

Bemessung der Fluchtwegbreiten in Arbeitsstätten – Ein Fachgutachten

Kersten Bux¹, Stephan Gabriel¹

baua: Fokus

Die Anzahl, Anordnung und Abmessung von Fluchtwegen in Arbeitsstätten wird in Deutschland über die Technische Regel für Arbeitsstätten ASR A2.3 „Fluchtwege und Notausgänge, Flucht- und Rettungsplan“ geregelt. Dabei stammen die dort enthaltenen Anforderungen z. T. noch aus früheren Richtlinien. Der Ausschuss für Arbeitsstätten (ASTA) führt deswegen eine Prüfung und Fortschreibung der ASR A2.3 durch. Im Rahmen dieser Überarbeitung wurde in vorliegendem Gutachten mithilfe von zwei unabhängigen mikroskopischen Simulationsmodellen untersucht, inwieweit Einengungen und Treppen auf Fluchtwegen sowie eine zeitlich versetzte Nutzung der Fluchtwege die Entfluchtungszeit beeinflussen.

Inhalt

| | | |
|---|--|----|
| 1 | Einleitung und Hintergrund | 1 |
| 2 | Maßgebliche Ergebnisse des Fachgutachtens..... | 2 |
| 3 | Simulationsmodelle, Berechnungsverfahren und verwendete Programme..... | 3 |
| 4 | Untersuchte Szenarien | 4 |
| 5 | Zusammenfassung..... | 12 |
| | Literatur..... | 13 |

1 Einleitung und Hintergrund

Zum Schutz der Beschäftigten muss ein Arbeitgeber beim Einrichten und Betreiben von Arbeitsstätten nach § 4 Abs. 4 Arbeitsstättenverordnung Vorkehrungen treffen, damit sich die Beschäftigten bei Gefahr unverzüglich in Sicherheit bringen und schnell gerettet werden können. Ein wesentlicher Faktor ist dafür die Gestaltung von Fluchtwegen und Notausgängen. Deren Anzahl, Anordnung und Abmessung wird in der Technischen Regel für Arbeitsstätten ASR A2.3 „Fluchtwege und Notausgänge, Flucht- und Rettungsplan“ konkretisiert. Die in der ASR A2.3 enthaltenen Anforderungen stammen z. T. aus früheren Richtlinien (z. B. ASR 10/1 Ausgabe September 1985, ASR 17/1.2 Ausgabe Januar 1988). Der Ausschuss für Arbeitsstätten (ASTA) hat deshalb eine Projektgruppe mit der Prüfung und Fortschreibung der ASR A2.3 beauftragt. Als Beitrag zu dieser Überarbeitung wurde im Auftrag der BAuA mit einem Fachgutachten [1] untersucht, inwieweit die Breite von Wegen, Treppen, Türen und Einengungen sowie eine zeitlich versetzte Nutzung der Fluchtwege die Entfluchtungszeiten beeinflussen. Die Bearbeitung des Fachgutachtens wurde durch die Projektgruppe Fluchtwege des ASTA fachlich begleitet und unterstützt.

¹ Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.

Auftragnehmer nach öffentlicher Ausschreibung war ein Konsortium der accu:rate GmbH München und IST GmbH Frankfurt am Main. Basis des Fachgutachtens sind Berechnungen mit zwei voneinander unabhängigen mikroskopischen Simulationsmodellen sowie Vergleichsberechnungen mit makroskopischen Strömungsmodellen. Mikroskopische Simulationsmodelle können im Gegensatz zu makroskopischen Strömungsmodellen bauliche Situationen mit deren Geometrien sowie Personen und deren Verhalten detailliert berücksichtigen. Das ist eine Weiterentwicklung des Standes der Technik bei der modellbasierten Berechnung von Entfluchtungszeiten. Dieser Bericht fasst wesentliche Ergebnisse des Fachgutachtens [1] zu fünf Szenarien zusammen. Vertiefende Informationen zu Vorgehen und Ergebnissen können dem Fachgutachten entnommen werden. Mit dem Fachgutachten wurden auf dem aktuellen Stand von Simulationsmodellen Beiträge insbesondere in Bezug auf die Regelung der Fluchtwegbreiten erarbeitet, die in die Fortschreibung der ASR A2.3 einfließen.

2 Maßgebliche Ergebnisse des Fachgutachtens

Die Untersuchungen im Rahmen des Fachgutachtens zeigen folgende maßgebliche Ergebnisse:

- Wesentlich für die Bewertung geometrischer, baulicher Situationen sind deren Einflüsse auf Gesamtentfluchtungszeit und individuelle Passagezeit. Diese Zeiten wurden im Fachgutachten im Vergleich zu den sich nach ASR A2.3 Tabelle 1 ergebenden Zeiten bewertet.
- Kurze Einengungen auf horizontalen Fluchtwegen haben kaum Auswirkungen auf die Gesamtentfluchtungszeit sowie auf die Passagezeit einzelner Personen. Selbst bei Einengungen von zweimal 15 cm, die in der Praxis beispielsweise an Türen in Gängen vorhanden sein können, ließen sich keine signifikanten Verzögerungen der Entfluchtungszeiten für Personenzahlen gemäß den Werten der ASR A2.3 feststellen.
- Längere Einengungen auf horizontalen Fluchtwegen, die in der Praxis beispielsweise durch Abstellen von Möbeln in Gängen vorhanden sein können, haben Einflüsse auf die Gesamtentfluchtungszeit sowie auf die individuelle Passagezeit. Dies reduziert die Entfluchtungsrate und führt zu Verzögerungen.
- Insgesamt besteht ein steter linearer Zusammenhang zwischen Fluchtwegbreite und Gesamtentfluchtungszeit. Dies ist bislang in der ASR A2.3 Tabelle 1 für den Bereich zwischen 20 und 100 Personen nicht berücksichtigt.
- Treppen im Verlauf von Fluchtwegen führen zu einer Abbremsung des Personenstromes. Die Stufengeometrie (Steigung und Auftritt) hat dabei grundsätzlich einen Einfluss. Werden Treppen nach den Vorgaben der Arbeitsstättenregel ASR A1.8 „Verkehrswege“ Abschnitt 4.5 gestaltet, haben die in diesem Rahmen möglichen Variationen von Steigung und Auftritt keinen signifikanten Einfluss auf die Entfluchtung.
- Besteht ein Fluchtweg aus horizontalen sowie vertikalen Elementen (Treppen), so sind die Einengungen entlang des Gangs einschließlich der in den Treppenraum mündenden Tür vernachlässigbar, da die eigentliche Flussreduktion durch die Treppen verursacht wird. Eine Reduktion der Türbreite im Rahmen des nach ASR A2.3 zulässigen Bereiches hat keinen signifikanten Einfluss auf die Entfluchtungsrate über die Treppe. Die Treppenbreite ist der signifikante Einflussfaktor.
- Der Einfluss der Treppenbreite ist auch bei mehrstöckigen Gebäuden erkennbar. So lange die Kapazität der Treppenräume es zulässt, dass eine Ebene geräumt ist, bevor die Personen aus der darüber liegenden Ebene in diese Ebene gelangen, können die Ebenen autark voneinander geräumt werden. Sobald dies nicht mehr der Fall ist, stellen sich kaskadierende Effekte ein. Ab ca. 40 – 50 Personen pro Ebene auf einer 1,20 m breiten Treppe bilden sich Stauungen in die Ebenen hinein aus. Sowohl eine sequentielle Räumung als auch verzögerte Reaktionszeiten wirken sich positiv auf den Räumungsverlauf aus, beschleunigen diesen aber nicht.

