Bergische Universität Wuppertal

Fachbereich D - Abt. Sicherheitstechnik

Lehr- und Forschungsgebiet Computersimulation für Brandschutz und Fußgängerverkehr

Master Thesis

Personenströme auf Tribünen - Vergleichende Untersuchung mit makroskopischen und mikroskopischen Modellen

Name:	Maike Thomas, B.Sc.
Matrikelnummer:	524420
Anschrift:	[redacted]
Studienrichtung:	Brandschutz, Master of Science
Hochschullehrer:	Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Armin Seyfried
Betreuer:	Sebastian Burghardt, M.Sc.

Ausgabe:	01.10.2010
Abgabe:	17.02.2011

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und Zitate kenntlich gemacht habe.

Wuppertal, den 17. Februar 2011 Maike Thomas

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei meinem Professor Dr. Armin Seyfried und meinem Betreuer M.Sc. Sebastian Burghardt bedanken, die mir diese Master Thesis ermöglicht, mich umfangreich betreut und unterstützt haben.
Vielen Dank für die Ideen, Ratschläge und die konstruktive Kritik.

Außerdem möchte ich mich herzlich bei meiner Familie für die Motivation, Unterstützung und den emotionalen Rückhalt bedanken.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

2 Grundlagen der Fußgängerdynamik **4**

2.1 Dichte 4

2.2 Timegap 5

2.3 Fluss 6

2.4 Fundamentaldiagramm 8

2.5 Kapazität 10

3 Rahmenbedingungen zur Personenstromführung auf Tribünen **13**

3.1 Rechtliche Vorgaben 13

3.1.1 Baurecht 13

3.1.2 Musterbauordnung 14

3.1.3 Muster-Versammlungsstättenverordnung 15

3.1.4 DIN EN 13200 Zuschaueranlagen 17

4 Experimente auf den Tribünen der ESPRIT arena **19**

4.1 Projekt „HERMES“ 19

4.2 ESPRIT arena Düsseldorf 20

4.3 Beschreibung und Durchführung der Experimente 22

5 Methoden der Evakuierungsberechnung **26**

5.1 Handrechenverfahren nach Predtetschenski und Milinski 26
5.1.1 Berechnung anhand einer Näherungsformel 29
5.2 Computersimulationsprogramme 35
5.2.1 PedGo 36
5.2.2 Fire Dynamics Simulator with Evacuation 37

6 Anwendung der Methoden am Beispiel der ESPRIT arena 43
6.1 Predtetschenski und Milinski 43
6.2 Computersimulationsprogramme 48
6.2.1 PedGo 49
6.2.2 Fire Dynamics Simulator with Evacuation 52
6.3 Prüfung der Anwendbarkeit von PM, PedGo und FDS+Evac anhand experimenteller Daten 56

7 Prüfung der Parametereinstellungen anhand einer einfachen Geometrie 63

8 Zusammenfassung und Fazit 66

1 Einleitung

Die Zunahme von Massenveranstaltungen und die steigende Größe von Multifunktionsgebäuden für öffentliche Veranstaltungen stellen neue Anforderungen an Sicherheitskonzepte. Die Sensibilisierung der Bevölkerung durch aktuelle Katastrophen bei Massenveranstaltungen, wie bei der Loveparade in Duisburg am 24. Juli 2010, führt dazu, dass der Schutz von Personen bei der Räumung von Gebäuden bzw. Anlagen einen besonders hohen Stellenwert in der heutigen Zeit einnimmt.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung fördert im Rahmen der deutschen Hightech-Strategie mit dem Programm „Forschung für die zivile Sicherheit“ im Themenfeld „Schutz und Rettung von Menschen“ das vom Jülich Supercomputing Centre koordinierte Forschungsprojekt „HERMES“ [1]. Ziel des Verbundprojektes ist die Verbesserung der Sicherheit der Personen in großen, multifunktionalen Gebäuden und bei Großveranstaltungen mit Hilfe eines Evakuierungsassistenten. Der Assistent soll mit Hilfe von Personenzählungen und Computersimulationen während einer Entleerung eine Prognose geben, in welchen Bereichen es in naher Zukunft zu gefährlich hohen Personendichten kommen wird, um frühzeitig intervenieren zu können.

[1] `http://www.fz-juelich.de/jsc/hermes`

Im Rahmen des Projektes dient unter anderem die ESPRIT arena in Düsseldorf für die Sammlung experimenteller Daten zur Optimierung der zugrunde liegenden Modelle der Fußgängerdynamik und zur Erforschung und Erprobung des Evakuierungsassistenten.

Die Grundlage jedes Computersimulationsprogrammes zur Vorhersage von Räumungszeiten eines Gebäudes bildet ein Modell für die Fußgängerbewegung. Die Programme prognostizieren mit Hilfe dieser Modelle den Verlauf von Personenströmen, berechnen Räumungszeiten und geben auftretende Stauungen an.

Im Rahmen dieser Abschlussarbeit wird geprüft, ob es möglich ist anhand von experimentellen Daten die Parameter der Simulationsprogramme bestmöglich auf ein bestimmtes Szenario einzustellen, sodass bei einer Variationen praxisnahe Ergebnisse erreicht werden. Hierzu werden experimentelle Daten von einer Räumung einer Tribüne der ESPRIT arena verwendet. Das Experiment MU11v1 (Siehe Kapitel 4.3) wird als Basisszenario genutzt, um die Parameter in den Simulationsprogrammen einzustellen und um aus drei möglichen Berechnungsansätzen das passende Handrechenverfahren auszuwählen. Anschließend wird eine Veränderung der Geometrie modelliert bzw. berechnet und deren Einfluss auf die Ergebnisse dargestellt. Als Handrechenverfahren wird das Handbuch von Predtetschenski und Milinski verwendet, welches in den Fachkreisen etabliert und anerkannt ist. Als Computersimulationsprogramme für die Evakuierungszeitberechnung und Prognose von Stauungen wird der mikroskopische Ansatz gewählt. Die Reproduktion des auf experimentelle Daten basierenden Räumungsverlaufs erfolgt durch ein raumkontinuierliches Modell (Fire Dynamics Simulator with Evacuation) und ein raumdiskretes Modell (PedGo).

Zwei Fragestellungen werden im Folgenden behandelt:

1. Inwieweit sind Computersimulationsprogramme in der Lage reale Räumungsexperimente zu reproduzieren?

2. In welchem Umfang geben die anhand eines Szenarios kalibrierten Modelle bei Veränderung der Geometrie die zugehörigen experimentellen Daten wieder?

Am Ende dieser Arbeit soll der Leser ein besseres Verständnis für die Modellgrenzen der Computersimulationsprogramme und dem Handrechenverfahren erhalten.

2 Grundlagen der Fußgängerdynamik

Im Folgenden werden Grundlagen der Fußgängerdynamik, die zu dem Verständnis der Arbeit beitragen, beschrieben und erläutert.

2.1 Dichte

In der Literatur lassen sich verschiedene Definitionen der Dichte finden. Die allgemeine Definition der Dichte ρ stellt den Quotienten aus Anzahl Personen N pro Bezugsfläche A dar:

$$\rho = \frac{N}{A} \quad \left[\frac{1}{m^2}\right] \tag{2.1}$$

Predtetschenski und Milinski [19] wählen eine andere Darstellungsform der Dichte:

$$D = \frac{\sum f}{A} = \frac{P \cdot f}{b \cdot l_{Strom}} \quad \left[m^2 \cdot m^{-2}\right] \tag{2.2}$$

mit $\sum f$ $[m^2]$ = Summe der Projektionsflächen auf den Boden
der einzelnen Personen
und A $[m^2]$ = Bezugsfläche des Personenstroms
und P = Anzahl der Personen.

Hierbei wird nicht nur die Anzahl der Personen pro Bezugsfläche, sondern auch der Platzbedarf, den eine Person einnimmt, berücksichtigt. Der Platzbedarf jeder Person wird als Projektionsfläche f bezeichnet. Je nach Modell, z. B. Rechteck oder Ellipse, variieren die Werte für die Maße einer Person. Zusätzlich geben Predteschenski und Milinski weitere Parameter für die Bestimmung des Platzbedarfs einer Person an, wie z. B. die Art der Kleidung oder das Mitführen von Gepäck. Im Rahmen dieser Arbeit wird von einer Projektionsfläche eines Erwachsenen in Übergangsstraßenkleidung ($f = 0,113\ m^2$) ausgegangen. Aufgrund der beschriebenen Parameter kann die Dichte bei gleicher Bezugsfläche und Anzahl der Personen variieren. Predteschenski und Milinski gehen von einer maximalen Personendichte von $0,92\ \frac{m^2}{m^2}$ aus.

2.2 Timegap

Unter dem Begriff Timegap wird der zeitliche Abstand zweier unmittelbar hintereinander gehender Personen verstanden. Die Zeiten beim Durchschreiten einer Messlinie je Person werden erfasst und voneinander subtrahiert:

$$\Delta t = t_{Person2} - t_{Person1}\ [s] \tag{2.3}$$

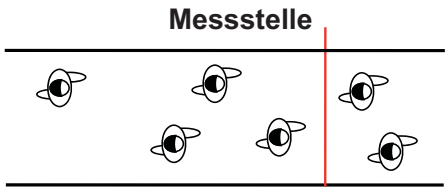

Abbildung 2.1: Timegap

Über den Timegap lässt sich der Fluss von Personen bestimmen (siehe Formel 2.6). Auch mit Hilfe von einzelne Zeitintervalle kann der Personenfluss bestimmt werden. Hierzu kann folgender mathematischer Ausdruck herangezogen werden:

$$J = \frac{1}{\overline{\Delta t_i}} \quad \left[\frac{1}{s}\right] \tag{2.4}$$

mit $\overline{\Delta t_i} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \Delta t_i \ [s]$

2.3 Fluss

Der Personenfluss gibt an, wie viele Personen ΔN pro Zeiteinheit Δt eine definierte Linie passieren:

$$J = \frac{\Delta N}{\Delta t} \quad \left[\frac{1}{s}\right] \tag{2.5}$$

Zur Bestimmung des Personenflusses sind zwei verschiedene Ansätze gängig:
Der erste Ansatz ist die Berechnung des Personenflusses durch Timegaps. Mathematisch wird der Zusammenhang wie folgt beschrieben:

$$J = \frac{\Delta N}{t_{out} - t_{in}} = \frac{\Delta N}{\Delta t} \quad \left[\frac{1}{s}\right] \tag{2.6}$$

mit ΔN = Anzahl der Personen
und t_{in} = Zeit zu der die erste Person die Messlinie übertritt
und t_{out} = Zeit zu der die letzte Person die Messlinie überschreitet.

Für den spezifischen Fluss gilt folgende Beziehung:

$$J_s = \frac{J}{b} = \frac{\Delta N}{\Delta t \cdot b} \quad \left[\frac{1}{m \cdot s}\right] \tag{2.7}$$

Bei dem zweiten Ansatz wird die Flussgleichung als Grundlage für die makroskopische Beschreibung von Personenströmen herangezogen. Hierbei lässt sich der Personenfluss folgendermaßen darstellen:

$$J = \rho \cdot v \cdot b \quad \left[\frac{1}{s}\right] \tag{2.8}$$

mit v = Geschwindigkeit.

Der spezifische Fluss J_s entspricht dem normierten Fluss bei einer Breite von 1 m:

$$J_s = \frac{J}{b} = \rho \cdot v \quad \left[\frac{1}{m \cdot s}\right] \tag{2.9}$$

Die Größen ρ und v sind makroskopischer Art. Das bedeutet, dass es sich hierbei um gemittelte Werte eines Personenstromes handelt.

Predtetschenski und Milinski beziehen sich in ihrem Ansatz zur Bestimmung von Personenflüssen auf die Flussgleichung. Zu beachten ist hierbei die veränderte Nomenklatur und Bezeichnung:

Durchlassfähigkeit Q des Stromes (Fluss):

$$Q = D \cdot v \cdot b \quad \left[m^2 \cdot min^{-1}\right] \tag{2.10}$$

Bewegungsintensität q des Stromes (spezifischer Fluss):

$$q = v \cdot D \quad \left[m \cdot min^{-1}\right] \tag{2.11}$$

2.4 Fundamentaldiagramm

Die empirische Beziehung zwischen Fluss und Dichte $J(\rho)$ wird als Fundamentaldiagramm bezeichnet. Neben dieser oft verwendeten Form ermöglicht die Flussgleichung weitere Darstellungsformen wie zum Beispiel $\mathrm{Js}(\rho), v(\rho), v(J), \ldots$.

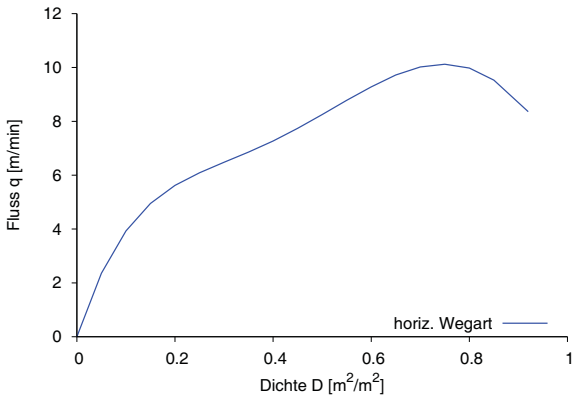

Abbildung 2.2: Empirische Beziehung des Flusses in Abhängigkeit zur Dichte nach Predtetschenski und Milinski

Für verschiedene Anlagentypen (horizontale Wege, Treppen, Wegeinengungen und Durchgänge) existieren unterschiedliche Fundamentaldiagramme.

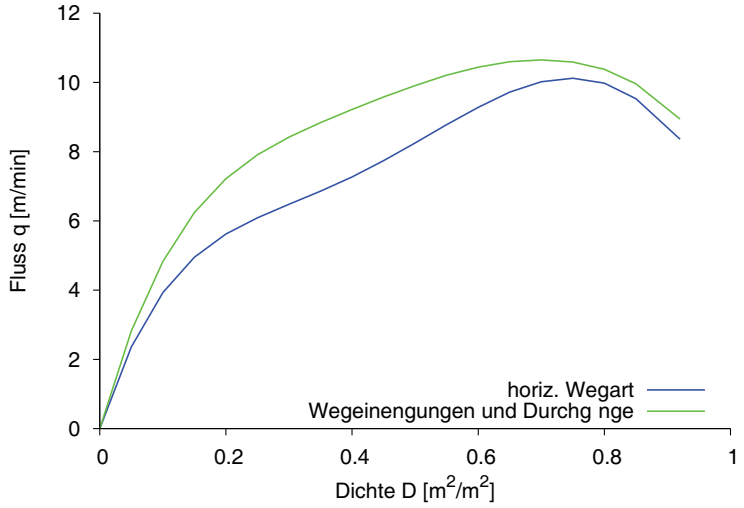

Abbildung 2.3: Fundamentaldiagramme für horizontale Wege sowie Wegeinengungen und Durchgänge nach Predtetschenski und Milinski

Der maximal mögliche Fluss wird als Kapazität bezeichnet und tritt bei der Dichte ρ_c auf. Bei der Dichte ρ_0 kommt der Fluss zum Erliegen (Stau) 2.4.

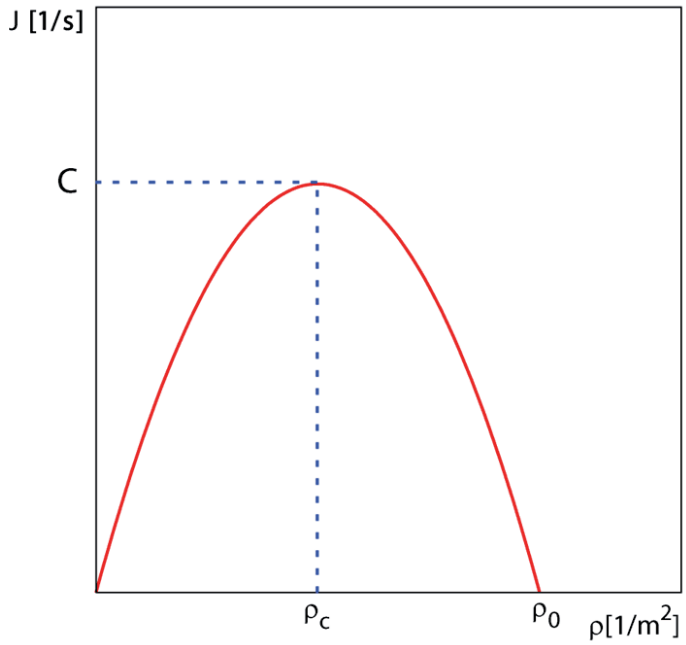

Abbildung 2.4: Graphische Darstellung der Beziehung zwischen Fluss, Dichte und Kapazität

2.5 Kapazität

Unter der Kapazität C einer Anlage (Treppen, horizontale Wege etc.) versteht man den maximal möglichen Fluss J_{max}:

$$C = J_{max} \tag{2.12}$$

Fundamentaldiagramme stellen die Grundlage zur Bestimmung von dem maximal möglichen Fluss J_{max} in Anlagen dar. Je nach Handbuch (Predtetschenski und Milinski, Weidmann [27], Nelson und Mowrer [14]) existieren unterschiedliche Fundamentaldiagramme und daraus resultierend auch unterschiedliche Kapazitäten für die gleiche Anlage.

Die Kapazität wird für die Berechnung von Räumungszeiten bzw. Mindestbreiten verwendet oder auch zur Vorhersage von Stauungen. Bei der Betrachtung von Anlagenkomplexen mit unterschiedlich nachgeschalteten Anlagentypen ist für die Evakuierungsberechnung für Fluss und Zeit immer die Anlage mit der geringsten Kapazität ausschlaggebend.

Betrachtet man dieses Phänomen physikalisch so lässt sich die Flussgleichung für Personenströme analog zur Flussgleichung für Flüssigkeiten in die Kontinuitätsgleichung bzw. Erhaltungsgleichung einsetzen, sodass im stationären Zustand der ein- und ausströmende Fluss in ein Kontrollvolumen identisch sein muss. Das bedeutet, innerhalb einer Anlage kann keine Person verschwinden oder hinzukommen; der einströmende Fluss in einen Anlagenteil muss also auch wieder vollständig hinaus strömen.

