

Evakuierungsberechnungen bei Brandereignissen mittels Ingenieurmethoden

o.Univ.-Prof. Dr.techn. Dr.h.c. Ulrich Schneider, Dipl.-Ing. Hubert Kirchberger

Institut für Hochbau und Technologie, TU Wien

Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz

A-1040 Wien • Karlsplatz 13/206

Tel. 01 / 588 01 - 206 00 • Fax 01 / 588 01 - 206 97

1. Einleitung

Brandereignisse mit schwerwiegenden Personenschäden gehören trotz zunehmenden Sicherheitsmaßnahmen noch immer zu regelmäßig wiederkehrenden Themen der Nachrichtensendungen. Es stellt sich dann jeweils die Frage, ob die Vorkehrungen für die Gewährleistung der Sicherheit im Gebäude, insbesondere im Hinblick auf den reibungslosen Ablauf der Evakuierung ausreichend waren. Die Gewährleistung der Personensicherheit in Gebäuden ist das zentrale Anliegen des baulichen, betrieblichen und abwehrenden Brandschutzes. Dieses gilt insbesondere für Gebäude besonderer Art oder Nutzung wie Versammlungsstätten, Krankenhäuser, Flughäfen, Bahnhöfe und Sportstätten sowie multifunktional genutzte Arenen. Ein wichtiger Einflussfaktor auf die Flucht oder Rettung ist das menschliche Verhalten im Falle eines Brandes. Aus diesem Grund ist die Zeitspanne der Evakuierung, beginnend mit dem Erkennen des Feuers, dem Setzen von ersten Maßnahmen, dem Ablauf der Flucht bis hin zum Eintreffen der Feuerwehr, nur sehr schwer festlegbar. Des Weiteren wird die Flucht ganz wesentlich von den vorhandenen Fluchtwegbreiten und den Rettungsweglängen im Gebäude abhängen. Darüber hinaus können die Brandgase, welche auf den menschlichen Körper einwirken, die Flucht beeinträchtigen oder sogar verhindern. Grundsätzlich gibt es somit drei wesentliche Faktoren, welche bei der Evakuierung von Gebäuden zu beachten sind:

- Einflussfaktor - *Mensch/Personenströme*
- Einflussfaktor - *Fluchtweg/Gebäudeart*
- Einflussfaktor - *Feuer/Brandrauch*

Die unterschiedlichen psychischen und physischen Reaktionen der Personen auf ein Brandereignis stellen einen großen Unsicherheitsfaktor bei einer Bewertung dar. Dabei ist das Verstehen von menschlichen Verhaltensmustern, wie Panikverhalten und Gruppenbildung besonders wichtig. Darüber hinaus sind die physische Mobilität und der psychische Zustand der Personen (Depressionen, Tabletten, Alkohol) zum Zeitpunkt der Flucht von großer Bedeutung.

Des Weiteren haben die baulichen Gegebenheiten großen Einfluss auf das Verhalten von Personen bei einem Gebäudebrand. Dabei spielen die Zugänglichkeit sowie Breiten und Längen der vorhandenen Flucht- und Rettungswege eine maßgebende Rolle.

Ein wesentlicher Punkt ist dabei die Bewegung des Personenstroms im Gebäude. Diesbezüglich werden Parameter wie effektive Wegbreite, Personenfluss, Flächenbedarf und Bewegungsgeschwindigkeit bestimmt und deren Auswirkungen auf die Evakuierungszeit berechnet. Dabei ist zu beachten, dass die grundlegenden Berechnungsdaten auf empirischen Untersuchungen beruhen, welche in der Regel unter „normalen“ Bedingungen durchgeführt werden, wie z. B. geplante Personenstrommessungen in öffentlichen Gebäuden (Theater, Warenhäuser) oder in Einkaufszentren. Es ist nicht möglich tatsächliche Gefahrenbedingungen (verrauchte Gebäude o. ä.) für Personenstrommessungen zu schaffen, d. h. die Berechnungen stützen sich immer nur auf Beobachtungen, die unter „angegenäherten Gefahrenbedingungen“ gemacht werden.

2. Grundlagen der Evakuierung

2.1. Faktor Mensch

Zu den menschlichen Faktoren zählen alle Parameter, die das menschliche Verhalten im Brandfall bestimmen. Es werden grundsätzlich 3 Kategorien unterschieden:

- *Erfahrung und Bewusstsein*
Dieses umfasst z. B. das Wissen über das Ausmaß des Feuers. Kenntnisse wie man auf Feuer reagiert. Reaktion auf Alarmsignale. Soziale Rolle des Einzelnen.
- *Physische Fähigkeiten*
Darunter versteht man das allgemeine Reagieren auf Alarm, Mobilitätseinschränkungen, Sinneswahrnehmungen (Sehen, Hören, Riechen).
- *Personenverteilung*
Ist die Anzahl und Verteilung der Menschen im Gebäude.

2.2. Verhalten von Personen unter Gefahrenbedingungen

Die Kenntnis über das menschliche Verhalten im Brandfall stellt bei der Planung der Fluchtwege einen wesentlichen Entwurfsfaktor dar. Menschen reagieren sehr unterschiedlich auf Extremsituationen und übersehen oft die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit. Während eines Brandes innerhalb eines Gebäudes bestimmt das Verhalten der betroffenen Personen häufig den Ausgang der Ereignisse entscheidend mit, dabei kann es durch Fehleinschätzungen und -verhalten zu schlimmen Folgen kommen [BOD1].

Für die Rettungsmannschaften gilt neben den Brandbekämpfungsmaßnahmen vorrangig die Rettung vom Feuer bedrohter Menschen. Der Einsatz wird dadurch erschwert, dass sich Menschen u. a. aufgrund ihrer psychischen Verfassung nicht mehr zurechtfinden oder durch gebäudebedingte Umstände in eine ausweglose Lage geraten sind z. B. durch das Aufsuchen innenliegender Räume. Brände stellen für einen Normalbürger ein äußerst seltenes Ereignis dar, so dass er in der Regel wenig Erfahrung mit solchen Situationen hat. Aufgrund fehlender Erfahrung erfolgt das Verhalten im Ernstfall daher rein instinktiv.

Bei einem Brand ändern sich Situationen sehr schnell, wobei oft nur minimale Informationen als Entscheidungshilfe zur Verfügung stehen. Zunächst scheinbar richtige Schritte können Sekunden später in eine ausweglose Situation führen. Deshalb ist für untrainierte Personen die Konfrontation mit einem Brand meist ein stressvolles Erlebnis. Geschulte Personen können mit so einem Ereignis besser umgehen, bleiben ruhig und überlegen die erforderliche Vorgehensweise.

2.3. Einflussfaktoren auf das Verhalten von Personen

Nach [SKII] ist das Verhalten in bestimmten Situationen hauptsächlich dadurch vorgegeben, wie man bei früheren Gelegenheiten in derselben oder einer ähnlichen Situation reagiert hat. Die beobachteten Verhaltensmuster werden einer Analyse unterzogen und Überlegungen, wie man das Verhalten ändern kann, angestellt. Dabei geht man nach folgenden Punkten vor:

- Die Einschätzung des Verhaltens beinhaltet sorgfältige Angaben der Situation mit z. B. folgender Fragestellung: „Wo ist das Verhalten aufgetreten?“
- Die Reaktionen werden nach folgenden Fragemustern erforscht: „Was wurde gemacht?“ „Wie wurde gehandelt?“
- Die Motivation des Verhaltens wird ergründet: „Warum wurde so gehandelt?“
- Mögliche Interventionen werden untersucht.

Anhand der folgenden drei Beispiele wird klar, wie sich menschliche Verhaltensmuster in Gefahrensituationen auswirken können und welche Interventionsmaßnahmen getroffen werden sollen:

- *Hypothese der Bedeutungslosigkeit von Hinweisschildern*
Menschen können zwar Notausgangsschilder als solche erkennen, wissen aber nicht, wo sie sich befinden. Das gilt auch für ihnen bekannte Orte, z. B. in Einkaufszentren. Da diese Gruppe von Menschen noch nie einen Notausgang benutzt hat, werden wichtige Hinweisschilder nicht wahrgenommen bzw. übersehen. Um die Aufmerksamkeit dieser Personengruppe in einer Gefahrensituation auf diese zu ziehen, würde eine Intervention in diesem Fall so aussehen, dass sich bestimmte Schilder, z. B. Notausgangsschilder, bei einem Alarm verändern, z. B. indem sie ihre Farbe und Leuchtkraft ändern oder blinken.
- *Hypothese des Reaktionsverlustes bei Alarm*
Signale werden bedeutungslos, wenn sie zu oft wahrgenommen werden. Ein Feueralarm wird als lästig empfunden, wenn er ohne Grund ausgelöst wird. Es ist anzunehmen, dass dieses Verhalten durch Instruktionen und praktische Feuerübungen geändert werden kann.
- *Hypothese konkurrierender Tätigkeiten*
Der Mensch wählt ständig zwischen den vorhandenen alternativen Aktivitäten. Eine Reaktion auf einen Feueralarm konkurriert mit anderen gerade stattfindenden Handlungen, z. B. einen Einkauf beenden. Öffentliche Ansagen und bestimmte Erziehungsprogramme können die Personen dazu bewegen, schnell auf einen Alarm zu reagieren und unverzüglich aus einer gefährlichen Situation zu fliehen.