- In einer weiteren Untersuchung werden systematisch die Wechselwirkungen zwischen der Anzahl Ebenen, Anzahl Personen pro Ebene sowie der Treppenbreiten betrachtet und analysiert.
- Bei Schulen ergeben sich für die Türen von Unterrichtsräumen bei mehr als 20 Personen bislang unterschiedliche lichte Durchgangsbreiten nach ASR A2.3 (1,20 m) und Muster-Schulbau-Richtlinie (0,90 m). Auch in Schulen wird die Evakuierungsdauer vor allem durch die Kapazitäten der Treppenräume dominiert, die Entleerungszeit der Unterrichtsräume fällt dabei nicht ins Gewicht. Türbreiten von 0,90 m oder 1,20 m bedingen für Unterrichtsräume mit einer Belegung mit bis zu 35 Personen keine statistisch erkennbaren Unterschiede bei den Evakuierungszeiten. Im Gegensatz dazu besitzen Alarmierungs- und Reaktionszeiten viel stärkere Auswirkungen auf die Evakuierungsläufe sowohl im Unterrichtsraum als auch im Treppenraum.

3 Simulationsmodelle, Berechnungsverfahren und verwendete Programme

Makroskopische Strömungsmodelle für Personenströme, z. B. von Predtetschenski und Milinski [10], konnten Effekte von Treppen und Einengungen, zeitlich versetzte Alarmierung sowie das Verhalten einzelner Personen nicht abbilden. Mikroskopische Simulationsmodelle dagegen können Geometrien und Personen detailliert berücksichtigen. Für das Fachgutachten kommen detaillierte Parameterstudien mit zwei verschiedenen und voneinander unabhängigen Individualmodellen, crowd:it [2] und ASERI [3], zum Einsatz. Als raumkontinuierliche mikroskopische Personenstrommodelle sind diese Programme in der Lage, kleinskalige geometrische Designvariationen abzubilden. Als Individualmodelle können sie mit ihrem mikroskopischen Ansatz die unterschiedliche Bewegung einzelner Personen, deren individuellen Platzbedarf und deren situative Handlungsalternativen (z. B. Reaktionszeiten, Fluchtwegewahl) erfassen. Dabei lassen sich z. B. gemischte Populationen von jüngeren und älteren Personen mit einem Anteil von mobilitätseingeschränkten Menschen abbilden. Die beiden verwendeten Programme basieren auf den neuesten Erkenntnissen der Wissenschaft und werden fortlaufend anhand der RiMEA (Richtlinie für mikroskopische Entfluchtungsanalysen) Testfälle [4] sowie der NIST Testfälle [5] (crowd:it) bzw. der Auswertungen von Realbeobachtungen von Personenströmen in den EVA-, BASIGO- und SIKET-Projekten (ASERI) validiert [6], [7], [8], [9]. Zu Vergleichszwecken wurden außerdem Berechnungen nach gebräuchlichen makroskopischen Strömungsmodellen (Kapazitätsanalysen und hydraulische Berechnungen) von Predtetschenski und Milinski [10] durchgeführt.

Das Programm ASERI ist ein von der IST GmbH entwickeltes Computerprogramm zur Simulation der zielgerichteten Personenbewegung in räumlich komplexer Umgebung. Es wurde im Rahmen eines geförderten Forschungsprojekts entwickelt [11]. Grundlage von ASERI ist eine Beschreibung der individuellen Bewegung aller beteiligten Personen (der sogenannten Agenten), wobei wesentliche Verhaltensaspekte (Reaktions- und Verzögerungszeiten, Wahl des Fluchtweges, Verhalten bei Staubbildung) und individuelle Eigenschaften (Mobilität und Raumbedarf) explizit in der Simulation berücksichtigt werden. ASERI gehört damit zur Klasse der mikroskopischen Evakuierungsmodelle (Individualmodelle). Die Gebäude- bzw. Geländegeometrie wird in allen für den Ablauf der Evakuierung wichtigen Details in den drei Raumdimensionen modelliert. Alle Bereiche sind dabei den Personen prinzipiell zugänglich (räumlich kontinuierliche Modellierung). Die Wahl des individuellen Fluchtweges erfolgt entweder auf der Basis des lokal (bezogen auf einen Raum oder bestimmten Gebäudeabschnitt) oder global (bis ins Freie oder einen anderen sicheren Bereich) kürzesten Weges oder anhand vorgegebener Fluchtwegen. Dabei sind gegebenenfalls lokale Abweichungen möglich, z. B. durch individuelle Präferenzen, als Reaktion auf Staubbildung vor Engpässen oder infolge der

Ausbreitung von Rauch. Die Personenbewegung basiert auf der Simulation elementarer Bewegungsabläufe innerhalb einer Menschenansammlung (Aufschließen, Ausweichen, Überholen, Mindestabstand) unter Beachtung der durch die Gebäudegeometrie gegebenen Einschränkungen. Dieses der tatsächlichen Natur des menschlichen Verhaltens nachempfundene und anhand empirischer Daten validierte Modellierungsverfahren verwendet stochastische Verteilungen (insbesondere für Körpergröße und Gehgeschwindigkeit) und hat so den Vorteil, dass es Mittelwerte der Räumungszeiten sowie statistische Schwankungen um diese Mittelwerte liefern kann [12].

Das Programm crowd:it ist ein mikroskopisches Simulationsmodell [2], das auf dem Optimal Steps Model [13] basiert und von der Firma accu:rate GmbH aufbauend auf einer Dissertation [14] fortlaufend weiterentwickelt und an aktuelle Forschungsergebnisse angepasst wird. Es bildet ähnlich wie das Programm ASERI die Entfluchtung von Menschen ab. Die Agenten bewegen sich dabei nach einem Modell, welches das Schrittverhalten der Menschen nachahmt. Die Wunschgeschwindigkeit einer Person ergibt sich aus der für die Person spezifischen Schrittlänge und -frequenz. Jeder Agent strebt eine gewisse „Wunsch“-Schrittlänge an, die jedoch nicht immer erreicht wird, da beispielsweise andere Agenten oder Raumgegebenheiten den Weg versperren. Entsprechend fällt der Schritt somit kleiner aus, wodurch der Agent abgebremst wird. Auf Treppen bewegen sich Personen anders als im ebenen Umfeld. Sie werden anhand der Stufentiefe in ihrer Schrittlänge eingeschränkt, wodurch sich individuelle Abbremsfaktoren für Personen auf Treppen ergeben. Die Wegefindung der Agenten wird mithilfe von Bewegungsgraphen in der Navigationsebene abgebildet. Dabei wird das unterschiedliche Navigationsverhalten (z. B. schnellster Weg, kürzester Weg) von Menschen berücksichtigt.