Unter der Voraussetzung, dass die zuvor eingeführten Gesetzmäßigkeiten gelten und angewendet werden können, gilt:

$$J_i = J_{i+1} \tag{2.13}$$

mit

$$J = J_s \cdot b \tag{2.14}$$

Folglich kann der spezifische Fluss der nachfolgenden Anlage mit

$$J_{s,i+1} = J_{s,i} \cdot \frac{b_i}{b_{i+1}} \tag{2.15}$$

berechnet werden.
Falls der eingehende Fluss $J_{s,i}$ den ausgehenden Fluss $J_{s,i+1}$ übersteigt, d.h. $J_{s,i} > J_{s,i+1}$, entsteht gemäß der oben vorgestellten Kontinuitätsgleichung ein Stau. Ist $J_{s,i+1}$ größer als der maximal mögliche Fluss $J_{s,max}$ wird die Kapazität C_s erreicht und der Fluss kommt zum erliegen.

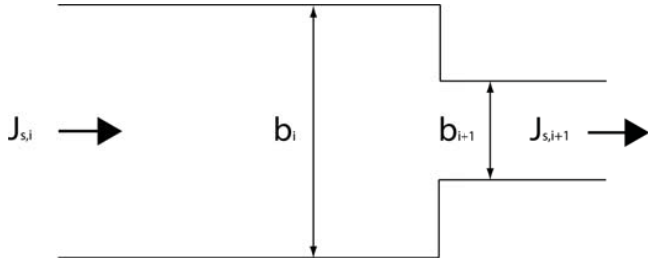

Abbildung 2.5: Ein- und ausgehender Fluss in einer Engstelle

Predtetschenski und Milinski beschreiben in ihrem Handbuch denselben Effekt. Die folgenden Formeln werden im Verlauf der Arbeit verwendet. Für das Verständnis der Kapitel 5, 6 und 7 ist die abweichende Nomenklatur von Predtetschenski und Milinski zu beachten.

Bewegungsintensität auf dem nachfolgenden Abschnitt des Weges:

$$q_{i+1} = q_i \cdot \frac{b_i}{b_{i+1}} \tag{2.16}$$

Bewegungsintensität auf dem nachfolgenden Abschnitt des Weges bei der Vereinigung zweier Ströme:

$$q_3 = \frac{Q_3}{b_3} \tag{2.17}$$

mit $Q_3 = \sum Q_i = Q_1 + Q_2$

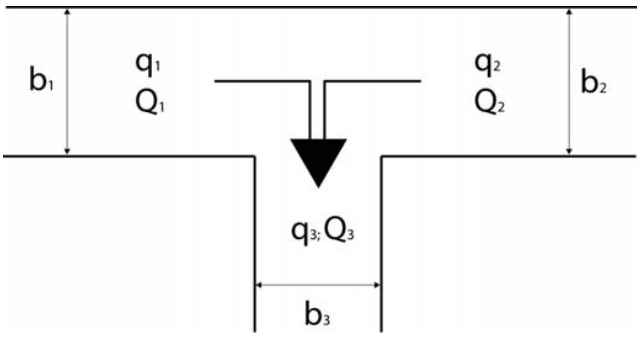

Abbildung 2.6: Vereinigung zweier Personenströme

3 Rahmenbedingungen zur Personenstromführung auf Tribünen

3.1 Rechtliche Vorgaben

3.1.1 Baurecht

Im Bauordnungsrecht finden sich Anforderungen für die Evakuierung und Entfluchtung von Gebäuden. Es fällt aufgrund der föderalistisch organisierten Struktur der Bundesrepublik Deutschland in den Zuständigkeitsbereich der einzelnen Bundesländer. Die Bauordnungen der Bundesländer wiederum orientieren sich an der Musterbauordnung (MBO). Diese wird von der Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz (ARGEBAU) erarbeitet und veröffentlicht. Als Resultat besitzt jedes Bundesland eine eigene Landesbauordnung (LBO), die jedoch von den LBO der anderen Bundesländer geringfügig abweichen kann.
Weiter ist zu beachten, dass das Recht im Bereich „Bau“ dynamisch ist und einem ständigen Wandel unterliegt. Teilweise werden Aktualisierungen, Änderungen oder Neufassungen von Bestimmungen in geringen Zeitabständen erlassen. Im Folgenden wird auf die aktuellen Baubestimmungen eingegangen, die für die Dimensionierung von Tribünen relevant sind.

3.1.2 Musterbauordnung

Die Musterbauordnung und auch die Landesbauordnungen gelten im Allgemeinen für Wohngebäude und bauliche Anlagen nach §2 Absatz 1,2 der MBO, die hauptsächlich dem Wohnzweck dienen. Daraus resultierend finden sich hier nur wenige Regelungen zur Dimensionierung von Rettungswegen, da andere Gebäude, in denen größere Menschenansammlungen und Grundflächen vorhanden sind, durch die sogenannten Sonderbauvorschriften geregelt werden. Sonderbauten werden in §2 Absatz 4 der MBO definiert. An dieser Stelle sollen der Vollständigkeit halber Inhalte der MBO kurz wiedergegeben werden, die sich auf die Dimensionierung von Tribünen beziehen:

- §14 (Brandschutz) fordert die Anordnung, Errichtung, Änderung und Instandhaltung von baulichen Anlagen derart, dass eine Rettung von Menschen und Tieren möglich ist;
- §34 Absatz 5 (Treppen) legt fest, dass die nutzbare Breite der Treppenläufe und -absätze für den größten zu erwartenden Verkehr ausreichen muss;
- §35 Absatz 3 Satz 1 (Notwendige Treppen, Ausgänge) fordert, dass der Raum zwischen einem notwendigen Treppenraum und dem Ausgang unmittelbar ins Freie - sofern ein solcher Raum erforderlich ist - mindestens so breit sein muss, wie die dazugehörigen Treppenläufe;
- §36 Absatz 2 (Notwendige Flure, offene Gänge) fordert solch breite notwendige Flure, dass sie für den größten zu erwartenden Verkehr ausreichen;
- §50 Absatz 3 (Barrierefreies Bauen) fordert 0,9 m lichte Ausgangsbreite auch für öffentlich zugängliche Bauten; Rampen in diesen Gebäuden müssen mindestens 1,20 m, Flure mindestens 1,50 m breit sein.

Des Weiteren ist nur die maximale Lauflänge von 35 m, d.h. die größte Entfernung von einem Aufenthaltsraum bis ins Freie oder einen Treppenraum, konkret festgelegt.

Detailliertere Angaben werden abhängig von der Nutzungsart der baulichen Anlage in den entsprechenden Sonderbauvorschriften geregelt, von denen nachfolgend die Muster-Versammlungsstättenverordnung ergänzend vorgestellt wird.

3.1.3 Muster-Versammlungsstättenverordnung

Die Muster-Verordnung über Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (MVStättV) in der Fassung von Juni 2005 regelt Erleichterungen oder weitere Anforderungen für Versammlungsstätten nach §1 Absatz 1 der MVStättV.
Die Vorschriften der Muster-Versammlungsstättenverordnung gelten nach §1 „Anwendungsbereich“ Absatz 1 der MVStättV für:

- Versammlungsstätten mit Versammlungsräumen, die einzeln mehr als 200 Personen fassen;
- Versammlungsstätten mit mehreren Versammlungsräumen, die insgesamt mehr als 200 Personen fassen und gemeinsame Rettungswege haben;
- Sportstadien, die mehr als 5000 Besucher fassen;
- Versammlungsstätten im Freien mit mehr als 1000 Besuchern.

Die ESPRIT arena fällt in einer ihrer Funktionen, als Fußballstadion mit mehr als 5000 Personen Fassungsvermögen, in den Geltungsbereich der Versammlungsstättenverordnung. Im Weiteren wird ausschließlich auf Tribünen mit Sitzplätzen eingegangen, wie es in der ESPRIT arena der Fall ist. Nach §1 „Anwendungsbereich“ Absatz 2 der MVStättV wird indirekt die Anzahl der Personen bemessen. Bei Sitzplätzen werden pro Quadratmeter Grundfläche zwei Personen angenommen. Die Zahl der zugelassenen Personen jedoch erfolgt anhand der Breiten der Rettungswege.

In §7 „Bemessung der Rettungswege“ Absatz 4 der MVStättV sind folgende lichte Mindestbreiten für die Rettungswege und die Türen vorgegeben:

- bei Versammlungsstätten im Freien sowie Sportstadien 1,2 m je 600 Personen
- bei anderen Versammlungsstätten 1,2 m je 200 Personen.

Die Breite ist anhand der größtmöglichen Personenzahl zu bemessen. Hierbei sind notwendige Verbreiterung nur in 0,6 m Schritten erlaubt.
Die maximale Entfernung von

- jedem Besucherplatz bis zum nächsten Ausgang aus dem Versammlungsraum oder von der Tribüne darf maximal 30 m, sowie
- 60 m bis zum nächsten Ausgang ins Freie

betragen.

§8 „Treppen“ der MVStättV gibt an, dass die maximale Breite von Treppen 2,40 m nicht überschreiten darf.

Nach §10 „Bestuhlung, Gänge und Stufengänge“ der MVStättV

- müssen die Sitzplatzbereiche der Tribünen von Versammlungsstätten mit mehr als 5 000 Besucherplätzen unverrückbar befestigte Einzelsitze aufweisen,
- müssen Sitzplätze mindestens 0,50 m breit sein und die lichte Durchgangsbreite zwischen den Sitzplatzreihen muss mindestens 0,40 m haben,
- müssen Sitzplätze in Blöcken von höchstens 30 Sitzplatzreihen angeordnet und die Blockbegrenzenden Gänge mindestens 1,20 m breit sein,
- dürfen höchstens 10 Sitzplätze seitlich eines Ganges und höchstens 40 Sitzplätze zwischen zwei Seitengängen angeordnet sein,
- müssen Stufen in Gängen (Stufengänge) eine Steigung von mindestens 0,10 m und maximal 0,19 m sowie einen Auftritt von mindestens 0,26 m haben,

- müssen Stufengänge sich durch farbliche Kennzeichnung von den umgebenden Flächen deutlich abheben.

In den Erläuterungen zur Versammlungsstättenverordnung werden die einzelnen Anforderungen genauer beschrieben:
Darin wird auf die Bemessung des Platzbedarfs von Personen eingegangen. Ein Platzbedarf von $0,51\ m^2$ je Sitzplatz wird anhand der Tiefe von 0,85 m (Durchgangsbreite von 0,40 m und Sitztiefe von 0,45 m) und Breite (Sitzbreite und notwendiger Armraum) bemessen. Dies ergibt $1,02\ m^2$ für zwei Personen. Zudem wird vorausgesetzt, dass die Körpermaße einer Person eine Durchgangsbreite von 0,6 m erfordern und eine ungehinderte Nutzung der Fluchtwege von zwei Personen ermöglicht werden muss. Die daraus resultierende Mindestbreite beträgt 1,2 m. Unberücksichtigt bei der Erhöhung des Personenflusses [24] bleiben jedoch das versetzte Gehen der Personen sowie die stufenlose Erhöhung der Rettungswegbreiten. Als Konsequenz wird für Türbreiten von 0,80 m bzw. 0,90 m nur eine Personenbreite erlaubt. Deswegen wird angenommen, dass 100 Personen einen Raum durch eine Tür mit 1,20 m lichter Breite innerhalb einer Minute verlassen können. Hieraus resultiert ein spezifischer Personenfluss von $1,39\ Personen/m \cdot s$. Unberücksichtigt bleibt zudem die Verringerung des Flusses durch Stauungen und der veränderliche Fluss in Abhängigkeit von der Zeit.

3.1.4 DIN EN 13200 Zuschaueranlagen

Teil 1: Kriterien für die räumliche Anordnung von Zuschauerplätzen - Anforderungen

Die aktuelle Version der DIN EN 13200-1 ist aus dem Jahr 2003 und enthält Vorgaben zur Bemessung von Zuschaueranlagen. Im ersten Teil der Norm werden Kriterien für die räumliche Anordnung von Zuschauerplätzen behandelt. Zum Zuschauerbereich gehören nach Norm neben den Sitz- und Stehplätzen auch die zu diesem Bereich gehörenden Treppen und Gänge.

Treppen: Die maximale Steigung einer Treppe darf 35° betragen. Treppenstufen sollen eine Höhe von 0,2 m nicht über- und eine Tiefe von 0,25 m nicht unterschreiten.

Sitzplätze: Bei den Sitzplätzen werden nur die Anforderungen je Kategorie der Sitzplätze beschrieben, die zur Anwendung auf der Tribüne der ESPRIT arena kommt. Wenn Sitzplätze aus Einzelsitzen bestehen, wie es bei der Tribüne der ESPRIT arena der Fall ist, muss die Stufentiefe mindestens 700 mm sein und das Mindestmaß für die seitlichen Abschrankungen (Mitte bis Mitte) eines Einzelsitzes muss 450 mm betragen (siehe Bilder 4 und 5 Seite 10 DIN EN 13200-1).

In Anhang E Teil 1 der Norm wird auf die Durchlasskapazitäten von Zuschauerbereichen eingegangen. Es wird vorgeschrieben, dass im Notfall Besucher aus Bereichen im Freien innerhalb von acht Minuten und aus Bereichen in Gebäuden innerhalb von zwei Minuten einen Sicherheitsplatz erreichen können müssen. Der Laufweg für einen einzelnen Zuschauer zum Erreichen eines gut passierbaren Ausgangs muss in Gebäuden höchstens 30 m und im Freien höchstens 60 m betragen. Für die Breite von Rettungswegen werden mindestens 1,2 m gefordert, sodass 100 Personen in einer Minute einen Ausgang auf ebener Fläche von 1,2 m passieren können. Bei Treppen reduziert sich die Personenanzahl auf 79 bei gleich bleibender Zeit.

Teil 3: Abschrankungen - Anforderungen

Der dritte Teil der DIN EN 13200 in der aktuellen Fassung von 2005 befasst sich mit Abschrankungen in Zuschaueranlagen. Diese Norm gilt unter anderem für Absperrungen vor und hinter Sitzplätzen, auf Zuschauerrängen, für Wellenbrecher und andere Abtrennungen. Grundlegend müssen Absperrungen berücksichtigt werden, wenn der Höhenunterschied zwischen zwei Bereichen mehr als 0,5 m beträgt. Wellenbrecher sollen den Druck, den eine Menschenmenge erzeugt, auf verschiedenen Absperrungen abfangen und die Last somit verteilen. Ein Wellenbrecher muss mindestens einer horizontalen Nutzlast von 2 kN/m standhalten und 1,1 m hoch sein, da in dieser Höhe der größte Körperdruck einer Person auftrifft.

4 Experimente auf den Tribünen der ESPRIT arena

4.1 Projekt „HERMES“

In der heutigen Zeit stellt der Trend zu immer größeren Multifunktionsgebäuden und öffentlichen Veranstaltungen neue Anforderungen an die Sicherheitskonzepte. Um die Sicherheit der Besucher zu gewährleisten sind neue Strategien und Arbeitsmittel notwendig.

Im Forschungsprojekt „HERMES“ beschäftigen sich die Verbundpartner mit diese Thematik. Ziel ist die Verbesserung der Sicherheit der Personen während der Räumung von großen, multifunktionalen Gebäuden und Großveranstaltungen mit Hilfe eines Evakuierungsassistenten. Der Assistent soll aktuelle Personenzahlen sowie eine Prognose zur Entwicklung der Personendichten in Gebäudebereichen während der Veranstaltung bestimmen und eine Hilfestellung für die optimale Evakuierung der gefährdeten Bereiche geben. Um Ergebnisse zu erhalten, die auf der aktuellen Gefahrenlage beruhen, wird der Simulationskern an das Gefahrenmanagementsystem gekoppelt sowie die Personen mittels spezieller Kameras und Software gezählt. Auf Basis der vorliegenden Informationen zur Personenverteilung und Verfügbarkeit der Rettungswege wird durch den Einsatz eines Parallelcomputers eine Simulation schneller als Echtzeit zur Prognose der Bewegung aller anwesenden Personen während der nächsten 15 Minuten erstellt und in Intervallen

von einer Minute aktualisiert. Ein im Umgang mit dem Assistenten geschulter Operator schätzt die Lage ein und berät die entsprechenden Entscheidungsträger, wie Betreiber, Sicherheitsdienst, Polizei und Feuerwehr. Die Einsatzkräfte vor Ort werden über ein Kommunikationsmodul mit den notwendigen und aktuellen Informationen versorgt und optimal eingesetzt.

Im Rahmen des Projektes dient unter anderem die ESPRIT arena in Düsseldorf (max. 66 000 Zuschauer) zur Sammlung experimenteller Daten für die Optimierung der zugrunde liegenden Modelle der Fußgängerdynamik. Dies erlaubt eine Validierung der baurechtlichen Anforderungen sowie eine Erforschung und Erprobung des Evakuierungsassistenten.

4.2 ESPRIT arena Düsseldorf

Abbildung 4.1: Foto der ESPRIT arena in Düsseldorf

Die ESPRIT arena in Düsseldorf (bis Juni 2009 LTU arena) wurde in den Jahren 2002 bis 2004 anstelle des bis dahin bestehenden Rheinstadions gebaut. Als neues und modernes Stadion sollte es für die Weltmeisterschaft 2006 und für die Olympischen Spiele 2012 Verwendung finden.

Das Stadion wurde aus wirtschaftlichen Aspekten als Multifunktionsarena geplant. Daher wird die ESPRIT arena nicht nur als Sportstätte sondern auch für Public-Viewing, Konzerte und Shows genutzt. Hierzu finden 51.500 Besucher auf Sitzplätzen der Tribünen Platz. Die Maximalkapazität bei Konzerten mit Innenraumnutzung beläuft sich auf 66.500 Personen.

Baulich verfügt die Arena über ein Zweirangsystem, d.h. Teilung der Sitzplätze in Unterrang und Oberrang. Beide Ränge weisen unterschiedliche Neigungen auf: Unterrang (27°), Oberrang (33°). Die Multifunktionsarena ist mit Sitzplätzen (klappbar) und Stehplätzen ausgerüstet.

