

# EVAKUIERUNGSBERECHNUNGEN FÜR GROSS-SPORTSTÄTTEN

Tim Meyer-König, TraffGo GmbH, Duisburg/Flensburg

## EINLEITUNG

Wie lange dauert die Entfluchtung eines Gebäudes oder Bereichs? Wo treten Staus auf und wie kann ich sie vermeiden? Wie viele Personen kann ich maximal zulassen? Dies sind die meistgestellten Fragen, die bei der Bewertung von Evakuierungskonzepten gestellt und dank moderner Analyseverfahren auch beantwortet werden.

Heutzutage ist das Auftreten hoher Personendichten in Gebäuden mit komplexen Geometrien eine gängige Situation. Neben den „Gebäuden des Alltags“ wie Bahnhöfen, Flughäfen und Bürokomplexen kommt es besonders bei der Freizeitgestaltung in Sportarenen oder Eventhallen zu fünfstelligen Personenzahlen, die auf einer minimalen Fläche untergebracht werden. Meist geht dies mit stark verwinkelten Fluchtwegen einher.

Die Beurteilung dieser Fluchtwegen fordert sowohl den verantwortlichen Ingenieur, der sie auslegt und dimensioniert als auch den Vertreter der Behörde, der den Entwurf prüft und abnimmt. Die Dimensionen des Objekts als auch die Komplexität der Entfluchtung sprengen häufig den Rahmen des Vorstellbaren.

Die in der Vergangenheit entwickelten und auf sogenannten Flussmodellen basierenden Analysen stellen einen ersten Schritt auf dem Weg zur Prognose der Evakuierungsdauer dar. Die steigenden Anforderungen aufgrund komplexer Geometrien der Fluchtwegen und die Stochastik des Ablaufs können mit ihrer Hilfe allerdings nur ungenügend oder unter ausuferndem Arbeitsaufwand erfüllt werden.

Die verfügbaren Programme, die auf Simulationen mit teilweise bestechend einfachen Modellen beruhen, bieten auf diesen Gebieten eine Lösung. Neben einer erhöhten Realitätsnähe erlauben sie durch ihre flexible Handhabung die Untersuchung verschiedener Entwurfsvarianten zur Optimierung des Gesamtkonzepts. Darüber hinaus ermöglicht eine Variation der Parameter Sensitivitätsanalysen des Entfluchtungskonzepts. Erst wenn die Ergebnisse verschiedener Evakuierungsszenarien vorliegen, können Aussagen zur Güte getroffen werden.

Ziel dieses Artikels ist es, ein Verständnis für die Funktionsweise derartiger Simulationen zu erwecken. Als Beispiel dient das durch die Mitarbeiter der TraffGo GmbH entwickelte Modell. Es wurde in der Software PedGo implementiert, die international bei der Analyse von Evakuierungskonzepten und ihrer behördlichen Genehmigung eingesetzt wird.

Zur praxisnahen Erläuterung werden Ergebnisse von der Analyse eines Stadions aufgeführt. Sie zeigen, wie sich Ergebnisse abhängig von den Eingangsdaten verhalten und welchen Variationen sie unterworfen sind.

## DAS MODELL

Der Grundstein für die Entwicklung eines Simulationsmodells für Fußgängerbewegungen wurde 1999 gelegt: Auf Betreiben der deutschen Werften und des *Ministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen* wurde das vom *bmb+f* geförderte Forschungsvorhaben *BYPASS* an der Universität Duisburg ins Leben gerufen [2]. Innerhalb von drei fruchtbaren Jahren erreichte es alle erklärten Ziele: Ein Modell zur Simulation von Evakuierungen wurde entwickelt und neue, weltweit gültige Richtlinien der *International Maritime Organization (IMO)* wurden etabliert. Seit Juni 2002 können die für Personen-Fährrschiffe vorgeschriebenen Evakuierungsanalysen mit Hilfe einer Simulation schnell und realitätsnah durchgeführt werden. *PedGo* ist hierzu von der deutschen See-Berufsgenossenschaft zertifiziert.

Bei der Entwicklung des Modells waren zwei Forderungen zu erfüllen:

1. Die Anwendung sollte realistische Ergebnisse liefern und
2. es sollte einfach und durch jeden nachvollziehbar sein.

Jede für sich ist leicht verständlich, eine Verknüpfung von beiden in einem Modell stellt allerdings eine große Anforderung bei der Modellbildung dar.

