

**FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH GmbH**  
**Zentralinstitut für Angewandte Mathematik**  
**D-52425 Jülich, Tel. (02461) 61-6402**

Interner Bericht

**Verfeinerte Auswertungsmethoden für  
Evakuierungssimulationen**

*Armin Seyfried, Marcus Strupp\*, Thomas Lippert*

FZJ-ZAM-IB-2004-12

November 2004

(letzte Änderung: 15.11.2004)



IfBW Ingenieurbüro für Brandschutz Wuppertal GmbH, Obergrünwalder Straße 8 a,  
42103 Wuppertal

Preprint: vfdb-Zeitschrift für Forschung, Technik und Management im Brandschutz, Seite 214,  
Heft 4 (2004)

# Verfeinerte Auswertungsmethoden für Evakuierungssimulationen

Armin Seyfried (Zentralinstitut für Angewandte Mathematik und John von Neumann-Institut für Computing, Forschungszentrum Jülich, 52425 Jülich, a.seyfried@fz-juelich.de)  
Marcus Strupp (IfBW Ingenieurbüro für Brandschutz Wuppertal GmbH, Obergrünwalder Straße 8 a, 42103 Wuppertal, strupp@ifbw-gmbh.de)  
Thomas Lippert (Zentralinstitut für Angewandte Mathematik und John von Neumann-Institut für Computing, Forschungszentrum Jülich, 52425 Jülich, Th.Lippert@fz-juelich.de)

## Abstract:

Um die Modellgrenzen von Computerprogrammen zur Simulation von Gebäuderäumungen zu veranschaulichen, wird die „Kapazitätscharakteristik“ eines Gebäudes eingeführt. Sie verdeutlicht, wie empfindlich die Vorhersage der Räumungszeit durch ein Computerprogramm von der Modellierung der Bewegung der Fußgänger an Engstellen abhängen kann. Die Untersuchung der vorhandenen Literaturangaben bezüglich des Personenflusses durch Engstellen und die Einführung der Kapazitätscharakteristik soll die Formulierung von Richtlinien und Zulassungskriterien für Simulationsprogramme unterstützen und zur Diskussion für notwendige Modellerweiterungen beigetragen.

## 1 Einführung

Im Bereich des Brandschutzes begann die Nutzung von Computerprogrammen zur Beschreibung der Räumung von Gebäuden Anfang der 80er Jahre [1]. Das schnelle Anwachsen der Rechenkapazität von Computern bildete die Grundlage für eine kommerzielle Anwendung und führte zu einer rasanten Entwicklung dieser Programme. Bemühungen zur Formulierung von Zulassungsverfahren und Richtlinien für diese Software werden erst seit wenigen Jahren unternommen. Beispielhaft seien der „Interim Guidelines for Evacuation Analyses for new and existing passenger ships“ der International Maritime Organisation (IMO) [2] und die zurzeit im deutschsprachigen Raum entstehende „Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen - RiMEA“ [3] genannt.

Jedes Computerprogramm zur Simulation von Gebäuderäumungen beruht auf einem Modell für die Bewegung von Fußgängern. Auf Grundlage dieser Modelle beschreiben die Programme den Fluss von Personenströmen durch ein Rettungswegesystem und liefern eine Vorhersage der Räumungszeit sowie eine Beschreibung der im Verlauf der Räumung auftretenden Stauungen. Um die Aussagekraft dieser Vorhersagen einordnen zu können, ist es notwendig sich der Grenzen der zugrunde liegenden Modelle bewusst zu sein. Zum jetzigen Zeitpunkt sind diese Modelle lediglich durch eine kleine und teilweise widersprüchliche experimentelle Datenbasis gestützt und berücksichtigen nur einen Teil der Parameter welche die Bewegung von Fußgängern beeinflussen können.

Um die Modellgrenzen zu verdeutlichen, wird in dem vorliegenden Artikel eine so genannte „Kapazitätscharakteristik“ eingeführt. Es handelt sich um eine erweiterte Analyse, die einen Einblick in experimentell unzugängliche Parameterbereiche erlaubt und allein durch die Computersimulation praktikabel wird. Sie erlaubt einen differenzierten Einblick in die Belastbarkeit eines Rettungswegesystems und soll die Formulierung von Richtlinien und Zulassungskriterien für Simulationsprogramme unterstützen, die Urteilssicherheit gegenüber den Vorhersagen von Computersimulationen verbessern und zur Diskussion für notwendige Modellerweiterungen beigetragen.

Der Artikel konzentriert sich auf die Phänomene an Türen und Engstellen. Der Fluss über Treppen stellt ein eigenes Thema dar und wird nicht behandelt. Aspekte panischer Zustände sowie die Einflüsse eines Brandes auf den Räumungsablauf durch Rauch oder toxische Verbrennungsprodukte werden in diesem Artikel vernachlässigt. Wie sich zeigen wird, ist die Modellierung der Bewegung von Fußgängern selbst bei regulären Bedingungen ein hoch komplexes Problem.

