

Integration und Modellierung von menschlichen Faktoren für die Evakuierung von U-Bahn-Systemen

Christina Schäfer

Lehrstuhl Computeranwendung und Integration in Konstruktion und Planung

Universität Paderborn

Pohlweg 47-49, 33098 Paderborn

c.schaefer@cik.uni-paderborn.de

Laura Künzer, Robert Zinke

Fachgebiet Interkulturelle Wirtschaftskommunikation

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Ernst-Abbe-Platz 8, 07743 Jena

laura.kuenzer@uni-jena.de

robert.zinke@uni-jena.de

Abstract: Eine schnelle Evakuierung von U-Bahn-Stationen im Fall eines Brandes oder nach Austritt eines Gefahrstoffs rettet Leben. Dazu ist eine optimale, der Gefahr entsprechende Fluchtwegslenkung erforderlich. Aber nicht nur die Gefahr bestimmt den optimalen Fluchtweg, auch der Mensch selbst ist eine entscheidende Einflussgröße in der Evakuierung. Er wird jedoch in aktuellen Methoden zur Fluchtwegsberechnung nicht hinreichend berücksichtigt. Diese Arbeit stellt ein neues Konzept zur Modellierung des „Faktor Mensch“ in Evakuierungssituationen vor und zeigt ein methodisches Vorgehen sowie den aktuellen Stand dieser Modellierung auf. Für die Modellierung wurde der Ansatz der Personenstromberechnung nach Predtetschenski und Milinski mit einem kombinierten Ansatz aus dem Belief, Desire, Intention Model und der Culture Affected Behaviour Language zusammengeführt und erweitert.

1 Einleitung

Die U-Bahn ist in vielen Städten ein bedeutendes Verkehrsmedium und transportiert täglich tausende von Fahrgästen im Minutentakt zu ihren jeweiligen Zielen. Daher bewegen sich in den Stationen viele Menschen auf stark begrenztem Raum. Im Ernstfall kann das zu einem schwerwiegenden Problem führen, denn für die (Selbst-)Rettung von Personen bei einer Evakuierung¹ bleibt nicht viel Zeit, da das Verrauchen einer Station lebensbedrohlich für Menschen sein kann [VDMA05]; [TM07]. Die Zeit der Evakuierung setzt sich in Anlehnung an Hosser [Ho09] wie folgt zusammen:

$$t_{\text{Evakuierung}} = t_{\text{Detektion}} + t_{\text{Alarm}} + t_{\text{Reaktion}} + t_{\text{„Laufzeit“}}$$

Präventiv kann maßgeblich auf die Zeit der Detektion und Alarmierung durch geeignete Technik Einfluss genommen werden. Potentielle Gefahren können so frühzeitig erkannt und die anwesenden Personen mittels entsprechend gestalteten Durchsagen über eine

¹ In Anhängigkeit vom jeweiligen Kontext/Fachgebiet auch Räumung oder Entfluchtung

Evakuierung informiert werden. Verschiedene Rechenverfahren (vgl. [NFP00] und [PM71]) und Simulationen (vgl. [KP05]) ermöglichen zudem eine Bestimmung der benötigten Zeit zur Evakuierung ($t_{\text{Reaktion}} + t_{\text{Laufzeit}}$). Maßnahmen für die Vermeidung von Verzögerungen sowie eine Unterstützung der Selbstrettung, z.B. durch entsprechende Kennzeichnung der Fluchtwege, können so geplant werden. Zudem kann durch sinnvolle bauliche Anpassungen, wie Rauchschürzen, die zur Verfügung stehende Zeit erhöht werden.

1.1 Die Basis: Modellierung der Fluchtwegsberechnung im Projekt OrGaMIR

Reaktive Ansätze liegen vor allem in den Notfallplänen der Verkehrsbetriebe und den Angriffskonzepten der Feuerwehr vor. Innerhalb des szenariobasierten Forschungsprojekts OrGaMIR² wurden unter anderem Konzepte zur dynamischen Fluchtwegslenkung, speziell die Ermittlung von optimalen Fluchtwegen im aktuellen Gefahrenfall, erforscht. Ziel war es, für jede Position eines Fahrgastes in einer komplexen U-Bahn-Station (Kreuzungsbahnhof mit mehreren Stockwerken) im Gefahrenfall einen optimalen, d.h. sicheren Fluchtweg zu berechnen. Dieser optimale Fluchtweg resultiert aus der aktuellen und zukünftigen Gefahrstoffausbreitung, möglichen Stauungen und der tatsächlichen Weglänge, die von einer Person zurückgelegt werden muss. Um effektiv in einer Evakuierung agieren zu können, müssen Ergebnisse schnell und ohne aufwendige Simulationen bereitgestellt werden können. Zur Berechnung des optimalen Fluchtwegs stehen nicht mehr als ca. 20 Sekunden zur Verfügung, um auch die Fahrgäste noch entsprechend zeitnah informieren zu können. Das Konzept in OrGaMIR sieht vor, die U-Bahn-Station in einem gerichteten Graphen zu modellieren, in dem jede Kante ein gleichbleibendes architektonisches Element beschreibt (Treppe, Rolltreppe, Engstelle, horizontaler Weg). Zusätzlich wird die Kante mit Attributen versehen, wie Länge und Breite, sowie die Koordinatenpunkte von Start- und Endpunkt der Kante. Auf diese Weise kann die Geometrie des Gebäudes vollständig abgebildet werden. Zur Echtzeit eines Ereignisses wird dann durch die Anwendung des Berechnungsverfahrens von Predtetschenski und Milinski (im Folgenden P&M; vgl. [PM71]) für jede Kante eine Evakuierungszeit bestimmt. Die Evakuierungszeit setzt sich dabei aus der benötigten Zeit zum Zurücklegen der Strecke und einer potenziellen Stauung durch eine zu hohe Anzahl von Fahrgästen auf der Strecke zusammen (vgl. [KP im Druck]). Die Personenstromanalyse von P&M kann für die Berechnung von Evakuierungszeiten in U-Bahnsystemen genutzt werden, z.B. Durst und Müller [Du08]; [Mu09]. Es wird dabei vereinfacht für die Berechnung eine Gleichverteilung der Fahrgäste auf der Gesamtfläche der U-Bahn-Station angenommen. Die Anzahl der Fahrgäste, die sich gleichzeitig in der U-Bahnstation aufhalten können, ergibt sich aus der EBA-Formel (Brandschutz in Personenverkehrsanlagen der Eisenbahnen des Bundes) [EB11]. Die EBA-Formel berechnet die maximal anzunehmende Personenzahl auf Basis der Anzahl der Gleise in einer U-Bahnstation sowie der Sitz- und Stehplätze der Züge. Der ermittelte Wert wird zusammen mit einem

² Die Forschungsprojekte ORGAMIR und das Folgeprojekt ORGAMIR^{PLUS} (Organisationsübergreifende Gefahrenabwehr zum Schutz von Menschen und kritischen Infrastrukturen durch optimierte Prävention und Reaktion) wurden gefördert durch das BMBF im Programm „Forschung für die zivile Sicherheit“, als Teil der HighTech-Strategie der Bundesregierung zum Schutz von Verkehrsinfrastrukturen.