Der zu betrachtende Teil der Tribüne besteht aus den Blöcken 16 und 17 im Unterrang der Arena. Insgesamt sind diese 10 m breit und 24 m lang (siehe Abbildung **??**). Der Ausgang (Mundloch) für diese Blöcke ist in der Mitte der zwei Blöcke angelegt. Er ist 2,6 m breit und besitzt eine zweiflügligen Ausgangstür von insgesamt 2,4 m Breite. Oberhalb des Mundlochs sind 12 Sitzreihen angeordnet. Rechts und links neben dem Mundloch befinden sich je 18 Reihen. Unterhalb des Mundlochs sind 7 Sitzreihen vorhanden. Auf beiden Seiten des Mundlochs befinden sich zwischen Treppe und und Mundloch sechs Reihen mit jeweils zwei Sitzplätzen. Jede Reihe ist 0,8 m tief. Die Tiefe der Sitzschalen beträgt 0,4 m. Damit stehen den Personen beim Verlassen der Arena 0,7 m lichte Durchgangsbreite zur Verfügung. Drei Treppen mit einer Breite von 1,2 m leiten die Personen zum Mundloch.

4.3 Beschreibung und Durchführung der Experimente

Die Datenbasis der vorliegenden Arbeit bildet ein Experiment auf der Tribüne 16/17 der ESPRIT arena mit verschiedenen Modifikationen. Ein Ziel der Versuche im „HERMES“ Projekt ist die Gewinnung von Erkenntnissen über Unterschiede beim Zusammenfluss von zwei bzw. drei Personenströmen unter Modifikation der initialen Dichte und unter Einfluss von Wegeinengungen.
Folgende Modifikationen werden betrachtet:

MU11v1: Zügige Räumung von drei Personenströmen (Obere- und untere Tribüne besetzt) mit insgesamt 300 Personen.

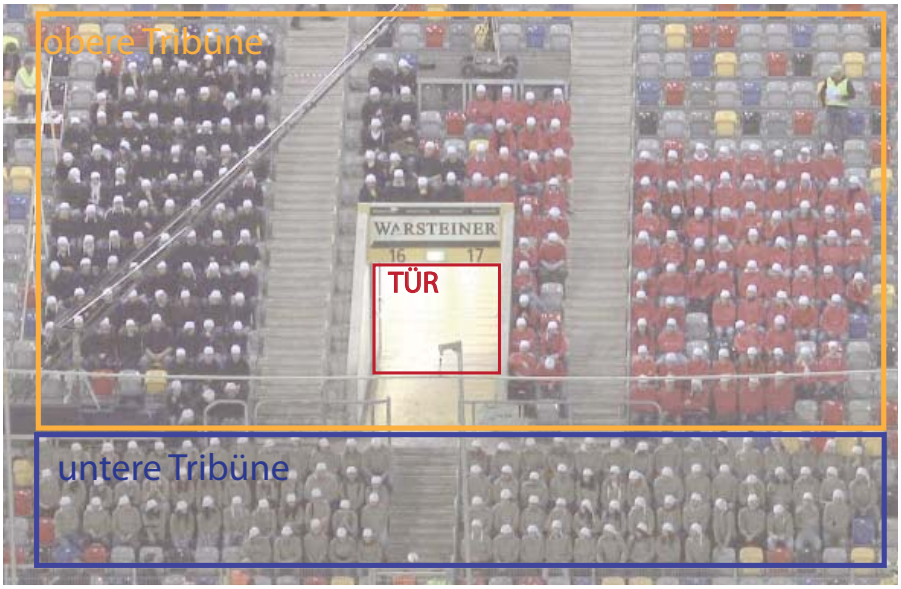

Abbildung 4.2: Ausgangsszenario MU11v1

MU11v2: Zügige Räumung von drei Personenströmen (Obere- und untere Tribüne besetzt) mit insgesamt 300 Personen und linkem Türflügel (eff. Breite 1,2 m) geschlossen.

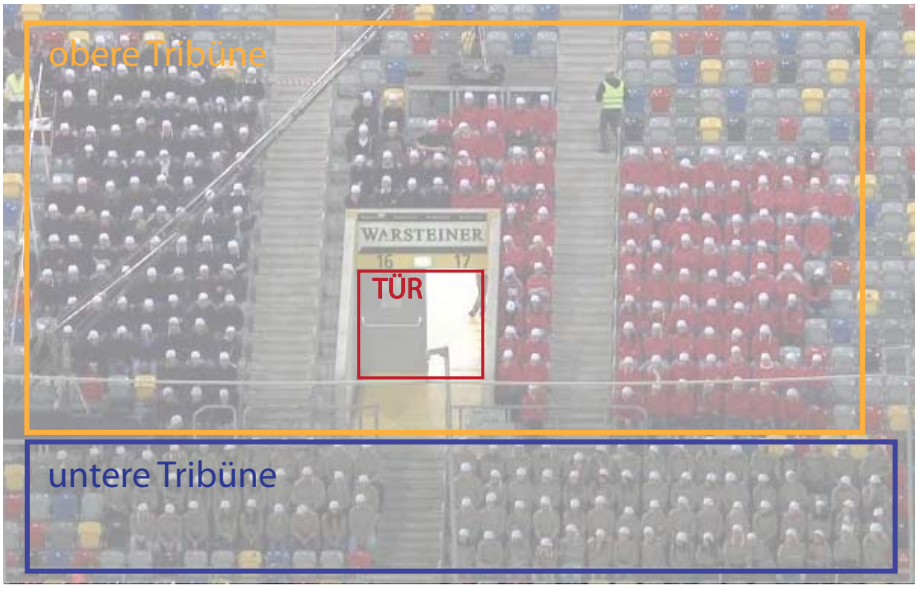

Abbildung 4.3: Ausgangsszenario MU11v2

An vier Stellen der Tribüne wurde der Fluss der Probanden anhand der Timegap-Methode 2.3 bestimmt. Die Ergebnisse der Messung dienen im weiteren Verlauf der Arbeit zum Vergleich mit den Ergebnissen des Handrechenverfahrens sowie der Simulationen. Es werden hierbei einmal der Fluss vor der Ausgangstür der Tribüne, Messlinie „back“, und die Summe der Flüsse der zuströmenden Personen, Messlinien „front“, „right“ und „left“ betrachtet.

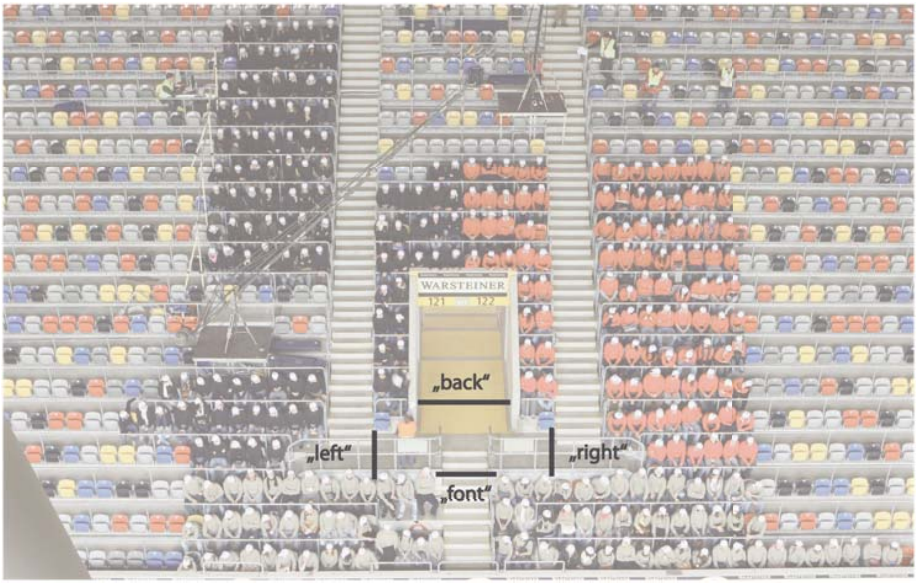

Abbildung 4.4: Messlinien zur Personenzählung

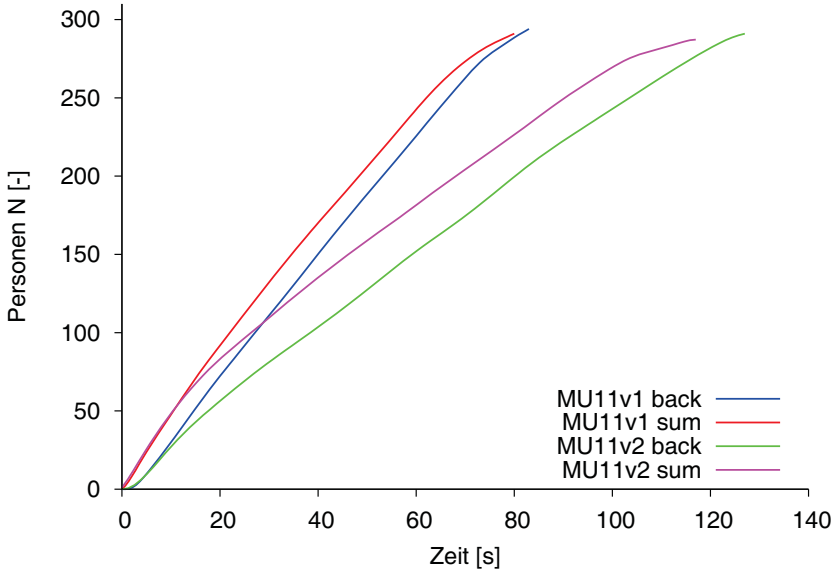

Abbildung 4.5: N(t)-Graphen der Experimente MU11v1 und MU11v2

Die Daten der Flussmessung für die Experimente MU11v1 und MU11v2 an den Messlinien „back“ und „sum“ werden in der Abbildung 4.5 dargestellt.
Die Graphen „back“ und „sum“ des Experimentes MU11v1 steigen konstant bis zu einer Räumungszeit von ca. 83 Sekunden an. Es lässt sich ein mittlerer Personenfluss von $J = 3,9\ \frac{1}{s}$ bei beiden Graphen durch die Formel 2.6 ermitteln. Während beim Experiment MU11v1 keine Änderung der Steigung der Graphen zu erkennen ist, steigen die Graphen „back“ und „sum“ des Experimentes MU11v2 konstant bis ca. 15 bzw. 20 Sekunden an ($J_{back} = 3,7\ \frac{1}{s}$ und $J_{sum} = 5\ \frac{1}{s}$) und verlaufen danach mit einer geringeren Steigung ($J_{Stau} = 2,3\ \frac{1}{s}$) konstant bis zu einer Räumungszeit von ca. 127 bzw. 117 Sekunden. Die Verringerung der Steigung der Graphen deutet auf einen Stau hin. Dies wird durch eine Verringerung des Personenflusses nach dem Staupunkt bestätigt.
Die unterschiedlichen maximalen Personenzahlen der Graphen „back“ und „sum“ je Experiment ergeben sich aus Fehlern in den Rohdaten der Personenmessung während der Experimente. Da sich die automatische Erfassung der Personen mit Hilfe spezieller Kameras und Software zur Zeit noch in der Entwicklungsphase befindet, können Abweichungen in der Personenzahl entstehen.

5 Methoden der Evakuierungsberechnung

5.1 Handrechenverfahren nach Predtetschenski und Milinski

Das Handrechenverfahren nach Predtetschenski und Milinski [19] wurde in den sechziger Jahren entwickelt. Mit diesem Verfahren lassen sich Evakuierungszeiten unabhängig von der Gebäudeart prognostizieren. Der makroskopische Berechnungsansatz baut auf einem hydraulischen Modell auf, bei dem die Bewegung von Personen ähnlich dem Strömen von Flüssigkeiten behandelt werden. Hierbei werden nur Personenströme betrachtet und die individuellen Eigenschaften einzelner Personen nicht berücksichtigt.

Die Zigarren-Form der Personenströme (siehe Abbildung 5.1) wird zur Vereinfachung als Rechteck idealisiert, da angenommen wird, dass die im Verhältnis zum Hauptteil wenigen Personen im Kopf- und Schlussteil bei der Gesamtbetrachtung eine vernachlässigbare Rolle spielen.

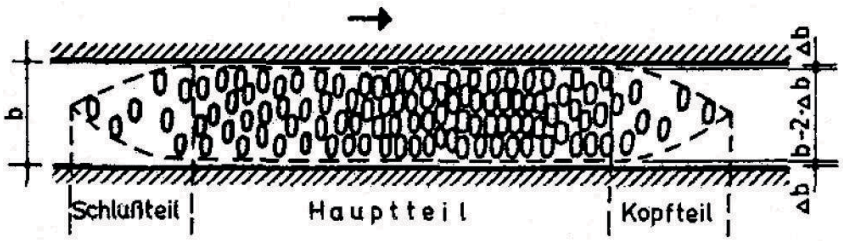

Abbildung 5.1: Schema eines Personenstromes

Weiterhin werden die Personenströme durch ihre Dichte D und die damit zusammenhängende Geschwindigkeit v definiert. Der Zusammenhang zwischen abnehmender Geschwindigkeit bei steigender Dichte wurde experimentell bestimmt und bildet die Grundlage aller Berechnungen nach Predtetschenski und Milinski. Die Szenarien können für unterschiedliche Situationen berechnet werden: Gefahrenbedingungen, Normalbedingungen und komfortable Bedingungen. Diese Wahl der Parameter beeinflusst wesentlich das Verhältnis von Geschwindigkeit zu Dichte bzw. Intensität der Bewegung zu Dichte. Die Wegart wird ebenfalls bei Predtetschenski und Milinski berücksichtigt. Es wird in den Geschwindigkeits-Dichte-Diagrammen zwischen horizontalen Wegen, Wegeinengungen und Durchgängen, Treppen aufwärts und Treppen abwärts unterschieden. Predtetschenski und Milinski nennen diese Berechnungstabelle für die von der Dichte abhängigen Parameter der Bewegung v und q im Anhang 1 auf Seite 291 im Handbuch. Zur Berechnung der Evakuierungszeit fließt die Länge des Weges ein. Bei der Angabe der tatsächlichen Lauflänge sind Neigungen und Ecken besonders zu beachten. Aus dem Zusammenhang von Geschwindigkeit und Dichte ist es möglich einen Personenfluss zu berechnen, der nach Predtetschenski und Milinski als Bewegungsintensität q bezeichnet wird. Stauungen vor Engstellen können mit Hilfe der Bewegungsintensität vorhergesagt bzw. berechnet werden.

Um die Bewegungsintensität in ein Verhältnis zur Anzahl bzw. Fläche von Personen, die eine bestimmte Öffnung durchschreiten können, zu setzen, wird die sogenannte Durch-

lassfähigkeit des Stromes Q eingeführt. Neben den grundlegenden Anwendungsmöglichkeiten bietet das Handbuch auch Berechnungsansätze für spezielle Gegebenheiten, wie z. B. Sitzreihen, Zusammenführung und Aufteilung von Personenströmen an.

Aus den Forschungen von Predtetschenski und Milinski lassen sich verschiedene Methoden zur Berechnung der Eigenschaften des Personenstromflusses und der Evakuierungszeiten der Tribüne der ESPRIT arena ableiten. Bei den Berechnungsmethoden werden die Laufwege der Personen in einzelne Wegabschnitte, je nach Wegart, aufgeteilt und betrachtet. Es ergeben sich folgende Abschnitte (siehe Abbildung 5.2):

- Reihe: Betrachtung der Verteilung der Personen, des Platzbedarfs der Personen und die Anfangsdichte.
- Treppe: Betrachtung des Übergangs vom horizontalen Weg (Reihe) auf die Treppe, die Vereinigung der Personenströme aus den Reihen auf der Treppe sowie die Untersuchung des Staus auf der Treppe.
- Abschnitt 1: Betrachtung des Übergangs von der Treppe in den horizontalen Gang bis zur Verengung vor dem Mundloch durch die Stufen der Treppe aufwärts. Diesen Wegabschnitt durchlaufen ausschließlich die Personen aus dem Oberrang.
- Abschnitt 2: Betrachtung der Vereinigung der Personenströme der linken und rechten Seite des Oberrangs sowie des Personenstroms aus dem Unterrang und der Bewegung der Personen bis zur Tür im Mundloch.
- Abschnitt 3: Betrachtung der Engstelle (Tür) und des dahinter liegenden Wegabschnittes bis zu dem sich anschließenden Raum.

Die Gesamtzeit der Wegabschnitte ergibt sich aus der Summe der Zeiten der einzelnen Wegabschnitte. Aus den Ergebnissen der Wegabschnitte fließt jeweils nur die längste Zeit in die Gesamtzeit mit ein.

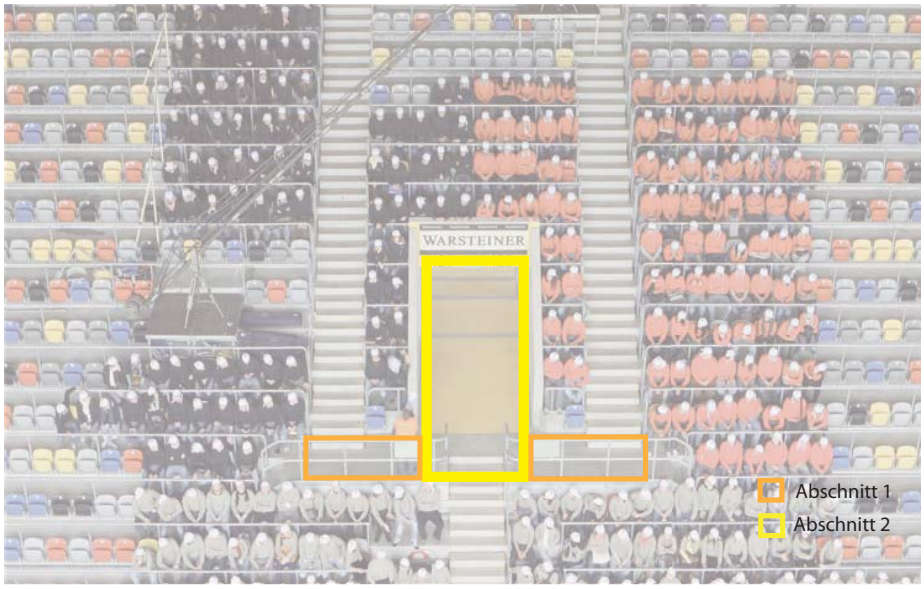

Abbildung 5.2: Abschnitte der Laufwege

Um die Evakuierungszeit der Tribüne in der ESPRIT arena zu bestimmen, wurde ein vereinfachtes Verfahren zur Berechnung der Vereinigung von mehreren Personenströmen auf einem begrenzten Wegabschnitt angewendet.

5.1.1 Berechnung anhand einer Näherungsformel

Die Vereinigung mehrerer Personenströme auf einem Wegabschnitt mit begrenzter Länge erfolgt beispielsweise in Quergängen von Zuschauersälen, wenn die Zuschauer die Sitzreihen verlassen. Laut Beobachtungen von PM besitzt dieser Prozess eine große Komplexität sowie seine eigene Charakteristik. Dies spiegelt sich auch in den Berechnungen wider.

Tabelle 5.1: Parameter der Bewegung von Personenströmen in Reihen von Zuschauersälen

Berechnungsparameter	Fläche f eines Menschen [m^2]					
	0,125		0,113		0,100	
	Normal-fall	Gefah-renfall	Normal-fall	Gefah-renfall	Normal-fall	Gefah-renfall
Dichte D	0,42	0,42	0,38	0,38	0,33	0,33
Geschwindigkeit v_R [$m \cdot min^{-1}$]	17,75	23,76	18,69	25,30	20,32	27,87
Intensität der Bewegung q_R [$m \cdot min^{-1}$]	7,45	9,98	7,10	9,61	6,71	9,20
Durchlaßfähigkeit der Reihe Q_R [$m^2 \cdot min^{-1}$]	4,47	5,99	4,26	5,77	4,03	5,52

PM geben für die Berechnung des Prozesses verschiedene Vereinfachungen vor:

- Ob der Personenstrom die Reihe nach einer oder nach zwei Seiten verlässt, ist ohne Bedeutung, da bei Vereinigungen die Parameter des vereinigten Stromes sich aus der Summe der Durchlassfähigkeiten ergeben.
- Der Abstand der Reihen b'_R kann nur die Werte 0,8; 0,9; 1,0 m annehmen. Zwischengrößen haben keinen Einfluss auf die Berechnung.
- Die Wegbreite jeden Stromes in den Reihen kann aufgrund der Schulterbreite eines Menschen mit $b_R = 0,6\ m$ angenommen werden.
- Vereinfachte Berechnungsparameter nach Tabelle 5.1 ergeben sich aus der Breite jedes Sitzes von 0,5 m.
- Verwendung eines Mittelwertes für die Plätze in den Reihen.

Die Durchlassfähigkeit, die Geschwindigkeit und die Intensität der Bewegung in den Reihen ergeben sich aus der Tabelle 5.1.

Die Berechnung des Prozesses mit Hilfe der Näherungsformel zur Bestimmung von Bewegungszeiten in Zuschauersälen ist eine weitere Vereinfachung des Berechnungsverfahrens nach Formel 50 aus dem Handbuch von PM. Der Zusammenhang zwischen Bewegung, Dichte und Zeit der Personenströme wird in drei Bereiche unterteilt, die sich auch in der Endformel wieder finden.

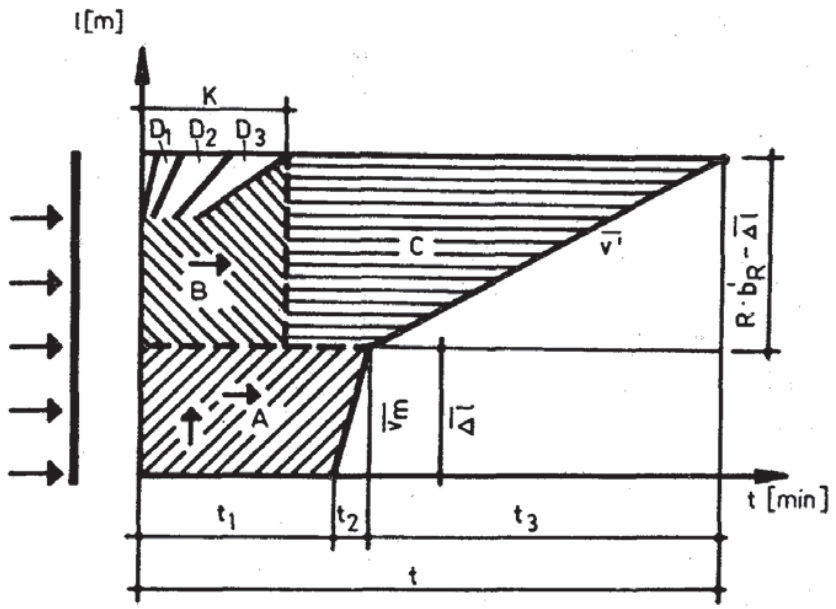

Abbildung 5.3: Grafische Darstellung des Evakuierungsprozesses beschrieben durch die Näherungsformel

Bereich A Anwachsen der Dichte, abhängig von der Länge des Gangs und der Zeit

Bereich B Vergrößerung der Dichte hauptsächlich durch die Zeit

Bereich C Stabilisierung mit maximaler Dichte

Die Dauer des Prozesses kann demnach wie folgt beschrieben werden:

$$t = t_1 + t_2 + t_3 \; [min] \tag{5.1}$$

Der erste zeitliche Abschnitt $t_1 = \frac{l_R}{v_R} \; [min]$ drückt die Dauer aus, die die Personen zum Verlassen der Reihen benötigen. Die Länge der Reihen wird mit $l_R = P_R \cdot 0,5$ ermittelt. Die Geschwindigkeit in den Reihen v_R richtet sich nach dem Platzbedarf der Personen und der Art der Räumung (siehe Tabelle 5.1 bei f = 0,113 im Normalfall). Die Bewegung des Endteils des Personenstromes aus der ersten Reihe durch den Hauptgang wird durch den zweiten Abschnitt $t_2 = \frac{\overline{\Delta l}}{\overline{v_m}} \; [min]$ dargestellt. Hierbei bedeutet $\overline{\Delta l}$ (ermittelt aus Tabelle 5.2) die Länge des Hauptganges von der ersten Reihe bis zum Anfang der Zone der Stabilisierung der Dichte C und $\overline{v_m}$ (ermittelt aus Tabelle 5.2) die mittlere Geschwindigkeit der Bewegung des Endteils vom vereinigten Strom ab dem Beginn der Zone der Dichtestabilisierung C. Der dritte Abschnitt $t_3 = \frac{R \cdot b_{R'} - \overline{\Delta l}}{\overline{v'}} \; [min]$ beschreibt die verbleibende Zeit bis zum Ende des Prozesses sowie die Dauer der Bewegung des Endteils vom Strom in der Zone der Dichtestabilisierung C. Hierbei gehen die Reihenanzahl R und die Breite der Reihe $b_{R'}$ in die Formel mit ein. Der Parameter $\overline{v'}$ (ermittelt aus Tabelle 5.2) stellt die Bewegungsgeschwindigkeit an den Grenzen der Zone C von t_2 bis zum Ende des Prozesses dar.

Die drei vorgestellten Zeitabschnitte beschreiben ausschließlich die Bewegung von Personen aus den Reihen bis zum Ende des Hauptgangs auf horizontalen Wegen. Um die Formel auf beliebige Weg- und Bewegungsarten anwenden zu können, wird die Formel mit Koeffizienten für diese Einflüsse erweitert.

Für $R \cdot b_{R'} > \overline{\Delta l}$ wird die folgende Formel 53 aus dem Handbuch von PM angewendet:

$$t = \mu \cdot \left[\overline{\Delta t'} + m \cdot \left(\frac{l_R}{v_R} - \overline{\Delta t'} + \frac{\overline{\Delta l}}{\overline{\Delta v_m}} \frac{R \cdot b_{R'} - \overline{\Delta l}}{\overline{v'}} \right) \right] \; [min] \tag{5.2}$$

Tabelle 5.2: Berechnungskoeffizienten $\overline{\Delta l}$, $\overline{\Delta v_m}$, $\overline{\Delta t'}$ und $\overline{v'}$

Berechnungsparameter	Platzanzahl pro Reihe	Reihenabstand b'_R = 0,80 m					Reihenabstand b'_R = 1,00 m				
		Breite des Hauptganges in m									
		2,20	1,80	1,40	1,00	0,60	2,20	1,80	1,40	1,00	0,60
$\overline{\Delta l}$	beliebig	2,93	2,45	1,92	1,40	0,90	4,05	3,31	2,60	1,88	1,15
$\overline{v_m}$	beliebig	53,80	51,30	46,40	36,50	20,00	51,00	48,80	46,70	40,00	20,00
$\overline{\Delta t'}$	beliebig	0,26	0,20	0,15	0,10	0,34	0,32	0,26	0,18	0,12	0,42
	5	20,80	18,90	16,00	12,30	7,00	26,60	23,90	20,80	16,20	8,00
	10	14,80	12,70	10,00	6,90	3,70	17,10	14,35	11,50	8,20	4,20
$\overline{v'}$	15	10,50	8,50	6,60	4,65	2,67	13,25	10,60	7,90	5,45	3,15
	20	8,75	6,45	4,70	3,32	2,15	9,60	7,75	5,80	4,10	2,50
	25	7,20	5,00	3,43	2,45	1,65	7,90	6,15	4,55	3,20	1,90

In der Formel bedeuten $\overline{\Delta t}$ die Dauer des Anwachsens der Dichte vom Zeitpunkt $t = 0\,min$ (wenn im Gang $D = 0\ m^2 \cdot m^{-2}$) bis zum Zeitpunkt $t = \overline{\Delta t'}$ (wenn sich D stabilisiert)(ermittelt aus Tabelle 5.2), μ als Koeffizient der Bewegungsart sowie m als Koeffizient der Wegart. Alle weiteren Zahlenwerte ergeben sich aus Tabelle 5.2 und Tabelle 5.3 nach der Geometrie des Prozesses.

Tabelle 5.3: Koeffizient m der Wegart

Charakter des Weges im Hauptgang	Platzanzahl in der Reihe P_R				
	5	10	15	20	25
Horizontale Wege und Rampen	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Treppen abwärts: b'_R = 1,00 m	0,90	1,51	2,10	2,20	2,10
b'_R = 0,80 m	0,94	1,70	2,06	2,20	2,18
Treppen aufwärts	1,30	1,27	1,42	1,43	1,43

Bei den anschließenden Wegabschnitten ergeben sich unterschiedliche Geschwindigkeiten, Intensitäten der Bewegung und Durchlassfähigkeiten der Personen je nach Wegart und Wegbreite. Die Einflüsse der unterschiedlichen Wegarten auf die Parameter der Personenbewegung werden gemäß den Tabellen aus Anhang 1 PM beachtet und die Änderung der Wegbreite nach folgender Formel

$$q_i \cdot b_i = q_{i+1} \cdot b_{i+1} \tag{5.3}$$

berechnet. Die Umformung der Personenströme der oberen Tribüne nach der Treppe bis zur Vereinigung aller Personenströme wird vereinfacht berechnet.
Der U-förmige Wegverlauf ergibt drei problematische Einflussfaktoren für die Berechnung:

1. der Verlauf der Personenströme in Kurven
2. die Bestimmung der Weglänge
3. die Bestimmung einer repräsentativen Wegbreite aus drei unterschiedlichen Breiten.

Laut PM verändert sich das Durchlassvermögen in Wendungen nicht wesentlich und kann unberücksichtigt bleiben. Die Weglänge (siehe Abbildung 5.4 rote Linie) zur Berechnung der Verweilzeit der Personen im Bereich der Wendung vor dem Mundloch (Abschnitt 1 und 2) wird entlang der Mitte der Wegbreiten (siehe Abbildung 5.4 blaue Linien) gemessen.

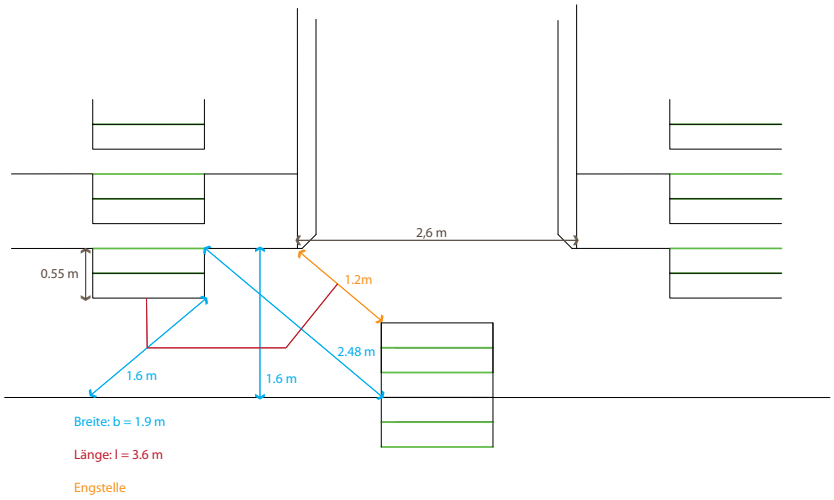

Abbildung 5.4: Bemessung der Geometrie des Mundlochs

5.2 Computersimulationsprogramme

Das im vorherigen Abschnitt vorgestellte Handrechenverfahren für Evakuierungszeitberechnungen von Predtetschenski und Milinski wird in der heutigen Zeit vermehrt durch Computersimulationsprogramme ersetzt.

Computersimulationsprogramme zur Evakuierungszeitberechnung gliedern sich in Programme mit implementierten makroskopischen oder mikroskopischen Ansätzen. Mikroskopische lassen sich zusätzlich in raumkontinuierliche und raumdiskrete Modelle aufteilen. Im Rahmen dieser Abschlussarbeit wird ein raumkontinuierliches Modell (Fire Dynamics Simulator with Evacuation) und ein Zellularautomat (PedGo) betrachtet.

Hauptsächlich unterscheiden sich die Modelltypen in der Abbildung der Bewegung der Personen und der körperlichen Maße. Bei raumkontinuierlichen Modellen können die Personen spezifisch eingestellt werden, d.h. der Anwender kann neben verschiedenen Parametern die körperlichen Maße beeinflussen und realitätsgetreu anpassen. Die Personen

können sich „frei“ im Raum bewegen. Bei zellularen Automaten sind die Personen in ihrem Platzbedarf auf die Größe der Zellen beschränkt und bewegen sich je Zeitschritt eine bestimmte Anzahl von Zellen weiter.
Im Folgenden werden nun die in dieser Arbeit verwendeten Simulationsprogramme Fire Dynamics Simulator with Evacuation und PedGo näher erläutert.

5.2.1 PedGo

Mit dem Programm PedGo werden Evakuierunsanalysen durchgeführt. Es wird von der Firma TraffGo HT GmbH in Duisburg entwickelt und vertrieben. Die Grundlage der Simulation bildet das Multi-Agenten-Modell, welches auf einem zellularen Automaten aufbaut. D.h. die Personen bewegen sich von Zelle zu Zelle, welche eine Seitenlänge von 0,4 m haben. Dies ergibt eine maximale Dichte von $6,25\ Personen/m^2$.
Dieses Programm besteht aus drei unterschiedlichen Modulen, dem Editor, dem Simulator und dem Viewer. In den Editor werden CAD-Grafiken bzw. DXF-Dateien importiert, die Geometrie aufbereitet, Ausgänge und Routen definiert sowie Personen platziert und den gewünschten Routen zugewiesen. Beim Importieren des Grundrisses wird dieser an das $0,4 \cdot 0,4\ m^2$ Raster angepasst. Anschließend werden die funktionalen Elemente wie Türen, Ausgänge, Wände oder Treppen durch farbige Markierungen dem Raster zugewiesen.
Des Weiteren können Inhalte von Zellen definiert werden, die in der Simulation unberücksichtigt bleiben. Ein Bereich oder der genaue Standort der Personen wird bei der Eingabe der Personen festgelegt. Hierbei ist darauf zu achten, dass nicht mehr als eine Person pro Zelle erlaubt ist. Es können Personengruppen definiert und ihnen Routen sowie Ausgänge zugewiesen werden.
Die Evakuierungsberechnung wird mit dem Simulator durchgeführt, d.h. die Bewegung der Personen wird anhand der Definitionen im Editor / Projektdatei berechnet. Personenparameter wie z. B. Geschwindigkeit, Geduld, Reaktionszeit oder Trödelwahrscheinlichkeit werden hier eingestellt und zwischen Gleich- und Normalverteilung gewählt. Die

Art und Reihenfolge, in der die Personen bewegen werden, wird Update genannt. Es gibt verschiedene Varianten. Bei der Simulation wird ein Random Shuffled Update verwendet. Hier besteht ein Zeitschritt (eine Sekunde) aus einer bestimmten Anzahl von Sub-Updates, die der Maximalgeschwindigkeit der gesamten Population entspricht. Pro Sub-Update werden die Personen in zufälliger Reihenfolge eine Zelle weiter bewegt. Da pro Zelle maximal eine Person zugelassen ist, werden die zugewiesenen Zellen einen Zeitschritt lang blockiert. Der hier beschriebenen Algorithmus ergibt eine gute Übereinstimmung mit der Laufgeschwindigkeit (entspricht dem Personenfluss) und der Dichte.
Um realistische Kenndaten der Räumungsverläufe durch das stochastische Modell zu erhalten, wird jedes Projekt üblicherweise 500 Mal simuliert und statistisch ausgewertet. Jede Berechnung lässt sich einzelnd wiederholen, um detaillierte Informationen zu erhalten. Die Ergebnisse werden in Form von Tabellen und Grafiken ausgegeben. Mit der erzeugten Log-Datei lässt sich das Evakuierungsszenario im Darstellungsprogramm (Viewer) betrachten.
Die Untersuchungen wurden mit einer vom Entwickler Tim Meyer-König modifizierten Version des Programms durchgeführt. In die Version 2.5.0.8 wurden zusätzlich zu den vorhandenen Türelementen virtuelle Türen implementiert. Die virtuellen Türen nehmen keinen Einfluss auf die Bewegung der Personen, sondern werden zur Schaffung von virtuellen Räumen verwendet um Personen bei der Überschreitung einer imaginären Messlinie durch LogPoints zählen zu können. Dies ermöglicht den direkten Vergleich mit den Experimenten, beispielsweise mit der N(t)-Grafik (siehe Abbildung 6.2).

5.2.2 Fire Dynamics Simulator with Evacuation

Das Programm „Fire Dynamics Simulator with Evacuation“ (FDS+Evac) sowie „Smokeview“ wird für die Brand- und Evakuierungssimulation in Zusammenarbeit mit dem National Institute of Standards and Technology (NIST) [1], dem U.S. Department of Com-

[1] `http://www.nist.gov`

merce (US DoC) [2] und dem VTT Building and Transport [3] aus Finnland entwickelt. Es handelt sich hierbei um „open source“ Programme, die der Anwender kostenlos im Internet herunterladen und modifizieren kann.

Das Modul für die Evakuierungssimulation (Evac) ist in dem auf numerischer Strömungsmechanik basierenden Brandsimulator (FDS) eingebettet. Für die Betrachtung der Simulation steht dem Anwender ein eigenständiges Programm (Smokeview) zur Verfügung. Das 2D-Evakuierungsmodell wurde besonders für Situationen mit hohen Personendichten entwickelt. Mit der Kombination von modernsten Brand- und Evakuierungsmodulen wird eine gleichzeitige Modellierung von Brand- und Evakuierungsprozessen ermöglicht. Durch Abschalten der Brandberechnungen ist die ausschließliche Nutzung des Evakuierungmoduls möglich.

Die Geometrie des Gebäudes wird einem Gitter angepasst. Hierbei ist die Größe der Gitterzellen vom Anwender frei wählbar, sollte jedoch auf jeder Raumachse gleich sein. Mögliche Werte für die Größe der Gitterzellen unterliegen bestimmten Einschränkungen: die Werte dürfen bei dreidimensionalen Simulationen nicht kleiner als 4 und ein ganzzahliges Vielfaches von 2, 3 oder 5 sein. Für die Brand- und Evakuierungssimulation wird ein eigenes Gitter bestimmt. Um Probleme mit dem Bewegungsfluss der Personen zu vermeiden, sollte die Größe der Gitterzellen identisch und nicht zu fein sein. Es kann für die Brandsimulationsberechnung nur ein Gitter vorliegen. Für die Evakuierungssimulation ist die Nutzung von mehreren Gittern möglich.

Die gewählte Feinheit des Gitters sollten auf die Evakuierungszeit keinen Einfluss nehmen. Um diesen Einfluss auf die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Simulationen zu prüfen, wird ein Minimalbeispiel unter Variation der Gitterauflösung simuliert und analysiert. In diesem Beispiel wird ein Raum indem 50 Personen platziert sind, mit den Abmaßen $10 \cdot 10\ m^2$ und einem sich anschließenden Flur von 2 m Breite, simuliert.

[2] `http://www.commerce.gov`

[3] `http://www.vtt.fi`

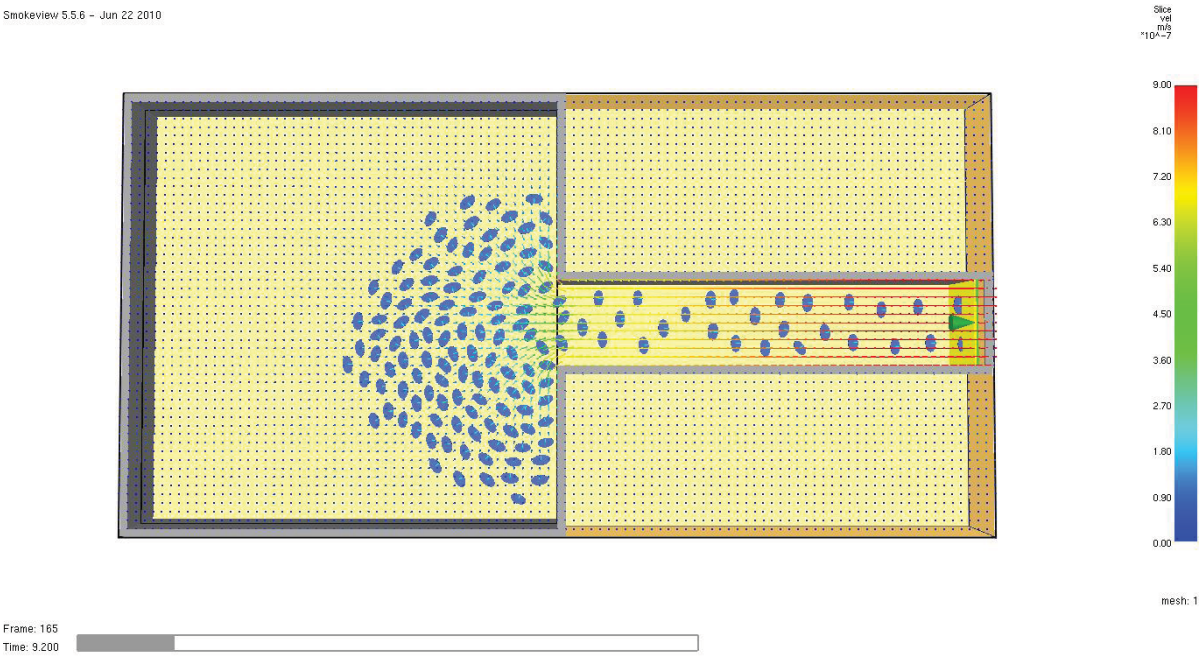

Abbildung 5.5: Raumgeometrie der Gitterstudie

Das Gitter wird je in 0,02 m, 0,05 m, 0,1 m, 0,2 m und 0,4 m Abschnitte unterteilt. In der Abbildung 5.6 werden die Räumungszeiten je Gitterauflösung dargestellt. Anhand der Abbildung 5.6 lässt sich erkennen, dass sich die Wahl des Gitters auf die Räumungszeit der Simulation auswirkt. Jedoch ist eine Abweichung von 10 % (3 Sekunden) der gesamten Evakuierungszeit bei einer Verfeinerung des Gitters um den Faktor 10 in X- und Y-Richtung (von 0,2 m auf 0,02 m) als gering anzusehen.

Wie wirkt sich jedoch die Wahl der Gitterauflösung in Stausituationen aus? Anhand des vorherigen Beispiels wird durch Erhöhung der Personenzahl auf 150 eine Stausituation herbeigeführt und untersucht. In der folgenden Abbildung 5.7 werden die Räumungszeiten je Gitterauflösung dargestellt.

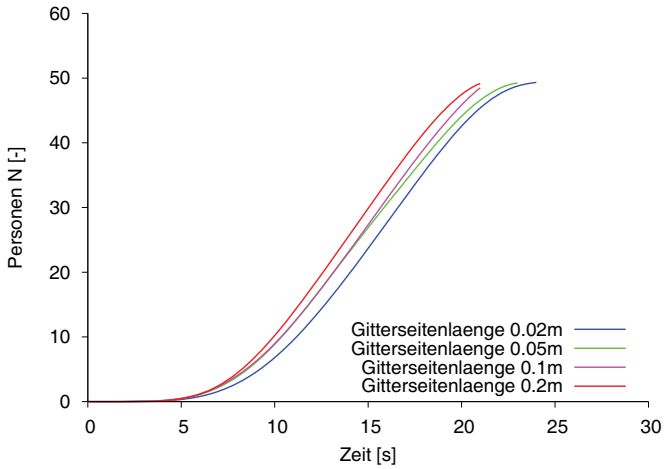

Abbildung 5.6: Evakuierungsverlauf in Abhängigkeit der Gitterauflösung ohne Stau

Die Abbildungen 5.6 und 5.7 zeigen, dass sich die Wahl des Gitters bei Räumungen mit oder ohne Stau nur minimal auf die Räumungszeit auswirkt. Jedoch kann festgehalten werden, dass mit der Verfeinerung des Gitters die Rechenzeit ansteigt. In der vorliegenden Arbeit wird zum einen die vorgegebene Größe der Zellen (0,4 m) von PedGo und zum anderen die benötigte Rechenzeit bei der Feinheit des Gitters berücksichtigt. Aufgrund der 100 Durchläufe je Simulation mit FDS soll die Rechenzeit in einem realistischen Rahmen gehalten werden. Folglich wird eine Gitterauflösung von 0,2 m gewählt. Da die Räumungszeiten je nach Gitterauflösung minimal von einander abweichen, fließt dies nicht bei der Interpretation der Ergebnisse mit ein.

Die Anfangspositionen und die Platzierung der Agenten werden nach dem Zufallsprinzip generiert. Deshalb kann die anfängliche Dichte des Agenten nicht viel größer als 4 Personen pro Quadratmeter sein. Soll eine höhere Dichte von Anfang an vorhanden sein, müssen die Positionen von mehreren Agenten angegeben werden. Durch das Zufallsprinzip weichen die Durchläufe der Simulation voneinander ab. Um statistische Werte und

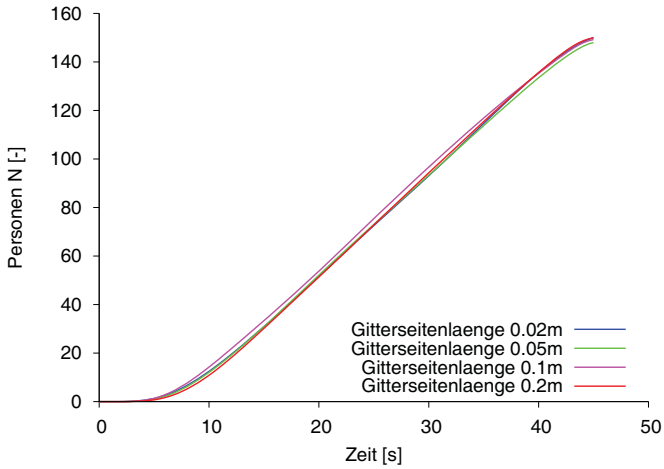

Abbildung 5.7: Evakuierungsverlauf in Abhängigkeit der Gitterauflösung mit Stau

eine Variation von Ergebnissen zu erhalten sollte die Simulation mehrere Male durchgeführt werden.

Das Modell berücksichtigt jede Person als separate Einheit (Agenten) mit eigenen persönlichen Eigenschaften und eigenem Entfluchtungsverhalten. Die Bewegung der Personen wird in einem feinen Gitter in der zweidimensionalen Ebene, d.h. in den Gängen der Gebäude, berechnet. Der Basisalgorithmus hinter der Entfluchtungsbewegung löst die Bewegungsgleichung kontinuierlich in Ort und Zeit für jede Person. FDS+Evac nutzt einfache Regeln und künstliche Intelligenz, um die Wahl der Evakuierungsrouten der Agenten zu modellieren.

Die von der Helbing's Gruppe eingeführte „social force method“ [7], [6], [5], [28]bildet den Ausgangspunkt des Basisalgorithmus. Der Basisalgorithmus wird von mehreren Parametern bestimmt. Neben den physikalisch bedingten Parametern wie Platzbedarf der Personen, Geschwindigkeit und Trägheitsmoment, nimmt auch die Umgebung Einfluss.

Der Platzbedarf der Agenten werden durch FDS+Evac als eine Anordnung von drei elastischen Kreisen in zweidimensionaler Ebene verwendet. Die drei Kreise sollen eine elipsenförmige Darstellung des menschlichen Körpers repräsentieren.

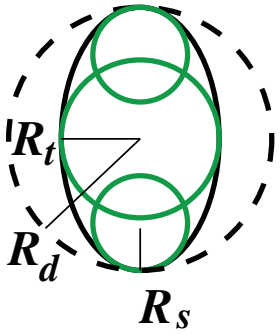

Abbildung 5.8: Maße der Agenten

Eine Änderung des Modells zur Optimierung der Form des menschlichen Körpers wurde von Langston Et al. [12] eingeführt.
Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende Maße der Personen gewählt:

- $R_d = 0,210 \pm 0,015\ m$
- $R_t/R_d = 0,5714$
- $R_s/R_d = 0,3333$

Die Wahl der Personenmaße wurde maßgeblich beeinflusst durch das Ziel der Arbeit, die Parameter der Programme bestmöglich auf das Experiment MU11v1 einzustellen, und so zu prüfen, ob sich das Experiment MU11v2 reproduzieren lässt. Zusätzlich wurde die nicht variierbare Einstellung der Körpermaße in PedGo berücksichtigt.

6 Anwendung der Methoden am Beispiel der ESPRIT arena

6.1 Predtetschenski und Milinski

In diesem Kapitel wird die Räumung der Tribüne mit der Näherungsformel von Predtetschenski und Milinski, wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben, für die Szenarien MU11v1 und MU11v2 berechnet.

Szenario MU11v1: Tribüne mit drei Personenströmen

Tabelle 6.1: Parameter zur Berechnung

Tribüne	R $[-]$	P_R $[-]$	$b_{R'}$ $[m]$	b $[m]$	v_R $[m \cdot min^{-1}]$	l_R $[m]$
oben links	18	5,5	0,8	1,2	18,69	2,75
oben rechts	19	5	0,8	1,2	18,69	2,45
unten	8	12	0,8	1,2	18,69	6

Die Parameter zur Berechnung (siehe Tabelle 6.1) wurden wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben berechnet oder aus den Tabellen 5.1, 5.2 und 5.3 ermittelt. Der Mittelwert der

Personen pro Reihe P_R und die Breite der Treppe b ergeben sich aus der Geometrie der Tribüne und von Fotos der Experimente.

Tabelle 6.2: Bestimmung der entsprechenden Näherungsformel

Tribüne	$\overline{\Delta l}$ $[m]$	$R \cdot b_{R'}$ $[m]$	Formel
oben links	1.66	14,4	(53)
oben rechts	1.66	15,2	(53)
unten	1.66	6,4	(53)

Anhand der Tabellen 5.2 und 5.3 werden die Parameter zur Berechnung der Näherungsformel bestimmt.

Tabelle 6.3: Parameter zur Berechnung der Näherungsformel sowie das Ergebnis $t_{Reihe+Treppe}$

Tribüne	μ $[-]$	$\overline{\Delta t'}$ $[min]$	m $[-]$	$\overline{\Delta v_m}$ $[m \cdot min^{-1}]$	$\overline{v_{i'}}$ $[m \cdot min^{-1}]$	$t_{Reihe+Treppe}$ $[min]$
oben links	1	0,125	0,94	41,45	14,15	1,07
oben rechts	1	0,125	0,94	41,45	14,15	1,06
unten	1	0,125	1,84	41,45	7,32	1,69

Tabelle 6.4: Zwischenergebnisse von $\overline{v_r}$, D und q

Tribüne	$\overline{v_r}$ $[m \cdot min^{-1}]$	D $[m^2 \cdot m^{-2}]$	q $[m \cdot min^{-1}]$
Oberrang links	14,15	0,48	6,89
Oberrang rechts	14,15	0,48	6,89
unten	7,32	0,88	6,4

Berechnung des Übergangs von der Treppe in den Abschnitt 1 auf der linken und rechten Seite:

- $q_{Abschnitt1} = \frac{6,89 \cdot 1,2}{1,9} = 4,35 \ \frac{m}{min}$ nach Anhang 1 für horizontale Wege $D = 0,12 \ \frac{m^2}{m^2}$, $v = 36,58 \ \frac{m}{min}$.

Die Personenströme der linken und der rechten Seite müssen jeweils eine Verengung von $b = 1,2 \ m$ passieren.

- $q_{Verengung} = \frac{4,35 \cdot 1,9}{1,2} = 6,89 \ \frac{m}{min}$ nach Anhang 1 Wegeinengungen und Durchgänge $D = 0,18 \ \frac{m^2}{m^2}$, $v = 38,18 \ \frac{m}{min}$ und $Q = 8,27 \ \frac{m^2}{min}$.

Von der Mitte her strömt ein Personenstrom mit einer Bewegungsintensität von $q = 6,09 \ \frac{m}{min}$ und einer Durchlassfähigkeit $Q = 6,78 \ \frac{m^2}{min}$. Die Breite des Ganges beträgt $b = 2,6 \ m$.

- $q_{Abschnitt2} = \frac{\sum Q}{b} = \frac{2 \cdot 8,27 + 6,4}{2,6} = 8,82 \ \frac{m}{min}$.

Da $q_{Abschnitt2} > q_{max} = 8,36 \ \frac{m}{min}$ ist, entsteht hier ein Stau. Durch den Effekt der Auflockerung ergibt sich deshalb nach Anhang 1 für horizontale Wege $D = 0,51 \ \frac{m^2}{m^2}$ und $v = 16,38 \ \frac{m}{min}$.
Anschließend passiert der Personenstrom eine Wegverengung in Form einer Tür von der Breite $b = 2,4 \ m$.

- $q_{Tuer} = \frac{8{,}36 \cdot 2{,}6}{2{,}4} = 9,06\ \frac{m}{min}$

Da $q_{Tuer} > q_{max} = 8,94\ \frac{m}{min}$ ist, entsteht hier ein Stau.
Der Gang hinter der Tür besitzt eine Breite von $b = 2,6\ m$ und ist 4,8 m lang.

- $q_{Abschnitt3} = \frac{8{,}36 \cdot 2{,}4}{2{,}6} = 7,72\ \frac{m}{min}$ nach Anhang 1 für horizontale Wege $D = 0,45\ \frac{m^2}{m^2}$ und $v = 17,2\ \frac{m}{min}$.

