

# BYPASS: Evakuierungssimulation für Fahrgastschiffe

T. Meyer-König, H. Klüpfel, J. Wahle, M. Schreckenber

Tragische Fährunglücke in den vergangenen Jahren haben zur Forderung nach verbesserten Sicherheitsstandards für Fahrgastschiffe geführt. Dabei spielt die Planung von Maßnahmen für Notfallsituationen, ihre genaue Bewertung und vor allem die Vorhersage der Evakuierungsdauer eine Schlüsselrolle. So müssen an oder nach dem 1. Juli 1999 gebaute Roll-on/Roll-off (Ro-Ro-) Fahrgastschiffe bereits im frühen Entwurfsstadium einer Evakuierungsanalyse unterzogen werden [10]. In diesem Beitrag werden die Grundlagen und die Implementierung einer neuen Methode für die mikroskopische Simulation von Evakuierungsprozessen beschrieben.



Abbildung 1: Programm FlightSim.

Im Rahmen des Projekts BYPASS (Bewertung und Analyse von Evakuierungsprozessen auf Fahrgastschiffen mittels mikroskopischer Simulationstechniken) wird an der Universität Duisburg das Simulationstool FlightSim (siehe Abbildung 1) entwickelt, mit dem die Evakuierungsdauer für Fahrgastschiffe ermittelt werden kann.

## 1 Einführung

Evakuierungen von Schiffen, verursacht durch Brände, Strandung oder das Sinken des Fahrzeugs, stellen einen besonderen Fall des Schiffsbetriebs dar. Das Kentern der „Herald of Free Enterprise“ 1987 oder der Untergang der „Estonia“ 1994 sind Beispiele für tragische Unfälle aus der jüngsten Vergangenheit.

Beim Brand der „Achile Lauro“ 1994 dagegen konnten durch eine geordnete Evakuierung viele Menschenleben gerettet werden. Dieses Beispiel zeigt eindrucksvoll, welche entscheidende Bedeu-

tung der sorgfältigen Evakuierungsplanung zukommt. Bislang werden Fluchtwege auf Schiffen anhand empirischer Daten und Heuristiken konzipiert. Die Festlegung der Größe und Geometrie der Fluchtwege erfolgt nach dem Internationalen Übereinkommen von 1974 zum Schutz des menschlichen Lebens auf See (SOLAS '74) und ergänzenden Richtlinien der Internationalen Seeschiffahrts-Organisation (IMO, [11]). In diesem (als makroskopisch anzusehenden) Ansatz finden personenspezifische Parameter nur über gemittelte Größen Einfluß. Dies setzt z.B. voraus, daß sich alle Personen gleichartig verhalten. Es wird jedoch vermehrt gefordert, individuelle Bewegungsmuster stärker zu berücksichtigen [2,6].

Ein verwandtes Problem ist die Beschreibung von Straßenverkehr in großen Netzwerken. Die Betrachtung einzelner Kreuzungen reicht dabei nicht aus. Entscheidend ist ihr Zusammenspiel, das netzweite Effekte verursacht (wie Rückstauungen). Seit Anfang der 90er Jahre werden insbesondere Zellularautomaten erfolgreich zur Verkehrssimulation eingesetzt [8,9].

Die daraus gewonnenen Erkenntnisse können weitgehend auf die Beschreibung von Fußgängerbewegungen übertragen werden. Die mikroskopische Simulation ermöglicht eine realitätsnahe Beschreibung der Bewegung einzelner Personen und eine natürliche Identifikation der Modellparameter. Dadurch kann der Ablauf einer Schiffsevakuierung detailliert im Rechner nachgebildet werden. Da außerdem eine Analyse der Fluchtwege bereits im Entwurfsstadium gefordert ist, können über eine praxisnahe Bewertung finanzielle Einsparungen bei der Konstruktion und dem Betrieb von Schiffen erzielt werden.

In diesem Zusammenhang stellt das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen (BMVBW) auch Überlegungen an, die zeitabhängige Überlebenswahrscheinlichkeit eines havarierten Schiffes untersuchen zu lassen.