Faktor, der die aktuelle Gefahrstoffkonzentration angibt, als Kantengewicht gesetzt. Darauf aufbauend wird, durch mehrfache Verwendung eines Algorithmus zur Berechnung von kürzesten Wegen (Dijkstra-Algorithmus), für jeden Knoten, d.h. für alle anwesenden Personen in diesem Bereich der U-Bahnstation, der aktuell kürzeste Weg zu einem Ausgang bestimmt. Den Mitarbeitern der U-Bahn und der Leitstellen können so auf Displays Informationen über die Ausbreitung eines Gefahrstoffes im U-Bahn-System, wie z.B. Rauch, Gas, schnell und sicher zur Verfügung gestellt werden. Der Verkehrsbetrieb kann diese Informationen an Fahrgäste weitergeben, z.B. über Durchsagen oder dynamische Anzeigen (vgl. [KP im Druck]). Darüber hinaus können die Informationen über sichere und kurze Fluchtwege auch für die Bestimmung von Rettungs- und Angriffswegen für die Feuerwehr verwendet werden.

1.2 Die Fortführung: Erweiterung der Modellierung im Projekt OrGaMIR^{PLUS}

Die hohe Relevanz der menschlichen Faktoren („human factors“) für die Fluchtwegslenkung, z.B. Emotionen, Motive, physiologische Eigenschaften, stellt ein wichtiges Ergebnis aus OrGaMIR dar. Im Rahmen einer Evakuierung spielen vier Faktoren eine bedeutende Rolle: Der Anlass des Aufenthalts an einem Ort (z.B. Transfer von A nach B), die Art der Gefahr (Gas, Brand), die betroffene Umwelt bzw. Infrastruktur (U-Bahn-System) und menschliche Faktoren [HKZ im Druck]. Die ersten drei Faktoren werden bereits weitestgehend durch das Szenario in OrGaMIR abgebildet. Der vierte Faktor ist dennoch eine entscheidende Größe für die Evakuierung. Im Rahmen des Folgeprojekts OrGaMIR^{PLUS}, in dem dieser Artikel entstand, verschob sich der Fokus von den Mitarbeitern der U-Bahn bzw. Leitstellen hin zu dem Erleben und Verhalten der Fahrgäste während einer Evakuierung. Da eine Evakuierung eine Ausnahmesituation darstellt und Menschen im Gefahrenfall sehr unterschiedlich reagieren können [UM01], gilt es den „Faktor Mensch“ genauer zu betrachten und in die Modellierungen zu integrieren. Um den „Faktor Mensch“ in Evakuierungen bestimmen zu können, müssen relevante Parameter identifiziert und modelliert werden. In homogenen Gruppen ist dies eher möglich. So kann in einem Schulgebäude von überwiegend gleichaltrigen Personen mit einer vergleichbaren körperlichen Verfassung und einer hohen Ortskenntnis ausgegangen werden [Ro05]. Das vereinfacht die Modellierung. In einem U-Bahnsystem ist eine vollkommen homogene Gruppe nicht zu erwarten. Das zurzeit bestehende OrGaMIR-System, basierend auf P&M, stützt sich auf empirisch ermittelte Werte für Geschwindigkeiten und Dichten, die den Menschen vor allem in Bezug auf seine Bewegung im Raum berücksichtigt. Menschen werden nur im geringen Maße beachtet, lediglich Einschränkungen werden von P&M in Form von mitgeführtem Gepäck oder Art der Bekleidung angerechnet. Merkmale wie körperliche Einschränkungen, Motive, Emotionen, etc. werden nicht abgebildet. Zusätzlich fehlt eine Betrachtung von Gruppenverhalten, das eine starke Auswirkung auf die Evakuierungszeit hat. Aus diesen Gründen sollte dem „Faktor Mensch“ im existierenden OrGaMIR-System mehr Beachtung geschenkt werden. Damit muss aber auch ein Spagat zwischen Personenstromanalysen wie der von P&M und sog. mikroskopischen Individualmodellen gemeistert werden, um letztlich bestimmte Anforderungen, z.B. eine kurze Rechenzeit, wahren zu können.

2 Integration des „Faktor Mensch“ in eine Modellierung zur dynamischen Fluchtwegslenkung

Das Vorgehen bei der vorliegenden Modellierung wird in der nachfolgenden Abbildung 1 veranschaulicht und umfasst vier Teilschritte:

- 1) Vorbereitung der Modellierung – schaffen einer wissenschaftlichen Grundlage durch Literatursichtung und experimentelle Überprüfung im gewählten Kontext U-Bahn-System
- 2) Bewertung des „Faktor Mensch“ aus psychologischer und modellierungstheoretischer Sicht:
 - a) Menschliche Faktoren und ihre Einflussgrößen in der Evakuierung
 - b) Auswahl eines Modellierungskonzept zur Integration des „Faktor Mensch“
- 3) Modellierung eines „Individuums“ in der ersten Phase einer Evakuierung (nach Auslösung der Alarmierung)
- 4) Gesamtmodell in Bezug auf einen zeitlichen Verlauf und Personen-Cluster³

Im Folgenden werden die vier Teilschritte des Vorgehens zur Modellierung detailliert beschrieben.

2.1 Vorbereitung der Modellierung: Recherche und experimentelle Überprüfung

Im ersten Teilschritt wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Ausgehend von dieser Literaturrecherche wurden zwei wesentliche Ziele zur Vorbereitung der hier vorgestellten Modellierung verfolgt: Zum einen wurden Personenzählungen und praktische Feldversuche in U-Bahnstationen durchgeführt. Zum anderen wurden unterschiedliche Modellierungen in Bezug auf deren Handhabung erprobt und beurteilt. Letztendlich wurde eine geeignete Modellierung zur Integration des „Faktor Mensch“ ausgewählt.

