

Modelle für die Berechnung von Personenströmen und Evakuierungssimulationen

Hubert Klüpfel¹ und Tim Meyer König²

¹TraffGo HT GmbH, Falkstraße 73-77, 47057 Duisburg

²TraffGo HT GmbH, Büro Flensburg, Johannisstraße 42, 24937 Flensburg

Abstrakt

Dieser Beitrag beschreibt die verschiedenen Aspekte der Modellierung und Simulation von Personenströmen und Evakuierungsprozessen. Da es dabei immer auch um menschliches Verhalten geht, ist diesem der erste Abschnitt gewidmet. Daran anschließend werden qualitative (Spurbildung, Oszillation an Engstellen) und quantitative empirische Daten (z.B. Laufgeschwindigkeit vs. Gruppengröße oder Dichte) dargestellt. Diese bilden die Grundlage für die Formulierung von Theorien und daraus abgeleiteter Modelle. Sowohl Flussberechnungen als Simulationen beruhen auf Modellen, letztere i.a. auf mikroskopischen. Dieser Abschnitt enthält auch einen Vergleich der verschiedenen Verfahren und Auswahlkriterien. Das Anwendungsbeispiel „Evakuierung eines Kinos“ zeigt die Funktionsweise von Simulationen im Detail.

Inhalt

Menschliches Verhalten	2
Unterschiedliche Ebenen der Entscheidung.....	2
Das Konzept „Panik“	3
Soziale Einflüsse und Gruppenbildung.....	4
Empirische Grundlagen	6

Spurbildung und Oszillation an Engstellen	7
Routenwahl	8
Einfluss der Personendichte auf die Bewegung	10
Kooperation und Wettstreit.....	12
Modellbildung und Simulation	13
Methodik der Modellbildung	13
Flussmodelle.....	15
Mikroskopische Modelle und Simulation	17
Vergleich der Verfahren und Auswahlkriterien	17
Anwendungsbeispiel: Evakuierung eines Multiplex-Kinos.....	22
Grundriss	22
Ausblick: Komplexe Fluchtwegführung auf Schiffen.....	27
Literaturverzeichnis	30

Menschliches Verhalten

Unterschiedliche Ebenen der Entscheidung

Bei der Berechnung von Personenströmen und der Simulation von Evakuierungsprozessen geht es immer auch um die Vorhersage menschlichen Verhaltens. Dementsprechend müssen menschliche Entscheidungen auf der strategischen, taktischen und operationalen Ebene mathematisch modelliert werden.

Bei der Quantifizierung menschlichen Verhaltens ist die Unterscheidung dreier Bereiche sinnvoll:

- strategisch
- taktisch

- operational

Die Strategie umfasst weit reichende Entscheidungen (Auswahl von Zielen, Abwägung von Alternativen), die Taktik die Entscheidungen, die zur Erreichung der strategischen führen sollen und operationale Entscheidungen sind reaktiv.

Das Konzept „Panik“

Clarke (2002) führt in seinem Artikel aus: „Bilder von Massenpaniken und kollektivem Chaos sind in Hollywoodfilmen, den Massenmedien und der Rhetorik von Politikern allgegenwärtig. Im Gegensatz zu diesen populären Darstellungen, sind Massenpaniken jedoch vergleichsweise selten. Bei Katastrophen verhalten sich Menschen oft vorbildlich zivilisiert und kooperativ.“ (Übersetzung: HK)

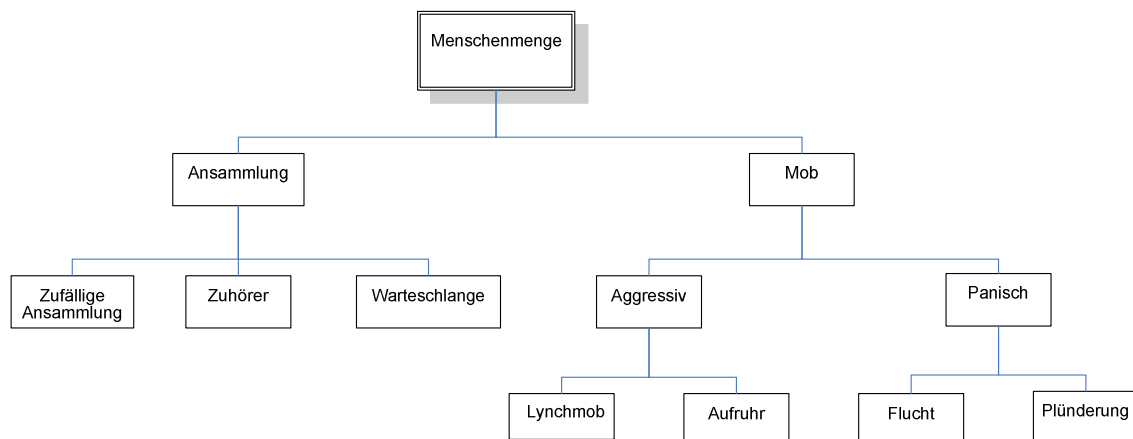


Abbildung 1: Klassifizierung von Gruppen.

Dieses Schema erlaubt auch die Einordnung von Panik als massenhafte Hysterie. Das Konzept der „Massenpanik“ ist wissenschaftlich umstritten (Clarke, 2002; Sime, 1990).

Diese Einschätzung wird von einer Reihe weiterer Autoren geteilt (Harbst, 1996), so dass man zu dem Schluss gelangt: *Panik ist kein*

sinnvolles wissenschaftliches Konzept.¹ (Quarintelli, 2002; Sime 1990).

Soziale Einflüsse und Gruppenbildung

Ein wesentlicher Aspekt bei der Bildung von Theorien zur Beschreibung und Vorhersage von Evakuierungsprozessen stellt soziales Verhalten dar. Die nachfolgende Abbildung 1 zeigt die Klassifizierung von Menschenmengen (nach Forsyth, 1999).

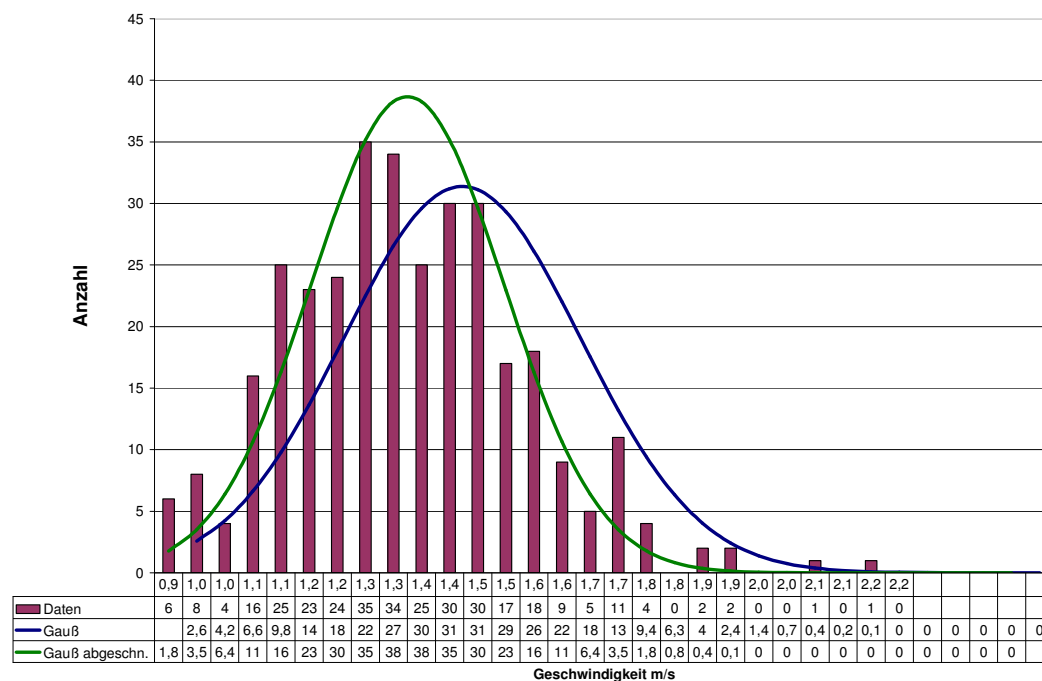


Abbildung 2: Laufgeschwindigkeitsverteilung (gerichtet) für die große Fußgängerbrücke auf der Weltausstellung (Expo) 2000 in Hannover.

¹ Das gilt für den Bereich der Soziologie, als das Verhalten von Gruppen. Für individuelle Verhaltensweisen, z.B. im Zusammenhang mit Phobien, Angststörungen und Panikattacken trifft diese Aussage natürlich nicht zu.

Eine generelle Tendenz, die sich feststellen lässt ist, dass die Laufgeschwindigkeit mit der Gruppengröße abnimmt.

<u>Gruppengröße</u>	<u>Anzahl</u>	<u>Mittelwert</u>
1	95	1,38
2	149	1,28
3	59	1,24
4	17	1,24
5	10	1,22
6	2	1,10
alle	332	1,30

Abbildung 3: Abhängigkeit der Laufgeschwindigkeit von der Gruppengröße.

