

Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation
Prof. Dr. - Ing. André Borrmann

Simulation von Evakuierungsszenarien bei Großveranstaltungen am Beispiel eines Gebäudes der TU München

Bachelorarbeit

Technische Universität München
Studiengang Bauingenieurwesen

Autorin: Maria Driesel
[REDACTED]
[REDACTED]
Matrikelnummer: [REDACTED]
Korrektur: Prof. Dr. - Ing. André Borrmann
Betreuung: Dipl. - Inf. Angelika Kneidl
Anmeldung: 01.05.2012
Abgabe: 21.09.2012

Vorwort

Die IKOM ist das größte Karriereforum in Süddeutschland und wird in der Fakultät für Maschinenwesen der TU München veranstaltet. Die Evakuierung eines Gebäudes unserer Universität während der Messe zu untersuchen, war für mich eine sehr interessante Aufgabe. Zudem ermöglichte mir dieses aktuelle Thema die Zusammenarbeit mit vielen Personen, die bei der Planung und Durchführung einer solchen Veranstaltung involviert sind.

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. - Ing. André Borrmann für die Ermöglichung dieser Arbeit bedanken. Vielen Dank an meine Betreuerin Frau Dipl. - Inf. Angelika Kneidl für ihre Hilfe bei der Erstellung der Simulation und der Bachelorarbeit. Sie stand mir stets bei allen Fragen und Problemen mit Rat und Tat zur Seite.

Mein Dank gilt auch allen Mitgliedern der Feuerwehr der TU München für ihre Unterstützung und Offenheit. Es war sehr spannend, einmal hinter die Kulissen schauen zu dürfen und einen so unmittelbaren Eindruck von ihrer Arbeit zu bekommen.

Besonders danken möchte ich Herrn Thomas Schmidt (Brandoberinspektor) und Herrn Jürgen Wettlaufer (Brandinspektor) für ihre tatkräftige Unterstützung und Hilfe, für alle bereitgestellten Informationen und die Beantwortung aller fachlichen Fragen.

An Dr. Heinz Daake und Dipl. - Ing. Johannes Drees (Hochschulreferat 6 - Sicherheit und Strahlenschutz) vielen Dank für ihre Zusammenarbeit und Mithilfe.

Desweiteren bedanke ich mich bei Constantin Hirschbiegel, Felix Braun (IKOM Leitung), Maximilian Meierhofer (IKOM Logistik), Veronika Haase und dem gesamten Team der IKOM für ihre Unterstützung während der Messe, die vielen Informationen und die Organisation eines einzigartigen Karriereforums.

Ebenfalls vielen Dank an Stephanie Huerre (Walt Disney Imagineering R & D), die uns die GoPro Kameras für die Videodatenaufzeichnung zur Verfügung gestellt hat. Dadurch haben wir viele aufschlussreiche Bilder erhalten.

Außerdem ein Dankeschön an Caroline Kargus (Staatliches Bauamt München 2) für die Aushändigung der Grundrisse und der vorläufigen Bestandsaufnahme der Flucht - und Rettungswegpläne sowie Angelika Heininger (Verwaltung, Lehrstuhl für Flugantriebe) für die rasche Zusammenstellung einer Liste der Mitarbeiter der Fakultät für Maschinenwesen.

Vielen Dank an die Helfer Tobias Mittermaier, Antonia Meißner, Holly Hoffmann, Sebastian Ultsch, Armin Pribbernow, Alexander Matschinski, Lea Richter und Sören Gunia. Ohne euch wäre eine Personenzählung während der IKOM nicht möglich gewesen.

Zum Schluss ein ganz besonderer Dank an meine Familie, die mich in dieser Zeit immer moralisch unterstützt hat.

Inhalt

1. Einleitung.....	1
2. Grundlegende Aspekte der Rettung von Personen	4
2.1. Historische Katastrophen	4
2.2. Definition und Abgrenzung.....	9
2.3. Anforderungen an Bauwerke	10
2.4. Psychologische Aspekte.....	14
2.5. Gefahrenpotentiale	17
2.6. Ablauf einer Evakuierung	18
3. Fallbeispiel: TU München	22
3.1. Beschaffenheit des Gebäudes	22
3.2. Messeveranstaltung IKOM	29
4. Simulation von Fußgängern	41
4.1. Grundidee	41
4.2. Fußgänger nach Weidmann.....	42
4.3. Modellierungsarten	44
4.4. Simulationsprogramm „CrowdControl“	49
4.5. Datenerfassung.....	52
4.6. Randbedingungen und Annahmen.....	65
4.7. Simulierte Szenarien	66
5. Ergebnisse der Simulation	76
5.1. Dauer der Evakuierung	76
5.2. Visuelle Auswertung	77
5.3. Messdaten	84
5.4. Optimierungsansätze.....	93
5.5. Konsequenzen	95
6. Schlusswort	97
7. Literaturverzeichnis.....	99
8. Abbildungsverzeichnis.....	104
9. Tabellenverzeichnis	107
10. Anhang.....	108
11. Selbstständigkeitserklärung	109

1. Einleitung

Großveranstaltungen wie Konzerte, Sportveranstaltungen, Festivals oder Messen stellen für die verantwortlichen Organisatoren und Sicherheitsbeauftragten schwer überschaubare Situationen dar. Durch die Ansammlung großer Menschenmassen auf Plätzen und in Gebäuden stehen Personen oft dicht gedrängt nebeneinander. Ursache dafür ist häufig Überfüllung und die dadurch entstehenden Staus an Hindernissen und Engpässen. Je mehr Personen sich sammeln, umso komplexer und kritischer wird die Situation. Im Gedränge fühlen sich die Menschen schnell beeengt, Panik bricht aus und Staus können zur lebensbedrohlichen Gefahr werden. Im schlimmsten Fall können nicht einmal Rettungskräfte und Feuerwehr zu den Verletzten vordringen. Eine gründliche Vorbereitung und Planung können dabei helfen, solch folgenschwere Szenarien zu verhindern.

Ebenso ist in öffentlichen Gebäuden, wie Bürokomplexen, Bildungseinrichtungen, Krankenhäusern und Hotels eine genaue Auseinandersetzung mit dem Thema Rettung von Personen in Notfällen zwingend erforderlich, um für den Ernstfall vorbereitet zu sein und Leben zu retten. Doch leider wird das Thema von den Menschen, die sich in einem Gebäude aufhalten, häufig vernachlässigt. Flucht - und Rettungspläne werden nur selten beachtet. Die Möglichkeiten, wie man das Gebäude, in dem man sich gerade befindet, auf dem kürzesten Weg verlassen kann, werden von vielen nicht im Voraus durchdacht.

Es gibt unzählige Gründe, die dazu führen können, dass ein Bauwerk schnellstmöglich geräumt werden muss. Die wohl bekanntesten Ursachen sind Brände oder das Austreten von Chemikalien. Der Ablauf eines Feuersalarms wird deshalb bereits im frühesten Kindesalter an den Schulen geübt.

Vor allem die schnelle und unkontrollierbare Rauchentwicklung zwingt Personen im Ernstfall dazu, Gebäude so schnell wie möglich zu verlassen. Menschliche Fehler, wie das unachtsame Abstellen von Brandlasten, oder durch Gegenstände blockierte Flucht - und Rettungswege machen es jedoch in bestimmten Fällen unmöglich, alle Personen rechtzeitig aus einem Gebäude zu retten.

Um die Gefährdung von Menschenleben zu verhindern, sind eine frühzeitige Vorbereitung, eine detaillierte Notfallplanung, die Durchführung der erforderlichen Maßnahmen und die anschließende Kontrolle außerordentlich wichtig. Hauptsächlich sind ausreichende Flucht - und Rettungswege zur Verfügung zu stellen, Gebäude durch brandschutztechnische Bauteile zu sichern sowie die Verteilung von Verantwortlichkeiten festzulegen.

Eine sorgfältige Planung ermöglicht es, Vorhersagen für den Ablauf einer Gebäuderäumung zu treffen. Auf Grundlage dessen kann entschieden werden, wie viele Personen sich maximal auf einer Veranstaltung oder in einem Gebäude befinden dürfen, damit eine reibungslose und geordnete Räumung noch möglich ist.

Das Verhalten von Fußgängern spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Die tatsächlichen Verhaltensmuster und die Wahl der Wege jedes Einzelnen sind allerdings individuell und schwer vorhersehbar. Deshalb ist es wichtig, sich vorab detailliert über alle verschiedenen Varianten und die betroffenen Personengruppen zu informieren. Die Gebäudegegebenheiten, die möglichen Flucht - und Rettungswege sowie die Notausgänge sind ebenfalls zu analysieren. Je genauer die zusammengestellten Informationen sind, umso präziser können Gefahren festgestellt, Risiken abgeschätzt und Vorhersagen über mögliche Ernstfälle getroffen werden.

Wissenschaftler und Universitäten beschäftigen sich seit geraumer Zeit mit dem Verkehrsverhalten von Fußgängern. Sie haben die wesentlichen Eigenschaften untersucht und empirische Werte wie beispielsweise die durchschnittliche Körpergröße, Leistung und Geschwindigkeit eines Fußgängers in verschiedenen Situationen ermittelt.

Simulationen am Computer helfen, das Verhalten der Fußgänger durchschaubar zu machen und Vorhersagen über Menschenströme zu treffen. Spezialisten haben dafür Modelle zur Darstellung der Fußgänger entwickelt. Verschiedene denkbare Szenarien einer Gebäuderäumung können so am Computer durchgespielt werden und bieten die Gelegenheit zu testen, wo sich kritische Ansammlungen von Personen bilden oder Fluchtwege nicht günstig gewählt sind. Dadurch ist es möglich, Gefahren bereits vor einem Unglück zu eliminieren.

An der Technischen Universität München (TU München) treffen Großveranstaltungen auf den alltäglichen Studienbetrieb in den Universitätsgebäuden. Einmal im Jahr findet das Karriereforum IKOM im Gebäude der Fakultät für Maschinenwesen in Garching statt.

2012 präsentierten sich auf dieser Firmenkontaktmesse 261 Firmen, die sich verteilt über vier Tage den Studenten und Besuchern vorstellten, um so direkten Kontakt aufzubauen. Die Veranstaltung umfasst täglich 72 Messestände, die in der Magistrale und den seitlichen Höfen des Gebäudes untergebracht sind. Während der Veranstaltung findet der Betrieb in den Lehrstühlen, in denen zum Teil mehr als 200 Mitarbeiter arbeiten, und den Hörsälen, die bis zu 894 Plätze beinhalten, wie gewohnt statt.

Die Feuerwehr der TU München und das Hochschulreferat 6 - Sicherheit und Strahlenschutz stehen damit vor einer planerischen, brandschutz - und sicherheitstechnischen Aufgabe. Es stellt sich daher die Frage, ob eine reibungslose Räumung auch unter diesen Umständen und den Beeinträchtigungen des Gebäudes noch einwandfrei durchführbar ist. Durch den Aufbau der Messestände ändert sich das Fluchtkonzept. Die Anzahl der Personen im Gebäude ist durch die hinzukommenden Messebesucher stark erhöht und Technik und Dekorationsmaterialien befinden sich zusätzlich in der Magistrale.

Zur unterstützenden Beurteilung dieser Situation und als Grundlage für die weitere Planung der erforderlichen Maßnahmen, soll an diesem Fallbeispiel in Zusammenarbeit mit der Feuerwehr und dem Hochschulreferat 6 eine Fußgängersimulation erstellt werden. Diese soll verdeutlichen, wo kritische Situationen auftreten können. Es ist zu untersuchen, ob eine Optimierung des Ablaufs und des Standplans sinnvoll ist. Mit Hilfe der Ergebnisse wird geprüft, ob die Veranstaltung weiterhin wie bisher durchgeführt werden kann oder Veränderungen zum Schutz der Besucher vorgenommen werden müssen.

In der folgenden Arbeit werden zunächst die Grundlagen und allgemeinen Informationen zur Rettung von Personen aus Bauwerken zusammengefasst. Ebenso wird ein kurzer Überblick über die gesetzlichen Grundlagen und die verwendeten Begriffe gegeben. Es werden die verschiedenen Ansätze, Fußgänger in einem Computermodell abzubilden und der Aufbau einer Fußgängersimulation erläutert. Außerdem wird das Fallbeispiel der TU München detailliert untersucht. Die dafür gesammelten Informationen werden präsentiert und auf deren Basis werden verschiedene Szenarien mit dem Simulationsprogramm durchgeführt. Die Auswertung der Messdaten sowie die zusammengestellten wesentlichen Ergebnisse sollen als Anregung und Unterstützung bei der weiteren Planung und Analyse des Gebäudes der Fakultät für Maschinenwesen dienen.

Ein durchdachtes Sicherheitskonzept kann schwerwiegende Folgen verhindern. Verheerende Katastrophen in der Geschichte machen noch deutlicher, wie bedeutend solche Konzepte sind und wie unumgänglich es ist, sich mit dem Thema Sicherheit von Personen in Bauwerken auseinanderzusetzen. Es ist wichtig, sich mit den Fehlern in der Vergangenheit auseinanderzusetzen und daraus für kommende Ereignisse zu lernen.

2. Grundlegende Aspekte der Rettung von Personen

2.1. Historische Katastrophen

Seit frühester Geschichte versammeln sich Menschen zu Großveranstaltungen auf Plätzen, in Stadien oder in Gebäuden. Bereits in der Antike fanden in Amphitheatern große Festspiele statt, zu denen sich tausende von Menschen zusammenfanden. Das bekannteste historische Bauwerk ist das Kolosseum in Rom, in dem bis zu 60.000 Besucher Platz fanden (vgl. [1]).

Im weiteren Verlauf der Geschichte trugen viele Faktoren dazu bei, dass sich immer größere Ansammlungen von Menschenmassen bildeten. Nur einige davon sind die wachsende Bevölkerungsdichte, die zunehmende Globalisierung, die Entwicklung der Medien und die dadurch steigende Bekanntheit von Musikstars, Fußballvereinen und Festivals. So versammeln sich tausend bis hunderttausend Menschen um ihre Lieblingsband zu sehen, als Fan das Fußballspiel ihres Vereins anzuschauen, berühmte Ausstellungen zu bewundern oder auf Festivals und Märkten entlang zu schlendern.

Jedoch bringen derartige Menschenmengen Probleme mit sich und stellen die Planer und Organisatoren dieser Veranstaltungen vor einige Herausforderungen. Viele Großveranstaltungen in der Vergangenheit sind aus verschiedenen Gründen nicht problemlos abgelaufen. Je mehr Menschen auf engem Raum zusammenkommen, umso höher ist das Risiko, dass unerwartete Ereignisse zu Drängelei oder sogar Panik führen können. Die Auswirkungen auf solche Situationen können katastrophal werden.

„Seit 1945 gab es weltweit mehr als 30 große Massenpaniken mit weit über 1000 Toten und 3500 Verletzten.“ [2]

Neben vielen kleineren Zwischenfällen, bleiben vor allem jene tragischen Unglücke in Erinnerung, bei denen es zu Schwerverletzten und sogar Todesopfern kam.



Abbildung 1: Massenpanik - Brüssel, Belgien [3].

Am 29. Mai 1985 standen der FC Liverpool und Juventus Turin im Finale des Europapokals. Das Fußballspiel fand im Heysel-Stadion in Brüssel statt. Nachdem Hooligans randaliert hatten, griffen Anhänger des FC Liverpool den Nachbarblock an, in dem sich Fans von Juventus Turin befanden. Die flüchtenden Juventus - Fans gerieten in Panik und wurden gegen eine Mauer gedrückt, die infolgedessen in sich zusammenbrach. Es kamen 39 Menschen ums Leben, 454 wurden verletzt. Das tragische Unglück ist nach heutigen Erkenntnissen vor allem auf Fehler in der Organisation und der Umsetzung zurückzuführen: Im betroffenen Block hätten sich laut Konzept nur neutrale Fans befinden dürfen. Polizisten waren nicht anwesend und die Blöcke waren nur unzureichend durch Abgrenzungen gesichert (vgl. [4]).



Abbildung 2: Überfüllung eines Stadions- Sheffield, Großbritannien [5].

Im Hillsborough - Stadion wurde am 15. April 1989 das Pokal - Halbfinale zwischen Nottingham und Liverpool ausgetragen. Im Gegensatz zu dem verheerenden Unglück im Heysel - Stadion 1985 wurden die Absperrungen und Sicherheitsmaßnahmen zum Verhängnis für die Besucher. Die Organisation hatte auch hier versagt und zu viele Personen ins Stadion gelassen. Aufgrund der Überfüllung eines Blockes wurden während des Fußballspiels die Zuschauer gegen den Zaun am Spielfeldrand gedrückt oder niedergetrampelt. 96 Menschen kamen dabei ums Leben, 766 wurden verletzt (vgl. [6]).



Abbildung 3: Pilgerstätte - Mekka, Saudi-Arabien [3].

Bis zu 2,5 Millionen Muslime pilgern jährlich zur Hadsch in Saudi - Arabien. Die Stadt Mekka ist der Geburtsort des Propheten Mohammed und der wichtigste Wallfahrtsort des Islam (vgl. [7]). Am 2. Juli 1991 brach im Al-Ma'aisim - Fußgängertunnel eine Massenpanik aus, bei der 1427 Pilger von fliehenden Menschenmassen überrannt und getötet wurden. Bei diesem Zwischenfall handelte es sich vermutlich um die folgenschwerste Panik der dokumentierten Geschichte (vgl. [8]).



Abbildung 4: Massenpanik - Duisburg, Deutschland [9].

Am 24. Juli 2010 fand die Loveparade auf dem Gelände des ehemaligen Güterbahnhofs in Duisburg statt. Die drängende Menschenmasse und die dadurch entstandene Enge aufgrund der ungünstigen Wegeplanung, nicht vorhandener Ausweichmöglichkeiten sowie versperfter Fluchtwege forderten 21 Todesopfer und mindestens 511 zum Teil schwer Verletzte. Einige 100 Meter von der Unglücksstelle entfernt, bekamen die feierlustigen Besucher nichts von der Katastrophe mit. Eine mögliche Ursache war die erhebliche Unterschätzung der immensen Besucherzahlen (vgl.[8]).



Abbildung 5: Flucht über die Treppenhäuser - World Trade Center, New York City [10].

Die Sicherheit von Personen in Hochhäusern und Bürogebäuden spielt bei der Notfallplanung eine ebenso große Rolle wie die Konzeption von Großveranstaltungen. Fluchttreppen sind meist die einzige Möglichkeit, Hochhäuser zu evakuieren. Demzufolge müssen tausende Menschen die engen Treppenhäuser herab gehen, um ins Freie zu gelangen.

Als am 11. September 2001 zwei Passagierflugzeuge in die Türme des World Trade Center einschlugen, war es nur für wenige Menschen möglich, sich durch die Treppenhäuser in Sicherheit zu bringen. Hinzu kam, dass einige zentrale Treppenhäuser durch den Angriff zerstört wurden. Wie am effizientesten ein Gebäude in solchen Größenordnungen geräumt werden kann, stellt für Gebäudeplaner noch immer eine Problematik dar (vgl. [11], [12]).

Während eines Notfalls können die Menschen in Panik geraten und übersehen dabei für sie unbekannte Fluchtwege. Zusätzlich spielt die hohe Anzahl von Flüchtenden eine beachtliche Rolle. Die Menschenströme aus verschiedenen Stockwerken blockieren sich oft gegenseitig.

Selbst bei einem früheren Bombenanschlag am 26. Februar 1993 in der Tiefgarage des World Trade Centers benötigten 52 Prozent der flüchtenden Personen zwischen einer und drei Stunden, bis sie das Gebäude verlassen hatten. Dies ging aus Daten von Professor Ed Galea hervor, Brandschutzexperte der britischen Greenwich University. In Anbetracht dessen, das bei einem Notfall jede Sekunde ausschlaggebend sein kann, ist dieser Zeitraum definitiv zu lang (vgl. [11], [12]).

Dieser historische Überblick verdeutlicht, dass es trotz jedem Fortschritts noch viele Unsicherheiten gibt und es schwierig ist, alle Einflüsse auf eine Gebäuderäumung abzuschätzen. Die Entstehung und Auswirkungen von Zwischenfällen müssen konkret untersucht werden, um die wesentlichen Zusammenhänge zu verstehen. Nur dies macht es Veranstalterern möglich, Risiken zu minimieren. Schon im Vorfeld kann es durch kleine Fehler bei der Planung und Organisation schnell zu unkontrollierbaren Ereignissen mit schwerwiegenden Folgen bis hin zur Katastrophe kommen.

Für solche Untersuchungen ist es wichtig zu wissen, wie viele Personen sich maximal auf einer Veranstaltung befinden dürfen, damit eine Räumung ohne den Ausbruch einer Panik noch möglich ist. Es können stets unvorhersehbare Vorfälle eintreten, die dazu führen, dass ein Gebäude geräumt werden muss. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Abläufe zu verstehen, die Ursachen zu minimieren und unter Einbeziehung aller möglichen Ereignisse eine optimale Durchführung bestmöglich voranzuplanen.

2.2. Definition und Abgrenzung

Zunächst ist es sinnvoll sich einen Überblick über die verwendeten Begriffe zu verschaffen. Häufig wird standardmäßig von einer Evakuierung gesprochen. Dies ist nicht für jede Situation der richtige Ausdruck und die Verwendung sollte deshalb immer durchdacht sein.

Eine allgemeine Definition der Evakuierung lässt sich in Nachschlagewerken folgendermaßen finden:

„evakuieren - Räumung eines Gebietes bei drohendem Risiko, um die Bevölkerung in Sicherheit zu bringen“ [13].

Autorin Andrea Wieland unterscheidet in ihrem „Leitfaden für eine Evakuierung und Gebäuderäumung“ sogar zwischen einer Evakuierung und einer Notfallevakuierung.

„Eine Evakuierung soll die zügige aber geordnete Rettung von Menschen, Sachwerten sowie wichtigen Dokumenten und Daten ermöglichen. [...] Unter dem Begriff Evakuierung versteht man ganz allgemein das (Teil-) Räumen von Gebäuden. Der Zeitfaktor spielt dabei keine zentrale Rolle.“ [14]

„Wenn Sie bei akuter Gefahr das Gebäude räumen, dann spricht man von einer Notfallevakuierung. Der Begriff macht deutlich, dass hier keine Zeit zu verlieren ist.“ [14]

Auf jeden Fall zu unterscheiden und abzugrenzen ist eine Evakuierung von einer Massenpanik. Die Gründe für die Panik einer einzelnen Person sind vielfältig. Oft spielen Angst, Bedrängnis und der entstehende Fluchtreflex eine Rolle, die durch das subjektive Empfinden einer Gefahr ausgelöst werden. Riskanter wird eine Situation erst dann, wenn eine große Menge von Menschen in Panik gerät.

„[...] aufgrund einer Panikansteckung drängt eine ganze Menschenmasse plötzlich und kollektiv zu den Ausgängen. Dies wird als Massenpanik bezeichnet. Massenpaniken sind besonders gefährlich, wenn beispielsweise bei Feuer in einem geschlossenen Raum viele Menschen gleichzeitig ihre Selbstkontrolle verlieren. Im übermächtigen Fluchtreflex werden dann oft Schwächere blindlings umgerannt und niedergetrampelt. Türen werden durch Menschenknäuel verstopft, weil der Drang hinaus ein effektiveres Nacheinander verhindert.“ [8]

Da eine Massenpanik laut Definition unkontrollierbar ausbricht und nicht beherrschbar ist, kann sie anhand von Simulationsprogrammen nicht dargestellt werden. Aus welchen Gründen derartige Paniken entstehen, wird anderweitig untersucht. Die folgende Arbeit beschränkt sich deshalb nur auf die Analyse einer geordneten Evakuierung. Hierfür kann die Wahl der Wege der Fußgänger anhand realer Situationen untersucht und daraus Verhaltensmuster abgeleitet werden. Das menschliche Verhalten kann so in dem Simulationsprogramm modelliert werden. Damit wird eine Untersuchung von Evakuierungsszenarien möglich.

2.3. Anforderungen an Bauwerke

Die Konstruktionsweise und die Ausführung der Bauwerke selbst haben einen großen Einfluss auf die Sicherheit von Gebäuden und deren Nutzer. Ebenso muss auf Veranstaltungen und an Versammlungsstätten ein größtmöglicher Schutz für die Besucher geschaffen werden.

Bereits in der Verfassung der Bundesrepublik Deutschland ist niedergeschrieben, dass jeder Bürger einen Anspruch auf Sicherheit hat.

„Art. 2 (2) Jeder hat das Recht auf Leben und körperliche Unversehrtheit.“ [15]

Dieser Leitsatz findet Berücksichtigung bei dem Entwurf von Gebäuden, unter anderem im vorbeugenden Brandschutz. Weitere Gesetze, Verordnungen und Richtlinien beinhalten genaue Angaben über die Verhinderung von Bränden, die Ausbildung von Flucht - und Rettungswegen, die Beschaffenheit und Ausführung von Bauteilen sowie die Planung und Ausführung von Versammlungsstätten. Hier sollen die geltenden Bestimmungen nur kurz genannt und Ausschnitte der für diese Arbeit benötigten Gesetze als Überblick zusammengefasst werden.

2.3.1. Allgemeine Anforderungen

In der Europäischen Union und in Deutschland existieren eindeutige Normen, mit denen Brände mittels planerischen, technischen und konstruktiven Maßnahmen verhindert werden sollen. Die bisher in Deutschland geltende Brandschutz - Norm DIN 4102 und die Rauchschutz - Norm DIN 18095, werden derzeit vollständig durch die europäischen Normen DIN EN 1350 - 1, 13501 - 2 und DIN EN 1634 - 1 abgelöst. Außerdem existieren spezielle Normen wie beispielsweise DIN EN 1992 - 1 - 2 für Stahlbetonbau, DIN EN 1993 - 1 - 2 für Stahlbau, DIN EN 1995 - 1 - 2 für Holzbau und DIN 18230 Brandschutz im Industriebau, die hier nur zur Vollständigkeit genannt werden (vgl. [16], [17]).

Bei großflächigen Anlagen sind verpflichtend Flucht - und Rettungswegepläne nach DIN 4844-3 zu erstellen und im Gebäude anzubringen. Außerdem müssen Feuerwehrpläne nach DIN 14095 angefertigt werden, die den Einsatzkräften zur schnelleren Orientierung im Gebäude dienen (vgl. [18]).

Bauliche Maßnahmen, die im konkreten Fall ergriffen werden müssen, werden in Deutschland durch die jeweilige Landesbauordnung geregelt, in diesem Fall durch die Bayerische Bauordnung.

Bayerische Bauordnung BayBO

Die Bayerische Bauordnung gibt viele Grundsätze für die Ausführung von baulichen Anlagen vor. Zunächst wird auf das Prinzip und die Notwendigkeit des Brandschutzes von Bauwerken hingewiesen.

„Art. 12 Bauliche Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind.“ [19]

Artikel 24 bis Artikel 30 beinhalten Angaben über die sachgemäße Verwendung und das Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen.

„Art. 24 Allgemeine Anforderungen an das Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen

(1) ¹Baustoffe werden nach den Anforderungen an ihr Brandverhalten unterschieden in

- 1. nichtbrennbare,*
- 2. schwerentflammbare,*
- 3. normalentflammbare.*

²Baustoffe, die nicht mindestens normalentflammbar sind (leichtentflammbare Baustoffe), dürfen nicht verwendet werden; das gilt nicht, wenn sie in Verbindung mit anderen Baustoffen nicht leichtentflammbar sind.

(2) ¹Baustoffe werden nach den Anforderungen an ihre Feuerwiderstandsfähigkeit unterschieden in

- 1. feuerbeständige,*
- 2. hochfeuerhemmende,*
- 3. feuerhemmende;*

die Feuerwiderstandsfähigkeit bezieht sich bei tragenden und aussteifenden Bauteilen auf deren Standsicherheit im Brandfall, bei raumabschließenden Bauteilen auf deren Widerstand gegen die Brandausbreitung.“ [19]

Desweiteren umfasst die Bayerische Bauordnung Richtlinien zur Ausführung von Rettungswegen. Dabei spielt vor allem das Vorhandensein von erstem und zweitem Rettungsweg eine große Rolle.

„Art. 31 Erster und zweiter Rettungsweg. (1) Für Nutzungseinheiten mit mindestens einem Aufenthaltsraum [...] müssen in jedem Geschoss mindestens zwei voneinander unabhängige Rettungswege ins Freie vorhanden sein; beide Rettungswege dürfen jedoch innerhalb des Geschosses über denselben notwendigen Flur führen.“ [19]

Landesstraf- und Verordnungsgesetz LStVG

Darüber hinaus hat das Bayerische Staatsministerium des Inneren aufgrund des Landesstraf- und Verordnungsgesetzes (LStVG, Art. 38 Abs. 1 Nr. 4 und Abs. 3) die Verordnung über die Verhütung von Bränden erlassen. Das Landesstraf- und Verordnungsgesetz verifiziert damit die Gesetzgebungsgewalt des Landes.

„Art. 38 Verhütung von Bränden

(1) Zur Verhütung von Gefahren für Leben, Gesundheit, Eigentum oder Besitz durch Brand kann, soweit nicht bundesrechtliche oder besondere landesrechtliche Vorschriften bestehen, das Staatsministerium des Innern Verordnungen erlassen über [...]

4. die Errichtung, die Einrichtung und den Betrieb elektrischer Anlagen.

