

# 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, Fluchtweglenkung 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 „Faktors 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 Evakuierung bleibt nicht viel Zeit. Trotz sinnvoller baulicher Anpassungen, wie Rauchschürzen, die die zur Verfügung stehende Zeit erhöhen, kann das Verrauchen einer Station lebensbedrohlich für Menschen sein [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 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.

Reaktive Ansätze liegen vor allem in den Notfallplänen der Verkehrsbetriebe und den Angriffskonzepten der Feuerwehr vor. Innerhalb des Forschungsprojekts OrGaMIR<sup>1</sup> wurden unter anderem Konzepte zur dynamischen Fluchtwegslenkung, d.h. die Ermittlung von optimalen Fluchtwegen im aktuellen Gefahrenfall, erforscht. Den Mitarbeitern der U-Bahn und der Leitstellen sollten Informationen über die Ausbreitung eines Gefahrstoffes im U-Bahn-System schnell und sicher zur Verfügung gestellt werden. Durch die Anzeige der dynamisch angepassten Fluchtwege wird den Leitstellenmitarbeitern ermöglicht, die Fahrgäste rasch über den besten Weg zu instruieren. Dadurch wird die Chance zur Selbstrettung erhöht. Die hohe Relevanz der menschlichen Faktoren („human factors“) für die Fluchtwegslenkung, z.B. Emotionen, Motive, physiologische Eigenschaften, stellt ein wichtiges Ergebnis aus OrGaMIR dar. Es zeigte sich, dass sowohl im präventiven als auch reaktivem Kontext menschliche Faktoren bis dahin nur unzureichende Berücksichtigung gefunden haben. Im Rahmen des Folgeprojekts OrGaMIR<sup>PLUS</sup>, 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. Die Einbeziehung der Fahrgäste sollte technische und menschliche Anforderungen an eine dynamische Fluchtwegslenkung aufdecken.

## 1.1 Modellierung der Fluchtwegsberechnung im Projekt OrGaMIR

Ziel war es, für jede Position eines Fahrgastes in der U-Bahn-Station im Gefahrenfall einen optimalen, d.h. sicheren Fluchtweg zu berechnen. Dieser optimale Fluchtweg resultierte aus der aktuellen und zukünftigen Gefahrstoffausbreitung, möglichen Stauungen und den tatsächlichen Weglängen, die von einer Person zurückgelegt werden muss. Um effektiv in einer Evakuierung agieren zu können, dürfen für diese Berechnung keine langen Simulationen durchgeführt werden. 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

---

<sup>1</sup> Die Forschungsprojekte ORGAMIR und das Folgeprojekt ORGAMIR<sup>PLUS</sup> (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.

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 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 der aktuell „kürzeste“ Weg zu einem Ausgang bestimmt. Diese Informationen werden über das OrGaMIR-System dem Verkehrsbetrieb umgehend bereitgestellt. 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 Rettungswegen für die Feuerwehr verwendet werden.

## **1.2 Grenzen der realisierten Fluchtwegsberechnung des OrGaMIR-Systems**

Im Rahmen einer Evakuierung spielen vier Faktoren eine bedeutende Rolle: Der Anlass des Aufenthalts an einem Ort, die Art der Gefahr, die betroffene Umwelt bzw. Infrastruktur und menschliche Faktoren [HKZ im Druck]. Die ersten drei Faktoren werden bereits weitestgehend durch das OrGaMIR-System abgebildet. Der vierte Faktor ist dennoch eine entscheidende Größe für die 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, was sich auf empirisch ermittelte Werte für Geschwindigkeiten und Dichten stützt, 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 Konzept und zur Fluchtwegslenkung 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**

Im Rahmen des Projekts OrGaMIR<sup>PLUS</sup> wurde eine Modellierung von Menschen während einer Evakuierung erarbeitet. Das Vorgehen bei dieser 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 einer U-Bahn – Infrastruktur
- 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-Cluster<sup>2</sup>

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-Bahnhöfen durchgeführt. Zum anderen wurden unterschiedliche Modellierungen in Bezug auf deren Handhabung erprobt und beurteilt. Letztendlich wurde eine, zur Integration des „Faktor Mensch“ geeignete, Modellierung ausgewählt.