Die verschiedenen Szenarien wurden jeweils mit beiden Programmen berechnet und die Ergebnisse miteinander verglichen. Dabei zeigte sich eine gute Übereinstimmung. Die Simulationen wurden jeweils 100-mal wiederholt ausgeführt (Szenario 2 Treppen 1000-mal), wobei jedes Mal mit einer stochastischen Verteilungsfunktion eine unterschiedliche Zusammensetzung der Personengruppe in Bezug auf die individuelle Gehgeschwindigkeit und Körpergröße der einzelnen Personen eingesetzt wird.

Die Auswertung und grafische Darstellung der ermittelten Datensätze erfolgt mit sog. „Boxplots“. Eine „Box“ zeigt den Median (waagerechte Linie) sowie den Bereich zwischen dem unteren Quartil (25 % der Werte) bis zum oberen Quartil (75 % der Werte), in dem also 50 % der ermittelten Werte liegen. Die Antennen der Boxplots kennzeichnen Minimal- und Maximalwerte innerhalb des 1,5-fachen Abstands zwischen oberem und unterem Quartil. Liegen Werte außerhalb des 1,5-fachen Abstands zwischen oberem und unterem Quartil werden sie durch kreisförmige Markierungen oberhalb bzw. unterhalb dieser „Antennen“ als „Ausreißer“ dargestellt. Sofern sich „Boxen“ von verschiedenen untersuchten Varianten überlappen, besteht kein signifikanter Unterschied, d. h., die untersuchte Intervention oder Variante hatte keinen Einfluss.

4 Untersuchte Szenarien

Zur Klärung des Einflusses verschiedener Faktoren auf die Gesamtentfluchtungszeit und individuellen Passagenzeiten wurden fünf Szenarien untersucht:

- Szenario 1: Einfluss von Einengungen
- Szenario 2: Einfluss von Treppen
- Szenario 3: Zusammenwirken von Einengungen und Treppen
- Szenario 4: Entfluchtung über mehrere Etagen
- Szenario 5: Schulgebäude

Unter Szenario wird im Fachgutachten eine Anordnung verstanden, bei der mit einer gegebenen Geometrie unterschiedliche Einflussgrößen wie Anzahl Personen oder Einengungen variiert werden, um so die Auswirkungen auf die Entfluchtungszeiten zu analysieren.

4.1 Szenario 1: Einfluss von Einengungen

Es wurde der Einfluss von Einengungen bei horizontalen Fluchtwegen auf einem 35 m langen Gang untersucht. Vor dem Gang befindet sich ein Raum, in dem sich die Personen zu Beginn befinden und gleichzeitig loslaufen. In Variation von Personenzahl, Gangbreiten und Einengungen verschiedener Tiefe und Länge wurde untersucht, welchen Einfluss diese Faktoren auf die Gesamtentfluchtungszeiten sowie auf die individuellen Passagezeiten haben. Als Vergleichsbasis werden die Werte für Gesamtentfluchtungszeiten für Fluchtwegbreiten und Personenzahl entsprechend ASR A2.3 Tabelle 1 herangezogen (siehe auch Abbildung 4).

Abbildung 1 zeigt beispielhaft den Zustand nach 30 Sekunden Entfluchtung. Ein Teil der Personen befindet sich noch im Raum und an der Einengung in Gangmitte ist eine leichte Staubildung zu erkennen.

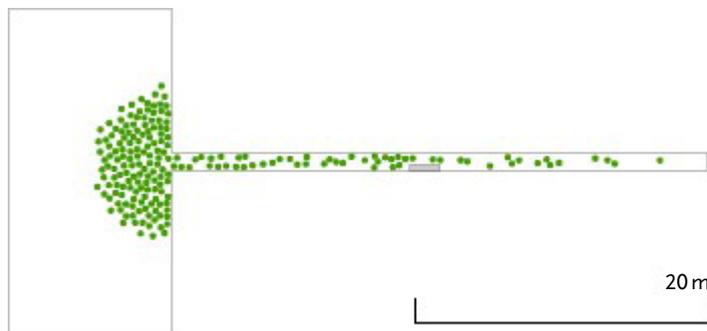


Abb.1 Beispiel Entfluchtungsverlauf der Simulation nach 30 Sekunden mit Gangbreite 1,20 m, Ganglänge 35 m, Hindernis Länge 2 m und Tiefe 0,40 m, in der Mitte des Gangs und 200 Personen (crowd:it)

Abbildung 2 zeigt beispielhaft, dass sich bei einer Fluchtwegbreite von 1,20 m und 200 Personen erst ab einer Hindernistiefe von über 0,50 m und verbliebener Fluchtwegbreite am Hindernis von kleiner 0,70 m die Zeiten für die Entfluchtung signifikant erhöhen, d. h., es kommt zu einer Staubildung vor dem Hindernis.

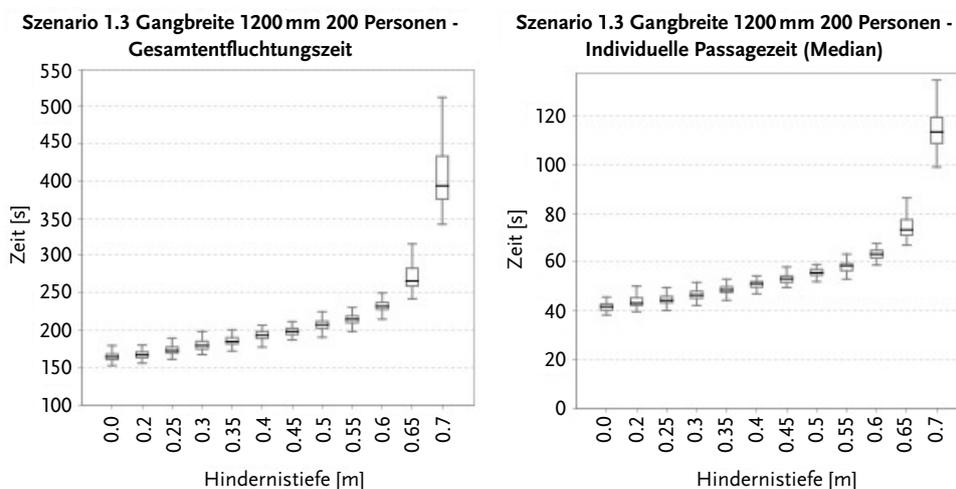


Abb. 2 Beispiel Gesamtentfluchtungszeiten und individuelle Passagezeiten für unterschiedliche Tiefen eines 13 cm breiten Hindernisses, Gangbreite 1,20 m (crowd:it)

Abbildung 3 zeigt beispielhaft, dass bei Bemessung des Fluchtweges nach ASR A2.3 bei einer beidseitigen Einengung des Gangs um 7,5 cm, wie sie beispielsweise bei einer Türzarge auftreten kann, keine signifikanten Auswirkungen ermittelt werden. Mit und ohne Einengung überlappen sich die statistischen Streubereiche.