## 2 Bisherige Entwicklungen

Die Basis für die Berechnungen nach den IMO-Vorschriften ist die Anzahl der Personen, die sich an unterschiedlichen Stellen, wie Unterkunftsbereiche, Gesellschaftsräume oder Kabinen aufhalten.

Unterschieden werden der Tag- und der Nachtfall mit verschiedener Verteilung der Fahrgäste und der Besatzung auf dem Schiff.

Alle Personen beginnen zum selben Zeitpunkt mit der Evakuierung und bewegen sich entlang der primären Fluchtwege [12], überholen sich aber nicht. Ihre Laufgeschwindigkeit ist von der Dichte unabhängig, blockierte Fluchtwege und andere Störungen werden dabei nicht berücksichtigt. Anhand von Tabellen wird ermittelt, wie lange es unter idealen Bedingungen dauert, bis sich alle Personen von ihrem Aufenthaltsort zu den Sammelplätzen, d.h. den Orten bewegt haben, an denen die Rettungsmittel bereit stehen. Diese Zeit ist die maximale Laufzeit  $t_{\max}$  und ergibt sich als Summe der Laufzeiten für einzelne Streckenabschnitte. Äußere Einflüsse, z.B. durch Seegang verursachte Schiffsbewegungen, durch Wassereinbruch entstandene Schlagseite oder Rauchentwicklung, und personenspezifische Unterschiede werden durch einen Sicherheitsfaktor  $\gamma \approx 2,0$  repräsentiert, der mit  $t_{\max}$  multipliziert wird. Der Gegenflußfaktor  $\delta \approx 0,3$  berücksichtigt Besatzungsmitglieder, die sich - aufgrund ihrer besonderen Aufgaben - entgegen dem Personenstrom bewegen. Für die Bewegungszeit  $T$ , d.h. die Zeit, die tatsächlich von den Personen auf dem Schiff benötigt wird, um von Unterkünften oder Gesellschaftsräumen zu den Sammelplätzen zu gelangen, gilt:

$$T = (\delta + \gamma) \cdot t_{\max} \cdot$$

Hinzu kommen die Reaktionszeit  $A$  (awareness time) der Einzelpersonen und die Zeit, die vergeht, bis die Rettungsmittel zu Wasser gelassen sind  $L$  (launching time) sowie die Einbootungszeit  $E$  (embarkation

time). Die Reaktionszeit  $A$  ist in dieser Rechnung für alle Personen gleich. Da die Einbootung und das zu Wasser lassen der Rettungsmittel teilweise parallel ablaufen, wird die Summe von  $E$  und  $L$  mit  $2/3$  multipliziert.

Die Gesamtzeit zur Evakuierung setzt sich folgendermaßen zusammen:

$$t_{\text{ges}} = A + T + \frac{2}{3}(E + L) \leq 60 \text{ min.}$$

Ein Schiff gilt als tauglich, wenn die Zeit  $t_{\text{ges}}$  60 Minuten oder weniger beträgt.

Dies stellt einen Kompromiß zwischen Rechenaufwand und Detaillierungsgrad dar und bildet daher die Realität nur sehr ungenau ab. So verlaufen z.B. die Ereignisse nicht sequentiell, sondern parallel, etwa das Sammeln und die Einbootung. Darüber hinaus ist die Reaktionszeit der Personen statistisch verteilt, was den Evakuierungsablauf deutlich beeinflusst. Dem kann am besten mit einer mikroskopischen Modellierung Rechnung getragen werden.

### 3 Modellierung

Die realitätsnahe Beschreibung eines komplexen sozialen Phänomens wie Fußgängerverkehr ist eine spezielle Herausforderung an die mathematische Modellierung (eine Übersicht des aktuellen Forschungsstands findet sich z.B. in [4,5]). Obwohl die mikroskopische Modellierung einen intuitiven Zugang darstellt, wurden bislang wenige konkrete Modelle vorgeschlagen. Im Gegensatz zu Verkehrsmodellen für Fahrzeuge, die sich quasi eindimensional bewegen, ist für Fußgänger eine zweidimensionale Beschreibung unumgänglich. Sie können jeden Teil eines Weges oder Raumes benutzen und ihre Richtung beliebig ändern. Ein weiterer wesentlicher Unterschied ist, daß Fußgänger,

anders als Fahrzeuge, sofort ihre Endgeschwindigkeit erreichen.