Die äußere Beeinflussung der Routenwahl von Menschen geschieht i.a. über Leitsysteme. Zu diesen gehört natürlich zuallererst die Fluchtwegbeschilderung. Vor allem in Flugzeugen und auf Schiffen kommt „low location lighting“ (am Boden entlang laufende Bänder mit Pfeilen in Richtung des Ausganges bzw. der Sammelstation) hinzu.



Abbildung 4: Fluchtwegschild und Lautsprecher für „directional sound“.

Ein neuer Ansatz ist die Nutzung des Gehörsinnes, so genannter „directional sound“. Dabei werden durch unterschiedliche Lautstär-

ken, Frequenzen und Modulationen attraktive (und unattraktive) Töne ausgesandt, die die Menschen zu den richtigen Zielen leiten sollen.

Empirische Grundlagen

Für die Untersuchung von Personenbewegungen gibt es drei grundsätzliche Möglichkeiten

- Beobachtung realer Ereignisse.
- Durchführung von Übungen
- Experimente im Labor

Alle diese Möglichkeiten haben Vor- und Nachteile. Beobachtungen sind zunächst am einfachsten durchzuführen. Sie haben allerdings den Nachteil, dass die äußeren Bedingungen i.a. nicht kontrolliert werden können.

Bei der Durchführung von Übungen ist diese Kontrolle größer. Allerdings entstehen dadurch Einflüsse, die möglicherweise in realen Gefahrensituationen nicht vorhanden sind. Außerdem darf es natürlich nicht zu Verletzungen o.ä. kommen. Es gibt also praktische, ethische und finanzielle Einschränkungen bei der Durchführung von Übungen (vgl. auch Abbildung 16).

Schließlich ist der Einfluss auf die Randbedingungen bei Laborexperimenten am größten. Dafür befinden sich die Personen natürlich in einer außergewöhnlichen Situation (Müller, 1999; Predtetschenski, 1964).

Spurbildung und Oszillation an Engstellen

Die Spurbildung tritt bei einander entgegen gerichteten Personenströmen auf. Yamori (2001) hat einen so genannten Bandindex eingeführt, um dieses Phänomen zu quantifizieren (siehe Abbildung 5).

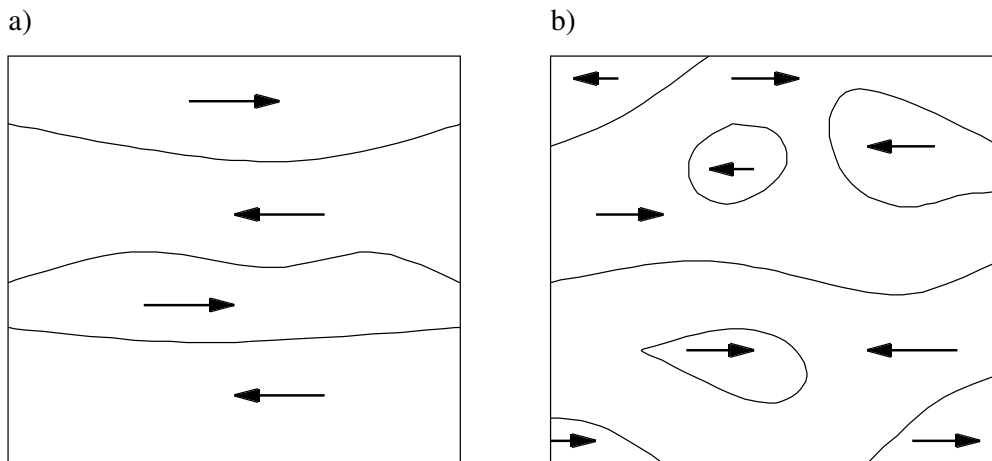


Abbildung 5: Spurbildung bei Gegenstrom (Yamori, 2001).

Hier handelt es sich um ein Selbstorganisationsphänomen, das den Fluss insgesamt erhöhen kann.

Ein weiteres in der Literatur (Helbing, 2002; Müller 1999) genanntes Phänomen ist die Entstehung von Oszillationen an Engstellen, die in beide Richtungen durchschritten werden (siehe Abbildung 6). Dieses Phänomen kann insofern gefährliche Konsequenzen haben, als das der Fluss in eine Richtung zeitweilig völlig zum Erliegen kommt und dadurch die wartenden Personen ungeduldig werden könnten. Außerdem sorgen die Oszillationen dafür, dass der Fluss insgesamt inhomogener wird. Allerdings beschränkt sich dieses Phänomen vermutlich auf Engstellen, die sehr schmal sind (maximal zwei Personen nebeneinander), so dass es in der Realität – insbesondere da zwei verschiedene Laufrichtungen vorausgesetzt werden – eher selten vorkommen dürfte.

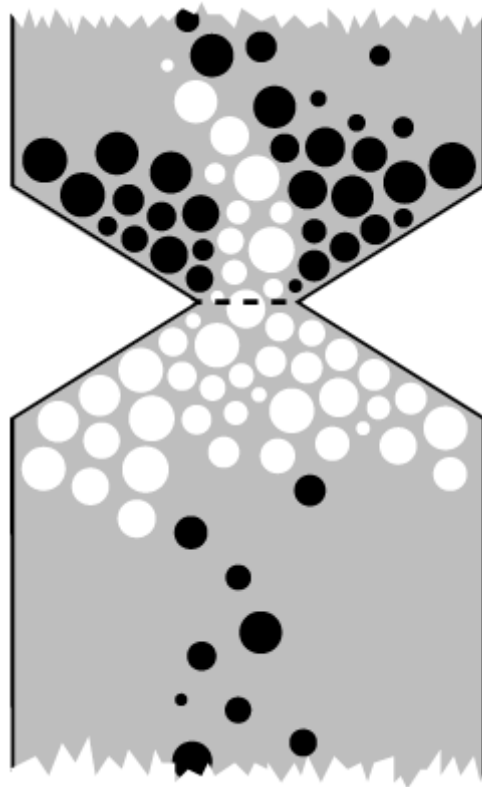


Abbildung 6: Oszillation an Engstellen (Helbing, 2002; Müller, 1999).

Routenwahl

Die Routenwahl ist eine entscheidende strategische Entscheidung beim Verlassen eines Gebäudes.

In der nachfolgenden Abbildung 7 ist gezeigt, wie die Wahl einer Strategie von der Umgebung und von der eigenen Mobilität abhängt. Ein weiterer Aspekt in diesem Zusammenhang sind Vorstellungen darüber, wie man am schnellsten ans Ziel (z.B. ins Freie oder an einen sicheren Ort) kommt. Abe (1986) gibt folgende Häufigkeiten für die unterschiedlichen Strategien an:

1. Den Fluchtwegschildern, Ansagen oder den Anweisungen des Personals folgen (53%).

2. Den nächstliegenden Ausgang nehmen (25%).
3. Sich vor Feuer und Rauch retten und direkten Weg von der Gefahr weg wählen (12%).
4. Anderen Personen folgen (7%).
5. Den bekannten Ausgang nehmen (2%).
6. Es gab ein Fenster neben der Tür, dort war es hell (1%).
7. Am Ausgang gab es kein Gedränge (1%).
8. Andere

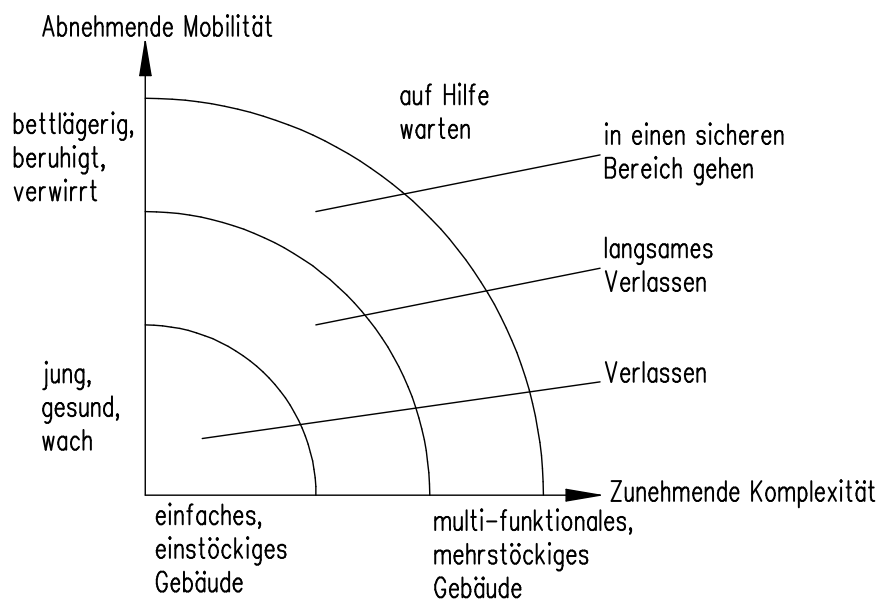


Abbildung 7: Verschiedene Strategien für die Reaktion auf Gefahr, abhängig von der Komplexität des Gebäudes und der eigenen Mobilität.