³ Um den Anspruch einer kurzen Rechenzeit zu wahren, wurden Typen von U-Bahn- Nutzern, sog. Personen-Custer, definiert und die Berechnung nur für die Personen-Cluster durchgeführt. Eine nähere Beschreibung der Personen-Cluster findet sich in Abschnitt 2.2.1

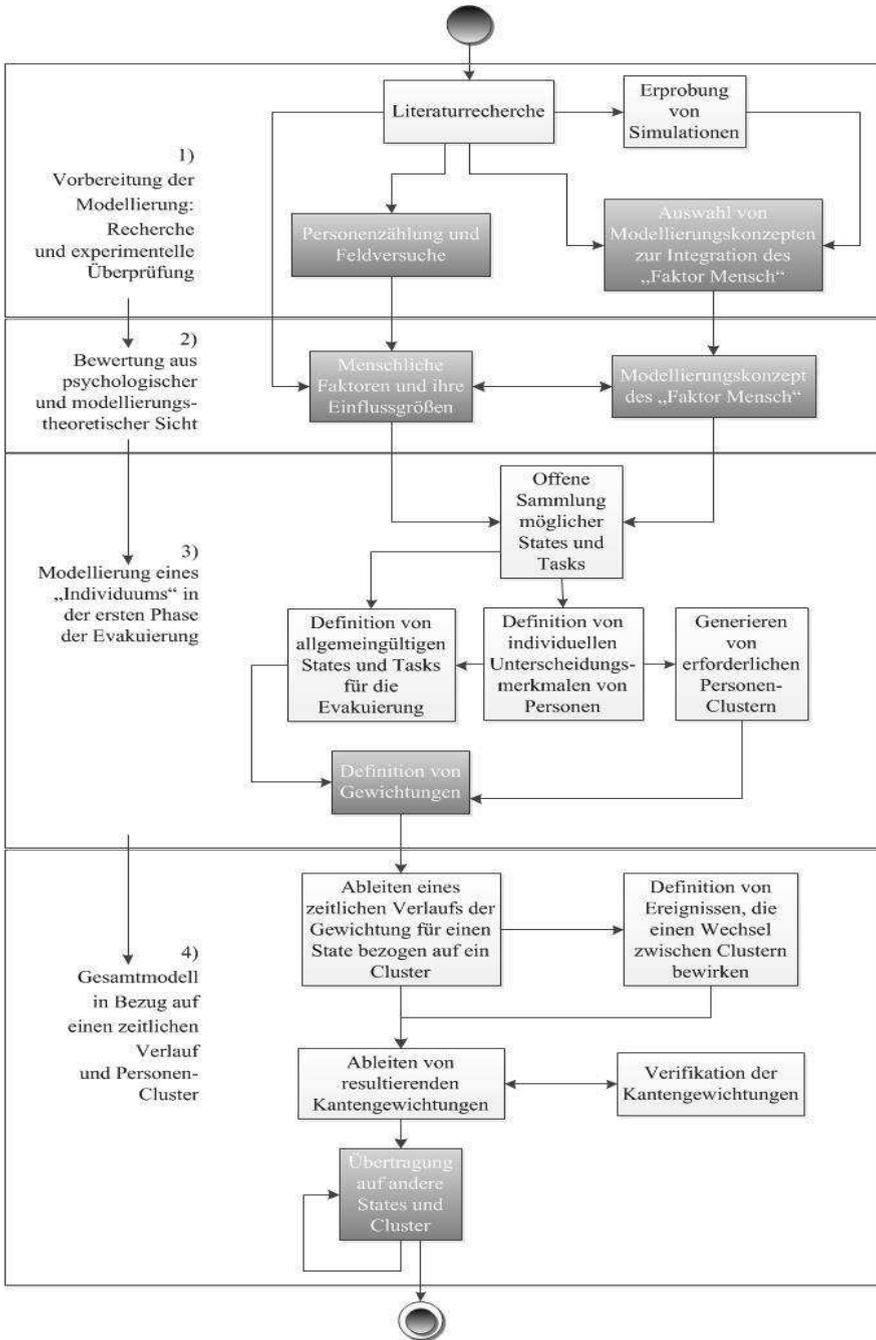


Abbildung 1 Vorgehen bei der Modellierung des „Faktors Mensch“ in der Evakuierung im Projekt OrGaMIR^{PLUS}

2.1.1 Personenzählungen und Feldversuche

Innerhalb der kritischen Infrastruktur „U-Bahn“ wurde überprüft, ob aus der Literatur bekannte personenbezogene Eigenschaften für die Fahrgäste zutreffend sind. Des Weiteren sollten bisher nicht betrachtete Merkmale der Fahrgäste gefunden werden, die in die vorliegende Modellierung integriert werden müssen. Da in den meisten U-Bahnverkehrsbetrieben keine Informationen über die Zusammensetzung und Frequenz von Fahrgästen bzw. Gruppen vorliegen, wurden zunächst Personenzählungen durchgeführt. Stundenweise wurden hierzu an drei Tagen in einer komplexen U-Bahnstation alle Personen gezählt. Darüber hinaus wurden auch individuelle Merkmale erfasst, u.a.: Waren Personen in Begleitung anderer unterwegs? Wie viele Personen führten große Gepäckstücke (Koffer, Kinderwagen) mit sich? Gab es Personen mit offensichtlichen Beeinträchtigungen wie Blindenstock oder Gehhilfe?. Die Ergebnisse zeigten, dass ca. 40% der Personen in Begleitung unterwegs sind. Rund 4% der Personen weisen eine offensichtliche Geh- oder Sehbeeinträchtigung auf [ZHK im Druck]. Außerdem zeigten sich Unterschiede der Dichte und eine Ungleichverteilung der Personenströme an den Ein- und Ausgängen der U-Bahnstation. Fast ein Drittel der Gezählten nutzten lediglich einen von zehn möglichen Ein- und Ausgängen, zusätzlich trat eine Konzentration von Personen mit Beeinträchtigungen an den Aufzügen auf. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus den Personenzählungen und der Literaturrecherche wurde eine Reihe von Feldversuchen in vier U-Bahnstationen durchgeführt. Dabei wurden insbesondere die Auswirkungen von personenbezogenen Parametern ([PM71]; [Si95]), z.B. das Verhalten von unterschiedlich großen Gruppen (3-26 Personen), der Einfluss von Infrastrukturelementen, wie Hindernisse, Engstellen, Treppen ([Ji09]; [Sc03]; [FT10]) und generellen Strömungsphänomenen in Fußgängermengen unter Normal- oder Evakuierungsbedingungen (z.B. [He02]) auf die Evakuierungszeit betrachtet. Konkret wurden körperliche Beeinträchtigungen simuliert, indem Einzelpersonen sehbeeinträchtigende Brillen oder eine Versteifung des Kniegelenkes durch Bandagen erhielten. Es wurden Durchläufe mit und ohne Gepäckstücke durchgeführt. Neben Zeitmessung wurden folgende Methoden angewendet: Selbstauskünfte der Versuchspersonen mittels Fragebogen und leitfragengestützten Interviews nach den Teilversuchen sowie Videoaufzeichnungen. In den Ergebnissen der Feldversuche zeigten sich in Bezug auf die betrachteten Parameter z.T. deutliche Varianzen in der benötigten Zeit für eine Evakuierung.

2.1.2 Auswahl eines Modellierungskonzept zur Integration des „Faktor Mensch“

Um eine Evakuierungszeit für ein Gebäude zu bestimmen, wird grundsätzlich zwischen makroskopischen und mikroskopischen Ansätzen unterschieden. Im Kontext von U-Bahnbetreibern ist die Kapazitätsanalyse nach NFPA 130 [NFP00] gebräuchlich und akzeptiert. Hier wird die Evakuierungszeit anhand der Kapazität von Treppen, Fluren bzw. Durchgängen vorhergesagt. Das Verfahren nach P&M, welches im Projekt OrGaMIR zu Einsatz kam, ist ebenfalls weit verbreitet ([Du09], [Ho09]), funktioniert aber entsprechend einer Personenstromanalyse. Es können zwar physische Eigenschaften wie Alter oder Kleidung variiert werden, zur Ermittlung der Evakuierungszeit wird der Personenstrom allerdings als Ganzes betrachtet und nicht jede Person in dem Strom für sich. Beide Ansätze gehören zu den Makroskopischen Verfahren.