## 2 Verfahrensbeschreibung

Die Simulation einer Gebäuderäumung (z. B. mit Hilfe von Computerprogrammen) besteht aus folgenden Schritten:

1. Abbildung der Gebäudegeometrie
2. Festlegung der Anzahl und Eigenschaften der Nutzer
3. Festlegung der Szenarien
4. Berechnung
5. Bewertung der Ergebnisse

zu 1: Anhand der Planung des Architekten wird die Gebäudegeometrie so abgebildet, dass das verwendete Simulationsprogramm die Informationen verarbeiten kann. Insbesondere Breite, Länge und Verlauf der Rettungswege müssen exakt behandelt werden. Welche Flure, Treppen und Türen als Rettungswege dienen, wird durch den Nutzer des Simulationsprogramms festgelegt.

zu 2: Entsprechend der Nutzung des Gebäudes wird die Anzahl der zu räumenden Personen bestimmt. Neben der Anzahl muss die Mobilität der Personen, durch Größen wie maximale Gehgeschwindigkeit, Platzbedarf oder Reaktionszeit, vorgegeben werden.

zu 3: Die Festlegung von Gefahrenszenarien ermöglicht es, Situationen zu berücksichtigen in denen lediglich ein Teil des Rettungswegesystems nutzbar ist. Dies kann zum Beispiel im Fall eines Brandes durch Verrauchung eines Teils des Rettungswegesystems hervorgerufen werden.

zu 4: Die Berechnung ergibt eine Abbildung des Flusses der Personen durch das Rettungswegesystem in sichere Bereiche.

Zu 5: Die Abbildung des Personenflusses ermöglicht die Vorhersage der Räumungszeit und die Identifikation, Beschreibung und Bewertung der Stauungen im Rettungswegesystem. Als weiteres Kriterium wird in dem jetzigen Entwurf der Richtlinie RIMEA [3] die Maximalbelegungszahl genannt. Hierunter versteht man die Anzahl von Nutzern, für welche die maximal zulässige Räumungszeit nicht überschritten wird.

Bei der Bewertung dieser Ergebnisse ist man mit der Problematik konfrontiert, dass in den gesetzlichen Regelungen zwar Anforderungen an Länge und Breite von Rettungswegen formuliert sind, allerdings selten maximal zulässige Räumungszeiten oder Personendichten festgelegt werden. Aber auch eine Festlegung dieser Größen würde keine Aussage darüber treffen, ob der Verlauf einer Räumung als kritisch zu bewerten ist. Ein Anzeichen hierfür ist, wenn geringfügige Variation der Randbedingungen (wie z. B. die Anzahl der Nutzer oder deren Mobilität) eine große Veränderung der Räumungszeit bedingen. Dies ergibt sich allein aus den dynamischen Eigenschaften der Personenströme, die im nächsten Abschnitt behandelt werden.

### 3 Grundlagen der Dynamik von Fußgängern

Vorhersagen von Evakuierungssimulationen hängen empfindlich davon ab, welche Annahmen für die Geschwindigkeit und den Fluss der Personen getroffen werden. Zunächst erscheint es offensichtlich, dass die Räumungszeit eines Raumes für eine Gruppe von Personen mit einer hohen Mobilität wesentlich geringer ausfällt, als bei Personen geringer Mobilität, wie zum Beispiel behinderte oder alte Menschen. Bei einer genaueren Betrachtung wird allerdings deutlich, dass eine Erhöhung der Geschwindigkeiten der Personen unter Umständen zu einem Wachsen der Räumungszeit führen kann. Dieser Effekt beruht auf dem Zusammenhang zwischen Dichte und Fluss eines Personenstromes und wird im Folgenden anhand von Literaturangaben<sup>1</sup> verdeutlicht.

#### 3.1 Einflüsse auf die Gehgeschwindigkeit

Eine Zusammenfassung über die Einflüsse auf die Gehgeschwindigkeit von Fußgängern findet sich in [4]. Dort wird unterschieden zwischen den Eigenschaften des Fußgängers (Geschlecht, Alter, Größe, ...), den Begleitumständen der Bewegung (Verkehrszweck, Jahres- und Tageszeit, ...) und den Charakteristiken der Anlage (Steigung von Rampen, Steigung und Schrittmaße von Treppen, ...). Es handelt sich hierbei um individuelle Eigenschaften der Personen und um Randbedingungen die durch die Struktur und Nutzung des Gebäudes vorgegeben sind. In einer Computersimulation müssen diese durch den Anwender festgelegt werden. Diese Parameter werden im Folgenden als äußere Parameter bezeichnet.

Eine weitere, die Gehgeschwindigkeit von Fußgängern beeinflussende Größe, ist die Dichte des Personenstroms. Diese hängt in einer Computersimulation nicht allein von äußeren Parametern wie zum Beispiel dem Verkehrszweck ab, sondern wird auch durch das zugrunde liegende Modell zur Beschreibung der Fußgängerbewegung bestimmt.

#### 3.2 Einfluss der Dichte auf die Gehgeschwindigkeit und den Fluss in der Ebene ohne Engstelle

Die Räumungszeit eines Gebäudes wird anhand des Flusses der Personen durch das Rettungswegesystem festgelegt. Der Fluss  $\Phi$  gibt die Anzahl der Personen an, die pro Zeiteinheit eine Stelle der Breite  $b$ , z.B. eine Türe im Verlauf eines Rettungsweges, durchlaufen. Für den Fluss gilt:

$$\Phi = \rho \times v \times b ,$$

wobei  $\rho$  die mittlere Dichte des Personenstromes und  $v$  die mittlere Geschwindigkeit der Personen im Strom bezeichnet. Oft wird in der Literatur die Normierung des Flusses auf die Einheitsbreite, der spezifische Fluss, angegeben

$$\Phi_s = \Phi/b .$$

Ist die funktionale Abhängigkeit zwischen Gehgeschwindigkeit und Dichte  $v = v(\rho)$  bekannt, kann der Fluss als Funktion der Dichte formuliert werden:

$$\Phi_s = \rho \times v(\rho) .$$

---

<sup>1</sup> Die Autoren waren darauf angewiesen die zitierten Daten aus Graphiken zu entnehmen. Der hiermit verbundene Ablesefehler wird nicht berücksichtigt, da in der Diskussion und Interpretation nur qualitative Aussagen getroffen werden.