Diese Überlegungen beeinflussen den Ablauf einer Evakuierung natürlich maßgeblich. Daher ist eine Voraussetzung für die richtige Nutzung und Interpretation von Rechen- und Simulationsergebnissen, dass die Annahmen über die Population und die zu ihrer Beschreibung benutzten explizit genannt und quantifiziert werden.

Einfluss der Personendichte auf die Bewegung

Ein wesentliches Ergebnis empirischer Untersuchungen ist das so genannte Fundamentaldiagramm, d.h. die Beziehung zwischen Dichte und spezifischem Fluss.

Es spielt für Flussmodelle und Simulationen eine unterschiedliche Rolle. Bei Flussmodellen (Predtetschenski 1964; Mehl 2003) bildet es die Grundlage für die Berechnungen, stellt als einen Eingabe-Parameter dar.

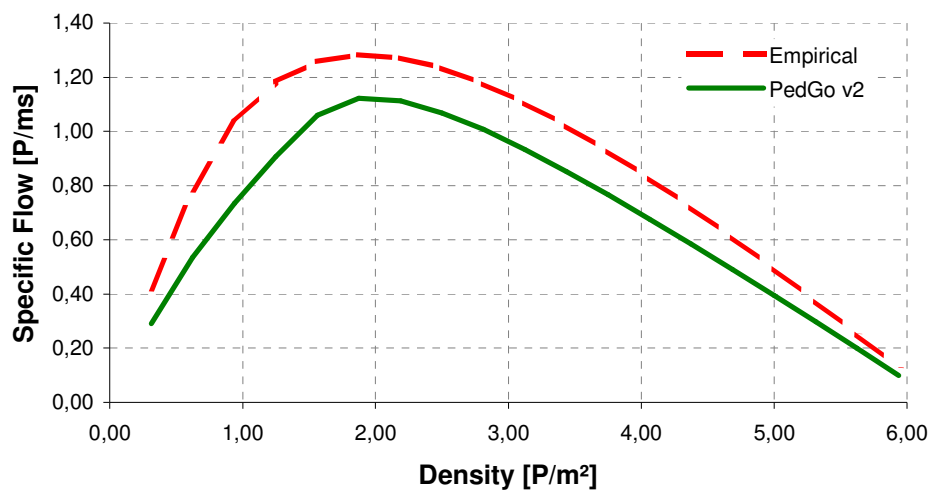


Abbildung 8: Fundamentaldiagramm für die Bewegung von Menschen. Es beschreibt den spezifischen Fluss (Personen/m/s) in Abhängigkeit von der Dichte (P/qm).

Bei Simulationen dient es zum einen der Kalibrierung der Parameter und zum anderen der Validierung der Ergebnisse. Es stellt also in diesem Fall ein Ergebnis der Berechnungen dar.

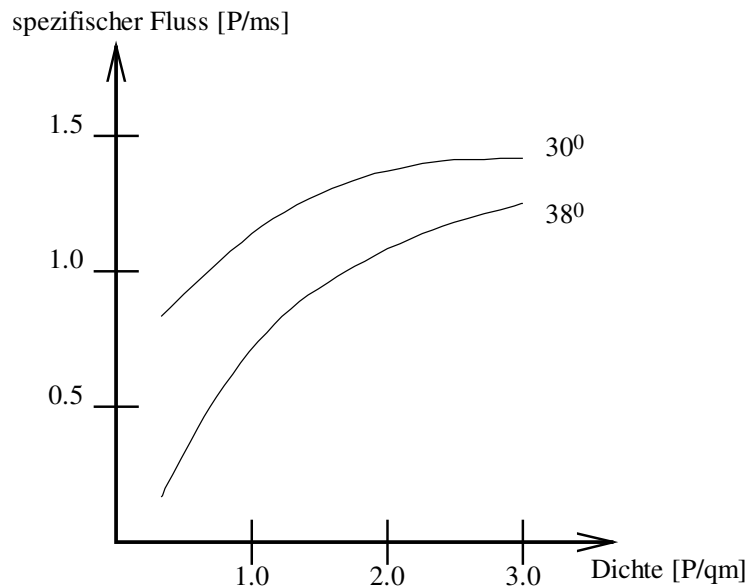


Abbildung 9: Spezifischer Fluss auf Treppen, gemessen in Fußballstadien (Graat, 1999).

Schließlich spielt die räumliche Umgebung eine besondere Rolle. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn es sich um Treppen handelt (siehe Abbildung 9). Für steilere Treppen (obere Kurve: 30°, untere Kurve 38°) ergibt sich ein geringerer Fluss. Der Dichtebereich reicht in dieser Abbildung allerdings nur bis 3 Personen pro Quadratmeter. Bei der Verwendung von Fluss-Dichte-Relationen wird i.a. davon ausgegangen, dass man in einem Bereich eine konstante Dichte als Berechnungsgrundlage für den Fluss verwenden kann. Wie in Abbildung 10 gezeigt, ist die Dichteverteilung in einem Gang allerdings nicht homogen. Die hier gezeigten Simulationsergebnisse finden sich auch bei empirischen Beobachtungen wieder.

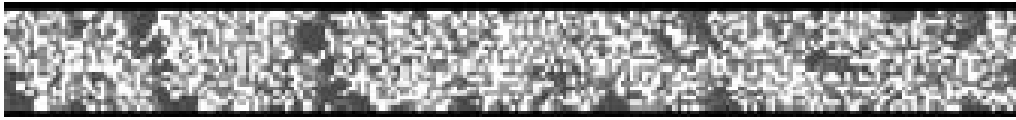


Abbildung 10: Dichteschwankungen in einem langen Gang.
Gezeigt ist Screenshot der Simulation mit PedGo.

Hier zeigt sich ein Vorteil von Simulationen: Sie ermöglichen es, diese Phänomene ebenfalls zu berücksichtigen, da sie räumlich und zeitlich detailliert arbeiten. Der in der Abbildung gezeigte räumliche Verlauf der Dichte in einem Gang ist das Ergebnis einer Simulation (mit dem Programm PedGo).

Kooperation und Wettstreit

Ein Aspekt, der schon zu Beginn im Zusammenhang mit dem Konzept der „Panik“ kurz angesprochen wurde, ist das menschliche Verhalten.

Soll menschliches Verhalten wissenschaftlich untersucht werden und in die Berechnung von Evakuierungsdauern oder Abläufen einfließen, dann muss es objektiviert und quantifiziert werden. Das beinhaltet eine operationale Beschreibung der Konzepte. Eine Möglichkeit kooperatives Verhalten und nicht-kooperatives Verhalten zu unterscheiden ist die Auslobung von Prämien.

Die Ergebnisse einer experimentellen Untersuchung in einem nachgebauten Flugzeugrumpf sind in Abbildung 11 dargestellt.

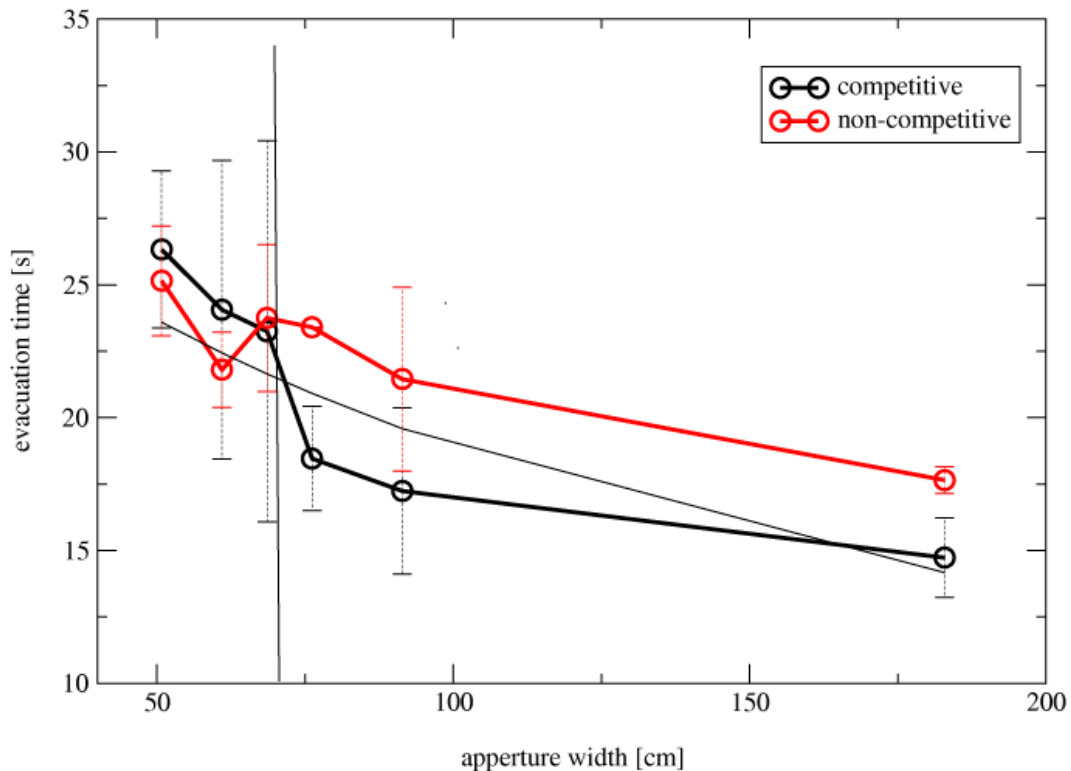


Abbildung 11: Unterschied zwischen kooperativem (rot) und nicht-kooperativem Verhalten (schwarz) bei der Evakuierung eines Flugzeuges (Übung). Kooperation führt bei geringer Ausgangsbreite zu kürzeren Evakuierungszeiten.