Einige Simulationen erlauben auch eine Individualbetrachtung für jede fliehende Person, um das Fluchtverhalten im Gefahrenfall stärker divergieren zu können. Diese Simulationen gehören somit zu den mikroskopischen Ansätzen. Es können in den Simulationen viele Parameter verändert werden. Alle Simulationen in diesem Kontext lassen eine Variation der Gehgeschwindigkeiten zu (siehe Aseri [<http://aseri.ist-net.de/>], Building EXODUS [http://fseg.gre.ac.uk/exodus/exodus_products.html] oder PedGo [<http://traffgo-ht.com/de/pedestrians/products/pedgo/>]). Es ist jedoch nicht immer ein Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und der vorherrschenden Personendichte zu erkennen, wie es bei PedGo festgestellt werden kann [Ro05]. Building EXODUS erlaubt eine starke Parametrisierung von psychologischen Eigenschaften wie der Entschlossenheit einen Weg zu gehen oder der Geduld zum Warten innerhalb von Stauungen. Sogar das Wissen über Ausgänge wie auch die Weitergabe dieses Wissens als Form der Hilfeleistung kann modelliert werden. In anderen Simulationen sind deutlich weniger Eingaben zum psychologischen Verhalten möglich, so kann oftmals nur auf die Festlegung einer Reaktionszeit oder der Wahrscheinlichkeit zum „Trödeln“ verwiesen werden. Weiterführende Analysen lassen sich aus [KP05] oder [Ro05] entnehmen. Eine ganzheitliche Betrachtung des menschlichen Verhaltens in einer Evakuierung bleibt auch bei den Individualmodellen der Simulationen weitestgehend aus. Darüber hinaus ist im Kontext des Projektes OrGaMIR^{PLUS} die Berechnungszeit ein ausschlaggebendes Kriterium, da im Reaktionsfall schnell entsprechend der aktuellen Gefahrenlage optimale Ausgänge ausgewiesen werden müssen. Durch die vorliegende Modellierung soll die Lücke zwischen einer schnellen Berechnung von optimalen Ausgängen und einer ganzheitlichen Integration von psychologischen Faktoren geschlossen werden. Der bestehende Ansatz des OrGaMIR-Systems, basierend auf der Berechnung von P&M, ist so weiterzuentwickeln, dass die Abbildung von menschlichen Faktoren realisiert wird. Es wurden dazu verschiedene Ansätze zur Modellierung von Verhalten, kulturellen Normen oder Emotionen aus der Entscheidungstheorie, Artificial Intelligence und Human Behaviour Models betrachtet. Die hier entstandene Modellierung zur dynamischen Fluchtweglenkung kombiniert, neben dem Rechenverfahren nach P&M, die Ansätze von Virtual Human [GM04], Cultural Affected Behavior Language (CAB) [So07] und einem kombinierten Ansatz der CAB–Language und dem Belief – Desire – Intention Model (BDI) von Schram [Sc11]. Abbildung 2 zeigt den für die Modellierung kombinierten Ansatz aus CAB und BDI und P&M, die im Folgenden beschrieben werden.

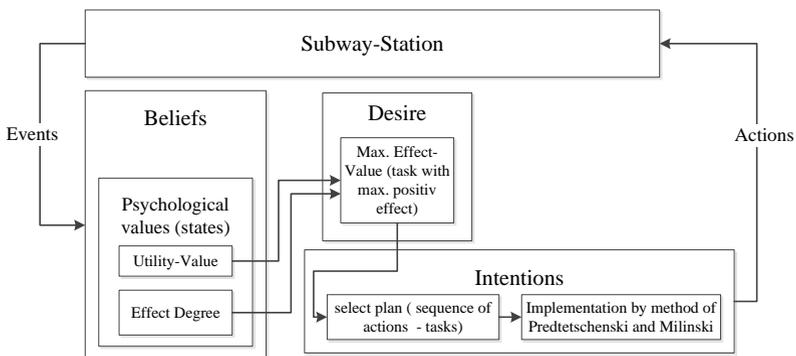


Abbildung 2 Modellierung von Verhalten und Normen als Entscheidungsgrundlage in Evakuierungssituationen durch Kombination von CAB, BDI und P&M [vgl. [Sc11]]

2.2 Bewertung aus psychologischer und modellierungstheoretischer Sicht

Aus den Personenzählungen und Feldversuchen wurden im nächsten Schritt zu berücksichtigende allgemeine Erkenntnisse zu menschlichen Faktoren abgeleitet. Außerdem wurde ein bestehendes Modellierungskonzept gewählt und zur angemessenen Integration des „Faktors Mensch“ angepasst.

2.2.1 Menschliche Faktoren und ihre Einflussgrößen in der Evakuierung

Eine Evakuierung setzt sich, wie bereits beschrieben, aus verschiedenen Phasen zusammen. Aber auch die Reaktionen anwesender Personen können in verschiedene Handlungsphasen unterteilt werden. Ein initiiender Alarm soll bei Menschen grundsätzlich folgende Handlungskette auslösen: „Alarm wahrnehmen – aktuelle Tätigkeit unterbrechen – losgehen – hinausgehen“ [HKZ im Druck]. Da es bei dieser Handlungskette häufig zu Unterbrechungen, Verzögerungen oder auch anderen Handlungen kommt, stellt sich die Frage was Gründe und Ursachen für eine Abweichung von der idealen Handlungskette sein können. Diese Frage kann aus psychologischer Sicht nicht „einfach“ beantwortet werden, da sie viele psychologische Aspekte, u.a. Wahrnehmung, Verstehen, Emotion, Handlungsfähigkeit, Motivation, berührt. Eine Modellierung muss also grundsätzlich die Handlungskette abbilden, zusätzlich aber auch menschliche Faktoren integrieren. Aus den Ergebnissen der Recherche und den experimentellen Feldversuchen zeigte sich eine Vielzahl relevanter menschlicher Faktoren. An dieser Stelle soll nur eine Sammlung von relevanten Faktoren dargestellt werden, eine nähere Beschreibung findet sich z.B. in [ZHK im Druck]. Jeder Mensch, der aufgrund einer bestehenden Gefahr in eine Evakuierungssituation gerät, bringt unterschiedliche Vorerfahrungen mit; er kennt sich unterschiedlich gut vor Ort und in der unmittelbaren Umgebung aus; hat Persönlichkeitseigenschaften wie eine Neigung zur Ängstlichkeit, einen eigenen Handlungsstil und nicht zuletzt eine eigene Motivation in der Situation, z.B. Neugier oder das Streben nach höchstmöglicher Sicherheit. Diese Merkmale bewirken unterschiedliche Strategien und Handlungen im Umgang mit (Gefahren)Situationen (vgl. [HKZ im Druck]; [KHZ12]). Auch Emotionen beeinflussen die Beurteilung einer Gefahrensituation sowie das Denken und das Entscheiden, was unter identischen Umweltbedingungen zu unterschiedlichen Verhaltensweisen von Personen führen kann [An11]. Des Weiteren haben physische Eigenschaften (z.B. körperliche Beeinträchtigungen), das Alter (Kinder, ältere Menschen), wie auch der aktuelle Zustand (betrunken, beängstigt, euphorisch, müde) einen Einfluss. In den Feldversuchen zeigte sich, wie bereits beschrieben, auch die Bedeutung von Gruppen. Familien und Freundesgruppen werden in Evakuierungen versuchen zusammen zu bleiben und sich gegenseitig zu helfen.

Als wesentliche Merkmale, die im Verhalten von Menschen in der Evakuierung einen Unterschied erzeugen, wurden anhand der Ergebnisse der Teilschritte 1 und 2 vier distinkte Merkmale festgelegt: das Handeln als Individuum bzw. die Zugehörigkeit zu einer Gruppe, die Ortskenntnis in der U-Bahnstation, das Vorhandensein bzw. das Fehlen einer emotionalen Einschränkung (z.B. Auswirkungen von Stress) sowie das Vorhandensein bzw. das Fehlen einer physischen Einschränkung. Durch Kombinationen dieser Merkmale ergaben sich für die Modellierung 16 verschiedene Personen-Cluster. Beispiele hierzu sind zum einen das Cluster „Individuum mit Ortskenntnis ohne

Einschränkungen“, in dem alle Individuen zusammengefasst sind, die über Ortskenntnisse verfügen und keinerlei körperliche oder emotionale Einschränkungen aufweisen. Zum anderen weist das Cluster „Gruppe mit Ortskenntnis ohne Einschränkungen“ identische Eigenschaften auf, mit dem Unterschied, dass hier eine geschlossene Gruppe von Individuen betrachtet wird. Aufgrund ortskundiger Gruppenmitglieder verfügt die gesamte Gruppe über Ortskenntnisse und keines der Gruppenmitglieder weist eine Einschränkung auf. In Abbildungen 3 und 4 werden Ausschnitte der Modellierung der Personen-Cluster: „Individuum mit Ortskenntnis ohne Einschränkungen“ und „Gruppe mit Ortskenntnis ohne Einschränkungen“ dargestellt.

2.2.2 Modellierungskonzept des „Faktor Mensch“

Das BDI-Modell spiegelt die grundsätzlichen Zusammenhänge bei einer Handlungswahl wider, die für jeden Zeitschritt durchgeführt wird und als Sequenz von Handlungen den entsprechende Weg einer Person ergibt. Der Mensch hat eine Sicht auf die Welt, über sich selbst und andere, welche im BDI-Modell in den Beliefs abgebildet wird. Diese Sicht muss nicht vollständig oder korrekt sein [Wo00]. Desires sind Zustände die ein Mensch in einer idealen Welt erreichen möchte, diese basieren auf seinen spezifischen Beliefs. Einen Teil der Desires die für den Menschen besonders wichtig oder realistisch sind und von dem Menschen in die Tat umgesetzt werden, sind die Intentions. Die Abhängigkeiten der einzelnen Module des BDI-Modell sind in der Abbildung 2 erläutert und wurden mit Hilfe der CAB-Language realisiert.

Belief. Ziel ist es, durch Beschreibung eines Aufgabenmodells ein grundsätzliches System von Regeln abzubilden, welches Auskunft über zu erwartendes Verhalten und den emotionalen Zustand der betroffenen Menschen in einer Evakuierungssituation gibt. Dieses Aufgabenmodell besteht zum einen aus States, welche mögliche (psychologische) Zustände darstellen, die Menschen im Laufe der Evakuierung erreichen können. Ein State s kann z.B. „Mensch hilft anderen Personen“ sein. Jeder State wird durch ein Utility- Value $u(s)$ gegenüber anderen States gewichtet. Der Utility-Value drückt aus, wie wichtig bzw. wie erstrebenswert ein gegebener Zustand für eine Person ist. Das Modell besteht des Weiteren aus Aufgaben, sog. Tasks, die von Personen in Evakuierungen ausgeführt werden können. Ein Task t kann z.B. „Laufen in einen sicheren Bereich“ sein. Diese Aufgaben können sowohl positive wie auch negative Auswirkungen auf die States haben, sog. Effect Degrees $d(t,s)$, was sich durch eine Kantengewichtung im Intervall von $[-1,1]$ zwischen entsprechendem Task t und State s widerspiegelt. Die Sicht des Menschen auf die Welt wird somit durch die Realisierung eines geeigneten Aufgabenmodells abgebildet.

Desire. Der Mensch wird den Task ausführen, der den größten positiven Nutzen (=Auswirkung) auf alle States hat, sodass dieser Task zu ermitteln ist. Der Task mit dem maximalen Auswirkungsfaktor a wird im nächsten Zeitschritt ausgeführt. Daher wird für jeden Task t berechnet: $a = \frac{\sum_{i=1}^n d(t, s_i) * u(s_i)}{\sum_{i=1}^n u(s_i)}$. Dazu erfolgt in jedem Zeitschritt oder auf Grund des Eintretens von Ereignissen, z.B. Erhöhung der Dichte der Fahrgäste über einen gesetzten Schwellwert, eine Neuberechnung der jeweiligen Auswirkungsfaktoren. Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen zwei Ausschnitte des entwickelten Modells, das sich nur um eine Kantengewichtung und die Gewichtung eines States unterscheidet. In Abbildung 3 ergibt im Zeitschritt T_0 die Berechnung des

Auswirkungsfaktors a^1 für den Task „Laufen in den sicheren Bereich“ den Wert 0,72 $((0,8 * 150 + 0,6 * 100) / (150 + 100) = 0,72)$. Die zweite Task „Gerichtet gehen mit dem Personenstrom“ erzielt nur einen Auswirkungsfaktor a^2 von 0,33 $((0,5 * 100 + 0 * 50)/(100 + 50))$, so dass die Wahl für eine Task auf „Laufen in den sicheren Bereich“ fällt. Im zweiten Beispiel (siehe Abbildung 4) bewirkt die Änderung einer Gewichtung ein anderes Ergebnis, so dass laut anschließender analoger Berechnung die Task „Gerichtet gehen mit dem Personenstrom“ ausgeführt wird. Auf diese Weise können unterschiedliche Personen-Cluster durch eine abweichende Gewichtung anders agieren.