Betrachten wir zunächst die experimentellen Daten zu der Abhängigkeit zwischen der Dichte des Personenstroms und der mittleren Gehgeschwindigkeit in der Ebene. Die meisten Autoren verweisen auf die Ergebnisse Weidmanns [4]. Es handelt sich hierbei um eine Literaturstudie aus dem Jahr 1993.

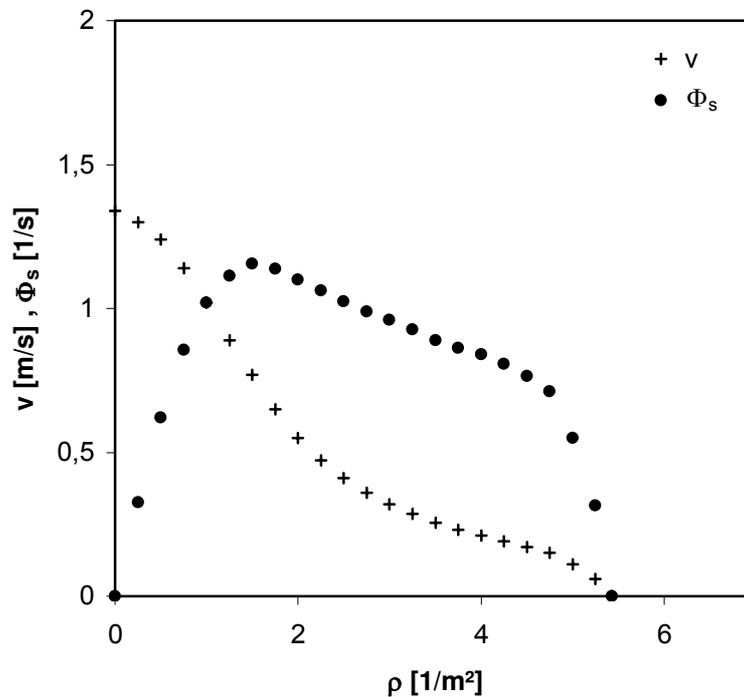


Abbildung 1: Gehgeschwindigkeit und Fluss in der Ebene ohne Engstelle nach Weidmann [4]

Für steigende Dichten fällt die Geschwindigkeit. Ursache für diesen Effekt ist, dass sich die für die Bewegung zur Verfügung stehende Fläche bei steigender Dichte verringert und somit die Bewegungsmöglichkeit der Personen im Strom eingeschränkt wird. Der Fluss weist ein Maximum bei einer Dichte von ca. 1,5 Personen pro Quadratmeter auf und bricht ab einer Dichte von ca. 5 Personen pro Quadratmeter ab.

### 3.3 Fluss durch Türen und Engstellen

An Türen oder Engstellen muss die notwendige Einfädelung von Personen in den Strom berücksichtigt werden. Wie sich dieser Prozess auf den Personenfluss auswirkt, hängt davon ab, wie sich Dichte und Geschwindigkeit im Bereich der Engstelle im Vergleich zum Fluss ohne Einengung verändern. In der folgenden Graphik sind verschiedene Literaturangaben zusammengefasst.