Die empirischen Daten stammen von Muir (1999). Aufgetragen ist die Evakuierungszeit gegenüber der Breite des Ausganges für vier verschiedene Breiten zwischen 50 und 180 cm.

Modellbildung und Simulation

Methodik der Modellbildung

Eine wissenschaftliche Untersuchung, die ein reales System (z.B. eine Menschenmenge) mit Hilfe eines Modells beschreiben will, umfasst drei Arbeitsschritte: Formulierung, Untersuchung und Validierung des Modells. Von einer Simulation spricht man dann, wenn ein

als valide angenommenes Modell als Hilfsmittel eingesetzt wird, um das System zu untersuchen (z.B. Vorhersagen über das Auftreten von Stauungen oder die Gesamtevakuierungsdauer zu treffen). Bei der Formulierung eines Modells geht es um die Reduzierung der Komplexität. Man versucht, die Wirklichkeit verstehbar und beschreibbar zu machen, indem man sie vereinfacht. Grundidee bei der Formulierung eines wissenschaftlichen Modells (Modellbildung, Modellierung) ist die Reduktion von Komplexität: man versucht, Wirklichkeit beschreibbar und verstehbar zu machen, indem man sie vereinfacht.

Kann das Modell quantitativ formuliert und durch einen geschlossenen Satz von Gleichungen beschrieben werden, spricht man von einem mathematischen Modell. Ist dieses Modell so komplex, dass es nur mit numerischen Methoden ausgewertet werden kann, spricht man von einem Computermodell. Die Validierung des Modells besteht darin, Ergebnisse der Untersuchung des Modells mit bekannten Eigenschaften des durch das Modell repräsentierten Systems zu vergleichen.

Ein Beispiel aus der Psychologie ist die Feldtheorie (Vektorpsychologie), die auf Kurt Lewin zurückgeht. Darin wird das Verhalten als Funktion der Person und der Umwelt beschrieben $V = f(P, U)$. Das ist insofern leicht missverständlich, als es eigentlich heißen müsste: $V = f(\text{psychologische } P, \text{psychologische } U)$, während andererseits der Lebensraum vom Forscher auf der Grundlage der realen oder konkreten Person und Situation rekonstruiert wird: $L = f(\text{konkrete Person, konkrete Umwelt})$.

Bei der Klassifizierung von Modellen sind die in Abbildung 12 gezeigten Kategorien hilfreich. In diesem Zusammenhang die hydraulischen Modelle eher spezifisch, kontinuierlich, analytisch, deterministisch, makroskopisch und qualitativ. Simulationen sind dementsprechend i.a. allgemein, numerisch, stochastisch, quantitativ und mikroskopisch. Hier kommen sowohl kontinuierliche als auch diskrete Modelle zum Einsatz. Außerdem gibt es gelegentlich auch deterministische Simulationen. Beide Ansätze stellen eine Näherung dar, da es sich gewissermaßen um soziologische (und nicht in erster Linie physikalische) Modelle handelt.

spezifisch	↔	allgemein
Näherung	↔	erste Prinzipien
diskret	↔	kontinuierlich
numerisch	↔	analytisch
stochastisch	↔	deterministisch
quantitativ	↔	qualitativ
makroskopisch	↔	mikroskopisch

Abbildung 12: Klassifizierungs-Schema für Modelle.

Flussmodelle

Flussmodelle behandeln Menschenmengen quasi als strömende (laminare) Flüssigkeiten. Dabei gelten eine Reihe von Annahmen, insbesondere:

- Kontinuitätsgleichung (Einfluss = Ausfluss),
- Zeitlich und räumlich konstanter spezifischer Fluss (Personen / Meter / Sekunde),

- Alle an einem Übergangspunkt eintreffenden Ströme dauern gleich lang an.

Diese Annahmen stellen den Ausgangspunkt dar und es lassen sich natürlich Verfeinerungen einfügen, z.B. turbulente Strömungen, bei denen die Kapazität nicht mehr konstant ist. Generell ist es aber so, dass die Auswirkungen hoher Dichten zum einen über die Identifikation von Stauungen (potenzieller Einfluss größer als potenzieller Ausfluss) und zum anderen über die Laufgeschwindigkeit berücksichtigt werden. Für detaillierte Darstellungen siehe z.B. IMO, 2002, Mehl, 2003, DiNenno, 1995, 2002. Die nachfolgende Abbildung 13 illustriert das Prinzip der hydraulischen Berechnungsmethode.

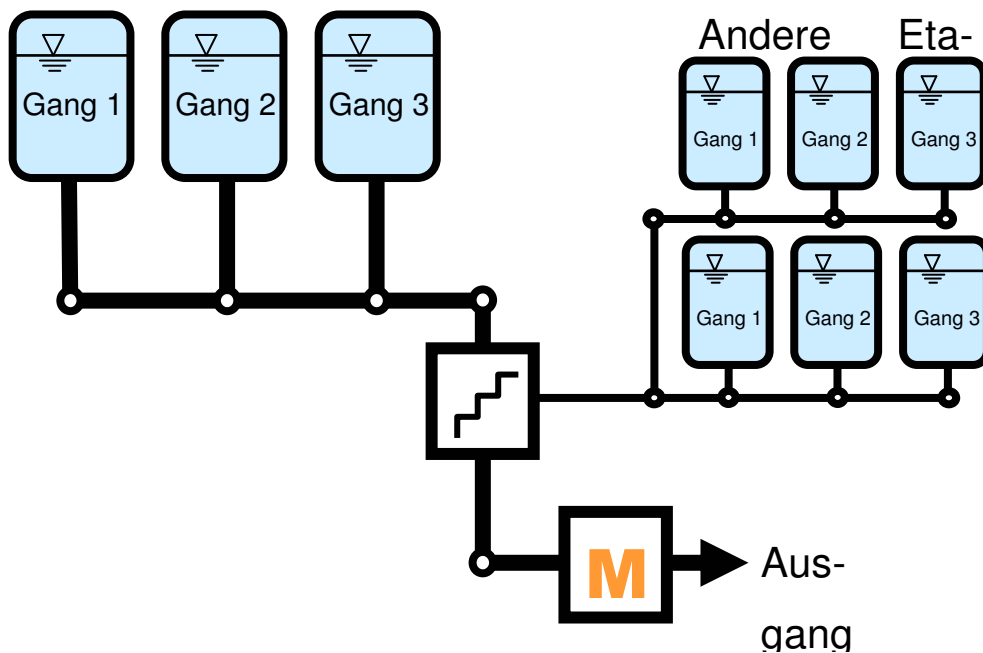


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Geometrie in einem Flussmodell: Der Grundriss wird als ein System von Röhren und Verbindungsstücken abgebildet.

Mikroskopische Modelle und Simulation

Mikroskopische Modelle beschreiben den Grundriss eines Gebäudes, die Population und den zeitlichen Verlauf im Detail. Die genannten drei Größen finden sich also mikroskopisch genau im Modell und anschließend in der Simulation wieder. Der Begriff mikroskopische ist dabei qualitativ zu verstehen. Es lassen sich aber folgende Kriterien für eine Eingrenzung angeben:

- Länge in der Größenordnung von Metern
- Zeit in der Größenordnung von Sekunden
- Population: einzelne Personen

Damit unterscheidet sich dieser Ansatz grundlegend vom vorher dargestellten makroskopischen (Flussmodelle). Diese wird u.a. daran deutlich, dass die Fluss-Dichte-Relation nicht als Eingabeparameter vorher angegeben werden muss, sondern ein Ergebnis der Simulation darstellt (siehe Abbildung 8). Weitere Details der mikroskopischen Methodik werden am Beispiel im nächsten Kapitel erläutert.

Vergleich der Verfahren und Auswahlkriterien

Zusammenfassend sind die verschiedenen Verfahren in der nachfolgenden Abbildung 14 dargestellt.

Dabei ist vor allem die grundlegende Unterscheidung in Simulation, Optimierung und Risikoanalyse interessant. Eine Simulation zielt zunächst auf die Darstellung des Zustandes und dessen Beschreibung im Detail ab, wohingegen eine Optimierung auf die Minimierung einer vorgegebenen Größe (z.B. die Gesamtentfluchtungsdauer) zum Ziel hat. Dazu muss ein funktionaler Zusammenhang zwi-

schen dieser Größen und allen relevanten Einflussgrößen bestehen. Diese Funktion wird dann variiert, um das Optimum zu finden.