---

<sup>2</sup> Um den Anspruch einer kurzen Rechenzeit zu wahren, wurden Typen von U-Bahn- Nutzern, sog. Personen-Cluster, definiert und die Berechnung nur für die Personen-Cluster durchgeführt. Eine nähere Beschreibung der Personen-Cluster findet sich in Abschnitt 2.2.1

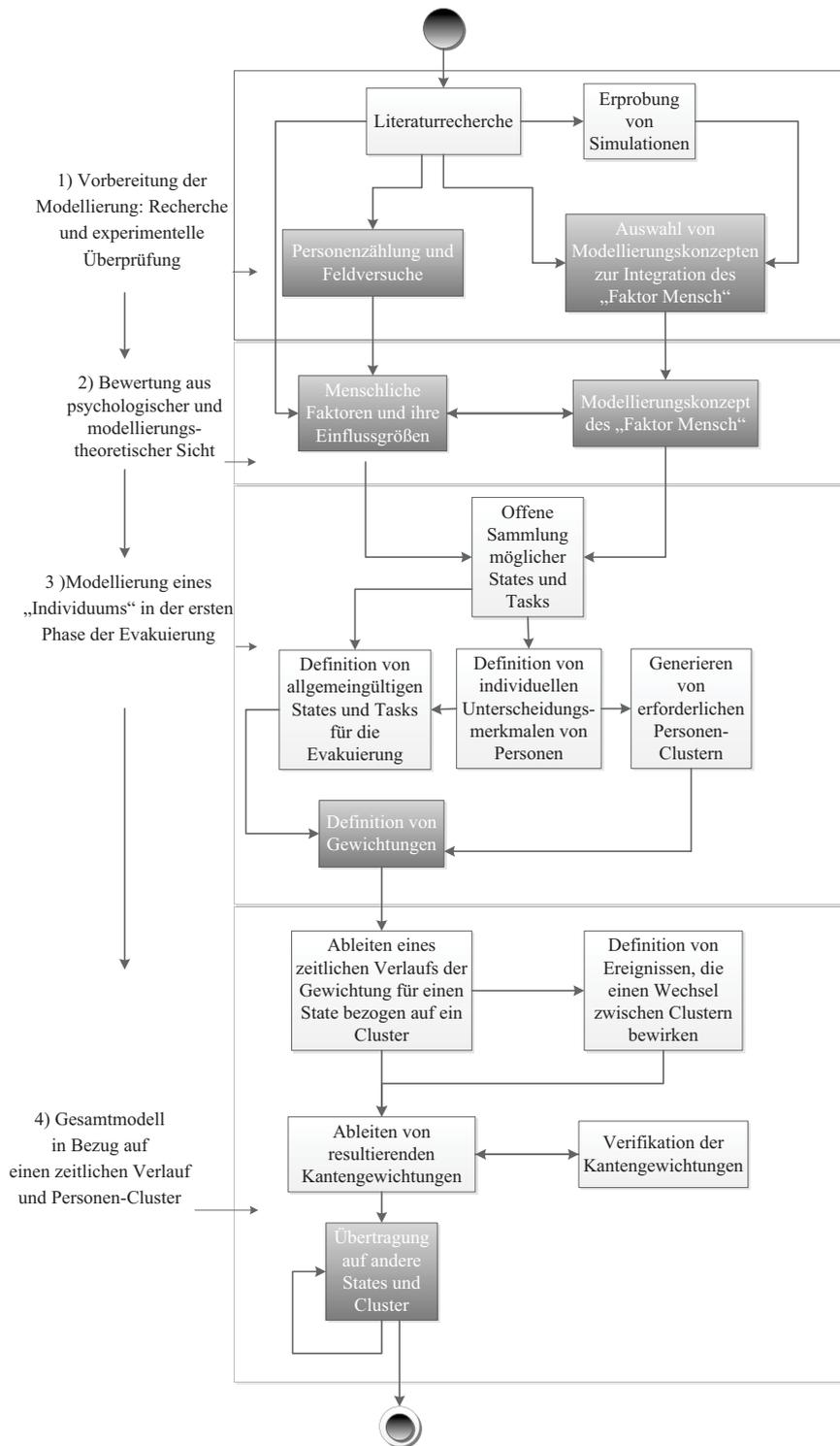


Abbildung 1 Vorgehen bei der Modellierung des „Faktors Mensch“ in der Evakuierung im Projekt OrGaMIR<sup>PLUS</sup>

### 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 verschiedenen 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 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 wurden Feldversuchen in vier U-Bahnhöfen durchgeführt. Dabei wurden insbesondere die Auswirkungen von personenbezogenen Parametern ([PM71]; [Si95]), der Einfluss von Infrastrukturelementen, wie Hindernisse, Engstellen, Treppen ([Ji09]; [Sc03]; [FT10]) und generellen Strömungsphänomenen in Fußgängermengen unter Normal- oder Evakuierungsbedingungen (z.B. [He02]) betrachtet. In den Ergebnissen zeigten sich z.T. deutliche Varianzen in der benötigten Zeit für eine Evakuierung. Einflussgrößen waren u.a. die Gruppengröße, besondere Infrastrukturelemente (Treppen), die körperlicher Verfassung und das Mitführen von Gepäck.

### 2.1.2 Auswahl eines Modellierungskonzept zur Intergation des „Faktor Mensch“

Durch die betrachtete Infrastruktur „U-Bahn“ und das bereits bestehende OrGaMIR-System waren grundlegende Rahmenbedingungen für die Auswahl eines Evakuierungsmodells gegeben. Es konnten dabei drei Anforderungskategorien festgestellt werden:

- **Anforderungen an die Nutzung bzw. Anwendbarkeit**, z.B. Anpassbarkeit für und Integration in das OrGaMIR-System
- **Anforderungen an die Berechnungszeit**, z.B. Einhaltung der Rechenzeit von maximal 20 Sekunden
- **Anforderungen an Einflussgrößen**, z.B. Berücksichtigung der Infrastruktur und menschlicher Faktoren (vgl. [Bel2])

Es zeigte sich, dass mikroskopische Individualmodelle, die jeden Menschen modellieren, z.B. als Agenten mit spezifischen Eigenschaften (vgl. [KP05]), einen hohen Nutzwert zur Evakuierungsberechnung erzielen. Mikroskopische Individualmodelle erfüllen jedoch nicht die in OrGaMIR definierten Anforderungen, da weder die Berechnungszeit noch die Nachvollziehbarkeit der Modellierung von menschlichen Faktoren (Einflussgrößen) erfüllt werden (vgl. [Bel2]). Das Rechenverfahren von P&M wurde für

das OrGaMIR-Projekt ausgewählt, da es im Kontext von U-Bahnbetreibern gebräuchlich ([Du09], [Ho09]) wie auch akzeptiert ist. Diese Methode weist zudem, entsprechend der durchgeführten Nutzwertanalyse, den höchsten Nutzwert der hydraulischen Modelle (Betrachtung der Personen als Strom/ Fluss) auf [Be12]. Darüber hinaus ist das Rechenverfahren nach P&M frei verfügbar. Ziel der vorliegenden Modellierung ist es, den bestehenden Ansatz des OrGaMIR-Systems sowie die Methode von P&M so weiterzuentwickeln, dass sie die formulierten Anforderungskategorien erfüllt, insbesondere die Abbildung von menschlichen Faktoren.

## **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, zeigten sich, auch aus den Feldversuchen, vier distinkte Merkmale: *das Handeln als Individuum* bzw. *die Zugehörigkeit zu einer Gruppe*, *die Ortskenntnis* in der U-Bahnstation, *das Vorhandensein* bzw. *das Fehlen einer emotionalen Einschränkung* 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**

Es wurden 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 den 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, die im Folgenden beschrieben werden.

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 und 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 nachfolgenden Abbildung erläutert und wurden mit Hilfe der CAB-Language realisiert.

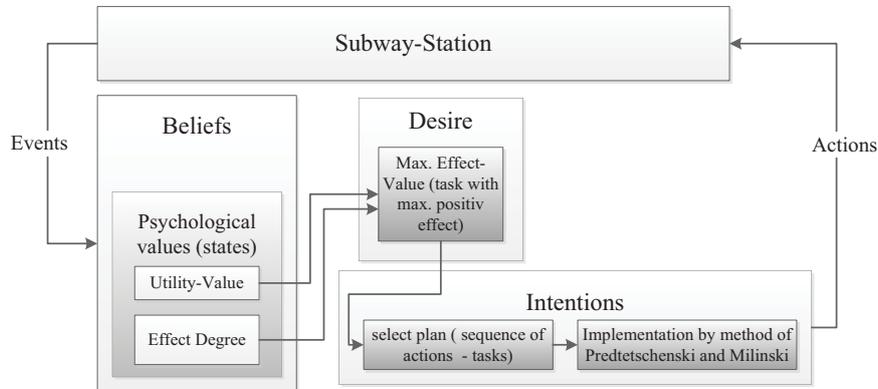


Abbildung 2 Modellierung von Verhalten und Normen als Entscheidungsgrundlage in Evakuierungssituationen durch Kombination von CAB, BDI und P&M [vgl. [Sc11]]

**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:  $a = \sum_{i=1}^n d(t, s_i) * u(s_i) / \sum_{i=1}^n u(s_i)$ . 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.

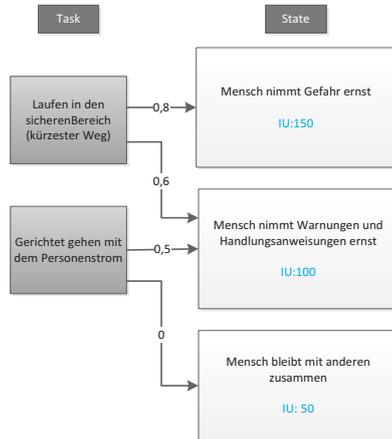


Abbildung 4 Ausschnitt aus dem Modell zum Cluster: *Individuum mit Ortskenntnis ohne Einschränkungen*

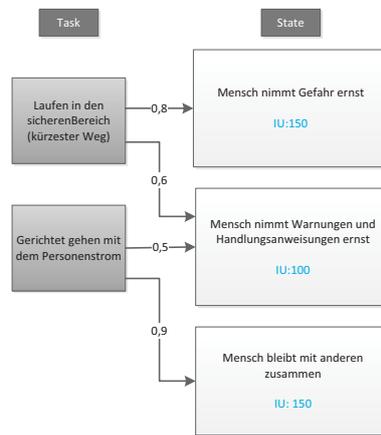


Abbildung 3 Ausschnitt aus dem Modell zum Cluster: *Gruppe mit Ortskenntnis ohne Einschränkungen*