Der erste Punkt ist trivial. Eine Rechnung mit realitätsfernen Ergebnissen ist sinnlos. Der zweiten Forderung liegen konkretere Vorstellungen zum späteren Einsatz zugrunde: Sollen die Ergebnisse einer Simulation in der Anwendung problemlos durch die behördlichen Genehmigungsstellen anerkannt werden, so muss das zugrundeliegende Modell transparent und leicht nachvollziehbar sein. Erst dann sind die vorgelegten Ergebnisse für die Behörde interpretierbar.

Das im Rahmen des *BYPASS*-Projekts entwickelte Modell wurde von *TraffGo* in der Software *PedGo* implementiert. Neben der Analyse von Fahrgastschiffen lässt es sich selbstverständlich zur Analyse von Gebäuden einsetzen. Soweit es möglich war, wurde die Software durch Praxistests validiert. Details hierzu können in anderen Publikationen nachgelesen werden [1].

## Personen

*PedGo* liegt ein mikroskopisches Modell zugrunde, welches die Bewegung jeder einzelnen Personen (repräsentiert durch einen sogenannten Agenten) simuliert. Der Bewegungsalgorithmus, anhand dessen sich die Agenten orientieren und bewegen ist dabei einheitlich und sehr einfach: Zu jedem Zeitschritt bestimmt der Agent die nötige Laufrichtung zum Erreichen seines Ziels und läuft dann so weit wie möglich darauf zu. Individuelle Parameter charakterisieren dabei sein Fähigkeiten, zum Beispiel die maximale Laufgeschwindigkeit und die Art, wie sensibel er anderen Personen und Hindernissen ausweicht.

Soweit lässt sich das „Verhalten“ einzelner Personen/Agenten leicht erklären und nachvollziehen. Die Komplexität und die stochastischen Abläufe des Evakuierungsprozesses werden weiter nicht beeinflusst. Sie entsteht durch Selbstorganisation (Abb. 1): Personen weichen sich aus und belegen abhängig von ihrer Geschwindigkeit unterschiedlich viel Platz. An Engpässen bilden sich hierdurch automatisch Staus und durch die stochastischen Entscheidungsprozesse der Agenten liefert jeder Berechnung ein anderes Ergebnis.

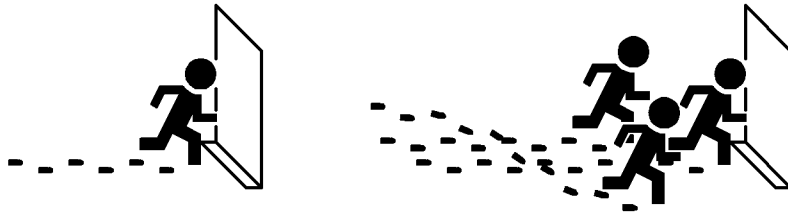


Abb. 1: Das Verhalten einer Person ist trivial. Erst durch viele interagierende Personen entsteht durch Selbstorganisation ein komplexer Ablaufs.

Bei der Festlegung der personenspezifischen Parameter stand während der Modellentwicklung der Aspekt eines einfachen Modells im Vordergrund. Die Anzahl der Parameter jeder Person sollte daher auf ein Minimum reduziert werden. Hierdurch wird das Modell transparent und die Ergebnisse interpretierbar. Man sagt auch, dass das Modell robust gegen äußere Eingriffe wird. Verwendet man hingegen sehr viele Parameter pro Person so ist bei Analysen kaum nachvollziehbar, welche Parameteränderung gerade für das momentane Ergebnis verantwortlich ist.

Betrachtet man die Bewegung einer Person sozusagen „von außen“, ohne Einblicke in ihre Gedanken zu bekommen, so charakterisiert sich ihre Bewegung durch ihre Geschwindigkeit und Ihre Laufrichtung. Ferner kommen von „außen“ nicht direkt erklärbare Schwankungen dieser beiden Parameter hinzu. Um sie im Modell berücksichtigen zu können führt man daher stochastische Parameter ein, die das optimale Verhalten zufällig stören. Die minimalistische Betrachtung der Personenbewegung führte dazu, dass im Modell nur sechs Parameter die Fähigkeiten einer Person charakterisieren (Abb. 2).

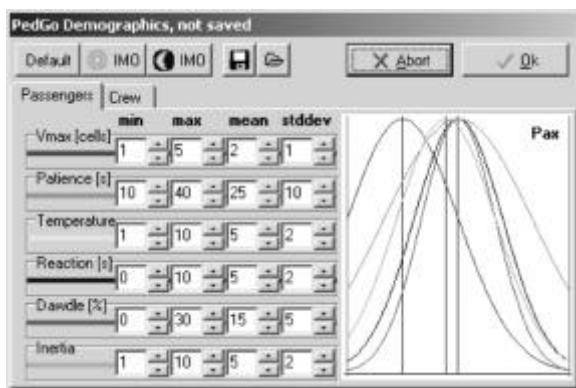


Abb. 2: Der Eingabedialog von PedGo zur Definition der sechs einstellbaren Personenparameter.

Am stärksten wirkt sich die Laufgeschwindigkeit aus die vorgibt, wie viele Zellen eine Person pro Zeitschritt zurücklegen kann. Effektiv verringert die Trödelwahrscheinlichkeit diese Geschwindigkeit, allerdings wirkt sie sich stochastisch aus. Eine Person läuft somit nicht mit ihrer Idealen Geschwindigkeit, sondern bremst zufällig etwas ab und stört damit den sonst optimalen Fluss.

Da Personen in der Realität unterschiedlich schnell auf das Räumungssignal reagieren, sind die Agenten mit einer individuellen Reaktionsdauer ausgestattet. Sie gibt vor, zu welcher Zeit ein Agent nach Beginn der Simulation losläuft. Der Einfluss dieses Parameters ist erheblich. Kann das Mittel aus allen Reaktionszeiten einer Population als eine Art Zuschlag (Offset) zur Laufzeit angesehen werden, so beeinflusst die Streuung der Verteilung maßgeblich die Größe der entstehenden Staus. Die Erklärung ist leicht nachvollziehbar: Laufen alle Personen in einer kurzen Zeitspanne los, treffen viele zur selben Zeit an Engpässen ein und behindern sich gegenseitig. Ist die Reaktionsdauer weit gestreut, verteilen sich die laufenden Personen über die Zeit und werden Staus verringert (Abb. 3).

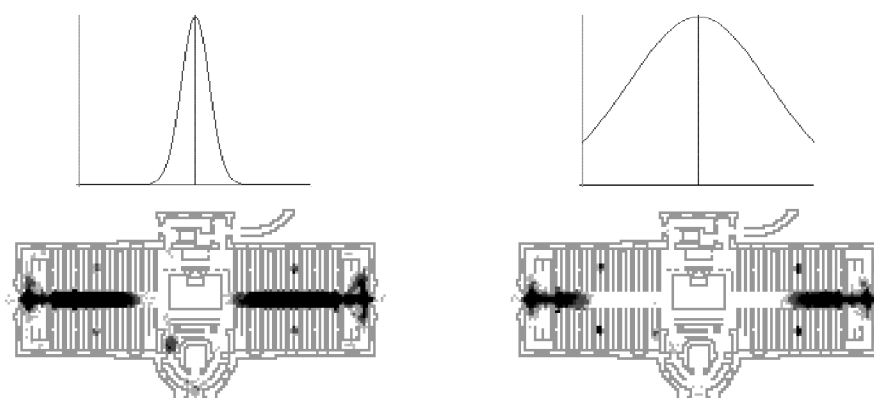


Abb. 3: Eine weit gestreute Reaktionsdauer (rechts) führt zu weniger stark ausgebildeten Staus (schwarze Flächen in den Stauplots). Die Fluchtwege führen in diesem Fall zu den Seiteneingängen der Kirche.

Während sich die beschriebenen Parameter auf das physische Laufverhalten auswirken, wird die Wahl der Route durch die Geduld gesteuert. Zu Beginn folgt jeder Agent der ihm zugewiesenen Route. Steht er dann allerdings die durch diesen Parameter vorgegebene Zeit in einem Stau, „verliert“ er seine Geduld und sucht nach einer alternativen Route.

Durch die Veränderung der Parameter lassen sich verschiedenste Populationen zusammensetzen und simulieren. Je nach Altersstruktur und Vertrautheit mit der Umgebung erhält man Agenten, die sich unterschiedlich schnell und zielstrebig bewegen. Die Festlegung der Parameter sollte in enger Zusammenarbeit mit der zuständigen Behörde geschehen und führt häufig zu ausgiebigen Diskussionen. Um die Auswirkungen der Parameter festzustellen empfiehlt es sich daher, verschiedene Simulationen mit variierenden Werten durchzuführen.

## Grundriss

Neben der Art, wie die Personen simuliert werden, ist natürlich auch die Berücksichtigung des Grundrisses eine entscheidende Frage bei der Modellbildung. Da die Rechengeschwindigkeit der Simulation ein entscheidendes Kriterium ist, wird der zu untersuchende Grundriss in PedGo diskretisiert und in ein

Gitter aus quadratischen Zellen unterteilt (siehe Abb. 4). Manche der sich ergebenden Zellen sind nicht begehbar und repräsentieren somit Wände und Einrichtungsgegenstände. Andere sind zugänglich und repräsentieren neben freien Zellen auch Treppen und Türen. Eine Zelle kann von maximal einem Agenten betreten werden und hat eine Kantenlänge von 40 cm. Die daraus resultierende Fläche entspricht der gemittelten Standfläche einer Person im Stau, bei dem die Bewegung zum Stillstand kommt.

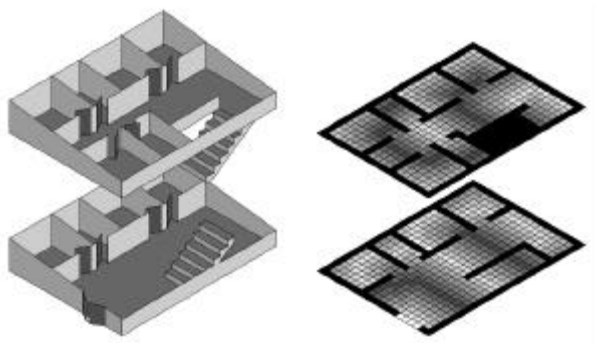


Abb. 4: Der Grundriss (links) wird auf das Zellgitter diskretisiert (rechts). Dann wird die Route anhand des Potenzials markiert.

Im Laufe der Simulation springen die Agenten wie bei einem Schachspiel von Zelle zu Zelle auf ihr Ziel zu. Dabei behindern sie sich gegenseitig und müssen ihre Geschwindigkeit dem verfügbaren Platz anpassen.

Zur Orientierung werden den Personen Routen anhand von Potenzialen zugewiesen. Das Potenzial ist ein Wert in jeder Zelle, der mit zunehmenden Abstand zum Ziel größer wird. Die Art, wie sich das Potenzial im Grundriss ausbreitet kann vom Benutzer durch die Markierung ausgewählter Türen vorgegeben werden. Somit sind beliebige Routen, die einander nicht beeinflussen, definierbar. Mithilfe der verschiedenen Routen können wieder Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden: Man definiert eine Route, die regulär zum Hauptausgang eines Objekts führt und eine andere, die dem Fluchtweg entspricht. Laufen die Agenten im ersten Durchgang noch alle entlang der Route zum Hauptausgang, folgen in den weiteren Simulationen immer größere Anteile den Fluchtwegen. Aus den Ergebnissen ist abschätzbar, wie sich die Entfluchtungsdauer in Abhängigkeit der Nutzung der Fluchtwegen entwickelt.

## PEDGO

Das beschriebene Modell wurde in der Software PedGo implementiert. Durch seinen bestechend einfachen Aufbau ist die Rechengeschwindigkeit des Programms extrem hoch. Die für eine statistische Analyse notwendigen Simulationsdurchläufe können damit in sehr kurzer Zeit berechnet werden (Beispiel: PC, 500 MHz Proz., 550 Personen, 425 mal schneller als die Realität).

Neben der Simulationssoftware wurde zum schnellen Aufbereiten von CAD-Zeichnungen der PedGo Editor entwickelt. Er dient dazu, Grundrisse im dxf-

Format zu importieren und auf das diskrete Gitter zu runden. Durch die Kopp-  
lung von Elementfarben aus der CAD-Zeichnung mit Eigenschaften können Tü-  
ren und Treppen erkannt und die betreffende Information den Zellen automa-  
tisch zugewiesen werden. Das teilweise umfangreiche Preprocessing wird somit  
stark automatisiert und es kann schnell mit der eigentlichen Analyse begonnen  
werden.

## ANWENDUNGSBEISPIEL

In Zusammenarbeit mit dem *Büro für Tragwerksplanung, Baustatik und Bau-  
physik* wurde eine Evakuierungsanalyse für die neu ausgebauten Ecktürme des  
Dortmunder Westfalenstadions durchgeführt. Da in den Ecken die Fluchtwege  
der Mitteltribünen in die der Ecktribünen münden, musste das gesamte Stadion  
modelliert werden (Abb. 5). Zur Reduktion des Aufwands wurden die  
Tribünenbereiche der Mitteltribünen allerdings nur als leere Gefäße modelliert.  
Durch eine geeignete Wahl der Reaktionszeiten ergaben sich die  
abgeschätzten Flüsse an den Ausgängen.

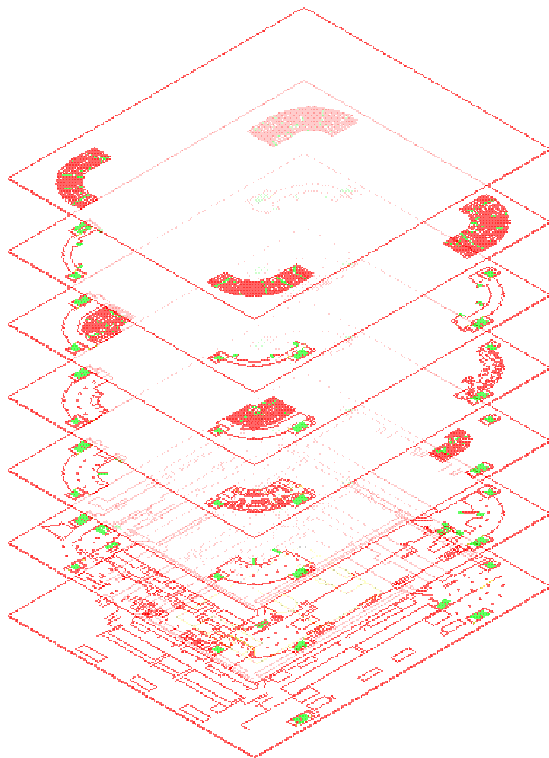


Abb. 5: Die modellierten Ebenen des Westfalenstadions mit detailliert modellierten Ecktribünen.

Zur Festlegung der Personenparameter wurde ein gewöhnlicher Bevölkerungs-  
querschnitt gewählt und die entsprechenden Eigenschaften den bis zu 44.000  
Agenten zugewiesen. Durch eine Variation der Parameter Geschwindigkeit,  
Trödeln und Reaktionsdauer wurden drei verschiedene Entfluchtungsfälle defi-

nier (langsam, gemäßigt und schnell) und die Auswirkung der Parameter, in der Realität also des Personenverhaltens, analysiert. Um ein statistisch zuverlässiges Ergebnis zu erhalten wurden für jedes Szenario 100 Durchläufe simuliert.

Es hat sich gezeigt, dass die Gesamtevakuierungsdauer je nach Reaktionsdauer und Laufgeschwindigkeit der Personen stark schwanken kann (Tab. 1). Da kein Gegenstrom durch zum Beispiel Rettungskräfte simuliert wurde, war die Standardabweichung der Ergebnisse gering. Wird er berücksichtigt, so hat sich in anderen Analysen gezeigt, dass sehr starke Streuungen durch das Verstopfen der Fluchtwege entstehen.

/min	Minimum	Maximum	Stdabw.	Mittel	Signifikant
Fall 1 (schnell)	12:26	12:46	4	12:35	<b>12:41</b>
Fall 2 (gemäßigt)	12:47	13:08	5	12:58	<b>13:07</b>
Fall 3 (langsam)	18:44	19:33	9	19:05	<b>19:22</b>

Tab. 1: Die berechneten Evakuierungsdauern für die Fälle 1 bis 3.

Betrachtet man die zeitliche Entwicklung der Prozesse anhand der Evakuierungskurven (Abb. 6), so zeigt der fast gleiche Verlauf des gemäßigten und des schnellen Falls, dass eine Reduktion der Evakuierungsdauer durch die Auswirkungen der Staus nicht mehr möglich ist. Auch wenn die Personen noch schneller gehen würden, an den Engpässen entstehen durch die hohen Dichten Staus welche die maximal möglichen Flüsse an den Ausgängen festlegen.