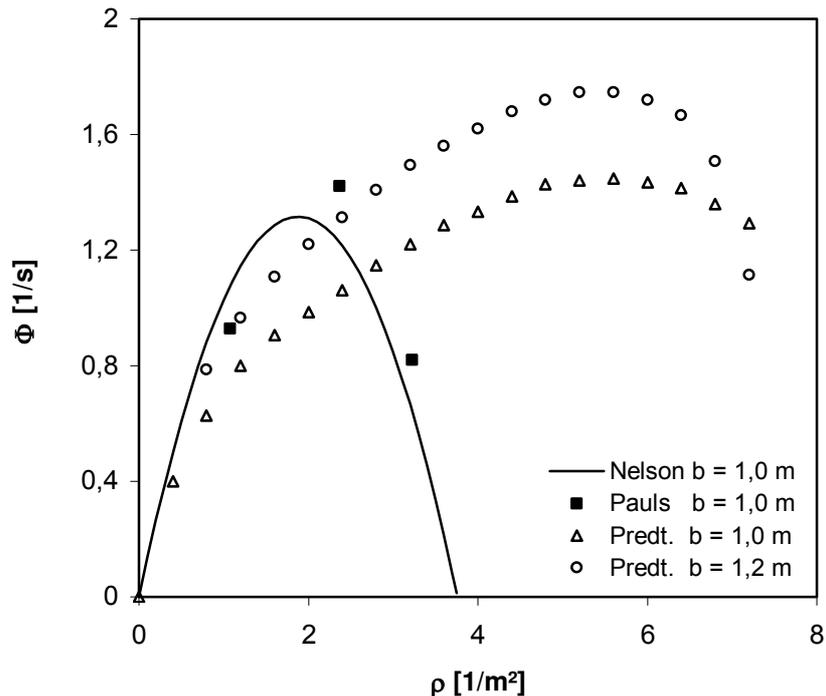


Abbildung 2: Fluss durch Türen

Ein erster Blick auf Abbildung 2 macht deutlich, wie unterschiedlich die Angaben in der Literatur sind. Insbesondere im Bereich von Dichten über 3 Personen pro Quadratmeter weichen sie stark voneinander ab. Bei den Daten von Predtetschenski und Milinski ist zu bemerken, dass der Abfall des Flusses bei einer Türbreite von  $b = 1,0$  m moderat verläuft, während bei  $b = 1,2$  m bei steigender Dichte eine stärkere Reduzierung des Flusses resultiert<sup>2</sup>. Nach Pauls<sup>3</sup> und Nelson<sup>4</sup> liegt das Maximum des Flusses bei ca. 2 Personen pro Quadratmeter und es muss bei wesentlich geringeren Dichten mit einem starken Abfall gerechnet werden. Eine Studie von Carstens und Ring begrenzt den maximal möglichen Fluss auf 1,6 Personen pro Meter pro Sekunde [10]. Die Autoren geben allerdings keine Relation zwischen der Dichte und dem Fluss an.

Messungen von Stapelfeld nach Sportveranstaltungen an einer Türe mit einer Breite von  $b = 1,2$  m dokumentieren ebenfalls ein Sinken des Flusses bei steigender Dichte. Seine Angaben stimmen für Dichten von 3 bis 4 Personen pro Quadratmeter in der Größenordnung mit den Angaben von Predtetschenski und Milinski überein. Bei Dichten von 5 bis 6 Personen pro Quadratmeter allerdings ermittelt er geringere Werte als sie von Predtetschenski und Milinski angegeben werden und stellt darüber hinaus fest, dass der Fluss zeitweise abbricht [11].

<sup>2</sup> Die Daten von Predtetschenski und Milinski wurden der Abbildung 19 aus [5] entnommen. Es handelt sich hierbei um Mittelwerte experimenteller Daten, die auf den Platzbedarf  $f$  der Nutzer normiert wurden. Für den Flächenbedarf wurde  $f = 0,125$  m<sup>2</sup> angenommen, dies entspricht einem Erwachsenen in Winterstraßenbekleidung. Bei kleinerem Flächenbedarf steigt der Fluss.

<sup>3</sup> Die Angaben von Pauls stammen aus [6]. Der Wert für die Dichte von 3,2 Personen pro Quadratmeter wird als obere Schranke angegeben.

<sup>4</sup> Die Daten von Nelson beruhen auf der Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen Dichte und Geschwindigkeit [7]. Die Autoren geben an, dass für die Ermittlung der Steigung und des Schnittpunktes der Geraden auf die Daten von Fruin [8], Pauls [9] und Predtetschenski und Milinski [5] zurückgegriffen wurde. Wie diese Parameterbestimmung durchgeführt wurde, wird nicht dokumentiert.

Eine exakte Dokumentation von Messungen an Engstellen, insbesondere von mikroskopischen Charakteristika wie die mittlere freie Fläche zwischen den Personen und die Trajektorien der Bewegung einzelner Personen wurde von Daamen und Hoogedoorn vorgenommen [12], [13], [14], [15]. Die Autoren führten Laborexperimente mit ca. 80 Probanden durch. Bei einer Engstelle mit einer Breite von 1 m und einer Länge von 5 m stellten sie fest, dass sich in der Engstelle zwei Linien in Form eines Reißverschlusses bilden. Darüber hinaus wird festgestellt, dass *entgegen* den Erkenntnissen aus dem Autoverkehr die Dichte in der Engstelle höher ist als vor der Engstelle. Diese Phänomene führen zu einer effektiven Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Fläche und somit zu einem unerwartet hohen Fluss. Durch Analyse der mittleren freien Fläche zwischen den Personen wird die maximale Kapazität einer Engstelle zu 1,7 Personen pro Sekunde pro Meter berechnet. Die gewonnenen Erkenntnisse beschränken sich allerdings auf den Dichtebereich unter 4 Personen pro Quadratmeter und ein geringes Personenaufkommen.

### **3.4 Dichte vor Türen oder Engstellen**

In den Medien finden sich immer wieder Meldungen über tödliche Unfälle bei Massenveranstaltungen. Panik aufgrund einer konkreten Gefährdung ist hierbei keine notwendige Bedingung [6]. Als Beispiele aus der jüngeren Vergangenheit seien die Unfälle in Mekka (2000, 1998, 1994, ...) und im Bergisel-Stadion in Innsbruck (1999) genannt. Die Ereignisse belegen, dass bei hohem Personenaufkommen schon allein die reguläre Bewegung einer Menschenmenge zu kritischen Dichten führen kann. Selbst kleine Störungen können dann große Effekte verursachen.

Messungen von Stapelfeld, nach Sportveranstaltungen an Ausgängen verschiedener Breite (1,2 m bis 2,6 m), dokumentieren Dichten von 3 bis 6 Personen pro Quadratmeter [11]. Bei Laborversuchen mit 100 Polizeischülern wurde festgestellt, dass selbst bei einer Ausgangsdichte von 4 Personen pro Quadratmeter kurz nach Versuchsbeginn im Türbereich Dichten von bis zu 8 Personen pro Quadratmeter aufgetreten sind.