Tabelle 6.5: Übersicht der Zeiten der einzelnen Wegabschnitte von Szenario MU11v1

	$t_{Reihen+Treppe}$ $[min]$	$t_{Abschnitt1}$ $[min]$	$t_{Abschnitt2}$ $[min]$	$t_{Abschnitt3}$ $[min]$	t_{ges} $[min]$
Tribüne	1,69	0,098	0,32	0,279	2,38

Szenario MU11v2: Tribüne mit drei Personenströmen, linker Türflügel geschlossen

Tabelle 6.6: Übersicht der Intensitäten der Bewegung der einzelnen Wegabschnitte von Szenario MU11v2

	$q_{Reihen+Treppe}$ $\left[\frac{m}{min}\right]$	$q_{Abschnitt1,l}$ $\left[\frac{m}{min}\right]$	$q_{Abschnitt1,r}$ $\left[\frac{m}{min}\right]$	$q_{Verengung}$ $\left[\frac{m}{min}\right]$	$q_{Abschnitt2}$ $\left[\frac{m}{min}\right]$	q_{Tuer} $\left[\frac{m}{min}\right]$	$q_{Abschnitt3}$ $\left[\frac{m}{min}\right]$
Tribüne	6,76	4,27	3,66	6,76	8,03	8,94	4,12

Tabelle 6.7: Übersicht der Zeiten der einzelnen Wegabschnitte von Szenario MU11v2

	$t_{Reihen+Treppe}$ $[min]$	$t_{Abschnitt1}$ $[min]$	$t_{Abschnitt2}$ $[min]$	$t_{Abschnitt3}$ $[min]$	t_{ges} $[min]$
Tribüne	1,89	0,095	0,316	0,125	2,38

Zwischenergebnisse

Im Vergleich der Ergebnisse der Berechnungen der Szenarien MU11v1 und MU11v2 fällt auf, dass die gesamte Räumungszeit t_{ges} des Szenario MU11v1 mit der des Szenario MU11v2 identisch ist. Dies scheint ungewöhnlich, da im Szenario MU11v2 nur die Hälfte der effektiven Breite von der Tür im Mundloch des Szenario MU11v1 zur Verfügung steht. Bei dem Vergleich der Räumungszeiten der einzelnen Abschnitte wird jedoch deutlich, dass $t_{Reihen+Treppe}$ 3/4 der gesamten Räumungszeit ausmacht. Diese weicht bei beiden Szenarien aufgrund der fast identischen Personenzahl und -verteilung in den Rei-

hen nur geringfügig ab. Die Räumungszeiten der Abschnitte 1 und 2 weisen keine bzw. sehr geringe Unterschiede auf. Im Abschnitt 3 dagegen benötigen die Personen beim Szenario MU11v1 fast die doppelte Zeit als beim Szenario MU11v2 um die Engstelle (Tür) und den dahinter liegenden Flur zu passieren. Bei beiden Szenarien bildet sich ein Stau in der Engstelle (Tür) aus, d.h. die maximalen Intensität der Bewegung wird überschritten. Durch den Effekt der Auflockerung nach PM werden beide Intensitäten der Bewegung gleich $q = 8,36\ \frac{m}{min}$ gesetzt. Durch die geringere effektive Breite der Tür ergeben sich für das Szenario MU11v2 halb so große Intensitäten der Bewegung und doppelt so hohe Geschwindigkeiten wie für das Szenario MU11v1. Resultierend hieraus ergibt sich, dass die Räumungszeit im Abschnitt 3 des Szenario MU11v1 doppelt so hoch ist wie beim Szenario MU11v2 und die gesamte Räumungszeit identisch ist.

6.2 Computersimulationsprogramme

In den folgenden zwei Kapiteln 6.2.1 und 6.2.2 werden die Modellgeometrie, die gewählten Modellparameter und die Ergebnisse der Simulationen von PedGo und FDS+Evac im Vergleich zu dem Basisexperiment MU11v1 dargestellt. Beim Vergleich der experimentellen Daten mit den Ergebnissen der Simulationen wird nur die Messlinie „back“ berücksichtigt. Da bei der Messlinie „sum“ die Daten der drei Messstellen „left“, „right“ und „front“ aufsummiert werden, kann es zu sogenannten Ausgleichseffekten kommen. D.h. falls die Kapazität einer oder zweier Messstellen überschritten ist, kann dies in der Summe durch die andere bzw. die anderen zwei Messstellen ausgeglichen werden. Zudem ist das Mundloch das beschränkende Element für den Personenfluss im Verlauf der Räumung.

6.2.1 PedGo

Geometrie der Tribüne und Implementierung der Personen im Simulationsmodell

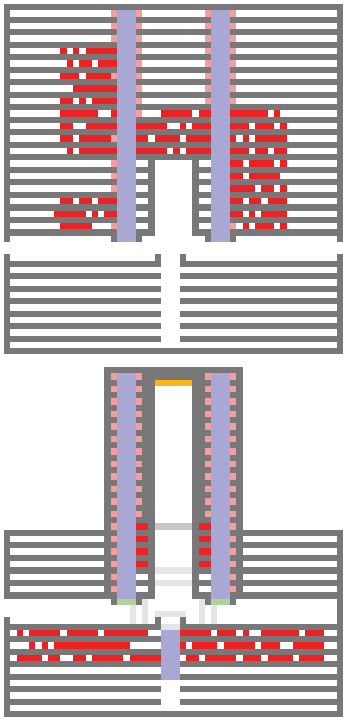

Abbildung 6.1: Ebenen 1 und 2 der Geometrie des Simulationsmodells PedGo

Abbildung 6.1 zeigt die Ebenen 1 und 2 der Geometrie des Simulationsmodells PedGo. Die blauen Flächen kennzeichnen die Treppen und die roten die angeordneten Personen. Aufgrund der Dreidimensionalität der Tribüne und der räumlichen Anordnung des Mundlochs unterhalb der oberen Tribünenreihen werden zwei Ebenen benötigt.

Einstellung der Parameter

Die Anpassung der Grundeinstellungen erfolgt anhand der Ergebnisse der Experimente, wie z. B. die freie horizontale Gehgeschwindigkeit von 1,55 m/s oder die Geschwindigkeit

auf der Treppe abwärts von $v_{down,hor} = 0,98 m/s$.
Folgende Einstellungen bilden die einheitliche Grundlage aller vier Szenarien:

- durchschnittliche freie Gehgeschwindigkeit: 4 Zellen/s d.h. 1,6 m/s
- Geschwindigkeit Treppe aufwärts: $v_{up,hor} = 0,8\ m/s$ (50 % der freien Gehgeschwindigkeit)
- Geschwindigkeit Treppe abwärts: $v_{down,hor} = 1,12\ m/s$ (70 % der freien Gehgeschwindigkeit)
- Die Parameter Geduld, Reaktionszeit und Trödelwahrscheinlichkeit werden ausgeschaltet bzw. auf Null gesetzt.
- Der Einfluss durch Schwankung und Trägheit wird, wie in den Experimenten, so gering wie möglich gehalten, d.h. auf den Wert 1 gesetzt.

Zwischenergebnisse

Die angepassten Modelle der Experimente MU11v1 und MU11v2 wurden 100 Mal simuliert, um statistisch auswertbare Ergebnisse zu erhalten. Hierbei wurden Pseudozufallszahlen von 4711 bis 4810 für den in PedGo integrierten Zufallsgenerator verwendet. Der Zufallsgenerator verteilt die Personen am Anfang der Räumung und weist ihnen die Parameter (siehe oben) zu.
Im Folgenden wird exemplarisch die N(t)-Graphen an der Messlinie „back“ des Programms PedGo und des Basisexperimentes MU11v1 in der Abbildung 6.2 dargestellt, beschrieben und analysiert. Hierbei stellt die Datenkurve „PedGo“ eine Mittelwertkurve aus der langsamsten und schnellsten Räumungszeit der Simulationen dar. In Kapitel 6.3 wird dann auf das Vergleichsexperiment MU11v2 eingegangen.
Der Graph „PedGo“ steigt konstant bis zu einer Räumungszeit von 94 Sekunden an und schneidet den Graphen des Experimentes MU11v1 bei ca. 15 Sekunden. Anhand der Abbildung 6.2 lässt sich durch die unterschiedliche Steigung der beiden Graphen erkennen,

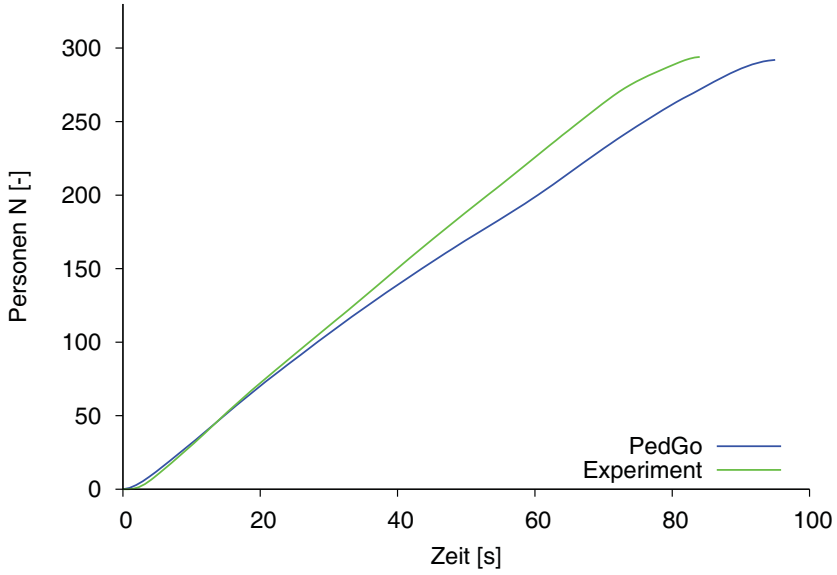

Abbildung 6.2: Vergleich der N(t)-Graphen an der Messlinie „back“ von PedGo und Experiment MU11v1

dass der mittlere Personenfluss des Experimentes ($J_{Exp} = 3,9\ \frac{1}{s}$) (siehe Kapitel 4.3) über die Zeit höher als bei der Simulation mit PedGo ($J_{PedGo} = 3,2\ \frac{1}{s}$) ist. Bei der Simulation gelangen die Personen zeitlich eher zur Messlinie „back“ (ca. 2 Sekunden), benötigen jedoch mehr Zeit bis alle Personen die Messlinie überschritten haben (94 Sekunden). Der Fluss von PedGo hätte (ohne Änderung der Geometrie) nur durch eine Erhöhung der Gehgeschwindigkeit dem Fluss des Experimentes angepasst werden können. Die gewählte Geschwindigkeit von maximal 4 Zellen/s, d.h. 1,6 m/s, zu überschreiten würde jedoch zu unrealistischen Einstellungen führen. Die Abweichung der gesamten Räumungszeit des Graphen „PedGo“ von dem des Experimentes MU11v1 beträgt 11 Sekunden (ca. 12 %).

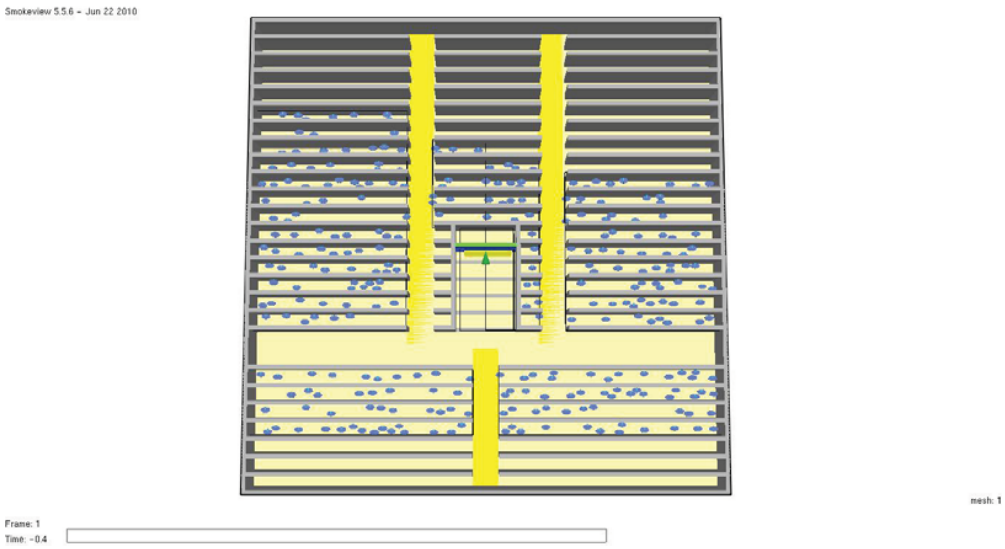

Abbildung 6.3: Geometrie des Simulationsmodells FDS+Evac

6.2.2 Fire Dynamics Simulator with Evacuation

Geometrie der Tribüne und Implementierung der Personen im Simulationsmodell

Abbildung 6.3 zeigt die Geometrie des Simulationsmodells FDS+Evac. Die gelben Flächen kennzeichnen die Treppen und die blauen Punkte die angeordneten Personen. Die Tür des Mundlochs wird durch die gelbe Fläche und den dazu gehörenden grünen Richtungspfeil dargestellt.

Einstellung der Parameter

Im Gegensatz zum Simulationsprogramm PedGo werden in FDS+Evac keine Einstellungen vorgegeben. Lediglich in Beispielen der Entwickler kann der Anwender gängige Parameter zum Vergleich heranziehen.

Bei allen vier Simulationszenarien wurden folgende Einstellungen angewandt:

- durchschnittliche freie Gehgeschwindigkeit: 1,6 m/s
- Maße der Personen: $R_d = 0.210 \pm 0.015\ m$; $R_t/R_d = 0.5714$; $R_s/R_d = 0.3333$ (siehe Abbildung 5.8)
- Geschwindigkeit Treppe aufwärts: $v_{up,slope} = 0,8\ m/s$ (50 % der freien Gehgeschwindigkeit)
- Geschwindigkeit Treppe abwärts: $v_{down,slope} = 1,12\ m/s$ (70 % der freien Gehgeschwindigkeit)
- Reaktionszeitverteilung: 0
- Detektionszeitverteilung: 0

Zwischenergebnisse

Die angepassten Modelle der Experimente MU11v1 und MU11v2 wurden 100 Mal simuliert, um statistisch auswertbare Ergebnisse zu erhalten. Im Gegensatz zu PedGo kann der Zufallsgenerator in FDS+Evac nur durch Veränderung des Programmcodes beeinflusst bzw. ausgeschaltet werden.

In der Abbildung 6.4 sind die Daten der langsamsten, schnellsten und der mittleren Räumungszeit der Messlinie „back“ des Experimentes MU11v1, berechnet durch das Programm FDS+Evac, in einem N(t)-Diagramm dargestellt.

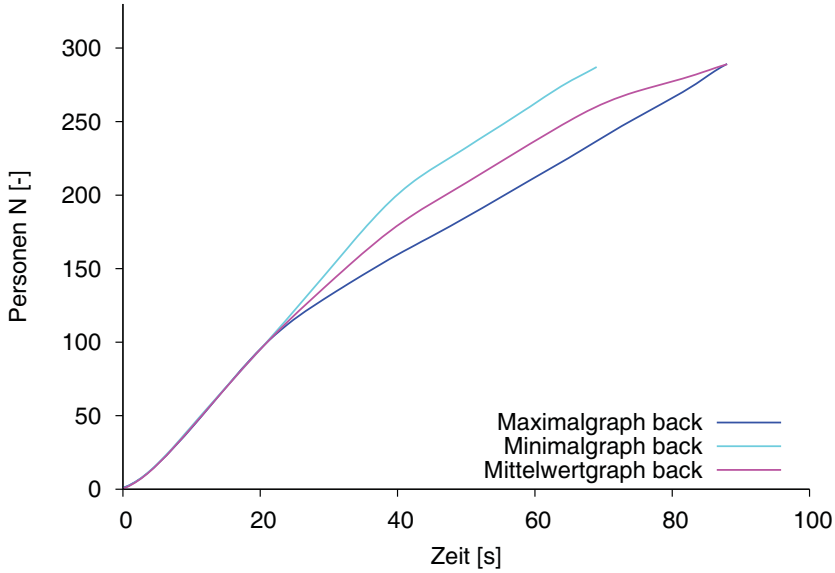

Abbildung 6.4: Vergleich des langsamsten, schnellsten und mittleren N(t)-Graphen von FDS+Evac gemessen an der Messlinie „back“ (MU11v1)

Die Graphen der Messlinie „back„ verlaufen identisch stetig ansteigend bis zu einem Zeitpunkt von ca. 22 Sekunden ($J = 5,4\ \frac{1}{s}$). Danach verringert sich die Steigung des Maximalgraphen ($J_{max,Stau} = 2,75\ \frac{1}{s}$) und verläuft konstant ansteigend bis zu einer Räumungszeit von ca. 89 Sekunden. Bei dem Minimalgraph verringert sich die Steigung erst bei ca. 40 Sekunden ($J_{min,Stau} = 2,9\ \frac{1}{s}$). Bis zu einer Räumungszeit von ca. 70 Sekunden verläuft der Graph parallel zum Maximalgraph. Der Mittelwertgraph steigt stetig bis ca. 40 Sekunden an. Die Steigung verringert sich bei ca. 40 ($J_{mittel,Stau} = 2,9\ \frac{1}{s}$) und nochmals bei ca. 70 Sekunden. Die Räumungszeit des Mittelwertgraphen beträgt ca. 89 Sekunden. Die Abweichung der minimalen und maximalen Räumungszeit an der Messlinie „back“ beträgt ca. 19 Sekunden. Die Abnahme der Steigung der Graphen und die Verringerung des Personenflusses deuten auf einen Stau hin. Dieser Staupunkt tritt

bei dem Maximalgraph früher auf als bei dem Minimalgraph. Der schwankende Verlauf des Mittelwertgraphen liefert keinen Indiz für einen Stau während der Räumungssimulation, da sich die Änderungen der Steigung über einen für die Simulation großen Zeitraum ereignen.

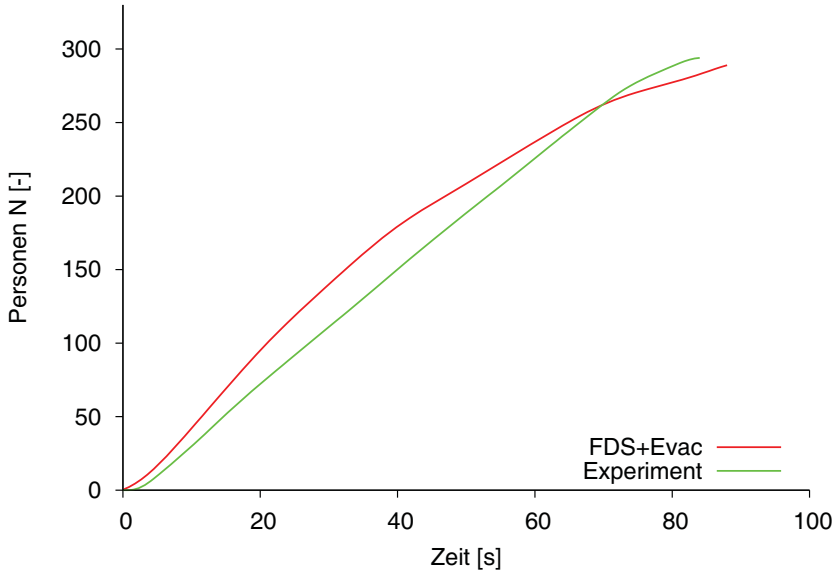

Abbildung 6.5: Vergleich der N(t)-Graphen an der Messlinien „back“ von FDS+Evac und Experiment MU11v1

In der Abbildung 6.5 ist der N(t)-Graph des Experimentes MU11v1 und der gemittelte N(t)-Graph des Programms FDS+Evac an der Messlinie „back“ dargestellt. Die Verläufe der Graphen wurden in den Kapiteln 4.3 und 6.2.2 bereits beschrieben. Die Graphen schneiden sich bei ca. 70 Sekunden. Im Vergleich der beiden Graphen fällt der linear ansteigende Verlauf des Graphen des Experimentes MU11v1 und der schwankende Verlauf des Graphen „FDS+Evac“ auf. Die Abweichung der Räumungszeit beträgt ca.