Risiko-Analyse schließlich erfasst alle relevanten Einflussgrößen und bewertet diese. Das bedeutet, dass im Grunde ein Ereignisbaum aufgestellt wird und jede mögliche Kette von Ereignissen zum einen hinsichtlich ihrer Konsequenzen (Schaden) und zum anderen hinsichtlich ihrer Wahrscheinlichkeit bewertet wird.

Die verschiedenen Ansätze sind für unterschiedliche Anwendungen konzipiert. Für schnelle und überschlägige Abschätzungen sind die Flussmodelle sicherlich am besten geeignet. Das bedeutet im einfachsten Fall, dass man einfach die Summe der Ausgangsbreiten durch einen konstanten spezifischen Fluss teilt und so eine grobe Näherung für die Gesamtevakuiierungsdauer erhält. Dabei muss man sich natürlich der Annahmen und Einschränkungen bewusst sein, die im genannten Beispiel noch weit über die im vorherigen Abschnitt genannten hinaus gehen.

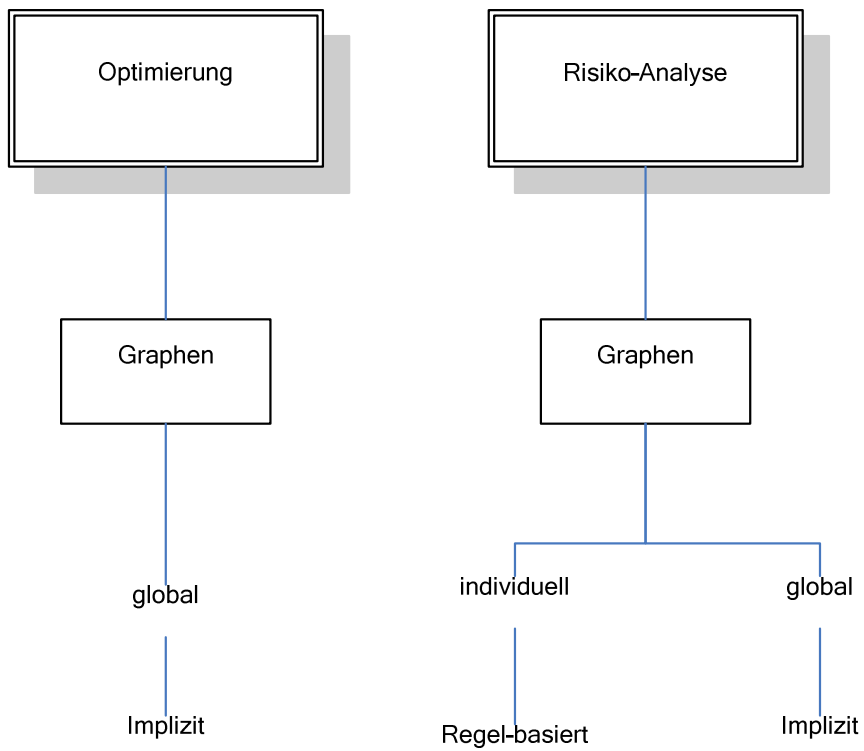
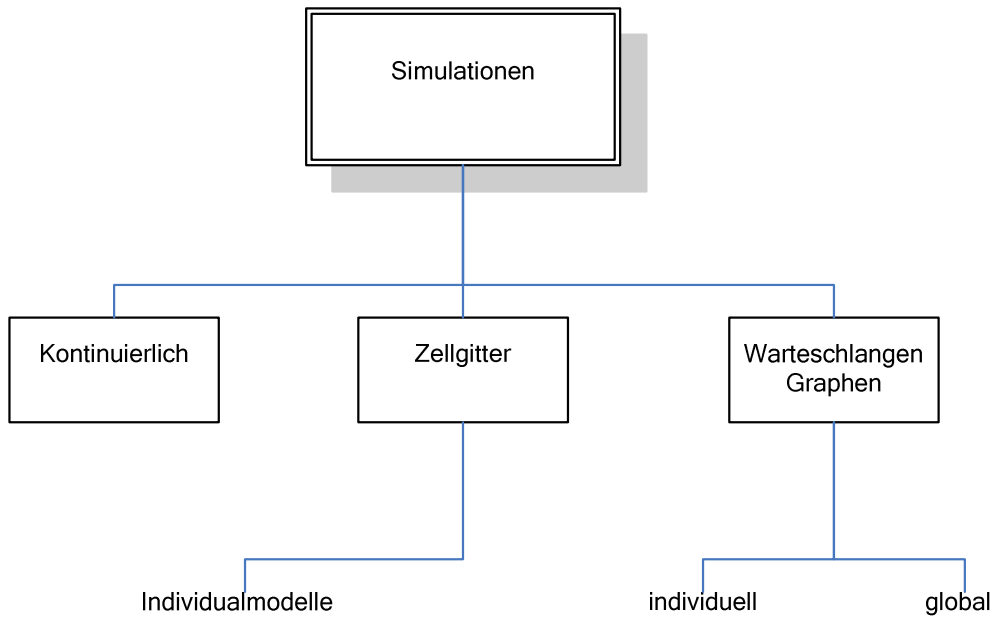


Abbildung 14: Klassifizierung der unterschiedlichen Modelle.

Nichtsdestotrotz sind solche Überschlagsrechnungen – vor allem auch zur Plausibilitätsprüfung von Ergebnissen – sinnvoll. Sobald man allerdings detaillierte Erkenntnisse gewinnen will, z.B. über den Verlauf und die räumliche und zeitliche Verteilung von Stauungen, reichen hydraulische Berechnungsmethoden i.a. nicht mehr aus.

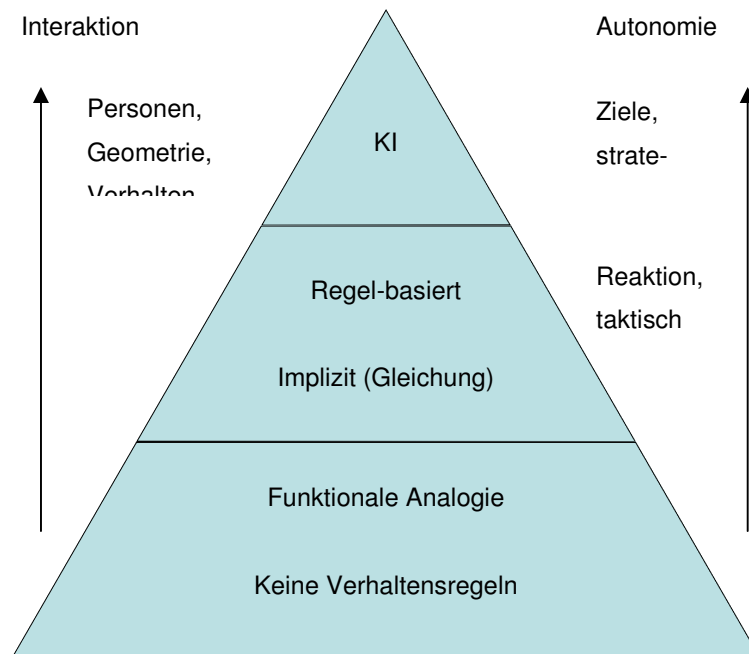


Abbildung 15: Interaktion und Autonomie in verschiedenen Modellen für die Beschreibung der Bewegung von Menschenmengen

Denn Einflussgrößen, wie sie schematisch in Abbildung 15 dargestellt sind, spielen dann eine entscheidende Rolle. Diese werden – mit zunehmendem Detaillierungsgrad – in mikroskopischen Modellen abgebildet.

Diese unterschiedliche Repräsentation des Gebäudes und der Population korrespondiert mit dem Anwendungsbereich der Verfahren, wie er in Abbildung 16 gezeigt ist. Simulationen und vereinfachte

Analyse stellen immer eine Annäherung an die Realität dar. Das gilt allerdings genauso für Evakuierungsübungen. Insofern lassen sich mit Simulationen, da sie zunächst an Evakuierungsübungen und an anderen empirischen Beobachtungen kalibriert werden, weitere Bereiche als mit diesen abdecken. Durch eine Variation der Personenparameter, z.B. eine Verringerung der Orientierungsfähigkeit oder der Laufgeschwindigkeit oder einer Erhöhung der Reaktionszeit kann man in Bereiche vordringen, die bei Übungen aufgrund praktischer und ethischer Einschränkungen selbstverständlich ausgeschlossen sind.