(3) Zur Verhütung von Gefahren für Leben, Gesundheit, Eigentum oder Besitz durch Brand können ferner, soweit nicht bundesrechtliche oder besondere landesrechtliche Vorschriften bestehen, die Gemeinden und das Staatsministerium des Innern Verordnungen erlassen über

- 1. die Verwendung von Feuer und offenem Licht in Gebäuden oder in der Nähe von Gebäuden oder brandgefährlichen Stoffen,*
- 2. Herstellung, Abgabe, Lagerung und Verwendung von Brennstoffen und brandgefährlichen Stoffen,*
- 3. Auflagen und Schutzmaßnahmen für die Errichtung, die Einrichtung und den Betrieb brandgefährlicher Anlagen, die nicht unter Absatz 1 fallen,*
- 4. Blitzableiter, Feuerlöscheinrichtungen und andere Schutzmaßnahmen zur Verhütung oder Beseitigung feuergefährlicher Zustände sowie zur Bekämpfung von Bränden.“ [20]*

Verordnung über die Verhütung von Bränden VVB

Die Verordnung über die Verhütung von Bränden beinhaltet Vorgaben über das Freihalten und die Erkennbarkeit von Fluchtwegen:

„§20 (1) Räume, die dem Aufenthalt einer größeren Anzahl von Menschen dienen und Rettungswege aus solchen Räumen dürfen nicht mit leicht entzündbaren Stoffen ausgeschmückt werden. [...] Zu- und Ausgänge und Hinweise auf Ausgänge dürfen durch Ausschmückungsgegenstände nicht verstellt oder verhängt werden.“ [21]

„§22 (1) Zu- und Ausgänge, Durchfahrten, Durchgänge, Treppenräume und Verkehrswege, die bei einem Brand als Rettungswege und als Angriffswege für die Feuerwehr dienen können, sind freizuhalten.“ [21]

„§22 (2) Türen im Zuge von Rettungswegen aus Räumen, die dem Aufenthalt einer größeren Anzahl von Menschen dienen, dürfen, solange die Räume benutzt werden, in Fluchtrichtung nicht versperrt werden.“ [21]

2.3.2. Spezielle Anforderungen an Veranstaltungen

Versammlungsstättenverordnung VStättV

Zusätzliche Anforderungen ergeben sich für ein Gebäude, wenn dieses ebenfalls als Versammlungsstätte genutzt werden soll:

„§2 (1) Versammlungsstätten sind bauliche Anlagen oder Teile baulicher Anlagen, die für die gleichzeitige Anwesenheit vieler Menschen bei Veranstaltungen, insbesondere erzieherischer, wirtschaftlicher, geselliger, kultureller, künstlerischer, politischer, sportlicher oder unterhaltender Art, bestimmt sind sowie Schank- und Speisewirtschaften.“ [22]

Spezielle Ansprüche ergeben sich an die Führung von Rettungswegen:

„§6 (1) Rettungswege müssen ins Freie unmittelbar oder über Verkehrsflächen auf dem Grundstück zu öffentlichen Verkehrsflächen führen. Zu den Rettungswegen von Versammlungsstätten gehören insbesondere die frei zu haltenden Gänge und Stufengänge, die Ausgänge aus Versammlungsräumen, die notwendigen Flure und notwendigen Treppen, die Ausgänge ins Freie, die als Rettungsweg dienenden Balkone, Dachterrassen und Außentreppe sowie die Rettungswege im Freien auf dem Grundstück.“ [22]

„§6 (2) Versammlungsstätten müssen in jedem Geschoss mit Aufenthaltsräumen mindestens zwei voneinander unabhängige bauliche Rettungswege haben; [...]. Die Führung beider Rettungswege innerhalb eines Geschosses durch einen gemeinsamen notwendigen Flur ist zulässig.“ [22]

„§6 (6) Ausgänge und Rettungswege müssen durch Sicherheitszeichen dauerhaft und gut sichtbar gekennzeichnet sein.“ [22]

Außerdem existieren Angaben zur Bemessung von Rettungswegen:

„§7 (1) Die Entfernung von jedem Besucherplatz bis zum nächsten Ausgang aus dem Versammlungsraum [...] darf nicht länger als 30m sein.“ [22]

„§7 (4) Die Breite der Rettungswege ist nach der größtmöglichen Personenzahl zu bemessen. Die lichte Breite eines jeden Teils von Rettungswegen muss mindestens 1,20m betragen. Die lichte Breite eines jeden Teils von Rettungswegen muss für die darauf angewiesenen Personen mindestens betragen bei [...] anderen Versammlungsstätten 1,20m je 200 Personen.“ [22]

Die hier aufgeführten Gesetzestexte müssen bei der Planung und dem Bau von Gebäuden in Bayern beachtet und einbezogen werden. Ebenso ist die Einhaltung aller Mindestanforderungen an die Konstruktion, die verwendeten Baustoffe und die Flucht - und Rettungswege vorgeschrieben.

2.4. Psychologische Aspekte

2.4.1. Der Mensch als Individuum

Um Fußgänger mit Hilfe von Simulationen untersuchen zu können, muss sich mit den Eigenschaften der Menschen in der Realität beschäftigt werden. Es wird eine detaillierte Kenntnis der Verhaltensweisen benötigt sowie der Unterschied zwischen einem normalen Fußgänger und einem Fußgänger in Extremsituationen. Dabei hat die Psychologie des Menschen einen großen Einfluss auf sein Handeln.

Jeder Mensch empfindet Angst und Gefahren subjektiv. Am besten lässt sich dies an Extremsportarten verdeutlichen. Was für eine Person Spaß ist, ist für eine andere Person die gefährlichste Unternehmung. In einer Notsituation sollten die Informationen über bestehende Gefahren durch Alarme eindeutig und präzise angezeigt werden, damit jeder Mensch direkt und schnell versteht, was gerade passiert (vgl. [23]).

Hinzu kommt, dass unbekannte Gefahren oft gar nicht wahrgenommen werden. Ein Kind, welches an einen heißen Ofen fassen will, kann noch nicht einschätzen, was es bedeutet, wenn etwas heiß ist. Entgegen aller Warnungen der Eltern, fasst das Kind den Ofen an. Erst durch den ausgelösten Schmerz wird sich das Kind merken, dass der Ofen eine Gefahr darstellt. Viele von uns haben in ihrem Leben noch keine Notsituation durchlebt und können daher das Ausmaß einiger Gefahren nicht abschätzen. Umso wichtiger ist es, die Aufmerksamkeit der Menschen anzuregen und gewisse Risiken wieder ins Bewusstsein zu holen.

Ein besorgniserregendes Problem ist die Selbstüberschätzung von Menschen. Alarme werden aus verschiedensten Gründen nicht mehr ernst genommen. Manche Situationen werden als beherrschbar eingeschätzt, obwohl dies oft nicht der Fall ist. Durch Fehlalarme aber auch Probealarme, die als Übung zweifelsohne notwendig sind, gewöhnen wir uns daran, dass ein Alarm nicht zwangsweise mit einer akuten Gefahr gleichzusetzen ist. So sorgt die Gewöhnung unseres Gehirns dafür, dass Menschen bei einem Alarm dazu tendieren mit Verzögerung zu reagieren. Häufig werden auch das Lesen von Flucht- und Rettungsplänen und das Wissen über den nächstgelegenen Notausgang vernachlässigt. Spezielle Trainings sind sinnvoll, um uns die Gefahren wieder wirklich bewusst zu machen (vgl. [24]).

Das Verhalten des Fußgängers selbst ist sehr komplex. Wenn wir ein Ziel vor Augen haben, versuchen wir möglichst keine Umwege zu gehen. Müssen wir jedoch Hindernissen ausweichen, dann entscheiden wir während des Laufens immer wieder neu über den kürzesten Weg. Existiert kein bestimmtes Ziel, laufen wir kreuz und quer, halten uns nicht an Wegweiser oder bleiben spontan stehen (vgl. [25]).

In Stresssituationen ändert sich unser Verhalten erneut. Wir folgen unseren Instinkten und verlassen uns auf Vertrautes. Menschen wissen zwar zumeist, dass alternative Notausgänge vorhanden sind, werden diese aber nur selten benutzen, auch wenn sie der schnellere Weg in die Freiheit wären. Meist verlassen wir das Gebäude über den Weg, über den wir es betreten haben und akzeptieren dabei sogar zusätzliche Gefahrenquellen. Viele Menschen gehen lieber den weiter entfernten, sichtbaren und bekannten Weg, als den unbekanntem, dunklen und unsichtbaren. Dabei spielt die richtige Beleuchtung von Flucht- und Rettungswegen eine große Rolle (vgl. [26]).

Die Höchste Stufe der Stresssituation ist die Panik. Sie löst Angst, Hyperventilation und Hilflosigkeit aus und sorgt für Orientierungslosigkeit und folgenschwere Fehleinschätzungen.

„Bei einer Panik werden die Notfallprogramme im Gehirn aktiviert: Wenn wir unvorbereitet in eine Notsituation kommen und die Bedrohung so groß ist oder so groß empfunden wird, dass geordnetes Nachdenken nicht mehr funktioniert, dann verlassen wir uns auf unsere ureigensten Instinkte. Wir werden blitzschnell die Entscheidung treffen: Kampf oder Flucht [...]“ [14]

Demzufolge müssen Beschilderungen und Signale kurz, eindeutig und verständlich sein, damit die Menschen sie in jeder Situation registrieren und verstehen können. Die Kenntnis über alternative Fluchtwege sollte im optimalsten Fall bis in das Unterbewusstsein vordringen, falls vertraute Fluchtwege versperrt oder behindert sind.

2.4.2. Personen als Teil der Gruppe

Meist kommen die Eigenschaften und Charaktere vieler verschiedener Personen zusammen. Es bildet sich ein Gruppenverhalten aus, zwischen Führungspersonen oder Vorbildern und Mitläufern. Ein Gruppenverhalten stellt sich zufällig ein und ändert sich ständig.

Die Autorin Andrea Wieland teilt Menschen während einer Notsituation in drei Gruppen ein:

(1) 10-15%: Diese Personen reagieren rational auf Ereignisse und zeigen keine Anzeichen von aufkommender Hektik. In der Regel behalten sie die Übersicht. Solche Personen stellen sich bei einer Evakuierung als Führungspersönlichkeiten heraus. Personen, die Vorbilder in Stresssituationen sind, müssen nicht mit den Führungspersonen im normalen Alltag übereinstimmen.

(2) ca. 70%: Die Situation betäubt diese Art von Personen. Sie reagieren ruhig, aber handeln aktiv nach der ersten Phase des Schreckens und geben Hilfeleistung. Meist sind sie unkritisch und positiv durch Anweisungen beeinflussbar.

(3) 10-15%: Die dritte Personengruppe ist absolut unberechenbar. Es treten Reaktionen wie Erstarrung, Kopflösigkeit und Flucht auf. Dies ist die kritischste der drei Gruppen (vgl. [14]).

Das entscheidende Problem an dieser Tatsache ist, dass im Vorfeld nicht eingeschätzt werden kann, wer zu welcher Kategorie zählt. Die Verhaltensweisen bilden sich erst in der Situation selbst aus.

Durch ausreichende Vorkehrungen kann eine Evakuierung positiv beeinflusst werden. Geeignete Trainings, Übungen und Schulungen sollen dafür sorgen, Gruppe (3) zu minimieren. Bestimmte Personen aus der Belegschaft, den Studenten, den Organisatoren oder den Veranstaltern sollten zu einem Notfallteam oder für Vorbildaufgaben ausgebildet werden.

Ein Notfallmanagement beinhaltet außerdem, mit Hilfe von Handlungen und Maßnahmen, menschliche Instinkte in bestimmte Richtungen zu lenken. Das grundlegende Wissen über das Verhalten in Notsituationen muss spannend und anregend vermittelt werden, damit die Personen die Fakten und Abläufe verinnerlichen.

Trotz all dieser Erkenntnisse bleibt das tatsächliche Verhalten des Menschen im Ernstfall jedoch ungewiss, nicht vorhersehbar und unberechenbar und stellt damit ein Risiko für die Evakuierung dar.

2.5. Gefahrenpotentiale

Es gibt eine große Anzahl von Ereignissen, die eine Evakuierung auslösen können. Diese sind abhängig von der Lage des Bauwerks. Beispielsweise können Gebäude in einem Erdbebengebiet von anderen Ursachen betroffen sein, als Gebäude die sich in der Nähe eines Atomreaktors befinden.

In den meisten Fällen können mehrere verschiedene Ereignisse eintreten. Brandursachen müssen bei der Evakuierungsplanung für jedes Gebäude betrachtet werden. Es ist wichtig, stets alle wahrscheinlichen Ursachen für eine Evakuierung in Betracht zu ziehen. Ganz allgemein können folgende Kategorien zusammengefasst werden:

Brandursachen

Blitzschlag, Selbstentzündung, Brandstiftung, Explosion, Erhitzungsanlagen, maschinelle Einrichtungen, Elektrizität, brandgefährliche Stoffe, sonstige Feuer -, Licht - und Wärmequellen (vgl. [14])

Technische Ursachen

Gasaustritt, Strahlung, Freiwerden von Chemikalien und Gefahrstoffen, Energieausfall

Naturbedingte Ursachen

Erdbeben, Tsunami, Sturm, Unwetter, Hochwasser, Lawinen

Statik des Gebäudes

Einsturzgefahr, Schneelast, Beschädigung der Konstruktion des Gebäudes durch zum Beispiel Wasser, Unfälle

Kampfmittelfund

Luftbilddauswertung, Kampfmittel- und Altlastenerkundung

Die Luftbilddatenbank in Estenfeld verwaltet und recherchiert vor allem historische Luftbilder aus dem Zweiten Weltkrieg.

Gewalttätiges Handeln

Drohungen, Anschläge, Amoklauf, Terrorismus

Die Wahrscheinlichkeiten der genannten Ursachen können durch Risikoabschätzungen ermittelt werden, was hier allerdings nicht dargestellt ist. Fakt ist, dass es zu jedem Zeitpunkt aus den verschiedensten Gründen zu einer Evakuierung kommen kann und deshalb immer eine ausreichende Vorbereitung getroffen werden muss.

2.6. Ablauf einer Evakuierung

Obwohl es keinen einheitlichen Standard für die Evakuierung von Gebäuden gibt, sondern im Gegenteil eine Evakuierung immer die Betrachtung des individuellen Falls erfordert, sollen an dieser Stelle die wesentlichen Bestandteile zusammengefasst werden.

2.6.1. Vorbereitung

Eine detaillierte Vorbereitung ist der wichtigste Teil einer Evakuierungsplanung und muss bereits während der Entwurfsphase des Bauwerks beginnen. Sie sollte so präzise wie möglich erstellt und dauerhaft auf dem aktuellsten Wissensstand gehalten werden.

Die Evakuierungsplanung beinhaltet alle in Frage kommenden Szenarien und die genauen Gebäudegegebenheiten. Ferner sind die Anzahl der Personen, die sich in einem Bauwerk aufhalten und sämtliche Besonderheiten des Gebäudes und dessen Nutzung anzugeben (vgl. [14]). Zur Vorbereitung zählen sowohl die Anfertigung von Flucht - und Rettungsplänen als auch die genaue Kennzeichnung aller Wege durch ein Sicherheitsleitsystem.

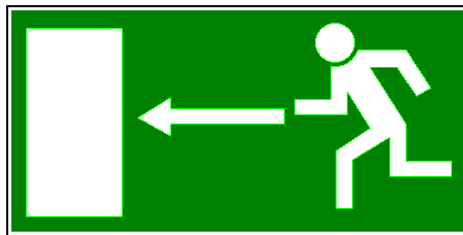


Abbildung 6: Notausgang [27].

Sämtliche notwendige Technik (Feuerlöscher, Brandmeldeanlagen, Wandhydranten, RWA - Anlagen, Erste Hilfe Pakete) sowie die Evakuierungssysteme müssen im Gebäude installiert werden.



Abbildung 7: Feuerlöscher [28].

Die entsprechenden Verantwortlichkeiten müssen verteilt oder festgelegt werden. Ein Notfallteam sollte gebildet werden.

2.6.2. Beteiligte Personen und Gewerke

Die Verantwortung für eine möglichst reibungslose Evakuierung verteilt sich auf verschiedene Personen und Gewerke. Grundsätzlich ist jede Person, die sich in einem Gebäude befindet, während der Evakuierung für sein Handeln verantwortlich.

Architekten, Ingenieure und Fachplaner sind bei der Erstellung des Bauwerks und während des Zeitraums der Gewährleistung für die Sicherheit der Konstruktion zuständig. Zu ihren Aufgaben zählen unter anderem die Einhaltung der Brandschutzmaßnahmen und die sachgemäße Ausführung der Flucht - und Rettungswege sowie der Notausgänge.

Den ausführenden Gewerken am Bau wird die Anforderung gestellt, ihre Produkte anhand des Bauplans und frei von Fehlern und Mängeln anzufertigen. Ein anschließendes Gewährleistungsmanagement kann entstandene Fehler aufdecken und minimieren.

Während der gesamten Evakuierungsplanung müssen die Feuerwehr und die Sicherheitsbeauftragten frühzeitig als Spezialisten mit einbezogen werden. Ob eine Brandschutzabnahme notwendig ist, liegt im Ermessen der zuständigen Aufsichtsbehörde und ist nutzungsabhängig. Ferner muss für alle Anlagen, in denen Veranstaltungen mit mehr als 200 Personen stattfinden sollen und die nicht nach der Versammlungsstättenverordnung für eine solche ausgelegt sind, ein Auflagenbescheid der Aufsichtsbehörde erlassen werden. Wird in diesem Auflagenbescheid ein Sanitätsdienst gefordert, so werden die erforderlichen Vorkehrungen (Verbandplätze, An - und Abfahrtswege, Aufstellungsflächen) ebenfalls durch die zuständige Feuerwehr festgelegt. Außerdem kann ein zusätzlicher Brandschutzbeauftragter mit fachspezifischem Wissen angefordert werden.

Ebenso müssen die Betreiber und Nutzer eines Gebäudes, beispielsweise Arbeitgeber, in ihren Räumlichkeiten für Sicherheit sorgen. Hierzu kann für den Betrieb eines Bauwerks ein Facility Management eingerichtet werden.

Zusätzlich wird empfohlen, ein Notfallteam und Notfallhelfer mit entsprechenden Kenntnissen auszubilden. Dies können zum Beispiel Ersthelfer, Brandschutzhelfer, Evakuierungshelfer oder Stockwerksbeauftragte sein. Tritt der Notfall ein, agieren sie als Schnittstelle zwischen den zu evakuierenden Personen und der Feuerwehr. Die speziell ausgebildeten Personen wissen dann, was im Ernstfall zu tun ist und sollen während der Durchführung einer Evakuierung koordinieren und den Überblick behalten. Beispielsweise kann die Feuerwehr somit frühzeitig Informationen über noch vermisste Personen erhalten. Umgekehrt dienen die Notfallhelfer als Ansprechpartner für den weiteren Verlauf (vgl. [14]).

2.6.3. Einleitende Maßnahmen

Nach Feststellung des Ereignisses ist unverzüglich der Alarm im Gebäude auszulösen und die Einsatzkräfte sind zu alarmieren. Im Anschluss ist erste Hilfe zu leisten, eine Schadensbegrenzung durchzuführen und gegebenenfalls sind ausgelaufene Schadstoffe zurückzuhalten. Falls erforderlich, sind Nachbarn oder die Öffentlichkeit von dem Ereignis zu informieren (vgl. [14]). Damit sich jeder im Ernstfall richtig verhält, können Hinweisschilder, wie beispielsweise in Abbildung 8 dargestellt, an gut sichtbaren Stellen im Gebäude angebracht werden.



Abbildung 8: Verhalten im Brandfall [29].

2.6.4. Ablauf

Bei der Evakuierung selbst müssen alle Personen das Gebäude auf dem schnellsten Weg verlassen. Dazu sollten sie die vorhandenen Flucht- und Rettungswege nutzen.

Die gesamte Evakuierungszeit t_{ev} setzt sich aus folgenden Anteilen zusammen. Zu beachten ist, dass die Formel nicht nur für Brände, sondern für alle wahrscheinlichen Ursachen Gültigkeit besitzt.

$$t_{ev} = t_d + t_a + t_p + t_i + t_m \quad [s]$$

Dabei sind

t_{ev}	gesamte Evakuierungszeit
t_{it}	Zeitraum von der Brandentstehung bis lebensbedrohliche Bedingungen eintreten
t_d	Zeitraum von der Brandentstehung bis zur Branddetektion
t_a	Zeitraum von der Branddetektion bis zum Alarm
t_p	Zeitraum von der Reaktion auf die Gefahr bis zum Start der Bewegung
t_i	Zeitraum zur Untersuchung und Bekämpfung des Feuers
t_m	Zeitraum vom Start der Flucht bis zum Erreichen eines geschützten Bereichs

$$t_{ev} \cdot SF < t_{it} \quad [s]$$

Grundsätzlich gilt, dass die Zeitdauer t_{ev} für die Evakuierung eines bestimmten Bereichs, kleiner sein muss als die Zeit t_{it} , die erforderlich ist, bis lebensbedrohliche Bedingungen in diesem Bereich vorherrschen. Zusätzlich wird die Gleichung um einen individuellen Sicherheitsfaktor SF ergänzt (vgl. [30]).



Abbildung 9: Sammelstelle [31].

Nach dem Verlassen des Gebäudes haben sich alle Personen unverzüglich auf den dafür vorgesehenen Sammelstellen einzufinden, die mit den in Abbildung 9 dargestellten Schildern gekennzeichnet sind. Notausgänge dürfen während der Evakuierung nicht für die nachströmenden Flüchtenden blockiert werden.

3. Fallbeispiel: TU München

In der folgenden Arbeit soll eine Fußgängersimulation am Beispiel der Fakultät für Maschinenwesen der TU München erstellt werden. Dafür sind zunächst genaue Kenntnisse der Gebäudegegebenheiten erforderlich.

3.1. Beschaffenheit des Gebäudes

3.1.1. Daten und Fakten

Die Fakultät für Maschinenwesen wurde 1934 im Zentrum von München gegründet und befindet sich seit 1998 in dem Neubau auf dem Gelände des Forschungszentrums in Garching. Sie ist die größte Fakultät der TU München (vgl. [32]).

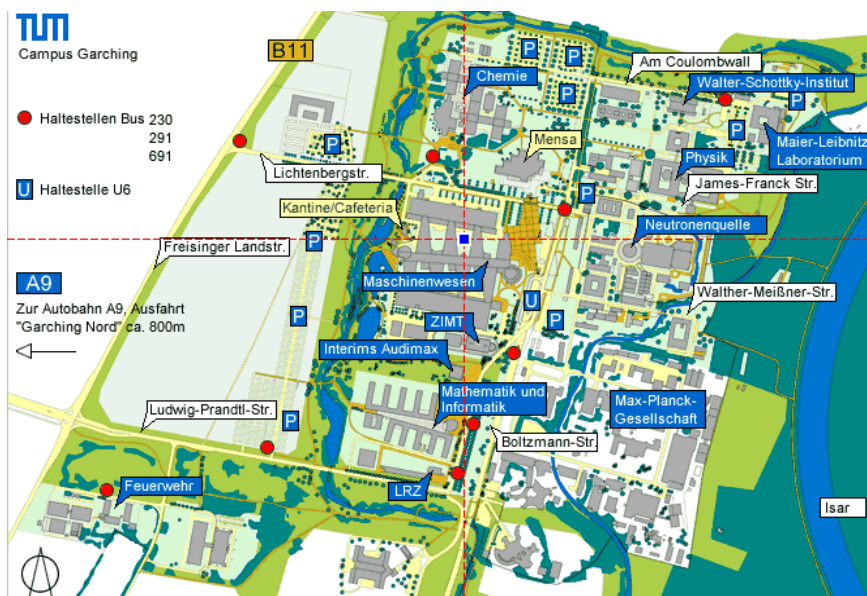


Abbildung 10: Forschungszentrum Garching [33].



Abbildung 11: Luftbild der Fakultät für Maschinenwesen [34].

Das Gebäude hat eine Hauptnutzungsfläche von insgesamt 52.508 m², davon sind circa 20.000 m² Büroflächen und über 30.000 m² Labore und Werkstätten (vgl. [32]).

Es befinden sich 40 Lehrstühle im Gebäude, in denen etwa 800 Mitarbeiter tätig sind. An der Fakultät für Maschinenwesen sind pro Semester ungefähr 4300 Studenten eingeschrieben (vgl. [32]). Das Bauwerk beinhaltet neben den Lehrstühlen und Hörsälen auch Labore, Werkstätten und Hallen, eine Cafeteria sowie eine Bibliothek.

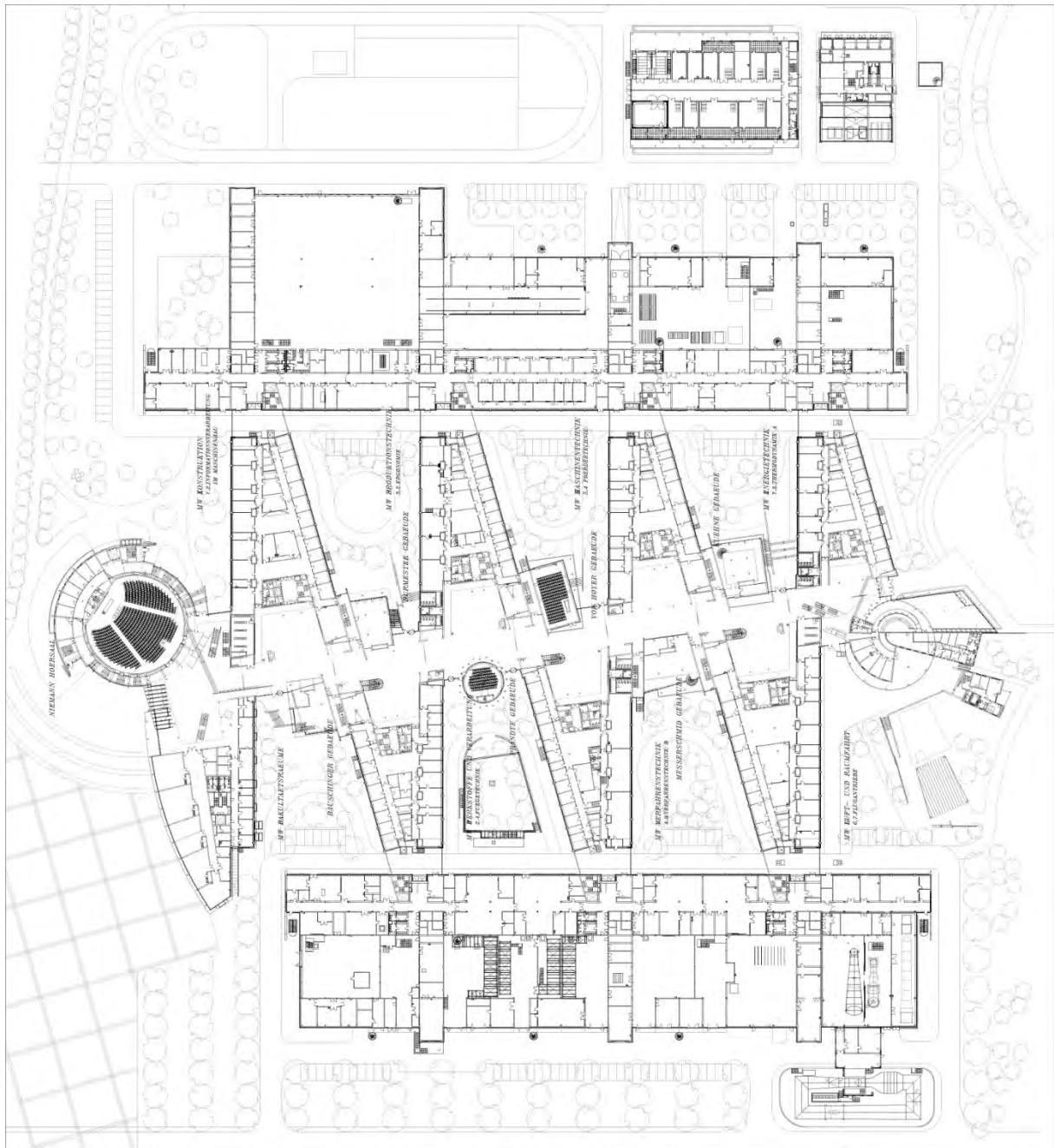


Abbildung 12: Grundriss Fakultät für Maschinenwesen [35].

CD: Grundriss.pdf

Die verschiedenen Institute und Hörsäle sind in den Gebäudeteilen 0 bis 8 (Abbildung 13) entlang einer großen zentralen Magistrale angeordnet. Der Haupteingang ist erreichbar von der Boltzmannstraße sowie der U-Bahn Haltestelle Garching - Forschungszentrum und befindet sich links im Grundriss (Abbildung 12). Der Westeingang liegt neben der Cafeteria und ist rechts im Grundriss dargestellt. Dieser Eingang wird erreicht, wenn das Gebäude vom Parkplatz aus betreten wird. Außerdem existieren zahlreiche weitere Seiteneingänge.



Abbildung 13: Lageplan Maschinenwesen [32].

Die Büros der verschiedenen Lehrstühle sind in den auskragenden Gebäudeteilen angeordnet und von den Höfen aus zu erreichen. Die Werkstätten und Hallen liegen, wie im Lageplan und Grundriss ersichtlich, oberhalb und unterhalb des Gebäudes hinter den Gebäudeteilen. In jedem Lehrstuhl befinden sich ein Treppenhaus sowie zwei Aufzüge. Außerdem besitzt jedes Institut zusätzliche Hinterausgänge in Richtung der Werkstätten und Hallen.

Im Gebäude existieren mehrere große Hörsäle, von denen hier nur die größten genannt werden:

Tabelle 1: Hörsäle [36].

Name des Hörsaals	Sitzplätze
MW 0001: Gustav - Niemann - Hörsaal	700
MW 2001: Rudolf - Diesel - Hörsaal	894
MW 0250: Ludwig - Prandtl - Hörsaal	88
MW 0350: Egbert - von - Hoyer - Hörsaal	180
MW 1801: Ernst - Schmidt - Hörsaal	401

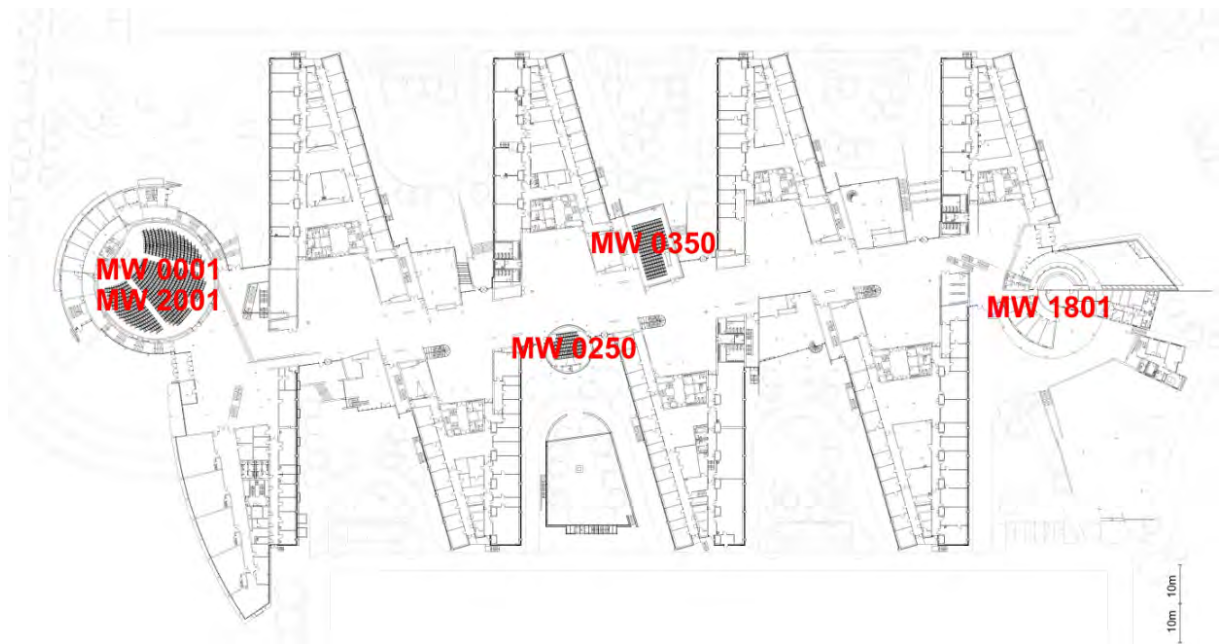


Abbildung 14: Lage der Hörsäle.

Die Hörsäle haben eine Kapazität von bis zu 894 Sitzplätzen. Die Hauptfluchtmöglichkeiten aus den Hörsälen sind direkt in die Magistrale. Neben den Ausgängen in die Magistrale verfügen die Hörsäle MW 0001 und MW 2001 über zusätzliche Notausgänge hinter dem Podium. Treppenhäuser führen hier direkt nach draußen.