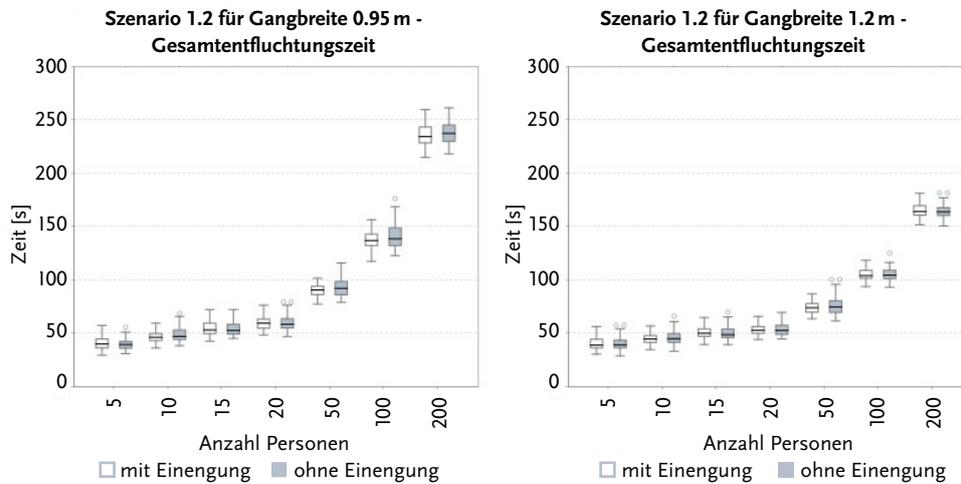


Abb. 3 Beispiel Gesamtentfluchtungszeiten bei 0,95 m und 1,20 m Gangbreite und Einengung mit zwei gegenüberliegende Hindernissen von jeweils 7,5 cm Eindringtiefe und 13 cm Breite in der Mitte des Gangs. (crowd:it)

Die Ergebnisse der Variationen zeigen, dass kurze Einengungen auf horizontalen Fluchtwegen kaum Auswirkungen auf die Gesamtentfluchtungszeit sowie auf die Passagezeit einzelner Personen haben. Selbst bei einer Einengung von zweimal 15 cm (Türzarge) können keine signifikanten Verzögerungen in der Entfluchtungszeit für die Personenzahl gemäß den Werten der ASR A2.3 festgestellt werden. Die Zeiten liegen in einer gewissen Streuung abhängig von der Personenzusammensetzung.

Bei längeren Einengungen stellen sich hingegen Einflüsse auf die Gesamtentfluchtungszeit sowie auf die Passagezeit ein. Dies reduziert die Entfluchtungsrate und führt zu Verzögerungen.

Insgesamt ist zu erkennen, dass ein steter linearer Zusammenhang zwischen Fluchtwegbreite und Gesamtentfluchtungszeit besteht, was bereits in durchgeführten Studien [15] festgestellt wurde. Je breiter der Gang, desto höher ist auch der spezifische Personenstrom (Anzahl Personen pro Meter und Sekunde). Dies findet sich auch in der Muster-Versammlungsstättenverordnung (MVStättVO) [16], die Zwischenwerte durch Interpolation zulässt.

Für die in ASR A2.3 Punkt 5 Tabelle 1 enthaltenen Werte konnte ein großer Sprung in der Gesamtentfluchtungszeit von 1,00 m (für bis 20 Personen) auf 1,20 m (ab 21 bis 200 Personen) lichte Fluchtwegbreite festgestellt werden (siehe Abbildung 4). Um diesen Sprung näher zu untersuchen, wurden Fluchtwegbreiten von 0,9 m, 1,0 m und 1,1 m variiert und festgestellt, dass kaum ein Unterschied in der Gesamtentfluchtungszeit für bis zu 50 Personen zu erkennen ist und damit eine Breite von 0,9 m für bis zu 50 Personen ausreichend erscheint.

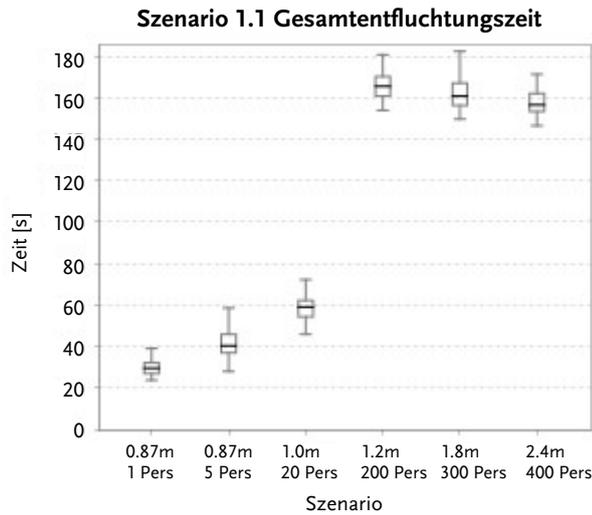


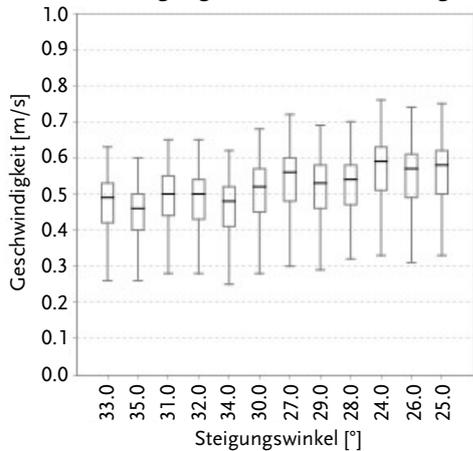
Abb. 4 Gesamtentfluchtungszeiten für unterschiedliche Fluchtwegbreiten und Personenzahl, Bemessung für Fluchtwegbreiten und Personenzahl entsprechend ASR A2.3 Tabelle 1

4.2 Szenario 2: Einfluss von Treppen

Im Verlauf von Fluchtwegen sind meist Treppen erforderlich. Treppen im Verlauf von Fluchtwegen werden überwiegend abwärts benutzt. Der Einfluss des Steigungsverhältnisses von Treppen wurde untersucht. Dazu wird der Gang aus Szenario 1 um eine Treppe in der Gangmitte (bei 17,5 m) erweitert. Die Geometrie der Treppe wird entsprechend der in der ASR A1.8 Punkt 4.5 zulässigen Werte variiert. Um Abbremsseffekte durch andere Personen zu umgehen, wird in diesem Szenario jeweils nur eine Person betrachtet. Die Person betritt den Gang aus dem davorliegenden Raum und läuft durch den Gang über die Treppe abwärts zum Zielbereich am Ende des Gangs. Um eine hohe Bandbreite von Werten zu bekommen, wurden pro Treppengeometrie 1.000 Simulationsläufe durchgeführt.