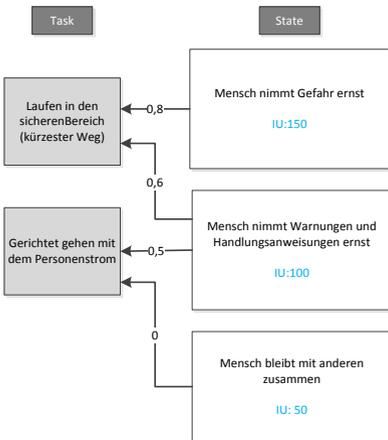


Abbildung 3 Ausschnitt aus dem Modell zum Cluster: Gruppe mit Ortskenntnis ohne Einschränkungen

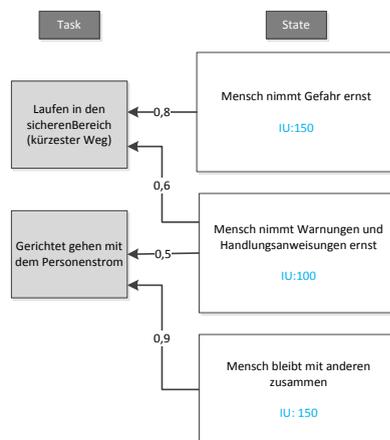


Abbildung 4 Ausschnitt aus dem Modell zum Cluster: Individuum mit Ortskenntnis ohne Einschränkungen

Intention. Der Mensch entscheidet sich letztlich für den Task mit dem höchsten Auswirkungsfaktor. Dieser Task wird durch die Anwendung des Verfahrens nach P&M umgesetzt und wirkt sich auf diese Weise auf die Evakuierungszeit aus. Als Beispiel bietet sich der Task „Abwarten“ an. Bei der Ausführung des Tasks „Abwarten“ werden die „wartenden“ Personen von der Gesamtzahl der hinauslaufenden Menschenmenge abgezogen und die zur Verfügung stehende Fläche für die Evakuierung wird entsprechend pro Person um $0,25 \text{ m}^2$ verringert. Die wartenden Personen werden dann als Säulen (Hindernisse) in die Modellierung der U-Bahnstation integriert und stellen für den Rest der hinauslaufenden Personen Hindernisse dar. In jedem Zeitschritt wird eine Task ausgewählt und durch die Abfolge der einzelnen Task der Weg der Person in den sicheren Bereich definiert.

2.3 Modellierung eines „Individuums“ in der ersten Phase der Evakuierung

Nachdem zunächst Recherchen und experimentelle Überprüfungen durchgeführt wurden, um dann psychologische und modellierungstheoretische Sichtweisen zu bewerten, erfolgte im dritten Teilschritt der Modellierung die Integration der Sichten.

Dafür wurde zunächst eine Sammlung der States und Tasks durchgeführt, die für einen Mensch in einer Evakuierung relevant sind. Darauf aufbauend wurden Abhängigkeiten zwischen States und Tasks beschrieben. Eine individuelle Betrachtung aller Personen in der U-Bahn würde die Anforderung der kurzen Rechenzeit verletzen, weshalb Personen-Cluster mit den vier beschriebenen distinkten Merkmalen berücksichtigt wurden. Durch diese Abstraktion konnte jeder dieser Personen-Cluster in der U-Bahn einheitliche Bedeutungen eines States gegeben werden. Durch eine unterschiedliche Gewichtung der States und der Kanten (vgl. Beispielrechnung in 2.2.2) können abweichende auszuführende Tasks berechnet werden. Diese Cluster als Zusammenfassung mehrerer Fahrgäste mit ähnlichen Merkmalen werden im vierten Teilschritt der Modellierung unterschieden, um bei schneller Berechnung nicht auf individuelle Eigenschaften verzichten zu müssen.

Anschließend wurden alle relevanten Personen-Cluster festgelegt und es konnten Auswirkungsgrade in Form der Gewichtung einer Kante zwischen Task und State definiert werden. Angefangen wurde mit Cluster Individuum; Ortskenntnis vorhanden; ohne Einschränkung zum Zeitpunkt T_0 , dem Beginn einer Evakuierung, z.B. nach einem Evakuierungsalarm. Die Auswirkungsgrade wurden aus den Teilschritten 1 und 2 der Modellierung abgeleitet. Die jeweiligen Zusammenhänge werden graduell als Werte in Zehntelschritten zwischen -1 und 1 in den Kanten abgebildet. Außerdem wurde separat für jedes Cluster und für jeden State ein Utility-Value vergeben. Die Utility-Values wurden in 50er Schritten als Werte zwischen 0 und 200 festgelegt. Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Modellierung für das Personen-Cluster („Individuum, Ortskenntnis vorhanden, ohne Einschränkungen“) zum Zeitpunkt T_0 . In der Mitte sind in grau die

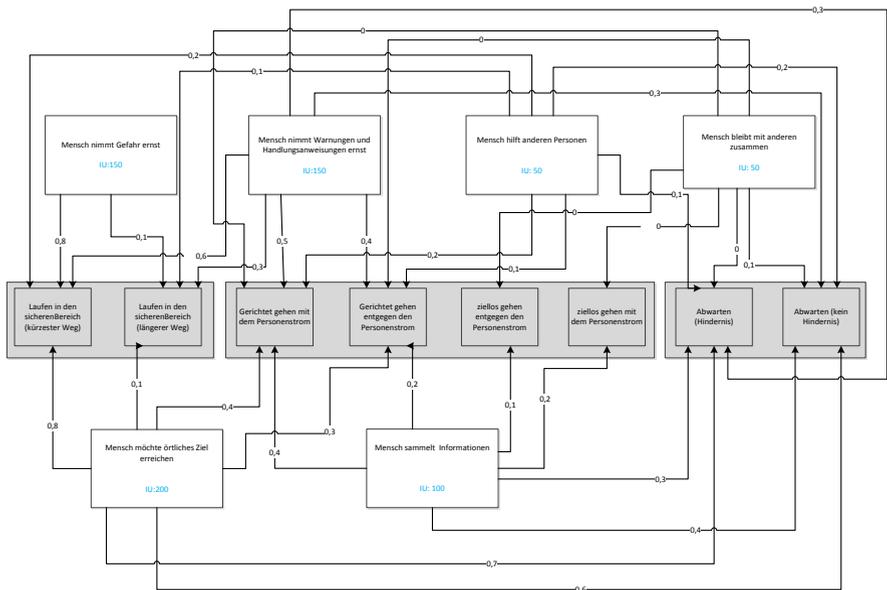


Abbildung 5 Modell für das Personen-Cluster („Individuum, Ortskenntnis vorhanden, ohne Einschränkungen“) zum Zeitpunkt T_0

Tasks dargestellt, deren Ausführung in unterschiedlichem Maße auf States Einfluss nimmt, was durch das Vorhandensein von Kanten und deren Gewichtung angezeigt wird. Welche Task von jeder Person dieses Clusters im Zeitpunkt T_0 ausgeführt wird, lässt sich somit rechnerisch ermitteln. Ohne auf Details in der Darstellung eingehen zu müssen, wird deutlich, dass die Modellgröße überschaubar bleibt und außerdem geeignet ist, das menschliche Verhalten für die Evakuierung abzubilden.