Daten für Dichte und Staulänge vor der Engstelle in Abhängigkeit von dem Personenaufkommen finden sich bei Westphal [16]. Es handelt sich um Messungen aus den 70er Jahren an Bahnhöfen in Deutschland im Berufsverkehr. Die Messungen beschränken sich auf Stauungen vor einer Rolltreppe mit einer Breite von  $b = 1,03$  m und einer Festtreppe mit einer Breite von  $b = 1,86$  m.

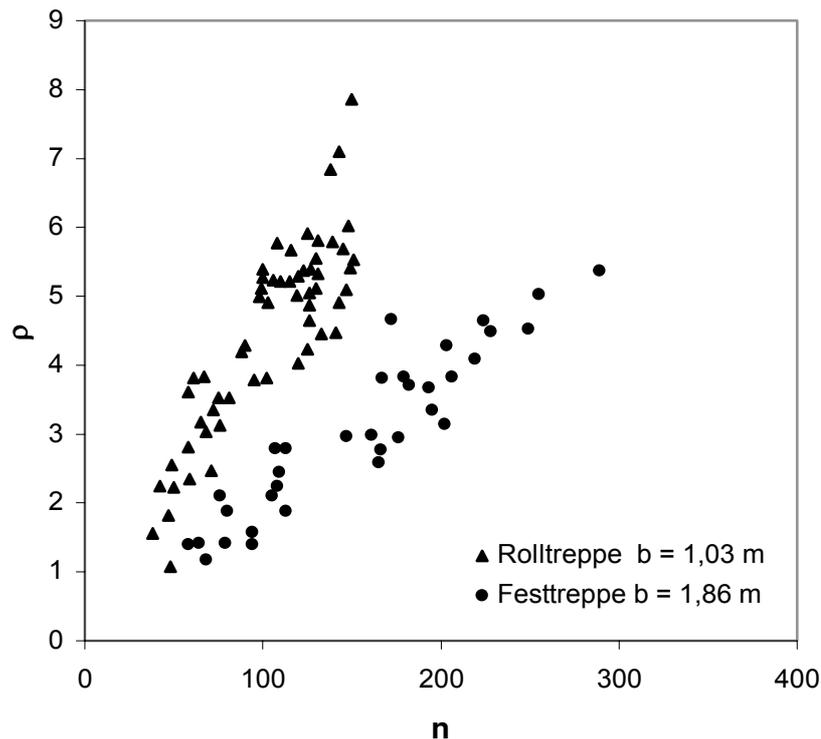


Abbildung 3: Dichteentwicklung vor Engstellen nach Westphal [16]

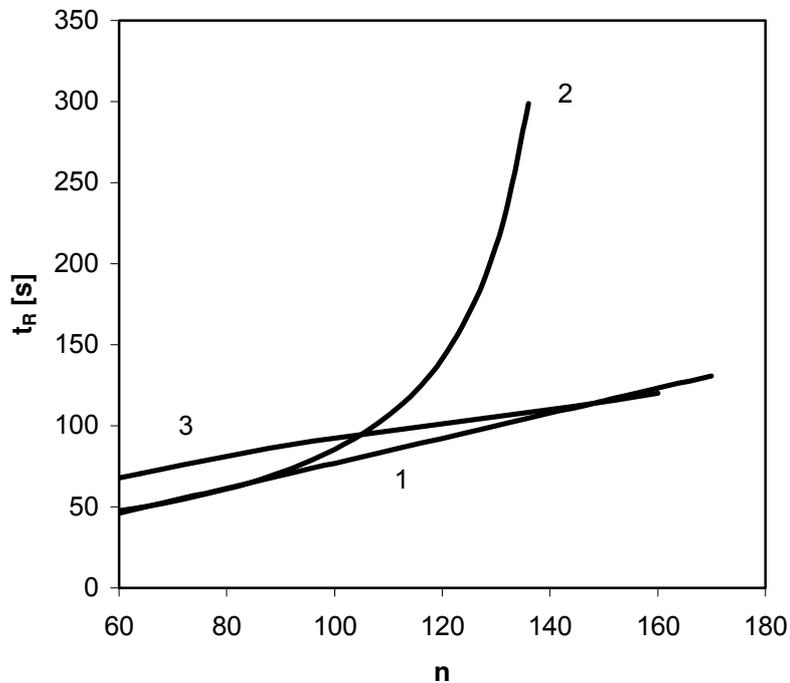
Abbildung 3 zeigt wie empfindlich die Dichte im Stau von dem Personenaufkommen  $n$  abhängt, Westphal [16]. Bei wachsender Breite der Engstelle verringert sich die Steigung. Eine Vernachlässigung dieses Zusammenhangs kann zu einer falschen Prognose der Dichte vor Engstellen und somit zu einer falschen Vorhersage des Flusses führen.