Die Ergebnisse (siehe Abbildung 5) zeigen, dass die Stufengeometrie zwar einen Einfluss auf die Abbremsung der Personen hat, diese Abbremsung jedoch innerhalb der erlaubten Treppenabmessungen nur unwesentlich schwankt. **Werden Treppen nach den Vorgaben der Arbeitsstättenregel ASR A1.8 gestaltet, haben die in diesem Rahmen möglichen Variationen von Steigung und Auftritt keinen signifikanten Einfluss auf die Entfluchtung.**

Szenario 2 Steigungswinkel - Geschwindigkeit



Szenario 2 Steigungswinkel - Zeit [s]

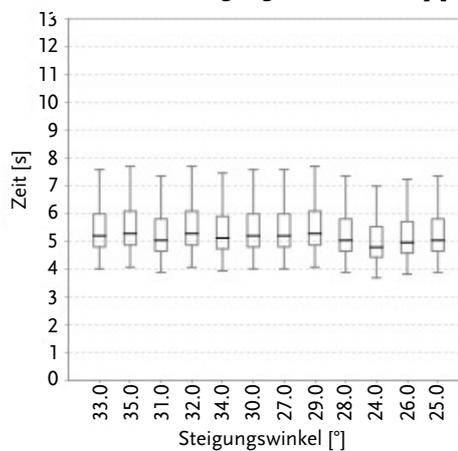


Abb. 5 Individuelle Geschwindigkeiten [m/s] (links) und Passagezeiten (rechts) auf der Treppe abhängig vom Steigungswinkel der Treppengeometrie (crowd:it)

Mit einer vertiefenden Literaturrecherche konnte dies bestätigt werden, insbesondere zeigte sich dabei eine sehr große Spannweite der individuellen Gehgeschwindigkeiten auf Treppen sowie ein deutliches Abbremsverhalten, die Stärke der Abbremsung schwankt jedoch beträchtlich. Für vertikale Fluchtwege bedeutet dies, dass es auf Treppen zu einer Verringerung des Personenstroms um bis zu ca. 50% verglichen mit horizontalen Fluchtwegen kommt (aufgrund der geringeren Gehgeschwindigkeiten) und damit zu einer langsameren Entfluchtung.

4.3 Szenario 3: Zusammenwirken von Einengungen und Treppen

Flure sind meistens durch Türen von Treppenträumen getrennt. Deshalb wird das Zusammenwirken von Einengungen und Treppen untersucht und das Szenario 1 entsprechend erweitert. Aus einem Raum führt ein Gang mit einer Tür am Ende des Gangs in den Fluchttreppenraum (siehe Abbildung 6). Alle Personen befinden sich zu Beginn des Szenarios im Raum vor dem Gang und beginnen ohne Verzögerung mit der Bewegung entlang des Gangs zur Treppe und dann die Treppe abwärts. Die Gangbreite wird auf 1,50 m festgelegt, um die Engstelle der Tür bei zwei Türzargen von 15 cm auf 1,20 m zu setzen; die Länge des Gangs bis zur Tür beträgt 17,5 m, insgesamt werden 100 Personen betrachtet. Das Szenario wird variiert, indem die Treppe einmal im 90° Winkel zum Gang angeordnet ist und einmal in der Verlängerung des Gangs. So kann der Einfluss eines Richtungswechsels mit einbezogen werden. Innerhalb beider Varianten wird die lichte Breite der Tür sowie der Treppe variiert. Abbildung 6 zeigt beispielhaft den Entfluchtungsverlauf vor und auf der Treppe. Nach 30 Sekunden gelangen die Personen noch ohne Staubildung bis durch die Tür in den Treppenraum, nach 60 Sekunden bewirkt die Treppe einen Rückstau bis in den Gang hinein.

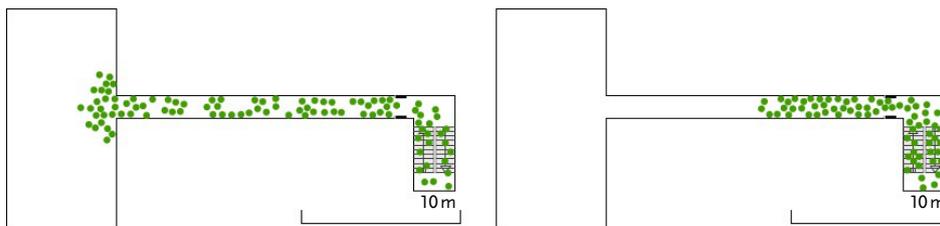


Abb. 6 Beispiel Entfluchtungsverlauf der Simulation nach 30 und 60 Sekunden mit Türbreite und Treppenbreite von 1,20m, abgewinkelte Treppenordnung, 100 Personen (crowd:it)

Die Simulation verschiedener Breiten der Treppen zeigt, dass für 100 Personen mit abnehmender Treppenbreite unter 1,0m die Entfluchtungszeiten deutlich ansteigen, bei größeren Breiten aber kaum noch ein Einfluss besteht. Die Breite der Tür zeigt keinen signifikanten Einfluss (siehe Abbildung 7).

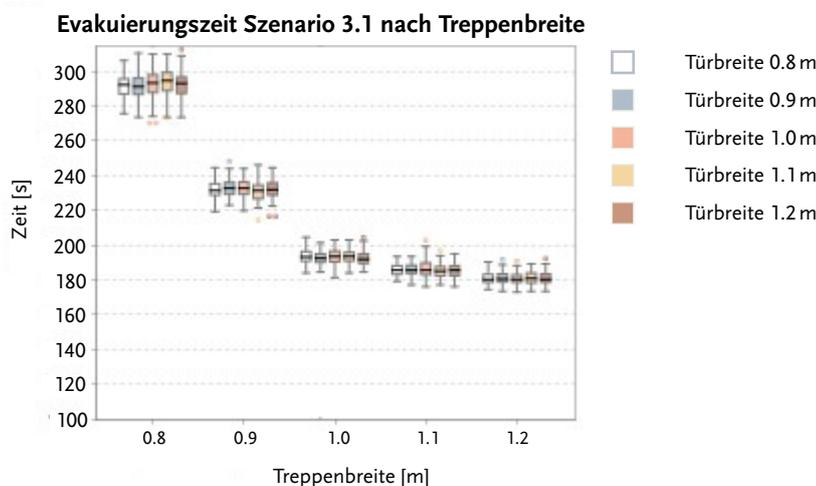


Abb. 7 Entfluchtungszeiten nach Treppenbreite, bei verschiedenen Türbreiten gruppiert (crowd:it)

Verglichen mit horizontalen Fluchtwegen haben Treppen eine deutliche Reduktion der Entfluchtungsrate zur Folge. In der Literatur findet man hierzu eine große Bandbreite über das Maß dieser Reduktion. Besteht ein Fluchtweg aus horizontalen sowie vertikalen Elementen, so sind die Einengungen entlang des Gangs einschließlich der in den Treppenraum mündenden Tür vernachlässigbar, da die eigentliche Flussreduktion durch die Treppen verursacht wird. Eine Reduktion der Türbreite im Rahmen des nach ASR A2.3 zulässigen Bereiches hat keinen signifikanten Einfluss auf die Entfluchtungsrate über die Treppe.