Ein Ansatz ist ein Gittergas-Modell [7], bei dem Personen als Gasmoleküle angesehen werden. Ein neuerer Zugang sind Zellularautomaten

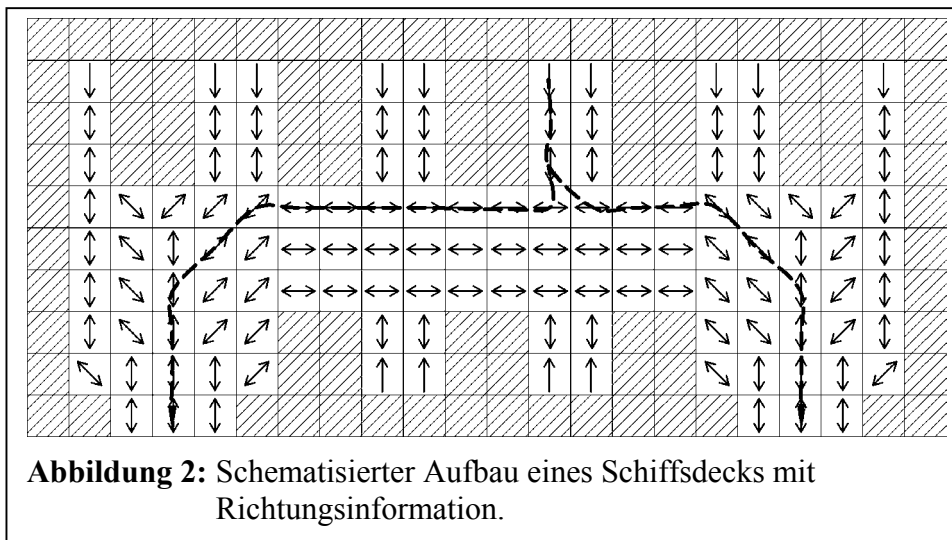
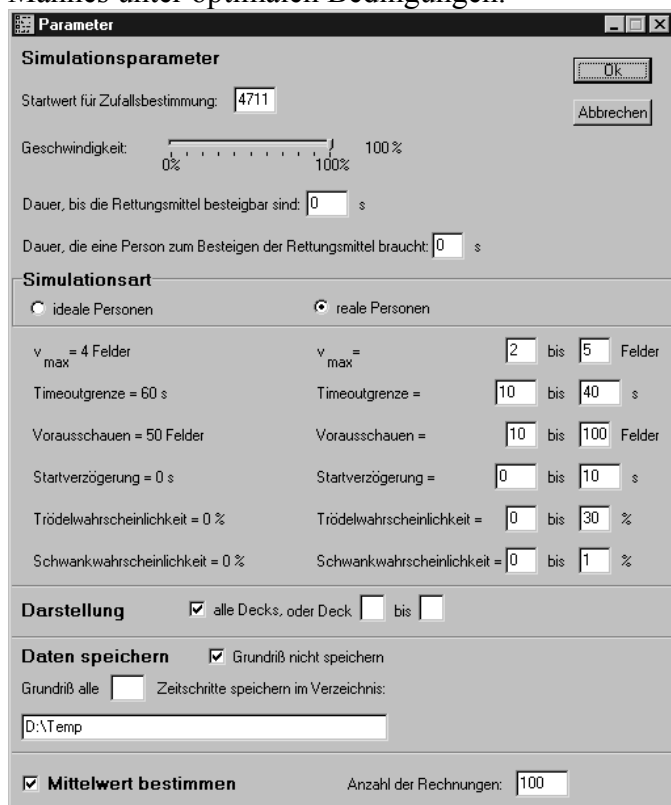


Abbildung 2: Schematisierter Aufbau eines Schiffsdecks mit Richtungsinformation.

[1,3], die bereits erfolgreich zur Simulation von Straßenverkehr eingesetzt wurden [8,9]. Diese Modelle müssen zur Beschreibung von Fußgängerverkehr, wie bereits erwähnt, auf zwei Dimensionen erweitert werden. Dabei spielt der Spurwechsel eine entscheidende Rolle, wobei zugrunde gelegt wird, daß sich verschiedene Laufspuren bilden [1,3].

Im folgenden wird das Simulationstool FlightSim v. 1.0 beschrieben. Um die Bewegung der Fußgänger

darzustellen, wird der begehbare Raum in quadratische Zellen von  $0,4m \cdot 0,4m$  aufgeteilt (siehe Abbildung 2), welche der mittleren Standfläche einer Person entsprechen [5]. Darüberhinaus werden die Zellen mit relevanten Richtungsinformationen im Schiff (d.h. primäre Fluchtwege [12]) belegt. Die Personen wählen eine Route mit Hilfe von lokalen Wegweisern. Dadurch werden sie zu den Sammelplätzen und dort bereitstehenden Rettungsmitteln geleitet. Türen, Rezesse und Nischen entlang der Fluchtwege (Gänge) werden durch Verringerung der Laufgeschwindigkeit berücksichtigt. Felder vor einer Wand, die einen Gang abschließt, sind durch absolute Richtungsinformation gekennzeichnet (siehe Abbildung 2). Dadurch wird verhindert, daß Personen in der Simulation an dieser Stelle stehen bleiben. Außerdem wird die Laufrichtung nach einer bewegungslosen Zeitspanne umgekehrt. Da der Grundriß aus quadratischen Feldern besteht, wird die Laufgeschwindigkeit in diagonaler Richtung entsprechend skaliert. Hexagonale Felder könnten hier vorteilhafter sein, würden aber die Zerlegung des Grundrisses erschweren. Die Personen haben eine maximale Geschwindigkeit  $v_{max}$ , die zwischen 2 und 5 Feldern/sec liegt. Eine Geschwindigkeit von 5 Feldern/sec entspricht ca. 1,6 m/sec, der mittleren Laufgeschwindigkeit eines erwachsenen Mannes unter optimalen Bedingungen.



**Abbildung 3:** Einstellung der Simulationsparameter in FlightSim.

Die Geschwindigkeit der Personen wird in jedem Zeitschritt in zufälliger Reihenfolge aktualisiert („random sequential update“). Dabei verfolgen die Personen die Strategie, sich mit möglichst hoher Geschwindigkeit über die freien Felder zu bewegen. Zusätzlich wird eine stochastische Komponente eingeführt (siehe Abbildung 3). Dadurch werden schwer erfassbare Ereignisse wie Orientierungsphasen oder Stürze simuliert. Im Zellularautomaten-Modell für den Fahrzeugverkehr wird dieser Faktor „Trödelfaktor“ genannt. In einer Notfallsituation herrschen allerdings andere Bedingungen: Unvorhergesehene Abweichungen vom idealen Ablauf kommen eher durch panisches, denn durch unaufmerksames Verhalten zustande.

Das Modell kann nicht nur zur Analyse von Evakuierungsprozessen auf Fahrgastschiffen eingesetzt werden, sondern eignet sich ganz allgemein zur Beschreibung menschlicher Bewegung in begrenzten Räumen.

In der Simulation werden die Personen solange bewegt, bis alle ein Rettungsfeld (Sammelplatz) erreicht haben und dann eingebootet sind. Daraus ergibt sich direkt die Evakuierungszeit. Sowohl die Reaktionszeit zu Beginn als auch die Zeit zum Besteigen der Rettungsmittel fließen ebenfalls ein. Im Rahmen dieser Arbeiten hat sich bestätigt, daß individuelle Handlungsweisen zu nichtlinearen Effekten führen und von enormer Bedeutung sind. Um diesen Ansatz weiter auszubauen, soll das Modell noch detaillierter ausgearbeitet und anhand genauer empirischer Daten kalibriert werden.

## 4 Schlußbetrachtung

Absolute Sicherheit ist nicht erreichbar. Das Ziel muß es jedoch sein, ein Höchstmaß an Sicherheit zu gewährleisten, ohne dabei das Nutzen/Kosten-Verhältnis aus den Augen zu verlieren. Aufgrund der Vorschriften der IMO und deren Anwendung auf Fahrgastschiffe sind die Sicherheitsstandards bereits sehr hoch. Durch Anwendung neuer Methoden kann die Sicherheit jedoch weiter verbessert werden. Die Erkenntnisse sollen schließlich in die Planung von Schiffen, in Notfallmaßnahmen und gegebenenfalls in den Entwurf neuer Sicherheitsrichtlinien einfließen.

Weitere personenspezifische Eigenschaften, die für die Simulation von Bedeutung sind, werden durch Gruppenbildung (Paare, Familien) oder die Hervorhebung von Besatzungsmitgliedern beschrieben, beispielsweise durch einen kleineren stochastischen Faktor. Ein paralleles Bewegen der Personen (anstelle des sequentiellen) in der Simulation ist

schließlich ebenso erstrebenswert wie eine Verbesserung des Routenwahlverfahrens. Auf die Herausforderungen, die sich aus der höheren Dimensionalität im Vergleich zum Straßenverkehr ergeben, wurde bereits hingewiesen. Besondere Bedeutung kommt außerdem der Auswertung empirischer Daten zur Kalibrierung der Modellparameter, der Analyse von Schwach- und Engstellen und der Validierung anhand von Erfahrungen aus Evakuierungsübungen zu.

Mit Hilfe der dargestellten Simulationsmethode können bereits Effekte der Vernetzung verschiedener Konstruktionselemente untersucht werden. Damit wird ein Entwurf in seiner Gesamtheit analysiert. Die Simulationsumgebung kann dann auch in anderen Evakuierungsszenarien erfolgreich eingesetzt werden (z.B. Gebäude, Stadien, Flugzeuge).

## Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen (BMBVW) für die Unterstützung des Projekts, insbesondere Herrn Kapitän Olsson für anregende Diskussionen und wertvolle Hinweise. Herrn Kapitän Stürmer von der See-Berufsgenossenschaft danken wir für die Einblicke in Praxistests. Den Herren Lohnman und Norda und Herrn Prof. Dr.-Ing. Thiel gilt ebenfalls unser Dank.

## Literaturverzeichnis

- [1] J.L. Adler und V.J. Blue. Bi-directional emergent fundamental pedestrian flows from cellular automata microsimulation. In: A.Ceder, editor, Int. Symp. on Transportation and Traffic Theory. Pergamon (1999).
- [2] L.C. Boer und W. Bles. Evacuation from ships: Account for ship motion. In Safety of transportation: Imbalance between growth and safety, Delft (1998).
- [3] M. Fukui und Y. Ishibashi. Self-organized phase transitions in CA-models for pedestrians. J. Phys. Soc. Japan, 8 (1999).
- [4] H.W. Hamacher und S.A. Tjandra. Modelling emergency evacuation - an overview. to be published (1999).
- [5] D. Helbing. Verkehrsdynamik. Springer, Berlin (1997).
- [6] G.G. Løvås. Models of way-finding in emergency evacuations. Euro. J. Op. Res., 105:371-389 (1998).

- [7] M. Muramatsu, T. Irie, und T. Nagatani. Jamming transition in pedestrian counter flow. Physica A, 267:487-498 (1999).
- [8] K. Nagel und M. Schreckenberg. A cellular automaton model for freeway traffic. J. de Phys. I, 2:2221 (1992).
- [9] M. Schreckenberg und D.E. Wolf (eds.). Traffic and Granular Flow '97. Springer, Singapore (1998).
- [10] SOLAS-Regel II-2/28-1.3
- [11] IMO – International Maritime Organization (Unterorganisation der VN)
- [12] Primäre Fluchtwege sind im Evakuierungsplan festgelegt.