2.4 Gesamtmodell in Bezug auf einen zeitlichen Verlauf und die Personen-Cluster

Analog zum oben beschriebenen Vorgehen werden für jedes der gebildeten 16 Personen-Cluster die jeweiligen Ausgangswerte und Zusammenhänge für Tasks und States festgelegt, ebenso werden die Utility-Values angepasst. Zusätzlich sollte nun der zeitliche Verlauf von Evakuierungen abgebildet werden. Da die Phase der Selbstrettung von Personen nicht länger als 15 Minuten andauern darf [Ca08], wurde hier zunächst ein Zeitintervall von 6 Minuten angenommen und in 12 gleichlange Zeiteinheiten unterteilt, deren Dauer als Zeitpunkte T_0 bis T_{12} bezeichnet wird. Nun war es möglich, den Übergang von einem Zeitpunkt zum nächsten abzubilden, also die Folgen einer in T_0 initiierten und ausgeführten Handlung als präferierte Task. Für die unterschiedlichen States und Tasks wurden in den Zeitpunkten der Evakuierung zunächst die Werte für ein Personen-Cluster neu festgelegt. Da dieses Vorgehen sehr zeitaufwändig wäre, wurde zur Vereinfachung eine Formalisierung entwickelt. Die Gewichtung der States wurde theoretisch und über die Erfahrungen aus den Feldversuchen in ihrer relativen Bedeutsamkeit über die Zeitachse der Selbstrettungsphase als Graph abgebildet. Mit Hilfe des Graphen wurde auf die Werte der eingehenden Kanten über den Zeitraum der Evakuierung geschlossen, in Bezug auf die aktuelle Gewichtung des States und die vorhergehende Gewichtung der Kante ausgehend vom Zeitpunkt T_0 . Hierdurch wurde für jeden Zeitpunkt die Wahl der auszuführenden Task festgelegt.

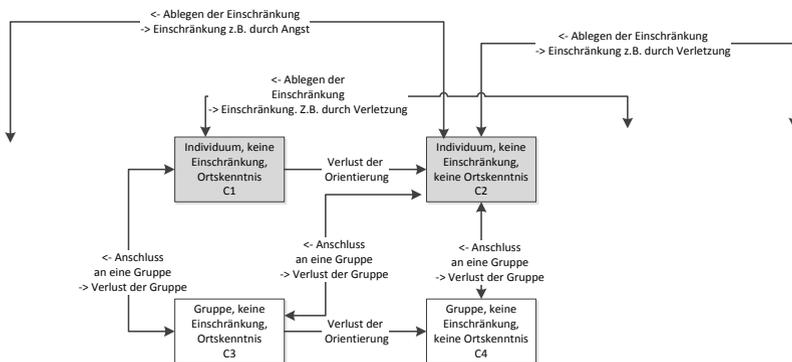


Abbildung 6 Beispiele für Abhängigkeiten und Übergänge zwischen Personen-Clustern

Während der Evakuierung kommt es zu „Ereignissen“, die für den einzelnen Menschen bedeutsam sein können [GM04]. Diese Ereignisse beeinflussen dabei das Verhalten und den Zustand von Menschen in unterschiedlichem Maß. Ein Deckeneinsturz in einer U-Bahnstation kann z.B. plötzlich Einzelpersonen von einer Gruppe trennen. Ebenso können Einzelpersonen im Verlauf der Evakuierung anderen Personen helfen und diese bei der Selbstrettung unterstützen. Aus Einzelpersonen können so Gruppen werden und vice versa. Des Weiteren können emotionale Einschränkungen, wie Angstzustände, oder physische Beeinträchtigungen, wie Verletzungen, auftreten.

Daher ist es in jedem Zeitintervall möglich, dass Personen aus einem Personen-Cluster in ein anderes wechseln. Dies führt somit für den nächsten Zeitpunkt zu einer Neuverteilung der Gesamtpersonen auf die Cluster und hat dementsprechend Einfluss auf die Evakuierungszeit. Die Ereignisse, die im Modell zu einem Wechsel zwischen Personen-Clustern führen, müssen noch weiter ausdifferenziert werden. Auszugsweise sind derartige Ereignisse in **Error! Reference source not found.** als Kantenbezeichnung zwischen den Clustern verdeutlicht.

3 Diskussion und Zusammenfassung

Das aufgezeigte Vorgehen zur Integration von menschlichen Faktoren in die Evakuierungsberechnung ist zweckmäßig und zielführend. Durch die Kombination einer makroskopischen Personenstromanalyse und der Modellierung von individuellen Merkmalen von Personen-Clustern konnte eine zeitgerechte Berechnung von optimalen Fluchwegen unter Berücksichtigung von psychologischen Faktoren durchgeführt werden. Darüber hinaus müssen aber noch weiterführende Analysen bezüglich der Korrektheit und Übertragbarkeit erfolgen.

Verifikation der Ergebnisse, bezogen auf:

- Prüfung der Übertragung auf alle Zeitschritte – dazu müssen weitere Daten aus Evakuierungen herangezogen werden, um die Bedeutsamkeiten und Abhängigkeiten der einzelnen States und Tasks zu überprüfen.
- Gültigkeit der Definition der Personen-Cluster - weiterhin ist die prozentuale Aufteilung der betrachteten Personenanzahl auf die einzelnen Cluster noch festzulegen. Darüber hinaus müssen weitere Szenarien und deren Auswirkung auf die Wertigkeiten von Tasks und States in den Phasen für unterschiedliche Cluster bestimmt werden, ebenso wie die Auswirkungen von neuen Szenarien auf Clusterübergänge. Auch tageszeitliche Schwankungen müssen berücksichtigt werden.
- Umfassende Evaluation der theoretischen Ergebnisse mittels Feldversuchen

Übertragung des Konzepts, bezogen auf:

- Andere kritische Infrastrukturen – z.B. Flughäfen, Krankenhäuser; als Vorarbeiten hierzu wurden bereits eine unangekündigte Räumung eines Veranstaltungssaals sowie eine Reihe von Evakuierungsversuchen in einem

öffentlichen Gebäude durchgeführt. Eine unangekündigte Räumung eines Lehrgebäudes wurde begleitet. Diese Untersuchungen dienten in Bezug auf die Modellierung primär dazu, frühzeitig zu prüfen, ob beobachtete Phänomene auch in von Teilnehmern als real eingeschätzten Situationen auftreten. Die noch ausstehende Auswertung muss zeigen, ob möglicherweise zusätzliche Aspekte zu beachten sind, die in der vorliegenden Sammlung von Tasks und States noch nicht abgebildet werden.