4.4 Szenario 4: Entfluchtung über mehrere Etagen

In diesem Szenario wurde untersucht, wie sich bei gleichzeitiger Alarmierung die zeitlich versetzte Nutzung der Fluchtwege auf die erforderliche Fluchtwegbreite insbesondere bei mehrgeschossigen Gebäuden auswirkt. Das simulierte Gebäude besteht aus 3 bis 8 Ebenen. Die Ebenen weisen jeweils auf einer Seite eine Büronutzung auf einer Fläche von 365 m² auf, aus der ein Fluchtweg von 35 m bis zur abschließenden Tür zum Treppenvorraum herausführt (rechter Gebäudeteil in Abbildung 8). Auf der linken Seite befindet sich jeweils ein Schulungsraum, der durch eine höhere Personenbelegung gekennzeichnet ist und aus dem ebenfalls ein maximal 35 m langer Fluchtweg zum Treppenraum führt. Die jeweiligen Türen zum innenliegenden Treppenraum besitzen eine lichte Weite von 0,9 m, die Bürotüren von 0,8 m, der Flur ist 1,2 m breit ebenso wie die Treppen- und Podestbreite des zentralen Treppenraums. Bei einer angenommenen Geschosshöhe von 3,63 m führen 22 Stufen mit dem Stufenmaß von 16,5/30 cm (Steigung/Auftritt) über ein Zwischenpodest nach 11 Stufen mit einem Treppenauge von 0,25 m in die nächstuntere Ebene.

Ausgangspunkt ist eine Belegung mit ca. 200 Personen über drei Ebenen. Bei Betrachtung von zusätzliche Ebenen werden aufgerundet 70 Personen pro Ebene angenommen. Diese verteilen sich auf 20 Personen im Bürotrakt (6 Büros x 2 Personen + 8 zusätzliche Mitarbeiter bzw. Besucher) und 50 Personen auf der 401 m² großen Fläche des Schulungsbereichs. Aufgrund der Komplexität des Modells wurde die Anzahl Durchläufe pro Simulationsvariante auf 10 festgelegt. Abbildung 8 zeigt das Gebäude mit der Ausgangsverteilung der Personen. In allen Szenarien wird nur der innere Treppenraum mit seiner 1,2 m breiten Treppe genutzt. Somit bewegen sich alle Personen aus dem hier im vorderen Bildteil zu sehenden Bürotrakt auf den mittleren Treppenraum zu, ebenso die Personen im Schulungsraum. Simuliert wurden Varianten mit unterschiedlichen Personenzahlen pro Ebene, bei gleichzeitiger Alarmierung aller Ebenen, bei zeitlich versetzter Alarmierung einzelner Ebenen sowie mit unterschiedlichen Reaktionszeiten der Personen.

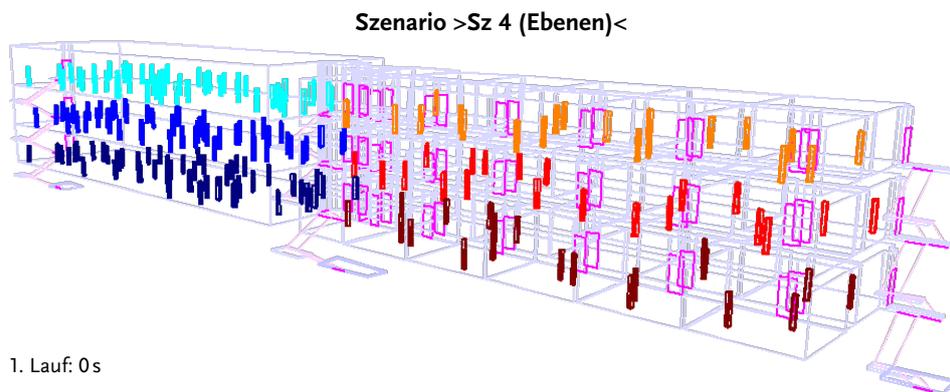


Abb. 8 Beispiel perspektivische Sicht auf das Gebäude mit drei Ebenen und der Belegung mit 70 Personen pro Ebene in ihrer zufälligen Ausgangsposition (t = 0 s) im ersten Simulationslauf (ASERI)

Beispielhaft wird hier die Variante mit drei Ebenen, 70 Personen pro Ebene sowie gleichzeitiger Entfluchtung ohne Reaktionszeit gezeigt. Alle Agenten beginnen ihre Entfluchtung mit

dem Zeitpunkt der Alarmierung zum Treppenraum, bei einer mittleren Gehgeschwindigkeit von ca. 1 m/s kommt es bereits nach 1 Minute zum Stau vor den Zugangstüren zum Treppenraum. Nunmehr spielt sich das gesamte Geschehen vor und im inneren Treppenraum ab. Nach 2½ Minuten befinden sich keine Personen aus den unteren Ebenen mehr im Gebäude, lediglich Personen aus der oberen Ebene halten sich noch im Treppenraum auf. Ein Übersichtsdiagramm, dem sich die Dynamik des Geschehens entnehmen lässt, stellt das Verteilungsdiagramm der Abbildung 9 dar. Die drei zu Beginn (t = 0 s) mit jeweils 70 Personen belegten Ebenen (untere Ebene A [blau], mittlere Ebene B [hellblau], obere Ebene C [orange]) werden in der ersten halben Minute stetig verlassen. Danach sind der Treppenvorraum und die Treppen aufgefüllt (roter Graph). Während die Ebene A nach 1 – 1¼ min (sowohl der Bürotrakt als auch der Schulungsraum) verlassen ist, warten noch Personen in Ebene B zwischen 1¼ bis 2 Minuten vor der Tür des Schulungsraums. In Ebene C ist dieser Vorgang erst zwischen 2 und 2 min 20s abgeschlossen. Alle drei Ebenen sind nach 3 min 14 s ± 4 s bis zur darunterliegenden Ebene geräumt.

Personenverteilung Sz 4.1: 210 Personen auf 3 Ebenen (70 Personen pro Ebene) (10 Läufe)

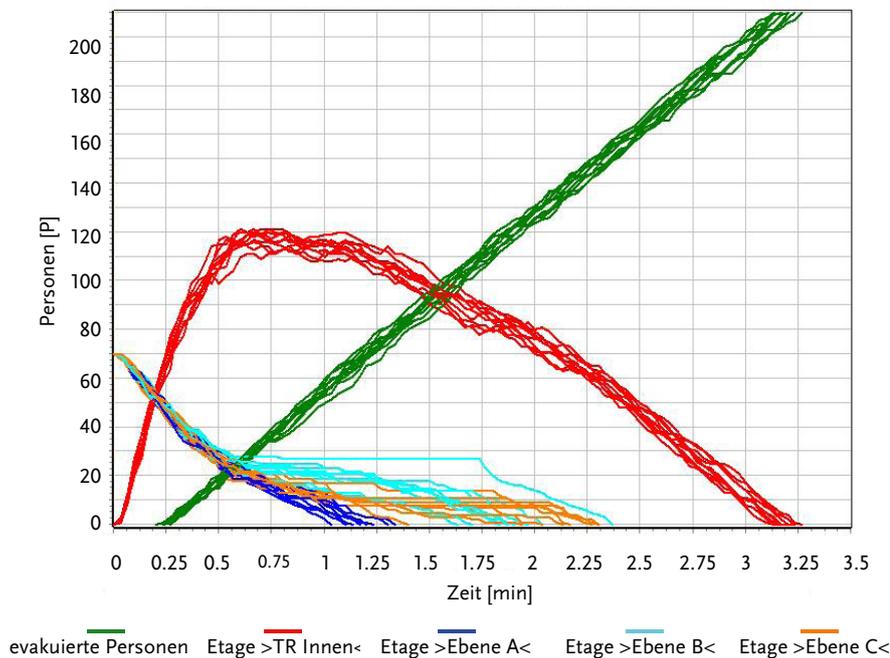


Abb. 9 Distributionsdiagramm, das die zeitliche Entwicklung der Entfluchtung der einzelnen Ebenen (unterste Ebene A, mittlere Ebene B, oberste Ebene C), des inneren Treppenraums (roter Graph) und der Personen im sicheren Bereich am unteren Ausgang (grüne Graphen) für 10 unabhängige Simulationsläufe zeigt. (ASERI)

Im Ergebnis aller untersuchten Varianten können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden: Mehrere Ebenen können zeitlich unabhängig voneinander entfluchtet werden, wenn Personen aus unteren Ebenen bereits die Treppe passiert haben, bevor die Personen von oberen Ebenen eintreffen. In den Analysen hat sich bei einer Belegung bis zu 120 Personen auf drei Ebenen (40 Personen pro Ebene) und einer Treppenbreite von 1,20m dieser Zustand eingestellt. Kommt es zu höheren Belegungszahlen, so beeinflussen sich die Flüchtenden über die Ebenen hinweg und bei größerer Anzahl der Ebenen kommt es entsprechend zu Stauungen. Letztendlich ist der limitierende Faktor der Personenstrom auf den Treppen. Übersteigt die Personenanzahl die Flussrate auf der Treppe, die zwischen 0,6 und 1,0 Personen pro Meter und Sekunde liegt, so kommt es zu Stauungen, die sich entsprechend erhöhen, je mehr Ebenen auf diesen Fluchtweg angewiesen sind. Im Falle der zeitlich versetzten Nutzung durch unterschiedliche individuelle Reaktionszeiten ergibt sich für mehrgeschossige Gebäude nur ein Versatz durch die Zeitspanne der verzögerten Aufnahme der Entfluchtung,

die Struktur des Entfluchtungsgeschehens bleibt insbesondere für höhere Belegungsdichten gleich. Eine sequentielle Alarmierung, d. h., es werden zunächst nur die betroffene Ebene sowie die darüber- und darunterliegenden Ebenen alarmiert, kommt den Personen dieser Ebenen zugute, ohne die Fluchtzeiten für das Gebäude insgesamt nachhaltig zu steigern. Um eine praxisbezogene Empfehlung auszusprechen, müssen in einer weiteren Untersuchung systematisch die Wechselwirkungen zwischen der Anzahl Ebenen, Anzahl Personen pro Ebene sowie der Treppenbreiten betrachtet und analysiert werden. Für die Variante über 8 Ebenen wurden die Entfluchtungszeiten außer mit den beiden Simulationsprogrammen zusätzlich mit verschiedenen makroskopischen Strömungsmodellen (Kapazitätsanalysen und hydraulische Berechnungen) berechnet. Für größere Personenbelegungen von über 20 Personen pro Ebene gibt es eine gute Übereinstimmung aller Methoden. Erwartungsgemäß liefern die makroskopischen Modelle für geringe Personenzahlen keine plausiblen Werte, da sie nicht das individuelle Verhalten abbilden.

4.5 Szenario 5: Schulgebäude

Um die Fluchtwege speziell in Schulgebäuden zu untersuchen, wurde ein Schulgebäude gemäß Muster-Schulbau-Richtlinie (MSchulbauR) [17] mit maximalen Auslastungen (bis 35 Schüler je Unterrichtsraum) mit einer Personenstromsimulation nachgebildet. Das betrachtete Gebäude besteht aus einem Erdgeschoss sowie zwei weiteren Ebenen. Insgesamt gibt es 30 Unterrichtsräume, die auf einen 1,50 m breiten Gang führen. Die Treppen sind mit 1,20 m bemessen. Um den Einfluss der Türbreiten von Unterrichtsräumen auf die Gesamtentfluchtungszeit zu untersuchen, wurden zwei Varianten untersucht: Türbreiten von 0,90 m sowie von 1,20 m für alle Türen aus den Unterrichtsräumen. Die Schüler wurden im Simulationsprogramm mit einer speziell angepassten Population bzgl. Körpergröße, Gehgeschwindigkeit und Reaktionszeit für die Altersgruppen 6 – 10 Jahre und 11 – 18 Jahre abgebildet. Mit je 50 Simulationsläufen getrennt für diese beiden Altersgruppen und jeweils für eine Schule mit 0,90 m bzw. 1,20 m Breite für alle Türen aus den Unterrichtsräumen wurden mit den beiden Programmen ASERI und crowd:it die Entfluchtungszeiten der Unterrichtsräume und die Gesamtevakuiierungszeiten der Schule berechnet. Die Abbildung 10 zeigt beispielhaft die Ergebnisse für die Gesamtevakuiierungszeiten.

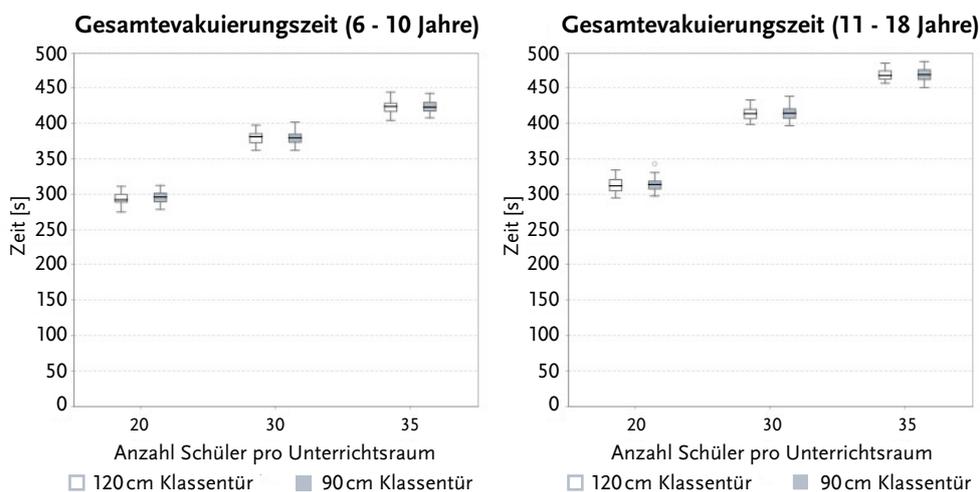


Abb. 10 Beispiel Gesamtevakuiierungszeiten für eine Population von 6 – 10 Jahren (linke Abbildung) oder 11 – 18 Jahren (rechte Abbildung), lichte Türbreite Unterrichtsräume mit 120 cm (weiß) und 90 cm (grau)

Die Räumungszeiten steigen jeweils an, je mehr Schüler sich in den Unterrichtsräumen befinden. Ein statistisch signifikanter Unterschied in den Gesamtevakuiierungszeiten abhängig der Türbreiten in Unterrichtsräumen ist dabei nicht ersichtlich. Vergleichbar mit den Ergebnissen in Szenario 3 haben die Treppen maßgeblichen Einfluss auf die Gesamtevakuiierungszeiten.