#### 4 Einführung der Kapazitätscharakteristik

Die Kapazitätscharakteristik gibt an, wie sich die Räumungszeit in Abhängigkeit von der Personenzahl ändert und wird im Folgenden anhand eines einfachen Beispiels eingeführt. In Analogie zu dem IMO Test [2] zur Validation von Simulationsprogrammen, wird ein Raum der Größe  $A = 8 \text{ m} \times 5 \text{ m}$  mit einem Ausgang der Breite  $b = 1 \text{ m}$ , welcher mittig an der  $5 \text{ m}$  breiten Wand gelegen ist, betrachtet. Zunächst wird angenommen, dass sich in dem Raum  $100$  Personen befinden. Als Kriterium für Simulationsprogramme wird in der Richtlinie [2] gefordert, dass der maximale Fluss durch diese Türe nicht mehr als  $1,3$  Personen pro Sekunde betragen darf. Dieser Wert orientiert sich an den Angaben Nelsons in [7]. Unter der Annahme, dass die Personen gleichmäßig im Raum verteilt sind, ergibt sich in diesem Szenario eine Ausgangsdichte von  $2,5$  Personen pro Quadratmeter. Die Räumungszeit  $t_R$  für  $n = 100$  Personen, die bei maximal zulässigem Fluss resultiert, berechnet sich dann mit

$$\Phi = \frac{n}{t_R} \quad \text{zu} \quad t_R = \frac{n}{\Phi} = \frac{100}{1.3} = 77 \text{ s}.$$

Anhand der Literaturangaben für den Fluss durch Türen soll im Folgenden abgeschätzt werden, wie sich die Räumungszeit bei wachsender Personenzahl  $n$  verhält. Für diese Abschätzung wird angenommen, dass die Gehgeschwindigkeit für alle Personen im Raum gleich ist, so dass Effekte durch ein mögliches Überholen nicht berücksichtigt werden müssen.



**Abbildung 4: Kapazitätscharakteristik für einen Raum**

**Linie 1, Abbildung 4:** Unter der Annahme, dass der Fluss durch die Türe unabhängig von der Dichte im Raum dem maximal zulässigen Fluss von 1,3 Personen pro Sekunde entspricht, siehe [2], ergibt sich ein linearer Verlauf

$$t_R = \frac{n}{\Phi_{\max}}$$

**Linie 2, Abbildung 4:** Wird angenommen, dass die Dichte im Ausgangsbereich der Dichte der Startkonfiguration entspricht und im Verlauf der Räumung konstant bleibt, steigt die Räumungszeit entsprechend dem Absinken der Geschwindigkeit bei steigender Dichte. Mit

$$\rho(t) = \rho(t=0) = \frac{n}{A}$$

ergibt sich die Räumungszeit in Abhängigkeit von der Personenzahl mit  $b = 1$  m zu

$$t_R = \frac{n}{\Phi(\rho)} = \frac{n}{\rho \times v(\rho) \times b} = \frac{A}{v(n/A)}$$

Auf Grundlage der Angaben von Nelson in [7] berechnet sich die Räumungszeit zu

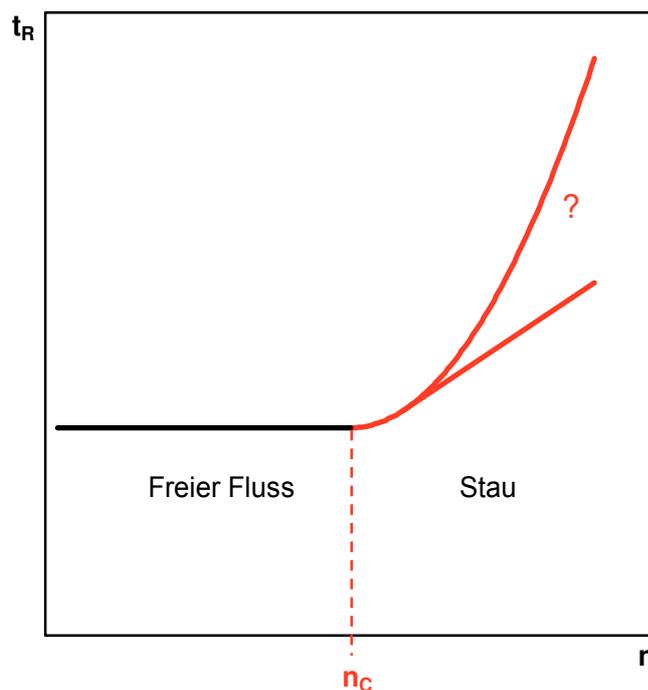
$$t_R = \frac{40}{1,4 \times (1 - 0,266 \times \rho)}$$

**Linie 3, Abbildung 4:** Es gelten die gleichen Annahmen wie für Linie 2 lediglich die Abhängigkeit der Gehgeschwindigkeit von der Dichte richtet sich nach den Angaben von Predtetschenski und Milinski [5]. Für die Personen wurde angenommen, dass es sich um Erwachsene in Hauskleidung mit einem Flächenbedarf von  $f = 0,125 \text{ m}^2$  pro Person handelt.

Sämtliche oben getroffenen Abschätzungen berücksichtigen nicht, dass die Dichte bei wachsendem Personenaufkommen zunimmt. Auch ohne Berücksichtigung des Dichteanstieges wird deutlich, wie empfindlich die Räumungszeit von den Annahmen für den Fluss abhängen kann.

## 5 Die Kapazitätscharakteristik von Gebäuden

Betrachtet man den Verlauf der Räumungszeit  $t_R$  eines Gebäudes für eine wachsende Personenzahl  $n$  ergibt sich folgendes qualitatives Bild.



**Abbildung 5: Kapazitätscharakteristik von Gebäuden**

Die Bestimmung der Kapazitätscharakteristik ermöglicht die Identifizierung zweier Phasen, deren Lage durch die kritische Personenzahl  $n_c$  festgelegt wird.