In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass das Bauwerk nach den bestehenden Richtlinien, Vorschriften und Gesetzen erbaut wurde und die Fluchtwege sowie die Notausgänge ordnungsgemäß beschildert und gekennzeichnet sind.

Um die Daten und Pläne auf dem aktuellsten Stand zu halten, führt das Staatliche Bauamt München 2 derzeit eine Bestandsaufnahme der Flucht- und Rettungswege sowie des Sicherheitsleitsystems durch. Abbildung 15 zeigt einen kurzen Ausschnitt der bestehenden Flucht - und Rettungswege von Hof 1 und dem Hörsaal MW 0001 auf Grundlage der Bestandsaufnahme. Die grünen Pfeile kennzeichnen die Flucht - und Rettungswege:

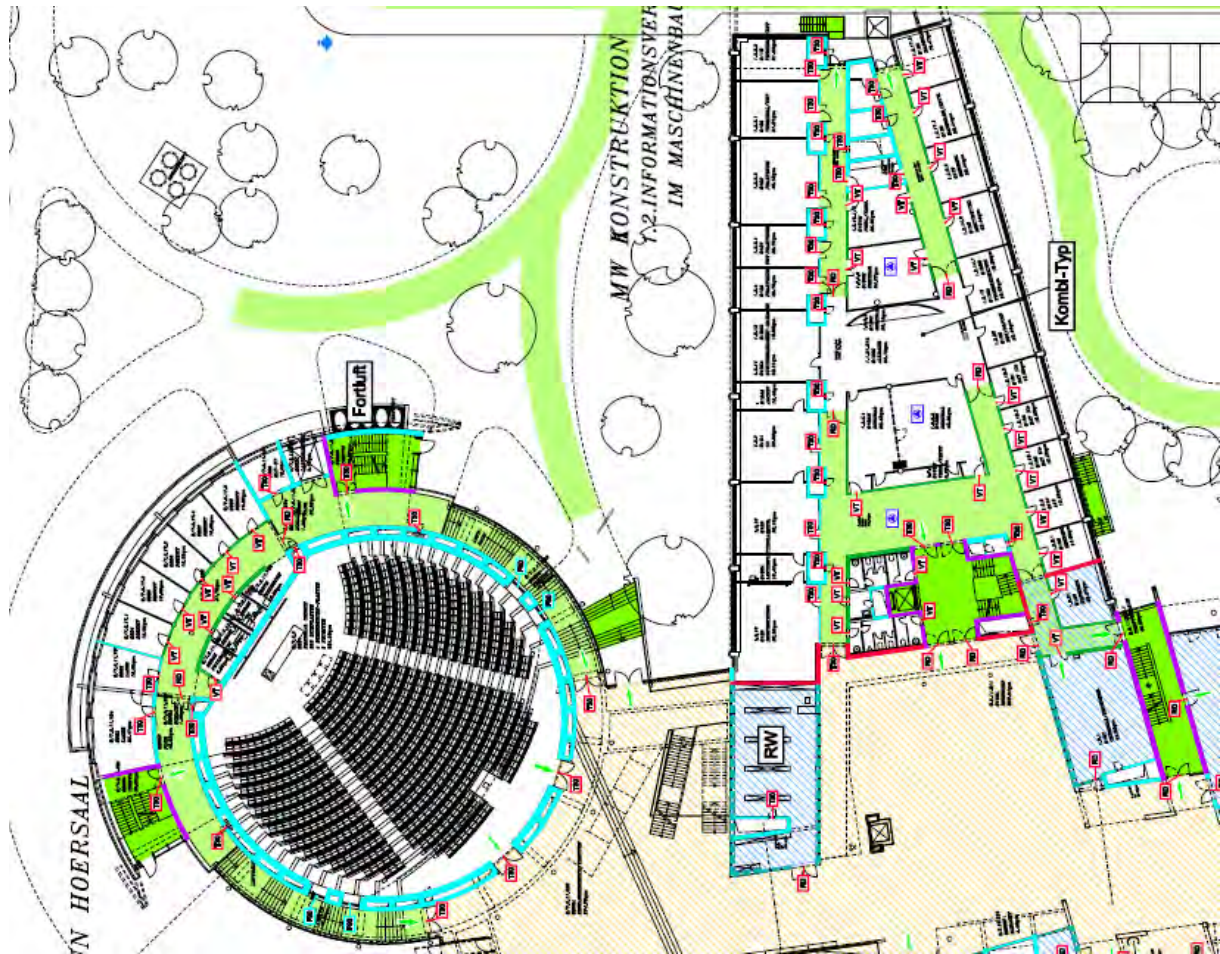


Abbildung 15: Ausschnitt Fluchtwege.
 CD: Bestandsaufnahme_Fluchtwege.pdf

Jeder seitliche Ausgang, der als Drehtür ausgeführt ist, stellt eine Besonderheit dar.

„§9 (6) Mechanische Vorrichtungen [...], wie Drehtüren oder -kreuze, sind in Rettungswegen unzulässig;“ [22].

Während der Flucht könnten Objekte und Gegenstände die Drehtüren verstopfen und versperren und so den Fluchtweg unbrauchbar machen. Deshalb ist es unzulässig, Drehtüren als Notausgänge anzusehen.

Durch die erteilte Baugenehmigung und die erforderlichen Abnahmen ist davon auszugehen, dass das Bauwerk grundsätzlich für den alltäglichen Studienbetrieb ausgelegt ist. Ob es hingegen möglich ist, eine Veranstaltung innerhalb der Magistrale während des Studienbetriebes durchzuführen und in welchem Umfang dies möglich ist, wird derzeit ebenfalls vom Staatlichen Bauamt München 2 geprüft. Die Feuerwehr der TU München, die für das gesamte Forschungsgelände in Garching verantwortlich ist, gibt dafür eine fachtechnische Stellungnahme zu dem Thema Brandschutz ab.

3.1.2. Risiken und Unsicherheiten

Für eine weitreichende Untersuchung stellt sich zunächst die Frage, welche Risiken und Unsicherheiten im Gebäude und demzufolge für dessen Evakuierungsplanung vermutet werden. Folgende Fragen sind im Laufe der Analyse aufgetreten:

- Wie viele Personen können sich in dem Gebäude befinden, damit eine geordnete Evakuierung noch möglich ist?
- Sind genügend Notausgänge vorhanden und sind diese entsprechend ausgelegt?
- Sind die Flucht - und Rettungswege hinsichtlich ihrer Breite und Länge ausreichend bemessen, um die große Anzahl an Personen aufzunehmen?
- Ist die notwendige Technik (Feuerlöscher, Brandmeldeanlagen, etc.) im Gebäude installiert?
- Sind genügend Zugänge vorhanden, über die die Feuerwehr in das Geschehen im Gebäude eingreifen kann?
- Können Veranstaltungen und Studienbetrieb gemeinsam problemlos durchgeführt werden?
- Welche Auswirkungen hat die veränderte Flächennutzung durch beispielsweise zusätzliche Objekte und Dekorationen in der Magistrale?
- Befindet sich unzulässige Brandlast im Gebäude beziehungsweise Gegenstände, die Brände beschleunigen oder die Rauchentwicklung fördern?
- An welchen Stellen werden die Laufwege verändert und Wegbreiten eingeschränkt?
- Ist es möglich, durch eine Nutzungstrennung das Gebäude außerhalb des Studienbetriebs risikofrei als Veranstaltungsort zu nutzen?

3.1.2. Gefahrenpotentiale

Eine allgemeine Übersicht der möglichen Ursachen einer Evakuierung wurde bereits im Kapitel „Grundlegende Aspekte der Rettung von Personen“ dargestellt.

Neben den Gefahren, die für alle Gebäude zutreffend sind, kann an dieser Stelle eine Auswahl der Ursachen aufgelistet werden, die in der Fakultät für Maschinenwesen denkbar sind.

Dem Gebäude sind Hallen, Werkstätten und Labore angeschlossen. Ein unsachgemäßer Umgang mit den Maschinen und Geräten durch fehlende Sicherheitsunterweisung oder mangelndes Bewusstsein der Gefahren kann zu Unfällen führen und Brände auslösen.

Ebenso findet im Gebäude und während den Lehrveranstaltungen die Benutzung und Lagerung von Chemikalien statt, die ein gewisses Gefahrenpotential darstellen.

Durch den sachgemäßen Umgang mit den Maschinen und Chemikalien und der Verhinderung von fahrlässigem Verhalten können die Ursachen so gering wie möglich gehalten werden.

Ein weiteres Risiko ist in den Nachbargebäuden zu sehen. Im Forschungsreaktor, der sich auf dem Gelände befindet, kann es zum Austritt von Strahlung kommen. Dies würde eine Evakuierung des gesamten Standorts Garching zur Folge haben. Unfälle in den benachbarten Fakultäten Chemie und Biochemie oder der Fakultät für Physik sowie in den auf dem Forschungsgelände ansässigen Instituten können ebenfalls Auslöser für eine Evakuierung sein.

Auch gewalttätige Handlungen wie Drohungen eines Anschlags oder Amoklauf dürfen nicht außer Acht gelassen werden.

Menschliches Handeln und menschliche Fehler stellen ebenfalls zu jeder Zeit einen Unsicherheitsfaktor dar.

Wie in jedem anderen Gebäude kann es jederzeit zu Problemen mit der Elektronik, Haustechnik oder Beleuchtung kommen.

3.2. Messeveranstaltung IKOM

Um zu überprüfen, ob in dem Fakultätsgebäude Veranstaltungen durchführbar sind, wird exemplarisch das Beispiel der Messeveranstaltung IKOM beleuchtet, die einmal jährlich in der Fakultät für Maschinenwesen stattfindet.

3.2.1. Daten und Fakten

Das Karriereforum IKOM wird von 80 ehrenamtlich tätigen Studenten organisiert. Das Ziel des Forums ist es, die Kontakte zwischen den Studierenden und den Unternehmen zu fördern. Die IKOM wurde 1989 gegründet und war zunächst als eintägige Veranstaltung angesetzt.

In den vergangenen Jahren ist die Messeveranstaltung immer weiter gewachsen. Seit 2007 findet zusätzlich einmal im Jahr die IKOM Bau am Stammgelände der TU München und die IKOM Life Science am Campus in Weihenstephan statt. Im Jahr 2012 fand die IKOM bereits zum 24. Mal statt und dauerte erstmalig vier Tage, vom 18. bis zum 21. Juni 2012. An diesen vier Tagen präsentierten sich 261 Firmen an den Messeständen in der Magistrale. Mittlerweile ist die IKOM das größte Karriereforum in Süddeutschland.

	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Anzahl teilnehmender Firmen	160	180	192	194	199	216
Besucher	ca. 8.000	ca. 10.000	ca. 10.000	ca. 10.000	ca. 10.000	ca. 12.000
IKOM Teamgröße	45	50	100	100	100	90

Abbildung 16: IKOM in Zahlen [37].

Die Anzahl der Besucher in Abbildung 16 basiert auf Schätzungen und Hochrechnungen der über die Veranstaltungstage verteilten Besucherströme, erstellt von den Organisatoren der IKOM.

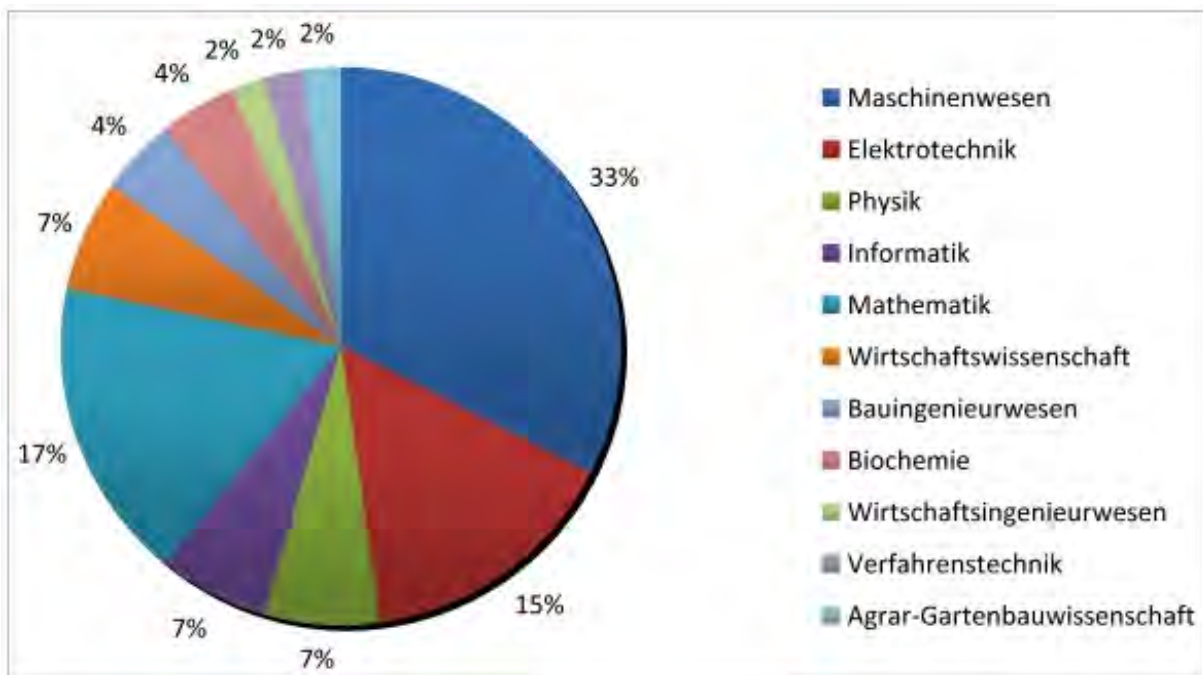


Abbildung 17: Verteilung der Studienrichtungen [37].

Aus der Verteilung in Abbildung 17 ist erkennbar, dass neben den Studierenden des Maschinenwesens auch eine Vielzahl von Studenten anderer Fachrichtungen die Messe besucht. Viele von ihnen kennen das Gebäude der Fakultät für Maschinenwesen nur wenig oder gar nicht und sind deshalb nur mit den Hauptaushängen vertraut, aber vermutlich nicht mit den Seitenausgängen.

3.2.2. Ablauf und Organisation

Die offizielle Eröffnung der IKOM findet jeweils täglich um 9:30 Uhr auf der Bühne statt. Die Messe endet um 15:00 Uhr. Die ausstellenden Firmen werden von Mitarbeitern der IKOM betreut und regelmäßig mit Getränken versorgt. Die Verpflegung übernimmt ein bereitgestelltes Catering. Die Ausstattung der zur Verfügung gestellten Messestände obliegt jeder Firma selbst.

Interessierte aktive und ehemalige Studenten können sich von Stand zu Stand über verschiedene Angebote der Firmen, Praktikumsplätze oder Berufseinstiegsmöglichkeiten informieren.

Das Team der IKOM organisiert außerdem eine Studenten - Lounge, in der sich die Studenten austauschen können und ein Fotostudio für Bewerbungsfotos. Beides befindet sich im ersten Stock neben dem Hörsaal MW 1801.

3.2.3. Standplan und Messestände

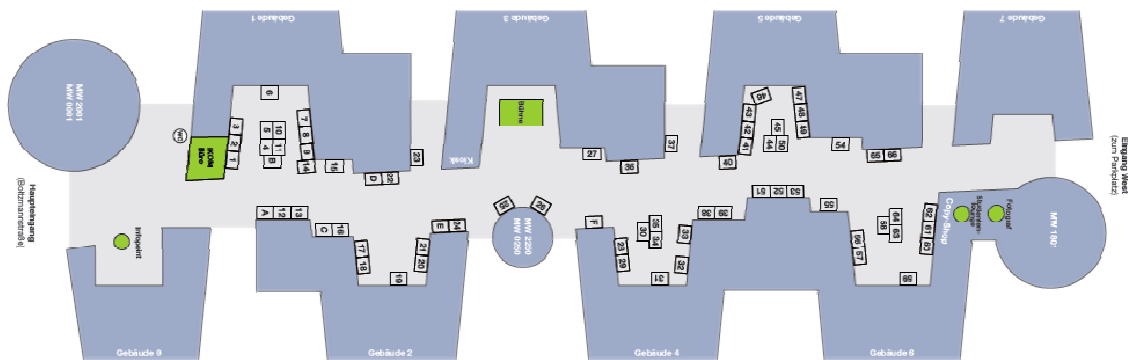


Abbildung 18: Standplan IKOM [37].

Abbildung 18 zeigt den Standplan der IKOM aus dem Veranstaltungsprogramm 2012. Nach dem Aufbau, wurden vor der offiziellen Eröffnung der IKOM die Messestände und deren Position genau vermessen.

Ein Messestand hat eine Grundfläche von 11.5 m^2 und ist $3 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ groß. Die Stände sind zum Teil untereinander durch zusätzliche Wände verbunden. Sie wurden von einem dafür beauftragten Messebauer aufgestellt. Einige wenige Stände sind nicht massiv, sondern bestehen lediglich aus einem oder mehreren $1 \text{ m} \times 1.60 \text{ m}$ großen Tischen.

Ein Stand besteht grundsätzlich aus einem Tisch mit Stühlen, einer Auslage für Broschüren oder Kataloge, einer Möglichkeit zum Aufhängen von Postern, der Standbeleuchtung sowie einem großen Schild mit Firmenname und Logo sowie der Standnummer (vgl. [37]).

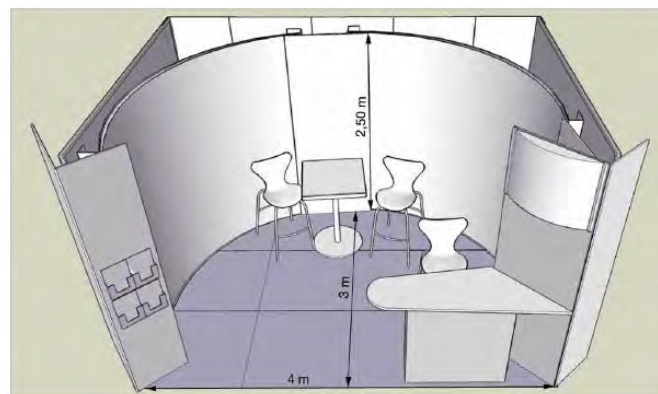


Abbildung 19: IKOM Messestand 2 [37].

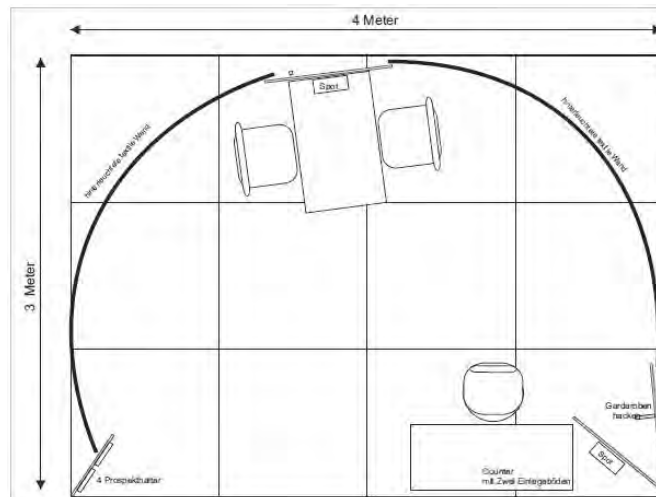


Abbildung 20: IKOM Messestand 3 [37].

Ferner befand sich eine Bühne in Hof 3, welche 3 m x 6 m groß ist, sowie die dazugehörigen Besucherstühle, zwei große Bildschirme und vier Stehtische. Im selben Hof befindet sich außerdem die Kaffee - Bar des Studentenwerks München. In Hof 0 hinter dem Haupteingang war der IKOM Infostand aufgebaut, der im Durchmesser 5 Meter groß ist.

Nach der Bestandsaufnahme wurden alle Details in den Grundriss des Gebäudes eingezeichnet.



Abbildung 21: Standplan Detail.
CD: Standplan_Bestand.pdf

Alle Stühle, Tische und Informationstafeln, die sich während dem normalen Studienbetrieb in der Magistrale befinden, wurden für die Messe aus der Magistrale geräumt.

3.2.4. Risiken und Unsicherheiten

Ähnlich wie bei dem Gebäude selbst werden für die Messeveranstaltung Risiken für die Evakuierungsplanung vermutet:

- Um wie viel wird die Personenanzahl im Gebäude im Vergleich zum normalen Studienbetrieb durch die Besucher der Messe erhöht?
- Wie läuft der Publikumsverkehr ab?
- Wie bewegen und verteilen sich die Besucher in der Magistrale?
- An welchen Orten sammeln sich Personen oder bleiben unkontrolliert stehen, um sich die Stände anzuschauen oder sich mit Mitarbeitern der Firmen zu unterhalten?
- Welche zusätzlichen Objekte befinden sich in der Magistrale?
- Welche Dekoration befindet sich in der Magistrale?
- Ist die Anordnung der Messestände in der Magistrale sinnvoll?
- Wo werden die Tische, Stühle und Informationstafeln gelagert, die sich während dem normalen Studienbetrieb in der Magistrale befinden?
- Werden Fluchtwege verändert?
- Befinden sich zusätzliche Brandlasten im Gebäude?
- Welche Infrastrukturmaßnahmen werden für den Messebetrieb benötigt?
- Wie erfolgt die Entnahme von Strom und Wasser?

3.2.5. Gefahrenpotentiale

Die Versammlungsstättenverordnung legt die Verantwortlichkeit für die Sicherheit der Messerveranstaltung genau fest:

„§38 (1) Der Betreiber ist für die Sicherheit der Veranstaltung und die Einhaltung der Vorschriften verantwortlich.“ [22]

Dabei gilt es nicht nur die Vorschriften aus Gesetzen und Richtlinien einzuhalten, sondern zusätzlich sämtliche Vorschriften der Aufsichtsbehörde, der Feuerwehr und des Hochschulreferats 6 - Sicherheit und Strahlenschutz.

Im Folgenden werden einige Beispiele der bisher erteilten Auflagen und den während der diesjährigen Messe erkannten Mängeln aufgezeigt.

Sicherheitsleitsystem

Die aufgebauten Messestände verändern die Optik der Magistrale wesentlich. Aus diesem Grund fordert die Feuerwehr die Anbringung zusätzlicher Signaletik für die Flucht - und Rettungswege sowie Notausgänge. Diese sollen die Fluchtwege sichtbarer und übersichtlicher machen.

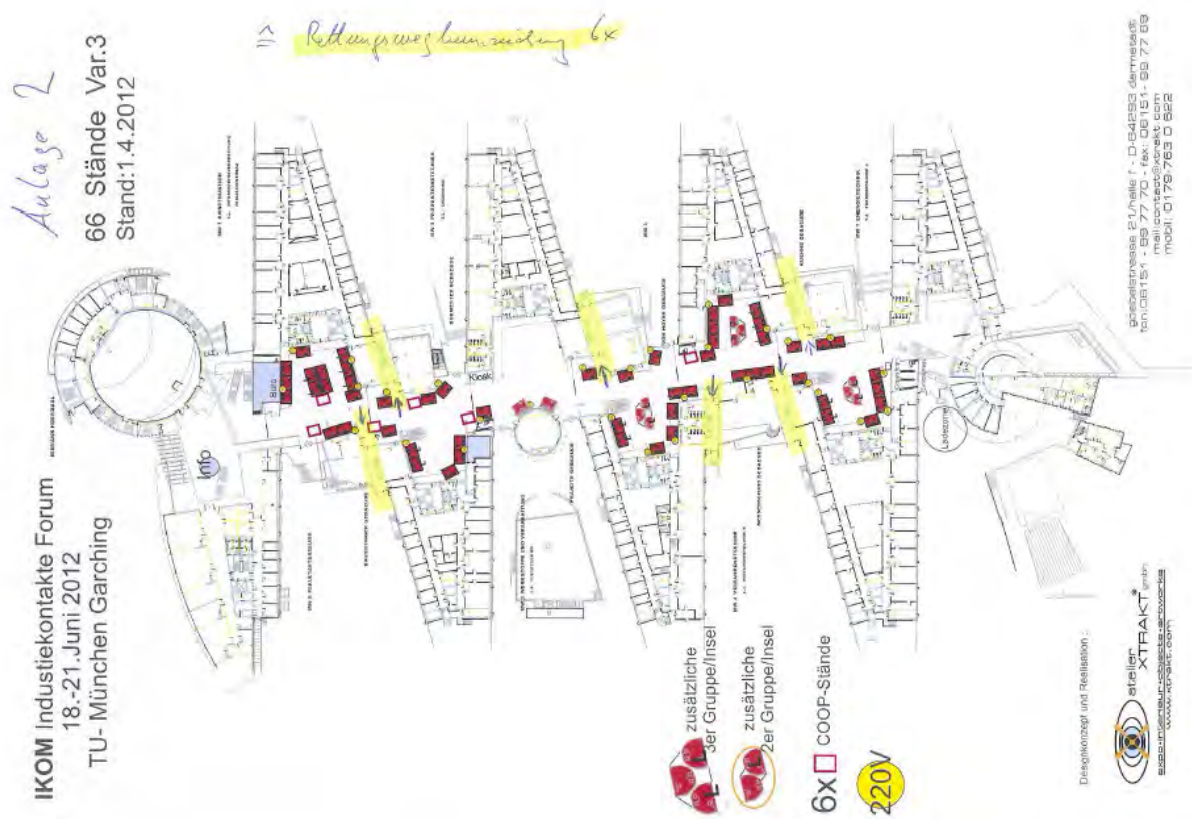


Abbildung 22: Kennzeichnung Flucht- und Rettungswege [38].

Abbildung 22 zeigt die bisher vorgesehene, zusätzliche Kennzeichnung der Flucht - und Rettungswege.

Messestände und Dekoration

Im Messebau sind in der Regel keine schwerentflammaren Materialien gefordert. Messehallen werden beispielsweise baulich und brandschutztechnisch speziell für Veranstaltungen ausgelegt. Das bedeutet, Gebäude und Hallen, die baulich als Versammlungsstätte konzipiert und genehmigt sind, besitzen unter anderem einen flächendeckenden Sprinklerschutz.

Die Fakultät für Maschinenwesen ist nicht speziell für Veranstaltungen ausgelegt. Daher sind Sprinkleranlagen nur an Stellen mit festen Einbauten wie dem Copy - Shop und der Cafeteria vorhanden und fehlen gänzlich in der Magistrale. Andere Messegelände wie beispielsweise die Messe Riem bieten im Vergleich dazu sogar die baulichen Strukturen und Möglichkeiten, einen Sprinklerschutz bis in besonders aufwendige oder brandgefährdete Aufbauten zu verlegen (vgl. [35]).

Der Entwurf und der Aufbau der Messestände wird derzeit noch von der Feuerwehr der TU München untersucht.

Als Dekoration wurden sogenannte Dekomoltons in den IKOM - Farben Grün und Weiß in der gesamten Magistrale aufgehängt.

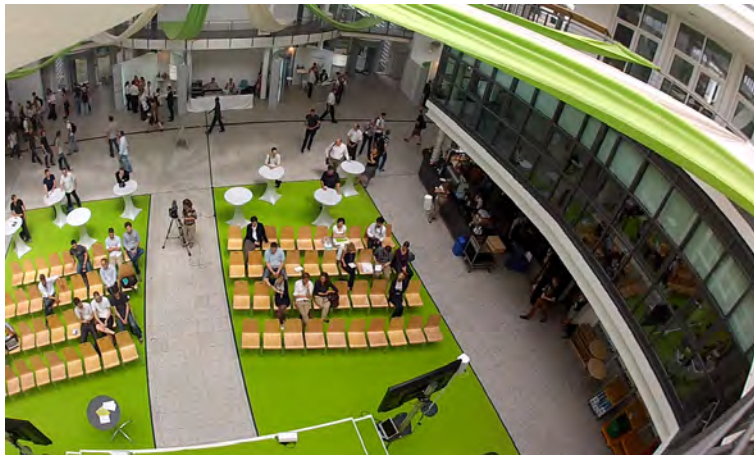


Abbildung 23: Dekomoltons 1.



Abbildung 24: Dekomoltons 2.

Ausschmückungen innerhalb des Gebäudes könnten eine zusätzliche Brandlast darstellen und sind deshalb in der Versammlungsstättenverordnung durch folgende beiden Kriterien begrenzt:

„§33 (4) Für Ausschmückungen muss mindestens schwerentflammbares Material verwendet werden. Für Ausschmückungen in notwendigen Fluren und notwendigen Treppenträumen muss nichtbrennbares Material verwendet werden.“ [22]

„§33 (5) Ausschmückungen müssen unmittelbar an Wänden, Decken oder Ausstattungen angebracht werden. Frei im Raum hängende Ausschmückungen sind zulässig, wenn sie einen Abstand von mindestens 2,50m zum Fußboden haben.“ [22]

Die Stoffe der Dekomoltons entsprechen laut Lieferschein der Brandschutzklasse B1, schwer entflammbar.

Pos.	Material Beschreibung	Menge / Einheit	Hersteller / Flammschutzmittel	Klassifizierung DIN
1	Dekostoff Dekomolton Material: reine Baumwolle, Farbe: cremeweiß-501, Breite: 130 cm, Gewicht: 165 g/m ² . Schwer entflammbar, Brandklasse: DIN 4102 B1. Rolllänge: 20x 60.00 m	1.200,00 m	Rudolf Chemie RUCO-FLAM NAF P-261 26265-ift	schwer entflammbar 4102 B1
2	Dekostoff Dekomolton Material: reine Baumwolle, Farbe: limonengrün-646, Breite: 130 cm, Gewicht: 165 g/m ² . Schwer entflammbar, Brandklasse: DIN 4102 B1.	1.200,80 m	Rudolf Chemie RUCO-FLAM NAF P-261 26265-ift	schwer entflammbar 4102 B1

Abbildung 25: Ausschnitt Brandschutznachweis Moltons [39].

Neben den erfüllten Auflagen wurden während der Veranstaltung einige Mängel innerhalb des Gebäudes festgestellt. Beispiele aus der Mängelliste der Feuerwehr der TU München verdeutlichen die Gefahren für den Notfall. Einige dieser Mängel wurden noch während der Messe 2012 vom Veranstalter behoben. Andere müssen dringend in den kommenden Veranstaltungen beseitigt werden.

Verstellte Notausgänge

Blockierte Notausgänge sowohl im ersten als auch im zweiten Fluchtweg können im Ernstfall Menschenleben gefährden. Deshalb gilt in der Versammlungsstättenverordnung:

„§31 (2) Rettungswege in Versammlungsstätten müssen ständig frei gehalten werden.“ [22]

Bei der IKOM 2012 wurden diesbezüglich entsprechende Mängel aufgedeckt. Durch die Gestaltung der Messestände wurden die Fluchtmöglichkeiten hinter einigen Ausgängen verstellt.



Abbildung 26: Notausgang 1[35].