Nicht nur die Wiederholung menschlicher Verhaltensmuster, sondern auch die Persönlichkeit, das soziale und kulturelle Umfeld des Einzelnen, spielen eine wesentliche Rolle im Fluchtverhalten. Gemäß Ploog, Clausen [PLO1] und Mark [MARI] können Personen in Gefahrensituationen folgenden Gruppen zugeordnet werden:

- *Gruppe 1: 10-15 %*
Dieser Teil der Personen reagiert sehr rational auf Ereignisse. Es gibt kein Anzeichen von aufkommender Hektik und die Übersicht wird behalten. Durch ihr klares Agieren übernehmen diese Personen meist wichtige Führungspositionen bei der Katastrophenbewältigung.
- *Gruppe 2: ~ 70 %*
Dieser Teil ist von der auftretenden Situation betäubt, verhält sich aber eher ruhig. Nach der ersten Phase des Schreckens, reagieren diese Menschen mit aktivem Handeln, meist Hilfeleistung. Diese Gruppe kann durch klare Anordnungen sehr positiv beeinflusst werden.
- *Gruppe 3: 10-15 %*
Diese Gruppe reagiert in solchen Situationen unberechenbar, d. h. meist mit Erstarrung, Kopfflosigkeit und blinder Flucht. Die Erstarrung entspricht dem Todstellreflex mancher Tiere und bringt evtl. Minuten bis zu mehreren Stunden anhaltende Immobilität und Apathie mit sich. Die Kopfflosigkeit äußert sich oft in Form von sinnlosen Handlungen, wie Schreien, Desorientiertheit, Realitätsverlust.

2.4. Panik: Mythos oder reale Gefahr während einer Evakuierung

Unter „Panik“ wird allgemein ein Verhalten verstanden, das hauptsächlich darauf abzielt, möglichst schnell allein oder gemeinsam einen Weg aus einer lebensbedrohlichen Gefahr zu finden. Panik ist nach [SIE1] eine Fluchtreaktion und kann durch nichts gestoppt werden. Sie führt zu rücksichtslosem Verhalten und mündet in einen Kampf ums Überleben. Verhaltensforscher und sogenannte Panikforscher haben Faktoren ermittelt, welche für das Entstehen einer klassischen Panik, als emotionale Kollektivreaktion einer Vielzahl von kommunizierenden Personen verantwortlich sein können:

- Erste Voraussetzung für das Entstehen einer Panik ist das Vorhandensein einer Vielzahl von Personen. Diese Personenansammlungen können zufällig sein oder über einen längeren Zeitraum bestehen.
- Die Personen befinden sich in einem Raum. Die Dimension des Raumes kann begrenzt sein, es muss jedoch ein bestimmtes Verhältnis Raum-Personenanzahl gegeben sein, welches zu hohen Personendichten führt. Jeglicher Veranstaltungsort kann zum Schauplatz einer Panik werden, wenn ein geeigneter Auslöser auf eine genügend große Menge einwirkt.
- Die Existenz der Personengruppe wird durch eine fiktive oder tatsächliche Gefahr bedroht und es kommt in dieser Situation zu einer massiven Beeinflussung des Gefühlslebens.
- Das Auftreten einer Panik kann durch externe Bedingungen (z. B. Brand, Erdbeben, Unwetter) oder ohne Einwirkung von außen (z. B. Fußballfans) sowie durch technische und bauliche Fehler (z. B. verschlossene Türen, Absperungen, zu enge Durchgänge) ausgelöst werden. [WAL1]

Der Ablauf einer paniktypischen Fluchtreaktion des Einzelnen ist durch mehrere Phasen bestimmt. Beginnend mit der ersten Phase, der sogenannte Flucht-Auslöser, geht die Kette in die Phase der Flucht-Reaktion mit darauffolgendem Bewegungsturm über, und endet mit einer sogenannten Entspannungsphase, die sich durch Erschlaffen der Arme und Beine bemerkbar macht. Die Zeitdauer der einzelnen Phasen kann individuell verschieden sein. Bei Brandfällen konnte immer wieder beobachtet werden, dass sich die Einzelpersonen in dieser ausweglosen Situation alleingelassen fühlen. Durch die entstehenden Angst- und Furchtzustände werden klare Entscheidungen und Überlegungen immer schwieriger oder sind überhaupt nicht mehr durchführbar. Meist kommt es dadurch zum Fehlverhalten oder zu falschen Einschätzungen, die oft schlimme Folgen haben können. Wie Erfahrungen aus Brandereignissen in der Vergangenheit zeigen, kann es bei großen Personenansammlungen in Gebäuden zu Panikreaktionen kommen.

Es entsteht ein Fluchtstrom, bei dem sich ein Personenstrom mit einer gewissen Geschwindigkeit in eine Richtung bewegt. Kommt es durch Engstellen oder Raumbegrenzungen (z. B. Geländer und Gitter) zum Stillstand des Fluchtstromes, kann sich durch nachdrängelnde Personen ein sehr hoher Staudruck aufbauen. Dabei können in der Menge befindliche Personen durch das massive Schieben schwer verletzt oder auch getötet werden (s. Abbildung 2.1). Problematisch sind gleichzeitig auftretende starke Rauchentwicklungen mit Schadstoffen, die den Flüchtenden die Sicht nehmen und das Atmen unmöglich machen könnten.



Abbildung 2.1: 96 Personen sterben bei einem Nachtclubbrand in Rhode Island, USA, Februar 2003

Wenn die unmittelbare Gefährdung aufgrund der Entfernung zum Brandherd oder die Personendichte aufgrund der geometrischen Verhältnisse wieder abnimmt, kommt es zum Auflösen der Menschenmenge, jeder wird wieder eine eigene Persönlichkeit, die unter allen Umständen überleben will. Die größte

Gefahr bergen die unterschiedlichen Reaktionen der Personen, da es zu zeitlich versetzten Entspannungsphasen kommt. Während ein Teil entspannt, bewegt sich der andere noch und bereits Ermüdete werden von diesen mitgerissen, stürzen oder werden überrannt [SIE1].

2.5. Bewegungsgeschwindigkeit

Von zentraler Bedeutung für die Evakuierung ist die Berechnung der individuellen Bewegungsgeschwindigkeit v , charakterisiert durch Betrag und Richtung des Geschwindigkeitsvektors. Das primäre Ziel einer Person ist in der Regel der nächstgelegene Zugang zu einem sicheren Bereich. Wesentlich ist dabei jedoch auch, dass Personen die Wahl ihres ursprünglichen Ziels während der Evakuierung ändern können, etwa bei erforderlichen Passagen durch verrauchte Bereiche, bei sich ergebenden Staubbildungen an Engpässen, an Einbauten und Objekten, die sich im Raum befinden. Außerdem wird die Bewegungsrichtung wesentlich durch die Anwesenheit von anderen Personen beeinflusst.

Der Betrag der Fortbewegungsgeschwindigkeit ergibt sich aus der mittleren Fortbewegungsgeschwindigkeit bei ungehinderter Bewegung. Der Wert dieser individuellen Kenngröße liegt bei einem durchschnittlichen Erwachsenen bei etwa 1,2 bis 1,4 m/s und hängt von folgenden Faktoren ab:

- Gebäudedesign und -nutzung
- Wegführung (Flure, Gänge, Treppen)
- Anzahl der im Personenstrom befindlichen Menschen

- Physische Daten der Personen
(Alter, Größe, Gewicht, Bekleidung)
- Psychischer Zustand der Personen
- Brandwirkungen (Sichtweite, Rauchgase)

2.6. Flächenbedarf

Der Flächenbedarf ist jene Fläche, die von einer Person im Personenstrom eingenommen wird. In vereinfachter Form kann man die Gesamtfläche der senkrechten Projektionen aller Personen ins Verhältnis zu einer vereinbarten Zählfläche setzen, um die Personenstromdichte auszudrücken. Es sollte beachtet werden, dass der Personenstrom nicht aus gleichartigen Personen besteht.

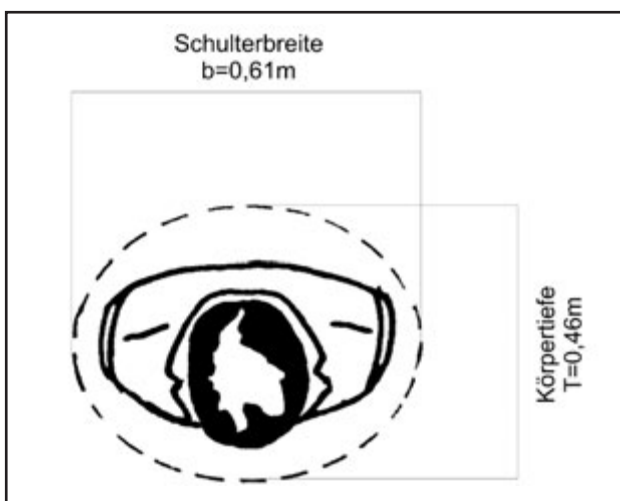


Abbildung 2.2: Abmessungen der Körperellipse nach Fruin [FRU1]

Zur Ermittlung des Flächenbedarfs wird als Vereinfachung eine Ellipse als senkrechte Projektion des Menschen angenommen. Die Achsen der Ellipse werden durch die Breite, gemessen an den Schultern und der Dicke, auf der Höhe der Brust gemessen, festgelegt.

Die Körperellipse von Fruin [FRU1] misst eine Schulterbreite von $b = 0,61$ m und eine Körpertiefe $t = 0,46$ m, somit ergibt sich ein Flächenbedarf von $0,28 \text{ m}^2$ (siehe Abbildung 2.2).