**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 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.

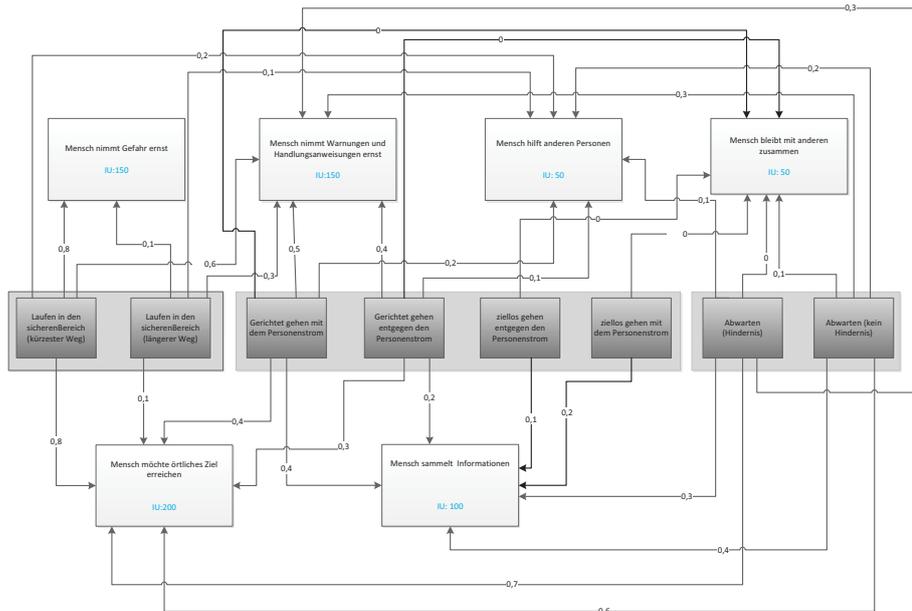


Abbildung 5 Modell für das Personen-Cluster („Individuum, Ortskenntnis vorhanden, ohne Einschränkungen“) zum Zeitpunkt  $T_0$

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 0 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 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 den Personen-Clustern

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, den präferierten 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. Beispielsweise lässt sich die Bereitschaft zu Helfen für das Personen-Cluster „Individuum; Ortskenntnis vorhanden; ohne Einschränkung“ als eine nach unten geöffnete, flache Parabel darstellen: zu Beginn hat dieser State nur eine geringe Bedeutung für das Cluster, bekommt jedoch im weiteren Verlauf eine höhere Relevanz, um letztlich auf Grund verstärkter Notwendigkeit zum Selbstschutz wieder an Bedeutung abzunehmen.

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.

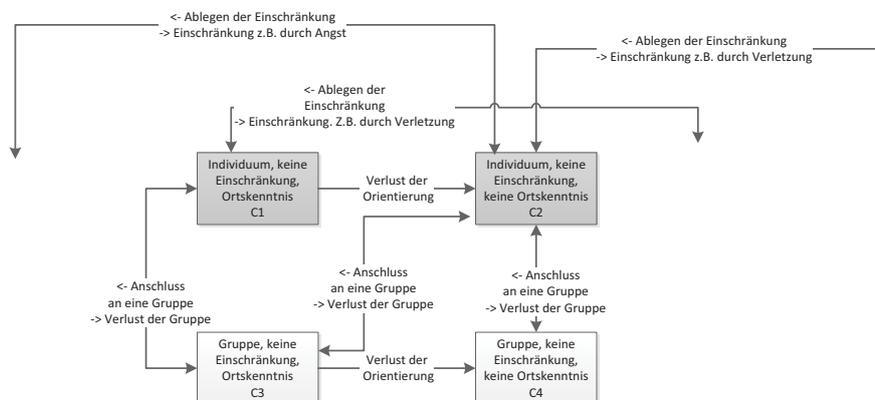


Abbildung 6 Abhängigkeiten und Übergänge zwischen Personen-Clustern

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, als Kantenbezeichnung zwischen den Clustern, in Abbildung 6 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.

**Übertragung des Konzepts**, bezogen auf:

- *Andere kritische Infrastrukturen* - 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 gerade abgeschlossen. 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 Wassereinbruch 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 variierender 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.traffgoht.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](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 reseach*, 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 Fremddrettung. In: *S<sup>3</sup> - 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.