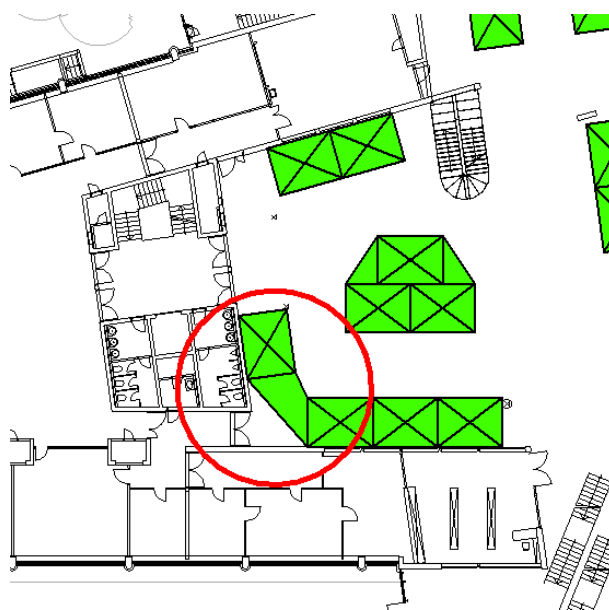


Abbildung 27: Notausgang 2.

Gegenstände und Brandlasten in den Rettungswegen

Gegenstände und Brandlasten können Rettungswege unbrauchbar machen. In diesem Fall wurden Stühle und Tische, die sich im normalen Betrieb in der Magistrale befinden, im Keller dieses Treppenhauses gelagert. Sollten diese in Brand geraten, würden die schnelle Rauchentwicklung und die Schlotwirkung des Treppenhauses den kompletten Fluchtweg eines Lehrstuhltraktes gefährden. Aus diesem Grund ist es unabdingbar, für kommende Veranstaltungen einen anderen, sicheren Lagerplatz zu finden.

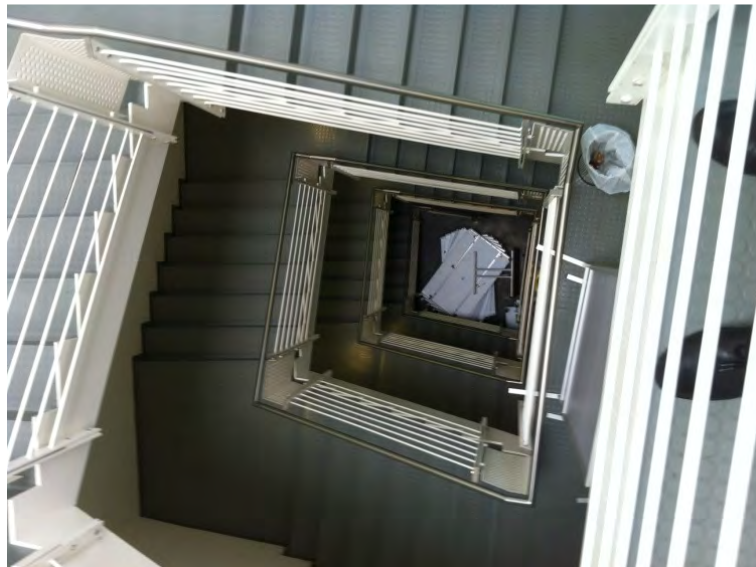


Abbildung 28: Rettungsweg 1 [35].

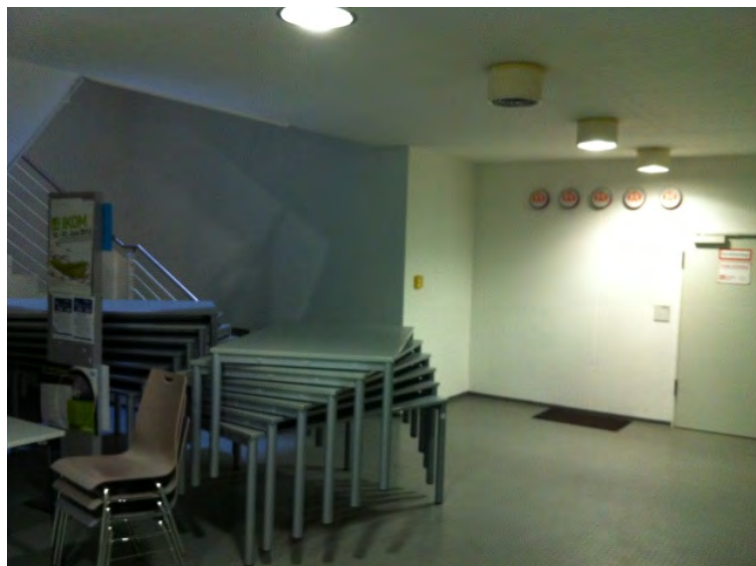


Abbildung 29: Rettungsweg 2 [35].

Ebenfalls befand sich Mobiliar auf notwendigen Fluren, blockierte damit den Laufweg und schränkte die Flucht- und Rettungswege vor allem in ihrer Breite ein.



Abbildung 30: Rettungsweg 3 [35].

Wandhydrant nicht sichtbar und unbenutzbar

Die notwendige Technik im Gebäude dient der Brandmeldung und Brandbekämpfung im Notfall.

„§19 (1) Versammlungsräume, [...] und notwendige Flure sind mit geeigneten Feuerlöschern in ausreichender Zahl auszustatten. Die Feuerlöscher sind gut sichtbar und leicht zugänglich anzubringen.“ [22]

Werden diese jedoch durch Messestände und Dekoration blockiert, wird die Erreichbarkeit und Sichtbarkeit maßgeblich eingeschränkt, wie im Falle eines Wandhydranten.



Abbildung 31: Wandhydrant 1 [35].



Abbildung 32: Wandhydrant 2 [35].

Da ein Evakuierungsfall jederzeit eintreten kann, müssen Gefahren und Mängel ohne Ausnahmen behoben und ausgeschlossen werden. Zuständig für die Untersuchung und Überprüfung des Gebäudes sind das Staatliche Bauamt München 2 als Aufsichtsbehörde, die Feuerwehr der TU München und das Hochschulreferat 6 - Sicherheit und Strahlenschutz.

Die Analyse in dieser Arbeit dient der unterstützenden Beurteilung dieser Untersuchung. Die Betrachtung der notwendigen Flucht - und Rettungswege durch eine Simulation der Fußgängerströme während einer geordneten Evakuierung kann in verschiedenen Szenarien abgebildet und geprüft werden.

4. Simulation von Fußgängern

4.1. Grundidee

Durch Simulationsprogramme ist die Abbildung des Verhaltens großer Personenströme möglich. Paniken bilden einen Sonderfall und werden von Wissenschaftlern separat untersucht. Sie können nur schwer dargestellt werden, da sie unvorhersehbar sind und aus verschiedensten Gründen unkontrollierbar ausbrechen.

Die Simulationen dienen der Unterstützung der Evakuierungsplanung. Durch sie können Schwachstellen und Gefahren identifiziert und Vorhersagen für verschiedene Szenarien getroffen werden.

Das Verhalten des Fußgängers und die Eigenschaften der Personen werden dabei genau untersucht und auf mathematische und physikalische Modelle zurückgeführt.

Das interdisziplinäre Projekt REPKA: Regionale Evakuierung, Planung, Kontrolle und Anpassung [6] ist eine Partnerschaft unter anderem zwischen der TU München, der TU Kaiserslautern und der Siemens AG und wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.

Ziel des Projektes ist es, Personen schnell und zuverlässig evakuieren zu können. Durch mathematische Optimierung und Simulationen werden Methoden entwickelt, mit denen realitätsnahe Evakuierungspläne für eine ganze Region vor Eintreten eines Katastrophenfalls entworfen werden können. Diese Pläne können selbst in der tatsächlichen Situation an die sich ständig verändernden Bedingungen angepasst werden. Am Ende des Projektes soll eine Softwarebibliothek zur Verfügung stehen, mit deren Hilfe die Einsätze für viele mögliche Szenarien im Voraus geplant und geübt werden können (vgl. [6]).

Untersuchungen des Fußgängerverhaltens werden von vielen Wissenschaftlern an verschiedenen Universitäten durchgeführt. Beispiele dafür sind die Arbeiten von Dirk Helbig an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETH Zürich), in denen er die Wahl der Wege von Fußgängern untersuchte. Außerdem entwickelte er das Soziale - Kräfte - Modell, welches bis heute noch Verwendung findet. Daneben wurden eine Vielzahl von Studien durchgeführt, beispielsweise die Untersuchung „How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters“ von Mehdi Moussaïd an der Université Paul Sabatier in Toulouse (vgl. [25]).

4.2. Fußgänger nach Weidmann

Transporttechnik der Fußgänger (vgl. [40])

Professor Ulrich Weidmann ist Dekan am Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme der ETH Zürich. In seiner Publikation „Transporttechnik der Fußgänger - Transporttechnische Eigenschaften des Fußgängerverkehrs“ hat er anhand einer Literaturlauswertung die wesentlichen Eigenschaften von Fußgängern zusammengefasst.

Das Funktionieren, die Leistungsfähigkeit und der Komfort von Anlagen sind abhängig vom Verhalten der Fußgänger, die sich in einer Anlage aufhalten und bewegen. In [40] wurde der Charakter, die Eigenschaften, der Energieverbrauch und das Geschwindigkeitsverhalten von Fußgängern untersucht.

Die bedeutendsten Eigenschaften eines Fußgängers sind:

- Geschlecht
- Alter
- Größe
- Körperproportionen
- Biomechanik
- Physiologie.

Alle diese Merkmale beeinflussen die körperliche Leistungsfähigkeit und Geschwindigkeit der Fußgänger. Dabei ist zu beachten, dass die Leistungsfähigkeit der Frauen kleiner ist als die der Männer. Dies ist hauptsächlich auf den unterschiedlichen Körperbau zurückzuführen.

Die Körpergröße wird in [40] als Funktion des Alters und des Geschlechts dargestellt. Die durchschnittliche Größe beträgt bei Männern 178.5 cm und bei Frauen 166.0 cm.

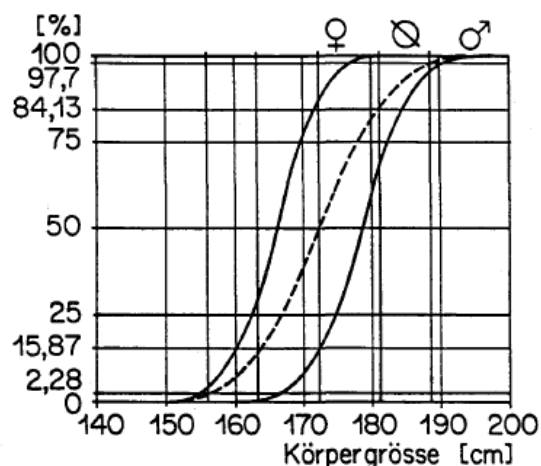


Abbildung 33: Durchschnittliche Körpergröße [40].

Im Durchschnitt ist die Körperbreite eines Menschen 0.46 m und die Körpertiefe 0.23 m. Aus diesen Angaben lässt sich der Platzbedarf einer Person berechnen.

Geht man von einer Ellipse als Grundfläche aus, so ist der Platzbedarf eines Menschen circa 0.085 m^2 , ohne Kleidung und ohne Gepäck. Das entspricht umgerechnet einer Personendichte von 11.8 Personen pro m^2 . Mit Kleidung und Füßen hat eine Person einen Platzbedarf von 0.15 m^2 , was einer Personendichte von 6.6 Personen pro m^2 gleichkommt.

Die Geschwindigkeit einer Person wird durch viele Einflüsse geprägt:

- Eigenschaft des Fußgängers
- Begleitumstände der Bewegung (Tageszeit, Witterung)
- Charakteristik der Anlage.

Außerdem ist die Geschwindigkeit von Fußgängern abhängig von der Fußgängerverkehrsdichte. Dieser Zusammenhang ist in dem sogenannten Fundamentaldiagramm dargestellt:

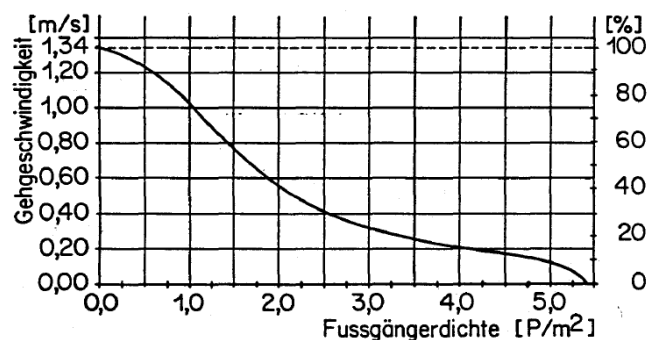


Abbildung 34: Fundamentales Diagramm [40]

Die Durchschnittsgeschwindigkeit einer Person beträgt 1.34 m/s .

Besondere Beachtung muss Personen mit Behinderung geschenkt werden. Diese sind in ihrer Bewegung eingeschränkt und meist langsamer als andere Personen.

„Die Beweglichkeit von 25 bis 30% der Bevölkerung ist im weitesten Sinn eingeschränkt.“ [40]

Im engeren Sinne zählen zu den Personen mit Behinderung:

- Körperbehinderte
- Sehbehinderte
- Hörbehinderte
- geistig Behinderte.

Im weiteren Sinne gehören zu den Personen mit Behinderung:

- ältere Menschen
- werdende Mütter
- Personen mit sperrigem Gepäck
- Erwachsene mit Kindern.

4.3. Modellierungsarten

Fußgängerströme lassen sich in Simulationsprogrammen durch drei grundlegende Arten modellieren.

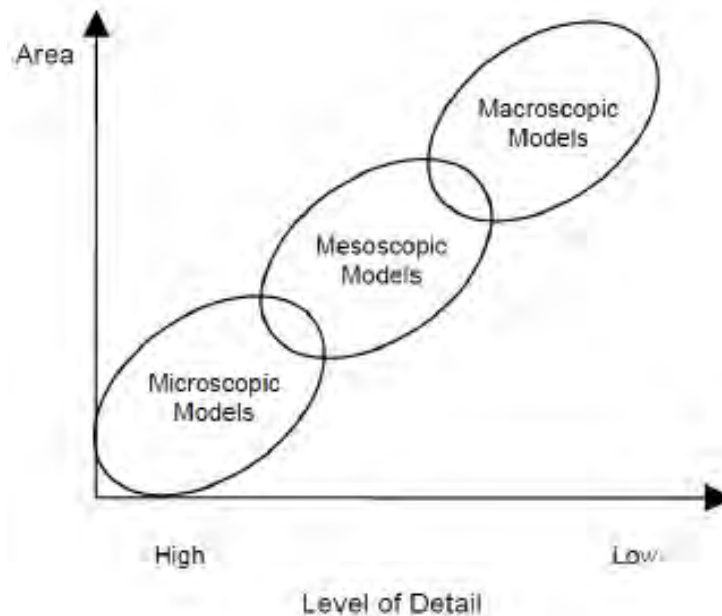


Abbildung 35: Arten von Fußgängersimulationen [41].

4.3.1. Makroskopisches Modell

Das Makroskopische Modell betrachtet die Fußgängermenge als Gas, eine kompressible Flüssigkeit oder ein Fluid. Das unterschiedliche menschliche Verhalten und die menschlichen Interaktionen können nicht modelliert werden, da die Fußgänger als einheitliche Masse mit bestimmten Eigenschaften gesehen werden.

Die Untersuchungen der Fußgängergeschwindigkeiten sind abhängig von der Dichte in einem bestimmten Gebiet. Ein Impuls- und Energieerhalt wird vorausgesetzt.

Die makroskopische Modellierung lässt sich schlecht auf Simulationen in besonderen Umgebungen oder unter besonderen Bedingungen anwenden, da sie nicht die individuellen Interaktionen zwischen Fußgängern und sogenannte Selbstorganisationseffekte mit einbeziehen kann. Daher werden unerwartete Behinderungen weitgehend vernachlässigt (vgl. [2], [41]).

4.3.2. Mikroskopisches Modell

Das mikroskopische Modell ist personenbezogen. Da es die einzelnen Fußgänger und die auf sie wirkenden Kräfte abbilden kann, ist es in der Anwendung flexibler und kann auf weit mehr Situationen als das makroskopische Modell angewendet werden. Die Modellierung vieler Individuen wird durch das mikroskopische Modell ermöglicht. Die Fußgänger verfolgen bestimmte Ziele und weichen Hindernissen aus.

Der mikroskopische Ansatz ist entitätsbasiert. Das heißt, es sind eindeutig bestimmbare Objekte definiert und keine verschwommene Masse, wie im makroskopischen Ansatz.

Die Berechnung der Geschwindigkeit und der Bewegungsrichtung jedes einzelnen Fußgängers ist somit möglich. Die Geschwindigkeit und der Abstand zu Hindernissen kann sogar in Abhängigkeit von anderen Fußgängern und Hindernissen dargestellt werden.

Dennoch sind die Verhaltensweisen der Fußgänger, die modelliert werden können, eingeschränkt. Es ist nahezu nur ein normaler Fußgängerverkehr in Standardsituationen und ohne besondere Einflüsse darstellbar. Die simulierten Individuen sollten aus diesem Grund ähnliche Verhaltensweisen besitzen. Bei Standardsituationen gleicht sich die geringe Ungewissheit des tatsächlichen Verhaltens jeder Person über die Summe aller Fußgänger aus. So kann eine endliche Anzahl der Eigenschaften für die Modellierung verwendet werden. In Extremsituationen sind die Reaktionen der Menschen derartig verschieden, dass die Modelle zu komplex und eine Berechnung zu aufwendig wäre.

Die Bedeutung wird in dem hier simulierten Fall erkennbar. Für eine geordnete Evakuierung kann ein Standardverhalten der Fußgänger angenommen werden. Dazu gehören die direkte Bewegung zu den ausgewählten Zielen oder das Ausweichen vor Hindernissen. Bei einer Panik, bei der sich die Verhaltensweisen extrem von Fußgänger zu Fußgänger unterscheiden, ist das nicht möglich. Hierzu zählen zum Beispiel unkontrolliertes Hin- und Herlaufen oder plötzliches Stehenbleiben.

Bei der Auswertung der Simulationen muss immer beachtet werden, dass trotz eines detaillierten Entwurfs eine gewisse Unsicherheit über die realen Reaktionen und Verhaltensweisen der Personen bleibt (vgl. [2], [41]).

Es gibt viele Varianten der mikroskopischen Modellierung sowie Kombinationen aus den unterschiedlichen Ansätzen. Als Beispiele werden hier die folgenden drei Modelle erläutert:

- Zellularautomaten
- Magnetkräftemodell
- Soziale - Kräfte - Modell

Zellularautomaten

Bei den Zellularautomaten werden die komplexen Systeme und die aufwendigen Berechnungen in einzelne, weniger komplexe Komponenten aufgeteilt. Ein Zellengitter unterteilt das Untersuchungsgebiet in diskrete Elemente.

Eine Zelle kann entweder Quelle, Ziel oder Hindernis sein. In allen weiteren Zellen befindet sich entweder ein Fußgänger oder sie sind leer.

Jede Zelle besitzt zu jedem Zeitpunkt genau einen Zustand. In einem konstanten Zeitschritt kann dieser Zustand in den jeweils nächsten überführt werden. So können die Fußgänger ihre Position verändern. Durch Unterzeitschritte können unterschiedliche Fußgängerparameter, beispielsweise verschiedene Geschwindigkeiten, modelliert werden.

Die Diskretisierung ermöglicht eine schnelle Berechnung großer Fußgängermengen. Es kann sogar ein Zusammenhang zwischen Dichte und Geschwindigkeit oder eine Dichte - Stau - Beziehung aufgezeigt werden.

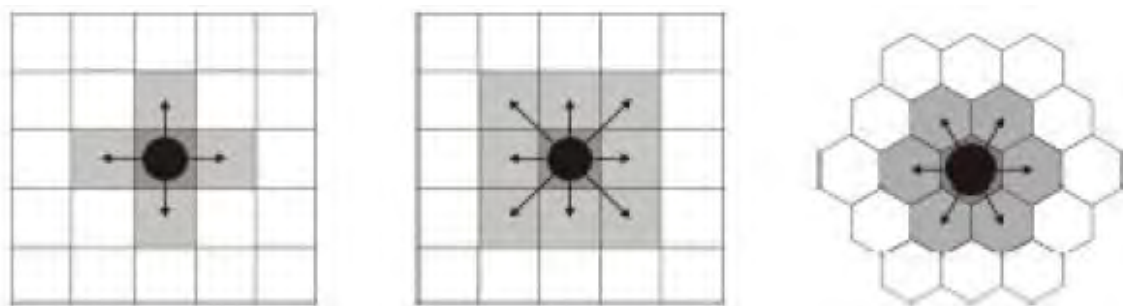


Abbildung 36: Zellularautomaten [2].

Das Grundmodell der Zellularautomaten ist ein Gitter aus viereckigen Zellen, sichtbar in den ersten beiden Positionen von Abbildung 36. Horizontale und vertikale Bewegungen sind möglich, ebenso wie diagonale, für die Sonderregelungen wegen der längeren Schrittweite getroffen werden müssen.

Bei viereckigen Zellen ist eine Simulation von einander entgegengesetzten Strömen und weiteren Phänomenen in Menschenmengen schwierig. Die Fußgänger können weniger Spurwechsel durchführen und müssen somit öfter abbremsen. Das erhöht die Stauanfälligkeit künstlich.

Eine Optimierung findet wie in Abbildung 36 rechts durch die Verwendung von sechseckigen Feldern mit konstanten Abständen zu allen Nachbarzellen und demzufolge natürlicheren Bewegungsregeln statt (vgl.[2]).

Magnetkräftemodell

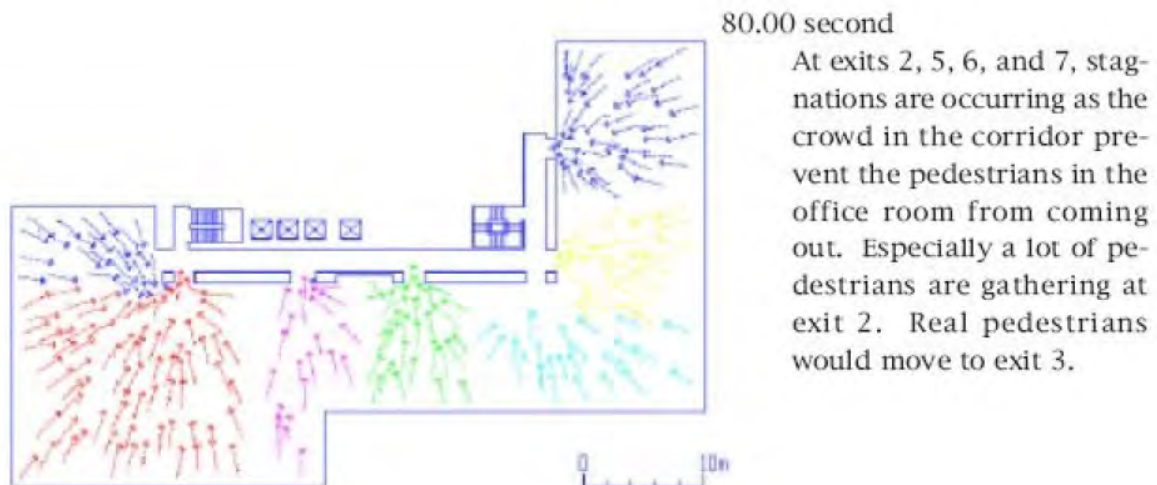


Abbildung 37: Magnetkräftemodell [2].

Das Magnetkräftemodell wurde von Shigeyuki Okazaki an der Fukui - Universität in Japan entwickelt.

Alle Fußgänger, Hindernisse und Begrenzungen erhalten eine positive und alle Ziele eine negative Ladung.

Personen bewegen sich gemäß bekannter magnetischer Gesetze mit zunehmender Geschwindigkeit auf das Ziel mit der höchsten Anziehungskraft zu. Von gleichnamigen Ladungen werden sie abgestoßen und vermeiden so die Kollision mit Hindernissen oder anderen Fußgängern sowie weite Umwege. Aufnahmen zu bestimmten Zeiten der Simulation können ein genaues Bild der Menschenströme liefern.

Durch die wenigen Parameter ist das Modell sofort verständlich. Allerdings wird es durch einige Schwächen eingeschränkt.

Zum Einen gibt es kein Tempolimit gegen unendliche Beschleunigungen. Zum Anderen wird die Fußgängerdichte durch die Stärke der magnetischen Kraft geregelt und nicht durch den Platzbedarf der einzelnen Fußgänger.

Mit dem Magnetkräftemodell kann nur eine bestimmte Anzahl von Personen dargestellt werden, da eine steigende Fußgängerzahl zu immer aufwendigeren Berechnungen führt.

Außerdem ist die Abbildung von gegeneinander laufenden Strömen nicht möglich, da das Modell auf zwei Pole beschränkt ist. Hinzu kommt, dass es keine Erklärung für Verhaltensweisen gibt, die nicht mit magnetischen Gesetzen erklärbar sind. Dazu gehört beispielsweise die Bewegung zu einem Ziel, welches nicht das nächstgelegene ist. Nur das nächstgelegene Ziel übt die größte Anziehungskraft aus.

Soziale - Kräfte - Modell

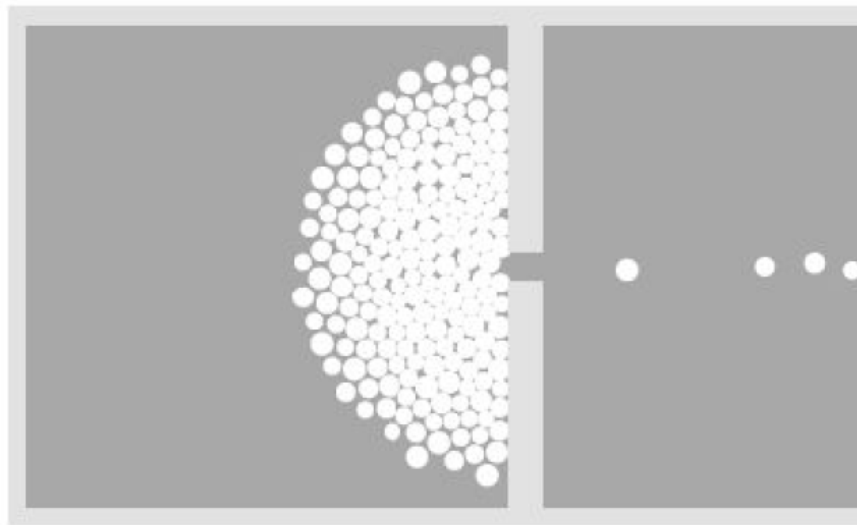


Abbildung 38: Soziale - Kräfte - Modell [2].

Dirk Helbig entwickelte das Soziale - Kräfte - Modell an der TU Dresden.

Das Modell ermöglicht eine Umwandlung von psychosozialem, unberechenbarem Verhalten in physische, also berechenbare Kräfte. Die Motivation der Fußgänger, mit einer bestimmten Geschwindigkeit ein bestimmtes Ziel zu erreichen, wird durch definierte Kraftterme wiedergegeben.

Die Wünsche, den Kontakt zu einem Partner oder einer Gruppe zu halten oder sich Zielen zu nähern, bilden anziehende Kräfte. Abstoßende Kräfte sind jene Wünsche, Wänden, Hindernissen und fremden Fußgängern fernzubleiben. Geschehnisse vor einem Fußgänger haben einen größeren Einfluss auf ihn als Ereignisse hinter oder neben ihm.

Das Soziale - Kräfte - Modell erfordert die Ermittlung und Kalibrierung vieler Parameter. Dies kann durch die empirische Beobachtung von Fußgängerströmen erfolgen. Wie bei allen bisher genannten Simulationstypen mangelt es auch hier an Werten für Paniksituationen. Mit wenigen, weitgehend identischen Fußgängern und geschätzten Parameterwerten können die meisten Phänomene wirklichkeitsnah reproduziert werden. Mit steigender Fußgängerzahl ist allerdings eine immer aufwendigere Berechnung notwendig.

Das Soziale - Kräfte - Modell ist ein einfaches und robustes Modell und eignet sich zur Prognose, Planung und Optimierung von kleineren Fußgängeranlagen (vgl. [2]).

4.3.3. Mesoskopisch

In mesoskopischen Modellen werden die Eigenschaften von makroskopischen und mikroskopischen Modellen verbunden (vgl. [41]).

4.4. Simulationsprogramm „CrowdControl“

Das von der Siemens AG im Zuge des REPKA Projekts entstandene Simulationstool „CrowdControl“ basiert auf einem mikroskopischen Modell.

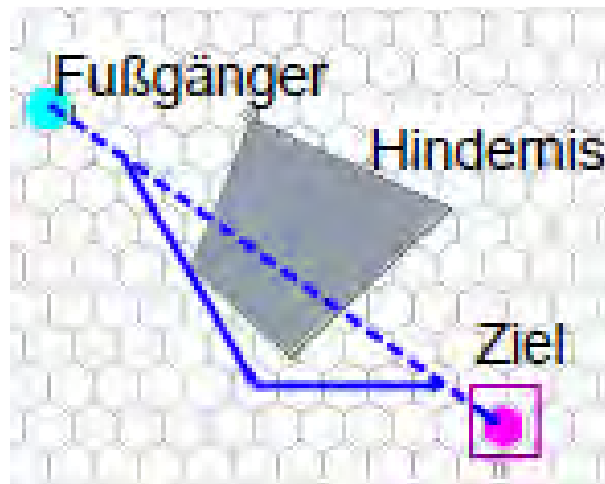


Abbildung 39: Zellulärer Automat 1 [42].

4.4.1. Räumliche Diskretisierung

Für die Modellierung wird ein Zellularautomat verwendet, der aus einem hexagonalen Zellgitter besteht. Das heißt die simulierten Bereiche werden in sechseckige Felder unterteilt. Es kann bisher nur in der Ebene, das heißt in zwei Dimensionen, simuliert werden (vgl. [43]).

Die Zellengröße entspricht dem Platzbedarf einer Person (vgl. [42]). Es wird eine Standardperson angenommen: Ein europäischer Mann mit Sommerbekleidung und ohne Gepäck (vgl. [43]). Nach [40] hat ein Mensch mit Kleidung und Füßen einen Platzbedarf von $0,15 \text{ m}^2$. Das ergibt eine Personendichte von $6,6 \text{ Personen pro m}^2$.

4.4.2. Zeitliche Diskretisierung

Jede Zelle befindet sich zu jedem Zeitschritt in einem bestimmten Zustand. Entweder ist sie leer oder es befindet sich ein Individuum in der Zelle. Die Zelle kann außerdem von einer Quelle (source), einem Ziel (target) oder einem Hindernis (obstacle) belegt sein.

In jedem Zeitschritt folgen die Personen den Regeln von positiver und negativer Anziehung. Ziele wirken anziehend, Hindernisse und Fußgänger stoßen sich gegenseitig ab. Diese einfachen Annahmen werden durch das menschliche Verhalten eingeschränkt. Menschen haben zwar ein langfristiges Ziel, nutzen aber für die Bestimmung ihres Weges das, was sie direkt vor sich sehen. Das widerspricht dem einfachen physikalischen Modell. Durch Untermodelle in der Programmierung werden diese Abweichungen kompensiert (vgl. [43]).

4.4.3. Kalibrierung

Für die Erstellung einer individuellen Simulation ist die Kalibrierung des Modells mittels bestimmter Parameter notwendig.

Der wichtigste Parameter der Fußgängersimulation ist die individuelle Geschwindigkeit. Als Basis werden die Untersuchungen aus [40] herangezogen. Im Programm CrowdControl wird eine Grundgeschwindigkeit von 1.34 m/s angenommen (vgl. [43]). Davon ausgehend hat die Geschwindigkeit der Fußgänger im Simulationsprogramm eine Spannweite von 0.97 - 1.65 m/s (vgl. [40]).