Bei Personenzahlen im Bereich  $n = [0, n_c]$  wird die Räumungszeit in Gebäuden wie Schulen, Verkaufsstätten oder Bahnhöfen durch die maximale Rettungsweglänge und die minimale freie Gehgeschwindigkeit der Personen bestimmt. Kurzzeitig auftretende Stauungen vor Türen oder anderen Engstellen beeinflussen die Räumungszeit nicht, da sie sich aufgelöst haben, bevor die letzte

Person diese Türen oder Engstellen erreicht. Bei Versammlungsstätten mit Sitzreihen, wie Opernhäuser oder Sportstadien, kann bereits die Sitzreihe die ausschlaggebende Engstelle sein. In diesem Fall beginnt das Ansteigen der Räumungszeit schon bei geringen Personenzahlen.

In komplexen Gebäuden ist die Lage der kritischen Personenzahl  $n_C$  von vielen äußeren Parametern abhängig. Den Vorhersagen eines Computerprogramms bezüglich des Ortes der relevanten Engstelle und der Lage von  $n_C$  kann vertraut werden, wenn die Modelle die freie Bewegung der Personen durch das Rettungswegesystem exakt beschreiben und eine obere Schranke für den Fluss durch Engstellen berücksichtigt wird. In der Praxis sollte beachtet werden, dass eine künstliche Erhöhung der Räumungszeit und somit der Lage der kritischen Personenzahl durch Wahl einer kleinen minimalen freien Geschwindigkeit vermieden wird.

Wird die kritische Personenzahl  $n_C$  überschritten, wächst die Räumungszeit. Wie in Kapitel 4 gezeigt wurde, hängt der Verlauf der Räumungszeit in diesem Bereich davon ab, welche Annahmen für den Fluss durch die ausschlaggebende Engstelle getroffen werden. Wird ein konstanter Fluss durch die Engstelle angenommen, wächst die Räumungszeit linear. Die Räumungszeit zeigt ein wesentlich schnelleres Wachstum, wenn berücksichtigt wird, dass die Dichte vor der Engstelle ansteigen kann und der Fluss gegen Null geht. Quantitative Aussagen sind von dem funktionalen Zusammenhang zwischen Personenaufkommen, Dichte und Fluss abhängig.

## 6 Konsequenzen

Ein Überblick über die zurzeit zur Verfügung stehenden Computerprogramme und zugrunde liegenden Modelle zur Beschreibung der Bewegung von Fußgängern findet sich in den Konferenzberichten [17] und [18]. Moderne Programme beruhen auf Modellen, die jede Person individuell betrachten. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen in folgenden Punkten:

- Parameter, welche die Mobilität der Personen festlegen (Geschwindigkeit, Platzbedarf, .... );
- Abbildung der Gebäudegeometrie (Zellen, kontinuierlicher Raum, Netzwerk);
- Modelle zur Beschreibung der Bewegung der Fußgänger.

Dabei hängt die Abbildung der Gebäudegeometrie eng mit dem Modell zur Beschreibung der Bewegung zusammen.

Ab einem gewissen Personenaufkommen wird die Räumungszeit eines Gebäudes durch das Verhalten des Systems an der ausschlaggebende Engstelle bestimmt. Die Modelle zur Beschreibung der Bewegung der Fußgänger sollten an diesen Stellen die Realität möglichst exakt abbilden. Die in Abschnitt 4 eingeführte Kapazitätscharakteristik in Verbindung mit den in Abschnitt 3 dargestellten experimentellen Daten verdeutlicht, dass in diesem Zusammenhang die Modellierung der Dichteentwicklung vor der Engstelle und des Flusses durch die Engstelle wesentlich ist. Das Steigen der Dichte bei wachsendem Personenaufkommen wird durch die Koordinationsfähigkeit und die Kraft, welche die Fußgänger in Richtung des Ausgangs treibt, verursacht. Wird in dem Modell für die Dynamik der Fußgänger das Zusammenspiel zwischen Koordinationsfähigkeit und Kraft richtig berücksichtigt, muss es zu einem Dichteanstieg bei wachsendem Personenaufkommen kommen. Die Arbeiten von Hoogedoorn und Daamen [12], [13], [14], [15] bieten zwar einen Ansatz zur Modellierung des Flusses durch die Engstellen, berücksichtigen allerdings nicht die Effekte bei hohen Dichten bzw. hohem Personenaufkommen.

Die Weiterentwicklung der bestehenden Modelle ist zum jetzigen Zeitpunkt eingeschränkt, da die zur Verfügung stehenden Literaturangaben bezüglich der Entwicklung des Flusses in Abhängigkeit von der Dichte extrem voneinander abweichen und nach Kenntnisstand der Autoren keine experimentellen Daten zur Entwicklung der Dichte vor Türen in Abhängigkeit vom Personenaufkommen vorliegen. Aufgrund dieser Grenzen sind die Vorhersagen von Computerprogrammen insbesondere bei hohem Personenaufkommen mit Unsicherheiten behaftet.

Die Autoren schlagen daher vor, für jedes Szenario einer Gebäuderäumung die Kapazitätscharakteristik zu bestimmen. Dies ermöglicht eine Abschätzung, inwieweit die Räumungszeit bei der vorgesehenen Nutzerzahl durch Stauungen beeinflusst wird und die Vernachlässigung der Dichteentwicklung zu einem modellbedingten systematischen Fehler in der Räumungszeit führen könnte.

## **7 Zusammenfassung**

Die Einführung der Kapazitätscharakteristik verdeutlicht, wie empfindlich die Vorhersage der Räumungszeit durch ein Computerprogramm von der Modellierung der Bewegung der Fußgänger an Engstellen abhängen kann. Bei der Formulierung von Zulassungskriterien ist man einerseits mit der Problematik konfrontiert, dass die experimentellen Daten bezüglich des Flusses durch Engstellen stark von einander abweichen und die Entwicklung der Dichte in Abhängigkeit von dem Personenaufkommen an Türen bisher nicht untersucht wurde. Die Autoren halten es daher zum jetzigen Zeitpunkt für erforderlich, in Zulassungsverfahren die Forderung nach einem maximalen Fluss dahingehend zu erweitern, dass an Engstellen eine definierte Fluss-Dichteabhängigkeit reproduziert wird. Darüber hinaus sollten die Modelle als ersten Ansatz das Wachsen der Dichte bei steigendem Personenaufkommen entsprechend den Ergebnissen Westphals abbilden.

Bei der Analyse einer Gebäuderäumung mit Hilfe von Computerprogrammen erlaubt die Bestimmung der Kapazitätscharakteristik einen tieferen Einblick in die Eigenschaften und Schwachstellen eines Rettungswegesystems als die Angabe einer einzelnen Räumungszeit. Die Lage der kritischen Personenzahl  $n_c$  ermöglicht eine Bewertung der vorgesehenen Nutzerzahl. Darüber hinaus bietet der Verlauf der Kapazitätscharakteristik einen Anhaltspunkt ob die Vorhersage des Computerprogramms durch einen modellbedingten Fehler belastet sein kann.

Zurzeit bemühen sich die Autoren um die Entwicklung eines automatisierten Verfahrens zur Datenerhebung an Engstellen und sie hoffen auf diesem Wege mit einer breiteren Datenbasis zu einer Klärung der Abweichungen in den experimentellen Daten beitragen zu können.

## Literatur:

- [1] S. Gwynne, E. R. Galea, M. Owen, P. J. Lawrence and L. Filippidis, "A Review of Methodologies Used in Evacuation Modelling", *Fire and Materials* 23, vol. 23, 383-388 (1999);
- [2] IMO, "Interim Guidelines for Evacuation Analyses for new and existing passenger ships", MSC/Circ.1033, 06.2002;
- [3] [www.rimea.de](http://www.rimea.de);
- [4] U. Weidmann in „Transporttechnik der Fußgänger“, Schriftenreihe des IVT Nr. 90, zweite ergänzte Auflage, ETH Zürich (1993);
- [5] W. M. Predtetschenski and A. I. Milinski, „Personenströme in Gebäuden – Berechnungsmethoden für die Projektierung“, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln-Braunsfeld, (1971);
- [6] J. Pauls, "Movement of Peoples" 3-263, in Sec.3/Chap.13 of "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", National Fire Protection Association, Quincy USA (1995);
- [7] H. E. B. Nelson and H. A. MacLennan, "Emergency Movement" 3-287, in Sec.3/Chap.14 of "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", National Fire Protection Association, Quincy USA (1995);
- [8] J. J. Fruin, "Pedestrian Planning and Design", Revised Edition, Elevator World INC., Alabama USA (1987);
- [9] J. L. Pauls, „Effective-Width Model for Evacuation Flow in Buildings“, Proceedings, Engineering Applications Workshop, Society of Fire Protection Engineers, Boston (1980);
- [10] R. L. Carstens, S. L. Ring, "Pedestrian Capacities of Shelter Entrances", *Traffic Engineering* 41, 38-43, (1970);
- [11] J.-P. Stapelfeldt, „Angst- und Panikzustände aus der Sicht des Brandschutzes“, *Zeitschrift für Forschung und Technik im Brandschutz vfdb*, Ausgabe 2/86;
- [12] W. Daamen, S. P. Hoogendoorn, "Experimental Research of Pedestrian Walking Behavior", *Transportation Research Board Series: Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board* 1828 Pages: pp 20-30 (2003);
- [13] S. P. Hoogendoorn, W. Daamen, P.H.L. Bovy, "Microscopic Pedestrian Traffic Data Collection and Analysis by Walking Experiments: Behaviour at Bottlenecks", in E. R. Galea (ed.), "Pedestrian and Evacuation Dynamics 2003", Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference, CMS Press, London (2003);
- [14] W. Daamen, S. P. Hoogendoorn, "Qualitative Results from Pedestrian Laboratory Experiments", in E. R. Galea (ed.), "Pedestrian and Evacuation Dynamics 2003", Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference, CMS Press, London (2003);
- [15] S. P. Hoogendoorn, W. Daamen, "Pedestrian Behavior at Bottlenecks", revised manuscript submitted February 17, 2004 to *Transportation Science*;
- [16] J. Westphal, "Untersuchungen von Fußgängerbewegungen auf Bahnhöfen mit starkem Nahverkehr", *Wissenschaftliches Arbeiten Nr. 2*, Dissertation an der Fakultät für Bauwesen der Technischen Universität Hannover (1971);
- [17] M. Schreckenberg and S. D. Sharma (eds.), "Pedestrian and Evacuation Dynamics", Springer, Berlin (2002);
- [18] E. R. Galea (ed.), "Pedestrian and Evacuation Dynamics 2003", Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference, CMS Press, London (2003).