2.7. Brandrauch

Die wesentliche Gefahr bei einem Brand resultiert aus dem Einatmen von narkotisierend und erstickend wirkenden Rauchgasen in Vergiftungserscheinungen, die abhängig sind von dem Zeitraum, über den die Personen den Rauchgaskonzentrationen ausgesetzt sind. Die narkotisierende bzw. erstickende Wirkung des Brandrauches und der akute Sauerstoffmangel (Hypoxia) führen zu einer unmittelbaren Beeinträchtigung des menschlichen Körpers, durch beginnende Hyperventilation, Kopfschmerzen, Übelkeit, Schwindelgefühlen, Bewusstlosigkeit und anschließend dem Tod. Im Gegensatz zu den narkotisch wirkenden Gasen, wird der menschliche Körper von Reizgasen - außer

bei sehr hohen Konzentrationen - nicht sofort so stark belastet, dass es zu einer Handlungsunfähigkeit kommt. Sie beeinträchtigen die Handlungsfähigkeit der Personen aber indirekt, indem sie den sensorischen Bereich beeinflussen und damit u. a. die Orientierung der Personen im Gebäude stark beeinträchtigen. Neben den toxischen Effekten des Brandrauches beeinflusst die Wärmeeinwirkung die individuelle Belastung und damit die für eine Selbstrettung verfügbare Zeitspanne entscheidend. Die Folgen von thermischen Einwirkungen, wie z. B. Hitzeschock, Hautverbrennungen, Verbrennungen des Atmungsapparates können zur Handlungsunfähigkeit und zu schweren körperlichen Schäden bis hin zum Tode führen. In dem Brandrauch sind darüber hinaus flüssige und feste Verbrennungsprodukte enthalten, die mit dem Rauch transportiert werden und vor allem die Sichtweite herabsetzen. Zu den wichtigsten Auswirkungen der durch Rauchbildung reduzierten Sichtweite sind die Verlangsamung flüchtender Personen sowie Schwierigkeiten bei der Orientierung zu nennen.

Für die Bestimmung gesundheitlich relevanter Grenzwerte wurden bestimmte Verfahren entwickelt, wie z. B. die FED-Methode für narkotisierende und erstickende Gase, die FIC-Methode für Reizgase und die $FED_{\text{thermisch}}$ -Methode für die kombinierte Wirkung von Wärmestrahlung und Konvektion. Dennoch muss bei diesen Methoden hinterfragt werden, welche Werte und Grunddaten den angegebenen Grenzwerten zugrunde liegen und wie aussagekräftig diese Ergebnisse tatsächlich sind.

3. Verfahren zur Beurteilung des Schutzes von Personen im Evakuierungsfall

3.1. Nachweiskriterien

Es stehen zwei prinzipielle Verfahren zur Beurteilung des Schutzes von Personen im Evakuierungsfall zur Verfügung. Diese Verfahren sind:

1. deterministische Verfahren
2. ingenieurmäßige Verfahren

In den folgenden Abschnitten 3.2. und 3.3. werden diese Verfahren kurz beschrieben. Die Beurteilung der Evakuierung im Brandfall erfolgt bei den ingenieurmäßigen Verfahren nach verschiedenen Kriterien:

Kriterium I

Es ist nachzuweisen, dass die Evakuierung abgeschlossen ist, bevor die flüchtenden Personen vom Brand direkt betroffen werden. Dies kann erfolgen durch die Festlegung einer raucharmen Schicht von z. B. 2,50 m, wie dies in der deutschen Musterversammlungsstättenverordnung oder der Musterindustriebaurichtlinie geschieht, oder nach Temperaturkriterien entlang der Fluchtwege (z. B. $T < 50^\circ \text{C}$ im Fluchtbereich).

Kriterium II

Es ist nachzuweisen, dass die berechnete Evakuierungszeit deutlich kleiner ist als der Zeitraum bis zum Eintritt lebensbedrohlicher Bedingungen. Dieses Kriterium wird z. B. in den Building Codes von Australien und Neuseeland, sowie in dem Simulationsmodell Exodus angewendet. Diese Methode ist in Deutschland und Österreich nicht üblich.

3.2. Deterministische Verfahren

Bei dieser Methode werden die Breiten und Längen der Flucht- und Rettungswege nach dem heutigen Wissensstand und den Erfahrungen im brandschutztechnischen Bereich bestimmt. Der Grad der Sicherheit dieser Methode, welche die Grundlage für Richtlinien und Bauvorschriften in vielen Ländern bildet, ist nicht bekannt. Der Vorteil dieser Methode ist der, dass sich diese einfach anwenden lässt. Es wird dabei in der Regel angenommen, dass die Vorschriften für verschiedene Gebäudetypen gelten. Die Einhaltung der vorgeschriebenen Fluchtweggeometrie ist als Bemessungskriterium zu verstehen. Internationale Studien zeigen, dass die Evakuierungszeiten für unterschiedliche Gebäudetypen oft erheblich variieren, wenn man die Bestimmungen in den verschiedenen Ländern im Detail vergleicht. Aufgrund dieser Nachteile wurden analytische Methoden für die Planung von Fluchtwegen entwickelt, die zu den ingenieurmäßigen Verfahren zählen.

3.3. Ingenieurmäßige Verfahren

3.3.1. Einführung

Ingenieurmäßige Evakuierungsmodelle umfassen sehr unterschiedliche Verfahren. Sie reichen von einfachen, empirisch abgeleiteten Formeln bis hin zu komplexen rechnergestützten Simulationsmodellen. Es lassen sich dabei drei Hauptgruppen unterscheiden:

- empirisch abgeleitete Formeln zur Durchführung von Kapazitätsanalysen,
- analytische Rechenverfahren, hydraulische Modelle (Strömungsmodelle) und Netzwerkmodelle,
- computergestützte Individualmodelle.

Fortschrittliche Rechenmodelle sollten u. a. die folgenden Eigenschaften aufweisen:

- Die Gebäudegeometrie sollte in allen für den Ablauf der Evakuierung wichtigen Details berücksichtigt werden können.
- Jeder tatsächlich erreichbare Teil des Gebäudes sollte den Personen prinzipiell zugänglich sein. Beschränkungen bezüglich der möglichen Fluchtwege sollten so weit als möglich vermieden werden, damit auch die Räumung von Bereichen mit größeren Freiflächen

(Hallen, Versammlungsräume ohne feste Bestuhlung, Messegelände, Verteilerebenen in Bahnhöfen, Flughäfen oder Stadien etc.) sinnvoll behandelt werden kann.

- Jede Person ist als eigenständige bewegliche Einheit darzustellen. Die den Räumungsprozess unmittelbar beeinflussenden individuellen Eigenschaften wie individueller Raumbedarf und Mobilität sind zu berücksichtigen.
- Die dynamische Ausbreitung von Rauch bzw. toxischen Verbrennungsprodukten sowie die Hitzeeinwirkung sollten Bestandteil der Evakuierungssimulation sein. Dabei sollten neben der eingeschränkten Sichtweite und den kritischen Konzentrationswerten von Rauchgasen auch geeignete Dosis-Wirkungs-Relationen berücksichtigt werden.
- Empirisch ermittelte charakteristische Personenmuster, z. B. bei der Bewegung auf Treppen oder bei Stauungen an Durchgängen und Engpässen, sollten sich konsistent aus dem zugrundeliegenden fundamentalen Bewegungsmodell ergeben, wobei individuelle Verhaltensaspekte zu berücksichtigen sind.
- Die aufgrund der individuellen Einflussfaktoren selbst bei unveränderten Anfangs- und Randbedingungen (d. h. identische Anfangsverteilung der Personen und identische externe Einflussgrößen) nur in gewissen Grenzen vorhersagbare Natur des Evakuierungsprozesses sollte sich auch in der Simulation widerspiegeln.

3.3.2. Kapazitätsanalysen nach NFPA 130

Ein übliches Maß für die Kapazität ist die maximale Anzahl der Personen, die pro Zeiteinheit einen Bereich definierter Breite passieren kann. Multipliziert man diese Größe mit der effektiven Breite des betreffenden Wegelementes, so erhält man den zugehörigen maximal möglichen Personenstrom, also die Anzahl der Personen, die pro Zeiteinheit den betreffenden Ausgang oder eine bestimmte Stelle der Treppe bzw. des Korridors durchqueren können. Die effektive Breite berücksichtigt den Umstand, dass Personen in der Regel nicht die gesamte verfügbare geometrische Breite ausnutzen, sondern einen gewissen Mindestabstand zu den Begrenzungen einhalten. Die Anwendung der Kapazitätsanalyse reduziert sich im Wesentlichen auf die Aufgabenstellung, das Wegelement mit der geringsten Kapazität herauszufinden. Dieses wirkt als „Nadelöhr“ und bestimmt somit die mögliche Räumungszeit. Die in den USA entwickelte Berechnungsmethode, die in der von der NFPA (National Fire Protection Association) herausgegebenen Norm NFPA 130: Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems, aus dem Jahr 2000 enthalten ist, beschäftigt sich mit den Anforderungen an den Brandschutz bei schienengebundenen Verkehrssystemen, die der Personenbeförderung dienen. Im Kapitel 2 dieser Richtlinie werden brandschutztechnische Anforderungen für die Stationen festgelegt und u. a. Vorgaben für die Kapazitätsberechnung der Fluchtwege getroffen, die hier auszugsweise wiedergegeben werden.