Auf der Messeveranstaltung in der Fakultät für Maschinenwesen bewegt sich ein tendenziell jüngeres Publikum. Die Besucher der IKOM sind vorrangig Studenten. Außerdem befinden sich Firmenvertreter, Mitarbeiter der Fakultät und Professoren im Gebäude. Personen mit Behinderung können im Simulationsprogramm nicht erfasst werden. Es wird von einer geordneten Bewegung der Fußgänger ausgegangen, die nicht unter Panik, sondern unter normalen Bedingungen stattfindet.

Die Geschwindigkeit eines Fußgängers ist umso langsamer, je dichter die Gruppe in der Richtung ist, in die er gehen will. Der genaue Zusammenhang wird im bereits erwähnten Fundamentaldiagramm in [40] gezeigt. Die unterschiedlichen Geschwindigkeiten werden durch unterschiedlich häufige Sprünge eines Fußgängers ermöglicht. Schnelle Fußgänger ziehen jeden Zeitschritt eine Zelle weiter. Langsame Fußgänger verweilen eine bestimmte Anzahl von Zeitschritten in der gleichen Zelle, bis sie weiterziehen.

4.4.4. Aufbau der Simulation

Die Simulation selbst setzt sich aus wenigen Bausteinen zusammen, die geschickt verwendet werden müssen, um ein repräsentatives Ergebnis zu erhalten.

Im Programm werden auf einer bestimmten Fläche, beispielsweise einem Gebäudegrundriss Quellen und Ziele erstellt. Die Quellen erzeugen Personen. Ziele ziehen Fußgänger an und lassen sie wieder verschwinden. Die Fußgänger selbst werden durch grüne, gelbe oder rote Punkte dargestellt. Die Farbe wird durch die Dichte der Personen pro m^2 festgelegt. Anschließend werden den Fußgängern Wege zugewiesen, zum Beispiel von einer Quelle zu einem Ziel. Erzeugte Hindernisse (Wände, Mobiliar, etc.) und andere Fußgänger blockieren und verändern diesen Weg. Durch Geschwindigkeitsfelder kann das Tempo von Personen durch Multiplikation eines Faktors mit der Grundgeschwindigkeit verlangsamt oder beschleunigt werden.

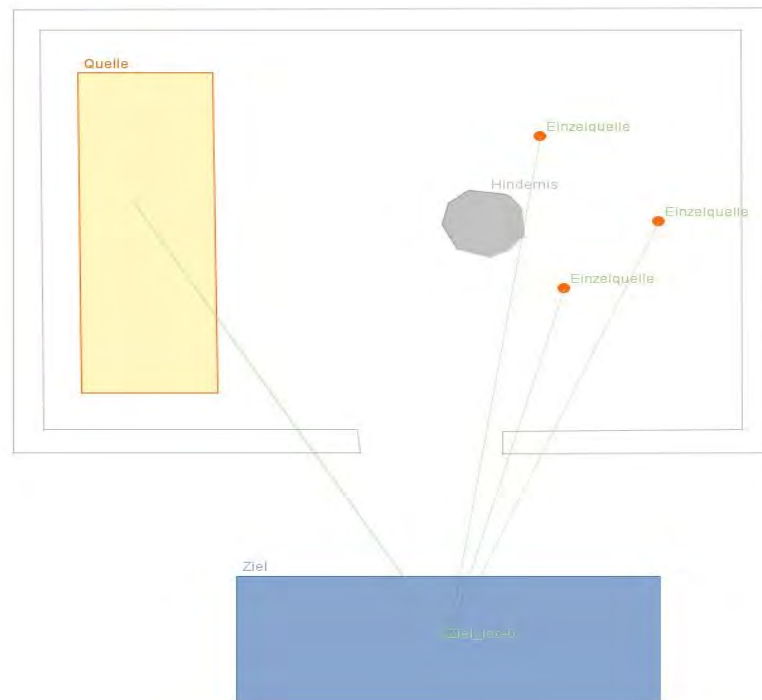


Abbildung 40: Grundszenario Simulation.

Ein einfaches Szenario aus diesen Grundbausteinen zeigt Abbildung 40. Hier werden zum Beispiel Fußgänger innerhalb eines Raumes erzeugt und sollen sich zu dem Ziel außerhalb des Raumes bewegen. Dabei kann ihr Weg durch Hindernisse blockiert sein.

Um ein Fallbeispiel so real wie möglich durch diese Bausteine simulieren zu können, müssen Informationen über die vorhandenen Personenquellen gesammelt und alle verfügbaren Ziele bestimmt werden. Dazu ist eine genaue Datenerfassung des Sachverhaltes notwendig.

4.4.5. Validierung

Validierung bedeutet, dass das Simulationsprogramm, welches sich zum Teil noch in der Entwicklung befindet, durch Anwendungsbeispiele geprüft wird. Nach dem Einsatz des Programms wird vom Anwender getestet, ob die Ergebnisse plausibel sind. Programmfehler können auf diese Weise aufgedeckt und umgehend korrigiert werden. So wird untersucht, ob das Programm auf verschiedene Fallbeispiele reproduzierbar ist.

4.5. Datenerfassung

4.5.1. Videodaten

Um die Personenströme während der Messeveranstaltung detailliert zu erfassen, wurde an ausgewählten Punkten eine Videoaufzeichnung mit speziell dafür vorgesehenen Kameras durchgeführt. Hierdurch kann sich ein Überblick verschafft werden, wie sich die Besucher auf der IKOM bewegen und im Gebäude verteilen.

Versuchsaufbau



Abbildung 41: Kamera 1.



Abbildung 42: Kamera 2.

Die Kameras aus Abbildung 41 und 42 wurden von Walt Disney Imagineering R&D für die Videodatenerfassung zur Verfügung gestellt. Alle aufgezeichneten Dateien werden für eine detailliertere Auswertung der Bewegung der Fußgänger an Walt Disney Imagineering R&D übergeben. In dieser Arbeit dienen die Videos zunächst als Anhaltspunkt für die Verteilung der Personen im Gebäude und damit für die Modellierung der Quellen.



Abbildung 43: GoPro [44].

In einem Kamerakorb sind jeweils zwei GoPro Kameras montiert. Der feste Aufbau dient dazu, zwischen den Kameras einen konstanten Abstand zu halten. Das spielt für die spätere Auswertung der Bewegungsdaten der Fußgänger eine entscheidende Rolle. Außerdem sind die Kameras in den Körben etwas versteckt und für den Besucher nicht direkt erkennbar, damit er sein Verhalten nicht aufgrund der Kameras ändert.



Abbildung 44: Versuchsaufbau 1.

Die GoPro Kameras haben einen Aufzeichnungswinkel von 140 Grad und können somit ein weiträumiges Gebiet in hoher Aufnahmequalität erfassen.



Abbildung 45: Versuchsaufbau 2.

Durch die Verwendung von zwei dieser Körbe mit je zwei Kameras, die in einem bestimmten Abstand voneinander angebracht sein müssen, werden die Daten aus vier Blickwinkeln aufgezeichnet. So kann später am Computer ein 3D - Video erstellt werden, mit dem von Walt Disney Imagineering R&D die genaue Wahl der Wege der Fußgänger nachvollzogen und am Computer ausgewertet werden kann.

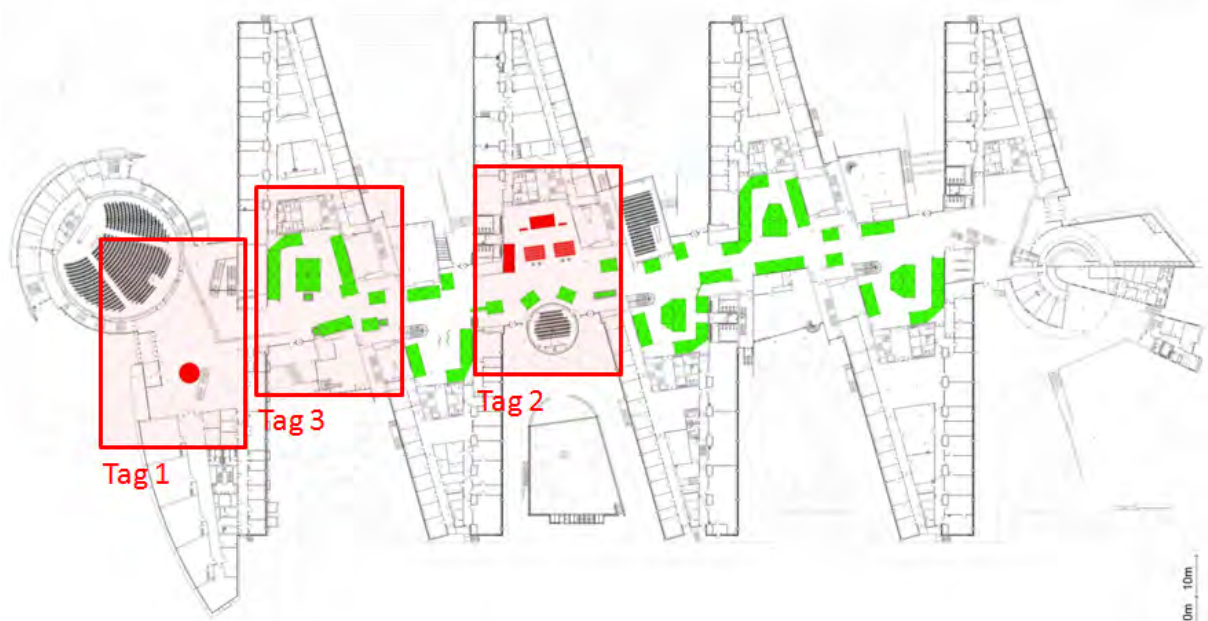


Abbildung 46: Versuchsaufbau 3.

Die Datenerfassung fand an drei Tagen statt. Die Kameras filmten dabei jeweils drei unterschiedliche Bereiche. Am ersten Tag wurden der Eingangsbereich und die Ausgänge der beiden großen Hörsäle MW 0001 und MW 2001 aufgenommen. Am zweiten Tag filmten die Kameras den Bereich über der Bühne und am dritten Tag die Messestände in Hof 1.

Auswertung

Tag 1 (Dienstag, 19. Juni 2012):

Der erste Tag zeigt die Situation im Eingangsbereich der Fakultät. Ebenfalls sichtbar ist der Informationsstand der IKOM. Es kann sowohl die Ankunft einer U - Bahn, als auch das Vorlesungsende in den beiden Hörsälen MW 2001 und MW 0001 beobachtet werden, dargestellt in den Abbildungen 47, 48 und 49.

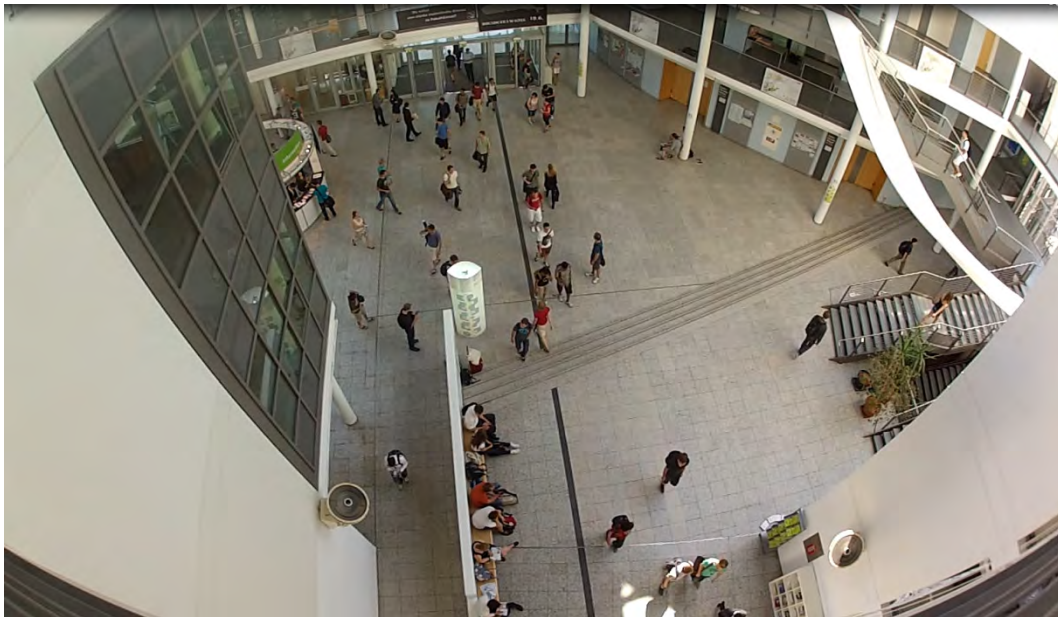


Abbildung 47: Tag 1 - Ankunft der U-Bahn.

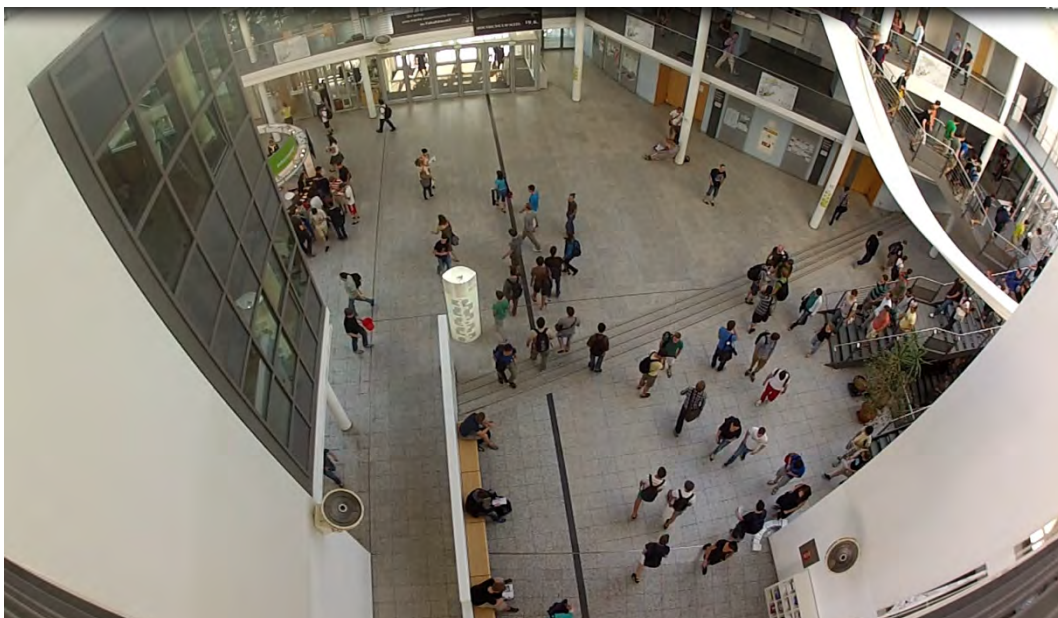


Abbildung 48: Tag 1 - Vorlesungsende MW 2001.



Abbildung 49: Tag 1 - Vorlesungsende MW 0001.

Tag 2 (Mittwoch, 20. Juni 2012):

An diesem Tag wurde der Publikumsverkehr vor der Bühne in Hof 3 aufgezeichnet. Rechts sind die wartenden Personen vor der Kaffee - Bar erkennbar, die den Weg für die vorbeigehenden Fußgänger blockieren.

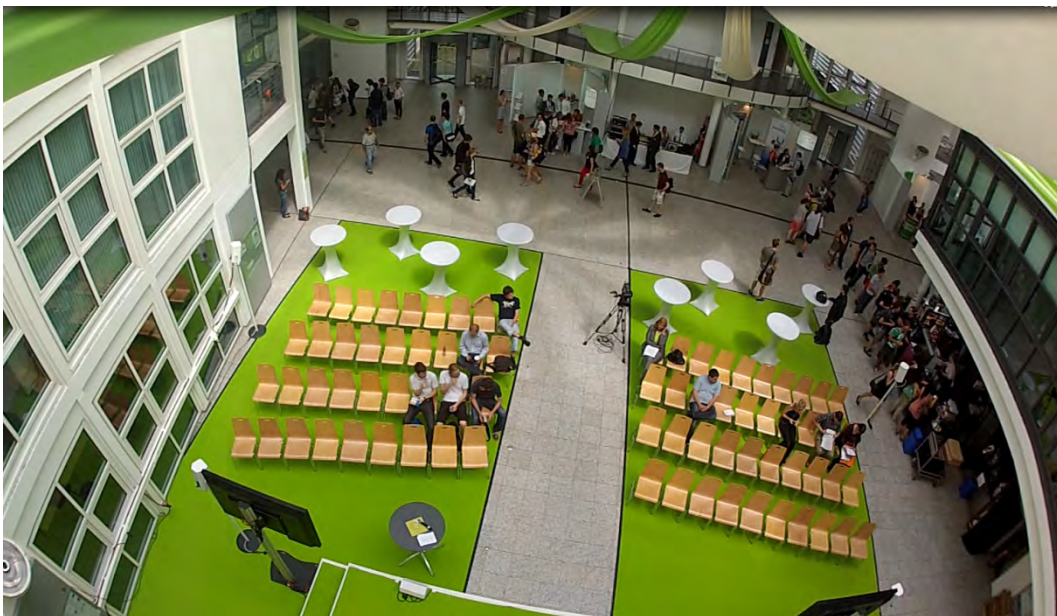


Abbildung 50: Tag 2 - Bühne.

Tag 3 (Donnerstag, 21. Juni 2012):

Am dritten Tag ist die Verteilung der Personen an den Ständen in Hof 3 zu sehen. Zum Teil ist weiter hinten die Bewegung der Besucher im Bereich des Haupteingangs ersichtlich.

In der linken unteren Ecke ist erkennbar, wie der Weg versperrt wird, wenn sich Studenten mit den Firmenvertretern unterhalten. Andere Personen weichen dadurch aus und ändern ihre Bewegungsrichtung.



Abbildung 51: Tag 3 - Messestände Hof 1.

Auf der beigefügten CD befinden sich kurze Ausschnitte der Videos aller drei Tage.

4.5.2. Auszählung

Die Angaben über die Anzahl der Besucher während der IKOM basierten bisher auf einer groben Schätzung der Veranstalter. Um genauere Daten zu erhalten, wurde eine Personenzählung an einem ausgewählten Tag während der Veranstaltung durchgeführt.

Versuchsaufbau



Abbildung 52: Position Auszählung.

Am Dienstag, dem 19. Juni 2012, wurden zum einen der Haupteingang und zum anderen der Westeingang neben der Cafeteria erfasst, wie in Abbildung 52 gekennzeichnet.



Abbildung 53: Handzählgerät [45].

Je zwei Helfer haben an den jeweiligen Ein- und Ausgängen mit Hilfe von Handzählern aufgezeichnet, wie viele Personen das Gebäude betreten und verlassen haben.

Eingang
Maschinenwesen - Haupteingang

07:00		10:30	
07:10		10:40	
07:20		10:50	
07:30		11:00	
07:40		11:10	
07:50		11:20	
08:00		11:30	
08:10		11:40	
08:20		11:50	
08:30		12:00	
08:40		12:10	
08:50		12:20	

Abbildung 54: Auszählung.

Die Registrierung der Besucher fand anhand des in Abbildung 54 gezeigten Datenblattes statt. Von 7:00 bis 20:00 Uhr wurde die Anzahl der Personen im 10 - Minuten - Takt aufgezeichnet.

Da sich bereits vor 7:00 Uhr die Mitarbeiter der IKOM im Gebäude befanden, wurde zu Beginn der Auszählung ein Startwert von 50 Personen festgelegt. Diese Annahme beruht auf einer Zählung während der täglichen Teamansprache aller IKOM Mitarbeiter um 6:30 Uhr.

AuswertungTabelle 2: Auswertung Personenzählung.
CD: Auswertung_Personenzählung.pdf

	Haupteingang		Cafeteria		Gesamt
	Eingang	Ausgang	Eingang	Ausgang	
07:00	50	0	0	0	50
07:10	63	3	15	5	70
07:20	83	6	25	7	95
07:30	109	8	49	9	141
12:40	3644	1871	1484	629	2628
12:50	3795	1981	1524	664	2674
13:00	4023	2083	1554	685	2809
13:10	4251	2174	1605	711	2971
13:20	4403	2335	1676	771	2973
13:30	4683	2440	1755	826	3172
13:40	4911	2532	1807	876	3310
13:50	5100	2602	1876	920	3454
14:00	5231	2684	1909	946	3510
14:10	5359	2795	1930	1009	3485
14:20	5441	2881	1975	1050	3485
14:30	5532	3015	2008	1080	3445
14:40	5638	3099	2034	1114	3459
14:50	5723	3180	2062	1146	3459
15:00	5784	3248	2083	1182	3437
19:30	6718	5924	2514	2279	1029
19:40	6727	5947	2516	2292	1004
19:50	6731	5959	2519	2296	995
20:00	6731	5965	2520	2302	984

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der Auszählung.

Die maximale Anzahl der Personen, die sich zu einem bestimmten Zeitpunkt im Gebäude aufgehalten haben betrug 3510 Personen um 14:00 Uhr.

Insgesamt haben 9251 Personen das Gebäude betreten, davon 6731 Personen (circa 72.76 Prozent) über den Haupteingang und 2520 Personen (circa 27.24 Prozent) über den Westeingang neben der Cafeteria.

Gezählt wurden hierbei alle Personen, darunter sämtliche Besucher der Messe, die Studenten und alle Fakultätsmitarbeiter.

Verlassen haben das Gebäude insgesamt 8267 Personen, davon 5965 Personen über den Hauptaingang und 2302 Personen über den Westausgang neben der Cafeteria.

Da eine Unterscheidung der einzelnen Besucher bei dieser hohen Anzahl von Personen nicht möglich war, wurden diejenigen, die mehrmals das Gebäude betreten und verlassen haben, auch mehrmals in der Auszählung erfasst.

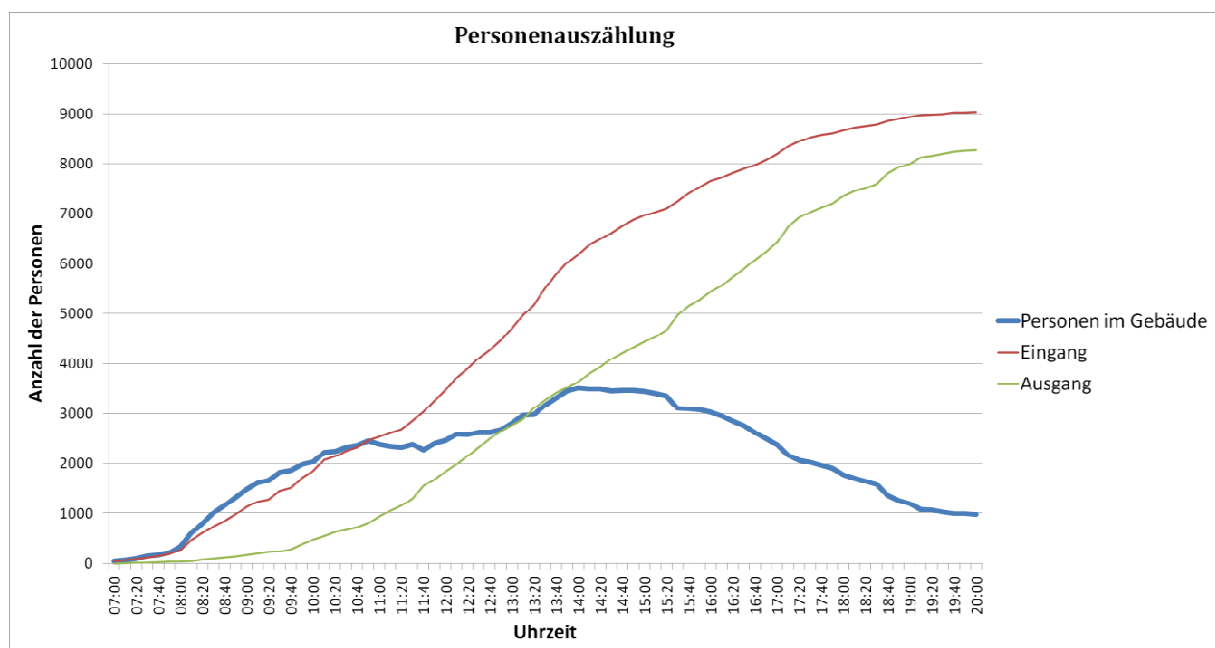


Abbildung 55: Diagramm Auszählung IKOM.

Abbildung 55 veranschaulicht die erfassten Daten in einer Grafik. Auffällig ist die Differenz zwischen den Personen, die das Gebäude betreten haben und denen, die es wieder verlassen haben. Laut den Daten der Zählung hätten sich um 20:00 Uhr noch 984 Personen im Gebäude befinden dürfen. Dies wird ebenso durch den Abstand der beiden Kurven für Eingang und Ausgang in der Abbildung ersichtlich. Nach einer Besichtigung der Magistrale befanden sich jedoch keine Personen mehr im Gebäude. Es stellt sich also die Frage, woher diese Differenz stammt.

Ursache der Differenz

Am Haupteingang ist die Differenz zwischen den Personen die das Gebäude betreten und denen, die es verlassen haben, weitaus größer als am Westeingang. Es existiert eine Differenz von 766 Personen am Haupteingang. Das sind 11.3 Prozent der Personen, die das Gebäude über diesen Eingang betreten haben. Am Westeingang neben der Cafeteria sind es lediglich 218 Personen und damit 8.65 Prozent.

Gemessen an der Gesamtanzahl von 9251 Personen, die das Gebäude betreten haben, wird dieser Unterschied zwischen den beiden großen Eingängen noch deutlicher. Der Haupteingang hat einen Gesamtanteil von 8.25 Prozent, der Eingang neben der Cafeteria gerade einmal 2.36 Prozent. Insgesamt müssen somit 10.61 Prozent das Gebäude über bislang nicht erfasste Ausgänge verlassen haben.

Dafür existiert eine einfache Erklärung. Viele Studenten betreten das Gebäude über den Haupteingang, wenn sie mit der U-Bahn nach Garching kommen. Nach den Vorlesungen verlassen beispielsweise Studenten der Fakultät für Mathematik und Informatik das Gebäude häufig durch die Seitenausgänge, um den Fußweg zu ihrer Fakultät zu verkürzen.

Personen, die das Gebäude vom Parkplatz aus betreten, halten sich meist ausschließlich in der Fakultät für Maschinenwesen auf, bis sie das Gebäude wieder in Richtung Parkplatz verlassen. Das erklärt den geringeren Anteil des Westeingangs an dieser Differenz.

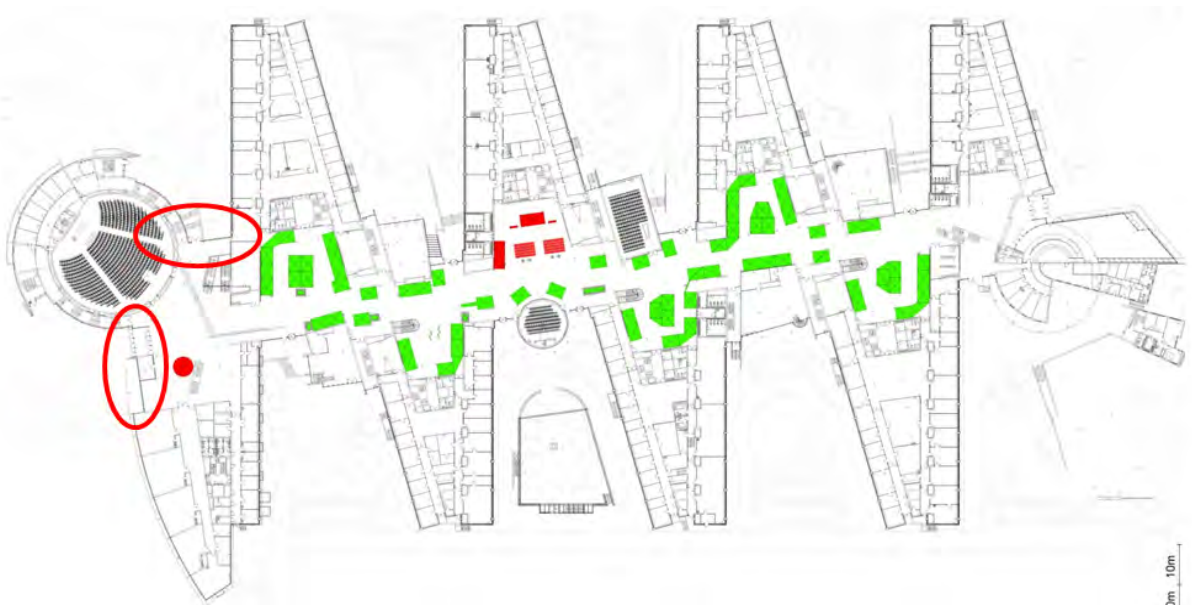


Abbildung 56: Auszählung Seiteneingang.

Noch deutlicher veranschaulicht diesen Umstand die Videoaufzeichnung des Eingangsbereichs. Es sind sowohl der Haupteingang als auch ein größerer seitlicher Eingang sichtbar. Abbildung 56 kennzeichnet die entsprechende Lage im Grundriss.

Im Video wurde das Ende einer Vorlesung der Informatik - Studenten aufgezeichnet. Es ist deutlich erkennbar, wie ein großer Teil der Studenten das Gebäude durch den Seitenausgang verlässt. Daraus lässt sich schließen, dass die seitlichen Ausgänge vermutlich nicht nur zum Verlassen des Gebäudes genutzt werden. Es ist wahrscheinlich, dass einige ortkundige Personen das Gebäude ebenfalls über diese Eingänge betreten haben.



Abbildung 57: Benutzung Seitenausgang.

4.5.3. Mitarbeiter der Fakultät für Maschinenwesen

Tabelle 3 zeigt eine Übersicht der Mitarbeiter der einzelnen Fachbereiche, aufgeteilt auf die jeweiligen Teilgebäude der Fakultät. Studenten und Hilfwissenschaftler sind in dieser Auflistung nicht enthalten.

Tabelle 3: Fakultätsmitarbeiter.

		Fakultät für Maschinenwesen		Gesamt
		Lehrstuhl	Mitarbeiter	
Hof 0	Prüfungsbüro		10	24
	Dekanat		4	
	Studienbüro		10	
Hof 1	Produktentwicklung		52	162
	Angewandte Mechanik		30	
	Mikrotechnik und Medizingerätetechnik		26	
	Automatisierung und Informationssysteme		32	
Hof 2	Regelungstechnik		22	128
	Numerische Mechanik		43	
	Verbrennungskraftmaschinen		38	
	Werkstoffkunde		25	
Hof 3	Ergonomie		51	137
	Betriebswissenschaften und Montaggesysteme		86	
Hof 4	Carbon Composites		37	138
	Nukleartechnik		12	
	Medizintechnik		30	
	Anlagen - und Prozesstechnik		17	
	Bioverfahrenstechnik		22	
	Selektive Trenntechnik		20	
Hof 5	Fördertechnik		51	239
	Maschinenelemente		75	
	Fahrzeugtechnik		59	
	Fahrzeugtechnik		54	
Hof 6	Aerodynamik		85	229
	Leichtbau		23	
	Flugsystemdynamik		55	
	Luftfahrtsysteme		16	
	Flugantriebe		27	
	Raumfahrttechnik		23	
Hof 7	Hubschraubertechnologie		11	125
	Thermodynamik		65	
	Fluidmechanik		15	
	Energiesysteme		34	
Hof 8	Hörsaal MW 1801 und Cafeteria		-	-

4.6. Randbedingungen und Annahmen

Im Kapitel „Grundlagen der Rettung von Personen“ wurde erläutert, dass sich die gesamte Evakuierungszeit t_{ev} aus den folgenden Anteilen zusammensetzt:

$$t_{ev} = t_d + t_a + t_p + t_i + t_m \quad [s]$$

Mit der Fußgängersimulation kann nur der Zeitraum t_m vom Start der Flucht bis zum Erreichen des geschützten Bereichs gemessen werden. Für alle anderen Zeiten sind im Nachhinein Annahmen über ihre Größe zu treffen. Sie müssen dann zur Dauer t_m addiert werden.

