

Simulationenmethoden für Brandschutz und Evakuierung

Grundlagen - Anwendung - Erweiterung

Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt von

Christian Rogsch

aus

Neustadt an der Weinstraße

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20140514-112006-6

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3Ahbz%3A468-20140514-112006-6>]

Abstract

Deutsch

Im Zeitalter der Computertechnik werden computergestützte Verfahren zur Entwicklung neuer Gebäude oder bei der Berechnung von wissenschaftlichen Ergebnissen immer häufiger eingesetzt. Da Computer, die zur Berechnung eingesetzt werden, immer billiger und sogleich leistungsstärker werden, gewinnt dieses Geschäftsfeld immer mehr an Bedeutung. Frei erhältliche Software, sog. „Open Source Software“, leistet einen weiteren Beitrag hierzu. Anhand der beiden Kapitel zum Thema *Evakuierungssimulationen* und *Brandsimulationen* werden Grundlagen der einzelnen Programme bzw. Rechenverfahren vorgestellt, genauer untersucht und zudem ausführlich erläutert. Aufgrund der aus beiden Kapiteln gewonnenen Erkenntnisse lassen sich diverse Kombinationsmöglichkeiten der beiden Themengebiete erörtern. So können zum Beispiel Fußgänger in einem Gebäude die Rauchausbreitung beeinflussen, indem Türen geöffnet oder geschlossen werden. Andersherum betrachtet kann die Ausbreitung von Rauch die Fußgänger in ihrem Routenwahlverhalten beeinflussen. Unter all diesen Kombinationsmöglichkeiten stellt sich jedoch die Frage, in wie weit die Annahmen, die vom Anwender der jeweiligen Programme getroffen werden, das Ergebnis beeinflussen, sei es in positiver oder negativer Blickrichtung. Um diese Fragestellung zu beantworten, wird die These verfolgt, dass konservative Annahmen bei der Anwendung von Brand- und Evakuierungssimulationsprogrammen keine konservativeren Ergebnisse ergeben, als wenn sich der Anwender hierüber keine Gedanken macht.

English

In the age of computers, computational methods are used more often to develop new buildings or to calculate scientific results. Based on the fact that computers are getting more and more cheaper and also more and more powerful, this kind of business segment gets a bigger interest. Free available software-tools, so called „open-source software“, also benefits this way. Based on two chapters about *evacuation simulations* and *fire simulations* basics of software-tools or calculation methods are described,

investigated and detailed exemplified. Based on the results of both chapters different combination methods are possible, e.g. pedestrians may have influence on smoke-movement inside a building if they open or close a door. The other way round smoke can influence pedestrians in the way they choose their route to leave the building. Based on all this possibilities of different combinations the main question is how big is the influence of user-chosen inputs to software-tools on the calculated results; in a positive or negative point of view. To answer this question this work pursues the thesis that conservative user-based assumptions in software-tools do not cause automatically in conservative results.

Inhaltsverzeichnis

I. Einleitung	1
II. Evakuierungssimulationen	5
1. Menschliche Bewegung und menschliches Verhalten	7
1.1. Empirische Messungen	7
1.1.1. Kollektive Effekte	7
1.1.2. Messgrößen	9
1.2. Individuelle Parameter	12
1.2.1. Reaktionszeit	15
1.3. Panik, Gedränge und Massenflucht	16
1.3.1. Definitionen von Panik, Gedränge, Massenflucht und Stampede	17
1.3.2. Eigene Definition von Panik, Gedränge, Flucht und Stampede	21
1.3.3. Experimente zum Thema Panik und Entscheidungsfindung . .	22
1.4. Brände als Todesursache	26
1.5. Startwellen in Warteschlangen	27
1.6. Konservative Annahmen bei menschlichen Bewegungen und mensch-	
lichem Verhalten	29
2. Mikroskopische Modelle für Evakuierungsberechnungen	31
2.1. Kontinuierliche Modelle	32
2.1.1. Social Force Modell	33
2.2. Zellularautomaten	36
2.2.1. Gipps-Marksjö Modell	37
2.2.2. Blue-Adler Modell	38
2.2.3. Floor Field Modell	39
2.3. Updatealgorithmen	40
2.3.1. Ordered Sequential Updatealgorithmen	43

2.3.2.	Random Shuffled Update	45
2.3.3.	Paralleler Update	46
2.3.4.	Vergleichende Darstellung der einzelnen Updatealgorithmen	48
2.3.5.	Einfluss von Wahrscheinlichkeitsfunktionen auf die Zielzellenwahl	54
2.4.	Einfluss verschiedener Kenngrößen auf die Evakuierungszeit	60
2.4.1.	Beschreibung der einzelnen Gebäudetypen	60
2.4.2.	Einfluss der Personenplatzierung	63
2.4.3.	Einfluss der Reaktionszeit	65
2.4.4.	Einfluss der freien Gehgeschwindigkeit	68
2.5.	Vergleich kommerzieller Programme mit Räumungsübungen	70
2.6.	Testverfahren für Evakuierungssimulationsprogramme	78
2.6.1.	Beschleunigen, Abbremsen und Überholen	79
2.6.2.	Zugrunde liegendes Potentialfeld	81
2.6.3.	Bewegung um die Ecke	82
2.6.4.	Implementation von Randbedingungen	85
2.6.5.	Wahl des Ausgangs	86
2.6.6.	Routenwahl	87
2.6.7.	Geschwindigkeits-Dichte-Beziehung (Fundamentaldiagramm)	90
2.6.8.	Updatealgorithmen	90
2.7.	Konservative Annahmen bei mikroskopischen Modellen	91
3.	Makroskopische Modelle für Evakuierungsberechnungen	94
3.1.	Ursprung	94
3.2.	Berechnung eines Hochhauses	95
3.2.1.	Untersuchte Geometrie	95
3.2.2.	Ergebnisse	97
3.3.	Berechnung eines Schulgebäudes	97
3.3.1.	Untersuchte Geometrie	97
3.3.2.	Ergebnisse	99
3.4.	Annahmen in konservativer Sicht bei makroskopischen Modellen	99
4.	Vergleich mikroskopischer und makroskopischer Evakuierungsmodelle	101
4.1.	Vergleich an einem Hochhaus	101
4.2.	Vergleich an einem Schulgebäude	102

III. Brandsimulationen	105
5. Zonenmodelle	107
5.1. Unterschiede bei der Anwendung von Zonenmodellen	108
5.1.1. Untersuchte Geometrie	108
5.1.2. Modellierung der Brandquelle	109
5.1.3. Geometrieingabe	109
5.2. Ergebnisse verschiedener Zonenmodelle	113
5.3. Vergleich der Ergebnisse mit dem Modellversuch und mit einem Feldmodell	120
5.4. Konservative Annahmen bei Zonenmodellen	121
6. Einfluss der Zellgröße am Beispiel FDS	123
6.1. Konvergenzverhalten	123
6.2. Geneigte Ebene	126
6.3. Die konservative Zellgröße gibt es nicht	128
7. Ein Blick in die Zukunft - Parallelisierung von CFD-Simulationsprogrammen am Beispiel FDS	129
7.1. Grundlegende Parallelisierungskonzepte	130
7.1.1. Distributed Memory Architecture	130
7.1.2. Shared Memory Architecture	131
7.1.3. Hybrid Architecture	132
7.2. Programmierung der einzelnen Architekturen	132
7.2.1. Parallelisierung von FDS mittels MPI	132
7.2.2. Parallelisierung von FDS mittels OpenMP	133
7.2.3. Stärken und Schwächen von MPI und OpenMP	137
7.3. Geschwindigkeitszuwachs	139
7.3.1. Geschwindigkeitszuwächse bei MPI-Parallelisierung	139
7.3.2. Geschwindigkeitszuwächse bei OpenMP-Parallelisierung	140
7.4. Zukünftige Entwicklung	141
IV. Zusammenfassung und Ausblick	144
A. Literaturverzeichnis	150
B. Abbildungsverzeichnis	163
C. Tabellenverzeichnis	167

D. Danksagung	169
E. Teilpublikationen	171
F. Lebenslauf	174
G. Erklärung	175

Teil I.

Einleitung

Im Zeitalter der Computertechnik werden computergestützte Verfahren zur Entwicklung neuer Gebäude oder bei der Berechnung von wissenschaftlichen Ergebnissen immer häufiger eingesetzt. Basierend auf den ersten Konstruktionen von Konrad Zuse in den 1930er Jahren wurde die Entwicklung dieser neuen Spezies von Maschinen immer weiter perfektioniert, was bis zum heutigen Tage anhält. Wird jedoch ein genauere Blick in die Vergangenheit riskiert, so ist es eher „ein Wunder“, dass es heute Computer gibt. So soll Thomas Watson, Vorstandsvorsitzender von IBM, im Jahre 1943 folgenden Satz gesagt haben: „I think that there is a world market for maybe five computers [156]“ Dass diese Aussage heute nicht mehr stimmt ist allgemein anerkannt, doch auch in den 1970er Jahren wurde der Computer noch als ein Gerät für Spezialisten „abgewertet“, wie folgende Aussage von Kenneth Olsen, Vorstandsvorsitzender und Gründer von DEC, im Jahre 1977 belegt: „There is no reason anyone would want a computer in their home [155].“ Was heutzutage als „normal“ gilt, war vor mehr als 20 Jahren noch undenkbar. Doch nicht nur die rasante Weiterentwicklung dieser Technik, sondern auch der zunehmende Preisverfall einzelner Komponenten macht die Anwendung von Computern immer attraktiver, dies wird nicht zuletzt durch die Entwicklung von freier Software gefördert. Doch neben Licht gibt es auch Schatten. Wurde vor zehn bis fünfzehn Jahren noch darüber nachgedacht, ob es sich zum einen lohnt einen Computer anzuschaffen, um die entsprechenden Berechnungen durchzuführen und ob zum anderen auch der entsprechende Mitarbeiter in der Lage war, die entsprechend teure Software korrekt zu bedienen, hat sich das Bild heutzutage geändert. Durch die allzeit erhältlichen günstigen und doch leistungsstarken Computer aus Elektronikmärkten und der freien (und damit kostenlosen) Verfügbarkeit der entsprechenden Rechenprogramme stellen sich die Fragen von damals nicht mehr. Der Computer wird gekauft, das Programm wird heruntergeladen und binnen eines Tages ist eine neue Arbeitsumgebung zu relativ günstigen Kosten geschaffen worden. Da die neue „freie“ Software schließlich „von Allen“ genutzt wird, kann es sicherlich nicht so schwer sein, diese selbst zu bedienen. „Bunte Bilder“ werden im Handumdrehen geschaffen und innerhalb maximal einer Woche ist ein neues Geschäftsfeld etabliert worden.

Doch ist es wirklich so einfach?

Dieser und anderen Fragestellungen versucht diese Arbeit auf den Grund zu gehen. Im Speziellen beschäftigt sich diese Arbeit mit der Anwendung von Evakuierungssimulationsprogrammen und Brandsimulationsprogrammen bei der Auslegung von neu zu bauenden oder bei der Änderung von bestehenden Gebäuden. Die Arbeit gliedert sich deshalb in zwei Teile, die recht unterschiedlich erscheinen:

- Evakuierungssimulation und
- Brandsimulation.

Im Teil II dieser Arbeit, das dem Thema Evakuierungssimulation gewidmet ist, wird zunächst auf die Grundlagen des menschlichen Verhaltens eingegangen. Hierzu werden Reaktionszeit auf entsprechende Ereignisse wie z. B. das Ertönen eines Rauchwarnmeldersignals, Gruppenbildung, erste Handlungen im Brandfall und weitere Verhaltensarten diskutiert und dargelegt. Speziell das Thema Panik wird im Hinblick auf die tragischen Ereignisse der Loveparade 2010 in Duisburg diskutiert. Es werden zudem Experimente aufgeführt, die sich mit dem Thema „menschliche Bewegung“ auseinandersetzen. Im Anschluss daran werden die einzelnen Modelltypen (makroskopisch und mikroskopisch), die zur Berechnung von Personenströmen in Gebäuden oder auf großen Flächen herangezogen werden, erläutert. Neben der Darstellung einzelner Vergleichsberechnungen werden Testverfahren für mikroskopische Modelle vorgestellt, die es dem Nutzer solcher Modelle ermöglichen sollen, ein entsprechendes kommerziell oder frei erhältliches Produkt besser zu verstehen einschließlich der Grundlagen, auf denen diese Modelle basieren.

Teil III dieser Arbeit ist dem Themengebiet der Brandsimulation gewidmet. Neben diversen Vergleichen zwischen Zonen- und Feldmodellen und deren aktuellen Anwendungsgrenzen wird ebenfalls dem Konvergenzverhalten von Feldmodellen ein Abschnitt gewidmet. Da im Zuge der weiteren Entwicklung im Bereich der Computertechnik das Thema Parallelrechnung immer weiter in den Vordergrund rückt (Stichwort „Multicore-Prozessoren“), wird in einem eigenen Abschnitt dieses Themengebiet ausführlich diskutiert. Anhand des aktuell frei verfügbaren Brandsimulationsprogramms „Fire Dynamics Simulator“ (FDS) werden sowohl die Vorteile als auch Nachteile unterschiedlicher Parallelisierungsansätze und deren Einbindung in das entsprechende Programm dargelegt. Zudem wird ein Blick in die Zukunft gewagt, wie das Thema Parallelisierung von Brandsimulationsprogrammen weiter verfolgt werden kann.

Aufgrund der aus den Teilen II und III gewonnenen Erkenntnisse lassen sich diverse Kombinationsmöglichkeiten der beiden Themengebiete erörtern. So können zum Beispiel Fußgänger in einem Gebäude die Rauchausbreitung beeinflussen, indem Türen geöffnet oder geschlossen werden. Andersherum betrachtet kann die Ausbreitung von Rauch die Fußgänger in ihrem Routenwahlverhalten beeinflussen. Unter all diesen Kombinationsmöglichkeiten stellt sich jedoch die Frage, in wie weit die Annahmen, die vom Anwender der jeweiligen Programme getroffen werden, das Er-

gebnis beeinflussen. Um diese Fragestellung zu beantworten, wird die These verfolgt, dass konservative Annahmen bei der Anwendung von Brand- und Evakuierungssimulationsprogrammen keine konservativeren Ergebnisse ergeben, als wenn sich der Anwender hierüber keine Gedanken macht.

Teil II.

Evakuierungssimulationen

Evakuierungssimulationen gelten im Sinne der Musterbauordnung als Rechenverfahren, mit deren Hilfe ein entsprechender Nachweis der Personensicherheit innerhalb eines Gebäudes geführt werden kann. In der heutigen Zeit werden hierzu meist mikroskopische Modelle angewandt, die seit Mitte der 1990er Jahre auch kommerziell erhältlich sind. Die auf diversen Modellen basierenden Computerprogramme ermöglichen anhand einer graphischer Benutzeroberfläche die Eingabe einer Gebäudegeometrie, zusätzlich ermöglichen sie die Platzierung von Personen und Hindernissen, wie beispielsweise Sitzgruppen. In den Jahren zuvor wurden, wenn überhaupt, makroskopische Modelle verwendet. Mit diesen Verfahren wurden bzw. werden im Sinne einer Handrechnung ebenfalls Evakuierungszeiten für einzelne Gebäude berechnet. Durch ihren geringen Detaillierungsgrad wird das zu untersuchende Gebäude stark vereinfacht, verglichen mit der Anwendung eines Computerprogramms.

In den folgenden Kapiteln werden sowohl mikroskopische als auch makroskopische Modelle vorgestellt und angewandt. Beide Modelltypen werden hierzu untersucht und vorgestellt. Mit Hilfe von Anwendungsszenarien, d. h. der Berechnung kompletter Gebäudegeometrien, werden Vergleichsuntersuchungen der beiden Modellgruppen durchgeführt. Anhand der Beispiele werden Stärken und Schwächen der einzelnen Modellgruppen erläutert und gegenübergestellt.

1. Menschliche Bewegung und menschliches Verhalten

1.1. Empirische Messungen

Bei Fußgängern handelt es sich um 3-dimensionale Objekte, deren Bewegung sich auf eine äußerst schwierige Art und Weise beschreiben lässt. Im Zuge von Modellvereinfachungen wird die Bewegung von Fußgängern normalerweise nur als eine 2-dimensionale Bewegung, d. h. die vertikale Projektion der Bewegung auf die Ebene, dargestellt. Diese vereinfachte Betrachtung ermöglicht das Messen verschiedener Größen der Fußgängerbewegung auf eine recht einfache Art und Weise, diese beginnt beim einfachen Zählen bis hin zu kameragestützten Videoauswertungen. Einige der im Folgenden dargestellten Größen dienen ebenfalls zur einfachen Überprüfung von entwickelten Modellen zur Vorhersage von Fußgängerbewegungen in Gebäuden oder Personenströmen im Allgemeinen. Es sei hierbei noch angemerkt, dass es zum heutigen Zeitpunkt keine einheitlichen Messmethoden für einige der Größen gibt.

1.1.1. Kollektive Effekte

Kollektive Effekte spielen bei der Evakuierung von Gebäuden eine große Rolle, da Personen meistens in einer großen Gruppe ein Gebäude verlassen, einzelne Personen sind in diesem Zusammenhang eher selten anzutreffen. Diese Effekte werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Stauungen

Stauungen (und auch Blockaden) kommen zumeist in Gebäudeabschnitten vor, die nicht ausreichend für die ankommenden Personen dimensioniert sind, es handelt sich

hierbei um Engstellen oder Ausgänge. Während Engstellen teilweise durch Unachtsamkeit entstehen können (beispielsweise wird ein Schrank in den Flur gestellt, somit verringert sich die Flurbreite), sind Ausgänge vielmehr mit in die Planung einbezogen. Besonders bei Versammlungsstätten sind die Ausgänge nach der Anzahl von Personen innerhalb der Versammlungsstätte zu bemessen [26], so dass ein geringer und vor allem kalkulierbarer Rückstau dort auftritt. Ziel der Evakuierungsforschung ist es, solche Staupunkte zu erkennen bzw. vorherzusagen und entsprechende Lösungsmaßnahmen darzulegen.

Dichtewellen

Dichtewellen erscheinen, wie es der Name schon sagt, in Situationen mit einer hohen Personendichte. Als Beispiel hierfür können Fußballstadien oder U-Bahnstationen genannt werden, da es dort zu Phänomenen ähnlich dem Stop-and-Go-Verkehr beim Autofahren kommt. Auch im Zuge der Hadsch 2006 wurden von Helbing Stop-and-Go-Wellen auf der Jamarat Brücke beobachtet [45]. Die Personendichte lag hierbei bei ca. 7 Personen pro m^2 . Fruin [31] beschreibt ebenfalls ein solches Phänomen ab einer Personendichte von 7 Personen pro m^2 , da dort die Personenmenge hin zu einer „flüssigen Masse verschmilzt“.

Linienbildung

Bei Gegenstromsituationen, d. h. in Situationen, in denen sich zwei Gruppen von Personen in einander gegenläufige Richtungen bewegen, kommt es immer wieder zu Linienbildungen [100,108,158], d. h. die Personen bilden jeweils Linien, an denen sie sich „wie im Gänsemarsch“ hintereinander in der entsprechenden Richtung bewegen. Diese Linien sind nicht statisch, sie variieren oft und verändern damit ihre Form. Es wurden hierzu bereits diverse Parameter zum Linienbildungsverhalten von Personen angegeben [18,158].

Oszillationen

Vor allem bei Türen, durch die Personen von beiden Seiten hindurchtreten, kommt es immer wieder zu Oszillationen. Personen durchqueren die Tür von einer Seite zur anderen, bis es eine Person von der anderen Seite schafft, ebenfalls die Tür zu durchqueren, danach folgen dieser Person weitere Personen, so dass die zuerst

gehende Gruppe warten muss. Dieses Wechselspiel von Durchqueren und Warten wird bei größeren Gruppen so lange wiederholt, bis alle Personen die Tür in der gewünschten Richtung durchquert haben. Empirische Daten liegen hierzu nicht vor.

1.1.2. Messgrößen

Grundlegende Messgrößen in der Fußgängerdynamik sind die Dichte ρ in Personen pro m^2 , der spezifische Fluss J_s in Personen pro Meter und Sekunde und die Gehgeschwindigkeit v in Meter pro Sekunde. Werden in einem Diagramm Dichte und Gehgeschwindigkeit gegenübergestellt, so wird diese Darstellung als Fundamentaldiagramm bezeichnet. Im Folgenden werden die Messgrößen kurz erläutert.

Gehgeschwindigkeit

Die freie Gehgeschwindigkeit v ist die am einfachsten zu messende Größe, da hierbei „nur“ die entsprechende Zeit t gemessen werden muss, die ein Fußgänger benötigt, um eine definierte Strecke zurückzulegen. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Strecke zusammenhängend und auf direktem Weg, d. h. ohne Abweichungen des Fußgängers nach links oder rechts, zurückgelegt wird. Auch ist bei eventuellen Mittelungen über mehrere Personen darauf zu achten, dass das Alter einen gewissen Einfluss auf die freie Gehgeschwindigkeit hat [151]. Einen weiteren Einfluss hat die Umgebung, in der gemessen wird. Besonders bei Treppen ist dies auffällig, da es hierbei diverse Einflussfaktoren zu berücksichtigen gilt, wie beispielsweise Steigung, Weglänge, Stufentiefe, Alter, Umgebungsbedingung (Gefahr, Komfortabel, Normal) und Behinderungen [12, 29, 31–33, 37, 68, 114].

Dichte

Die Dichte ρ gibt an, wie viele Personen sich auf einer bestimmten Fläche befinden. Hierzu lassen sich unterschiedliche Definitionen in der Literatur finden.

Im Sinne einer 1-dimensionalen Dichtemessung wurde von Thompson und Marchant [142] die sogenannte „inter-person distance“ eingeführt, es handelt sich hierbei um den Abstand der Körpermittelpunkte zweier aufeinander folgender Personen. Es besteht in diesem Fall jedoch ebenso die Möglichkeit eine Dichte anzugeben

(Liniendichte, da nur 1-dimensional). Diese Dichte wird in Personen pro Meter angegeben.

Bei 2-dimensionalen Dichtemessungen gibt es zum einen den recht einfachen Ansatz der Personenzählung in einer bestimmten Fläche, d. h.

$$\rho = \frac{N}{A}, \quad (1.1)$$

wobei N die Anzahl der Personen in der ausgewählten Fläche A angibt. Ein weiterer Ansatz [45] geht davon aus, dass zur Dichteberechnung um einen spezifischen Punkt r zur Zeit t eine Kreisfläche mit frei wählbarem Radius R herangezogen werden kann. Das Besondere an diesem Ansatz ist, dass eine abstandsbezogene Gauss'sche Wichtungsfunktion $f(\dots)$ mit in diese Berechnung einfließt, es ergibt sich dadurch folgende Gleichung:

$$\rho(\vec{r}, t) = \sum_j f(\vec{r}_j(t) - \vec{r}). \quad (1.2)$$

Die Personen j und deren aktuelle Position $\vec{r}_j(t)$ müssen sich bei diesem Ansatz innerhalb des gewählten Radius' R befinden.

Im Vergleich zu den oben genannten Definitionen, bei denen die Projektion der Körperfläche einer Person keine Rolle spielt, wird dieser Ansatz bei Predtetschenski und Milinski [114] angewandt. Bei der Berechnung der dimensionslosen Dichte $\tilde{\rho}$ wird folgende Gleichung verwendet:

$$\tilde{\rho} = \frac{\sum_j f_j}{A}. \quad (1.3)$$

Es wird hierbei angenommen, dass jede Person j eine auf die Ebene projizierte Grundfläche f_j hat. Es werden alle in der zu betrachtenden Fläche A befindlichen „Personenflächen f_j “ aufsummiert und durch die zur Verfügung stehende Fläche dividiert, hierdurch ergibt sich die dimensionslose Dichte $\tilde{\rho}$.

Der neueste Ansatz der Dichteberechnung stammt von Steffen und Seyfried [137]. Hierbei wird davon ausgegangen, dass jede Person eine individuelle Dichte bzw. Fläche hat, diese wird durch Aufspannen eines Netzes von Voronoi-Zellen ermittelt, wobei sich jede Person in einer speziell auf sie ausgerichteten Voronoi-Zelle befindet.

Zuletzt sei noch angemerkt, dass Fruin [31] den Kehrwert der Dichte als „pedestrian area module“ bezeichnet. Zudem werden einzelne Dichteregime in sogenannte „Level of Service (LOS)“ eingeteilt [31, 151]. Je nach LOS ist es Personen möglich (basierend auf der vorhandenen Dichte), einzelne Bewegungen auszuführen. Somit besteht

in Planungsphasen die Möglichkeit ein maximales LOS mit Hilfe von Simulationsprogrammen nachzuweisen, um beispielsweise in Einkaufszentren eine „Wohlfühl-atmosphäre“ zu erreichen.

Spezifischer Fluss

Der spezifische Fluss J_s gibt an, wie viele Personen in einer gewissen Zeitspanne eine auf einen Meter Breite normierte Öffnung durchqueren. Er kann somit auch als „Leistungsfähigkeit“ oder „Kapazität“ einer Engstelle angesehen werden. Der „unnormierte“ Fluss J kann zum einen über eine mit Hilfe einer Zeitspanne („timegap“) berechnet werden, in der die Personen eine entsprechende Weglänge zurücklegen, d. h.

$$J = \frac{1}{\langle \Delta t \rangle}. \quad (1.4)$$

Wird diese Größe nun auf einen Meter normiert, so ergibt sich daraus der spezifische Fluss J_s .

Eine weitere Möglichkeit zur Berechnung ergibt sich aus dem Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit v , der Dichte ρ und der Breite b :

$$J = \rho v b = J_s b. \quad (1.5)$$

Der spezifische Fluss J_s wird in diesem Fall durch

$$J_s = \rho v \quad (1.6)$$

definiert. Es gilt hierbei anzumerken, dass dies nur für den 2-dimensionalen Fall gilt, für den 1-dimensionalen Fall (Linienbewegung) kann kein spezifischer Fluss angegeben werden, da in diesem Fall keine Breite zur Normierung vorliegt.

Seit Anfang des 20. Jahrhunderts [23, 27, 123] wird die Frage diskutiert, in wie weit der Fluss durch eine Engstelle linear oder stufenweise mit der Breite ansteigt. Erste Experimente wurden bereits 1911 [23] durchgeführt; schließlich wird diese Fragestellung durch Experimente und Untersuchungen bis heute [27, 50, 69, 91, 92, 98, 114, 130] erforscht. Im Sinne der Musterversammlungstättenverordnung (MVStättV) [26] ist bei Engstellen ein stufenweises Ansteigen anzunehmen, dort heißt es über die Breite von Ausgängen: „Staffelungen sind nur in Schritten von 0,60 m zulässig.“ Im Gegensatz dazu zeigen viele Handbücher [31, 101, 114, 151] und Experimente [69, 91, 92, 98, 130] auf, dass der Fluss linear mit der Breite der Engstelle ansteigt. Abbildung 1.1 zeigt auf, wie sich das Verhältnis Personenfluss zu Ausgangsbreite verhält, Skizzen (siehe

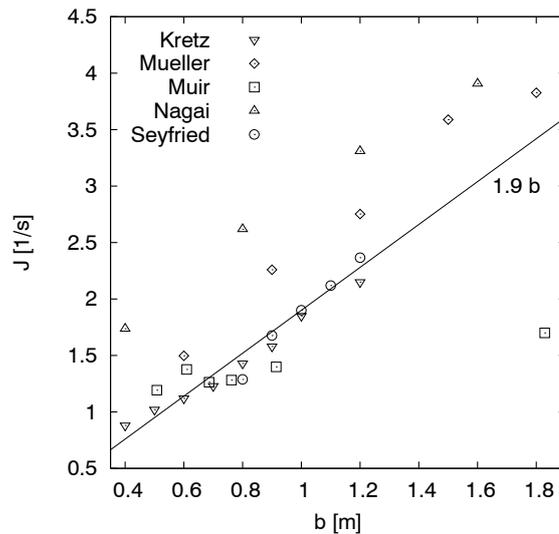


Abbildung 1.1.: Experimentelle Daten für Personenflüsse durch Engstellen [129]. Die experimentellen Daten stammen aus [69, 91, 92, 98, 130], Grundlagen der Experimente sind aus Abbildung 1.2 zu entnehmen.

Abbildung 1.2 aus [130]) verdeutlichen die Anordnung der Personen und Ausgänge zu Beginn des jeweiligen Experiments. Zusätzlich sei darauf hingewiesen, dass Predtetschenski und Milinski [114] keine Module von 60 cm Breite vorschreiben, denn auch bei diesem Verfahren gilt der lineare Anstieg des Personenflusses mit zunehmender Türbreite. Die Erläuterungen der MVStättV [25] stimmen in dieser Hinsicht („Stufenmodul“) mit der dort aufgeführten Quelle, nämlich dem Buch von Predtetschenski und Milinski [114], nicht überein.

1.2. Individuelle Parameter

Empirische Größen, d. h. sowohl kollektive (makroskopische) Größen als auch Messgrößen sind jedoch hauptsächlich von den persönlichen (mikroskopischen) Faktoren eines jeden Individuums abhängig. Proulx [115] schildert in ihrem Forschungsbericht ausführlich die grundlegenden Einflussfaktoren auf eine Person, die sogenannten „individuellen Parameter“, und ihre Wechselwirkungen. Tabelle 1.1 zeigt die entsprechende Übersicht.

Wie aus Tabelle 1.1 zu entnehmen ist handelt es sich um eine große Anzahl von unterschiedlichen Einflussfaktoren, die zum Teil psychologischen Ursprungs sind.

Mensch	Gebäude	Feuer
Profil	Art	Optische Anzeichen
<ul style="list-style-type: none"> - Geschlecht - Alter - Fähigkeiten - Behinderungen 	<ul style="list-style-type: none"> - Wohnhaus - Fabrik - Krankenhaus - Hotel - Kino usw. 	<ul style="list-style-type: none"> - Flammen - Rauch - Durchbiegung von Bauteilen
Wissen und Erfahrungen	Architektur	Geruchsbedingte Hinweise
<ul style="list-style-type: none"> - Vertrautheit mit dem Gebäude - Feuererfahrungen - Feuerübungen - Notfalltraining 	<ul style="list-style-type: none"> - Anzahl Etagen - Ort der Ausgänge - Ort der Treppen - Gebäudeform - Komplexität 	<ul style="list-style-type: none"> - verbrannter Geruch - ätzender Geruch
Bedingungen	Grund des Aufenthalts	Akustische Hinweise
<ul style="list-style-type: none"> - allein / nicht allein - Aktiv / Passiv - Unter Drogen- bzw. Medikamenteneinfluss 	<ul style="list-style-type: none"> - arbeiten - schlafen - essen - einkaufen usw. 	<ul style="list-style-type: none"> - Geräusche des Feuers - herunterfallende Gegenstände - Glas
Persönlichkeit	Vorbeugender Brandschutz	Andere Anzeichen
<ul style="list-style-type: none"> - Anführer - Mitläufer - ängstliche oder hilfsbedürftige Person 	<ul style="list-style-type: none"> - Feueralarmsignal - Durchsage - Fluchtplan - geschultes Personal - Rückzugsräume 	<ul style="list-style-type: none"> - Hitze

Tabelle 1.1.: Einflussfaktoren und ihre Wechselwirkungen [115]

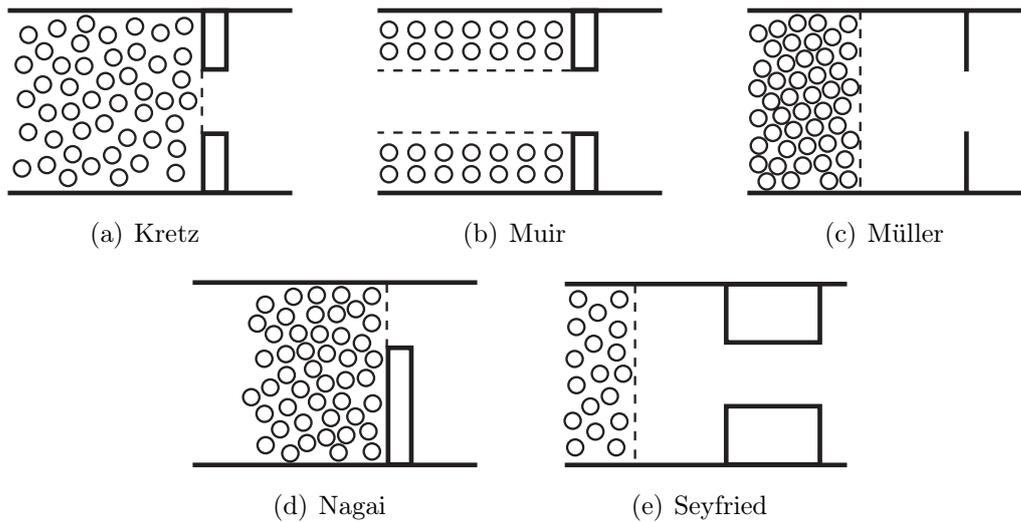


Abbildung 1.2.: Skizzen der Experimente der Daten in Abbildung 1.1 [130]

Neben quantifizierbaren Kenngrößen wie „Anzahl der Etagen“ sind es hauptsächlich die bereits erwähnten psychologischen Faktoren, die sich auf die Evakuierung auswirken. Zum heutigen Zeitpunkt ist es jedoch nicht möglich vorherzusagen, wie sich diese psychologischen Einflussfaktoren auf die Evakuierung im Gesamten auswirken. Da es sich zusätzlich um individuelle Faktoren handelt, können diese auch einen Einfluss auf die Evakuierungszeit haben, der nicht mit Modellen berechnet werden kann. So ist es beispielsweise nicht bekannt, wie sich eine ängstliche Person verhält sobald ein Alarmierungssignal ertönt. Bewegt sich die entsprechende Person gleich zum Ausgang, so trägt dieses Verhalten nicht gesondert zur Gesamtevakuierungsdauer eines Gebäudes bei, versteckt sich jedoch die entsprechende Person beispielsweise hinter Regalen, so ist eine mehr oder weniger aufwendige Suche nötig, welche sehr wohl einen Einfluss auf die Gesamtevakuierungszeit hat. Da diese Faktoren heute nicht bekannt sind bzw. es keine allgemein gültigen Regeln zur Vorhersage eines Verhaltens in Alarmsituationen gibt, können diese entsprechenden Parameter und die daraus ermöglichten Kombinationen nur mit einfachen Abschätzungen wiedergegeben werden.

Ein weiterer individueller Parameter neben psychologischen Faktoren ist die körperliche Verfassung der Personen. Hierbei spielt nicht nur das Geschlecht eine entsprechende Rolle, auch Behinderungen können einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtevakuierungszeit haben. Während Frauen im Durchschnitt langsamer als Männer laufen [48, 151] und jüngere Personen schneller als ältere [151] gibt es zu behinderten Personen, d. h. Personen mit Gehhilfen oder in Rollstühlen, sehr wenige Daten.

Da bei Evakuierungen hauptsächlich von „normalen“ Personengruppen ausgegangen wird, ist der Einfluss von behinderten Personen auf eine Evakuierung weitestgehend nicht untersucht. Eine erste Konferenz zu diesem Thema wurde bereits 1980 abgehalten [59], es gibt dennoch keine neueren Untersuchungen zu diesem Thema. Zum einen benötigen diese Personen Hilfe von Dritten (Rollstuhlfahrer müssen beispielsweise die Treppe heruntergetragen werden), zum anderen benötigen die Personen mehr Platz bei ihren Bewegungen, da beispielsweise eine Gehhilfe notwendig ist. Diese Einflüsse können sich auch auf den Personenstrom innerhalb des Gebäudes auswirken, da zum Beispiel auf Treppen die Bewegung insgesamt langsamer wird, sobald ein Rollstuhlfahrer von anderen Personen getragen wird.

Erste Untersuchungen zu menschlichem Verhalten im Zusammenhang mit Evakuierungen wurden 1909 in den USA durchgeführt [1], in den folgenden Jahren wurden diverse Evakuierungsstudien durchgeführt, deren Ergebnisse letztendlich in dem sogenannten „Building Exits Code“ verarbeitet wurden [1, 103]. In den 1940er und 1950er Jahren wurde mit Hilfe von Fragebögen das menschliche Verhalten untersucht, ein Hauptinteresse lag an dem Verhalten von Personen, die in ein brennendes Gebäude zurückkehrten [16]. Massenunglücke waren damals [51] wie heute ausschlaggebend für weitere Forschungen. Basierend auf Auswertungen von Fragebögen wurden ausführliche Berichte von Bryan und Wood veröffentlicht [17, 157]. Insgesamt wurden in beiden Studien zusammen mehr als 2700 Personen und 1200 Brandereignisse untersucht.

1.2.1. Reaktionszeit

Wie bereits erwähnt, haben sowohl psychische als auch physische Faktoren einen Einfluss auf den Evakuierungsprozess. Da die Personenbewegung im Allgemeinen recht gut vorhergesagt werden kann, ist die Reaktionszeit der entscheidende Parameter, der nicht durch mathematische Modelle erfasst ist, da hier beispielsweise Angst oder Lautstärke des Alarmsignals eine maßgebende Rolle spielen. Wird das Alarmsignal aufgrund seiner Lautstärke nicht wahrgenommen, so beginnt die Evakuierung (wenn überhaupt) recht spät, meistens durch eine Alarmierung per Telefon oder durch andere Personen. Dieser Zeitpunkt ist jedoch nicht vorherzusagen und kann sehr stark variieren. Reaktionszeiten, d. h. der Beginn der Evakuierung nach Ausbruch des Schadensereignisses, können teilweise länger sein als die reine Bewegungszeit vom aktuellen Ort hin zum entsprechenden Notausgang. Einen Ausschnitt über bisher ermittelte Reaktionszeiten zeigt Tabelle 1.2. Wie sich verschiedene Reaktionszeiten

auf den Evakuierungsprozess auswirken wird im Abschnitt 2.4.3 aufgezeigt.

Quelle	Art	Gebäude	Brandmel- dezeit	Erken- nungszeit	Reaktions- zeit
Duncan [24]	Übung	Wohnhaus	-	22s	-
Shields [134]	Übung	Wohnhaus	-	ca. 25s	
VDMA [147]	-	-	180s	60s	180s
Whiting [152]	-	-	-	60s - 360s	
Gwynne [40]	Übung	Uni	-	70,8s	
			-	73,7s	
	Übung	Krankenha.	-	im Mittel ca. 50s	
Grace [38]	-	-	60s - 180s	-	
Proulx [117]	Schätzung	„worst case“	310s	600s	
	Schätzung	„best case“	60s	30s	
Proulx [116]	Übung	Wohnhaus	ca. 360s		

Tabelle 1.2.: Erkennungs- und Reaktionszeiten im Brandfall

1.3. Panik, Gedränge und Massenflucht

Untersuchungen zum Thema *Panik* gibt es schon seit dem 19. Jahrhundert [35, 72]. Seitdem wurden im Bereich der Ingenieurwissenschaften oder Soziologie bereits spezielle Paper (z. B. [121]) oder Bücher (z. B. [20, 74]) über das Phänomen *Panik* veröffentlicht. Wie auch immer, es konnte bis heute keine eindeutige und verbindliche Definition des Begriffs *Panik* ausfindig gemacht werden, dies stimmt mit den bereits von Smelser [135] gemachten Aussagen überein.

Der Begriff *Panik* kommt zum einen im Bereich der Börsenwirtschaft („Börsenpanik“, „Panikverkäufe“) vor, zum anderen natürlich im Bereich des menschlichen Verhaltens, das auch hier im Folgenden betrachtet wird. Die erste gefundene Definition des Begriffs *Panik* stammt aus dem Buch von Park und Burgess [110] aus dem Jahre 1921. Die einzige verbindliche Definition, die das Wort *Panik* beinhaltet, ist die „Panikattacke“, eine Definition findet sich in der „Fourth Edition of the Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders (DSM-IV)“ [3]. Da es, wie bereits erwähnt, für den Begriff *Panik* keine generelle Definition gibt, werden im Folgenden einige Definitionen aufgelistet. Auf Grund der Tatsache, dass es sich hierbei um englischsprachige Definitionen handelt, wird der original englische Text mit einer selbst

angefertigten deutschen Übersetzung aufgeführt. Dies soll das Problem einer einheitlichen Definition verdeutlichen, da die angefertigten Übersetzungen keine eindeutige Aussage bzw. Definition zulassen.

1.3.1. Definitionen von Panik, Gedränge, Massenflucht und Stampede

- „A sudden, overpowering terror, often affecting many people at once [140].“
Übersetzung:
Ein plötzlich überwältigender Schreck, der sich oft auf viele Personen gleichzeitig auswirkt.
- „A sudden overpowering fright; also: acute extreme anxiety [83].“
Übersetzung:
Ein plötzlich überwältigender Schreck, auch: akute extreme Angst.
- „A sudden unreasoning terror often accompanied by mass flight 'widespread panic in the streets' [83].“
Übersetzung:
Ein plötzlich „unvernünftiger“ Schreck, oft begleitet von einer Massenflucht, „weit verbreitete Panik in den Straßen“.
- „A sudden strong feeling of fear that prevents reasonable thought or action [78].“
Übersetzung:
Ein plötzliches starkes Angstgefühl, das vernünftiges Denken oder Handeln verhindert.
- „A sudden overwhelming fear, with or without cause, that produces hysterical or irrational behavior, and that often spreads quickly through a group of persons or animals [22].“
Übersetzung:
Ein plötzlich überkommendes Angstgefühl, begründet oder unbegründet, das hysterisches oder irrationales Verhalten hervorruft, und das sich schnell über eine Gruppe von Personen oder Tieren ausbreitet.
- „An instance, outbreak, or period of such fear [22].“
Übersetzung:

Ein Fall, Ausbruch oder eine Periode von Angst.

- „Panic is a sudden terror which dominates thinking and often affects groups of people. Panics typically occur in disaster situations, for example, during a fire, and may endanger the overall health of the affected group. Architects and city planners increasingly try to accommodate the symptoms of panic, such as herd behavior, during design and planning, often using simulations to determine the best way to lead people to a safe exit [65].“

Übersetzung:

Panik ist ein plötzlicher Schreck, der das Denken dominiert und häufig Personengruppen beeinflusst. Panik entsteht typischerweise in Unglücksfällen wie beispielsweise einem Brand und gefährdet möglicherweise die Gesundheit der beteiligten Gruppe. Architekten und Stadtplaner versuchen innerhalb des Planungsprozesses Symptome der Panik zu berücksichtigen, wie zum Beispiel „Herdenverhalten“; hierzu werden häufig Simulationen genutzt um den besten Weg ausfindig zu machen, der die Personen zum sicheren Ausgang geleitet.

- „In sociology, precipitate and irrational actions of a group are often referred to as panics (e.g. 'sex panic', 'stock market panic'), see also hysteria [65].“

Übersetzung:

In der Soziologie werden häufig überstürzte und irrationale Handlungen als Panik bezeichnet (z. B. „Torschlusspanik“, „Börsenpanik“), siehe auch unter Hysterie.

- „Panic is a sudden fear which dominates or replaces thinking and often affects groups of people or animals. Panics typically occur in disaster situations, or violent situations (such as robbery, home invasion, a shooting rampage, etc.) which may endanger the overall health of the affected group [153].“

Übersetzung:

Panik ist eine plötzliche Angst, die das Denken dominiert oder verdrängt und betrifft häufig Gruppen von Menschen oder Tieren. Panik tritt typischerweise in Unglückssituationen oder gefährlichen Situationen auf (z. B. Überfall, Einbruch, wilde Schießerei, etc.), welche die Gesundheit der beteiligten Gruppe möglicherweise beeinträchtigen können.

- Panic is “a collective flight based on a hysterical belief [135].“

Übersetzung:

Panik ist eine kollektive Flucht, basierend auf hysterischen Annahmen.

- „Panic is the crowd in dissolution [110].“

Übersetzung:

Panik ist die Menschenmenge in ihrer Auflösung.

- Panic develops through the „linkage of a shock stimulus and four phases of human reaction to this stimulus [28].“

Übersetzung:

Panik entwickelt sich durch die Verbindung eines Schock-Stimulus und vier Phasen menschlicher Reaktion auf diesen.

- Panic is a „collective retreat from group goals into a state of extreme 'privatization' [70].“

Übersetzung:

Panik ist ein kollektives Abweichen von Gruppenzielen hin zu einer extremen Art von „Privatisierung“.

- „In the literature the term 'panic' is used to refer to many things. Thus, one finds it applied to such divergent behavior as a single individual's unrealistic anxieties to a group's ill-coordinated activities; at times its referent ranges from paralysis of action to a wild outburst of flight. [...] For our purposes, panic can be conceived of as involving actual (or attempted) physical flight [120].“

Übersetzung:

In der Literatur wird der Begriff „Panik“ für viele Dinge benutzt. So wird Panik beispielsweise angewandt bei abweichendem bzw. instabilem Verhalten von einzelnen Personen mit unrealistischen Angstzuständen bis hin zu gruppenbasierten, durch Krankheit ausgelöste, Aktivitäten; dieses reicht von gelähmten Handlungen bis hin zu wilden Fluchtaktionen oder Ausbrüchen. [...] Für unsere Zwecke sehen wir Panik als eine zur Folge habende aktuelle (oder geplante) physische Flucht.

- „The introduction of any strong and irrelevant stimulus into a situation of any of the foregoing types will disrupt the normal course of interaction. Thus, the clamor of a fire engine outside the theater or auditorium will disrupt audience interaction. When such a stimulus is defined by the members of the situation as a source of danger, the situation may become a panic situation. [...] Panic behavior is, thus, the antithesis of regimental behavior [71].“

Übersetzung:

Die Einbringung eines starken und bedeutungslosen Stimulus in eine Situation von andauernden Handlungen wird die normale Handlung unterbrechen.

Deshalb wird der Lärm eines Feuerwehrautos außerhalb eines Theaters oder Hörsaales die Zuhörer/Zuschauer in ihrer Tätigkeit (zuschauen oder zuhören) unterbrechen. Wird dieser Stimulus von Personen als Gefahrenquelle eingestuft, so kann die Situation hin zu einer Paniksituation umschwenken. Panikverhalten ist deshalb das Gegenteil von „normalem“ Verhalten.

- „The word panic is often applied to a strictly individual, maladaptive reaction of flight, immobility, or disorganization stemming from intense fear. Individual panic frequently occurs as a unique individual response without triggering a similar reaction to others. Panic as collective behavior, however, is shared behavior [107].“

Übersetzung:

Das Wort Panik wird oft angewandt auf eine streng individuelle, krankhafte Fluchthandlung, Unbeweglichkeit oder Unorganisiertheit, basierend auf intensiver Angst. Individuelle Panik wird häufig als individuelle Reaktion ohne Beeinflussung anderer Personen angesehen. Panik als kollektives Verhalten ist, wie auch immer, ein geteiltes Verhalten.

Bemerkenswert ist, dass es selbst zu der Ursache von *Panik* unterschiedliche Ansichten gibt. Nolan [107] schreibt beispielsweise, dass *Panik* eigentlich nicht im Zusammenhang von Evakuierungen bei Brandereignissen auftritt, LaPierre [71] beschreibt genau das Gegenteil. Bei der Untersuchung der zumeist englischsprachigen Literatur fällt auf, dass es dort zusätzlich die Begriffe *Crush (Gedränge)* und *Stampede (Massenflucht, Stempede)* gibt, während diese im Deutschen fast nicht gebräuchlich sind. Hierbei gibt es folgenden Definitionen:

- “a crowding together (as of people) [81]”

Übersetzung:

Ein Zusammendrängen (von Personen)

- “a crowd of people pressing against one another [81]”

Übersetzung:

Eine Menge von Menschen, die gegeneinander drückt

- “to squeeze together into a mass [82]”

Übersetzung:

Ein Zusammendrücken zu einer Masse

- “a mass movement of people at a common impulse [84]”

Übersetzung:

Eine Massenbewegung von Personen auf einen gemeinsamen Impuls

- “to cause to run away in a headlong panic [85]”

Übersetzung:

Ursache für ein Weglaufen, basierend auf Panik

- “to cause (as a group of people) to act on sudden or rash impulse [85]”

Übersetzung:

Grund/Auslöser (einer Gruppe von Personen) auf einen plötzlichen oder unbesonnenen Impuls zu reagieren

- “A stampede is an act of mass impulse among herd animals or a crowd of people in which the herd (or crowd) collectively begins running with no clear direction or purpose [154]”.

Übersetzung:

Eine Massenflucht/Stampede ist ein Massenimpuls durch eine Herde von Tieren oder eine Menge von Personen, auf dem basierend die Herde oder Menschenmasse ohne klare Richtung oder klaren Zweck kollektiv loszulaufen beginnt.

1.3.2. Eigene Definition von Panik, Gedränge, Flucht und Stampede

Aufgrund der Tatsache, dass es viele unterschiedliche Definitionen zu den einzelnen Themengebieten gibt, wurden aus den bereits genannten Definitionen eigene Definitionen hergeleitet, die nach Möglichkeit die Inhalte der übrigen Definitionen wiedergeben. Zur Untersuchung und Definition von Massenunglücken der letzten 150 Jahre wurden folgende Definitionen gewählt:

Panik:

Personen flüchten basierend auf einer plötzlich erscheinenden persönlichen oder „durch andere Personen weitergeleiteten“ Angst. Die Personen verhalten sich dabei unüberlegt. Der Grund der Fluchtbewegung kann durch einen Außenstehenden nicht nachvollzogen werden.

Gedränge:

Während der Bewegung werden die Personen aufgrund externer Einflüsse (Hindernisse, Engstellen) abgebremst, so dass dadurch die Personen gegeneinander drücken.

Ursache	Anzahl von Unglücken
Feuer	19
Ausschreitungen	12
keine logische Ursache	21
organisatorische Fehler	34
Habgier	11
Sonstige/Unbekannt	30
Gesamt	127

Tabelle 1.3.: Entstehungsgründe für Massenunglücke

Flucht:

Personen entfernen sich vom Unglücksort. Der Tod bzw. die Verletzung **redder** flüchtenden Personen wird durch zusätzliche Ereignisse ausgelöst, z. B. umherfliegende Trümmer.

Stampede:

Personen bewegen sich in eine Richtung. Aufgrund der Eigendynamik kann die Personenmenge nicht abbremsen und zum Stillstand kommen.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass, basierend auf den neuen Definitionen, Panik eine eher untergeordnete Rolle spielt. Wenn Panik auftritt, so ist dies ein eher untergeordnetes Phänomen, das nur lokal auftritt. Dies bedeutet, dass nur wenige Personen überhaupt davon betroffen sind, eine „Massenpanik“, wie in den Medien häufig benannt, kommt hingegen nicht vor. Tabelle 1.3 zeigt die Ursachen von 127 Massenunglücken auf, Tabelle 1.4 zeigt, wie die Unglücke basierend auf den gewählten Definitionen neu eingeteilt werden.

1.3.3. Experimente zum Thema Panik und Entscheidungsfindung

Seit ca. 70 Jahren werden Experimente zum Thema *Panik* oder *Entscheidungsfindung* durchgeführt [30,55,88,138,139]. Da teilweise vermehrt auf die Ergebnisse von French [30] und Mintz [88] verwiesen wird, werden diese beiden Experimente im Folgenden näher erläutert.

Kategorie	nach alten Definitionen in der Artikelbeschreibung	Neue Definition
Gedränge	16	35
Gedränge/Stampede	1	12
Gedränge/Panik	0	3
Stampede	62	11
Stampede/Chaos	1	0
Stampede/Panik	4	8
Stampede/unklar	0	2
Panik	20	2
Panik/unklar	1	2
Panik/Chaos	1	0
unklar	17	38
Stampede/Gedränge/Panik	4	4
Stampede/Gedränge/unklar	0	2
Flucht	0	2
Panik/Flucht/Selbstrettung	0	1
Gesamt	127	127

Tabelle 1.4.: Einteilung der Massenunglücke nach neuen Definitionen

Experiment von French

Der im Jahr 1941 von French veröffentlichte Artikel „Experimental Study of Group Panic“ [30] beschreibt das Verhalten von organisierten und unorganisierten Gruppen in einer Art Angstsituation. Hierzu wurden acht Gruppen von organisierten Sportlerteams (Gruppenmitglieder waren miteinander bekannt) mit acht unorganisierten Studentengruppen (Gruppenmitglieder waren nicht miteinander bekannt) verglichen. Jede Gruppe bestand aus sechs Personen und wurde in einen Raum gebeten, um dort einen Fragebogen auszufüllen; die Tür des Raumes wurde ohne deren Wissen verschlossen. Schließlich wurde Rauch eines Holzbrandes in den Raum geleitet und es ertönte eine Sirene, hierbei wurde das Verhalten der einzelnen Gruppen beobachtet. Nach French handelte es sich bei den unterschiedlichen Verhaltensweisen teilweise um „echte“ Panik, Skepsis oder der Annahme, es handelt sich um einen Scherz. Das Hauptergebnis des Experiments lautet, dass die organisierte Gruppe wesentlich ängstlicher war als die Gruppe der unorganisierten Personen. Dies wird wie folgt begründet:

- Die Personen der unorganisierten Gruppen hatten mehr „soziale Freiheit“.
- Die Personen der unorganisierten Gruppe waren in der vorhergehenden Situation mehr frustriert.
- Die Personen der unorganisierten Gruppe hatten teilweise Psychologiekurse belegt.
- Zwei der organisierten Gruppen waren beeinflussbarer und weniger kritisch aufgrund ihrer geringeren Ausbildung und fügsamer gegenüber dem Ansehen des Experimentleiters.

Experiment von Mintz

Mintz' im Jahre 1951 veröffentlichte Studie „Non-Adaptive Group Behavior“ [88] beschäftigt sich mit dem kooperativen Verhalten von Personen. Bei dem Experiment wurden Gruppen von 15 – 21 Personen gebildet, die Kegel aus einer Flasche herausziehen sollten (siehe Abbildung 1.3). Jeder Kegel war einer Person zugeordnet und wurde von dieser mit einer Schnur nach oben aus dem Flaschenhals gezogen. Der Flaschenhals war so eng ausgeführt, dass immer nur ein Kegel durch die Öffnung gelangen konnte, mehrere Kegel führten dagegen zu einem Stau. Ziel war es, die Kegel

aus der Flasche zu bekommen, bevor von unten einströmendes Wasser die Kegel berührte. Die Personen wurden unterschiedlich beeinflusst, teils mit einer Geldprämie oder mit „störenden“ (schreienden, laut rufenden) Personen innerhalb der Gruppe. Als Resultat der Versuche kann nach [149] angesehen werden, dass unkooperatives Verhalten nicht das Ergebnis eines „panik-getriebenen“ Verhaltens ist, sondern dass Personen ihr Verhalten an das erwartete Verhalten anderer Personen und an einen Wechsel der Situation anpassen.

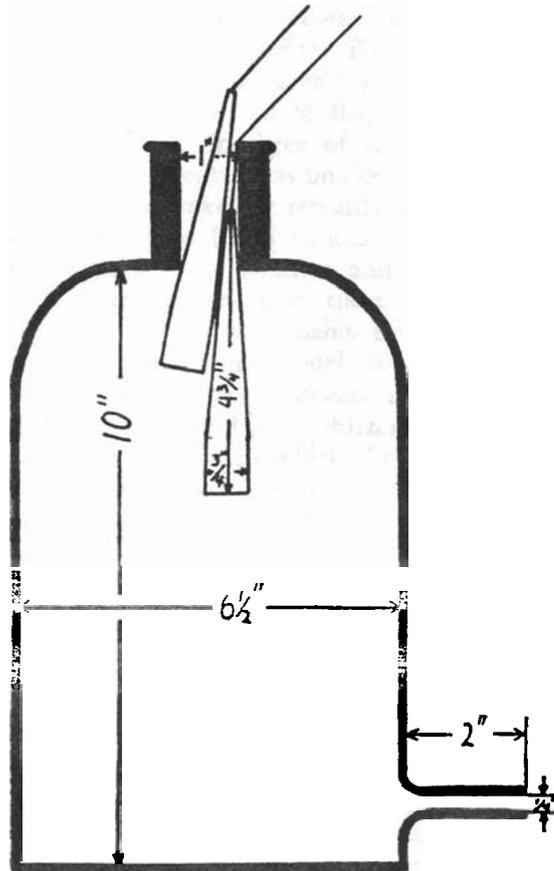


Abbildung 1.3.: Darstellung des Experiments von Mintz [88]

Diskussion der beiden Experimente

Das von French durchgeführte Experiment scheint eine „panik-artige“ Situation zu schaffen, besonders durch die Zuhilfenahme von Brandrauch und Sirenen. Die unklare Komponente ist die verschlossene Tür. Da die Personen nicht über die verschlossene Tür vorab informiert wurden besteht hier die Möglichkeit, dass die Personen aufgrund der verschlossenen Tür das Experiment erkannt haben. Das Experiment

von Mintz wird hauptsächlich von Brown [13] und Kelley et al. [55] kritisiert. Kelley et al. kritisieren vor allem, dass keine Gefahr bei dem Experiment entstand, so dass dieser Aspekt nicht von dem Experiment wiedergegeben werden kann. Weiterhin wird angezweifelt, dass der geringe Betrag, der als Belohnung ausgesetzt wurde, wirklich ein erhöhtes Stresslevel hervorruft. Brown weist zusätzlich darauf hin, dass kein „richtiger“ Stau entsteht, obwohl Mintz einige Personen anwies, laut zu sein und andere „in Panik zu versetzen“. Basierend auf den Kritiken von Brown und Kelley kann festgestellt werden, dass das Experiment von Mintz nicht dazu genutzt werden kann, um *Panikverhalten* vorherzusagen bzw. dessen Einfluss auf Entscheidungen zu erkennen. Gruppeneinflüsse bzw. Gruppenverhalten oder Verhalten gegen andere Gruppen wurde beispielsweise von Tajfel untersucht [138], diese werden hier nicht weiter diskutiert.

1.4. Brände als Todesursache

Verschiedene Studien haben sich mit der Entstehung von Bränden beschäftigt und deren Auswirkungen auf Todesfälle. Es wurde festgestellt, dass die häufigsten Brände am Wochenende (Freitags - Sonntags) entstehen [24,87]. In Nordamerika wird als hauptsächliche Brandentstehungsquelle die Küche angegeben, in der das Essen zubereitet wird (zwischen 16:00 und 20:00 Uhr) [117]. Dies stimmt mit Untersuchungen in Neuseeland überein [109]. Hierbei ist vor allem festzuhalten, dass diese Brände die wenigsten Todesopfer verursachen, da die Personen zu diesem Zeitpunkt wach sind und den Brand schnell bemerken. Ca. 65 % der Brände entstehen tagsüber, ca. 35 % nachts [39,159]. Auch gibt es Untersuchungen, die besagen, dass die soziale Herkunft ebenfalls ein Indiz für Todesfälle bei Brandereignissen ist [79,109,119]. Während in Kanada bis zu 38 % der Brandursachen durch eine Zigarette oder ein Streichholz ausgelöst werden (meist kurz vor dem Einschlafen) [117], sind auch Brandstiftungen nicht als Brandursache zu vernachlässigen. Wagner zeigt beispielsweise auf, dass der Anteil von Brandstiftungen in einigen Ländern über 20 % liegt [150]. Auch in Krankenhäusern sind Zigaretten eine der häufigsten Brandursachen [97], ob es sich hierbei um gezielte Brandstiftung handelt, ist jedoch nicht bekannt.

Bezogen auf das Risiko bei einem Brand zu sterben, haben ältere Personen ein höheres Risiko als jüngere. Ab einem Alter von 50 Jahren liegt ein entsprechend höheres Risiko vor, bei einem Brand zu sterben [117], ähnliche Aussagen können auch aus anderen Artikeln entnommen werden [49,54,73,79,87,127,145].

Neben den bereits genannten Faktoren spielen auch Drogen, Alkohol, Schlaf und Schlafmangel eine wichtige Rolle beim Erkennen von Bränden. Je nachdem ob beispielsweise Drogen konsumiert wurden besteht ein erhöhtes Risiko, einen Brand nicht zu erkennen oder einen Alarmruf nicht wahrzunehmen. Diese Themen werden im Weiteren nicht diskutiert, es sei hierbei auf weiterführende Literatur verwiesen [14, 15, 24, 38, 52, 53, 104–106, 109].

1.5. Startwellen in Warteschlangen

Menschen, die in einer Schlange stehen und beginnen loszulaufen, bewegen sich wie Autos vor einer roten Ampel, die auf Grün umschaltet: es wird entsprechend gewartet, bis die vor einem stehende Person beginnt loszulaufen, danach beginnt man selbst mit dem Loslaufen. An der Ampel ist dieses Phänomen identisch mit dem bei Fußgängern, nur handelt es sich hier um Autos und nicht um Personen. Um bei Fußgängern nun festzustellen, wie schnell sich eine Startwelle durch die wartende Schlange bewegt, wurde ein einfaches Experiment durchgeführt: Personen wurden mit unterschiedlicher Dichte auf einem Parkplatz hintereinander aufgereiht, so dass sich eine typische Warteschlange bildet. Nach dem Startkommando beginnen die Personen sich zu bewegen und es wurde die Zeit der letzten Person ermittelt, bis diese den Anfangspunkt der Warteschlange erreicht hat. Mit Hilfe der auf dem Parkplatz angebrachten Markierungen konnten die entsprechenden geometrischen Abmessungen leicht ermittelt werden, Abbildung 1.4 zeigt den Versuchsaufbau in vereinfachter Form.

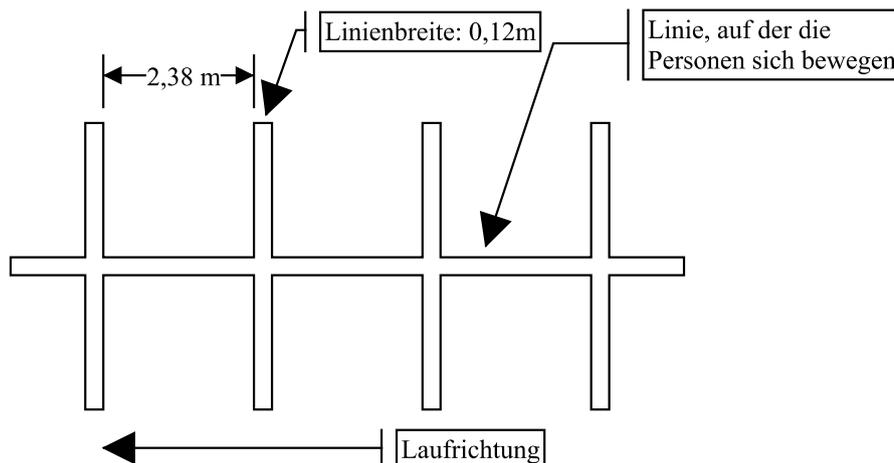


Abbildung 1.4.: Skizze des Experiments zur Ermittlung der Startwelle

Lauf Nr.	Anzahl Personen	Dichte (P/m)	Zeit bis letzte Person den Anfangspunkt erreicht (s)	Zeit bis zum Start der letzten Person (s)	Geschwindigkeit der Startwelle (m/s)
1	51	2,27	40	21	1,07
2	47	2,09	38	21	1,07
3	25	1,11	23	1	keine klare Startwelle
4	29	1,29	23	1	keine klare Startwelle
5	19	0,84	17	0	keine Startwelle
6	16	0,71	15	0	keine Startwelle

Tabelle 1.5.: Ergebnisse des Experiments zur Bestimmung des Verlaufs einer Startwelle

Insgesamt wurden 6 Durchläufe mit unterschiedlichen Personenzusammensetzungen durchgeführt (wahllose Anordnung). Bei den Personen handelte es sich um Personen ohne Behinderung aus unterschiedlichen Kulturkreisen. Die Ergebnisse des Experiments zeigt Tabelle 1.5, ein aus den Videoaufnahmen erstelltes Bild des zweiten Laufs ist in Abbildung 1.5 zu sehen, die Länge der Warteschlange betrug ca. 22,50 m.

Wie aus den Ergebnissen hervorgeht, breitet sich die Startwelle mit ca. 1,07 m/s aus. Es konnte nicht beobachtet werden, dass die Personen nach dem Loslaufen ihre Geschwindigkeit verringert haben, so dass die letzte Person den Anfangspunkt der Warteschlange nach folgender Zeit erreicht:

$$\text{Zeit} = \frac{\text{Länge Wegstrecke}}{\text{Gehgeschwindigkeit}} + \frac{\text{Länge Wegstrecke}}{1,07\text{m/s}} \quad (1.7)$$

Weiterhin konnte nicht festgestellt werden, dass bei einer mittleren Dichte (hier: 1,11 P/m und 1,29 P/m) eine klare Startwelle entsteht. Die Personen mussten aufgrund eines „verspäteten“ Starts von anderen Personen noch einmal kurz abbremsen, so dass dieser Dichtebereich eher für eine Grenzsituation spricht, wäre der Startvorgang „optimal“ verlaufen, so wäre ein Abbremsen sicherlich nicht nötig gewesen. Bei geringeren Dichten ist jedoch keine Startwelle zu erkennen, alle Personen beginnen sofort loszulaufen. Die dadurch errechenbare Zeit kann beispielsweise auch für die Validierung von Simulationsprogrammen für Personenbewegung genutzt werden, da sich dadurch recht einfach zum einen die Wiedergabe einer Startwelle überprüfen lassen kann, zum anderen kann auch deren Geschwindigkeit durch die Personenmenge überprüft werden.



Abbildung 1.5.: Startwelle bei einer Warteschlange. Die Personen im rechten Bereich des Bildes warten, während die Personen im linken Bereich bereits in Bewegung sind. In der Bildmitte beginnen die Personen gerade die Bewegung, d. h. an dieser Stelle ist die Startwelle gerade angekommen.

1.6. Konservative Annahmen bei menschlichen Bewegungen und menschlichem Verhalten

Die Ausarbeitungen haben aufgezeigt, dass es recht schwierig ist, konservative Annahmen für menschliche Verhaltensweisen und Bewegungen zu finden. Wie in den Abschnitten 1.1 und 1.2 gezeigt wurde, gibt es diverse Einflussfaktoren auf das menschliche Verhalten (siehe beispielsweise Tabelle 1.1). Was hiervon als konservativ angesehen werden kann oder soll, ist jedoch nicht einfach zu definieren, da es von der jeweiligen Situation abhängt. Ebenfalls ist im Hinblick auf Reaktionszeiten eine konservative Annahme für Evakuierungssimulationen nicht möglich, da die entsprechenden Werte sehr stark schwanken (siehe Tabelle 1.2). In der genannten Übersicht werden Reaktionszeiten von Personen zwischen 25 und 600 Sekunden angegeben, somit können sogar angenommene 5 Minuten (300 Sekunden) als Reaktionszeit zu kurz sein, obwohl dies schon allgemein als eine recht lange Zeitspanne angesehen wird. Die Frage, ob 5 Minuten Reaktionszeit nun konservativ sind oder nicht, kann deshalb nicht vorab geklärt werden. Ebenfalls dienen die unterschiedlichen Begriffsdefinitio-

nen zum Thema *Panik* nicht gerade zum besseren Verständnis des Phänomens, das häufig in Schlagzeilen und Nachrichtensendungen verwendet wird. Je nachdem, wie der Leser für sich Panik definiert, können immer Anzeichen dafür gefunden werden, jedoch handelt es sich hierbei um keine argumentativ starke Aussage, vielmehr ist es eine persönliche Annahme, also eine subjektive Bewertung der Situation. Lediglich die *Panikattacke* ist wissenschaftlich definiert, eine nachträgliche Feststellung jedoch meistens nicht möglich, da hierzu unter anderem medizinische Messwerte benötigt werden. Brände als Todesursachen sind im Hinblick auf eine allgemeine konservative Annahme ebenfalls weniger hilfreich. Zum einen sind die Untersuchungen älteren Datums, zum anderen haben sich heute die Randbedingungen verändert, hierzu sei nur die selbstverlöschende Zigarette genannt.

Der erste Abschnitt hat letztendlich aufgezeigt, dass es schwer möglich ist eine Definition für konservative Annahmen hinsichtlich menschlichem Verhalten zu definieren, da auch vermeintlich konservative Annahmen zu optimistisch sein können, wie das Beispiel der Reaktionszeit aufzeigt. Letzendlich ist es hierbei nicht möglich, allgemein gültige „Standards“ für konservative Annahmen zu definieren, so dass die Frage „Was ist denn nun konservativ?“ in diesem Themengebiet nicht beantwortet werden kann.

2. Mikroskopische Modelle für Evakuierungsberechnungen

Im Sinne des heutigen Standes der Technik werden zur Berechnung von Evakuierungszeiten für Gebäude hauptsächlich mikroskopische Modelle verwendet. Mikroskopisch bedeutet hierbei, dass jede einzelne Person innerhalb eines Gebäudes modelliert wird, je nach Modell hat die entsprechende Person individuelle Parameter, die sie von anderen modellierten Personen unterscheidet. Mögliche Parameter sind beispielsweise

- freie Gehgeschwindigkeit (Wunschgeschwindigkeit),
- Reaktionszeit,
- Körpergröße,
- Gewicht,
- Alter und
- zu erreichendes Ziel.

Da die Parameter modellspezifisch sind, gibt es Modelle mit mehr oder weniger Parametern, eine Beschränkung besteht grundsätzlich nicht.

Bei den mikroskopischen Modellen wird zwischen

- kontinuierlichen und
- diskreten

Modellen unterschieden. *Kontinuierlich* bedeutet hierbei, dass die modellierten Personen prinzipiell jede Position im Raum erreichen können, solange es beispielsweise die Körpergröße zulässt. *Diskret* dagegen bedeutet, dass die zu untersuchenden Gebäude oder Flächen in diskrete Flächen eingeteilt werden, meist handelt es sich

hierbei um quadratische Zellen der Größe 40×40 cm. Personen bewegen sich in diesem Fall von Zelle zu Zelle, Positionen zwischen den einzelnen Zellen können nicht erreicht werden. Meist handelt es sich bei diesen diskreten Modellen um Zellularautomaten, die im Folgenden ebenfalls näher untersucht werden.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst einige Modelle (sowohl kontinuierliche als auch diskrete) vorgestellt, im weiteren Verlauf werden grundlegende Eigenschaften der Modellierung untersucht, im Speziellen handelt es sich hierbei um verschiedene Updatealgorithmen bei Zellularautomaten und deren Einfluss auf das Ergebnis. Anhand eines kommerziell erhältlichen (proprietären) Softwareprogramms werden Einflüsse verschiedener individueller Parameter auf die Simulationsergebnisse von kompletten Gebäuden dargelegt. Im letzten Abschnitt werden Verfahren und Testszenarien vorgestellt, welche es ermöglichen, anhand einfacher Geometrien Aussagen über die Grundlagen des vorhandenen Modells zu treffen. Diese einfachen Szenarien sollen dem Modellanwender helfen, ein tieferes Verständnis für das von ihm verwendete Modell zu erlangen. Gleichzeitig soll der Anwender in die Lage versetzt werden schnell zu erkennen, wie sich einzelne Modellparameter auf Gesamtevakuierungszeiten auswirken.

2.1. Kontinuierliche Modelle

Wie bereits vorab beschrieben, handelt es sich bei kontinuierlichen Modellen um Modelle, in denen jede modellierte Person jeden Punkt in einem Raum erreichen kann, solange dies nicht von anderen Faktoren wie beispielsweise Körperumfang eingeschränkt wird. Bei den kontinuierlichen Modellen gibt es sogenannte *regelbasierte* Modelle und sogenannte *kraftbasierte* Modelle. *Regelbasierte* Modelle basieren hierbei auf einer Grundlage von Regeln, beispielsweise „wenn Abstand zur vorne laufenden Person $<$ Grenzwert, starte Überholvorgang“. Diese einzelnen Regeln sind recht starr, jedoch spiegeln sie je nach Detaillierungsgrad recht gut die Realität wieder. *Kraftbasierte* Modelle hingegen benutzen einen physikalischen Ansatz wie beispielsweise Magnetkräfte, um die Personen durch einen Raum zu bewegen. Hierzu werden einzelne Theorien der Physik im Hinblick auf Fußgängerdynamik modifiziert und angewandt. Im Gegensatz zu den *regelbasierten* Modellen werden hier keine „Aktionen“ wie Überholvorgänge durch Grenzwerte ausgelöst, sie ergeben sich vielmehr automatisch durch Lösung der zugrunde liegenden Gleichungen. Eines der bekanntesten *kraftbasierten* Modelle ist das Social Force Modell [41–44, 46, 47, 90], das im Fol-

genden vorgestellt wird. Ein *regelbasiertes* Modell ist beispielsweise das Programm Simulex [141–143], dessen Grundlagen werden hier jedoch nicht näher erläutert.

2.1.1. Social Force Modell

Das von Helbing et al. [41–44, 46, 47, 90] bekannt gemachte Social Force Modell ist ein raumkontinuierliches Modell, das auf der Annahme basiert, dass Personen durch sogenannte „soziale Kräfte“ und „physische Kräfte“ sich ihren Weg durch ein Gebäude oder eine Menschenmenge suchen, wie beispielsweise auf Weihnachtsmärkten oder im Winter- bzw. Sommerschlussverkauf. Das hier vorgestellte Modell entspricht den Vorgaben in [43].

Die Grundannahme des Modells besteht darin, dass aus der Anzahl der vorhandenen Personen N eine Person i mit der Masse m_i sich mit ihrer Wunschgeschwindigkeit v_i^0 in eine bestimmte Richtung \mathbf{e}_i^0 bewegt, beispielsweise Richtung Ausgang. Um ihre Wunschgeschwindigkeit und -richtung zu erreichen, versucht die Person ihre aktuelle Richtung und Geschwindigkeit \mathbf{v}_i innerhalb einer charakteristischen Zeit τ_i anzupassen. Diese Zeit kann auch als Zeitschrittweite des Modells angesehen werden, nach der die nächste „Bewegung“ der Person berechnet wird. Gleichzeitig versucht die entsprechende Person von anderen Personen und Wänden einen geschwindigkeitsabhängigen Abstand bewahren. Verglichen mit der Realität bedeutet dies, dass schneller laufende Personen einen größeren Abstand zum Vordermann halten als langsam gehende Personen, dies gilt ebenfalls für den Abstand zur Wand. Diese beiden Kräfte werden von Helbing et al. [43] als „interaction forces (interagierende Kräfte)“ \mathbf{f}_{ij} für Kräfte zwischen Personen und \mathbf{f}_{iW} für Wände bezeichnet. Somit kann die Geschwindigkeitsänderung mit Hilfe der Beschleunigungsgleichung wie folgt beschrieben werden:

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = m_i \frac{v_i^0(t) \mathbf{e}_i^0(t) - \mathbf{v}_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j(\neq i)} \mathbf{f}_{ij} + \sum_W \mathbf{f}_{iW} . \quad (2.1)$$

Die Änderung der Position $\mathbf{r}_i(t)$ ist durch den Geschwindigkeitsvektor $\mathbf{v}_i(t) = \frac{d\mathbf{r}_i}{dt}$ gegeben.

Die psychologisch bedingte Tendenz zweier Personen i und j sich „nicht zu nahe zu kommen“ wird durch die sogenannte „interaction force“ $\left[A_i e^{\frac{r_{ij} - d_{ij}}{B_i}} \right] \mathbf{n}_{ij}$ wiedergegeben; A_i und B_i sind hierbei frei wählbare Konstanten. Der Abstand zwischen den Körpermittelpunkten der Personen i und j wird durch $d_{ij} = \|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j\|$ wiedergegeben, $\mathbf{n}_{ij} = (n_{ij}^1, n_{ij}^2) = \frac{(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)}{d_{ij}}$ ist der normalisierte Vektor, der von Person j zu

Person i zeigt. Beide Personen berühren einander, sobald der Wert von d_{ij} kleiner ist als die Summe der beiden Körperradien r_i und r_j , d. h. $r_{ij} = (r_i + r_j) > d_{ij}$. In diesem Fall treten zwei weitere Kräfte auf: die sogenannte „body force (Körperkraft)“, die als $k(r_{ij} - d_{ij})\mathbf{n}_{ij}$ definiert ist und damit die Verformung der Körper wiedergibt und die sogenannte „sliding force (Gleitkraft)“ $\kappa(r_{ij} - d_{ij})\Delta v_{ji}^t \mathbf{t}_{ij}$, welche eine tangentielle Bewegung verhindert, falls die Person i näher an die Person j gerät. Hierbei ist $\mathbf{t}_{ij} = (-n_{ij}^2, n_{ij}^1)$ die tangentielle Richtung und $\Delta v_{ji}^t = (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \cdot \mathbf{t}_{ij}$ die tangentielle Geschwindigkeitsdifferenz, die Faktoren k und κ sind hierbei große empirische Konstanten (Werte siehe unten). Werden diese Kräfte nun zu einer Formel zusammengefasst, so ergibt sich

$$\mathbf{f}_{ij} = \left[A_i e^{\frac{r_{ij} - d_{ij}}{B_i}} + kg(r_{ij} - d_{ij}) \right] \mathbf{n}_{ij} + \kappa g(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ji}^t \mathbf{t}_{ij}. \quad (2.2)$$

Es ist zu beachten, dass die Funktion $g(x) = 0$ ergibt, sobald sich die Personen nicht mehr berühren, d. h. $d_{ij} > r_{ij}$. Findet eine Berührung statt, so erhält die Funktion den Wert des Arguments, also $r_{ij} - d_{ij}$.

Die Annahmen, die für den Abstand zwischen zwei Personen gemacht wurden, gelten sinngemäß auch für den Abstand zu Wänden W . d_{iW} ist der Abstand zur Wand, \mathbf{n}_{iW} die Richtung rechtwinklig (senkrecht) zur Wand und \mathbf{t}_{iW} die tangentielle Richtung dazu. Somit ergibt sich für den Einfluss der Wände folgende Kraft:

$$\mathbf{f}_{iW} = \left[A_i e^{\frac{r_i - d_{iW}}{B_i}} + kg(r_i - d_{iW}) \right] \mathbf{n}_{iW} - \kappa g(r_i - d_{iW}) (\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{t}_{iW}) \mathbf{t}_{iW}. \quad (2.3)$$

Helbing et al. geben in ihrer Veröffentlichung [43] folgende Werte für die Parameter an:

- $m_i = 80$ kg (Masse eines durchschnittlichen Fußballfans)
- $\tau_i = 0,5$ s
- $A_i = 2 \cdot 10^3$ N
- $B_i = 0,08$
- $k = 1,2 \cdot 10^5$ kg s⁻²
- $\kappa = 2,4 \cdot 10^5$ kg m⁻¹ s⁻¹
- $2r_i$ gleichverteilt im Intervall $[0,5\text{m}, 0,7\text{m}]$

Zusätzlich kann zu den Kräften ein Fluktuationsparameter ξ addiert werden, sowie Parameter zum Gruppenverhalten, so dass die entsprechende Person auch anderen

Personen folgt. Diese Parameter werden hier jedoch nicht weiter diskutiert, weitere Informationen können z. B. aus [4, 46] entnommen werden.

Eine eher umgangssprachlich vereinfachte Formulierung des Modells lautet:

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \mathbf{f}_i^{(pers)} + \mathbf{f}_i^{(soc)} + \mathbf{f}_i^{(phys)} \quad (2.4)$$

wobei

- $\mathbf{f}_i^{(pers)}$ die „persönliche (treibende) Kraft“ darstellt, also die Kraft, die von der Person selbst ausgeht und mit der sie ihre Wunschrichtung und -geschwindigkeit erreicht,
- $\mathbf{f}_i^{(soc)}$ die „soziale Kraft“ darstellt, d. h. die Kraft, die beim Annähern an Personen entsteht und
- $\mathbf{f}_i^{(phys)}$ die „physische Kraft“ darstellt mit der die Person daran gehindert wird, an Wände zu laufen.

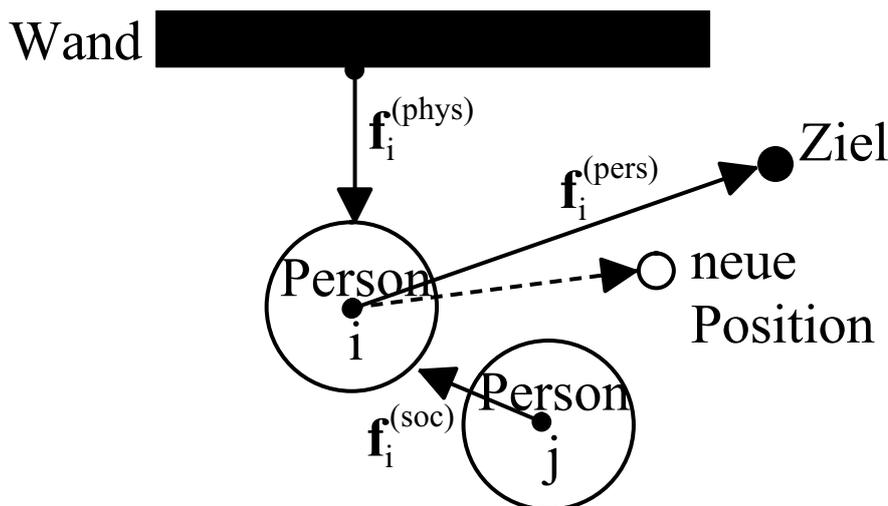


Abbildung 2.1.: Möglicher Verlauf der Kräfte $\mathbf{f}_i^{(pers)}$, $\mathbf{f}_i^{(soc)}$ und $\mathbf{f}_i^{(phys)}$ für eine Person i in Anlehnung an [4]

Abbildung 2.1 zeigt einen möglichen Verlauf der Kräfte $\mathbf{f}_i^{(pers)}$, $\mathbf{f}_i^{(soc)}$ und $\mathbf{f}_i^{(phys)}$ für eine Person i . Das Social Force Modell wird auch aktuell zur Simulation von Personenströmen eingesetzt, sowohl in kommerzieller [118, 125] als auch in frei verfügbarer Software [66]. Zudem ist das Social Force Modell Gegenstand weiterer wissenschaftlicher Untersuchungen [136]. Es ist jedoch auch anzumerken, dass das Social Force Modell in seiner einfachen Formulierung sowohl negative als auch über der Wunsch-

geschwindigkeit v_i^0 liegende Geschwindigkeiten in Richtung der Hauptbewegungsrichtung errechnen kann. Diese Effekte können nur durch eine Einschränkung der Freiheitsgrade [46] oder durch Ausschalten der Superposition einzelner Kräfte [133] ausgeschlossen werden, da das einfache Modell die Kräfte aller Personen und Wände berücksichtigt, unabhängig von deren Entfernung zur jeweiligen Person i .

2.2. Zellularautomaten

Zellularautomaten (Cellular Automata, CA) sind regelbasierte dynamische Modelle, die diskret in Zeit, Raum und der Zustandsvariablen sind, die Zustandsvariable selbst entspricht hierbei der Geschwindigkeit. Diskret in der Zeit bedeutet, dass die Position der einzelnen Personen innerhalb einer fest definierten Zeitspanne (einem Zeitschritt) neu bestimmt wird. Dies wird mit sogenannten Updatealgorithmen durchgeführt (siehe hierzu Abschnitt 2.3), prinzipiell sollte dies ein paralleler bzw. synchroner Update sein, d. h. die Personen bewegen sich alle gleichzeitig und nicht nacheinander. Der Zeitschritt selbst entspricht einer natürlichen Zeitskala Δt , er kann auch zur Kalibrierung des Modells genutzt werden, um Vorhersagen bezogen auf Evakuierungszeiten zu treffen.

Zellularautomaten basieren auf einer konstanten und regelmäßigen Gitterstruktur, eine Zelle des Gitters entspricht dem Platzbedarf einer Person in der Realität (40×40 cm [64]), kleinere Zellgrößen sind jedoch ebenfalls möglich [61] und führen zu einer besseren Diskretisierung des Raumes. Weiterhin kann eine Zelle jeweils nur durch eine Person belegt werden (Ausschlussprinzip), bei kleineren Zellen gilt dies nicht mehr (z. B. 20×20 cm), da in diesem Fall vier Zellen von einer Person belegt werden. Der Ansatz des Ausschlussprinzips und der Unverformbarkeit der Personen spiegelt somit eine gewisse „Privatsphäre“ wieder.

Die Bewegung der Personen von einer zur anderen Zelle wird normalerweise durch Regeln wiedergegeben, die Übergangswahrscheinlichkeiten für die einzelnen Zellen beinhalten. Vereinfacht gesagt wählt die Person die Zelle, die die höchste Wahrscheinlichkeit hat, die Zielzelle zu sein, da sie beispielsweise näher am Ausgang liegt. Die Bestimmung dieser Wahrscheinlichkeit ist auch die Grundlage für die Unterscheidung einzelner Modelle. Auch kommt es auf unterschiedliche Nachbarschaftsbeziehung an, es wird hierbei unterschieden zwischen der *von Neumann Nachbarschaft* und der *Moore Nachbarschaft*. Bei Verwendung einer *von Neumann Nachbarschaft* dürfen sich die Personen nur zu den Zellen bewegen, die an der Ursprungszelle seitlich

direkt anliegen (verglichen mit dem Schachspiel handelt es sich um die Zugbewegung eines Turmes in das nächste Feld), bei Verwendung einer *Moore Nachbarschaft* darf eine Bewegung auch in die über Eck anliegenden Zellen erfolgen (beim Schachspiel wäre dies die Bewegung eines Läufers in ein nächstes Feld), siehe hierzu auch Abbildung 2.2.

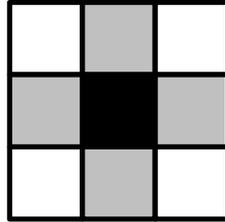


Abbildung 2.2.: Darstellung der *von Neumann* und der *Moore Nachbarschaft* für eine Zelle. Ausgehend von der schwarzen Zelle werden die grauen Zellen als *von Neumann Nachbarschaft* bezeichnet, bei weiterer Hinzunahme der weißen Zellen ergibt sich eine *Moore Nachbarschaft*

Als eines der ersten Zellularautomatenmodelle zur Fußgängersimulation gilt das Modell von Gipps und Marksjö [36] aus dem Jahr 1985, weitere Modelle anderer Wissenschaftler folgten. Diese Modelle basierten meist auf drei Faktoren zur Wahl der nächsten Zelle:

- die entsprechende Wunsch-Gehrichtung,
- Interaktionen mit anderen Personen und
- Interaktionen mit Gebäudebestandteilen wie Wänden und Türen.

Ab Mitte der 1990er Jahre wurden vermehrt Modelle zur Fußgängersimulation basierend auf Zellularautomaten entwickelt, von denen einige im Folgenden kurz dargestellt werden.

2.2.1. Gipps-Marksjö Modell

Das aus dem Jahr 1985 stammende Modell von Gipps und Marksjö [36] wurde aus dem Ansatz heraus entwickelt, dass die vorherrschenden Computer noch nicht sehr leistungsstark (im Vergleich zu heutigen Computern) waren. Durch die Verwendung des diskreten Ansatzes eines Zellularautomaten war es möglich, auch mit den damaligen Computern dieses Modell in annehmbarer Zeit zu berechnen. Als Zellgröße

wurde 50×50 cm gewählt und es wurde schon damals ein Ansatz von „sozialen Kräften“ gewählt; hierzu wurde jeder Zelle ein Wert zugewiesen, der auf der Nähe der Zelle zu anderen Personen basierte. Zudem wurde mit Hilfe eines Potentialfeldes die Richtung zum Ziel (dem Ausgang) vorgegeben. Durch Addition der jeweiligen Werte einer Zelle wurde die jeweils nächste Zielzelle bestimmt (*Moore Nachbarschaft*). Um unterschiedliche Geschwindigkeiten zu repräsentieren, wurden Personen mit beispielsweise einer Wunschgeschwindigkeit von 2 m/s in einem Zeitschritt ($= 1 \text{ s}$) vier mal bewegt, Personen mit nur einer Wunschgeschwindigkeit von 1 m/s dagegen nur zwei mal. Um Kollisionen zu vermeiden, wurde ein sequentieller Update genutzt, der auch als D'Hondt Update angesehen werden kann (siehe hierzu Kapitel 2.3).

2.2.2. Blue-Adler Modell

Das von Blue und Adler 1998 veröffentlichte Modell [8] basiert in seinen Grundzügen auf einer Variante des Nagel-Schreckenberg-Modells für Straßenverkehr [99]. Personen verhalten sich hierbei ähnlich wie auf einer mehrspurigen Straße, d. h. in ihrer Vorwärtsbewegung führen sie eine Art „Spurwechsel“ durch. Das Modell selbst besteht aus fünf Regeln, wobei sich die ersten vier Regeln mit dem Auswählen der entsprechenden „Spur“ beschäftigen, in der fünften Regel wird untersucht, wie weit sich die entsprechende Person fortbewegen kann. Durch die einzelnen Regeln wird sichergestellt, dass keine Kollisionen entstehen, da ein paralleler Update (siehe Kapitel 2.3) durchgeführt wird. Um verschiedene Geschwindigkeiten zu repräsentieren, werden die Personen in drei unterschiedliche Klassen eingeteilt:

- Klasse A: maximal 3 Zellen Vorwärtsbewegung pro Zeitschritt (ca. $1,30 \text{ m}$ oder $4,5 \text{ ft}$)
- Klasse B: maximal 2 Zellen Vorwärtsbewegung pro Zeitschritt (ca. $0,85 \text{ m}$ oder 3 ft)
- Klasse C: maximal 4 Zellen Vorwärtsbewegung pro Zeitschritt (ca. $1,80 \text{ m}$ oder 6 ft)

Als Kantenlänge einer Zelle wurde hierbei 18 inches ($0,457 \text{ m}$) gewählt. Die von Blue und Adler durchgeführten Untersuchungen zeigten auf, dass eine Verteilung von (Klasse A / Klasse B / Klasse C) = (90 % / 5 % / 5 %) das Fundamentaldiagramm für Fußgänger am besten reproduziert. In späteren Veröffentlichungen werden zusätzlich bidirektionale (Gegenstrom) [9] und kreuzende [10] Personenströ-

me hinsichtlich ihrer Modellierung untersucht.

2.2.3. Floor Field Modell

Das Floor Field Modell [18, 19, 60, 63, 126] basiert auf der Annahme, dass die Übergangswahrscheinlichkeit auf eine Nachbarzelle nicht mehr nur durch eine statische Funktion gegeben ist, sie variiert vielmehr dynamisch aufgrund der Personen, die sich vor anderen Personen zum Ziel bewegen. Die Grundlage dessen ist der aus der Natur bekannte Prozess der Chemotaxis [7], der z. B. von Insekten (beispielsweise Ameisen) genutzt wird, um einander den Weg zu einer Futterstelle mitzuteilen; hierdurch ergeben sich die sogenannten „Ameisenkolonnen“, welche eine gewisse Ähnlichkeit mit menschlichem Verhalten haben. Die sogenannte „Linienbildung“ bei bidirektionalen Strömen kann beispielsweise auf Plätzen oder Wegen mit hoher Dichte festgestellt werden, siehe hierzu Abbildung 2.3. Die Richtung der Personen wird bei dem Modell



Abbildung 2.3.: Linienbildung bei Gegenstromsituationen. Die gelbe Linie zeigt die Grenze zwischen beiden den Personenströmen, aufgenommen 2005 auf der „Hohe Straße“ während des Weltjugendtags in Köln (Foto: Tobias Kretz)

durch die sogenannten „floor fields“ wiedergegeben, hierbei handelt es sich um die Ausbreitung eines Feldes, die an einem bestimmten Punkt im Raum (meistens am Ausgang) startet. Durch eine höhere Intensität des Feldes am Ausgang als in weiter

entfernten Bereichen bewegen sich die Personen in Richtung der Zellen mit der höheren Intensität. Beim Floor Field Modell wird hierbei unterschieden zwischen dem „static floor field“ S_{ij} , das sich unabhängig von Personen im Raum ausbreitet und das keine Änderung während der Zeit erfährt, und dem „dynamic floor field“ D_{ij} , welches auf der Bewegung der Personen im Raum basiert. Vereinfacht kann gesagt werden, dass das dynamische Feld an den Stellen eine erhöhte Intensität hat, an denen sich mehr Personen bewegen. Durch Kopplung der beiden Felder kann eine realitätsnahe Bewegung von Personen erzeugt werden. Da das Modell mit einem *Parallelen Update* arbeitet, werden entstehenden Konflikte, d. h. mehrere Personen wollen auf die gleiche Zielzelle, durch den sogenannten „friction parameter“ μ gelöst. Es hat sich gezeigt [62], dass es bestimmte Vorteile hat, wenn nicht alle Konflikte aufgelöst werden, d. h. keine Person darf sich auf die Zielzelle bewegen, siehe hierzu auch Abbildung 2.4.

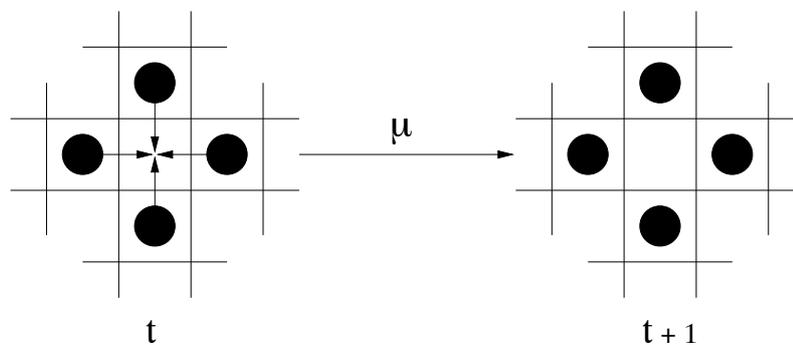


Abbildung 2.4.: Keine Bewegung auf eine Zielzelle basierend auf dem Friction Parameter μ [62]

2.3. Updatealgorithmen

Um Fußgängersimulationen durchführen zu können, ist die Auswahl des Updatealgorithmus' eines der wichtigsten Punkte bei der Modellentwicklung. Im Folgenden werden die für Fußgängersimulationen bekanntesten Updatealgorithmen vorgestellt und ihre Vor- und Nachteile erläutert. Im Einzelnen sind dies folgende Updatealgorithmen:

- *Ordered Sequential Update (back-to-front bzw. front-to-back)*,
- *Random Shuffled Update* und

- *Paralleler Update.*

Der *Random Sequential Update* und der *D'Hondt-Update* werden im Folgenden nicht weiter untersucht. Beim *Random Sequential Update* handelt es sich um einen Update, bei dem die gleiche Person immer wieder nacheinander ausgewählt werden kann (im gleichen Zeitschritt bzw. Subzeitschritt), es handelt sich um ein „Ziehen mit Zurücklegen“. Somit ist die Einhaltung der Zeitlinie¹ nicht gewährleistet, was bei Fußgängersimulationen einer der maßgeblichen Punkte ist. Zudem ist es möglich, dass nicht alle Personen innerhalb eines Zeitschrittes berücksichtigt werden, da der Zeitschritt in diesem Fall nur durch die Anzahl ausgewählter Personen definiert werden kann, wobei (wie bereits erwähnt) eine Person mehrfach ausgewählt werden kann.

Der *D'Hondt-Update* wird ebenfalls nicht weiter untersucht, da er nur beim Modell von Gipps und Marksjö [36] verwendet wird und eine Bewegung von mehreren Zellen pro Zeitschritt erfordert, seine Grundlagen werden jedoch erläutert. Es handelt sich bei diesem Update um eine bestimmte Reihenfolge, in der Personen mit unterschiedlich zugewiesener Wunschgeschwindigkeit ausgewählt werden, innerhalb eines Zeitschrittes sich zu bewegen bzw. ihre Zielzelle zu suchen und nach Möglichkeit anzusteuern. Ausgehend von einer Wunschgeschwindigkeit von fünf Zellen pro Sekunde ergibt sich folgende Reihenfolge in der Auswahl bzw. Bewegung der Personen:

$$5 - 4 - 3 - 5 - 2 - 4 - 5 - 3 - 4 - 5 - 1 - 4 - 5 - 3 - 2$$

Die genannte Reihenfolge ergibt sich bei Anwendung des „Sitzzuteilungsverfahrens“ nach D'Hondt [21] auf die unterschiedlichen Personengruppen. Es wird hierbei angenommen, dass es, wie bei einer politischen Wahl, fünf Gruppen gibt, hierbei spiegelt jede Gruppe eine Personengruppe mit unterschiedlicher Wunschgeschwindigkeit (1–5 Zellen pro Zeitschritt) wieder. Je nach Wunschgeschwindigkeit hat jede Gruppe die entsprechende Anzahl von „Sitzen“, d. h. die Gruppe mit fünf Zellen Wunschgeschwindigkeit erhält fünf „Sitze“, die mit drei Zellen Wunschgeschwindigkeit erhält drei „Sitze“. Nun wird nach dem Sitzzuteilungsverfahren nach D'Hondt die Sitzverteilung berechnet, es ist jedoch sichergestellt, dass jede Gruppe die ihr zustehende

¹Es soll dadurch ausgedrückt werden, dass durch die Wahl der Person, welche bewegt wird, sich innerhalb des Zeitschrittes die Umgebungsbedingungen (und dadurch mögliche Zielzellen) für andere Personen ändern können. So kann bspw. eine Person zu Beginn des Zeitschrittes von vier Personen umgeben sein, ist die Person mit ihrer Bewegung an der Reihe, so können bereits bspw. zwei der vier Personen die ursprüngliche Zelle verlassen haben, so dass sich nun andere Vorraussetzungen für die Bewegung der Person ergeben.

	Quotient für WG 5	Quotient für WG 4	Quotient für WG 3	Quotient für WG 2	Quotient für WG 1
$S = 0$	$5/1 = 5,00$	$4/1 = 4,00$	$3/1 = 3,00$	$2/1 = 2,00$	$1/1 = 1,00$
$S = 1$	$5/2 = 2,50$	$4/2 = 2,00$	$3/2 = 1,50$	$2/2 = 1,00$	
$S = 2$	$5/3 = 1,67$	$4/3 = 1,33$	$3/3 = 1,00$		
$S = 3$	$5/4 = 1,25$	$4/4 = 1,00$			
$S = 4$	$5/5 = 1,00$				

Tabelle 2.1.: D'Hondt-Quotienten für eine Wunschgeschwindigkeit „WG“ von maximal fünf Zellen pro Zeitschritt nach Gleichung 2.5

Anzahl von Sitzen erhält. Durch das D'Hondt-Verfahren ergibt sich nun eine Reihenfolge, in der die Sitze zugeteilt werden. Diese Reihenfolge ist die, die der vorher genannten Reihenfolge entspricht, wenn dabei eine gewisse Gleichmäßigkeit bei der Verteilung beachtet wird. Berechnet und verteilt wird dabei wie folgt: Es gilt die Gleichung

$$\text{D'Hondt-Quotient} = \frac{V}{S + 1}. \quad (2.5)$$

Hierbei ist V die Anzahl der erhaltenen Stimmen (hier: die Wunschgeschwindigkeit „WG“ in Zellen pro Zeitschritt) und S die Anzahl der bereits erhaltenen Sitze (hier: Anzahl der bereits durchgeführten/versuchten Bewegungen im Zeitschritt). Durch Berechnung aller möglichen D'Hondt-Quotienten ergibt sich Tabelle 2.1. Werden nun die D'Hondt-Quotienten in absteigender Reihenfolge sortiert, so ergibt sich bei Beachtung einer gewissen Gleichmäßigkeit die Reihenfolge

$$5 - 4 - 3 - 5 - 2 - 4 - 5 - 3 - 4 - 5 - 1 - 4 - 5 - 3 - 2.$$

Gleichmäßigkeit bedeutet, dass darauf geachtet wird, dass bei gleichem D'Hondt-Quotienten wie beispielsweise 1,0 versucht wird, die vorherige Reihenfolge einzuhalten. Damit die Person mit der Wunschgeschwindigkeit 1 nicht benachteiligt wird, ist diese bei allen mit 1,0 berechneten Quotienten an die vorderste Stelle zu setzen.

Würde alternativ das *Sainte-Laguë-Verfahren* angewandt, ein modifiziertes D'Hondt-Verfahren, welches die Reihenfolge der Sitzzuteilungen mit Hilfe des Quotienten

$$\text{Sainte-Laguë-Quotient} = \frac{V}{S + 0,5}. \quad (2.6)$$

berechnet, so ergäbe sich folgende Updatereihenfolge:

5 – 4 – 3 – 2 – 5 – 4 – 1 – 3 – 5 – 4 – 5 – 2 – 3 – 4 – 5.

Auch hierbei ist auf eine gewisse Gleichmäßigkeit zu achten. Im Vergleich zu der Reihenfolge nach D’Hondt fällt jedoch auf, dass die Person, deren Wunschgeschwindigkeit eine Zelle beträgt, viel früher bewegt wird.

Prinzipiell ist der *D’Hondt-Update* jedoch nicht genau definiert, da die Reihenfolge nur aussagt, welche Geschwindigkeitsgruppe zuerst bewegt wird. Wie die genaue Bewegung innerhalb dieser Gruppe durchzuführen ist, wird dadurch nicht bestimmt. Um eine eindeutige Definition des Bewegungsupdates nach D’Hondt zu erlangen, muss dieser mit einem der anderen Updatealgorithmen (z. B. mit einem *Parallelen Update*) gekoppelt werden, so dass in diesem Fall von einem *parallelem D’Hondt-Update* oder einem *Ordered Sequential back-to-front D’Hondt-Update* gesprochen werden müsste. Nur dadurch ist sichergestellt, dass auch die Bewegung innerhalb der einzelnen Geschwindigkeitsgruppen exakt definiert ist.

2.3.1. Ordered Sequential Updatealgorithmen

Die sogenannten *Ordered Sequential Updatealgorithmen* können im Bereich der Fußgängersimulation in die Unteralgorithmen *back-to-front* und *front-to-back* untergliedert werden. Prinzipiell bedeutet ein *Ordered Sequential Update*, dass die Personen in einer bestimmten Reihenfolge nacheinander bewegt werden, d. h. die Entscheidung der aktuell sich bewegenden Person hängt direkt von der Entscheidung aller Personen ab, die vor ihr im gleichen Zeitschritt bewegt worden sind bzw. die noch bewegt werden. Dadurch ist die Zeitlinie innerhalb des Zeitschrittes verletzt, da die Person (vereinfacht gesagt) „in die Zukunft blickt“, weil sie bereits Entscheidungen anderer Fußgänger kennt, nämlich die Entscheidungen der Fußgänger, die bereits bewegt worden sind.

Die Unterscheidung in *back-to-front* bzw. *front-to-back* hängt von der Reihenfolge ab, wie die Personen nacheinander bewegt werden. *Back-to-front* bedeutet hierbei, dass die Personen zuerst bewegt werden, die vom Ziel (dem Ausgang) am weitesten entfernt sind. Die Entfernung kann hierbei z. B. durch das zugrunde liegende Potentialfeld leicht bestimmt werden. Bei einem *front-to-back* Update werden dagegen die Personen zuerst bewegt, die dem Ziel am nächsten sind. Abbildung 2.5 zeigt das Ablaufdiagramm eines *Ordered Sequential Updates*. Wie bei allen Algorithmen gibt es auch beim *Ordered Sequential Updatealgorithmus* Vor- und Nachteile:

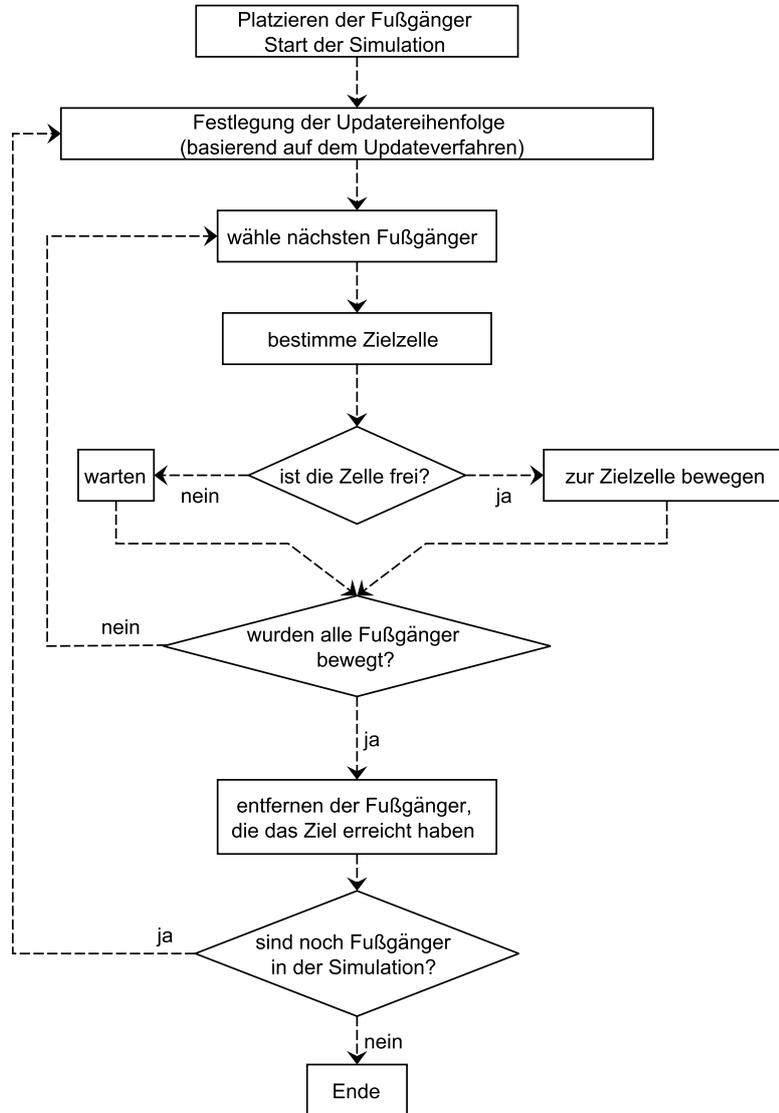


Abbildung 2.5.: Ablaufdiagramm eines *Ordered Sequential* bzw. *Random Shuffled Updates*. Je nach Festlegung der Updatereihenfolge kann ein *Ordered Sequential Update (front-to-back bzw. back-to-front)* oder ein *Random Shuffled Update* durchgeführt werden.

Vorteile:

- sehr leicht zu programmieren
- keine Konfliktlösung zu beachten, da immer nur eine Person betrachtet wird
- kann unter Umständen dazu genutzt werden „menschliches Verhalten“ wiederzugeben

Nachteile:

- Verletzung der Zeitlinie innerhalb des Updateschrittes
- nicht parallelisierbar

Die Möglichkeit, „menschliches Verhalten“ durch die Wahl der Updatereihenfolge bei deterministischen Modellen wiederzugeben, besteht darin, dass bei der Wahl eines *front-to-back* Updates ein eher kooperatives Verhalten oder auch trainiertes Verhalten der Personen wiedergegeben werden kann. Der Vergleich mit marschierenden Soldaten zeigt dies am besten: jeder Soldat weiß genau, was sein Vordermann tun wird, er kennt nämlich dessen Laufgeschwindigkeit und dessen Laufrichtung und zusätzlich weiß er bereits, welches Bein der vor ihm laufende Soldat nutzen wird. Deshalb entsteht auch beim Gleichschritt der Soldaten keine Startwelle wie beispielsweise beim Anfahren von Autos an einer Ampel. Dieses spezielle Wissen wird durch den *front-to-back* Update am besten wiedergegeben. Auch können durch den *front-to-back* Update höhere Dichten im Vergleich zum *back-to-front* Update erzeugt werden, da die freien Zellen zwischen Personen besser ausgefüllt werden können. Dies kann ebenfalls mit trainierten Soldaten verglichen werden, die schnell ein Gebäude verlassen müssen. Da die persönliche Distanz zwischen den einzelnen Soldaten in diesem Fall wegfällt (es handelt sich hierbei um eine Art „geordnetes Gedränge“), wird das entsprechende Gebäude schneller verlassen, als wenn es sich um „normale“ Personen handeln würde. Somit besteht zumindest eine theoretische Möglichkeit, bestimmte Verhaltensweisen nur mit Hilfe eines Updatealgorithmus’ zu simulieren.

2.3.2. Random Shuffled Update

Der *Random Shuffled Update* ist ebenfalls eine Variante eines *Ordered Sequential Updates*, da auch bei diesem Updatealgorithmus die Personen nacheinander bewegt werden. Der Unterschied liegt hierbei nur in der Sortierung, d. h. der Reihenfolge, in

der die Personen nacheinander bewegt werden. Beim *Random Shuffled Update* gibt es keine Sortierung der Personen in einer bestimmten Reihenfolge; die Reihenfolge, in der die Personen bewegt werden, ist zufällig. So kann z. B. zuerst eine Person recht nah am Ziel bewegt werden und danach eine Person, die sehr weit vom Ziel entfernt ist, es handelt sich deshalb ebenfalls um ein „Ziehen ohne Zurücklegen“. Da die Reihenfolge der Personen zufällig ist, kann der *Random Shuffled Update* auch einen *Ordered Sequential Update (back-to-front)* oder einen *Ordered Sequential Update (front-to-back)* wiedergeben, beides sind deshalb Spezialfälle des *Random Shuffled Updates*. Wird beim *Random Shuffled Update* jedoch die von einer Person vor der Bewegung belegte Zelle erst im nächsten Zeitschritt freigeben, so kann dadurch ein *Paralleler Update* ansatzweise realisiert werden, da hierbei keine Konfliktlösungen notwendig sind.

Die Vor- und Nachteile dieses Updates entsprechen in etwa denen des *Ordered Sequential Updates*, nur kann durch den *Random Shuffled Update* nicht gezielt ein spezielles menschliches Verhalten wiedergeben werden, da die Reihenfolge der Personenbewegung zufällig ist. Abbildung 2.5 zeigt ebenfalls das Ablaufdiagramm eines *Random Shuffled Updates*.

2.3.3. Paralleler Update

Der *Parallele Update* ist keine Variante eines *Ordered Sequential Updates*, da hier keine Reihenfolge der Bewegung oder Auswahl von Personen zugrunde liegt. Beim *Parallelen Update* werden für alle Personen gleichzeitig die entsprechenden Zielzellen ermittelt, hierbei „weiß“ eine Person nicht, wohin andere Personen bewegt werden, wie z. B. beim *Ordered Sequential Update*; die Wahl der Zielzelle ist deshalb unabhängig von „den Wünschen“ anderer Personen. Da es jedoch nicht vermieden werden kann, dass beispielweise zwei Personen die gleiche Zielzelle anstreben, ist deshalb ein Konfliktlösungsverfahren zu implementieren. Dies bedeutet, dass eine (oder keine) Person ausgewählt wird, die ausgewählte Zielzelle zu erreichen. Dieser Parameter μ wird meistens über eine Wahrscheinlichkeitsfunktion ermittelt; die Person, die beispielsweise den höchsten Wert von μ hat, darf zur Zielzelle wechseln. Hier gibt es jedoch diverse Ansätze, mit dem Problem der Konfliktlösung umzugehen, so dass jedes Modell seine eigene Konfliktlösung implementiert hat, sobald es auf einem *Parallelen Update* basiert. Abbildung 2.6 zeigt das Ablaufdiagramm eines *Parallelen Updates*.

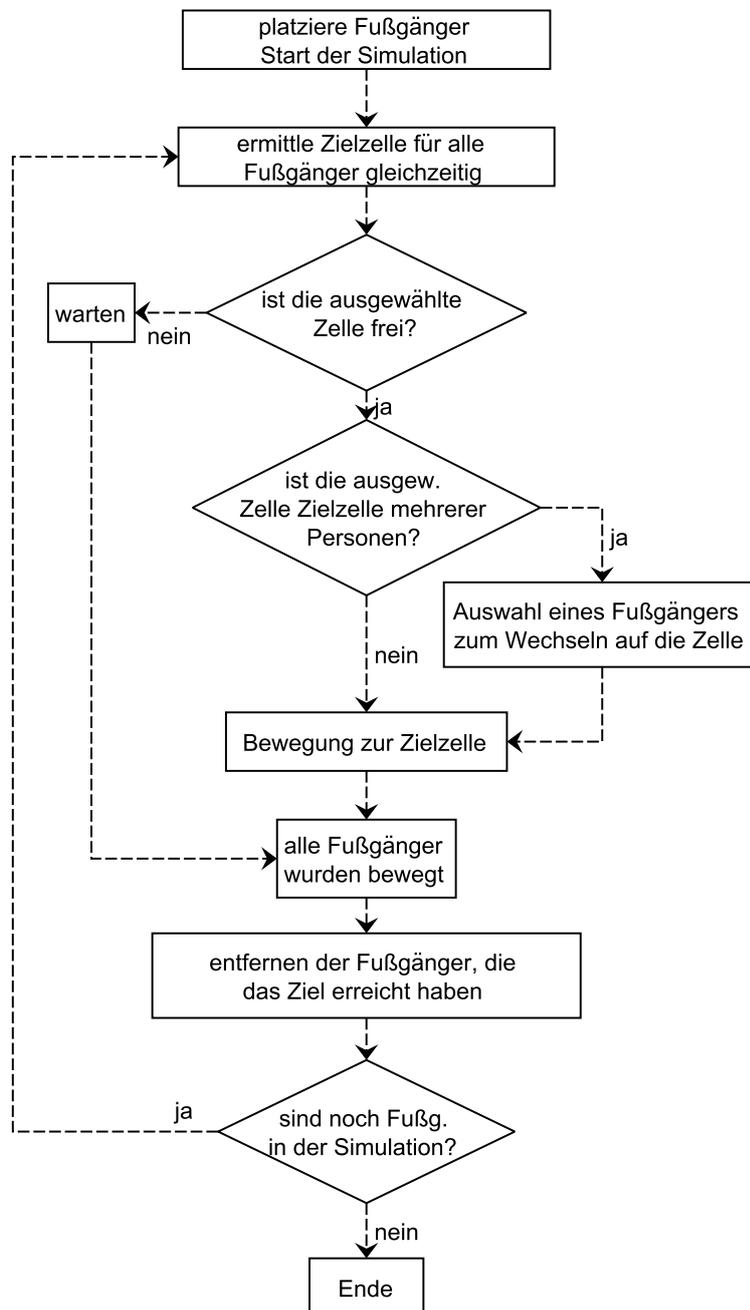


Abbildung 2.6.: Ablaufdiagramm eines *Parallelen Updates*

Wie bei den *Ordered Sequential Updates*, hat auch der *Parallele Update* Vor- und Nachteile:

Vorteile:

- leicht parallelisierbar, da die Zielzellenwahl unabhängig erfolgt
- spiegelt die Realität wieder, da Personen sich ebenfalls unabhängig verhalten
- keine Verletzung der Zeitlinie

Nachteile:

- Konflikte müssen gelöst werden
- teilweise umfangreicher zu programmieren
- keine unterschiedlichen Verhaltensweisen möglich wie beim *Ordered Sequential Update*

Prinzipiell sollte jedes Modell auf einem *Parallelen Update* basieren, da dadurch reales Verhalten am besten wiedergegeben wird. Konfliktlösungsverfahren können ebenfalls dazu beitragen, dass die Bewegungen realitätsnaher gestaltet werden, auch können dadurch Kollisionen simuliert werden, die es auch im „normalen Leben“ gibt. Zudem besteht dadurch die Möglichkeit, eine Art „Vorzugsbehandlung“ einiger Personen wiederzugeben. Die umfangreicheren Programmieraufgaben sind jedenfalls kein Hinderungsgrund, diesen Update zu implementieren.

2.3.4. Vergleichende Darstellung der einzelnen Updatealgorithmen

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Updatealgorithmen werden im Folgenden sowohl qualitativ als auch quantitativ gegenübergestellt. Am Beispiel sehr einfacher Geometrien (ein einfacher Raum mit einer Tür, ein Hörsaal und ein schmaler Flur) zeigen, wie sich die verschiedenen Updatealgorithmen hinsichtlich Dynamik und Evakuierungszeit unterscheiden. Hierzu wurden auf Grundlage der Ablaufdiagramme aus Abbildung 2.5 und 2.6 die verschiedenen Updatealgorithmen in einen Zellularautomaten implementiert. Als Zeitschritt wurde eine Iteration der jeweiligen Updateschleife gewählt, d. h. die folgenden Ergebnisse werden nicht in Sekunden, sondern in Zeitschritten angegeben. Pro Zeitschritt kann sich eine Per-

son maximal eine Zelle weiterbewegen. Es wurde eine *von Neumann Nachbarschaft* implementiert, so dass sichergestellt wird, dass die Entfernung, die eine Person pro Zeitschritt zurücklegt, wirklich nur eine Zelle beträgt. Bei Implementierung einer *Moore Nachbarschaft* hätte eine Korrekturfunktion sicherstellen müssen, dass Bewegungen „über Eck“ ausgeglichen werden, somit hätten einzelne Personen sich in einigen Zeitschritten nicht bewegen dürfen, was wiederum Auswirkungen auf die Dynamik des Systems im Ganzen gehabt hätte. Durch die Implementierung der „von Neumann Nachbarschaft“ werden diese Probleme umgangen, so dass dadurch gezielt der Einfluss des Updatealgorithmus’ sichtbar wird. Im Falle der Konfliktlösung wird mit Hilfe einer gleichverteilten Zufallszahl die Person ermittelt, die auf die von mehreren Personen beanspruchte Zielzelle bewegt wird. Da der Code mit Fortran95 programmiert wurde, wurde hierzu die Funktion `RANDOM_NUMBER()` genutzt. Die Richtung, in der sich die Personen bewegen, wird durch ein Potentialfeld bestimmt (siehe Abbildungen 2.7 und 2.9). Haben zwei oder mehrere Zellen den gleichen Potentialwert, so wird dort ebenfalls mit einer gleichverteilten Zufallszahl entschieden, welche Zelle als Zielzelle ausgewählt wird. Zusätzlich wurde untersucht, inwieweit sich die Beeinflussung der Wahl der Zielzelle durch eine Wahrscheinlichkeitsfunktion auf das Ergebnis auswirkt, Ergebnisse hierzu sind im Abschnitt 2.3.5 dokumentiert.

10 × 10 m Raum

Die in Abbildung 2.8 dargestellten Diagramme zeigen auf, dass sowohl der *Parallele Update* als auch der *Ordered Sequential Update back-to-front* eine fast gleiche Anzahl von Zeitschritten benötigen, um einen 10 × 10 m Raum mit 1,2 m Türöffnung bei einer Belegung von 200 Personen zu evakuieren. Wie zu erwarten, benötigt der *Ordered Sequential Update front-to-back* die wenigsten Zeitschritte für die Evakuierung des Raumes, die Ergebnisse des *Random Sequential Updates* liegen erwartungsgemäß zwischen den beiden bereits benannten Updatealgorithmen. Zudem ist zu erkennen, dass die Spannweite der Ergebnisse beim *Ordered Sequential Update front-to-back* wesentlich geringer ist als bei den drei anderen Updatealgorithmen, dies kann dadurch erklärt werden, dass der *Ordered Sequential Update front-to-back* eine Art „Systemoptimierung“ mit sich bringt, da die Personen zuerst bewegt werden, die dem Ausgang am nächsten stehen. Für weiter entfernt stehende Personen werden dadurch gezielt Plätze frei, welche sogleich von diesen ausgefüllt werden, so dass insgesamt betrachtet ein „kompakteres“ System mit weniger Möglichkeiten entsteht, was letztendlich zu der geringen Spannweite der Ergebnisse führt.

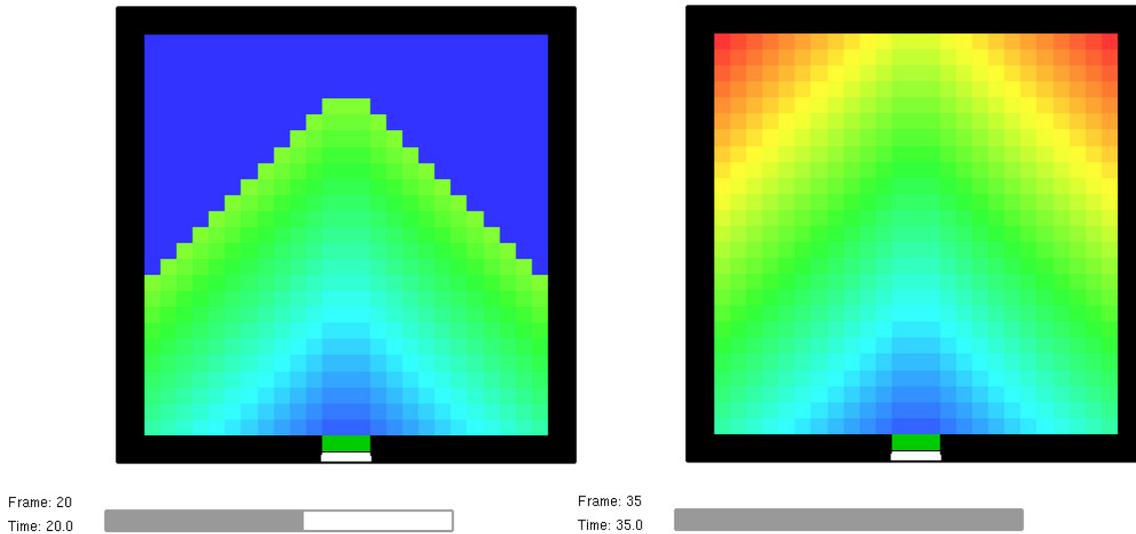
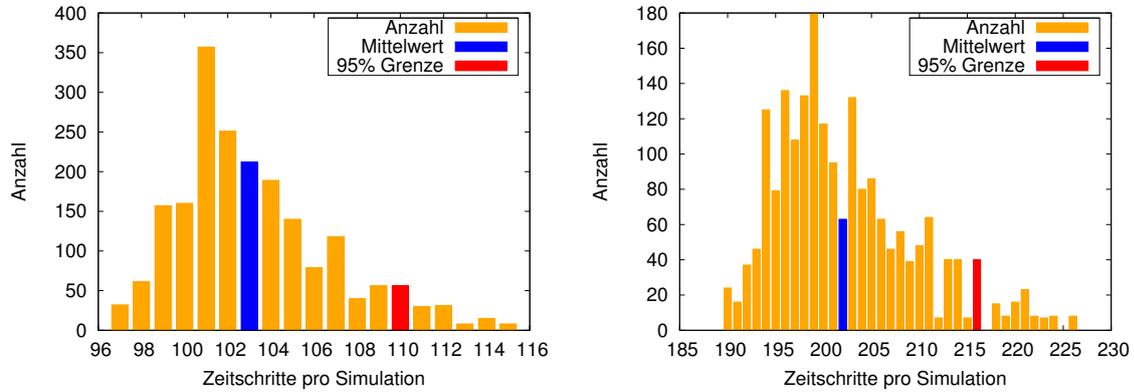


Abbildung 2.7.: Ausbreitung eines Potentialfeldes mit einer *von Neumann Nachbarschaft* nach 20 (links) und 35 (rechts) Iterationen in einem Raum. Die Färbung gibt an wie nahe (blau) bzw. wie weit weg (rot) sich die jeweilige Zelle vom Ausgang befindet. Die blaue Fläche (links) im oberen Teil bedeutet, dass sich das Potential nach 20 Iterationen noch nicht im gesamten Raum ausgebreitet hat.

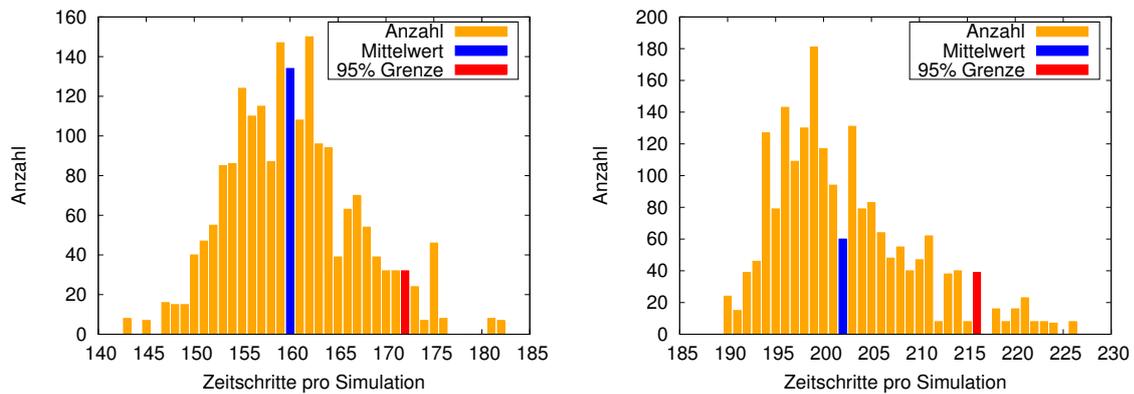
Hörsaal

Der untersuchte Hörsaal entspricht der Abbildung 2.9. Zwischen den einzelnen Bänken (schwarze Balken in der Mitte des Raumes) wurden je Reihe 17 Personen platziert, insgesamt wurden somit 119 Personen simuliert (vollbesetzte Reihen). Die Ergebnisse der einzelnen Updatealgorithmen sind in Abbildung 2.10 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen hierbei genau auf, wie der jeweilige Updatealgorithmus einen Einfluss auf die Anzahl der Zeitschritte pro Simulation hat. Beim Vergleich des *Ordered Sequential Update front-to-back* (siehe Abbildung 2.10(a)) und dem *Ordered Sequential Update back-to-front* (siehe Abbildung 2.10(b)) fällt auf, dass der *Ordered Sequential Update front-to-back* bei einer geraden Anzahl von Zeitschritten beginnt, während der *Ordered Sequential Update back-to-front* bzw. der *Parallele Update* mit einer ungeraden Anzahl von Zeitschritten beginnt und diese auch in weiteren Durchläufen berechnet (der *Random Shuffled Update* beginnt „eher zufällig“ mit einer ungeraden Anzahl von Zeitschritten). Dies lässt sich anhand der Art der Bewegung, die durch den jeweilige Updatealgorithmus bestimmt wird, erklären. In Abbildung 2.11(a) und 2.11(b) wird ersichtlich, dass je nach Update eine gerade (*Ordered Sequential Update front-to-back*) oder ungerade (*Ordered Sequential Update*



(a) Ordered Sequential Update front-to-back

(b) Ordered Sequential Update back-to-front



(c) Random Shuffled Update

(d) Paralleler Update

Abbildung 2.8.: Benötigte Zeitschritte zur Evakuierung eines 10×10 m Raumes (siehe Abb. 2.7) mit 1, 2 m Türöffnung bei verschiedenen Updatealgorithmen (200 Personen). Es wurden 2000 Simulationen durchläufe durchgeführt. Der nach unten gerundete Mittelwert gibt an, wie viele Zeitschritte im Mittel benötigt werden, die 95 % Grenze zeigt an, wie viele Zeitschritte von nicht mehr als 95 % aller Simulationen benötigt wurden.

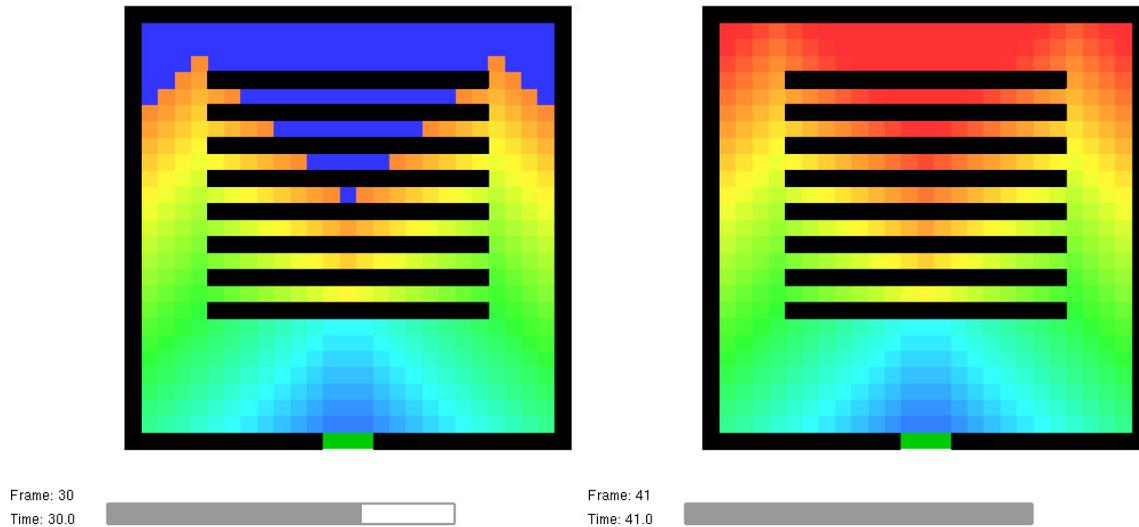
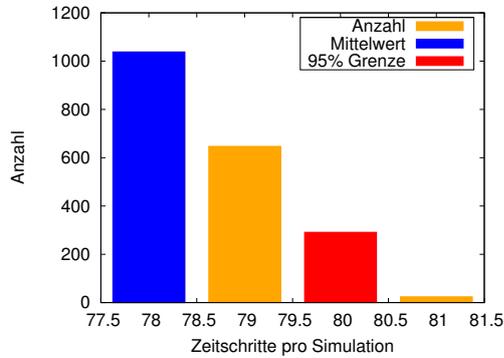


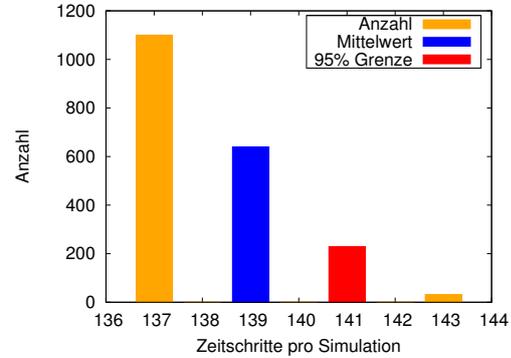
Abbildung 2.9.: Ausbreitung eines Potentialfeldes mit einer *von Neumann Nachbarschaft* nach 30 (links) und 41 (rechts) Iterationen in einem Hörsaal. Die Färbung gibt, an wie nahe (blau) bzw. wie weit weg (rot) sich die jeweilige Zelle vom Ausgang befindet. Die blaue Fläche (links) im oberen Teil bedeutet, dass sich das Potential nach 30 Iterationen noch nicht im gesamten Hörsaal ausgebreitet hat.

back-to-front) Anzahl von Zeitschritten benötigt wird, um den Hörsaal zu evakuieren. Dies stimmt mit den Ergebnissen aus Abbildung 2.10 überein, da zumindest eine gerade Anzahl (hier: 78 Zeitschritte) beim *Ordered Sequential Update front-to-back* notwendig ist um den Hörsaal zu evakuieren. Dass auch eine ungerade Anzahl von Zeitschritten möglich ist, zeigt Abbildung 2.12. Je nach Verteilung der Personen vor dem Ausgang ist es möglich, dass auch eine ungerade Anzahl von Zeitschritten berechnet wird, um den Hörsaal zu evakuieren. Die unterschiedliche Personenverteilung basiert auf der zufälligen Wahl der entsprechend nächsten Zielzelle im Update, da die Personen bei zwei möglichen Zielzellen mit dem gleichen Potential zufällig (gleichverteilt) eine Zelle auswählen. Beim *Ordered Sequential Update back-to-front* oder beim *Parallelen Update* ist die Anzahl der benötigten Zeitschritte immer gerade, dies zeigt Abbildung 2.11(b). Dass hierbei die Personenverteilung vor dem Ausgang wie beim *Ordered Sequential Update front-to-back* keine Rolle spielt, wird aus Abbildung 2.13 ersichtlich.

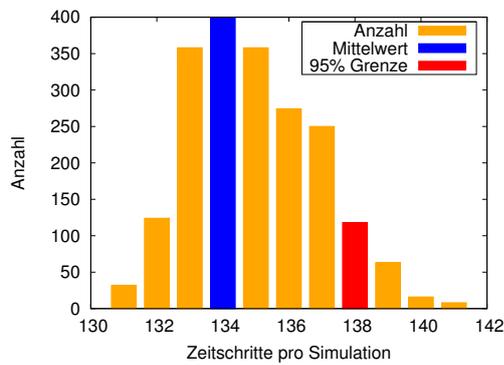
Wird eine andere Geometrie gewählt wie in Abbildung 2.11(c) bzw. 2.11(d), d. h. wird eine Zellenreihe zwischen Ausgang und „Bänken“ eingefügt, so hat dies zur Folge, dass beim *Ordered Sequential Update front-to-back* eine zumindest ungerade



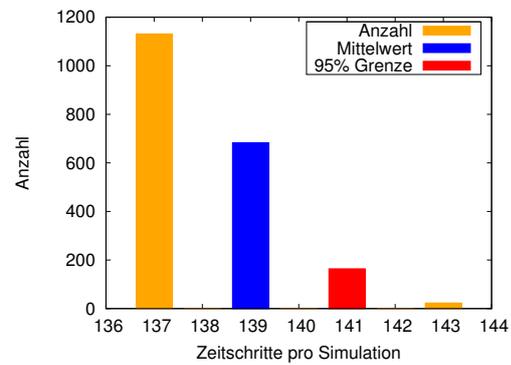
(a) Ordered Sequential Update front-to-back



(b) Ordered Sequential Update back-to-front



(c) Random Shuffled Update



(d) Paralleler Update

Abbildung 2.10.: Benötigte Zeitschritte zur Evakuierung eines Hörsaales (siehe Abb. 2.9 bzw. 2.11(a) und 2.11(b)) mit 1, 2 m Türöffnung bei verschiedenen Updatealgorithmen (119 Personen). Es wurden 2000 Simulationendurchläufe durchgeführt. Der nach unten gerundete Mittelwert gibt an, wie viele Zeitschritte im Mittel benötigt werden, die 95 % Grenze zeigt an, wie viele Zeitschritte von nicht mehr als 95 % aller Simulationen benötigt wurden.

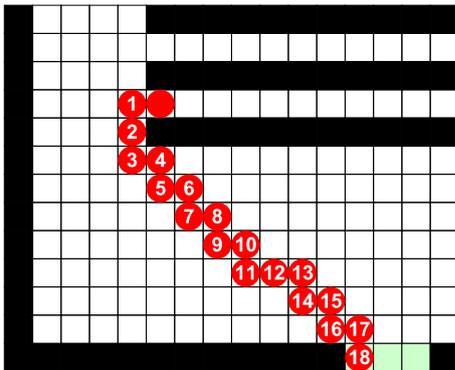
Anzahl von Zeitschritten benötigt wird, beim *Ordered Sequential Update back-to-front* oder beim *Parallelen Update* sind jedoch weiterhin nur eine ungerade Anzahl von Zeitschritten möglich. Dies wird durch die Diagramme in Abbildung 2.14 bestätigt.

2.3.5. Einfluss von Wahrscheinlichkeitsfunktionen auf die Zielzellenwahl

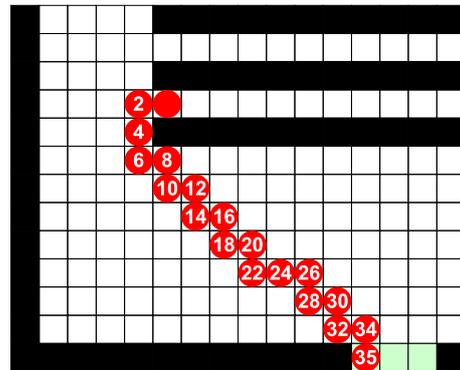
Die vorherigen Untersuchungen haben aufgezeigt, dass bei einer Verwendung von Updatealgorithmen mit sehr geringem Wahrscheinlichkeitsanteil die Ergebnisse recht ähnlich sind, d. h. sie haben keine große Spannbreite, die Abbildungen 2.10(a), 2.10(b) und 2.10(d) verdeutlichen dies. Um „natürlichere“ Ergebnisse zu erhalten, wurde in Anlehnung an [146] eine Wahrscheinlichkeitsfunktion zur Zielzellenwahl implementiert:

$$p_i = e^{\left(\frac{(P_0 - P_i) + S}{S}\right)} \quad (2.7)$$

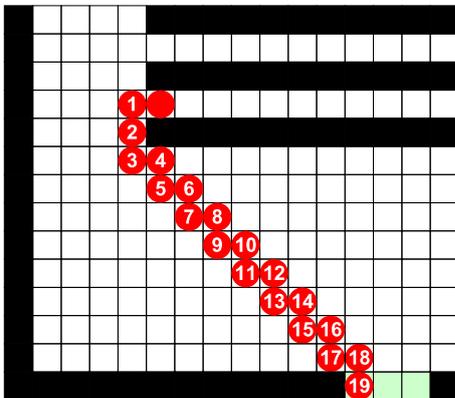
p_i ist hierbei die Wahrscheinlichkeit, im nächsten Zeitschritt die Zelle i als Zielzelle zu wählen, P_0 und P_i sind die jeweiligen Potentialwerte der aktuellen Zelle P_0 und einer möglichen Zielzelle P_i , S (Sway) ist ein frei wählbarer Parameter. Die Wahrscheinlichkeiten wurden im Anschluss an die Berechnung normiert und mit Hilfe einer normalverteilten Zufallszahl wurde die entsprechende Zielzelle bestimmt. Abbildung 2.15 zeigt einige mögliche Exponenten der e-Funktion in Abhängigkeit von S auf, auf der die Wahrscheinlichkeitsbetrachtung der Zielzellenwahl basiert. Abbildung 2.16 zeigt den Einfluss des Parameters S auf die ermittelte Anzahl von Zeitschritten für den betrachteten Hörsaal bei Anwendung des *Parallelen Updates*. Wie zu erwarten, erhöht sich die Streuung der benötigten Zeitschritte mit zunehmendem Parameter S , gleichzeitig erhöht sich auch die mittlere Anzahl von benötigten Zeitschritten. Dies ist dadurch zu erklären, dass mit größer werdendem Parameter S die Wahrscheinlichkeit steigt, dass eine Zelle gewählt wird, die entgegen der Zielrichtung liegt. Die dadurch entstehenden „Rückwärtsbewegungen“ verursachen Stauungen, welche sich zunehmend auf die Gesamtzeitschrittzahl auswirken. Um jedoch eine realitätsnahe Bewegung von Personen zu erhalten, sollte eine Wahrscheinlichkeitsfunktion implementiert werden, damit die Personen nicht strikt dem Potential folgen. Damit können z. B. Faktoren wie „Ausweichen“ oder „Verzögern“ abgebildet werden. Je nach Modell können hierbei natürlich andere Wahrscheinlichkeitsfunktionen gewählt werden; die hier dargestellte Funktion soll nur als einfaches Beispiel den Einfluss einer solchen Funktion auf die Rechenergebnisse verdeutlichen.



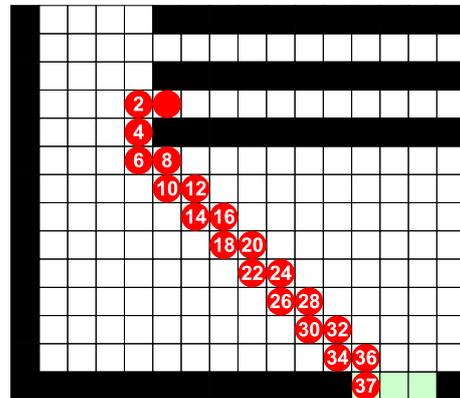
(a) *Ordered Sequential Update front-to-back*



(b) *Ordered Sequential Update back-to-front oder Paralleler Update*



(c) *Ordered Sequential Update front-to-back*



(d) *Ordered Sequential Update back-to-front oder Paralleler Update*

Abbildung 2.11.: Einfluss verschiedener Updatealgorithmen auf die Ermittlung von Zeitschritten bei der Evakuierung eines Hörsaales. Die obere Reihe (Abb. 2.11(a) und 2.11(b)) zeigt die ursprüngliche Untersuchung, die untere Reihe (Abb. 2.11(c) und 2.11(d)) eine Untersuchung, in der die Sitzreihen eine Zellenreihe nach oben verschoben sind. Die Ziffern geben den jeweiligen Zeitschritt der Person im Verlauf des Weges wieder. Es wird angenommen, dass direkt vor der Person ebenfalls eine Person bewegt wird. Die Wahl der jeweiligen Zielzelle folgt strikt dem Potentialverlauf.

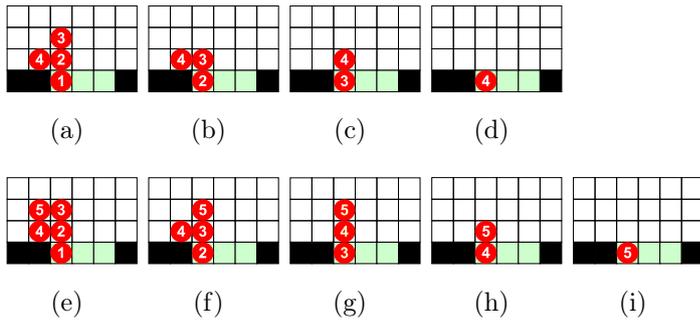


Abbildung 2.12.: Einfluss der Personenplatzierung vor dem Ausgang bei einem *Ordered Sequential Update front-to-back*. Die Nummerierung gibt an, in welcher Reihenfolge die Personen bewegt werden. Jede Figur zeigt einen Zeitschritt, jede Reihe entspricht einer abgeschlossenen Bewegung für 4 Personen (obere Reihe) oder 5 Personen (untere Reihe). Die Wahl der jeweiligen Zielzelle folgt strikt dem Potentialverlauf.

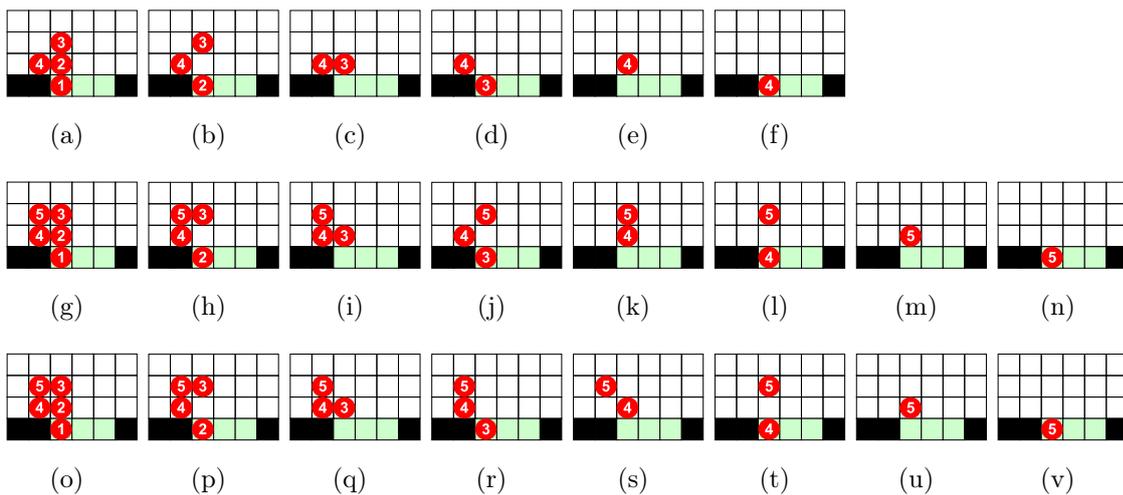
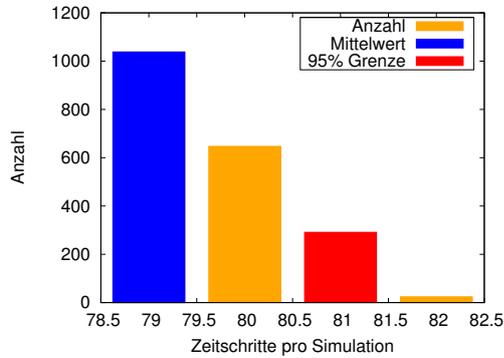
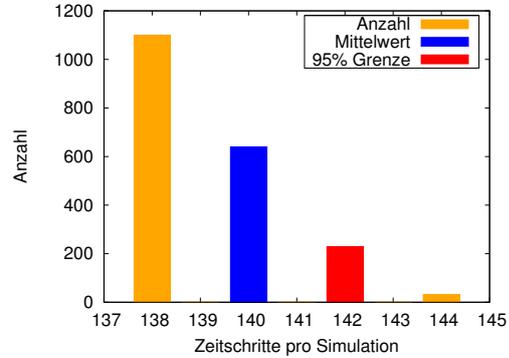


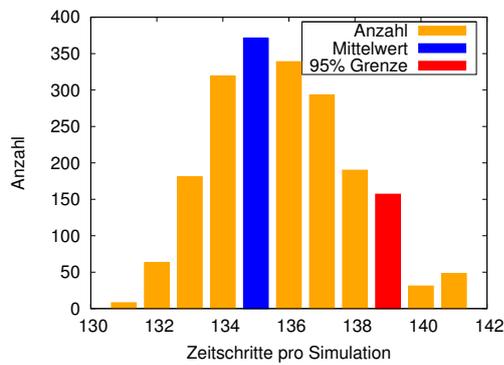
Abbildung 2.13.: Einfluss der Personenplatzierung vor dem Ausgang bei einem *Ordered Sequential Update back-to-front* oder einem *Parallelen Update*. Die Nummerierung gibt an, in welcher Reihenfolge die Personen bewegt werden. Jede Figur zeigt einen Zeitschritt, jede Reihe entspricht einer abgeschlossenen Bewegung für 4 Personen (obere Reihe) oder 5 Personen (mittlere und untere Reihe). Welche Zelle bei zwei Möglichen gewählt wird, ist dabei nicht entscheidend (siehe mittlere Reihe 2.13(j) und 2.13(k) sowie untere Reihe 2.13(r) und 2.13(s)). Die Wahl der jeweiligen Zielzelle folgt strikt dem Potentialverlauf.



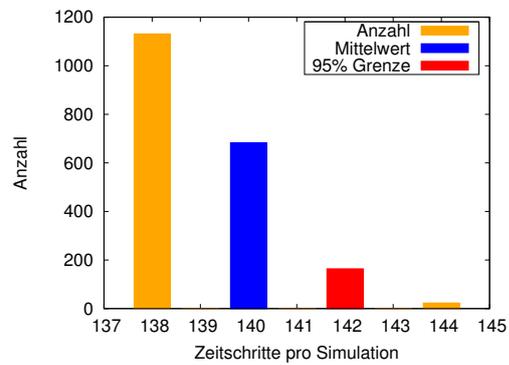
(a) Ordered Sequential Update front-to-back



(b) Ordered Sequential Update back-to-front



(c) Random Shuffled Update



(d) Paralleler Update

Abbildung 2.14.: Benötigte Zeitschritte zur Evakuierung eines Hörsaales (siehe Abb. 2.11(c) und 2.11(d)) mit 1, 2 m Türöffnung bei verschiedenen Updatealgorithmen (119 Personen). Es wurden 2000 Simulationen durchgeföhrt. Der nach unten gerundete Mittelwert gibt an, wie viele Zeitschritte im Mittel benötigt werden, die 95 % Grenze zeigt an, wie viele Zeitschritte von nicht mehr als 95 % aller Simulationen benötigt wurden.

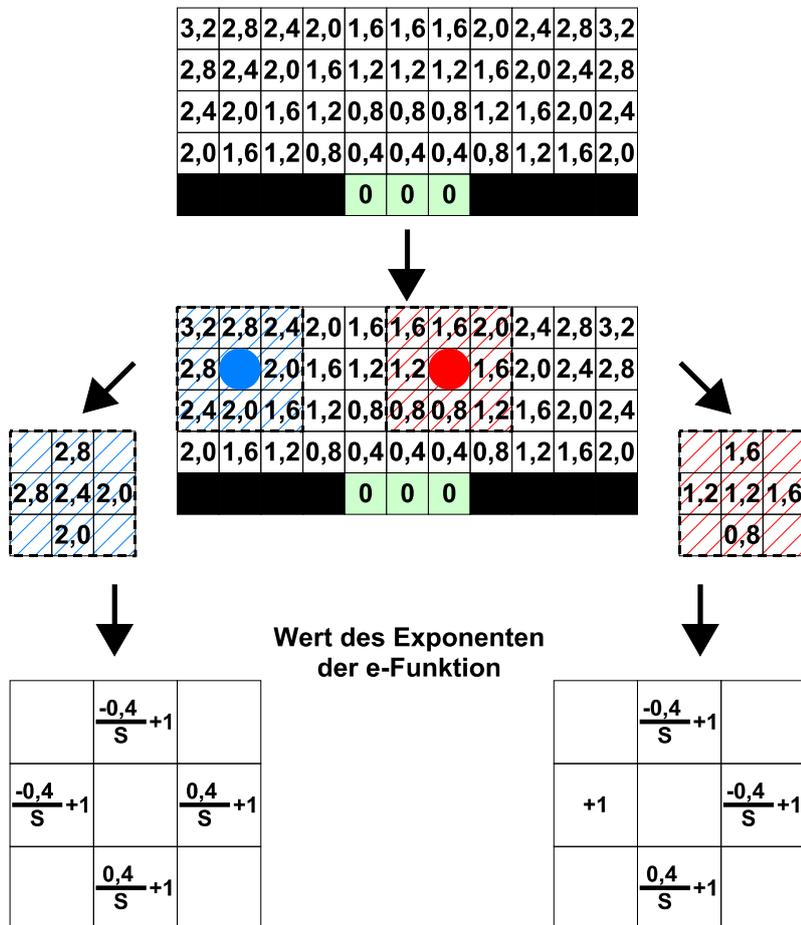
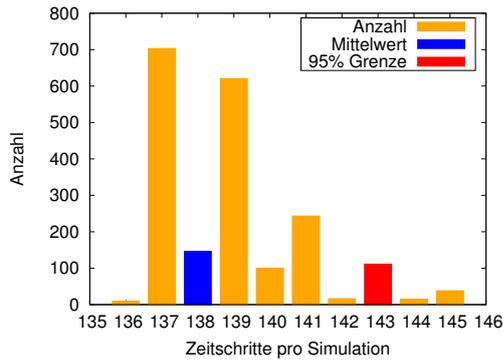
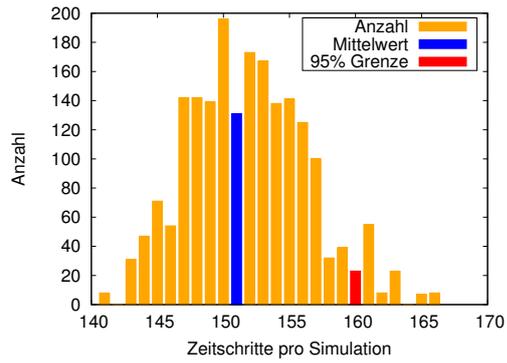


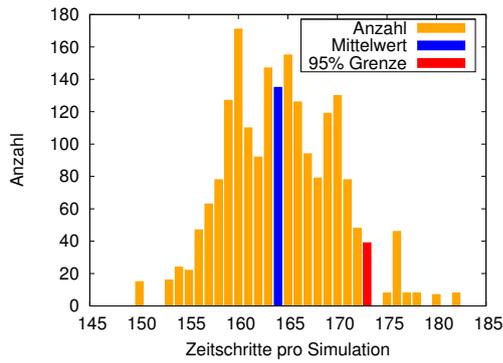
Abbildung 2.15.: Berechnung des Wertes des Exponenten der Wahrscheinlichkeitsfunktion für die Zielzellenwahl in Abhängigkeit vom Parameter S .



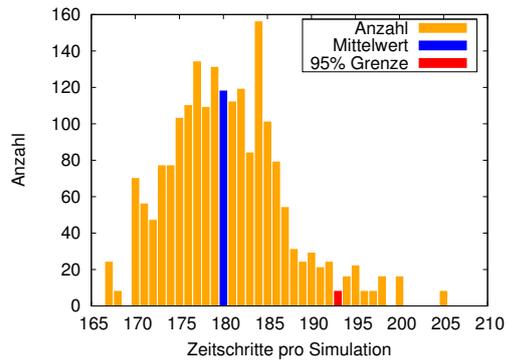
(a) Paralleler Update mit $S = 0,1$



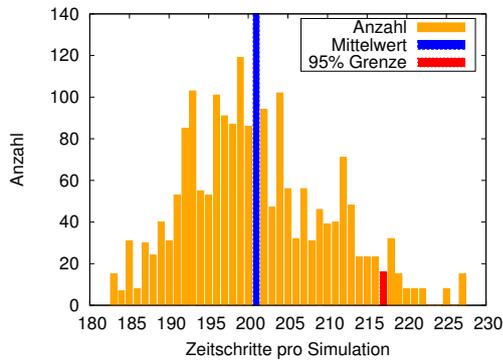
(b) Paralleler Update mit $S = 0,2$



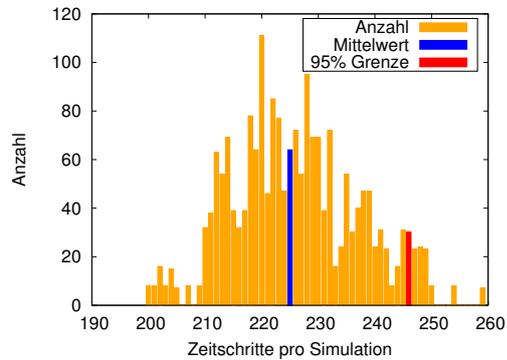
(c) Paralleler Update mit $S = 0,3$



(d) Paralleler Update mit $S = 0,4$



(e) Paralleler Update mit $S = 0,5$



(f) Paralleler Update mit $S = 0,6$

Abbildung 2.16.: Einfluss einer Wahrscheinlichkeitsfunktion bei der Zielzellenwahl auf Zeitschritte zur Evakuierung eines Hörsaales (siehe Abb. 2.11(b)) mit 1,2 m Türöffnung bei *Parallelem Update* (119 Personen). Es wurden 2000 Simulationsdurchläufe durchgeführt. Der nach unten gerundete Mittelwert gibt an, wie viele Zeitschritte im Mittel benötigt werden, die 95 % Grenze zeigt an, wie viele Zeitschritte von nicht mehr als 95 % aller Simulationen benötigt wurden.

2.4. Einfluss verschiedener Kenngrößen auf die Evakuierungszeit

Wie bereits gezeigt wurde, kann die Wahl des Updates einen entscheidenden Einfluss auf die Anzahl der zur Evakuierung eines Raumes notwendigen Zeitschritte haben. Da kommerzielle Software jedoch nur eine Art des Updates enthält, besteht keine Möglichkeit, diesen Update zu ändern. Die folgenden Untersuchungen sollen nun aufzeigen, wie sich verschiedene Kenngrößen bzw. Parameter auf die Ermittlung von Evakuierungszeiten realer Gebäude auswirken, diese sind

- Personenplatzierung
- freie Gehgeschwindigkeit
- Reaktionszeit

Alle Untersuchungen wurden mit dem Programm „PedGo Version 2.2.4“ der Firma TraffGo-HT durchgeführt [64,146]. Es handelt sich hierbei um einen Zellularautomaten mit der Zellgröße 40×40 cm. Als Updatealgorithmus liegt der *Random Shuffled Update* zugrunde. Um eine möglichst große Bandbreite der Ergebnisse zu erhalten, wurden vier verschiedene Gebäudetypen simuliert, teilweise auch mit unterschiedlichen Personenanzahlen im Gebäude. Folgende Gebäudetypen wurden untersucht:

- Schule
- Bürohochhaus
- Hotel
- Einkaufszentrum („Shopping Mall“)

2.4.1. Beschreibung der einzelnen Gebäudetypen

Im Folgenden werden die einzelnen Gebäude, die für die Untersuchung herangezogen wurden, näher beschrieben.

Schule

Das untersuchte Schulgebäude besteht aus vier Geschossen (Erdgeschoss sowie drei Obergeschosse). Im Erdgeschoss befinden sich die Verwaltungsräume sowie Hausmeister- und Lehrerzimmer, im 1. Obergeschoss befinden sich 15 Klassenzimmer sowie spezielle Unterrichtsräume für Biologie, Chemie, Physik. Die beiden weiteren Obergeschosse dienen ausschließlich der Unterbringung von Klassenzimmern (2. OG = 32 Klassenzimmer, 3. OG = 30 Klassenzimmer). Bei der Untersuchung wurde angenommen, dass sich Personen nur jeweils in den Klassenzimmern befinden, weitere Personen, wie beispielsweise Lehrer im Lehrerzimmer oder die Sekretariatsangestellten, wurden nicht berücksichtigt, da es sich hierbei um eine sehr kleine Anzahl von Personen handelt (ca. 25 – 30 Personen), die zusätzlich eigene Fluchtwege aus dem Gebäude haben. Unter der Annahme, dass sich in einem Klassenzimmer 25 Personen aufhalten, ergibt sich eine Gesamtpersonenzahl von 1700 Schülern. Es standen jeweils drei Treppenhäuser zur Verfügung, wobei ein Treppenhaus in der Mitte des Gebäudes liegt. Aufgrund der homogenen Struktur der Personengruppe wurden hier keine Untersuchungen mit unterschiedlichen freien Gehgeschwindigkeiten durchgeführt. Abbildung 2.17(a) zeigt den Grundriss eines Regelgeschosses, die Maße des Grundrisses betragen ca. 60 m × 100 m.

Bürohochhaus

Das untersuchte Bürohochhaus besteht aus drei Kellergeschossen, einem Erdgeschoss, einem Zwischengeschoss und 22 Obergeschossen, wobei nur die Obergeschosse als mit Personen belegt angesehen werden. Insgesamt befanden sich bei einer Evakuierungsübung [128] 427 Personen in dem Gebäude. Es wurde sowohl bei der Evakuierungsübung als auch in der Simulation nur ein Treppenraum genutzt. In Anlehnung an die BGI 650 [148] ergibt sich eine maximale Personenzahl von ca. 880 Personen. Es wurden deshalb Untersuchungen sowohl mit dieser Personenzahl während der Übung durchgeführt, als auch mit 20, 30 und 40 Personen pro Stockwerk. Abbildung 2.17(b) zeigt den Grundriss eines Regelgeschosses des Hochhauses, die Maße des Grundrisses betragen ca. 15 m × 35 m.

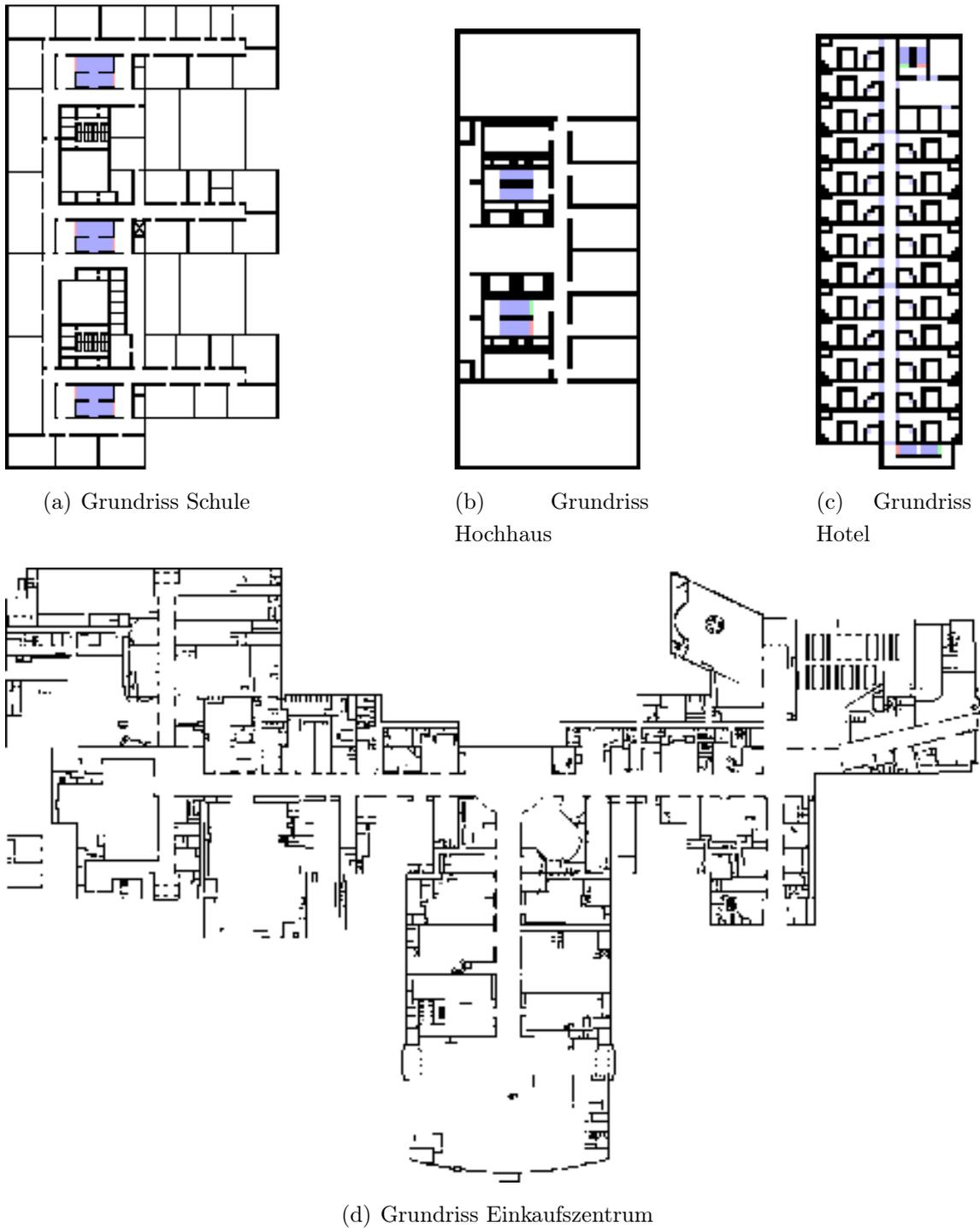


Abbildung 2.17.: Grundrisse verschiedener Gebäude (nicht maßstäblich) wie im Programm PedGo modelliert. Die in hellblau markierten Bereiche stellen Treppen dar, die hellroten bzw. hellgrünen Flächen sind Sprungflächen für Stockwerkswechsel. Die grauen Flächen im Hotel zwischen den Wänden stellen jeweils Türen dar.

Hotel

Das untersuchte Hotel besteht aus einem Erdgeschoss und drei Obergeschossen. Während das Erdgeschoss aus Verwaltung, Frühstücksraum, Rezeption sowie 15 Gästezimmern besteht, befinden sich in jedem Obergeschoss ausschließlich 23 Gästezimmer. Unter der Annahme, dass jedes Gästezimmer mit zwei Personen (Vollbelegung) belegt ist, ergibt sich eine Gesamtpersonenanzahl von 168 Personen. Das Hotel verfügt über zwei Treppenträume, die auch für die Simulation zur Verfügung standen. Abbildung 2.17(c) zeigt den Grundriss eines Regelgeschosses, die Maße des Grundrisses betragen ca. 13 m × 40 m.

Einkaufszentrum

Das Einkaufszentrum besteht aus einem Erdgeschoss mit ca. 100 Verkaufsläden. Alle Ausgänge führen direkt ins Freie. Maximal 4500 Personen befinden sich gleichzeitig im Einkaufszentrum. Abbildung 2.17(d) zeigt den Grundriss, die Maße des Grundrisses betragen ca. 230 m × 350 m.

2.4.2. Einfluss der Personenplatzierung

Werden Evakuierungsanalysen von Gebäuden durchgeführt, so stellt sich immer wieder die Frage, wo sich die Personen genau befinden. Durch eine unterschiedliche Positionierung von Personen in einem Gebäude soll gezeigt werden, in wie weit sich die Standortwahl von Personen in Gebäuden auf das Ergebnis hinsichtlich der Evakuierungsdauer auswirkt. Es wurden deshalb bei allen vier untersuchten Gebäuden die Personen nach folgenden (soweit möglich) Schemata verteilt:

- Personen befinden sich nur in den Räumen (beim Einkaufszentrum: nur in der Ladenstraße)
- Personen befinden sich zufällig verteilt im gesamten Geschoss
- Gleichverteilung der Personen in den Obergeschossen (im Hotel bereits Standard, im erdgeschossigen Einkaufszentrum nicht möglich)

Abbildung 2.18 zeigt die unterschiedlichen anfänglichen Belegungsarten (nur in Räumen verteilt bzw. zufällig verteilt im gesamten Geschoss, d. h. eine homogene Personenverteilung) anhand des Schulgebäudes. Bei der Untersuchung „Gleichverteilung

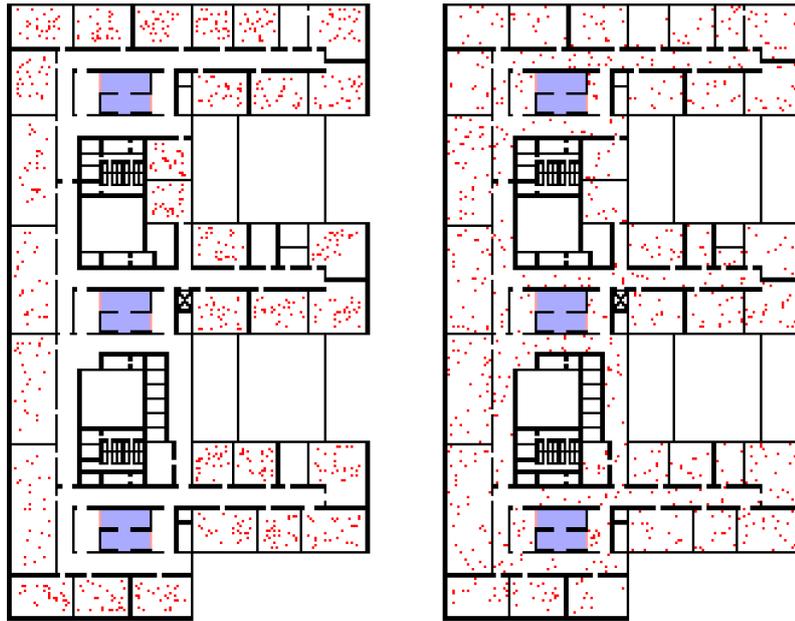


Abbildung 2.18.: Unterschiedliche Arten der Personenverteilung in einem Geschoss. Die linke Abbildung zeigt die Personenverteilung „Personen nur im Raum“, die rechte Abbildung die zufällige homogene Personenverteilung im gesamten Geschoss. Rote Punkte stellen die einzelnen Personen dar (566 Personen pro Geschoss).

in Obergeschossen“ wurde die gesamte Personenanzahl durch die Anzahl der Obergeschosse geteilt, die dann gerundete Anzahl der Personen wurde zufällig in dem jeweiligen Geschoss platziert. Am Beispiel der Schule wurden die Simulationen wie folgt durchgeführt: 1700 Personen geteilt durch 3 Obergeschosse ergibt 566 Personen pro Obergeschoss, die dann in dem jeweiligen Geschoss zufällig verteilt wurden. Insgesamt wurden so 1698 Personen im Schulgebäude platziert, Tabelle 2.2 zeigt die Ergebnisse. Alle Simulationen wurden mit der gleichen Personengruppe durchgeführt.

Wie aus den Ergebnissen zu ersehen ist, spielt es praktisch keine Rolle, wo genau die einzelnen Personen platziert sind. Beim Betrachten des Simulationsverlaufs fällt auf, dass es jeweils Stellen im Gebäude gibt, bei denen ein Personenstau oder zumindest eine sehr hohe Dichte entsteht (> 3 Personen pro m^2). Dadurch hat es keinen Einfluss, an welchem Ort im Gebäude die Personen platziert sind, da sie früher oder später immer einen dieser Bereiche erreichen und somit warten müssen. Es kann somit für die hier dargestellten Szenarien festgestellt werden, dass bei Gebäuden, bei denen es zu Stauungen oder hohen Dichten während des Evakuierungsverlaufs

	Bürohochhaus (427 Personen)	Hotel (168 Personen)	Schule (1700 Personen)	Einkaufszentrum (1500 Personen)
(1)	8, 58min	2, 25min	4, 67min	5, 67min
(2)	8, 50min	2, 33min	4, 67min	5, 40min
(3)	8, 50min	–	4, 50min	–

Tabelle 2.2.: Einfluss der Personenverteilung in Gebäuden auf die Gesamtevakuierungsdauer. (1) zeigt die Ergebnisse bei Verteilung der Personen nur in den Räumen (bzw. beim Einkaufszentrum in der Ladenstraße), (2) zeigt die zufällige Verteilung der Personen im gesamten Geschoss, (3) zeigt die Gleichverteilung der Personen in den Obergeschossen. Es wurden jeweils 300 Simulationsdurchläufe durchgeführt, die Werte zeigen die 95 % Grenze ohne Reaktionszeit

kommt, die genaue Personenplatzierung keine bzw. nur eine sehr untergeordnete Rolle spielt.

2.4.3. Einfluss der Reaktionszeit

Im Zuge der Evakuierungsforschung sind Reaktionszeiten eine der meist diskutierten Größen, da diese nicht im Sinne eines mathematischen Modells wie die Personenbewegung im Gebäude beschrieben sind; sie sind vielmehr vom individuellen Verhalten der jeweiligen Person oder Personengruppe abhängig, wie bereits in Kapitel 1.2 diskutiert. Während freie Gehgeschwindigkeiten und Personenflüsse durch Engstellen in der Vergangenheit recht gut untersucht und dokumentiert wurden, ist die Fragestellung nach der „richtigen“ Reaktionszeit bis heute immer noch unbeantwortet. Dies mag daran liegen, dass es viele unterschiedliche Einflussfaktoren auf die Reaktionszeit gibt, wie beispielsweise die aktuelle Tätigkeit oder die Wahrnehmung des Alarmsignals. Eigene Erfahrungen beim Auslösen eines Feueralarms in Schulen haben gezeigt, dass dort sehr differenziert reagiert wird. Während beim ersten Ertönen des Alarms nach den Sommerferien sofort alle Personen aus dem Gebäude strömen (es ist bekannt, dass in diesem Zeitraum die jährliche Evakuierungsübung stattfindet), ist beim Ertönen des Alarms zu späteren Zeiten fast keine Reaktion zu erkennen. Meistens wird davon ausgegangen, dass es sich um einen Fehl- oder Falschalarm handelt, oder es wird aus dem Fenster geschaut, ob es „irgendwo brennt“. Diese unterschiedlichen Reaktionen zeigen auf, dass es trotz gleichen Alarmsignals zu unterschiedlichen Verhaltensweisen kommen kann. Auch in Einkaufszentren kann

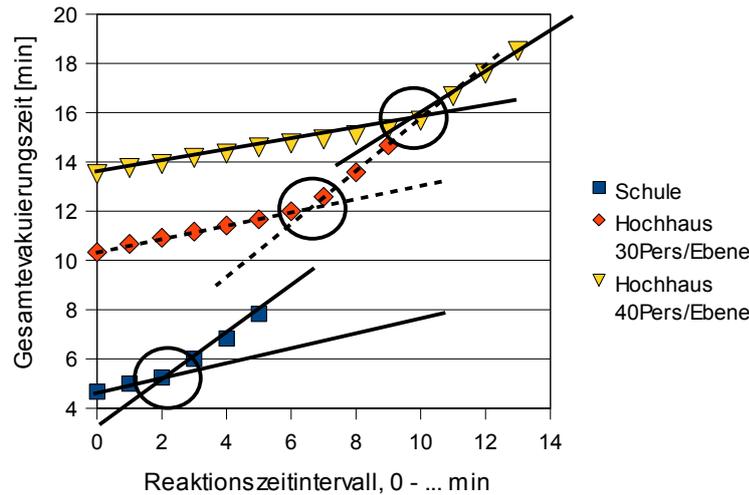


Abbildung 2.19.: Einfluss des Reaktionszeitintervalls auf die Gesamtevakuierungszeit. Am Beispiel des Schulgebäudes und des Bürohochhauses mit unterschiedlicher Personenbelegung ist zu erkennen, dass es einen Grenzwert gibt (Schnittpunkt der beiden Linien, dargestellt durch den Kreis), ab dem sich der Einfluss des Reaktionszeitintervalls an der Gesamtevakuierungszeit ändert. Vor dem Grenzwert ist der Anteil des Reaktionszeitintervalls an der Gesamtreaktionszeit kleiner als eine Ausweitung des Intervalls, nach dem Grenzwert ist der Einfluss bzgl. der Verlängerung der Gesamtevakuierungszeit mit einer Ausweitung des Reaktionszeitintervall identisch.

es zu unterschiedlichen Handlungen kommen: während einzelne Personen sofort das Gebäude verlassen, suchen andere zuerst ihre Angehörigen, um mit ihnen zusammen das Gebäude zu verlassen. Es ist somit sehr schwer, eine in jeder Situation „korrekte“ Reaktionszeit zu ermitteln. Da eine Verzögerung, d. h. ein späterer Beginn der Evakuierung, sich nur addierend auf die Gesamtevakuierungszeit auswirkt, stellt sich vielmehr die Frage, wie sich einzelne Verzögerungen innerhalb der Reaktionszeit auf die Gesamtevakuierungszeit und die Dynamik innerhalb der Evakuierung auswirken. Dies lässt sich an einem einfachen Beispiel erläutern. Unter der Annahme, dass in einem Gebäude die Reaktionszeit mit 1 – 2 min angegeben ist und die berechnete Gesamtevakuierungsdauer 6 min beträgt, so ist bekannt, dass eine Reaktionszeit von 2 – 3 min die Gesamtevakuierungsdauer um eine Minute auf 7 min erhöht. Es stellt sich jedoch die Frage, ob dieser Sachverhalt auch bei einer Reaktionszeit von 1 – 3 min gilt.

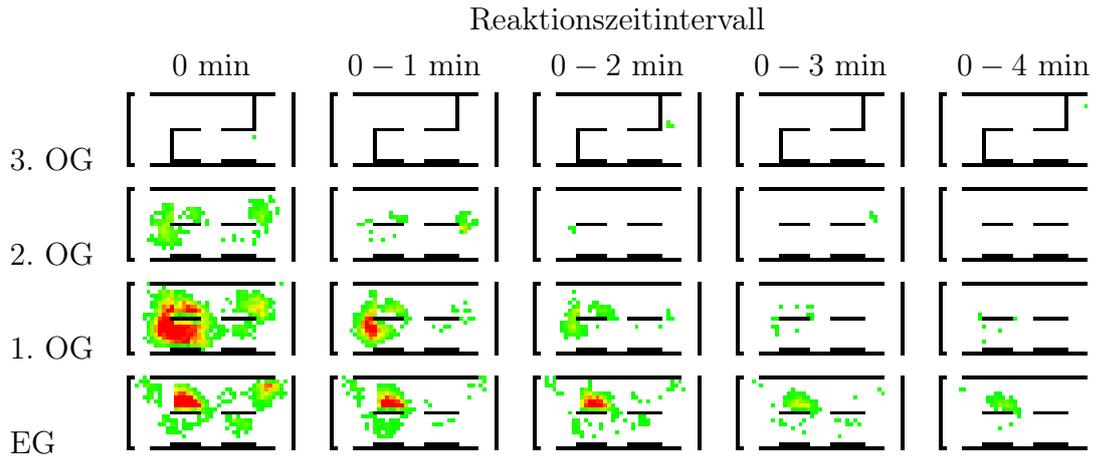


Tabelle 2.3.: Einfluss des Reaktionszeitintervalls auf Stauungen im Treppenhaus am Beispiel des Schulgebäudes. Rot bedeutet viele Stauungen, grün wenig Stauungen, weiß gar keine Stauungen.

Die durchgeführten Untersuchungen an den vier verschiedenen Gebäudetypen zeigen auf, dass die Verlängerung der Reaktionszeit nur unter gewissen Umständen auf die Gesamtevakuiierungsdauer addiert werden kann. Es ergibt sich vielmehr ein Grenzwert, ab dem die verlängerte Reaktionszeit komplett zur Gesamtevakuiierungszeit addiert werden kann. Vor diesem Grenzwert leistet die verlängerte Reaktionszeit nur einen anteiligen Beitrag zur Verlängerung der Gesamtevakuiierungszeit (siehe Abbildung 2.19). Die Reaktionszeiten wurden hierbei als gleichverteilt angenommen um sicherzustellen, dass auch das Intervall der Reaktionszeit gleichmäßig mit Personen ausgefüllt wird. Abbildung 2.19 zeigt ebenfalls am Beispiel des Schulgebäudes, dass auch unterschiedliche Reaktionszeiten die Ergebnisse der vorherigen Untersuchung hinsichtlich Personenplatzierung im Gebäude nicht beeinflussen. Vielmehr ist festzustellen, dass bei einer Verlängerung der Reaktionszeit um bis zu 2 min sich die Gesamtevakuiierungsdauer um jeweils 20 Sekunden je Minute zusätzlicher Reaktionszeit verlängert. Ab einer Reaktionszeit von 0 – 3 min erhöht sich die Gesamtevakuiierungszeit jeweils um eine weitere Minute je weiterer Minute Reaktionszeit. Ähnlich verhält es sich auch bei der Verlängerung von Reaktionszeiten bei dem untersuchten Bürohochhaus, dem Einkaufszentrum und dem Hotel. Beim Bürohochhaus mit unterschiedlichen Anfangspersonenzahlen ist zudem zu sehen, dass diese „Grenze“ sich mit steigender Anfangspersonenzahl immer weiter verschiebt, d. h. während bei einer Ausgangspersonenanzahl von 20 Personen pro Geschoss fast keine Grenze zu erkennen ist, liegt diese bei 30 Personen pro Geschoss bei ca. 7 min, bei 40 Personen pro Geschoss bei ca. 10 min. Dieses „Phänomen“ lässt sich durch

eine veränderte Dynamik des Personenstroms während der Simulation erklären. Tabelle 2.3 zeigt hierzu die Stauprognose in einem Treppenraum des Schulgebäudes über alle Geschosse für verschiedene Reaktionszeitintervalle. Während es bei einer Simulation ohne Reaktionszeitintervall zu Stauungen im Treppenraumbereich kommt, verschwindet diese bei immer länger werdenden Reaktionszeitintervallen. Dies bedeutet, dass ein längeres Reaktionszeitintervall dazu genutzt werden kann, dass Stauungen innerhalb der Simulation vermieden werden können. Der Effekt der verminderten Stauungen kann dadurch erklärt werden, dass im Falle des Schulgebäudes weniger Personen gleichzeitig in das Treppenhaus strömen, wodurch sich zwangsläufig „günstigere“ Stauprognosen ergeben.

2.4.4. Einfluss der freien Gehgeschwindigkeit

Auf Grundlage des Hotel-, Bürohochhaus- und Einkaufszentrumgrundrisses wurde untersucht, wie sich die Wahl der freien Gehgeschwindigkeit auf die Ergebnisse der Gesamtevakuiierungsdauer auswirkt. Es wurden zwei Personengruppen definiert: eine langsame Personengruppe und eine schnelle. Die beiden Gruppen wurden auf Grundlage der in PedGo verfügbaren Einstellungen wie folgt definiert:

langsam:

min: 2 cells/s, max: 5 cells/s, mean: 3 cells/s, standard deviation: 1 cell/s

schnell:

min: 3 cells/s, max: 5 cells/s, mean: 4 cells/s, standard deviation: 1 cell/s

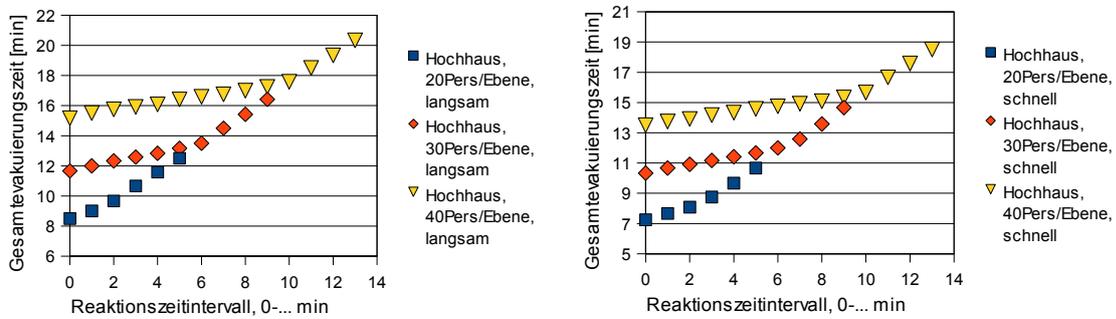
Beide Gruppen werden auch von einem „Dawdle“-Parameter beeinflusst („Trödelwahrscheinlichkeit“) um Geschwindigkeiten zu ermöglichen, die nicht in das 0,4 m/s-Raster des Zellularautomaten fallen. Bei jeder Gruppe wurden die gleichen „Dawdle“-Parameter verwendet:

min: 0 %, max: 30 %, mean: 15 %, standard deviation: 5 %.

Die Ergebnisse zeigen auf, dass sich die Charakteristik der Evakuierung nicht verändert, d. h. die durch das Reaktionszeitintervall vorgegebene Grenze bleibt weiterhin bestehen (siehe speziell Abbildung 2.20). Die Ergebnisse zeigen vielmehr, dass die Personen nur schneller das Gebäude verlassen, der Abstand hierbei bleibt bei allen Reaktionszeitintervallen gleich, wie aus Tabelle 2.4 für das Schulgebäude und Abbildung 2.20 für das Bürohochhaus entnommen werden kann.

Reaktionszeitintervall	Evakuierungszeit	
	langsame Gruppe	schnelle Gruppe
0 min	135 Sekunden	120 Sekunden
0 – 1 min	160 Sekunden	140 Sekunden
0 – 2 min	215 Sekunden	195 Sekunden
0 – 3 min	275 Sekunden	255 Sekunden
0 – 4 min	335 Sekunden	315 Sekunden
0 – 5 min	395 Sekunden	370 Sekunden

Tabelle 2.4.: Einfluss der freien Gehgeschwindigkeit auf die Evakuierungszeit eines Hotelgebäudes



(a) langsame Personengruppe

(b) schnelle Personengruppe

Abbildung 2.20.: Einfluss der freien Gehgeschwindigkeit auf Evakuierungszeiten am Beispiel des Bürohochhauses. Die Personen wurden in der entsprechenden Anzahl zufällig in den einzelnen Stockwerken verteilt.

2.5. Vergleich kommerzieller Programme mit Räumungsübungen

Bei der Anwendung von Evakuierungssimulationsprogrammen stellt sich immer wieder die Frage der Prognosegenauigkeit dieser Programme. Anhand von Räumungsübungen, die in den 1970er Jahren durchgeführt wurden [128] wird gezeigt, in wie weit die Ergebnisse der einzelnen Programme (Aseri 4.1, buildingExodus V 4.0, Level 2, PedGo 2.2.4 und Simulex 11.1.3) übereinstimmen. Im Zuge der damaligen Untersuchungen wurden 3 Bürohochhäuser evakuiert, es handelt sich hierbei um das Bayer-Hochhaus (siehe Abbildung 2.21), das Mannesmann-Hochhaus (siehe Abbildung 2.22) und das Unilever-Hochhaus (siehe Abbildung 2.23).

Die von Seeger und John durchgeführten Untersuchungen [128] wurden in den 1970er Jahren während der normalen Arbeitszeit in den Hochhäusern der Firmen Bayer, Mannesmann und Unilever durchgeführt. In der Publikation wurde die jeweilige Gesamtanzahl der Personen innerhalb des Gebäudes erfasst sowie die Anzahl von Personen innerhalb ausgewählter Flure. In diesen ausgewählten Fluren wurde zusätzlich ermittelt, wann die erste und die letzte Person den Treppenraum betritt. Hierzu wurden Kameraaufnahmen und persönliche Beobachtungen zu Hilfe genommen. In den Simulationsprogrammen wurde die Anzahl der Personen anhand der vorgegebenen Werte festgesetzt. Bei Fluren, in denen keine Personenanzahl bekannt war, wurde eine zufällige Verteilung der Personen gewählt. Die Zusammensetzung der Personen hinsichtlich des Alters wurde anhand der Arbeitsamstatistik des Jahres 1978 [2] ermittelt, worauf basierend auf den Untersuchungen von Weidmann [151] die freien Gehgeschwindigkeiten für jede Altersgruppe ermittelt wurden. Tabelle 2.5 zeigt die entsprechend angewandten Verteilungen.

Beim Vergleich der Ergebnisse (siehe Tabellen 2.6, 2.7 und 2.8) der jeweiligen Hochhäuser fällt auf, dass die zur Verfügung stehenden Programme die Evakuierungszeiten für das gesamte Gebäude recht treffend vorhersagen. Dies gilt für alle drei Hochhäuser. Hinsichtlich der Prognose für einzelne Etagen gibt es dagegen Abweichungen zwischen Programmen und Übung. Diese sind dadurch zu erklären, dass im Falle der Evakuierung einer einzelnen Etage das individuelle Verhalten der einzelnen Personen einen wesentlich stärkeren Einfluss auf die Evakuierungszeit hat als bei einem kompletten Gebäude. Beendet beispielsweise ein Mitarbeiter noch ein Telefongespräch erst in zwei Minuten nach Ertönen des Signals, so ist er die letzte Person, die die Etage verlässt, falls alle anderen Personen sofort nach Ertönen

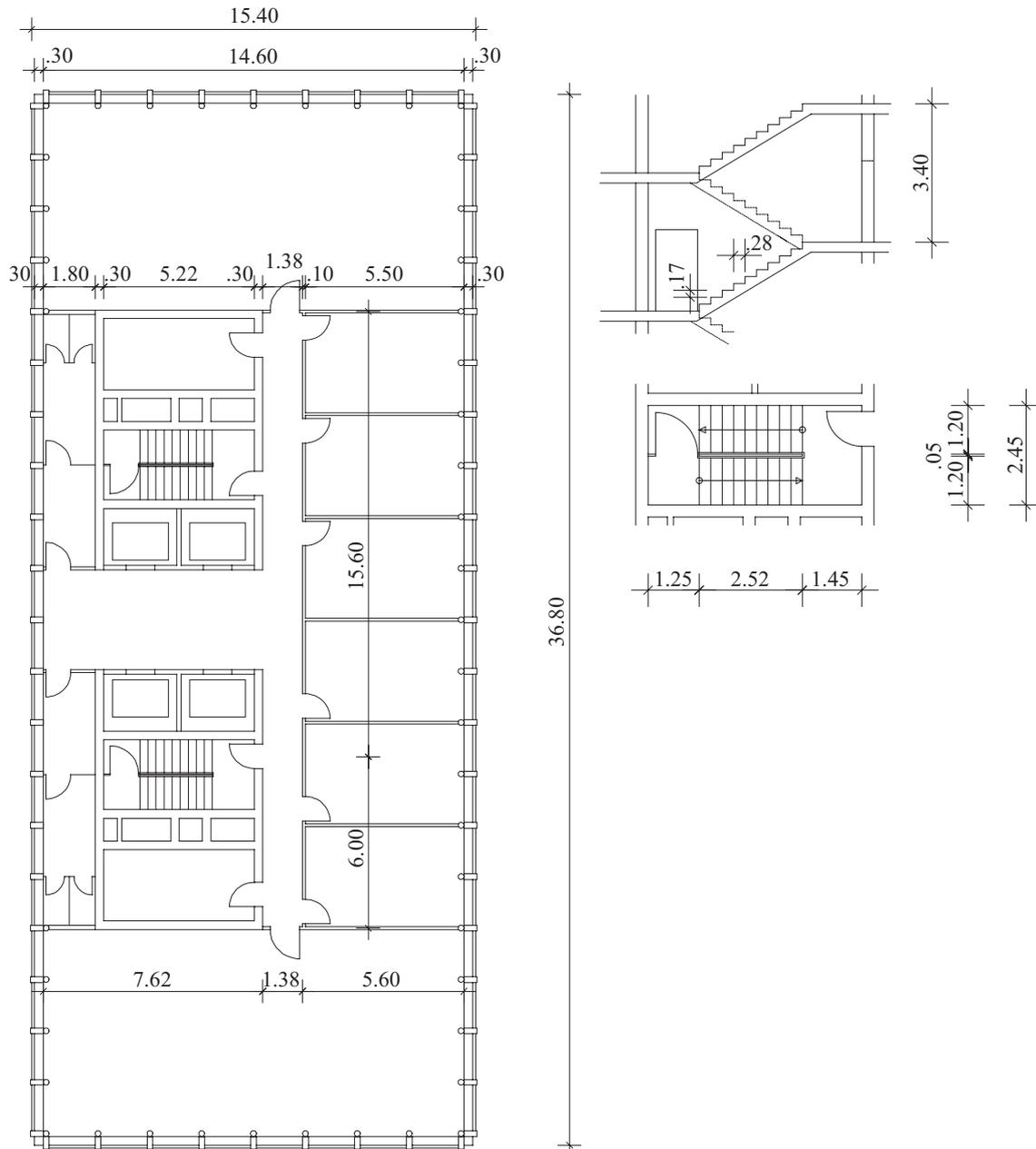


Abbildung 2.22.: Grundriss des Mannesmann-Hochhauses [128]

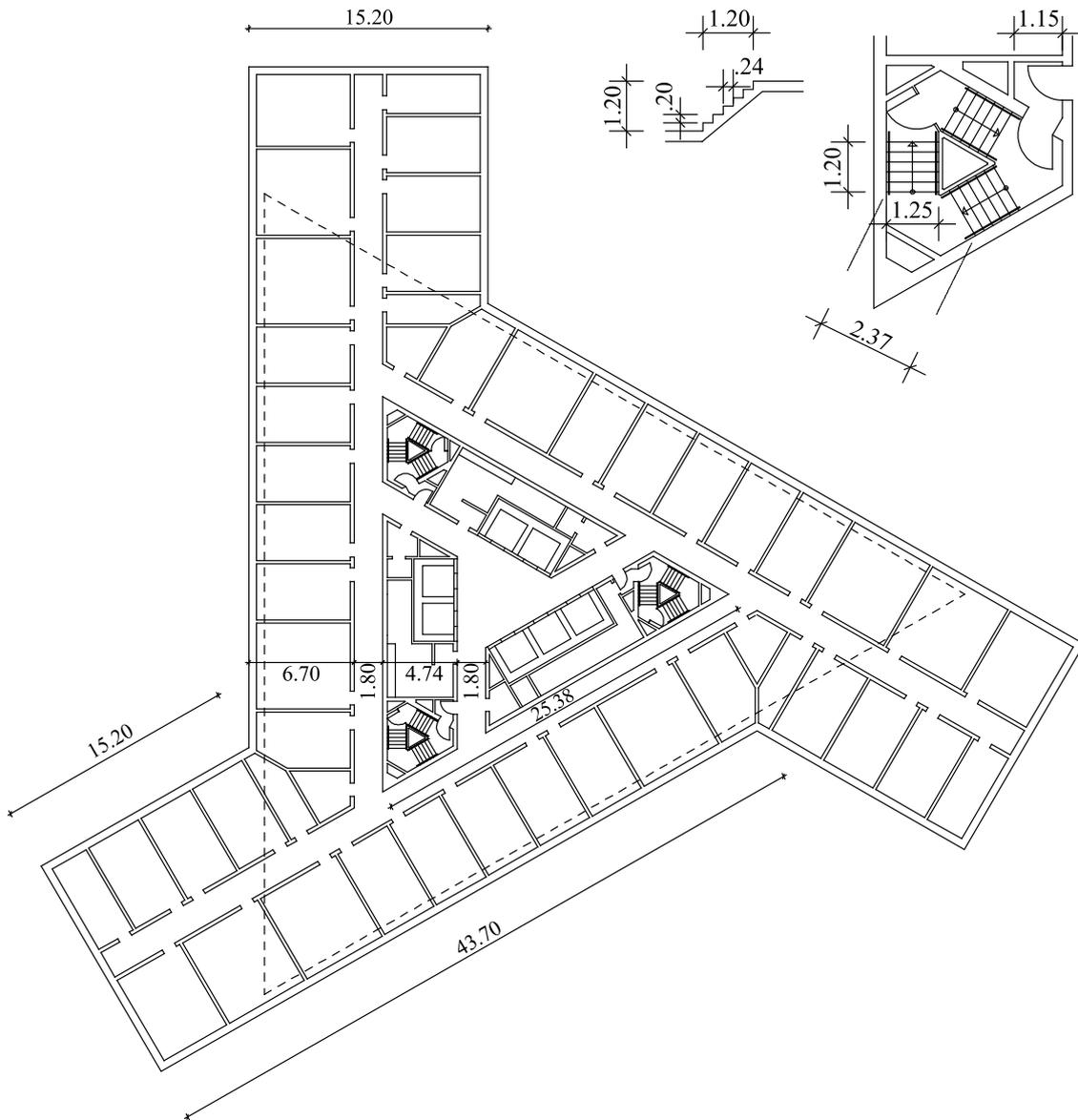


Abbildung 2.23.: Grundriss des Unilever-Hochhauses [128]

	Alter		15-25	25-35	35-45	45-55	55-65
Männer	% der Beschäftigten		11,0	14,4	17,9	12,6	6,2
	freie Gehgeschwindigkeit (m/s)		1,58	1,54	1,48	1,41	1,26
	aufwärts (m/s)	horizontal	0,70	0,68	0,65	0,62	0,56
		schräg	0,81	0,79	0,75	0,72	0,64
	abwärts (m/s)	horizontal	0,79	0,77	0,74	0,71	0,63
		schräg	0,91	0,89	0,85	0,81	0,73
Frauen	% der Beschäftigten		10,2	8,6	8,6	6,7	3,8
	freie Gehgeschwindigkeit (m/s)		1,42	1,39	1,33	1,27	1,14
	aufwärts (m/s)	horizontal	0,63	0,61	0,59	0,56	0,50
		schräg	0,72	0,71	0,68	0,65	0,58
	abwärts (m/s)	horizontal	0,71	0,70	0,67	0,64	0,57
		schräg	0,82	0,80	0,77	0,73	0,66

Tabelle 2.5.: Alterverteilung und freie Gehgeschwindigkeiten ($\pm 0,2$ m/s) der Beschäftigten im Jahr 1978 [2]

des Signals die Etage verlassen. Liegt sein Büro jedoch in einer der unteren Etagen so ist diese Zeit von zwei Minuten nicht relevant, da die Personen aus den oberen Stockwerken auf Grund der Länge des Laufweges das Gebäude noch nicht verlassen haben können. Eine „korrekte“ Vorhersage von Räumungszeiten für einzelne Etagen mit einer geringen Personenanzahl ist deshalb eher ein Glücksfall, da einzelne Personen das Ergebnis individuell beeinflussen können. Bei der Vorhersage für ein gesamtes Gebäude dagegen spielen eher die makroskopischen Eigenschaften der Personengruppe eine Rolle, so dass hier der Einfluss der einzelnen Person „in der Masse untergeht“. Hier zeigt sich, dass für Hochhausgeometrien die von den Programmen getroffenen Vorhersagen recht gut übereinstimmen, da individuelle Auswirkungen nicht vorkommen.

Da die Ergebnisse der Evakuierungssimulationsprogramme alle bei relativ geringen Dichten ermittelt wurden (Bayer-Hochhaus: 502 Personen bei 31 Etagen, Mannesmann-Hochhaus: 427 Personen bei 22 Etagen, Unilever-Hochhaus: 567 Personen bei 21 Etagen) wurden jeweils mehrere Personen in den einzelnen Etagen verteilt, um eine höhere Personendichte zu erreichen. Bei den Resultaten fällt hierbei auf, dass es bei höheren Dichten zu größeren Differenzen der Ergebnisse der einzelnen Programme kommt, die Tabellen 2.9, 2.10 und 2.11 zeigen die Ergebnisse im Detail.

	Evak.-Übung	ASERI	building-EXODUS	PedGo	Simulex
Gesamtes Gebäude	10,47 min	ca. 11 min	ca. 9,5 min	ca. 9,5 min	ca. 10 min
1. Etage	? - 200s	38 - 91s	35 - 85s	46 - 97s	39 - 84s
5. Etage	? - 165s	40 - 90s	38 - 90s	45 - 103s	40 - 90s
12. Etage	? - 97s	37 - 83s	40 - 90s	44 - 94s	42 - 83s
15. Etage	? - 190s	41 - 89s	43 - 84s	43 - 94s	37 - 87s
18. Etage	? - 229s	39 - 138s	38 - 89s	41 - 95s	39 - 89s
26. Etage	? - 37s	41 - 71s	44 - 79s	44 - 77s	52 - 71s
28. Etage	? - 73s	42 - 85s	38 - 82s	44 - 96s	45 - 78s

Tabelle 2.6.: Vergleich berechneter Evakuierungszeiten mit einer Räumungsübung (Bayer-Hochhaus). Bei ausgewählten Fluren geben die beiden Werte jeweils den Zeitpunkt an, zu dem die erste und letzte Person jeweils das Treppenhaus betritt. Die Ergebnisse der Gesamtträumungszeit geben einen gerundeten Mittelwert von mindestens 10 Simulationsdurchläufen an.

	Evak.-Übung	ASERI	buildingEXODUS	PedGo	Simulex
Gesamtes Gebäude	8,78 min	ca. 9 min	ca. 8,5 min	ca. 8 min	ca. 8 min
2. Etage	50 - 149s	40 - 82s	38 - 74s	44 - 94s	44 - 82s
4. Etage	45 - 75s	35 - 86s	49 - 73s	50 - 82s	41 - 86s
5. Etage	61 - 101s	36 - 87s	35 - 83s	42 - 89s	42 - 90s
6. Etage	31 - 102s	42 - 82s	35 - 78s	41 - 95s	42 - 85s
7. Etage	67 - 132s	43 - 96s	37 - 77s	39 - 96s	43 - 95s
10. Etage	51 - 102s	33 - 117s	41 - 83s	39 - 92s	43 - 90s
15. Etage	48 - 155s	38 - 83s	38 - 81s	45 - 88s	42 - 80s

Tabelle 2.7.: Vergleich berechneter Evakuierungszeiten mit einer Räumungsübung (Mannesmann-Hochhaus). Bei ausgewählten Fluren geben die beiden Werte jeweils den Zeitpunkt an, zu dem die erste und letzte Person jeweils das Treppenhaus betritt. Die Ergebnisse der Gesamtträumungszeit geben einen gerundeten Mittelwert von mindestens 10 Simulationsdurchläufen an.

	Evak.-Übung	ASERI	building-EXODUS	PedGo	Simulex
Gesamtes Gebäude	10,48 min	ca. 11,50 min	ca. 10 min	ca. 12 min	ca. 9,50 min
3. Etage	37 - 122s	46 - 86s	38 - 83s	49 - 89s	44 - 86s
5. Etage	31 - 75s	53 - 66s	52 - 75s	58 - 85s	63 - 80s
7. Etage	69 - 109s	37 - 67s	47 - 76s	53 - 84s	54 - 80s
11. Etage	48 - 100s	55 - 89s	50 - 89s	52 - 89s	56 - 81s

Tabelle 2.8.: Vergleich berechneter Evakuierungszeiten mit einer Räumungsübung (Unilever-Hochhaus). Bei ausgewählten Fluren geben die beiden Werte jeweils den Zeitpunkt an, zu dem die erste und letzte Person jeweils das Treppenhaus betritt. Die Ergebnisse der Gesamtträumungszeit geben einen gerundeten Mittelwert von mindestens 10 Simulationsdurchläufen an.

	ASERI	buildingEXODUS	PedGo	Simulex
10 P./E.	8,38-9,45min	8,03-8,55min	7,58-8,73min	9,28-11,00min
15 P./E.	9,90-10,68min	9,18-9,88min	8,93-9,42min	9,98-10,70min
20 P./E.	13,02-14,57min	11,35-11,70min	11,00-11,53min	11,58-11,83min
30 P./E.	19,13-22,12min	16,28-16,58min	15,65-16,28min	16,32-16,52min
40 P./E.	24,48-27,05min	21,17-21,52min	20,42-21,12min	21,15-21,38min

Tabelle 2.9.: Berechnete Evakuierungszeiten bei unterschiedlichen Ausgangspersonenzahlen in Personen pro Etage (P./E.), Bayer-Hochhaus. Die Ergebnisse der Gesamtträumungszeiten geben jeweils die schnellste und langsamste Evakuierungszeit bei mindestens 10 Simulationsdurchläufen wieder.

	ASERI	buildingEXODUS	PedGo	Simulex
10 P./E.	5,78-6,95min	6,40-7,10min	5,98-7,20min	6,73-7,83min
20 P./E.	8,75-9,82min	9,12-9,42min	7,82-8,23min	8,17-8,37min
30 P./E.	12,43-13,78min	12,83-13,13min	10,88-11,43min	11,37-11,70min
40 P./E.	16,13-17,67min	16,42-17,27min	14,12-14,67min	14,80-15,10min

Tabelle 2.10.: Berechnete Evakuierungszeiten bei unterschiedlichen Ausgangspersonenzahlen in Personen pro Etage (P./E.), Mannesmann-Hochhaus. Die Ergebnisse der Gesamträumungszeiten geben jeweils die schnellste und langsamste Evakuierungszeit bei mindestens 10 Simulationsdurchläufen wieder.

	ASERI	buildingEXODUS	PedGo	Simulex
10 P./E.	6,08-6,65min	5,52-6,18min	5,62-6,22min	5,45-6,67min
20 P./E.	8,90-9,48min	7,77-8,07min	9,15-9,80min	7,42-7,58min
30 P./E.	12,90-13,55min	11,02-11,32min	13,08-13,85min	10,27-10,58min
40 P./E.	16,68-17,60min	14,02-14,67min	17,00-17,92min	13,27-13,45min

Tabelle 2.11.: Berechnete Evakuierungszeiten bei unterschiedlichen Ausgangspersonenzahlen in Personen pro Etage (P./E.), Unilever-Hochhaus. Die Ergebnisse der Gesamträumungszeiten geben jeweils die schnellste und langsamste Evakuierungszeit bei mindestens 10 Simulationsdurchläufen wieder.

2.6. Testverfahren für Evakuierungssimulationsprogramme

Bei kommerziell erhältlichen Programmen für Evakuierungssimulationen handelt es sich um sogenannte „closed-source“ (proprietäre) Programme. Im Gegensatz zu Open-Source Software-Programmen kann der Nutzer nicht durch eine Quellcodeanalyse erkennen, welche Algorithmen und Grundlagen in diesen Programmen implementiert sind, vielmehr ist er auf die Dokumentation der jeweiligen Programmhersteller angewiesen, die jedoch aus kommerziellen Gründen unvollständig sein kann. Dies geht sogar soweit, dass kommerzielle Programme als „black box“ Software bezeichnet werden [112]. Um jedoch die Ergebnisse des jeweiligen Programmes besser zu verstehen bzw. zu interpretieren, sind zumindest Grundkenntnisse der dem Programm zugrunde liegenden Verfahren notwendig. Im Folgenden werden nun einfache Testszenarien vorgestellt, die dem Nutzer ein schnelles Verständnis des ihm zur Verfügung stehenden Programmes ermöglichen sollen. Folgende Grundlagen werden hierbei untersucht:

- Grundlagen der Personenbewegung (bschleunigen, abbremsen, überholen)
- zugrunde liegendes Potentialfeld (*von-Neumann* oder *Moore Nachbarschaft*)
- Bewegung um eine Ecke
- Implementation von Randbedingungen
- Wahl des Ausgangs
- Routenwahl
- Geschwindigkeits-Dichte-Beziehung (Fundamentaldiagramm)
- Updatealgorithmus

Die Reihenfolge der vorgestellten Szenarien hat nichts mit ihrer Wertig- oder Wichtigkeit zu tun. Wichtig hierbei ist, dass eventuell einzustellende „psychologische“ Parameter wie „Panik“, „Gruppenverhalten“ oder Ähnliches bei den einzelnen Untersuchungen nicht aktiviert werden, da diese die Grundlagen des Modells „überschreiben“ können. So ist es beispielsweise möglich, dass bei einem aktivierten „Gruppenverhalten“ einzelne Personen ihre Ziele nicht aufgrund des implementierten „Zielalgorithmus“ wählen, vielmehr wählen sie ihre Ziele aufgrund des Laufweges anderer

Personen. Somit wird in diesem Fall das Ergebnis des grundlegenden „Zielalgorithmus“ durch den „Personenfolgealgorithmus“ überschrieben. Die ausgewählten Testfälle sind nur für Agenten-basierende Modelle geeignet, wie Zellularautomaten oder kontinuierliche Modelle; Netzwerkmodelle oder ähnliche Modelltypen können hiermit nicht untersucht werden.

2.6.1. Beschleunigen, Abbremsen und Überholen

Hauptsächlich bei kontinuierlichen Modellen vorkommend, ist das Beschleunigen und Abbremsen dennoch ein wichtiger Punkt in der Modellierung. Kommt es beispielsweise in Situationen mit höheren Dichten wie Fruin „Level of Service C“ oder „D“ [31] zu häufigen Start- und Stoppbewegungen, können die berechneten Zeiten sich bei unterschiedlicher Beschleunigung oder unterschiedlichem Abbremsen unterscheiden. Auch wenn Personen in solchen Situation weiter oder näher von anderen Personen ihre Bewegung abbremsen, kann es zu unterschiedlichen Dichteprognosen kommen. So wird beispielsweise eine höhere Personendichte erreicht, wenn Personen erst viel später abbremsen, da sie dadurch dichter und schneller auf andere Personen auflaufen. Auch beim Überholen spielen solche Einflüsse eine große Rolle. Starten Personen schon recht früh einen Überholvorgang, so können andere Personen besser darauf reagieren, die Bewegung ist insgesamt „flüssiger“ als bei abrupten Ausweichmanövern. Es kommt so auch zu weniger Kollisionen oder „Ausbremsvorgängen“ in der simulierten Fußgängergruppe, der reale Autoverkehr ist hierfür das beste Beispiel. Auch spiegelt ein frühes Überholen oder eine entsprechend frühe Richtungsänderung eine Art „kooperatives Verhalten“ wieder, was zum Teil zu verbesserten Personenflüssen durch Engstellen führen kann [91].

Beschleunigen und Abbremsen

Um das vorliegende Programm bzw. Modell auf Beschleunigungs- oder Abbremsereigenschaften zu untersuchen ist ein einfacher schmaler und gerader Gang zu modellieren. Der Gang darf nicht breiter als die entsprechende Person selbst sein, da sonst die Person zu viele Bewegungsfreiheiten hat (siehe Abbildung 2.24). Gewünscht ist eine 1-dimensionale Bewegung. Durch die 1-dimensionale Bewegung ist zudem sichergestellt, dass das Potentialfeld keinen Einfluss auf die Personenbewegung hat. Um zu überprüfen, ob nun eine Beschleunigung implementiert ist oder nicht, muss die Person mit einer bekannten freien Gehgeschwindigkeit starten, es ist

die Zeit zu ermitteln, die die Person benötigt, um eine ca. 1 – 2 m Strecke zurückzulegen. Ist die ermittelte Zeit länger als die mit Gleichung 2.8 berechnete, so ist eine Beschleunigung implementiert; ist die Zeit identisch, so ist keine Beschleunigung implementiert.

$$\text{Zeit} = \frac{\text{Weg}}{\text{Geschwindigkeit}} \quad (2.8)$$

Das Abbremsverhalten einer Person kann in gleicher Art und Weise bestimmt wer-

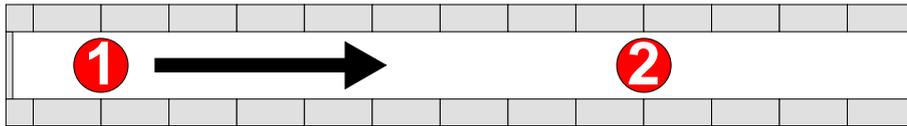


Abbildung 2.24.: Testszenario für Abbremsen und Beschleunigen. Im Falle einer Beschleunigung ist der Fußgänger „2“ zu entfernen. Soll das Abbremsverhalten untersucht werden, so ist der Fußgänger „2“ mit einer langen Reaktionszeit zu belegen.

den. Hierzu ist am Ausgang des Ganges eine Person mit einer sehr langen Reaktionszeit zu platzieren, in weiter Entfernung dazu eine weitere Person, die bei Simulationsbeginn ihre Bewegung startet (siehe ebenfalls Abbildung 2.24). Es ist sicherzustellen, dass die Person ihre freie Gehgeschwindigkeit erreichen kann. Die Person mit der langen Reaktionszeit ist deshalb wichtig, damit die andere Person dort abbremsen muss, um eine Kollision zu vermeiden. Würde anstelle der Person ein Hindernis platziert, würde die Ausbreitung des Potentialfeldes beeinflusst oder die Person könnte den Ausgang nicht erreichen. Um nun das Abbremsverhalten zu bestimmen, sind zwei Simulationsdurchläufe notwendig. Im ersten Durchlauf ist darauf zu achten, an welcher Stelle die sich bewegende Person zum Stillstand kommt und die entsprechende Zeit vom Simulationsbeginn zu ermitteln. Im zweiten Durchlauf ist die Simulation ohne die blockierende Person durchzuführen. Es ist hierbei ebenfalls die Zeit zu ermitteln, bis die Person den Ort erreicht hat, an dem sie beim ersten Durchlauf zum Stillstand gekommen ist. Sind beide Zeiten gleich, so ist kein Abbremsen implementiert; ist die im ersten Durchlauf ermittelte Zeit länger als die im zweiten Durchlauf ermittelte, so ist ein Abbremsverhalten implementiert.

Überholen

Um zu ermitteln, in welchem Abstand Personen zu anderen Personen einen Überholvorgang beginnen, ist ein etwa 2 m breiter Flur zu modellieren mit einer Länge

von ca. 20 – 30 m. An einer Wandseite des Flures sind zwei Personen in einem Abstand von ca. 10 m zu platzieren, siehe hierzu Abbildung 2.25. Die dem Ausgang am nächsten befindliche Person ist - wie bei der Untersuchung des Abbremsverhaltens - mit einer langen Reaktionszeit zu versehen, die andere Person dagegen beginnt ihre Bewegung mit dem Start der Simulation. Diese Person bewegt sich nun direkt auf die wartende Person zu. Der Punkt, an dem diese Person ihre Bewegungsrichtung in Richtung Flurmitte ändert, ist der Startpunkt des Überholvorgangs, er zeigt somit an, wie weit der Einfluss von einzelnen Personen auf andere Personen in dem entsprechenden Modell reicht.

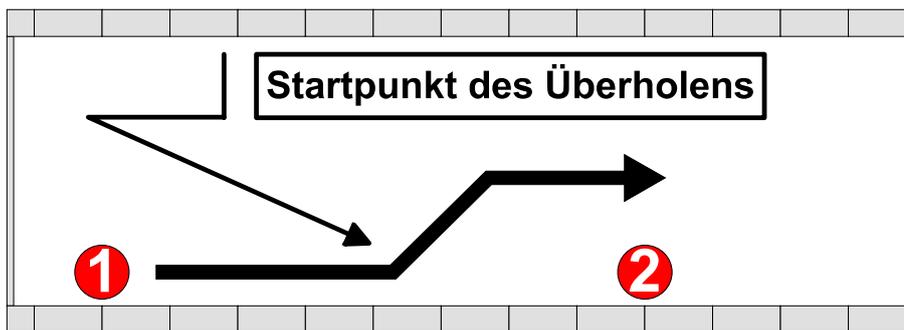


Abbildung 2.25.: Testszenario zur Überprüfung des Startpunktes beim Überholvorgang. Der Fußgänger „2“ ist mit einer langen Reaktionszeit zu versehen, damit er vom Fußgänger „1“ überholt werden kann.

2.6.2. Zugrunde liegendes Potentialfeld

Bei den meisten Programmen oder Modellen werden Personen mit Hilfe eines Potentialfeldes (manchmal auch als „Distance Map“ [143] bezeichnet) zum Ausgang geleitet. Potentialfelder starten meist mit einem niedrigen Wert am Ausgang und breiten sich mit ansteigendem Wert weiter im Gebäude aus. Um den Ausgang zu erreichen, folgen die Personen einfach den in diesem Fall immer kleiner werdenden Potentialwerten, bis sie den Ausgang erreicht haben. Meistens werden, wie bereits in Abschnitt 2.3 erwähnt, *von Neumann* oder *Moore Nachbarschaften* zur Berechnung des Potentialfeldes genutzt, weitere Methoden werden in [67] diskutiert. Eine Alternative zu diesen „klassischen“ Potentialfeldansätzen bietet die Zuhilfenahme eines CFD-Ansatzes. Hierbei wird jeweils an den Ausgängen „Luft aus einem Gebäude gesaugt“, das entstehende Vektorfeld der Luftströmungsrichtung (CFD-Potentialfeld) gibt dabei die Richtung der Personen zum Ausgang hin wieder. Dieser Ansatz wird im Programm FDS-Evac [66] genutzt.

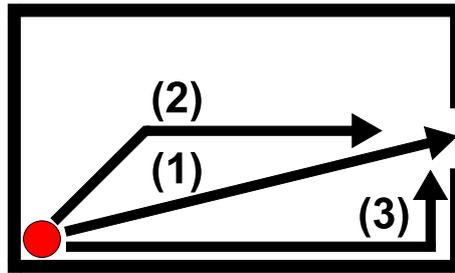


Abbildung 2.26.: Testszenario zur Überprüfung des implementierten Potentialfeldes. (1) zeigt den Weg des Fußgängers bei einem *Moore Potentialfeld*, (2) zeigt den Weg eines Fußgängers bei einem *von Neumann Potentialfeld*, (3) zeigt den Weg eines Fußgängers bei einem *CFD-Potentialfeld*.

Um festzustellen, welche Art von Potentialfeld implementiert ist, ist ein einfacher Raum zu modellieren, ca. 10×20 m mit einer 1 m breiten Tür mittig in einer der beiden 10 m Wände angeordnet. In einer der beiden gegenüberliegenden Ecken ist eine einzelne Person zu platzieren. Diese soll zum Ausgang laufen. Bewegt sich die Person auf direktem Weg zum Ausgang (im Sinne einer durchgehenden geraden Linie), so ist ein Potentialfeld basierend auf einer *Moore Nachbarschaft* implementiert. Bewegt sich die Person jedoch erst in einem ca. 45° Winkel zur Raummitte und dann gerade auf den Ausgang zu, so ist ein Potentialfeld basierend auf einer *von Neumann Nachbarschaft* implementiert. Bewegt sich die Person dagegen entlang der Wand zum Ausgang, so ist ein auf dem CFD-Ansatz basiertes Potentialfeld implementiert. Abbildung 2.26 zeigt den Grundriss des Raumes und die entsprechenden Laufwege.

2.6.3. Bewegung um die Ecke

Ecken sind eine der Hauptgeometrien in Rettungswegen. In Situationen mit geringer Dichte wie beispielsweise Fruin „Level of Service A“ oder „B“ [31] haben Ecken keine Auswirkung auf die Bewegung, da Personen sich unabhängig von anderen Personen im Gebäude und auf den Rettungswegen bewegen. Es entstehen auch keine Stauungen oder Ähnliches. Zudem ist es nebensächlich, ob eine Person nun in einem engen Bogen um die Ecke läuft oder eher um einen weiten Bogen, bezogen auf die Gesamtwegstrecke ist diese „Extrawegstrecke“ von untergeordneter Bedeutung. Ist jedoch der Flur dicht mit Personen gefüllt, so stellt sich die Frage nach dem Verhalten, welches an der Ecke einsetzt: wird der komplette Flurbereich genutzt, da die Perso-

nen auch größere Radien in Kauf nehmen, oder bewegen sich die Personen eng um die Ecke, so dass nur eine Hälfte des Flures genutzt wird und dadurch ein Stau vor der Ecke entsteht? Beobachtungen in der Realität haben aufgezeigt, dass Personen in Fußballstadien oder auf Bahnhöfen dazu tendieren, die Breite des Flures an der Ecke voll auszunutzen, es werden somit längere Wege in Kauf genommen.

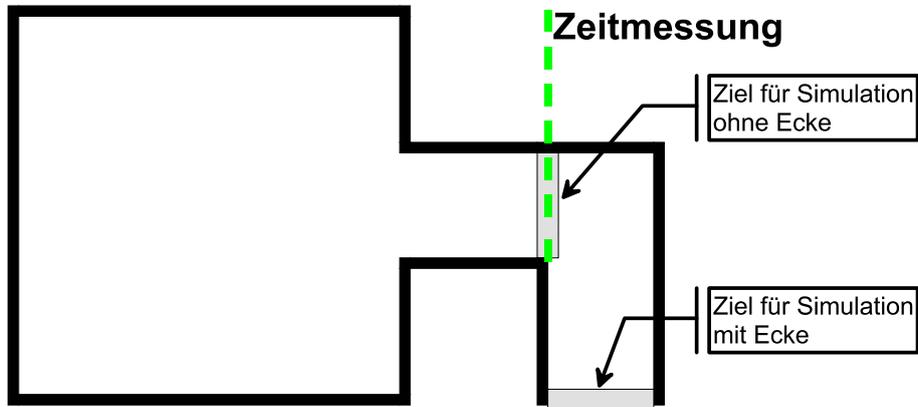


Abbildung 2.27.: Testszenario zur Überprüfung des Einflusses einer Ecke auf die Simulationsergebnisse. Durch die unterschiedliche Platzierung des Ausgangs können mit einer Geometrie beide Testfälle realisiert werden, die Zeitmessung verbleibt dabei an der gleichen Stelle.

Diese beiden Möglichkeiten (Stau oder kein Stau vor der Ecke) haben einen großen Einfluss auf die mit Modellen bzw. Programmen berechnete Evakuierungszeit. Um den Einfluss der Modellierung bei vorliegenden Programmen festzustellen, ist ein einfacher Raum mit anschließendem Flur zu modellieren, in einem Fall mit Ecke im Flur, im anderen Fall ohne Ecke. Abbildung 2.27 zeigt die beiden Geometrien auf. Der Raum ist mit ausreichend Personen zu belegen, so dass vor dem Übergang Raum-Flur ein Stau entsteht. Dieser sorgt dafür, dass ein annähernd konstanter Personenfluss zum Flur hin erzeugt wird. Es ist nun die Zeit zu messen, bis die letzte Person die Stelle erreicht hat, an der die Ecke beginnt, und zwar in beiden Geometrien. Somit wird sichergestellt, dass die Personen bis zu dieser Stelle jeweils die gleichen Wegstrecken zurückgelegt haben. Berechnungen haben ergeben, dass es teilweise zu einer Verdopplung der gemessenen Zeit kommen kann, falls die Personen eng um die Ecke laufen und somit ein Stau vor der Ecke entsteht, Abbildung 2.28 zeigt einen Ausschnitt aus einer Simulation mit Simulex, aus der ersichtlich wird, dass die Personen eng um die Ecke laufen, so dass vor der Ecke ein Stau entsteht. Es ist hierbei klar zu erkennen, dass bei der Bewegung um die Ecke der Flur nicht komplett ausgenutzt wird, was letztendlich die Ursache des Staus ist. Abbil-

Abbildung 2.29 zeigt die Ursache dieses Phänomens. Basierend auf der hinzugekommenen Ecke verändert sich das zugrunde liegende Potentialfeld, dem die Personen folgen. Da das Potentialfeld in diesem Fall jedoch immer den kürzesten Weg zum Ausgang ermöglicht, führt dieser nur eng um die Ecke. Die modellierten Personen folgen dem Potentialfeld sehr direkt, so dass alle Personen versuchen diesen kürzesten Weg um die Ecke zu nehmen, wie der Pfeil in Abbildung 2.29 zeigt.

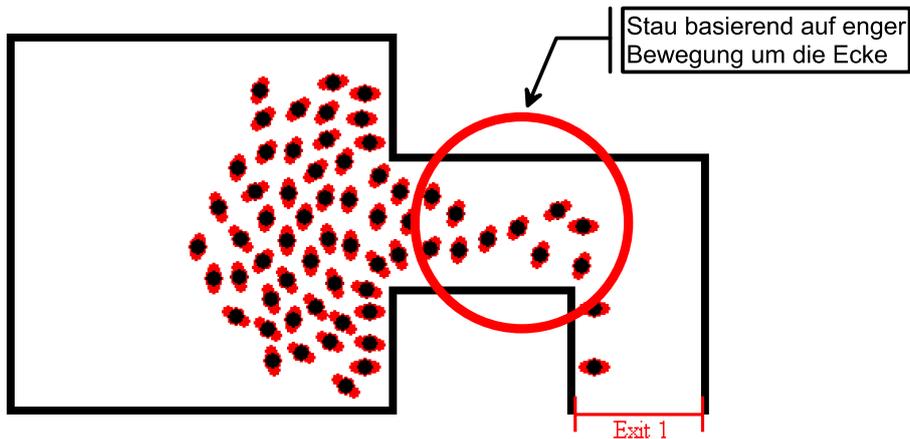


Abbildung 2.28.: Beispiel einer Stautstehung während der Bewegung um eine Ecke (Programm Simulex).

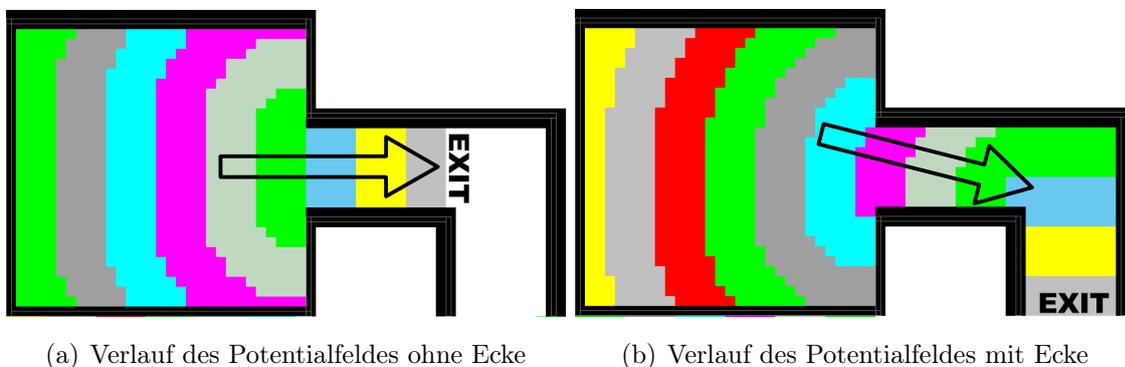


Abbildung 2.29.: Erklärung der engen Bewegung um eine Ecke basierend auf dem Potentialfeld. Der Pfeil zeigt die Bewegungsrichtung der Personen an. Beim Vorhandensein der Ecke (Abbildung 2.29(b)) verändert das Potentialfeld die Bewegung hin zur Ecke, es wird dadurch nur ein Teil des Flures an dieser Stelle genutzt, so dass ein Stau entsteht.

2.6.4. Implementation von Randbedingungen

Randbedingungen sind mit die wichtigsten Eigenschaften bei der Modellierung von Evakuierungsszenarien, denn mit Erreichen des Randes, der in diesem Fall der Ausgang ist, hat die Person per Definition den sicheren Bereich erreicht und ist somit gerettet bzw. befindet sich nicht mehr in der Gefahrenzone. Hat die Person in einer Simulation diesen Bereich erreicht, so wird sie aus der Simulation entfernt; dies bedeutet jedoch, dass sich für die ihr folgenden Personen die Situation von einem auf den anderen Zeitschritt ändert. Sind beispielsweise Geschwindkeits-Dichte-Beziehungen wie die Inter-Person-Distance [143] implementiert, so kann das Entfernen vorangegangener Personen einen großen Einfluss auf die weiteren Personen haben. Dieser Einfluss sollte jedoch nicht vorhanden sein, denn es darf keinen Unterschied hinsichtlich der Evakuierungszeit machen, ob die Personen eine Ausgang erreichen oder einen als sicher definierten Raum, die Ergebnisse müssen in beiden Fällen die gleichen sein.

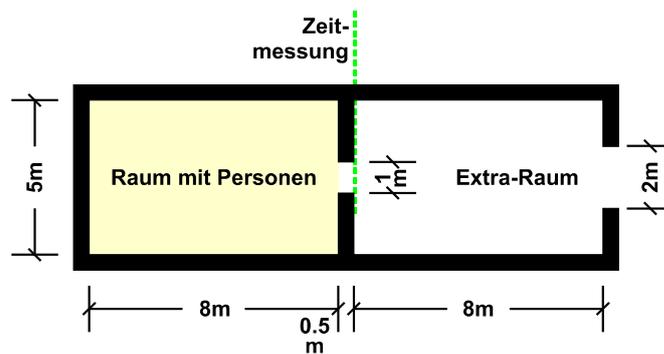


Abbildung 2.30.: Testszenario zur Überprüfung von Randbedingungen

Um festzustellen, wie Randbedingungen in den dem Nutzer vorliegenden Programmen implementiert sind bzw. welchen Einfluss sie auf die Evakuierungszeit haben, ist ein einfaches zwei-Raum Szenario zu modellieren. Beide Räume sollten ungefähr $5\text{ m} \times 8\text{ m}$ groß sein und an den 5 m Wänden miteinander durch eine 1 m breite, mittig in der Wand befindliche Öffnung verbunden sein. Die Wanddicke sollte ca. 50 cm betragen, an einer der weiteren 5 m Wände ist zusätzlich mittig ein 2 m breiter Ausgang zu platzieren. Die Personen (ca. 160 Personen ohne Reaktionszeit) sind in dem Raum ohne die 2 m Tür zu platzieren, Abbildung 2.30 zeigt den Grundriss. Bei einem Simulationsdurchlauf ist der Ausgang direkt nach dem 1 m breiten Durchgang zu platzieren, so dass sichergestellt wird, dass die Personen vollständig im Durchgang sein müssen, bevor sie aus der Simulation genommen werden. Im anderen Simulationsdurchlauf ist der Ausgang an der 2 m Tür zu platzieren, so dass

die Personen den zusätzlichen Raum durchqueren müssen, bevor sie den Ausgang erreichen. Durch den 2 m breiten Ausgang wird sichergestellt, dass kein zusätzlicher Stau entsteht. Beim Vergleich der beiden Simulationen ist darauf zu achten, dass jeweils die Evakuierungszeit der letzten Person an der Position ermittelt wird, an der der Ausgang im ersten Simulationsdurchlauf platziert wird. Sind beide Zeiten gleich, so ist davon auszugehen, dass die Randbedingungen korrekt implementiert sind.

2.6.5. Wahl des Ausgangs

Welchen Ausgang Personen bei einer Evakuierung wählen ist eine Fragestellung, die schon seit Jahrzehnten diskutiert und untersucht wird (siehe z. B. [157]). Gesetzliche Vorschriften wie Versammlungsstättenverordnungen [26] gehen quasi davon aus, dass alle Ausgänge im Falle einer Evakuierung gleichmäßig auf ihre Breite bezogen ausgelastet werden; die Weglänge zu den einzelnen Ausgängen ist davon unabhängig, es darf nur eine Maximalweglänge nicht überschritten werden. Alle Ausgänge sind auch auf gleiche Art und Weise zu kennzeichnen, so dass kein Ausgang hervorgehoben wird. Die Anzahl der Personen, die beispielsweise für Versammlungsstätten zugelassen werden, bemisst sich hierbei zum einen nach der Grundfläche des Versammlungsraumes, zum anderen nach der Breite der Ausgänge, es kann also davon ausgegangen werden, dass die Ausgänge nur in Abhängigkeit ihrer Breite frequentiert werden. Wird diese Annahme zu Grunde gelegt, wird stets eine optimale Evakuierung des Gebäudes erreicht. Doch was passiert, wenn die Ausgänge nicht in der vorbestimmten Art und Weise genutzt werden? Um diese Frage beantworten zu können, ist es wichtig zu verstehen, wie das jeweilige Programm einer Person einen Ausgang zuordnet, falls dies nicht explizit durch den Nutzer vorgenommen wird.

Bei dem Testszenario werden nur sichtbare Ausgänge untersucht, Rauch- oder Brandausbreitung wird hierbei nicht untersucht, da diese Ereignisse (falls implementiert) den ursprünglichen Algorithmus beeinflussen. Der hier dargestellte Fall basiert auf einer modifizierten Version eines Testfalles der RiMEA-Richtlinie [5], er ermöglicht festzustellen, wie oder durch welche Parameter die Wahl des Ausgangs beeinflusst wird. Hierzu ist ein Raum wie in Abbildung 2.31 dargestellt zu modellieren. Die Ausgänge sollten sich hierzu in unterschiedlichen Abständen zum ersten Fußgänger befinden. Die Personen sollten nacheinander starten (beispielsweise realisiert durch unterschiedlich lange Reaktionszeiten) um zu verhindern, dass die Personen sich überholen, was letztendlich ebenfalls die Wahl des Ausgangs beeinflussen kann.

Wird nun nur ein Ausgang (der mit dem kürzesten Weg) angesteuert, so wird immer der kürzeste Weg genommen („Kürzester-Weg-Algorithmus“). Werden dagegen beide Ausgänge gewählt, so ist ein anderer Algorithmus, beispielsweise ein Zufallsalgorithmus, implementiert.

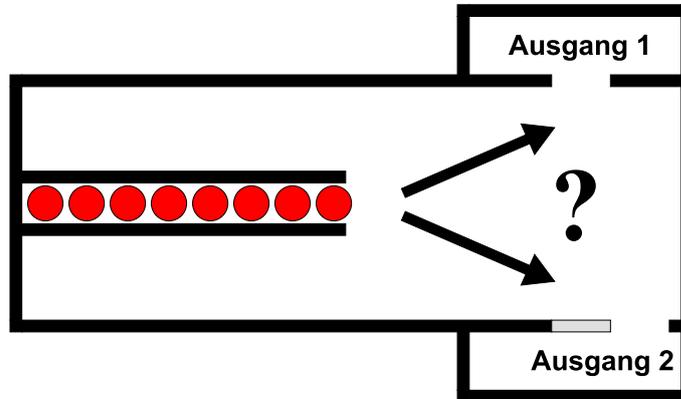


Abbildung 2.31.: Testszenario zur Wahl des Ausgangs. Die Position der Ausgänge kann modifiziert werden, um beispielsweise das Vorhandensein von Rettungszeichenleuchten und deren Einfluss auf die Ausgangswahl zu untersuchen.

Durch Modifikation der Ausgänge, d. h. Ausgänge werden mit Rettungszeichenleuchten versehen oder ihnen wird eine erhöhte Attraktivität zugewiesen, können diese Einflüsse ebenfalls leicht untersucht werden. Wird beispielsweise nur der weiter entfernte Ausgang mit einer Rettungszeichenleuchte in der Simulation versehen, so sollte dieser auch von einigen Personen genutzt werden. Somit können durch solche einfache Modifikationen sehr leicht die Wirkungsweise verschiedener Methoden zur Ausgangskennzeichnung, die durch das entsprechende Programm angeboten werden, getestet werden.

2.6.6. Routenwahl

Steht, anders als im vorangegangenen Abschnitt, nur ein Ausgang zur Verfügung, der aber auf unterschiedlichen Wegen erreicht werden kann, so stellt sich zwangsläufig die Frage nach dem Weg, welcher von den Personen genutzt wird. Hierbei ist noch zu unterscheiden, ob die verschiedenen Wege sich in einem Stockwerk befinden oder ob ein Weg über ein anderes Stockwerk zum Ausgang führt. Es handelt sich hierbei um eine Unterscheidung zwischen dem sogenannten „Quickest Path Algorithmus“

oder dem „Shortest Path Algorithmus“.

Wahl des schnellsten oder kürzesten Weges in einer Ebene

Um zu festzustellen welche Art von Algorithmus implementiert ist, ist eine Geometrie wie in Abbildung 2.32 dargestellt zu modellieren. Wichtig ist hierbei, dass beide Wege keinen direkten Blick auf den Ausgang erlauben, da sonst eine Beeinflussung der Wegwahl durch eine eventuell implementierte „Sichtbarkeitsfunktion“ beeinflusst wird. Zudem muss auch sichergestellt werden, dass der Ausgang sich über die Breite beider Flure erstreckt und dass jeder Flur den gleichen „Anteil“ am Ausgang erhält. Die Personen sind in dem Raum vor den beiden Fluren zu platzieren. Wählen die Personen ausschließlich den kürzeren Weg (in diesem Beispiel der linke Flur) zum Ausgang, so ist ein „Shortest Path Algorithmus“ implementiert, wählen die Personen dagegen auch den zweiten Flur *nachdem* ein Stau vor dem Eingang zum Flur mit dem kürzesten Weg entstanden ist, so ist ein „Quickest Path Algorithmus“ implementiert. Wichtig ist, dass die Auswahl des zweiten Flures erst dann erfolgt, wenn ein Stau vor dem kürzesten Weg entstanden ist, da erst dann der längere Weg der schnellere Weg ist. Nutzen die Personen jedoch beide Wege gleich zu Beginn der Simulation, d. h. wenn noch kein Stau entstanden ist, so kann nicht davon ausgegangen werden, dass ein „Quickest Path Algorithmus“ implementiert ist, da in diesem Fall noch nicht feststeht, dass zum einen überhaupt ein Stau entsteht und zum anderen, dass der Weg in diesem Fall tatsächlich der schnellere ist.

Wahl des schnellsten oder kürzesten Weges bei mehreren Ebenen

Oft gibt es bauliche Gegebenheiten, bei denen der sowohl schnellste als auch kürzeste Weg über eine andere Etage führt. Industriebauten sind hierfür das beste Beispiel, da es dort meistens viele Ebenen, Zwischenebenen und Bühnen gibt. Bei allen diesen Szenarien ist die Treppe das eingreifende Element. Um zu verstehen, wie Treppen zur Routenwahl beitragen, ist das aus der RiMEA-Richtlinie [5] entnommene Beispiel zu modellieren (siehe Abbildung 2.33). Die Personen beginnen dabei auf dem roten Quadrat, das Ziel ist das grüne Quadrat. Es können nun unterschiedliche Möglichkeiten modelliert werden, beispielsweise schnellster und kürzester Weg wird realisiert über einen Wechsel des Stockwerks, oder kürzester Weg ist der Weg über die Treppe, der schnellere jedoch der Weg im gleichen Stockwerk verbleibend. Grundsätzlich muss hierzu natürlich bekannt sein, wie die Länge der Treppe zur

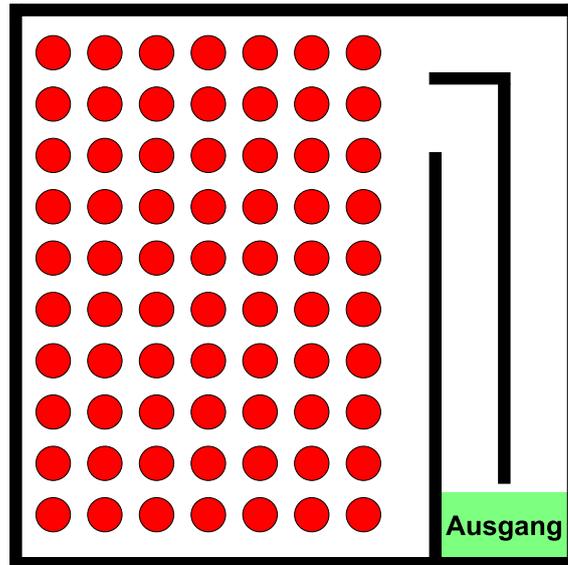


Abbildung 2.32.: Testszenario zur Untersuchung eines „Quickest“ oder „Shortest Path Algorithmus“.

Rettungsweglänge in dem vorhandenen Programm beiträgt. So besteht zum einen die Möglichkeit, dass nur die horizontale Projektionsfläche zur Wegstrecke addiert wird, eine andere Möglichkeit ist, die Länge der schiefen Ebene anzurechnen.

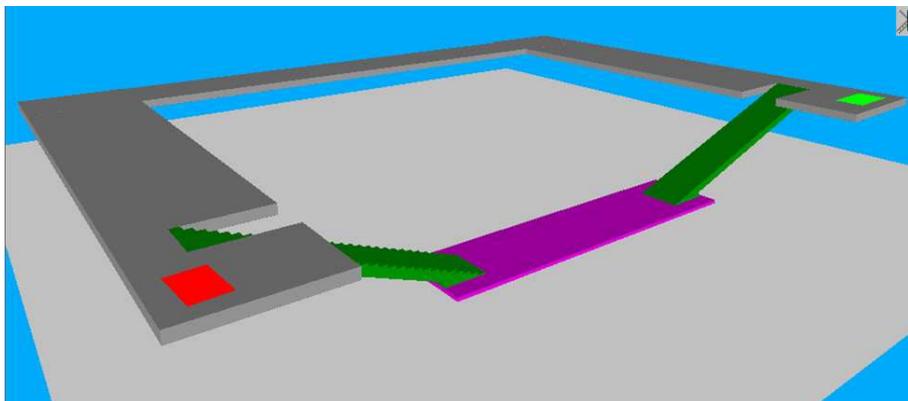


Abbildung 2.33.: Treppentest aus der RiMEA-Richtlinie [5]. Die Person startet auf dem unteren linken roten Quadrat, Ziel ist das rechte grüne Quadrat.

2.6.7. Geschwindigkeits-Dichte-Beziehung (Fundamentaldiagramm)

Wie schon vorab dargestellt, bedeutet eine Geschwindigkeits-Dichte-Beziehung im Falle der Fußgängerdynamik, dass, je dichter gedrängt Personen sich bewegen, je langsamer ihre mittlere Geschwindigkeit ist. Um festzustellen, ob diese einfache Beziehung auch in Programmen für Evakuierungssimulationen vorhanden ist, ist jeweils ein schmaler (kein Überholen möglich) und ein breiter Flur (Überholen möglich) zu modellieren. Experimente, die keinen Ausgang haben, wie beispielsweise das von Seyfried et al. durchgeführte [132], zeigen zwar hervorragend auf, dass diese Beziehung existiert, sie sind jedoch nicht zur Überprüfung mit kommerziellen Programmen geeignet, da bei diesen Programmen in der Regel immer ein Ausgang als Ziel vorhanden sein muss. Einfache Bewegungen im Kreis können deshalb nicht simuliert werden. Beide Flure sind jeweils mit einer zunehmenden Anzahl von Personen zu befüllen (keine Reaktionszeit). Ist bei beiden Fluren mit jeweils einer größeren Anzahl von Personen eine längere Evakuierungszeit festzustellen, so kann davon ausgegangen werden, dass eine Geschwindigkeits-Dichte-Beziehung basierend auf der Modellimplementierung vorhanden ist, d. h. jedoch nicht, dass sie explizit festgelegt wurde, wie beispielweise in [141] dargestellt. Ist keine Geschwindigkeits-Dichte-Beziehung in auch nur einem Flur zu erkennen, so spiegelt das Modell nicht die Realität wieder.

2.6.8. Updatealgorithmen

Basierend auf den bereits in Abschnitt 2.3 dargestellten Updatealgorithmen soll aufgezeigt werden, wie erkannt werden kann, welche Art von Update vorhanden ist. Am besten geeignet sind für diese Untersuchungen Zellularautomaten mit einer Geschwindigkeit von $v_{\max} = 1$ Zelle/Zeitschritt, da dort die Auswirkungen der einzelnen Updatealgorithmen auf die Bewegung am besten zu erkennen sind, andere Modelltypen eignen sich jedoch ebenfalls.

Anhand der Modellierung eines einfachen schmalen Flurs lässt sich erkennen, ob ein *Ordered Sequential Update front-to-back*, *Random Shuffled Update* oder ein *Paralleler Update* bzw. *Ordered Sequential Update back-to-front* implementiert ist. Der Flur ist hierzu mit seiner maximalen Anzahl an Personen zu füllen. Die Personen dürfen keine Reaktionszeit haben. Ist nach dem Start der Simulation eine klare Startwelle zu erkennen, wurde entweder ein *Paralleler Update* bzw. *Ordered Sequential Update back-to-front* implementiert, eine Unterscheidung ist in diesem Fall nicht möglich.

Bewegen sich die Personen dagegen „wie in einem Stück“ zum Ausgang (vergleichbar mit Soldaten im Gleichschritt), so ist ein *Ordered Sequential Update front-to-back* implementiert; ist die Bewegung „unregelmäßig“, so handelt es sich um einen *Random Shuffled Update*. Abbildung 2.34 zeigt die unterschiedlichen Bewegungsabläufe der einzelnen Personen zu jeweils gleichen Zeitschritten.

2.7. Konservative Annahmen bei mikroskopischen Modellen

Basierend auf den unterschiedlichen Modelltypen (kontinuierliche Modelle oder Zellularautomaten) ist es nicht möglich, einen Modelltyp als konservativer zu definieren. Beide Modelltypen haben sowohl Vor- als auch Nachteile, letztendlich ist die Art des Updates die Größe mit dem entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis der Simulation, also nur ein „Unterpunkt“ des Modelles, nicht jedoch das gesamte Modell. Unter der Annahme, dass vielleicht die Art der Personenplatzierung innerhalb eines Gebäudes als konservativ angesehen werden kann (d. h. konservativ entspricht einer exakten Personenplatzierung), kann auch hierzu keine eindeutige Aussage gemacht werden, da sich die Ergebnisse minimal unterscheiden. Auch die Ausdehnung von Reaktionszeitintervallen, wobei ein längeres Reaktionszeitintervall hierbei die konservative Sichtweise widerspiegelt, erzeugt kein konservativeres „auf der sicheren Seite“ liegendes Ergebnis, vielmehr werden Stauungen „weggerechnet“, so dass der Prozess der Entfluchtung wesentlich unkritischer verläuft. Mögliche Staustellen werden somit nicht erkannt was wiederum zur Folge hat, dass kritische Phasen einer Evakuierung nicht weiter vorab untersucht werden. Legt der Anwender eine höhere Ausgangspersonendichte als konservative Annahme zu Grunde, so stimmt es zwar, dass die berechnete Evakuierungszeit im Allgemeinen ansteigt, jedoch ist der Unterschied zwischen verschiedenen Programmen ungleich größer, wie Tabelle 2.9 eindrucksvoll darstellt. Somit stellt sich hierbei die Frage, ob nicht die Auswahl des Rechenprogrammes den größeren Einfluss auf das Ergebnis hat als die verwendete Ausgangspersonendichte. Würde diese Argumentation noch weiter ausgeführt, so könnte der Schluss entstehen, dass es eher „konservative Programme“ als „konservative Annahmen“ gibt.

Wie auch im Abschnitt über menschliches Verhalten, kann auch basierend auf den Szenarien und Untersuchungen in diesem Abschnitt nicht belegt werden, dass vermeindlich konservative Annahmen konservativere Ergebnisse erzeugen, vielmehr wird

die These bestätigt, dass konservative Annahmen keine konservativeren Ergebnisse ergeben.



(a) *Ordered Sequential Update front-to-back*, *Ordered Sequential Update back-to-front*, *Random Shuffled Update* und *Paralleler Update* (von oben nach unten) nach 40 Zeitschritten



(b) *Ordered Sequential Update front-to-back*, *Ordered Sequential Update back-to-front*, *Random Shuffled Update* und *Paralleler Update* (von oben nach unten) nach 60 Zeitschritten



(c) *Ordered Sequential Update front-to-back*, *Ordered Sequential Update back-to-front*, *Random Shuffled Update* und *Paralleler Update* (von oben nach unten) nach 80 Zeitschritten

Abbildung 2.34.: *Ordered Sequential Update front-to-back*, *Ordered Sequential Update back-to-front*, *Random Shuffled Update* und *Paralleler Update* nach 40, 60 und 80 Zeitschritten. Die Personenbewegung erfolgt von rechts nach links.

3. Makroskopische Modelle für Evakuierungsberechnungen

3.1. Ursprung

Makroskopische Modelle, auch als Handrechenverfahren bekannt, wurden seit Mitte der 1950er Jahre entwickelt [144]. Prinzipiell basieren sie auf einem fluiddynamischen Ansatz, in dem sich Personen wie „eine Masse/ein Fluss durch ein Gebäude bewegen“. Ebenso besteht die Möglichkeit, diese Handrechenverfahren als einfache „Queuing Modelle“ anzusehen, da die Bewegung der Fußgänger auf einer Art vereinfachtem Netzwerk ausgeführt wird, welches aus Knoten mit limitierten Kapazitäten besteht. Durch die teilweise vereinfachten Annahmen erlauben die makroskopischen Modelle eine recht schnelle Berechnung von Evakuierungszeiten für Gebäude; die Modelle basieren hierbei häufig auf Evakuierungsübungen, so dass eine gewisse „Kalibrierung“ bereits erfolgt ist.

Makroskopische Modelle können in zwei Kategorien eingeteilt werden: Modelle mit „dynamischem Fluss“ [31, 34, 56–58, 101, 113, 114, 124, 151] und Modelle mit „statischem Fluss“ [80, 93–96, 102, 111, 128, 144]. „Dynamischer Fluss“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der Personenfluss durch Engstellen oder im Gebäude allgemein jeweils für jeden Teilbereich auf der Dichte basierend neu berechnet wird. Auch kann sich der Personenfluss beispielsweise auf Treppen gegenüber einer Bewegung in der Ebene ändern; er basiert damit auf einem im Modell hinterlegten Fundamentaldiagramm. Modelle mit „statischem Fluss“ haben diese Eigenschaft dagegen nicht. Hier basieren Personenflüsse innerhalb des Gebäudes nicht auf Fundamentaldiagrammen, sie sind vielmehr für einzelne Teilbereiche festgelegt, beispielweise für Treppen, Ebenen und Türen und sind deshalb nicht „dynamisch“. Häufig werden diese „statischen Flüsse“ aus experimentellen Daten entnommen, wie Räumungsübungen in Hochhäusern oder U-Bahnstationen und fließen direkt in das Modell ein, wodurch die Anwendung des Modells natürlich auf diese Art von Gebäudetyp festgelegt wird. Da

jedoch der Personenfluss nicht immer neu berechnet werden muss, sind die Modelle mit „statischem Fluss“ wesentlich einfacher und schneller zu berechnen als Modelle mit „dynamischem Fluss“.

Makroskopische Modelle mit „dynamischen Fluss“ erlauben es jedoch dem Nutzer, eine Beschreibung des Personenflusses innerhalb des Gebäudes vorzunehmen; somit können mit dieser Art von Modellen unterschiedliche Gebäudetypen berechnet werden und auch Übergänge wie beispielsweise zwischen Flur und Engstelle, Treppe und Flur oder Flur und Treppe werden hierbei berücksichtigt. Da jedoch nicht alle Modelle mit „dynamischen Fluss“ eine solche Komplexität aufweisen, kann allgemein eine Unterscheidung in komplex [56–58, 114] und einfach [31, 34, 80, 93–96, 101, 102, 111, 113, 124, 128, 144, 151] zu berechnende Modelle durchgeführt werden.

Alle Modell (ob „dynamisch“ oder „statisch“) ermöglichen eine Berechnung von Evakuierungszeiten für ausgewählte Gebäude. Die Ergebnisse werden im Folgenden diskutiert. Es sei darauf hingewiesen, dass die Beschreibung der einzelnen Modelle nicht immer konkrete Annahmen zulässt, d. h. es bleibt dem Anwender ein entsprechender Ermessensspielraum, wie er die Berechnung durchführt. Somit können die Ergebnisse bei der Berechnung eines Objektes durch mehrere Personen unterschiedlich ausfallen.

3.2. Berechnung eines Hochhauses

3.2.1. Untersuchte Geometrie

Das 1959 errichtete Mannesmann-Hochhaus (siehe Abbildung 3.1, siehe auch Seite 72) besteht aus drei Kellergeschossen, einem Erdgeschoss, einem Zwischengeschoss und 22 Obergeschossen. Bei einer Evakuierungsübung Mitte der 1970er Jahre befanden sich 427 Personen in den Obergeschossen [128]. Zur Gebäudeevakuierung wurde nur ein Treppenraum genutzt, der andere wurde verschlossen. Basierend auf den in [128] bereitgestellten Daten wird eine Reaktionszeit von 50 Sekunden ($\approx 0,8$ min) berücksichtigt.

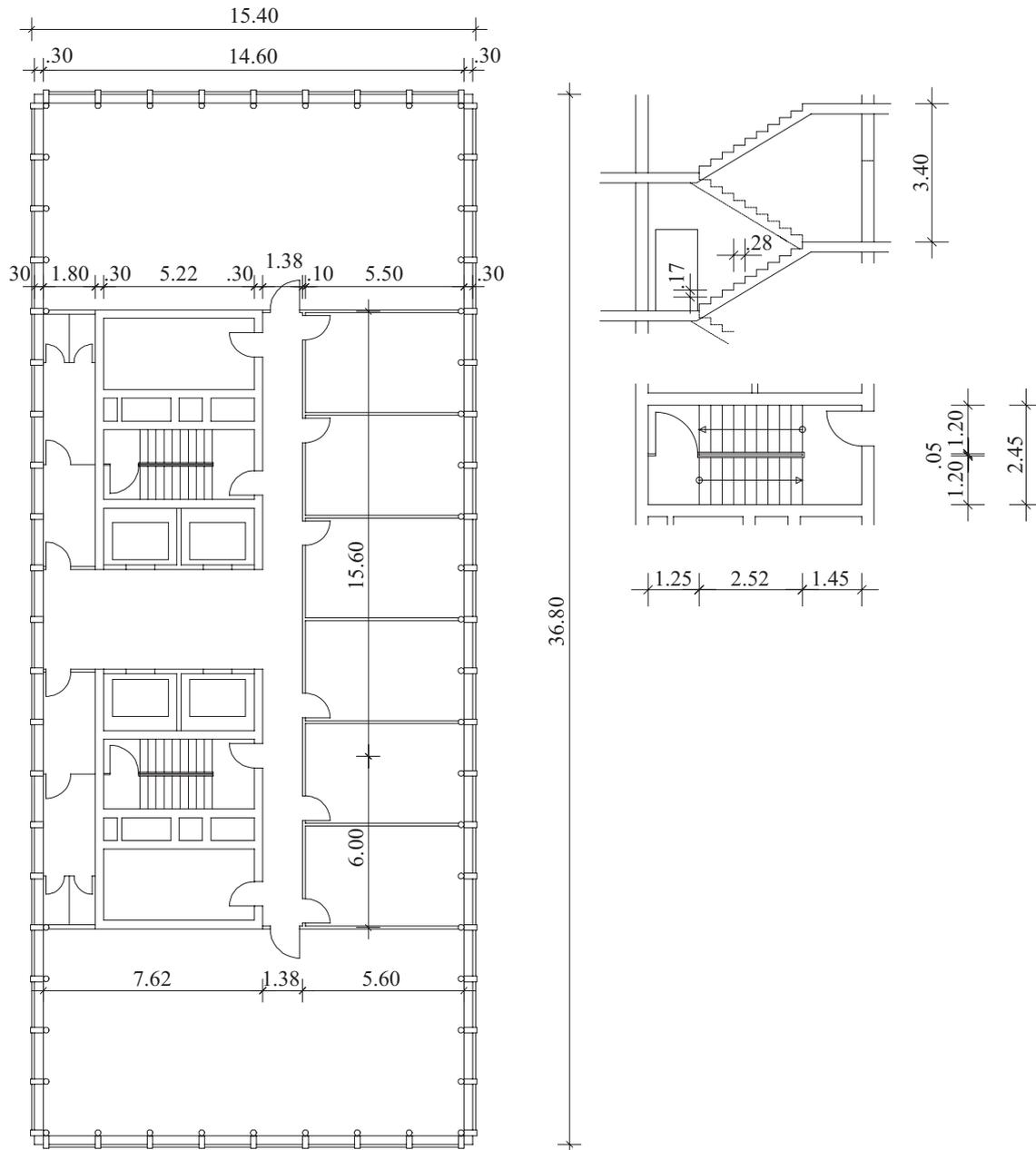


Abbildung 3.1.: Grundriss des Mannesmann-Hochhauses [128]

3.2.2. Ergebnisse

Da nicht alle makroskopischen Modelle für Hochhäuser geeignet sind, wurden nur die in Tabelle 3.1 aufgezählten Handrechenverfahren für das Hochhaus angewandt. Da die Handrechenverfahren teilweise keine unterschiedlichen Personenbelegungen pro Stockwerk zulassen, wurden die Berechnungen jeweils mit 19 Personen pro Stockwerk durchgeführt, so dass insgesamt eine Gebäudebelegung von 418 Personen angenommen wurde. Bei Verfahren, die keine Reaktionszeit berücksichtigen (nur die Verfahren von Pauls [111] sowie Seeger und John [128] beinhalten Reaktionszeiten), wurde diese hinzuaddiert. Bei Verfahren, die nur eine mittlere Lauflänge annehmen, wurde der mittlere Laufweg aus dem Flur bis zum Treppenraum angenommen (8 m). Bei Verfahren, deren Fundamentaldiagramme zwei Werte für Geschwindigkeit und Dichte zulassen (wie [101]) wurde der konservative Wert gewählt, also die langsamere Geschwindigkeit bzw. der geringere spezifische Fluss. Auch wurden Türen innerhalb des Treppenraumes ignoriert, da diese eine eher untergeordnete Rolle für die Handrechenverfahren spielen. Tabelle 3.1 zeigt auf, dass die Ergebnisse der Handrechenverfahren sehr stark untereinander schwanken, was auf eine unterschiedliche Datenbasis der Verfahren schließen lässt. Das Verfahren von Seeger und John [128] ergibt die genaueste Prognose, dieses Verfahren wurde jedoch aus den Versuchen abgeleitet, so dass es zwangsläufig zu der guten Prognose führt. Der Mittelwert über alle Verfahren zeigt jedoch eine sehr gute Übereinstimmung zu der durchgeführten Evakuierungsübung, da sich dort die Stärken und Schwächen einzelner Verfahren aufheben bzw. nicht das Ergebnis dominieren. Ein Vergleich mit den Ergebnissen von mikroskopischen Modellen wurde ebenfalls durchgeführt, siehe hierzu Kapitel 4.

3.3. Berechnung eines Schulgebäudes

3.3.1. Untersuchte Geometrie

Das Schulgebäude wurde dem Buch von Roitman [124] entnommen. Es handelt sich um ein fiktives Gebäude, welches symmetrisch aufgebaut ist, so dass nur eine Hälfte berechnet wird. Das Gebäude besteht aus einem Erdgeschoss und drei Obergeschossen, im Erdgeschoss befinden sich zwei Klassenräume, in den Obergeschossen jeweils drei. Jeder Klassenraum ist mit 40 Schülern voll besetzt, so dass sich eine Gesamtpersonenanzahl von 880 Personen ergibt. Abbildung 3.2 zeigt den Grundriss der berechneten Hälfte des Schulgebäudes.

Makroskopische Modelle	427 Personen (19 pro Etage) mit 0,8 min Reak.-Zeit
Predtetschenski und Milinski, herkömmliches Verfahren [114]	9,10 min
Predtetschenski und Milinski, vereinfachtes Verfahren [113]	9,15 min
SFPE/NFPA-Handbook [101]	14,78 min
Verfahren von W. Müller [93–96]	14,58 min
Verfahren von K. Togawa [144]	5,65 min
Verfahren von M. Galbreath [34]	6,52 min
Effective-Width Modell nach J. Pauls [111]	7,84 min
Verfahren von Melinek und Booth [80]	7,67 min
Verfahren von E. Kendik [57]	7,98 min
Verfahren von Seeger und John [128]	8,83 min
Durchschnitt der 10 Verfahren	9,21 min
Evakuierungsübung [128]	8,78 min (ohne 0,8 min Reak.-Zeit: 7,98 min)

Tabelle 3.1.: Vergleich verschiedener makroskopischer Modelle mit einer Evakuierungsübung am Beispiel eines Hochhauses.

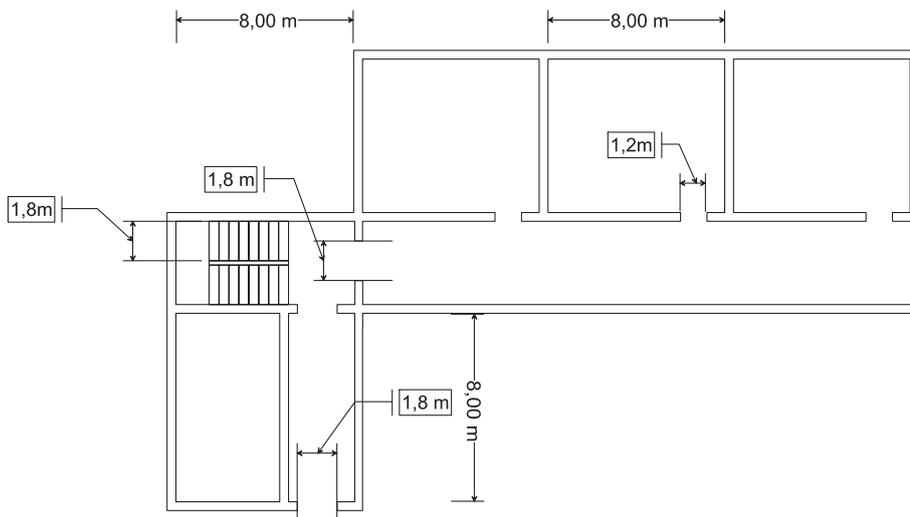


Abbildung 3.2.: Hälfte des Grundrisses eines Schulgebäudes nach [124]

Makroskopische Modelle	880 Personen (Gesamt)
Predtetschenski und Milinski, herkömmliches Verfahren [114]	9,00 min
Predtetschenski und Milinski, vereinfachtes Verfahren [113]	9,07 min
SFPE/NFPA-Handbook [101]	4,76 min
Verfahren von W. Müller [93–96]	5,33 min
Verfahren von Roitman [124]	5,88 min
Verfahren nach NFPA 130 [102]	4,34 min
Verfahren von Weidmann [151]	5,63 min
Durchschnitt der 10 Verfahren	6,30 min

Tabelle 3.2.: Vergleich verschiedener makroskopischer Modelle für ein Schulgebäude.

3.3.2. Ergebnisse

Da einige der makroskopische Modelle nicht für diesen Gebäudetyp geeignet sind, wurde das Gebäude nur mit den Modellen berechnet, die keine Einschränkung hinsichtlich des Gebäudes haben. Bei Verfahren, die unterschiedliche Personengruppen zulassen, wurden in diesem Fall Erwachsene angenommen, da davon ausgegangen wird, dass die andere Verfahren grundsätzlich von der Personengruppe „Erwachsene“ ausgehen. Die in Tabelle 3.2 dargestellten Ergebnisse zeigen, wie beim zuvor berechneten Hochhaus, eine große Schwankungsbreite. Der ermittelte Durchschnitt aller Modelle erscheint plausibel, es wurde, wie auch beim Hochhaus, ein Vergleich mit mikroskopischen Modellen durchgeführt, der in Kapitel 4 näher erläutert wird.

3.4. Annahmen in konservativer Sicht bei makroskopischen Modellen

Da die vorgestellten makroskopischen Modelle teilweise nicht genau definiert sind, d. h. dem Anwender bleibt ein entsprechender Entscheidungsspielraum hinsichtlich der Annahmen und der Art und Weise, wie er seine Berechnung durchführt, ist es in diesem Fall besonders schwer, konservative Annahmen überhaupt zu definieren. Die Randbedingungen sind für alle Verfahren gleich, nur die Annahmen im Verfahren selbst unterscheiden sich (bspw. unterschiedliche maximale Personendichten in verschiedenen Verfahren). Da die makroskopischen Modelle meistens auf verschiede-

nen Realversuchen basieren, ist eher der Versuch selbst als konservativ oder optimistisch einzuschätzen. Da jedoch teilweise keine Veröffentlichungen hinsichtlich der durchgeführten Versuche vorliegen, können hierzu ebenfalls keine Aussagen gemacht werden. Durch die allsamt verwendendeten makroskopischen Größen ist es ebenfalls nicht möglich, einzelne konservative oder optimistische Annahmen zu treffen, d. h. der Nutzer hat hier überhaupt keinen Einfluss darauf, wie er entsprechende Eingabekenngrößen definiert, die bei mikroskopischen Verfahren einen Einfluss haben können. Letztendlich sind keine Aussagen möglich, wie im Falle von makroskopischen Modellen konservative Annahmen getroffen werden können.

4. Vergleich mikroskopischer und makroskopischer Evakuierungsmodelle

Immer wieder stellt sich die Frage nach der Prognosegenauigkeit von Evakuierungssimulationen oder Handrechenverfahren, da diese in der Praxis zur Genehmigung von Großveranstaltungen oder Gebäuden herangezogen werden. Auch werden mit Hilfe dieser Verfahren Abweichungen von Rettungswegbreiten und -längen beantragt und auch genehmigt. Grundlage ist hierbei meistens auch eine Zeitprognose, in der die Evakuierung eines Gebäudes oder Geländes nachgewiesen werden muss. So kursieren teilweise Forderungen gemäß dem Motto „wenn das Gebäude in 10 Minuten evakuiert ist, ist alles OK“. Um diese Forderung zu erfüllen, werden häufig Evakuierungssimulationsprogramme genutzt, die eine entsprechende Zeitprognose erlauben. Um darzulegen, in wie weit die unterschiedlichen Ansätze (makroskopisch - mikroskopisch) anwendbar sind, werden die in den Kapiteln 2 und 3 verwendeten Evakuierungssimulationsprogramme und Handrechenverfahren im Folgenden verglichen.

4.1. Vergleich an einem Hochhaus

In einem Hochhaus sind die Treppen die hauptsächlich genutzten Gebäudeteile im Falle einer Evakuierung, da bei einer Evakuierung keine Aufzüge genutzt werden dürfen. Um einen Vergleich zwischen Simulation und Handrechnung zu ermöglichen, wurde das Mannesmann-Hochhaus (siehe Abbildung 3.1) [128] sowohl mit vier Evakuierungssimulationsprogrammen (Aseri 4.1, buildingExodus V 4.0, Level 2, PedGo 2.2.4, Simulex 11.1.3) und verschiedenen Handrechenverfahren berechnet. Die in Tabelle 4.1 dargestellten Ergebnisse zeigen auf, dass sowohl Evakuierungssimulationsprogramme als auch Handrechenverfahren im gleichen Prognosebereich liegen.

Hierbei ist jedoch anzumerken, dass die Schwankungen bei den Evakuierungssimulationsprogrammen untereinander wesentlich geringer sind als bei den Handrechenverfahren. Der Mittelwert der angewandten Handrechenverfahren stimmt jedoch recht gut mit der Evakuierungsübung und den Prognosen der Evakuierungssimulationsprogramme überein.

4.2. Vergleich an einem Schulgebäude

Das im Abschnitt 3.3 dargestellte Schulgebäude wurde mit den Programmen SimuLex 11.1.3 und PedGo 2.2.4 berechnet. Auch hier zeigen die Evakuierungssimulationsprogramme eine gute Übereinstimmung mit dem Mittelwert der Handrechenverfahren, da diese ebenfalls eine breite Streuung untereinander aufweisen (siehe Tabelle 4.2). Da die Handrechenverfahren jedoch keine freien Gehgeschwindigkeiten zur Auswahl stellen, sind die angegebenen Zeiten nur mit einer Personengruppe „Männer“ vergleichbar. Langsamere freie Gehgeschwindigkeiten können mit den Handrechenverfahren nicht wiedergegeben werden, wie aus dem Vergleich in Tabelle 4.2 hervorgeht. Im Mittel ergibt sich bei Anwendung der Handrechenverfahren eine Evakuierungszeit von ca. 6,5 min, die auch die Programme mit einer Personengruppe „Männer“ wiedergeben. Für den hier dargestellten Fall ist eine recht gute Übereinstimmung zwischen Programm und Handrechenverfahren zu erkennen.

Makroskopische Modelle	427 Personen (19 pro Etage) mit 0,8 min Reak.-Zeit
Predtetschenski und Milinski, herkömmliches Verfahren [114]	9,10 min
Predtetschenski und Milinski, vereinfachtes Verfahren [113]	9,15 min
SFPE/NFPA-Handbook [101]	14,78 min
Verfahren von W. Müller [93–96]	14,58 min
Verfahren von K. Togawa [144]	5,65 min
Verfahren von M. Galbreath [34]	6,52 min
Effective-Width Modell nach J. Pauls [111]	7,84 min
Verfahren von Melinek und Booth [80]	7,67 min
Verfahren von E. Kendik [57]	7,98 min
Verfahren von Seeger und John [128]	8,83 min
Durchschnitt der 10 Verfahren	9,21 min
Mikroskopische Modelle	mit 0,8 min Reak.-Zeit
ASERI	ca. 9 min
buildingEXODUS	ca. 8,5 min
PedGo	ca. 8 min
Simulex	ca. 8 min
Durchschnitt der 4 Programme	ca. 8,4 min
Evakuierungsübung [128]	8,78 min (ohne 0,8 min Reak.-Zeit: 7,98 min)

Tabelle 4.1.: Vergleich verschiedener makroskopischer und mikroskopischer Modelle mit einer Evakuierungsübung am Beispiel des Mannesmann-Hochhauses.

Makroskopische Modelle	880 Personen (Gesamt)
Predtetschenski und Milinski, herkömmliches Verfahren [114]	9,00 min
Predtetschenski und Milinski, vereinfachtes Verfahren [113]	9,07 min
SFPE/NFPA-Handbook [101]	4,76 min
Verfahren von W. Müller [93–96]	5,33 min
Verfahren von Roitman [124]	5,88 min
Verfahren nach NFPA 130 [102]	4,34 min
Verfahren von Weidmann [151]	5,63 min
Durchschnitt der 7 Verfahren	6,30 min
<hr/>	
PedGo - Schüler ($0,9\text{m/s} \pm 0,3\text{m/s}$)	ca. 8 min
PedGo - Männer ($1,35\text{m/s} \pm 0,2\text{m/s}$)	ca. 7 min
Simulex - Schüler ($0,9\text{m/s} \pm 0,3\text{m/s}$)	ca. 8 min
Simulex - Männer ($1,35\text{m/s} \pm 0,2\text{m/s}$)	ca. 6 min
Durchschnitt der 2 Programme - Schüler	ca. 8 min
Durchschnitt der 2 Programme - Männer	ca. 6,5 min

Tabelle 4.2.: Vergleich verschiedener makroskopischer Modelle für ein Schulgebäude.

Teil III.

Brandsimulationen

Brandsimulationen spielen bei heutigen Bauwerken eine immer größer werdende Rolle. Während die jeweiligen Landesbauordnungen oder Sonderbauverordnungen mit ihren brandschutzspezifischen Vorgaben bei „Standardgebäuden“ recht gut angewendet werden können, ist die Situation bei Gebäuden der modernen Architektur doch etwas komplizierter. Hier werden teilweise Atrien errichtet oder verglaste Treppenträume, was nur auf Grundlage der jeweiligen Landesbauordnungen nicht zu realisieren wäre. So müssen beispielsweise Treppenträume in Hochhäusern mit Brandwänden versehen werden, was die Verwendung von Glas eigentlich ausschließt. Auch die Entrauchung von Atrien kann mit herkömmlichen Vorgaben von Rauchabzugsöffnungen nicht gelöst werden, das bekannteste Beispiel ist das Mercedes-Benz-Museum in Stuttgart, das mit Hilfe des weltgrößten künstlichen Zyklons entrauchung werden kann. Die Planung solcher Sondermaßnahmen ist deshalb auf die Anwendung von Ingenieurmethoden angewiesen, um die jeweiligen Schutzziele zu erreichen und auch nachzuweisen, seien es Schutzziele im Sinne der Personensicherheit oder der Bauwerkssicherheit.

Speziell im Bereich Brandschutz werden zum Nachweis der Rettungswegsicherheit und -nutzbarkeit oder der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen Brandsimulationsprogramme angewendet, die entweder auf Massenbilanzen (sog. Zonenmodelle) oder die vom Aufbau her komplexen Fluid-Dynamischen Ansätzen (sog. CFD-Modelle) basieren. Im Folgenden werden die Vor- und Nachteile der einzelnen Programmtypen beschrieben und ihre Anwendungsgrenzen dargelegt. Weiterhin wird am Beispiel des Brandsimulationsprogramms „NIST Fire Dynamics Simulator (FDS)“ gezeigt, wie mit Hilfe moderner Parallelisierungsmechanismen eine Beschleunigung der Berechnungszeit erzielt werden kann.

5. Zonenmodelle

Zonenmodelle sind die ersten rechnerischen Modelle, mit deren Hilfe eine Rauchausbreitung in Gebäuden vorhergesagt wurde. Vereinfacht gesagt handelt es sich bei diesen Modellen um Massenbilanzrechnungen für verschiedene Räume, die durch Türen miteinander verbunden sind, so dass Rauch bei Erreichen der Türöffnung in den nächsten Raum strömt. Ebenfalls ist es dadurch möglich, den Einfluss von Entrauchungsöffnungen auf die Rauchausbreitung zu ermitteln. Bei den ersten Modellen handelte es sich um einfache Ein-Raum Zonenmodelle, die aufgrund der Einfachheit für die Auslegung einzelner Räume genutzt wurden, es entfiel dadurch die Berechnung von raucharmen Schichten mittels Handrechenverfahren. Basierend auf diesem ersten Ansatz wurden Zonenmodelle immer komplexer, so dass sich mittlerweile Rauchausbreitungen in einer teilweise komplexen Mehrraum-Geometrie vorhersagen lassen. Aufgrund des geringfügigen Rechenbedarfs ist es recht einfach, diverse Parameterstudien zu betreiben. Doch Zonenmodelle haben auch ihre Grenzen hinsichtlich der zu untersuchenden Geometrie, da die Modelle ausschließlich für eine rechteckige Gebäudegeometrie geeignet sind; handelt es sich jedoch um eine runde oder mehreckige Geometrie, wird diese dagegen in eine flächen- und volumengleiche Geometrie umgerechnet, was nicht immer zu den gewünschten Ergebnissen führt. Auch können Gebäude mit Atrien und Galerieelementen nicht bzw. nur mit erheblichen Einschränkungen berechnet werden, da Zonenmodelle keine Raumluftströmungen berücksichtigen, sondern nur Massenbilanzen. Dadurch werden Rauchströmungen an Galerien oder Emporen nicht wiedergegeben, was zu fehlerhaften Ergebnissen führen kann.

Da die Zonenmodelle zum Teil unterschiedliche Ansätze hinsichtlich Plumeformeln oder Algorithmen verwenden, soll im Folgenden anhand eines einfachen Beispiels einer Industriehalle gezeigt werden, welche Unterschiede bei der Anwendung von Zonenmodellen zu erwarten sind und wie mit diesen umzugehen ist.

5.1. Unterschiede bei der Anwendung von Zonenmodellen

Wie bereits erwähnt haben Zonenmodelle zum Teil unterschiedliche Ansätze, die bei der Berechnung verwendet werden. Auch sind teilweise Eingaben auf unterschiedliche Art und Weise zu tätigen, da die einzelnen Programme unterschiedliche Einheiten oder Bezeichnungen verwenden. Im Folgenden werden Ergebnisse von vier verschiedenen zur Verfügung stehenden Zonenmodellen (Argos Version 5.3.59.341, Branzfire Version 2009.1, CFAST Version 6.1.1.54 und Ozone Version 2.2.2) am Beispiel einer einfachen Industriehalle mit einer Grundfläche von 1.600 m^2 und einer Höhe von 8 m gegenübergestellt. Es wurde hierbei darauf geachtet, dass die Eingaben bei allen Programmen identisch sind, entsprechende Voreinstellungen wurden verwendet.

5.1.1. Untersuchte Geometrie

Bei der untersuchten Geometrie handelt es sich um eine Industriehalle mit den Grundmaßen $50 \text{ m} \times 32 \text{ m}$, sowie mit einer Höhe von 8 m , somit ergibt sich eine Grundfläche von 1.600 m^2 und ein umbauter Raum von 12.800 m^3 . In der Decke der Halle sind jeweils 8 natürliche Rauchabzugöffnungen mit einer Grundfläche von jeweils $4,84 \text{ m}^2$ ($2,2 \text{ m} \times 2,2 \text{ m}$), die Zuluft wird durch insgesamt 5 Öffnungen sichergestellt, hierbei befinden sich jeweils 2 Öffnungen zu je $15 \text{ m} \times 0,75 \text{ m}$ in den jeweils 50 m langen Außenwänden, eine weitere Zuluftöffnung befindet sich an der 32 m langen Außenwand ($17,44 \text{ m} \times 0,75 \text{ m}$).

Die Halle wurde als Modellversuch im Rahmen des 1. Workshops der FDS Usergroup - Arbeitsgruppe NRW in Zusammenarbeit mit dem Institut für Industrieaerodynamik GmbH (IFI) in Aachen untersucht. In der ursprünglichen Untersuchung enthält die Halle Einbauten, die 40% der Grundfläche einnehmen und eine Höhe von 5 m bzw. 7 m haben. Da jedoch nicht alle Zonenmodelle eine Möglichkeit bieten, dass Einbauten in der gewünschten Art und Weise in die Geometrie implementiert werden können, wurden die Simulationen jeweils mit einer leeren Halle durchgeführt. Als Brandquelle (in etwa mittig in der Halle platziert) wurde ein sog. αt^2 -Brand realisiert, der seine maximale Wärmefreisetzungsrate von 3.000 kW nach 420 Sekunden erreicht, danach bleibt der Brand konstant. Die flächenbezogene Wärmefreisetzungsrate beträgt 150 kW/m^2 , der Strahlungsanteil 25% . Alle Öffnungen (Zuluft sowie

Rauchabzugsöffnungen) werden zu Beginn des Versuchs als geöffnet angesehen. Abbildung 5.1 zeigt den entsprechenden Grundriss mit den ursprünglich untersuchten Einbauten, die jedoch im Rahmen der Simulation mit Zonenmodellen nicht berücksichtigt wurden.

5.1.2. Modellierung der Brandquelle

Da es sich bei der Brandquelle um einen sog. αt^2 -Brand handelt, wurde nach Möglichkeit eine entsprechende Funktion in den Programmen genutzt. Teilweise war dies jedoch nicht möglich, so dass die entsprechenden Werte über eine Tabelle eingegeben werden mussten. Ebenfalls wurde die entsprechende Brandfläche berücksichtigt. Wenn es ein Programm erlaubt, dass die genaue Position der Brandquelle angegeben werden kann, so wurde von dieser Möglichkeit Gebrauch gemacht, ansonsten wurde als Brandquellenposition die Gebäudemitte ausgewählt.

Die folgenden Abbildungen 5.2 - 5.5 zeigen unterschiedliche Eingabefenster für die Brandquelle der jeweiligen Programme.

5.1.3. Geometrieingabe

Bei der Geometrieingabe verhält es sich ähnlich wie bei der Brandquelleneingabe, da die Programme teilweise unterschiedliche Eingabeformate wählen. Während beispielsweise bei Branzfire, CFAST und Ozone der jeweilige Raum in seinen Ausmaßen anzugeben ist (Länge \times Breite \times Höhe), so ist exemplarisch im Programm Argos zusätzlich zur Höhe die Grundfläche des Raumes anzugeben sowie die maximale Distanz innerhalb des Raumes. Zusätzlich wird der Raumumfang durch die Definition der einzelnen Umfassungsbauteile (Wände) ermittelt. Eine Angabe hinsichtlich Länge und Breite ist in diesem Fall nicht möglich. Ähnlich verhält es sich bei den Öffnungen in Decken und Wänden. Bei CFAST ist beispielsweise jede Wandöffnung separat einzugeben, während alle Deckenöffnungen zu einer einzigen Öffnung zusammengefasst werden müssen. Bei Branzfire verhält es sich ähnlich, nur kann hier nur eine Öffnung jeweils für Decke und Wand spezifiziert werden. Argos und Ozone erlauben dagegen die Definition einzelner Öffnungen in Decken und Wänden sowie deren Anzahl. Bei Ozone ist jedoch zu beachten, dass die Öffnungen in der Decke mit Hilfe des Kreisdurchmessers beschrieben werden. Es sei zusätzlich darauf hingewiesen, dass die Programme teilweise einen „Kontraktionskoeffizienten“ nutzen, der die geome-

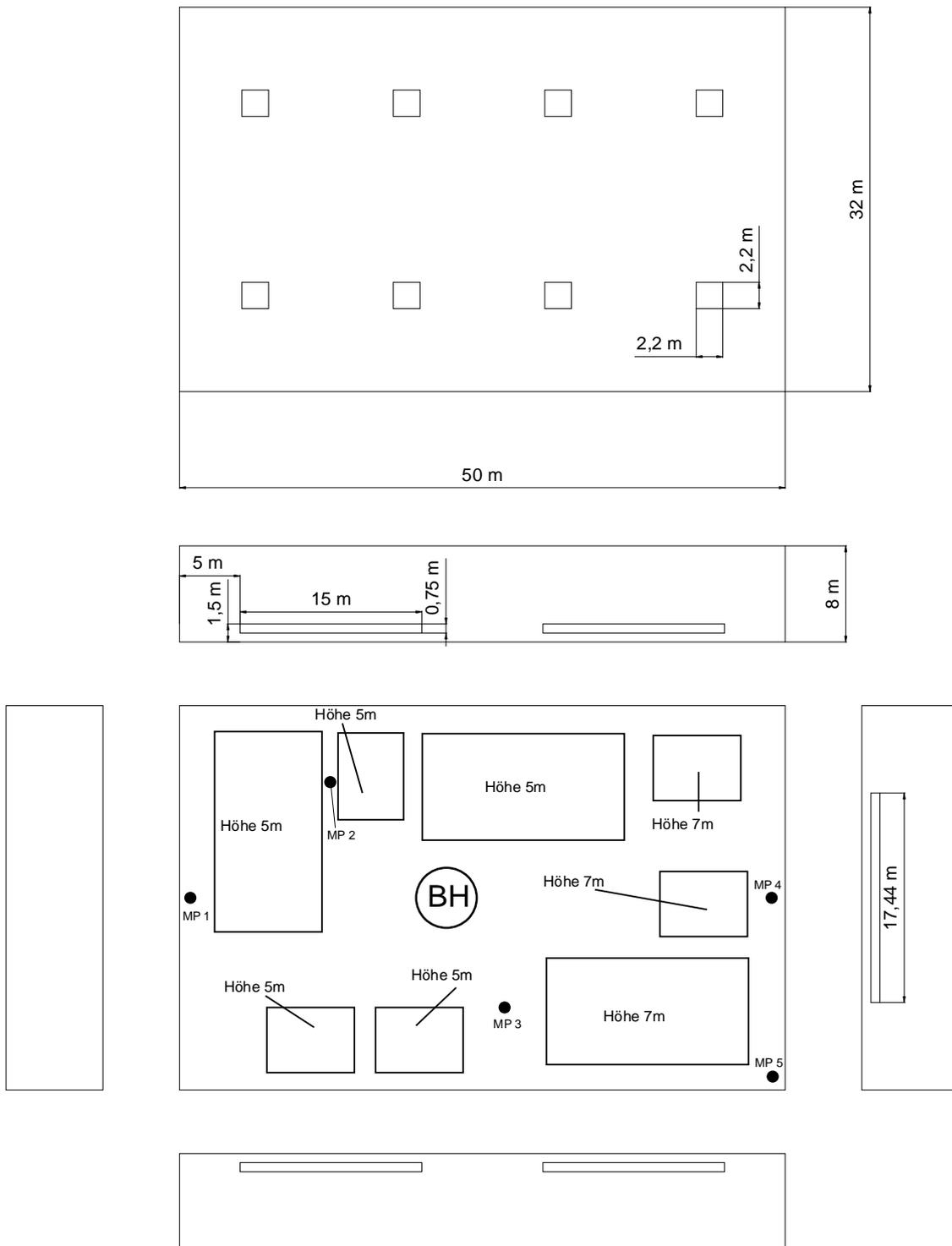


Abbildung 5.1.: Modellversuch einer Industriehalle (Bild: IFI). BH zeigt die Position des Brandherdes (Brandquelle), MP kennzeichnet vor Ort angebrachte Messpunkte. Der obere Teil zeigt die Anordnung der Rauchabzugsöffnungen, die Seiten geben die jeweilige Position der Zuluftöffnungen an. Die Einbauten wurden in der Simulation nicht berücksichtigt

5. Zonenmodelle

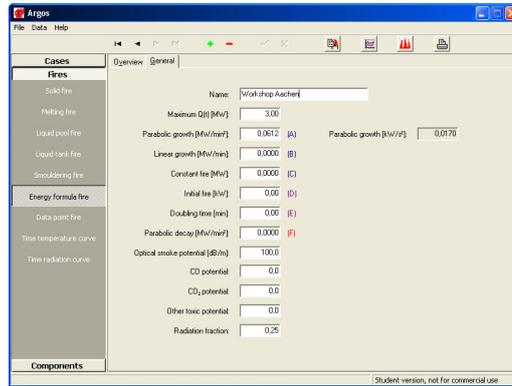
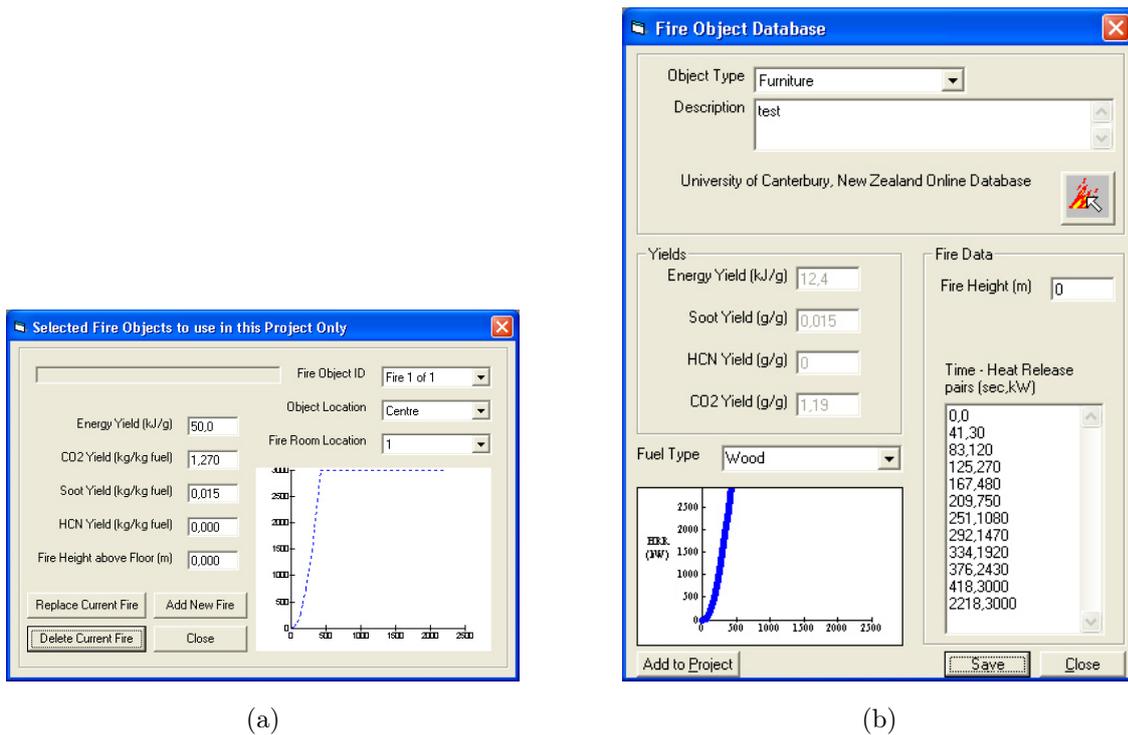


Abbildung 5.2.: Brandquellenmodellierung im Programm Argos

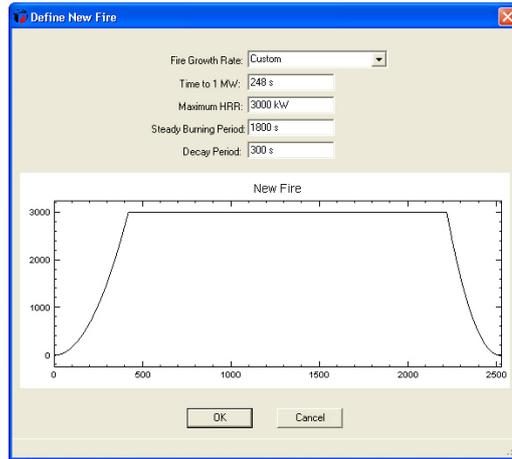


(a)

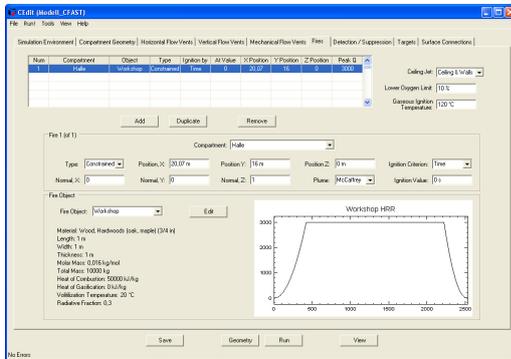
(b)

Abbildung 5.3.: Brandquellenmodellierung im Programm Branzfire

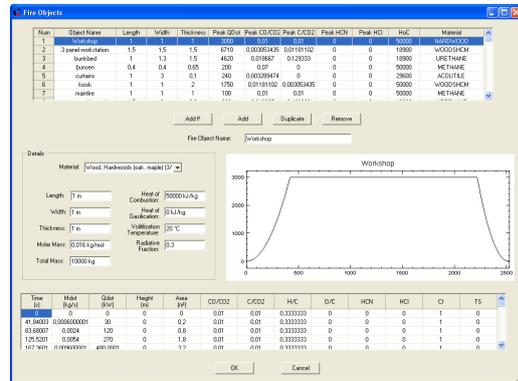
5. Zonenmodelle



(a)



(b)



(c)

Abbildung 5.4.: Brandquellenmodellierung im Programm CFAST

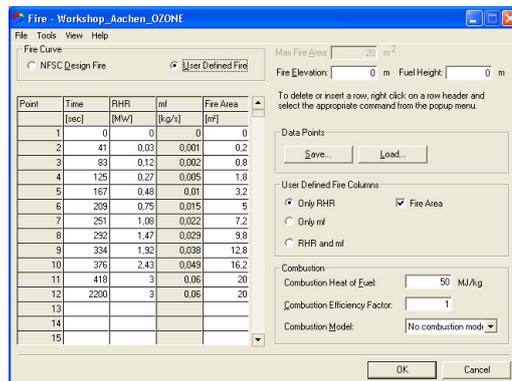


Abbildung 5.5.: Brandquellenmodellierung im Programm Ozone

trische Öffnungsfläche in eine aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche umrechnet. Dieser ist mit 0,7 angesetzt. Bei Programmen, die keinen entsprechenden Koeffizienten ermöglichen, wurde die Öffnungsfläche entsprechend verkleinert (Multiplikation der geometrischen Öffnungsfläche mit 0,7). Um die Wärmekapazität der Bauteile vergleichbar zu machen, wurde in den jeweiligen Programmen ein Standard-Beton als Material der Umfassungsbauteile (Boden, Wände und Decke) ausgewählt.

Aufgrund der vielfältigen Eingabemöglichkeiten bzw. -vorschriften ist es natürlich recht kompliziert, die unterschiedlichen Randbedingungen vergleichbar anzunehmen, da beispielweise die Deckenöffnungen einmal als Kreise und einmal als Rechtecke angegeben werden müssen. Die folgenden Abbildungen zeigen einige der Eingabedialoge der verschiedenen Programme.

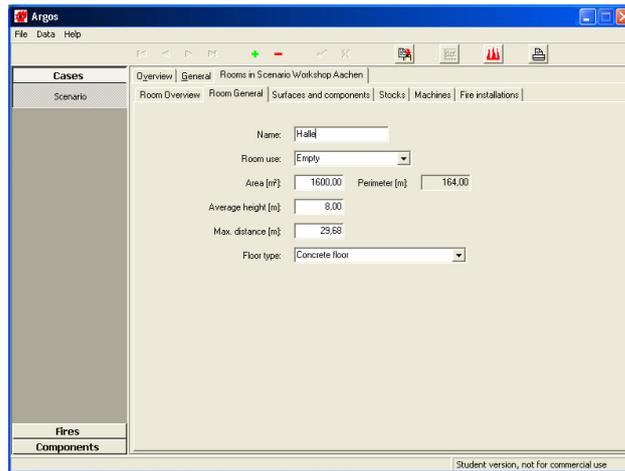
5.2. Ergebnisse verschiedener Zonenmodelle

Da die unterschiedlichen Zonenmodelle unterschiedliche Eingabeparameter besitzen stellt sich zwangsläufig die Frage, ob denn trotz dieser unterschiedlichen Eingabemöglichkeiten auch die Ergebnisse unterschiedlich sind. Da es sich bei der untersuchten Industriehalle um ein sehr einfaches Beispiel handelt, sollten in diesem Falle eventuell vorhandene Unterschiede in den Ergebnissen recht einfach zu erkennen sein. Die Simulationsdurchläufe wurden jeweils über einen Simulationszeitraum von 30 min durchgeführt, da dieser Zeitraum auch dem Experiment entspricht. Dass die Eingabe der Brandquellen bei den einzelnen Programmen zu unterschiedlichen Verläufen im Endstadium der Brände führt ist bei dieser Untersuchung nicht relevant, da die jeweiligen Brandquellen immer bis zur 30. Minute nach der anfänglichen Steigung die konstante Wärmefreisetzungsrate behielten (3.000 kW), so dass eventuelle Unterschiede nach diesem Zeitpunkt aufgrund des Experimentendes keinen Einfluss auf das Ergebnis haben.

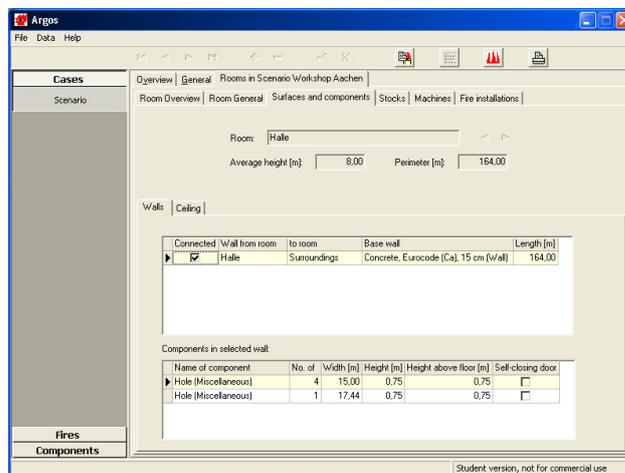
Da nicht alle Programme die gleichen Ausgabegrößen ausgeben, zeigen die folgenden drei Abbildungen (Abb. 5.10, 5.11 und 5.12) den Vergleich der Höhe der raucharmen Schicht, der Temperatur in der Heißgasschicht und der Druckdifferenz im berechneten Raum zur Umgebung, da diese Werte von allen Programmen zur Verfügung gestellt werden.

Die Ergebnisse bei der Berechnung der raucharmen Schicht (siehe Abb. 5.10) zeigen recht große Unterschiede. Speziell das Programm Ozone hatte bei der Berechnung

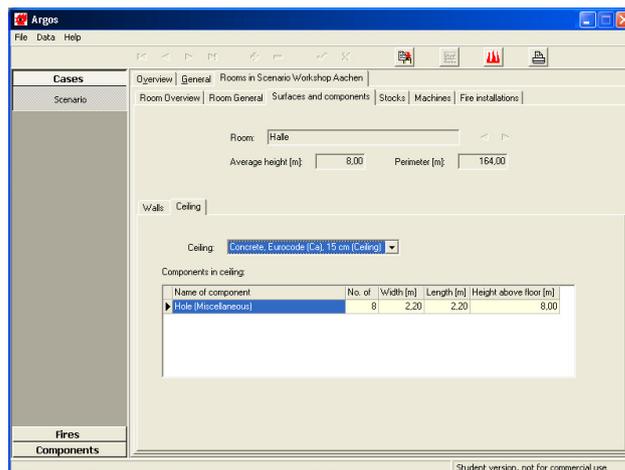
5. Zonenmodelle



(a) Eingabe der Geometrie



(b) Eingabe der Wandöffnungen



(c) Eingabe der Deckenöffnungen

Abbildung 5.6.: Geometrie- und Öffnungseingabe im Programm Argos

Building / Room Specification

Dimensions | Wall Vents | Ceiling Vents | Wall Material | Ceiling Material | Floor Material

General

Room Width (m) 50

Room Length (m) 32

Max Stud Height (m) 8

Min Stud Height (m) 8

Floor Elevation (m) 0

Current Room 1

Room Description Halle

Ceiling Geometry

Flat Ceiling

Sloping Ceiling

Add Room Delete Room

OK

(a) Eingabe der Geometrie

Building / Room Specification

Dimensions | Wall Vents | Ceiling Vents | Wall Material | Ceiling Material | Floor Material

Connecting rooms 1 and outside

Vent Width (m) 77,440

Vent Height (m) 0,750

Vent Sill Height (m) 0,750

Vent Opening Time (sec) 0,0

Vent Closing Time (sec) 3600,0

Vent # Vent 1

Add Vent Delete Vent

Spill Plume Options

Vent - Glass Properties

Room-Vent Geometry

OK

(b) Eingabe der Wandöffnungen

Building / Room Specification

Dimensions | Wall Vents | Ceiling Vents | Wall Material | Ceiling Material | Floor Material

Connecting upper room outside

to lower room 1

Vent # Vent 1

Vent Area (sqm) 38,72

Vent Opening Time (sec) 0,0

Vent Closing Time (sec) 3600,0

Vent Opening

Manual Automatic

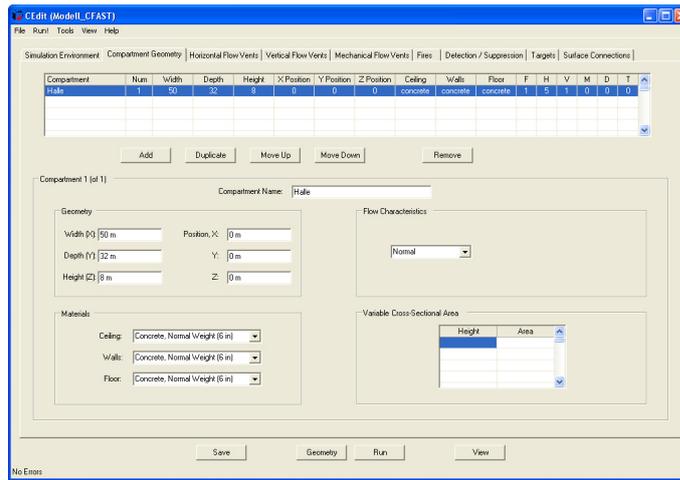
Add Vent Delete Vent

OK

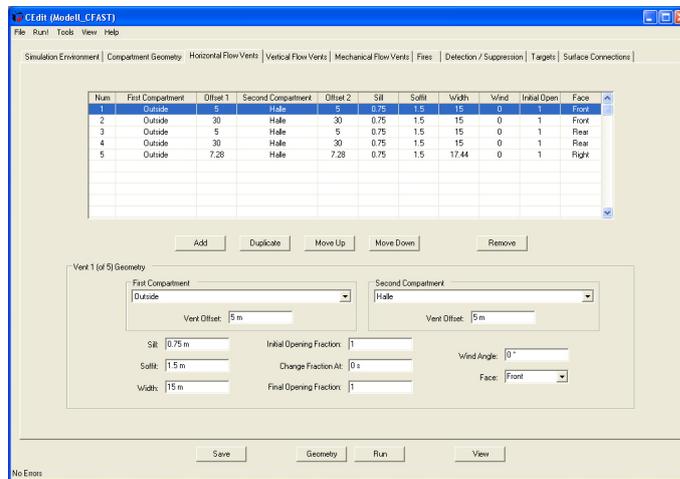
(c) Eingabe der Deckenöffnungen

Abbildung 5.7.: Geometrie- und Öffnungseingabe im Programm Branzfire

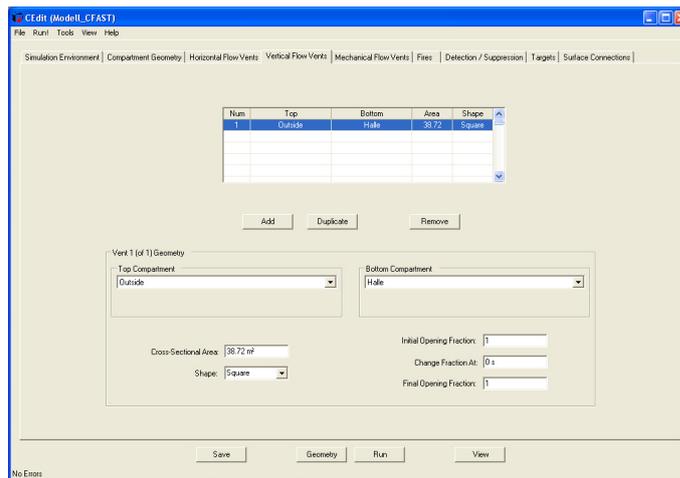
5. Zonenmodelle



(a) Eingabe der Geometrie



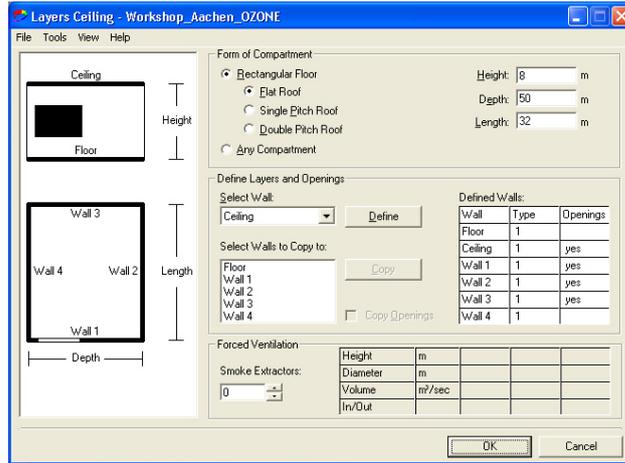
(b) Eingabe der Wandöffnungen



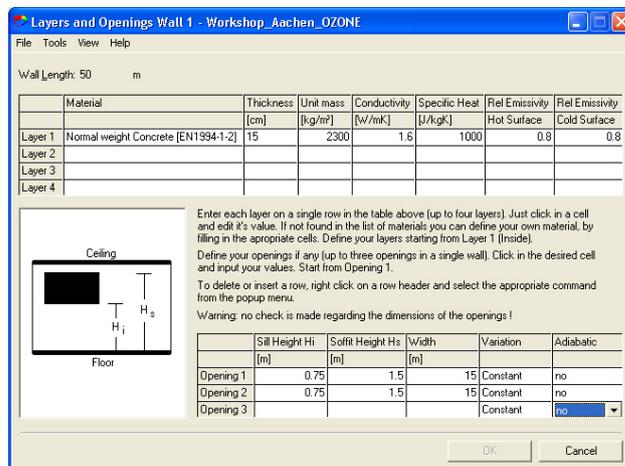
(c) Eingabe der Deckenöffnungen

Abbildung 5.8.: Geometrie- und Öffnungseingabe im Programm CFAST

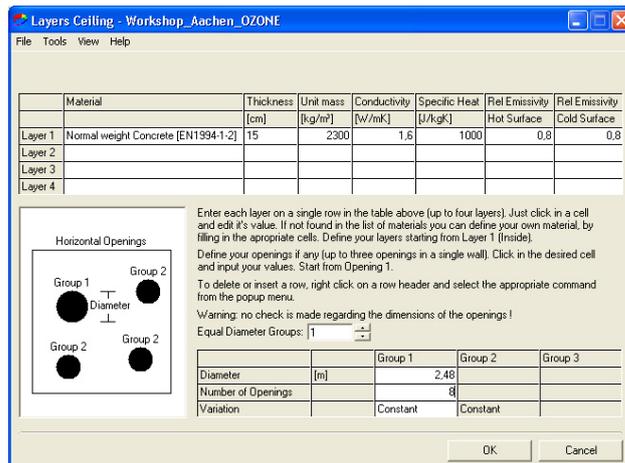
5. Zonenmodelle



(a) Eingabe der Geometrie



(b) Eingabe der Wandöffnungen



(c) Eingabe der Deckenöffnungen

Abbildung 5.9.: Geometrie- und Öffnungseingabe im Programm Ozone

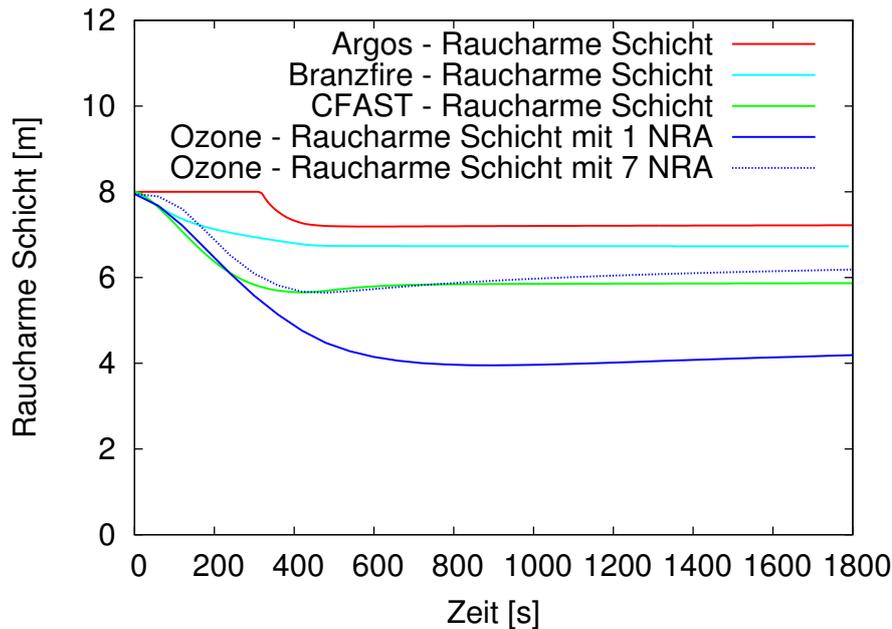


Abbildung 5.10.: Höhe der raucharmen Schicht, ermittelt mit 4 verschiedenen Zonenmodellen

der raucharmen Schicht Probleme, da eine Eingabe von 8 Deckenöffnungen mit einem Durchmesser von jeweils 2,48 m (insgesamt $38,64 \text{ m}^2$) in einer nicht durchgeführten Berechnung endete (laut Programm wäre die Rauchsicht zu klein, so dass die Berechnung abgebrochen wurde). Um dennoch ein Ergebnis zu erhalten, wurden nur 7 Deckenöffnungen verwendet, die eine raucharme Schicht von ca. 6 m errechneten. Wurde dagegen nur eine Deckenöffnung mit einem Durchmesser von 7,023 m angegeben, was einer Fläche von $38,74 \text{ m}^2$ entspricht, so wurde die Berechnung ohne Probleme durchgeführt, die Höhe der raucharmen Schicht sank um ca. 2 m nach unten, so dass nunmehr ca. 4 m als raucharme Schicht ausgegeben werden. Die übrigen Programme hatten bei der Eingabe bzw. Berechnung der raucharmen Schicht keine Probleme, hier schwankt die Höhe der raucharmen Schicht zwischen 6 und 7 m.

Auch bei der Temperatur der Rauchsicht variieren die Ergebnisse der Programme (siehe Abb. 5.11). Die niedrigste Temperatur der Rauchsicht wird vom Programm Ozone mit 54 °C angegeben, während das Programm CFAST 79 °C angibt. Neben der doch recht großen Differenz der Ergebnisse fällt vor allem auf, dass das Programm Ozone mit der unterschiedlichen Eingabe der Deckenöffnungen jeweils annähernd gleiche Ergebnisse ermittelt.

Beim Vergleich des Druckunterschieds in der Halle im Vergleich zur Umgebung zei-

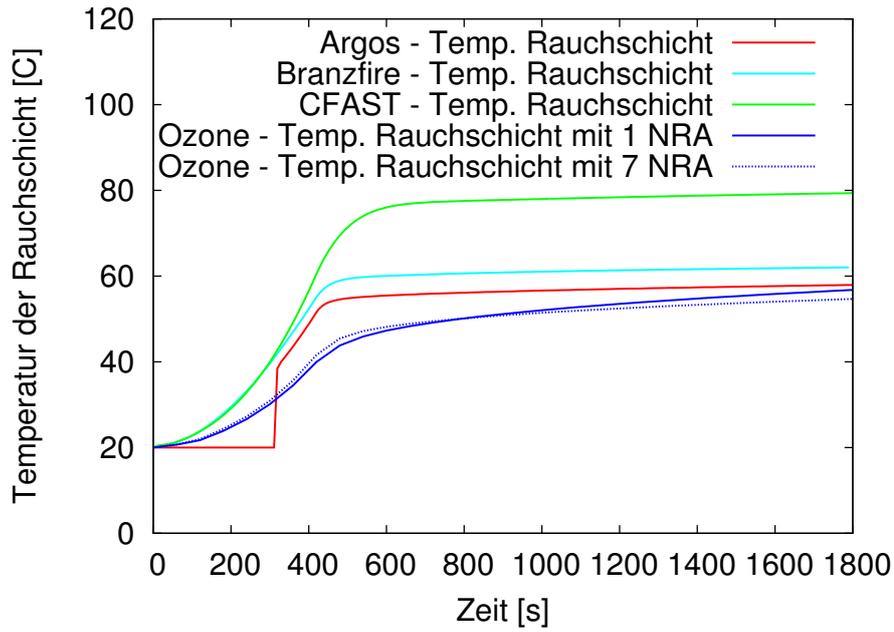


Abbildung 5.11.: Temperatur der Rauchscht, ermittelt mit 4 verschiedenen Zonenmodellen

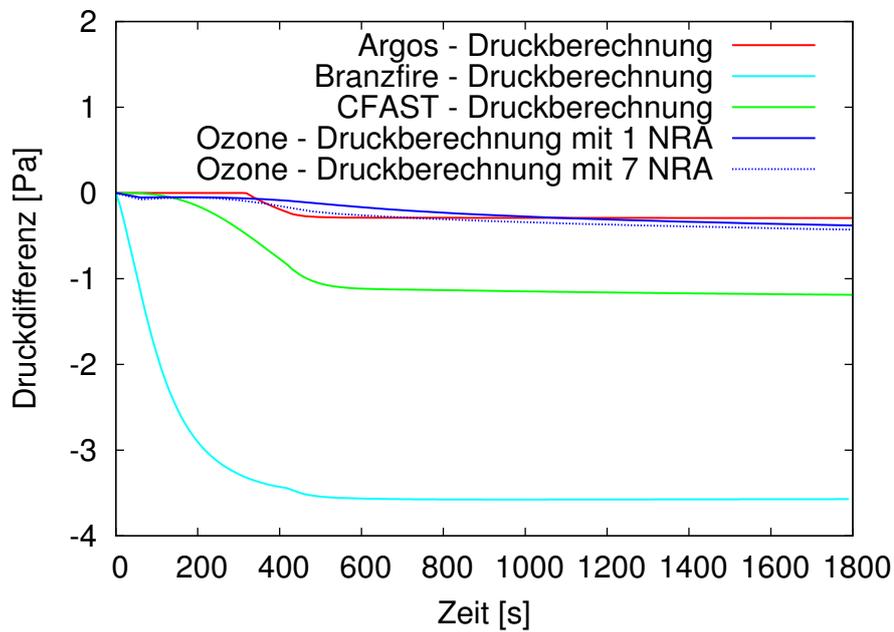


Abbildung 5.12.: Druckdifferenz zur Umgebung, ermittelt mit 4 verschiedenen Zonenmodellen

gen die Programme ebenfalls eine Abweichung. Während beim Programm Argos der Druckunterschied in der Halle zur Umgebung nur minimal ist (-0,3 Pa) ist er dagegen beim Programm Branzfire mit -3.5 Pa am größten. Was auf den ersten Blick recht klein erscheint, ist letztendlich ein Unterschied um den Faktor 10. Auch das Programm Ozone zeigt keine großen Unterschiede zwischen den beiden Simulationen mit unterschiedlichen Deckenöffnungen.

5.3. Vergleich der Ergebnisse mit dem Modellversuch und mit einem Feldmodell

Da die Ergebnisse der Zonenmodelle doch recht unterschiedlich sind, ist ein Vergleich mit einem Feldmodell (hier: NIST Fire Dynamics Simulator (FDS)) und dem Experiment angebracht. Da die Vergleiche mit dem Experiment nur einen Vergleich der Rauchschichthöhe ermöglichen, kann festgestellt werden, dass die mit den Zonenmodellen berechneten Ergebnisse teilweise zu positiv ausfallen. Im Experiment wird die Rauchschichthöhe über den Kehrwert des Verdünnungsverhältnisses des beigemischten Tracergases ermittelt. Wird ein vorher festgelegter Grenzwert überschritten, so gilt der entsprechende Bereich als verraucht. Die im Experiment durch die Firma IFI ermittelten Werte zeigen auf, dass die Höhe der raucharmen Schicht ca. 5 m beträgt, ein Wert, der nur durch das Programm Ozone unter Zuhilfenahme einer großen Deckenöffnung unterschritten wird. Die übrigen Programme dagegen ermitteln eine höhere raucharme Schicht. Berechnungen mit FDS haben ergeben, dass dort ebenfalls eine raucharme Schicht von ca. 5 m ermittelt wird (siehe Abb. 5.13). Die raucharme Schicht in FDS wurde mittels der Funktion „LAYER HEIGHT“ ermittelt.

Die Berechnung der Temperatur einer Rauchgasschicht in einem Feldmodell ist naturgemäß etwas komplizierter, da es keine exakte Trennung zwischen beiden Schichten (Rauchgasschicht - raucharme Schicht) gibt. Um die Werte dennoch vergleichen zu können, wurden an den entsprechenden Messpunkten (siehe Abb. 5.1) jeweils die Temperaturwerte in unterschiedlichen Höhen ermittelt (5,125 m, 6,125 m und 7,125 m). Da eine entsprechende Rauchausbreitung entsteht, wurden zwei Arten von Temperaturen ermittelt: eine mittlere Temperatur aller Messpunkte zum jeweiligen Zeitpunkt sowie die maximale Temperatur aller Messpunkte, Abbildung 5.14 zeigt die Ergebnisse. Beim Vergleich der Ergebnisse mit den Zonenmodellen fällt auf, dass die maximale Temperatur am ehesten den Ergebnissen der Zonenmodelle entspricht

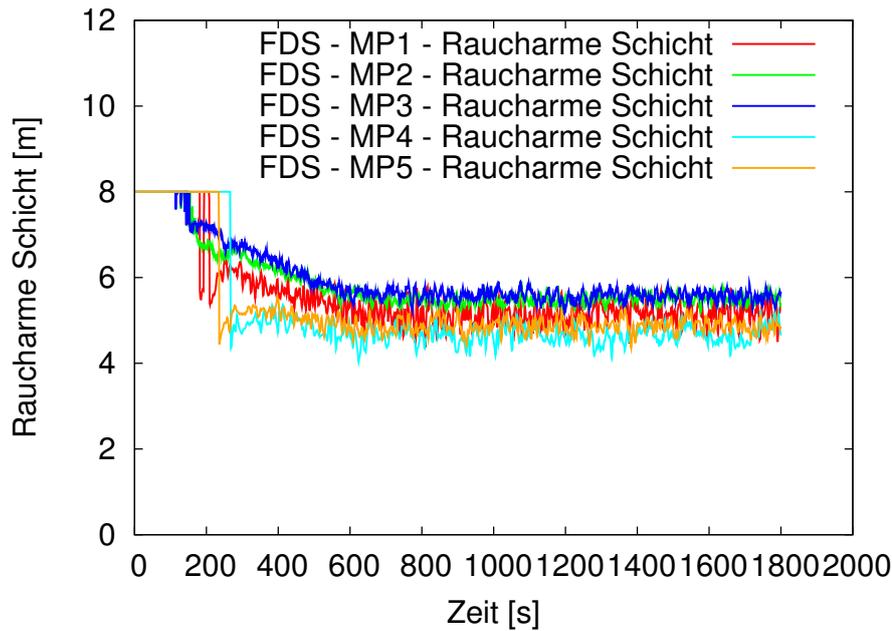


Abbildung 5.13.: Höhe der raucharmen Schicht, ermittelt mit FDS an unterschiedlichen Messpunkten

(sowohl Argos, Branzfire und Ozone ermitteln ca. 60 °C als Temperatur, CFAST dagegen fast 80 °C), die mittlere Temperatur ist dagegen weitaus niedriger als von den Zonenmodellen ermittelt.

Prinzipiell ist festzustellen, dass sowohl Zonenmodell als auch Feldmodell recht ähnliche Ergebnisse ermitteln. Als Empfehlung kann jedoch festgehalten werden, dass immer mehrere Zonenmodelle bei der Berechnung verwendet werden sollten, da die entsprechenden Ergebnisse teilweise voneinander abweichen. Durch die Bildung entsprechender Mittelwerte können die Unterschiede der Ergebnisse ausgeglichen werden, so dass die Ergebnisse auf unterschiedlichen Berechnungsansätzen basieren, was für eine größere Zuverlässigkeit der Ergebnisse spricht.

5.4. Konservative Annahmen bei Zonenmodellen

Da bei Brandsimulationen im Allgemeinen und bei Zonenmodellen im Besonderen die Randbedingungen vorgegeben sind, bietet sich dem Anwender keine Möglichkeit zur Auswahl konservativerer Annahmen. Die Randbedingungen sind bekannt, d. h. die Gebäudegeometrie steht fest und vorhandenen Entlastungsflächen sind bekannt. Letztendlich bleibt dem Nutzer nur die Möglichkeit anhand des Bemessungsbrand-

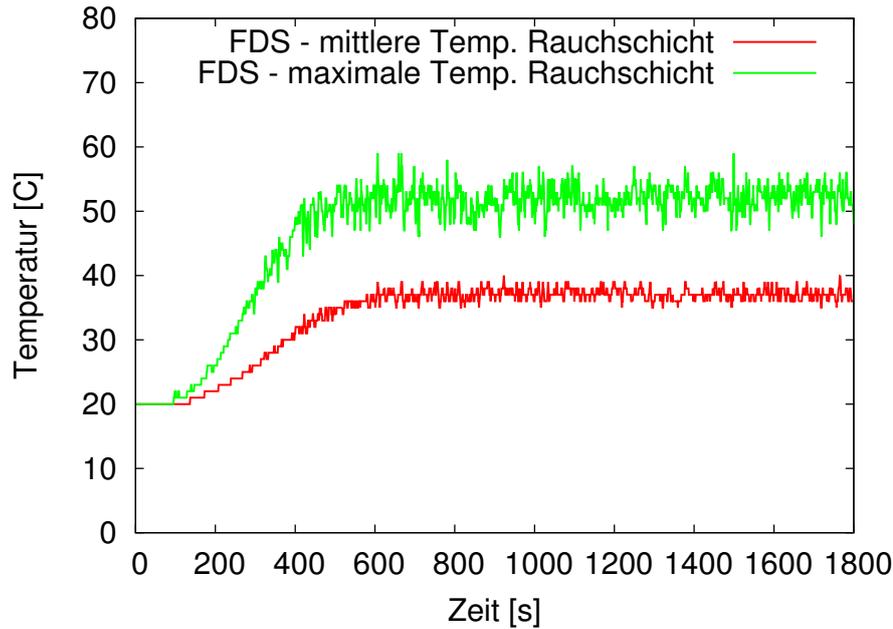


Abbildung 5.14.: Temperatur der Rauchschicht, ermittelt mit FDS

szenarios eine konservative Abschätzung zu treffen. Da jedoch beispielsweise bei Anwendung von Brandlastberechnungen reale Werte angenommen werden müssen, orientieren sich diese Annahmen sehr stark an der Realität, so dass dadurch recht wenig Spielraum für Entscheidungen bleibt, ob sie nun konservativ oder optimistisch sein mögen. Vielmehr zeigen die einzelnen Programme teilweise Unterschiede in den berechneten Ergebnissen (bspw. die Höhe der raucharmen Schicht), so dass hierbei eher die Wahl des Programmes die „konservative Annahme“ darstellt, ein Problem, was jedoch in der Praxis nicht vorkommen sollte, wie Abbildung 5.10 aufzeigt.

6. Einfluss der Zellgröße am Beispiel FDS

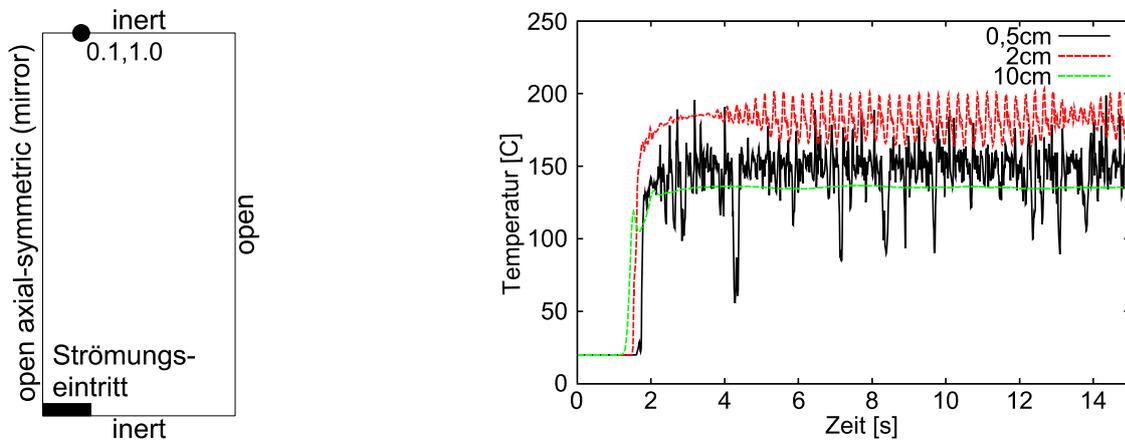
Die Zellgröße ist bei CFD-Programmen die Größe, die einen maßgeblichen Einfluss auf das Ergebnis haben kann, da durch die Auflösung der Detaillierungsgrad der Simulation bestimmt wird. Als Zellgröße wird in diesem Fall die Kantenlänge einer Zelle bezeichnet, d. h. eine „10 cm Zelle“ hat eine Kantenlänge von $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$. Zudem bedeutet eine kleinere Zellgröße letztendlich immer eine längere Rechenzeit, da beispielsweise eine Halbierung der Zellgröße eine um den Faktor 16 verlängerte Rechenzeit bedeutet¹, so dass der Anwender im Sinne einer wirtschaftlichen Lösung stets bestrebt ist, die größte und zugleich noch akzeptable Zellweite zu wählen. Am Beispiel von Temperaturentwicklungen eines achsensymmetrischen Plumes sowie von Strömungen an geneigten Ebenen (Ebenen, die nicht in das Zellraster des Fire Dynamics Simulator passen) soll deshalb gezeigt werden, wie sich kleinere Zellgrößen auf das Ergebnis auswirken.

6.1. Konvergenzverhalten

Das Konvergenzverhalten bei Feldmodellen ist ein Punkt, der bis heute für zahlreiche Diskussionen im Bereich Brandschutzingenieurwesen sorgt. Was sich im ersten Moment recht kompliziert anhört, läuft letztendlich auf die Suche nach einer „korrekten“ Zellgröße bei der Anwendung von Feldmodellen hinaus. Untersuchungen mit FDS 4.07 anhand einer 2-dimensionalen Strömung (LES-Simulation) haben gezeigt, dass in dieser Version keine Konvergenz (zumindest im Bereich der Wand) festgestellt werden konnte, hierzu sei auf die Abbildungen 6.1(a) und 6.1(b) verwiesen. Es

¹Durch die Halbierung der Zellgröße entstehen 8 Zellen an der Stelle, wo zuvor nur eine Zelle war. Zusätzlich bewirkt die Halbierung der Zellgröße eine Halbierung des Zeitschritts, da Strömungen max. eine Zelle pro Zeitschritt „durchqueren“ dürfen, somit ergibt sich der Faktor 16 (8 (Anzahl der Zellen) $\times 2$ (halbierter Zeitschritt))

wurde hierbei eine Strömung bestehend aus 200 °C warmer Luft und einer Geschwindigkeit von 2 m/s untersucht. Abbildung 6.2 zeigt den unterschiedlichen Verlauf der Turbulenzen bei verschiedenen Zellgrößen.



(a) Zugrundeliegende Geometrie der Konvergenzuntersuchung

(b) Ergebnisse für unterschiedliche Zellgrößen. Der Messpunkt ist der schwarze Punkt in der linken Graphik.

Abbildung 6.1.: Geometrie und Ergebnisse des Konvergenzverhaltens von FDS 4.07

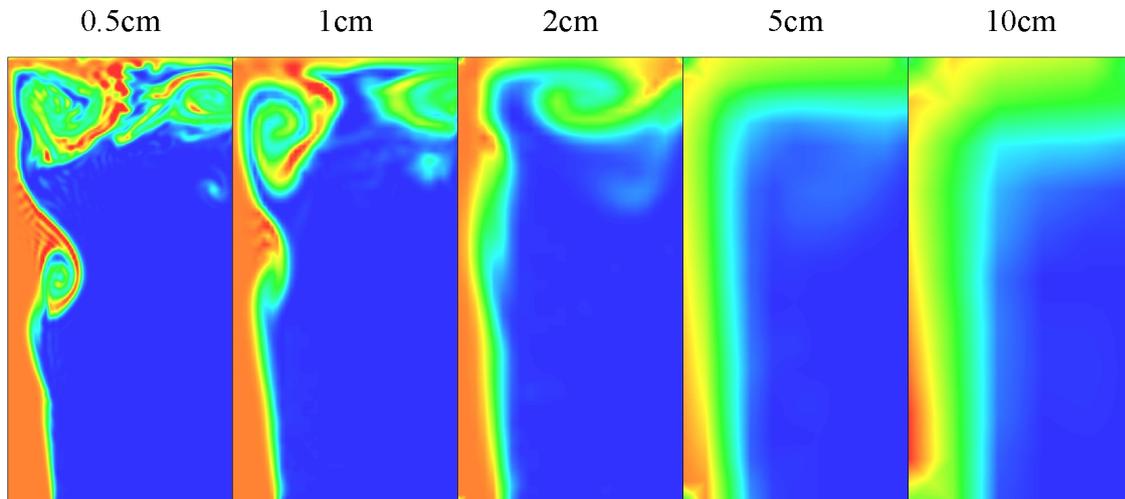


Abbildung 6.2.: Auflösung von Turbulenzen bei unterschiedlichen Zellgrößen

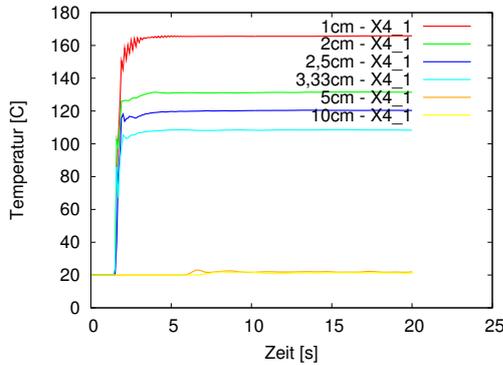
Weiterhin wurde zusätzlich der gesamte Raum mit $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ simuliert. Das Ergebnis der Simulation ist in diesem Fall nicht mehr turbulent sondern laminar, doch die Ergebnisse zeigen, dass die Platzierung der Messpunkte² eine große Rolle spielt. Je nach Platzierung der Messpunkte kann das Ergebnis in seiner Tendenz

²mit Hilfe der Messpunktkoordinaten wird festgelegt welcher Wert ausgegeben wird, d. h. es wird

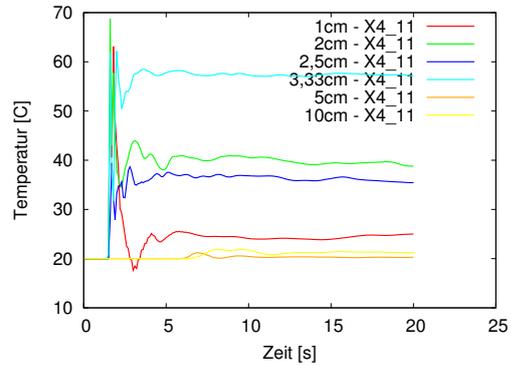
abweichend sein, wie die Abbildungen 6.3(a) und 6.3(b) zeigen. Beim Vergleich der beiden Abbildungen fällt auf, dass eine Abbildung ein Konvergenzverhalten wieder spiegelt (Abb. 6.3(a)), während bei der anderen Abbildung (Abb. 6.3(b)) kein Konvergenzverhalten zu erkennen ist. Die beiden Messpunkte wurden in FDS 5.5.2 wie folgt festgelegt:

- Messpunkt X4_1:
`&DEVC XYZ=0.011,0.301,0.998`
- Messpunkt X4_11:
`&DEVC XYZ=0.011,0.301,0.948`

Der Ursprung (Punkt 0.0,0.0,0.0) wurde in die Mitte der untersuchten Geometrie gelegt, da es sich um eine achsensymmetrische Simulation handelt.



(a) Temperaturen am Messpunkt X4_1



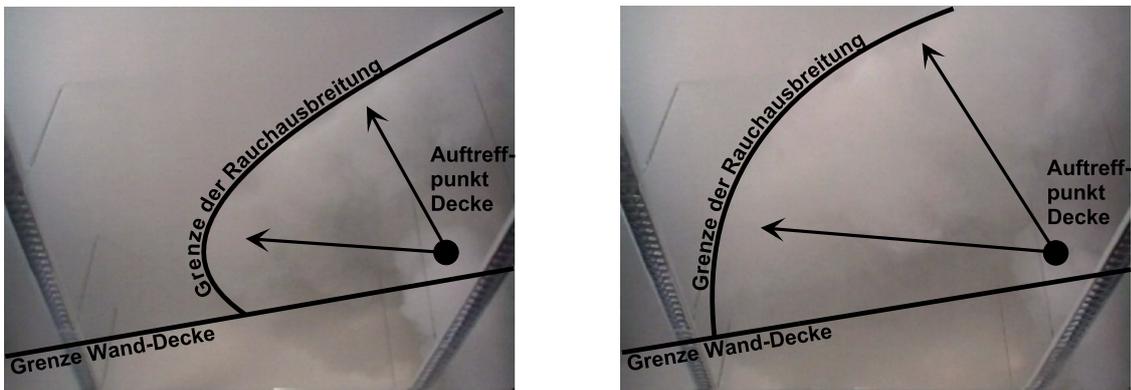
(b) Temperaturen am Messpunkt X4_11

Abbildung 6.3.: Temperaturen an unterschiedlichen Messpunkten. Am Messpunkt X4_1 ist ein Konvergenzverhalten zu erkennen, am Messpunkt X4_11 dagegen nicht.

der Wert der Zelle ausgegeben, in der der Messpunkt liegt. Da es sich hier um eine Ausgabekoordinate handelt ist der Begriff „Messpunkt“ falsch, vielmehr müsste von einem „Ausgabepunkt“ gesprochen werden. Da der Begriff „Messpunkt“ sich jedoch im Sprachgebrauch durchgesetzt hat, wird er im Folgenden verwendet.

6.2. Geneigte Ebene

Um zu zeigen welchen Einfluss die Wahl der Zellgröße auf die Rauchausbreitung an einer geneigten Ebene hat, wurde ein Rauchversuch an einer geneigten Decke durchgeführt. Hierzu wurde der Rauchgasgenerator unter einer geneigten Decke platziert. Nach dem Start des Generators wurde festgestellt, dass die Neigung der Decke keinen Einfluss auf die Ausbreitung des Rauches hatte, da der Rauch sich radial an der Decke ausbreitete. Abbildung 6.4 zeigt, dass der Rauch sich nach Auftreffen auf der Decke relativ gleichmäßig in alle Richtungen radial ausbreitet. Dieses Verhalten des Rauches vorherzusagen wird ebenfalls vom Computerprogramm FDS gefordert. Um die geneigte Decke zu modellieren wurde hierbei die Funktion `SAWTOOTH` auf `.FALSE.` gesetzt, die das sogenannte „Stair Stepping“³ an geneigten Geometrien reduzieren soll, so dass die bei der Modellierung entstehenden „Stufen“ nach Möglichkeit nicht die Ausbreitung des Brandrauches beeinflussen.



(a) Rauchausbreitung nach 10 Sekunden

(b) Rauchausbreitung nach 30 Sekunden

Abbildung 6.4.: Rauchausbreitung an schrägen Decken. Die Pfeile zeigen, dass der Rauch sich radial nach dem Auftreffen an der Decke ausbreitet.

Im Rahmen der Simulation wurde der entsprechende Raum und der Rauchgenerator nachgebildet (Größe des Raumes: ca. 9 m × 6 m × 5 m (Höhe), Schnitt der geneigten Decke siehe Abbildung 6.5). Hierzu wurde der Raum in 5 cm und in 10 cm große Zellen aufgeteilt um den Einfluss der geneigten Decke auf das Simulationsergebnis darzustellen. Wie in der Abbildung zu ersehen ist, ist die Diskretisierung der geneigten Decke bei einer Auflösung von 5 cm besser als bei einer Auflösung von

³„Stair Stepping“ bedeutet, dass schräge Geometrien in kleine Würfel aufgelöst werden, die dann im rechtwinkligen Gitter entsprechend platziert werden. Bei schrägen Ebenen entsteht deshalb eine Art „Treppe“, die die Wortherkunft recht einfach erklärt

10 cm, jedoch kann als Ergebnis festgehalten werden, dass die im Modell berechnete Rauchausbreitung nicht der Realität entspricht. Eine Rauchausbreitung entgegen der Deckenneigung findet nur sehr begrenzt statt, was mit der Modellierung der geneigten Decke durch den „Stair Stepping“ Prozess zusammenhängt. Die Nutzung des Parameters SAWTOOTH bringt hierbei keine Vorteile, da die als Stufen modellierte Decke immer wieder als Strömungshindernis berechnet wird. Es ist deshalb bei der Modellierung ähnlicher Geometrien darauf zu achten, dass die entsprechende Rauchausbreitung unter Umständen nicht der Realität entspricht. Abbildung 6.6 zeigt die Ausbreitung des Rauches durch visualisierte Partikel.

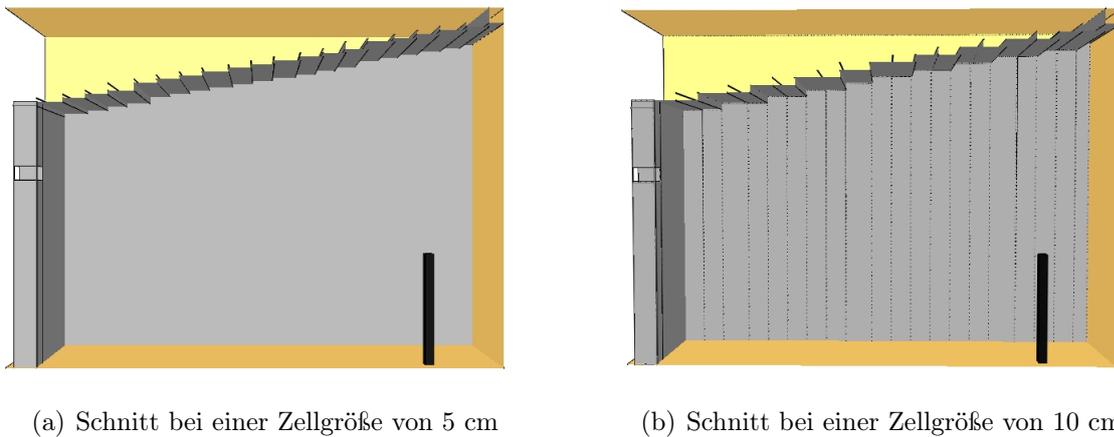


Abbildung 6.5.: Schnitt durch einen Raum mit geneigter Decke. Der schwarze „Balken“ auf der rechten Seite stellt den Rauchgenerator dar, an dessen oberem Ende der Rauch austritt.

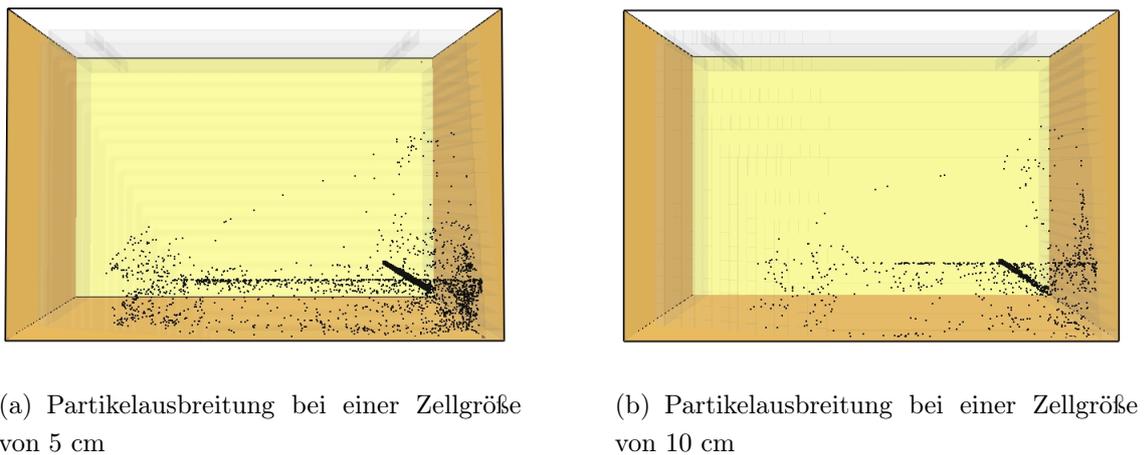


Abbildung 6.6.: Partikelausbreitung nach 30 Sekunden an einer geneigten Decke (Draufsicht, 3D-Ansicht)

6.3. Die konservative Zellgröße gibt es nicht

Die im Zuge dieser Arbeit verfolgte These, dass konservative Annahmen nicht zu konservativen Ergebnissen führen, wird bei der Wahl der Zellgröße bestätigt. Als konservative Annahme gilt in diesem Fall die feinere Zellgröße, da dadurch viel besser die Realität abgebildet werden kann. Abbildung 6.1 zeigt, dass anhand einer theoretischen Untersuchung für konservative Annahmen, d. h. kleinere Zellgrößen, nicht automatisch konservativere Annahmen errechnet werden (in diesem Fall eine höhere Temperatur). Da bei gleichbleibenden Randbedingungen die Zellgröße die einzige Wahl ist, die der Nutzer selbst treffen kann, hat die Simulation aufgezeigt, dass es hierbei ebenfalls keine eindeutige Tendenz hin zu konservativen Ergebnissen gibt, da die Temperatur im gezeigten Beispiel mit noch kleinerer Zellgröße wieder abfällt, so dass dadurch ein optimistischeres Gesamtbild entsteht.

7. Ein Blick in die Zukunft - Parallelisierung von CFD-Simulationsprogrammen am Beispiel FDS

Im Zuge der Weiterentwicklung von Mikroprozessoren für handelsübliche Computer wurde seit etwa 5 Jahren eine andere Entwicklung eingeschlagen. Begründet auf der Tatsache, dass Mikroprozessoren nicht unendlich schnell gemacht werden können, d. h. die Taktfrequenz und Transistorenanzahl unterliegt diversen Beschränkungen, wurde die Entwicklung vom jahrzehntelangen Einkernprozessor hin zum Mehrkernprozessor verlagert. Somit wurden nicht weiter schnellere Mikroprozessoren benötigt, vielmehr wurden mehrere dieser separaten „Einheiten (Core)“ zu einer einzelnen „Einheit“ zusammengeführt, es entstand somit der sogenannte „Multi-Core Prozessor“. Die Vorteile aus entwicklungstechnischer Sicht liegen klar auf der Hand. Während immer schneller werdende Prozessoren immer mehr Strom verbrauchen und eine immer größere ungenutzte (und zu kühlende) Abwärme produzieren, erreichen theoretisch 2 langsamere und energetisch effizientere Rechenkerne, die sogenannten „Cores“ (Kerne), die gleiche Leistung. Verglichen mit Bauprojekten zeigt sich eine entsprechende Analogie. Werden Hochhäuser beispielsweise immer höher gebaut, so steigen zum einen die Baukosten aufgrund der Höhe und die Nutzfläche nimmt ab, da Versorgungseinrichtungen immer mehr Platz benötigen. Werden hingegen statt einem sehr hohen Hochhaus zwei kleinere Hochhäuser gebaut, so können dort die gleiche Anzahl von Bewohnern untergebracht werden während die Baukosten für beide Hochhäuser wesentlich günstiger sind als beim Bau eines sehr hohen Hochhauses.

Durch das neue Prozessordesign sind neue Programmiertechniken notwendig, um die entsprechenden Prozessoren auch effizient nutzen zu können. Im Folgenden wird die bisherige Strategie bei der Parallelisierung des Programms FDS dargestellt und

mit einer auf das modernere Prozessordesign abgestimmten neuen Methode verglichen. Weiterhin wird erläutert, welche Vorteile zu erwarten sind und ein eventueller Ausblick in die Zukunft wird gegeben. Die hier vorgestellten Programmier-techniken sind ebenfalls für die Nutzung von zusätzlichen „Rechenkarten“ anwendbar, die Berechnungen um ein vielfaches beschleunigen, ein Punkt, der für zukünftige Simulationsanwendungen von enormer Bedeutung sein wird.

7.1. Grundlegende Parallelisierungskonzepte

Basierend auf den aktuellen und handelsüblichen Computertechnologien gibt es drei verschiedene Architekturen, für die Programme parallelisiert werden:

- Distributed Memory Architecture
- Shared Memory Architecture
- Hybrid Architecture (Kombination der beiden erstgenannten Architekturen)

Während die sogenannten Distributed Memory Systeme schon seit Jahren verbreitet sind, hat die Verbreitung der Shared Memory Systeme erst mit dem Beginn der „Multi-Core“ Ära sowie mit dem Rechnen auf Graphikkarten begonnen. Die verschiedenen Architekturen werden im Folgenden kurz erläutert.

7.1.1. Distributed Memory Architecture

Die Distributed Memory Architektur wird schon seit Jahrzehnten im Bereich des Supercomputings genutzt. Distributed Memory („Verteilter Speicher“) bedeutet in diesem Fall, dass jeder Prozessor seinen eigenen Arbeitsspeicher hat, d. h. jeder Prozessor arbeitet „alleine“. Um dennoch ein gemeinsames Rechnen zu ermöglichen werden die einzelnen Systeme über Netzwerkkabel verbunden, so dass dadurch Informationen zwischen den Systemen ausgetauscht werden können. Durch die Möglichkeit kostengünstige Standardsysteme zu verwenden, hat diese Art der Architektur eine weite Verbreitung erfahren. Abbildung 7.1 zeigt den prinzipiellen Aufbau solcher Distributed Memory Systeme. Programmiert werden diese Architekturen unter anderem mit Hilfe des sogenannten Message Passing Interfaces (MPI) [86].

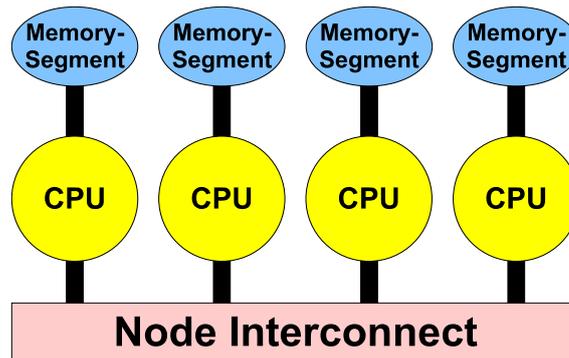


Abbildung 7.1.: Prinzipieller Aufbau einer Distributed Memory Architektur [122]

7.1.2. Shared Memory Architecture

Seit die sogenannten „Dual Core“ Prozessoren den Massenmarkt erobert haben, ist die Shared Memory Architektur auf dem Vormarsch. Shared Memory („Geteilter Speicher“) bedeutet in diesem Fall, dass die einzelnen Prozessorkerne auf einen gemeinsamen Arbeitsspeicher zugreifen, den sogenannten „Shared Memory“. Somit entfällt die Verkabelung mit Netzkabeln, um Daten zwischen den einzelnen Recheneinheiten auszutauschen, wenn in diesem Fall der Prozessorkern mit einem einzelnen Prozessor der Distributed Memory Architektur gleichgesetzt wird. Abbildung 7.2 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Shared Memory Systems. Shared Memory Architekturen werden unter anderem mit Hilfe vom OpenMP [11] Compilerdirektiven programmiert.

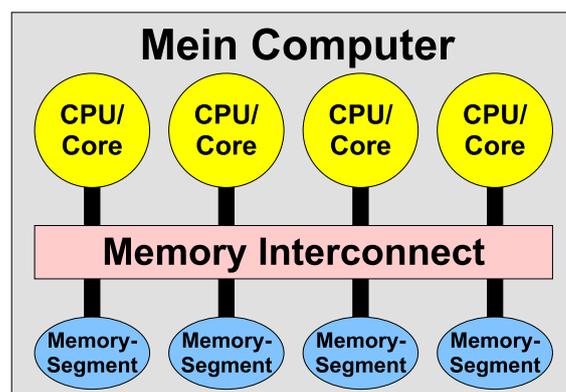


Abbildung 7.2.: Prinzipieller Aufbau einer Shared Memory Architektur [122]

7.1.3. Hybrid Architecture

Wie der Name schon andeutet, handelt es sich bei der Hybrid Architektur um einen gemischten Ansatz von Distributed und Shared Memory. Vereinfacht gesagt handelt es sich um einen Zusammenschluss mehrerer Shared Memory Systeme zu einem Distributed Memory System. Dieser Ansatz vereint deshalb die Vorteile der beiden Systeme: kostengünstige Massenware zum Rechnen benutzen. Abbildung 7.3 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Hybrid Architektur. Bei der Programmierung solcher Hybrid Architekturen können beispielsweise MPI und OpenMP gemeinsam genutzt werden.

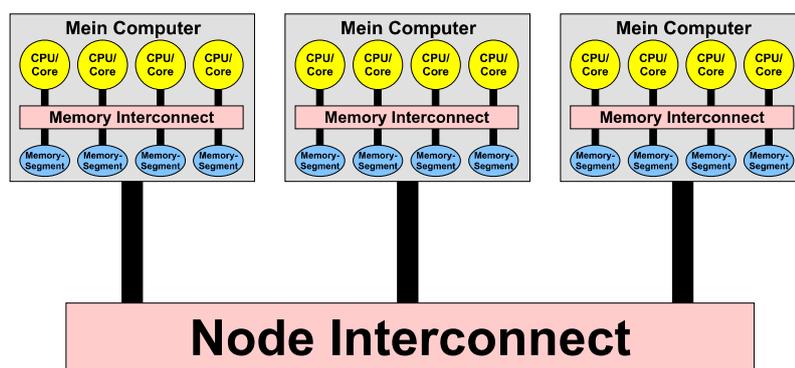


Abbildung 7.3.: Prinzipieller Aufbau einer Hybriden Architektur [122]

7.2. Programmierung der einzelnen Architekturen

Wie bereits erwähnt gibt es für unterschiedliche Architekturen unterschiedliche Programmierungsansätze. Der in FDS standardmäßig verwendete Programmieransatz zur Parallelisierung ist der MPI-Ansatz, aufgrund der weiten Verbreitung von Shared Memory Architekturen wurde ein neuer Parallelisierungsansatz mittels OpenMP in FDS implementiert.

7.2.1. Parallelisierung von FDS mittels MPI

In FDS 3.0 [77] wurde das sogenannte Multi-Mesh Verfahren eingeführt, ein sogenanntes Domain-Decomposition Verfahren. Multi-Mesh bedeutet, dass der Aufbau einer Geometrie nicht nur in einem Gitter (Mesh) erfolgen kann, vielmehr können

mehrere Gitter nachbarschaftlich zusammengesetzt werden, so dass Informationen zwischen den einzelnen Gittern ausgetauscht werden, wie beispielsweise Rauchströmungen von einem zum anderen Gitter. Durch den in FDS verwendeten Ansatz ist es möglich, dass die Gitter nicht vollständig nebeneinander liegen müssen. Es können beispielsweise auch L-förmige Gebäude mit Hilfe zweier Gitter abgebildet werden, so dass keine überzähligen (unwichtigen) Bereiche berechnet werden, siehe hierzu Abbildung 7.4. In FDS 4.0 [75] wurde dieser Ansatz genutzt um ein verteiltes Rechnen zu ermöglichen, d. h. jeder Computer berechnet ein Gitter, die Informationen werden dabei zwischen den einzelnen Computern mittels MPI ausgetauscht. Bei den ausgetauschten Informationen handelt es sich um Werte, die sich an den Rändern des jeweiligen Gitters befinden, den sogenannten „Ghost Cells“. Die entsprechenden Informationen werden hierbei nach jeder Berechnung ausgetauscht, so dass diese dem jeweils anderen Gitter zur Verfügung stehen. Abbildung 7.5 verdeutlicht den Austausch von Informationen mit Hilfe des „Ghost Cells“ Konzept. Da diese Parallelisierung zum Standard von FDS gehört, wird auf eine genauere Erläuterung verzichtet.

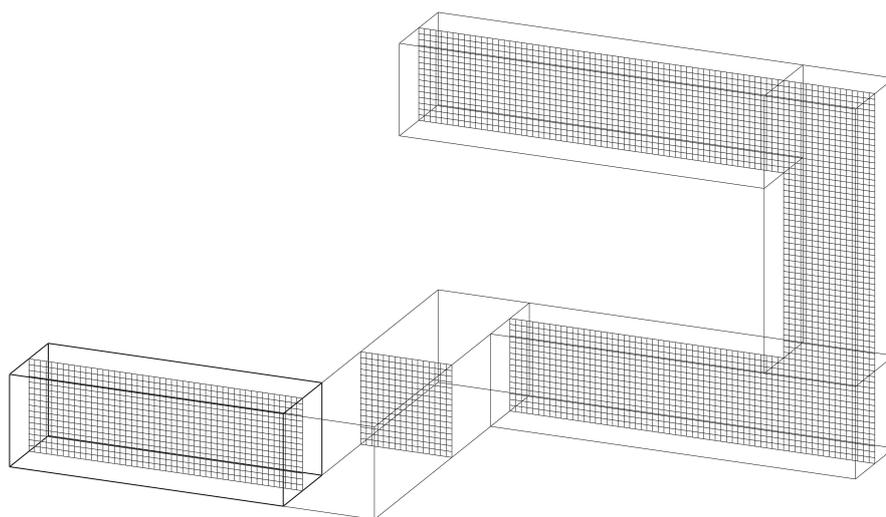


Abbildung 7.4.: Flexible Gitteranordnung in FDS [76]

7.2.2. Parallelisierung von FDS mittels OpenMP

Im Gegensatz zum MPI-Ansatz, der eine Zerlegung des zu berechnenden Raumes in Teilbereiche erfordert (Domain-Decomposition), findet beim OpenMP-Ansatz eine Parallelisierung des Programmcodes statt. Hierbei werden beispielsweise zu berech-

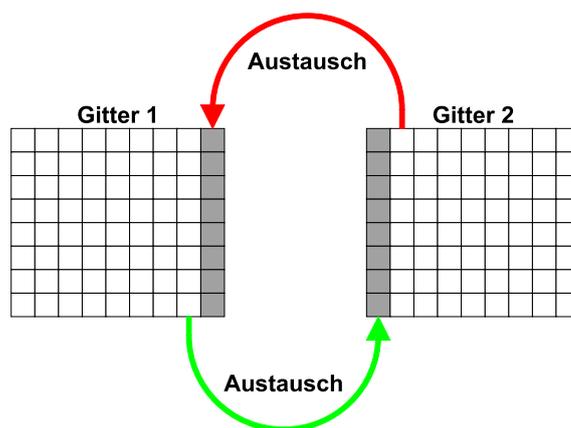


Abbildung 7.5.: Austausch von Informationen mit Hilfe von „Ghost Cells“. Die grau markierten Zellen stellen die Ghost-Zellen dar. Die Informationen dieser Zellen entstammen den Randzellen des jeweiligen anderen Gitters.

nende Schleifen auf unterschiedliche Prozessorkerne verteilt, dies geschieht automatisch, so dass der Nutzer sich nicht mehr aktiv um die Parallelisierung des zu berechnenden Gebietes kümmern muss. Die Aufteilung der Rechenarbeit erfolgt bei OpenMP in mehrere sogenannte „Threads“. Im Folgenden entspricht ein Thread einem Prozessorkern, d. h. ein Quad-Core Prozessor hätte in diesem Fall vier Threads. Letztendlich muss der Nutzer nur entscheiden, wie viele Threads er FDS zur Berechnung zur Verfügung stellen möchte, alles andere passiert automatisch. OpenMP nutzt hierzu einen sogenannten „Fork and Join Ansatz“, der erlaubt, dass Teile des Codes auf mehrere Threads zur Berechnung verteilt werden, während manch andere Berechnung nur auf einem Thread durchgeführt werden. Abbildung 7.6 zeigt eine prinzipielle Aufteilung in mehrere Threads.

Wie bereits erwähnt, basiert die Parallelisierung mittels OpenMP auf Compilerdirektiven. Dies bedeutet, dass der Compiler¹ bei entsprechend gesetztem „Flag“² diese Direktiven erkennt und das Programm dementsprechend kompiliert. Da FDS ein auf Fortran basierender Code ist, beginnen die Compilerdirektiven für die Parallelisierung des Codes mit `!$OMP`. Dies hat zur Folge, dass Compiler, die den OpenMP-Standard nicht unterstützen bzw. wenn keine OpenMP-Parallelisierung gewünscht wird, die entsprechenden Zeilen einfach ignorieren, da sie in diesem Fall nur einen Kommentar

¹Compiler bezeichnet ein Programm, das den vom Programmierer verfassten Programmcode in eine maschinenlesbare Form übersetzt

²Mit Hilfe von Flags werden Einstellungen dem Compiler mitgeteilt, da es sich um ein einfaches Kommandozeilenprogramm handelt

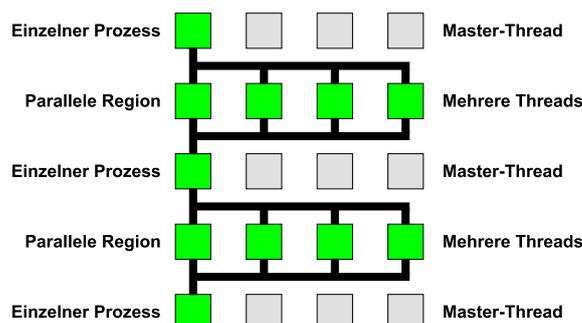


Abbildung 7.6.: Ablauf eines OpenMP-Programms mit mehreren Threads (Programmablauf von oben nach unten). Die grünen Kästchen stellen jeweils aktive Threads (Kerne) dar. Inaktive Threads (Kerne) sind mit grau gekennzeichnet.

darstellen.

Nach der Compilerdirektive `!$OMP` muss entsprechend ausgewählt werden, wie genau die Parallelisierung aussehen soll. So sind beispielsweise parallele Regionen, Schleifen, private und geteilte (private/shared) Variablen oder Reduzierungsoperationen (reduction) näher zu definieren. Anhand des folgenden Beispiels wird die prinzipielle Vorgehensweise bei einer Parallelisierung mittels OpenMP näher erläutert.

Das folgende Beispiel stammt aus der Datei `velo.f90`. Der ursprüngliche Code lautet wie folgt:

```
DO K=1,KBAR
  DO J=1,JBAR
    DO I=1,IBAR
      U2 = 0.25_EB*(US(I-1,J,K)+US(I,J,K))**2
      V2 = 0.25_EB*(VS(I,J-1,K)+VS(I,J,K))**2
      W2 = 0.25_EB*(WS(I,J,K-1)+WS(I,J,K))**2
      KRES(I,J,K) = 0.5_EB*(U2+V2+W2)
    ENDDO
  ENDDO
ENDDO
```

In diesen drei verschachtelten Schleifen wird der Wert für die Variable `KRES` für jede einzelne Zelle `I, J, K` berechnet. Für jede einzelne Zelle werden zunächst die entsprechenden Variablen `U2, V2` und `W2` berechnet, diese werden anschließend addiert

und mit 0,5 multipliziert. Der daraus entstandene Wert wird schließlich in der zur jeweilige Zelle I, J, K gehörenden Variable KRES gespeichert.

Im Zuge der OpenMP-Programmierung ist zuerst eine Analyse der einzelnen Variablen durchzuführen. Hierbei ist zu bestimmen ob es sich um eine sogenannten „private“ (engl.: private) oder um eine geteilte (engl.: shared) Variable handelt. Private bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Variable nur von einem Thread gelesen bzw. geschrieben oder verändert werden kann. Handelt es sich dagegen um eine geteilte (engl.: shared) Variable, so haben alle Threads auf diese Variable Zugriff. Nach Analyse der Variablen im gewählten Beispiel ist schließlich festzustellen, dass die Variablen I, J, K sowie die Variablen U2, V2, W2 als private Variablen zu deklarieren sind. Die Variablen IBAR, JBAR, KBAR sowie US, VS, WS und KRES sind hingegen geteilte Variablen, da zum einen alle Threads aus ihnen lesen müssen bzw. alle Threads einen Schreibvorgang in die Variable KRES durchführen müssen. Eine weitere Analyse des Quellcodefragments zeigt auf, dass alle drei verschachtelten Schleifen unabhängige Berechnungen durchführen, d. h. jeder einzelne Wert von KRES für eine entsprechende Zelle ist nicht von anderen Werten der Variablen KRES abhängig. Um dies dem Compiler mitzuteilen ist das Schlüsselwort COLLAPSE(3) aufzuführen, die Zahl „3“ besagt, dass es sich um drei unabhängige Schleifen handelt, die mit dem Schlüsselwort DO kenntlich gemacht werden. Um den Prozess der Parallelisierung überhaupt einzuleiten ist zusätzlich das Schlüsselwort PARALLEL anzuführen, das Schlüsselwort DEFAULT(NONE) besagt, dass alle Variablen deklariert werden müssen, was die Fehlersuche letztendlich erleichtert. Nach Abschluss aller Analysen sieht das fertig parallelisierte Codefragment wie folgt aus:

```
!$OMP PARALLEL DEFAULT(NONE) SHARED(KBAR, JBAR, IBAR, KRES, US, VS, WS)
!$OMP DO COLLAPSE(3) PRIVATE(K, J, I, U2, V2, W2)
DO K=1, KBAR
  DO J=1, JBAR
    DO I=1, IBAR
      U2 = 0.25_EB*(US(I-1, J, K)+US(I, J, K))**2
      V2 = 0.25_EB*(VS(I, J-1, K)+VS(I, J, K))**2
      W2 = 0.25_EB*(WS(I, J, K-1)+WS(I, J, K))**2
      KRES(I, J, K) = 0.5_EB*(U2+V2+W2)
    ENDDO
  ENDDO
ENDDO
!$OMP END DO
```

```
!$OMP END PARALLEL
```

Da der Compiler nicht automatisch erkennt, wann zum einen die Parallelisierung der Schleifen abgeschlossen ist bzw. wann die gesamte parallele Region zu Ende ist, ist dieses dem Compiler manuell mit den Direktiven `!$OMP END DO` und `!$OMP END PARALLEL` mitzuteilen. Wird nun der Code vom Compiler in ein ausführbares Programm übersetzt, so werden die oben ausgewählten Schleifen mit mehreren Threads parallel berechnet.

7.2.3. Stärken und Schwächen von MPI und OpenMP

Basierend auf dem vorhandenen seriellen Quellcode von FDS ist es recht einfach, erste OpenMP-Parallelisierungen einzuarbeiten da OpenMP es grundsätzlich erlaubt, nur ausschnittsweise Teile des Programmcodes zu parallelisieren. Wird dagegen mittels MPI parallelisiert, so muss grundsätzlich die gesamte Programmcodestruktur darauf ausgelegt werden, dass Randwerte ausgetauscht werden. Dies ist auch der erste Hauptunterschied der beiden Parallelisierungsansätze. Während mit OpenMP sehr schnell erste positive Ergebnisse hervorgebracht werden, ist es sehr aufwendig einen rein seriellen Programmcode in einen MPI-tauglichen Programmcode umzuschreiben, da ein kompletter Austausch von Randwerten neu implementiert werden muss. Abbildung 7.7 zeigt eine prinzipielle Übersicht zwischen Programmieraufwand und Performancegewinn sowohl bei MPI als auch bei OpenMP.

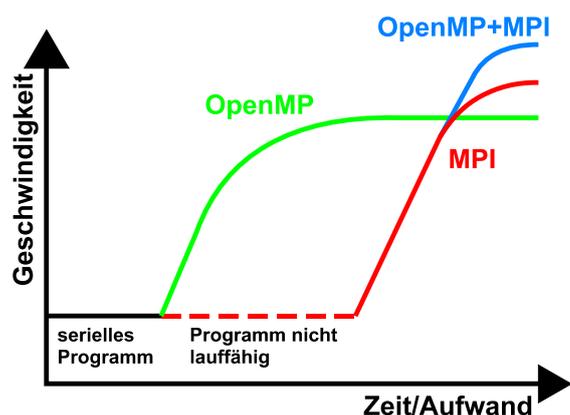


Abbildung 7.7.: Theoretischer Geschwindigkeitsgewinn und Programmieraufwand für OpenMP und MPI-Implementierungen [89]

Auch die Realisierung der einzelnen Parallelisierungskonzepte geschieht auf unter-

schiedliche Art und Weise. Während die MPI-Parallelisierung mit Hilfe von Funktionsaufrufen innerhalb des Programms realisiert wird, wird bei OpenMP der Parallelisierungsprozess mittels Compilerdirektiven durchgeführt. Dies ist auch eine der größten Schwächen des OpenMP-Ansatzes, da der Programmierer hierbei auf die Korrektheit des Compilers angewiesen ist, der zudem den entsprechenden Standard (hier: OpenMP 3.0) unterstützen muss. Bei MPI dagegen werden die aufzurufenden Funktionen durch externe Bibliotheken bereitgestellt, einen speziellen Compiler benötigt es hierfür nicht. Deshalb ist auch die Fehlersuche in OpenMP Programmen teilweise aufwendiger, da Compilerfehler sehr schwer zu erkennen sind. Im Zuge der Parallelisierung von FDS sind solche Compilerprobleme mehrfach aufgetreten, die durch den Programmierer nicht zu beheben sind, da immer wieder auf eine neue Compilerversion gewartet werden muss, es handelt sich somit um eine Abhängigkeit von Dritten. Bei MPI dagegen sind solche Fehler recht schnell zu beheben, da es sich meistens um einen falschen Funktionsaufruf handelt, der durch den Programmierer selbst behoben werden kann.

Zukünftige Parallelisierungen basieren höchstwahrscheinlich auf beiden Ansätzen, also dem sog. Hybrid-Ansatz, da die Entwicklung neuer Prozessoren auf mehr Kerne fokussiert ist. Dies entspricht auch dem aktuellen Prozess der Nutzung von Grafikkarten zur Berechnung. Auch wird aktuell über Erweiterungskarten zur Berechnung nachgedacht, welche ebenfalls auf dem Shared Memory Prinzip basieren. Diese Karten benötigen einen für Shared Memory Systeme ausgelegten Code, da eine Programmierung mittels MPI nicht möglich ist. MPI wird jedoch weiterhin benötigt, da die einzelnen Gitter auf die jeweiligen Erweiterungskarten oder Computer verteilt werden müssen.

Grundsätzlich bleibt abzuwarten wie die Computertechnologie sich weiter entwickelt. Ein Code, der für beide Parallelisierungsansätze ausgelegt ist, kann jedoch recht schnell für einzelne Architekturen angepasst werden, so dass darin die größte Flexibilität liegt. Sich speziell auf eine Architektur festzulegen ist nicht empfehlenswert, da ein unflexibler Code keine Zukunft hat, weil eventuelle Umstellungen oder Anpassungen auf neue Architekturen nicht oder nur sehr zeitaufwendig zu realisieren sind. Durch den Beginn der Umstellung des FDS-Codes hin zu einer zusätzlichen Shared-Memory Architektur im Rahmen dieser Arbeit ist der Code für zukünftige Entwicklungen gerüstet, was einen langen Bestand des Programms sichern wird.

7.3. Geschwindigkeitszuwachs

Aufgrund der verschiedenen Prozessorarchitekturen sind theoretisch Geschwindigkeitszuwächse möglich, die über einer Halbierung der Rechenzeit liegen bei einer Verdopplung der Kernanzahl. Bei „einfachen“ Operationen in vereinfachten Testprogrammen ist es durchaus möglich, dass solche Performancesteigerungen erzielt werden, so kann beispielsweise ein Programm 3-mal schneller ablaufen, obwohl es nur mit der doppelten Anzahl von Prozessorkernen gestartet wurde. Da diese Eigenschaften jedoch teilweise sehr von der jeweiligen Prozessorarchitektur abhängig sind, wird hierauf nicht weiter eingegangen. Zudem handelt es sich bei FDS um einen sehr komplexen Code, bei dem Geschwindigkeitszuwächse einzelner kleiner Routinen in der Masse der Routinen untergehen.

7.3.1. Geschwindigkeitszuwächse bei MPI-Parallelisierung

Ist die Berechnung einer Geometrie mittels FDS in mehrere Gitter (Meshes) aufgeteilt, so ist der theoretische Geschwindigkeitszuwachs proportional zur Anzahl der Kerne, die zur Berechnung zur Verfügung stehen. Dies hängt natürlich davon ab, dass die einzelnen Gitter optimal aufgeteilt sind, so dass in jedem Gitter die gleiche Anzahl von Berechnungsschritten durchgeführt werden muss. Dies ist jedoch nicht immer leicht zu erreichen, da bei aufwendigen Geometrien die Anzahl der Wandzellen nicht gleichmäßig verteilt sind. Da jedoch die Definition „Wand“ einige Algorithmen in FDS nicht benötigt (z. B. keine Strömungsgeschwindigkeiten in Wandzellen) entstehen hierdurch unterschiedliche Anzahlen von Berechnungen in den einzelnen Gittern. Auch ist der Austausch von Randwerten zu anderen Gittern mit einem sehr geringen Zeitaufwand behaftet, der jedoch nicht unterschlagen werden darf. Wird von der Initialisierung der Parallelen Umgebung einmal abgesehen, so erreicht die Parallelisierung von FDS mittels MPI einen Wert von ca. 95 %. Je nach Anzahl der Gitter spielt jedoch die Initialisierung der parallelen Umgebung eine immer größer werdende Rolle, da zuerst die entsprechenden Nachbarzellen bestimmt werden müssen. Berechnungen eines einfachen Beispiels unter Anwendung von 256 Gittern zeigte auf, dass die Initialisierung mehr Zeit in Anspruch nahm als die anschließende Berechnung.

7.3.2. Geschwindigkeitszuwächse bei OpenMP-Parallelisierung

Da der OpenMP Parallelisierungsansatz im Gegensatz zum MPI Parallelisierungsansatz keine Initialisierungsphase benötigt, entfällt dieser Punkt bei einer entsprechenden Performancemessung. Ganz ohne Initialisierung geht es jedoch auch beim OpenMP-Ansatz nicht. Hier ist zu beachten, dass jeweils bei den Berechnungen die einzelnen parallelen Regionen geöffnet oder auch wieder geschlossen werden müssen. Dies kann ungefähr mit dem Datenaustausch zwischen den Gittern beim MPI-Ansatz verglichen werden. Um hier entsprechende „Überhänge“ zu vermeiden, sollte der Programmierer stets darauf bedacht sein, die Anzahl der parallelen Regionen zu minimieren und diese gleichzeitig immer weiter auszuweiten, damit die zusätzliche Zeit sehr gering bleibt. Ein weiteres Problem bei der Performancemessung ist die Aufteilung der Berechnung auf die einzelnen Threads (hier: Kerne), da bei einer standardmäßigen Anwendung des OpenMP-Ansatzes die gleiche Anzahl von Iterationen beispielsweise einer Schleife auf die einzelnen Threads verteilt wird. Da auch hier das Beispiel mit Wandzellen wie beim MPI-Ansatz zu berücksichtigen ist, kann es auch hier zu ungenutzten Wartezeiten kommen. Der OpenMP-Ansatz selbst hat eine Lösung für dieses Problem, da die Möglichkeit besteht, die einzelnen Iterationen einer Schleife dynamisch auf die einzelnen Threads zu verteilen (sog. dynamische Lastverteilung), d. h. dass derjenige Thread, der gerade eine Iteration einer Schleife berechnet hat, die nächste anstehende Iteration berechnet. So kann es beispielsweise vorkommen, dass ein Thread 1/3 der Iterationen berechnet und der andere Thread die restlichen 2/3. Diese Vorgehensweise ist zwar sehr praktisch, hat aber den Nachteil, dass die „Verwaltung“ der einzelnen Threads aufwändiger ist, so dass hierfür wiederum mehr Zeit aufgewendet wird. Hierzu sind deshalb noch zahlreiche weitere Untersuchungen notwendig um genau zu bestimmen, ab wann „es sich lohnt“ eine dynamische Lastverteilung anzuwenden. Die folgenden Geschwindigkeitsmessungen zeigen Resultate für eine statische Lastverteilung, die jedoch auf Grund der untersuchten Geometrie keine erheblichen Nachteile bringt.

Abbildung 7.8 zeigt, welchen Einfluss die Wahl des Prozessors auf die Rechengeschwindigkeit hat. Wie zu ersehen ist, kann der Austausch des Prozessors die Rechengeschwindigkeit ca. um den Faktor 2,5 verbessern (Vergleich AMD Opteron 8356 - Intel Xeon (Nehalem Architecture) X5570). In diesem Fall wurde das gleiche Programm auf beiden Prozessorarchitekturen gestartet, prozessorspezifische Optimierungen wurden nicht vorgenommen. Somit sind auch in den dargestellten Ergebnissen hinsichtlich der einzelnen Prozessorarchitekturen noch Reserven, da durch

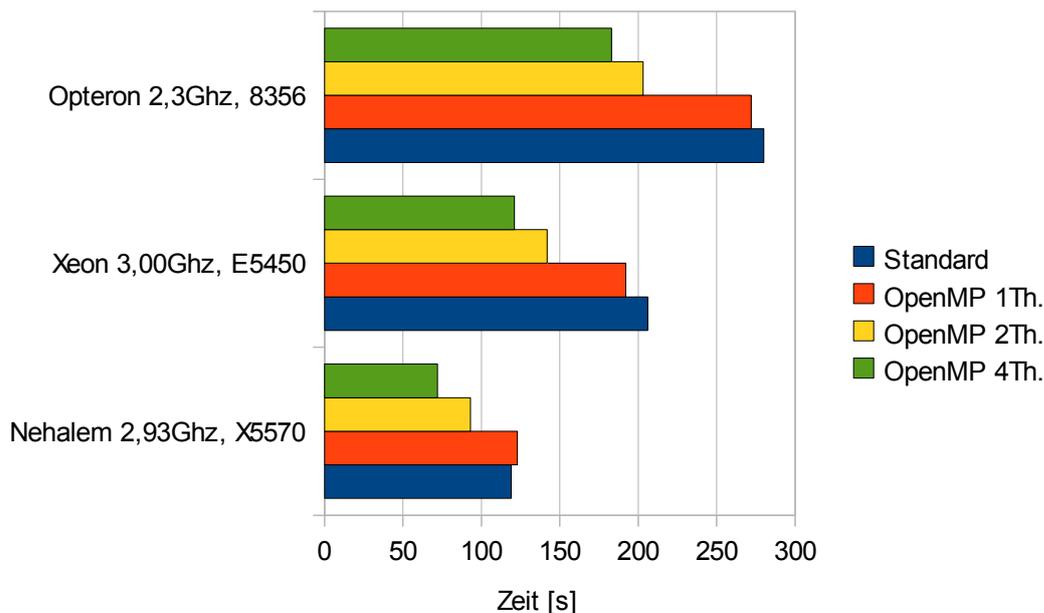


Abbildung 7.8.: Einfluss der CPU auf Rechengeschwindigkeiten.

spezielle Compilereinstellungen Programme auf spezielle Prozessoren hin optimiert werden können; dies wurde jedoch nicht weiter untersucht.

Wie in Abbildung 7.9 zu sehen ist, wurden zu Beginn die Quellcode-Dateien `divg.f90`, `mass.f90` und `velo.f90` mit Hilfe von OpenMP parallelisiert. Hierbei wurden keine speziellen Optimierungen durchgeführt, es wurden lediglich die entsprechenden Compilerdirektiven in den Quellcode eingearbeitet. Dies jedoch nicht vollständig, da der Code teilweise hinsichtlich einer Shared Memory Architektur überarbeitet werden muss. Die Ergebnisse zeigen, dass selbst eine sehr einfache Parallelisierung mittels OpenMP die Rechenzeit der einzelnen Subroutinen erheblich verbessert, siehe hierzu Tabelle 7.1.

Die in Tabelle 7.1 dargestellten Parallelisierungsgrade (Prozentwerte in Klammern) wurden nach „Amdahl’s law“ berechnet, siehe hierzu auch Gleichung 7.1.

$$\frac{\text{Serielle Zeit}}{\text{Zeit bei mehreren Threads} \times \text{Anzahl Threads}} = \text{Faktor} \quad (7.1)$$

7.4. Zukünftige Entwicklung

Aufgrund der rasanten Entwicklung ist es schwer vorherzusagen, wie Computer oder „Rechner“ im Allgemeinen in 10 oder 20 Jahren aussehen werden. Wie bereits er-

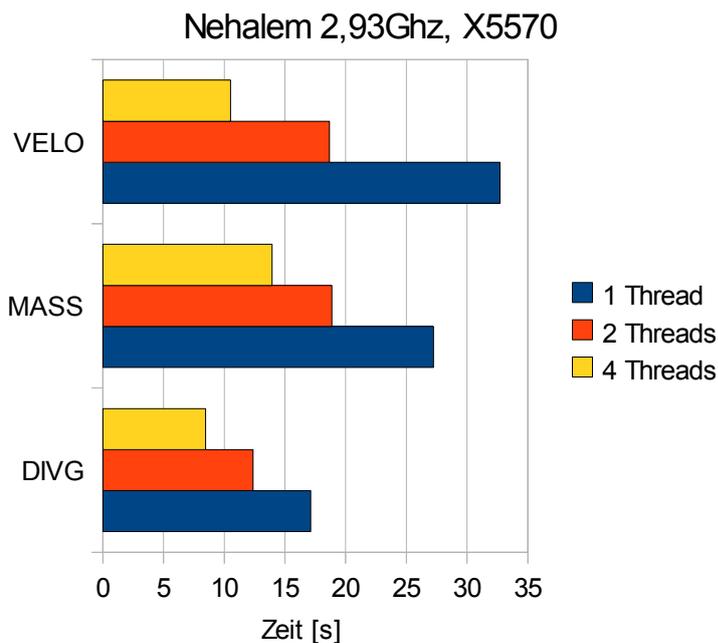


Abbildung 7.9.: Geschwindigkeitszuwachs unterschiedlicher Routinen bei der Nutzung von OpenMP.

wähnt ist davon auszugehen, dass Shared Memory Systeme, in welcher Art auch immer, zunehmen werden. Um diese miteinander kommunizieren zu lassen, ist jedoch auch der Distributed Memory Ansatz unerlässlich, so dass alles auf eine Hybride Architektur hinsichtlich der Parallelisierung hindeutet. Auch scheint die Nutzung von Erweiterungskarten (aktuell: Grafikkarten) in der Zukunft eine große Rolle zu spielen, da der OpenMP Standard dahingehend ausgeweitet wird [6]. Welches Programmierkonzept sich in Zukunft durchsetzen wird ist im Moment nicht absehbar, da ein offener Standard für eine einfache parallele Programmierung im Sinne von OpenMP dieser Erweiterungskarten zur Zeit nicht vorhanden ist. Durch die entsprechenden Erweiterungen bleibt der Quellcode von FDS jedoch für alle Möglichkeiten offen, so dass auch entsprechende zukünftige Standards angewendet werden können.

	1 Thread	2 Threads	4 Threads
DIVG	17,12 Sek.	12,36 Sek. (69%)	8,46 Sek. (51%)
MASS	27,23 Sek.	18,87 Sek. (72%)	13,93 Sek. (49%)
VELO	32,72 Sek.	18,66 Sek. (88%)	10,52 Sek. (78%)

Tabelle 7.1.: Performancevergleich unterschiedlicher Quellcodedateien, Parallelisierung mittels OpenMP. In Klammern ist der jeweilige Parallelisierungsgrad angegeben, basierend auf „Amdahl’s law“. Es wurden 86 Zeitschritte berechnet.

Teil IV.

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Simulationsmethoden aus den Bereichen Evakuierung und Brandschutz dargestellt und näher untersucht. In zwei getrennten Teilen wurde zunächst der Bereich Evakuierung untersucht, im anschließenden Teil ging es schließlich um den Bereich Brandsimulation.

Im Teil Evakuierung wurden zunächst die Bereiche menschliche Bewegung und menschliches Verhalten dargelegt. Hierbei wurde neben allgemeinen „Messgrößen“ ein Hauptaugenmerk auf den Bereich der Panik gelegt. Hier wurde dargelegt, dass es teilweise recht unterschiedliche Ansichten und Definitionen dieses Phänomens gibt. Bei einer genaueren Untersuchung von Massenunglücken stellte sich schließlich heraus, dass Panik ein eher seltenes Phänomen ist, das zudem sehr lokal begrenzt ist. Weiterhin wurde anhand eines sehr einfachen Experimentes gezeigt, wie schnell sich eine Startwelle durch eine Warteschlange ausbreitet und wie dadurch die Zeit berechnet werden kann, die die letzte Person dieser Warteschlange benötigt, um den Startpunkt der Warteschlange zu erreichen. Im nächsten Abschnitt wurden mikroskopische Simulationsmodelle ausgiebig untersucht. Hier wurde zum einen der Einfluss von Update-Schemata und frei wählbaren Parametern wie Personenverteilung oder Reaktionszeit auf das Simulationsergebnis untersucht, zum anderen wurden Vergleiche kommerzieller Evakuierungssimulationsprogramme mit Räumungsübungen durchgeführt. Da bei kommerziellen Programmen der Quellcode nicht einsehbar ist, wurden dafür verschiedene Testverfahren entwickelt, die dem Nutzer einen Einblick in die jeweiligen Modellgrundlagen ermöglichen. In den letzten beiden Abschnitten wurden schließlich makroskopische Evakuierungsmodelle (sog. Handrechenverfahren) untersucht und ebenfalls mit Evakuierungsübungen verglichen. Zudem erfolgte ein Vergleich von mikroskopischen und makroskopischen Evakuierungsmodellen untereinander.

Im Teil Brandsimulationen wurden zunächst unterschiedliche Zonenmodelle verglichen und deren Ergebnisse einem Modellversuch gegenübergestellt, eine Berechnung mit Hilfe des Feldmodells FDS erfolgte ebenfalls. Weiterhin wurden die beiden am

häufigsten auftretenden Fragestellungen bei CFD-Simulationen - der Einfluss der Zellgröße auf das Ergebnis sowie die Modellierung von geneigten Decken mittels „Stair Stepping“ - untersucht. Abgeschlossen wurde dieser Teil der Arbeit mit einer Untersuchung verschiedener Parallelisierungsstrategien für das Programm FDS. Hierbei wurde dargelegt, wie sich der in das Programm implementierte OpenMP-Ansatz auf die Berechnungsgeschwindigkeit von Brandsimulationen auswirkt. Zudem wurden die Stärken und Schwächen des neuen OpenMP-Ansatzes und des bereits standardmäßig implementierten MPI-Ansatzes dargelegt.

Zusammenfassend kann deshalb festgestellt werden, dass es sowohl im Bereich Evakuierung als auch im Bereich Brandschutz eine Vielzahl unterschiedlicher Modelltypen und Programme gibt, die von einer Vielzahl von Anwendern täglich genutzt werden. Da Ergebnisse von Simulationsmethoden in beiden Bereichen teilweise recht unterschiedlich ausfallen ist der Anwender gut beraten, sich mit den Modellen, ihren Grundlagen und deren Eigenschaften vertraut zu machen. Die Anwendung unterschiedlicher Modelle oder Verfahren auf eine Problemstellung erhöht die Eintrittswahrscheinlichkeit der jeweiligen Berechnung, da dadurch eventuelle Schwächen einzelner Modelle durch die Stärken anderer Modelle aufgehoben werden. Die Ergebnisgrundlage ist deshalb wesentlich breiter als bei der Anwendung eines einzigen Modells. Eine Kombination von Modellen für Evakuierung und Brandschutz ist deshalb mit Vorsicht zu genießen, da hierbei die Gefahr besteht, dass Ergebnisse ermittelt werden, die mathematisch zwar korrekt sein mögen, jedoch den psychischen Aspekt (beispielsweise einer Evakuierung) völlig außer Acht lassen. Bei einer Kombination der beiden Modelle ist deshalb auf jeden Fall darauf zu achten, dass ausreichend Sicherheitsbeiwerte berücksichtigt werden, wie beispielsweise längere Reaktionszeiten oder langsamere Gehgeschwindigkeiten. Ergebnisse, die auf Aussagen beruhen, die dem Motto „wenn wir den Flur 3 m kürzer machen, kommen alle noch lebend raus“ entsprechen, sind deshalb grundsätzlich extrem fragwürdig und somit abzulehnen, da sie in die Grenzbereiche der Modelle vorstoßen, die bis heute noch nicht ausreichend erforscht sind. Verhält sich beispielsweise nur eine Person anders als in der Simulation angenommen, so sind die kompletten Ergebnisse hinfällig, was bei ausreichend Sicherheitsbeiwerten noch vertretbar gewesen wäre. Aus diesem Grund sollen beide Bereiche zunächst getrennt untersucht werden, um sich einen Überblick über entsprechende Auswirkungen einzelner Parameter auf das Ergebnis zu verschaffen. Erst nachdem diese Auswirkungen geklärt und bekannt sind, ist eine Kombination der beiden Bereiche sinnvoll.

Auch haben die Untersuchungen sowohl im Bereich Evakuierungssimulationen als

auch Brandsimulationen aufgezeigt, dass es recht schwierig ist, konservative Annahmen zu suchen und darauf basierend konservative Ergebnisse zu erhalten. Besteht jedoch die Möglichkeit zu konservativen Annahmen, so ergeben sich dadurch nicht automatisch konservative Ergebnisse, vielmehr kann das Ergebnis optimistischere Prognosen hervorbringen. Als Beispiel sie hierzu nochmals auf das „Wegrechnen“ von Staustellen mit verlängerter Reaktionszeit und den entsprechenden Einfluss der Zellgröße bei der Temperaturermittlung hingewiesen. Somit wird die zu Anfang aufgestellte These, dass konservative Annahmen keine konservativen Ergebnisse ergeben, bestätigt.

Ausblick

Im Bereich Evakuierung hat sich durch die durchgeführten Untersuchungen gezeigt, dass die grundlegenden Daten teilweise recht dürftig sind, seien es nun Daten aus dem Bereich der Fundamentaldiagramme oder aus dem Bereich von Evakuierungsübungen. Zum einen sind die Daten teilweise recht alt (d. h. es liegen mittlerweile zwei Generationen zwischen den damaligen Untersuchungen und den Personen von heute), teilweise sind die Ergebnisse auch nur sehr dürftig dokumentiert. Messmethoden werden zum Teil nur ansatzweise dargestellt oder die genauen Umstände der jeweiligen Untersuchungen sind nicht bekannt. Hier ist auf jeden Fall ein großer Nachholbedarf vorhanden. Neben den recht individuellen Daten wie freie Gehgeschwindigkeit oder Personengröße gibt es recht wenige Untersuchungen zu kompletten Evakuierungsübungen in Gebäuden. Diese sind jedoch von enormer Wichtigkeit, da sonst Evakuierungssimulationsprogramme nicht im Ganzen validiert werden können. Hier sollte deshalb ebenfalls in die Forschung investiert werden. Von der gesetzlichen Seite sind Evakuierungsübungen eigentlich vorgeschrieben, man müsste sie nur noch wissenschaftlich dokumentieren.

Um jedoch all diese Daten zu erhalten sind neue Mess- und Auswertungsmethoden notwendig, die die Datengewinnung auf eine recht einfache Art und Weise ermöglichen. Hier sollte deshalb untersucht werden, wie auch aus vergleichbar schlechten Bildaufnahmen von Überwachungskameras recht präzise Daten gewonnen werden können, da dadurch der zeitraubende Aufbau von Kameras entfallen könnte und die Ergebnisse nicht von der Kenntnis einer Kamera beeinflusst sind. Während für die Aufzeichnung einzelner Personenbewegungen, bedingt durch das Interesse am Bewegungs- und Kaufverhalten von Personen in Einkaufsmärkten, schon recht brauchbare Ergebnisse gewonnen werden können, ist bei der Auswertung von dicht gedrängten Menschenmassen noch enormes Potential vorhanden.

Im Bereich der Brandsimulationen sind ebenfalls weitere Daten von großem Nutzen, da teilweise Modelle angewendet werden, die für die zu untersuchenden Gegebenheiten nicht entwickelt wurden. Weiterhin werden Daten von Brand- und Rauchausbrei-

tungen in komplexen Geometrien benötigt, da es sich bei bisherigen Untersuchungen um sehr einfache Geometrien handelt wie beispielsweise Ein- oder Zweiraumgeometrien. Untersuchungen bei kompletten Häusern oder komplexeren Industriehallen fehlen dagegen fast vollständig, so dass auch hier ein großer Nachholbedarf besteht.

Neben all diesen Forschungen im eher praktischen Bereich sollten zudem theoretischen Untersuchungen für diverse Wahrscheinlichkeitsfunktionen und deren Auswirkungen auf die Prognosen der unterschiedlichen Simulationsprogramme durchgeführt werden. Dies würde helfen, die Grenzen der jeweiligen Modelle besser zu verstehen sowie die Auswirkungen einzelner Parameter auf das Gesamtergebnis. Zusätzlich könnten dadurch Sicherheitskonzepte erweitert oder verbessert werden, was letztendlich allen Personen zu Gute kommt.

A. Literaturverzeichnis

- [1] NATIONAL BUREAU OF STANDARDS: Design and Construction of Building Exits. 1935. – Forschungsbericht
- [2] Sozialversicherungspflichtige beschäftigte Arbeitnehmer nach Altersgruppen. In: *Amtliche Nachrichten der Bundesanstalt für Arbeit (ANBA)* Bd. 2. 27. Bundesanstalt für Arbeit, 1979, S. 1673
- [3] AMERICAN PSYCHIATRIC ASSOCIATION: *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders: DSM-IV*. 4th. American Psychiatric Association, 1994
- [4] APEL, M.: *Simulation of Pedestrian Flows Based on the Social Force Model Using the Verlet Link Cell Algorithm*, Poznan University of Technology, Diplomarbeit, 2004
- [5] AUTORENKOLLEKTIV: *RiMEA - Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungs-Analysen*. 2009. – Version 2.2.1
- [6] AYGUADE, E.: *A Proposal to Extend the OpenMP Tasking Model for Heterogeneous Architectures - Talk presented at The 2009 International Workshop on OpenMP in Dresden, Germany*, 2009
- [7] BEN-JACOB, E.: From snowflake formation to growth of bacterial colonies. Part II. Cooperative formation of complex colonial patterns. In: *Contemp. Phys.* 38 (1997), S. 205
- [8] BLUE, V. J. ; ADLER, J. L.: Emergent Fundamental Pedestrian Flows From Cellular Automata Microsimulations. In: *Transportation Research Record* 1644 (1998), S. 29 –36
- [9] BLUE, V.J. ; ADLER, J.L.: Cellular automata microsimulation of bi-directional pedestrian flows. In: *Transp. Res. Rec., Jrl. Transp. Res. Brd.* 1678 (2000), S. 135

-
- [10] BLUE, V.J. ; ADLER, J.L.: Modeling four-directional pedestrian movements. In: *Transp. Res. Rec., Jrl. Transp. Res. Brd.* (2000)
- [11] BOARD, OpenMP Architecture R.: *OpenMP Application Program Interface, Version 3.0*, 2008
- [12] BOYCE, K. E. ; SHIELDS, T. J. ; SILCOCK, G. W. H.: Toward the Characterization of Building Occupancies for Fire Safety Engineering: Capabilities of Disabled People Moving Horizontally and on an Incline. In: *Fire Technology* 35 (1999), S. 51–67
- [13] BROWN, Roger: *Social Psychology*. The Free Press, 1965
- [14] BRUCK, Dorothy: Non - awakening in children in response to a smoke detector alarm. In: *Fire Safety Journal* (1998), S. 369–376
- [15] BRUCK, Dorothy ; BRENNAN, Patricia: Recognition of fire cues during sleep, S. 241–252
- [16] BRYAN, J. L.: A Study of the Survivors Reports on the Panic in the Fire at The Arundel Park Hall in Brooklyn / University of Maryland. 1957. – Forschungsbericht
- [17] BRYAN, J. L.: Smoke as a Determinant of Human Behavior in Fire Situations / National Bureau of Standards. 1977. – Forschungsbericht
- [18] BURSTEDDE, C. ; KIRCHNER, A. ; KLAUCK, K. ; SCHADSCHNEIDER, A. ; ZITTARTZ, J.: Cellular automaton approach to pedestrian dynamics - Applications. In: SCHRECKENBERG, M. (Hrsg.) ; SHARMA, S. D. (Hrsg.): *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Springer, 2002, S. 87
- [19] BURSTEDDE, C. ; KLAUCK, K. ; SCHADSCHNEIDER, A. ; ZITTARTZ, J.: Simulation of pedestrian dynamics using a 2-dimensional cellular automaton. In: *Physica A* 295 (2001), S. 507
- [20] CHERTKOFF, Jerome M. ; KUSHIGIAN, Russell H.: *Don't Panic - The Psychology of Emergency Egress and Ingress*. Praeger Publishers, 1999
- [21] D'HONDT, V.: *Système pratique et raisonné de représentation proportionnelle*. Brüssel, 1882
- [22] DICTIONARY.COM: *Panic*. Online, January 2009

-
- [23] DIECKMANN, D.: *Die Feuersicherheit in Theatern*. München : Jung, 1911
- [24] DUNCAN, Christine: The Effectiveness of the Domestic Smoke Alarm Signal / University of Canterbury. 1999 (99/5). – Fire Engineering Research Report
- [25] FACHKOMMISSION BAUAUFSICHT: *Begründung und Erläuterung zur Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten*. online, Juni 2005. – www.is-argebau.de
- [26] FACHKOMMISSION BAUAUFSICHT: *MVStättV - Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten*. online, Juni 2005. – www.is-argebau.de
- [27] FISCHER, H.: *Über die Leistungsfähigkeit von Türen, Gängen und Treppen bei ruhigem, dichtem Verkehr*, Technische Hochschule Dresden, Diss., 1933. – in German
- [28] FOREMAN, P.: Panic Theory. In: *Sociology and Social Research* 37 (1953), S. 295–304
- [29] FRANTZICH, H.: Study of movement on stairs during evacuation using video analysing techniques / Department of Fire Safety Engineering, Lund Institute of Technology. 1996. – Forschungsbericht
- [30] FRENCH, John R. P. J.: Experimental Study of Group Panic. In: *Journal of the Elisha Mitchell Scientific Society* 57 (1941), December, Nr. 2, S. 195–196
- [31] FRUIN, J. J.: *Pedestrian Planning and Design*. Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, 1971
- [32] FUJIYAMA, T. ; TYLER, N.: An explicit study on walking speeds of pedestrians on stairs. In: *10th International Conference on Mobility and Transport for Elderly and Disabled People*. Hamamatsu, Japan, 5 2004
- [33] FUJIYAMA, T. ; TYLER, N.: Pedestrian Speeds on Stairs: An Initial Step for a Simulation Model. In: *Proceedings of 36th Universities Transport Studies Group Conference*. Life Science Centre, Newcastle upon Tyne, UK, 1 2004
- [34] GALBREATH, M.: Time of Evacuation by Stairs in High Buildings / NRCC. 1969 (8). – Fire Research Note
- [35] GENEVIE, Louis E. (Hrsg.): *Collective Behavior and Social Movements*. F. E.

Peacock Publishers, Inc., 1978

- [36] GIPPS, P. G. ; MARKSJÖ, B.: A micro-simulation model for pedestrian flows. In: *Mathematics and Computers in Simulation* 27 (1985), S. 95 – 105
- [37] GRAAT, E. ; MIDDEN, C. ; BOCKHOLDS, P.: Complex evacuation; effects of motivation level and slope of stairs on emergency egress time in sports stadium. In: *Safety Science* 31 (1999), S. 127–141
- [38] GRACE, T.: Improving the Waking Effectiveness of Fire Alarms in Residential Areas / University of Canterbury. 1997 (97/13). – Fire Engineering Research Report
- [39] GROETSCHEL, C: Rauchmelder retten Leben.
- [40] GWYNNE, S. ; GALEA, E. R. ; PARKE, J. ; HICKSON, J.: The Collection and Analysis of Pre-evacuation Times Derived from Evacuation Trials and Their Application to Evacuation Modelling. In: *Fire Technology* 39 (2003), S. 173–195
- [41] HELBING, D.: A mathematical model for the behavior of pedestrians. In: *Behavioral Science* 36 (1991), S. 298
- [42] HELBING, D.: *Verkehrsdynamik*. Springer, 1997. – (in German)
- [43] HELBING, D. ; FARKAS, I. ; VICSEK, T.: Simulating dynamical features of escape panic. In: *Nature* 407 (2000), S. 487
- [44] HELBING, D. ; JOHANSSON, A.: Pedestrian, Crowds and Evacuation Dynamics. In: MEYERS, Robert A. (Hrsg.): *Encyclopedia of Complexity and System Science*. Springer, 2009, S. 6476
- [45] HELBING, D. ; JOHANSSON, A. ; AL-ABIDEEN, H. Z.: The dynamics of crowd disasters: An empirical study. In: *Physical Review E* 75 (2007), S. 046109
- [46] HELBING, D. ; MOLNAR, P.: Social force model for pedestrian dynamics. In: *Phys. Rev. E* 51 (1995), S. 4282
- [47] HELBING, D. ; VICSEK, T.: Optimal self-organization. In: *NJP* 1 (1999), S. 13.1
- [48] HENDERSON, L. F. ; LYONS, D. J.: Sexual Differences in Human Crowd Motion. In: *Nature* 240 (1972), S. 353–355

-
- [49] HIRSCHLER, Marcelo M. ; CHRISTIAN, S. D.: Fires and the Elderly. Fatalities During Residential Fires in the UK: 1982-84, S. 777–791
- [50] HOOGENDOORN, S. P. ; DAAMEN, W.: Pedestrian behavior at bottlenecks. In: *Transportation Science* 39 2 (2005), S. 0147–0159
- [51] JUILLERT, Ernest E.: Fire at Dale’s Penthouse Restaurant. In: *Fire Journal* (1967), S. 5–9
- [52] KAHN, M. J.: Detection Times to Fire-Related Stimuli by Sleeping Subjects / National Bureau of Standards. 1983 (NBS GCR 83-435). – Forschungsbericht
- [53] KAHN, Michael J.: Human Awakening and Subsequent Identification of Fire-Related Cues. In: *Fire Technology* 20 (1984), February, Nr. 1, S. 20–26
- [54] KARTER, M. J.: Patterns of fire deaths among the elderly and children in the home. In: *Fire Journal* March (1986), S. 19–22
- [55] KELLEY, Harold H. ; CONDRY, John C. J. ; DAHLKE, Arnold E. ; HILL, Arthur H.: Collective Behavior in a Simulated Panic Situation. In: *Journal of Experimental Social Psychology* 1 (1965), S. 20–54
- [56] KENDIK, Ezel: Determination of the Evacuation Time Pertinent to the Projected Area Factor in the Event of Total Evacuation of High-rise Office Buildings via Staircases. In: *Fire Safety Journal* 5 (1983), S. 223–232
- [57] KENDIK, Ezel: *Die Berechnung der Personenströme als Grundlage für die Bemessung von Gehwegen in Gebäuden und um Gebäude*, TU Wien, Diss., May 1984
- [58] KENDIK, Ezel: Designing Escape Routes in Buildings. In: *Fire Technology* 22 (1986), November, S. 272–294
- [59] KENNETT, E. W.: Proceedings of the 1980 Conference on Life Safety and the Handicapped / National Bureau of Standards. 1982. – Forschungsbericht
- [60] KIRCHNER, A.: *Modellierung und statistische Physik biologischer und sozialer Systeme*, Universität Köln, Diss., 2002
- [61] KIRCHNER, A. ; KLÜPFEL, H. ; NISHINARI, K. ; SCHADSCHNEIDER, A. ; SCHRECKENBERG, M.: Discretization effects and the influence of walking speed in cellular automata models for pedestrian dynamics. In: *J. Stat. Mech.*

(2004), S. P10011

- [62] KIRCHNER, A. ; NISHINARI, K. ; SCHADSCHNEIDER, A.: Friction effects and clogging in a cellular automaton model for pedestrian dynamics. In: *Phys. Rev. E* 67 (2003), S. 056122
- [63] KIRCHNER, A. ; SCHADSCHNEIDER, A.: Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics. In: *Physica A* 312 (2002), S. 260
- [64] KLÜPFEL, H.: *A Cellular Automaton Model for Crowd Movement and Egress Simulation*, Universität Duisburg-Essen, Diss., 2003. – <http://www.uni-duisburg.de/ETD-db/theses/available/duett-08012003-092540/>
- [65] KNOWLEDGERUSH.COM: *Panic. Who is Panic? What is Panic? Where is Panic?* Online, January 2009
- [66] KORHONEN, T. ; HOSTIKKA, S.: *Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac - Technical Reference and User's Guide (FDS 5.4.0, Evac 2.2.0) / VTT*. 2010. – Forschungsbericht
- [67] KRETZ, T. ; BÖNISCH, C. ; VORTISCH, P.: Comparison of Various Methods for the Calculation of the Distance Potential Field. In: KLINGSCH, W.W.F. (Hrsg.) ; ROGSCH, C. (Hrsg.) ; SCHADSCHNEIDER, A. (Hrsg.) ; SCHRECKENBERG, M. (Hrsg.): *Pedestrian an Evacuation Dynamics 2008*, 2010, S. 335–346
- [68] KRETZ, T. ; GRÜNBOHM, A. ; KESSEL, A. ; KLÜPFEL, H. ; MEYER-KÖNIG, T. ; SCHRECKENBERG, M.: Upstairs walking speed distribution on a long stair. In: *Safety Science* 46 (2006), S. 72–78
- [69] KRETZ, T. ; GRÜNEBOHM, A. ; SCHRECKENBERG, M.: Experimental study of pedestrian flow through a bottleneck. In: *J. Stat. Mech.* (2006), S. P10014
- [70] LANG, K. ; LANG, G. E.: *Collective Dynamics*. Thomas Y. Crowell Company, 1961
- [71] LAPIERRE, Richard T.: *Collective Behavior*. McGraw-Hill Book Company, Inc., 1938
- [72] LE BON, Gustave: *The Crowd - A Study of the Popular Mind*. Batoche Books, 2001. – Reprint of the 1896 ed.

-
- [73] LEE, Arthur ; MIDGETT, Jonathan ; WHITE, Sharon: A Review of the Sound Effectiveness of Residential Smoke Alarms / U.S. Consumer Product Safety Commission. 2004 (CPSC-ES-0502). – Forschungsbericht
- [74] MAWSON, Anthony R.: *Mass Panic and Social Attachment: The Dynamics of Human Behavior*. Ashgate Publishing Ltd., 2007
- [75] MCGRATTAN, K. ; FORNEY, G.: *Fire Dynamics Simulator (Version 4) - User's Guide*. NIST
- [76] MCGRATTAN, K. ; MCDERMOTT, R. ; HOSTIKKA, S. ; FLOYD, J.: *Fire Dynamics Simulator (Version 5) - User's Guide*. NIST
- [77] MCGRATTAN, K. B. ; FORNEY, G. P. ; FLOYD, J. E. ; HOSTIKKA, S. ; PRASAD, K.: *Fire Dynamics Simulator (Version 3) - User's Guide*. NIST
- [78] MEDICAL ONLINE DICTIONARY: *Panic*. Online, January 2009
- [79] MELINEK, S. J.: Use of Fire Statistics in Behavioural Studies. In: *Fire Safety Journal* 5 (1982), S. 1–7
- [80] MELINEK, S. J. ; BOOTH, S.: An Analysis of Evacuation Times and the Movement of Crowds in Buildings / BRE. 1975 (CP 96/75). – Forschungsbericht
- [81] MERRIAM WEBSTER ONLINE DICTIONARY: *Crush, noun*. Online, January 2009
- [82] MERRIAM WEBSTER ONLINE DICTIONARY: *Crush, verb*. Online, January 2009
- [83] MERRIAM WEBSTER ONLINE DICTIONARY: *Panic*. Online, January 2009
- [84] MERRIAM WEBSTER ONLINE DICTIONARY: *Stampede, noun*. Online, January 2009
- [85] MERRIAM WEBSTER ONLINE DICTIONARY: *Stampede, verb*. Online, January 2009
- [86] MESSAGE PASSING INTERFACE FORUM: *MPI: A Message-Passing Interface Standard, Version 2.2*, 2002
- [87] MILLER, Ian: Human Behaviour Contributing to Unintentional Residential Fire Deaths 1997 - 2003 / Heimdall Consulting Ltd. 2005 (47). – New Zealand

Fire Service Commission Research Report

- [88] MINTZ, A.: Non-adaptive group behaviour. In: *The Journal of Abnormal and Social Psychology* 46 (1951), S. 150–159
- [89] MÜLLER, M. ; KELLER, R. ; LOEBICH, I. ; RABENSEIFNER, R.: *Introduction to OpenMP, Slides from Parallel Programming Course, Version 12*
- [90] MOLNAR, P.: *Modellierung und Simulation der Dynamik von Fußgängerströmen*, Universität Stuttgart, Diss., 1995
- [91] MUIR, H. C. ; BOTTOMLEY, D. M. ; MARRISON, C.: Effects of Motivation and Cabin Configuration on Emergency Aircraft Evacuation Behavior and Rates of Egress. In: *The International Journal of Aviation Psychology* 6 (1) (1996), S. 57–77
- [92] MÜLLER, K.: *Die Gestaltung und Bemessung von Fluchtwegen für die Evakuierung von Personen aus Gebäuden*, Technische Hochschule Magdeburg, Dissertation, 1981. – in german
- [93] MÜLLER, W.: Untersuchung über zulässige Räumungszeiten und die Bemessung von Rückzugswegen in Gebäuden. (1970)
- [94] MÜLLER, Werner: Die Beurteilung von Treppen als Rückzugsweg in mehrgeschossigen Gebäuden. In: *Unser Brandschutz - wissenschaftlich-technische Beilage* 3 (1966), S. 65–70. – to be continued in 4/1966
- [95] MÜLLER, Werner: Die Beurteilung von Treppen als Rückzugsweg in mehrgeschossigen Gebäuden. In: *Unser Brandschutz - wissenschaftlich-technische Beilage* 4 (1966), S. 93–96. – continuation from 3/1966
- [96] MÜLLER, Werner L.: Die Überschneidung der Verkehrsströme bei dem Berechnen der Räumungszeit von Gebäuden. In: *Unser Brandschutz - wissenschaftlich-technische Beilage* 4 (1968), S. 87–92
- [97] MURPHY, Regina M. ; HILADO, Carlos J.: Hospital Fire Safety from the Viewpoint of the Patient. In: *Journal of Fire & Flammability* 11 (1980), April, S. 131–134
- [98] NAGAI, R. ; FUKAMACHI, M. ; NAGATANI, T.: Evacuation of crawlers and walkers from corridor through an exit. In: *Physica A* 367 (2006), S. 449–460

-
- [99] NAGEL, K. ; SCHRECKENBERG, M.: A cellular automaton model for freeway traffic. In: *Jrl. Physique I* 2 (1992), S. 2221. – DOI:10.1051/jp1:1992277
- [100] NAVIN, P. D. ; WHEELER, R. J.: Pedestrian flow characteristics. In: *Traffic Engineering* 39 (1969), S. 31–36
- [101] *Kapitel 14.* In: NELSON, Harold E. ; MOWRER, Frederick W.: *Emergency Movement*. 3rd. SFPE, 2002, S. 3–367–3–380
- [102] NFPA: *NFPA 130: Standard for Fixed Guideway Transit and and Passenger Rail Systems*. NFPA
- [103] NFPA: Life Safety Code / National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2000. – Forschungsbericht
- [104] NOBER, E. H. ; PEIRCE, H. ; WELL, A. D.: Waking Effectiveness of Household Smoke and Fire Detection Devices. Final Report. / National Bureau of Standards. 1983 (NBS GCR 83-439). – Forschungsbericht
- [105] NOBER, E. H. ; PEIRCE, H. ; WELL, A. D. ; JOHNSON, C. C. ; CLIFTON, C.: Waking Effectiveness of Household Smoke and Fire Detection Devices. / National Bureau of Standards,. 1980 (NBS GCR 80-284). – Forschungsbericht
- [106] NOBER, E. H. ; PEIRCE, Henry ; WELL, Arnold: Waking Effectiveness of Household Smoke and Fire Detection Devices. In: *Fire Journal* (1981), July, S. 86–91, 130
- [107] NOLAN, Dennis P.: *Encyclopedia of Fire Protection*. Thomson Delmar Learning, 2006
- [108] OEDING, D.: Verkehrsbelastung und Dimensionierung von Gehwegen und anderen Anlagen des Fußgängerverkehrs / Technische Hochschule Braunschweig. Bundesministerium für Verkehr, Abt. Straßenbau, Bonn, 1963 (Straßenbau und Straßenverkehrstechnik 22). – Forschungsbericht
- [109] PALMER, Deborah L.: *Should Bedroom Doors Be Open Or Closed While People Are Sleeping? - A Probabilistic Risk Assessment*, University of Canterbury, Diplomarbeit, 1999
- [110] PARK, Robert E. ; BURGESS, Ernest W.: *Introduction to the Science of Sociology*. University of Chicago Press, 1921

-
- [111] PAULS, J. L.: Movement of people. In: DINENNO, P. J. (Hrsg.): *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Second Edition. Quincy MA : National Fire Protection Association, 1995, Kapitel 3, S. 263
- [112] PAULSEN, Truls ; SOMA, Helge ; SCHNEIDER, Volker: Technical Note WP 320 - Qualitative Analysis of Evacuation Data. In: *Evaluation of Simulation Models of Evacuation from Complex Spaces*. Sintef, jun 1995
- [113] PREDTETSCHENSKI, W. M. ; CHOLSTSCHEWNIKOW, W. W. ; VÖLKEL, H.: Vereinfachte Berechnung der Umformung von Personenströmen auf Wegabschnitten mit begrenzter Länge. In: *Unser Brandschutz - wissenschaftlich-technische Beilage 6* (1972), S. 90–94
- [114] PREDTETSCHENSKI, Wsewolod M. ; MILINSKI, Anatoli I.: *Personenströme in Gebäuden - Berechnungsmethoden für die Projektierung*. Köln-Braunsfeld : Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, 1971
- [115] PROULX, G.: Occupant Behavior and Evacuation / National Research Council Canada. 2001. – Forschungsbericht
- [116] PROULX, Guylene: Movement of People: The Evacuation Timing. In: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 3rd. SFPE, Kapitel 13, S. 3–342–3–366
- [117] PROULX, Guylene ; CAVAN, Neil R. ; TONIKAN, Roupun: Egress Times From Single Family Houses / National Research Council Canada. 2006 (IRC-RR-209). – Research Report
- [118] PTV AG: *VISSIM Handbuch*
- [119] PUBLIC/PRIVATE FIRE SAFETY COUNCIL: *Home Smoke Alarms and Other Fire Detection and Alarm Equipment*. April 2006. – White Paper
- [120] QUARANTELLI, E. L.: The Behavior of Panic Participants. In: *Sociology and Social Research* 41 (1957), S. 187–194
- [121] QUARANTELLI, E. L.: The Sociology Of Panic / Disaster Research Center. 2001. – Preliminary Paper 283
- [122] RABENSEIFNER, R. ; RESCH, M. M.: *Hardware Architectures and Parallel Programming Models - An Introduction - Slides from Parallel Programming Course*

-
- [123] RITTGEN, O. v.: *Über die Feuersicherheit der Bauten*. Wilhelm Ernst und Sohn, 1901
- [124] ROITMAN, M. J.: *Die Evakuierung von Menschen aus Bauwerken*. Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik, 1966
- [125] SAVANNAH SIMULATIONS: *Simwalk Manual*
- [126] SCHADSCHNEIDER, A.: Cellular automaton approach to pedestrian dynamics - Theory. In: SCHRECKENBERG, M. (Hrsg.) ; SHARMA, S. D. (Hrsg.): *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Springer, 2002, S. 75
- [127] SCHWALM, Norman D.: Behavior of Special Populations in Fires. In: *Fire Journal* (1980), May, S. 41–42
- [128] SEEGER, P. G. ; JOHN, R.: Untersuchung der Räumungsabläufe in Gebäuden als Grundlage für die Ausbildung von Rettungswegen, Teil III: Reale Räumungsversuche / Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH). 1978 (T395). – Forschungsbericht
- [129] SEYFRIED, A. ; PASSON, O. ; STEFFEN, B. ; BOLTES, M. ; RUPPRECHT, T. ; KLINGSCH, W.: New Insights into Pedestrian Flow Through Bottlenecks. In: *Transportation Science* 43 (2009), S. 395 –406
- [130] SEYFRIED, A. ; RUPPRECHT, T. ; PASSON, O. ; STEFFEN, B. ; KLINGSCH, W. ; BOLTES, M.: Capacity estimation for emergency exits and bottlenecks. In: *Interflam2007 - Conference Proceedings*, 2007
- [131] SEYFRIED, A. ; SCHADSCHNEIDER, A.: Validation of cellular automata models of pedestrian dynamics using controlled large-scale experiments. In: *Cybernetics and Systems 2008*, 2008
- [132] SEYFRIED, A. ; STEFFEN, B. ; KLINGSCH, W. ; BOLTES, M.: The fundamental diagram of pedestrian movement revisited. In: *J. Stat. Mech.* (2005), S. P10002
- [133] SEYFRIED, A. ; STEFFEN, B. ; LIPPERT, T.: Basics of modelling the pedestrian flow. In: *Physica A* 368 (2006), S. 232
- [134] SHIELDS, T. J. ; DUNLOP, K. E.: Emergency Egress Models and the Disabled. In: *Conference Proceedings of the sixth International Interflam Conference*, 1993, S. 143–150

-
- [135] SMELSER, Neil J. ; SPROTT, W. J. H. (Hrsg.): *Theory of Collective Behavior*. Routledge and Kegan Paul, 1970
- [136] STEFFEN, B.: A Modification of the Social Force Model by Foresight. In: KLINGSCH, W.W.F. (Hrsg.) ; ROGSCH, C. (Hrsg.) ; SCHADSCHNEIDER, A. (Hrsg.) ; SCHRECKENBERG, M. (Hrsg.): *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, Springer, 2010, S. 677
- [137] STEFFEN, B. ; SEYFRIED, A.: Methods for measuring pedestrian density, flow and direction with minimal scatter. In: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 389 (2010), Nr. 9, S. 1902–1910
- [138] TAJFEL, H.: Experiments in Intergroup Discrimination. In: *Scientific American* 223 (1970), S. 96–102
- [139] TAJFEL, H. ; TURNER, J.C.: The Social Identity Theory of Intergroup Behavior. In: *Psychology of Intergroup Relations*. Chicago,IL : Nelson-Hall, 1986, S. 7–24
- [140] THE FREE DICTIONARY: *Panic*. Online, January 2009
- [141] THOMPSON, P.: *Simulex: simulated people have needs too*. online,
- [142] THOMPSON, P.A. ; MARCHANT, E.W.: Simulex: Developing New Computer Modelling Techniques For Evacuation. In: *Fire Safety Science* 4, 1994, S. 613–624
- [143] THOMPSON, Peter A. ; MARCHANT, Eric W.: A Computer Model for the Evacuation of Large Building Populations. In: *Fire Safety Journal* 24 (1995), S. 131–148
- [144] TOGAWA, K.: Study on fire escapes basing on the observation of multitude currents / Ministry of Construction, Japan. 1955. – Report of the Building Research Institute. – 1–40 S. – in Japanese
- [145] TOWNSEND, N.: Real Fire Research - People's Behaviour in Fires, S. 173–180
- [146] TRAFFGO-HT GMBH: *PedGo Manual*
- [147] VDMA: Entrauchung von Räumen im Brandfall / Geschäftsstelle : Gesprächskreis Entrauchung. 2005. – Forschungsbericht
- [148] VERWALTUNGS-BERUFGENOSSENSCHAFT: *BGI 650 - Bildschirm- und Bü-*

roarbeitsplätze, 2006

- [149] VOGIAZOU, Yanna ; EISENSTADT, Marc: Presence Based Play - Towards a Design for Large Group Social Interaction. In: *Proceedings of the First International Conference on Appliance Design*, 2003
- [150] WAGNER, Peter: Brandopfer und Brandstiftung - ein nationales Problem? / Feuerwehr Berlin. 2000. – Forschungsbericht
- [151] WEIDMANN, U.: Transporttechnik der Fußgänger - Transporttechnische Eigenschaften des Fußgängerverkehrs (Literaturauswertung) / ETH Zürich. 1993 (Schriftenreihe des IVT 90). – Forschungsbericht. – Zweite, ergänzte Auflage, in German.
- [152] WHITING, P. N.: A Review of International Research Efforts Related to Occupant Pre-movement Behaviour and Response Times in Fire / Branz. 2005 (143 (2005)). – Study Report
- [153] WIKIPEDIA: *Panic* — *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. 2009. – [Online; accessed 26-January-2009]
- [154] WIKIPEDIA: *Stampede* — *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. 2009. – [Online; accessed 11-February-2009]
- [155] WIKIPEDIA: *Ken Olsen* — *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. 2012. – [Online; accessed 25-June-2012]
- [156] WIKIPEDIA: *Thomas J. Watson* — *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. 2012. – [Online; accessed 25-June-2012]
- [157] WOOD, Peter G.: The Behaviour of People in Fires / Fire Research Station. 1972 (953). – Fire Research Note
- [158] YAMORI, K.: Going with the Flow: Micro-Macro Dynamics in the Macrobehavioral Patterns of Pedestrian Crowds. In: *Psychological Review* 105 (1998), Nr. 3, S. 530
- [159] ZDS: Brandschutz in Europa - Sicherheit in Deutschland am höchsten? In: *Fachzeitschrift des Zentralverband Deutscher Schornsteinfeger e. V.* (2002)

B. Abbildungsverzeichnis

1.1.	Experimentelle Daten für Personenflüsse durch Engstellen [131]	12
1.2.	Skizzen der Experimente der Daten in Abbildung 1.1 [130]	14
1.3.	Darstellung des Experiments von Mintz [88]	25
1.4.	Skizze des Experiments zur Ermittlung der Startwelle	27
1.5.	Startwelle bei einer Warteschlange	29
2.1.	Möglicher Verlauf der Kräfte $\mathbf{f}_i^{(pers)}$, $\mathbf{f}_i^{(soc)}$ und $\mathbf{f}_i^{(phys)}$ für eine Person i in Anlehnung an [4]	35
2.2.	Darstellung der <i>von Neumann</i> und der <i>Moore Nachbarschaft</i> für eine Zelle	37
2.3.	Linienbildung bei Gegenstromsituationen.	39
2.4.	Keine Bewegung auf eine Zielzelle basierend auf dem Friction Para- meter μ [62]	40
2.5.	Ablaufdiagramm eines <i>Ordered Sequential</i> bzw. <i>Random Shuffled Up- dates</i>	44
2.6.	Ablaufdiagramm eines <i>Parallelen Updates</i>	47
2.7.	Ausbreitung eines Potentialfeldes mit einer <i>von Neumann Nachbar- schaft</i> nach 20 und 35 Iterationen in einem Raum	50
2.8.	Benötigte Zeitschritte zur Evakuierung eines 10×10 m Raumes (siehe Abb. 2.7) mit 1, 2 m Türöffnung bei verschiedenen Updatealgorithmen (200 Personen)	51
2.9.	Ausbreitung eines Potentialfeldes mit einer <i>von Neumann Nachbar- schaft</i> nach 30 und 41 Iterationen in einem Hörsaal	52
2.10.	Benötigte Zeitschritte zur Evakuierung eines Hörsaales (siehe Abb. 2.9 bzw. 2.11(a) und 2.11(b)) mit 1, 2 m Türöffnung bei verschiedenen Updatealgorithmen (119 Personen)	53
2.11.	Einfluss verschiedener Updatealgorithmen auf die Ermittlung von Zeit- schritten bei der Evakuierung eines Hörsaales	55
2.12.	Einfluss der Personenplatzierung vor dem Ausgang bei einem <i>Ordered Sequential Update front-to-back</i>	56

2.13. Einfluss der Personenplatzierung vor dem Ausgang bei einem <i>Ordered Sequential Update back-to-front</i> oder einem <i>Parallelen Update</i>	56
2.14. Benötigte Zeitschritte zur Evakuierung eines Hörsaales (siehe Abb.2.11(c) und 2.11(d)) mit 1, 2 m Türöffnung bei verschiedenen Updatealgorithmen (119 Personen)	57
2.15. Berechnung des Wertes des Exponenten der Wahrscheinlichkeitsfunktion für die Zielzellenwahl in Abhängigkeit vom Parameter S	58
2.16. Einfluss einer Wahrscheinlichkeitsfunktion bei der Zielzellenwahl auf Zeitschritte zur Evakuierung eines Hörsaales (siehe Abb. 2.11(b)) mit 1, 2m Türöffnung bei <i>Parallelem Update</i> (119 Personen)	59
2.17. Grundrisse verschiedener Gebäude (nicht maßstäblich) wie im Programm PedGo modelliert	62
2.18. Unterschiedliche Arten der Personenverteilung in einem Geschoss	64
2.19. Einfluss des Reaktionszeitintervalls auf die Gesamtevakuierungszeit	66
2.20. Einfluss der freien Gehgeschwindigkeit auf Evakuierungszeiten am Beispiel des Bürohochhauses	69
2.21. Grundriss des Bayer-Hochhauses [128]	71
2.22. Grundriss des Mannesmann-Hochhauses [128]	72
2.23. Grundriss des Unilever-Hochhauses [128]	73
2.24. Testszenario für Abbremsen und Beschleunigen	80
2.25. Testszenario zur Überprüfung des Startpunktes beim Überholvorgangs	81
2.26. Testszenario zur Überprüfung des implementierten Potentialfeldes	82
2.27. Testszenario zur Überprüfung des Einflusses einer Ecke auf die Simulationsergebnisse	83
2.28. Beispiel einer Stautentstehung während der Bewegung um eine Ecke (Programm Simulex).	84
2.29. Erklärung der engen Bewegung um eine Ecke basierend auf dem Potentialfeld	84
2.30. Testszenario zur Überprüfung von Randbedingungen	85
2.31. Testszenario zur Wahl des Ausgangs	87
2.32. Testszenario zur Untersuchung eines „Quickest“ oder „Shortest Path Algorithmus“	89
2.33. Treppentest aus der RiMEA-Richtlinie [5]	89
2.34. <i>Ordered Sequential Update front-to-back</i> , <i>Ordered Sequential Update back-to-front</i> , <i>Random Shuffled Update</i> und <i>Paralleler Update</i> nach 40, 60 und 80 Zeitschritten.	93
3.1. Grundriss des Mannesmann-Hochhauses [128]	96

3.2. Hälfte des Grundrisses eines Schulgebäudes nach [124]	98
5.1. Modellversuch einer Industriehalle (Bild: IFI)	110
5.2. Brandquellenmodellierung im Programm Argos	111
5.3. Brandquellenmodellierung im Programm Branzfire	111
5.4. Brandquellenmodellierung im Programm CFAST	112
5.5. Brandquellenmodellierung im Programm Ozone	112
5.6. Geometrie- und Öffnungseingabe im Programm Argos	114
5.7. Geometrie- und Öffnungseingabe im Programm Branzfire	115
5.8. Geometrie- und Öffnungseingabe im Programm CFAST	116
5.9. Geometrie- und Öffnungseingabe im Programm Ozone	117
5.10. Höhe der raucharmen Schicht, ermittelt mit 4 verschiedenen Zonen- modellen	118
5.11. Temperatur der Rauchsicht, ermittelt mit 4 verschiedenen Zonen- modellen	119
5.12. Druckdifferenz zur Umgebung, ermittelt mit 4 verschiedenen Zonen- modellen	119
5.13. Höhe der raucharmen Schicht, ermittelt mit FDS an unterschiedlichen Messpunkten	121
5.14. Temperatur der Rauchsicht, ermittelt mit FDS	122
6.1. Geometrie und Ergebnisse des Konvergenzverhaltens von FDS 4.07	124
6.2. Auflösung von Turbulenzen bei unterschiedlichen Zellgrößen	124
6.3. Temperaturen an unterschiedlichen Messpunkten	125
6.4. Rauchausbreitung an schrägen Decken	126
6.5. Schnitt durch einen Raum mit geneigter Decke	127
6.6. Partikelausbreitung nach 30 Sekunden an einer geneigten Decke (Drauf- sicht, 3D-Ansicht)	127
7.1. Prinzipieller Aufbau einer Distributed Memory Architektur [122]	131
7.2. Prinzipieller Aufbau einer Shared Memory Architektur [122]	131
7.3. Prinzipieller Aufbau einer Hybriden Architektur [122]	132
7.4. Flexible Gitteranordnung in FDS [76]	133
7.5. Austausch von Informationen mit Hilfe von „Ghost Cells“	134
7.6. Ablauf eines OpenMP-Programms mit mehreren Threads	135
7.7. Theoretischer Geschwindigkeitsgewinn und Programmieraufwand für OpenMP und MPI-Implementierungen [89]	137
7.8. Einfluss der CPU auf Rechengeschwindigkeiten.	141

7.9. Geschwindkeitszuwachs unterschiedlicher Routinen bei der Nutzung von OpenMP.	142
--	-----

C. Tabellenverzeichnis

1.1.	Einflussfaktoren und ihre Wechselwirkungen [115]	13
1.2.	Erkennungs- und Reaktionszeiten im Brandfall	16
1.3.	Entstehungsgründe für Massenunglücke	22
1.4.	Einteilung der Massenunglücke nach neuen Definitionen	23
1.5.	Ergebnisse des Experiments zur Bestimmung des Verlaufs einer Startwelle	28
2.1.	D'Hondt-Quotienten für eine Wunschgeschwindigkeit „WG“ von maximal fünf Zellen pro Zeitschritt nach Gleichung 2.5	42
2.2.	Einfluss der Personenverteilung in Gebäuden auf die Gesamtevakuiierungsdauer	65
2.3.	Einfluss des Reaktionszeitintervalls auf Stauungen im Treppenhaus am Beispiel des Schulgebäudes	67
2.4.	Einfluss der freien Gehgeschwindigkeit auf die Evakuierungszeit eines Hotelgebäudes	69
2.5.	Alterverteilung und freie Gehgeschwindigkeiten ($\pm 0,2$ m/s) der Beschäftigten im Jahr 1978 [2]	74
2.6.	Vergleich berechneter Evakuierungszeiten mit einer Evakuierungsübung (Bayer-Hochhaus)	75
2.7.	Vergleich berechneter Evakuierungszeiten mit einer Evakuierungsübung (Mannesmann-Hochhaus)	75
2.8.	Vergleich berechneter Evakuierungszeiten mit einer Evakuierungsübung (Unilever-Hochhaus)	76
2.9.	Berechnete Evakuierungszeiten bei unterschiedlichen Ausgangspersonenzahlen (Bayer-Hochhaus)	76
2.10.	Berechnete Evakuierungszeiten bei unterschiedlichen Ausgangspersonenzahlen (Mannesmann-Hochhaus)	77
2.11.	Berechnete Evakuierungszeiten bei unterschiedlichen Ausgangspersonenzahlen (Unilever-Hochhaus)	77

3.1. Vergleich verschiedener makroskopischer Modelle mit einer Evakuierungsübung am Beispiel eines Hochhauses.	98
3.2. Vergleich verschiedener makroskopischer Modelle für ein Schulgebäude.	99
4.1. Vergleich verschiedener makroskopischer und mikroskopischer Modelle mit einer Evakuierungsübung am Beispiel des Mannesmann-Hochhauses.	103
4.2. Vergleich verschiedener makroskopischer Modelle für ein Schulgebäude.	104
7.1. Performancevergleich unterschiedlicher Quellcodedateien, Parallelisierung mittels OpenMP	143

D. Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei allen Unterstützern bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Klingsch, der diese Arbeit betreut hat und mir einen Platz an seinem Lehrstuhl zur Durchführung der wissenschaftlichen Untersuchungen gestellt hat. Ein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Seyfried, der mich bereits seit mehreren Jahren wissenschaftlich als auch persönlich unterstützt hat. Ebenfalls möchte ich Herrn Prof. Schadschneider und Herrn Prof. Schreckenberg danken für die vielseitigen Erfahrungen, die mir beide ermöglicht haben. Weiterhin gilt auch großer Dank Dr. Hubert Klüpfel und Dr. Tobias Kretz, die mit vielen Diskussionen ebenfalls zu dieser Arbeit beigetragen haben.

Ebenfalls möchte ich den zahlreichen Studenten danken, die durch Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten zu den Untersuchungen dieser Arbeit beigetragen haben. Es wurden mir dadurch zahlreiche neue Blickwinkel auf die einzelnen Themengebiete eröffnet, da man doch im Laufe der Jahre „etwas betriebsblind“ wird.

Auch möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Baustofftechnologie und Brandschutz bedanken, die mich ebenfalls all die Jahre unterstützt haben. Besonders möchte ich mich hierbei bei meinem „Zimmergenossen“ Marijo bedanken, da er mich all die Jahre ertragen musste.

Weiterhin gilt mein Dank der „wissenschaftlichen Community“, die sich bereits jahrzehntelang mit den Themen meiner Arbeit beschäftigt. Hierzu konnte auf vielen Tagungen diverse Meinungen ausgetauscht werden, so dass mir hierdurch auch eine komplett andere Sichtweise einzelner Themengebiete ermöglicht wurde.

Neben den vielen fachbezogenen Personen gilt mein Dank auch Herrn Prof. Schmidt, seinen Mitarbeitern und dem Umweltschutzseminar, das doch immer wieder eine gewisse wohltuenede Ablenkung und erstaunliche Erkenntnisse jenseits von Brandschutz und Evakuierung lieferte.

Zuletzt gilt der Dank meinen Eltern, die mir diese Ausbildung ermöglicht haben. Ob sie erfolgreich war, vermag ich nicht zu sagen, denn schlauer ist man immer hinterher...

E. Teilpublikationen

Books and Research Reports

W.W.F. Klingsch, C. Rogsch, A. Schadschneider, and M. Schreckenberg, editors. Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008. Springer, 2010. 833 pages.

Refereed Publications

C. Rogsch and W. Klingsch. Basics of Software-Tools for Pedestrian Movement - Identification and Results. Fire Technology, 2012, Vol. 48, No. 1, pages 105-125

A. Schadschneider, W. Klingsch, H. Klüpfel, T. Kretz, C. Rogsch, and A. Seyfried. Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications. In R.A. Meyers, editor, Encyclopedia of Complexity and System Science, pages 3142-3176. Springer, 2009.

Conference Proceedings and Contributions

C. Rogsch. Aus der Geschichte lernen - Ursachen für Massenunglücke, vfdB Jahrestagung 2011, Tagungsband

C. Rogsch and W. Klingsch. To See Behind the Curtain - A Methodical Approach to Identify Calculation Methods of Closed-Source Evacuation Software Tools. In R. Peacock et al., Pedestrian and Evacuation Dynamics. Springer 2011.

C. Rogsch, A. Schadschneider, and A. Seyfried. How to Select the „Right One“ - Update Schemes for Pedestrian Movement in Simulation and Reality. In Traffic and Granular Flow '09. Springer. in print.

C. Rogsch. FDS and OpenMP - A New Parallelization Approach for Fire Modelling Software. In Interflam 2010 - Proceedings of the twelfth international conference, volume 2, pages 1543-1548. Interscience Communications, 2010.

C. Rogsch. Start Waves and Pedestrian Movement - An Experimental Study. In W.W.F. Klingsch, C. Rogsch, A. Schadschneider, and M. Schreckenberg, editors, Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008, pages 247-248. Springer, 2010.

C. Rogsch, H. Weigel, and W. Klingsch. Hand-Calculation Methods for Evacuation Calculation - Last Chance for an Old-Fashioned Approach or a Real Alternative to Microscopic Simulation Tools? In W.W.F. Klingsch, C. Rogsch, A. Schadschneider, and M. Schreckenberg, editors, Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008, pages 523-528. Springer, 2010.

C. Rogsch, M. Schreckenberg, E. Tribble, W. Klingsch, and T. Kretz. Was It Panic? An Overview about Mass-Emergencies and Their Origin All Over the World for Recent Years. In W.W.F. Klingsch, C. Rogsch, A. Schadschneider, and M. Schreckenberg, editors, Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008, pages 743-755. Springer, 2010.

C. Rogsch and W. Klingsch. Risk Analysis with Evacuation Software - How Should We Interpret Calculated Results?. In Interschutz 2010 - Conference Proceedings. vfdb, 2010.

C. Rogsch, W. Klingsch, A. Seyfried, and H. Weigel. Prediction Accuracy of Evacuation Times for High-Rise Buildings and Simple Geometries by Using Different Software-Tools. In C. Appert-Rolland, F. Chevoir, P. Gondret, S. Lassarre, J.-P. Lebacque, and M. Schreckenberg, editors, Traffic and Granular Flow '07, pages 395-400. Springer, 2009.

C. Rogsch, A. Schadschneider, and A. Seyfried. Influence of Different Update Schemes on the Simulation of Human Movement Using Cellular Automata Models. In First International Conference on Evacuation Modeling and Management (ICEM '09) - Conference CD. Delft University, 2009.

C. Rogsch, A. Schadschneider, and A. Seyfried. Simulation of Human Movement by Cellular Automata Models Using Different Update Schemes. In 4th International Symposium on Human Behaviour in Fire, pages 543-548. Interscience Communications, 2009.

C. Rogsch. FDS und OpenMP - Erfahrungen bei der Entwicklung. In 3. Anwendertreffen der FDS Usergroup - Tagungsband - Zusammenstellung der Kurzreferate, pages 206-214. hhppress, 10 2009. online - in German.

C. Rogsch. FDS und OpenMP. In 2. Anwendertreffen der FDS Usergroup - Tagungsband - Zusammenstellung der Kurzreferate, pages 174-186. hhppress, 12 2008. online - in German.

C. Rogsch. Parallelrechnung in der Praxis - Ist FDS5 wirklich „besser“ als FDS4?

In 1. Anwendertreffen der FDS Usergroup - Tagungsband - Zusammenstellung der Kurzreferate, pages 27-35. hhpress, 3 2008. online - in German.

C. Rogsch, W. Klingsch, A. Seyfried, and H. Weigel. How Reliable are Commercial Software-Tools for Evacuation Calculation? In Interflam 2007 - Proceedings of the eleventh international conference, volume 1, pages 235-245. Interscience Communications, 2007.

D. Toris, C. Rogsch, and A. Seyfried. Usefullness of Finer Grid to Increase the Approximation Quality of LES-based CFD-Calculations Related to Buoancy-Driven Flows. In Interflam 2007 - Proceedings of the eleventh international conference, volume 2, pages 1369-1372. Interscience Communications, 2007.

C. Rogsch, A. Seyfried, and W. Klingsch. Comparative Investigation of the Dynamic Simulation of Foot Traffic Flow. In N. Waldau, P. Gattermann, H. Knoflacher, and M. Schreckenberg, editors, Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005, pages 357-362. Springer, 2007.

F. Lebenslauf

In der Online-Version ist aus Datenschutzgründen kein Lebenslauf vorhanden.

G. Erklärung

Ich versichere, dass ich die von mir vorgelegte Dissertation selbständig angefertigt, die benutzten Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben und die Stellen der Arbeit einschließlich der Abbildungen, die anderen Werken im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, in jedem Einzelfall als Entlehnung kenntlich gemacht habe; dass diese Dissertation noch keiner anderen Fakultät oder Universität zur Prüfung vorgelegen hat; dass sie abgesehen von den angegebenen Teilpublikationen noch nicht veröffentlicht worden ist, sowie, dass ich eine solche Veröffentlichung vor Abschluss des Promotionsverfahrens nicht vornehmen werde. Die Bestimmungen der Promotionsordnung vom 04. Dezember 2006 sind mir bekannt.

67435 Neustadt an der Weinstraße,