Die Kapazität in Personen pro Meter pro Minute und die Gehgeschwindigkeit in Meter pro Minute werden gemäß den in Tabelle 3.1, nach NFPA 130 zusammengefassten Werten, festgelegt:

3.3.3. Analytische Verfahren

Bei dieser Methode wird die Zeitspanne, die für die gesamte Evakuierung benötigt wird, mit der Zeitspanne, die für das Verlassen eines jeden Gebäudeteils zur Verfügung steht, verglichen. Das Kriterium für eine sichere Evakuierung ist, dass die Zeit die zur Verfügung steht größer ist als die Zeit, die für die Flucht benötigt wird.

Ein Nachweis nach dem Kriterium I kann in den folgenden Schritten erfolgen:

1. Festlegung des maßgebenden Brandszenariums
2. Durchführung der Brandsimulation
3. Bestimmung der zeitabhängigen Verrauchung und der raucharmen Schichten z. B. mit dem Brandsimulationsmodell MRFC; d. h. es ist die Zeit t_{HR} zu bestimmen, bis die die Rauchsicht eine festgelegte Höhe erreicht hat (z. B. 2,50 m).
4. Berechnung der Entfluchtungszeit t_{ev}
5. Nachweisformel: $t_{ev} \leq t_{HR}$

Die Anwendung des Kriteriums I setzt ein fundiertes Wissen über das Verhalten, die physischen Fähigkeiten und die sozialen Beziehungen der Menschen während der Evakuierung voraus. In den letzten Jahren wurden große Fortschritte in diesem Bereich erzielt und man kann davon ausgehen, dass diese Methode in Zukunft Verwendung finden wird [FRA1]. Im Building Code von Neuseeland [NZB1] sind z. B. Richtlinien für die Ermittlung der Evakuierungszeit und die daraus resultierende Dimensionierung der Fluchtwege in Gebäuden angegeben.

Grundsätzlich gilt, dass die Zeitdauer t_{ev} , um einen bestimmten Bereich zu evakuieren, kleiner sein muss als die Zeit t_{lt} , die erforderlich ist, bis lebensbedrohliche Bedingungen in diesem Bereich vorherrschen. Aus diesem Grund wird die Gleichung Gl. (3.1) mit einem Sicherheitsfaktor SF ergänzt:

$$t_{ev} \cdot SF < t_{lt} \quad [s] \tag{3.1}$$

Darin sind:

- t_{ev} kalkulierte Evakuierungszeit gemessen ab der Brandentstehung [s]
- SF Sicherheitsfaktor [-]
- t_{lt} Zeitraum für lebensbedrohliche Bedingungen, gemessen ab der Brandentstehung [s]

Die Berechnungen der Evakuierungszeit t_{ev} variieren aufgrund der physischen und psychischen Eigenschaften der Personen erheblich und können nur einen ungefähren Wert darstellen. Für eine erwachsene Durchschnittsperson wird ein Sicherheitsfaktor SF von 2,0 vorgeschlagen, für Kinder, ältere und behinderte Menschen muss er entsprechend erhöht werden.

Die gesamte Evakuierungszeit t_{ev} ist bestimmt durch die Zeitdauer t_d von der Entstehung des Brandes bis zur Brandentdeckung, die Zeitspanne t_a von der Branddetektion bis zum Auslösen des Alarms, dem Zeitraum t_p , den die Gebäudebenutzer brauchen um zu reagieren, bevor sie erste Schritte setzen. t_i ist jene Zeit, die benötigt wird um das Feuer zu untersuchen, dagegen anzukämpfen und persönliche Gegenstände für die Flucht zusammenzusuchen und die Zeitspanne t_m vom Start der Flucht, passieren der Fluchtroute mit Orientierungsschwierigkeiten und Personenstaus, bis zum Erreichen eines geschützten Bereiches.

Bahnsteige, Gänge und Rampen mit einer Neigung von $\leq 4 \%$		
	Kapazität	89,4 Pers./(m min)
	Gehgeschwindigkeit	61,0 m/min
Stiegen, stehende Fahrtreppen und Rampen mit einer Neigung $> 4 \%$		
aufwärts	Kapazität	62,6 Pers./(m min)
	Gehgeschwindigkeit	15,24 m/min (vertikale Komponente)
abwärts	Kapazität	71,6 Pers./(m min)
	Gehgeschwindigkeit	18,3 m/min (vertikale Komponente)
Türen und Ausgänge		
	Kapazität	89,4 Pers./(m min)
Bahnsteigzugangskontrollen		
allgemein	Kapazität	50 Pers./min pro Schranken
Drehkreuz	Kapazität	25 Pers./min pro Drehkreuz

Tabelle 3.1: Kapazitäten und Gehgeschwindigkeiten für die Erschließungszonen einer Stationsanlage nach NFPA 130

Die gesamte Evakuierungszeit t_{ev} kann daher nach der Gleichung Gl. (3.2) folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$t_{ev} = t_d + t_a + t_p + t_i + t_m \quad [s] \quad \text{Gl. (3.2)}$$

Darin sind:

- t_{ev} gesamte Evakuierungszeit [s]
- t_d Zeitraum von der Brandentstehung bis zur Branddetektion [s]
- t_a Zeitraum von der Branddetektion bis zum Alarm [s]
- t_p Zeitraum von der Reaktion auf die Gefahr bis zum Start der Bewegung [s]
- t_i Zeitraum zur Untersuchung und Bekämpfung des Feuers [s]
- t_m Zeitraum vom Start der Flucht bis zum Erreichen eines geschützten Bereiches [s]

Die Zeitspanne t_a für automatische Brandmeldesysteme ist abhängig vom gewählten Detektionssystem und berechenbar. Die Methoden um von Menschen ausgelöste Alarmer zu berechnen, enthalten hingegen einen enorm großen Unsicherheitsfaktor.

Dieselbe unsichere Variable für das menschliche Verhalten beinhalten die Zeitspannen t_p und t_i , doch gibt es aufgrund gesammelter Daten von tatsächlich durchgeführten und simulierten Evakuierungen geschätzte Erkennungszeiten und Richtwerte, die in den Tabellen 3.2 und 3.3 für unterschiedliche Gebäudetypen und in Abhängigkeit von dem gewählten Alarmierungssystem angeführt sind:

Um detaillierte Aussagen über die Reaktionszeit zu gewinnen, wurde in speziellen Studien (z. B. Interviews, Fragebögen) versucht die unterschiedlichen Verhaltensweisen der Personen und Personengruppen zu analysieren. Dabei wurde festgestellt, dass das menschliche Verhalten vor allem beeinflusst wird von:

- der Gestaltung des Gebäudes (Fluchtwegführung etc.) und
- den physikalischen Einflussgrößen, wie Hitze- und Braundrauchentwicklung.

Es kann zu unterschiedlichen Reaktionen der Personen kommen, diese sind abhängig davon, ob die Erkennung des Brandes durch Brandgeruch oder durch offensichtliche Hinweise, wie Flammen und Rauchschwaden, erfolgt. In diesem Zusammenhang muss erwähnt werden, dass die wichtigsten individuellen Entscheidungen stattfinden bevor die Rettungsmannschaften eintreffen, und dass die Verhaltensreaktionen in lebensbedrohenden Situationen die Evakuierungszeit stark beeinflussen und diese grundsätzlich schwer berechenbar machen.

Die Zeitdauer t_m , um zu einem Bereich der Sicherheit zu gelangen, ist von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängig. Dazu zählen nach [CHA1] im Wesentlichen:

- Anzahl der Gebäudebenutzer
- Bewegungsgeschwindigkeit der Personen
- Gebäudedesign und -nutzung

Gebäudetyp	Reaktionszeit [min]		
	Anweisungen durch Lautsprecheresystem	Bandansage	Alarmglocke oder -sirene
Bürogebäude, Handels- und Industrieflächen (Benutzer sind wachsam - mit dem Gebäude vertraut)	< 1 min	3 min	> 4 min
Geschäfte und Veranstaltungsgebäude (Benutzer sind wachsam - mit dem Gebäude nicht vertraut)	< 2 min	3 min	> 6 min

Tabelle 3.2: Richtwerte für Reaktionszeiten abhängig vom Gebäudetyp, von der Art des Warnsystems sowie der Vertrautheit mit dem Gebäude nach [BST1]

Warnsystem	Reaktionszeit [min]		
	Gute Reaktionszeit mit Räumungs- und Evakuierungsübungen	Durchschnittliche Reaktionszeit	Schlechte Reaktionszeit ohne Räumungs- und Evakuierungsübungen
Alarmsirene	< 4 min	7 min	> 10 min
Alarmsirene mit auf- u. abschwellendem Ton	< 3 min	5 min	> 7 min
Alarmsirene mit auf- u. abschwellendem Ton sowie einer zusätzl. Informationsnachricht	< 2 min	3,5 min	> 5 min
Alarmsirene mit auf- u. abschwellendem Ton sowie mit zusätzlichem optischen Informationssystem (z. B. mittels Bildschirmen)	< 1 min	2 min	> 3 min

Tabelle 3.3: Richtwerte für Reaktionszeiten abhängig von der Art des Warnsystems sowie dem „Brandschutztraining“ nach [FEG1]

- Wegführung (horizontal, vertikal z. B. Treppen und Rampen, Wegverengung)
- Anzahl der im Personenstrom befindlichen Menschen
- Physische Daten der Personen (Alter, Größe, Gewicht, Bekleidung)
- Psychischer Zustand der Personen

In dieser Zusammenstellung sind die negativen Auswirkungen des Brandes selbst bei der Flucht oder Rettung praktisch nicht enthalten.

3.3.4. Berechnungsverfahren nach Predtetschenski und Milinski

3.3.4.1. Allgemeines

Die russischen Wissenschaftler Predtetschenski und Milinski [PRE1] haben bereits in den 70-er-Jahren eine Methode erarbeitet, in der die mathematischen Grundlagen für die Berechnung von Personenströme auf verschiedenen Wegabschnitten in Abhängigkeit von der Personendichte festgelegt wurden. Diese Berechnungsmethode ist zunächst für normale Personenströme entwickelt worden. Später wurde sie zur Berechnung von Personenströmen unter Gefahrenbedingungen erweitert.

Die Berechnungen stützen sich diesbezüglich auf „angeneherte Gefahrenbedingungen“, wie z. B. eine Zwangsevakuation eines Gebäudes, oder auf Extrapolation von Werten, die man sonst unter normalen Bedingungen erhält. Die irrationalen Reaktionen von Personen auf eine konkrete Gefahr, die Panikreaktion, bleibt als nicht berechenbar unberücksichtigt.

Im Unterschied zu anderen Berechnungsmethoden wird in [PRE1] die Entleerung von Gebäuden nicht anhand eines mittleren Personenflusses ermittelt, sondern es wird untersucht, wie die Veränderung der Bewegungsgleichungen, sowie der gesamte Bewegungsablauf des Personenstromes auf horizontalen oder geneigten Wegabschnitten mit unterschiedlichen Breiten in Abhängigkeit der Personendichte, die Evakuierung beeinflusst.

Nach [PRE1] unterscheidet man verschiedene Arten der Bewegung:

- *Die gerichtete Bewegung:* Es treten bestimmte Bewegungsrichtungen hervor, die in einer gewissen Zeitspanne erhalten bleiben, z. B. beim Verlassen eines Theaters etc.
- *Die ungerichtete Bewegung:* Ist jene Bewegung, bei der sich die Menschen auf einem bestimmten Abschnitt des Weges in verschiedenen, oft zufälligen und sich ständig ändernden Richtungen bewegen, z. B. auf Einkaufsstraße und Marktplätzen etc.
- *Die übereinstimmende Bewegung:* Die Menschenmasse geht im Gleichschritt, mit gleicher Schrittlänge und Geschwindigkeit, z. B. beim Militär

- *Die nicht übereinstimmende Bewegung:* Jeder Mensch hat eine eigene Schrittlänge und Schrittzahl, abhängig von der Personengröße und den physischen Eigenschaften
- *Die freie Bewegung:* Jeder Mensch kann in einem beliebigen Moment, Geschwindigkeit und Richtung der Bewegung verändern, z. B. auf Gehwegen und Gängen etc.
- *Die eingeschränkte Bewegung:* Die Dichte des Stromes begrenzt die freie Bewegung, z. B. in Zuschauersäle, auf Tribünen nach der Beendigung der Veranstaltung, in U-Bahnstationen zu Stoßzeiten etc.
- *Die langdauernde Bewegung:* Diese Bewegung vollzieht sich in einer entsprechenden Zeitdauer, sie beginnt nach und nach und wird allmählich beendet, z. B. beim Füllen von Tribünen, Bewegung in großen Kaufhäusern etc.
- *Die kurzzeitige Bewegung:* Diese Bewegung vollzieht sich in einer kurzen Zeitspanne, z. B. die Evakuierung von Menschen

Für die Bestimmung der Bewegung eines Personenstromes sind folgende Einflussgrößen ausschlaggebend:

- Bewegungsgeschwindigkeit
- Flächenbedarf pro Person

3.3.4.2. Bewegungsgeschwindigkeit nach Predtetschenski und Milinski

Predtetschenski und Milinski [PRE1] haben die Bewegungsgeschwindigkeit und die Dichte der Personenströme unter verschiedenen Bedingungen gemessen. Die Ergebnisse von Messungen zeigten, dass die Bewegungsgeschwindigkeit eine Funktion der Dichte des Personenstromes, der Art des Weges und der Bewegungsbedingung ist. Der Zusammenhang der ersten beiden Faktoren ist für Gefahrenbedingungen in der folgenden Abbildung 3.1 auf der nächsten Seite dargestellt.

Gleichzeitig stellten sie fest, dass sich bei ein- und derselben Dichte die Bewegungsgeschwindigkeit eines Stromes stark ändern kann. Diese Schwankungen des Stromes ergeben sich aus der Individualität der Menschen. Je geringer die Freiheiten der Bewegung sind, desto größer ist die Dichte des Stromes und umgekehrt. In den Grenzen der entsprechenden Geschwindigkeitsschwankungen können die Menschen ihre Geschwindigkeit nach eigenem Ermessen verändern.

Der Wunsch, die Bewegungsgeschwindigkeit zu ändern, entsteht unter dem Einfluss der umgebenden Bedingungen und der Ursachen, die die Bewegung des Stromes hervorruft. Dieser Umstand bestimmt den dritten Faktor, den psychologischen Faktor, von dem die Bewegungsgeschwindigkeit ebenfalls abhängt. Das bedeutet, dass die Bewegungsgeschwindigkeit als Funktion der Dichte, der Art des Weges und den psychologischen Umständen zu sehen ist.

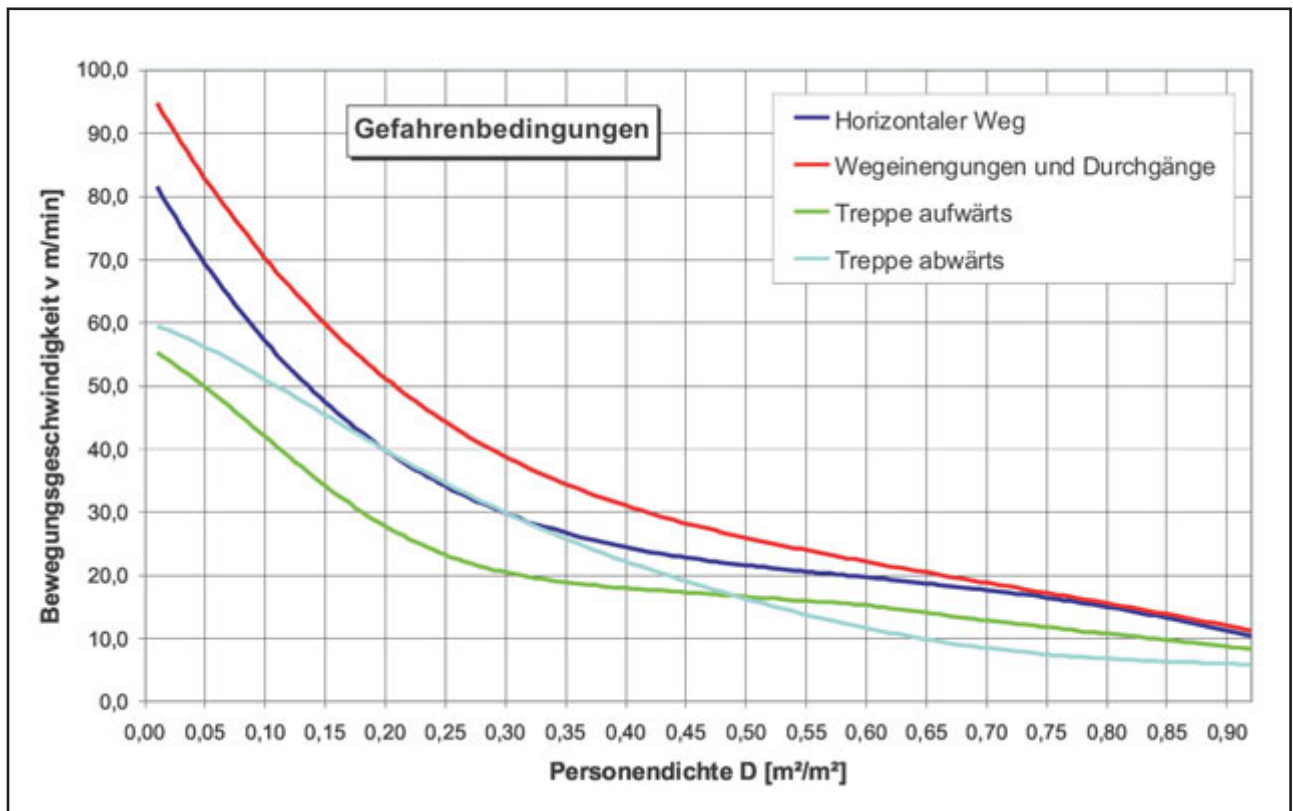


Abbildung 3.1: Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit von der Personendichte für Gefahrenbedingungen nach [PRE1]

Unter Gefahrenbedingungen spielt der psychologische Faktor eine große Rolle und es vergrößert sich folglich die Bewegungsgeschwindigkeit bei gleichbleibender Dichte des Stromes. Der Koeffizient der Bewegungsbedingungen für die Bewegungsgeschwindigkeit, der die psychische Verfassung des Menschen berücksichtigt, wird als Größe μ bezeichnet und erreicht unter unterschiedlichen Bedingungen folgende Werte:

- für normale Bedingungen: $\mu = 1$
- für Gefahrenbedingungen: $\mu_G = 1,15$ bis $1,49$
- für komfortable Bedingungen: $\mu_K = 0,63$ bis $0,86$

Mit Hilfe dieses Koeffizienten μ_G bzw. μ_K kann die Bewegungsgeschwindigkeit unter Gefahrenbedingungen v_G bzw. unter Komfortbedingungen v_K , ausgehend von der Geschwindigkeit unter Normalbedingungen v , nach der folgenden Gleichung Gl. (3.3) bzw. Gl. (3.4) ermittelt werden.

$$v_G = \mu_G \cdot v \quad \text{Gl. (3.3)}$$

$$v_K = \mu_K \cdot v \quad \text{Gl. (3.4)}$$

Der psychologische Faktor μ spielt bei geringeren Dichten eine weitaus größere Rolle als bei hohen Personendichten. Bei sehr hohen Personendichten sind die Bewegungsgeschwindigkeiten der einzelnen Bewegungsbedingungen annähernd gleich.