Die Modellierung des Fallbeispiels ist ausschließlich in zwei Dimensionen möglich. Das bedeutet, dass nur ein Stockwerk dargestellt werden kann, hier das Erdgeschoss. Personen, die sich in anderen Geschossen befinden, müssen auf den Treppen, die in das Erdgeschoss führen, simuliert werden und betreten von dort aus die Flure oder die Magistrale.

Die Hörsäle im Erdgeschoss können selbst als Räume simuliert werden. Die beiden großen Hörsäle MW 2001 und MW 1801 sowie alle weiteren Zeichensäle werden dagegen über die Treppen simuliert.

Die Lehrstühle und Institute können aufgrund der Komplexität nicht als einzelne Büros simuliert werden. Es wird angenommen, dass sich die Personen nach 15 Sekunden in den Fluren der Gebäudeteile befinden. Nach 20 Sekunden befinden sich die Personen in den Treppenhäusern. Ein Selbsttest in einem Büro mit vier Mitarbeitern hat ergeben, dass nach 14,5 Sekunden alle vier Mitarbeiter auf dem Flur waren. Dabei haben sie sogar ihre persönlichen Gegenstände mitgenommen.

Im Simulationsprogramm werden die Eigenschaften und die Geschwindigkeit der Fußgänger nach [40] angenommen. Die verwendeten Parameter wurden bereits bei der Einführung in das Simulationsprogramm „CrowdControl“ erläutert. Als Randbedingung wird festgelegt, dass sich die Personen auf den Treppen im Vergleich zur Ebene mit der halben Geschwindigkeit fortbewegen. Zwischen den Sitzreihen im Hörsaal wird die Geschwindigkeit durch den Faktor 0.2 reduziert, da die Studenten in den Gängen durch die heruntergeklappten Stühle behindert werden.

Es wird davon ausgegangen, dass sich die Personen nach Verlassen des Gebäudes von den Notausgängen entfernen und den Fluchtweg nicht versperren und blockieren. In der Realität muss das nicht grundsätzlich der Fall sein. Es sollte aber von geschultem Personal dafür gesorgt werden, dass die Flüchtenden die Ausgänge freimachen.

4.7. Simulierte Szenarien

Mit „CrowdControl“ werden die Quellen, Ziele, Wege und Hindernisse für die Fußgängersimulation in den Grundriss des Erdgeschosses der Fakultät eingezeichnet.

Für das Fallbeispiel der TU München muss die Verteilung der Personenquellen im Gebäude festgelegt werden. Sie stellen die Ausgangssituation zu einem Zeitpunkt „X“ dar, an dem die Evakuierung selbst, also die Bewegung zum Verlassen des Gebäudes, beginnt.

Als erster Schritt wird das komplexe Erdgeschoss, anhand folgender Abbildung, in einzelne Bereiche unterteilt:



Abbildung 58: Verteilung der Quellen und Ziele.

Die orange hinterlegten Flächen sind Quellen. In diesen wird zu einem bestimmten Zeitpunkt oder in definierten Zeitschritten durch das Programm eine bestimmte Anzahl von Personen erzeugt. Rote Punkte kennzeichnen die Einzelquellen, die ebenfalls eine vorgegebene Anzahl von Fußgängern zu einer bestimmten Zeit erstellen.

Ziele werden durch blau hinterlegte Flächen eingezeichnet, die sich direkt hinter jedem möglichen Notausgang befinden.

Alle Wände des Gebäudes, die Messestände sowie sämtliche sonstigen Objekte, die sich während der Messe im Gebäude befanden, werden als Hindernisse markiert.

Folgende Festlegungen wurden als Randbedingungen definiert:

- Personen in den Fluren werden nach 15 Sekunden erzeugt.
- Personen auf den Treppen werden nach 20 Sekunden erzeugt.
- Einzelquellen auf den Treppen erzeugen 1 Person pro Sekunde.
- In allen weiteren Quellen (Hörsäle, Zeichensäle, Magistrale) werden die Personen zum Zeitpunkt „0“ erzeugt.

Wie die Personen innerhalb einer Quelle angeordnet sind, wird vom Programm festgelegt und ist gleichverteilt.

In einem zweiten Schritt müssen den Quellen ihre Eigenschaften unter Einbezug der Randbedingungen zugewiesen werden, das heißt, wann sie wie viele Personen erzeugen sollen.

Die durchgeführte Auszählung ist Grundlage für eine erste Abschätzung der Personen im Gebäude. Als Maximalwert der Besucher, die sich zu einem Zeitpunkt im Gebäude befanden, wurden 3510 Personen gezählt. Da wahrscheinlich zusätzlich Besucher das Gebäude über die seitlichen Eingänge betreten haben, wird diese Zahl auf 4000 Personen erhöht. Die Anzahl der Personen muss auf die Teilquellen verteilt werden.

Da in der Simulation ein „Worst Case“ Szenario der Gebäudeevakuierung betrachtet werden soll, wird von der Belegung aller Hörsäle, Zeichensäle, Büros sowie der Lehrstühle ausgegangen. Deshalb werden die Personen zuerst auf die in Abbildung 58 nicht nummerierten Gebäudeteile aufgeteilt: Flure, Treppenhäuser, Cafeteria, Hörsäle und Zeichensäle. Die angenommene Verteilung kann Tabelle 4 entnommen werden. Alle gesammelten Informationen aus der Datenerfassung werden hierfür verwendet. Die Verteilung beginnt beim Pförtnerbüro links neben dem Haupteingang, verläuft gegen den Uhrzeigersinn durch das Gebäude und endet am Hörsaal MW 0001.

Tabelle 4: Maximalbelegung.
 CD: Maximalbelegung.pdf

Fakultät für Maschinenwesen		
	Personen	
	Bezeichnung	
Hof 0 (links)	Pförtner	2
	Bibliothek Treppe	100
	Prüfungsbüro	10
	Dekanat	4
	Studienbüro	10
	IKOM - Büro	6
Hof 2	Zeichensaal	20
	Treppe	20
	Zeichensaal	10
	Treppe	20
	Lehrstuhl Flur	32
	Lehrstuhl Treppenhaus	96
	Zeichensaal	5
Hof 4	Ludwig - Prandtl - Hörsaal	80
	Treppe	20
	Lehrstuhl Flur	34
	Lehrstuhl Treppenhaus	104
	Treppe	20
Hof 6	Zeichensaal	20
	Treppe	20
	Zeichensaal	5
	Treppe	20
	Lehrstuhl Flur	57
	Lehrstuhl Treppenhaus	172
Hof 8	Copy - Shop	3
	Hörsaal MW 1801 Treppe 1	200
	Hörsaal MW 1801 Treppe 2	200
	Flur	5
	Cafeteria	50
Hof 7	Lehrstuhl Flur	31
	Lehrstuhl Treppenhaus	94
Hof 5	Zeichensaal	20
	Treppe	20
	Zeichensaal	5
	Lehrstuhl Flur	60
	Lehrstuhl Treppenhaus	179

Hof 3	Egbert - von - Hoyer Hörsaal	150
	Treppe	20
	Zeichensaal	10
	Lehrstuhl Flur	34
	Lehrstuhl Treppenhaus	103
Hof 1	Zeichensaal	15
	Treppe	20
	Zeichensaal	5
	Lehrstuhl Flur	35
	Lehrstuhl Treppenhaus	105
Hof 0 (rechts)	IKOM - Büro	15
	MW 2001 Treppe Magistrale 1	300
	MW 2001 Treppe Magistrale 2	300
	MW 2001 Treppe hinten 1	147
	MW 2001 Treppe hinten 2	147
	MW 0001	700
Gesamt		3860

Bei einer Simulation mit 4000 Personen im Gebäude, würden sich noch 140 Personen in der Magistrale der Fakultät befinden.

Die Verteilung der Fußgänger sieht für diesen Fall folgendermaßen aus:



Abbildung 59: Verteilung 4000 Personen.

Bei einem Vergleich mit den Videodaten und Fotos der Veranstaltung ist vor allem in Hof 1 zu erkennen, dass die simulierte Personenverteilung in der Magistrale nicht mit der Realität übereinstimmt, sondern sich weitaus mehr Personen dort befanden.



Abbildung 60: Detail Hof 1.



Abbildung 61: Ausschnitt Video Hof 1.



Abbildung 62: Foto Magistrale [35].

Da auch für die Magistrale realistische Ergebnisse mit der Simulation erzielt werden sollen, wird die Personenanzahl stufenweise erhöht. Erst bei 5000 Menschen im Gebäude wird die Dichte der Besucher in der Magistrale wirklichkeitsgetreu.

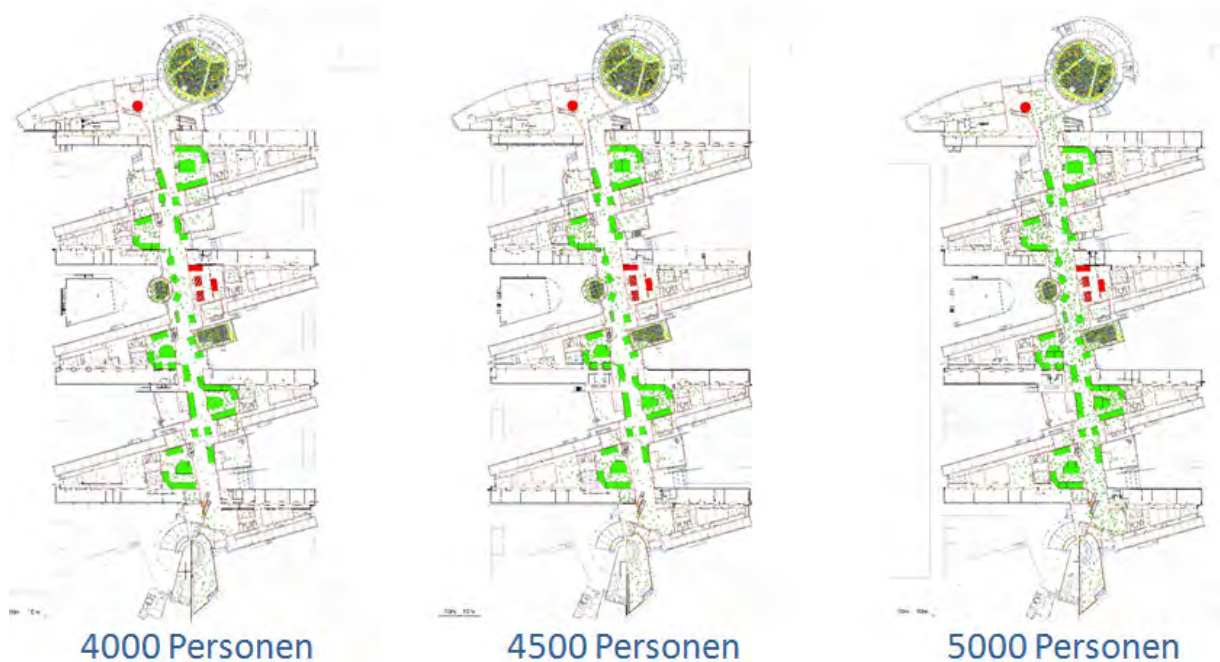


Abbildung 63: Vergleich Personenanzahl.

In Absprache mit der Feuerwehr und dem Hochschulreferat 6 wurde im Folgenden eine Simulation mit 5000 Personen durchgeführt. Um die Ergebnisse noch deutlicher zu veranschaulichen, wurde ein zusätzlicher Versuch mit 5500 Personen simuliert.

Damit müssen bei der Simulation mit 5000 Fußgängern noch 1140 Personen auf die Quellen in der Magistrale verteilt werden, bei der Simulation mit 5500 noch 1640 Personen.

Zum Schluss werden die Wege der verschiedenen Fußgänger definiert. Dabei stellt sich die Frage, welche Personen welchen Ausgang benutzen. Laut Auszählung haben ungefähr 2/3 der gezählten Personen das Gebäude über den Haupteingang sowie 1/3 über den Westeingang betreten und verlassen. Circa 10.61 Prozent aller Personen verließen das Gebäude über alternative Ausgänge.

Es ist unklar, wie viele Personen die Seitenausgänge kennen und in einem Notfall benutzen würden. Im Kapitel „Grundlagen der Rettung von Personen“ wurde erläutert, dass die Mehrheit aller Menschen während dem Verlassen eines Gebäudes den Ausgang benutzt, von dem aus sie das Gebäude betreten hat. Hinzu kommt, dass viele Besucher nicht ausreichend mit dem Gebäude und den vorhandenen Notausgängen vertraut sind.

Deshalb wurden die beiden Simulationen noch einmal in drei weitere unterteilt. Die Unterteilung erfolgte prozentual nach der Anzahl der Fußgänger in der Magistrale, die entweder die beiden Hauptausgänge oder die Seitenausgänge benutzt haben.

- 30 Prozent benutzen die Seitenausgänge, 70 Prozent die beiden Hauptausgänge
- 20 Prozent benutzen die Seitenausgänge, 80 Prozent die beiden Hauptausgänge
- 10 Prozent benutzen die Seitenausgänge, 90 Prozent die beiden Hauptausgänge

Das weitere Vorgehen der Simulation wird im Folgenden anhand der Verteilung 30/70 exemplarisch veranschaulicht. Die Daten aller Simulationen und jeweils ein Video befinden sich auf der beigefügten CD.

Die restlichen Personen wurden unter Einbeziehung der prozentualen Verteilung auf die nummerierten Quellen in der Magistrale verteilt. Die Magistrale wurde in einzelne Teilquellen unterteilt, da eine Gesamtquelle die Simulation durch künstliche Staus verfälschen würde. Diese Staus würden entstehen, wenn durch die Modellierung Personen, die bereits direkt vor dem Hauptausgang stehen, das Gebäude durch den Westausgang verlassen und umgekehrt. Sie behindern sich dann in der Mitte des Gebäudes gegenseitig und erzeugen einen unrealistischen Stau.

Darüber hinaus wurden jeder Quelle die nächstgelegenen und sinnvollen Ziele zugeordnet. Die Fußgänger wurden dabei prozentual auf die verschiedenen Ausgänge verteilt. Die konkrete Verteilung für eine Simulation mit 5000 Personen (30/70) ist in Tabelle 5 ersichtlich. Die Personen in der Magistrale flüchten aus den beiden Hauptausgängen und den jeweils nächsten Seitenausgängen. Ebenso verhält es sich mit den Hörsälen. Die Mitarbeiter der Lehrstühle verlassen das Gebäude zum Teil durch die Hinterausgänge der Gebäudeteile, aber auch zum Teil durch die Magistrale.

Tabelle 5: Personenverteilung Magistrale.
 CD: Personenverteilung_Magistrale_5000_30/70.pdf

Simulation 5000 (30/70)								
Quelle	Anzahl der Personen					Prozent		
	Gesamt	Seitenausgänge	Zwischen	Hauptausgang	Westausgang	Seitenausgänge	Hauptausgang	Westausgang
1	35	15	20	20	0	43	57	0
2	35	5	30	30	0	14	86	0
3	20	15	5	5	0	75	25	0
4	40	20	20	20	0	50	50	0
5	30	10	20	20	0	33	67	0
6	40	10	30	30	0	25	75	0
7	45	15	30	30	0	33	67	0
8	50	21	29	29	0	42	58	0
9	50	21	29	29	0	42	58	0
10	50	24	26	26	0	48	52	0
11	50	24	26	22	4	48	44	8
12	50	21	29	21	8	42	42	16
13	45	15	30	20	10	34	44	22
14	45	10	35	5	30	22	11	67
15	45	15	30	0	30	33	0	67
16	45	10	35	0	35	22	0	78
17	30	10	20	0	20	33	0	67
18	20	10	10	0	10	50	0	50
19	5	5	0	0	0	100	0	0
20	20	10	10	0	10	50	0	50
21	10	1	9	0	9	10	0	90
H1	70	10	60	60	0	14	86	0
H2	70	10	60	60	0	14	86	0
H4	70	10	60	50	10	14	71	14
H5	70	10	60	30	30	14	43	43
H6	70	10	60	0	60	14	0	86
H3	30	5	25	25	0	17	83	0
Summe	1140	342	798	532	266	30	47	23

Waren alle Daten in das Programm eingearbeitet, ergab sich die endgültige Verteilung der Fußgänger im Gebäude, wie in der nachfolgenden Abbildung ersichtlich:

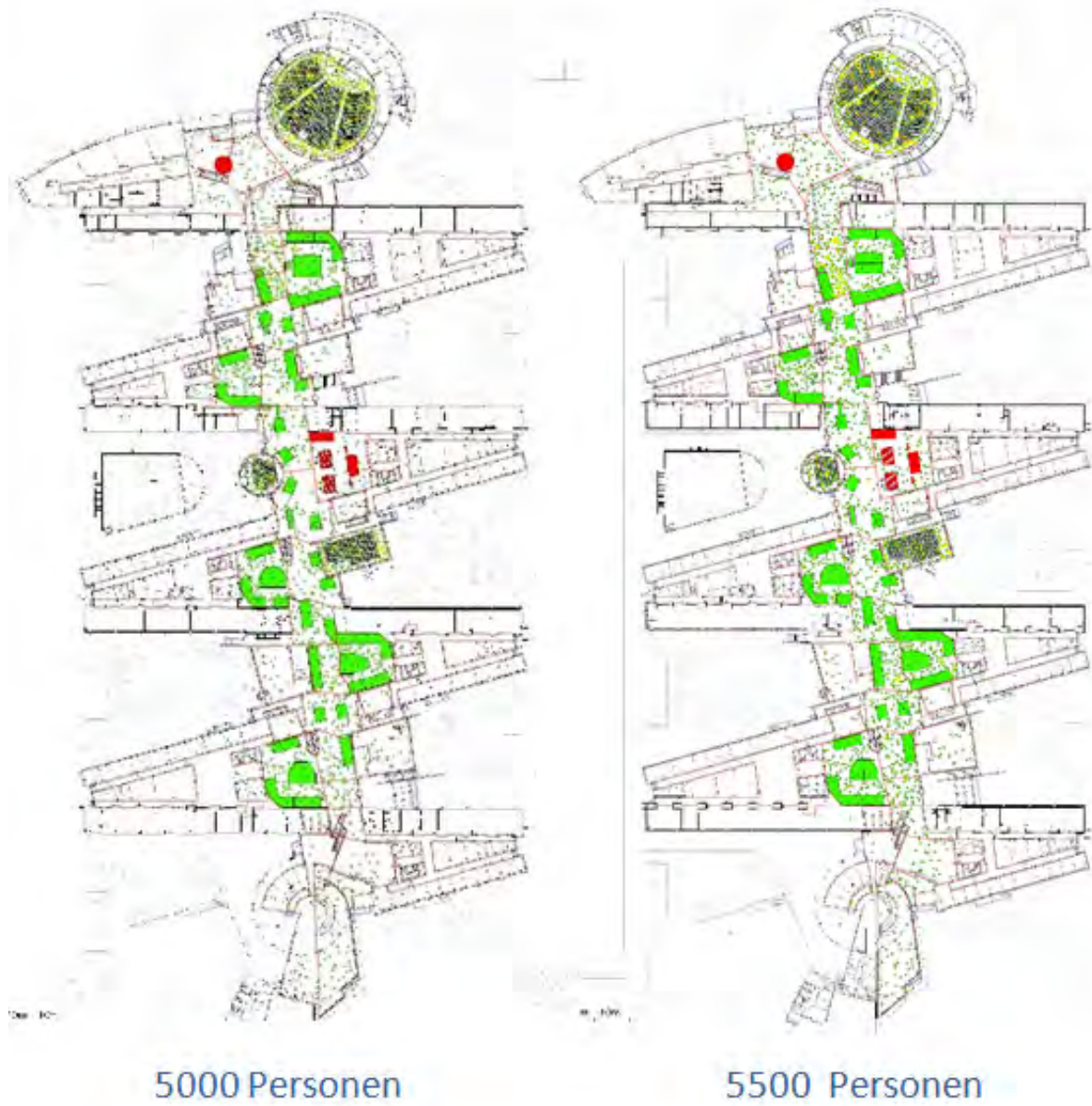


Abbildung 64: Personenverteilung 5000 und 5500.

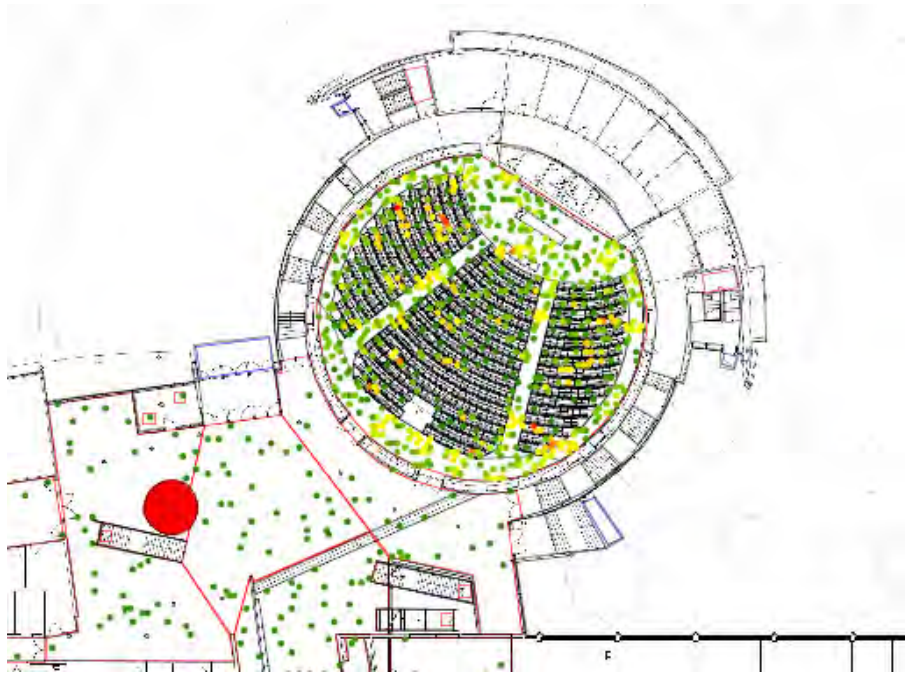


Abbildung 65: Simulation 5000 Detail MW 0001.



Abbildung 66: Simulation 5000 Detail Hof 1.

Die Videos aller durchgeführten Simulationen sind auf der CD hinterlegt. Im Anschluss erfolgte die Untersuchung und Auswertung. Mit dem Visualisierungsprogramm „CrowdVis“ konnten Messdaten ausgelesen und kritische Stellen identifiziert werden.

5. Ergebnisse der Simulation

Die Auswertung der Simulation kann anhand unterschiedlicher Kriterien durchgeführt werden. Mittels einer visuellen Auswertung können kritische Stellen identifiziert und der Ablauf der Simulation beurteilt werden. Die Dauer der Evakuierung und die Messgrößen für verschiedene Bereiche (Anzahl der Personen, Personendichte, Geschwindigkeit der Personen) können ebenfalls bestimmt werden.

5.1. Dauer der Evakuierung

Tabelle 6: Dauer der Evakuierung.

Personen	30/70	20/80	10/90
5000	418,00 s	415,00 s	418,00 s
5500	417,07 s	416,02 s	414,05 s

In allen Varianten des durchgeführten Fallbeispiels dauert eine Evakuierung des gesamten Gebäudes circa 420 Sekunden. Das entspricht einer Evakuierungszeit t_m von 7 Minuten.

Für die Evakuierungszeit macht es fast keinen Unterschied, ob sich 5000 oder 5500 Personen im Gebäude befinden, da t_m maßgeblich von der benötigten Zeit für die Evakuierung des Hörsaals MW 2001 bestimmt wird, welcher nur über Treppen evakuiert werden kann. Ein Teil der Personen, die sich in diesem Hörsaal befinden, verlassen das Gebäude in der Simulation erst am Ende.

Die geringen Abweichungen von t_m erklären sich aus der prozentual unterschiedlichen Wahl der Ziele der einzelnen Fußgänger. Dadurch weichen der Charakter der gebildeten Staus, die Geschwindigkeit der Personen und die daraus resultierende Evakuierungszeit minimal voneinander ab.

Andere Messgrößen werden von der höheren Personenzahl stärker beeinflusst. Mit Hilfe der visuellen Auswertung wurden sinnvolle Orte in der Magistrale bestimmt, an denen diese Daten aus dem Programm ausgelesen wurden.

5.2. Visuelle Auswertung

Um einen kurzen Eindruck der optischen Auswertung zu verschaffen, ist hier lediglich die Simulation mit 5000 Personen (30/70) als Ausschnitt zu verschiedenen Zeitpunkten in den Abbildungen 67 bis 71 dargestellt. Für ein besseres Verständnis können die Videos aller Simulationen auf der beigefügten CD betrachtet werden.

Zeit: 0 Sekunden



Abbildung 67: Simulation 5000 (30/70) - Zeitpunkt 0 Sekunden.

Zeit: 30 Sekunden



Abbildung 68: Simulation 5000 (30/70) - Zeitpunkt 30 Sekunden.

Zeit: 60 Sekunden



Abbildung 69: Simulation 5000 (30/70) - Zeitpunkt 60 Sekunden.

Zeit: 120 Sekunden

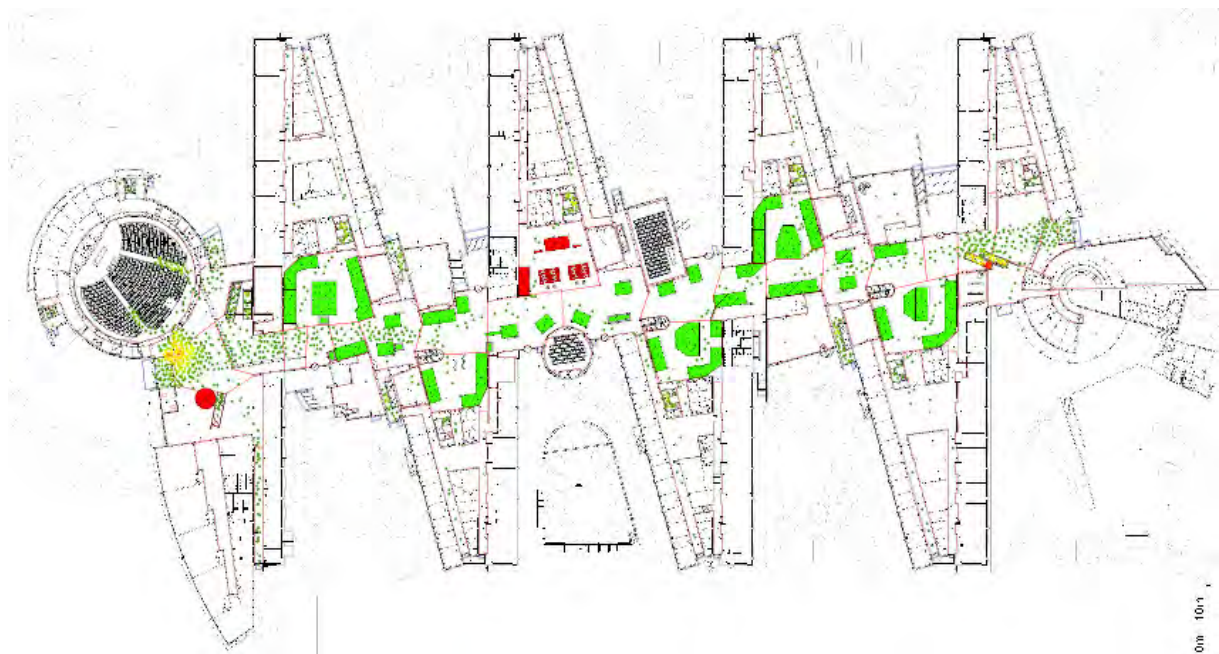


Abbildung 70: Simulation 5000 (30/70) - Zeitpunkt 120 Sekunden.

Zeit 180 Sekunden

Abbildung 71: Simulation 5000 (30/70) - Zeitpunkt 180 Sekunden.

Während der visuellen Auswertung konnten fünf wesentliche kritische Stellen der Evakuierung identifiziert werden. Diese sind der Hauptausgang, der Westausgang und drei Engstellen innerhalb der Magistrale. Diese sind in der nachfolgenden Abbildung markiert. Die Engstellen in der Magistrale werden im Folgenden von oben beginnend von 1 bis 3 nummeriert.

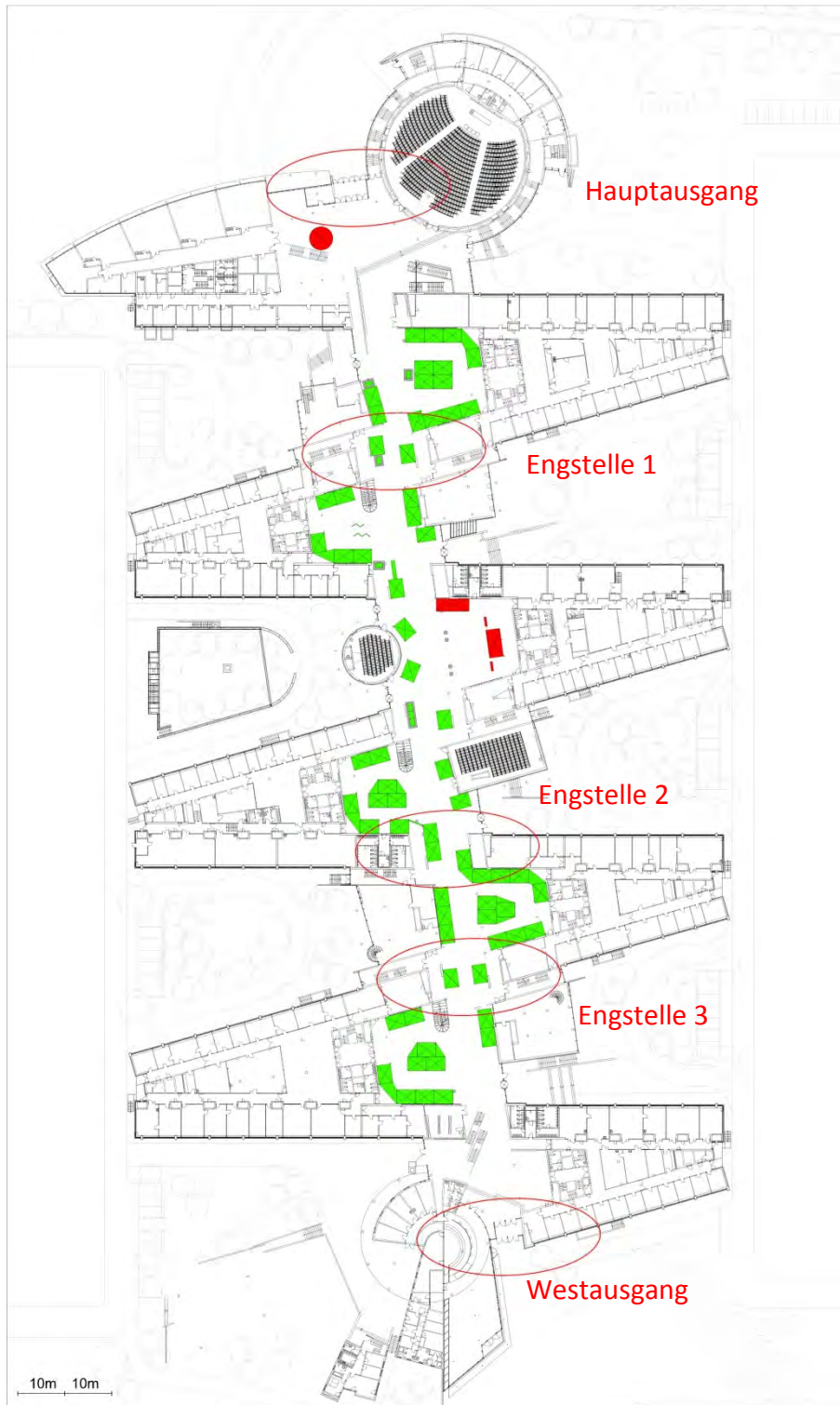


Abbildung 72: Kritische Stellen.