- Andere Gefahrensituationen – eine weitere Differenzierung ist durchzuführen in Bezug auf Verhalten und Besonderheiten in Abhängigkeit unterschiedlicher denkbarer Ereignisse, die nicht Feuer oder giftige (Rauch-)Gase sind, sondern beispielsweise ein Wassereintrich in einem Bauwerk. Es ist noch offen, ob weitere Ereignisse Auswirkungen auf das Verhalten haben können. Das bisherige Modell bildet derartige Ereignisse nicht ab, da es primär auf der initialen Annahme eines Brands basiert.
- Andere kulturelle Bedingungen – es sollte eine Überprüfung der Modellierung unter Berücksichtigung kulturell bedingter Besonderheiten erfolgen. Erste Erkenntnisse über kulturell erlernte und akzeptierte Verhaltensmuster sowie kulturbezogen variierende Wertevorstellungen liegen vor. In einer Evakuierung können sich kulturell bedingte Verhaltensmuster, z.B. in Bezug auf das Zusammenbleiben und Hilfeverhalten innerhalb von Gruppen, auswirken. Eine Anpassung der Ausgangswerte der States (Utility-Value) sowie der Gewichtung der Wirkzusammenhänge über die Zeitpunkte und von Tasks und States ist hierzu ein vielversprechender Ansatz.

4 Literaturverzeichnis

- [An11] Angie, A. D. et al.: The influence of discrete emotions on judgement and decision-making: A meta-analytic review. In: *Cognition & Emotion* 25 (8), 2011, S. 1393–1422.
- [Be12] Becker, T.: Dokumentation AP1.4-02 Anforderungsanalyse, internes Dokument, 2012.
- [Ca08] Casazza, W.: Kombilösung Karlsruhe. Tunnelbau im Herzen der Stadt, In: Müller, H. S.; Nolting, U.; Haist, M. (Hg.) *Betonbauwerke im Untergrund. Infrastruktur für die Zukunft*. 5. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, 13. März 2008, Universität Karlsruhe (TH), Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, 2008, S. 11-16.
- [Du08] Durst, D.: Evakuierung einer U-Bahn-Station. Methodenvergleich zwischen computergestützter Analyse und manueller Berechnung. Hausarbeit, Hamburger-Fern-Hochschule. Essen, 2008. verfügbar unter <http://www.traffgo-ht.com/de/pedestrians/downloads/research/index.html>; Zugriff am 11.04.2012.
- [EB11] Eisenbahn-Bundesamt (2001, Stand 2011): Leitfaden für den Brandschutz in Personenverkehrsanlagen der Eisenbahnen des Bundes. Referat 21. Online verfügbar unter http://www.eba.bund.de/cln_031/SharedDocs/Publikationen/DE/Infothek/Infrastruktur/Hochbau/21_LF_brandschutz,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/21_LF_brandschutz.pdf, zuletzt geprüft am 19.04.2013.
- [FT10] Fujiyama, T. & Tyler, N.: Predicting the walking speed of pedestrians on stairs. In: *Transportation Planning and Technology*, 33 (2), 2010, S. 177–202.
- [GM04] Gratch, J.; Masella, S.: A Domain-independent Framework for Modelling Emotion, In: *Journal of Cognitive Systems research*, Volume 5, Issues 4, 2004; S. 269-306.

- [He02] Helbing, D. et al.: Simulation of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations. In: Schreckenberg, M.; Sharma, S., (eds.): Pedestrian and Evacuation Dynamics: Springer, 2002, S. 21-58.
- [Ho09] Hosser, D.: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. Technischer Bericht, vfdb, 2009.
- [HKZ im Druck] Hofinger, G.; Künzer, L. & Zinke, R.: „Nichts wie raus hier?!“. Entscheiden in Räumungs- und Evakuierungssituationen, In: Strohschneider, S., Heimann, R., (Hg.) Entscheiden in kritischen Situationen. Umgang mit Unbestimmtheit. Verlag für Polizeiwissenschaft, Frankfurt a.M., im Druck.
- [Ji09] Jiang, C.; Deng, Y.; Hu, C.; Ding, H.; Chow, W.: Crowding in platform staircases of a subway station in China during rush hours. In: Safety Science 47, 2009, S. 931-938.
- [KP05] Kuligowski, E. D.; Peacock, R. D.: A Review of Building Evacuation Models, National Institute of Standards and Technology Technical Note 1471, 2005.
- [KP im Druck] Koch, R.; Plaß, M.: Gefahrenabwehr in U-Bahnen: Nutzung von Informationen und Methoden der Prävention zur Optimierung der Selbst- und Fremdrettung. In: S³ - Science in Safety and Security (1). Im Druck.
- [KHZ12] Künzer, L., Hofinger, G. & Zinke, R: Mythen der Entfluchtung. In Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (Hrsg.). Tagungsband Jahresfachtagung 2012 der vfdb e.V.. Köln: DFS, 2012, S. 725-735.
- [Mu09] Müller, K.: Handbuch Evakuierung. Maßnahmen im Brand- und Katastrophenfall. Erich Schmidt Verlag, 2009.
- [NFP00] NFPA 130 Standard for Fixed Guideways Transit and Passenger Rail systems. Quincy MA, 2000.
- [PM71] Predtetschenski, W. M.; Milinski, I. A.: Personenströme in Gebäuden. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Berlin, 1971.
- [Ro05] Rogsch, C.: Vergleichende Untersuchungen zur dynamischen Simulation von Personenströmen. Diplomarbeit, Bergische Universität Wuppertal; 2005.
- [Sc11] J. Schram: Culturally Affected Behaviour in Belief-Desire-Intention Agents. Tilburg University, 2011.
- [Sc03] Schreyer, J.: Notfallszenarien für Tunnelanlagen des ÖPNV. In: Blennemann, F. (Hg.): Tunnel - Lebensadern der mobilen Gesellschaft. Vorträge der STUVA-Jahrestagung 2003 in Dortmund. Gütersloh: Bauverlag (Forschung und Praxis, U-Verkehr und unterirdisches Bauen, 40), S. 121–128.
- [Si95] Sime, J. D.: Crowd psychology and engineering. In: Safety Science 21(1), 1995, S. 1-14
- [SK07] Schneider, U.; Kirchberger, H.: Evakuierungsberechnungen bei Brandereignissen mittels Ingenieurmethoden. Vorbeugender Brandschutz, 2007, S.62 -75.
- [So07] Solomon, S. et. Al.: A Language for Modeling Cultural Norms, Biases and Stereotypes for Human Behavior Models. University of Southern California, 2007.
- [TM07] Tubbs, J. S. & Meacham, B. J.: Egress design solutions. A guide to evacuation and crowd management planning. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007.
- [UM01] Ungerer, D.; Morgenroth, U. C.: Analyse des menschlichen Fehlverhaltens in Gefahrensituationen. Empfehlungen für die Ausbildung (Zivilschutz-Forschung: Neue Folge, Bd. 43), Bundesverwaltungsamt Zentralstelle für Zivilschutz, Bonn, 2001.
- [VDMA05] Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (Hrsg.): Entrauchung von Räumen im Brandfall. Notwendige Zeiten für Entfluchtung, Rettung, Löschangriff (Informationsblatt Nr. 3), 2005.
- [Wo00] Wooldridge, M. J.: Reasoning about rational agents: MIT Press. 2000.
- [ZHK im Druck] Zinke, R, Hofinger, G. & Künzer, L.: Psychological aspects of human dynamics in underground evacuation: Field experiments. Proceedings of the 6th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics (PED), Zürich, 6. Juni 2012, im Druck.