3.3.4.3. Flächenbedarf nach Predtetschenski und Milinski
Es wurde beobachtet, dass jede Person versucht, zwischen

sich und den anderen Personen einen „Pufferraum“ zu bewahren. Dieser „Pufferraum“ dient dazu, dass Konfliktsituationen vermieden werden. Zur Ermittlung des Flächenbedarfs wird als Vereinfachung eine Ellipse als senkrechte Projektion des Menschen angenommen. Die Achsen der Ellipse werden durch die Breite, gemessen an den Schultern und der Dicke, auf der Höhe der Brust gemessen, festgelegt.

Die Abmessungen des Menschen selbst werden von seinen physischen Werten, dem Alter und der Kleidung bestimmt. Auf der Grundlage von Messungen sind in Tabelle 3.4 gemittelte Abmessungen von Menschen unterschiedlichen Alters und in verschiedener Kleidung aufgeführt.

3.3.4.4. Struktur des Personenstroms

Bei massenartigen, nicht übereinstimmenden, gerichteten, beschränkten oder freien, kurzzeitigen oder langandauernden Bewegungen, die unter normalen oder Gefahrenbedingungen verlaufen, bilden Menschen einen Strom in eine Richtung mit der Breite $b \cdot 2 \cdot \Delta b$ und der Länge l_{Strom} .

Dabei ist b die Breite des Stromes und Δb der Zwischenraum, der durch das Schwanken beim Laufen oder durch Angst vor dem Anstoßen an die Konstruktion, entsteht.

Wie Abbildung 3.2 zeigt, bildet der Personenstrom beim Kopf- und Fußteil jeweils eine geringere Personenzahl als der Hauptteil aus, es entsteht die Form einer Zigarre.

Alter, Bekleidung und Gepäck der Person	Fläche f^* [m ² / Pers.]
Kind	0,04...0,06
Jugendlicher	0,06...0,09
Erwachsener	
in Sommerkleidung bzw. Hauskleidung	0,100
in Übergangsstraßenkleidung	0,113
in Winterstraßenkleidung	0,125
Erwachsener in Übergangsstraßenkleidung	
mit leichtem Gepäck	0,180
mit Koffer	0,240
mit Rucksack	0,260
mit schwerem Gepäck	0,390
mit einem Kind am Arm	0,260
mit einem Kind an der Hand	0,200
mit einem Kind an der Hand und Gepäck	0,320

Tabelle 3.4: Zusammenstellung der unterschiedlich beanspruchten Flächen nach [PRE1]

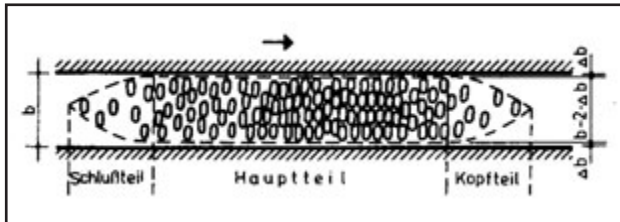


Abbildung 3.2: Schema eines Personenstromes

Da die Menschenmenge am Kopf- und Fußteil relativ klein ist, kann man den Strom vereinfacht als Rechteck betrachten. Die Stromdichte D ist unterschiedlich, da die Verteilung der Menschen, sowohl in der Längs- wie auch in der Querrichtung, ungleichmäßig ist. Die Entfernung zwischen den gehenden Menschen verändert sich ständig, es entstehen örtliche Verdichtungen, die sich wieder auflösen und erneut entstehen. Bei massenartiger, nicht übereinstimmender, gerichteter, beschränkter oder freier und langandauernder Bewegung (z. B. in Kaufhäusern) verliert der Begriff der Länge des Stromes l_{Strom} an Bedeutung, weil die Bewegung hier kontinuierlich erfolgt.

3.4. Computergestützte Simulationsverfahren

3.4.1. Einführung

Für die Entfluchtungsberechnung von Bauwerken, auch unter Gefahrenbedingungen, kommen hauptsächlich ingenieurmäßige Verfahren zum Einsatz. Simulationsverfahren werden in der Regel dort eingesetzt wo:

- komplexe Geometrien (Dimensionen, Wegführungen)
- große Personenzahlen

vorliegen.

Des Weiteren bieten Simulationsverfahren, sofern sie das menschliche Verhalten in einem bestimmten Umfang modellieren, die Möglichkeit auch probabilistisch orientierte Untersuchungen durchzuführen. Dies ist dann von Vorteil, wenn in einem Brandschutzkonzept auf sicherheitstheoretische Verfahren zurückgegriffen wird und in der zugrundeliegenden Fragestellung eine Reihe von Unsicherheiten vorliegt, die deterministisch nicht zu erfassen sind.

Die Notwendigkeit der Durchführung von wiederholten Berechnungen ist offenkundig, da selbst unter kontrollierten Bedingungen niemals identische Ergebnisse bei Evakuierungsübungen mit realen Personen auftreten. Deshalb ist es auch nicht möglich exakte Aussagen wie „die Evakuierungszeit des Gebäudes beträgt 187,7 Sekunden“, zu treffen. Vielmehr wird für jede Kombination von Gebäude-Personen-Umwelt in der Realität eine Verteilung der Entfluchtungszeit erwartet. Eine rein hypothetische Verteilung ist in der Abbildung 3.3 gezeigt. Eine einzelne Berechnung oder eine Evakuierungsübung kann irgendwo auf dieser Kurve liegen. Was durch probabilistisch orientierte Simulationen erreicht werden kann, ist das Verständnis, wie ein System aus Gebäude-Personen-Umwelt sich unter bestimmten definierten Bedingungen verhalten wird [GAL1].

Bei den Simulationsverfahren kann grundsätzlich unterschieden werden zwischen

- Verfahren mit Zeit und Ortsdiskretisierung
- Verfahren nur mit Zeitdiskretisierung

Für die Ortsdiskretisierung stehen zwei Ansätze zur Verfügung:

- feinmaschiges Netz (fine Network)
- grobmaschiges Netz (coarse Network)

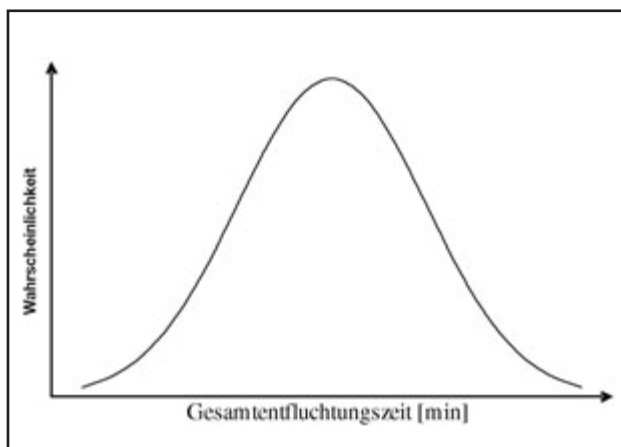


Abbildung 3.3: Hypothetische Verteilung der Gesamtentfluchtungszeit

Beim Ansatz mit einem feinmaschigen Netz wird die gesamte Grundfläche des Gebäudes in einzelne Zellen oder Knoten zerlegt. Form und Größe der einzelnen Knoten variieren bei den verschiedenen Simulationsprogrammen, von quadratischen Zellen mit 50 cm Seitenlänge bis zu hexagonalen Knoten, die der Größe einer Person entsprechen. Jede Zelle ist mit ihren Nachbarzellen verbunden. Bei großen Gebäuden kann dieses Netz mehrere tausend Zellen umfassen. Auf diese Weise ist es möglich, die Geometrie genau darzustellen, sowie interne Hindernisse zu berücksichtigen und jede Person zu jeder beliebigen Zeit der Evakuierung zu lokalisieren.

Der Ansatz mit einem grobmaschigen Netz teilt die Geometrie in Bereiche, die von der tatsächlichen Anordnung abgeleitet wird. Dabei stellt jede Zelle einen Raum oder Gang dar, ungeachtet seiner physischen Größe. Die Zellen sind durch Bögen miteinander verbunden, welche die tatsächlichen Verbindungen im Gebäude darstellen. In solchen Modellen bewegen sich die Personen von einem Abschnitt zum nächsten, wobei ihre Position weniger genau bestimmt werden kann als bei einem feinmaschigen Netz. Eine Person kann sich deshalb nur von einem Raum in den nächsten bewegen, anstatt von einem Bereich innerhalb eines Raumes zu einem anderen.

Auch für die Darstellung der zu evakuierenden Personen gibt es zwei verschiedene Ansätze:

- eine individuelle und
- eine globale Betrachtungsweise.