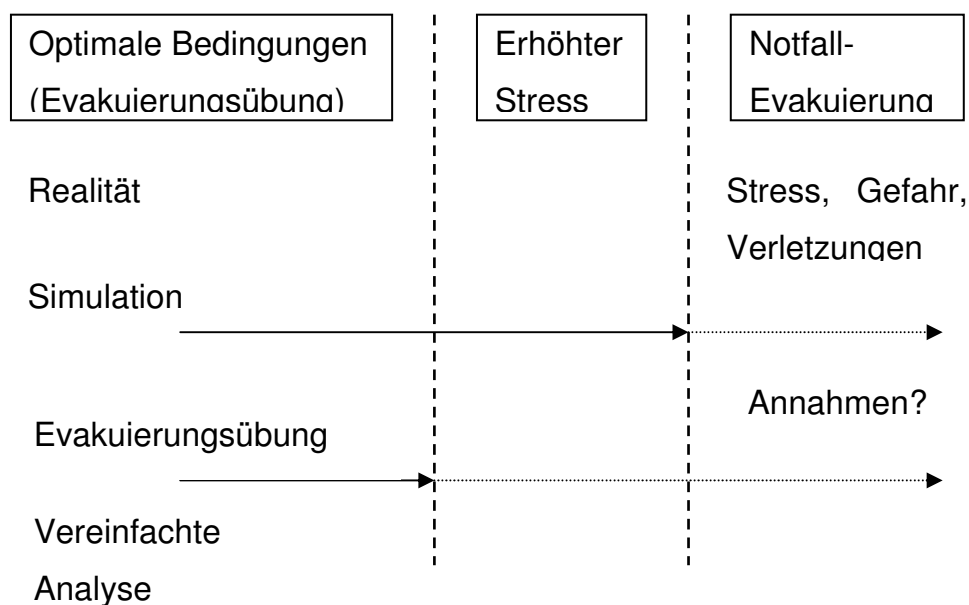


Abbildung 16: Vergleich des Anwendungsbereiches von Simulationen und vereinfachten Berechnungsverfahren.

Zusammenfassend lassen sich aus dem Vergleich der Verfahren also Auswahlkriterien ableiten. Diese müssen natürlich zuerst an den Bedürfnissen des Nutzers orientiert sein. Für eine überschlägi-

ge Berechnung von Räumungszeiten können einfache Flussmodelle (d.h. in diesem Fall die Multiplikation der Summe der Türbreiten mit einem konstanten spezifischen Fluss) ausreichend sein. Für detaillierte Analysen und den Vergleich verschiedener Szenarien (z.B. mit unterschiedlichen Tür- oder Gangbreiten, veränderter Fluchtwegführung, etc.) eignen sich Simulationen deutlich besser.

Anwendungsbeispiel: Evakuierung eines Multiplex-Kinos

Der Vergleich von Simulations- und Berechnungsergebnissen mit empirischen Daten dient der Kalibrierung und Validierung von Modellen und Simulationsergebnissen. Dabei spielen spezifische Messungen, wie die des Zusammenhangs zwischen Fluss- und Dichte eine wichtige Rolle für die Kalibrierung von Modellparameter. Die Validierung erfolgt hingegen i.a. anhand von umfassenden Daten, wie der tatsächlichen oder „nachgestellten“ Räumung eines Gebäudes. Im folgenden wird auf ein solches Beispiel – die Evakuierung (als Übung) eines Saales eines Multiplex-Kinos – näher eingegangen.

Grundriss

Der Grundriss des Kinosaales und der relevanten Bereiche des ersten OG des Kinos sind in Abbildung 17 dargestellt.

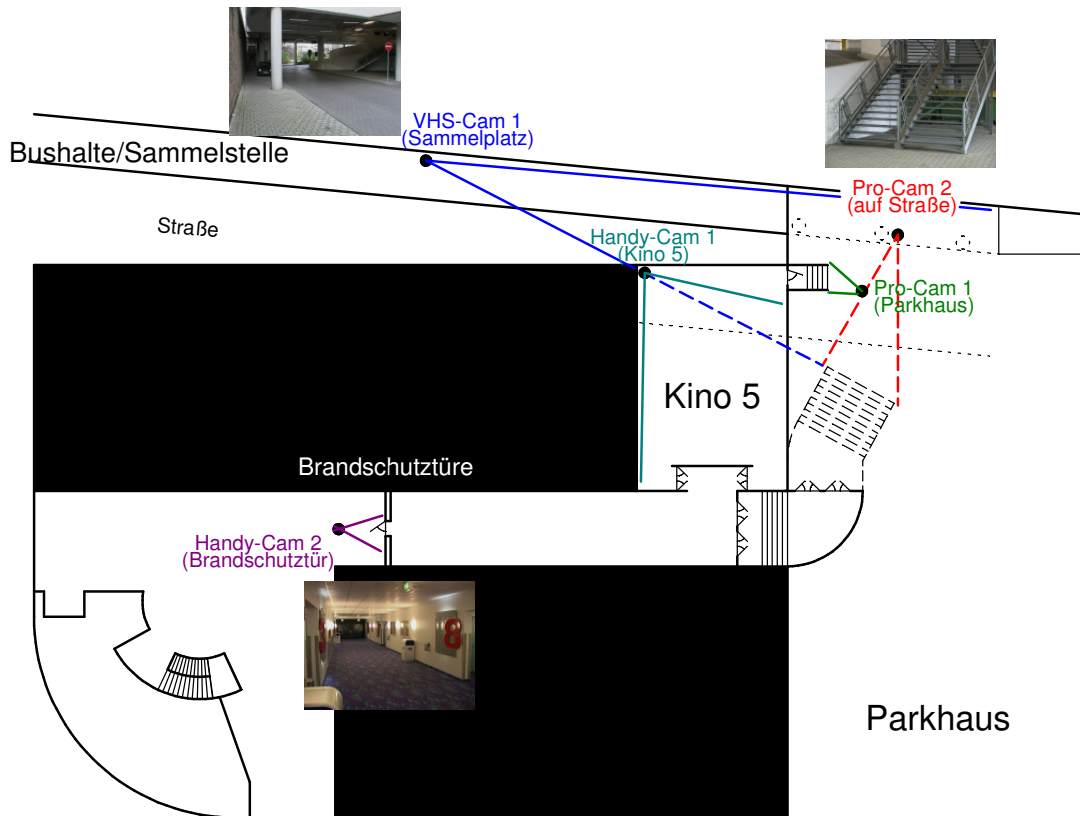


Abbildung 17: Grundriss des Kinos.

Der Ablauf wurde mit mehreren Videokameras gefilmt. Die Standorte dieser Kameras sind ebenfalls in der Abbildung eingetragen.

Abbildung 18 zeigt zusätzlich die Abmessungen des Saales und die Bestuhlung.

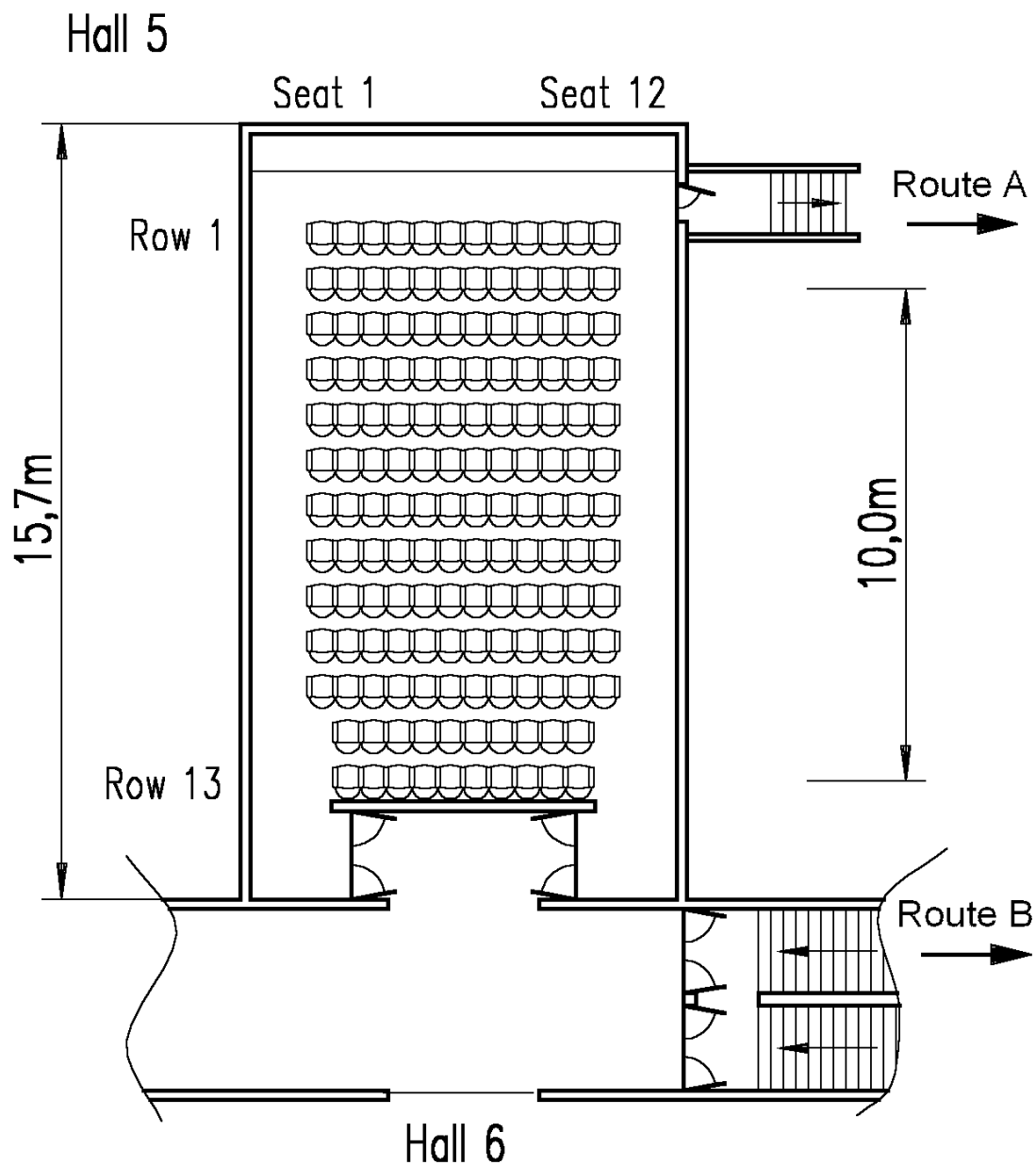


Abbildung 18: Grundriss des Kinosaals. Die Lage dieses Saales innerhalb des Kinos wird aus Abbildung 17 deutlich.

In dem Kino waren 152 Sitzplätze vorhanden. An der von uns durchgeführten Übung nahmen 102 Personen teil. Diese wurden individuell markiert. Der Ablauf der Übung wurde mit mehreren Videokameras gefilmt und anschließend detailliert ausgewertet.

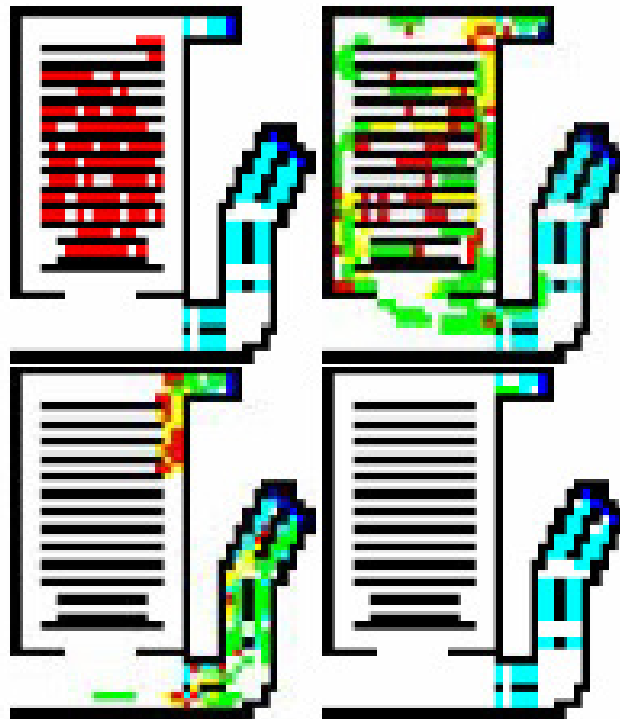
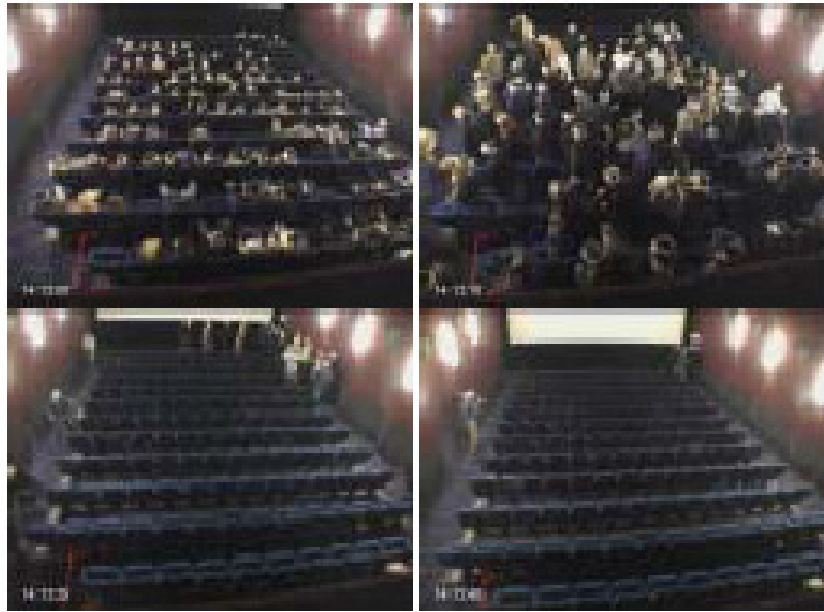


Abbildung 19: Videoaufnahmen und Simulation des Evakuierungsablaufs. Von links oben nach rechts unten sind die Zeitpunkte $t=0s$, $t=10s$, $t=60s$ und $t=65s$ gezeigt.

Abbildung 19 zeigt die Aufnahmen der Innenkamera und „Schnappschüsse“ der Simulation. Nach 65s hatten alle Personen den Kinosaal verlassen. Die Simulation lieferte für die Gesamtdauer das gleiche Ergebnis. Sowohl der Notausgang rechts vorne (vgl. Abbildung 19) als auch der hintere, reguläre Ausgang wurden in der Übung benutzt.

Beim Vergleich des Ablaufes fällt auf, dass der Ausfluss aus den Türen in der Simulation gleichmäßiger ist als in der Übung. Dies wird insbesondere auch an den Evakuierungskurven, die in Abbildung 20 gezeigt sind, deutlich.

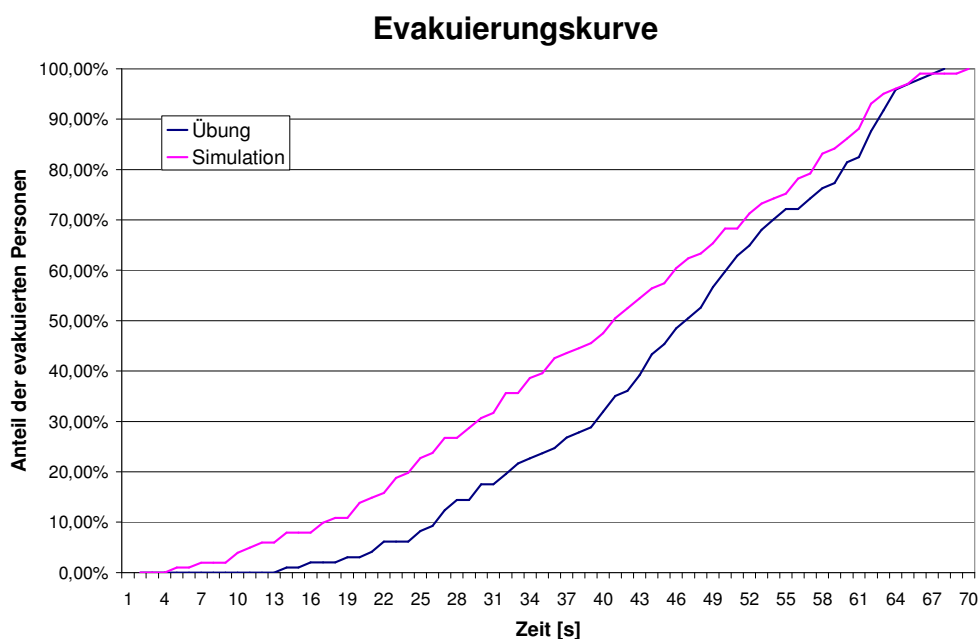


Abbildung 20: Evakuierungskurven (empirisch) für die Kinoevakuierung.

In diesem Zusammenhang ist außerdem zu bemerken, dass in der Simulation die Orientierung effektiver war. D.h. trotz einer gleichen Reaktionszeit, erreichte die erste Person den Ausgang früher als in

der Übung. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Übereinstimmung zwischen Simulation und Realität (Übung) gut ist – siehe Abbildung 20. Unterschiede bestehen hauptsächlich darin, dass in dem hier vorgestellten Beispiel der Evakuierungsübung eines Kinosaales hohe Flüsse auch bei relativ hohen dichten auftraten. Daher ist die untere Kurve in Abbildung 20 (Übung) in Bereichen deutlich steiler als die obere Kurve (Simulation). Ein solcher „synchronisierter Fluss“ ist z.B. auch an Bahnhöfen zu beobachten, wenn sehr viele Pendler gleichzeitig aus den Zügen streben. Allerdings ist er vermutlich instabil, d.h. etwaige relativ kleine Störungen können den Fluss deutlich beeinträchtigen.

Ausblick: Komplexe Fluchtwegführung auf Schiffen

Der im vorherigen Beispiel gezeigte Grundriss des Kinosaales war vergleichsweise einfach. Das hat für empirische Untersuchungen den Vorteil, dass man sehr viel mehr ins Detail gehen kann und eine Reihe von Einflüssen ausgeschlossen sind. Wenn es um die Kalibrierung von Modellparametern und die Validierung von Simulationsergebnissen geht, ist eine solche Vorgehensweise vorteilhaft und sinnvoll.

Das bedeutet natürlich nicht, dass die Simulation in erster Linie auf solch einfache Fälle angewendet wird. Wie beim Vergleich der verschiedenen Methoden bereits ausführlich dargestellt, eignen sich mikroskopische Modelle vor allem auch, um komplexe Abläufe, große Gebäude oder Strukturen und Populationen zu simulieren. Die Software PedGo, mit der die hier gezeigten Simulationen durchgeführt werden, beruht auf dem gleichen Modell wie das Programm

AENEAS, das von der TraffGo HT GmbH und der Germanischer Lloyd AG im maritimen Bereich angeboten und eingesetzt wird. In der Abbildung 21 ist der Grundriss eines Ro-Ro-Fahrgastschiffes gezeigt. Simuliert wurde das Sammeln (Musterung) von 1600 Personen. Der Evakuierungsablauf auf Schiffen ist i.a. deutlich komplexer als derjenige für Gebäude. Das liegt u.a. daran, dass in einer ersten Phase die Personen zu so genannten Sammelstationen gehen und dort (im Falle von Ro-Pax-Schiffen) Rettungswesten angelegt werden. Die Einbootungsphase ist eine separate Phase, die sich evtl. an die Sammelphase anschließt. Außerdem können Fluchtwege auf Schiffen sowohl treppauf und treppab führen, so dass die Orientierung im Vergleich zu Gebäuden schwieriger ist.

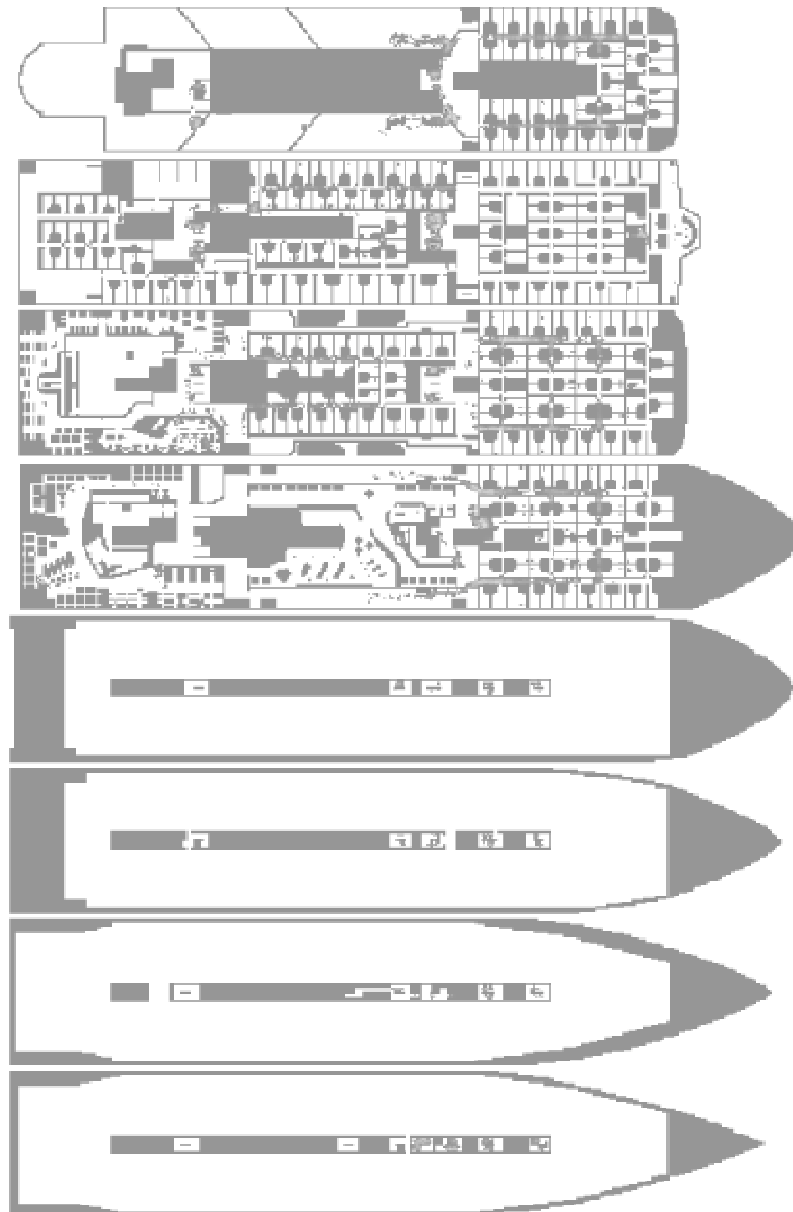


Abbildung 21: Grundriss eines Ro-Ro-Fahrgastschiffes. Die Fluchtwege (zunächst zu den Sammel-, dann zu den Einbootungsstationen) können sowohl nach oben (treppauf), als auch nach unten (treppab) verlaufen.

Möglicherweise lassen sich aus den Erfahrungen, die man bei der Evakuierung von Fahrgastschiffen gewinnen kann, auch Rückschlüsse auf mögliche Verbesserungen an Land ziehen. Mikrosko-

pische Modelle und Simulationen (wie PedGo und AENEAS) beruhen jedenfalls nicht spezifisch auf Annahmen, die nur für einen Bereich gelten. Das macht diesen Ansatz flexibel und erlaubt es, auch Szenarien zu betrachten, die bei der Formulierung des Modells und der Entwicklung des Programms nicht explizit bekannt waren.

Literaturverzeichnis

Lee Clarke (2002): Panic: Myth or reality?. Contexts, fall 2002, p. 21.

<http://www.e-noah.net/ASA/MO/articles/clarke.pdf>

Quarantelli, E. L. (2001): Sociology of Panic. In: International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences. Oxford, UK, Pergamon Press, 2001.

Sime, J. (1990): The concept of panic. Chapter 5, pages 63-82. In: David Canter (Ed.): Fires and Human Behavior. London, David Fulton Publishers, 1990.

Smith, R.A. and J.F. Dickie (1993), editors. Engineering for Crowd Safety. Elsevier, Amsterdam, 1993.

Harbst, J. and F. Madsen (1996): *The behaviour of passengers in a critical situation on board a passenger vessel or ferry*. Technical report, Danish Investment Foundation, Copenhagen, 1996.

Ehm, M. und Jan Linxweiler (2004): Berechnung von Evakuierungszeiten bei Sonderbauten mit dem Programm buildingExodus. Braunschweig, TU, Studienarbeit, 2002. <http://www.bau-ings.de/exodus/>

Predtetschenski, W.M. und A.I. Milinski (1971): *Personenströme in Gebäuden – Berechnungsmethoden Modellierung*. Müller, Köln-Braunsfeld, 1971.

Transportation Research Board: Highway Capacity Manual, *Chapter 13 Pedestrians*

- Ullrich Weidmann, *Transporttechnik der Fußgänger, Transporttechnische Eigenschaften des Fußgängerverkehrs, Literaturlauswertung*, Schriftenreihe des IVT 90, ETH Zürich, Jan. 1992
- Hubert Klüpfel, *A Cellular Automaton Model for Crowd Movement and Egress Simulation*, Dissertation, Universität Duisburg, 2003
- PedGo Benutzerhandbuch*, TraffGo GmbH, 2003
- Tim Meyer-König et al., *Assessment and Analysis of Evacuation Processes on Passenger Ships by Microscopic Simulation*, Pedestrian and Evacuation Dynamics, Springer
- International Maritime Organization (IMO, 2002), *Interim Guidelines for Evacuation Analyses for New and Existing Passenger Ships*, MSC/Circ.1033
- RiMEA-Projekt, *Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen*, www.rimea.de
- Hubert Klüpfel, Michael Schreckenberg, und Tim Meyer-König: *Models for Crowd Movement and Egress Simulation*. Proceedings of the Workshop on Traffic and Granular Flow 2003, Delft. (im Druck).
- Burkhard Forell: Bewertung von Evakuierungen in Diskotheken und ähnlichen Vergnügungsstätten, vfdb-Zeitschrift 2/2004, Seiten 95—103.
- Fruin, J. (1971). *Pedestrian Planning and Design*. New York: Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners.
- DiNenno, P. (Ed.) (1995). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (2nd ed.). National Fire Protection Association. 3rd edition 2002.
- Ando, K., H. Ota, and T. Oki (1988). Forecasting the flow of people. *Railway Research Review* 45, 8–14. (in Japanese).
- Joachim Westphal: *Untersuchungen von Fußgängerbewegungen auf Bahnhöfen mit starkem Nahverkehr*. Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und –betrieb, Technische Universität Hannover, Dissertation, 1971.
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.): *Datenreport 1999 – Zahlen und Fakten über die Bundesrepublik Deutschland*. Bonn, 2000.
- Friedrich Mehl: *Bauaufsichtliche Akzeptanz von Ingenieurmethoden im baulichen Brandschutz – Anwendungsbereiche, Grenzen*. Promat Fachbeitrag, Ratingen, 2003. www.promat.de

K. Abe: *The Science of Human Panic*. Brain Publ. Co., Tokyo, 1986 (japanisch, Übersetzung: K. Nishinari).