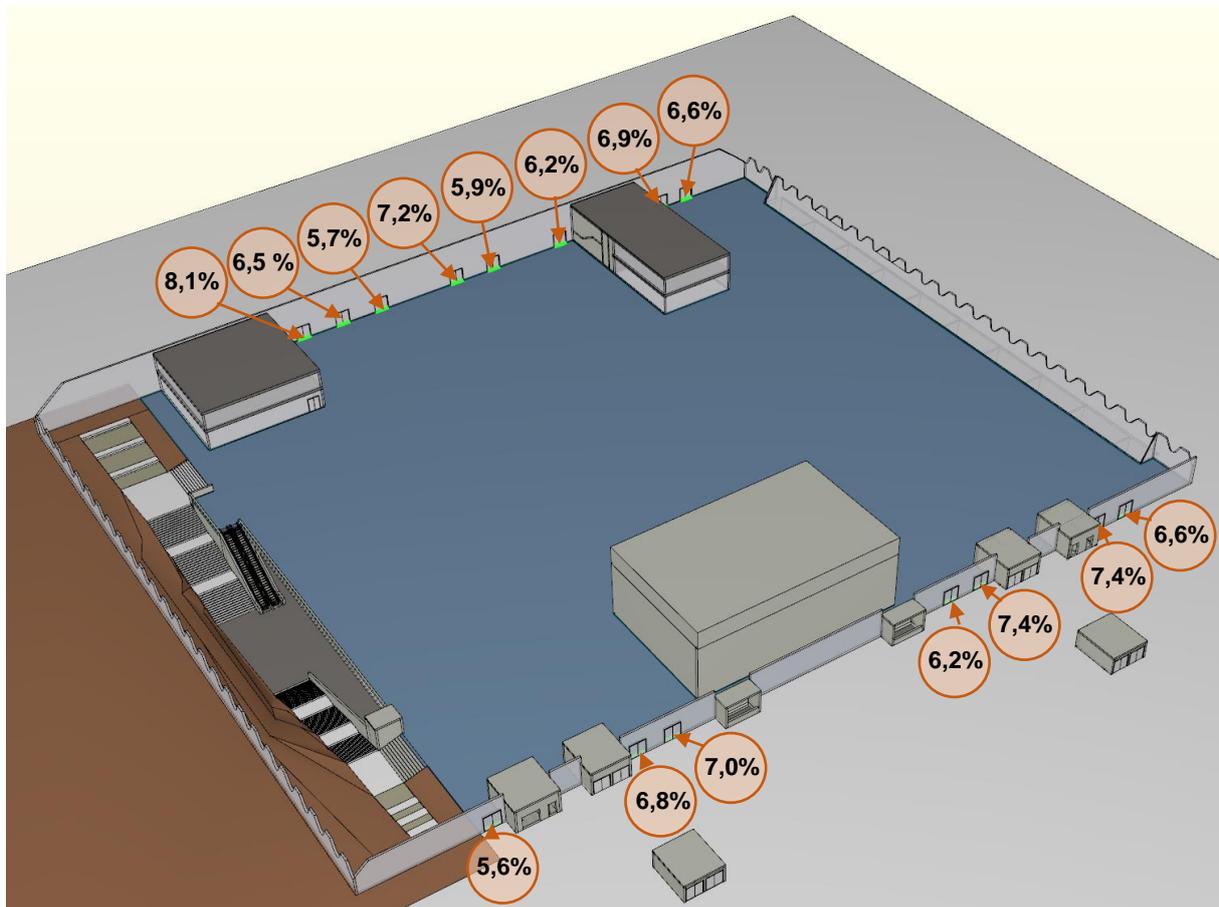


Abbildung 16. Prozentsatz der Nutzung der Ausgangstüren.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Personenstromraten durch die vier am meisten und die vier am wenigsten genutzten Ausgänge.

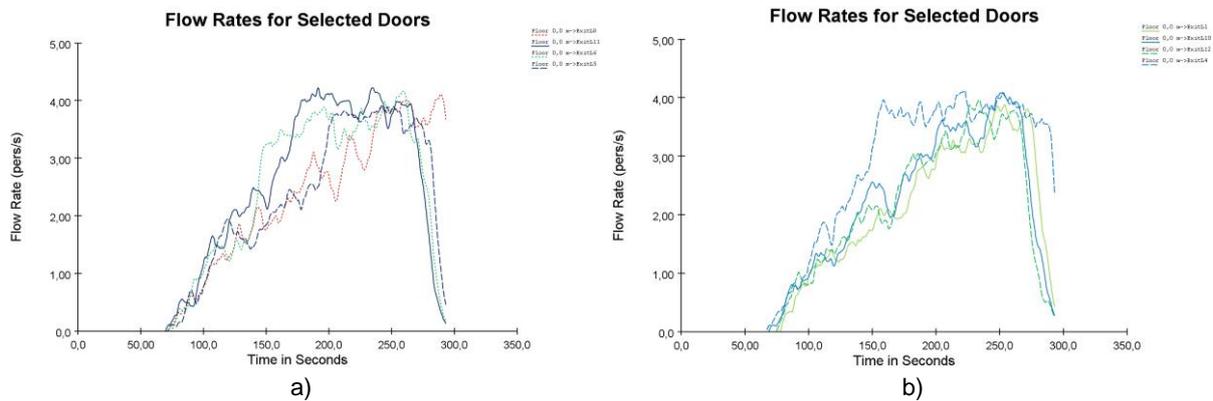


Abbildung 17. Personenstromraten durch a) die L5, L6, L8 und L11 (meistgenutzten) und b) die L1, L4, L10 und L12 (am wenigsten genutzten) Ausgangstüren.

Die Ausgangstüren werden ab 68-75 Sekunden benutzt; die Nutzung steigt an, bis sie am Ende der Reaktionszeit (bei 240 Sekunden in der Simulation) sowohl für die am meisten als auch für die am wenigsten genutzten Türen die maximale Nutzung erreicht. Einige Türen erreichen ihre Kapazität bereits eine Minute früher, z.B. Ausgangstür L4, in Abbildung 18 Teil b. Es gibt keinen Abfall der Nutzung, was bedeutet, dass die Ausgangstüren voll ausgelastet sind, was darauf hinweist, dass die Anordnung der Ausgänge recht effizient und verteilt ist. Die Personen verteilen sich angemessen auf die verschiedenen Ausgänge, wie auf Abbildung 17 zu sehen ist.

In Abschnitt 4.3 werden die verschiedenen Stauungen, die bei der Evakuierung auftreten, gezeigt.

### 4.3) Stauung

Um entstehende Stauungen zu visualisieren, wird die Bodenfläche so eingefärbt, dass sie die Personendichte repräsentiert, wobei Dunkelrot 3 Personen/m<sup>2</sup> entspricht.

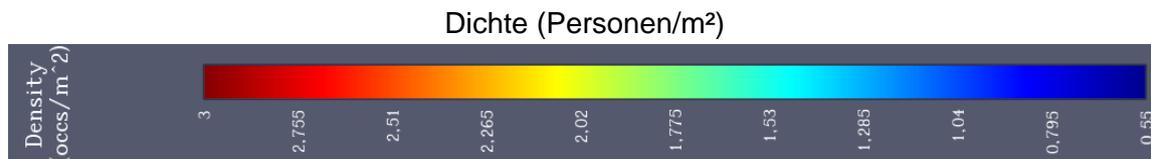


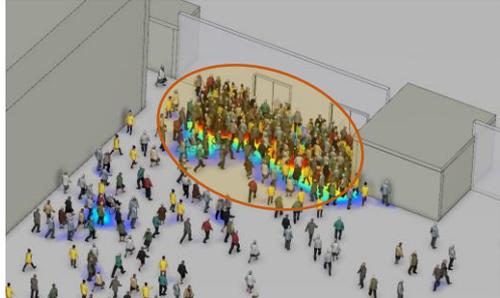
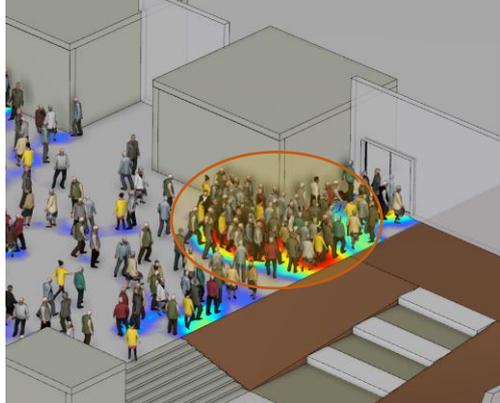
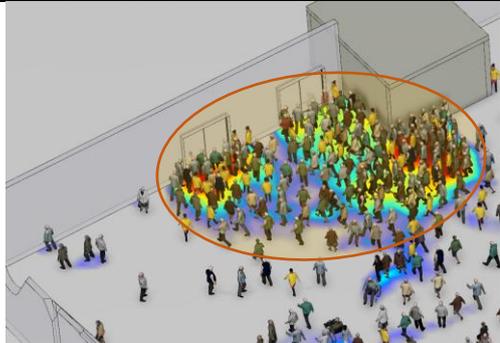
Abbildung 18. Personendichte Farbkonvention.

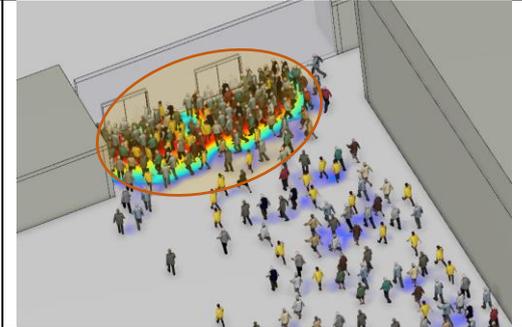
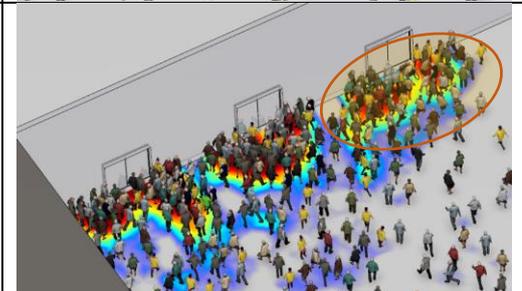
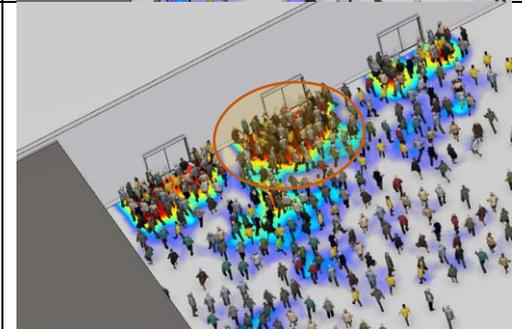
Wie in Abschnitt 2.2.2 erwähnt, wird Stau definiert, wenn die Personen eine Geschwindigkeit unter einem bestimmten Wert haben, typischerweise zwischen 0,2 und 0,8 m/s. Daher wird die folgende Annahme getroffen:

**Annahme:** Stau tritt auf, wenn die mittlere Geschwindigkeit weniger als 0,6 m/s beträgt.

Die folgende Tabelle fasst die Stauungen zusammen, die bei der Evakuierungssimulation auftreten, geordnet nach Stauzeit.