Bei den meisten Modellen können den Personen individuelle Eigenschaften zugewiesen werden, die in der Folge bei der Bewegung und der Entscheidungsfindung des Individuums berücksichtigt werden. Bei einer individuellen Zuordnung von Eigenschaften ist diese Entscheidungsfindung üblicherweise unabhängig von anderen in die Simulation einbezogenen Personen und erlaubt es der Einzelperson gewissen Trajektorien zu folgen.

Die gesamte Personenmenge kann folglich aus einzelnen Personen mit unterschiedlichen Eigenschaften zusammengesetzt sein, deren Entfluchtung dann von diesen Eigenschaften beeinflusst wird. Ein Beispiel dafür ist das Rechenprogramm EXODUS.

Weiters kann nach der Art der Behandlung der Abbildung des menschlichen Verhaltens unterschieden werden zwischen:

- keine spezifischen Verhaltensregeln
Verhalten wird durch physikalische Modelle simuliert (z. B. elektrostatische Anziehung bzw. Abstoßung).
- implizites Verhalten; d. h. es werden keine Verhaltensregeln festgelegt, aber es wird angenommen, dass sie durch die Verwendung von komplizierten physikalischen Modellen dargestellt werden, die auf der Anwendung von Sekundärdaten beruhen, welche psychologische oder soziologische Einflüsse beinhalten,
- regelbasiertes Verhalten (wenn ich nicht weiter kann, bleibe ich stehen)
- auf künstlicher Intelligenz basierende Verhaltenssysteme

Grundsätzlich steht das menschliche Verhalten, das bei einer Evakuierung zu erwarten ist, in einem komplexen Zusammenhang mit der Umgebung. Die Personen können von drei verschiedenen Interaktionen betroffen werden, die Entscheidungsprozesse beeinflussen:

- Interaktion mit anderen Personen
- Interaktionen mit der baulichen Umgebung
- Interaktionen mit der Umwelt (Rauchgase etc.)

Diese Interaktionen wirken sich auf die Bewegung der Personen aus und lösen Entscheidungsfindungsprozesse aus, die durch die Art wie die Interaktion erfolgt, weiter erschwert werden. Die Interaktionen können auf drei Ebenen verfolgt werden:

- *Psychologische Ebene:* Die Antwort einer Person basierend auf der verfügbaren Information und ihren Erfahrungen (z. B. Flucht vor dem Feuer)
- *Soziologische Ebene:* Die Antwort einer Person basierend auf der Interaktion mit anderen Personen (z. B. initiieren einer Evakuierung, Warnung anderer Personen)
- *Physiologische Ebene:* Eine physische Reaktion auf die umgebende Umwelt (z. B. Berauschtigkeit aufgrund von narkotisierenden Rauchgasen, Reizung der Sinnes- und Atmungsorgane aufgrund von Reizgasen)

Das menschliche Verhalten ist der am komplexesten und schwierigsten zu simulierende Aspekt einer Evakuierung. Kein Modell beinhaltet sämtliche bekannte Verhaltensaspekte einer Evakuierung, zumal nicht alle Aspekte berücksichtigt bzw. quantifiziert werden können. Bei der globalen Betrachtungsweise werden die Personen als homogene Menge ohne unterschiedliche Identitäten angesehen.

hen. Diese Modelle liefern als Ergebnis keine Angabe darüber, welche Einzelperson entfluchtet wird. Als Ergebnis erhält man lediglich eine Zeitangabe über die Anzahl von Personen die evakuiert wurden. Dieser Ansatz besitzt Vorteile hinsichtlich der Rechengeschwindigkeit und der einfacheren Handhabung der Eingabegrößen, wobei jedoch der Detaillierungsgrad der Ergebnisse deutlich geringer ist als bei der individuellen Betrachtungsweise. Es ergeben sich u. a. auch Probleme bei der Berücksichtigung von z. B. toxischen Rauchgasen auf die betroffenen Personen. Es kann lediglich eine gemittelte Einwirkung auf die Personengruppe angesetzt werden, woraus keine Aussagen über die Überlebensrate von speziellen Personengruppen, wie z. B. älteren Personen oder Kindern, ableitbar sind.

3.4.2. Zelluläre Automaten

Bei den Simulationsverfahren mit zellulären Automaten wird der Mensch als Automat dargestellt, der sich in einem diskretisierten Raum in festgelegten Zeitschritten bewegt. Zelluläre Automaten im ursprünglichen Sinne sind diskrete Modelle in Raum und Zeit. Der Raum wird durch ein regelmäßiges dreidimensionales Gitter modelliert, das verschiedene Symmetrien aufweisen kann (in zwei Dimensionen beispielsweise quadratisch, hexagonal usw.). Die Randbedingungen sind beliebig wählbar. Die Elemente des Gitters bestehen aus gleichartigen Zellen, die sich jeweils in genau einem Zustand aus einer bestimmten (endlichen) Zustandsmenge befinden. Jede Zelle steht in Kontakt zu einer festen Anzahl von Nachbarn und hat Zugriff auf die Zustandsinformation dieser Nachbarn (beim Quadratgitter sind beispielsweise vier oder acht Nachbarn sinnvoll).

Die Entwicklung einer gegebenen Zelle wird beschrieben durch eine Übergangsfunktion, die für alle Zellen gleichermaßen gilt. Sie hängt vom Zustand der Zelle selber und denen ihrer Nachbarn zur aktuellen Zeit ab (und in gewissen Varianten auch zu einer endlichen Anzahl von vorhergehenden Zeitschritten). Diese Funktion kann deterministisch sein oder Zufallselemente enthalten, man spricht dann von probabilistischen zellulären Automaten. Die Übergangsfunktion bestimmt den Zustand der Zelle im nächsten Zeitschritt.

3.4.3. Panikmodelle

Zur Simulation der Auswirkungen von Panik wurden von Helbig [HEL1] et al. Panikmodelle entwickelt, die auf einem Kräftewirkungsmodell beruhen. Auf die Person wirken verschiedene soziale Kräfte, welche die unterschiedlichen Umwelteinflüsse widerspiegeln. Diese einzelnen Kräfte können vektoriell addiert werden. Für die Simulation von Personen in Panik wird das Kräftemodell um physische Interaktionskräfte erweitert, die dann auftreten, wenn sich die Personen so nahe kommen, dass Körperkontakt auftritt. Es werden zusätzlich eine der Körper-

kompression entgegenwirkende „Körperkraft“ und eine die Tangentialbewegung hemmende „Gleitreibungskraft“ angesetzt. Feuerfronten werden in diesem Modell durch abstoßende soziale Kräfte ähnlich jenen wiedergegeben, die Wände beschreiben, allerdings sie sind viel stärker. Die physikalischen Interaktionen sind jedoch qualitativ anders, da Personen, spätestens wenn sie von der Feuerfront erfasst werden, verletzt und/oder bewegungsunfähig werden ($v_i = 0$). Es gibt derzeit keinen wissenschaftlichen Nachweis hinsichtlich der Aussagefähigkeit und Richtigkeit dieser Panikmodelle.

4. Zusammenfassung

Die Gewährleistung der Personensicherheit in Gebäuden ist ein zentrales Anliegen des baulichen, betrieblichen und abwehrenden Brandschutzes. Eine wesentliche Einflussgröße für den Personenschutz im Brandfall stellt die Sicherstellung einer zeitgerechten Evakuierung eines Gebäudes dar. Zu beachten ist in diesem Zusammenhang, dass viele Gesetze, Richtlinien und Verordnungen, die sich mit Evakuierungen befassen, häufig nur auf sehr vereinfachten Anwendungsregeln basieren.

Die Abbildung 4.1 zeigt, dass der Mensch mit all seinen Aktionen und Reaktionen das zentrale Element für die Erstellung eines Evakuierungskonzeptes bildet. Weitere wesentliche Einflussgrößen stellen die umgebenden Faktoren, wie das Gebäude (z. B. Design, Dimensionierung), die Umgebung (z. B. Brandwirkungen), betriebliche und organisatorische Maßnahmen (z. B. Alarmsysteme, Hinweisbeschilderung, Evakuierungsübungen) dar. Diese stehen in starken Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zueinander. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass bei Vorliegen von guten betrieblichen und organisatorischen Rah-

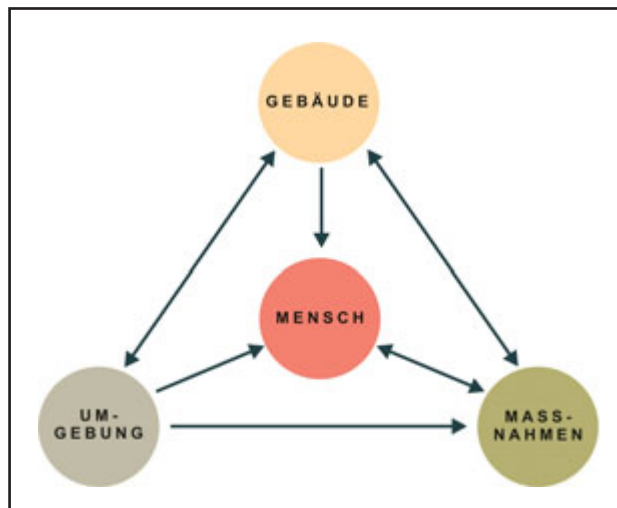


Abbildung 4.1: Schema der Einflussfaktoren und ihre Wechselwirkungen auf die Evakuierung

menbedingungen eine relativ kurze Zeitspanne (Reaktionszeit) zwischen dem Erkennen eines Brandes und der erfolgreichen Einleitung der Evakuierung angenommen werden kann.

Die Abmessungen innerhalb eines Gebäudes haben eine große Auswirkung auf das Brandgeschehen und die einsetzende Flucht von Personen. Die Größen Personendichte, Bewegungsgeschwindigkeit und Flächenbedarf stehen in enger Abhängigkeit zur Wegbreite. Die für Evakuierungsberechnungen wichtige Gehzeit wird im Wesentlichen durch die oben beschriebenen Faktoren und die Länge des Fluchtweges bestimmt.

Zu den umgebungsspezifischen Einflussgrößen zählen die Auswirkungen des Brandszenariums, im Besonderen die Freisetzung von Brandrauch, sowie die thermische Wirkung des Feuers. Die Zusammensetzung des Brandrauchs hängt u. a. ab von der Art der brennenden Materialien, der Verbrennungstemperatur und den Ventilationsbedingungen. Um eine Beurteilung des im Brandfall anfallenden Brandrauches zu ermöglichen, ist es notwendig, die Rauchverdünnung in der raucharmen Schicht zu berechnen, um daraus die gesundheitlichen Beeinträchtigungen für die Personen zu ermitteln. Für normale Holzbrände werden in der Literatur zulässige Verdünnungsfaktoren von 1:100 genannt, diese steigen bei stark qualmenden Stoffen (Dieselöl) auf 1:1000 an (bei gleicher Sichtweite).

Obwohl es große Fortschritte auf dem Gebiet der Berechnungs- und Simulationsmethoden mit Computermodellen zur Berechnung der Evakuierungszeit gegeben hat, muss man feststellen, dass viele der oben erwähnten Faktoren oft keine Berücksichtigung finden. Vor allem werden Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Einflussgrößen nur in einem geringen Ausmaß bzw. gar nicht berücksichtigt. Insbesondere werden Brände als Ursache der Evakuierung in den meisten Evakuierungsmodellen gar nicht behandelt. Es stellt sich somit zwangsläufig die Frage welche Bedeutung eine berechnete Evakuierungszeit von „X“ Minuten überhaupt hat, wenn das Brandgeschehen nicht berücksichtigt wurde. In so einem Fall verbleibt dann lediglich die Möglichkeit des Nachweises der Rauchfreiheit oder Rauchverdünnung für den gesamten Entfluchtungszeitraum.

5. Literaturzusammenstellung

- [BOD1] *Bodamer, M.*: Verhalten von Menschen bei Brandgefahren. vfdB-Zeitschrift Forschung und Technik im Brandschutz 2. 1989, S. 47-48
- [BST1] *British Standards BS DD 240*: Fire Engineering in Buildings. British Standards, UK 1997

- [CHA1] *Charters, D. et al.*: Analysis of the Number of Occupants, Detection Times and Pre-Movement Times. 2nd International Symposium on Human Behaviour in Fire. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Boston(MA), USA. March 2001, S. 197-207
- [FEG1] *FEG*: Fire Engineering Guidelines, Fire Code Reform Centre, Sydney, Australia, 1996
- [FRA1] *Frantzich, H.*: A model for performance - based design of escape routes. Report 1011. Dept. of Fire Safety Eng. Lund Institute of Technology. Lund, 1994
- [FRU1] *Fruin, J.J.*: Designing for Pedestrians. A Level of Service Concept. Polytechnical Institute of Brooklyn.Ph.D., 1970
- [GAL1] *Galea, E.; Gwynne, S.*: A review of the methodologies used in the computer simulation of evacuation from the building environment. Building and Environment 34; 1999
- [HEL1] *Helbing D. et. al.*: Simulation von Fußgängermengen in normalen Situationen und im Evakuierungsfall, Vortrag bei der AGE Zentralveranstaltung 2002, Ganzheitliche Entrauchungskonzepte - Wunsch oder Realität?
- [LES1] *Leslie, J.L.*: Behavioural safety: Extending the Principles of applied behavioural analysis to safety in fires in public buildings. 2nd International Symposium on Human Behaviour in Fire. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Boston(MA), USA. March 2001, S. 1-8
- [MAR1] *Mark, R.*: Das Fluchtverhalten von Menschen in Extremsituationen. Brandverhütung 1/2001, S. 7-10, 2001
- [NEL1] *Nelson, H.E.; MacLennan, H.A.*: Emergency Movement. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 1999
- [NZB1] *New Zealand Building Code*: Building Regulations 1992, Wellington, New Zealand, July 1992
- [PAU1] *Pauls, J.L.*: Building Evacuation: Research Findings and Recommendations. In Fires and Human Behaviour, New York, 1980
- [PLO1] *Ploog, D.; Clausen, L.*: Katastrophenmedizin. Leitfaden für die ärztliche Versorgung im Katastrophenfall. Bundesamt für Zivilschutz (Hrsg.), 4. überarbeitete Auflage, Bonn, 1997
- [PRE1] *Predtetschenski, W.M.; Milinski, A.I.*: Personenströme in Gebäuden. Berechnungsmethoden für die Projektierung, Berlin, 1971
- [SCH1] *Schneider, U.; Lebeda C.*: Baulicher Brandschutz. 1. Auflage, Schriftenreihe Brand- und Explosionsschutz, Band 4, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, 2000
- [SCH2] *Schneider, U. et. al.*: Ingenieurmethoden im Baulichen Brandschutz. Kontakt & Studium Band 531; Renningen: expert verlag, 4. Auflage, 2006

- [SCH3] *Schneider, U.*: Grundlagen der Ingenieurmethoden im Brandschutz, 1. Auflage, Werner Verlag GmbH, Düsseldorf, 2002
- [SCH4] *Schneider, U.; Horvath, J.*: Brandschutzpraxis in Tunnelbauten, 1. Auflage, Bauwerk Verlag GmbH, Berlin, Juni 2006
- [SCH5] *Schneider, U.*: Evakuierung bei Brandereignissen, Artikel im Tagungsband der Brandschutz-Fachtagung 2004, Schloss Schallaburg bei Melk an der Donau, S. 7-25, 9. Februar 2004
- [SCH6] *Schneider U.; Haas M.; Oswald M.*: Grundlagen, Methoden und Beispiele der Evakuierungsberechnung, Schriftenreihe des Instituts für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, Heft 10, TU Wien, 2003
- [SCH7] *Schneider, U. et. al.*: Untersuchungsvorhaben Flucht- und Rettungswege. Abschlussbericht September 1989. Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit
- [SCH8] *Schneider, U.; Kath K.; Oswald M.; Kirchberger H.*: Evakuierung und Verhalten von Personen im Brandfall unter spezieller Berücksichtigung von schienengebundenen Fahrzeugen, Schriftenreihe des Institut für Hochbau und Technologie, Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz, Heft 12, TU Wien, 2006
- [SCH9] *Schneider, U. et. al.*: Untersuchungsvorhaben Flucht- und Rettungswege. Abschlussbericht September 1989. Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit
- [SCH10] *Schneider, U.*: Personensicherheit und Vorführung einer Berechnung der Entfluchtungszeiten mit einem EDV-gestützten Verfahren, TAE Lehrgang Brandschutznormung und Ingenieurmethoden im Brandschutz, Techn. Akademie Esslingen, März 2006
- [SIE1] *Sieber, G.M.*: Panik. vfdb-Zeitschrift Forschung und Technik im Brandschutz 2. 1986, S. 39-41
- [SKI1] *Skinner, B.F.*: Science and human behaviour. New York, 1953.
- [TEM1] *Templer, J.A.*: Stair Shape and Human Movement. Columbia University, Ph.D., 1975
- [TOG1] *Togawa, K.*: Study of Fire Escapes Based on the Observation of Multitude Currents. Dissertation, Building Research Institute of Ministry of Construction, Japan, May 1963
- [WAL1] *Waldau, N.*: Massenpanik in Gebäuden. Grundlagen und Simulationsmodelle. Planungskriterien zur Orientierung in Gebäuden bei steigender Stressbelastung. TU Wien, Dipl. Arb., 2002

Autoren

o. Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Ulrich Schneider

Dipl.-Ing. für Wärme- und Verfahrenstechnik; Dr.techn. und Dr.-Ing.habil. für Bauwesen; o. Univ. Prof. für Baustofflehre, Fakultät Bauingenieurwesen TU Wien, Vorstand des Instituts für Hochbau und Technologie, Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz TU Wien; seit 1974 Mitarbeiter bzw. Obmann nationaler und internationaler Normen-Ausschüsse; Sachverständiger für Brandschutz i. A. d. Reg. Österreich und Deutschland, NRW, Hessen. Mitglied der RSK, Deutschland. Vorsitzender des VIB, Deutschland. Leiter des Brandschutz-Lehrganges an der Arch+Ing Akademie, Österreich. Karlsplatz 13/206, A-1040 Wien.

Dipl.-Ing. Hubert Kirchberger

Dipl.-Ing. für Bauwesen der TU Wien, 1993 bis 2002 Mitarbeit in verschiedenen Ingenieurbüros und Baufirmen; 2002 bis 2005 wissenschaftlicher Mitarbeiter, 2005 bis 2006 Projektassistent, ab 2006 Univ. Ass. am Institut für Hochbau und Technologie, Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz der TU Wien in der Arbeitsgruppe Brandschutz. Arbeitsbereich: Evakuierungsrechnungen, Mitarbeit bei gutachterlichen Tätigkeiten und Forschungen im baulichen Brandschutz. Karlsplatz 13/206-1, A-1040 Wien. ▶