An dieser Stelle wird beispielhaft die genaue Auswertung des Hauptausgangs und der Engstelle 2 durchgeführt. Bei Bedarf können die anderen Stellen nach dem gleichen Schema ausgewertet werden.

Am Hauptausgang treffen die Personen, die aus der Magistrale evakuiert werden, auf die Menschen, die aus den beiden großen Hörsälen flüchten. Dies führt dort schnell zu Gedränge. Die Bildung dieses Staus kann in den Abbildungen 67 bis 71 betrachtet werden.

An der Engstelle 2 wird durch die Messestände die Wegbreite der Fußgänger auf 3.25 m begrenzt. Zwischen Hof 4 und 5 kommt es zum Stau. Abbildung 73 bis 75 zeigen dies in der Vergrößerung für verschiedene Zeitschritte.



Abbildung 73: Simulation 5000 (30/70) Engstelle 2 - Zeitpunkt 10 Sekunden.



Abbildung 74: Simulation 5000 (30/70) Engstelle 2 - Zeitpunkt 20 Sekunden.



Abbildung 75: Simulation 5000 (30/70) Engstelle 2 - Zeitpunkt 30 Sekunden.

Abbildung 76 und 77 zeigen diese Engstelle als Ausschnitt aus der Simulation mit 5500 Personen. Hier ist die Problematik noch weitaus deutlicher erkennbar.

Ist der Platzbedarf einer Person ausreichend, sind die Fußgänger in der Simulation grün gefärbt. Je enger eine Situation wird, um so mehr färben sich die Fußgänger gelb oder sogar rot und verlangsamen ihre Geschwindigkeit. An dieser Stelle entstehen sogar einzelne rote Punkte, das heißt die betreffende Person ist eingeeengt und kann sich aufgrund der anderen Fußgänger und der Hindernisse kaum mehr fortbewegen.



Abbildung 76: Simulation 5500 (30/70) Engstelle 2 - Zeitpunkt 40 Sekunden.



Abbildung 77: Simulation 5500 (10/90) Engstelle 2 - Zeitpunkt 40 Sekunden.

Bereits nach 40 Sekunden hat sich an der Engstelle 2 ein großes Gedränge ausgebildet. Die Breite des Fluchtweges zwischen den beiden betroffenen Ständen reicht für die große Anzahl der Personen, die in dem Moment über diesen Weg das Gebäude verlassen wollen, nicht aus. Hinzu kommen die Studenten, die aus dem Hörsaal MW 0350, oberhalb der Engstelle evakuiert werden.

Damit wird der Hauptfluchtweg durch die Magistrale zwischen Hof 4 und Hof 5 von den flüchtenden Personen blockiert. Fußgänger, die sich auf diese Engstelle zu bewegen, könnten ihre Bewegungsrichtung und ihr Ziel ändern, das heißt sie suchen nach einem anderen Notausgang. Unter den Personen, die sich direkt in dieser Engstelle befinden, könnten unkontrolliert Angst oder Panik ausbrechen, was die Situation noch kritisch machen würde.

5.3. Messdaten

Um derartige Engstellen genauer zu analysieren, wurden die entsprechenden Messgrößen ermittelt und die dazugehörigen Diagramme erstellt.

An dieser Stelle soll erneut die Simulation mit 5000 Personen mit der prozentualen Verteilung 30/70 betrachtet und zum Teil mit der Simulation 5500 (30/70) verglichen werden. Der Schwerpunkt wurde wieder auf die beiden kritischen Stellen „Haupteingang“ und „Engstelle 2“ gelegt.

Ausgewertet wurden jeweils die in der Abbildung 78 und 79 gekennzeichneten rot hinterlegten Flächen. Das untersuchte Gebiet umfasst am Haupteingang 27.81 m² und an der Engstelle 13.00 m².

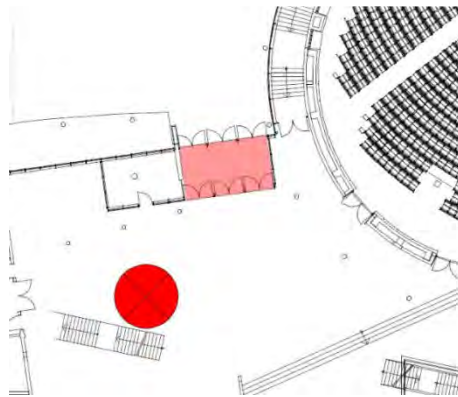


Abbildung 78: Fläche Haupteingang.

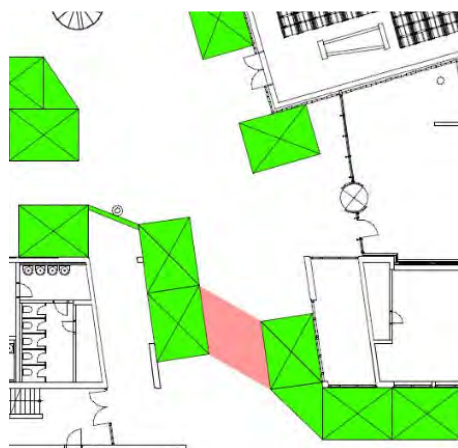


Abbildung 79: Fläche Engstelle 2.

Folgende Diagramme konnten für die beiden Bereiche direkt aus der Simulation ausgelesen werden:

Anzahl der Personen

Das Diagramm „Population“ ermittelt die Anzahl der Personen, die sich zu einem bestimmten Zeitpunkt im untersuchten Gebiet befinden. Die meisten Personen bewegten sich am Hauptaussgang bis zum Zeitpunkt „200“ durch das Gebiet.

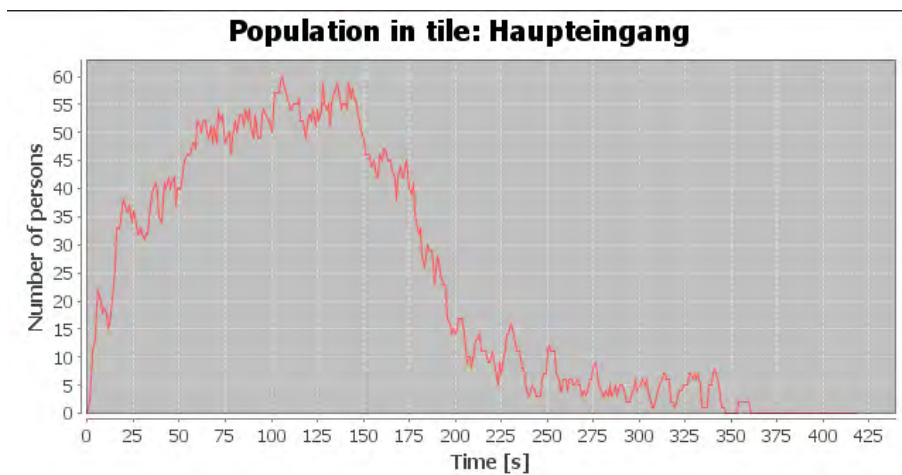


Abbildung 80: Simulation 5000 (30/70) - Population Haupteingang.

Eine hohe Anzahl von Personen durchlief die Engstelle 2 bis zum Zeitpunkt „50“. Das spiegelte sich bereits in der visuellen Auswertung wieder. Nach dem Zeitpunkt „50“ befanden sich jeweils weniger Personen in diesem Bereich.

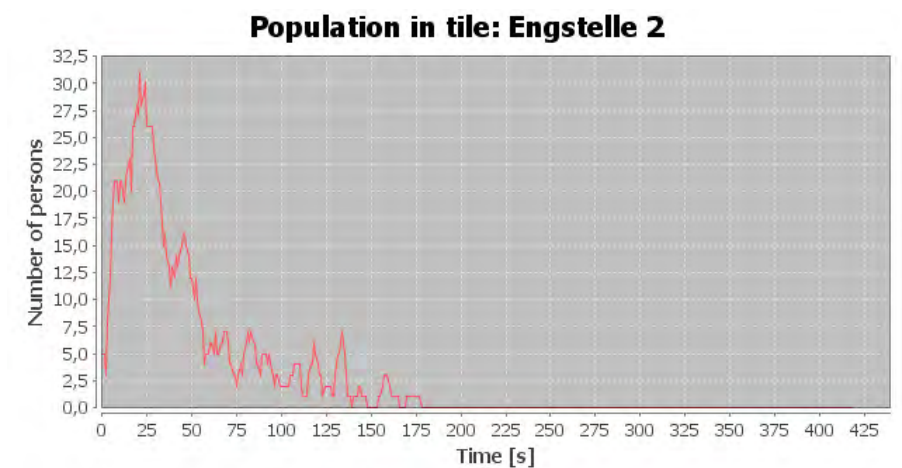


Abbildung 81: Simulation 5000 (30/70) - Population Engstelle 2.

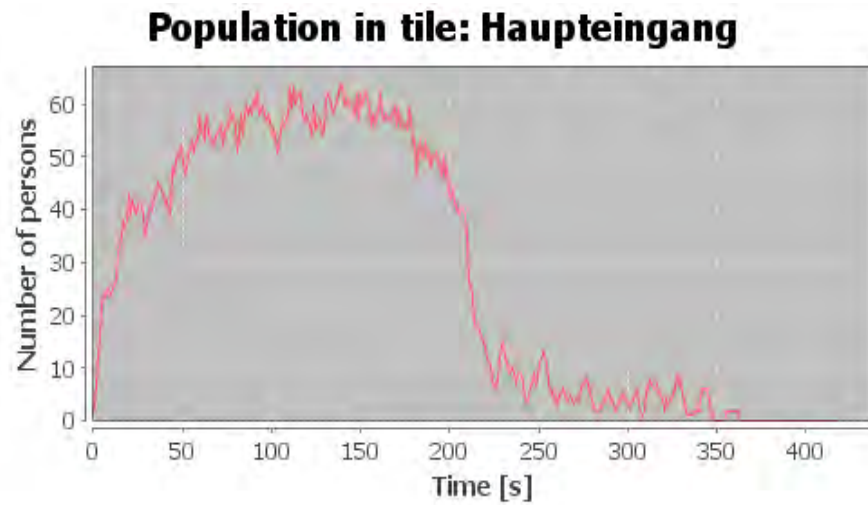


Abbildung 82: Simulation 5500 (30/70) - Population Haupteingang.

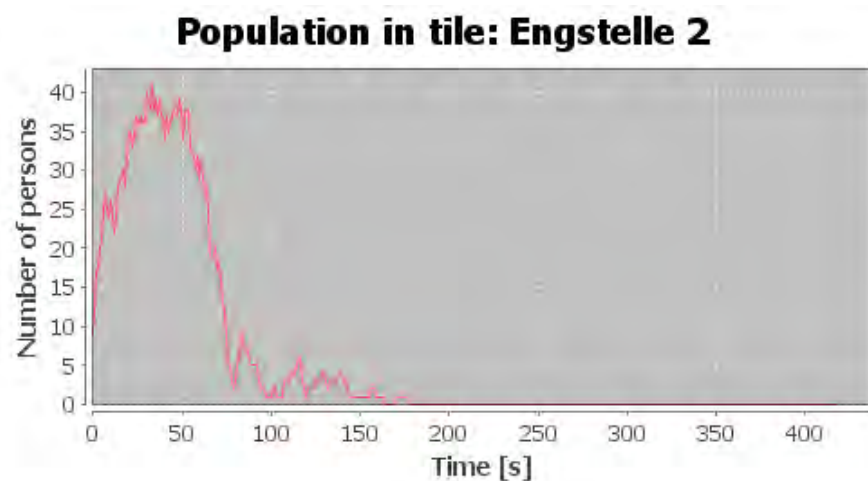


Abbildung 83: Simulation 5500 (30/70) - Engstelle 2.

Die Diagramme für eine Simulation mit 5500 Fußgängern weichen nicht maßgeblich von denen der Simulation mit 5000 Personen ab. Erkennbar ist jedoch, dass am Hauptaussgang die Kurve zwischen dem Zeitpunkt „0“ und „200“ etwas breiter ist als zuvor. Das heißt, hier durchliefen diesmal mehr Personen den betroffenen Bereich. An der Engstelle 2 dauert es sogar bis zum Zeitpunkt „150“, bis die Kurve abnimmt. Das bedeutet, im Vergleich zur Simulation mit 5000 Personen dauerte es an dieser Engstelle es etwas länger, bis der größte Teil der Fußgänger das Gebiet durchlaufen hatte und sich in Richtung der Notausgänge bewegen konnte.

Personendichte

Welche Personendichte in einem Bereich herrscht, kann aus dem Diagramm „Density“ bestimmt werden. Aus den Graphen können ähnliche Phänomene abgeleitet werden, wie aus den Graphen der Personenanzahl.

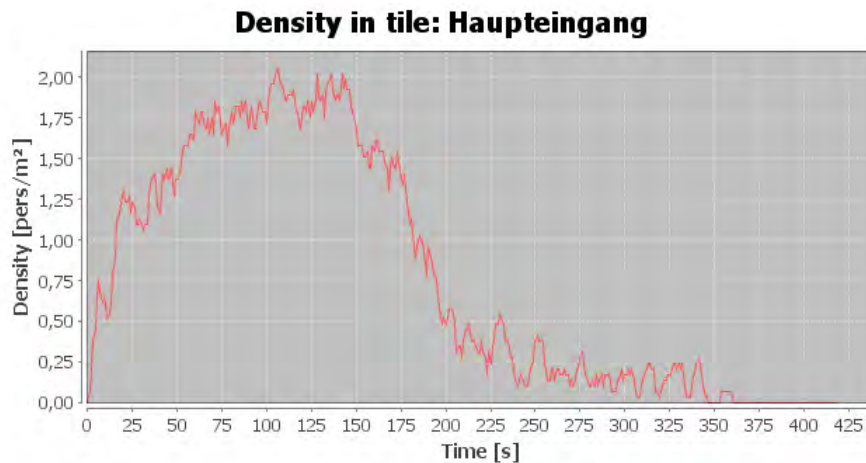


Abbildung 84: Simulation 5000 (30/70) - Density Haupteingang.

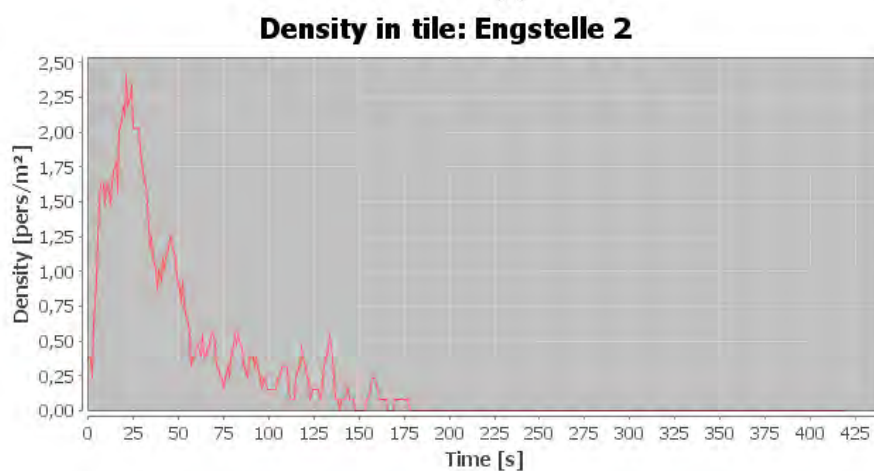


Abbildung 85: Simulation 5000 (30/70) - Density Engstelle 2.

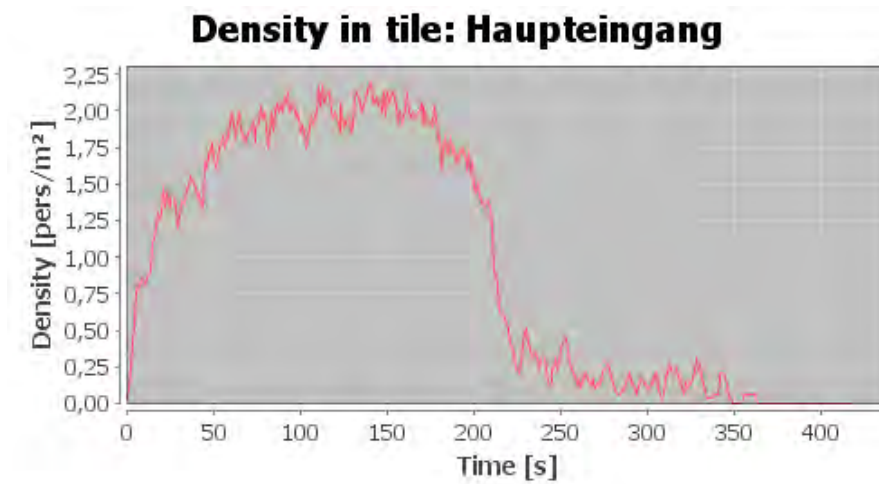


Abbildung 86: Simulation 5500 (30/70) - Density Haupteingang.

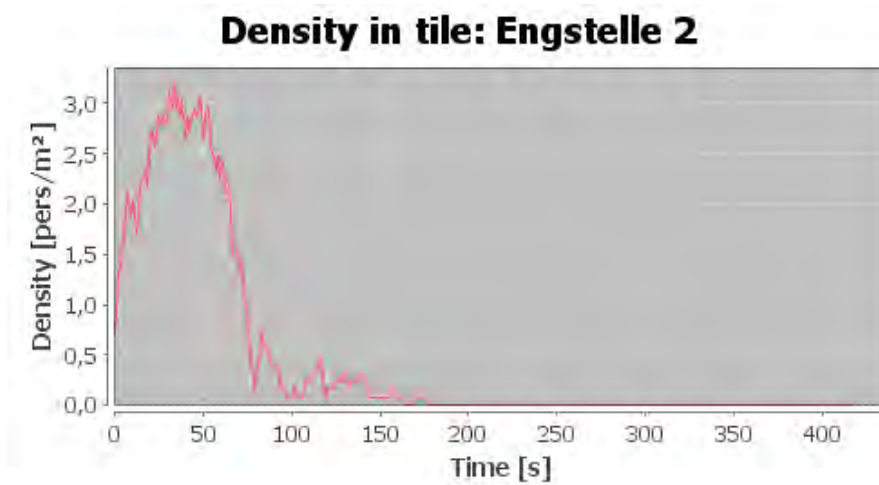


Abbildung 87: Simulation 5500 (30/70) - Density Engstelle 2.

Geschwindigkeitsverteilung

Mit der Abbildung „Velocity“ kann sogar die Verteilung der Geschwindigkeit der einzelnen Fußgänger nachvollzogen werden. Das Diagramm zeigt, wie viel Prozent der Fußgänger sich zu welcher Zeit mit einer bestimmten Geschwindigkeit bewegen. Das Simulationsprogramm legt die Geschwindigkeitsverteilung zum Teil fest, um die unterschiedlichen Eigenschaften der Personen zu simulieren. Teilweise wurde die Geschwindigkeit aber auch durch die entstandene Enge in einem bestimmten Bereich beeinflusst.

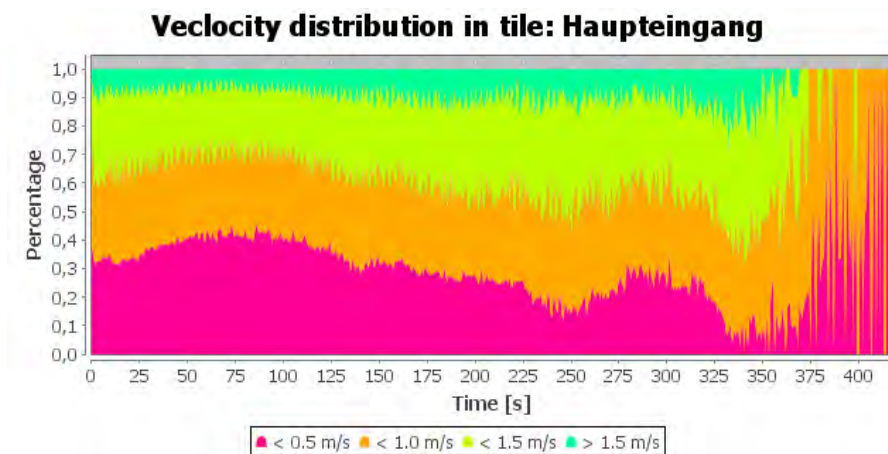


Abbildung 88: Geschwindigkeit Haupteingang.

Bei beiden kritischen Stellen nahm die Geschwindigkeit der Personen zu Beginn der Simulation zunächst ab, da sich hier eine große Personenanzahl schnell zu den Zielen bewegt hat. Blockierten sich Fußgänger gegenseitig, wurden sie also langsamer. Mit abnehmender Personenanzahl, die sich durch den entsprechenden Bereich bewegte, nahm die Geschwindigkeit wieder etwas zu. Die größten Geschwindigkeiten wurden im zweiten Teil der Simulation erreicht, als die Fußgänger sich weniger gegenseitig behinderten. Am Ende der Simulation bewegten sich größtenteils nur noch die langsamen Fußgänger durch die Magistrale, was in den Diagrammen erkennbar ist.

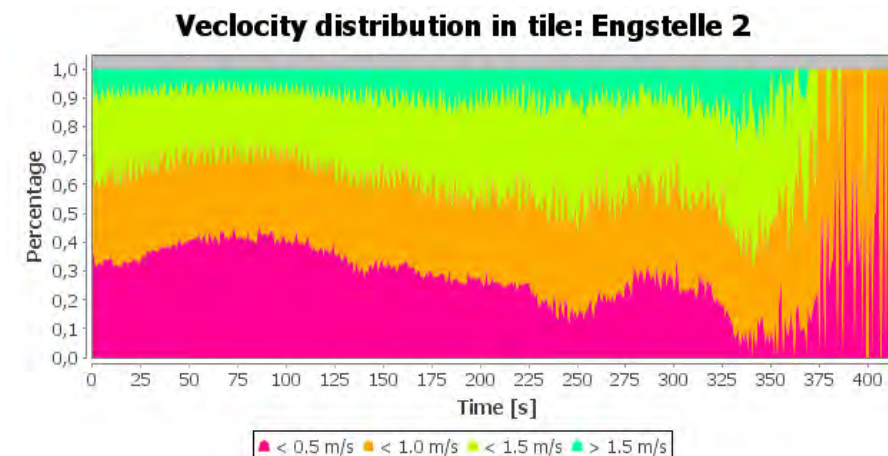


Abbildung 89: Geschwindigkeit Engstelle 2.

Zudem können die Messwerte für die unterschiedlichen Simulationen zu verschiedenen Zeiten aus folgenden Tabellen entnommen werden.

Tabelle Haupteingang

Tabelle 7: Simulation 5000 Messwerte Haupteingang.

Fläche [m ²]	Haupteingang					
27,81	5000 Personen					
	30/70		20/80		10/90	
Zeit [s]	Anzahl [Personen]	Dichte [Personen/m ²]	Anzahl [Personen]	Dichte [Personen/m ²]	Anzahl [Personen]	Dichte [Personen/m ²]
50	35	1,259	36	1,294	39	1,402
100	48	1,726	49	1,762	46	1,654
150	42	1,510	45	1,618	47	1,690
200	13	0,467	15	0,539	27	0,971

Tabelle 8: Simulation 5500 Messwerte Haupteingang.

Fläche [m ²]	Haupteingang					
27,81	5500 Personen					
	30/70		20/80		10/90	
Zeit [s]	Anzahl [Personen]	Dichte [Personen/m ²]	Anzahl [Personen]	Dichte [Personen/m ²]	Anzahl [Personen]	Dichte [Personen/m ²]
50	41	1,474	42	1,510	42	1,510
100	48	1,726	45	1,618	45	1,618
150	52	1,870	51	1,834	51	1,834
200	42	1,510	45	1,618	45	1,618

Rot hinterlegt sind die Zeitpunkte, zu denen sich die meisten Personen in einem Bereich befanden. In diesen Momenten war auch die Personendichte am höchsten. Je höher die Personendichte ist, umso eingeschränkter können sich die Fußgänger bewegen und umso höher ist das Risiko, dass bei den betroffenen Menschen Angst ausbricht.

Tabelle Engstelle 2

Tabelle 9: Simulation 5000 Messwerte Engstelle 2.

Fläche [m ²]	Engstelle 2					
13,00	5000 Personen					
	30/70		20/80		Okt 90	
Zeit [s]	Anzahl [Personen]	Dichte [Personen/m ²]	Anzahl [Personen]	Dichte [Personen/m ²]	Anzahl [Personen]	Dichte [Personen/m ²]
10	20	1,538	23	1,769	26	2,000
20	27	2,077	32	2,462	42	3,231
30	25	1,923	27	2,077	45	3,462
40	11	0,846	14	1,077	39	3,000
50	11	0,846	10	0,769	34	2,615
60	6	0,462	6	0,462	12	0,923
70	3	0,231	7	0,538	7	0,538
80	5	0,385	5	0,385	9	0,692

Tabelle 10: Simulation 5500 Messwerte Engstelle 2.

Fläche [m ²]	Engstelle 2					
13,00	5500 Personen					
	30/70		20/80		Okt 90	
Zeit [s]	Anzahl [Personen]	Dichte [Personen/m ²]	Anzahl [Personen]	Dichte [Personen/m ²]	Anzahl [Personen]	Dichte [Personen/m ²]
10	30	2,308	31	2,385	38	2,923
20	35	2,692	47	3,615	50	3,846
30	54	4,154	56	4,308	58	4,462
40	46	3,538	54	4,154	58	4,462
50	50	3,846	54	4,154	49	3,769
60	36	2,769	46	3,538	48	3,692
70	19	1,462	34	2,615	37	2,846
80	5	0,385	6	0,462	25	1,923

In der Engstelle 2 wird eine Personendichte von bis zu 4.462 Personen pro m² erreicht, wenn mit 5500 Personen simuliert wird. In Anbetracht dessen, dass die maximale Personendichte 6.6 Personen pro m² ist, war es an diesem Ort bereits verhältnismäßig eng.

Fundamentaldiagramm

Als Besonderheit kann das Simulationsprogramm das Fundamentaldiagramm des Fallbeispiels dem Diagramm nach [40] gegenüberstellen.

Es ist ersichtlich, dass mit zunehmender Personendichte der Durchfluss zunächst zunimmt. Unter spezifischem Durchfluss ist die Anzahl der Personen zu verstehen, die sich innerhalb einer Sekunde durch einen bestimmten Bereich bewegt. Ab einer entsprechenden Personendichte nimmt der spezifische Durchfluss wieder ab, da sich dann die Fußgänger gegenseitig behindern und weniger Fußgänger ein Gebiet durchlaufen können. Dieser Teil der Kurve entsteht im Fallbeispiel nicht, da eine dementsprechend hohe Personendichte nicht erreicht wird.

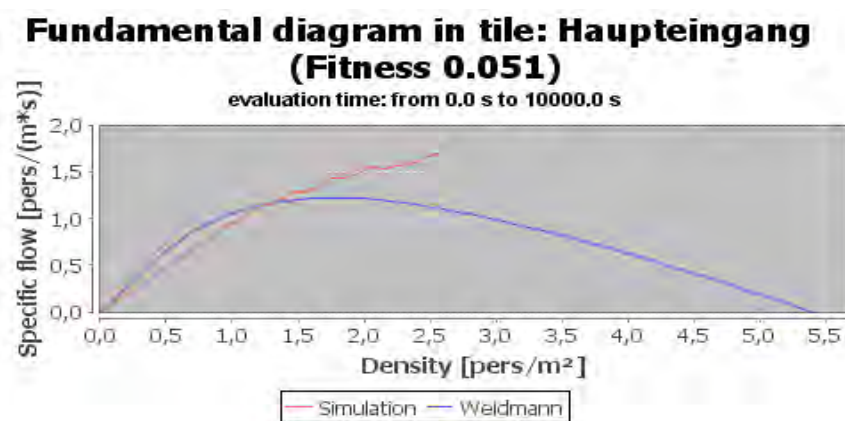


Abbildung 90: Simulation 5000 Fundamentales Diagramm Haupteingang.

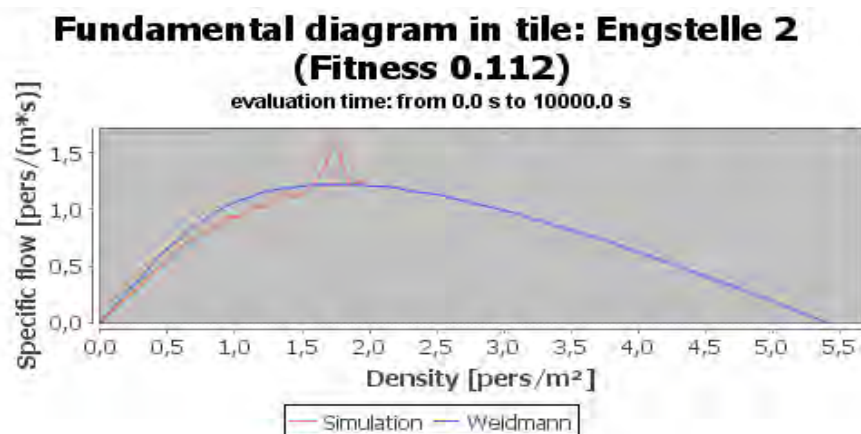


Abbildung 91: Simulation 5000 Fundamentales Diagramm Engstelle 2.

Abgesehen von den hier genannten Engstellen, ist eine Gesamteвакуierung in der Simulation weitestgehend unproblematisch in einer Zeit von 7 Minuten möglich. Die identifizierten Engstellen dienen trotzdem als Anhaltspunkte und müssen unbedingt weiter betrachtet und eventuell optimiert werden, denn in der Simulation kommt es bereits bei normalem Gehverhalten der Fußgänger zu einer großen Ansammlung von Personen in den betrachteten Gebieten. Entstehen in der Realität an diesen Stellen Angst oder gar Panik, könnten sich die Fußgänger komplett anders verhalten und die Staus damit weitaus verheerender werden.