*Tabelle 8. Werte für die festgelegten Leistungskriterien für alle auftretenden Stauungen in der Entfluchtungssimulation des Theaters.*

Staustelle	Stauzeit in s (Intervall)	Maximale Wartezeit in s	Mittlere Geschwindigkeit in m/s	Bild
Ausgangstüren L2 und L3	140 (135 – 275)	44	0,25	
Ausgangstür L1	133 (135 – 268)	45	0,15	
Ausgangstür L8	121 (165 – 286)	28	0,25	
Ausgangstüren L6 und L7	115 (140 – 255)	30	0,25	

Ausgangs- türen L4 und L5	105 (175 – 280)	25	0,30	
Ecke der Geometrie in der Nähe der Ausgangstür L8	103 (120 – 223)	38	0,20	
Ausgangstür L10	80 (165 – 245)	21	0,30	
Ausgangstür L9	74 (188 – 262)	17	0,30	
Ausgangstür L11	60 (194 - 254)	17	0,30	
Ausgangstür L13	51 (197 – 248)	8	0,50	

Ausgangs- türen L14 und L15	47 (203 – 250)	13	0,40	
Ausgangstür L12	44 (210 – 254)	12	0,40	

Die Stauungen treten vor allem in der Nähe der Ausgangstüren auf, wobei einige Stauungen in eine größere Stauung übergehen. Die größte Stauung bildet sich in der Nähe der Ausgangstüren L2 und L3 und dauert 140 Sekunden. Sowohl die Personen, die sich in der Nähe der Ausgänge aufhalten und ihre Flucht noch nicht angetreten haben, als auch die Rollstuhlfahrer tragen zu diesen Stauungen bei, aber die Hauptursache ist die große Anzahl der Personen, die die Räumung vornehmen.

Bei den beiden größten auftretenden Stauungen überschreiten die maximalen Wartezeiten 10 % des oberen Perzentils der Fluchtzeit. Daher muss die Personendichte analysiert werden, denn wenn sie über 4 Personen/m<sup>2</sup> liegt, würden sie als signifikante Stauungen betrachtet werden.