5 Zusammenfassung

Im Gutachten [1] wurde der Einfluss von Breite der Fluchtwege sowie von Treppen, Türen und Einengungen im Verlauf der Fluchtwege sowie einer sequentiellen Räumung auf die Entfluchtung mithilfe von mikroskopischen Personenstromsimulationen untersucht. Während der Analyse der Szenarien mit zwei unterschiedlichen mikroskopischen Simulationsmodellen (ASERI und crowd:it) wurden die Ergebnisse mit vorhandener Literatur und gebräuchlichen makroskopischen Strömungsmodellen eingeordnet und bewertet.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich auf horizontalen Fluchtwegen die Entfluchtungszeiten in linearer Weise abhängig von der zur Verfügung stehenden Fluchtwegbreite und Anzahl Personen verändern. Dies deckt sich auch mit Ergebnissen aus Experimenten. Der vorhandene „Sprung“ der lichten Fluchtwegbreite von 1,00 m (für bis 20 Personen) auf 1,20 m (ab 21 bis 200 Personen) in der Tabelle 1 der ASR A2.3 erscheint daher verhältnismäßig hoch. In den untersuchten Szenarien bei Fluchtwegbreiten von 0,90 m bis 1,10 m ist kaum ein Unterschied in den Gesamtentfluchtungszeiten für bis zu 50 Personen zu erkennen. Daher erscheint hier auch eine Gangbreite von 0,90 m für bis zu 50 Personen als ausreichend.

Die Ergebnisse zeigen weiter, dass auf horizontalen Fluchtwegen Einengungen in geringem Umfang (bis beidseitig 15 cm) und über kurze Strecken zu keiner signifikanten Erhöhung der Fluchtzeiten führen.

Enthalten Fluchtwege vertikale Komponenten, also Treppen, bestimmen diese Elemente die Durchflusskapazität und damit auch maßgeblich die Fluchtzeit. Durch die Flussverringering (aufgrund der verlangsamten Gehgeschwindigkeit auf Treppen) ist festzustellen, dass Einengungen auf den horizontalen Wegabschnitten die Fluchtzeit nicht wesentlich beeinflussen, sondern der signifikante Einflussfaktor die Treppenbreite ist.

Dies ist auch in mehrstöckigen Gebäuden zu erkennen. Solange die Kapazität der Treppe es zulässt, dass eine Ebene geräumt ist, bevor die Personen aus den oberen Ebenen in die betrachtete Ebene gelangen, können die Ebenen autark voneinander geräumt werden. Sobald dies nicht mehr der Fall ist, stellen sich kaskadierende Effekte ein: Ab ca. 40 – 50 Personen pro Ebene auf einer 1,20 m breiten Treppe bilden sich Stauungen in die Ebenen hinein aus. Genaue Grenzen und die Iteration unterschiedlicher Anzahl Ebenen und Personen sowie Treppenbreiten müssten im Weiteren durchgeführt werden, um präzise Aussagen über die Stärke der Effekte zu treffen. Festzuhalten ist, dass sowohl eine sequentielle Räumung als auch Reaktionszeiten sich positiv auf den Räumungsverlauf auswirken, diesen aber nicht beschleunigen.

In Schulen wird die Evakuierungsdauer vor allem durch die Kapazitäten der Treppenräume dominiert, die Entleerungszeit der Unterrichtsräume fällt dabei nicht ins Gewicht. Türbreiten von 0,90 m oder 1,20 m bedingen für Unterrichtsräume mit einer Belegung mit bis zu 35 Personen keine statistisch erkennbaren Unterschiede bei den Evakuierungszeiten. Im Gegensatz dazu besitzen Alarmierungs- und Reaktionszeiten viel stärkere Auswirkungen auf die Evakuierungsabläufe sowohl im Unterrichtsraum als auch im Treppenraum.

Literatur

- [1] Kneidl, A. und Könnecke, R. 2020. Fachgutachten „Fluchtwege in Arbeitsstätten – Einfluss von Wegbreite, Treppen, Türen und Einengungen auf die Entfluchtung“. Dortmund: BAuA, 2020.
- [2] www.accu-rate.de/en/software-crowd-it-en/
- [3] ASERI – Referenz- und Benutzerhandbuch, IST GmbH, 1993 – 2019
- [4] Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen, Version 3.0, 10. März 2016, www.rimea.de/fileadmin/files/dok/richtlinien/RiMEA_Richtlinie_3.0,0_-_D-E.pdf
- [5] Kuligowski, E. D., et al. (2013): The Process of Verification and Validation of Building Fire Evacuation Models, Technical Note 1822, Natl. Inst. Stand. Technol., Gaithersburg, MD.
- [6] R. Könnecke, V. Schneider: Risk management at major events – Study of behavioral aspects and implementation into the ASERI microscopic evacuation model, 5th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics (PED), Gaithersburg, MD USA, 8. – 10. März 2010
- [7] V. Schneider, R. Könnecke: Microscopic modelling of crowd movement at major events, Proceedings Interflam 2010, Fire Science & Engineering Conference, Nottingham, UK, July 2010
- [8] R. Könnecke, V. Schneider: BaSiGo: Safety of Large Scale Events – Crowd flow modeling of ingress and egress scenarios, Transportation Research Procedia Vol. 2, 2014, Seiten 501 - 506
- [9] V. Schneider, R. Könnecke: Occupants with mobility impairments and social groups in design calculations, 6th International Symposium on Human Behaviour in Fire, Cambridge, UK, 28. – 30. September 2015
- [10] Predtechenskii, V.M., Milinskii, A.I., (1978). Planning for Foot Traffic Flow in Buildings. Amerind Publishing, New Delhi, Translation of: Proekttirovanie Zhdaniis Uchetom Organizatsii Dvizheniya Lyuddskikh Potokov. Stroizdat Publishers, Moscow, 1969
- [11] V. Schneider, R. Könnecke, S. Habip, J. Hofmann: Verbundprojekt Simulation von Bränden, Lösch- und Notfallmaßnahmen – Teilprojekt Brand- und Rauchausbreitung, Evakuierungsmodell, BMFT-Abschlußbericht 13 RG 91141, 1994
- [12] V. Schneider, R. Könnecke: Simulating Evacuation Processes with ASERI, Tagungsband International Conference on Pedestrian Evacuation Dynamics (PED), 4. – 6. April 2001, Duisburg und V. Schneider: Application of the individual-based evacuation model ASERI in designing safety concepts, 2nd International Symposium on Human Behaviour in Fire, Boston, March 2001
- [13] M. J. Seitz and G. Köster, Natural discretization of pedestrian movement in continuous space, American Physical Society, PHYSICAL REVIEW E 2012, 86, 046108
- [14] Kneidl, A. (2013). Methoden zur Abbildung menschlichen Navigationsverhaltens bei der Modellierung von Fußgängerströmen, PhD Thesis, Technische Universität München

[15] Seyfried, A. et al. (2009): New Insights into Pedestrian Flow Through Bottlenecks, Transportation science, INFORMS, 43, 395 - 406

[16] Muster-Versammlungsstättenverordnung – (MVStättVO). Fassung Juni 2005. Zuletzt geändert durch Beschluss der Fachkommission Bauaufsicht vom Juli 2014

[17] Muster-Schulbau-Richtlinie (MSchulbauR) der Fachkommission „Bauaufsicht“ der ARGE-BAU – Fassung April 2009 – bauaufsichtliche Richtlinie, Zuletzt geändert durch Beschluss der Fachkommission Bauaufsicht vom 1. August 2015