6 Sekunden. Einen Stau bildet keiner der beiden Graphen nach.
In Kapitel 6.3 wird auf das Vergleichsexperiment MU11v2 näher eingegangen.

6.3 Prüfung der Anwendbarkeit von PM, PedGo und FDS+Evac anhand experimenteller Daten

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Berechnung nach PM, der Simulationen mit PedGo und FDS+Evac zusammenfassend dargestellt, beschrieben und mit den experimentellen Daten der Versuche auf der Tribüne der ESPRIT arena verglichen. Anschließend wird die Anwendbarkeit der Programme und des Handrechenverfahrens zur Reproduktion von Räumungsversuchen untersucht.
Um die Daten der Simulationen und Experimente mit den Berechnungen des Handrechenverfahrens nach PM vergleichen zu können, muss der Personenfluss in der Messlinie „back“ in den Berechnungen nach PM bestimmt werden. Die Berechnung nach PM erfolgt abschnittsweise und berücksichtigt zum Vergleich der Räumungszeiten jeweils die längste Zeit je Abschnitt der Laufwege. Resultierend daraus, wird nur die längste Verweildauer der Personenströme der oberen Tribüne links oder rechts und der unteren Tribüne zur Bestimmung der gesamten Räumungszeit verwendet. Erschwert wird die Flussbestimmung durch das zeitversetzte Heraustreten der Personen aus den Reihen und die daraus resultierende, zeitlich versetzte Vereinigung der Personenströme vor dem Mundloch. Zudem wird bei dem gewählten Verfahren je Abschnitt der Laufwege die Zeitspanne berechnet, in der der gesamte Personenstrom diesen Abschnitt passiert hat. Hierbei wird das Verlassen der Reihen und das Passieren der Treppe zeitlich zusammengefasst. So kann der Zeitpunkt der Räumung $t_{Reihen+Treppe}$ als frühester Zeitpunkt zur Bestimmung des Personenstromflusses in der Messlinie „back“ verwendet werden.

Die Messlinie „back“ liegt 0,8 m hinter dem Eingang des Mundlochs. Anhand des Platzbedarfs der Personenströme und der vorhandenen Fläche von den Treppen bis zur Messlinie, ergibt sich, wie viele Personen die Messlinie zum Zeitpunkt $t_{Reihen+Treppe}$ noch nicht überschritten haben: 30% (87 Personen). Daraus resultierend können zwei Messpunkte zur Flussmessung für das Verfahren nach PM bestimmt werden: 70% und 100%. Aufgrund der wenigen Datenpunkte ergibt sich folgender, sehr vereinfacht dargestellter Räumungsverlauf mit PM der Experimente MU11v1 und MU11v2:

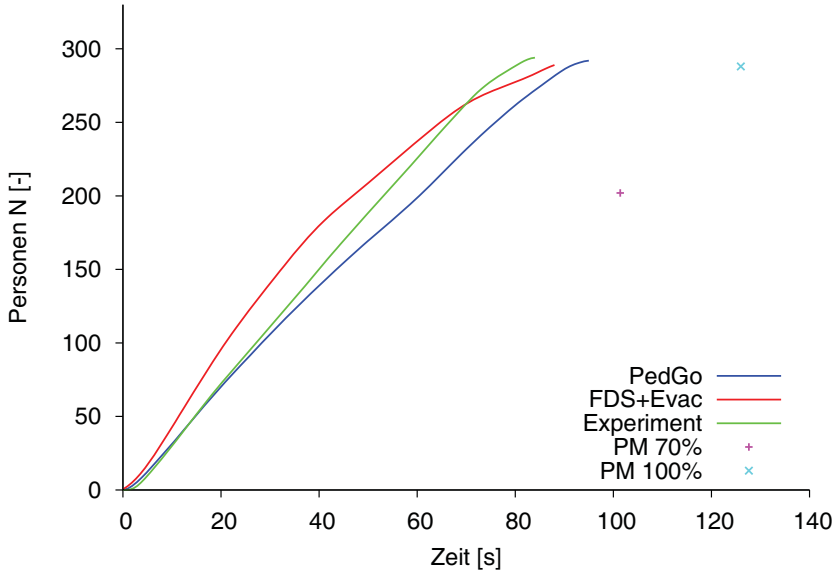

Abbildung 6.6: Vergleich der Räumungsverläufe des Experimentes MU11v1 mit denen der Simulationsprogramme PedGo, FDS+Evac und dem Handrechenverfahren PM

Abbildung 6.6 zeigt die Räumungsverläufe des Experimentes MU11v1 und die Nachbildungen dieser durch die Simulationsprogramme PedGo und FDS+Evac sowie die Berechnungen nach PM in einem N(t)-Diagramm. Der Verlauf der Graphen „PedGo“

und „FDS+Evac“ wurde in den Kapiteln 6.2.1 und 6.2.2 mit dem Graphen des Experimentes MU11v1 bereits verglichen. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Graphen des Experimentes MU11v1 und „PedGo“ bis zum Räumungsende konstant ansteigen während der Graph „FDS+Evac“ an zwei Punkten eine Verringerung der Steigung aufweist. Es können Personenflüsse von $J_{Exp} = 3,9\ \frac{1}{s}$, $J_{PedGo} = 3,2\ \frac{1}{s}$ und $J_{FDS+Evac} = 5,4\ \frac{1}{s}$ bis ca. 40 Sekunden bzw. $J_{FDS+Evac} = 2,9\ \frac{1}{s}$ ab ca. 40 Sekunden ermittelt werden. Die Räumungszeit des Experimentes MU11v1 von 83 Sekunden wird von beiden Programmen überschritten (vgl. Tabelle 6.8). Der Messpunkt 70 % von PM liegt bei 202 Personen und 104 Sekunden, der Messpunkt 100 % markiert das Ende der Räumung bei 288 Personen und 126 Sekunden. Dies ist eine Abweichung vom Experiment MU11v1 von 50 bzw. 46 Sekunden. Die oben beschriebenen Verläufe der Graphen zeigen, dass das Programm FDS+Evac den N(t)-Graphenverlauf des Experimentes MU11v1 teilweise unterschätzt, jedoch bei der Räumungszeit überschätzt. Das Programm PedGo und das Handrechenverfahren nach PM dagegen liefern bezogen auf den Räumungsverlauf der Tribüne einen lokal konservativen Ansatz, mit dem der Anwender auf der sicheren Seite ist.

In Abbildung 6.7 sind die Räumungsverläufe des Experimentes MU11v2 und die Nachbildungen durch die Simulationsprogramme PedGo und FDS+Evac sowie die Berechnung mit PM in einem N(t)-Diagramm dargestellt. Der Graph des Experimentes MU11v2 verläuft wie in Kapitel 4.3 beschrieben. In der Anfangsphase steigen die Graphen „PedGo“, „FDS+Evac“ und des Experimentes konstant und nahezu identisch an. Der Graph „PedGo“ steigt konstant an ($J_{PedGo} = 3,5\ \frac{1}{s}$), verringert leicht die Steigung bei ca. 25 Sekunden ($J_{PedGo,Stau} = 2\ \frac{1}{s}$) und schneidet bei ca. 25 und 40 Sekunden den Graphen des Experimentes. Eine Räumungszeit von 130 Sekunden wird erreicht. Der Graph „FDS+Evac“ besitzt bis ca. 15 Sekunden ($J_{FDS+Evac} = 3,8\ \frac{1}{s}$) die höchste Steigung der drei Graphen, danach verringert sich die Steigung ($J_{FDS+Evac,Stau} = 2,1\ \frac{1}{s}$). Er steigt konstant bis zum Ende der Räumung bei ca. 150 Sekunden an und schneidet den Gra-

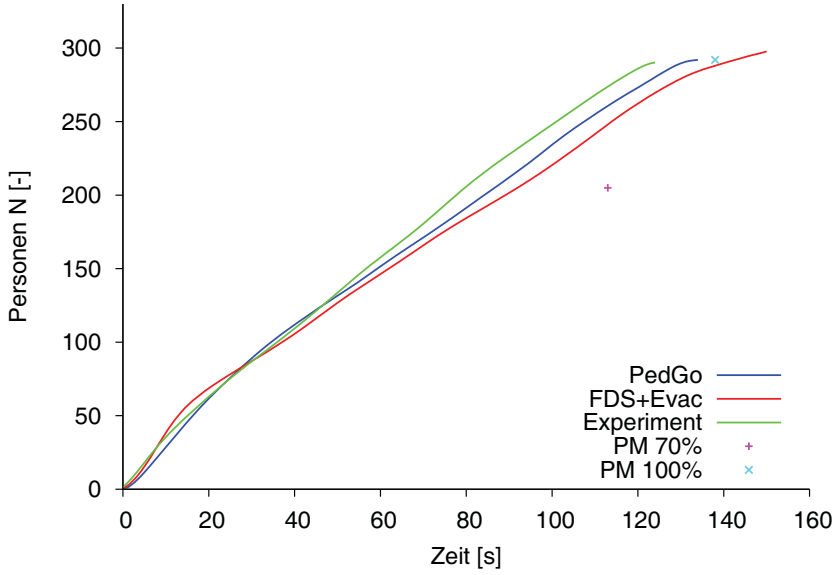

Abbildung 6.7: Vergleich der Räumungsverläufe des Experimentes MU11v2 mit denen der Simulationsprogramme PedGo, FDS+Evac und dem Handrechenverfahren PM

phen des Experimentes MU11v2 bei ca. 25 Sekunden. Wie schon beim Basisexperiment MU11v1 liefert PM den konservativsten Ansatz bezogen auf die Räumung der Tribüne. Der Messpunkt 70 % liegt bei 205 Personen und 113 Sekunden, der Messpunkt 100 % das Ende der Räumung bei 292 Personen und 138 Sekunden. Dies ist eine Abweichung vom Experiment MU11v2 von 27 bzw. nur von 8 Sekunden. Die Abbildung 6.7 zeigt, dass die Anwendung der eingestellten Parameter aus dem Basisexperiment MU11v1 für die Verringerung der lichten Durchgangsbreite gut gelungen ist. Die Steigungsänderung im Verlauf des Graphen des Experimentes MU11v2 bei ca. 20 Sekunden deutet auf einen Stau hin. Dieser Staupunkt wird deutlicher vom Programm FDS+Evac wiedergegeben und ist auch am Graphen „PedGo“ zu erkennen. PM bildet aufgrund der reduzierten

Datenmenge auf zwei Messpunkte den Stau bei ca. 20 Sekunden nicht nach. Zusammenfassend ergibt sich durch die oben beschriebenen Verläufe der Graphen, dass die Programme PedGo und FDS+Evac sowie das Handrechenverfahren nach PM den N(t)-Graphenverlauf des Experimentes MU11v2 überschätzen. Der Anwender wäre jedoch bezogen auf die Räumung der Tribüne auf der sicheren Seite. Beide Programme sind in der Lage den Stau nachzubilden. Hierbei ist das Handrechenverfahren mangels detaillierter Daten ausgenommen.

Bei der Bewertung der Anwendbarkeit werden die Simulationsergebnisse und die Ergebnisse der Berechnung hinsichtlich der Räumungszeit t_{evac}, der Fähigkeit einen Stau nachzubilden und des Stauzeitpunktes t_{Stau} untersucht. Die Ergebnisse mit der geringsten Abweichung von den experimentellen Daten werden in der Tabelle 6.8 grau hinterlegt.

Methode	PedGO	FDS+Evac	PM	Experiment
$t_{evac,MU11v1}$ $[s]$	94	89	126	83
$t_{evac,MU11v2}$ $[s]$	130	150	138	127
$t_{Stau,MU11v2}$ $[s]$	25	15	-	15
$J_{Stau,MU11v2}$ $[\frac{1}{s}]$	2,0	2,1	-	2,3

Tabelle 6.8: Vergleich der Ergebnisse der Simulationen und der Handrechnung mit denen der Experimente

Der Vergleich anhand der Tabelle 6.8 zeigt, dass beide Programme annähernd gleiche Abweichungen aufweisen. Beim Basisexperiment MU11v1 liefert FDS+Evac und beim Versuch MU11v2 PedGo eine geringere Differenz in der Räumungszeit. Anhand der Räumungszeit lässt sich von der Qualität der Reproduktion der Experimente demnach kein deutlicher Unterschied feststellen. Um die Fähigkeit einen Stau nachzubilden zu bewerten, wird das Experiment MU11v2 zur Beurteilung herangezogen. Der Stauzeitpunkt

wird vom Programm FDS+Evac genau getroffen und ist im Verlauf des Graphen deutlich zu erkennen, während das Programm PedGo den Stauzeitpunkt leicht übertrifft und visuell nur andeutet. Im Vergleich des Personenflusses nach dem Staupunkt J_{Stau} können nur geringfügige Unterschiede festgestellt werde. Da der Stau auch anhand der experimentellen Daten nur schwer durch eine Änderung des Flusses feststellbar ist, kann festgehalten werden, dass beide Programme den Stau gleich gut darstellen.

Nach den messbaren Größen werden nun die subjektiven Größen, wie der Bedienungskomfort, die Einstellungsmöglichkeiten der Parameter und die benötigten Vorkenntnisse zusammengefasst und bewertet.

Um die Handrechnung nach PM richtig anzuwenden benötigt der Anwender erweiterte Kenntnisse in der Evakuierungsthematik. Das Handbuch ist verständlich geschrieben und gibt einige Beispiele zu den einzelnen Szenarien. Jedoch sind viele verschiedene Variablen zur Berechnung der einzelnen Szenarien nötig, die den Anwender verwirren. Die Variablen werden meistens nur unzureichend im zugehörigen Text erklärt sowie nur unvollständig im Anhang definiert. Die Vielzahl an Methoden die selben Räumungsszenarien zu berechnen, ermöglichen dem geübten Anwender bestmögliche Ergebnisse zu erhalten. Für den ungeübten Anwender dagegen, kann die Methodensuche zeitaufwendige werden. Bei der Einstellung der Parameter einer Evakuierung lässt PM nur einen geringen Spielraum zu. Geschwindigkeiten von Personen sind ausschließlich über die Art der Evakuierung und die Wegart einzustellen. Daraus resultierend ergeben sich drei Geschwindigkeiten je Wegart. Die beanspruchte Fläche der Personen ist über die Variable f einstellbar, wie Alter, Bekleidung und Gepäck der Personen.

Auch für das frei verfügbare Simulationsprogramm FDS+Evac sind erweiterte Kenntnisse in der Evakuierungsthematik nötig. Das umfangreiche Handbuch und die Möglichkeit in einer „User Groupe“ den Entwicklern Fragen zu stellen, helfen bei der Anwendung. In

der Bedienung des Programmes ist die Eingabe der Modellgeometrie ein zeitraubender Faktor. Das Modell und die Programmsprache sind einfach zu beherrschen. Die vielen Voreinstellungen erleichtern die Bedienung. Jedoch kann die Abänderung der Voreinstellungen teilweise schwierig und aufwendig sein. In FDS+Evac sind alle Parameter (beispielsweise Platzbedarf der Personen und Geschwindigkeit), bis auf die initiale Dichte von 4 $Personen/m^2$, veränderbar. Die Berechnung der Modelle der Experimente nimmt abhängig von der Rechenleistung des Computers einige Zeit ein. Den Evakuierungsverlauf kann sich der Anwender über „smokeview“ ansehen.

Das Simulationsprogramm PedGo besitzt den höheren Bedienungskomfort. Es verfügt über eine Anwenderoberfläche, in der die Geometrie eingegeben und eingestellt wird. Die Bedienung erfolgt über zwei Tools und einem Tool zur Visualisierung des Räumungsverlaufes. In PedGo kann der Anwender Personeneigenschaften verändern und ist bis auf den Platzbedarf der Personen von einer Zelle, resultierend daraus die initiale Dichte, nicht eingeschränkt. Die Berechnungszeit ist wesentlich kürzer als beim Programm FDS+Evac. Das Handbuch zu PedGo beinhaltet Basisinformationen für den Anwender. Hier helfen die von der Firma TraffGo angebotenen Seminare weiter.

Im Vergleich der drei Methoden scheinen FDS+Evac und PedGo leistungsfähiger zu sein als das Handrechenverfahren. FDS+Evac ist zwar etwas schwieriger in der Anwendung als PedGo, hat hier jedoch den Vorteil der Hilfestellungen durch ein umfangreicheres Handbuch und Benutzern aus aller Welt. PedGo dagegen ist in der Bedienung einfacher und übersichtlicher. Da es jedoch ein kostenpflichtiges Programm und nicht so weit verbreitet ist, besitzt PedGo eine geringere Nutzergemeinschaft. Hier muss der Anwender für sich entscheiden, welchem Simulationsprogramm er den Vorzug gibt.

7 Prüfung der Parametereinstellungen anhand einer einfachen Geometrie

Im folgendem Kapitel soll anhand einer einfachen Raumgeometrie überprüft werden, ob die Räumungsverläufe der Simulationsprogramme PedGo und FDS+Evac identisch sind, wenn die gleichen Modellparameter aus den Kapiteln 6.2.1 und 6.2.2 verwendet werden. Hierzu wird ein Raum in dem 50 Personen platziert werden, mit den Abmaßen $10 \cdot 10\ m^2$ und einem sich anschließenden Flur von 2 m Breite, geräumt.