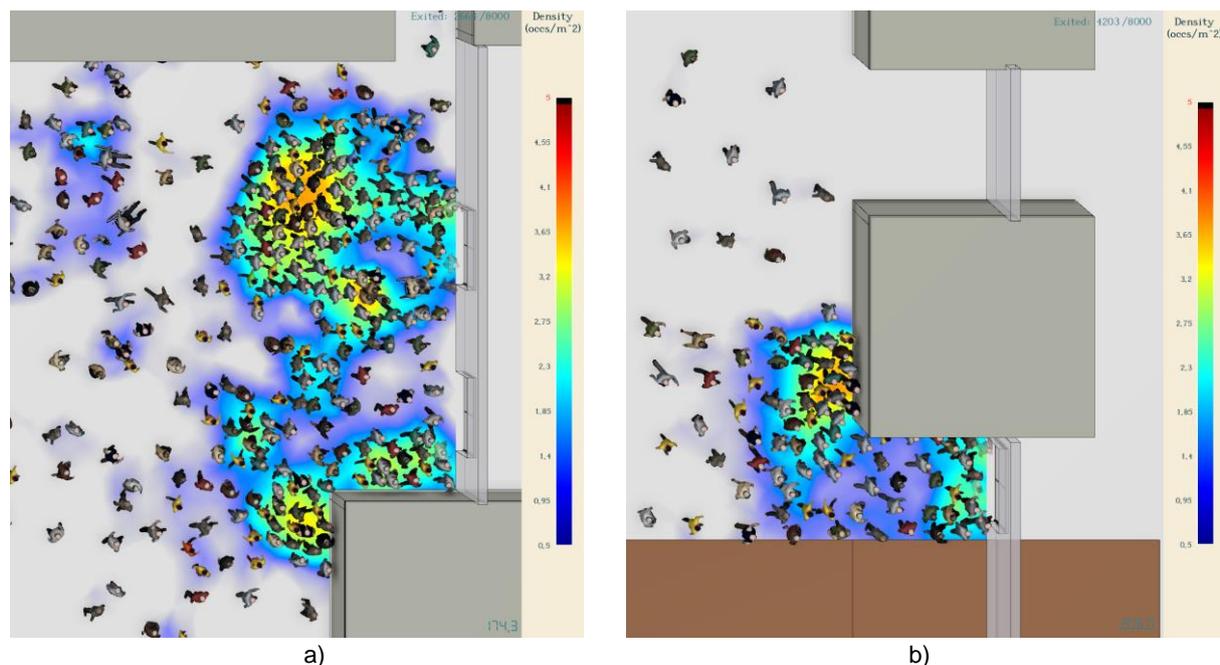


Abbildung 19. Lokale Personendichte für die längsten Stauungen: a) an den Ausgangstüren L2 und L3 und b) an der Ausgangstür L1, mit einer angepassten Farbkonvention bis zu 5 Personen/m<sup>2</sup>.

Wie aus Abbildung 19 ersichtlich ist, erreicht die lokale Personendichte ca. 3,65 Personen/m<sup>2</sup> bei beiden Stauungen. Da sie unter 4 Personen/m<sup>2</sup> liegt, treten keine signifikanten Stauungen auf.

Daher ergibt sich folgende maximale Wartezeit:

Maximale Wartezeit = 45 s (neben dem Ausgang L1)

## 5) Fazit

Die Fluchtzeit für die 8000 Personen in der Halle beträgt 5 Minuten und 1 Sekunde (obere Perzentile). Die großzügige Verteilung der Ausgangstüren (sieben Ausgänge auf der Ostseite und acht Ausgänge auf der Westseite) ermöglicht eine schnelle Evakuierung, auch wenn die Personen älter sind.

Personen, die bereits mit der Flucht begonnen haben, werden durch jene behindert, die ihre Evakuierung noch nicht gestartet haben, insbesondere wenn diese Personen sich in der Nähe von Türen aufhalten. Auch Rollstuhlfahrer stellen Hindernisse dar. Dennoch verlängern diese Faktoren die Fluchtzeit nicht wesentlich. Dies lässt sich daraus schließen, dass die Verteilung der Fluchtzeiten eng mit der Verteilung der Reaktionszeiten übereinstimmt, d.h. einer log-normalen Verteilung.

Die maximale Wartezeit beträgt 45 Sekunden, was 15 % der gesamten Fluchtzeit entspricht. In der Stauung, in der diese maximale Wartezeit auftritt, wird eine Personendichte von 3,65 Personen/m<sup>2</sup> erreicht. Da dieser Wert unter 4 Personen/m<sup>2</sup> liegt, handelt es sich nicht um eine signifikante Stauung. Insgesamt gibt es keine signifikanten Stauungen.

## 6) Anhang: Durchführung von Entfluchtungssimulationen nach DIN 18009-2

How does one proceed with DIN 18009-2?

The procedure is as follows: the protection goals and their specific criteria are defined; ideally, these are defined together with the examining authority. The evacuation simulation is analyzed and evaluated according to these criteria (see Why evacuation simulations). If the protection goals and their performance criteria are met, the planning can be released. If this is not the case, the planning must be revised and the analysis must be carried out again. This ensures that all persons can leave the building in a desired time and are not affected by the geometry of the building in such a way that their safety is endangered.

Evacuation simulations according to RiMEA

"Computer-aided analysis of autonomous person movements toward a safe place, in which each agent (person modeled in the computer) performs individual movements based on individual parameters, capabilities, and/or behavioral settings based on computerized algorithms.

NOTE: In contrast to flow calculations (e.g., Predtetschenski & Milinski), which treat person flows as fluid flows (=macroscopic), microscopic escape analysis represents the movement of each individual person. Each person has individual properties that characterize his or her behavior. The microscopic escape analysis provides information about the total escape time as well as about the places and times of jams."