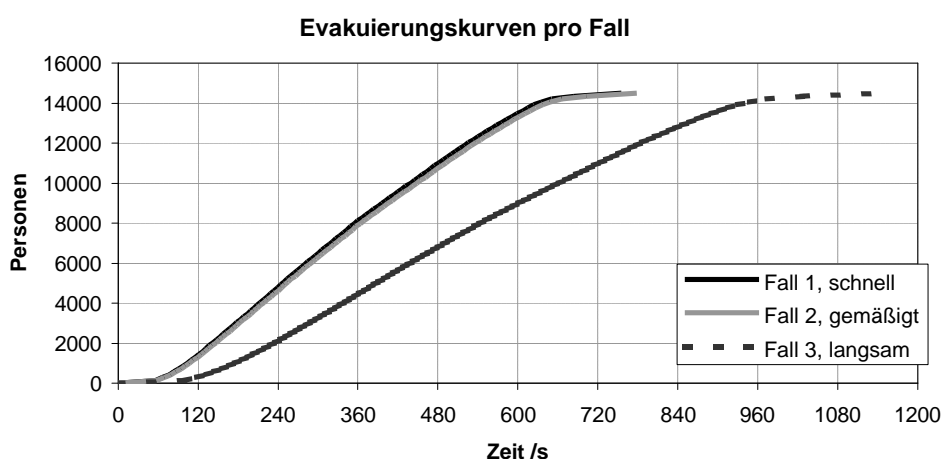


Abb. 6: Die berechneten Evakuierungskurven (gerettete Personen pro Zeit) für die drei Fälle.

Die geforderte Einbeziehung der Mitteltribünen zeigte, dass die Personenströme an den Ausgängen der einzelnen Bereiche klar voneinander getrennt waren. Durch das neu errichtete Treppenhaus in der Nordwest-Ecke wurde aller-

dings effektiv die Breite des Fluchtwegs hinter den aufgestellten Vereinzelnern reduziert. Die Simulation prognostiziert einen Stau, der sich bis zur dritten Minute der Entfluchtung konstant ausweitet und letztendlich das Ergebnis bestimmt. Der Bereich wurde daraufhin während eines Länderspiels durch Videoaufzeichnungen untersucht. Hierbei traten jedoch nicht die bei einer Entfluchtung zu erwartenden hohen Flüsse auf, so dass noch keine abschließende Feststellung getroffen werden konnte.

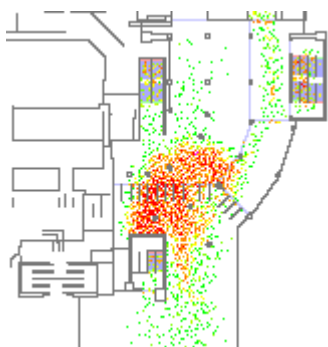


Abb. 7: Die Staubildung in der Nordwest-Ecke, drei Minuten nach dem Start der Entfluchtung.

## FAZIT UND DANCSAGUNG

Durch die wissenschaftlich fundierten Grundlagen ist das von PedGo verwendete minimalistische Modell sehr effizient und praxisnah. Dies konnte durch diverse Vergleiche mit praktischen Evakuierungen aufgezeigt werden. Es hat sich in der Vergangenheit bei der behördlichen Bewertung von Entfluchtungskonzepten bewährt und zeigt, dass die praktische Anwendung von derartiger Software zunimmt. Vor allem bei Großprojekten wie dem aufgezeigten Fußballstadion gehört eine derartige Analyse zum aktuellen Stand der Technik.

Für die Akzeptanz der Ergebnisse ist allerdings die Transparenz des Modells unablässig und es sollte nie vergessen werden, dass trotz der vielfachen Möglichkeiten der Simulation eine noch viel größere Anzahl von Unwägbarkeiten besteht.

Wir danken der Borussia Dortmund für die Erlaubnis, Teile der Ergebnisse aus der Evakuierungsanalyse des Westfalenstadions in diesem Artikel veröffentlichen zu dürfen.

## QUELLEN

- [1] Meyer-König, Tim: Mikroskopische Simulation von Evakuierungsprozessen, Technische Überwachung Bd. 43 Nr. 9, Springer/VDI, Sept. 2002
- [2] Meyer-König, Tim: Assessment and Analysis of Evacuation Processes on Passenger Ships by Microscopic Simulation, Pedestrian Evacuation Dynamics, 2001