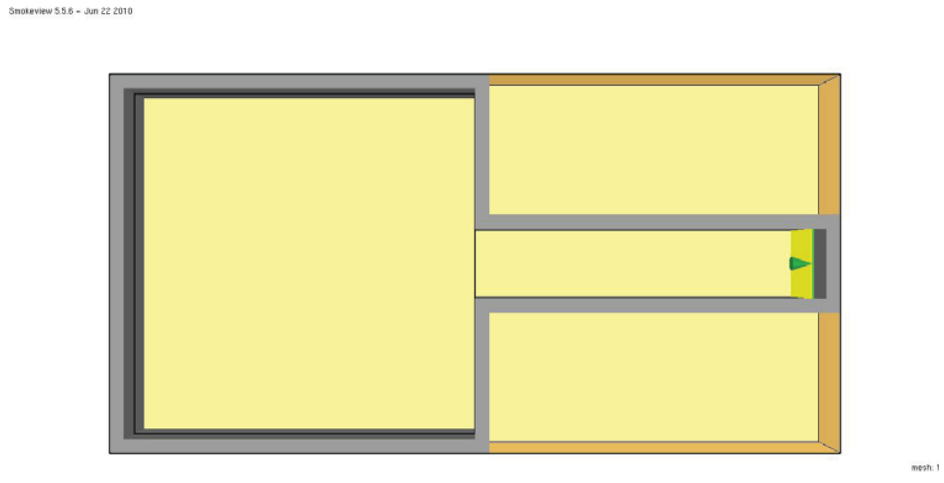

Abbildung 7.1: Raumgeometrie

Die folgende Abbildung 7.2 zeigt den Personenfluss der Programme PedGo und FDS+Evac im Verlauf der Räumung mit den Modellparametern aus den Kapiteln 6.2.1 und 6.2.2 im Vergleich zu den Ergebnissen des gleichen Versuchs von Christian Rogsch [20].

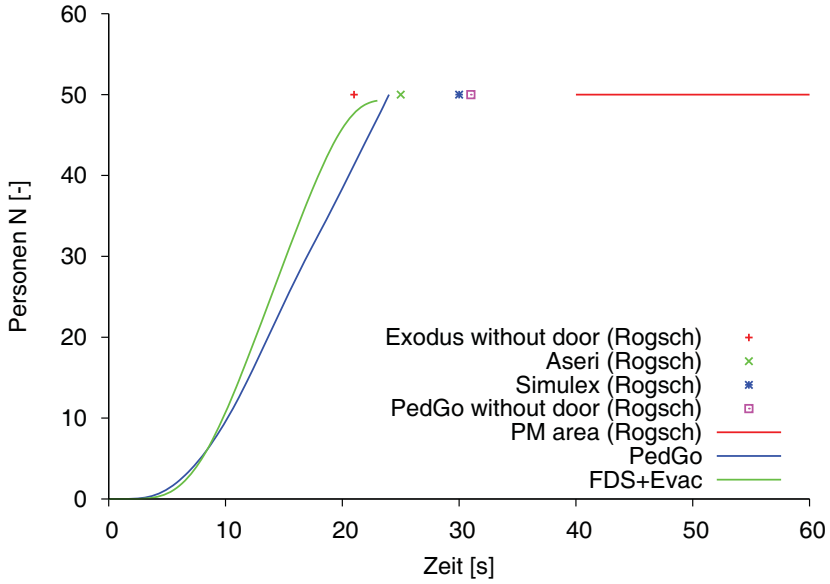

Abbildung 7.2: N(t)-Graphen der Programme PedGo und FDS+Evac mit den Modellparametern aus den Kapiteln 6.2.1, 6.2.2 im Vergleich zu den Ergebnissen von C. Rogsch

Der Verlauf der Räumung ist in einer N(t)-Graphik dargestellt. Zu Anfang verlaufen die Graphen „PedGo“ und „FDS+Evac“ nahezu identisch. Der Graph „PedGo“ steigt zeitlich eher an als der Graph „FDS+Evac“, sodass sich die Graphen bei ca. 8 Sekunden schneiden. Anschließend verläuft der Graph „PedGo“ mit einer geringeren Steigung als der Graph „FDS+Evac“. Der geringere Personenfluss der beiden Graphen zu Anfang der Räumung (bis ca. 8 Sekunden) deutet auf einen Stau hin. Dieser Stau entsteht vor dem 2 m breiten Gang. Im Gegensatz zum Graphen „PedGo“, der konstant bis zum Ende

der Räumung mit einem Personenfluss von $J_{PedGo} = 3\ \frac{1}{s}$ ansteigt, verringert sich die Steigung des Graphen „FDS+Evac“ nach konstantem Anstieg mit einem Personenfluss von $J_{FDS+Evac} = 4\ \frac{1}{s}$ bei ca. 20 Sekunden. Beide Graphen erreichen eine Räumungszeit von ca. 24 Sekunden. Bezogen auf die Räumungszeit und die Nachbildung des Staus liefern beide Programme identisch gute Ergebnisse. Nur im Personenfluss gibt es Abweichungen, die sich zum Ende des Räumungsverlaufs ausgleichen.

Der Versuch von C. Rogsch basiert zwar auf der gleichen Modellgeometrie (siehe Abbildung 7.1), jedoch werden andere Modellparameter als die in Kapiteln 6.2.1 und 6.2.2 beschriebenen verwendet. Laut C. Rogsch sind die Grundeinstellungen der jeweiligen Programme, wie Aseri, Simulex, Exodus und PedGo, nicht verändert worden. Lediglich die Personenkonfiguration wird festgelegt: freie Laufgeschwindigkeit von $1,35\ m/s\ \pm\ 0,2\ m/s$, Reaktionszeit gleich Null. Für die Berechnungen nach Predtetschenski und Milinski wählt C. Rogsch als Obergrenze Personen in Sommerkleidung ($f = 0,1\ m^2$), die sich unter Gefahrenbedingungen bewegen und als Untergrenze Personen in Winterkleidung ($f = 0,125\ m^2$), die sich unter Normalbedingungen bewegen. Der Vergleich der beiden PedGo-Graphen in Abbildung 7.2 zeigt, dass die Einstellung der Parameter einen hohen Einfluss auf die Räumungszeit besitzt und es durchaus sinnvoll ist eine Parameterstudie durchzuführen.

Das Räumungsbeispiel unterstützt den Eindruck, dass beide Simulationsprogramme befriedigende Ergebnisse bei der Reproduktion der experimentellen Daten der Tribüne liefern. Inwieweit die ermittelten Ergebnisse auf komplexe Gebäudestrukturen übertragen werden können, kann man nicht mit Sicherheit sagen.

8 Zusammenfassung und Fazit

Ziel der vorliegenden Thesis soll die Behandlung der folgenden Fragestellungen sein:

1. Inwieweit sind Computersimulationsprogramme in der Lage, reale Räumungsexperimente zu reproduzieren?
2. Wie gut lassen sich Simulationen durch Parameteranpassung optimieren?
3. In welchem Umfang geben die eingestellten Modelle bei der Veränderung der Geometrie die zugehörigen experimentellen Daten wieder?

Betrachtet man die gewonnenen Ergebnisse, scheinen die Programme für Räumungssimulationen zufriedenstellende Ergebnisse im Hinblick auf die Reproduktion von Versuchen für komplexe Raumgeometrien (Vereinigung von drei Personenströmen, Engstellen, Übergang von horizontralen Wegen auf Treppen, Einfädelung von Personen aus Reihen in den Strom) zu liefern. Die Höhe des Personenflusses während der Räumung besitzt teilweise keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Programmen. Abhängig vom Programm ergeben sich unter identischen Voraussetzungen geringe Abweichungen in den Räumungszeiten (siehe Tabelle 6.8). Durch die Einstellung der Modellparameter können der Stauzeitpunkt $t_{Stau} = 15\ s$ exakt sowie der Personenfluss nach dem Stau $J_{Stau} = 2,3\ \frac{1}{s}$ annähernd nachgebildet werden.

Nach dem Handbuch von PM eignen sich drei Verfahren zur Berechnung der Räumung einer Tribüne. Alle drei wurden auf die Geometrie angewendet und mit den experimentel-

len Daten verglichen. Zwei der Möglichkeiten wurden aufgrund geringerer Räumungszeiten als die der Experimente verworfen. Die in dieser Arbeit verwendete Näherungsformel liefert das beste Ergebnis. Bei den Berechnungen nach PM entsteht auch eine deutliche Differenz von ca. 50% hinsichtlich der Räumungszeit beim Experiment MU11v1 (siehe Tabelle 6.8). Die geringen Möglichkeiten bei PM die Parameter einzustellen sowie durch die Näherungsformel einen kontinuierlichen Räumungsverlauf der Personen über die Zeit darzustellen, führen dazu, dass kein Personenfluss während der Räumung bestimmt werden kann und keine Aussage über die Staudarstellung möglich ist. Bedingt dadurch kann nicht von einer gelungenen Abbildung der experimentellen Ergebnisse gesprochen werden.

Folgende Ergebnisse können festgehalten werden:

- Die Programme liefern eine gute Reproduktion der experimentellen Ergebnisse bei genauer Einstellung der Randbedingungen.
- Die Differenzen der Programme untereinander sind gering.
- Die Ergebnisse der Berechnungen nach PM zeigen den konservativsten Ansatz bezogen auf die Räumung der Tribüne. Der Anwender ist hierbei für diesen Teilbereich der Arena auf der sicheren Seite, jedoch könnte eine größere Überschätzung der Räumungszeit zu höheren Kosten führen. Zudem ist dieses Ergebnis nicht auf z.B. die gesamte Räumung der Arena übertragbar, da der lokal konservative Ansatz auch negative Auswirkungen, wie z.B. Entstehung von Staus in anderen Teilbereichen der Arena, zur Folge haben kann.
- Bei dem Vergleich der Räumungszeiten zwischen dem makroskopischen Ansatz (PM) und den mikroskopischen Modellen weichen die Ergebnisse von PM deutlich von denen der Programme ab. Dieses Ergebnis war aufgrund der verschiedenen Ansätze zu erwarten.

- Eine Parameterstudie ist sinnvoll und machbar.
- Zeitaufwand, benötigte Vorkenntnisse, Bedienkomfort, Justierung der Randbedingungen und Qualität der Ergebnisse je Simulationsprogramm unterscheiden sich nicht nennenswert voneinander, sodass keine Empfehlung gegeben werden kann. Die Wahl liegt beim Anwender.

An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass die hier vorgestellten Ergebnisse ausschließlich für die Tribüne der ESPRIT arena gelten. In welchem Umfang eine Übertragung auf andere Geometrien möglich ist, bleibt offen.

Tabellenverzeichnis

5.1 Parameter der Bewegung von Personenströmen in Reihen von Zuschauersälen 30
5.2 Berechnungskoeffizienten $\overline{\Delta l}$, $\overline{\Delta v_m}$, $\overline{\Delta t'}$ und $\overline{v'}$ 33
5.3 Koeffizient m der Wegart 33

6.1 Parameter zur Berechnung 43
6.2 Bestimmung der entsprechenden Näherungsformel 44
6.3 Parameter zur Berechnung der Näherungsformel sowie das Ergebnis $t_{Reihe+Treppe}$ 44
6.4 Zwischenergebnisse von $\overline{v_r}$, D und q 45
6.5 Übersicht der Zeiten der einzelnen Wegabschnitte von Szenario MU11v1 . 46
6.6 Übersicht der Intensitäten der Bewegung der einzelnen Wegabschnitte von Szenario MU11v2 47
6.7 Übersicht der Zeiten der einzelnen Wegabschnitte von Szenario MU11v2 . 47
6.8 Vergleich der Ergebnisse der Simulationen und der Handrechnung mit denen der Experimente 60

Abbildungsverzeichnis

2.1 Timegap 5
2.2 Empirische Beziehung des Flusses in Abhängigkeit zur Dichte nach Predtetschenski und Milinski 8
2.3 Fundamentaldiagramme für horizontale Wege sowie Wegeinengungen und Durchgänge nach Predtetschenski und Milinski 9
2.4 Graphische Darstellung der Beziehung zwischen Fluss, Dichte und Kapazität 10
2.5 Ein- und ausgehender Fluss in einer Engstelle 12
2.6 Vereinigung zweier Personenströme 12

4.1 Foto der ESPRIT arena in Düsseldorf 20
4.2 Ausgangsszenario MU11v1 22
4.3 Ausgangsszenario MU11v2 23
4.4 Messlinien zur Personenzählung 24
4.5 N(t)-Graphen der Experimente MU11v1 und MU11v2 24

5.1 Schema eines Personenstromes 27
5.2 Abschnitte der Laufwege 29
5.3 Grafische Darstellung des Evakuierungsprozesses beschrieben durch die Näherungsformel 31
5.4 Bemessung der Geometrie des Mundlochs 35
5.5 Raumgeometrie der Gitterstudie 39
5.6 Evakuierungsverlauf in Abhängigkeit der Gitterauflösung ohne Stau . . . 40

5.7 Evakuierungsverlauf in Abhängigkeit der Gitterauflösung mit Stau 41
5.8 Maße der Agenten 42

6.1 Ebenen 1 und 2 der Geometrie des Simulationsmodells PedGo 49
6.2 Vergleich der N(t)-Graphen an der Messlinie „back“ von PedGo und Experiment MU11v1 51
6.3 Geometrie des Simulationsmodells FDS+Evac 52
6.4 Vergleich des langsamsten, schnellsten und mittleren N(t)-Graphen von FDS+Evac gemessen an der Messlinie „back“(MU11v1) 54
6.5 Vergleich der N(t)-Graphen an der Messlinien „back“ von FDS+Evac und Experiment MU11v1 55
6.6 Vergleich der Räumungsverläufe des Experimentes MU11v1 mit denen der Simulationsprogramme PedGo, FDS+Evac und dem Handrechenverfahren PM 57
6.7 Vergleich der Räumungsverläufe des Experimentes MU11v2 mit denen der Simulationsprogramme PedGo, FDS+Evac und dem Handrechenverfahren PM 59

7.1 Raumgeometrie 63
7.2 N(t)-Graphen der Programme PedGo und FDS+Evac mit den Modellparametern aus den Kapiteln 6.2.1, 6.2.2 im Vergleich zu den Ergebnissen von C. Rogsch 64

Literaturverzeichnis

[1] Burghardt, S.: *Analyse und vergleichende Untersuchung zum Fundamentaldiagramm auf Treppen*. Bergische Universität Wuppertal, 2009 (Master Thesis).

[2] DiNenno, P. J., D. Drysdale, C. L. Beyler, W. D. Walton, R. L. P. Custer, J. R. Hall und J. M. Watts: *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. National Fire Protection Association, 3. Aufl., 2002.

[3] Erbsland, T. und A. Nitsch: *Diplomarbeit mit LATEX*. `http://drzoom.ch/project/dml/diplomarbeit_mit_latex_v1.12.pdf`, 2008.

[4] ESPRIT arena. `http://espritarena.de`, 06.01.2011.

[5] Helbing, D., I. Farkas, P. Molnár und T. Vicsek: *Simulating of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations*. In: Pedestrian and Evacuation Dynamics, Schreckenberg, M. and Sharma, S.D. (eds.), Springer, 2002.

[6] Helbing, D., I. Farkas und T. Vicsek: *Simulating dynamical features of escape panic*. Nature 407, 2000.

[7] Helbing, D. und P. Molnár: *Social force model for pedestrian dynamics*. Physical Review E 51, 1995.

[8] Konferenz der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister der Länder (ARGEBAU): *Musterbauordnung (MBO)*. `http://is-argebau.de`, 2002.

[9] Konferenz der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister der Länder (ARGEBAU): *MVStättV: Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten*. `http://is-argebau.de`, 2005.

[10] Konferenz der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister der Länder (ARGEBAU): *Begründung und Erläuterung zur Verordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (VStättVO)*. `http://is-argebau.de`, 2006.

[11] Korhonen, T. und S. Hostikka: *Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac Technical Reference and Users Guide*. `http://www.vtt.fi/proj/fdsevac`, 2010.

[12] Langston, P., R. Masling und B. Asmar: *Crowd dynamics discrete element multi-circle model*. Safety Science 44, 2006.

[13] McGrattan, K., R. McDermott, S. Hostikka und J. Floyd: *Fire Dynamics Simulator (Version 5) Users Guide*. `http://fire.nist.gov/fds/index.html`, 2010.

[14] Nelson, H. und F. Mowrer: *Emergency Movement, In: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. National Fire Protection Association, 3. Aufl., 2002.

[15] Norm DIN EN 13200-1: *Zuschaueranlagen - Teil 1: Kriterien für die räumliche Anordnung von Zuschauerplätzen - Anforderungen; Deutsche Fassung*, 2003.

[16] Norm DIN EN 13200-3: *Zuschaueranlagen Teil 3: Abschrankungen Anforderungen; Deutsche Fassung*, 2005.

[17] Norm DIN EN 13200-4: *Zuschaueranlagen Teil 4: Sitze Produktmerkmale; Deutsche Fassung*, 2006.

[18] Norm DIN EN 13200-5: *Zuschaueranlagen Teil 5: Ausfahrbare (ausziehbare) Tribünen; Deutsche Fassung*, 2006.

[19] Predtetschenski, W. M. und A. I. Milinski: *Personenströme in Gebäuden - Berechnungsmethoden für die Projektierung*. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln-Braunsfeld, 1971.

[20] Rogsch, C.: *Vergleichende Untersuchungen zur dynamischen Simulation von Personenströmen*, 2005 (Diplomarbeit).

[21] Rupprecht, T.: *Untersuchung zur Erfassung der Basisdaten von Personenströmen*. Bergische Universität Wuppertal, 200 (Diplomarbeit).

[22] Schneider, V.: *Evakuierung und Räumung von Sportstätten und -arenen*. Brandschutz, 2006.

[23] Seyfried, A.: *Vorlesungsreihe Evakuierung, Skript zur Vorlesung*. Bergische Universität Wuppertal, 2008.

[24] Seyfried, A., B. Steffen, W. Klingsch und M. Boltes: *The fundamental diagram of pedestrian movement revisited*. Journal of Statistical Mechanics:Theory and Experiment, 2005.

[25] Seyfried, A., M. Strupp und T. Lippert: *Verfeinerte Auswertungsmethoden für Evakuierungssimulationen*. Berichte des Forschungszentrums Jülich, 2004.

[26] TraffGo HT GmbH: *Benutzerhandbuch: PedGo/AENEAS*. `http://www.traffgo-ht.com`, 2008.

[27] Weidmann, U.: *Transporttechnik der Fußgänger, Transporttechnische Eigenschaften des Fußgängerverkehrs (Literaturauswertung)*. In: Schriftenreihe des IVT Nr. 90, Institut für Verkehrsplanung, 2. Aufl., 1993.

[28] Werner, T. und D. Helbing: *The social force pedestrian model applied to real life scenarios*. In: Pedestrian and Evacuation Dynamics Proceedings of the Second International Conference, University of Greenwich, 2003.

[29] Winkens, A.: *Analyse der lokalen Dichte in Fußgängerströmen vor Engstellen*. Bergische Universität Wuppertal, 2007 (Diplomarbeit).