5.4. Optimierungsansätze

Für einen möglichen Optimierungsansatz wird die Annahme getroffen, dass die Veranstaltung weiterhin in der jetzigen Form in der Fakultät für Maschinenwesen während des normalen Studienbetriebs durchgeführt wird.

Der Standplan der IKOM bietet nur noch wenig Kapazität im Gebäude. Betroffen sind drei Messestände. Ein Stand könnte an einer anderen Position aufgebaut werden und zwei Stände müssten aufgelöst werden, um die Engstellen zu entzerren. Die Verteilung der Firmen müsste dann entsprechend von den Veranstaltern angepasst werden.

Abbildung 92 zeigt den Grundriss mit einem Vorschlag für einen optimierten Standplan. Die grau hinterlegten Stände müssten aus der Magistrale entfernt werden. Der dunkelgrün hinterlegte Messestand könnte anstelle des Standes in Engstelle 3 hinzugefügt werden. Es ist jedoch noch vor Ort zu prüfen, dass dadurch keine notwendige Technik (Feuerlöscher, Brandmeldeanlagen, etc.) blockiert oder verstellt wird.

Die Simulation mit dem neuen Standplan läuft weitaus flüssiger, und kann für alle Varianten auf der beigefügten CD betrachtet werden.



Abbildung 92: Optimierung Standplan.

5.5. Konsequenzen

5.5.1. Gebäude

Da die Fakultät für Maschinenwesen bereits seit mehreren Jahren in Betrieb ist, erscheinen größere bauliche Veränderungen unwahrscheinlich, um das Gebäude speziell für Veranstaltungen ausulegen. Bauliche Maßnahmen, wie ein Vergrößern der Türen oder das Austauschen der Drehtüren, sind zwar prinzipiell möglich, müssten allerdings zunächst statisch und bautechnisch untersucht werden und sollten nur dann in Betracht gezogen werden, wenn alle anderen Möglichkeiten ausgeschöpft sind.

Die wichtigsten Maßnahmen sind die Wartung und Instandhaltung des Gebäudes, der notwendigen Haustechnik sowie der Flucht - und Rettungswege.

Ebenso wichtig ist die Kenntnis der Risiken und Gefahrenpotentiale in der Umgebung des Bauwerks, um auf alle möglichen Fälle vorbereitet zu sein.

5.5.2. Veranstalter

Voraussetzung für einen Veranstaltungsort nach der Versammlungsstättenverordnung sind unter anderem die entsprechenden Flucht - und Rettungswege, Sprinkleranlagen, eine stationäre Haustechnik, ausreichende Beleuchtungs - und Durchsageeinrichtungen mit einer unterbrechungsfreien Stromversorgung und ein genauer Bestuhlungsplan (vgl. [35]).

Die Fakultät für Maschinenwesen ist aus mehreren Gründen nicht als Versammlungsstätte ausgelegt. Dazu zählen zum Beispiel die fehlenden Sprinkleranlagen in der Magistrale. Um dennoch eine Veranstaltung in der Magistrale durchführen zu können, wird immer eine Veranstaltungsgenehmigung benötigt. Von der zuständigen Aufsichtsbehörde wird ein Auflagenbescheid erteilt, dessen Inhalte umgesetzt werden müssen.

Um für zusätzliche Sicherheit während der Messeveranstaltung zu sorgen, ist eine Schulung der Mitarbeiter der IKOM und der Fakultät als Notfallteam oder Notfallhelfer sinnvoll, die in einem Ernstfall wissen, was zu tun ist und die Koordination einer Evakuierung unterstützen.

Außerdem ist eine sorgfältige Planung der Veranstaltung notwendig. Vorhandene Gefahrenpotentiale und Sicherheitsmängel müssen bei den nächsten Veranstaltungen unbedingt beseitigt werden.

5.5.3. Feuerwehr

Im Vorfeld der Veranstaltungsgenehmigung gibt die Feuerwehr der TU München gegenüber dem Staatlichen Bauamt München 2 als Aufsichtsbehörde eine fachtechnische Stellungnahme ab.

Die erstellte Fußgängersimulation soll eine Planungs - und Bemessungsgrundlage für die maximale Personenanzahl bei Veranstaltungen im Fakultätsgebäude sein. Mittels der grafischen Darstellung wird ein subjektives Empfinden der verantwortlichen Planer in Bezug auf das Räumungsverhalten und die Besucherströme geweckt (vgl. [35]).

Die gewonnenen Erkenntnisse werden in die vorbereitende Planung der Veranstaltung einfließen und im Auflagenbescheid Berücksichtigung finden. So kann eine Entscheidung getroffen werden, ob der bisherige Zustand belassen werden kann, oder zusätzliche Maßnahmen umgesetzt werden müssen (vgl. [35]).

Aus der fachtechnischen Stellungnahme der Feuerwehr vom 31.05.2012 geht hervor, dass einige Maßnahmen bereits eingeleitet und Empfehlungen gegeben wurden (vgl.[38]).

Dazu gehören das Limitieren der Besucheranzahl, kein paralleler Lehrbetrieb während der Veranstaltung, das Freihalten der Rettungswege und Feuerwehrezufahrten, die Fluchtwegführung, die zusätzliche Kennzeichnung von Rettungswegen sowie die Materialeigenschaft B1 (schwerentflammbar) von Brandlasten in der Magistrale nach DIN 4102-2.

Damit wird nicht nur die Sicherheit der Veranstaltungsbesucher, sondern aller im Gebäude befindlichen Personen erhöht.

6. Schlusswort

Die Fußgängersimulation am Fallbeispiel der TU München ist sehr komplex und durch viele Annahmen bestimmt. Deshalb kann sie nur eine von unzähligen Varianten möglicher Evakuierungsszenarien darstellen.

Durch die Personenzählung, die Photographien und die Videodaten konnten die Verteilung und die Bewegung der Fußgänger während der IKOM 2012 dokumentiert und veranschaulicht werden. Von der Videodatenauswertung durch Walt Disney Imagineering R&D werden zusätzliche Ergebnisse über das Fußgängerverhalten erhofft. Das Verhalten der Menschenströme während einer Gebäuderäumung wurde durch die Simulation abgebildet.

Um noch mehr Erkenntnisse aus der Fußgängersimulation zu gewinnen, könnten alternative Situationen durchgeführt und Eingangsparameter verändert werden. Ferner kann die Simulation für die unterstützende Beurteilung anderer Veranstaltungen oder Gebäude der TU München angewendet werden.

Aus den bisher gewonnenen Erkenntnissen der Simulation für die Messeveranstaltung IKOM in der Fakultät für Maschinenwesen war es möglich, einige Schwachstellen zu identifizieren, an denen eine Verbesserung durchaus sinnvoll ist. Besonders für den Standplan sollte eine alternative Lösung gefunden werden.

Bei einer theoretischen Simulation mit 5000 Personen im gesamten Gebäude und damit 1140 Besuchern in der Magistrale können alle Personen nach 7 Minuten evakuiert werden. Dabei entstehen nur wenige Engstellen an den Ausgängen und zwischen den Messeständen. Ein kritischer Punkt ist der Hauptausgang, wo es durch das Aufeinandertreffen von flüchtenden Personen aus der Magistrale mit den Studenten aus dem Hörsaal eng wird. Hier wurde von einem Maximalfall der Belegung aller Hörsäle ausgegangen. Zunächst sollte geklärt werden, inwieweit alle Hörsäle des Gebäudes gleichzeitig genutzt werden. Zu welcher Zeit die Hörsäle vollbesetzt sind ist schwer vorherzusehen, da es nur wenige Lehrveranstaltungen mit Anwesenheitspflicht gibt.

Alle weiteren Flucht - und Rettungswege sowie Notausgänge sind laut der Simulation und den gesetzlichen Vorgaben für das Gebäude ausreichend bemessen. Es ist eine große Anzahl an seitlichen Notausgängen vorhanden. In einem Notfall kann es jedoch trotzdem zu Komplikationen an den Ausgängen kommen. In der Realität ist unklar, wie viele Besucher sich für welchen Ausgang entscheiden. Deshalb wurde in der Simulation eine prozentuale Verteilung berücksichtigt, die sich aus den festgelegten Randbedingungen ergeben hat.

Da das Bauwerk nicht als Versammlungsstätte ausgelegt ist, muss ein Auflagenbescheid der zuständigen Aufsichtsbehörde erfüllt werden. Zum Beispiel muss für alle Objekte, die sich während der Veranstaltung in der Magistrale befinden, der Brandschutznachweis B1 (schwerentflammbar) erbracht werden (vgl. [35]).

Alle offen gebliebenen Fragen, beispielsweise aus dem Kapitel „Risiken und Unsicherheiten“, müssen von der Aufsichtsbehörde und der Feuerwehr der TU München gemeinsam mit den Veranstaltern analysiert und geklärt werden.

Dazu gehören unter anderem die Brandschutznachweise der Messestände, die Ausführung der Infrastruktur (Versorgung mit Strom und Wasser) und die Lagerung der Gegenstände, die sich während dem Normalbetrieb in der Magistrale befinden.

Außerdem muss die notwendige Haustechnik (Feuerlöscher, Brandmeldeanlagen, etc.) auf einem aktuellen Stand gehalten sowie regelmäßig überprüft und verbessert werden. Zugänge für die Feuerwehr und Sicherheitskräfte müssen stets freigehalten werden.

Die parallele Nutzung von Hörsälen, Büros und der Magistrale als Veranstaltungsfläche stellt eine komplizierte Problematik dar. Ist trotz aller Maßnahmen die Sicherheit der Menschen im Gebäude nicht mehr zu gewährleisten, muss über eine Nutzungstrennung von Studienbetrieb und Veranstaltung als eine mögliche Lösung nachgedacht werden.

Auf viele weitere Faktoren, die einen Einfluss auf die Sicherheit haben, wurde in dieser Arbeit nicht eingegangen. Umgebungsbedingungen, wie fehlende Sprinkleranlagen oder zusätzliche Brandlasten innerhalb des Gebäudes, können in der Simulation nicht erfasst werden. Es konnte nur eine reine Abbildung der Fußgängerströme, die durch Hindernisse eingeschränkt sind, modelliert werden.

Eine endgültige Entscheidung über die zukünftigen Veranstaltungen in der Fakultät für Maschinenwesen obliegt allein der Aufsichtsbehörde und der Feuerwehr.

Das Karriereforum IKOM ist eine großartige Veranstaltung, in deren Durchführung die studentischen Organisatoren das ganze Jahr über viel Arbeit und Zeit investieren. Es ist eine einzigartige Gelegenheit für die Studenten, die Firmen hautnah kennen zu lernen und direkte Kontakte zu knüpfen. Außerdem ist die Messe mittlerweile ein Aushängeschild der TU München geworden. Es wäre wünschenswert, dies in Zukunft beizubehalten.

7. Literaturverzeichnis

- [1] KOLOSSEUM
http://www.roma-antiqua.de/antikes_rom/kolosseum/kolosseum/
Aufruf: 07.09.2012
- [2] A. C. Lazar:
MODELLE ZUR FUßGÄNGERSIMULATION
<http://www.moviebazaar.de/blog/data/05080301.pdf>
Aufruf: 12.08.2012
- [3] K. N. Pritzsche:
CHRONOLOGIE - SCHON TAUSENDE STERBEN BEI MASSEN PANIKEN
<http://www.faz.net/aktuell/gesellschaft/chronologie-schon-tausende-starben-bei-massenpaniken-11014596.html>
Aufruf: 12.08.2012
- [4] KATASTROPHE VON HEYSEL
http://de.wikipedia.org/wiki/Katastrophe_von_Heysel
Aufruf: 12.09.2012
- [5] THE LIST BLOG - TOP 10
http://www.listblog.com/top_ten_deadly_accident_disaster_history_list.html
Aufruf: 17.08.2012
- [6] REPKA
<http://www.repka-evakuierung.de/index.php?Site=Main>
Aufruf: 17.08.2012
- [7] SPIEGEL ONLINE - MEKKA
<http://www.spiegel.de/thema/mekka>
Aufruf: 07.09.2012
- [8] MASSEN PANIK
<http://de.wikipedia.org/wiki/Massenpanik>
Aufruf: 12.08.2012
- [9] F. Thomsen:
STERN
<http://www.stern.de/wissen/mensch/kopfwelten-zum-loveparade-drama-angst-ist-keine-panik-1586965.html>
Aufruf: 12.08.2012
- [10] WASHINGTONPOST
http://www.washingtonpost.com/national/images-from-911-and-the-aftermath/2011/09/08/gIQAx9hxEK_gallery.html#photo=11
Aufruf: 07.09.2012

- [11] BOMBENANSCHLAG 1993
http://de.wikipedia.org/wiki/Bombenanschlag_auf_das_World_Trade_Center_1993
Aufruf: 07.09.2012
- [12] SÜDDEUTSCHE
<http://www.sueddeutsche.de/wissen/world-trade-center-an-der-treppe-fuert-kein-weg-vorbei-1.613254>
Aufruf: 07.09.2012
- [13] WOXYKON
<http://wissen.woxikon.de/evakuieren>
Aufruf: 17.08.2012
- [14] A. Wieland:
LEITFADEN FÜR EINE EVAKUIERUNG UND GEBÄUDERÄUMUNG
Kissing WEKA Media GmbH & Co. KG, 2005
- [15] GRUNDGESETZ FÜR DIE BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND
<http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/gg/gesamt.pdf>
Aufruf: 07.09.2012
- [16] BAULICHER BRANDSCHUTZ
<http://www.das-energieportal.de/energieberatung/brandschutz/baulicher-brandschutz/>
Aufruf: 09.09.2012
- [17] DIN NORMEN
<http://www.beuth.de/de/>
Aufruf: 09.09.2012
- [18] BRANDSCHUTZTECHNIK
<http://www.bs-brandschutztechnik.de/produkte/rettungsplan/rettungslaene.html>
Aufruf: 11.09.2012
- [19] BAYERISCHE BAUORDNUNG BAYBO UND ERGÄNZENDE BESTIMMUNGEN
Verlag C. Beck
München, 2009, 40. Auflage
- [20] LStVG
http://by.juris.de/by/LstVG_BY_Art23.htm
Aufruf: 07.09.2012
- [21] VERORDNUNG ÜBER DIE VERHÜTUNG VON BRÄNDEN VVB
<http://www.gesetze-bayern.de/jportal/portal/page/bsbayprod.psml?showdoccase=1&doc.id=jlr-BrandVerhVBYrahmen>
Aufruf: 09.08.2012
- [22] VERORDNUNG ÜBER DEN BAU UND BETRIEB VON VERSAMMLUNGSSTÄTTEN
VSTÄTTV
<http://www.gesetze-bayern.de/jportal/portal/page/bsbayprod.psml?showdoccases=1&doc.id=jlr-VSt%C3%A4ttVBY2007rahmen6doc.part=X>
Aufruf: 12.08.2012

- [23] WARUM DER MENSCH VON ANGST BEHERRSCHT WIRD
<http://www.welt.de/gesundheit/psychologie/article5858005/Warum-der-Mensch-von-Angst-beherrscht-wird.html>
Aufruf: 19.09.2012
- [24] FEHLALARM
<http://www.feuerwehr-rauenberg.de/information/>
Aufruf: 19.09.2012
- [25] SPIEGEL
<http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/fussgaenger-simulation-der-kuerzeste-weg-ist-das-ziel-a-757753.html>
Aufruf: 15.07.2012
- [26] EVAKUIERUNG EINKAUFSZENTRUM NEUWIESEN
http://www.simwalk.com/simwalk_pro/articles/Shopping_Center_Neuwies.pdf
Aufruf: 19.09.2012
- [27] NOTAUSGANG
<http://blog.fand.ch/2012/06/13/intelligente.schlosser-teil-1-antipanikschloss/fluchtweg-2>
Aufruf: 10.09.2012
- [28] FEUERLÖSCHER
http://www.google.de/imgres?q=feuerl%C3%B6scher&um=1&hl=de&biw=1280&bh=663&tbn=isch&tbnid=mQNRde6P5SXC3M:&imgrefurl=http://www.botnanger-kuckuck.de/sites.php%3Fid%3D21&docid=hdXZfIW8DnLWZM&imgurl=http://www.botnanger-kuckuck.de/uploader/img/2007_02_11_Fe
Aufruf: 10.09.2012
- [29] VERHALTEN IM BRANDFALL
http://www.feuerschutz.at/popup_image.php/verhalten-brandfall-pi-533?image=0
Aufruf: 12.09.2012
- [30] EVAKUIERUNG BEI BRANDEREIGNISSEN
http://vbbd-brandschutzforum-brandschutzbeauftragter.de/filez/Publikationen/Evakuierung_040218.pdf
Aufruf: 09.09.2012
- [31] SAMMELSTELLE
http://www.toool-factory.com/Fluchtwegschilder_Rettungsschilder_Rettungsschild_nachleuchtend_Sammelplatz-67903-749888.html
Aufruf: 10.09.2012
- [32] FAKULTÄT FÜR MASCHINENWESEN
<http://www.mw.tum.de/index.php?contentpath=n3/n565>
Aufruf: 11.09.2012

- [33] LAGEPLAN FORSCHUNGSZENTRUM
<http://portal.mytum.de/displayRoomMap?@5516>
Aufruf: 14.09.2012
- [34] LUFTBILD
http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:TUM_Garching.JPG&filetimestamp=20110509185950
Aufruf: 11.09.2012
- [35] FEUERWEHR DER TU MÜNCHEN
Die zur Verfügung gestellten Dokumente der Feuerwehr der TU München unterliegen einer Geheimhaltungspflicht und können von der Verfasserin dieser Arbeit hier nicht veröffentlicht werden.
- [36] HÖRSÄLE
<http://campus.tum.de/tumonline/webnav.ini>
Aufruf: 11.09.2012
- [37] KARRIEREFORUM IKOM
<http://www.ikom.tum.de/>
Aufruf: 11.08.2012
- [38] FACHTECHNISCHE STELLUNGNAHME DER FEUERWEHR, 31.05.2012
Die zur Verfügung gestellten Dokumente der Feuerwehr der TU München unterliegen einer Geheimhaltungspflicht und können von der Verfasserin dieser Arbeit hier nicht veröffentlicht werden.
- [39] Gerrits GmbH:
Lieferschein Dekomoltons
01.06.2012
- [40] U. Weidmann:
TRANSPORTTECHNIK DER FUßGÄNGER
Zürich, Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Straßen - und Eisenbahnbau, 1993
- [41] C. Twelkemeier
MODELLIERUNG UND BEHANDLUNG VON EREIGNISSEN IN
FUßGÄNGERSIMULATIONEN
Hamburg, Hochschule für angewandte Wissenschaften, 15.12.2001
<http://users.informatik.haw-hamburg.de/~ubicomp/projekte/master11-12-aw1/twelkemeier/fohlen.pdf>
Aufruf: 12.08.2012
- [42] André Borrmann, Angelika Kneidl:
KURZDOKUMENTATION ERGEBNISSE UND ALGORITHMEN DER TU MÜNCHEN IM
PROJEKT REPKA
- [43] Dr. Wolfram Klein, Dr. Gerta Köster, Andreas Meister, Siemens AG:
TOWARDS THE CALIBRATION OF PEDESTRIAN STREAM MODELS
2009

- [44] GOPRO
<http://downhill-rangers.com/news/53275-testbericht-gopro-helmet-hero-wide.html>
Aufruf: 14.09.2012
- [45] HANDZÄHLER
http://www.amazon.de/Infactory-NC-1206-Handz%C3%A4hler-5-stelligem-Veranstaltungen/dp/B001CJ8VCC/ref=sr_1_4?ie=UTF8&qid=1344787849&sr=8-4
Aufruf: 10.06.2012
- [46] BAUGESETZBUCH BAUGB
Deutscher Taschenbuchverlag
München, 2010, 42. Auflage
- [47] BÜRGERLICHES GESETZBUCH BGB
Deutscher Taschenbuchverlag
München, 2011, 67. Auflage
- [48] EVAKUIERUNG
<http://de.wikipedia.org/wiki/Evakuierung>
Aufruf: 17.08.2012
- [49] BAULINKS
<http://www.baulinks.dewebplugin/2006/1681.php4>
Aufruf: 17.08.2012
- [50] FUßGÄNGERSIMULATION SOFTWARE
http://www.simwalk.com/simwalk_pro/articles/fussgaengersimulation.pdf
Aufruf: 07.08.2012
- [51] P. Hummel:
WELT DER PHYSIK
<http://www.weltderphysik.de/gebiet/technik/verkehr/fussgaenger-im-modell/>
Aufruf: 07.08.2012

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Massenpanik - Brüssel, Belgien [3].....	5
Abbildung 2: Überfüllung eines Stadions- Sheffield, Großbritannien [5].....	5
Abbildung 3: Pilgerstätte - Mekka, Saudi-Arabien [3].....	6
Abbildung 4: Massenpanik - Duisburg, Deutschland [9].....	6
Abbildung 5: Flucht über die Treppenhäuser - World Trade Center, New York City [10].	7
Abbildung 6: Notausgang [27].....	18
Abbildung 7: Feuerlöscher [28].	18
Abbildung 8: Verhalten im Brandfall [29].	20
Abbildung 9: Sammelstelle [31].	21
Abbildung 10: Forschungszentrum Garching [33].....	22
Abbildung 11: Luftbild der Fakultät für Maschinenwesen [34].	22
Abbildung 12: Grundriss Fakultät für Maschinenwesen [35].	23
Abbildung 13: Lageplan Maschinenwesen [32].	24
Abbildung 14: Lage der Hörsäle.	25
Abbildung 15: Ausschnitt Fluchtwege.....	26
Abbildung 16: IKOM in Zahlen [37].	29
Abbildung 17: Verteilung der Studienrichtungen [37].....	30
Abbildung 18: Standplan IKOM [37].....	31
Abbildung 19: IKOM Messestand 2 [37].	31
Abbildung 20: IKOM Messestand 3 [37].	32
Abbildung 21: Standplan Detail.....	32
Abbildung 22: Kennzeichnung Flucht- und Rettungswege [38].....	34
Abbildung 23: Dekomoltons 1.....	35
Abbildung 24: Dekomoltons 2.....	35
Abbildung 25: Ausschnitt Brandschutznachweis Moltons [39].	36
Abbildung 26: Notausgang 1[35].....	37
Abbildung 27: Notausgang 2.	37
Abbildung 28: Rettungsweg 1 [35].....	38
Abbildung 29: Rettungsweg 2 [35].....	38
Abbildung 30: Rettungsweg 3 [35].....	39
Abbildung 31: Wandhydrant 1 [35].....	40
Abbildung 32: Wandhydrant 2 [35].....	40
Abbildung 33: Durchschnittliche Körpergröße [40].	42
Abbildung 34: Fundamentales Diagramm [40]	43
Abbildung 35: Arten von Fußgängersimulationen [41].....	44
Abbildung 36: Zellularautomaten [2].	46
Abbildung 37: Magnetkräftemodell [2].	47
Abbildung 38: Soziale - Kräfte - Modell [2].	48
Abbildung 39: Zellulärer Automat 1 [42].	49

Abbildung 40: Grundszenario Simulation.	51
Abbildung 41: Kamera 1.	52
Abbildung 42: Kamera 2.	52
Abbildung 43: GoPro [44].	53
Abbildung 44: Versuchsaufbau 1.	53
Abbildung 45: Versuchsaufbau 2.	54
Abbildung 46: Versuchsaufbau 3.	54
Abbildung 47: Tag 1 - Ankunft der U-Bahn.	55
Abbildung 48: Tag 1 - Vorlesungsende MW 2001.	55
Abbildung 49: Tag 1 - Vorlesungsende MW 0001.	56
Abbildung 50: Tag 2 - Bühne.	56
Abbildung 51: Tag 3 - Messestände Hof 1.	57
Abbildung 52: Position Auszählung.	58
Abbildung 53: Handzählgerät [45].	58
Abbildung 54: Auszählung.	59
Abbildung 55: Diagramm Auszählung IKOM.	61
Abbildung 56: Auszählung Seiteneingang.	62
Abbildung 57: Benutzung Seitenausgang.	63
Abbildung 58: Verteilung der Quellen und Ziele.	66
Abbildung 59: Verteilung 4000 Personen.	69
Abbildung 60: Detail Hof 1.	70
Abbildung 61: Ausschnitt Video Hof 1.	70
Abbildung 62: Foto Magistrale [35].	71
Abbildung 63: Vergleich Personenanzahl.	71
Abbildung 64: Personenverteilung 5000 und 5500.	74
Abbildung 65: Simulation 5000 Detail MW 0001.	75
Abbildung 66: Simulation 5000 Detail Hof 1.	75
Abbildung 67: Simulation 5000 (30/70) - Zeitpunkt 0 Sekunden.	77
Abbildung 68: Simulation 5000 (30/70) - Zeitpunkt 30 Sekunden.	77
Abbildung 69: Simulation 5000 (30/70) - Zeitpunkt 60 Sekunden.	78
Abbildung 70: Simulation 5000 (30/70) - Zeitpunkt 120 Sekunden.	78
Abbildung 71: Simulation 5000 (30/70) - Zeitpunkt 180 Sekunden.	79
Abbildung 72: Kritische Stellen.	80
Abbildung 73: Simulation 5000 (30/70) Engstelle 2 - Zeitpunkt 10 Sekunden.	81
Abbildung 74: Simulation 5000 (30/70) Engstelle 2 - Zeitpunkt 20 Sekunden.	81
Abbildung 75: Simulation 5000 (30/70) Engstelle 2 - Zeitpunkt 30 Sekunden.	82
Abbildung 76: Simulation 5500 (30/70) Engstelle 2 - Zeitpunkt 40 Sekunden.	82
Abbildung 77: Simulation 5500 (10/90) Engstelle 2 - Zeitpunkt 40 Sekunden.	82
Abbildung 78: Fläche Haupteingang.	84
Abbildung 79: Fläche Engstelle 2.	84
Abbildung 80: Simulation 5000 (30/70) - Population Haupteingang.	85
Abbildung 81: Simulation 5000 (30/70) - Population Engstelle 2.	85

Abbildung 82: Simulation 5500 (30/70) - Population Haupteingang.....	86
Abbildung 83: Simulation 5500 (30/70) - Engstelle 2.	86
Abbildung 84: Simulation 5000 (30/70) - Density Haupteingang.	87
Abbildung 85: Simulation 5000 (30/70) - Density Engstelle 2.	87
Abbildung 86: Simulation 5500 (30/70) - Density Haupteingang.	88
Abbildung 87: Simulation 5500 (30/70) - Density Engstelle 2.	88
Abbildung 88: Geschwindigkeit Haupteingang.	89
Abbildung 89: Geschwindigkeit Engstelle 2.	89
Abbildung 90: Simulation 5000 Fundamentales Diagramm Haupteingang.....	92
Abbildung 91: Simulation 5000 Fundamentales Diagramm Engstelle 2.....	92
Abbildung 92: Optimierung Standplan.....	94

9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Hörsäle [36].	24
Tabelle 2: Auswertung Personenzählung.....	60
Tabelle 3: Fakultätsmitarbeiter.	64
Tabelle 4: Maximalbelegung.	68
Tabelle 5: Personenverteilung Magistrale.	73
Tabelle 6: Dauer der Evakuierung.	76
Tabelle 7: Simulation 5000 Messwerte Haupteingang.	90
Tabelle 8: Simulation 5500 Messwerte Haupteingang.	90
Tabelle 9: Simulation 5000 Messwerte Engstelle 2.	91
Tabelle 10: Simulation 5500 Messwerte Engstelle 2.	91

10. Anhang

Technische Universität München, ZA 1, Referat 15 - Feuerwehr
Römerhofweg 67, 85748 Garching, Germany

Anlage zur Bachelorarbeit

„Simulation von Evakuierungsszenarien bei Großveranstaltungen am Beispiel eines Gebäudes der TU München“

von Frau Maria Driesel

Garching, 14.09.2012

Die Feuerwehr TUM gibt dem Staatlichen Bauamt München II gegenüber für das Forschungsgelände Garching im Vorfeld zu Veranstaltungsgenehmigungen brandschutzrechtliche Stellungnahmen ab.

In diesem Zusammenhang stellt die von Frau Driesel erarbeitete Simulation eine Planungs- und Bemessungsgrundlage zur Personenzahl bei Veranstaltungen dar. Sie wird daher in die Formulierung künftiger Auflagenbescheide einfließen.

Desweiteren ist es durch die Simulation gelungen, das subjektive Empfinden der verantwortlichen Planer in Bezug auf Räumungsverhalten und Besucherströme mittels grafischer Darstellung zu manifestieren, bzw. auch zu korrigieren.

Die gewonnenen Erkenntnisse werden in die vorbereitenden Planungen daher zeitnah einfließen und nicht nur die Sicherheit der Veranstaltungsbesucher, sondern auch aller im Gebäude befindlicher Personen unmittelbar erhöhen.

Thomas Schmidt
Brandoberinspektor
stellv. Leiter der Feuerwehr



Technische Universität München



Zentralabteilung 1
Referat 15 - Werkfeuerwehr
Brandoberinspektor
Thomas Schmidt

Römerhofweg 67
85748 Garching
Germany
Telefon +49.89.289.12024
Telefax +49.89.289.12027
thomas.schmidt@feuerwehr.tum.de
www.feuerwehr.tum.de

11. Selbstständigkeitserklärung

Originalarbeit

Ich erkläre ausdrücklich, dass es sich bei der von mir eingereichten schriftlichen Arbeit mit dem Titel

„Simulation von Evakuierungsszenarien bei Großveranstaltungen am Beispiel eines Gebäudes der TU München“

um eine von mir selbst und ohne Beihilfe sowie in eigenen Worten verfasste Originalarbeit handelt.

Außerdem bestätige ich, dass die vorgelegte Arbeit zuvor weder von mir, noch - soweit mir bekannt ist - von einer anderen Person, als Studienleistung an der Technischen Universität München oder einer anderen Universität oder Ausbildungsstätte eingereicht wurde.

Verwendung von Quellen

Ich erkläre ausdrücklich, dass ich sämtliche in der oben genannten Arbeit enthaltenen Bezüge auf fremde Quellen (einschließlich Tabellen, Grafiken u. Ä.) als solche gekennzeichnet habe. Insbesondere bestätige ich, dass ich ausnahmslos und nach bestem Wissen sowohl bei wörtlich übernommenen Aussagen (Zitaten) als auch bei in eigenen Worten wiedergegebenen Aussagen (Paraphrasen) anderer Autorinnen oder Autoren die Urheberschaft angegeben habe.

Sanktionen

Ich nehme zur Kenntnis, dass Arbeiten, welche die Grundsätze der Selbstständigkeitserklärung verletzen, insbesondere solche, die Zitate oder Paraphrasen ohne Herkunftsangaben enthalten, als Plagiat betrachtet werden und entsprechende rechtliche Konsequenzen nach sich ziehen können.

Ich bestätige mit meiner Unterschrift die Richtigkeit dieser Angaben.

Name: Driesel

Vorname: Maria

Matrikelnummer: XXXXXXXXXX

Ort, Datum:

Unterschrift: