

Leitfaden für die Erstellung von Evakuierungsgutachten auf der Grundlage von Personenstromsimulationen und deren Bewertung durch die Genehmigungsbehörde

Diplomarbeit

Bauingenieurwesen D II

Bearbeiter: Sven Hebben, Matr.-Nr.: 1292422

Betreuung: Dr.-Ing. H.-J. Keck, Bauphysik und Materialwissenschaft,
Universität Duisburg-Essen

Branddirektor Dipl.-Ing. J. Wackerhahn, Abteilungsleiter Vorbeugender
Brandschutz der Feuerwehr Essen

Abgabe: 30.04.2008

DANKSAGUNG

Zuallererst möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Hans-Joachim Keck von der Universität Duisburg-Essen und bei Herrn Dipl.-Ing. Jörg Wackerhahn, dem Abteilungsleiter des Vorbeugenden Brandschutzes der Feuerwehr Essen bedanken, durch deren Betreuung die Bearbeitung einer Diplomarbeit im Themenbereich der Evakuierung im Brandschutz ermöglicht wurde.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Dr. Hubert Klüpfel und Herrn Dipl.-Ing. Tim Meyer-König von der TraffGo HT GmbH in Duisburg bedanken, die mir das Programm PedGo kostenfrei für die Verwendung in der vorliegenden Diplomarbeit überließen und mich während der Bearbeitung mit nützlicher Literatur und interessanten Diskussionen zum Thema unterstützten. Bei Alex Schmid und dem übrigen Team der Savannah Simulations AG in Herrliberg, Schweiz möchte ich mich dafür bedanken, dass sie mir das Programm SimWalk kostenfrei zur Verfügung stellten. Der Firma IES Ltd. in Glasgow, Schottland danke ich dafür, dass sie mir das Programm SIMULEX mit einer Studentenlizenz bereitstellten. Außerdem danke ich Dr. Rainer Könnecke von der I.S.T. Integrierte Sicherheits-Technik GmbH in Frankfurt am Main, der mir die Handbücher zum Programm ASERI überlies und mir während der Bearbeitung der Diplomarbeit Fragen zum Programm beantwortete. Weiterhin möchte ich Herrn Lars Jedenat vom Amt für Bauordnung und Hochbau der Hansestadt Hamburg und Dipl.-Ing. Klaus Richter vom Amt für Bauordnung und Denkmalpflege der Stadt Leipzig danken, die mir mit der Beantwortung eines Fragenkataloges Probleme bei der Prüfung von Ergebnissen aus den Entfluchtungssimulationen aufgezeigt haben. Ebenso möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Markus Kraft von der Ingenieurgesellschaft Spitthöver GmbH in Essen, Dr. Detlef Mamrot vom IBS – Ingenieurbüro für Brandschutzplanung GbR in Wuppertal und Dipl.-Ing. Hellmuth Schomberg vom Büro für Brandschutz in Wuppertal bedanken, die mir Fragen zur ordnungsgemäßen Aufstellung der Ergebnisse von Entfluchtungssimulation beantworteten und mich weiter für das Thema sensibilisiert haben. Zuletzt möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Christian Rogsch bedanken, der mir nützliche Hinweise zur Bearbeitung gegeben hat und dessen Forschungsergebnisse zu Entfluchtungssimulationen ich in der Diplomarbeit verwenden konnte.

ABSTRAKT

Mit zunehmendem Maß werden für die Genehmigung von baulichen Anlagen Personenstromanalysen genutzt, um Abweichungen vom Rettungswegkonzept der Bauvorschriften zu kompensieren. Derzeit legen national nur die Richtlinie für mikroskopische Entfluchtungsanalysen und der vfdb-Leitfaden für Ingenieurmethoden im Brandschutz grundsätzliche Vorgaben fest, um ein Entfluchtungskonzept mithilfe der computerunterstützten Simulationsmodelle zu entwerfen. Diese Richtlinien unterliegen aber keiner rechtlichen Bindung, sodass im Rahmen der Aufstellung solcher Analysen häufig differierende Annahmen getroffen werden. Durch die fehlende Harmonisierung ist es im Zuge der Prüfung durch die Genehmigungsbehörden schwierig, die Resultate aus den Modellen zu deuten und zu beurteilen.

Im Laufe dieser Arbeit werden die rechtlichen Grundlagen bezüglich der grundlegenden Nutzung von Ingenieurmethoden und der speziellen der Nutzung von Personenstromsimulationsmodellen erläutert. Weiter werden Grundlagen der Personenbewegung und der Anforderungen durch die bereits konzeptionierten Richtlinien beschrieben, um notwendige Hintergrundinformationen hinsichtlich der Prüfung zu erlangen. Durch die nachfolgende Dokumentation der Personenstromsimulationsmodelle PedGo, SIMULEX, SimWalk und ASERI werden die elementaren Funktionen der jeweiligen Programme und die Möglichkeiten der Ergebnisausgabe dargestellt. Zusätzlich werden durch Untersuchungen an den Simulationen die Auswirkung bestimmter Parameter auf das Ergebnis illustriert. Abschließend wird als Resümee der vorangehenden Betrachtungen ein Leitfaden entworfen, der Anforderungen an die Inhalte der Entfluchtungsanalysen stellt, sodass Ergebnisse der Simulationen transparenter werden und somit eine Beurteilung durch Genehmigungsbehörden einfacher erfolgen kann.

INHALTSVERZEICHNIS

Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	xii
Abkürzungsverzeichnis	xiv
1 Einleitung.....	1
2 Aktuelle Ereignisse	2
3 rechtlicher Hintergrund	4
3.1 Allgemeine Richtlinien.....	4
3.1.1 Ingenieurmethoden im Brandschutz	4
3.1.2 Musterbauordnung.....	5
3.1.3 vfdb Richtlinie: Brandschutzkonzept	6
3.1.4 Brandschutzleitfaden für Gebäude des Bundes.....	7
3.1.5 Grundlagendokument Brandschutz	7
3.1.6 Internationaler Stand der Normung.....	8
3.2 Bemessungsrichtlinien	9
3.2.1 Deskriptive Verordnungen	9
3.2.1.1 Sonderbauordnungen	9
3.2.1.2 Muster-Industriebaurichtlinie.....	11
3.2.1.3 Muster-Versammlungsstättenverordnung	11
3.2.1.4 EN 13200.....	12
3.2.2 Performance based Codes	12
3.2.2.1 MSC Circular Guidelines	12
3.2.2.2 Richtlinie für mikroskopische Entfluchtungsanalysen (RiMEA)	14
3.2.2.3 vfdb-Leitfaden für Ingenieurmethoden im Brandschutz	14
3.2.3 Vergleich RiMEA und vfdb-Leitfaden	15
4 Grundlagen.....	16
4.1 Begriffe	16
4.1.1 Räumung, Evakuierung und Entfluchtung.....	16
4.1.2 Gesicherter Bereich	17
4.2 Definitionen der Dauern	17
4.2.1 Entfluchtungsdauer	17
4.2.2 Detektions- und Alarmierungsdauer	20
4.2.3 Reaktionsdauer.....	21
4.2.4 Laufdauer.....	29
4.3 Geschwindigkeit.....	30
4.4 Dichte.....	36
4.5 Personenfluss	38

4.6	Fundamentaldiagramme	39
5	Ergänzende Randbedingungen für die Simulation	44
5.1	Personenbelegung im Anfangszustand	44
5.2	Routenverhalten und Ausgangswahl	46
5.3	Staudauer	52
5.4	Wahl der Bemessungsszenarien	53
6	Programmbeschreibung.....	55
6.1	Allgemeines	55
6.2	PedGo.....	56
6.2.1	Modell	57
6.2.2	Eingabe.....	57
6.2.2.1	Geometrie	57
6.2.2.2	Ziele und Routen	59
6.2.2.3	Personen	64
6.2.3	Ergebnisse.....	69
6.3	SIMULEX	73
6.3.1	Modell	73
6.3.2	Eingabe.....	73
6.3.2.1	Geometrie	74
6.3.2.2	Ziele und Routen	76
6.3.2.3	Personen	78
6.3.3	Ergebnisse.....	83
6.4	SimWalk.....	84
6.4.1	Modell	85
6.4.2	Eingabe.....	85
6.4.2.1	Geometrie	85
6.4.2.2	Ziele und Routen	87
6.4.2.3	Personen	89
6.4.3	Ergebnisse.....	92
6.5	ASERI	95
6.5.1	Modell	96
6.5.2	Eingabe.....	96
6.5.2.1	Geometrie	96
6.5.2.2	Ziele und Routen	98
6.5.2.3	Personen	101
6.5.3	Ergebnisse.....	104
7	Allgemeine Untersuchungen.....	107
7.1	Vorbemerkung	107
7.2	Bewertungskriterium Entfluchtungsdauer	108

7.3	Ausgangsauslastung.....	109
7.4	Einfluss der Personenzahl und der Anfangsdichte.....	111
7.5	Einfluss der Lage des Zieles.....	113
7.6	Einfluss von Einrichtungsgegenständen	114
8	Entwurf eines Leitfadens als Grundlage für die Bewertung.....	115
8.1	Allgemeine Inhalte	115
8.2	Angaben zur Modellierung	118
8.3	Ergebnisse	126
8.4	Zusammenfassung wesentlicher Beurteilungskriterien	137
8.5	Zusammenfassung der Inhalte des Leitfadens	138
8.6	Zusammenfassung der Beurteilungskriterien der Entfluchtungsdauer.....	141
9	Schlussbetrachtung.....	142
	Literaturverzeichnis	144
	Anhang A: Beschreibung der Sensitivitätsanalyse.....	151
	Anhang B: PedGo.....	153
	Anhang C: SIMULEX	184
	Anhang D: SimWalk	202
	Anhang E: ASERI	216
	Anhang F: Tabellen.....	218
	Anhang G: Berechnung zum Nachtclub „The Station“	226
	Eidesstattliche Versicherung	230

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Schema des zeitlichen Ablaufs der Entfluchtung.....	19
Abbildung 2: Vergleich Reaktionsdauer / Pre-movement time und Verzögerungszeit / delay time.....	22
Abbildung 3: Darstellung der Verteilung der Reaktionsdauern auf die Personen (aufbereitet nach [31]).....	24
Abbildung 4: Altersverteilung der Standardpopulation in RiMEA [27].....	31
Abbildung 5: Geschwindigkeit-Dichte Diagramm für Bewegung in der Ebene [39] ..	32
Abbildung 6: Geschwindigkeit-Dichte Diagramm für Bewegung auf Treppen [39] ...	33
Abbildung 7: durchschnittliche Gehgeschwindigkeiten auf Neigungen [39].....	33
Abbildung 8: Fundamentaldiagramm für Bewegung in der Ebene [39]	40
Abbildung 9: Fundamentaldiagramm für Bewegung auf Treppen [39]	41
Abbildung 10: Vergleich von Fundamentaldiagrammen [43]	42
Abbildung 11: Geschwindigkeitsverlauf in Abhängigkeit der Dichte nach Predtedschenski und Milinski [45].....	43
Abbildung 12: Grundriss des Nachtclubs „The Station“ in Rhode Island [49]	47
Abbildung 13: Verteilung der Personen auf die Ausgänge und Fenster nach [49] ...	47
Abbildung 14: Verteilung auf die Ausgänge aller anwesenden Personen im Nightclub „The Station“	48
Abbildung 15: Diskretisierung eines Grundrisses am Beispiel von PedGo.....	58
Abbildung 16: Wegverlauf und Sprungpunkt bei Treppen in PedGo [56]	59
Abbildung 17: Dialogfenster zur Einstellung der Blockierzeiten (PedGo).....	60
Abbildung 18: zeitliche Auswirkung von Blockierzeiten des Ausgangs [56]	60
Abbildung 19: Darstellung des Verlaufes des Potenzialfeldes in PedGo und zugehörige Laufrichtung in den Zellen [58]	61
Abbildung 20: Zusammenhang Potenzialfeld und Laufrichtung in Abhängigkeit vom Standort bei PedGo.....	61
Abbildung 21: Darstellung des Einflusses von Bauteilen auf die Potenzialausbreitung	62
Abbildung 22: Potenzialausbreitung bei zwei modellierten Türen	63
Abbildung 23: Bewegung der Personen in Abhängigkeit der Zeit in PedGo [56].....	64
Abbildung 24: Informationsfenster der modellierten Gruppen im PedGo Editor	65
Abbildung 25: Dialogfenster zur Einstellung der Personeneigenschaften in PedGo.....	66

Abbildung 26: Darstellung des Gruppenverhaltens in PedGo	68
Abbildung 27: Beispiel einer Entfluchtungskurve aus PedGo.....	70
Abbildung 28: Häufigkeitsverteilung der Ergebnisse einer Mittelwertrechnung	70
Abbildung 29: Dichteplots aus PedGo mit unterschiedlichem Grenzwert der Dauer	72
Abbildung 30: Dreidimensionale Darstellung eines Grundrisses aus PedView	73
Abbildung 31: Darstellung des Ebenenwechsels durch Linkverknüpfung zu den Treppenräumen	75
Abbildung 32: Darstellung des Verlaufes des Potenzialfeldes in SIMULEX und zugehörige Laufrichtung	76
Abbildung 33: Zusammenhang Potenzialfeld und Laufrichtung in SIMULEX.....	77
Abbildung 34: Wegverlauf in Abhängigkeit der Position in einem Raum mit 2 Ausgängen (SIMULEX).....	77
Abbildung 35: Idealisierung der Körpermaße in SIMULEX [61].....	78
Abbildung 36: Grafische Darstellung der Abstandsdefinition zwischen Personen in SIMULEX [59]	79
Abbildung 37: Zusammenhang zwischen Gehgeschwindigkeit und Personenabstand [59].....	80
Abbildung 38: Dialogfenster zur Einstellung der Personeneigenschaften in SIMULEX.....	82
Abbildung 39: Informationsfenster und zugehöriger Grundriss aus SIMULEX.	83
Abbildung 40: Wegverlauf in Abhängigkeit des Potenzials in SimWalk [63].....	87
Abbildung 41: Wegverlauf in Abhängigkeit der Position in einem Raum mit zwei Ausgängen (SimWalk)	88
Abbildung 42: Wegverlauf durch Wartepunkte in SimWalk [62]	88
Abbildung 43: Dialogfenster zur Einstellung der Personeneigenschaften in SimWalk.....	90
Abbildung 44: Parameterfenster zum Export der eingestellten Personeneigenschaften in der Gruppe	91
Abbildung 45: Statistikfenster zur Auswertung der einzelnen Personen (Agenten)..	92
Abbildung 46: Ausgabe des Balkendiagramms in SimWalk für die Endzeitpunkte der Personen	93
Abbildung 47: Screenshot <i>Loads</i> aus SimWalk.....	94
Abbildung 48: Screenshot <i>Density</i> aus SimWalk	95
Abbildung 49: Orientierungspunkte und mögliche Laufwege [65]	99

Abbildung 50: Unterschied der Optionen global kürzester und lokal kürzester Fluchtweg über die Darstellung von Spurbildern [65]	100
Abbildung 51: Darstellung der horizontalen Projektion der Körperellipse in ASERI	101
Abbildung 52: Dialogfenster zur Eingabe der Personensätze [64]	102
Abbildung 53: Einstellung der Personeneigenschaften in ASERI [64]	103
Abbildung 54: Statistikdiagramm der einzelnen Durchläufe [64]	104
Abbildung 55: Häufigkeitsverteilung der Geschwindigkeit aus ASERI [64]	105
Abbildung 56: Personenverteilung auf die Ausgänge [53]	109
Abbildung 57: Entfluchtungsauern der jeweiligen Ausgänge [53]	110
Abbildung 58: Erhöhung der Entfluchtungsdauer bei Erhöhung der Anfangsdichte im Gebäude [53]	111
Abbildung 59: Geschwindigkeits-Dichte Diagramm für eine Flächenbewegung [66]	112
Abbildung 60: Zeit-Dichte Diagramm für den Vergleich der Auswirkung der Entfluchtungsdauer auf die Lage des Zieles [66]	113
Abbildung 61: Flussdiagramm in Abhängigkeit der Dauer aus SIMULEX	129
Abbildung 62: Entfluchtungskurve aus PedGo	130
Abbildung 63: Beispiel einer mit SIMULEX erstellten Entfluchtungskurve	131
Abbildung 64: Entfluchtungskurve für einzelne Ausgänge mit SIMULEX	132
Abbildung 65: Personenbelegung für Teilbereiche und Darstellung der Entfluchtungskurve am Beispiel von PedGo	133
Abbildung 66: Darstellung der Entfluchtungskurve (Personenverteilungsgraph) aus ASERI [68]	134
 Abbildung A 1: Grundriss des Erdgeschosses	 151
Abbildung A 2: Grundriss des 1. und 2.Obergeschosses	152
Abbildung A 3: Entwicklung der Entfluchtungsdauer bei schrittweiser Erhöhung der Geschwindigkeit (PedGo)	153
Abbildung A 4: Entwicklung der Entfluchtungsdauer bei normalverteilter Zuweisung (PedGo)	154
Abbildung A 5: Entwicklung der Entfluchtungsdauer bei Veränderung der Standardabweichung (PedGo)	155
Abbildung A 6: Normalverteilung in Abhängigkeit der Standardabweichung für den Mittelwert 0	156

Abbildung A 7: Verteilung der Laufgeschwindigkeiten aus den 95%-Durchläufen mit unterschiedlicher Standardabweichung (PedGo).....	156
Abbildung A 8: Entwicklung der Entfluchtungsdauer bei Variation der Reaktionsdauer (PedGo)	157
Abbildung A 9: Auswirkung der Standardabweichung bei Normalverteilung der Reaktionsdauer auf die Entfluchtungsdauer (PedGo).....	158
Abbildung A 10: Vergleich der Entfluchtungsdauer bei unterschiedlich verteilten Reaktionsdauern für den Mittelwert 90 Sekunden (PedGo).....	159
Abbildung A 11: Häufigkeitsverteilung der Reaktionsdauer für unterschiedliche Standardabweichungen bei normalverteilter Reaktionsdauer von 0 bis 180 Sekunden (PedGo).....	160
Abbildung A 12: Auswirkung des Schwankens auf die Entfluchtungsdauer (PedGo)	161
Abbildung A 13: Auswirkung der Trägheit auf die Entfluchtungsdauer (PedGo)	161
Abbildung A 14: Auswirkungen der Trägheit auf die Entfluchtungsdauer bei Variation des Schwankens (PedGo)	162
Abbildung A 15: Auswirkung der Trödelwahrscheinlichkeit auf die Entfluchtungsdauer (PedGo)	163
Abbildung A 16: Entwicklung der Entfluchtungsdauer bei Variation des Gruppenzusammenhaltes (PedGo)	164
Abbildung A 17: Beschreibung der Ausgabe Demographics aus PedGo	176
Abbildung A 18: Erklärung der Ergebnisdatei der Mittelwertrechnung	177
Abbildung A 19: Histogramm der Häufigkeitsverteilung der Entfluchtungsauern aus PedGo	178
Abbildung A 20: Erklärung der Einstellungsdaten aus der Einzelrechnung	179
Abbildung A 21: Erklärung der Personendaten der Ergebnisse der Einzelrechnung	180
Abbildung A 22: Erklärung der logpoints-Datei der Einzelrechnung aus PedGo	181
Abbildung A 23: Beispiel eines Screenshots aus PedGo	183
Abbildung A 24: Entwicklung der Entfluchtungsdauer bei schrittweiser Erhöhung der Geschwindigkeit (SIMULEX)	184
Abbildung A 25: Entwicklung der Entfluchtungsdauer bei verteilter Zuweisung der Geschwindigkeit (SIMULEX).....	185
Abbildung A 26: Verteilung der Geschwindigkeiten in SIMULEX für einen Mittelwert von 1,2 m/s und einer Abweichung von 0,6 m/s	186

Abbildung A 27: Verteilung der Geschwindigkeiten in SIMULEX für einen Mittelwert von 1,2 m/s und einer Abweichung von 0,4 m/s	186
Abbildung A 28: Entwicklung der Entfluchtungsdauer bei Variation der Reaktionsdauer (SIMULEX).....	187
Abbildung A 29: Entwicklung der Entfluchtungsdauer bei unterschiedlicher Verteilung der Reaktionsdauer (SIMULEX)	188
Abbildung A 30: ausgelesene gleichverteilte Reaktionsdauern eines Raumes mit 50 Personen	189
Abbildung A 31: ausgelesene triangularverteilte Reaktionsdauern eines Raumes mit 50 Personen.....	189
Abbildung A 32: ausgelesene normalverteilte Reaktionsdauern eines Raumes mit 50 Personen	190
Abbildung A 33: Entwicklung der Entfluchtungsdauer bei Variation der Körpermaße	191
Abbildung A 34: Ergebnisdatei aus SIMULEX und Erklärung der Positionen.....	197
Abbildung A 35: Entwicklung der Entfluchtungsdauer bei schrittweiser Erhöhung der Geschwindigkeit (SimWalk)	203
Abbildung A 36: Entwicklung der Entfluchtungsdauer bei verteilter Zuweisung der Geschwindigkeit (SimWalk)	204
Abbildung A 37: Verteilung der zugewiesenen Geschwindigkeiten in SimWalk für einen Mittelwert von 1,2 m/s bei einer Spanne von 0,6 – 1,8 m/s.....	205
Abbildung A 38: Verteilung der resultierenden Geschwindigkeiten in SimWalk für einen Mittelwert von 1,2 m/s bei einer Spanne von 0,6 – 1,8 m/s.....	205
Abbildung A 39: Entwicklung der Entfluchtungsdauer bei Variation der Körpermaße	206
Abbildung A 40: Variation des Parameters Interaction Range (Personenabstand) in SimWalk	207
Abbildung A 41: Variation des Parameters Druckfaktor in SimWalk	208
Abbildung A 42: Erklärung des Ergebnisreportes aus SimWalk	215
Abbildung A 43: mittlere Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Lebensalter [27] ..	219
Abbildung A 44: Ausgangsbelegung ohne Flucht durch Fenster [49].....	226
Abbildung A 45: Fundorte der Opfer [49].....	227
Abbildung A 46: Darstellung der Verteilung aller Personen.....	228

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Zusammenstellung der Rettungsweglängen und -breiten basierend auf den Rechtsgrundlagen	10
Tabelle 2: Richtwerte für die Alarmierungsdauer in Abhängigkeit vom Alarmierungssystem [31]	21
Tabelle 3: Reaktionsdauern in Abhängigkeit vom Gebäudetyp, Charakteristik und Alarmierungssystem [32]	23
Tabelle 4: Reaktionsdauern in Abhängigkeit des verwendeten Alarmierungssystems und der Vertrautheit mit Evakuierungsprozeduren [37]	24
Tabelle 5: Kategorisierung der Personencharakterisierung und Nutzungsart [31];[28];[27]	26
Tabelle 6: Kategorisierung der Gebäudekomplexität [28]	26
Tabelle 7: Kategorisierung des Alarmierungssystems [28]	27
Tabelle 8: Kategorisierung des Brandschutzmanagements [28]	27
Tabelle 9: Festlegung der Reaktionsdauern [31];[28];[27]	28
Tabelle 10: Gehgeschwindigkeiten nach MSC Circular 1238, abhängig von Alter und Geschlecht [26]	30
Tabelle 11: Gehgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Alter nach RiMEA [27]	31
Tabelle 12: Einflüsse auf die Fußgängergeschwindigkeit [39]	32
Tabelle 13: Fortbewegungsgeschwindigkeit in der Ebene von Personen mit eingeschränkter Bewegungsfähigkeit [40]	34
Tabelle 14: Fortbewegungsgeschwindigkeiten auf Treppen (aufwärts/abwärts) von Personen mit Bewegungseinschränkung [40]	35
Tabelle 15: Konzept für Gehwege nach Fruin [41]	37
Tabelle 16: LOS Konzept für Gehwege nach Weidmann [39]	37
Tabelle 17: LOS Konzept für Personendichten in Wartepositionen [41]	38
Tabelle 18: Annahmen zur Abschätzung der Personenbelegung	45
Tabelle 19: Ergebnisse einer Evakuierungsuntersuchung aus zwei Theatern nach Sime [51]	49
Tabelle 20: Gründe für die Ausgangswahl und prozentuale Verteilung bei unangekündigter Räumung von zwei Verkaufsstätten [52]	50
Tabelle 21: Auszug vordefinierter Personentypen aus SIMULEX	81

Tabelle 22: Auszug der Populationsgruppen aus SIMULEX	81
Tabelle A 1: Erläuterung der Farbskalierung der Dichteplots aus PedGo (nach Tim Meyer-König)	182
Tabelle A 2: Farbcodierung der graphischen Ausgabe.	183
Tabelle A 3: Gemessene und anhand des Programms ASERI errechnete Entfluchtungsdauern bezüglich der Evakuierungsübung eines Theaters [79]	216
Tabelle A 4: Ermittelte Entfluchtungsdauern eines Stadions für unterschiedliche Eigenschaften der Personen [80]	217
Tabelle A 5: Gehgeschwindigkeit in der Ebene abhängig vom Alter und Geschlecht nach [26]	218
Tabelle A 6: Gehgeschwindigkeit auf Treppen abhängig vom Alter und Geschlecht nach [26]	218
Tabelle A 7: Gehgeschwindigkeit in der Ebene abhängig vom Alter und Geschlecht nach [27]	219
Tabelle A 8: Gehgeschwindigkeit auf Treppen abhängig vom Alter und Geschlecht nach [27]	219
Tabelle A 9: LOS-Konzept für Gehwege [41]	220
Tabelle A 10: LOS-Konzept für Treppen [41]	221
Tabelle A 11: LOS-Konzept für Wartepositionen [41]	222
Tabelle A 12: LOS-Konzept für Gehwege [39]	225
Tabelle A 13: LOS-Konzept für Treppen [39]	225

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

aaRdT	allgemein anerkannte Regeln der Technik
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMVg	Bundesministeriums für Verteidigung
DIN	Deutsches Institut für Normung
DXF	Drawing Exchange Format
EN	Europäische Normung
ETB	eingeführte Technischen Baubestimmungen
IMO	International Maritime Organization
ISO	International Organization for Standardization
LBO	Landesbauordnung
LOS	Level of Service
MBeVO	Muster-Verordnung über den Bau und Betrieb von Beherbergungsstätten
MBO	Musterbauordnung
MHHR	Muster-Richtlinie über den Bau und Betrieb von Hochhäusern
MIndBauRL	Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau
MSC	Maritime Safety Committee
MSchulbauR	Muster-Richtlinie über bauaufsichtliche Anforderungen an Schulen
MVkVO	Muster-Verordnung über den Bau und Betrieb von Verkaufsstätten
MVStättV	Muster-Verordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten
NFPA	National Fire Protection Association
RiMEA	Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen
vfdb	Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V.

1 EINLEITUNG

Bei der Genehmigungsplanung von baulichen Anlagen werden Abweichungen von bestehenden Bauvorschriften mit wachsender Häufigkeit durch die Anwendung von Ingenieurmethoden begründet. Für die Abweichungen vom Rettungswegkonzept werden dazu häufig computergestützte Personenstromsimulationsmodelle verwendet. Diese Methoden sind dem Stand der Wissenschaft und Technik zuzuordnen. Die Problematik dieser Methode ist, dass keine rechtlich verbindlichen Vorlagen bezüglich der Aufstellung und erforderlichen Resultate existieren. Die Folge ist, dass Entfluchtungsanalysen wenig einheitlich, mit unterschiedlichen Schwerpunkten und Umfang in der Dokumentation ausgeführt sind. Ein weiteres Problem ist dabei die Software selbst, die in der Ergebnisausgabe bis auf eine resultierende Gesamtdauer sehr unterschiedliche Varianten von Resultaten liefert. Weiterhin ist durch die Anwendung von Software begründet, dass Rechenschritte kaum nachvollziehbar sind, sofern das verwendete Programm weitgehend unbekannt ist. Zusätzlich können individuelle Einstellungen in den Programmen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen. Dies hat einen Verlust der Transparenz in den Ergebnissen zufolge. Erschwerend kommt hinzu, dass individuelle Verhaltensaspekte von Personen durch die entsprechende Wahl von Bemessungsszenarien berücksichtigt werden müssen. Welche in der Analyse vorgelegt werden, liegt in der Regel in der Hand des Simulierenden.

Angesichts der Prüfung werden Genehmigungsbehörden so vor die schwierige Aufgabe gestellt, die Analysen fachgerecht zu beurteilen. In der Vergangenheit sind so zwei unterschiedliche Richtlinien konzipiert worden, die sich zum Ziel gesetzt haben, eine möglichst standardisierte Ausführung von Entfluchtungsanalysen vorzuschreiben. Bis zum aktuellen Zeitpunkt lassen sich durch diese Richtlinien zwar Analysen aufstellen, jedoch sind noch nicht alle relevanten Gesichtspunkte ausreichend ausgeführt oder vorgeschrieben. Auch sind diese Richtlinien nicht auf die jeweiligen Programme und deren individuelle Eigenschaften ausgelegt. Eine vollständige Prüfung ist demnach durch diese noch nicht vollständig möglich.

Ziel dieser Arbeit soll es sein, einen notwendigen Hintergrund und Hinweise für die Prüfung zu liefern und die Ergebnisse von Personenstromsimulationen besser verständlich und transparenter zu machen.

2 AKTUELLE EREIGNISSE

Evakuierungsplanung und die damit einhergehenden Personenströme bleiben für den vorbeugenden Brandschutz immer ein aktuelles Thema. Folgende Pressemeldungen der letzten Monate verdeutlichen dies:

Essen, 10. Januar 2007

Ein Feuer bricht im Keller eines Hochhauses aus. Der Brandrauch durchzieht einzelne Flure. 81 Wohnungen werden evakuiert.

Quelle: NRZ Essen vom 12. Januar 2007, Lokalseite 1

Ratingen, 07. Juni 2006

Bei einem Brand eines neugeschossigen Hochhauses wird das Hochhaus mit 250 Menschen evakuiert. Sechs Menschen erleiden Rauchgasvergiftungen. Zwei Menschen werden von der Feuerwehr tot aufgefunden, davon eine Person im Treppenhaus.

Quelle: <http://www.abendblatt.de/daten/2006/06/08/571073.html>

(letzter Zugriff am 30.09.2007)

Für die Analyse von Evakuierungen wird deshalb häufig das Szenario der Brandentstehung und der damit einhergehenden Belastung durch Rauchgas und Hitze verwendet.

Neben Bränden und der dadurch entstehenden Hitzeentwicklung und der toxischen Wirkung von Rauchgasen können allerdings auch andere Szenarien zu einer umgehenden Evakuierung eines Gebäudes oder eines Platzes führen. Dass auch Untersuchungen von Szenarien ohne Brandbelastung, d.h. die Betrachtung der reinen Personenströme, sinnvoll sein können, zeigen die weiteren Pressemeldungen.

Berlin, September 2007

Bei der Neueröffnung eines Elektronikmarktes stürmen 5000 Menschen das Gebäude. Aufgrund der hohen Personenkonzentration werden 15 Menschen verletzt.

Quelle: NRZ Essen vom 22. September 2007, Seite 4

Essen, 16. Juli 2007

Bei dem Neubau einer Verbindungsstraße wird von einem Bagger der Säurezünder einer Fliegerbombe aus dem zweiten Weltkrieg beschädigt. Aufgrund der Gefahr einer unkontrollierten Detonation werden im näheren Umkreis des Bombenfundes zahlreiche Wohnungen und Unternehmen, darunter zwei große Möbelhäuser, evakuiert.

Quelle: NRZ Essen vom 17. Juli 2007, Lokalseite 1 und 3

Berlin, 18. Januar 2007

Der Sturm Kyrill lässt Teile der Glasfassade des neugebauten Hauptbahnhofs einstürzen. Wegen weiterer Einsturzgefahr wird der Hauptbahnhof umgehend evakuiert.

Quelle: http://www.focus.de/panorama/welt/berlin_aid_122981.html

(letzter Zugriff am 30.09.2007)

London/Heathrow, 10. Oktober 2006

Wegen eines verdächtigen Päckchens wird das Terminal 2 des Flughafens London-Heathrow mit 2000 Passagieren und ein umliegendes Bürogebäude evakuiert.

Quelle: <http://news.search.ch/ausland/2006-10-10/terror-alarm-in-london-heathrow>

(letzter Zugriff am 30.09.2007)

3 RECHTLICHER HINTERGRUND

Ein Aspekt, durch den sich das Prüfen der Ergebnisse von Evakuierungssimulationen durch Baubehörden als schwierig gestaltet, ist die fehlende verbindliche Grundlage, in der allgemeingültige Anforderungen und Vorgaben an Simulationen gestellt werden. Nachfolgend wird beschrieben, inwieweit Entfluchtungsberechnungen auf der Basis von Personenstromsimulationen rechtlich berücksichtigt werden und welche Handhabungsmöglichkeiten für die Benutzung und Prüfung von Personenstromsimulationen bestehen.

3.1 ALLGEMEINE RICHTLINIEN

3.1.1 Ingenieurmethoden im Brandschutz

In der Vergangenheit hat es im Bereich des Brandschutzes weitreichende Veränderungen gegeben. Die Beachtung von Ingenieurmethoden ist dabei ein elementarer Bestandteil. Ziel dieser Ingenieurmethoden ist es, den Brandschutz nicht allein durch normative und gesetzliche Regelungen zu beachten, sondern auch wissenschaftliche und praxisorientierte Methoden in die Brandschutzplanung miteinzubeziehen. Der Begriff „*Ingenieurmethoden im Brandschutz*“ beschreibt dabei „die Anwendung von ingenieurmäßigen Prinzipien, Regeln und Methoden , welche auf wissenschaftlichen Erkenntnissen basieren und für den Nachweis der Brandsicherheit geeignet sind“ [1]. Der Anwendungsbereich dieser Ingenieurmethoden umfasst dabei im Wesentlichen die folgenden Gebiete [2];[3] :

- Ermittlung grundlegender Kenntnisse über die Entwicklung und Ausbreitung von Feuer und Rauch in Gebäuden
- Berechnung der Brandeinwirkungen
- Beurteilung des Verhaltens von Baustoffen, Produktions- und Lagergütern
- Bemessung und Beurteilung von Räumungs- und Rettungsmaßnahmen
- Planung und Beurteilung des Brandmeldekongzeptes
- Entwicklung und Beurteilung des Brandbekämpfungskongzeptes
- Planung und Beurteilung der betrieblichen Brandschutzmaßnahmen
- Bemessung und Beurteilung von Räumungs- und Rettungsmaßnahmen

Die Bemessung und Beurteilung von Räumungs- und Rettungsmaßnahmen beinhaltet dabei ebenfalls die Berechnung von Entfluchtungszeiten bzw. Evakuierungsdauern.

3.1.2 Musterbauordnung

Die allgemeine Anforderung der Musterbauordnung (MBO) [4] hinsichtlich des Schutzzieles ist nach § 3 Abs. 1 wie folgt definiert:

„Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden“.

Dem Brandschutz wird in der MBO ein besonderer Stellenwert beigemessen und erweitert diese Schutzzielanforderung in § 14:

„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“.

Evakuierungs- oder Personenstromsimulationen werden häufig dann angewendet, wenn von den bestehenden Bauordnungen abgewichen werden muss. Hierbei wird bezüglich Abweichungen nach § 3 Abs. 3 Satz 3 definiert, dass von den Technischen Baubestimmungen abgewichen werden kann, sofern die allgemeine Schutzzielanforderung nach § 3 Abs. 1 in gleichem Maße eingehalten wird [4]. Nach § 67 kann die Bauaufsichtsbehörde diese Abweichungen gestatten, wenn die Abweichungen unter Berücksichtigung des Zwecks, der Anforderung und unter Würdigung der öffentlich-rechtlichen geschützten nachbarlichen Belange mit den öffentlichen Belangen vereinbar sind. Hinsichtlich der öffentlichen Belange wird hierbei wieder auf das allgemeine Schutzziel nach § 3 Abs. 1 verwiesen. Die Maßgabe der Erstellung eines Brandschutzkonzeptes liegt hierbei also auf dem Schwerpunkt des Erreichens eines äquivalenten Schutzniveaus, welches durch die Bauordnungen beschrieben wird. Die Erstellung eines Brandschutzkonzeptes mithilfe brandschutztechnischer Ingenieurmethoden ist hiermit möglich [5].

Aufgrund der Abweichungsklausel nach § 3 Abs. 3 der MBO können Nachweisführungen grundsätzlich auf der Basis dreier Lösungsmethoden angewendet werden [2]:

1. Nachweisführung auf Grundlage der jeweiligen Landesbauordnung (LBO) in Verbindung mit den eingeführten Technischen Baubestimmungen (ETB) und/oder bauaufsichtlichen Richtlinien
2. Nachweisführung unter allgemein anerkannten Regeln der Technik (aaRdT), wie z.B. DIN-Normen
3. Nachweisführung nach dem „Stand der Wissenschaft und Technik“

Eine Nachweisführung nach brandschutztechnischen Ingenieurmethoden ist dabei unter Punkt 3 einzuordnen [2]. Dazu sei angemerkt, dass bei Heranziehung von Ingenieurmethoden, diese als ausreichend verifiziert und validiert klassifiziert werden müssen, um eine bauaufsichtliche Akzeptanz zu gewährleisten [6];[7].

3.1.3 vfdb Richtlinie: Brandschutzkonzept

Insbesondere bei Sonderbauten wird heute häufiger von den materiellen und rechtlichen Anforderungen der Bauordnungen abgewichen. Die getroffenen Brandschutzmaßnahmen müssen hierbei dann durch ein ganzheitliches Brandschutzkonzept detailliert vorgelegt werden und im Hinblick auf die Einhaltung der Schutzziele der Bauordnungen bewertet werden. Mit Veröffentlichung der vfdb-Richtlinie 01/01 „Brandschutzkonzept“ [8] hat die Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb) die Grundsätze und Inhalte eines Brandschutzkonzeptes definiert. In den Inhalten des Brandschutzkonzeptes nach vfdb ist im Bereich des organisatorischen (betrieblichen) Brandschutzes die Angabe über das Erfordernis einer Evakuierungsplanung notwendig.

Innerhalb eines Brandschutzkonzeptes wird die Anwendung mittels Ingenieurmethoden im Brandschutz von dieser Richtlinie als „hilfreich“ eingestuft, womit eine Anwendung der Ingenieurmethoden zulässig ist. Die angewendeten Nachweisverfahren und die zugrunde gelegten Parameter sind dazu im Brandschutzkonzept detailliert vorzulegen.

3.1.4 Brandschutzleitfaden für Gebäude des Bundes

Das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) veröffentlichte im Juli 2006 den „Brandschutzleitfaden für Gebäude des Bundes“ in der dritten Auflage [9]. Dieser Leitfaden führt Grundsätze ein, die für eine wirtschaftliche Sicherstellung der erforderlichen Brandsicherheit eines Gebäudes erforderlich sind. Außerdem enthält er eine Anleitung zur Erstellung von ganzheitlichen Brandschutzkonzepten. Der Geltungsbereich erstreckt sich über die Planung, Erstellung, Unterhaltung, den Betrieb und die Nutzung für Gebäude des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung und des Bundesministeriums für Verteidigung (BMVg). Die jeweiligen Landesbauordnungen bleiben unberührt. Die verfolgten Schutzziele dieses Leitfadens lehnen sich an die Schutzziele der MBO an. Hinsichtlich des Schutzzieles von Leben und Gesundheit wird hier definiert, dass Gebäudenutzer ein Gebäude verlassen können sollen „ohne in eine gefährliche Situation zu oder sonstige widrige Umstände zu geraten (Prinzip der Selbstrettung)“ [9].

Bei der Erstellung von Brandschutzkonzepten sind die vorgenommenen Brandschutzmaßnahmen bezüglich der Brandgefahren und der Einhaltung des Schutzzieles zu überprüfen. Als mögliche Nachweismethode wird hier die Nutzung von Ingenieurmethoden genannt. Zum Nachweis der Schutzziele der Personenrettung wird hier explizit der Nachweis durch Evakuierungsberechnungen aufgeführt.

3.1.5 Grundlagendokument Brandschutz

Das Grundlagendokument Brandschutz – Wesentliche Anforderung Nr.2 wurde 1994 im Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften veröffentlicht. Es dient der Harmonisierung eines grundlegenden technischen Konzeptes im europäischen Brandschutz. In diesem Dokument werden die Grundlagen für Nachweise im Brandschutz festgelegt.

Dabei wird beschrieben, dass Ingenieurmethoden im Brandschutz zur Bewertung eines erforderlichen Brandsicherheitsniveaus und zur Bemessung und Berechnung von notwendigen Schutzmaßnahmen herangezogen werden können [10]. Durch diese allgemeine Aussage soll erreicht werden, dass ein umfassender einheitlicher Ansatz zur Anwendung von Ingenieurmethoden im Brandschutz entwickelt wird.

3.1.6 Internationaler Stand der Normung

Durch die fortschreitende Entwicklung im Brandschutzingenieurwesen tendiert man international dazu, dass statt deskriptiver Brandschutzvorschriften immer mehr leistungsbezogene (performance based) Brandschutzkonzepte zum Nachweis für die Sicherheit im Brandschutz benutzt werden. Um der Notwendigkeit einer internationalen Harmonisierung durch Normierung bei der Erstellung schutzzielorientierter Brandschutzkonzepte gerecht zu werden, hat die International Organization for Standardization (ISO) innerhalb des Technischen Komitees ISO TC 92 „Brandschutz bei Bauwerken“ das Wissenschaftliche Komitee SC4 „Fire Safety Engineering“ gegründet [11]. Bis 1999 sind dabei acht Arbeitsdokumente ISO/TR 13387 – 1 bis 8 entstanden. Hiermit wurde die Grundidee verfolgt, Einflüsse verschiedener veränderlicher Größen, ausgehend von einer Brandentstehung in einem Bauwerk, darzustellen und Nachweismethoden für ein schutzzielorientiertes Konzept zu formulieren. Das Dokument ISO/TR 13387 – 8: Brandschutzingenieurwesen: Personenschutz [12] beschäftigt sich mit den theoretischen Ansätzen über das Modellverhalten von Simulationsmodellen und das Verhalten von Personen.

Zum Zweck der praktischen Anwendung werden die Arbeitsdokumente gegenwärtig durch sieben Arbeits- und zwei Projektgruppen mit internationaler Beteiligung um die folgenden Arbeiten erweitert [11]:

- Bemessungsbrandszenarien und Bemessungsbrände (Kanada)
- Bewertung, Verifizierung und Validierung von Rechenverfahren (Deutschland)
- Datensammlung für brandschutzingenieurtechnische Bemessungsverfahren (Frankreich)
- Rechenverfahren (Japan)
- Bewertung von Brandrisiken (USA)
- Verhalten und Bewegung von Menschen bei Bränden (Großbritannien)
- Verhalten von Gebäudestrukturen bei Brandangriff (Kanada).

In der Arbeitsgruppe „Verhalten und Bewegung von Menschen bei Bränden“ unter dem Vorsitz von Großbritannien werden zwei Dokumente ausgearbeitet. Eines behandelt die Grundlagenvermittlung bezüglich:

- des RSET – ASET Konzeptes (Zusammenhang von verfügbarer und erforderlicher Dauer)
- der Evakuierungsstrategien
- der Bestimmung der Reaktionsdauer
- der Bestimmung der Laufzeiten
- der Auswirkung von erhöhter Temperatur und Schadstoffen auf das Fluchtverhalten
- der Auswirkung von reduzierter Sichtweite auf das Fluchtverhalten und den Bewegungsablauf

Das zweite Dokument beschäftigt sich mit der Wahl personenbezogener Daten auf festgelegte Bemessungsszenarien. Hierbei soll erreicht werden, dass für verschiedene Bemessungsszenarien das individuelle Verhalten und die individuellen Eigenschaften von Personen erfasst werden und damit als Eingangsdaten für eine Bemessung dienen [11].

3.2 BEMESSUNGSRICHTLINIEN

3.2.1 Deskriptive Verordnungen

3.2.1.1 Sonderbauordnungen

Die Brandschutzanforderungen in der MBO beschränken sich auf Standardbauaufgaben, wie z.B. kleinere Wohn- oder Bürogebäude. Zur Kompensation besonderer Risiken im Brandschutz werden in der MBO Sonderbauten definiert, für die besondere Anforderungen an das Brandschutzkonzept gestellt werden. Sonderbauten werden nach § 2 Abs. 4 der MBO als bauliche Anlagen besonderer Art oder Nutzung definiert. Zu Sonderbauten zählen unter anderem Hochhäuser, Verkaufsstätten oder Versammlungsstätten. Um den spezielleren Anforderungen an diese besonderen baulichen Anlagen gerecht zu werden, sind für Sonderbauten Sonderbauordnungen formuliert worden.

In Tabelle 1 sind Angaben über die Bemessung der Rettungswege aus unterschiedlichen Bauordnungen zusammengefasst:

Rechtsgrundlage	Rettungsweglänge	Rettungswegbreite	
MBO [4]	35 m	1,00 m	nach DIN 18065
MSchulbauR [13]	35 m 10 m Stichflure	1,25 m	(personenabhängig)
MBeVO [14]	35 m 15m Stichflure	1,00 m	siehe MBO
MHHR (Entwurf) [15]	35 m 15 m Stichflure	1,20 m	
MVkVO [16]	25 m vom Verkaufsraum (Luftlinie) 35 m von Ladenstraße oder sonstigem Raum (Luftlinie)	2,00 m	
MVStättV [17]	30 - 60 m Entfernung Ausgang aus Versammlungsraum; abhängig von lichter Höhe	1,20 m	je 200 Pers. je 600 Pers. (im Freien)
MIndBauRL [18]	35 - 70 m abhängig von lichter Höhe und installierter Anlagen (Luftlinie)	2,00 m	

Tabelle 1: Zusammenstellung der Rettungsweglängen und -breiten basierend auf den Rechtsgrundlagen

Zu Tabelle 1 ist zu bemerken, dass die Angaben über die Rettungswege nicht komplett dargestellt sind. Unter anderem sind bei den Angaben der Breite nur die Standardfälle der Mindestbreiten der notwendigen Flure oder Treppen angegeben. Soweit nicht anders vermerkt, beziehen sich die Angaben der Rettungsweglänge auf den ersten Rettungsweg mit der Entfernung vom Aufenthaltsort bis zu einem notwendigen Treppenraum oder einem Ausgang ins Freie.

Die erstellten Brandschutznachweise mit den vorgeschriebenen Brandschutzkonzeptionen der Sonderbauordnungen, erfordern nach § 66 Abs. 2 Satz 3 der MBO eine bauaufsichtliche Prüfung oder eine Bescheinigung durch einen Prüfsachverständigen. Geprüfte Brandschutzkonzeptionen bilden die Grundlage der Baugenehmigung. Mit dem Instrument der Abweichungen nach § 67 der MBO kann von den Regelungen der Sonderbauordnungen abgewichen werden, wenn für Sonderbauten die in § 3 Abs. 1 und § 14 festgelegten Schutzziele der MBO in gleichem Maße erfüllt werden. Diese Nachweise können dann mit Brandschutzingenieurmethoden erfolgen [19]. Aus § 66 Abs. 2 Satz 3 der MBO ergibt sich, dass diese ebenfalls überprüft werden müssen.

3.2.1.2 Muster-Industriebaurichtlinie

Die Muster-Industriebaurichtlinie (MindBauRL) [18] regelt die Mindestanforderungen an den Brandschutz in Industriebauten. Diese Richtlinie formuliert allgemeingültig als erste ihrer Art die Zuhilfenahme von Ingenieurmethoden bei Brandschutznachweisen. Sie ist als Technische Baubestimmung in den Bundesländern bekannt gemacht worden.

Im Anhang 1 der MindBauRL werden die Grundsätze, Voraussetzungen und die Nachweisführung eines Nachweises durch Ingenieurmethoden allgemein beschrieben.

3.2.1.3 Muster-Versammlungsstättenverordnung

Die Muster-Versammlungsstättenverordnung (MVStättV) [17] bezieht sich auf den Bau und Betrieb von baulichen Anlagen mit hohen Personenkonzentrationen. Wie in Tabelle 1 dargestellt, wird die lichte Breite der Rettungswege durch die Personenzahl und die jeweilige Bauart (offen/geschlossen) bestimmt. Die lichte Breite eines jeden Teiles von Rettungswegen erfordert eine Mindestbreite von 1,20 m je 200 Personen. Für Versammlungsstätten im Freien und Sportstadien werden nur 1,20 m lichte Breite für 600 Personen benötigt. Diese Mindestbreite von 1,20 m entstammt aus der EN 13200-1:2003. Staffelungen sind nur in 60 cm Schritten möglich, sodass sich die Durchgangskapazität erst bei Erreichen einer solchen weiteren Modulbreite erhöht. Diese Modulbetrachtung basiert auf wissenschaftlichen Untersuchungen und makroskopischen Personenstrommodellen [20]. Die Durchgangskapazität für eine 1,20 m breite Öffnung beträgt 100 Personen pro Minute [20]. Damit ergeben sich für überdachte Versammlungsstätten 2 Minuten und für Versammlungsstätten im Freien 6 Minuten für den Durchgang. Bei den vorgenannten Dauern für den Durchgang handelt es sich allerdings um keine konkrete Schutzzielvorgabe in Form einer Zeitvorgabe [21]. Bedenkt man, dass die in Tabelle 1 angegebenen Rettungsweglängen nicht die absoluten Weglängen betrachten, sondern nur Weglängen für Teilbereiche, so ist es durchaus möglich, dass alleine für das Zurücklegen des Weges bis zum Ausgang ins Freie annähernd 2 Minuten benötigt werden können. Mit den Dauern für den Durchgang ist hier die Flussdauer durch einen Ausgang gemeint.

Neben der Angabe über die Bemessung von Rettungswegen, ist in der MVStättV zusätzlich die Bestimmung der zu erwartenden Personenanzahl vorhanden. Die ma-

ximale Anzahl der Personen ergibt sich nach § 1 Abs. 2 der MVStättV zu 2 Personen je m² Grundfläche des Versammlungsraums. Höhere Dichten können nur bei Personen auf Stufenreihen, z.B. in Sportstadien, erreicht werden.

3.2.1.4 EN 13200

Die europäische Norm EN 13200 behandelt die Einrichtung von Zuschaueranlagen. In Teil 1 werden Anforderungen für die räumliche Anordnung von Zuschauerplätzen festgelegt [22]. Die EN 13200-1:2003 (D) besitzt den Status einer deutschen Norm.

In Bezug auf die Personenrettung werden folgende Angaben gemacht:

- die Rettungsweglänge sollte 30 m in Gebäuden und 60 m im Freien nicht überschreiten
- die Mindestbreite eines Ausgangs beträgt 1,20 m
- die Zuschauerdichte auf Stehplätzen soll 47 Personen pro 10 m² nicht überschreiten
- das Fassungsvermögen der Zuschauer auf Sitzplätzen ergibt sich durch die Anzahl der Sitzplätze oder aus Division der Reihenlänge in Metern durch einen Koeffizienten mit einem Mindestwert von 0,5
- die Durchlasskapazität der Ausgänge sollte so bemessen sein, dass ein Sicherheitsplatz für Zuschauer im Freien innerhalb von 8 Minuten und für Zuschauer in Gebäuden innerhalb von 2 Minuten erreichbar ist
- ein 1,20 m breiter Ausgang ist in einer Minute für 100 Personen in der Ebene und für 79 Personen über Stufen passierbar

Für die Dauern der Durchlasskapazität gelten die Bedingungen analog zur MVStättV. Sollte von den festgelegten Werten in der EN 13200 abgewichen werden, muss eine Risikobeurteilung erfolgen.

3.2.2 Performance based Codes

3.2.2.1 MSC Circular Guidelines

Aufgrund des Untergangs der Fähre Estonia, bei der am 28. September 1994 852 Menschen ums Leben kamen, wurde 1994 eine „Estonia Konferenz“ von der International Maritime Organization (IMO) einberufen [23]. Bei dieser Konferenz wurde unter anderem beschlossen, dass für Ro-Ro-Fahrgastschiffe, die ab 1. Juli 1999 Kiel ge-

legt werden, eine schutzzielorientierte Evakuierungsanalyse während einer frühen Entwurfsphase verpflichtend wird.

Als Durchführungsverordnung wurde von der International Maritime Organization (IMO), die MSC Circular 1033 [25] bezüglich neuer Nachweise von Evakuierungen auf Fahrgastschiffen entwickelt. Diese wurde im August 2002 vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen bekannt gemacht [24] und ist als Teil der „Convention on the Safety of Life at Sea“ auch in Deutschland geltendes Recht. Seit 2002 beinhaltet sie den Nachweis der Evakuierung mittels Evakuierungssimulationen (advanced evacuation analysis) und ist die derzeit einzige international gültige Richtlinie, die Angaben hinsichtlich der Handhabung und Durchführung bei einem Nachweis durch Evakuierungssimulationen enthält.

Diese Durchführungsverordnung umfasst dabei im Wesentlichen die folgenden Festlegungen, um einen Nachweis mithilfe einer Simulation durchzuführen:

- notwendige Anforderungen hinsichtlich der Modelleigenschaften einer Simulation
- zahlenmäßige Angabe von zulässigen Dauern
- Verfahren für die Ermittlung der berechneten Dauer
- Nachweismethode
- anzusetzende Parameter der Personen (Alter, prozentuale Altersverteilung, Gehgeschwindigkeit, Reaktionsdauer in Abhängigkeit des Szenarios)
- anzusetzende Szenarien für die Untersuchung
- Anforderung an die Dokumentation und das Ergebnisdarstellung
- Anhang zur Validierung und Verifizierung von verwendeten Simulationsmodellen

Im November 2007 wurde die MSC Circular 1033 durch die MSC Circular 1238 [26] aktualisiert und enthält bezüglich der Durchführung von Nachweisen mittels Evakuierungssimulationen Änderungen im Bereich der Ermittlung der Reaktionsdauer und der Kalkulation der Gesamtdauer einer Evakuierung.

3.2.2.2 Richtlinie für mikroskopische Entfluchtungsanalysen (RiMEA)

Die Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen (RiMEA) [27] entstand aus einem Projekt, das von einer Gruppe von Initiatoren aus Deutschland, Österreich und der Schweiz im Jahr 2004 gegründet wurde.

RiMEA behandelt die Aufstellung von Entfluchtungsanalysen auf der Basis von Personenstromsimulationen. Sie lehnt sich in ihren Inhalten an die MSC Circular 1033 der IMO an [24]. Ziel der RiMEA ist es, standardisierte Kriterien bezüglich der Eingabe in Simulationen festzulegen und so eine erhöhte Transparenz bei der Beurteilung der Ergebnisse herzustellen. Um eine kontinuierliche Weiterentwicklung zu gewährleisten, ist es Mitgliedern des Projektes möglich, Beiträge einzubringen, die unter allen Beteiligten diskutiert werden. Durch das Einbringen von Beiträgen durch die Mitglieder und die anschließende gemeinschaftliche Diskussion wird die Richtlinie kontinuierlich weiterentwickelt.

Eine Anwendung der RiMEA ist rechtlich nicht verbindlich, allerdings wird nach ihrer endgültigen Fertigstellung eine Einordnung in das bauordnungsrechtliche Regelwerk angestrebt.

3.2.2.3 vfdb-Leitfaden für Ingenieurmethoden im Brandschutz

Der Leitfaden „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ [28] ist ein Technischer Bericht der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb). Er beschreibt die nach dem Stand der Wissenschaft und Technik verfügbaren ingenieurmäßigen Nachweise bei in der Praxis auftretenden Brandschutzproblemen. Hierbei wird deutlich, dass sich der Leitfaden nicht nur auf die Personenrettung beschränkt, sondern einen Überblick über die Planung und Bewertung eines mit ingenieurmäßigen Methoden aufgestellten Brandschutzkonzeptes gibt. Ziel des Leitfadens ist es, uneinheitliche Vorgehensweisen und getroffene Annahmen bei der Anwendung von Ingenieurmethoden zu harmonisieren.

Basis für die Konzeption des Leitfadens sind die vom ISO TC 92 Referat 4 erarbeiteten Technischen Berichte ISO TR 13387 Teil 1 bis 8. Das Kapitel 9 des Leitfadens befasst sich mit der Personenstromanalyse mit rechnerischen Nachweisverfahren. Hierbei werden Annahmen, die zu einer Aufstellung mittels Personenstromsimulationen notwendig sind, allgemein formuliert.

Wie bei RiMEA ist eine Anwendung des Leitfadens nicht verbindlich vorgeschrieben.

3.2.3 Vergleich RiMEA und vfdb-Leitfaden

Beide Richtlinien liefern Inhalte, die zur Aufstellung von Personenstromsimulationen notwendig sind. Schwerpunkt des vfdb-Leitfadens ist die ganzheitliche Betrachtung eines mit ingenieurmäßigen Methoden aufgestellten schutzzielorientierten Brandschutzkonzeptes. Die RiMEA konzentriert sich vollkommen auf die Aufstellung von Entfluchtungsanalysen durch Simulationsprogramme. In der inhaltlichen Strukturierung ähnelt die RiMEA einer Norm, der vfdb-Leitfaden hingegen vermittelt Grundlagen und Anwendungsgrundsätze aller Nachweisverfahren der Personenstromanalyse und hat daher die Form eines Berichtes. Außerdem lässt sich zwischen beiden Dokumenten in ihrem Inhalt unterscheiden. Während im vfdb-Leitfaden explizit ein Nachweiskonzept über die Dauer genannt wird, lässt sich in RiMEA indirekt auf ein Nachweiskonzept über Dauer und Dichte schließen. Angaben über grundlegende festzulegende Parameter wie Dauer, Gehgeschwindigkeit, Reaktionsdauer und Festlegung der Personenzahl sind in beiden Richtlinien enthalten, sind allerdings unterschiedlich in ihrer Gestaltung und in ihrem Umfang. Zusätzlich unterscheiden sich zum Teil die Begrifflichkeiten und anzusetzende Parameter voneinander. Zum Thema Validierung wird im vfdb-Leitfaden nur erwähnt, welche Methoden für eine Validierung von Simulationsprogrammen herangezogen werden können, die RiMEA hingegen bietet eine ausführliche Anleitung zu bestimmten Aspekten einer Validierung. Insgesamt fällt die RiMEA zur Aufstellung von Entfluchtungsanalysen durch Personenstromsimulationsprogramme ausführlicher aus. Hier werden zusätzliche Anforderungen an Inhalt und Umfang der Analysen und der Dokumentation gestellt.

Beide Richtlinien haben gemeinsam, dass eine Anwendung dieser bisher noch unverbindlich ist.

4 GRUNDLAGEN

4.1 BEGRIFFE

4.1.1 Räumung, Evakuierung und Entfluchtung

Die Begriffe der *Räumung* und *Evakuierung* lassen sich bezüglich der Dauer der Gefährdung und der damit verbundenen Maßnahme unterscheiden.

Bei einer *Evakuierung* handelt es sich um eine langfristig anhaltende Gefährdung, wodurch eine Verlegung (evtl. auch durch Transport) von Menschen und Tieren in einen Bereich mit adäquatem Versorgungsniveau veranlasst wird. Hierbei ist eine organisierte Vorplanung mit ausreichendem Zeitvorlauf notwendig. Demgegenüber bezeichnet die *Räumung* das vorübergehende Freiräumen bzw. angeordnete Verlassen eines gefährdeten Bereiches oder Gebietes in einen nahen gesicherten Bereich. Die Gefährdung ist in diesem Fall akut und nur kurzfristig wirksam. Eine Räumung kann mit sofortiger Wirkung und ohne Vorplanung beginnen [29]; [30].

Mit einer Entfluchtung ist lediglich die Situation des „In-Sicherheit-Bringens von Personen aus einem gefährdeten Bereich“ bezeichnet [27] und ist somit allgemeiner definiert.

Die Begriffe der *Räumung*, *Evakuierung* und *Entfluchtung* werden in der Regel synonym verwendet. Sie haben gemeinsam, dass sie das „In-Sicherheit-Bringen“ mit einem Ortswechsel von Personen aus einem gefährdeten Bereich in einen gesicherten Bereich formulieren.

Aufgrund der weitestgehenden synonymen Verwendung der Begriffe, der Gemeinsamkeit eines ähnlichen Vorgehens und der Beschränkung auf Fußgänger, wird innerhalb dieser Arbeit auf eine weitere Differenzierung zwischen den Begriffen verzichtet, jedoch werden wegen ihrer Bedeutung die Begriffe *Räumung* und *Entfluchtung* bevorzugt verwendet.

Im vfdb-Leitfaden für Ingenieurmethoden des Brandschutzes [28] wird bezüglich der Personenstromanalyse der Begriff „Räumung“ verwendet. Im Gegensatz dazu wird in der Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen (RiMEA) [27] der Begriff „Entfluchtung“ angewendet.

4.1.2 Gesicherter Bereich

Der gesicherte Bereich ist ein Bereich am Ende eines Fluchtweges, der vor Einwirkungen eines Schadensereignisses geschützt ist. Eine Versorgung durch Einsatzkräfte und Helfer muss in diesem Bereich möglich sein. Die Lage des gesicherten Bereiches kann sich innerhalb und außerhalb eines Gebäudes befinden und muss genügend Raum für die maximal zu erwartende Personenanzahl bieten [27].

4.2 DEFINITIONEN DER DAUERN

4.2.1 Entfluchtungsdauer

Die Entfluchtungsdauer bzw. Räumungszeit ist ein wesentlicher Faktor für die Bewertung der Evakuierung. Beginnend mit der Brandentstehung beschreibt sie die Dauer, die Personen benötigen um von einem gefährdeten in einen gesicherten Bereich zu gelangen. Die Entfluchtung gilt als abgeschlossen, sobald alle Personen einen sicheren Bereich erreicht haben.

Die erforderliche Dauer wird, abgesehen von den unterschiedlichen Bezeichnungen, in der Richtlinie für mikroskopische Entfluchtungsanalysen [27] und dem vfdb-Leitfaden für Ingenieurmethoden des Brandschutzes [28] gleich definiert. Da es sich bei der Berechnung um eine zeitliche Ausdehnung eines Ereignisses handelt, wird hier die Definition nach [27] verwendet.

Die Definition der Entfluchtungsdauer lautet:

$$t_{i, \text{Flucht}} = t_{\text{Detekt}} + t_{\text{Alarm}} + t_{i, \text{Reakt}} + t_{i, \text{Lauf}}$$

Dabei werden die einzelnen Dauern wie folgt definiert:

$t_{i, \text{Flucht}}$ = erforderliche individuelle Entfluchtungsdauer; ist die Gesamtdauer, die sich aus der Summe aller Einzeldauern, vom Beginn der Brandentstehung bis zum Abschluss der Entfluchtung bzw. des Erreichens eines sicheren Bereiches, berechnet.

t_{Detekt} = Detektionsdauer; ist die Dauer vom Beginn eines auslösenden Ereignisses bzw. der Brandentstehung bis zur Entdeckung

t_{Alarm} = Alarmierungsdauer; Dauer vom Detektionszeitpunkt bis zur Auslösung des Entfluchtungssignals

- $t_{i, \text{Reakt}}$ = individuelle Reaktionsdauer; ist die Dauer vom Zeitpunkt der Alarmauslösung bis zur Initiierung des Entfluchtungsprozesses
- $t_{i, \text{Lauf}}$ = individuelle Laufdauer; ist die Dauer, die eine Person von ihrer Startposition bis zum Erreichen eines sicheren Bereiches benötigt.

Aufgrund der Einbeziehung von individuellen Lauf- und Reaktionsdauern, erhält man bei der Ermittlung der individuellen Entfluchtungsdauer eine Schwankungsbreite in den Ergebnissen. In RiMEA wird die Entfluchtungsdauer daher weiter spezifiziert und folgendermaßen unterschieden:

- *Gesamtentfluchtungsdauer* t_{Flucht}
(ist das Maximum aus den allen individuellen Entfluchtungsauern;
 $T_{\text{Flucht}} = \max(t_{i, \text{Flucht}})$)
- *Minimale Gesamtentfluchtungsdauer* $t_{\text{Flucht, min}}$
(ist das Minimum aus einer Gesamtheit von Entfluchtungsauern)
- *Maximale Gesamtentfluchtungsdauer* $t_{\text{Flucht, max}}$
(ist das Maximum aus einer Gesamtheit von Entfluchtungsauern)
- *Mittlere Gesamtentfluchtungsdauer* $t_{\text{Flucht, mittel}}$
(ist das arithmetische Mittel aus einer Gesamtheit von Entfluchtungsauern)
- *Signifikante Gesamtentfluchtungsdauer* $t_{\text{Flucht, signifikant}}$
(ist die Dauer die aus einer Gesamtheit von Entfluchtungsauern gleich oder größer als 95 % ist)

Eine weitere Unterscheidung der Entfluchtungsauern bzw. Räumungszeiten wird im vfdb-Leitfaden für Ingenieurmethoden des Brandschutzes nicht durchgeführt.

Die Zusammenhänge der einzelnen Dauern werden durch folgendes Schema illustriert:

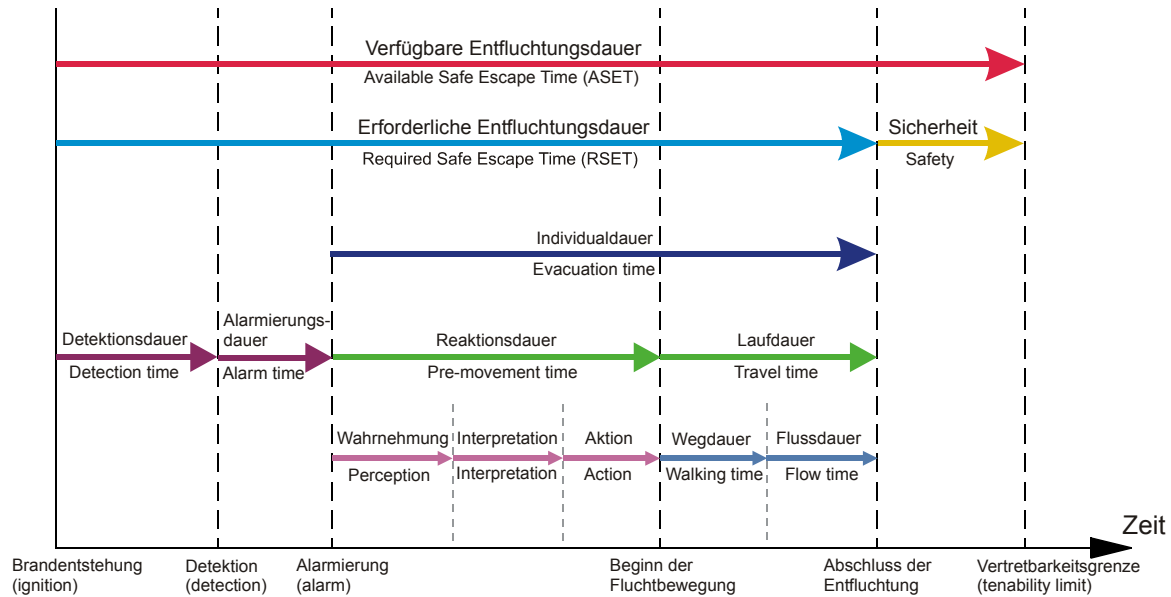


Abbildung 1: Schema des zeitlichen Ablaufs der Entfluchtung

Die verfügbare Entfluchtungsdauer entspricht der erforderlichen Entfluchtungsdauer inklusive eines explizit berücksichtigten Sicherheitszuschlages, sofern bei der Ermittlung der verfügbaren Entfluchtungsdauer nicht bereits ein Sicherheitsfaktor implizit berücksichtigt wurde.

In der englischsprachigen Literatur wird die erforderliche Entfluchtungsdauer als „Required Safe Escape Time – RSET“ bezeichnet. Dieser wird eine „Available Safe Escape Time – ASET“ gegenübergestellt, die der verfügbaren Entfluchtungsdauer entspricht.

Der theoretische Ansatz für den Nachweis über die Entfluchtungsdauer sollte über $RSET < ASET$ bzw. $t_{\text{Flucht, erforderlich}} < t_{\text{Flucht, verfügbar}}$ erfolgen [28]. Eine maximal zulässige Entfluchtungsdauer ist aber allgemein nicht gegeben und individuell verschieden. Diese Dauer kann für Brandsicherheitsnachweise beispielsweise über die Dauer der Vorhaltung einer raucharmen Schicht erfolgen.

Die Reaktionsdauer und die Laufdauer werden nach [31] mit dem Begriff „Evacuation time“ zusammengefasst. Ein deutsches Pendant ist unbekannt, daher wurde hier der Oberbegriff „Individualdauer“ verwendet. Eine Übersetzung in Evakuierungsdauer wäre in der Definition der Entfluchtungsdauer zu ähnlich und würde zu Verwechslungen führen. Außerdem wird durch den Begriff der „Individualdauer“ dargestellt, dass die Entwicklung dieser Zeitspanne individuell von den Eigenschaften der Personen und der Umgebung abhängig ist. Daher besteht eine Abgrenzung zur Detektions-

und Alarmierungsdauer, da in der Ermittlung dieser Dauern hauptsächlich die Eigenschaften des verwendeten Alarmierungssystems einkalkuliert werden. Detektions- und Alarmierungsdauern sind für die betroffenen Personen gleich und werden damit durch einen Einzelwert für die Ermittlung der Entfluchtungsdauer repräsentiert.

4.2.2 Detektions- und Alarmierungsdauer

Die Detektionsdauer erstreckt sich über einen Bereich vom Beginn der Brandentstehung oder eines anderen zur Entfluchtung führenden Ereignisses bis zum Zeitpunkt, an dem die Gefährdung entdeckt wird. Die Detektion kann sowohl durch automatische Einrichtungen als auch durch Personen erfolgen. Die Höhe der Detektionsdauer wird dabei von verschiedenen Faktoren beeinflusst, diese wären:

- Brandentwicklungsgeschwindigkeit
- Brandort relativ zu Detektions- bzw. Alarmierungssystemen und Personen
- Ansprechempfindlichkeit von Meldesystemen
- Geometrische Randbedingungen
- Personencharakteristik

Bei automatischen Einrichtungen ist potenziell die Detektionsdauer rechnerisch abschätzbar. Über Detektionsdauern von manuellen Systemen dagegen lässt sich schlecht eine pauschale Aussage machen, da hier spezielle Handlungen von Personen für die Alarmauslösung notwendig sein können.

Sobald ein Gefährdungsereignis entdeckt wurde, beginnt die Alarmierungsdauer.

Sie beschreibt die Dauer, die benötigt wird, um nach der Detektion eine Aufforderung an die betroffenen Personen zur Entfluchtung zu geben. Wie die Detektionsdauer ist auch die Alarmierungsdauer abhängig vom installierten Alarmierungssystem.

Detektions- und Alarmierungsdauer werden in der Regel auch nur zu einer Alarmierungsdauer bzw. -zeit zusammengefasst. Richtwerte für die Detektions- und Alarmierungsdauer liegen je nach Detektionsart zwischen 1,0 bis 5,0 Minuten [7].

Einzelne Anhaltswerte für die Alarmierungsdauer lassen sich aus empirischen Untersuchungen von Purser [31] entnehmen. Hierbei werden die Alarmierungssysteme in 3 Kategorien unterteilt.

Kategorie	Charakteristik	Alarmierungsdauer t_{Alarm} [min]
A1	automatisches Brandmeldesystem mit sofortiger Alarmierung der betroffenen Bereiche	≈ 0
A2	zweistufiges automatisches Brandmeldesystem mit sofortiger Alarmierung einer Zentrale und nachgeschalteter zeitverzögerter Alarmierung der betroffenen Bereiche (für Sprachalarmierungssysteme die zweifache Dauer der Ansage hinzuaddieren)	2 - 5
A3	keine oder nur lokale automatische Brandmeldung	Keine pauschale Aussage möglich

Tabelle 2: Richtwerte für die Alarmierungsdauer in Abhängigkeit vom Alarmierungssystem [31]

Im anlagentechnischen und abwehrenden Brandschutz wird für die Ermittlung der Zeitdauer von einer Brandentstehung bis zum Beginn der Löscharbeiten der Begriff der Alarmierungszeit verwendet. Hiermit wird die Zeitspanne bezeichnet, die benötigt wird, um nach einer Entzündung die Feuerwehr zu benachrichtigen. Diese entspricht daher nur dann der Detektions- und Alarmierungsdauer im Bereich der Entfluchtungsberechnung, wenn gleichzeitig mit der Personenalarmierung auch die Meldung an die Feuerwehr erfolgt.

4.2.3 Reaktionsdauer

Die Bezeichnungen Reaktionsdauer oder Pre-movement time beschreiben den Zeitraum von der Alarmauslösung bis zum Fluchtbewegungsbeginn.

Die Begriffe *delay time* oder *Verzögerungszeit* werden oftmals synonym für die Bezeichnungen Reaktionsdauer oder Pre-movement time benutzt [32]. Allerdings kann hier die Definition über den beinhaltenden Zeitraum von der Reaktionsdauer abweichen. Die *Verzögerungszeit* oder *delay time* kann dabei die Alarmierungs- oder auch die Detektionsdauer beinhalten (siehe Abbildung 2) [33];[34];[35]. Alle Dauern haben jedoch gemeinsam, dass sie eine Zeitspanne vor Beginn der Fluchtbewegung beschreiben.

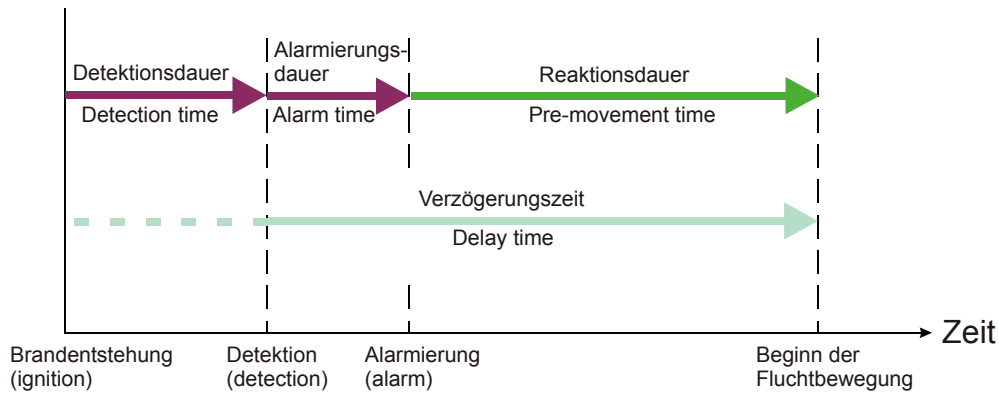


Abbildung 2: Vergleich Reaktionsdauer / Pre-movement time und Verzögerungszeit / delay time

Erschwerend kommt hinzu, dass der Begriff Verzögerungszeit auch in Handrechenverfahren für die Berechnung von Personenauslastung verwendet wird.

Der vfdb-Leitfaden für Ingenieurmethoden im Brandschutz sowie die Richtlinie für mikroskopische Entfluchtungsanalysen beschränken sich auf den Begriff Reaktionsdauer bzw. Pre-movement time.

In der Reaktionsdauer werden verschiedene Verhaltensweisen erfasst. Dazu kann sie grundsätzlich in drei Phasen aufgeteilt werden [33]:

- Wahrnehmung
- Interpretation
- Aktion

Die Phase der Wahrnehmung beschreibt die Dauer bis ein Alarm von den Personen erkannt wird. In der Interpretationsphase wird das wahrgenommene Signal gedeutet und möglicherweise die Umgebung untersucht oder Brandbekämpfungsmaßnahmen getroffen bevor über ein Verlassen eines gefährdeten Bereiches entschieden wird.

Vor dem Verlassen können sich Personen noch mit anderen Handlungen beschäftigen, wie z.B. das Anlegen von Kleidung oder dem Suchen und Warnen anderer Personen.

Die Höhe der anzusetzenden Reaktionsdauer ist wesentlich abhängig von Faktoren, wie der Aufnahmebereitschaft von Personen, der Vertrautheit mit dem Gebäude, der Art des Alarmierungssystems, der Gebäudeart und Komplexität sowie der Qualität des Brandschutzmanagements. Richtwerte für die Reaktionsdauer sind in Tabelle 3 und Tabelle 4 dargestellt.

Gebäudetyp und Charakteristik	Reaktionsdauer [min]		
	W1	W2	W3
Bürogebäude, Handels- und Industrieflächen, Schulen (Personen sind wach und mit dem Gebäude, Alarmierungssystem und Evakuierungsprozeduren vertraut)	<1	3	>4
Geschäfte, Ausstellungen, Museen, Freizeiteinrichtungen und andere Versammlungsstätten (Personen sind wach aber nicht mit dem Gebäude, Alarmierungssystem und Evakuierungsprozeduren vertraut)	<2	3	>6
Wohnungen, Internate, Schafsäle (Personen möglicherweise in schlafendem Zustand aber überwiegend mit dem Gebäude, Alarmierungssystem und Evakuierungsprozeduren vertraut)	<2	4	>5
Hotels und Pensionen (Personen möglicherweise in schlafendem Zustand und nicht mit dem Gebäude, Alarmierungssystem und Evakuierungsprozeduren vertraut)	<2	4	>6
Krankenhäuser, Altenheime und Pflegeeinrichtungen (Personen benötigen möglicherweise Helfer)	<3	5	>8

W1: Sprachanweisungen durch Lautsprechersystem

W2: Bandansage und/oder Anzeigetafeln

W3: Alarmglocke, Sirene oder ähnliches

Tabelle 3: Reaktionsdauern in Abhängigkeit vom Gebäudetyp, Charakteristik und Alarmierungssystem [32]

In Tabelle 3 ist erkennbar, dass durch Sprachanweisungen die Reaktionsdauer gesenkt werden kann. In [36] wurde untersucht, inwieweit sich die Länge der Sprachnachricht auf die Reaktionsdauer auswirkt. Dabei wurde festgestellt, dass hinsichtlich der Reaktionsdauer kurze Nachrichten effektiver aber weniger verlässlich sind. Bei längeren Sprachnachrichten tendierten Personen dazu, sich die Nachricht ein zweites Mal anzuhören. Dies verlängert zwar die Reaktionsdauer, aber Personen sind höher motiviert den Raum zu verlassen. In der Untersuchung lagen im Vergleich mit einer herkömmlichen Alarmsirene die Reaktionsdauern der Alarmierung mit den Sprachnachrichten deutlich unter denen der Sirene.

Den Einfluss von Evakuierungsübungen der Gebäudenutzer und des Alarmierungssystems zeigt nachstehende Tabelle:

Warnsystem	Reaktionsdauer [min]		
	mit Räumungs- und Evakuierungsübungen	Durchschnittliche Reaktionszeit	ohne Räumungs- und Evakuierungsübungen
Alarmsirene	< 4	7	> 10
Alarmsirene mit auf- und abschwellendem Ton	< 3	5	> 7
Alarmsirene mit auf- und abschwellendem Ton sowie einer zusätzlichen Informationsnachricht	< 2	3,5	> 5
Alarmsirene mit auf- und abschwellendem Ton sowie mit zusätzlichem optischen Informationssystem (z.B. mittels Bildschirmen)	< 1	2	> 3

Tabelle 4: Reaktionsdauern in Abhängigkeit des verwendeten Alarmierungssystems und der Vertrautheit mit Evakuierungsprozeduren [37]

Obige Tabellen belegen den Einfluss von verschiedenen Faktoren auf die Höhe der Reaktionsdauer. Hierbei werden allerdings nur Absolutwerte angegeben die als Mittelwerte zu verstehen sind. In diesen Fällen würden alle Personen gleichzeitig mit einer Entfluchtung beginnen. Individuelle Reaktionsdauern folgen hingegen einer Verteilung, wie sie qualitativ in Abbildung 3 gezeigt ist.

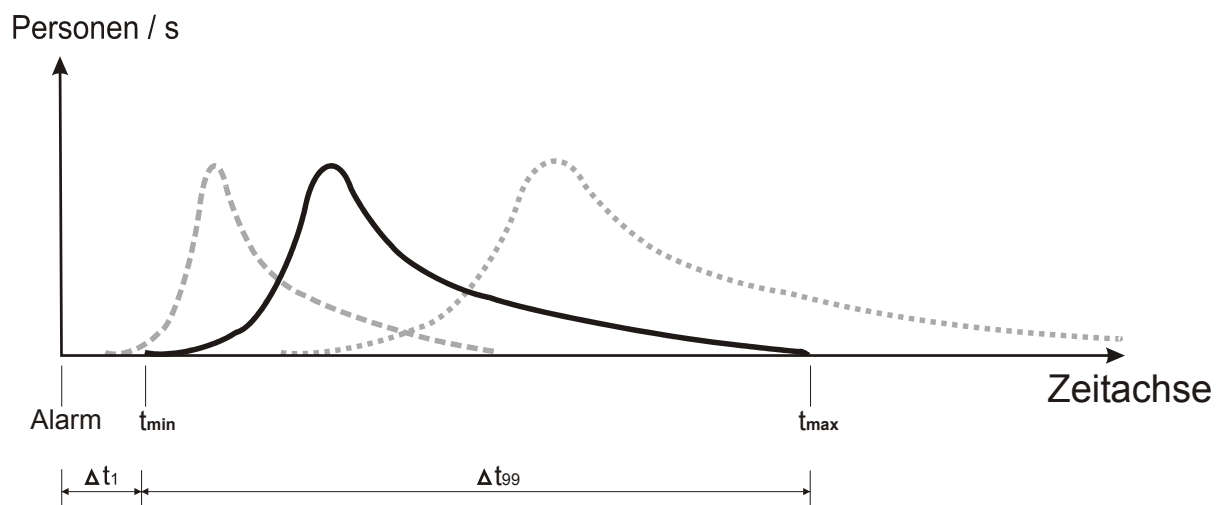


Abbildung 3: Darstellung der Verteilung der Reaktionsdauern auf die Personen (aufbereitet nach [31])

Die Verteilungskurven stellen den Bereich dar, in dem die Personen relativ zum Alarmierungszeitpunkt mit der Fluchtbewegung beginnen. Zum Zeitpunkt t_{\min} setzen sich die ersten Personen in Bewegung, ebenfalls beschrieben durch das Zeitintervall Δt_1 (1%-Perzentile). Zunächst reagieren nur wenige Personen auf eine drohende Gefährdung, unmittelbar danach steigt die Verteilungskurve steil bis auf einen Maximalwert an. Danach fällt die Kurve bis zum Zeitpunkt t_{\max} etwas flacher wieder ab, bis alle Personen auf die Gefährdung reagiert haben. Das Zeitintervall, in dem Personen auf die Gefahr reagieren wird mit Δt_{99} (99%-Perzentile) bezeichnet. Beim Betrachten dieses Bereiches wird deutlich, dass die meisten Personen in den ersten 2/3 von Δt_{99} reagieren und mit der Fluchtbewegung beginnen. Im letzten Drittel dieses Intervalls wird durch den flachen gestreckten Verlauf der Kurve deutlich, dass ein geringer Personenanteil sehr spät auf Aufforderungen zum Verlassen reagiert.

Die Anfangs- und Endzeitpunkte und die damit einhergehende Höhe des Spreizungsbereiches (Δt_{99}) hängen dabei von der Qualität des Brandschutzmanagements ab. Höhere Qualitätsstandards (gestrichelte Verteilungskurve) bewirken eine Senkung der Zeitpunkte, sowie eine Reduktion des Spreizungsbereiches (Δt_{99}) und damit der hohen Verzögerung durch Nachzügler. Niedrige Qualitätsstandards bewirken das Gegenteil (dargestellt durch die gepunkteten Verteilungskurven in Abbildung 3).

Die Berechnung der minimalen und maximalen Reaktionsdauer ergibt sich damit zu:

$$t_{\text{Reakt, min}} = \Delta t_1$$

$$t_{\text{Reakt, max}} = \Delta t_1 + \Delta t_{99}$$

Dieser empirische Grundsatz ist sowohl im vfdb-Leitfaden für Ingenieurmethoden im Brandschutz als auch in der Richtlinie für mikroskopische Entfluchtungsanalysen durch die Untersuchungen von [31] berücksichtigt. Die Festlegung von Reaktionsdauern erfolgt hierbei durch Kategorisierungen hinsichtlich der Nutzungsart und der Eigenschaften der Personen, der Art des Alarmierungssystems, der Gebäudegeometrie und der Qualität des Brandschutzmanagements.

Unterschiedliche Eigenschaften der Population, wie der Wachsamkeitsgrad und die Vertrautheit mit dem Gebäude, wirken sich auf die Reaktionsdauer aus. Durch Kombinationen dieser Eigenschaften lassen sie sich mit verschiedenen Nutzungsarten von baulichen Anlagen verbinden.

Kategorie	Charakteristik			Nutzungsart
	Wachsamkeit	Vertrautheit	Dichte	
A	wach	vertraut	niedrig	Büro, Industrie
B	wach	unvertraut	hoch	Handel, Gaststätten, Versammlungsstätten
C(a)	schlafend	vertraut	niedrig	Wohnungen
C(b)	betreut	betreut	niedrig	Wohnheime
C(c)	schlafend	unvertraut	niedrig	Hotels, Herbergen
D	med. betreut	unvertraut	niedrig	Medizinische Betreuung
E	Transport	unvertraut	hoch	Verkehrsanlagen (Bahnhof, Flughafen)

Tabelle 5: Kategorisierung der Personencharakterisierung und Nutzungsart [31];[28];[27]

Eine weitere Kategorisierung erfolgt über die Komplexität des Grundrisses. Klar strukturierte, einfache Grundrisse vermindern die Reaktionsdauer in der Aktionsphase.

Kategorie	Gebäudekomplexität
B1	einfache, überwiegend rechtwinklige Struktur, eingeschossig, nur wenige Räume bzw. Unterteilungen, einfacher Grundriss mit Ausgängen in Sichtlinie, kurze Wegstrecken, geeignete Vorkehrungen für direkt ins Freie führende Ausgänge
B2	einfacher Grundriss mit mehreren Räumen (auch mehrgeschossig), Bauweise entspricht überwiegend präskriptiven Vorgaben
B3	großer, komplexer Grundriss

Tabelle 6: Kategorisierung der Gebäudekomplexität [28]

Wie bereits in Tabelle 3 und Tabelle 4 sichtbar, wirkt sich die Art der Alarmierung auf die Entwicklung der Reaktionsdauer aus. Insbesondere die Wahrnehmungs- und Interpretationsphase können z.B. durch Alarmierungssysteme mit Sprachanweisungen verkürzt werden.

Kategorie	Alarmierungssystem
A1	automatisches Brandmeldesystem mit sofortiger Alarmierung der betroffenen Bereiche
A2	zweistufiges automatisches Brandmeldesystem mit sofortiger Alarmierung einer Zentrale und nachgeschalteter zeitverzögerter Alarmierung der betroffenen Bereiche
A3	keine oder nur lokale automatische Brandmeldung

Tabelle 7: Kategorisierung des Alarmierungssystems [28]

Die Qualität des Brandschutzmanagements ist ein wesentlicher Bestandteil für die Höhe der Reaktionsdauer. Hierbei spielt die Vorbereitung auf einen eventuellen Gefährdungsfall eine erhebliche Rolle. Erfahrungen haben gezeigt, dass beispielsweise durch regelmäßige Räumungsübungen und das Vorhandensein von Brandschutzhelfern die Reaktionsdauer reduziert werden kann. Entsprechende Kategorisierungen des Brandschutzmanagements sind in Tabelle 8 definiert.

Kategorie	Brandschutzmanagement
M1	Personal bzw. ständige Gebäudenutzer sind in den Belangen des Brandschutzes gut ausgebildet. Es gibt Brandschutzhelfer, eine Gefahrenabwehr und Notfallplanung sowie regelmäßige Schulungen und Räumungsübungen. In öffentlich zugänglichen Bereichen muss in Sicherheitsfragen geschultes Personal in relativ hoher Zahl vorhanden sein. Eine unabhängige Überprüfung und Bewertung des Sicherheitssystems und der zugehörigen Verfahrensweisen ist notwendig. In öffentlich zugänglichen Bereichen ist ein Lautsprechersystem vorzusehen.
M2	wie M1, jedoch mit einem geringeren Anteil an geschultem Personal. Brandschutzhelfer und eine unabhängige Prüfung / Bewertung des Sicherheitssystems sind nicht erforderlich.
M3	Brandschutzmanagement entsprechend dem erforderlichen Mindeststandard hinsichtlich der Personensicherheit

Tabelle 8: Kategorisierung des Brandschutzmanagements [28]

Die Festlegung der Reaktionsdauern erfolgt aus Kombinationen der vorangegangenen Einzelkategorisierungen. Fehlende Kombinationen schließen sich entweder aus (Brandschutzmanagement M1 – M2 nicht verträglich mit Alarmierungssystem A3) oder sind wegen fehlendem Datenmaterial nicht vorhanden (Kategorie D und E). Die Werte, die mit einem „größer als“ Zeichen versehen sind, steht vergleichsweise we-

nig Datenmaterial zur Verfügung und sind daher mit einer größeren Unsicherheit behaftet.

Szenario	Δt_1 [min]	Δt_{99} [min]
Kategorie A: wach, vertraut, geringe Dichte		
M1 B1 – B2 A1 – A2	0,5	1
M2 B1 – B2 A1 – A2	1	2
M3 B1 – B2 A1 – A3	>15/ 10	>15/ 20
B3: addiere 0,5 min zu Δt_1 wegen schwierigerer Orientierung		
Kategorie B: wach, unvertraut, hohe Dichten		
M1 B1 A1 – A2	0,5	2
M2 B1 A1 – A2	1	3
M3 B1 A1 – A3	>15/ >10	>15/ >20
B2: addiere 0,5 min zu Δt_1 wegen schwierigerer Orientierung		
B3: addiere 1,0 min zu Δt_1 wegen schwierigerer Orientierung		
Kategorie C(a): schlafend, vertraut, geringe Dichten		
M2 B1 A1	5/ 5	5/ 10
M3 B1 A3	10	>20
Kategorie C(b): betreute Wohnanlagen, geringe Dichten		
M1 B2 A1 – A2	10	20
M2 B2 A1 – A2	15	25
M3 B2 A1 – A3	>20/ >15	>20/ >25
Kategorie C(c): schlafend, unvertraut, geringe Dichten		
M1 B2 A1 – A2	15/ 15	15/ 20
M2 B2 A1 – A2	20/ 20	20/ 25
M3 B2 A1 – A3	>20/ >20	>20/ >25
B3: addiere 1,0 min zu Δt_1 wegen schwierigerer Orientierung		

Tabelle 9: Festlegung der Reaktionsdauern [31];[28];[27]

Die Verteilung der Reaktionsdauern in RiMEA erfolgt in abgewandelter Form nach den Untersuchungen von [31]. Daher bestehen zwischen der Festlegung der Reaktionsdauern in RiMEA und dem vfdb-Leitfaden für Ingenieurmethoden des Brand-schutzes leichte Unterschiede. Dies ist in der Tabelle dargestellt durch zwei Werte innerhalb einer Spalte. Der erste Wert entstammt dem vfdb-Leitfaden, der zweite Wert entspricht dem der RiMEA. Innerhalb der Tabelle wird deutlich, dass die nied-

rigsten Dauern bei hohem Wachsamkeitsgrad und hoher Qualitätsstufe des Brandschutzmanagements erreicht werden.

Bei der gesamten Betrachtung der Tabellen, die Richtwerte für die Reaktionsdauer angeben, wird deutlich, dass die Reaktionsdauer mit steigendem Informationsgehalt der Personen sinkt. Weiter ist erkennbar, dass mit sinkender Qualität der Alarmierung die Reaktionsdauern steigen und für die maximale Dauer kein genauer Wert festgelegt werden kann. Gerade bei Alarmierung durch Sirenen ist zusätzlich damit zu rechnen, dass aufgrund ihrer Lautstärke eine Kommunikation der Personen untereinander erschwert wird. Einen Überblick über empirisch ermittelte Reaktionsdauern liefert [38]. Bei der Betrachtung wird deutlich, dass bei schlechter Alarmierung die maximale Reaktionsdauer unter schlechten Umständen über die in RiMEA und vfdb-Leitfaden angegebenen Richtwerte hinausgehen kann.

Da die Reaktionsdauer wesentlich die Entwicklung der Gesamtentfluchtungsdauer beeinflusst und in bestimmten Fällen sogar die Laufdauer in ihrer Höhe überschreiten kann, ist der Bestimmung der Reaktionsdauer der gleiche Stellenwert beizumessen wie der Ermittlung der Laufdauer.

4.2.4 Laufdauer

Die Dauer vom Beginn der Fluchtbewegung bis zum Erreichen eines sicheren Bereiches wird Laufdauer (RiMEA) oder Fluchtdauer (vfdb) genannt.

Die Entwicklung dieser Dauer gliedert sich vorrangig in die Dauer, die für das Zurücklegen des Weges benötigt wird und die Dauer des Flusses bei Engstellen. Genauer differenziert hängt die Wegdauer von der Distanz der Startposition bis zum gewählten Ausgang und der individuellen Gehgeschwindigkeit ab. Ein weiterer Faktor ist hier die Gebäudekomplexität; mit zunehmender Komplexität wird die Orientierung der Gebäudenutzer erschwert.. Hieraus resultiert eine Dauer, die für das Suchen des Weges benötigt wird.

Die Flussdauer ist dagegen abhängig von der Durchflusskapazität der Engstellen und der damit einhergehenden Entwicklung von Personenstauungen vor Engstellen oder durch zusammentreffende Personengruppen. Zusätzlich ist die Flussdauer von der Anzahl der Personen bzw. der Personendichte abhängig.

Ein qualitativ hoher Standard des Brandschutzmanagements kann die Flussdauer vermindern. Regelmäßige Räumungsübungen oder Brandschutzhelfer vor Ort kön-

nen zu einer optimaleren Auslastung der Ausgänge führen und damit die Flusssdauer verkürzen.

4.3 GESCHWINDIGKEIT

Betrachtet man die Geschwindigkeit, mit der sich eine Person bewegt, so muss man die Geh- von der Laufgeschwindigkeit trennen. Diese Fortbewegungsarten unterscheiden sich dadurch, dass beim Gehen mindestens ein Fuß und kurzzeitig auch beide Füße den Boden berühren. Im Gegensatz dazu befindet sich die Person während des Laufens zwischen den Stützphasen in einer kurzen Flugphase. Als obere Grenze des natürlichen Gehens nennt Weidmann [39] eine Geschwindigkeit von 2,0 m/s. Aus Gleichgewichtsgründen gilt als untere Grenze eine Gehgeschwindigkeit in Höhe von 0,5 m/s. Aufgrund von empirischen Untersuchungen wird die Durchschnittsgeschwindigkeit von Personen in der Ebene zu 1,34 m/s angenommen. Typische Gehgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht sind in Tabelle 10 und Tabelle 11 angegeben.

Populationsgruppe	Gehgeschwindigkeit in der Ebene	
	Minimum [m/s]	Maximum [m/s]
Frauen, jünger als 30 Jahre	0.93	1.55
Frauen, 30 – 50 Jahre	0.71	1.19
Frauen, älter als 50 Jahre	0.56	0.94
Frauen, älter als 50 Jahre, beeinträchtigte Mobilität (1)	0.43	0.71
Frauen, älter als 50 Jahre, beeinträchtigte Mobilität (2)	0.37	0.61
Männer, jünger als 30 Jahre	1.11	1.85
Männer, 30 – 50 Jahre	0.97	1.62
Männer, älter als 50 Jahre	0.84	1.40
Männer, älter als 50 Jahre, beeinträchtigte Mobilität (1)	0.64	1.06
Männer, älter als 50 Jahre, beeinträchtigte Mobilität (2)	0.55	0.91

Tabelle 10: Gehgeschwindigkeiten nach MSC Circular 1238, abhängig von Alter und Geschlecht [26]

In RiMEA erfolgt die Angabe typischer Geschwindigkeiten allgemeiner.

Personengruppe	Gehgeschwindigkeit in der Ebene	
	Minimum [m/s]	Maximum [m/s]
Unter 30 Jahre	0,58	1,61
30 bis 50 Jahre	1,41	1,54
Über 50 Jahre	0,68	1,41
Personen mit beeinträchtigter Mobilität	0,46	0,76

Tabelle 11: Gehgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Alter nach RiMEA [27]

Die in RiMEA angegebenen Geschwindigkeiten sind über die Geschlechter gemittelt. Hierin wird zusätzlich erwähnt, dass die Durchschnittsgeschwindigkeit von Männern um 10,9 % größer als die der Frauen ist. Zur Erstellung dieser Tabelle wurde ein durchschnittlicher Geschwindigkeitsverlauf in Abhängigkeit des Alters ausgewertet. Jedem Alter wird dabei nur eine mittlere Geschwindigkeit zugeordnet. Um die Geschwindigkeiten anteilig auf die Personen aufzuteilen, wurde in RiMEA eine Standardpopulation festgelegt, die jeweils zur Hälfte aus Frauen und Männern besteht.

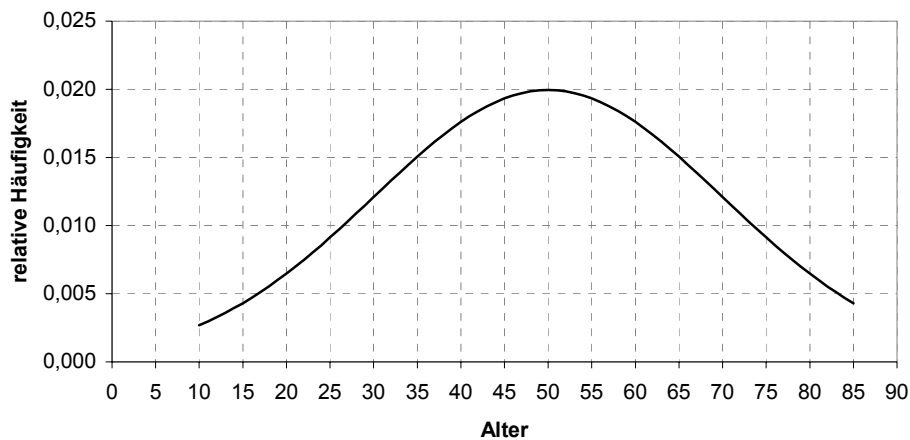


Abbildung 4: Altersverteilung der Standardpopulation in RiMEA [27]

In RiMEA wird dazu festgelegt, dass der Mittelwert der Standardpopulation bei 50 Jahren liegt mit einer Standardabweichung von 20 Jahren. Das Mindestalter beträgt 10 Jahre, das höchste Alter beträgt 85 Jahre. Aus der Normalverteilung lassen sich damit prozentuale Verteilungen für jedes Alter ermitteln, woraus letztendlich die individuelle Gehgeschwindigkeit den Personen zugeordnet werden kann.

Die Gehgeschwindigkeit ist von verschiedenen Einflüssen abhängig. Die Faktoren, die die Gehgeschwindigkeit der einzelnen Personen beeinflussen, sind nachfolgend

in Tabelle 12 dargestellt. Für die jeweilige Auswirkung dieser Faktoren sei auf die Untersuchungen zur Transporttechnik von Fußgängern nach [39] verwiesen.

Eigenschaften der Fußgänger	Begleitumstände der Bewegung	Charakteristiken der Anlage
Geschlecht Alter Größe Gesundheitszustand Erholungsgrad Charakter, Temperament Stimmungslage Zeitdruck Belastung durch Gepäck Behinderungen	Verkehrszweck Jahres- und Tageszeit Witterung Klima Höhenlage über Meer Länge des Weges	Steigungen von Rampen Steigung und Schrittmaße von Treppen Zustand der Oberfläche Attraktivität der Umgebung Straßenbelastung bei Fahrbahnüberquerungen

Tabelle 12: Einflüsse auf die Fußgängergeschwindigkeit [39]

Zusätzlich zu den oben genannten geschwindigkeitsbeeinflussenden Faktoren, hat die Fußgängerdichte einen erheblichen Einfluss auf die Geschwindigkeitsentwicklung.

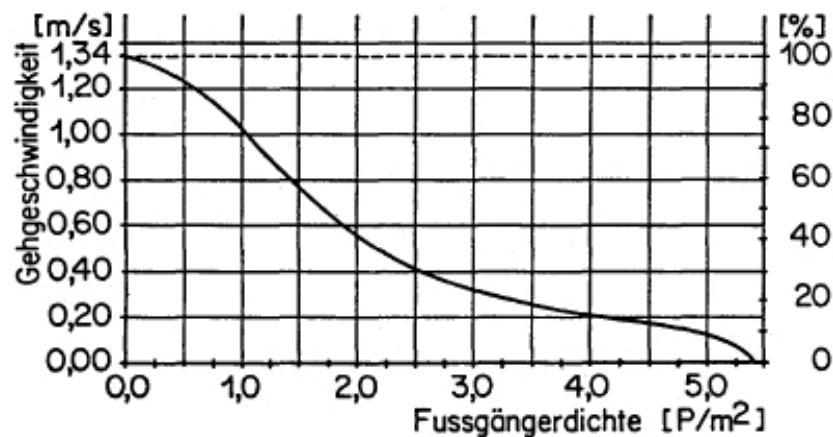


Abbildung 5: Geschwindigkeit-Dichte Diagramm für Bewegung in der Ebene [39]

In Abbildung 5 ist dargestellt, wie die Dichte das Geschwindigkeitsverhalten von Fußgängern beeinflusst. Erkennbar ist, dass mit zunehmender Dichte die Geschwindigkeit sinkt.

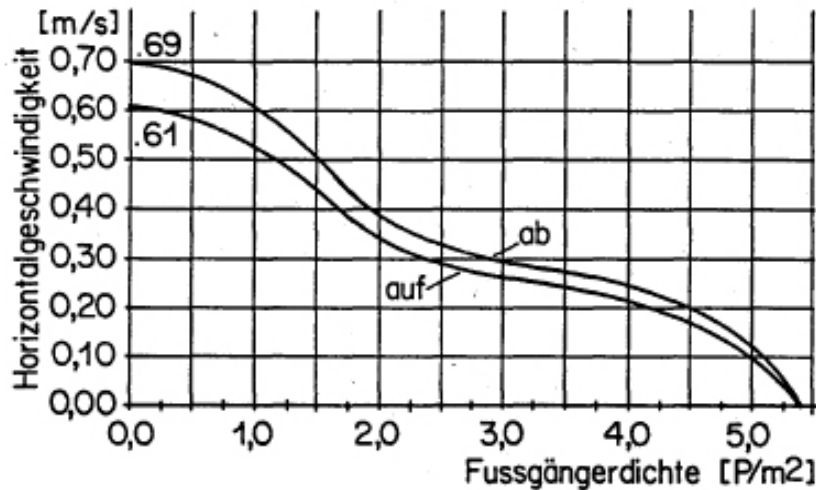


Abbildung 6: Geschwindigkeit-Dichte Diagramm für Bewegung auf Treppen [39]

Wie bei der Bewegung in der Ebene ist auch auf Treppen eine Geschwindigkeitssenkung bei zunehmender Dichte feststellbar. Auffällig ist hierbei, dass zwischen der Auf- und Abwärtsbewegung auf Treppen nur geringe Unterschiede bestehen. Ebenso sind die Verläufe in etwa qualitativ gleich und besitzen dieselbe Grenzdichte.

Vergleicht man die Geschwindigkeitsentwicklung in der Ebene mit der Entwicklung auf Treppen, so ist ein ähnlicher Verlauf mit gleicher Grenzdichte erkennbar. Die Geschwindigkeiten auf Treppen entsprechen ungefähr der Hälfte der Geschwindigkeiten in der Ebene.

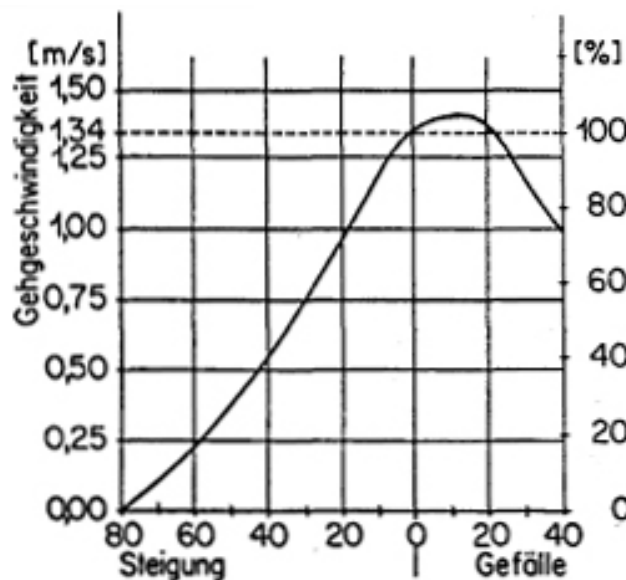


Abbildung 7: durchschnittliche Gehgeschwindigkeiten auf Neigungen [39]

Dargestellt ist der durchschnittliche Geschwindigkeitsverlauf in Abhängigkeit des Neigungsgrades der Ebene. Abgebildet ist eine Reduzierung des Geschwindigkeitsverlaufes, sobald eine Steigung vorliegt. Im Bereich von 0-20 % Gefälle ist nur eine leichte Erhöhung der Durchschnittsgeschwindigkeit erkennbar. Gefälleneigungen, die größer als 20 % sind, bewirken wieder eine Reduzierung der Gehgeschwindigkeit. Bei Personen mit Gehbehinderungen sind die Bewegungsgeschwindigkeiten geringer. Für Personen im Rollstuhl gilt eine Fortbewegungsgeschwindigkeit in der Ebene von 0,5 m/s. Zu beachten ist hierbei, dass ohne Hilfspersonen Treppen nicht bestiegen werden können und auch nur eine Neigung von 5 % aus eigener Kraft überwunden werden kann. Für anderweitig gehbehinderte Personen kann eine Neigung von 11 % über eine Länge von 3 Metern begangen werden. Anhaltspunkte bezüglich des Geschwindigkeitsverhaltens anderweitig gehbehinderter Personen liefert eine Studie nach Boyce, Shields und Silcock. Hierbei wurde die Fortbewegungsgeschwindigkeit von gehbehinderten Personen in der Ebene und auf Treppen gemessen. In diese Studie wurden verschiedenste Beeinträchtigungen im Laufverhalten, wie z.B. Herzkreislaufbeschwerden, Sehbehinderungen und Gehen mit Gehhilfen, miteinbezogen. Eine genaue Aufschlüsselung ist daher nur für die Personen mit Benutzung von Gehhilfen möglich. Die Untersuchungsergebnisse sind in Tabelle 13 und Tabelle 14 dargestellt.

Personengruppe	Mittelwert [m/s]	Standard- abweichung [m/s]	Bereich [m/s]	Interquartiler Bereich [m/s]
Alle Personen (n=107)	1,00	0,42	0,10-1,77	0,71-1,28
Bewegungseinschränkung vorhanden (n=101)	0,80	0,37	0,10-1,68	0,57-1,02
Ohne Gehhilfe (n=52)	0,95	0,32	0,24-1,68	0,70-1,02
Krücken (n=6)	0,94	0,30	0,63-1,35	0,67-1,24
Gehstock (n=33)	0,81	0,38	0,26-1,60	0,49-1,08
Gehrahmen / Rollator (n=10)	0,57	0,29	0,10-1,02	0,34-0,83
Bewegungseinschränkung nicht vorhanden (n=6)	1,25	0,32	0,82-1,77	1,05-1,34

Tabelle 13: Fortbewegungsgeschwindigkeit in der Ebene von Personen mit eingeschränkter Bewegungsfähigkeit [40]

Personengruppe	Mittelwert [m/s]	Standard- abweichung [m/s]	Bereich [m/s]	Interquartiler Bereich [m/s]
Aufwärts				
Bewegungseinschränkung vorhanden (n=30)	0,38	0,14	0,13-0,62	0,26-0,52
Ohne Gehhilfe (n=19)	0,43	0,13	0,14-0,62	0,35-0,55
Krücken (n=1)	0,22	-	0,13-0,31	0,26-0,45
Gehstock (n=9)	0,35	0,11	0,18-0,49	-
Gehrahmen / Rollator (n=1)	0,14	-	-	-
Ohne Bewegungseinschränkung (n=8)	0,70	0,24	0,55-0,82	0,55-0,79
Abwärts				
Bewegungseinschränkung vorhanden (n=30)	0,33	0,16	0,11-0,70	0,22-0,45
Ohne Gehhilfe (n=19)	0,36	0,14	0,13-0,70	0,20-0,47
Krücken (n=1)	0,22	-	-	-
Gehstock (n=9)	0,32	0,12	0,11-0,49	0,24-0,46
Gehrahmen / Rollator (n=1)	0,16	-	-	-
Ohne Bewegungseinschränkung (n=8)	0,70	0,26	0,45-1,10	0,53-0,90

Tabelle 14: Fortbewegungsgeschwindigkeiten auf Treppen (aufwärts/abwärts) von Personen mit Bewegungseinschränkung [40]

Aus Tabelle 14 ist ersichtlich, dass auch für Personen mit Bewegungseinschränkung die Änderung der Fortbewegungsgeschwindigkeiten auf Treppen auf- und abwärts ähnlich ist. Es können nur minimale Erhöhungen der Geschwindigkeit abwärts festgestellt werden. Bei der Beurteilung dieser Werte ist allerdings zu beachten, dass die Anzahl der Personen, die in die Messung einbezogen wurden, zum Teil sehr gering ist und insbesondere bei Messungen mit n=1 nicht repräsentativ sein können.

4.4 DICHTEN

Die Fußgängerdichte berechnet sich als das Verhältnis von Personen pro nutzbare Fläche mit der Einheit Personen/m². Dabei ist zur Bestimmung von Fußgängerdichten der Raumbedarf von Personen entscheidend. Unterschieden wird hierbei zwischen einem statischen und dynamischen Raumbedarf. Der statische Raumbedarf betrachtet die Personendichte ohne Bewegung, während der dynamische Raumbedarf die Dichte im Fortbewegungsprozess betrachtet.

Der Raumbedarf ergibt sich als die auf den Boden projizierte Fläche des Rumpfes inklusive der Kleidung und umfasst zusätzlich die Standfläche der Füße. Die maximalen Körpermaße für Männer und Frauen bei mittleren Verhältnissen im stehenden Zustand ohne Bekleidung betragen 0,46 m Körperbreite und 0,23 m Körpertiefe. Der 97,5 % Wert der Körpermaße beträgt 0,50 m Körperbreite und 0,27 m Körpertiefe [39]. Unter praktischen Bedingungen beträgt der statische Raumbedarf eines stehenden Menschen im Mittel eine Fläche von 0,15 m²/Person [39]. Es ergibt sich dadurch eine Grenzdichte von 6,6 Personen pro m² im stehenden Zustand, die nicht überschritten werden kann.

Der dynamische Raumbedarf berücksichtigt den Platz, der bei der Bewegung durch Schritte benötigt wird. Dadurch ist der dynamische Raumbedarf im Gegensatz zum statischen höher. Wird die Fußgängerdichte erhöht, so verringert sich der zur Verfügung stehende Raum. Dies hat zur Folge, dass sich eine gewünschte Schrittlänge durch den verringerten Abstand nicht mehr einstellen kann und die Geschwindigkeit sinkt. Nach [39] führt ein Anstieg der Dichte auf 5,4 Personen/m² zum Stillstand der Bewegung und es kommt zu Staus. Diese Zusammenhänge von Geschwindigkeit und Dichte sind im Fundamentaldiagramm abgebildet.

Für die Beschreibung von Fußgängerdichten während der Bewegung sind sogenannte Level-of-Service (LOS) Konzepte eingeführt worden. Diese geben eine Übersicht über die Charakterisierung von Dichteverhältnissen in einem untersuchten Bereich. Die Level E und F nach Fruin sollten in einer Rettungswegplanung selten zum Einsatz kommen.

Level of Service Konzept nach Fruin für Gehwege		
LOS	Dichte [P/m^2]	Charakterisierung
A	< 0,31	Absolut freie Bewegung
B	0,31 – 0,43	Schwache Behinderungen
C	0,43 – 0,72	Mäßige Behinderungen
D	0,72 – 1,07	Starke Behinderungen
E	1,07 – 2,17	Gedränge
F	> 2,17	Massives Gedränge

Tabelle 15: Konzept für Gehwege nach Fruin [41]

Eine etwas detailliertere Aufschlüsselung bietet das LOS-Konzept nach Weidmann [39]. Hierbei werden die einzelnen LOS feiner unterteilt.

Level of Service Konzept nach Weidmann für Gehwege		
LOS	Dichte [P/m^2]	Charakterisierung
A	0,00 – 0,10	Absolut freie Bewegung
B	0,10 – 0,30	Freie Bewegung
C	0,30 – 0,45	Schwache Behinderungen
D	0,45 – 0,60	Mäßige Behinderungen
E	0,60 – 0,75	Starke Behinderung
F	0,75 – 1,00	Dichter Verkehr
G	1,00 – 1,50	Mäßiges Gedränge
H	1,50 – 2,00	Starkes Gedränge
I	2,00 – 5,40	Massives Gedränge, Stillstand der Bewegung bei 5,4 Personen/ m^2

Tabelle 16: LOS Konzept für Gehwege nach Weidmann [39]

Bezüglich der Personendichte in Wartepositionen wird von Fruin ein weiteres LOS-Konzept definiert. Dabei ist erkennbar, dass im Gegensatz zum LOS-Konzept auf Gehwegen in Wartepositionen höhere Personendichten erreicht werden können. In Wartepositionen ist demnach eine höhere Personendichte akzeptabler. Die Kriterien zur Beurteilung dieses LOS-Konzeptes sind in Tabelle 17 gezeigt.

Level of Service Konzept nach Fruin für Personendichten in Wartepositionen		
LOS	Dichte [P/m ²]	Charakterisierung
A	< 0,83	Freie Rotation des Körpers möglich
B	0,83 – 1,07	Schwach beschränkte Rotation
C	1,07 – 1,54	Rotation bei Körperkontakt möglich
D	1,54 – 3,57	Starke Beschränkung der Rotation, Stehen ohne Körperkontakt
E	3,57 – 5,26	Keine Rotation möglich, Körperkontakt ist unvermeidlich
F	> 5,26	Stehen nur mit sehr engem Körperkontakt, keine Bewegung möglich

Tabelle 17: LOS Konzept für Personendichten in Wartepositionen [41]

Für eine detaillierte Beschreibung der beschriebenen LOS-Konzepte sei auf den Anhang verwiesen.

4.5 PERSONENFLUSS

Der Personenfluss gibt den Durchgang einer Personenmenge durch einen vordefinierten Querschnitt in einem Zeitintervall an. Für die Berechnung des Personenflusses gibt es zwei unterschiedliche Ansätze [42]. Der Personenfluss Φ lässt sich mit dem ersten Ansatz über das Produkt der Personendichte ρ , der Gehgeschwindigkeit v und der Breite des Weges b ermitteln. Die Formel lautet:

$$\Phi = \rho * v * b \quad [Personen / s]$$

Bei diesem Ansatz ist zu beachten, dass die Gehgeschwindigkeit mit der Personendichte verknüpft ist. Bei hohen Dichten können nur verminderte Geschwindigkeiten erreicht werden, andererseits setzt eine hohe Gehgeschwindigkeit eine geringe Dichte voraus.

Mit dem zweiten Ansatz ist eine Ermittlung des Personenflusses über die zeitlichen Abstände zwischen Personen zum Erreichen eines vordefinierten Querschnitts möglich. Hierbei ergibt sich der Personenfluss aus der Division der Anzahl n der Personen, die den Querschnitt durchschritten haben, durch das gemessene Zeitintervall. Das Zeitintervall ergibt sich aus dem Endzeitpunkt t_e der Messung abzüglich des Anfangszeitpunktes t_a .

$$\Phi = \frac{N_{\text{Personen}}}{t_e - t_a} \quad [\text{Personen /s}]$$

Der auf einen laufenden Meter normierte Personenfluss wird als spezifischer Fluss Φ_s bezeichnet. Er ergibt sich durch die Division von Personenfluss Φ durch die Breite des Weges b .

$$\Phi_s = \frac{\Phi}{b} \quad [\text{Personen /ms}]$$

Anhaltswerte für die Quantifizierung des spezifischen Personenflusses lassen sich in verschiedenen Richtlinien finden. Aus den Vorgaben der EN 13200 [22] und der Begründung zur MVStättV [20] lässt sich durch Rückrechnung von 200 Personen auf 1,20 m Öffnungsbreite bei einer Flussdauer von 2 Minuten ein mittlerer spezifischer Personenfluss von 1,39 Personen/ms ermitteln. In der MSC Circular 1238 ist angegeben, dass ein Fluss durch Türen 1,33 Personen/ms nicht übersteigen sollte. Die RiMEA gibt im Anhang zur Validierung von Simulationsprogrammen als Richtwert einen maximalen spezifischen Fluss in Höhe von 1,30 Personen/ms für Gänge und Türöffnungen an. Im Kapitel der Abschätzung durch Handrechnungen ist im vfdb-Leitfaden für Ingenieurmethoden ein Personenfluss von 1,40 Personen/ms für Ausgänge durch Türen bei einer Dichte von 2 Personen/m² festgelegt. Die Höhe des maximalen spezifischen Personenflusses lässt sich nach den vorgenannten Angaben in den Richtlinien also auf einen relativ engen Bereich von 1,30 bis 1,40 Personen/ms für den maximalen spezifischen Personenfluss durch Öffnungen eingrenzen. Ergänzend sei bemerkt, dass aus experimentellen Untersuchungen für den maximalen spezifischen Personenfluss auch schon höhere Werte ermittelt wurden. So ergibt zum Beispiel eine Auswertung von [53] der experimentellen Daten durch Türöffnungen nach [44] einen maximalen spezifischen Fluss von etwa 1,6 Personen/ms.

4.6 FUNDAMENTALDIAGRAMME

Empirische Zusammenhänge von Einflussgrößen in der Fußgängerdynamik werden in der Regel über Fundamentaldiagramme dargestellt. Diese Diagramme ermöglichen Aussagen über die Charakteristik des Personenverkehrsflusses an Querschnitten und sind damit ein wichtiger Bestandteil in der Fußgängerdynamik. Während

Fundamentaldiagramme als Eingangsdaten für verschiedene Handrechenverfahren benutzt werden, sollen Fundamentaldiagramme das Ergebnis von Evakuierungssimulationen sein.

Die betrachteten Größen innerhalb des Fundamentaldiagramms sind die Gehgeschwindigkeit, die Fußgängerdichte und der Personenfluss. Um die funktionalen Abhängigkeiten zwischen diesen drei Größen zu formulieren, existieren drei Darstellungsformen. Hierbei wird jeweils der Zusammenhang zwischen Gehgeschwindigkeit und Personendichte, Gehgeschwindigkeit und Personenfluss und Personenfluss und Personendichte separat dargestellt.

Häufig zitiert wird dabei das Fundamentaldiagramm nach Weidmann (siehe Abbildung 8), welches auch in der RiMEA aufgeführt ist.

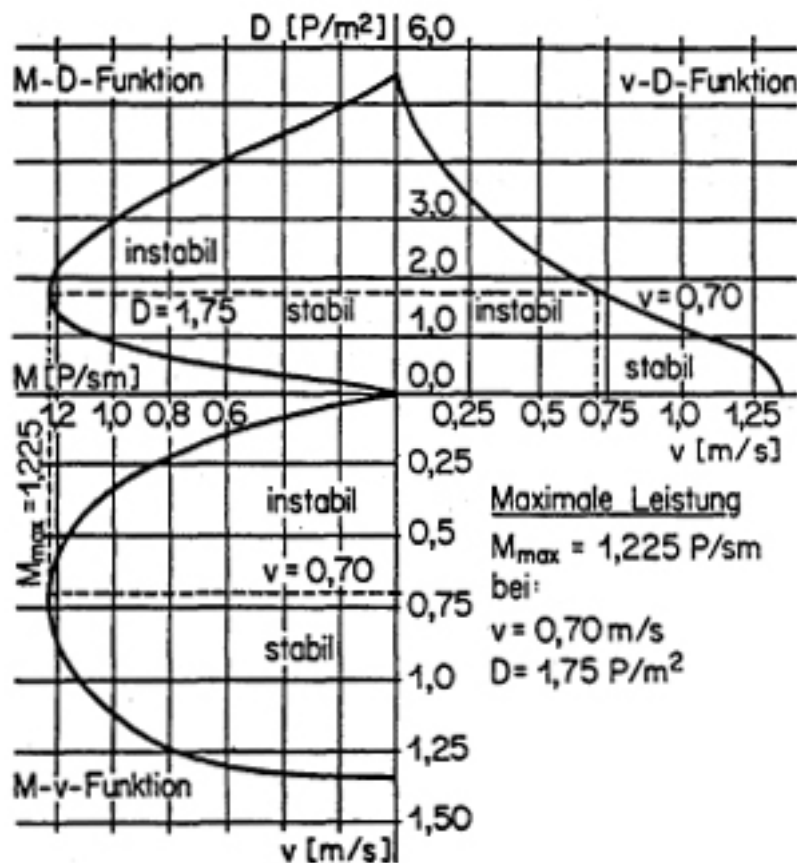


Abbildung 8: Fundamentaldiagramm für Bewegung in der Ebene [39]

Beim Betrachten des Fundamentaldiagramms wird deutlich, dass bei Erhöhung der Dichte die Geschwindigkeit sinkt. Bei Erreichen der Grenzdichte von 5,4 Personen/m² sind die Geschwindigkeit und der Personenfluss 0. Es kommt zu einem Still-

stand der Bewegung und damit zu einem Stau. Der optimale Personenfluss von 1,225 Personen/ms wird hierbei bei einer Dichte von $1,75 \text{ Personen/m}^2$ erreicht und nimmt bis zum Erreichen der Grenzdichte stetig ab.

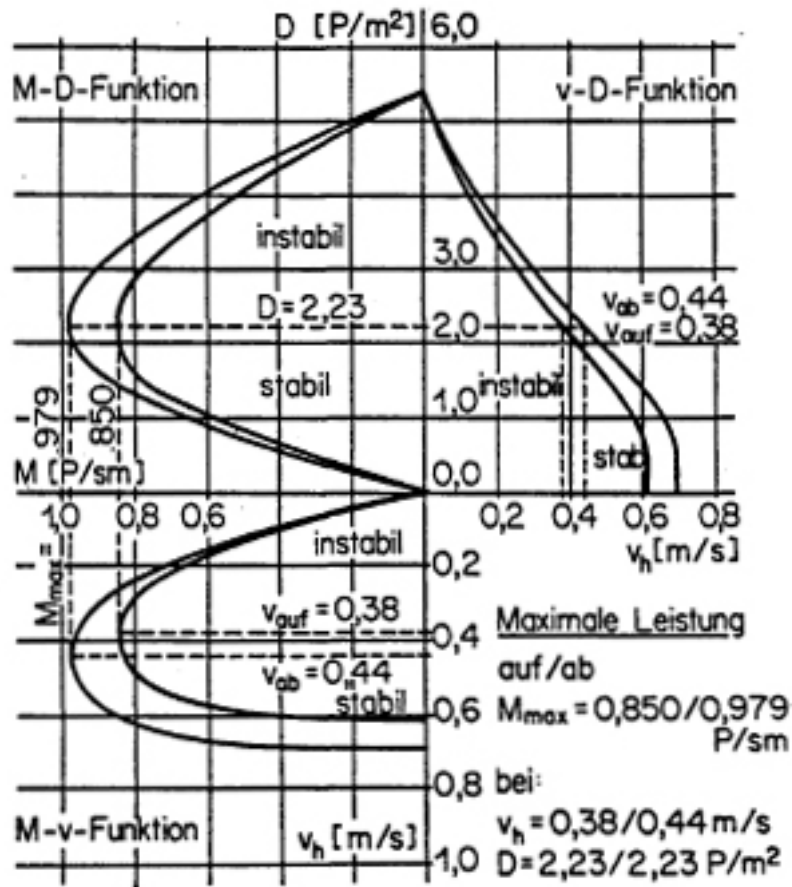


Abbildung 9: Fundamentaldiagramm für Bewegung auf Treppen [39]

Bezüglich der Bewegung auf Treppen ist dargestellt, dass hier die erreichbaren Geschwindigkeiten und Flüsse gegenüber der Bewegung in der Ebene reduziert sind. Auffällig ist dabei, dass zum Erreichen des optimalen Personenflusses eine höhere Dichte ($2,23 \text{ Personen/m}^2$) als bei der Bewegung in der Ebene erforderlich ist. Der Unterschied zwischen der Auf- und Abwärtsbewegung ist gering, jedoch werden für die Abwärtsbewegung höhere Geschwindigkeiten und Flüsse festgestellt. Wie bei der Bewegung in der Ebene ist bei Erreichen der Grenzdichte von $5,4 \text{ Personen/m}^2$ ein Stillstand der Bewegung durch Erliegen des Flusses sichtbar.

Ein Vergleich von verschiedenen Fundamentaldiagrammen ist in nachfolgender Abbildung gezeigt.

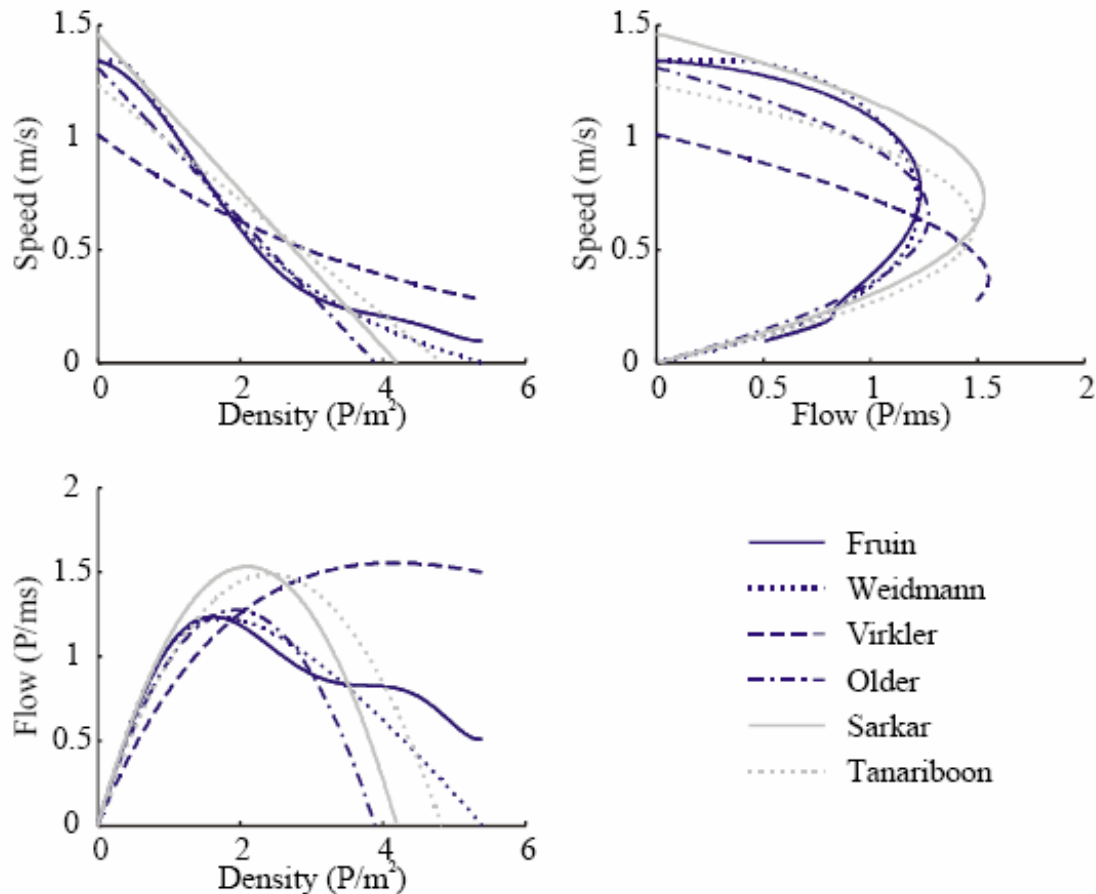


Abbildung 10: Vergleich von Fundamentaldiagrammen [43]

Die Fundamentaldiagramme haben gemeinsam, dass der Fluss (Flow) in Abhängigkeit der Dichte (Density) bis zu einem Optimum steigt und danach wieder absinkt. Bei der Mehrheit der Diagramme stellt sich ein optimaler Fluss bei einer Dichte von 2 Personen/m² ein. Auffallend ist, dass auch bei wesentlich höheren Dichten optimale Personenflüsse festgestellt wurden. Maximale Flüsse liegen dabei zwischen etwa 1,3 und 1,6 Personen/ms. Für unbehinderte Gehgeschwindigkeiten (Speed) in der Ebene sind Durchschnittsgeschwindigkeiten in Höhe von 1,0 bis 1,5 m/s sichtbar. Wesentliche Unterschiede bestehen in der Festlegung der Grenzdichten, bei der eine Bewegung zum Stillstand kommt. Es wird ein Bereich von etwa 4 bis größer als 6 Personen/m² ausgewiesen. Höhere Dichten als 5,4 Personen/m² werden auch bei dem Handrechenverfahren von Predtedschenski und Milinski [44] angesetzt. Wie aus Abbildung 11 erkennbar, werden Dichten bis annähernd 10 Personen/m² berücksichtigt.

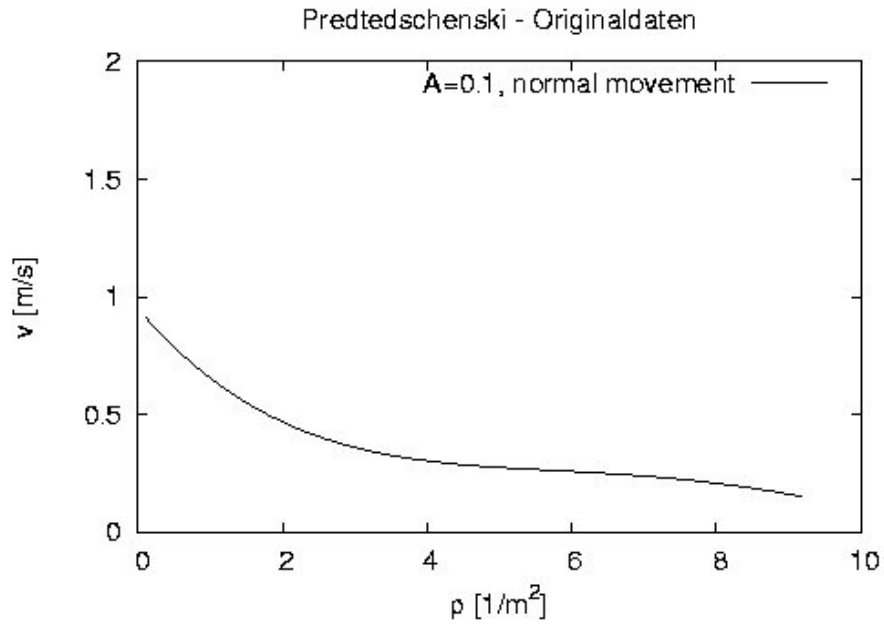


Abbildung 11: Geschwindigkeitsverlauf in Abhängigkeit der Dichte nach Predtedschenski und Milinski [45]

Bei dem Geschwindigkeit-Dichte Diagramm nach Predtedschenski und Milinski ist sichtbar, dass selbst bei einer Dichte von mehr als 8 Personen/ m^2 noch eine Bewegung ablaufen kann. Da das verwendete Verfahren allerdings auf Personenströme ausgelegt ist und damit größere Gruppen von Personen berücksichtigt, ist es hier fraglich, ob bei solch hohen Dichten noch eine Bewegung eines Individuums möglich ist.

5 ERGÄNZENDE RANDBEDINGUNGEN FÜR DIE SIMULATION

5.1 PERSONENBELEGUNG IM ANFANGSZUSTAND

Bei der Simulation einer Entfluchtung ist die Personenzahl oder die Personendichte in der Anfangssituation von entscheidender Bedeutung für die Ausbildung von Entfluchtungsdauer und Stauungen in einem Gebäude. In der MVStättV werden für Versammlungsstätten Richtwerte zur Abschätzung der zu erwartenden Personenanzahl angegeben. Allerdings sind die Angaben im Hinblick auf Vergnügungsstätten, wie Diskotheken, teilweise mit lediglich 2 Personen pro Quadratmeter als zu gering einzuschätzen [46]. In solchen Anlagen werden in der Regel Personendichten von 4 Personen pro Quadratmeter erreicht und würde damit zu einer Unterschätzung des Entfluchtungsszenarios führen.

In den Bauvorschriften für andere bauliche Anlagen sind zu der Ermittlung der Personenzahl keine Hinweise vorhanden.

Um die Personenanzahl dennoch abschätzen zu können, müssen andere Quellen oder Richtlinien herangezogen werden, wie etwa der NFPA Life Safety Code [47]. Angaben von Richtwerten zur Bestimmung von maximal erwartbaren Personenzahlen sind allerdings sowohl in RiMEA, als auch im vfdb-Leitfaden für Ingenieurmethoden des Brandschutzes vorhanden. Die Bestimmung der Personenzahl ist dabei abhängig von der Geschossfläche und der Art der Gebäudenutzung. Die Angaben nach dem vfdb-Leitfaden fallen zu der Bemessung von Personenzahlen wesentlich umfangreicher aus als in RiMEA. Die nachfolgende Tabelle stellt die Angaben über Personendichten nach Gebäudeart und –nutzung heraus. Der größte Teil der Angaben ist dem vfdb-Leitfaden für Ingenieurmethoden im Brandschutz entnommen.

5 Ergänzende Randbedingungen für die Simulation

Nutzung	Personendichte [P/m ²]	Quelle:
Flughäfen		
- Gepäckrückgabe	0,54 (brutto)	[32]
- Gepäckabfertigung	0,04 (brutto)	[32]
- Check-In	0,11 (brutto)	[32]
- Warte- und Aufenthaltsbereiche	0,72 (brutto)	[32]
Bahnhöfe		
- Bahnsteige (auf Personenverkehrsanlagen)	3,0	[48]
Versammlungsstätten (Stadion, Tribüne, Theater, etc.)		
- Stehplätze	5,0	[28]
	4,70	[27];[22]
- freie Bestuhlung	2,0	[27];[28];[17]
- feste Bestuhlung	Anzahl der Sitzplätze	[28];[22]
- Lobby / Foyer	1,0	[28]
Passagen, Umgänge (bei Nutzung als Versammlungsstätte)	1,4	[28]
Kunstgalerie, Museum	0,25	[28]
Bibliothek		
- Lesesaal	0,2	[28]
- Magazin	0,1	[28]
Ausstellung, Messe	0,6	[28]
	1,0	[27];[17]
Spielcasino	1,0	[28]
Trainingsraum, Fitnesscenter		
- mit Geräten	0,2	[28]
- ohne Geräte	0,7	[28]
Gaststätte, Restaurant	1,0	[28]
Bar, Club, Diskothek	4,0	[28]
Ausbildungseinrichtungen (Schule)		
- Klassenzimmer	0,5	[28]
- Labor / Übungsraum	0,2	[28]
Gesundheitsvorsorge (Krankenhäuser)		
- stationär	0,04 (brutto)	[32]
- ambulant	0,11 (brutto)	[32]
- Schlafbereiche	0,09 (brutto)	[32]
Tagesstätten, Tagesbetreuung	0,3	[28]
Verkaufsgeschäfte		
- Bereich (Geschoss) mit Zugang ebenerdig	0,5	[28]
- sonstige Geschosse	0,3	
- alle Geschosse	0,18-0,36	[27]
Einkaufsmarkt (für Großgeräte, Möbel, etc.)	0,1	[28]
Lager	0,04	[27]
Ausstellungsraum	0,2	[28]
Wohngebäude (Hotels, Apartments, Wohnungen)	0,05 (brutto)	[32];[47]
Bürogebäude	0,2	[28]
	0,11	[27]

Tabelle 18: Annahmen zur Abschätzung der Personenbelegung

Sofern nicht anders angegeben, handelt es sich bei den Angaben in der Tabelle um die nutzbare Nettogesamtfläche.

Bei Betrachtung der Tabelle ist auffallend, dass die Annahmen nach vfdb-Leitfaden, bis auf die Annahmen bei Ausstellungen und Messen, höher ausfallen als die Angaben in RiMEA. Besonders auffällig ist hier der Unterschied zwischen beiden Richtlinien bei der Angabe der Maximalbelegung in Verkaufsstätten. Bei der Erstellung der Annahmen nach vfdb-Leitfaden ist zu erwähnen, dass aus den zugrunde liegenden Quellen jeweils der höchste Wert übernommen wurde.

5.2 ROUTENVERHALTEN UND AUSGANGSWAHL

Sofern in deskriptiven Regelungen nur die Mindestanforderungen an die Ausgangsbreiten eingehalten werden, wird von einer optimalen Auslastung der Ausgänge ausgegangen. Solch eine optimale Auslastung kann aber nur in den seltensten Fällen erreicht werden. Außerdem kann die Fixierung auf optimale Ausgangsauslastung, trotz Einhaltung der Anforderung an die Weglängen, zu Unregelmäßigkeiten im Rettungswegverlauf führen. Hierzu ist es notwendig, die Ausgangs- oder Streckenwahl von Personen genauer zu betrachten.

Nachfolgend soll anhand von Untersuchungen dargestellt werden, zu welchen Ausgängen und Streckenverläufen Personen tendieren.

Bei einem Brand in einem amerikanischen Nachtclub kommen im Jahr 2003 100 Menschen ums Leben. Durch eine sehr schnelle Hitze- und Rauchausbreitung und einem Personenstau im Bereich des Hauptausganges, sind die Personen nicht mehr in der Lage, das Gebäude zu verlassen. Bei dem Nachtclub handelt es sich um ein ebenerdiges Geschoss, wie in der folgenden Abbildung dargestellt.

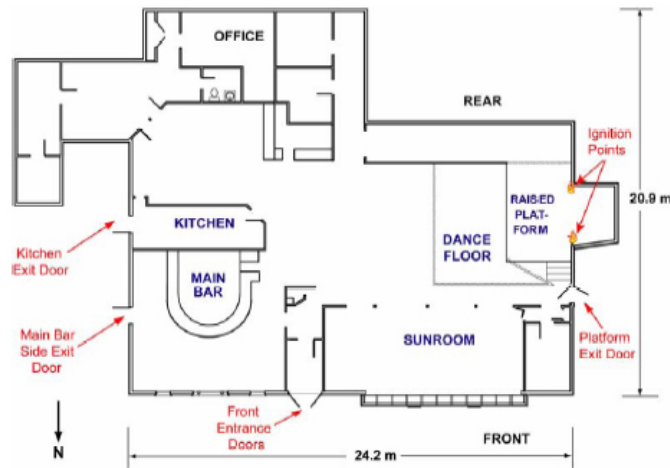


Abbildung 12: Grundriss des Nachtclubs „The Station“ in Rhode Island [49]

Diese Gebäude verfügt über vier Ausgänge, davon zwei auf der Ostseite (Kitchen und Main Bar), einer auf der Westseite (Plattform) und auf der Nordseite befindet sich der Hauptausgang (Front Entrance). Auf der Rückseite des Gebäudes sind keine Ausgänge angeordnet. Der Brand brach auf der Westseite im Bereich der Plattform (ignition points) aus (siehe Abbildung 12). Über die Ausgänge verließen insgesamt 169 Personen das Gebäude. Zusätzlich sind 79 Personen durch die Fenster des Sunrooms und der Main Bar ins Freie gelangt. Die Verteilung der Anzahl der Personen auf die Ausgänge lässt sich über nachfolgendes Diagramm ablesen.

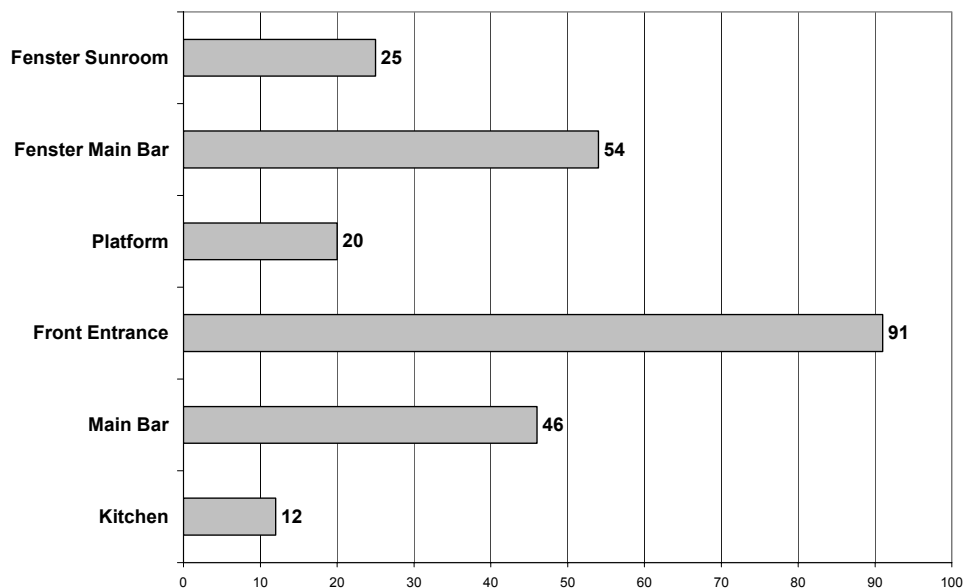


Abbildung 13: Verteilung der Personen auf die Ausgänge und Fenster nach [49]

Der Ausgang der Plattform ist aufgrund der schnellen Rauch- und Hitzeausbreitung nach ungefähr 30 Sekunden nicht mehr passierbar, so ist es nur 20 Personen möglich, das Gebäude über diesen Ausgang zu verlassen. Die Fluchtbewegung erfolgt dann vom Schadensereignis weg. Die Ausgänge auf der Ostseite des Gebäudes sind nur gering belastet, da diese trotz Notausgangsbeschilderung unbekannt sind und von den Personen kaum wahrgenommen werden. Insbesondere im Fall des Ausgangs im Bereich Kitchen ist zusätzlich die Zugänglichkeit erschwert. Die meisten Personen verlassen das Gebäude über den Hauptaussgang, der den meisten Personen bekannt ist. Außerdem liegt dieser Ausgang für die meisten Personen auf einem direkten Weg ins Freie. Hierbei kommt es zu einer Überbelastung und damit zu einer Blockade dieses Hauptausses. Danach entscheiden sich einige Personen, das Gebäude über die Fenster zu verlassen.

Betrachtet man nur die Verteilung über die Ausgänge, so ergibt sich für den Hauptaussgang eine Belastung von 54 % der Personen, die das Gebäude über einen Ausgang verlassen haben (siehe Anhang). Werden bei einer Berechnung die Opfer, die im Bereich des Hauptausses gefunden wurden, miteinbezogen und wenn zusätzlich berücksichtigt wird, dass Personen erst durch das Fenster flüchteten als der Hauptaussgang bereits blockiert war, so steigt die prozentuale Belastung des Hauptausses. Festzustellen ist dann, dass der Hauptaussgang von 2/3 aller anwesenden Personen als Ausgang ins Freie gewählt wurde (siehe Abbildung 14). Diese Betrachtung relativiert sich erst dadurch, dass der Ausgang der Westseite nur für einen kurzen Zeitraum begehbar war.

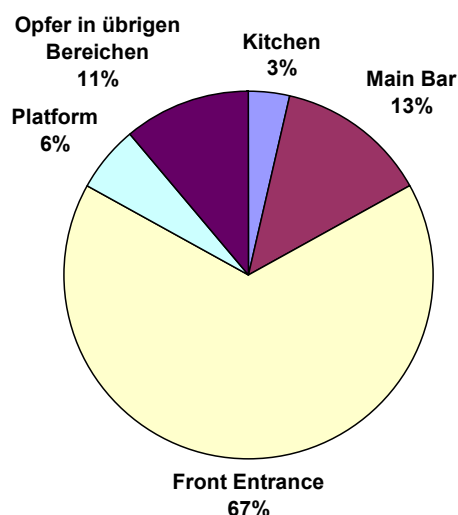


Abbildung 14: Verteilung auf die Ausgänge aller anwesenden Personen im Nightclub „The Station“

Ähnliche Beobachtungen über die ungleiche Verteilung auf Ausgänge wurden in einem weiteren Nachtclub gemacht. Bei dem Einsatz von Pfefferspray durch das Sicherheitspersonal kommt es zu einem panikartigen Verlassen des Nachtclubs. Die meisten Besucher strömen dabei auf den Hauptaustgang zu, obwohl sich weitere offene Ausgänge in dem Gebäude befinden [50]. Durch die Überbelastung kommt es bei diesem Ausgang zu einem massiven Personenstau und durch den ansteigenden Staudruck auf die Personen kommen 21 Menschen ums Leben.

Im Life Safety Code der National Fire Protection Association (NFPA) [47] ist dazu festgelegt worden, dass Haupteingänge von Diskotheken, Bars und anderen Versammlungsstätten mit Festivitätscharakter auf 2/3 der maximal zu erwartenden Personenzahl ausgelegt sein müssen. Für übrige Versammlungsstätten genügt nach NFPA eine Bemessung für 50 % der zu erwartenden Personenzahl.

Bei folgender Tabelle handelt es sich um Ergebnisse von Räumungsuntersuchungen aus zwei Theatern. Diese verfügen über jeweils zwei Ausgänge. Die Personen wurden durch unterschiedliche Anweisungen aufgefordert, den Raum zu verlassen.

Theater	Gewählter Ausgang [%]		Instruktionen
	Haupteingang	Notausgang	
F	55	45	Raum verlassen
F	62	38	Raum verlassen
R	0	100	Raum über Notausgang verlassen
R	30	70	Raum verlassen

Tabelle 19: Ergebnisse einer Evakuierungsuntersuchung aus zwei Theatern nach Sime [51]

Deutlich erkennbar ist, dass es selbst bei zwei Ausgängen nur in einem Fall zu einer annähernd optimalen Auslastung der Ausgänge kommt. Weiter wird deutlich, dass die Art der Anweisung Einfluss auf das Routenverhalten hat.

Dies wird auch durch die nachstehenden Beobachtungen von einer unangekündigten Räumung zweier Verkaufsgebäude offensichtlich [52].

5 Ergänzende Randbedingungen für die Simulation

Grund der Ausgangswahl	Marks & Spencer, Sprucefield (A)	Marks & Spencer, Belfast (B)
durch den benutzten Eingang wieder hinaus	10 %	18 %
bekannter Ausgang	3 %	12 %
nächstliegender Ausgang	60 %	30 %
vom Personal geleitet	26 %	31 %
von anderen geleitet	1 %	9 %

Tabelle 20: Gründe für die Ausgangswahl und prozentuale Verteilung bei unangekündigter Räumung von zwei Verkaufsstätten [52]

Im ersten Fall (A) wird deutlich, dass der prozentuale Anteil der Personen für die Wahl des nächstliegenden Ausgangs sehr hoch ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in diesem Fall alle Ausgänge vom Personal sehr früh geöffnet wurden, sodass Tageslicht in das Gebäude eindringen konnte und die Ausgänge sehr gut sichtbar waren. Also lässt sich auch hier ein Einfluss des Personals auf die Ausgangswahl feststellen. In beiden Fällen wurde von mehr als einem Viertel der Personen angegeben, dass sie den Anweisungen des Personals gefolgt waren. Im zweiten Fall (B) ist der prozentuale Anteil für die Wahl des nächstliegenden Ausgangs geringer, dafür steigt wiederum der Anteil der Ausgangswahl für bekannte Ausgänge. Hierbei ist zusätzlich zu erwähnen, dass der Anteil der Erstbesucher während dieser Übung in beiden Verkaufsgebäuden unter 1,5 % lag.

Die Fluchtwegewahl hängt außerdem deutlich von der Orientierung der einzelnen Person im Gebäude ab. Die Orientierung eines Menschen wird vor allem durch die optische Wahrnehmung beeinflusst [75]. Die Bewegung eines Menschen erfolgt bevorzugt

- zu hellen Bereichen,
- geradlinig in Hauptblickrichtung nach vorn und
- nach unten.

In Stresssituationen stellt sich für Personen häufig ein Tunnelblick ein, worauf seitlich angelegte Fluchtwege nur schwierig wahrgenommen werden können. Innerhalb der baulichen Anlage zeichnet sich eine leichte Orientierung durch übersichtliche, geradlinige und kurze Wegführungen mit wenigen Richtungswechseln aus. Dies gilt unter

der Voraussetzung, dass die Wege entsprechend beleuchtet sind. Abweichungen wie Kreuzungen, Abweichungen und Einmündungen können die Orientierung erschweren und damit die Bewegung durch Suchen des richtigen Weges verlangsamen.

Die Orientierung ist abhängig von der Häufigkeit der Nutzung und damit der Vertrautheit durch die jeweilige Person. Beispielsweise ist an Arbeitsplätzen aufgrund der häufigen Nutzung in der Regel von bekannten Fluchtwegen auszugehen. In selten besuchten Orten, wie Versammlungsstätten kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass dem Besucher nicht alle Fluchtwegalternativen bekannt sind und daher eine zwischenzeitliche Orientierung bei der Wegsuche notwendig ist. Nach wissenschaftlichen Untersuchungen folgt die Wahl des Fluchtweges der nachstehenden Reihenfolge [75]:

- Kenntnis des jeweiligen Fluchtweges
- Häufigkeit in der täglichen Benutzung
- Kürzeste Entfernung bis zum Ausgang
- Wahrnehmen von Rauch als behindernder Faktor.

Aus den vorherigen Betrachtungen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten. Bei Gebäuden mit ortsunkundigem Publikum, tendieren Personen dazu, den Weg zu wählen, durch den sie hineingekommen sind. Hierdurch kann es zu einer Konzentration auf einen Ausgang kommen und dies führt wiederum zu einer ungleichmäßigen Verteilung auf die verfügbaren Ausgänge. Ferner kann eine entfernende Bewegung vom Gefährdungsereignis zu weiterer Belastung eines Ausgangs führen.

Weiterhin hängt die Wahl eines nahe liegenden Ausgangs davon ab, wie gut diese zugänglich und sichtbar sind. Ausgänge durch offene Türen, die direkt ins Freie führen, werden dabei bevorzugt benutzt. Schlecht sichtbare und zugängliche Ausgänge (z.B. durch mehrere Türen oder Abzweigungen von einem direkten Weg), können annähernd vollkommen übersehen werden.

Die Einwirkung von Personal kann hohen Einfluss auf die Ausgangswahl der Gebäudenutzer haben, sofern eine Kommunikation möglich ist.

5.3 STAUDAUER

Bezüglich einer akzeptierten Staudauer sind in der Literatur kaum Anhaltspunkte gegeben. Auch sind keine Untersuchungen zu diesem Thema bekannt. In der MVStättV werden Flusssdauern in Höhe von 2 Minuten angegeben. Bedenkt man, dass ein Fluss nur eine Personenmenge mit erheblich reduzierter Geschwindigkeit ist, so ließe sich für die letzte Person im Fluss, die nahezu still steht, auch eine akzeptierte Staudauer in etwa der Höhe der Flusssdauer von 2 Minuten herleiten. Diese Betrachtungsweise liefert aber eine erhebliche Diskussionsgrundlage, gerade bezüglich der Unterscheidung von Fluss (=Bewegung) und Stau (=Stillstand).

Mehl [7] empfiehlt für Einzelwerte von Staudauern, dass eine Dauer von einer Minute nicht überschritten werden sollte. Weiter sollten die „Verzögerungszeiten“ nicht mehr als 2 Minuten betragen. In diesem Fall werden die Verzögerungszeiten als Dauer der Gehgeschwindigkeit $< 0,30$ m/s definiert. Dies entspricht aber eher einer Flusssdauer als einer Staudauer und ähnelt somit der Betrachtungsweise nach MVStättV. Als letztes Kriterium sollten die Summe der Staudauern bzw. Verzögerungszeiten ($v < 0,30$ m/s) nicht mehr als die Hälfte der Summe der Gehdauern sein.

In RiMEA wird die Identifizierung von Staus in Abhängigkeit der Gesamtentfluchungsdauer beschrieben. Hier liegt ein signifikanter Stau vor, wenn eine lokale Dichte von 4 Personen/m² für eine Dauer von 10% der Gesamtentfluchungsdauer übersteigt [27]. Dieser Wert für die Identifizierung von Stauungen ist von der MSC Circular 1033 [25] übernommen.

Verglichen mit der Forderung von Mehl über die Hälfte der Summe der Gehdauern, entspräche das einer Forderung von etwa 33% der Gesamtentfluchungsdauer nach RiMEA.

Zusammenfassend sei erwähnt, dass eine akzeptierte Staudauer im Wesentlichen abhängig vom Szenario und damit individuell verschieden ist. So liefert eine unmittelbar erkennbare Gefahr (z.B. ein Feuer innerhalb des Raumes, in dem sich der Ausgang befindet) ein höheres Potenzial für einen Panikausbruch und senkt damit eine akzeptierte Staudauer. Demgegenüber gestellt ist ein Stau ohne unmittelbares Gefährdungsereignis nur ein Indikator für das Personenaufkommen in einem bestimmten Bereich und stellt für sich selbst noch keine unmittelbare Gefahr dar. Hierbei ist das Verhaltensmuster der Personen zu berücksichtigen. Ein erwarteter Stau (z.B. für

die Besucher eines Sportstadions) führt zu einem anderen Verhalten als ein vollkommen unerwarteter Stau.

Nichtsdestotrotz sollte bei der Prüfung oder Durchführung einer Simulation auf eine möglichst geringe Staudauer geachtet werden. Die Anforderung von RiMEA, eine Staudauer relativ zur Gesamtentfluchtungsdauer zu betrachten, erscheint daher sinnvoll.

5.4 WAHL DER BEMESSUNGSSZENARIEN

Die nach den Bauvorschriften erstellten Brandschutzkonzepte gelten gemeinhin bezüglich des Rettungswegkonzeptes als ausreichend sicher. Da Simulationen der Entfluchtung häufig dann angewendet werden, wenn eine Abweichung von den Rettungswegkonzepten der Bauvorschriften begründet werden soll, bedeutet dies zunächst auch ein Verlust von implizit einberechneten Sicherheiten. Um dennoch ein ausreichendes Maß für die Sicherheiten zu behalten, ist es notwendig ein möglichst ungünstiges Szenario für die Simulation heranzuziehen. Die Ermittlung des ungünstigsten Szenarios erfordert die Untersuchung einer Reihe von Szenarien, die für die abschließende Beurteilung gegenübergestellt werden müssen.

Das grundlegende Szenario ist immer durch die Gebäudenutzung bestimmt. Jede einzelne Nutzungsart benötigt daher eine separate Analyse. Weitere Szenarien bauen auf das grundlegende Szenario der Gebäudenutzung auf.

Nach RiMEA werden Szenarien durch die Variation der Geometrie, der Anfangspersonenverteilung, der Route und der statistischen Zusammensetzung der Population definiert [27]. Welche Szenarien allerdings für eine Entfluchtungsanalyse herangezogen werden sollen, ist derzeit nur vage definiert. Es wird ein grundlegender Entfluchtungsfall vorgeschrieben, bei dem alle Rettungswege zur Verfügung stehen. Ein weiterer Fall beschäftigt sich mit der Versperrung von Fluchtwegen, die in Absprache mit den Behörden entwickelt werden sollen. Eine Angabe welche oder wie viele versperrte Fluchtwegen für ein weiteres Szenario herangezogen werden sollen ist nicht enthalten. Zusätzlich sollen Sensitivitätsanalysen hinsichtlich der Reaktionsdauer erfolgen, sofern die genaue Bestimmung dieser nicht möglich ist. Hierzu sind die Einstellungen gleichzeitiger Reaktion aller Personen ($t_{\text{Reakt}} = 0$) für die Entwicklung der maximalen Staubildung und zwei gleichverteilte Reaktionsdauern ($t_{\text{Reakt}} = 0$ bis 60 und $t_{\text{Reakt}} = 0$ bis 300) zu untersuchen.

Noch ungenauer ist die Wahl der Szenarien im vfdb-Leitfaden für Ingenieurmethoden definiert. Hier erfolgt lediglich die Aussage, dass „geeignete Räumungszeiten“ durch eine „angemessen konservative Wahl des Szenariums“ erhalten werden [28]. In den maritimen Richtlinien MSC Circular 1033 oder 1238 [25];[26] zur Evakuierung sind vier Szenarien festgelegt, die für eine Entfluchtungsanalyse durchlaufen werden müssen. Die grundsätzliche Unterscheidung erfolgt hier in einem Nacht- und einem Tagfall mit jeweils festgelegten Reaktionsdauern und Standorten der Personen. Zu jedem tageszeitabhängigen Szenario müssen zwei Szenarien durchlaufen werden. Im ersten Fall sind alle Fluchtwege begehbar, für den zweiten Fall muss zunächst der Fluchtweg mit der längsten Dauer identifiziert werden. Ist dieser Weg identifiziert, kann zwischen zwei Alternativen gewählt werden. Die erste Alternative sieht eine Sperrung des Fluchtweges mit der längsten Entfluchtungsdauer vor. In der zweiten Alternative soll der identifizierte Fluchtweg höher belastet werden. Für einen Nachweis wird die höchste Entfluchtungsdauer aus den vier vorgenannten Szenarien maßgebend.

Ein anderer Ansatz für die Entwicklung von Szenarien wird in [53] vorgeschlagen. Soll ein Nachweis über die Entfluchtungsdauer erfolgen, ist eine Kalibrierung notwendig. Das bedeutet, dass zunächst eine Simulation erfolgen soll, die den Anforderungen der Bauvorschriften entspricht. Mit zwei weiteren Szenarien wird zunächst die geometrische Abweichung simuliert und anschließend ein Szenario mit der vorgesehenen Kompensationsmaßnahme. Damit sollte eine Relativaussage mit dem Vergleich der Szenarien zur Beurteilung möglich sein.

6 PROGRAMMBESCHREIBUNG

6.1 ALLGEMEINES

Mit Hilfe von Personenstromsimulationen wird die Bewegung von Personenströmen in baulichen Anlagen simuliert und analysiert. Personenstromsimulationen stellen den Bewegungsablauf, in denen Personen von ihren Startpunkten zu einem gesicherten Bereich gelangen, abhängig von der Zeit dar.

Ziel dieser Simulationen ist es, in Abhängigkeit der Geometrie, Fluchtwegwahl, Personenanzahl und individuellem Personenverhalten eine sinnvolle Abschätzung über die Dauer einer möglichen Entfluchtung zu erhalten und Hinweise auf Art und Ausmaß einer möglichen Staubildung zu erlangen.

Personenstromsimulationen lassen sich in ihrem zugrunde liegenden Modell grundsätzlich nach folgenden Kriterien unterscheiden [54]:

- Mikroskopisch - Makroskopisch
- Diskret - Kontinuierlich
- Deterministisch - Stochastisch
- Regelbasierend - Kräftebasierend
- Hohe Auflösung - Geringe Auflösung

In makroskopischen Modellen werden Personen als eine Gruppe ohne weitere Unterscheidung betrachtet, woraus sich eine gleichzeitige Bewegung mit gleicher Geschwindigkeit ergibt. Mikroskopische Modelle stellen im Gegensatz dazu jede Person separat mit individuellen Eigenschaften dar. Mikroskopische Modelle werden nachfolgend auch als Individualmodelle bezeichnet.

Diskrete Modelle teilen im Gegensatz zu kontinuierlichen Modellen für die Beschreibung einer Simulation Eingaben, wie Raum und Zeit, in endlich viele Teile auf. Es lässt weiter hinsichtlich des Grades der geometrischen Aufteilung unterscheiden, ob ein fein- oder grobmaschiges Gitter vorliegt [55]. Grobmaschige Netzwerke unterteilen die gesamte Geometrie in Teilabschnitte, wie Räume und Gänge und lassen eine genaue Lokalisierung von Personen und deren Interaktionen untereinander nicht zu. Feine Netzwerke lassen eine genaue Lokalisierung der Personen und deren Interak-

tionen zu und erlauben wie in kontinuierlichen Modellen die Berücksichtigung von Hindernissen. Die diskreten Modelle sind die Grundlage des zellulären Automaten, der die Geometrie in ein feinmaschiges Zellgitter aufteilt.

Deterministische Modelle liefern für einen identischen Ausgangszustand identische Lösungen. In stochastischen Modellen sind im Gegensatz dazu für identische Zustände unterschiedliche wahrscheinlichkeitsbasierende Lösungen möglich, sodass Personen auf eine Situation unterschiedlich reagieren können.

Die Art des Ansatzes für Personeninteraktionen während der Simulation kann zwischen Kräften und Regeln unterschieden werden. Entweder treffen Personen ihre Entscheidungen auf der Basis der momentanen Situation (Regel), beispielsweise die vorhandene Personendichte, oder aufgrund von äußeren einwirkenden Kräften (Kräfte). Grundlage des *Social Force* Modells ist die Annahme, die Veränderungen des Bewegungsverhaltens durch Kräftefelder auszudrücken. Kräfte werden hierbei durch das Vorhandensein von Bauteilen oder Personen selbst hervorgerufen und führen zu Änderungen der individuellen Gehgeschwindigkeit.

Nachfolgend werden nur Individualmodelle beschrieben, bei denen die Eigenschaften für jede Person separat zugeordnet werden. Die Beschreibung der Programme erfolgt hinsichtlich ihres Modells, der Vorbereitung der Geometrie und der Eingabe der Personendaten und des Umfangs der Ergebnisse aus der Simulation. Bei allen Programmen muss eine Anpassung der Geometrie erfolgen, das bedeutet, dass Grundrisse auf ein Minimum ihrer Darstellung reduziert werden müssen und weitere Informationen, wie Personenanzahl und Zielpunkte, hinzugefügt werden. Dieser Vorgang wird im folgenden Modellierung genannt.

6.2 PEDGo

Das Programm PedGo wird entwickelt und vertrieben von der TraffGo HT GmbH in Duisburg. Für die Untersuchungen stand die Simulation PedGo in der Version 2.3.1 sowie 2.4 Beta 1, der PedGo Editor in der Version 2.3.1 und der 3D-Viewer PedGo Viewer in der Version 1.0.0 zur Verfügung. Die Einzelmodule PedGo Editor und PedGo Viewer sind auf der Homepage der TraffGo HT GmbH www.traffgo-ht.com frei zugänglich und eignen sich damit bei Bereitstellen der entsprechenden Projektdateien für Prüfungen der Modellierung. Eine Testversion für das Simulationsmodul kann ebenfalls auf der Homepage heruntergeladen werden.

6.2.1 Modell

Grundlage dieses zweidimensionalen Individualmodells ist ein zellulärer Automat. Durch die speziellen Eigenschaften eines zellulären Automaten wird der Raum und die Zeit diskretisiert, das bedeutet, dass im Gegensatz zu einem kontinuierlichen Modell Raum und Zeit in endlich viele Teile zerlegt werden. Die Aufteilung des Raumes erfolgt hierbei in ein quadratisches Zellgitter mit einer jeweiligen Zellkantenlänge von 0,4 Metern [56]. Die Zeitschrittweite beträgt 1 Sekunde. Um Personen als Individuen repräsentieren zu können, werden dabei jeder einzelnen Zelle spezifische Informationen zugewiesen.

6.2.2 Eingabe

Das Programm ist in die drei Module PedGo Editor, PedGo und PedGo Viewer unterteilt. Mittels des Editors werden die notwendigen Daten, wie Geometrie, Personenbelegung, Ziele und Routen, für die Simulation aufbereitet. Im Simulationsmodul PedGo erfolgen die Anpassung der Personen- und Zieleigenschaften und die Berechnung der einzelnen Durchläufe. Der PedGo Viewer ist ein zusätzliches Anzeigeelement, mit dem sich die Berechnungsdurchläufe dreidimensional visualisieren lassen.

6.2.2.1 Geometrie

Die Eingabe der Geometrie erfolgt über den Editor mit dem Import von Grundrissplänen im DXF-Format. Innerhalb des Editors ist eine Skalierungsfunktion vorhanden, die es ermöglicht verschiedene Maßstäbe korrekt einzulesen. Eine Begrenzung der Fläche ist nicht bekannt. Hinsichtlich der simulierbaren Fläche wurden bisher Simulationen bis zu einer Ebenenfläche von etwa 21.000 m² pro Ebene und einer Gesamtfläche von ungefähr 390.000 m² innerhalb eines Projektes durchgeführt [57]. Durch den Import in den PedGo Editor werden die vorhandenen Grundrissdaten auf das 40 cm Zellraster transformiert und damit für die weitere Bearbeitung vorbereitet. Maße, die dem Raster nicht entsprechen, werden auf eine geringere Zellbreite abgemindert. Alle modellierten Maße können im Editor abgelesen werden. Änderungen der Geometrie können in der Zeichenoberfläche des Editors vorgenommen werden. Um den Grundriss für die Simulation realitätsnah aufzubereiten stehen grundsätzlich die vier Zelltypen *Wand*, *Tür*, *Treppe* und *freie Zelle* zur Verfügung.

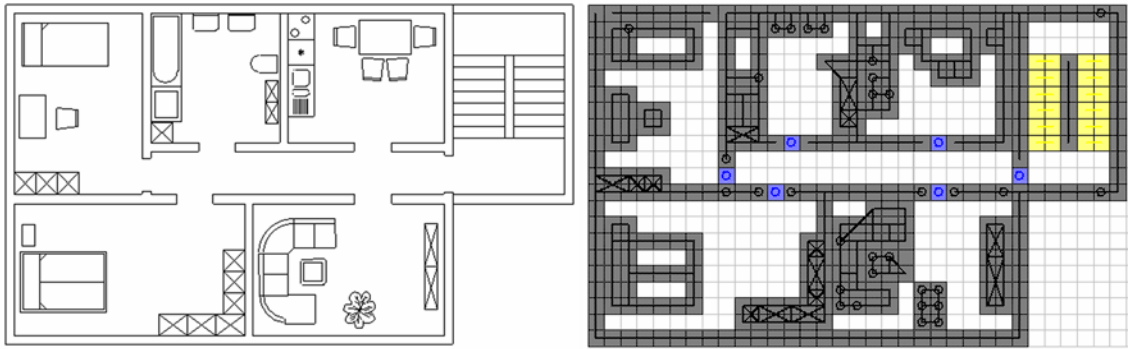


Abbildung 15: Diskretisierung eines Grundrisses am Beispiel von PedGo

Abbildung 15 zeigt einen einfachen Grundriss und das diskretisierte Modell im Editor. Einzelne Zelltypen werden im Editor farblich unterschiedlich gekennzeichnet. Die Farbwahl erfolgt durch den Benutzer und kann daher in der Darstellung je nach Benutzereinstellung abweichen.

Zelltypen beeinflussen maßgeblich die Bewegung und Gehgeschwindigkeit der Personen. Den Zelltypen sind unterschiedliche Eigenschaften zugeordnet. Der einfachste Zelltyp ist dabei die freie Zelle, die ohne Behinderung betreten werden kann. Der Zelltyp *Wand* kann nicht betreten werden und dient damit der Modellierung von Begrenzungen durch Bauteile und andere Objekte wie Einrichtungsgegenstände. Zur Berücksichtigung von Türen wird der Zelltyp *Tür* eingeführt. Türen führen zu einer Verringerung des Personenstroms. Dieses Merkmal wird insofern berücksichtigt, dass beim Betreten oder Überschreiten von Türzellen eine Verringerung der individuellen Gehgeschwindigkeit auf 25 % erfolgt. Mit dem Zelltyp *Treppe* wird das Bewegungsverhalten auf Treppen und Neigungen berücksichtigt. Hierbei erfolgt eine Reduzierung der Gehgeschwindigkeit auf 50 %. Treppenzellen müssen seitlich durch den Zelltyp *Wand* begrenzt sein, um ein Abwandern der Personen zu vermeiden. Zum Zelltyp *Treppe* gehören die Zelltypen *Up* und *Down*, die als Verbindung zwischen den einzelnen Geschossen dienen. Außerdem lässt sich so eine Bewegung in beide Richtungen der Treppe ausführen. Um eine Verbindung der Geschosse sicherzustellen, müssen lediglich die *Down*-Zellen übereinander liegen, da bei Erreichen der *Down*-Zelle der Wechsel auf eine andere Ebene erfolgt. Daraus ergibt sich, dass eine komplette Darstellung der Treppe nur auf der unteren Ebene komplett dargestellt werden muss. Bei der Modellierung ist zu berücksichtigen, dass in der Simulation die horizontale Lauflänge auf der Treppe einbezogen wird [56].

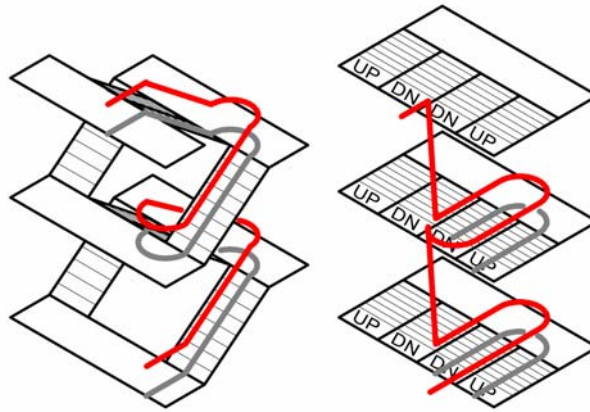


Abbildung 16: Wegverlauf und Sprungpunkt bei Treppen in PedGo [56]

In Abbildung 16 ist die Funktionsweise bei der Modellierung von Treppen schematisch dargestellt. Die dreidimensionale Schemazeichnung auf der linken Seite stellt den schematischen Verlauf der Laufwege auf Treppen in der Realität dar. Rechts ist die Interpretation durch die Simulation abgebildet. Anhand der roten Linie ist der Wechsel zwischen den Ebenen bei Erreichen der *Down*-Zelle erkennbar. Damit kann innerhalb einer Ebene eine zweiläufige Treppe mit Zwischenpodest modelliert werden. Bei mehreren Zwischenpodesten (beispielsweise eine Treppe mit 3 Läufen und 2 Zwischenpodesten) müssen Ebenen zwischen den Geschossen eingefügt werden.

6.2.2.2 Ziele und Routen

Vor der Bestimmung von Zielen müssen Ziele in ihrer Bezeichnung im Editor definiert werden. Die Bestimmung des Zielbereiches erfolgt dann durch die Anordnung von *Exit*-Zellen in der vorliegenden Geometrie. Dabei können maximal 256 verschiedene Ziele definiert werden. Bei der Eingabe von Zielbereichen können die zwei unterschiedlichen Zieltypen *Passenger* und *Crew* definiert werden. Diese unterscheiden sich durch das Verhalten der Personen bei Erreichen des Zielbereiches. Wird den Personen ein Ziel der Eigenschaft *Passenger* zugeordnet, so werden die Personen nach Erreichen des Zielbereiches aus der Simulation entfernt und gelten als gerettet. Dieser Zieltyp stellt den Ausgang dar. Bei einer Zuordnung zu einem *Crew* Ziel verfolgen die Personen zunächst dieses Ziel. Nachdem sie an diesem Zielbereich angekommen sind, werden die Personen dann zu einem beliebigen *Passenger* Ziel weitergeleitet. Ein *Crew* Ziel kann daher auch als Zwischenziel verstanden werden. Für den Ausgang, bzw. dem Zieltyp *Passenger*, lassen sich in der Simulation Blockierzeiten zuweisen. Diese bewirken, dass die Ausgangszellen erst nach einer voreinge-

stellten Zeit freigegeben werden und die Personen erst nach der eingestellten Blockierzeit aus der Simulation entfernt werden. Es existieren dabei zwei Möglichkeiten eine Blockierzeit einzustellen:

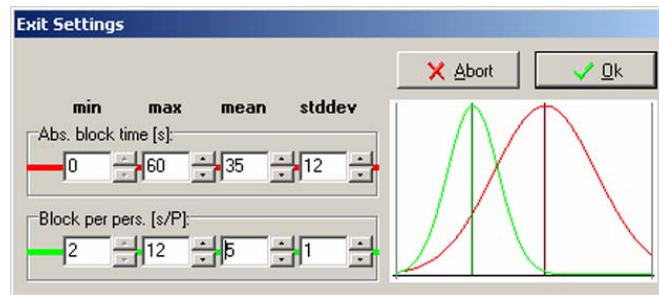


Abbildung 17: Dialogfenster zur Einstellung der Blockierzeiten (PedGo)

Die absolute Blockierzeit (Absolute blocking time) gilt für alle Personen. Erst nach Ablauf der absoluten Blockierzeit kann der Ausgang betreten werden. Bei der Blockierzeit pro Person (Block per person) wird vorgegeben, wie lange eine Person eine Ausgangszelle blockiert, bevor eine andere diese Zelle betreten kann. Die Einstellung dieser Werte erfolgt über Minimum, Maximum, Mittelwert und Standardabweichung. Die Auswirkung der einzelnen Blockierzeiten auf den zeitlichen Ablauf der Entfluchtung der Personen ist in Abbildung 18 dargestellt.

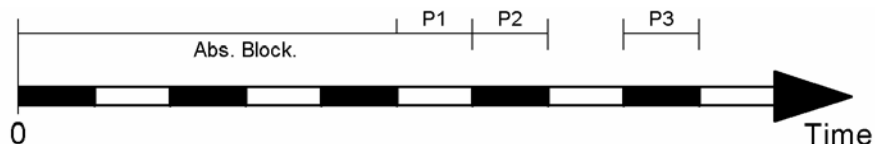


Abbildung 18: zeitliche Auswirkung von Blockierzeiten des Ausgangs [56]

Eine Blockierzeit pro Person kann zur Modellierung bestimmter Türarten, z.B. Drehtüren, verwendet werden, da sich bei diesen kein stetiger Personenfluss ausbilden wird.

Nach der Anordnung von Zielen im Editor, bilden sich aufgrund der jeweiligen Lage innerhalb der Simulation so viele verschiedene Potenzialfelder aus, wie verschiedene Zielbereiche definiert worden sind. Wurde nur ein Ziel definiert, breitet sich das Potenzialfeld für alle Zielbereiche gleichzeitig aus. Diese Potenzialfelder dienen dabei der Orientierung der simulierten Personen zu einem zugehörigen Zielbereich. Die Ausbreitung des Potenzialfeldes erfolgt über alle begehbaren Zellen. Mit dem Poten-

zialfeld wird ein standortabhängiger Wegweiser für die Laufrichtung aller im Grundriss befindlichen Personen beschrieben. Die jeweilige Laufrichtung entspricht dem Gradienten des Potenzialfeldverlaufes, das bedeutet, dass die Bewegung senkrecht zum Potenziallinienverlauf erfolgt.

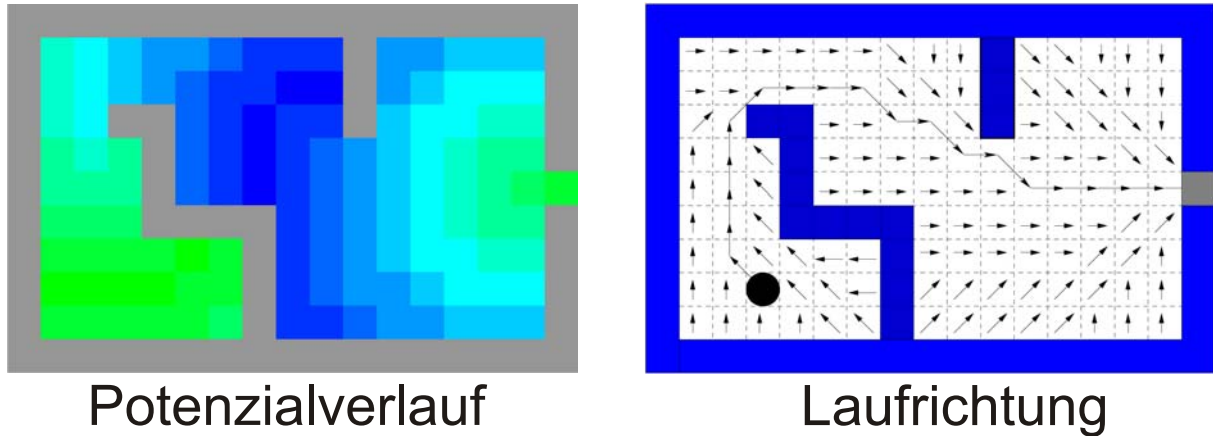


Abbildung 19: Darstellung des Verlaufes des Potenzialfeldes in PedGo und zugehörige Laufrichtung in den Zellen [58]

In Abbildung 19 ist auf der linken Seite ein Potenzialfeld eines Raumes mit Zwischenwänden dargestellt. Rechts dargestellt sind die zugehörigen Gradienten, beziehungsweise die Laufrichtungen, für jede einzelne Zelle. Um den Zusammenhang zwischen Potenzialfeld und Laufrichtung übersichtlicher anzuzeigen, sind in Abbildung 20 beide Zeichnungen übereinander gelegt worden.

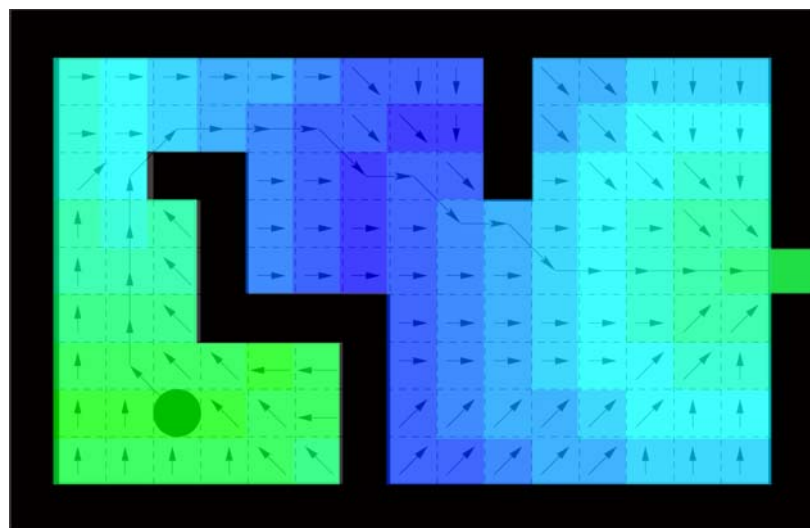


Abbildung 20: Zusammenhang Potenzialfeld und Laufrichtung in Abhängigkeit vom Standort bei PedGo

Hierbei ist zu erkennen, dass sich die Richtungslinien der einzelnen Zellen senkrecht zum Potenzialfeld ausbilden.

Um ein solches Feld auszubilden, werden jeder begehbaren Zelle dimensionslose Zahlenwerte zugewiesen. Diese Werte erhöhen sich mit zunehmendem Abstand zum Ziel und beeinflussen damit die Wahl des Weges. Die simulierten Personen bewegen sich zu den Zellen, in denen der Potenzialwert geringer ist als der Potenzialwert benachbarter Zellen. Mit der Potenzialwertdifferenz zwischen einzelnen Zellen wird den Personen die Laufrichtung zum Ziel vorgegeben. Sofern nur die Zelltypen *Wand* und *freie Zelle* modelliert sind, erfolgt der Weg über den kürzesten Abstand zum Ziel. Die Potenzialwerte der einzelnen Zellen können innerhalb der PedGo Simulation abgelesen werden.

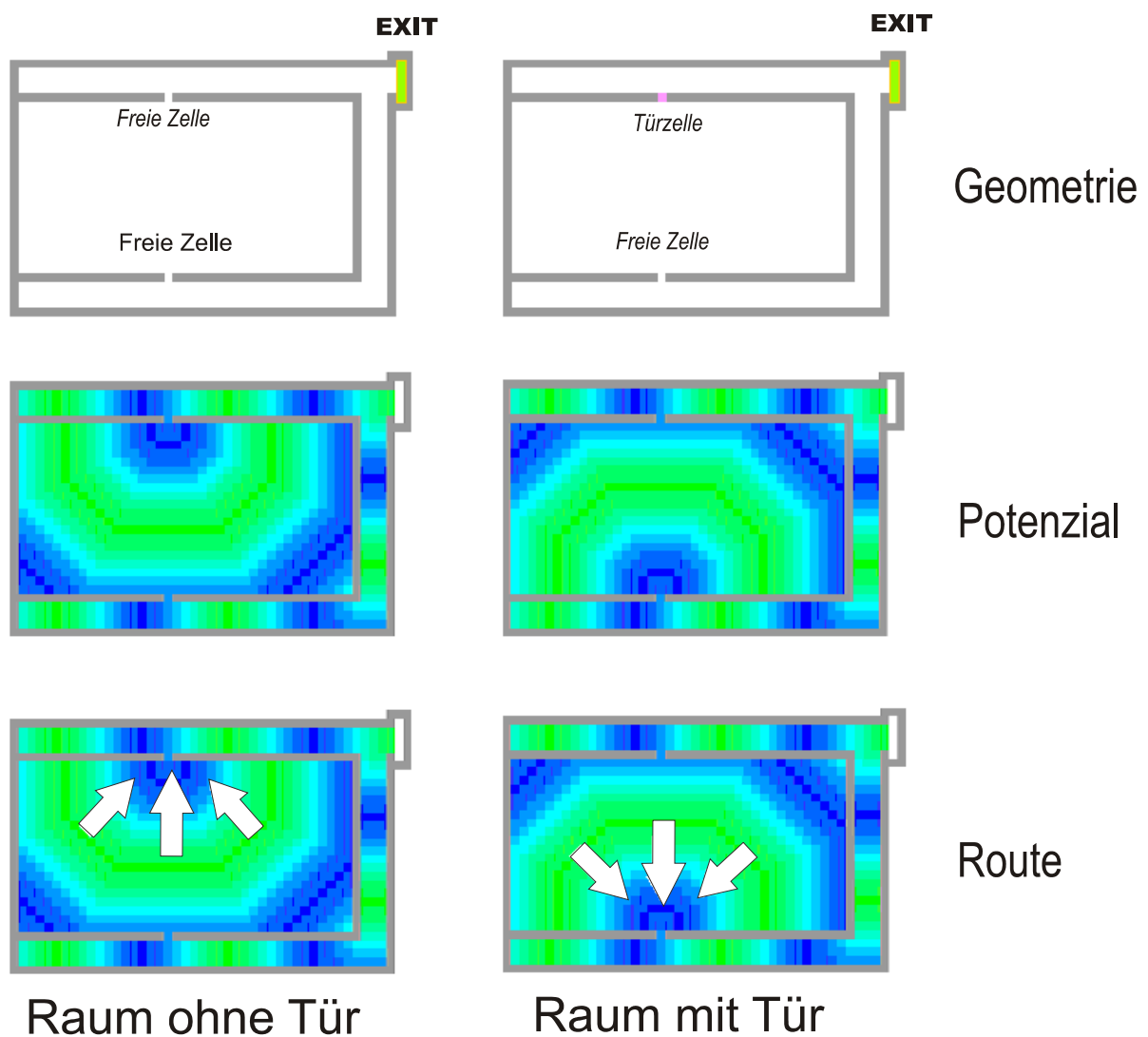


Abbildung 21: Darstellung des Einflusses von Bauteilen auf die Potenzialausbreitung

Zur Verdeutlichung der Wirkung des Potenzials und der daraus entstehenden Fluchtwegwahl sind in Abbildung 21 zwei Räume mit jeweils zwei Ausgängen und einem angrenzenden Gang mit einer rechts oben befindlichen Ausgangszelle dargestellt. Die Räume unterscheiden sich nur durch die Art der Ausgänge. Auf der linken Seite werden die Öffnungen nur als freie Zellen dargestellt. Auf der rechten Seite ist zusätzlich eine Türzelle auf der oberen Seite des Raumes modelliert, die untere Öffnung ist weiterhin mit einer freien Zelle modelliert.

Verglichen mit einer topographischen Karte stellen die Farben des Potenzialfeldes unterschiedliche Höhen dar. So kann interpretiert werden, dass eine Person auf möglichst direktem Wege versucht den Höhenunterschied, bzw. die Potenzialdifferenz zur Ausgangszelle, zu überbrücken.

Aus Abbildung 21 wird deutlich, dass zwischen den beiden Grundrissen „ohne Tür“ und „mit Tür“ die Potenzialausbreitung innerhalb des Raumes differiert. Dargestellt durch die weißen Pfeile, wählen Personen den kürzesten Weg über den oberen Ausgang, sofern keine Tür vorhanden ist. Hierbei wird deutlich, dass Bauteile wie Türen und Treppen Einfluss auf die Potenzialausbreitung nehmen, indem sie die benachbarten Potenzialwerte erhöhen. Durch die Modellierung von Tür- oder Treppenzellen werden also die Wege von simulierten Personen verändert, sodass nicht unbedingt der kürzeste Weg angestrebt wird. Dies kann in der Realität ebenfalls der Fall sein, wenn spezielle Notausgänge für die betreffenden Personen nicht sichtbar oder unbekannt sind. Falls für den oben abgebildeten Grundriss Türzellen für beide Öffnungen eingesetzt werden, breitet sich das Potenzial symmetrisch zu den Türen im Raum aus.

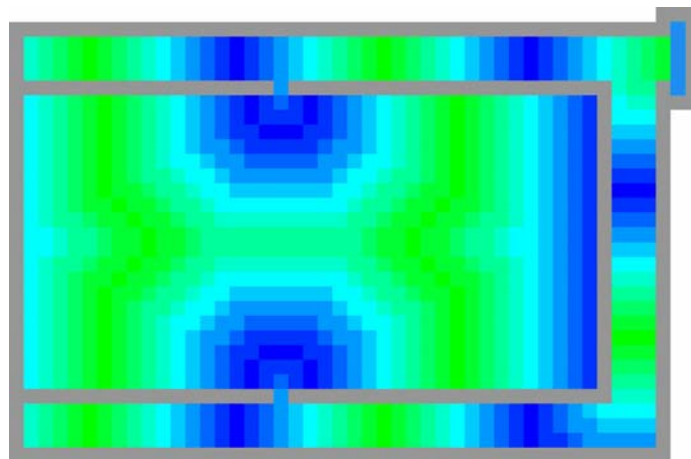


Abbildung 22: Potenzialausbreitung bei zwei modellierten Türen

Der von der Person gewählte Ausgang wird dann von der individuellen Position im Raum abhängig, das heißt es wird der Ausgang mit der geringeren Entfernung angesteuert.

Die Potenzialausbreitung kann zusätzlich anhand von Routenführungslinien im Editor verändert werden. Hiermit wird ermöglicht, den simulierten Personen bestimmte Fluchtwegverläufe über Treppen und durch Türen vorzugeben.

Neben dem Verlauf des Weges, lässt sich anhand des Potenzialfeldes feststellen, welche Bereiche von Personen betreten werden können. Bereiche, in denen sich kein Potenzial ausbildet, sind für die simulierten Personen nicht begehbar. Solche Bereiche bleiben ungefärbt.

6.2.2.3 Personen

Die simulierbare Personenanzahl in PedGo beträgt derzeit etwa 100.000 Personen [57]. Die Fläche die eine Person in PedGo beansprucht, beträgt eine Zelle mit der Kantenlänge 0,4 m. So ergibt sich für eine Person eine Standfläche von $0,16 \text{ m}^2$. Daraus resultiert eine maximal mögliche Personendichte von 6,25 Personen pro m^2 , da eine Zelle zu einem Zeitpunkt nur von einer Person betreten werden kann.

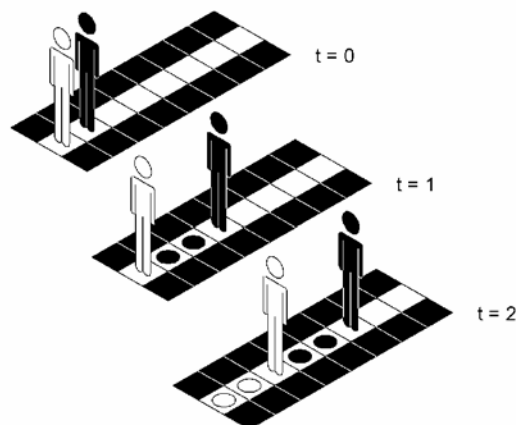


Abbildung 23: Bewegung der Personen in Abhängigkeit der Zeit in PedGo [56]

Die unmögliche Doppelbelegung der Zellen durch Personen führt auch dazu, dass Personen nicht übersprungen werden können. Vorauslaufende Personen blockieren also die nachfolgenden Personen. Kann keine neue Position der nachfolgenden Person gefunden werden, kommt es zum Stillstand.

Die Eingabe der Personen in die Simulation erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt werden im Editor zunächst die folgenden Grunddaten festgelegt:

- Standpunkt der Personen
- Personenanzahl
- Gruppenzugehörigkeit
- Zielbereiche und Zieltyp

Bei der Festlegung des Standpunktes kann gewählt werden, ob die Personen sich in einem bestimmten Bereich aufhalten oder zufällig über die Zellen verteilt werden sollen. Mit der Angabe des Zieles wird den Personen der Zielbereich, sowie bei Anordnung von Routenführungslinien auch der Wegverlauf zugewiesen. Durch die Zuordnung in Gruppen ist bei der Zuweisung von Personeneigenschaften eine differenzierte Betrachtung möglich. Eine Gruppe kann aus einer oder mehreren Personen bestehen. Jeder Gruppe können in der Simulation unterschiedliche Eigenschaften zugewiesen werden. Eine Auflistung über modellierte Personenanzahl und definierte Gruppen kann über den Editor ausgegeben werden. Dabei kann zwischen der Ausgabe nach Geschoss oder der Ausgabe nach Ebene gewählt werden.

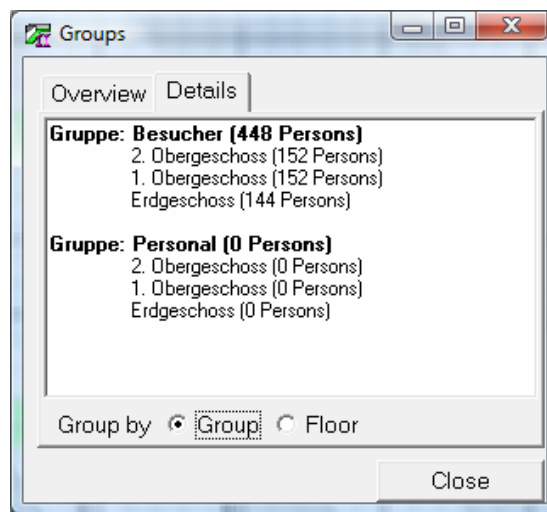


Abbildung 24: Informationsfenster der modellierten Gruppen im PedGo Editor

Die Zuweisung der individuellen Personeneigenschaften erfolgt im zweiten Schritt im Simulationsmodul. Diese Eigenschaften werden in PedGo als Demographie bzw. demographics bezeichnet.

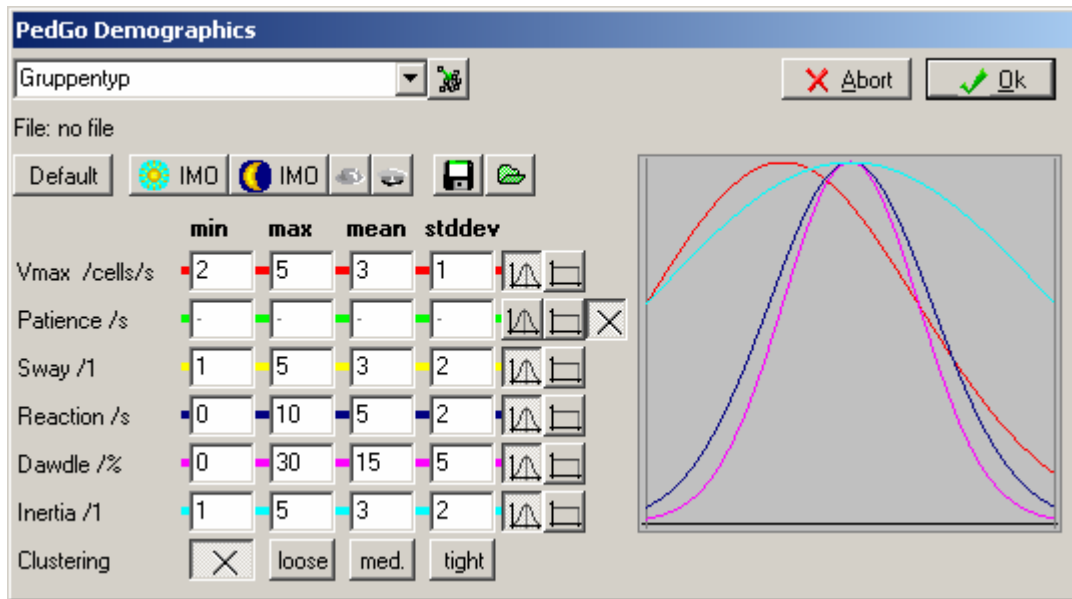


Abbildung 25: Dialogfenster zur Einstellung der Personeneigenschaften in PedGo

In Abbildung 25 ist das Einstellungsfenster für die Eigenschaften der Personen in PedGo dargestellt. Die abgebildeten Einstellungen entsprechen den voreingestellten Standardeinstellungen.

Die Charakteristik der Personen bzw. der Gruppentypen kann über die folgenden sieben Parameter beschrieben werden:

- Geschwindigkeit (Vmax)
- Geduld (Patience)
- Schwanken (Sway)
- Reaktionsdauer (Reaction)
- Trödelwahrscheinlichkeit (Dawdle)
- Trägheit (Inertia)
- Gruppenzusammenhalt (Clustering)

Bis auf den Parameter Gruppenzusammenhalt, lassen sich die Parameter normal- oder gleichverteilt beschreiben. Eine Gleichverteilung bedeutet, dass die Häufigkeit aller Werte über die Personen gleichmäßig verteilt wird. Dazu sind lediglich die Werte Minimum und Maximum vorzugeben. Bei einer Normalverteilung werden die Werte mit unterschiedlichen Häufigkeiten, entsprechend der im Dialogfenster dargestellten Glockenkurven, verteilt. Der Parameter wird hierbei über das Minimum und Maximum, sowie den Mittelwert und die Standardabweichung definiert.

Durch den Parameter *Geschwindigkeit* (V_{\max}) erfolgt die Zuweisung der maximal möglichen Geschwindigkeit der Personen für eine unbehinderte Bewegung in der Ebene. Die Einheit der Geschwindigkeit beträgt Zellen/s. Mit der Umrechnung über die Kantenlänge beträgt damit eine Zelle pro Sekunde einer Geschwindigkeit von 0,4 m/s. Eine Eingabe ist damit nur in Schritten von 0,4 m/s möglich, jedoch können über den Parameter *Trödelwahrscheinlichkeit* (*Dawdle*) Anpassungen vorgenommen werden.

Der Parameter *Geduld* (*Patience*) bestimmt die Dauer in Sekunden, die eine Person im Stau still steht, bevor sie sich auf einen anderen Weg zum Ziel begibt. Dadurch kann sich eine gleichmäßigere Auslastung der Fluchtwege ergeben.

Die *Reaktionsdauer* (*reaction*) legt den Zeitpunkt fest, an dem die Personen mit der Fluchtbewegung beginnen. Gemäß der Definition der Reaktionsdauer entspricht die Differenz zwischen Minimum und Maximum dem Zeitintervall Δt_{99} . Das Minimum legt den frühesten, das Maximum den spätesten Zeitpunkt fest, an dem Personen mit der Bewegung einsetzen können. Bei der Normalverteilung ist der Mittelwert der am häufigsten gewählte Zeitpunkt für die Fluchtbewegung. Die Standardabweichung bestimmt die Streuung der Zeitpunkte um den Mittelwert. Die Einheit für die Reaktionsdauer wird in Sekunden angegeben.

Das *Schwanken* (*Sway*) beeinflusst die Genauigkeit mit der dem Potenzialverlauf gefolgt wird. Werte können in einem Spektrum von 1 bis 10 eingegeben werden. Anhand dieser Werte wird die Wahrscheinlichkeit für die möglichen Laufrichtungen ermittelt. Je höher dieser Wert gewählt wird, desto stärker gleichen sich die Potenzialwerte der benachbarten Zellen einander an. Hieraus folgt, dass eine Bewegung in Fluchtrichtung unwahrscheinlicher wird.

In Zusammenhang mit dem Parameter *Schwanken* bestimmt der Parameter *Trägheit* (*Inertia*) die Wahrscheinlichkeit für das Beibehalten der aktuellen Laufrichtung. Auch hier beträgt das Wertespektrum 1 bis 10. Hohe Werte sprechen dafür, dass die aktuelle Laufrichtung beibehalten wird.

Um Einflüsse wie beispielsweise Orientierungsschwierigkeiten und Fitness zu berücksichtigen, wurde der Parameter *Trödelwahrscheinlichkeit* (*Dawdle*) eingeführt. Er beschreibt die Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine Person für einen bestimmten Zeitraum stehen bleibt. Die Eingabe dieses Wertes erfolgt prozentual. Eine Trödelwahr-

scheinlichkeit von 100% bedeutet, dass sich eine Person nicht mehr bewegt, hingegen bedeutet eine Eingabe von 5%, dass Personen 1/20 der individuellen Entfluchungsdauer stehen bleiben.

Mit dem Parameter Gruppenzusammenhalt (Clustering) wird definiert, inwieweit Personen einer Gruppe ihren Weg zum Zielbereich zusammenhängend gehen. Hiermit soll beispielsweise der Zusammenhalt von Familien berücksichtigt werden. Dazu sind die vier Einstellungsmöglichkeiten eng (tight), mittel (medium), locker (loose) und ohne Zusammenhang (X) möglich.

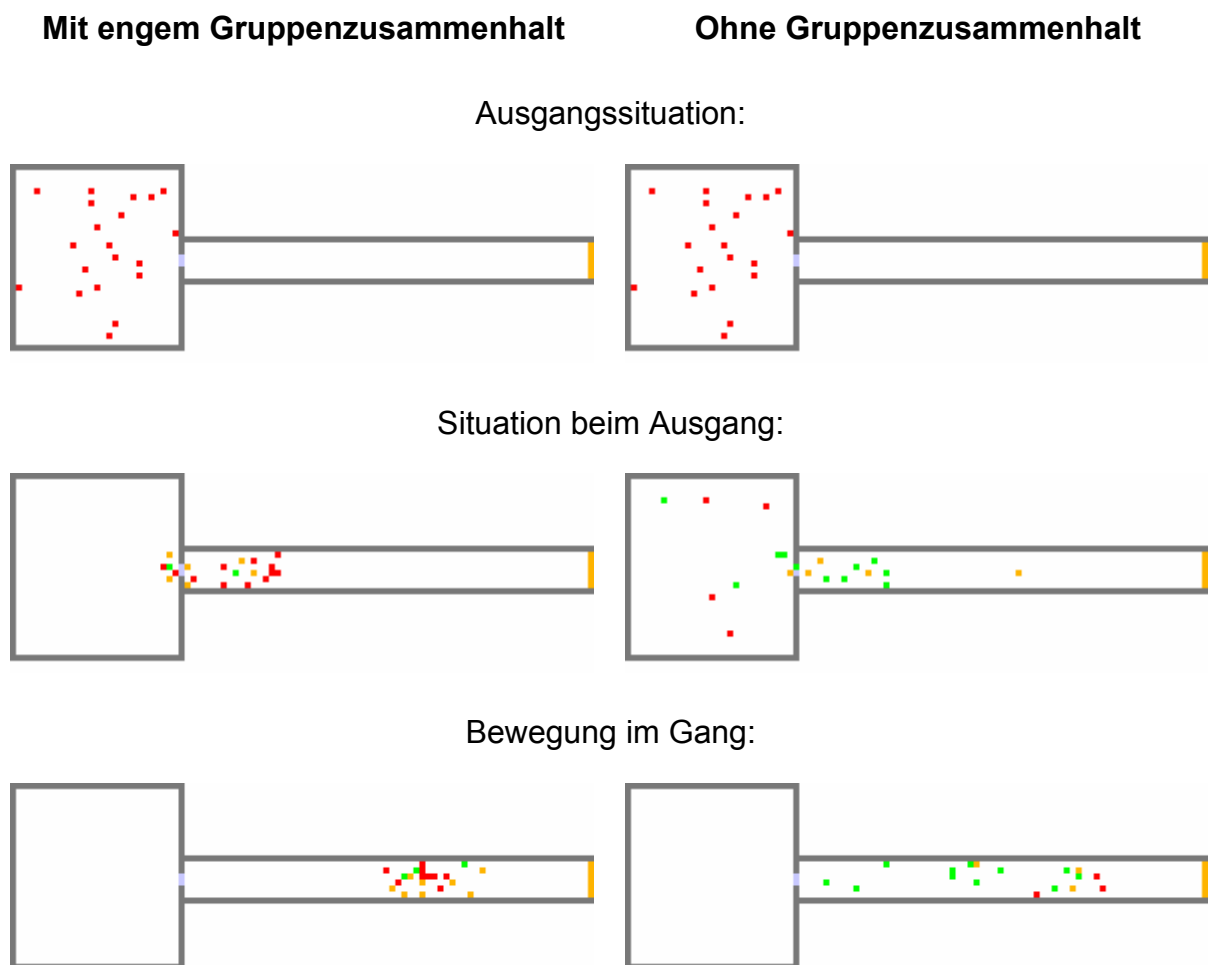


Abbildung 26: Darstellung des Gruppenverhaltens in PedGo

An einem Raum mit anschließendem Gang ist dargestellt, wie sich das Gruppenverhalten von simulierten Personen auswirkt. Personen werden in der Simulation als farbige Quadrate gekennzeichnet. Unterschiedliche Geschwindigkeiten der Personen sind farblich unterschiedlich markiert. Rote Quadrate stellen stehende Personen dar,

grüne diejenigen mit Maximalgeschwindigkeit. Anhand der Abbildung wird deutlich, dass sich bei einer Gruppenzuordnung Personen im Bereich des Ausgangs versammeln. Die Bewegung in der Gruppe erfolgt im weiteren Verlauf zusammenhängend. Ohne Gruppenzusammenhalt bewegen sich die Personen weit verstreut.

Wie sich die einzelnen Einstellungen der Parameter auf die Entwicklung des Ergebnisses auswirken, ist im Anhang untersucht worden. Außerdem ist auf der Homepage des Herstellers ein Untersuchungsbericht [77] über die Testfälle zur Validierung nach RiMEA öffentlich zugänglich, in dem eine Sensitivitätsanalyse zu den Parametereinstellungen vorhanden ist.

6.2.3 Ergebnisse

Vor der eigentlichen Simulation ist durch die Geometrie des Modells und eventuell vorhandener Routenführungen bereits der Potenzialverlauf vorhanden. Diese Visualisierung des Potenzialverlaufs wird in PedGo *directional index* genannt.

Um weitere Ergebnisse aus der Simulation zu erhalten, gibt es zwei Möglichkeiten. Zur statistischen Analyse wird eine Mittelwertrechnung durchgeführt, die aus einer vorher bestimmbaren Anzahl von Rechendurchläufen besteht. Ein einzelner Rechendurchlauf stellt dabei einen möglichen Entfluchtungsfall dar. Bei der Mittelwertrechnung wird für jeden einzelnen Durchlauf, die *Seeds* genannt werden, die Population (Gesamtheit der Personen mit ihren individuellen Eigenschaften) in den vorher angegebenen Grenzen der Anfangsposition variiert. Mittels dieser Variation wird aus den Durchläufen ein Ergebnisbereich der erforderlichen Entfluchtungsdauer ermittelt.

In den Ergebnissen der Mittelwertrechnung liegen die Entfluchtungsauern für alle Durchläufe, mit der Angabe der jeweiligen Bezeichnung, vor. Zu jedem Durchlauf wird in Schritten von 10 Personen angegeben, zu welcher Zeit Personen den Ausgang erreicht haben. Aus dieser Ergebnismenge werden markante Dauern, wie die Minimal-, Maximal- und die mittlere Entfluchtungsdauer, sowie die sich ergebende Standardabweichung angegeben. Desweiteren wird ein 95%-Wert für die Entfluchtungsdauer angeführt. Dieser Wert wird in den Richtlinien der IMO und der RiMEA angegeben und gilt als signifikant. Er bedeutet, dass 95% aller ermittelten Entfluchtungsauern geringer sind als der 95%-Wert. Die markanten Dauern sind zusätzlich separat mit der Bezeichnung des zugehörigen Durchlaufes aufgeführt.

Mit diesen Werten lässt sich eine allgemeine bzw. eine globale Entfluchungskurve über alle Ausgänge mittels gängiger Tabellenkalkulationsprogramme erstellen. Mit einer globalen Entfluchungskurve ist hier gemeint, dass alle Personen unabhängig vom gewählten Ausgang in die Auswertung miteinbezogen werden.

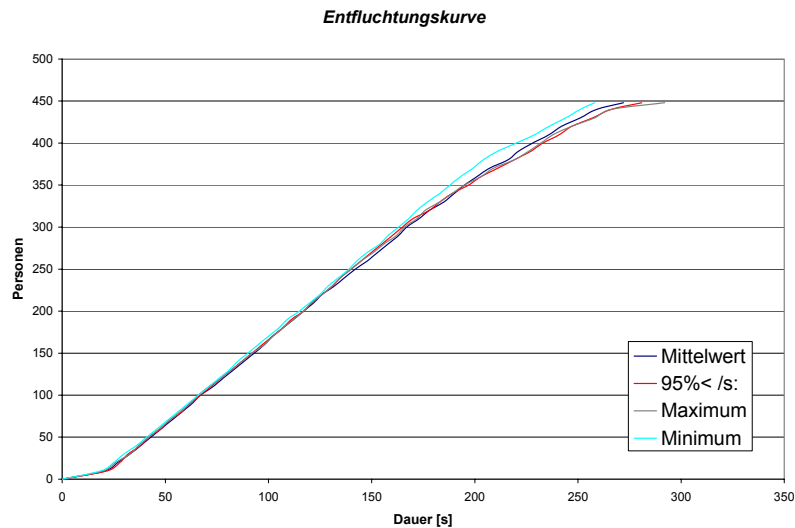


Abbildung 27: Beispiel einer Entfluchungskurve aus PedGo

Die Entfluchungskurve zeigt, wie viele Personen zu welcher Zeit den Ausgang erreicht haben. Dargestellt sind alle Kurven der identifizierten markanten Rechendurchläufe aus PedGo.

Ein Histogramm der Häufigkeitsverteilung der Ergebnisse aus den einzelnen Durchläufen wird automatisch generiert. Das Histogramm gibt an, wie oft eine bestimmte Entfluchungsdauer ermittelt wurde und dient damit einer statistischen Auswertung der Ergebnisse.

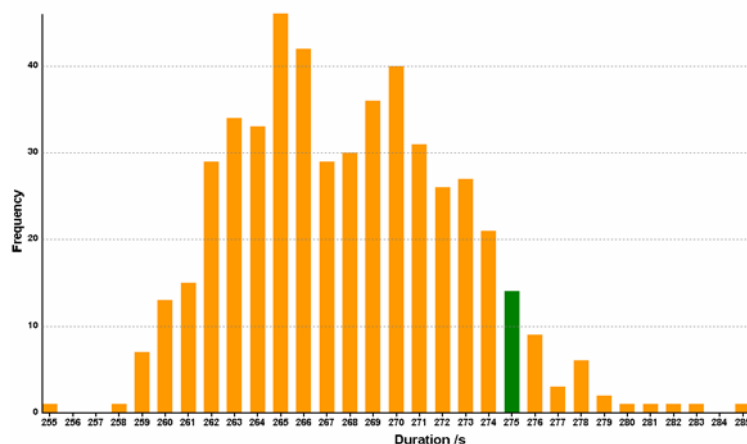


Abbildung 28: Häufigkeitsverteilung der Ergebnisse einer Mittelwertrechnung

Die im Histogramm grün dargestellte Säule entspricht dem 95%-Wert. Diese Verteilung der Dauern (Duration) in Abhängigkeit der Häufigkeit (Frequency) ist tabellarisch auch in der Ergebnisdatei vorhanden.

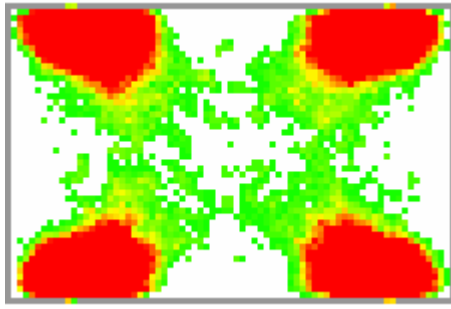
Zusätzlich wird in den Ergebnisdateien dokumentiert, welche Eingabedaten für die Simulation benutzt werden. Dokumentiert werden der Name der Projektdatei, die Einstellungen der Personeneigenschaften für jede einzelne Gruppe und die Einstellungen für die Blockierzeiten der Ausgänge. Außerdem ist den Dateien die simulierte Personenanzahl entnehmbar.

Die zweite Möglichkeit Ergebnisse zu erhalten, ist die Einzelrechnung. Mit der Einzelrechnung kann ein spezieller Durchlauf wiederholt werden, um spezifizierte Ergebnisse zu erhalten. Hier werden Angaben zu den Personendaten höher aufgelöst. Für jede Person ist in der Ergebnisdatei aufgeführt

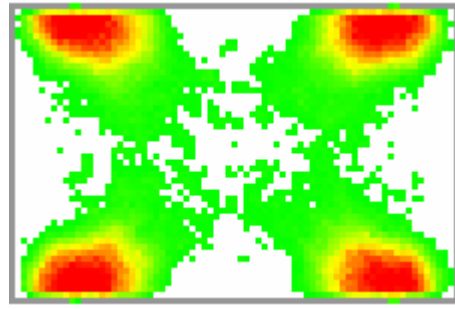
- welcher Gruppe sie angehört,
- von welcher Anfangsposition sie losgelaufen ist,
- welchen Zielbereich sie erreicht hat,
- welches Ziel sie angesteuert hat,
- welche individuelle Entfluchtungsdauer benötigt wurde,
- welche Distanz überbrückt wurde,
- mit welcher Dauer welche Geschwindigkeit gelaufen wurde und
- welche Eigenschaften der Person zugeordnet wurden.

Aus diesen Angaben lassen sich Rückschlüsse über die Verteilung der Geschwindigkeiten und individuellen Laufdauern ziehen. Weiterhin ist eine Berechnung möglich, wie lange sich Personen aufgrund von Personenstauungen insgesamt im Stillstand befinden. Außerdem ist die Erstellung von Entfluchtungskurven je Ausgang möglich.

Neben den Personendaten werden zusätzlich Dichteplots (density plots) ausgegeben. Der Dichteplot beschreibt, über welche Dauer relativ zur Entfluchtungsdauer und in welchen Bereichen eine Dichte von 4 Personen/m² überschritten wurde. Bei der Ausgabe der Dichteplots ist der maximale Grenzwert auf eine bestimmte Dauer oder auf ein bestimmtes Vielfaches der Entfluchtungsdauer justierbar, das bedeutet, dass die Darstellung innerhalb des Dichteplots geändert werden kann. Beispiele für die Darstellung eines Dichteplots und die Abhängigkeit vom eingestellten Grenzwert ist in der nachfolgenden Abbildung illustriert.



Grenzwert = 10% der Entfluchtungsdauer



Grenzwert = 50% der Entfluchtungsdauer

Abbildung 29: Dichteplots aus PedGo mit unterschiedlichem Grenzwert der Dauer

Gezeigt ist ein Raum mit 4 Ausgängen. Der grün-rote Farbverlauf illustriert die Bereiche, in denen eine Personendichte von 4 Personen/m² überschritten wird. Grüne Bereiche werden stellen die Bereiche dar, in denen die Personendichte nur für einen kurzen Zeitraum besteht. Im Gegensatz dazu kennzeichnet der rote Bereich den Bereich, in dem die Dichte für die gesamte Dauer des maximalen Grenzwertes erreicht wird, das bedeutet eine Überschreitung des Grenzwertes. Die weiteren Farben geben prozentuale Abstufungen relativ zum eingestellten Grenzwert wieder. Um die Farben den entsprechenden Dauern zuzuordnen, ist im Anhang eine Skalierungstabelle enthalten. Aus der Abbildung geht hervor, dass ein höherer maximal eingestellter Grenzwert die roten Bereiche verkleinert. Die Belegung des Bereiches, in denen die Dichte überschritten wird, bleibt hingegen gleich.

Eine weitere Auswertung kann mit der Angabe von festgelegten Bereichen im Editor durch logpoints erfolgen. Dadurch kann eine Personenbelegung dieser Bereiche in Abhängigkeit der Zeit ausgewertet werden. Dies macht eine lokale Dichteberechnung und Entfluchtungskurven für einzelne Bereiche möglich. Ebenso kann damit eine Beurteilung nach bestimmten LOS erfolgen.

Zur Visualisierung des Durchlaufes können verschiedene Dateien erstellt werden. Zum einen ist die Ausgabe einer zweidimensionalen Animation im AVI Format möglich. Ferner können Screenshots in beliebigen Zeitabständen ausgegeben werden. Für Animation und Screenshots ist es möglich, Ebenen einzeln oder insgesamt darzustellen. Eine weitere Möglichkeit den Rechendurchlauf dynamisch darzustellen, ist durch ein programmeigenes Format gegeben. Dazu wird eine Datei im 3dl Format ausgegeben, die sich mit Hilfe des kostenfreien Programms PedView abspielen lässt. Dadurch wird eine dreidimensionale Darstellung des Entfluchtungsablaufes möglich.

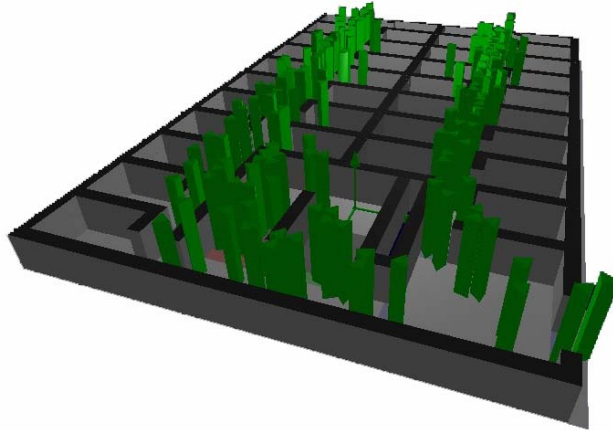


Abbildung 30: Dreidimensionale Darstellung eines Grundrisses aus PedView

Personen in PedView werden als extrudierte Dreiecke gekennzeichnet. Dynamische Veränderungen der Ansichten sind während des Abspielens möglich.

6.3 SIMULEX

Das Programm SIMULEX wird von dem Unternehmen Integrated Environmental Solutions Limited, kurz IES Ltd., in Glasgow entwickelt und vertrieben. Das in SIMULEX zugrunde liegende Modell wurde von Dr. Peter Thompson entwickelt. Für die Untersuchungen stand die Simulation in der Version 2007.2.0.2 zur Verfügung. Eine Testversion des Programms ist unter www.iesve.com verfügbar.

6.3.1 Modell

Bei SIMULEX handelt es sich um ein raumkontinuierliches, zweidimensionales Individualmodell. Jeder Person wird eine individuelle maximale Gehgeschwindigkeit zugewiesen, die sich mit abnehmendem Abstand zwischen den Personen (inter-person distance) reduziert [59]. Hiermit wird der Zusammenhang zwischen abnehmender Geschwindigkeit bei zunehmender Personendichte dargestellt.

Neuberechnungen der Situation erfolgen in der Simulation in Schritten von 0,1 Sekunden.

6.3.2 Eingabe

Die Eingabe der benötigten Daten erfolgt in SIMULEX durch eine Programmkomponente. Die Grundeinstellungen von allgemeinen Personendaten sind zusätzlich in einer Textdatei hinterlegt, die frei veränderbar ist.

6.3.2.1 Geometrie

Die Eingabe der Geometrie erfolgt mit dem Import von Grundrissplänen im DXF-Format. Um unterschiedliche Maßstäbe korrekt einlesen zu können, kann die DXF-Datei durch eine Skalierungsfunktion angepasst werden. Die Geometrie wird unverändert übernommen und ist in SIMULEX nicht weiter bearbeitbar. Für die Veränderung einer Geometrie ist daher ein CAD-Programm zwingend erforderlich. Die maximal simulierbare Fläche ist von den Systemressourcen abhängig. Die Ausmaße der verschiedenen Grundrisse sind durch ein äußeres Raster im Simulationsfenster ablesbar. Dimensionen der Grundrisse und Positionen angeordneter Ziele sind zusätzlich in einem Informationsfenster hinterlegt. Nachbearbeitete DXF-Dateien können über SIMULEX, ohne den Verlust bereits modellierter Elemente innerhalb der Simulation, ersetzt werden. Alle importierten modellierten Elemente sind nicht durchdringbar und bilden Abgrenzungen für den Verlauf der Fluchtwege.

Treppenräume können von SIMULEX beim Import nicht interpretiert werden und müssen in der Simulation nachträglich über Zwischenebenen modelliert werden. Treppenräume werden über Angabe der Breite und Länge als ein Treppenlauf definiert. Bei der Modellierung ist zu berücksichtigen, dass in der Simulation die geneigte Lauflänge für die Länge des Treppenlaufes angesetzt werden soll [60].

Durch Treppenräume erfolgt auch die Verknüpfung zwischen den Ebenen im Zusammenhang mit so genannten Links. Links sind Sprunglinien, an denen die Personen bei Betreten die Ebene wechseln. Die Anzahl der möglichen Links innerhalb eines Projektes ist auf 100 beschränkt [60]. Um 2 Ebenen mit einem Treppenlauf zu verbinden sind 2 Links notwendig, das bedeutet, dass maximal 50 Treppenläufe für die Verbindung zweier Ebenen innerhalb eines Projektes existieren können. Insgesamt können aber bis zu 100 Treppenläufe angelegt werden.

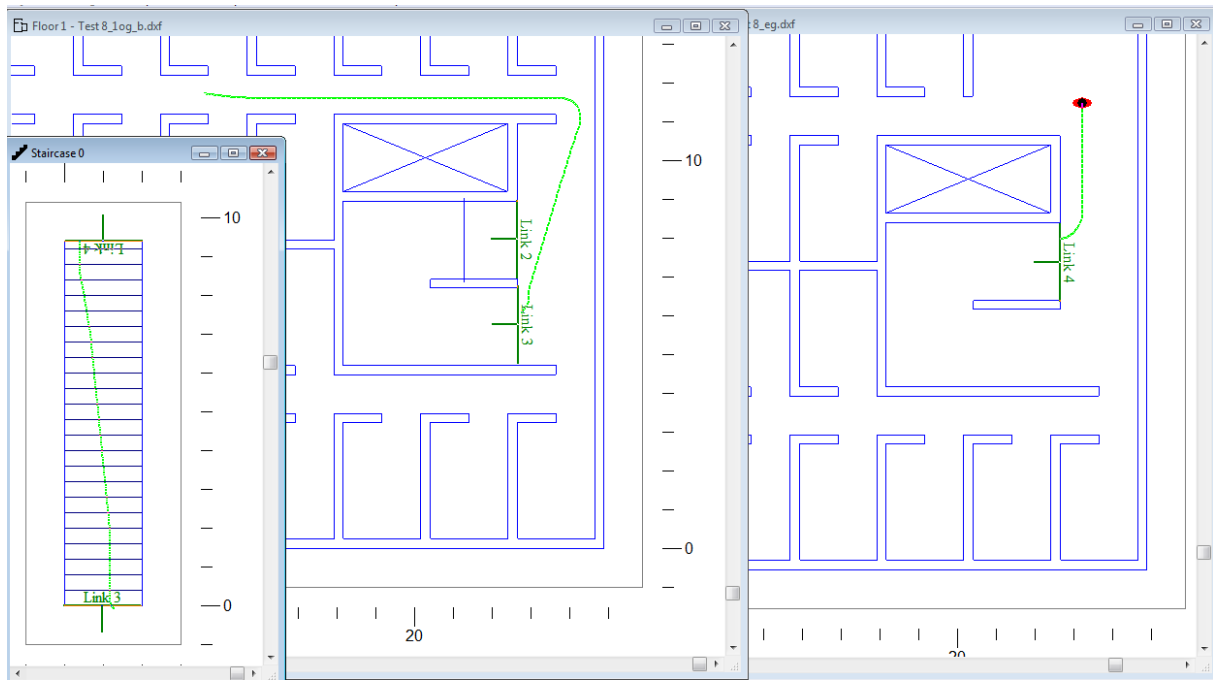


Abbildung 31: Darstellung des Ebenenwechsels durch Linkverknüpfung zu den Treppenträumen

Dargestellt ist die Verknüpfung von Ebenen durch Links und Treppenhäusern. Zur Verdeutlichung der Sprunglinien ist hier eine Spur einer Person zur Kennzeichnung der Lauflinie enthalten.

Da Treppenträume immer nur mit einem Treppenlauf modelliert werden, müssen für eine realitätsnahe Umsetzung des Modells Kompensationsmaßnahmen in Betracht gezogen werden. Dem Benutzerhandbuch [60] zufolge, soll für die Berücksichtigung spezieller Treppenträume die geneigte Lauflänge der Treppenläufe mit den Lauflängen auf Podesten addiert werden und die resultierende Länge für den modellierten Treppenlauf angesetzt werden. Andernfalls müsste eine Modellierung über weitere Zwischenebenen für etwaige Zwischenpodeste erfolgen.

Links können nicht innerhalb einer Ebene benutzt werden, sodass eine Modellierung von hohen Neigungen oder Tribünenplätzen immer über eine Zwischenebene als Treppenraum erfolgen muss, um die Reduzierung von Gehgeschwindigkeiten zu beachten. Geschwindigkeiten auf Treppen werden durch Multiplikationsfaktoren ≤ 1 auf die unbehinderte Gehgeschwindigkeit der einzelnen Personen berücksichtigt. Die Verringerung des Personenstroms durch Türen und andere Engstellen wird durch die Körperproportionen und die Breite des Durchgangs bestimmt.

6.3.2.2 Ziele und Routen

Ziele (Exits) werden durch ein Dialogfenster mit Bezeichnung, zugehöriger Ebene und Breite des Ausgangs angegeben und anschließend in den Grundriss platziert. Es können dabei maximal 50 Ziele definiert werden [60]. Nach dem Betreten der Ziellinie werden Personen aus der Simulation entfernt.

Sobald die Ziele modelliert sind, kann die Berechnung der Potenzialausbreitung, genannt *distance map*, erfolgen, um den Personen die Orientierung zum Ziel vorzugeben. Diese *distance map* besteht aus einem Netz von $0,2 \times 0,2$ m großen Blöcken und zeigt durch einen farblichen Verlauf die Distanzen zum jeweiligen Ziel an (siehe Abbildung 32). Der Verlauf bildet sich über alle begehbaren Bereiche aus. Die begehbaren Bereiche werden farblich dargestellt, nicht begehbare Bereiche sind in der *distance map* einheitlich grau gekennzeichnet. Die Wege, die sich aus den einzelnen Potenzialverläufen ergeben, können in SIMULEX durch eine Testoption dargestellt werden. Durch das Einsetzen einer Person wird der Wegverlauf durch die Anzeige einer Spur dargestellt.

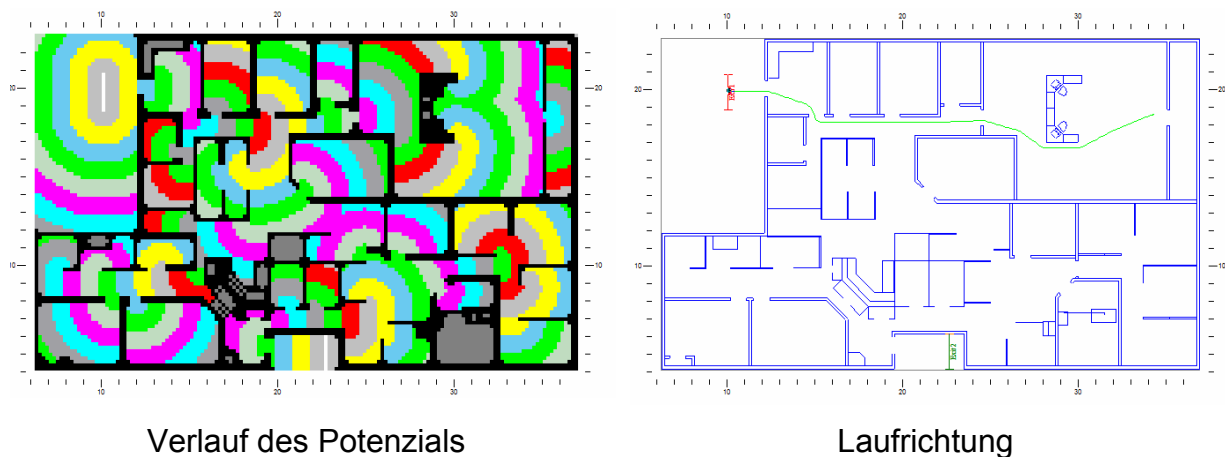


Abbildung 32: Darstellung des Verlaufes des Potenzialfeldes in SIMULEX und zugehörige Laufrichtung

In Abbildung 32 ist auf der linken Seite ein Potenzialfeld bzw. eine *distance map* eines Gebäudegeschosses mit zwei Ausgängen dargestellt. Auf der rechten Seite ist aus der Testoption die Spur einer Person, die sich aus dem Verlauf des Potenzials ergibt, abgebildet. Wie bei PedGo, wird auch hier bei der Betrachtung von Abbildung 33 deutlich, dass der Weg senkrecht zu den Potenzial- bzw. Distanzlinien erfolgt. Die Laufrichtung entspricht also auch hier dem Gradienten des Potenzialverlaufs.

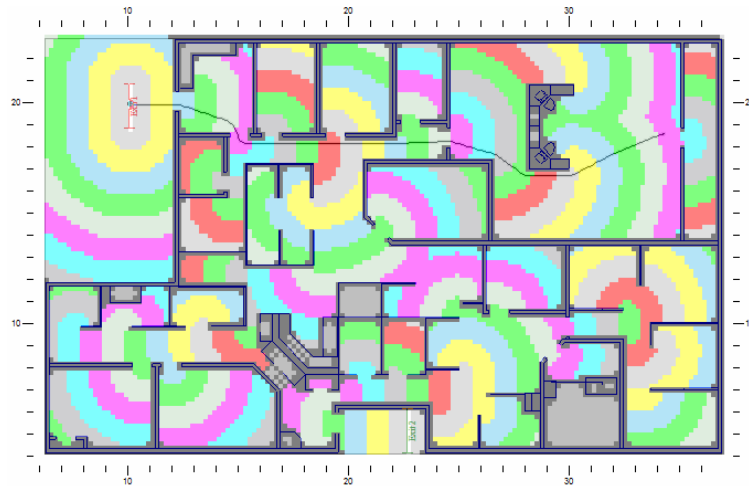


Abbildung 33: Zusammenhang Potenzialfeld und Laufrichtung in SIMULEX

Wird nur eine *distance map* in SIMULEX erstellt, so erfolgt der Weg immer zum Ziel mit der kürzesten Distanz vom individuellen Standpunkt. Am Beispiel des Raumes mit zwei Ausgängen ist erkennbar, dass aufgrund des Potenzialverlaufes immer der obere Ausgang gewählt wird, da dieser bei einer Position im Raum den geringsten Abstand zum Ziel darstellt.

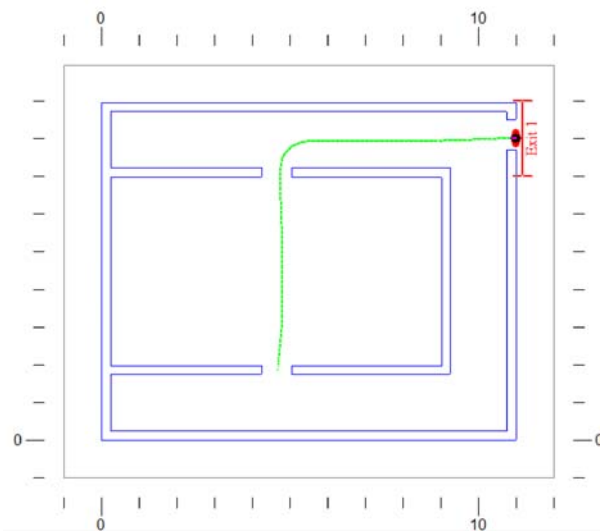


Abbildung 34: Wegverlauf in Abhängigkeit der Position in einem Raum mit 2 Ausgängen (SIMULEX)

Um den simulierten Personen verschiedene Wegverläufe vorzugeben, können bis zu 10 verschiedene *distance maps* erstellt werden. Bei der Erstellung einer neuen *distance map* können dazu verschiedene verfügbare Ziele und Treppenhäuser gewählt werden, die für eine bestimmte Personengruppe zugänglich sind. Hierdurch ist es

möglich den Personen eine Route vorzugeben, beispielsweise zu einem Ziel mit höherer Entfernung oder durch ein festgelegtes Treppenhaus.

6.3.2.3 Personen

Die Körperproportionen von Personen sind in SIMULEX durch die Zusammensetzung von drei Kreisen idealisiert.

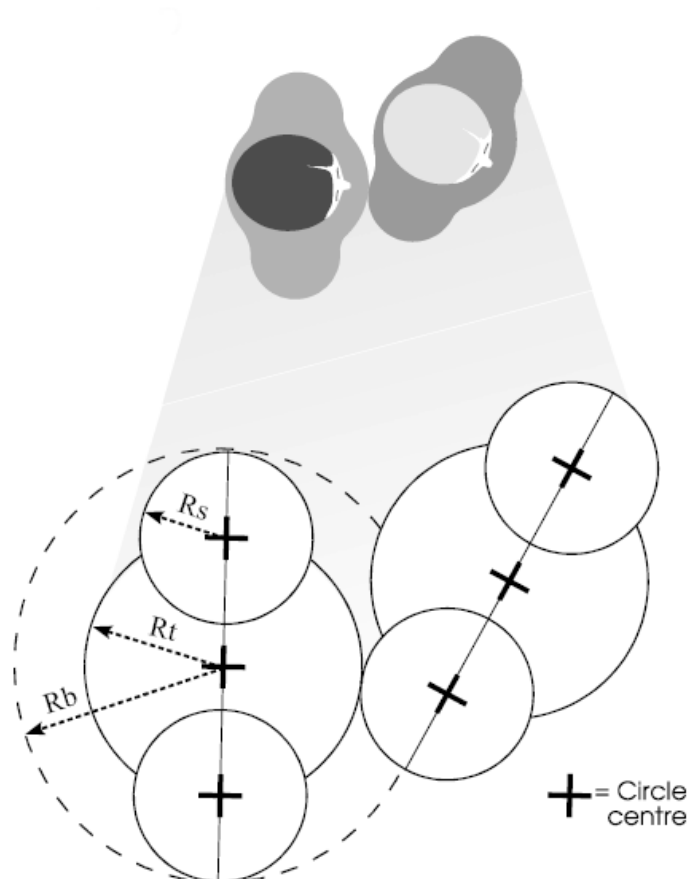


Abbildung 35: Idealisierung der Körpermaße in SIMULEX [61]

Der innere Kreis beschreibt die Ausmaße des Körperrumpfes mit dem Radius $R(t)$ ausgehend vom Kreiszentrum (Circle centre), die beiden äußeren Kreise mit dem Radius $R(s)$ stellen die Ausmaße der Schultern dar. Durch einen umschließenden Kreis mit dem Radius $R(b)$ vom Mittelpunkt des Torsokreises bis zum äußeren Punkt des Schulterkreises, ergibt sich die Körperbreite von Personen zum zweifachen Radius $R(b)$. Die Körpertiefe entspricht dem zweifachen Radius $R(t)$.

Die von einer Person beanspruchte Fläche hängt dabei von den individuellen Körperproportionen ab. Die maximal erreichbare Dichte wird durch den Personenabstand untereinander (inter-person distance) begründet.

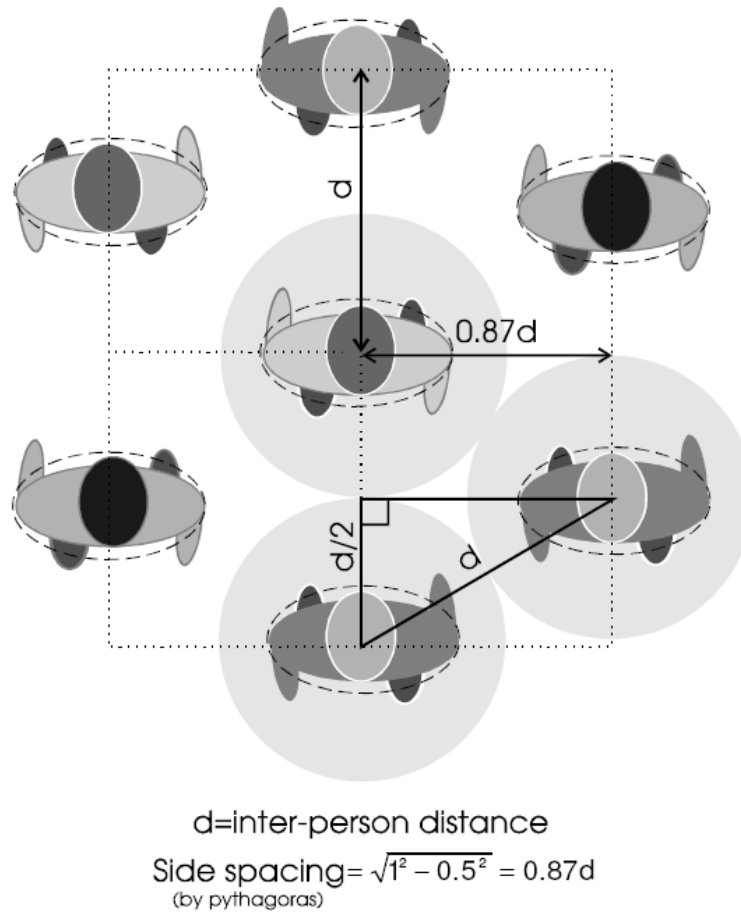


Abbildung 36: Grafische Darstellung der Abstandsdefinition zwischen Personen in SIMULEX [59]

Die Gehgeschwindigkeit (walking velocity) einer Person in SIMULEX ist abhängig von dem Abstand zwischen den Personen (inter-person distance). Mit Verringerung des Abstandes zwischen den Personen und der daraus entstehenden höheren Dichte, sinkt die Gehgeschwindigkeit der einzelnen Person. Abbildung 37 zeigt den Zusammenhang zwischen der Reduzierung der unbehinderten Gehgeschwindigkeit bei abnehmendem Personenabstand in Abhängigkeit der Personeneigenschaften.

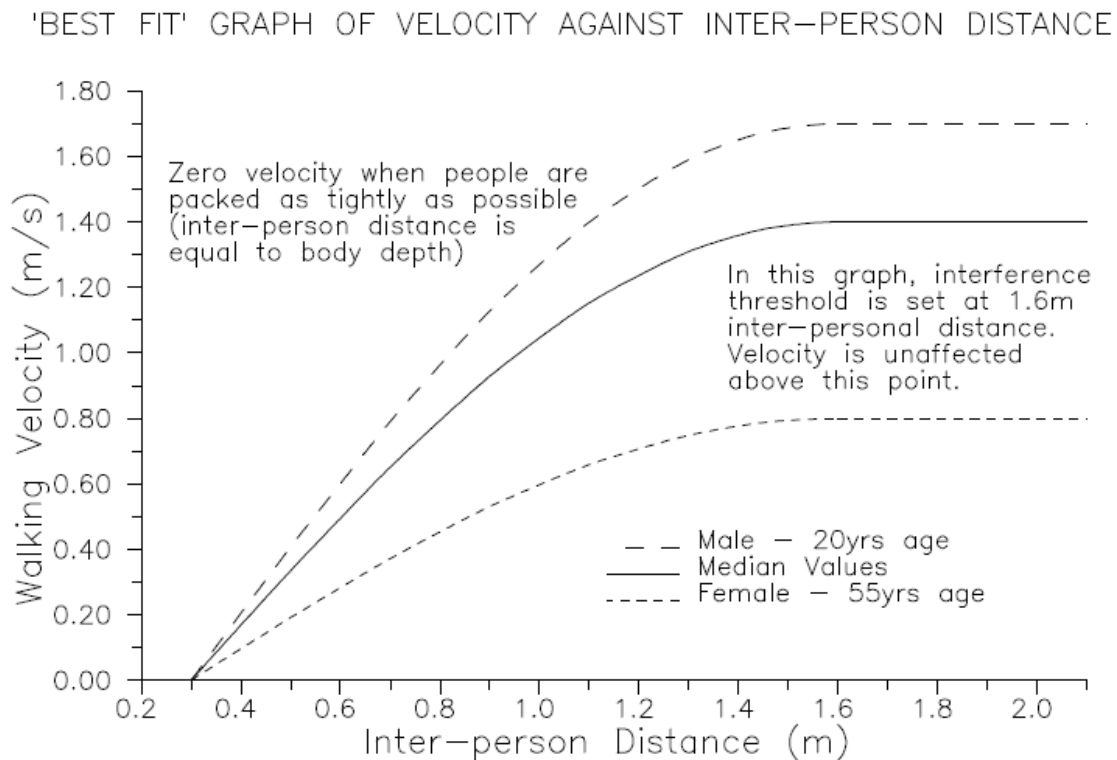


Abbildung 37: Zusammenhang zwischen Gehgeschwindigkeit und Personenabstand [59]

Ab einem Abstand (inter-person distance) von 1,6 Metern hat der Abstand der Personen keinen Einfluss mehr auf die Gehgeschwindigkeit. Ist der Abstand also größer als dieser Wert, kann die unbehinderte Gehgeschwindigkeit in der Ebene erreicht werden. Sinkt der Abstand unter 1,6 Meter fällt der Graph und die Gehgeschwindigkeit wird stetig reduziert. Bei Erreichen eines Abstandes von 0,3 Metern, welcher annähernd Körperkontakt darstellt, ist dann keine Bewegung mehr möglich. In diesem Fall blockieren sich die Personen gegenseitig.

Allgemeine Angaben zu den Personeneigenschaften werden über eine Textdatei im Programmverzeichnis festgelegt. Zunächst werden die individuellen Eigenschaften für spezielle Personentypen definiert. Die folgende Tabelle zeigt einen Auszug ausgewählter vordefinierter Personentypen; ergänzt um die resultierende Körperbreite und -tiefe. Diese können frei verändert werden oder um weitere Personentypen ergänzt werden. Eine vollständige Auflistung aller vordefinierten Personentypen ist im Anhang enthalten.

Typnummer	Personentyp	Gesamtkörperradius [m]	Torsoradius [m]	Schulterradius [m]	Gehgeschwindigkeit [m/s]	Abweichung von maximaler Gehgeschwindigkeit	Multiplikationsfaktor Treppen abwärts	Multiplikationsfaktor Treppen aufwärts	Breite [m]	Tiefe [m]
1	Median	0,25	0,15	0,10	1,30	0,00	0,60	0,50	0,50	0,30
2	Adult Male	0,27	0,16	0,10	1,35	0,20	0,60	0,50	0,54	0,32
3	Adult Female	0,24	0,14	0,09	1,15	0,20	0,60	0,50	0,48	0,28
4	Child	0,21	0,12	0,07	0,90	0,30	0,60	0,50	0,42	0,24
5	Elderly	0,25	0,15	0,09	0,80	0,30	0,60	0,50	0,50	0,30

Tabelle 21: Auszug vordefinierter Personentypen aus SIMULEX

Personentypen werden, in derselben Textdatei, für die Eingabe in die Simulation prozentual in Populationsgruppen zusammengefasst. Für gängige Populationsgruppen ist nachfolgend die prozentuale Verteilung der Personentypen auf die Populationsgruppen tabellarisch dargestellt.

Populationsgruppe	Anzahl der verschiedenen Personentypen	Anteil der Personentypen [%]				
		0	1	2	3	4
Office Staff	2	-	60	40	-	-
Commuter	3	-	50	40	10	-
Shopper	4	-	35	40	15	10
School population	3	-	3	7	90	-
All Male	1	-	100	-	-	-
All Female	1	-	-	100	-	-
All Children	1	-	-	-	100	-
All Elderly	1	-	-	-	-	100
All Median	1	100	-	-	-	-

Tabelle 22: Auszug der Populationsgruppen aus SIMULEX

Die Erstellung einer Populationsgruppe ist mit bis zu 10 Personentypen möglich. Neben den vordefinierten Populationsgruppen sind weitere frei definier- oder veränderbar.

Die Eingabe der Personen in die vorliegende Geometrie kann entweder per Mauszeiger punktgenau einzeln oder durch Aufziehen eine Polygons über die gekennzeichnete Fläche verteilt erfolgen. Bei der Verteilung über eine Fläche, kann bezüglich der Personenanzahl gewählt werden, ob eine festgelegte Anzahl oder eine bestimmte Dichte in die Geometrie eingesetzt werden soll. Allerdings arbeitet diese Funktion durch die Verteilung der Personen in einem bestimmten Raster nicht immer exakt. Bei der Eingabe von Personen in die Geometrie erfolgt die Festlegung von Personeneigenschaften durch die Angabe von (siehe Abbildung 38):

- Populationsgruppe (Occupant Type): für die Zuweisung der Gruppe und deren Eigenschaften
- Distance map (Distance (Route)): um den Personen die verfügbaren Ziele und die damit verbundenen Routen zuzuordnen
- Reaktionsdauer (Response Time): um den Personen individuelle Startzeitpunkte zuzuweisen

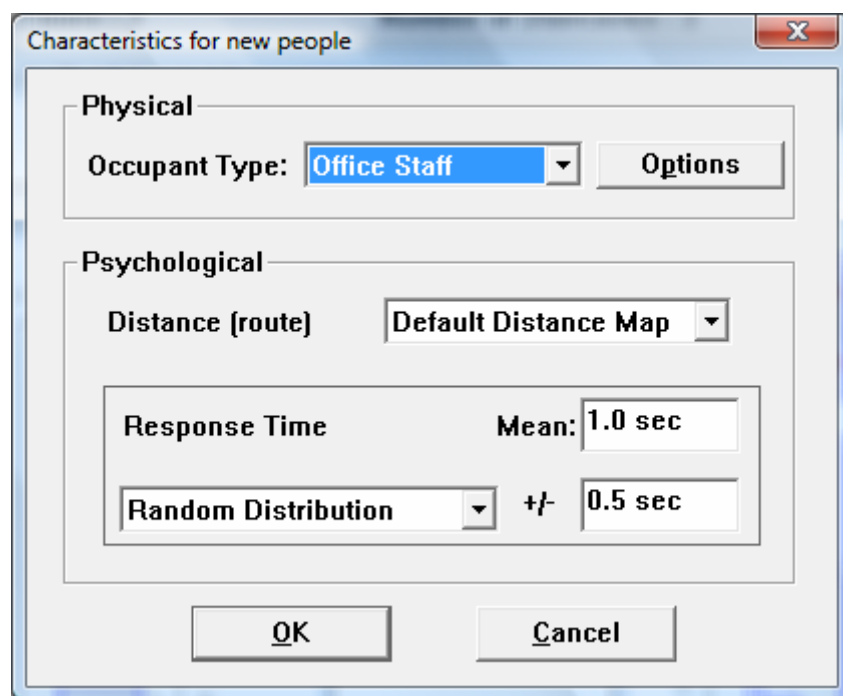


Abbildung 38: Dialogfenster zur Einstellung der Personeneigenschaften in SIMULEX

Die Reaktionsdauer (Response Time) ist über Mittelwert und Abweichung mit der Einheit Sekunden einstellbar. Die Abweichung ist dabei die Abweichung von der Minimal- oder Maximaldauer bis zum Mittelwert. Zusätzlich muss die Art der Verteilung definiert werden. Zur Auswahl stehen hier die Verteilungen random (gleichverteilt),

triangular (triangular verteilt) und normal (normalverteilt). Bei der Normalverteilung entspricht die eingestellte Abweichung in etwa der dreifachen Standardabweichung [60]. Entsprechend der Definition der Reaktionsdauer entspricht das Zeitintervall Δt_{99} der zweifachen eingestellten Abweichung. Die Minimaldauer ergibt sich zu Mittelwert abzüglich der Abweichung, die Maximaldauer zu Mittelwert zuzüglich der Abweichung.

Die Anzahl simulierter Personen kann insgesamt oder je Ebene aus dem Informationsfenster entnommen werden.

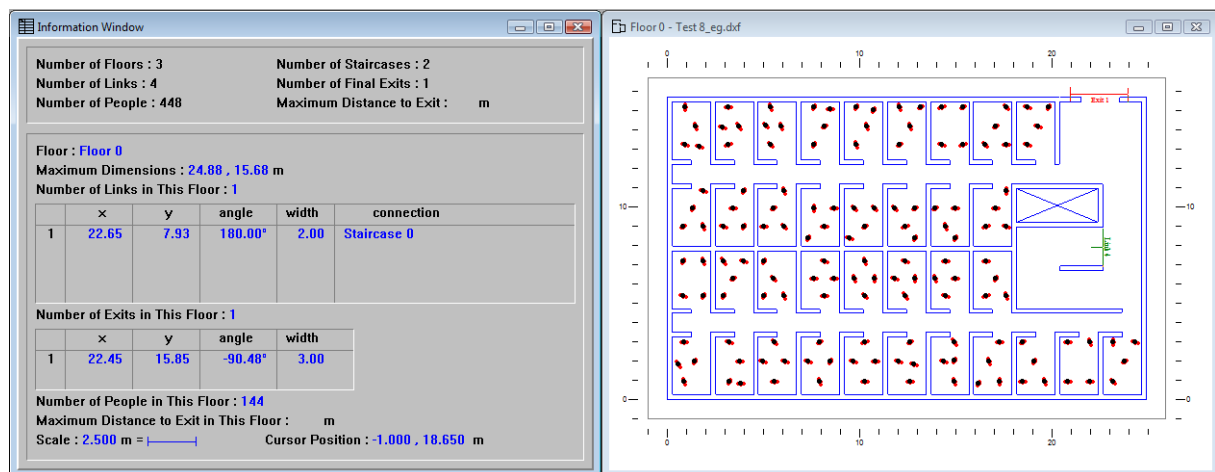


Abbildung 39: Informationsfenster und zugehöriger Grundriss aus SIMULEX.

6.3.3 Ergebnisse

Zur Verdeutlichung der Fluchtwege ist in SIMULEX der Potenzialverlauf darstellbar. Außerdem können über die Testoption die Laufwege der Personen als Spuren ausgegeben werden.

Verteilte Geschwindigkeiten, individuelle Reaktionsdauern, Populationsgruppe und Ziel der einzelnen Person lassen sich in der Simulation anzeigen. Dies kann allerdings nur manuell erfolgen und wird auch nicht in den Ergebnisdateien dokumentiert. Geschwindigkeits- und Reaktionsdauerverteilungen sind daher nur unter erhöhtem Aufwand herstellbar.

Der Verlauf der Simulation erfolgt deterministisch, das bedeutet, dass eine bestimmte Anfangskonstellation immer zu einem identischen Ergebnis führt. Um zu einem statistisch auswertbaren Ergebnis zu gelangen, wäre hier die manuelle Änderung von Anfangspositionen oder Personeneigenschaften notwendig.

Die Ergebnisdatei, die von SIMULEX generiert wird, wird als Textdatei ausgegeben. Sie zeigt die Dauer des Entfluchtungsablaufes an. Um Rückschlüsse auf den zeitlichen Ablauf zu ziehen, wird für jeden Ausgang und jede Verknüpfung ausgegeben, wie viele Personen den Ausgang oder Link erreicht haben. Zusätzlich ist die Angabe für alle Ausgänge gleichzeitig enthalten. Diese Ausgabe erfolgt in Intervallen von 5 Sekunden. Aus diesen Ergebnissen lassen sich Entfluchtungskurven über alle Ausgänge oder für die die Ausgänge getrennt erstellen. Außerdem liefern diese Angaben Hinweise auf die Höhe der Personenflüsse für Ausgänge und Treppenträume. Für Treppenträume können so etwaige Staubetrachtungen erfolgen.

Zur Modellierung lassen sich aus der Ergebnisdatei die folgenden Angaben entnehmen:

- Anzahl der Ebenen, der Treppenträume, der definierten Ziele (Exits) und Verknüpfungen (Links)
- Anzahl der simulierten Personen
- Ausmaße der Ebenen und Treppenträume
- Anfangspersonenanzahl auf entsprechender Ebene
- Lokalisierung der Ziele und Verknüpfungen

Eine Dokumentation der verwendeten Personeneigenschaften ist in der Datei nicht vorhanden.

Staubetrachtungen oder hohe Dichteentwicklungen müssen über die Angabe von manuell erstellten Screenshots erfolgen.

Um den Ablauf der Entleerung zu visualisieren, ist es möglich die Simulation aufzuzeichnen. Eine Animation wird in einem programmeigenen Format gespeichert. Um diese abzuspielen, muss zumindest eine frei erhältliche Demoversion des Programms installiert sein.

Screenshots können mit SIMULEX manuell durch die Bildschirmkopie während des Simulationsdurchlaufes erstellt werden.

6.4 SIMWALK

Das Programm SimWalk wird von der Savannah Simulations AG in Herrliberg, Schweiz entwickelt und vertrieben. Für Untersuchungen stand SimWalk in der Version 2.1.3 und in einer Testversion in der Version 3.0 zur Verfügung. Die Testversion

des Programms ist unter www.simwalk.ch verfügbar. Um auf die erweiterte Version 3.0 einzugehen, erfolgt die Beschreibung des Programms für die Version 3.0.

6.4.1 Modell

SimWalk ist ein raumkontinuierliches, zweidimensionales Individualmodell, bei dem jeder Person individuelle Eigenschaften wie Körpermaße und Gehgeschwindigkeiten zugewiesen werden. Der Personenstromsimulation SimWalk liegt ein Kräftemodell, ähnlich dem Social Force Modell nach Helbing, zugrunde [62]. Laufrichtung und Geschwindigkeit sind von der Entwicklung dreier verschiedener Kräfte abhängig. Die erste Kraft ist die über das Potenzialfeld berechnete Kraft, die die Personen zum Ziel führt. Die zweite Kraft ist der *Agenten-Druck*, der einen bestimmten Abstand zwischen den Personen gewährleisten soll. Die dritte Kraft, der *Objekt-Druck*, stellt sicher, dass ein Abstand zu unbeweglichen Objekten, wie beispielsweise Wänden, eingehalten wird.

Die Zeitschrittweite für die Neuberechnung der Situation ist variabel einstellbar.

6.4.2 Eingabe

Grundsätzlich ist die Simulation SimWalk in zwei Komponenten unterteilt. Mit der Komponente SimDraw enthält die Simulation ein einfaches CAD Programm, das den Import für die Simulation vorbereitet und konvertiert. Das Modul SimWalk erledigt die Modellierung und die nachfolgende Simulation. Zur Visualisierung dient das Zusatzmodul SimView, erstellte Animationen können hiermit angesehen werden.

6.4.2.1 Geometrie

Die Eingabe der Geometrie erfolgt durch das Einlesen von Grundrissplänen im DXF-Format im Zeichenmodul SimDraw. Mithilfe dieses Moduls wird die gesamte Geometrie für die Simulation vorbereitet. Eine Änderung oder ein Neuzeichnen der Geometrie ist mit dem Modul möglich. Bereits eingelesene Pläne können hierdurch ebenfalls geändert werden. Alle modellierten Elemente bilden eine Begrenzung, durch die eine Bewegung für Personen nicht möglich ist.

Um die vorliegende Geometrie für die Simulation vorzubereiten, sind weitere Schritte notwendig. Zunächst müssen die Start- und Zielbereiche im Plan festgelegt werden. Zu den Zielbereichen lassen sich die weiteren spezifischen Eigenschaften *Kapazität*, *Frequenz* und *Öffnungszeit* einstellen. Die *Kapazität* gibt an, wie viele Personen den

Zielbereich gleichzeitig betreten können. Die *Frequenz* beschreibt, in welchem Zeitintervall der Zielbereich bis zur maximal möglichen Kapazität betreten werden kann. Die *Öffnungszeit* beschreibt die Dauer wie lange der Zielbereich geöffnet ist. Ist die Einstellung der Eigenschaften *Kapazität*, *Frequenz* oder *Öffnungszeit* Null, so bleiben die Einflüsse der jeweiligen Eigenschaft unberücksichtigt. Durch die Zuweisung dieser Eigenschaften können beispielsweise unterschiedliche Türarten berücksichtigt werden.

Zusätzlich ist noch die Modellierung von Wartepositionen und Verzögerungsbereichen möglich. Wartedauern werden in den Personeneigenschaften zugewiesen. Wie in den Zielbereichen sind den Wartepositionen die Eigenschaften *Kapazität*, *Frequenz* und *Öffnungszeit* zuweisbar. Verzögerungsbereiche sind Bereiche, die zu einer Reduktion der Geschwindigkeit führen. Hiermit können dann auch Neigungen modelliert werden. Verzögerungsbereiche können entweder durch eine festgelegte Geschwindigkeit, eine benötigte Dauer zur Überquerung oder eine prozentuale Reduktion der individuellen Gehgeschwindigkeit definiert werden.

Um die Ebenen miteinander zu verbinden, können Treppen, Aufzüge und Rolltreppen modelliert werden. Die Betrachtung bleibt hier allerdings auf Treppen beschränkt, da in einem Brandfall Aufzüge und Rolltreppen nicht benutzt werden sollen. Treppen werden durch Aufziehen eines Bereiches auf die Ebene platziert und mit Angabe des unteren und oberen Geschosses mit den Ebenen verknüpft.

Die Länge der Treppenläufe wird auf die horizontalen Lauflängen bezogen, daher sind bis zu zwei Treppenläufe in einer Ebene darstellbar. Kompliziertere Läufe sind auch in SimWalk durch Zwischenebenen zu modellieren oder durch entsprechend höhere Reduktionsfaktoren zu kompensieren. Dem Bereich Treppe können verschiedene Eigenschaften zugeordnet werden, um die Bewegung von Personen auf Treppen zu berücksichtigen. Dazu sind die bereits zuvor erläuterten Eigenschaften *Kapazität* und *Frequenz* einstellbar, sowie auch geschwindigkeitsreduzierende Eigenschaften, wie eine festgelegte Dauer zur Durchquerung oder eine prozentuale Reduktion der individuellen Gehgeschwindigkeit.

Alle Bereiche oder Bauteile werden durch Aufziehen eines Polygons im Plan festgelegt. Die Koordinaten aller genannten Bereiche werden in einem Fenster dargestellt und können in ein Tabellenkalkulationsprogramm exportiert werden.

6.4.2.2 Ziele und Routen

Ziele werden unter der Vergabe einer Bezeichnung entweder als Punkt oder als Zielbereich durch Aufziehen eines Polygons in die Simulation platziert. Die Dimensionen des Bereiches werden durch Koordinaten in einem separaten Fenster angegeben. Mit dem Betreten des Zielbereiches werden Personen aus der Simulation entfernt. Die Berechnung des Potenzialfeldes erfolgt, sobald die Personen dem Plan hinzugefügt werden. Das Potenzialfeld wird in SimWalk über Zellen berechnet, die in der Programmkonfiguration variabel einstellbar sind. Die kleinstmögliche Größe für die Berechnung des Potenzialfeldes ist eine Zellgröße von 0,25 Meter Kantenlänge. Bis zu einer Größe von 2 Metern Kantenlänge kann die Zellgröße in Schritten von 5 Zentimetern eingestellt werden.

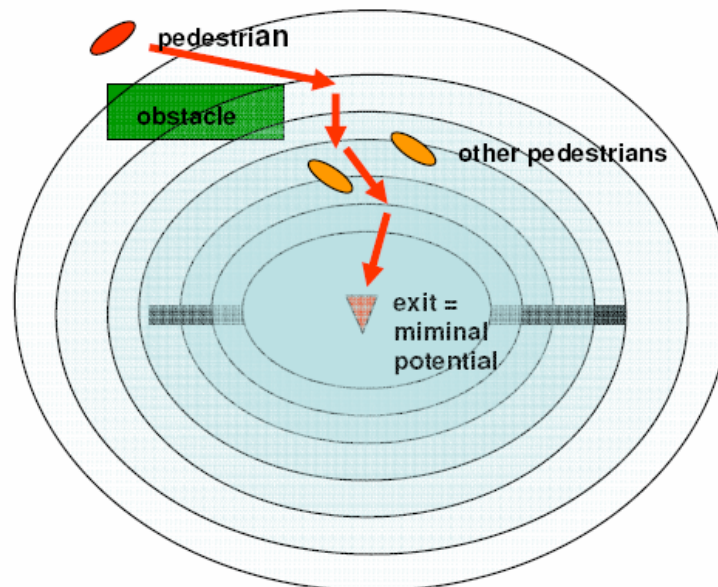


Abbildung 40: Wegverlauf in Abhängigkeit des Potenzials in SimWalk [63]

Der Routenwahl erfolgt über die kürzeste Distanz zum Ziel, sofern nur eine Zielbezeichnung vergeben wurde. Die Person (pedestrian) bewegt sich über die kürzeste Distanz zum minimalen Potenzialwert (minimal potential), der das Ziel (Exit) darstellt. Auf diesem Weg werden Hindernisse (obstacle) und andere Personen umgangen. Am Beispiel des Raumes mit zwei Ausgängen ist auch in SimWalk sichtbar, dass wenn nur ein Ziel definiert ist, der Weg zum Ziel über die geometrisch kürzeste Distanz vom individuellen Standpunkt führt. An den Spuren (Trails) wird deutlich, dass

der Weg immer über den oberen Ausgang führt. Die Spuren stellen die tatsächlich gelaufenen Wege der Personen dar.

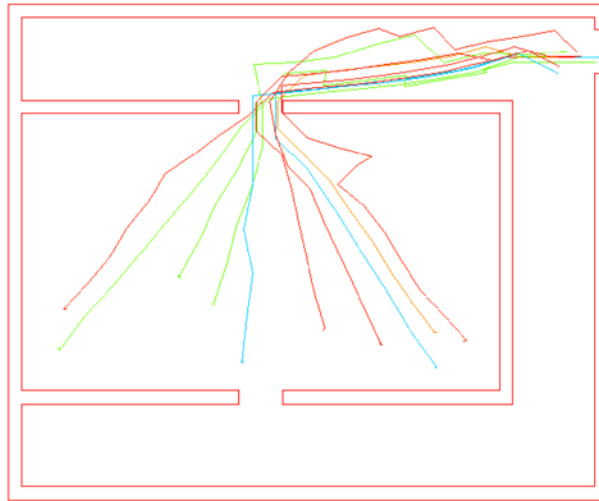


Abbildung 41: Wegverlauf in Abhängigkeit der Position in einem Raum mit zwei Ausgängen (SimWalk)

Um vom Weg mit der kürzesten Distanz abzuweichen, können zwei Möglichkeiten herangezogen werden. Zunächst können den Personen bestimmte Ziele zugewiesen werden, sodass Personen nicht das Ziel der kürzesten Distanz ansteuern. Eine weitere Möglichkeit ist die Zuweisung zu Wartepunkten. Diese können als Wegpunkte zum Ziel benutzt werden. Mit einer eingestellten Wartezeit von 0 Sekunden können die Personen diesen Bereich ansteuern und die Bewegung ohne Verzögerung fortsetzen. Werden den Personen mehrere Wartepunkte zugewiesen, so ist es möglich, dass Personen nicht in der chronologischen Reihenfolge die Wartepunkte ansteuern.

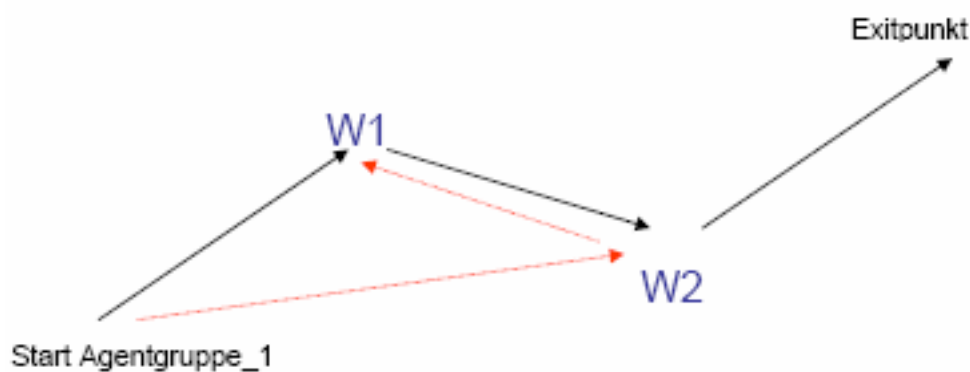


Abbildung 42: Wegverlauf durch Wartepunkte in SimWalk [62]

Die Darstellung des resultierenden Laufweges kann, wie in Abbildung 42 illustriert, durch Personenspuren angezeigt werden.

6.4.2.3 Personen

Der Körper der simulierten Personen wird in SimWalk durch einen Kreis beschrieben, wodurch der Durchmesser sowohl der Körperbreite als auch der Körpertiefe entspricht. Zur Darstellung der Personen innerhalb der Simulation kann zwischen verschiedenen geometrischen Formen gewählt werden. Die Standfläche einer Person hängt von den Proportionen ab, die den Personen zugeteilt wurden. Mit abnehmendem Abstand zu den Personen versuchen die Personen einander auszuweichen. Ist kein Ausweichen möglich, verringert sich die individuelle Gehgeschwindigkeit der Personen. Der Abstand, ab dem die Personen aufeinander reagieren ist variabel einstellbar. Die Standardeinstellung in SimWalk für diesen Interaktionsbereich (Interaction range) beträgt 1,71 Meter. Abstände zu Bauteilen werden von den Personen eingehalten, sofern in den Konfigurationseinstellungen ein Wert eingegeben wird. Voreingestellt ist ein Wert von 0,5 Metern. Dieser muss allerdings geändert werden, da ansonsten eine Bewegung durch Türen nicht möglich ist. Mit der Veränderung dieses Parameters ändert sich der Personenfluss.

Die Eingabe der Personen erfolgt gemeinsam mit der Zuweisung der Eigenschaften. Die Charakteristik der Personen wird festgelegt durch

- die Route (Start-, Waiting- und Exit area),
- die Reaktionsdauer (Start time range),
- die Personenzahl (Agents),
- die Gehgeschwindigkeit (Agents walking speed) und
- die Körperproportionen (Agents body breadth).

Nachstehend ist das Dialogfenster für die Zuordnung der Personeneigenschaften in SimWalk abgebildet.

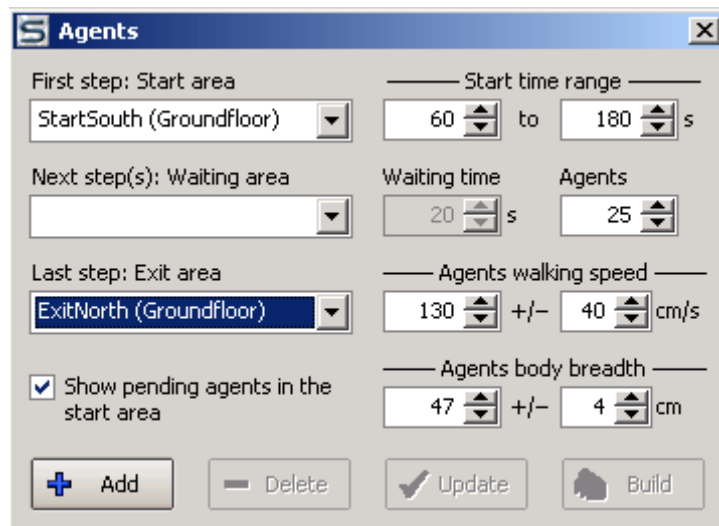


Abbildung 43: Dialogfenster zur Einstellung der Personeneigenschaften in SimWalk

In SimWalk können den Personen (Agents) festgelegte Startbereiche (Start areas) und Zielbereiche (Exit area) zugewiesen werden. Um einen bestimmten Weg festzulegen ist zusätzlich die Zuweisung von Wartepunkten möglich, die bei einer eingestellten Wartedauer (Waiting Time) von 0 Sekunden auch als Wegpunkte dienen können.

Die Reaktionsdauer (Start time range) wird durch die Angabe der Minimal- und der Maximaldauer mit der Einheit Sekunden über die Personen zufällig gleichverteilt [62]. Die Gehgeschwindigkeiten (Agents walking speed) werden den Personen normalverteilt über die Angabe des Mittelwertes und der Standardabweichung zugewiesen. Die Einheit für die Geschwindigkeit beträgt cm/s.

Die Körperabmessungen (Agents body breadth) werden den Personen normalverteilt über die Angabe des mittleren Körperdurchmessers und der Standardabweichung zugeteilt.

Sobald alle Eigenschaften eingestellt und die Personen hinzugefügt wurden, wird in SimWalk automatisch eine Gruppe erstellt. Alle eingestellten Eigenschaften lassen sich in einem Parameterfenster ansehen und in ein Tabellenkalkulationsprogramm exportieren. Das Parameterfenster für die Ausgabe der Einstellungsdaten der Personen ist in Abbildung 44 dargestellt.

Id	Agent	Level	Start	Exit	Tmin	Tmax	Vmean	Vdev	Rmean	Rdev	Wait	Group	Units
1	10 sho	1	StartN	ExitNo	60	180	130	40	47	4		1	0
2	10 sho	1	StartSi	Kiosk (60	180	130	40	47	4	20	2	0
3	10 sho	1	StartSi	ExitSoi	60	180	130	40	47	4		2	0
4	25 sho	1	StartSi	ExitSoi	60	180	130	40	47	4		3	0

Abbildung 44: Parameterfenster zum Export der eingestellten Personeneigenschaften in der Gruppe Angezeigt wird

- die Anzahl der eingesetzten Personen (Spalte Agents),
- das Geschoss (Spalte Level) und der Startbereich (Spalte Start) in dem sich die Personen in der Anfangssituation befinden,
- das zugewiesene Ziel der jeweiligen Personen (Spalte Exit),
- die zugewiesene minimale und maximale Reaktionsdauer (in den Spalten Tmin und Tmax),
- die zugewiesene mittlere Gehgeschwindigkeit (Vmean) und ihre Standardabweichung (Vdev),
- die Körperabmessungen (Rmean) und die Standardabweichung (Rdev),
- die Wartedauer an einem bestimmten Punkt (Spalte Wait in Zusammenhang mit der Spalte Exit), sowie
- die Gruppenzugehörigkeit der jeweiligen Personen (in Spalte Group)

Durch den Export in ein gängiges Tabellenkalkulationsprogramm lassen sich diese Eigenschaften für die Dokumentation weiterverwenden und zusätzlich aufbereiten. Die Einstellungen der Personen müssen dann zusätzlich in die Simulation durch die Option *Build Agents Plan* in die Simulation importiert werden. Nach dem Import sind der jeweilige Startpunkt, die individuelle Reaktionsdauer und die zugewiesene Geschwindigkeit für jede Person sichtbar und lässt sich ebenfalls in ein Tabellenkalkulationsprogramm exportieren.

6.4.3 Ergebnisse

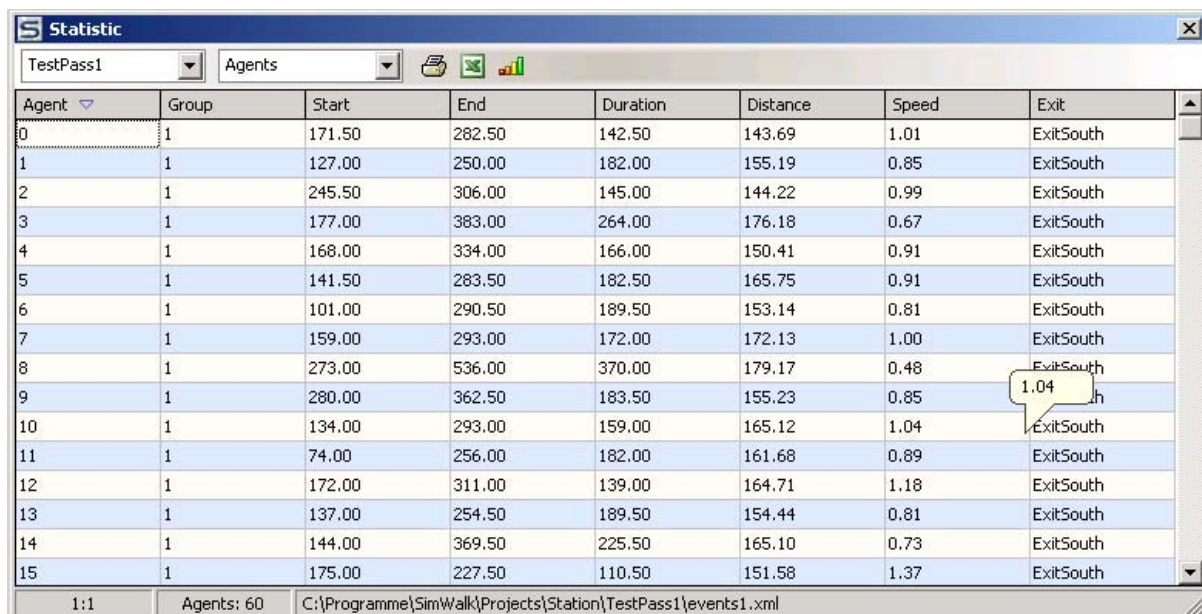
Die Anzahl der Rechendurchläufe in SimWalk ist variabel einstellbar. Die einzelnen Rechendurchläufe müssen allerdings getrennt voneinander ausgewertet werden.

Zur Auswertung der Simulation sind verschiedene Möglichkeiten vorhanden. Nach der Simulation wird zunächst ein Report automatisch ausgegeben, der folgende allgemeine Angaben enthält:

- Dimensionen der betrachteten baulichen Anlage
- Konfigurationseinstellungen der Simulation
- Entfluchtungsdauer
- simulierte Personenzahl
- zugewiesene Start- und Zielbereiche der jeweiligen Personen einer Gruppe
- zugeordnete Reaktionsdauern und Geschwindigkeiten.

Für die weitere statistische Analyse sind unter anderem detailliertere Angaben zu den Personen enthalten (siehe Abbildung 45). Dazu werden für jede Person

- die individuelle Reaktionsdauer (Start),
- der Endzeitpunkt bei Erreichen des Zielbereiches (End),
- das erreichte Ziel (Exit),
- die gelaufene Distanz (Distance),
- die Laufdauer (Duration) und
- die resultierende Geschwindigkeit (Speed) aufgezeichnet.



Agent	Group	Start	End	Duration	Distance	Speed	Exit
0	1	171.50	282.50	142.50	143.69	1.01	ExitSouth
1	1	127.00	250.00	182.00	155.19	0.85	ExitSouth
2	1	245.50	306.00	145.00	144.22	0.99	ExitSouth
3	1	177.00	383.00	264.00	176.18	0.67	ExitSouth
4	1	168.00	334.00	166.00	150.41	0.91	ExitSouth
5	1	141.50	283.50	182.50	165.75	0.91	ExitSouth
6	1	101.00	290.50	189.50	153.14	0.81	ExitSouth
7	1	159.00	293.00	172.00	172.13	1.00	ExitSouth
8	1	273.00	536.00	370.00	179.17	0.48	ExitSouth
9	1	280.00	362.50	183.50	155.23	1.04	ExitSouth
10	1	134.00	293.00	159.00	165.12	1.04	ExitSouth
11	1	74.00	256.00	182.00	161.68	0.89	ExitSouth
12	1	172.00	311.00	139.00	164.71	1.18	ExitSouth
13	1	137.00	254.50	189.50	154.44	0.81	ExitSouth
14	1	144.00	369.50	225.50	165.10	0.73	ExitSouth
15	1	175.00	227.50	110.50	151.58	1.37	ExitSouth

Abbildung 45: Statistikfenster zur Auswertung der einzelnen Personen (Agenten)

Die Daten lassen sich sowohl in ein Tabellenkalkulationsprogramm exportieren als auch automatisch in ein Balkendiagramm ausgeben (siehe Abbildung 46).

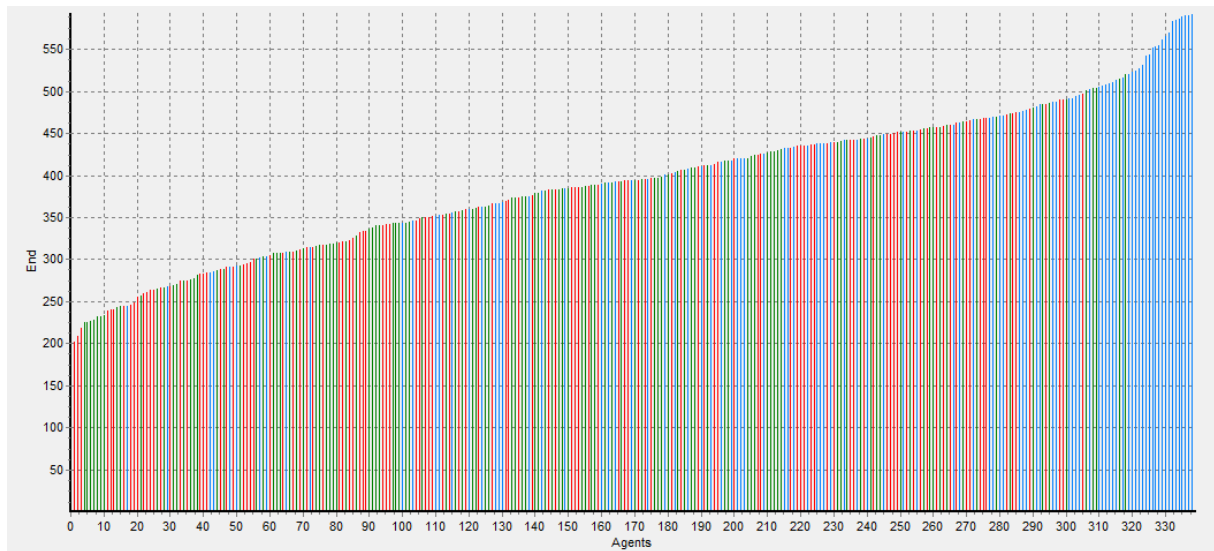


Abbildung 46: Ausgabe des Balkendiagramms in SimWalk für die Endzeitpunkte der Personen

Mit diesen Angaben lassen sich globale Entfluchungskurven über alle Ziele und differenzierte Entfluchungskurven für die einzelnen Ziele erstellen. Aus den Spalten Speed und Start lassen sich Häufigkeitsverteilungen zu der Gehgeschwindigkeit und der Reaktionsdauer erstellen. Bemerkt werden muss hier allerdings, dass es sich bei der Gehgeschwindigkeit in der Auswertung der Statistik in Abbildung 45 nicht um die zugewiesene unbehinderte Gehgeschwindigkeit handelt, sondern die mittlere gelaufene Geschwindigkeit aus der Division der Distanz durch die Laufdauer darstellt. Die zugewiesene Geschwindigkeit der Personen muss daher bereits vor der Simulation exportiert werden.

Es werden zusätzlich Daten zu den Zielen ausgegeben. Hier wird je Ziel die Personenzahl, der früheste und späteste Zeitpunkt des Erreichens und die Flussrate aufgeführt. Mit diesen Daten lassen sich Gleichförmigkeitsbetrachtungen anstellen.

In der Simulation lassen sich so genannte Zähllinien in die Modellierung einarbeiten. Mithilfe dieser Linien können in der Simulation die Personen gezählt werden, die diese Linie überschreiten. Hiermit ist es möglich, Personenverteilungen über einzelne Bereiche genauer darzustellen. Diese Zählungen lassen sich in den Screenshots dokumentieren. Zu beachten ist jedoch, dass Personen bei Rückstauungen mehrfach gezählt werden können.

Um Screenshots auszugeben, ist eine Aufzeichnungsfunktion vorhanden. Die Aufzeichnung zu bestimmten Zeitpunkten muss allerdings manuell erfolgen. Screenshots können mit SimWalk in vier verschiedenen Darstellungsmodi ausgegeben werden. Um die simulierten Personen darzustellen, können entweder die Personen selbst (Agents), dargestellt durch benutzerdefinierte geometrische Formen, oder Personenspuren (Trails) ausgegeben werden. Die Personenspuren zeigen die Laufwege der simulierten Personen.

Personenbelegungen und Dichteentwicklungen sind über die Bildmodi *Loads* und *Density* darstellbar. Der Parameter *Loads* zeigt durch farbliche Unterscheidung die aufsummierte Personenbelegung über den gesamten Simulationslauf in Personen pro m^2 an. Abstufungen hinsichtlich der Höhe sind durch die in Abbildung 47 rechts angelegte Farblegende dargestellt.

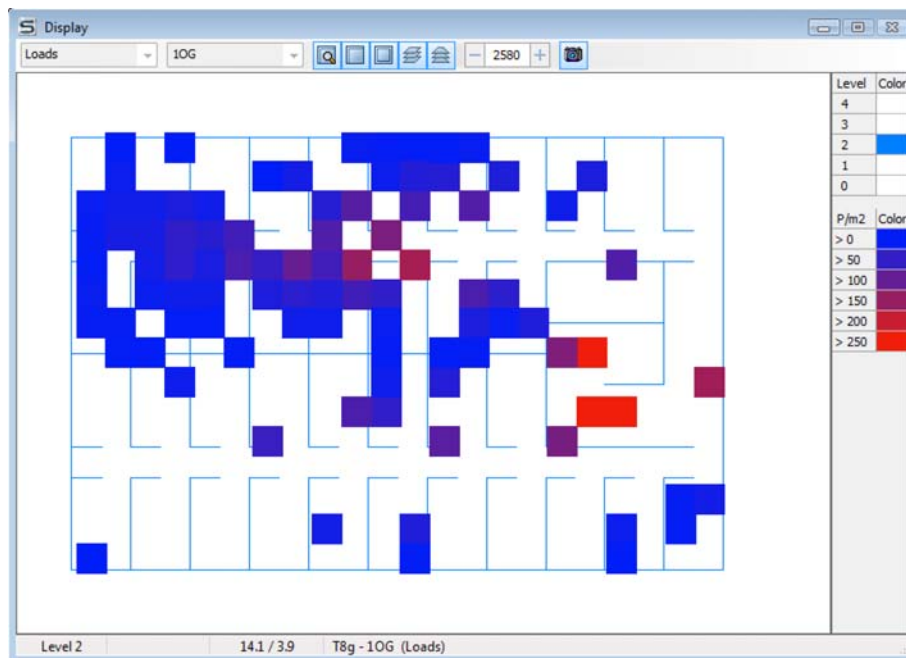


Abbildung 47: Screenshot *Loads* aus SimWalk

Auf der rechten Seite der Abbildung ist die Legende für die Farbabstufungen mit den Werten für die Höhe der Personenbelegung.

Eine andere Möglichkeit die Dichte darzustellen, kann in SimWalk über die Darstellung des Bildmodus *Density* erfolgen. Er beschreibt die aktuelle veränderliche Dichte in Anlehnung an die Level-of-Service Konzepte. Zur Darstellung sind unter anderem die Level-of-Service Konzepte von Fruin und Tanaboriboon enthalten. Die Darstel-

lung kann aber auch benutzerdefiniert ausfallen. Die einzelnen LOS werden über Farbabstufungen im Screenshot illustriert.

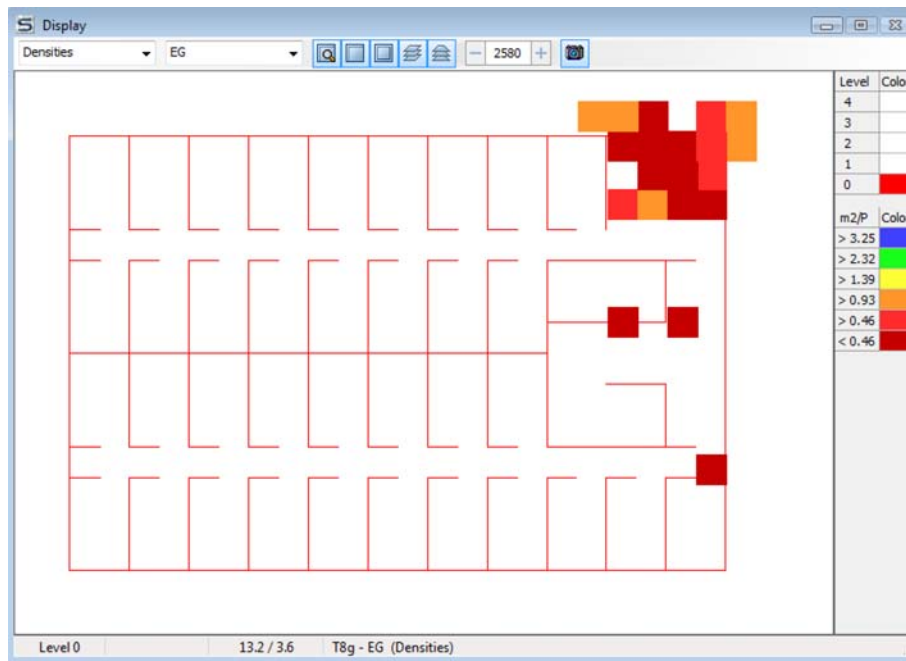


Abbildung 48: Screenshot *Density* aus SimWalk

An der Legende auf der rechten Seite ist zu erkennen, welche Qualitätskriterien für das LOS-Konzept festgelegt wurden.

Die Zellengröße für die Berechnung der Parameter Loads und Density kann über die Konfigurationseinstellungen frei gewählt werden.

Um den Ablauf der Entfluchtung dynamisch zu visualisieren, ist die Ausgabe einer Animation möglich. Diese wird in einem programmeigenen Format gespeichert und benötigt ein separates Programm um diese abspielen zu können. Dieses Programm ist in SimWalk enthalten und kann zu Visualisierungszwecken weiterverteilt werden.

6.5 ASERI

ASERI wird von dem Unternehmen I.S.T. Integrierte Sicherheits-Technik GmbH in Frankfurt am Main entwickelt und vertrieben. Für die Beschreibung der Simulation wurden die Programmhandbücher ([64];[65]) in der Version 4.5 mit dem Stand von Dezember 2007 zur Verfügung gestellt. Im Folgenden wird das Programm nur in seinen wesentlichsten Bestandteilen dargestellt, da zur Beschreibung nur Literatur in begrenztem Umfang zur Verfügung stand.

6.5.1 Modell

Bei ASERI handelt es sich um ein raumkontinuierliches, dreidimensionales Individualmodell. Jeder Person können individuelle Eigenschaften, wie Geschwindigkeit und Fluchtverhalten, zugewiesen werden. Zusätzlich ist in ASERI ein Modell enthalten, das die Bewegung von Personen unter Brandeinwirkung berücksichtigt.

Das Update der Simulation erfolgt in einem Intervall von 0,5 Sekunden.

6.5.2 Eingabe

6.5.2.1 Geometrie

Die geometrische Modellierung eines Gebäudes entsteht in ASERI über eine dreidimensionale Koordinateneingabe. Es besteht die Möglichkeit die Koordinaten aus einer Auto-CAD Zeichnung zu importieren, um die Koordinaten nicht manuell eingeben zu müssen. Erstellte Gebäudedaten sind innerhalb des Programms veränderbar. Die Eingabe erfolgt in einer bestimmten Reihenfolge, zuerst wird dabei das Gebäude grob formuliert und dann schrittweise durch Hinzufügen weiterer Elemente fertig gestellt. Die Reihenfolge der Modellierung [64] ist nachfolgend aufgeführt.

Gebäude → Etage → Unit / Einheit → Komponente

Im Objekt *Gebäude* werden die Umgrenzungsflächen festgelegt. In *Etagen* werden die verfügbaren *Units*, die auf einem Höhenniveau liegen zusammengefasst. *Units* werden zwischen den Typen Raum, Flur, Treppe, Außenbereich, Rang und Tribüne unterschieden. Durch die einzelnen Typen werden allgemeine Bewegungseigenschaften simulierter Personen festgelegt. Für langgestreckte Raumeinheiten kann der Typ Flur verwendet werden. Im Gegensatz zur Einheit Raum tendieren Personen dazu, einen gerichteteren Weg parallel zu den Längswänden zu gehen.

Treppen entsprechen hinsichtlich der horizontalen Bewegungsregeln dem Typ Flur. Bezüglich der vertikalen Bewegungsrichtung ändert sich die Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Steigung und der Bewegungsrichtung auf- oder abwärts. Hierbei sind die Angabe der Stufenabmessungen, der geneigten Lauflänge und die Angabe des Höhenunterschiedes erforderlich. Die Ermittlung der Geschwindigkeit auf Treppen folgt der Beziehung [65]:

$$v_{\text{Treppe}} = v_0 \times \frac{v_{\text{Treppe, Ref.}}}{v_{0, \text{Ref.}}} \times \begin{cases} 1.0 & \text{treppab} \\ 0.7 & \text{treppauf} \end{cases}$$

Mit der Bezeichnung v_0 ist die maximal unbehinderte Gehgeschwindigkeit gemeint. Die Geschwindigkeiten $v_{\text{Treppe, Ref.}}$ und $v_{0, \text{Ref.}}$ sind empirisch ermittelte Referenzwerte [65]. Die Referenzgeschwindigkeit auf Treppen ist dabei von der Stufenbreite und Stufenhöhe abhängig. Aus dem Verhältnis dieser beiden ergibt sich ein Reduktionsfaktor, der minimal bei 0,71 liegt. Zusätzlich wurden Reduktionsfaktoren für die Bewegungsrichtung auf Treppen eingeführt, um Ermüdungserscheinungen für die Bewegungsrichtung aufwärts zu berücksichtigen.

Außerdem können mit der Einheit Treppe weitere Arten zur Höhenüberbrückung, wie Leitern oder Rampen, mit freier Wahl von Reduktionsfaktoren, modelliert werden. Durch die dreidimensionale Modellierung ist es nicht notwendig, etwaige Vereinfachungen bei komplizierteren Treppenräumen mit mehreren Zwischenpodesten zu treffen.

Um Tribünen in Versammlungsstätten zu modellieren, steht die Einheit Rang zur Verfügung. Diese *Units* können nur durch seitliche Ausgänge verlassen werden und münden direkt in Treppen. Die Raumeinheit Tribüne dient lediglich der Zusammenfassung mehrerer Ränge. Die Einheit Außenbereich markiert das Ziel der Personen. Außenbereiche werden mit Türen zu benachbarten Raumeinheiten bzw. *Units* verbunden.

Um detailliertere innere Strukturen innerhalb des Gebäudes zu beschreiben, werden *Komponenten* erforderlich. Es sind die vier Komponententypen Tür, Hindernis, Sitzreihe und Zwischenstopp verfügbar.

Die *Komponente* Tür dient der Verbindung der *Units* untereinander. Für Türen existieren die Zustände offen und geschlossen. Geschlossene Türen werden während der Simulation nicht passiert. Zusätzlich ist die Art der Tür anzugeben (beispielsweise Standard oder Ausgang).

Die *Komponente* Hindernis ermöglicht die Eingabe von unbeweglichen Objekten, die umgangen werden müssen.

Über die *Komponente* Sitzreihe sind Sitzplätze darstellbar. Von Anfang an werden Personen über die gesamte Fläche der Sitzreihe verteilt, können diese aber nur seitlich oder von vorn verlassen.

Mit der Komponente Zwischenstopp werden lokale Zwischenziele angegeben, an denen zusätzlich eine Wartezeit eingestellt werden kann, durch die Personen für die eingestellte Dauer am Zwischenstopp verweilen. Ein Zwischenstopp wird nur angesteuert, sofern dieser auf dem Weg zum Ausgang oder zumindest in direktem Sichtkontakt (unbehinderter geradliniger Weg) liegt.

Zusätzlich kann zu jedem Objekt (Gebäude, Etage, Unit/Einheit, Komponente) ein bestimmtes Verhalten der Bewegung zugeordnet werden. Diese Bewegungsarten lassen sich in die Arten *Komfort*, *Entfluchtung* und *Gefahr* einteilen. Durch die Bewegungsarten wird festgelegt, welche effektiven Abstände zu Begrenzungen aus Bauteilen oder Personen zugelassen werden. Die Bewegungsart *Komfort* legt die höchsten Abstände fest und entspricht einer entspannten Bewegung. Im Modus *Entfluchtung* wird ein leichter Körperkontakt akzeptiert, wenn eine erhöhte Personendichte vorliegt und entspricht dem Verhalten einer Entfluchtungssituation. In der Bewegungsart *Gefahr* sind die Abstände zwischen Begrenzungen und Personen am geringsten und erlaubt so einen stärkeren Körperkontakt. Die Bewegungsarten sind nicht nur beschränkt auf die Objekte, sondern lassen sich auch den Personen zuweisen.

6.5.2.2 Ziele und Routen

Ziele werden durch die Raumeinheit Außenbereich gekennzeichnet [64]. Werden die Bereiche betreten, werden die Personen aus der Simulation entfernt. Über diese endgültigen Ziele wird die allgemeine Laufrichtung vorgegeben. Weiterführend wird die Laufrichtung durch lokale Orientierungspunkte vorgegeben, die nacheinander bis zu Erreichen des Zielbereiches angesteuert werden. Lokale Orientierungspunkte sind an Türen, an konvexen Ecken von Wänden, Hindernissen und anderen Begrenzungen, wie Sitzplatzreihen und Rängen, in einem Abstand von 0,4 Metern vom Bauteil entfernt angeordnet. Eine Darstellung der Orientierungspunkte und der möglichen resultierenden Laufwege ist in Abbildung 49 gezeigt. Die Kreise stellen die Orientierungspunkte dar und die Pfeile repräsentieren die möglichen Laufwege.

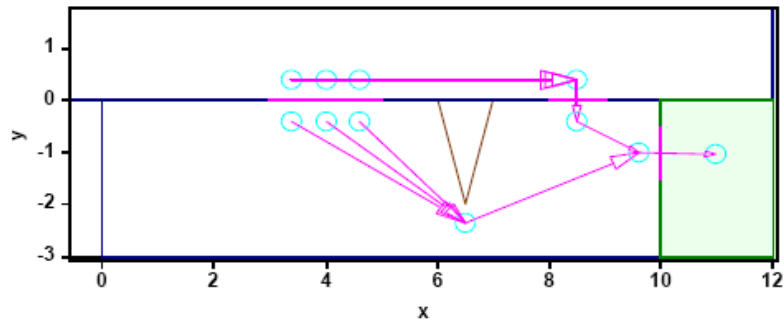


Abbildung 49: Orientierungspunkte und mögliche Laufwege [65]

Türen, die breiter als 1 Meter sind, werden entlang der Tür drei Orientierungspunkte, anstatt einem zugeordnet.

Die Fluchtbewegung kann durch die Eingabe bestimmter Ziel-Bewegungen verändert werden. Eine Angabe ist sowohl in Objekten, als auch bei den Personeneigenschaften möglich. Allgemein kann dazu zwischen den folgenden Ziel-Bewegungen gewählt werden:

- Global kürzester Weg (global kürzester Weg)
- Lokal kürzester Weg (kürzester Weg)
- Auslastung der Fluchtwege (Balance / Dynamische Ausgangswahl)
- Vorgabe eines Fluchtweges oder –zieles (ausgewählter Außenbereich)

Die Einstellung *global kürzester Weg* bewirkt, dass sich Personen anhand des geometrisch kürzesten Weges zum Ziel bewegen. Die Option *lokal kürzester Weg* ist nur in Räumen oder Rängen möglich, unter der Voraussetzung, dass auch dort die Option aktiviert ist. Hierbei erfolgt die Fluchtwegführung von der individuellen Standposition zur Ausgangstür (Eigenschaft Ausgang) mit der geringsten Entfernung.

Der Unterschied der sich ergebenden Laufwege bei der Anwendung der Optionen *global kürzester Weg* und *lokal kürzester Weg* ist in Abbildung 50 illustriert.

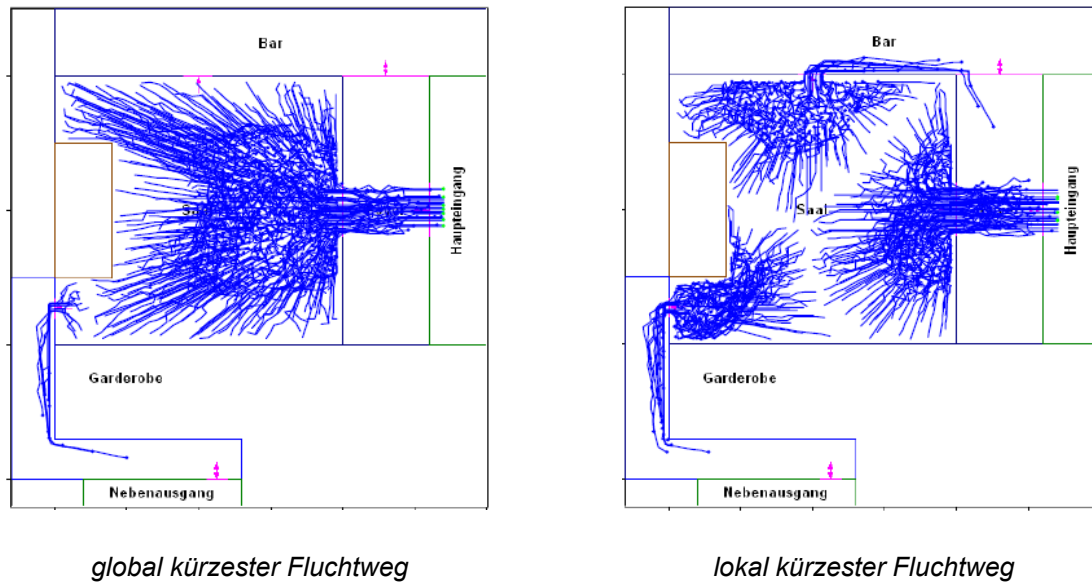


Abbildung 50: Unterschied der Optionen *global kürzester* und *lokal kürzester* Fluchtweg über die Darstellung von Spurbildern [65]

Dargestellt sind die Personenspuren der Option *global* und *lokal kürzester* Fluchtweg. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Bewegung lokal zu einer erhöhten Auslastung der Ausgänge führt.

Über die Einstellungen *Balance* und *Dynamische Ausgangswahl* kann eine gleichmäßige Auslastung der Fluchtwege erzielt werden. Bei der *dynamischen Ausgangswahl* wird von den Personen die Wartezeit vor Ausgängen, aufgrund von zu erwartenden Personendichten, abgeschätzt und untersucht, ob andere verfügbare Ausgänge mit geringerer Auslastung und Wartezeit existieren. Die Wegwahl erfolgt dann zum Ziel mit geringster Auslastung. Bei der Option *Balance* erfolgt die Ausgangswahl ebenfalls über die Prüfung der Auslastung des Ausganges. Allerdings ist hier die Anzahl der Personen bezogen auf die Ausgangsbreite maßgebend.

Mit der Angabe eines *ausgewählten Außenbereiches* ist den Personen ein bestimmtes Ziel zuweisbar.

Weiterhin ist die Fluchtwegführung über bestimmte Wegführungen in den Personeneigenschaften oder über bestimmte Raumeigenschaften veränderbar.

Die verschiedenen Wege die sich aus den jeweiligen Einstellungen ergeben, können beispielhaft über Spurbilder dargestellt werden.

6.5.2.3 Personen

Personen werden in ASERI durch die Überlagerung dreier zusammenhängender Kreise repräsentiert.

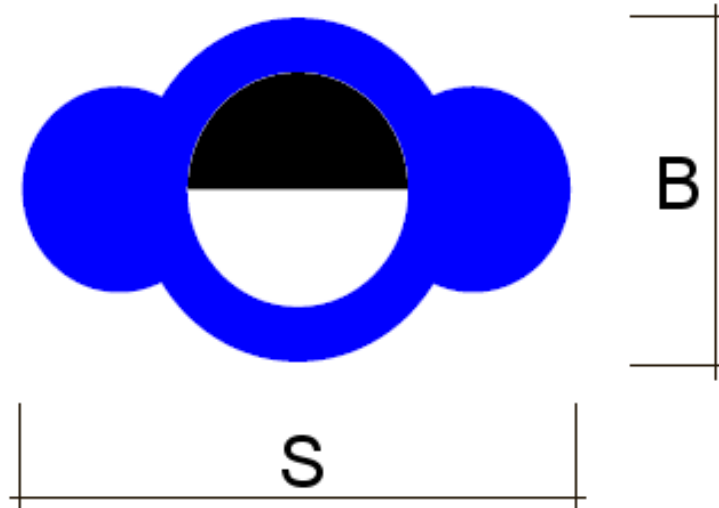


Abbildung 51: Darstellung der horizontalen Projektion der Körperellipse in ASERI

Die Körpermaße einer Person werden über die Brustbreite B und die Schulterbreite S bestimmt. Die beanspruchte Fläche einer Person ergibt sich damit aus den individuellen Körperproportionen. Simulierte Personen bewegen sich mit ihrer Maximalgeschwindigkeit, solange ihr Weg unbehindert ist. Werden Personen durch vorauslaufende Personen blockiert oder steigt die Personendichte in einem Bereich, reagieren Personen zunächst mit Ausweichbewegungen, Überholvorgängen oder reduzierter Geschwindigkeit. Ist eine neue Position nicht möglich, kommt es zum Stillstand.

Die Eingabe der Personen wird in zwei Schritten durchgeführt. Zuerst wird eine Populationsgruppe, in ASERI genannt Personensatz, beschrieben.

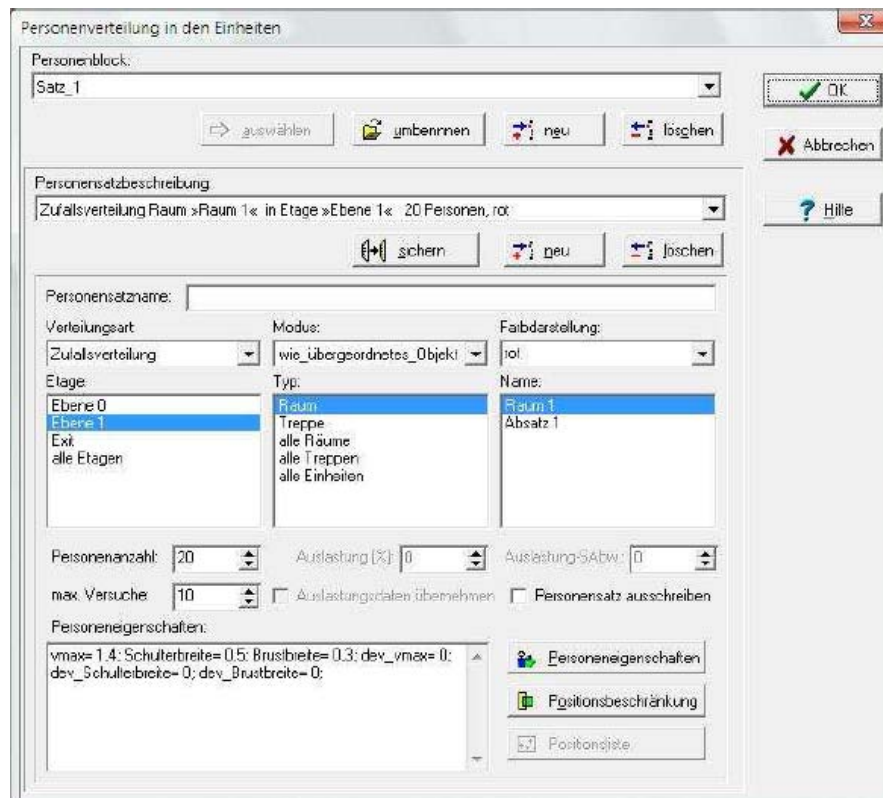


Abbildung 52: Dialogfenster zur Eingabe der Personensätze [64]

Die allgemeinen Charakteristiken, die im Personensatz festgelegt werden umfassen unter anderem

- die Anfangsposition der Personen,
- die Verteilungsart der Anfangspositionen,
- die Bewegungsart und
- die Anzahl der Personen.

Personen können in die Geometrie sowohl zufällig als auch gleichverteilt platziert werden. Ebenfalls sind genaue Positionseingaben über Koordinateneingabe möglich.

In den Personensätzen lassen sich die individuellen Personeneigenschaften weiter bestimmen. Die Definition der Personeneigenschaften erfolgt durch die Angabe der:

- individuellen Geschwindigkeiten
- Körperproportionen über die Angabe von Brust- und Schulterbreite
- Reaktionsdauer
- Art der Ziel-Bewegung
- Wegführung
- Wartezeiten bei Zwischenstopps

Abbildung 53: Einstellung der Personeneigenschaften in ASERI [64]

Die Verteilung der Geschwindigkeiten und der Körperproportionen erfolgt normalverteilt über die Angabe der Standardabweichungen [64]. Ist die Standardabweichung Null, dann ist die Geschwindigkeit oder das jeweilige Körpermaß für alle Personen gleich.

Die Reaktionsdauer der einzelnen Personen wird in ASERI über die Alarm- und die Verzögerungszeit angegeben. Die Alarmzeit setzt den frühesten Zeitpunkt fest, an dem die Personen mit der Fluchtbewegung beginnen. Die Verzögerungszeit beschreibt die Zeitspanne nach dem Zeitpunkt der Alarmzeit in der Personen mit der Bewegung anfangen. Anlehnend an die Definition der Reaktionsdauer aus Abschnitt 4.2.3 entspricht die Alarmzeit also dem Zeitintervall Δt_1 . Die Verzögerungszeit entspricht dem Zeitpunkt Δt_{99} . Damit ergibt sich in ASERI der späteste Zeitpunkt t_{\max} , an dem Personen in ASERI reagieren können, aus der Addition der Alarmzeit und der Verzögerungszeit. Ist die Verzögerungszeit Null, so werden sich alle zugeordneten Personen zum gleichen Zeitpunkt in Bewegung setzen. Die Verteilung der Reaktionsdauern erfolgt gleichverteilt über die Verzögerungszeit [64].

Über die Wegführung kann den Personen eine Route vorgegeben werden. Wartezeiten geben an, wie lange Personen bei Erreichen eines Zwischenstopps stehen bleiben bevor sie die Bewegung wieder aufnehmen.

6.5.3 Ergebnisse

Um einen Überblick über die möglichen Laufwege zu erhalten, lassen sich die Wege über Verbindungen der Orientierungspunkte darstellen. Tatsächlich gelaufene Wege können über Personenspuren angezeigt werden.

In ASERI kann eine vorher bestimmbare Anzahl von Rechendurchläufen gestartet werden, um ein statistisch auswertbares Ergebnis aus der Variation von Anfangsverteilungen zu erhalten. Um die Ergebnisse der einzelnen Durchläufe darzustellen, lassen sich diese in einer Tabellenform oder in einem Diagramm wiedergeben.

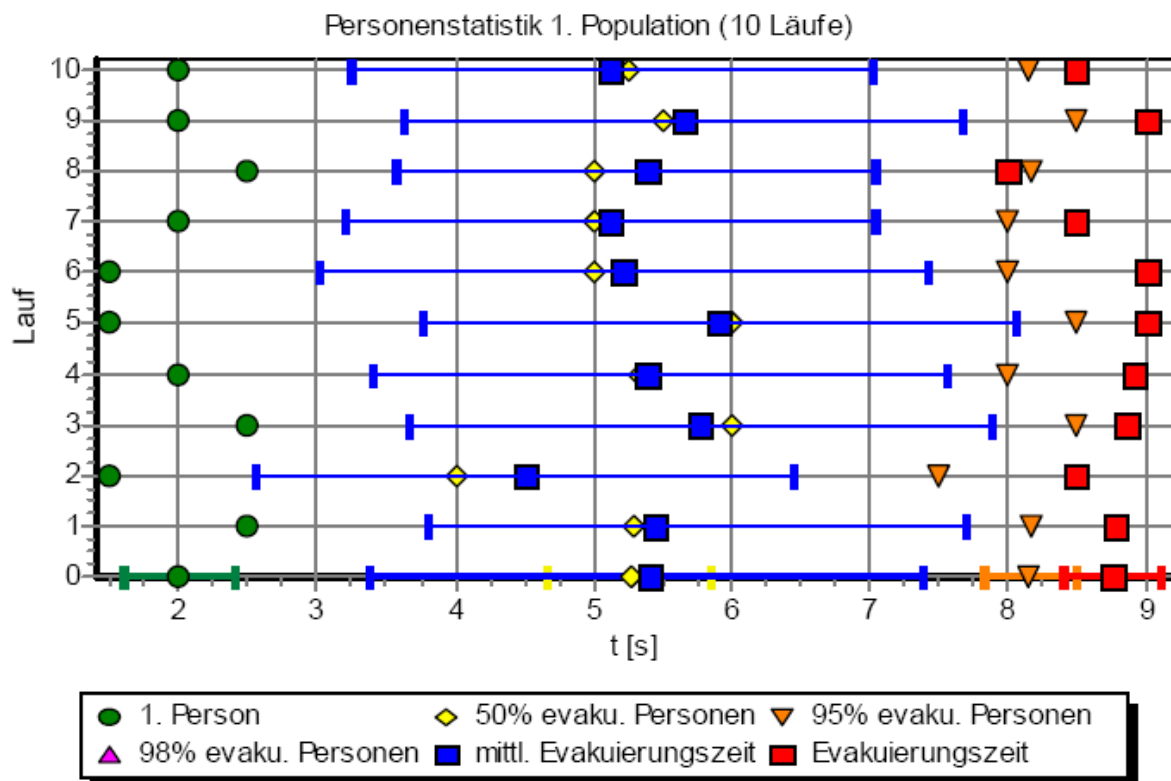


Abbildung 54: Statistikdiagramm der einzelnen Durchläufe [64]

Im Lauf 0 werden die gemittelten Werte über die Durchläufe angegeben. Die Angaben beinhalten die Gesamtentfluchtungsauern und die Dauern die für eine bestimmte gerettete Personenzahl erreicht werden. Außerdem können durch die vertikalen Markierungen die ermittelten Standardabweichungen abgelesen werden.

Für die weiterführende Beurteilung werden zusätzliche Diagramme ausgegeben. Hierbei kann die Darstellung einer Personenverteilungskurve erfolgen. Sie zeigt die Personenbelegung in Abhängigkeit der Dauer in vorher festgelegten Raumbereichen an. Außerdem wird angezeigt, nach welcher Dauer die Personen das Gebäude verlassen haben. Die Ausgabe ist auch in tabellarischer Form möglich. Wird zusätzlich die Untersuchung von Personenflüssen durch Türen erforderlich, lässt sich in der Simulation der Personenstrom durch Türen protokollieren und anschließend als Zeitkurve darstellen.

Zur Darstellung der Verteilung der individuellen Eigenschaften der Personen, lassen sich verschiedene Häufigkeitsverteilungen wiedergeben. Es sind die Ausgabe der Geschwindigkeitsverteilung, der Verteilung der Schulter- oder Brustbreite und die Verteilung der beanspruchten Flächen der Körperellipsen möglich.

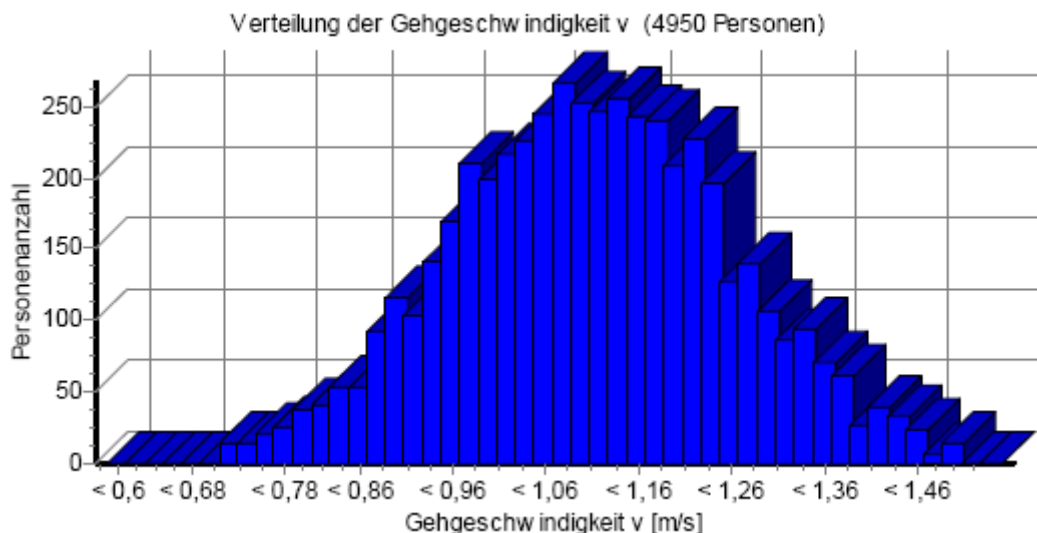


Abbildung 55: Häufigkeitsverteilung der Geschwindigkeit aus ASERI [64]

Angaben zur Dokumentation der Gebäudemaße, der Personen und der Ziele, sowie der jeweiligen individuellen Einstellungen dieser, sind in den Eingabedatensätzen hinterlegt.

Staubetrachtungen oder hohe Dichteentwicklungen müssen über die Angabe von Screenshots erfolgen. Die Angabe von der Entwicklung hoher Personendichten erfolgt über einen Hinweis in der Simulation.

Zur Visualisierung der Simulation lässt sich eine Animation im AVI-Format erstellen. Dabei kann bei der Erstellung gewählt werden, ob Personen oder Personenspuren in der Animation dargestellt werden.

Eine Ausgabe von Screenshots ausgewählter Ebenen und 3D-Ansichten des Drahtmodells ist ebenfalls in frei wählbaren Abständen möglich.

7 ALLGEMEINE UNTERSUCHUNGEN

7.1 VORBEMERKUNG

Gegenstand dieser Arbeit ist es nicht darzustellen, wie sich die Programme untereinander verhalten. Für einen umfassenden Vergleich sei hier vorab auf folgende Berichte verwiesen, die sich eingehend mit diesem Thema beschäftigt haben:

- *Berechnung von Entleerungszeiten für Fallbeispiele*; M. Kersken, N. Waldau, T. Hoffmann; Forschungsbericht des DIBt, 2006 [53]
- *Vergleichende Untersuchung zur dynamischen Simulation von Personenströmen*; Christian Rogsch; Forschungszentrum Jülich, 2005 [66]
- *A Review of Building evacuation Models*; Erica D. Kuligowski, Richard D. Peacock; Technical Note 1471, National Institute of Standards and Technology, 2005 [55]

Zusätzlich haben sich bereits einige Diplomarbeiten mit diesem Thema befasst, in der einzelne Programme untereinander anhand von spezifischen Beispielen verglichen wurden:

- *The Evaluation of a performance-based design process for a Hotel building: The comparison of two egress models*; Erica D. Kuligowski; Thesis, 2003 [67]
- *Evakuierungsberechnungen als Bestandteil der Risikoanalyse zur Erstellung von Brandschutzkonzepten und Nachweis für das Rettungswegkonzept*; Manuela Otto; Diplomarbeit, 2005 [68]
- *Simulation vs. Realität – Anwendbarkeit von Evakuierungssimulationsprogrammen zur Vorhersage von Räumungszeiten für Bürohochhäuser*; Christoph Kotthaus; Diplomarbeit, 2006 [69]

Im Folgenden werden zur Darstellung weiterer individueller und allgemeiner Eigenschaften der jeweiligen Programme Ergebnisse der vorgenannten Berichte zitiert und beschrieben. Untersuchungen zu den einzelnen Programmen sind in Form von Sensitivitätsanalysen im Anhang enthalten.

7.2 BEWERTUNGSKRITERIUM ENTFLUCHUNGSDAUER

In einem vom deutschen Institut für Bautechnik beauftragten Forschungsprojekt wurden anhand von Fallbeispielen die Personensimulationen ASERI, buildingEXODUS und PedGo untersucht [53]. Aufgrund der verstärkten Entwicklung, Abweichungen von Rettungswegkonzepten der geltenden Bauvorschriften mit Entfluchtungssimulationen nachweisen zu wollen, war es die Aufgabe zu prüfen, inwieweit die ermittelten Entfluchtungsdauern der Programme als alleiniges Kriterium zur Bewertung ausreichen. Herangezogen wurden dazu verschiedene Fallbeispiele, die den Anforderungen der geltenden Bauvorschriften genügen. Untersucht wurden dazu Versammlungsstätten und eine Verkaufsstätte. Beim Vergleich der ermittelten Entfluchtungsdauern der Simulationsmodelle stellte sich heraus, dass diese unabhängig vom gewählten Modell höher ausfielen als die in der Begründung der MVStättV angegebenen Dauern von 2 Minuten in Gebäuden bzw. 6 Minuten für Anlagen im Freien [53]. Weiter wurde festgestellt, dass ermittelte Dauern im Vergleich zwischen den Programmen teilweise erhebliche Unterschiede aufweisen. Diese treten im Zusammenhang mit erhöhten Flüssen der Ausgänge auf. Die auftretenden Unterschiede können allerdings teilweise begründet werden. Unterschiede in den Ergebnissen sind auch schon in den Untersuchungen von [66] festgestellt worden. Einschränkend muss hier erwähnt werden, dass es sich in beiden Untersuchungen um relativ einfache Geometrien handelte. In anderen Untersuchungen (vergleiche [69];[70];[71];) sind zwischen den Programmen weitaus geringere Unterschiede ermittelt worden. In diesen Untersuchungen sind gesamte Gebäudekomplexe untersucht worden. Hieraus wird gefolgert, dass sich einzelne Unterschiede in den Programmen wieder ausgleichen, je vielschichtiger die betrachtete Gebäudegeometrie ist [53].

Aus den vorangegangenen Ausführungen kann geschlossen werden, dass im Zuge einer Prüfung die alleinige Betrachtung der Entfluchtungsdauer für die Bewertung eines Evakuierungskonzeptes nicht ausreicht. Daher ist es notwendig auch die Plausibilität der Dauer durch die Angabe von Personenflüssen zu beurteilen. Nach [53] sollten außerdem

- die Dichten innerhalb von Stauungen,
- Größe der Staudrücke,
- Dauern der Stauungen und

– Größe der Stauungen

für die Beurteilung einer Analyse herangezogen werden. Gerade bei der Größe der Staudrücke sind für eine Beurteilung allerdings noch keine empirischen Ergebnisse vorhanden.

7.3 AUSGANGSAUSLASTUNG

Sofern es zu einer ungleichmäßigen Auslastung der Ausgänge kommt, sind die Entfluchtungsauern vom höchstbelasteten Ausgang abhängig. Entfluchtungssimulationen, die mit dem Kriterium des geometrischen kürzesten Weges ausgeführt werden, können, je nach Aufenthaltsort der Personen und der geometrischen Anordnung der Ausgänge, zu ungleichmäßigen Verteilungen der Personen auf die Ausgänge führen. Mit Programmooptionen, wie die *Geduld* in PedGo oder die *Dynamische Ausgangswahl* in ASERI, lässt sich die Verteilung auf die Ausgänge beeinflussen. Die Anwendung der Optionen kann dazu führen, dass Ausgänge gleichmäßiger belastet werden. Eine gleichmäßigere Aufteilung bedeutet wiederum, dass die Entfluchtungsauern sinken. Ebenso ist es möglich durch manuelle Zuordnung auf die Ziele eine gleichmäßigere Verteilung zu erreichen. In [53] wurde die Auswirkung der gleichmäßigen Verteilung von Personen auf die Ausgänge auf die resultierenden Entfluchtungsauern untersucht. Nachfolgend aufgeführt sind Auswertungen für ein untersuchtes Fallbeispiel nach [53], um diesen Punkt zu verdeutlichen.

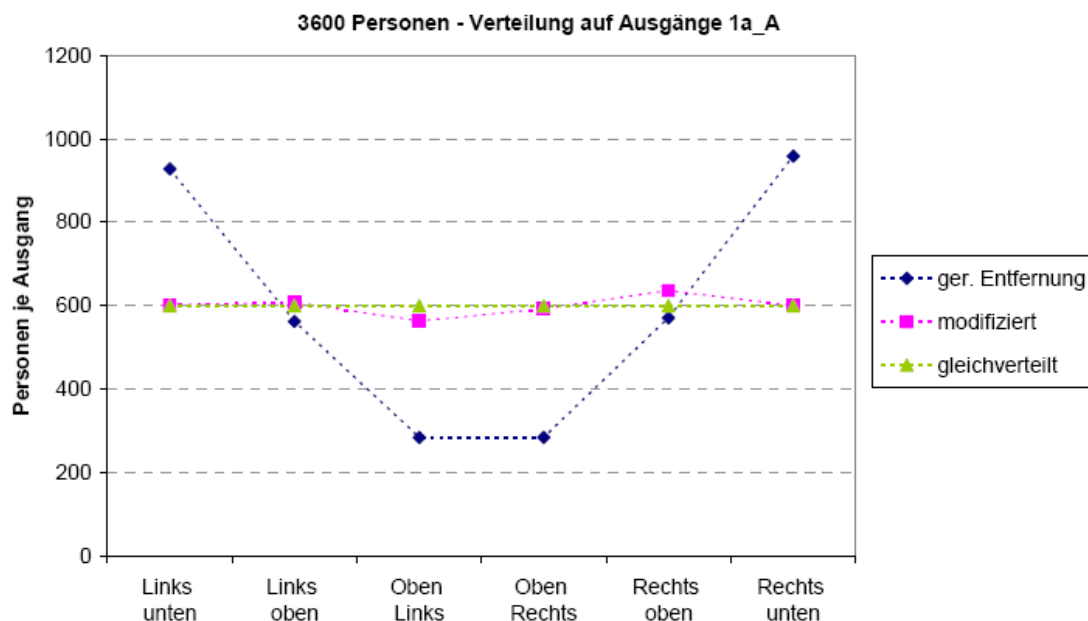


Abbildung 56: Personenverteilung auf die Ausgänge [53]

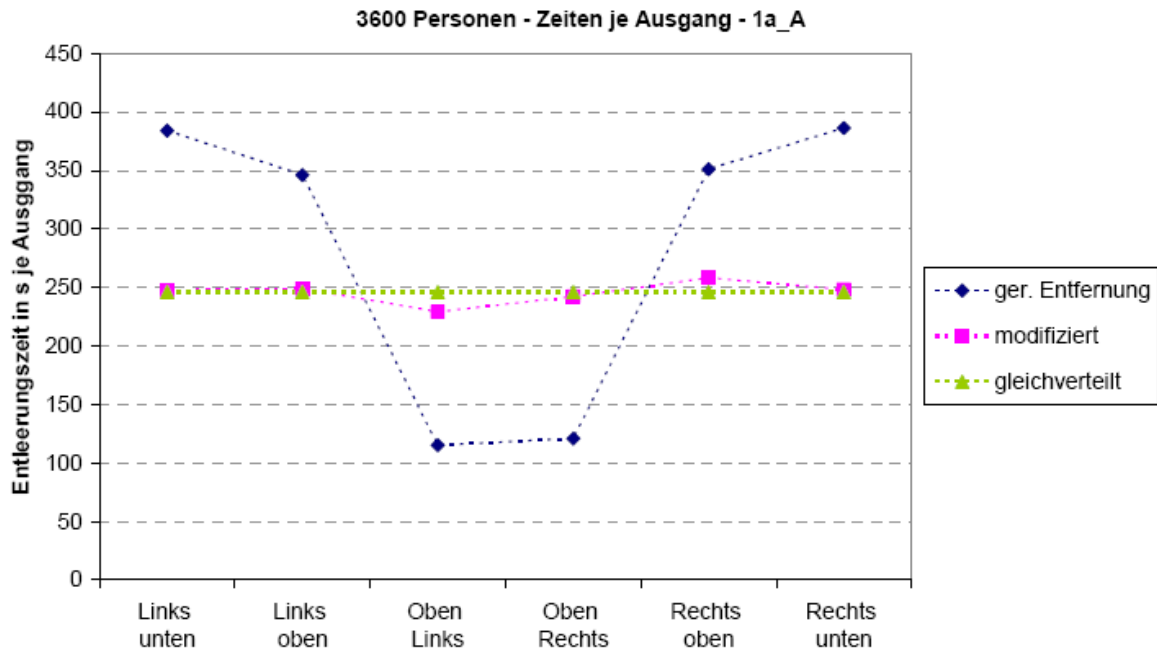


Abbildung 57: Entfluchtungsauern der jeweiligen Ausgänge [53]

Bei der Simulation mit der Einstellung der geometrisch kürzesten Entfernung treten ungleichmäßige Belastungen der Ausgänge auf. Die Abbildungen zeigen, dass die Gesamtentfluchtungsauer von dem Ausgang mit der höchsten Personenzahl bestimmt wird. Bei gleichmäßiger Verteilung ist zu erkennen, dass die Entfluchtungsauer für das untersuchte Fallbeispiel deutlich geringer ist. Eine gleichmäßige Verteilung tritt in der Regel nur sehr selten auf und bildet damit einen unteren Grenzwert für Staubildungen und Entfluchtungsauer. Für eine mögliche Deutung der Gleichförmigkeit, wird in [53] eine Maßangabe eingeführt, die dem einfachen mittleren Fehler u bezüglich einer optimalen Aufteilung beschreibt. Diese wird definiert als

$$u = \frac{\sum |(1 - P_i / P_{i, \text{opt}})|}{\sqrt{n * (n - 1)}} .$$

Hierbei sind

$$P_{i, \text{opt}} = (a_i / a) * P$$

n = Anzahl der Ausgänge

a = Summe der vorhandenen Ausgangsbreiten

a_i = Breite des betrachteten Ausgangs i

P = Summe der vorhandenen Personenzahl

P_i = Personen über Weg/ Ausgang i mit Breite a_i

Niedrige Werte entsprechen dabei einer gleichmäßigen Verteilung. Für das Fallbeispiel dargestellt in Abbildung 56 und Abbildung 57 wurde für das Kriterium kürzester Weg eine Ungleichförmigkeit von 42,2 % berechnet. Die modifizierte Verteilung (dargestellt durch die hellblaue Linie) hat eine Ungleichförmigkeit von 2,7 % ergeben.

Im Anhang wurde für das Beispiel des Nachtclubs „The Station“ eine Ungleichförmigkeit von 51 % errechnet (siehe Anhang). Zur Berechnung wurden nur die Personen herangezogen, die das Gebäude tatsächlich durch den Ausgang verlassen haben. Dabei ist zu bemerken, dass ein Ausgang den Personen unbekannt war und ein anderer Ausgang nur für eine sehr kurze Zeit begehbar war. Werte in der Größenordnung $> 40\%$ werden daher vermutlich nur selten auftreten, sind aber durchaus möglich.

7.4 EINFLUSS DER PERSONENZAHLE UND DER ANFANGSDICHTE

Eine Erhöhung der Personenzahl für die Ausgangssituation bedeutet auch eine Erhöhung der Anfangsdichte. In [53] wurde der Einfluss der Anfangsdichte auf die Entfluchtungsdauer untersucht. Bei der Erhöhung der Dichte wurden dazu die Ausgangsbreiten proportional zur Personenzahl erhöht.

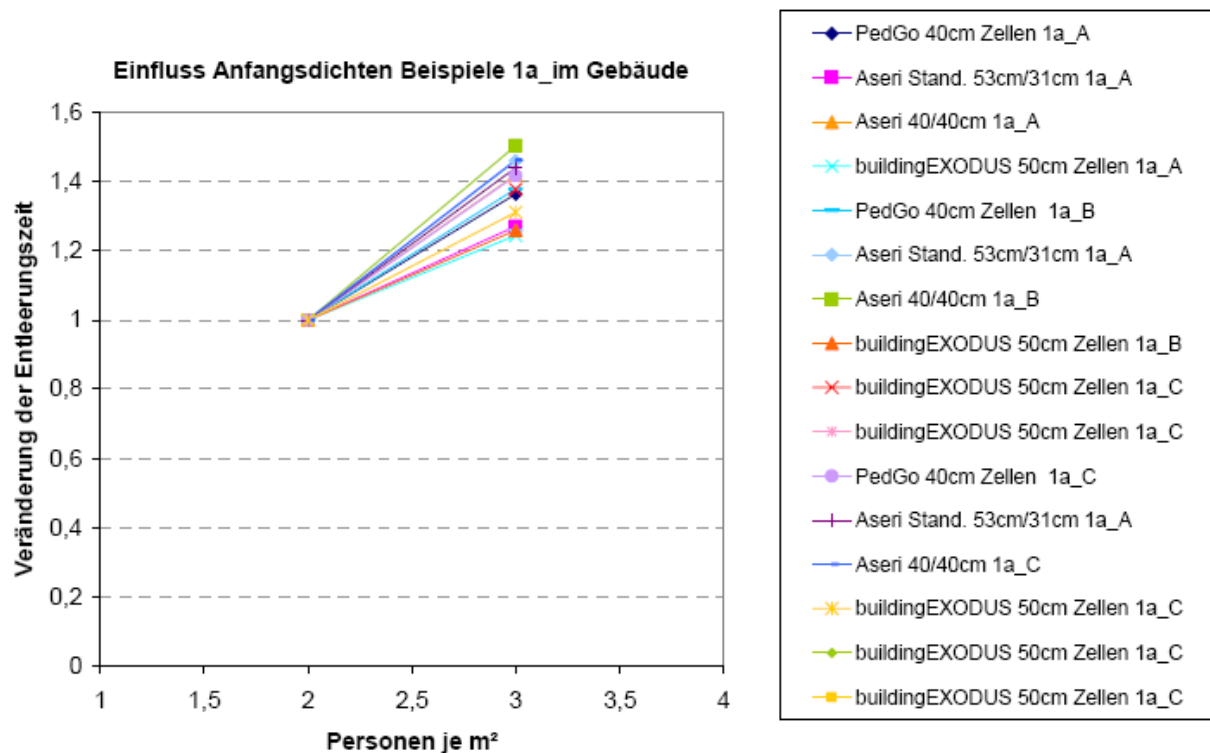


Abbildung 58: Erhöhung der Entfluchtungsdauer bei Erhöhung der Anfangsdichte im Gebäude [53]

Das Diagramm zeigt, dass mit wachsender Anfangsdichte in den Räumen die Entfluchtungsdauer trotz der Erhöhung der Ausgangsbreiten steigt. Dies ist unter anderem damit zu begründen, dass mit zunehmender Dichte die Gehgeschwindigkeiten der simulierten Personen verringert werden. Für eine Flächenbewegung wurde dazu in [66] in einem Szenario der Einfluss der Dichte auf die Entfluchtungsdauer, die Geschwindigkeitsentwicklung und den spezifischen Fluss untersucht. Der Einfluss der Personendichte auf die Geschwindigkeitsentwicklung einzelner Programme ist in nachstehender Abbildung aufgeführt.

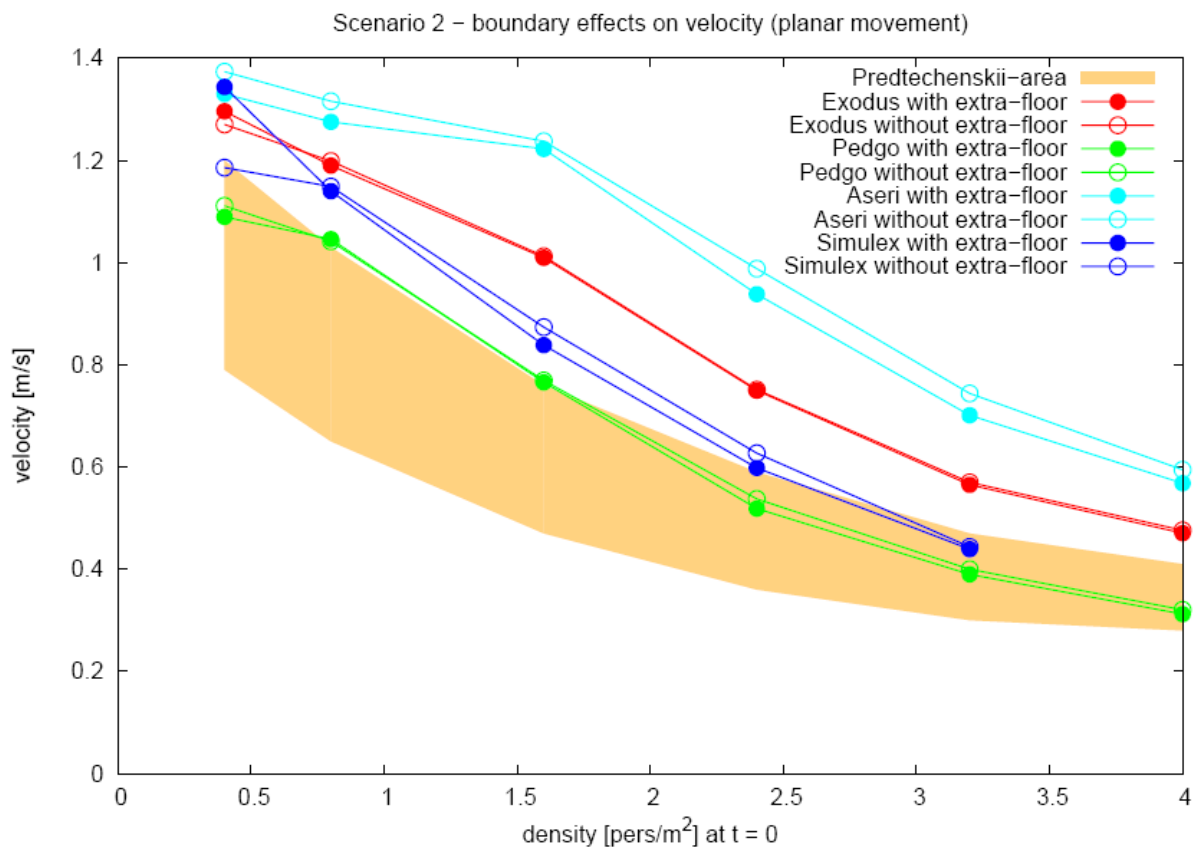


Abbildung 59: Geschwindigkeits-Dichte Diagramm für eine Flächenbewegung [66]

Deutlich ist, dass alle Programme bei erhöhter Anfangsdichte (bezeichnet mit density) einen Abfall in der Geschwindigkeit (bezeichnet mit velocity) darstellen. Weiter stellt die Untersuchung dieses Falles dar, dass mit zunehmender Dichte der Personenfluss sinkt.

7.5 EINFLUSS DER LAGE DES ZIELES

Untersuchungen nach [66] haben ergeben, dass die Lage der Zielbereiche ebenfalls einen Einfluss auf die Entfluchtungsdauer hat. Dies ist damit begründet, dass ein Rückstau nach Erreichen der Ziele nicht dargestellt werden kann, da simulierte Personen umgehend an diesen Bereichen aus der Simulation entfernt werden und damit keine Blockierungen für nachrückende Personen bilden. Der Einfluss ist durch eine Untersuchung an einem einzelnen Raum mit unterschiedlichen Anordnungen der Zielbereiche untersucht worden. Im ersten Fall wurden dazu die Zielbereiche unmittelbar hinter dem Raumausgang angeordnet und die ausgegebenen Dauern der Programme aufgetragen. Im zweiten Fall wurde ein separater angrenzender Raum hinzumodelliert und der Zielbereich am Ausgang des zweiten Raumausgangs angeordnet. Die Messung der Entfluchtungsauern im zweiten Fall erfolgte durch Ablesung der Dauern am ersten Raumausgang anhand der Animationen der Programme.

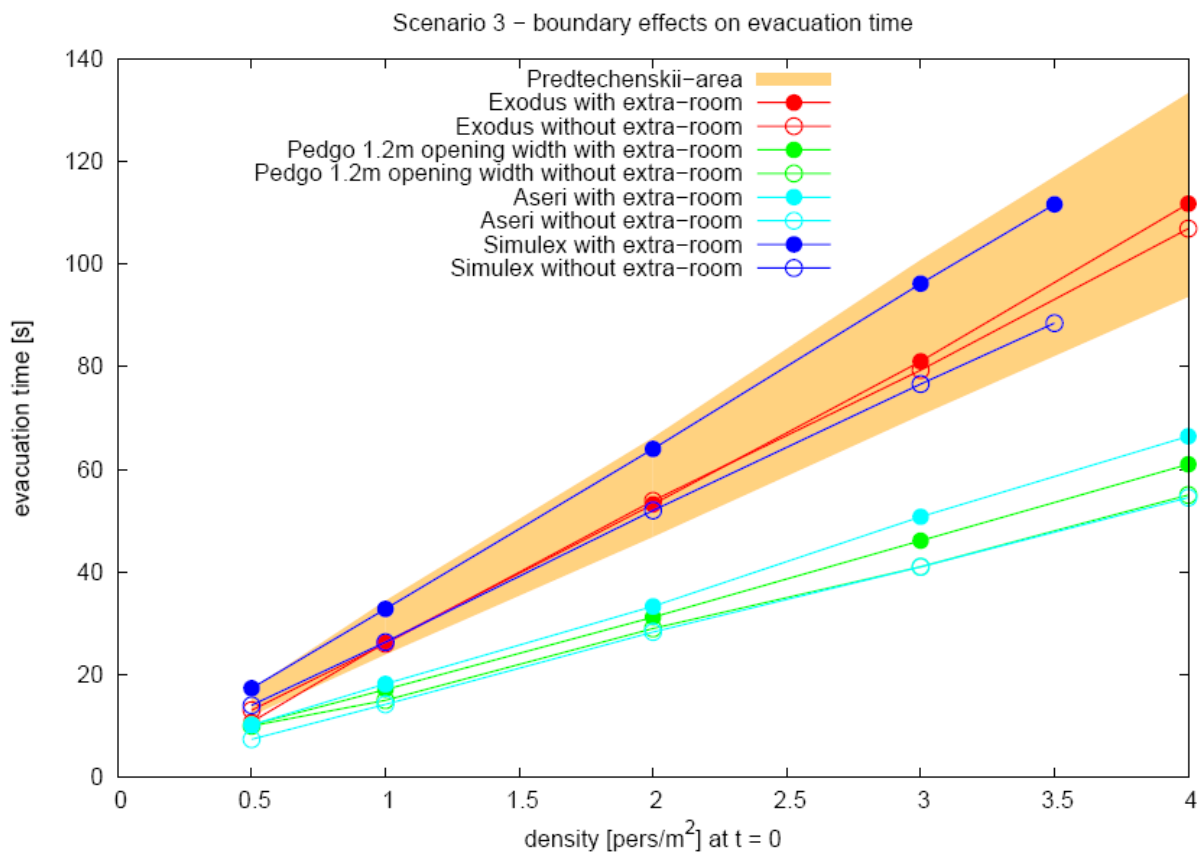


Abbildung 60: Zeit-Dichte Diagramm für den Vergleich der Auswirkung der Entfluchtungsdauer auf die Lage des Zieles [66]

Die Ergebnisse haben ergeben, dass der Rückstau von den Programmen in unterschiedlicher Größenordnung dargestellt wird, aber einen Einfluss auf die Entwicklung

der Entfluchtungsdauer hervorruft. Der Einfluss der möglichen Rückstauungen bewirkt eine Verlängerung der Entfluchtungsdauer und entspricht einer realistischeren Darstellung.

Desweiteren wurde in [72] dargestellt, dass die Lage des Zieles für manche Programme erheblichen Einfluss auf die Entfluchtungsdauer hat, wenn es sich dabei bei Bewegungen um die Ecken handelt. Festgestellt wurde, dass dieses Problem beim Programm SIMULEX sehr ausgeprägt ist und eine Verdoppelung der Entfluchtungsauern einfacher Geometrien bewirken kann.

7.6 EINFLUSS VON EINRICHTUNGSGEGENSTÄNDEN

Hinsichtlich einer Einbeziehung von Möblierungen einer Verkaufsstätte in der Simulation wurde festgestellt, dass diese keinen Einfluss auf die Entfluchtungsauern haben [53]. Einschränkend sollte bemerkt werden, dass hier die Ausgänge früh erreicht wurden und die Entfluchtungsdauer damit von der Rückstaubildung vor den Ausgängen abhing. Festgehalten werden kann, dass Möblierungen oder andere Hindernisse dann ausschlaggebend werden, wenn Durchgangsbreiten verringert werden oder die Entfluchtungsauern von den reinen Laufdauern abhängig werden. Laufdauern sind in der Regel dann maßgebend, wenn die Dichte gering ist.

8 ENTWURF EINES LEITFADENS ALS GRUNDLAGE FÜR DIE BEWERTUNG

Die Konzeption des Leitfadens bezieht sich auf die Punkte, die im Zusammenhang mit einer Entfluchtungssimulation und deren Bewertung bedeutsam sind. Bei der ganzheitlichen Betrachtung eines Brandschutzkonzeptes könnten daher allgemeine Punkte bereits enthalten sein.

Die Überprüfung einer Entfluchtungssimulation muss in zwei Schritten erfolgen. Zunächst ist es notwendig Anforderungen an den Umfang der Dokumentation zu stellen, um eine Prüfungsgrundlage zu besitzen. Der zweite Schritt muss sich mit den Eingaben in die Simulation und der Beurteilung der Ergebnisse befassen.

Der Entwurf des Leitfadens orientiert sich an die von RiMEA und vfdb-Leitfaden gestellten Anforderungen für die Durchführung einer Entfluchtungsanalyse.

Die hier beschriebenen Inhalte des Leitfadens sind in Kapitel 8.5 stichpunktartig zusammengefasst.

8.1 ALLGEMEINE INHALTE

Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung erläutert, welche Maßnahmen durchgeführt werden, um die bauliche Anlage zu genehmigen. Bezüglich einer Entfluchtungssimulation bedeutet dies, dass beschrieben wird mit welchem Programm diese durchgeführt werden und welche Ergebnisse aus der Simulation zur abschließenden Bewertung führen.

Schutzzieldefinition

Das von der MBO definierte Schutzziel ist lediglich allgemein definiert. Daher kann das Schutzziel bezüglich des Szenarios konkretisiert werden. Gerade im Zusammenhang mit einer Brandsimulation können Schutzziele zur Personenrettung genauer definiert werden. Im Bereich der Brandsimulation kann dann die Bestimmung einer zulässigen Dauer für die Personenrettung angegeben werden. Diese setzt sich aus dem Minimum der Dauern für die Standfestigkeit der Tragkonstruktion, der Vorhaltung einer raucharmen Schicht, der Hitzeentwicklung oder der Brandausbreitung zu-

sammen. Falls diese Werte angenommen werden, so ist unbedingt die Dauer für gefahrlose Löscharbeiten durch die Feuerwehr zu berücksichtigen.

Objektbeschreibung

In der Dokumentation einer Entfluchtungsanalyse ist für die Bewertung eine ausführliche Beschreibung aller zur Entfluchtung relevanten Merkmale der analysierten baulichen Anlage notwendig. Diese sollte zunächst allgemeine Angaben zur Art des Gebäudes und der angrenzenden Umgebung enthalten. Ferner sollten Angaben zum Gebäudeausmaß betreffend Längenausdehnung und Geschossflächen erfolgen. Anhand einer Plandarstellung sollten die Ausgänge mit den zugehörigen Ausgangsbreiten bezeichnet sein. Zu der Darstellung der Gebäudeausgänge muss zusätzlich definiert werden, welche Bereiche als gesicherte Bereiche dienen. Die Angabe gesicherter Bereiche ist insofern wichtig, als das im Zusammenhang mit der Darstellung der Umgebung im Hinblick auf Rückstaubildung und Kapazität der gesicherte Bereich beurteilt werden kann. Befindet sich ein Gebäudeausgang beispielsweise unmittelbar an einer dicht befahrenen Hauptverkehrsstraße, könnten nachrückende Personen die Personen auf die Straße drängen, die das Gebäude bereits verlassen haben. Somit würde das reine Verlassen eines Ausgangs keinen gesicherten Bereich darstellen. Ein gesicherter Bereich muss außerdem ausreichend Platz für die flüchtenden Personen bieten, da nicht garantiert werden kann, dass sie den umgebenden Bereich um das Gebäude unverzüglich verlassen.

In manchen Programmen ist dazu, durch Anordnung einer Warteposition am Ausgang oder Festlegen von Blockierzeiten der Ausgänge, die visuelle Darstellung des mit Personen besetzten gesicherten Bereiches möglich. Einschränkend bemerkt sei hier, dass dafür gegebenenfalls eine Neuberechnung der Simulation erfolgen muss.

Zusätzlich sollte die Angabe zu der Lokalisierung der Angriffswege der Feuerwehr erfolgen. Fallen diese Wege mit den Fluchtwegen zusammen, könnte ein Gegenstrom entstehen, der die Entfluchtungsdauer entscheidend verlängert, falls die Entfluchtung bei Eintreffen der Feuerwehr noch im Gange ist. Der Zeitpunkt des Eintreffens der Feuerwehr sollte daher ebenfalls eingegrenzt werden.

Zuletzt sollten allgemeine Angaben zur Alarmierungsanlage und des sonstigen Brandschutzmanagements (z.B. Evakuierungsübungen, Schulung des Personals, Sicherheitstreppenräume) erfolgen.

Nutzung der Anlage

Die Beschreibung der Nutzung ist insbesondere bei Multifunktionsgebäuden von Bedeutung, da hier unterschiedliche Nutzungen für die Simulation in Betracht gezogen werden müssen. Ein Stadion wird beispielsweise sowohl als Sportstätte sowie auch als Konzertbereich genutzt. Hierbei wird deutlich, dass unterschiedliche Fluchtwege und wechselnde Personendichten auftreten können. Eine Nutzung erfordert daher auch eine getrennte Durchführung einer Entfluchtungssimulation. Aus der Nutzung lassen sich notwendige Annahmen für die Eingabe in die Simulation ableiten, wie beispielsweise eine erwartete Personendichte oder eine Altersverteilung.

Abweichungen

Entfluchtungssimulationen werden in der Regel dann angewendet, wenn von bestehenden Bauvorschriften abgewichen werden soll. Um die Abweichungen durch die Baubehörde beurteilen zu können, sind diese in der Dokumentation zu erläutern und zu begründen.

Definitionen

Ein häufiges Problem bei der Prüfung von Gutachten ist, dass spezielle Begriffe ohne genauere Beschreibung verwendet werden. Da aber viele Begriffe nicht eindeutig definiert oder synonym gebraucht werden, wächst die Gefahr Begriffe missverständlich anzuwenden. Selbst zwischen den Richtlinien RiMEA und vfdb-Leitfaden, bestehen Differenzen, was die Verwendung von Begrifflichkeiten betrifft. In jedem Gutachten sind nicht eindeutig definierte Begriffe, wie z.B. die Reaktionsdauer oder die *pre-movement time*, mit Angabe der Quelle vorab zu definieren.

Hinzu kommt, dass die Verwendung der Begriffe zwischen den einzelnen Programmen immer abweichend ist. Aus der Programmbeschreibung in Kapitel 6 geht hervor, dass gerade hinsichtlich der Reaktionsdauer ist in den Programmen kein einheitlicher Begriff verwendet wird. Diese variieren zwischen *Reaction* (PedGo), *Alarm- und Verzögerungszeit* (ASERI), *Response Time* (SIMULEX) und *Start Time Range* (SimWalk). In der Dokumentation müssen diese Begriffe ebenfalls dargestellt und definiert werden.

Simulationsmodell

Da es für eine Prüfung einer Entfluchtungsanalyse nicht erforderlich sein kann, alle verwendeten Simulationsprogramme und deren Eigenschaften zu kennen, muss der Analyse eine allgemeine Programmbeschreibung vorangehen. Hierin sollte die elementare Funktionsweise bezüglich der Modellbildung erklärt werden. Neben der Bezeichnung des Programms und der Version, zählt vorab die Klassifizierung des benutzten Modells dazu. Angaben über die Intervalle der Aktualisierung der Berechnung (Updates) sind ebenfalls anzugeben [27]. Desweiteren ist zu erläutern, in welcher Weise die Geometrie in der Simulation abgebildet wird. Um einen Überblick über die resultierende Wegführung zu erhalten, sollte beschrieben werden, welche Faktoren für die Wegführung (z.B. Potenzialausbreitung) ausschlaggebend sind und inwiefern eine gezielte Führung der Personen möglich ist. Außerdem ist zu erläutern, über welche Parameter die Bewegung der Personen definiert werden und wie die Population aus Gruppen zusammengesetzt wird, um Angaben zu den Eigenschaften beurteilen zu können. In RiMEA wird zusätzlich beschrieben, dass der funktionale Zusammenhang und der Einfluss auf die Bewegung der verschiedenen Einstellungsparameter und Bauteile dokumentiert werden soll [27].

Ebenso ist die Ergebnisauswertung des jeweiligen Programms zu dokumentieren, damit gedeutet werden kann, wie beispielsweise eine statistische Analyse der Entfluchtungsauern oder etwaige Staubetrachtungen zustande kommen. Um sich von der Funktionsweise der Programme zu vergewissern, sind Hinweise zur Validierung der genutzten Simulation unter Angabe der Art und Quelle notwendig. Als weitere Anforderung nennt RiMEA, dass detaillierte Benutzerhandbücher der verwendeten Programme auf Anforderung zur Verfügung stehen sollen. Die Benutzerhandbücher der Programme SIMULEX, SimWalk und PedGo sind auf den Homepages der Hersteller zugänglich.

8.2 ANGABEN ZUR MODELLIERUNG

Geometrie

Auf vereinfachte Annahmen innerhalb der Bildung des Modells sollte hingewiesen werden. Gerade die Modellierung von Treppenräumen erfordert häufig einen höheren Aufwand. Bei speziellen Treppenräumen (z.B. zwei- oder dreiläufige Treppen

oder Spindeltreppen) ist es teilweise nicht oder nur unter erhöhtem Aufwand möglich, diese in der modellierten Geometrie korrekt darzustellen. Diese Bereiche sind bei entsprechend hohem Personenaufkommen durch die Reduzierung von Gehgeschwindigkeiten anfällig für eine Staubildung. Wird eine Treppe beispielsweise zu kurz modelliert, kann es zu einer Verzerrung bei Staubildung kommen, da dieser schneller abgebaut werden kann. Daher ist die Modellierung für Treppenräume gesondert zu dokumentieren und bei speziellen Treppenräumen etwaige getroffene Kompensationsmaßnahmen zu erläutern. Neben der Umsetzung der Modellierung ist zusätzlich die Angabe von Reduktionsfaktoren der Geschwindigkeiten auf Treppen anzugeben. Die Programmbeschreibungen haben deutlich gemacht, dass Geschwindigkeiten auf Treppen in unterschiedlicher Weise angenommen werden und sind deshalb gesondert zu dokumentieren.

Da gerade bei diskreten Modellen eine korrekte Abbildung der Ausgangsbreite nicht möglich ist, sollten die Zellbreiten der Ausgänge angegeben werden, da die Zellbreiten ausschlaggebend für den Personenfluss werden. Bei anderen Modellen reicht die einfache Angabe der modellierten Ausgangsbreite. Weitere Besonderheiten, wie beispielsweise Stufentribünen in Stadien, sind ebenfalls zu dokumentieren. Einrichtungsgegenstände müssen bei einer Verringerung der Durchgangsbreite des Fluchtweges modelliert werden.

Die angeordneten Ziele entsprechen dem gesicherten Bereich und müssen hinsichtlich ihrer Lage dokumentiert werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass die unmittelbare Anordnung von Zielbereichen hinter der letzten Tür zu kürzeren Entfluchungsdauern führen, da simulierte Personen aus der Simulation entfernt werden und damit keine Hindernisse für nachrückende Personen darstellen. Weiter wurde deutlich, dass die meisten Programme in der Lage sind, diesen in der Realität auftretenden Effekt zu berücksichtigen. Aus diesem Grunde ist bei der Modellierung zu beachten, dass das Ziel in entsprechendem Abstand zur letzten Tür anzuordnen ist. Dieser Abstand zur letzten Tür sollte mindestens 2 Meter betragen, um eventuelle Rückstaubildung hinter der letzten Tür in die Simulation miteinzubeziehen. Zum Vergleich: Bei einer freien Gehgeschwindigkeit von 1,0 m/s würde sich bei einer Anordnung des Ziels im Abstand von 2 Metern ohne Rückstaubildung eine vernachlässigbare Zu-

satzdauer von 2 Sekunden ausbilden. In ASERI müssen dazu Zwischenräume vor dem Außenbereich modelliert werden.

Eine Prüfung der Modellierung über die Eingabedateien wird in den meisten Fällen nicht möglich sein, da es notwendig ist, das Programm zu besitzen. Selbst bei der Vorlage der gesamten Projektdati ist zu einer Prüfung ein breites Basiswissen zum jeweiligen Programm notwendig. Prüfungen der Modellierung der Programme PedGo und SIMULEX sind zwar tendenziell möglich, erfordern jedoch einen hohen Aufwand für die Prüfung einer Simulation. Damit wird belegt, dass die ausführliche Dokumentation der Modellierung zwingend notwendig ist, um darzustellen, welche Vereinfachungsmaßnahmen getroffen wurden. Zur Visualisierung sollte das erstellte Modell in der Analyse dargestellt werden.

Szenarien

Bei einer Entfluchtungsanalyse sind immer mehrere Szenarien heranzuziehen, um Unsicherheiten abzudecken. Die Wahl der Szenarien ist dazu zu dokumentieren und zu begründen. Das grundlegende Szenario ist immer die jeweilige Nutzung der baulichen Anlage. Auf dieses bauen weitere Szenarien auf. Wie bereits in Kapitel 5.4 beschrieben, ist die Wahl weiterer anzusetzender Szenarien nur sehr vage beschrieben. Dazu kristallisierten sich allerdings zwei grundsätzliche Möglichkeiten der Bildung von Szenarien heraus. Zum einen ist eine Relativaussage durch den Vergleich von bauaufsichtlich vorgeschriebener mit abweichender Geometrie und Kompensationsmaßnahme möglich, zum anderen werden verschärfte Szenarien für die abweichende Geometrie vorgeschlagen. Ideal wäre die Kombination aus beiden Möglichkeiten um Plausibilitätsaussagen zu treffen. Aus den Forschungen von [53] wird deutlich, dass sich Simulationen sehr gut eignen um Relativaussagen zu treffen. Durch einen Vergleich eines Szenarios, das den bauaufsichtlichen Vorschriften entspricht, mit dem Szenario, das die Abweichungen und die Kompensationsmaßnahmen enthält, lässt sich bereits vergleichsweise unabhängig von der Entfluchtungsdauer schließen, inwiefern sich diese Maßnahmen auswirken. Als zusätzliche Szenarien sollten Veränderungen der Wegführung des von den bauaufsichtlichen Vorschriften abweichenden Szenarios herangezogen werden. Es empfiehlt sich, anlehnend an die Vorschriften des NFPA Life Safety Codes 101, einen Fall zu berücksichtigen bei dem 50% der Personen den Hauptaustgang als Rettungsweg benutzen. Ein weiterer

Fall sollte berücksichtigen, dass bestimmte Rettungswege versperrt sind. Anlehnend an die maritimen Vorschriften der IMO kann hier der Rettungsweg gesperrt werden, bei dem die längste Entfluchtungsdauer identifiziert wurde, solange keine Ergebnisse aus einer Brandsimulation vorliegen.

Sofern die maximale Personenzahl nicht bereits in den vorangehenden Szenarien berücksichtigt ist, sollte diese miteinbezogen werden. Den dargestellten Untersuchungen zufolge ist deutlich, dass mit steigender Personenzahl und steigender Dichte die Entfluchtungsdauer ansteigt. Hieraus abgeleitet, ist die Ermittlung der zu erwartenden Personenzahl von entscheidender Bedeutung für die Entwicklung der Entfluchtungsdauer oder potenzieller Staubildungen. Rettungswege sind nach §7 Abs. 4 der MVStättV [17] immer für die größtmögliche Personenzahl auszulegen. Gerade bezüglich der Bemessung der Rettungswege in Versammlungsstätten sind, aufgrund maximaler Auslastung aus wirtschaftlichen Gründen, Abminderungen bei der Bemessung der Personenzahl nicht gerechtfertigt [20]. Auch in der MBO § 36 Satz 2 ist festgelegt, dass die Breiten der Flure in Rettungswegen für den maximal zu erwartenden Verkehr ausgelegt sein müssen. Ansätze für die Ermittlung der Personenzahl sind in Bauvorschriften allerdings nur für Versammlungsstätten in der MVStättV geregelt. Andere Bauvorschriften liefern dahingehend keinen Aufschluss. Die konzeptionierten Richtlinien wie RiMEA oder der vfdb-Leitfaden für Ingenieurmethoden im Brandschutz liefern zwar Angaben für die Ermittlung der Personenzahl in Abhängigkeit der genutzten Flächen, sind aber rechtlich nicht bindend. Da die Bauvorschriften immer das maximal zu erwartende Personenaufkommen berücksichtigen, sollte dieses auch als ein „worst case“ Szenario für eine Simulation herangezogen werden. Eine Abweichung von den in RiMEA oder im vfdb-Leitfaden angegebenen Anfangsdichten sollten ausreichend begründet werden.

Weitere ergänzende Szenarien für die Entfluchtungsanalyse ergeben sich durch Sensitivitätsanalysen der Parametereinstellungen der benutzten Programme. Hierzu zählt zum Beispiel die Variation des Parameters Reaktionsdauer.

Eingabeparameter

Um die Annahmen zur Eingabe in die Simulation zu überprüfen, müssen diese vollständig dokumentiert werden. Dazu gehört zunächst die Angabe der simulierten Personenzahl und der jeweiligen Aufenthaltsorte vor der Fluchtbewegung. Zusätzlich

sind die definierten Ziele und die Fluchtwegführung zu den Zielen darzustellen. Eine reine Angabe von Potenzialfeldern dient zwar der Illustration, ist aber nur schwierig zu deuten. Eine Angabe der Personenspuren kann bei hohem Personenaufkommen ebenfalls sehr schnell unübersichtlich werden. Daher sind in der Regel zusätzliche Abbildungen zur Wegführung erforderlich.

Von weiterer Bedeutung ist die Dokumentation und Begründung der Parameter, die die Eigenschaften der Bewegung der Person beschreiben. Eigenschaften, die in allen betrachteten Programmen frei einstellbar sind, sind die Gehgeschwindigkeit und die Reaktionsdauer. Weitere Parameter sind ebenfalls zu dokumentieren und zu begründen. Die Personendaten für SIMULEX sind in den Konfigurationseinstellungen enthalten. Hier ist es zusätzlich erforderlich, benutzerdefinierte Personengruppen über die Konfigurationseinstellungen zu dokumentieren.

Geschwindigkeit

Wie bereits in Kapitel 4.3 verdeutlicht liegen typische Bewegungsgeschwindigkeiten von Personen ohne Mobilitätseinschränkungen in einem Bereich von etwa 0,5 bis 2,0 m/s bei einem Mittelwert von 1,34 m/s. Die Untersuchungen mit den Simulationsprogrammen haben gezeigt, dass steigende Geschwindigkeiten die Flüsse erhöhen können und damit die Entfluchtungsauern senken können. Außerdem wurde dargestellt, dass eine Verringerung der Schwankungsbreite der Geschwindigkeit zu niedrigeren Dauern bei Einhaltung des gleichen Mittelwertes führen. Bei der Prüfung und Erstellung von Entfluchtungssimulationen sollte daher eine höhere Schwankungsbreite mit in die Simulation einfließen. Sofern von einer unbekannten Personenzusammensetzung ausgegangen werden muss, sollten Geschwindigkeiten zwischen etwa 0,6 und 1,8 m/s bei einem Mittelwert von ungefähr 1,34 m/s liegen, um eine entsprechende Annäherung an die Realität zu gewährleisten. Abweichende Schwankungsbreiten können durch vorliegende Tabellen aus empirischen Untersuchungen begründet werden. Dies setzt voraus, dass bestimmte Personenklientele für die Gebäudenutzung ausgeschlossen werden können. Zum Beispiel ist in Einrichtungen wie Diskotheken selten mit einer Personengruppe „älter als 50 Jahre“ zu rechnen.

Um die Geschwindigkeiten und ihre Schwankungsbreite zu überprüfen, können dazu generierte Verteilungsdiagramme aus den Simulationen herangezogen werden. Durch Häufigkeitsangaben lässt sich damit auch die angesetzte Standardabweichung

chung überprüfen. Die Häufigkeitsverteilung sollte zunächst für die zugewiesenen Geschwindigkeiten aufgestellt werden, um die Eingaben zu überprüfen. Eine Darstellung der resultierenden Geschwindigkeiten kann zusätzlich erfolgen.

Reaktionsdauer

Die Einstellung der Reaktionsdauer setzt eine Bestimmung abhängig von den beschriebenen Kriterien in Kapitel 4.2.3 voraus.

Eine Simulation mit der Einstellung einer gleichzeitigen Bewegung aller Personen und dem additiven Zuschlag der maximalen Reaktionsdauer liefert in der Regel das konservativste Ergebnis durch das maximale Auftreten von Stauungen und der maximalen Reaktionsdauer. Das kann allerdings nicht bei jeder Geometrie gewährleistet sein. So ist es denkbar, dass sich bei unterschiedlicher Reaktionsdauer in anderen Bereichen Personenströme zusammenfließen und Stauungen verursachen.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass bei Simulationen die Einstellung der Reaktionsdauer nur nach entsprechender Anpassung gewünschte Reaktionsdauern liefern. Wichtig ist hierbei die Art der gewählten Verteilung zu kennen und die zusätzliche Angabe von Mittelwerten und Standardabweichungen.

Die Art, in der Reaktionsdauern in den Programmen verteilt werden, ist durchgehend unterschiedlich. Von den betrachteten Programmen ist die Variation der Verteilungen nur in PedGo und SIMULEX möglich. Hier kann beispielsweise zwischen den Einstellungen normalverteilt oder gleichverteilt gewählt werden, allerdings fehlt bisher die Einstellung der Lognormalverteilung. In den übrigen Programmen erfolgt die Verteilung der Reaktionsdauer auf die simulierten Personen gleichverteilt.

In den Untersuchungen wurde dargestellt, dass eine gleichverteilte Reaktionsdauer zu einem entspannteren Fluss und damit auch zu einer Senkung der reinen Laufdauer führt. Empirische Untersuchungen haben ergeben, dass eine Gleichverteilung in den Reaktionsdauern nicht unbedingt gegeben ist. Wie in Kapitel 4.2.3 beschrieben, folgt die Verteilung der Reaktionsdauer einer Lognormalverteilung. Charakteristik der Lognormalverteilung ist, dass ähnlich der Normalverteilung ein Zeitbereich auftritt, bei dem viele Personen mit der Fluchtbewegung beginnen. Im Gegensatz zur Normalverteilung gibt es dann noch einen Anteil, bei dem die Entscheidung zur Flucht lange hinausgezögert wird. Dieser Bereich ist dann eher der Gleichverteilung ähnlich. Die Folge der Lognormalverteilung ist, dass auch bei einer breiteren Zeit-

spanne für den Beginn der Fluchtbewegung hohe Staubildungen auftreten können, die dann die Entfluchtungsdauer verlängern. Durch eine reine Gleichverteilung kann dieser Zustand nicht erreicht werden und bewirkt unter Umständen kürzere Entfluchtungsauern.

Um eine Lognormalverteilung anzustreben, ist bei allen Programmen die Kombination aus mehreren Gruppen mit verschiedenen Reaktionsauern notwendig.

Wie die Reaktionsauern den Personen zugewiesen wurden, lässt sich durch eine Häufigkeitsverteilung ausgeben und sollte zur Prüfung vorliegen. Allerdings erfordert die Erstellung einer solchen Verteilung aus SIMULEX das manuelle Auslesen aller Personendaten.

Körpermaße

Der 97,5%-Wert der Körperbreite ermittelt aus empirischen Ergebnissen beträgt 0,50 m Körperbreite und 0,27 m Körpertiefe ohne Bekleidung. Die mittleren Maße sind für Breite und Tiefe 4 cm geringer. Wesentlich geringere Maße, ausgehend vom Mittelmaß, können nur dann angesetzt werden, wenn mit einer hohen Anzahl von Kindern gerechnet werden kann, wie beispielsweise in Grundschulen.

Die Verteilung der Maße der Personen lassen sich in ASERI und SimWalk ebenfalls über Häufigkeitsverteilungen ermitteln. Durch diese Häufigkeitsverteilungen lassen sich die prozentualen Aufteilungen der Körperproportionen auf die Personen überprüfen und sollten zur Verdeutlichung in der Analyse angegeben werden.

Verteilung der Personen auf die Ausgänge

Mit den Parametereinstellungen *Geduld* (PedGo) oder *Dynamische Ausgangswahl* und *Balance* (ASERI) ist eine gleichmäßigere Verteilung von Personen auf die Ausgänge möglich. Diese Einstellungen arbeiten mit einem Schwellenwert bei Staubbildung vor Ausgängen. Die Überschreitung des eingestellten Schwellenwerts führt dazu, dass der angestrebte Ausgang gewechselt wird. Hierzu sind jedoch keine Untersuchungen bekannt, womit dieses Verhalten quantifiziert werden könnte. Dass dieses Verhalten auftritt ist unbestritten. So geht aus dem Untersuchungsbericht zum Brand im Nachtclub „The Station“ [49] hervor, dass Personen aufgrund der Überfüllung des Hauptagangs den Weg ändern, jedoch lässt sich hieraus nicht die prozentuale Verteilung oder eine Zeitangabe allgemeingültig ableiten. Dieses Verhalten setzt

wiederum voraus, dass alternative Ausgänge bekannt oder sichtbar sind. Anwendungen dieser Parameter in einer Simulation eines Entfluchtungsfalles zum Nachweis über die Entfluchtungsdauer, sollten also nur begrenzt erfolgen, da eine absolut gleichmäßige Verteilung auf die Ausgänge nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit auftritt. Hierdurch kann der Entwicklung eines „worst case“ Szenarios entgegenge wirkt werden, da wie in Kapitel 5.2 dargestellt, ungleichmäßigere Verteilungen auf die Ausgänge im Realfall auftreten. Bei der Prüfung sollte hierzu auf eine Mindestungleichförmigkeit geachtet werden.

Freie Parameter

Bis auf SIMULEX, sind in allen Programmen weitere freie Parameter vorhanden, die zum Teil erheblichen Einfluss auf die Entfluchtungsdauer besitzen. Im Falle von ASERI, wäre das beispielsweise die Bewegungsart. Dem ASERI Benutzerhandbuch zufolge [64], soll auf diese Einstellung für die Ermittlung von Entfluchtungsdauern innerhalb eines schutzzielorientierten Sicherheitskonzeptes verzichtet werden.

Speziell in PedGo sind zusätzlich einstellbare Parameter vorhanden, für die bisher wenige empirische Untersuchungen vorhanden sind.

Gerade der Parameter Trödelwahrscheinlichkeit fasst verschiedene nicht erfassbare Einflüsse zusammen. Dieser dient in erster Linie aber der Variation der Geschwindigkeit, sodass ein Mindestwert von 10% bei der Einstellung der Personenparameter eingehalten werden sollte. Weiter werden hiermit durch Erhöhung Einflüsse berücksichtigt, die die Ruhepausen von Personen beschreiben. Ruhepausen werden beispielsweise bei der Fluchtwegführung über Treppen in Hochhäusern festgestellt oder bei der Orientierung in komplexen Gebäuden.

Dass sich die Gehgeschwindigkeit bei komplexen Gebäuden aufgrund von Orientierungsschwierigkeiten verringert, ist bereits in den Untersuchungen der Reaktionsdauer von [31] ist vermerkt. Vorläufige Untersuchungen der Katastrophe des World Trade Centers haben ergeben, dass bei der Entfluchtung von Hochhäusern Personen Ruhestopps bei der Entfluchtung über Treppen einlegen [76]. Diese erhöhen sich mit steigender Geschosshzahl unabhängig vom Body Mass Index.

All diese Parameter sind bisher aber noch schwierig quantifizierbar. Daher ist in der Analyse die Auswirkung auf den Entfluchtungsablauf zu dokumentieren und die Einstellung zu begründen.

Begehen durch Rauch

Es ist bereits häufiger festgestellt worden, dass Personen unter Umständen dazu neigen ihren Weg ins Freie durch Brandrauch wählen, sofern eine bestimmte Sichtweite vorhanden ist [32];[33]. Manche Programme sind in der Lage, den Einfluss von bestimmten Brandgasen auf die Bewegung von Personen zu berücksichtigen (z.B. ASERI). Wirken Rauchgase auf Personen ein, so verringert sich ihre Geschwindigkeit abhängig von der Toxizitätskonzentration bis zur Bewegungsunfähigkeit. Die Eingabedaten der Schadstoffkonzentrationen für eine Entfluchtungssimulation stammen aus beispielsweise aus Brandsimulationen. Diese sind aber bisher lediglich imstande abzuschätzen, für welche Dauer ausreichend hohe raucharme Bereiche vorhanden sind. Eine realitätsnahe Abschätzung der Schadstoffkonzentration ist derzeit nicht möglich und kann daher nicht genutzt werden um Vertretbarkeitsgrenzen hinsichtlich der Dauer der Nutzung von Fluchtwegen zu erweitern [73]. Ein Begehen von flüchtenden Personen durch Rauch ist daher nicht anzunehmen.

8.3 ERGEBNISSE

Statistische Auswertung

Den Angaben nach RiMEA, sollen für eine statistische Analyse mindestens 10 Simulationsdurchläufe erfolgen. Im Gegensatz zu PedGo und ASERI, liefern deterministische Modelle, wie SIMULEX, allerdings für einen Anfangszustand ein identisches Ergebnis. Um dennoch mehrere Durchläufe zu realisieren, muss in diesen Modellen die Population neu verteilt werden. Dies kann durch eine manuelle Neuberechnung der Verteilung der simulierten Personen erfolgen. Hiermit werden Geschwindigkeit und/oder Positionen der Personen neu verteilt, womit erst eine statistische Auswertung möglich wird. In SIMULEX gibt es dazu die Option *Update Characteristics*, hiermit werden in den angegebenen Grenzen Populationsgruppen die individuellen Geschwindigkeiten neu zugeteilt.

Angaben zur statistischen Analyse der Entfluchtungsdauern, sollten dazu die Aufstellung der minimalen, maximalen, mittleren und signifikanten Gesamtentfluchtungsdauer enthalten. Falls nur 10 Simulationsdurchläufe gefahren werden, entspricht die signifikante Entfluchtungsdauer der maximalen Entfluchtungsdauer, da rein rechne-

risch nur die maximale Dauer größer als 95% der Gesamtheit der Entfluchtungsauern ist.

Entfluchtungsdauer

Entfluchtungsauern ergeben sich zunächst aus der statistischen Analyse für ein untersuchtes Szenario. Um Vergleiche zu ermöglichen und Relativaussagen zu treffen, sind diese tabellarisch zusammenzustellen. Ein untersuchtes Szenario umfasst dazu mindestens die Minimal-, die maximale und die mittlere Dauer. Bei mehr als 10 Simulationsdurchläufen ist zusätzlich die signifikante Entfluchtungsdauer anzugeben.

Werden nur die Entfluchtungsauern in der Analyse betrachtet, so kann es der Fall sein, dass unterschiedliche Simulationen unterschiedliche Ergebnisse liefern. Aus [53] ist zu entnehmen, dass ungleiche Entfluchtungsauern mit unterschiedlichen Personenflüssen einhergehen. Außerdem ist bei optimaler Auslastung der Ausgänge eine Untergrenze für die Entfluchtungsdauer festgestellt worden. Hierdurch entstehen drei Kriterien, die eine Plausibilitätsprüfung der Entfluchtungsdauer ermöglichen. Zunächst kann dazu der mittlere Fehler u der Gleichförmigkeit ermittelt werden. Er gibt einen Anhaltspunkt, wie gleichmäßig die Personen auf die Ausgänge verteilt wurden. Ein geringer Prozentsatz bedeutet eine annähernd gleiche Verteilung.

Weitere Kriterien sind die mittleren Angaben zu globalen Flüssen über die gesamte Ausgangsbreite und spezifischen Flüssen zu den einzelnen Ausgängen. Der globale Fluss entspricht der Steigung der allgemeinen Entfluchtungskurve. Der spezifische Fluss entspricht der Steigung der Entfluchtungskurve der einzelnen Ausgänge. Angemerkt sei hier, dass zur Berechnung der Flüsse nicht die gesamte Entfluchtungsdauer herangezogen werden sollte, da durch Reaktionsdauer und Laufdauer zum Ziel die Flüsse verfälscht werden. Der ideale Zeitraum für die Berechnung ist der, bei dem die Steigung der Entfluchtungskurve konstant ist. Alternativ sollte sonst die Zeitspanne von der ersten bis zur letzten Person des jeweiligen Ausgangs für die Berechnung genutzt werden.

Richtwerte zur Beurteilung der Flüsse sind sowohl in RiMEA als auch im vfdb-Leitfaden für Ingenieurmethoden enthalten.

Um die Entfluchtungsauern zu bestätigen, bleibt natürlich noch die Möglichkeit der Vergleichsrechnung durch Handrechenverfahren oder anderer Personenstromsimulationen.

Personenflüsse

Die Angabe der Personenflüsse ermöglicht es Plausibilitätsaussagen über die Entfluchtungsauern zu treffen. Hierzu ist einerseits eine Angabe eines globalen (spezifischen) und die Angabe eines spezifischen Flusses bezogen auf die jeweiligen Ausgänge notwendig. Dazu muss vorangehend dokumentiert werden,

- welche Gesamtausgangsbreite vorhanden ist,
- welche einzelnen Ausgangsbreiten vorhanden sind,
- wie viele Personen simuliert wurden,
- wie viele Personen den jeweiligen Ausgang benutzt haben und
- welche Entfluchtungsauern (gesamt und je Ziel) ermittelt wurden.

Aus diesen Angaben ist die Berechnung der jeweiligen Flüsse in P/ms möglich. Der globale Fluss ist der Fluss, der sich über alle Personen und Ausgänge berechnet. Einfache Berechnungen ermitteln hier den Fluss über die Gesamtentfluchtungsauer. Sinnvoller ist es aber, die Dauer zu wählen zwischen dem Zeitpunkt an dem die erste Person das Ziel betritt bis zum Zeitpunkt an dem die letzte Person am Ziel eintrifft. Ansonsten würde der Fluss die Laufdauer der Personen, die für die Bewegung zum Ziel benötigt wird, beinhalten. Dies führt dann zu einer Verfälschung des Flusses, da in der Dauer der Bewegung kein Fluss an den Ausgängen vorhanden ist. Der spezifische Fluss über die einzelnen Ausgänge sollte in gleicher Weise berechnet werden. Hierzu ist ebenfalls eine Dokumentation der Berechnung notwendig.

Neben der Berechnung ist ebenfalls die Ausgabe von Personenflüssen über ein Diagramm möglich. Diese Visualisierung hat den Vorteil, dass Spitzenwerte des Flusses direkt sichtbar werden. Ein beispielhaftes Diagramm für einen Flussverlauf in Abhängigkeit der Entfluchtungsauer ist in Abbildung 61 dargestellt.

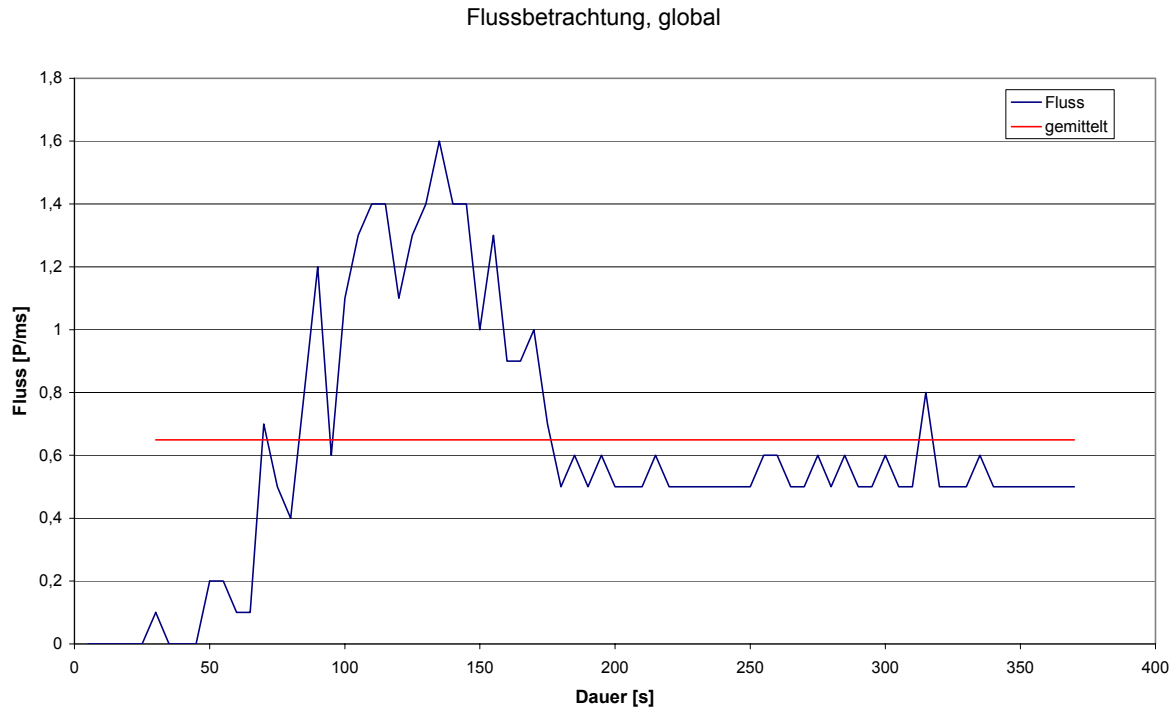


Abbildung 61: Flussdiagramm in Abhängigkeit der Dauer aus SIMULEX

Die oben dargestellte Abbildung zeigt den Verlauf eines Flusses über die Gesamtentfluchtungsdauer. Dazu wurde der Fluss in einem Intervall von 5 Sekunden gemittelt und für das entsprechende Zeitintervall aufgetragen (blaue Linie). Gut erkennbar ist bei dieser Art der Darstellung der maximal auftretende Fluss. Zusätzlich lässt sich der daraus mittlere berechnete spezifische Fluss (rote Linie) über die Dauer vom Betreten des Zieles der ersten bis zur letzten Person über eine Linie mit der Steigung Null darstellen.

Entfluchungskurven

Entfluchungskurven stellen den Entfluchtungsverlauf grafisch dar und ermöglichen so einen Überblick über den gesamten Ablauf oder den Entfluchtungsverlauf von Teilbereichen. Hierbei lassen sich unter anderem Rückschlüsse auf die simulierte Personenanzahl, die Personenaufteilung und die Entfluchtungsdauern einzelner oder aller Bereiche ziehen. Zusätzlich ist durch die Kurven identifizierbar, wie hoch die Personenbelegung einzelner Bereiche ist und wo und wann Stauungen auftreten können. Durch eine grafische Darstellung ist es außerdem möglich, die Stellen zu identifizieren an denen Störungen des Ablaufs auftreten, um diese nachträglich ge-

nauer zu untersuchen. Auf der Abszisse wird dazu die Dauer aufgetragen und auf der Ordinate die Personenanzahl. Es sind dazu drei Darstellungsarten möglich. Die globale Entfluchtungskurve zeigt den Ablauf für alle Personen über alle Bereiche. Sie gibt an zu welchem Zeitpunkt eine bestimmte Anzahl von Personen das Ziel erreicht hat. Hieraus lassen sich die Gesamtentfluchtungsdauer und die simulierte Personenanzahl ableiten. Die Steigung dieser Kurve entspricht dem globalen Fluss. Der globale Fluss ist der Fluss der über die gesamt vorhandene Ausgangsbreite gemessen wird.

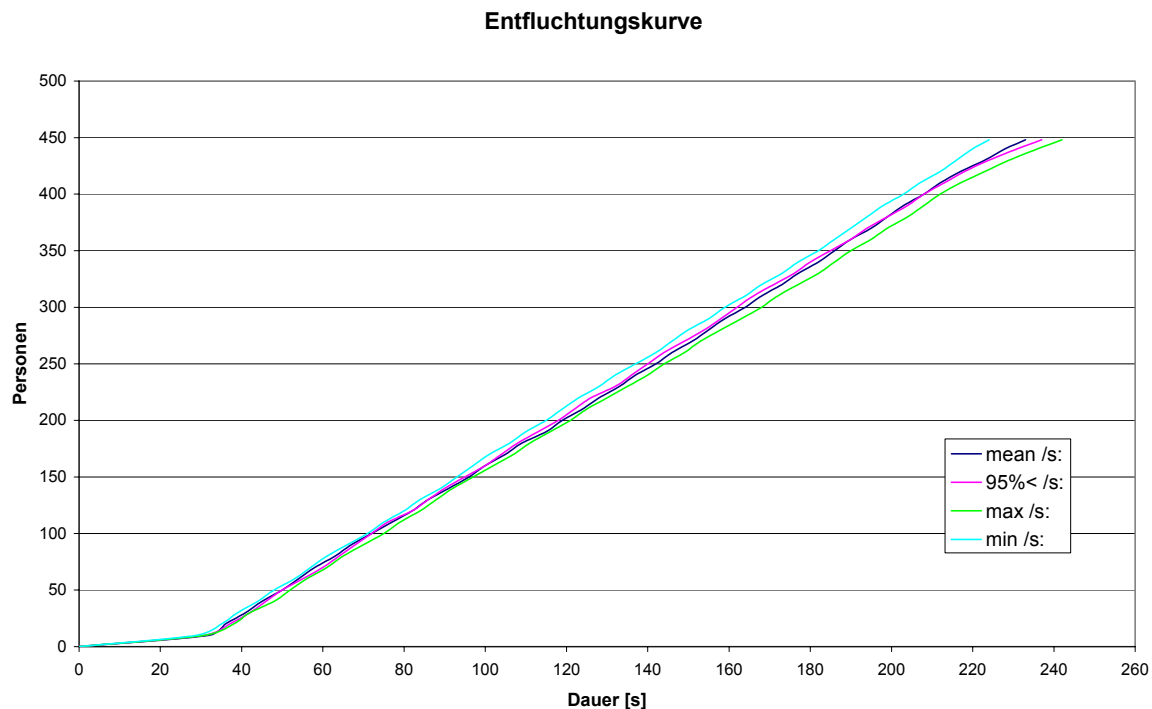


Abbildung 62: Entfluchtungskurve aus PedGo

In PedGo kann die Entfluchtungskurve mit allen statistisch notwendigen markanten Dauern ausgegeben werden. Dazu sind Daten wie die Minimal-, Maximaldauer und die mittlere Dauer aufgetragen werden. Zusätzlich ist die nach RiMEA bezeichnete signifikante Entfluchtungsdauer durch die Darstellung der 95%-Wert Kurve abgebildet. Durch die Darstellung aller markanten Durchläufe ist so außerdem die Zeitspanne zwischen den einzelnen Dauern abzulesen.

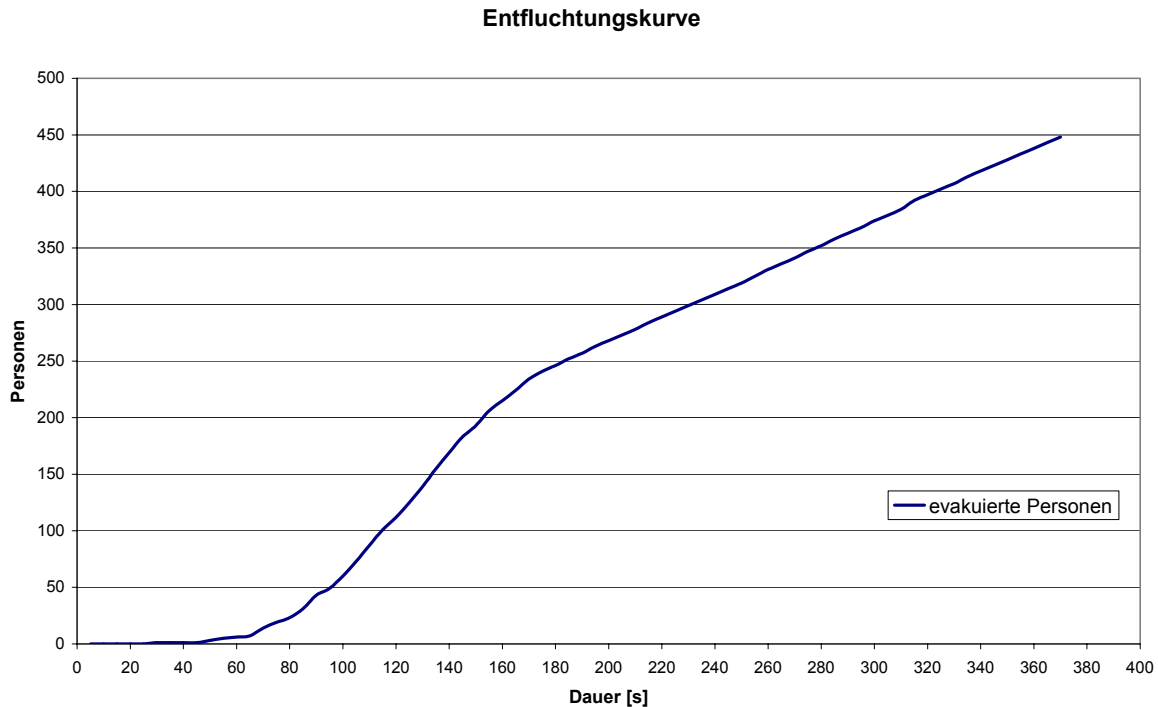


Abbildung 63: Beispiel einer mit SIMULEX erstellten Entfluchtungskurve

In anderen Programmen muss für eine statistische Auswertung die Bestimmung der Kurven manuell erfolgen. Deshalb ist am Beispiel der Entfluchtungskurve für SIMULEX nur eine Kurve vorhanden.

Allgemeingültig lässt sich durch die Entfluchtungskurve feststellen, dass je größer die Steigung der Kurven ist, desto höher ist die Kapazität des Ausgangs oder der globale Personenfluss. Ist keine Steigung vorhanden, so erreicht keine Person den gesicherten Bereich und es ist kein Fluss vorhanden. Ein Bereich ohne Steigung im mittleren Zeitraum würde damit einen Stau bedeuten. Ein Abflachen der Steigungen bedeutet, dass in einem Bereich der Fluss sinkt. Dies kann beispielsweise auch durch Stauungen oder ungleichmäßige Auslastungen hervorgerufen werden.

In beiden Beispielen ist sichtbar, dass am Anfang der Entfluchtung die Steigung der Kurve sehr flach ist. Das bedeutet, dass in dieser Zeit keine oder nur wenige Personen den gesicherten Bereich erreichen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass zuerst die Reaktionsdauer abgelaufen sein muss und der Weg von der individuellen Standposition bis zum Ziel zurückgelegt werden muss. Aus der globalen Entfluchtungskurve lassen sich so bereits über eingestellte Reaktionsdauern schließen. Im Laufe der Zeit steigt die Steigung an. Die maximale Steigung ist erreicht, wenn alle gesicherten Bereiche von Personen betreten werden. Flache Steigungen lassen sich häufig ge-

gen Ende der Entfluchtung feststellen. Das ist dann der Fall, wenn durch Nachzügler oder besser gesagt einzelne Personen für den Ablauf entscheidend sind.

Die Entfluchungskurve für einzelne Ausgänge beschreibt dieselbe Situation wie die globale Entfluchungskurve, jedoch erfolgt hier eine Beschreibung der Dauern bezogen auf die einzelnen Ausgänge. Hieraus lassen sich die Zuordnung der Personenzahl und die Entfluchungsdauer der einzelnen Ausgänge entnehmen. Auch sind dadurch Aussagen über eine gleichförmige oder ungleichförmige Personenverteilung möglich. Falls die Dauern für alle Ausgänge gleich sind, liegt eine gleichförmige Verteilung vor.

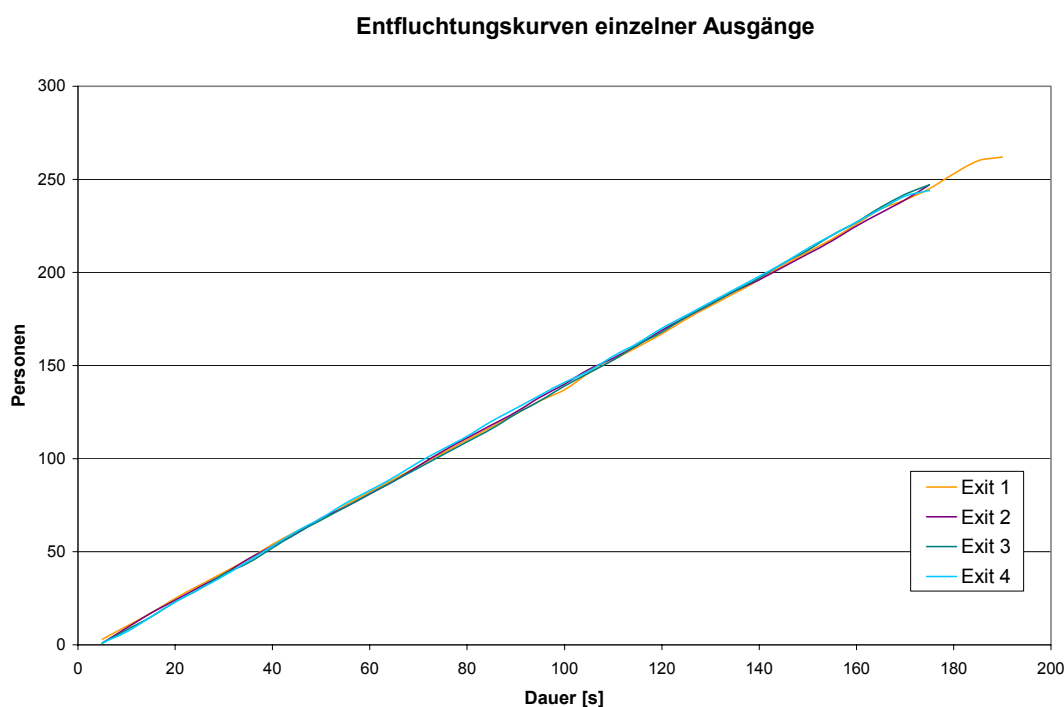


Abbildung 64: Entfluchungskurve für einzelne Ausgänge mit SIMULEX

Die Darstellung der Entfluchungskurve zeigt einen Raum mit 4 gleichgroßen Ausgängen. Daher ist auch die Steigung bzw. der Fluss der einzelnen Ausgänge gleich. Weiter ist sichtbar, dass nur Exit 1 eine längere Dauer und eine höhere Personenzahl zeigt. In diesem Fall ist also die Verteilung auf die Ausgänge annähernd gleichförmig. Die Kurve mit der längsten Dauer gibt zugleich auch die Gesamtentfluchungsdauer an. Diese Art der Kurven ist mit allen betrachteten Programmen möglich.

Eine noch differenziertere Kurve beschreibt die Entleerungsdauern für einzelne Bereiche. Sie beschreibt die vorhandene Anzahl der Personen in einem untersuchten

Bereich in Abhängigkeit der Zeit. Hiermit sind Angaben über Staubildungen, Personenflüsse und Personendichten für die untersuchten Bereiche möglich. Im Gegensatz zu den vorangehenden Kurven, kann die Anzahl der Personen im Laufe der Zeit sowohl zu- als auch abnehmen. Dies hängt vom betrachteten Bereich ab.

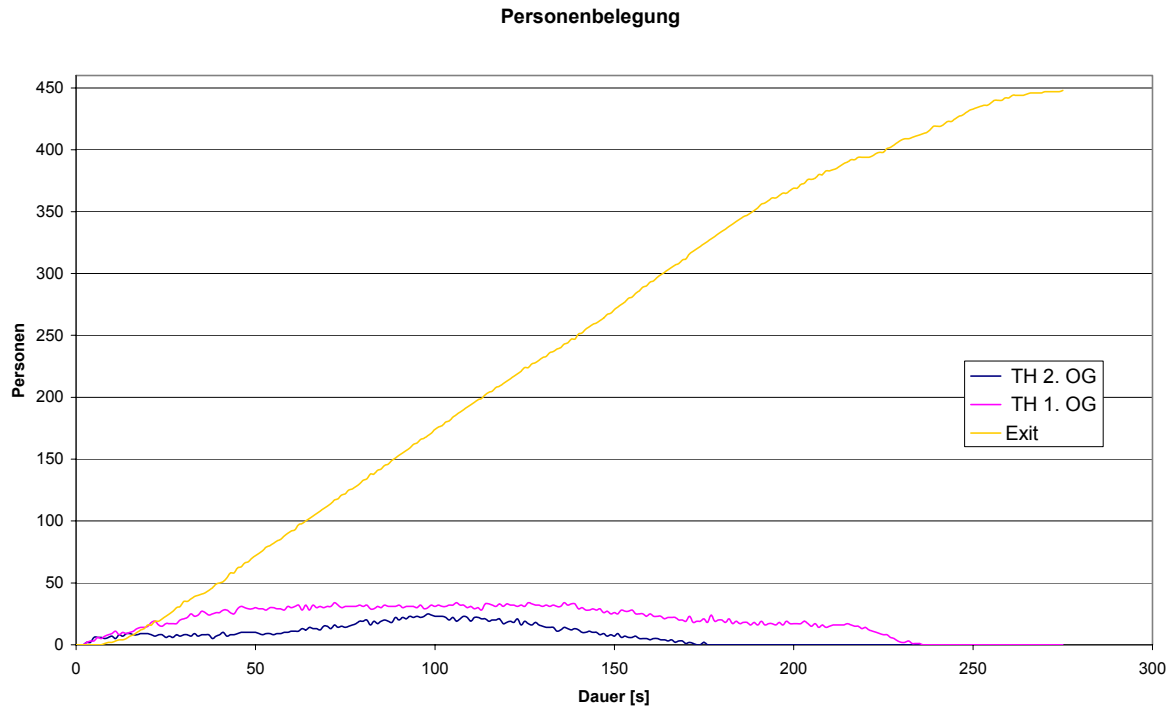


Abbildung 65: Personenbelegung für Teilbereiche und Darstellung der Entfluchtungskurve am Beispiel von PedGo

Die Kurve zeigt die Personenbelegung zweier Treppenhäuser. Sichtbar ist, dass es zunächst zu einem Anstieg der Personenzahl durch den Zufluss kommt. Die Personenzahl bleibt über einen gewissen Zeitraum konstant und nimmt danach wieder ab, da diese Bereiche letztendlich geleert werden. Aus den beiden Personenbelegungskurven kann beispielsweise gefolgert werden, dass im Bereich des Treppenhauses des ersten Obergeschosses mit erhöhter Staubildung zu rechnen ist, da beide Geschosse mit gleicher Personenanzahl und Reaktionsdauer belegt sind. Hier fließen die Personenströme aus dem ersten und zweiten Obergeschoss zusammen.

In der von ASERI ausgegebenen Entfluchtungskurve sind alle Entfluchtungskurven in einem Diagramm vereint. Die Ausgabe ist allerdings auch getrennt möglich.

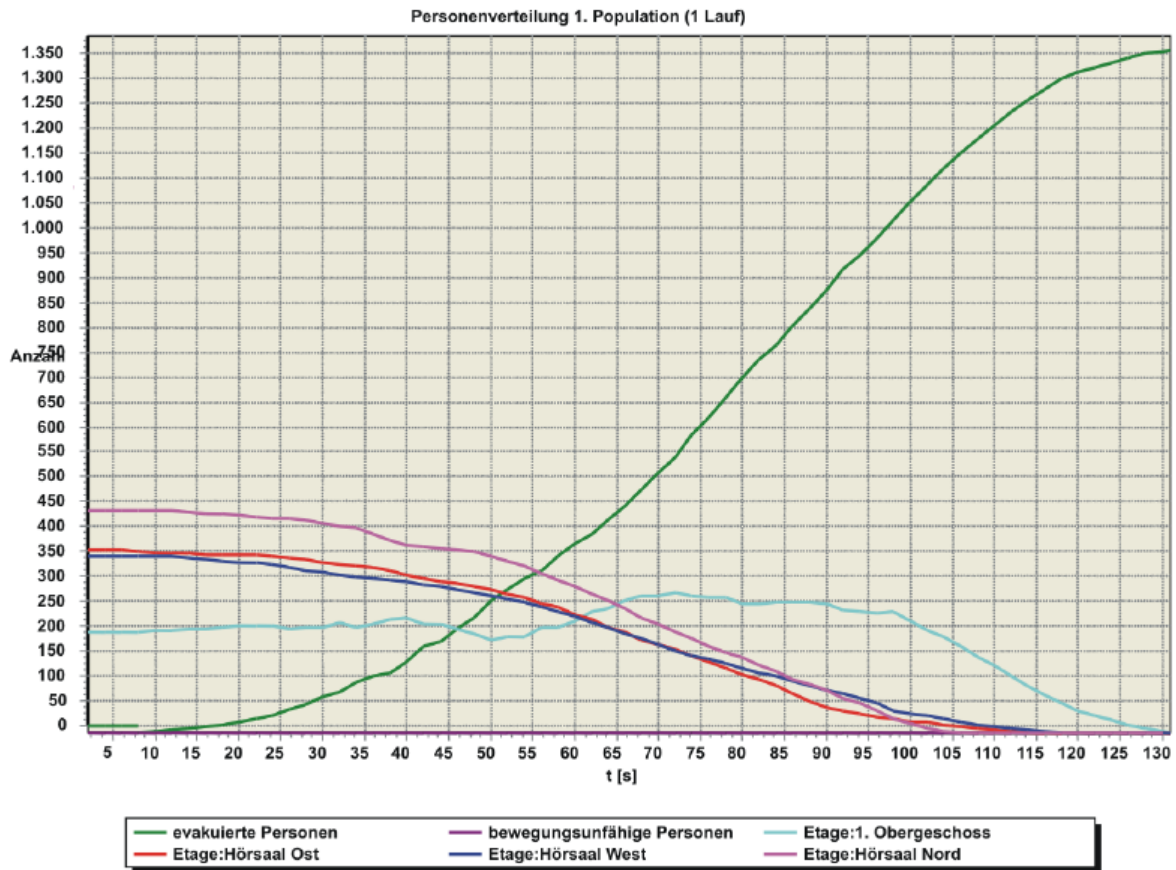


Abbildung 66: Darstellung der Entfluchtungskurve (Personenverteilungsgraph) aus ASERI [68]

Die in Abbildung 66 dargestellte Kurve für die evakuierten Personen entspricht einer globalen Entfluchtungskurve. Mit den anderen in der Abbildung dargestellten Kurven wird die Personenbelegung in einzelnen Bereichen in Abhängigkeit der Zeit beschrieben. Gut sichtbar ist in dieser Darstellung, dass bis zu einer Dauer von etwa 15 Sekunden die Etagen ungeleert bleiben. Danach nimmt die Anzahl der Personen mit der Zeit ab. Entfluchtungskurven für einzelne Ausgänge sind hier nicht dargestellt.

Entfluchtungskurven für einzelne Bereiche sind nicht mit allen betrachteten Programmen erstellbar. In SIMULEX ist die Kurve nur für Treppenhäuser erstellbar, da zusätzlich zur Aufzeichnung der Ziele nur die Anzahl der Personen über die Verknüpfungen zu den Treppenhäusern aufgezeichnet wird. In ASERI und PedGo sind die Kurven für alle definierten Bereiche erstellbar. In SimWalk ist eine Erstellung dieser Kurven nur bedingt möglich. Durch die Anordnung von Wartepunkten mit der Wartedauer Null können Aussagen getroffen werden, wann ein bestimmter Bereich geleert ist. Dichteaussagen der betrachteten Bereiche können dann über die Dichteabbil-

dungen getroffen werden. Allerdings ist mit allen Programmen eine visuelle Auswertung durch Betrachtung der Animation möglich.

Welche Bereiche in der Entfluchtungskurve enthalten sein sollen, ist von der baulichen Anlage und der individuellen Fluchtsituation abhängig. Allgemein sind die Bereiche aufzuführen, die von besonderer Bedeutung für die Entfluchtung sind. Der Übersichtlichkeit halber sollten Entfluchtungskurven einzelner Bereiche bei mehrgeschossigen Gebäuden auf die Etagen, die Treppenhäuser und Flure oder große Räume mit hoher Personenbelegung begrenzt werden. Gebäude mit weniger Geschossen können differenzierter betrachtet werden.

Animation

Die Animation liefert einen dynamischen Überblick über den Entfluchtungsablauf. Gerade für Genehmigungsbehörden, die in der Regel nicht oft mit der Prüfung einer Entfluchtungsanalyse betraut werden, ist die Animation von einer häufig unterschätzten Bedeutung. Durch die Animation lassen sich insbesondere die Entwicklung und Größe der Stauungen unmittelbar betrachten. Außerdem sind direkt die Fluchtwegverläufe und die Verteilung der Personen sichtbar. Auch lassen sich teilweise Annahmen in der Modellierung und der Auswirkung erkennen, ohne die entsprechenden Eingabedaten zu kennen.

Die Animation sollte daher für die Erstellung einer Entfluchtungsanalyse vorgeschrieben werden. Alle in dieser Arbeit betrachteten Programme sind in der Lage den Entfluchtungsverlauf zu visualisieren. Auch die Darstellung separater Ebenen ist für die Visualisierung möglich. Einziges Problem ist, dass ein gängiges Format der abspielbaren Videodatei nur von PedGo und ASERI automatisch ausgegeben wird. So muss bei der Weitergabe einer Animation auch die Weitergabe zusätzlicher Software erfolgen.

Screenshots

Screenshots ermöglichen den Entfluchtungsablauf in Bildern innerhalb der Analyse darzustellen. Da in den betrachteten Programmen die Zeitintervalle für die Erstellung von Screenshots variabel sind, ist es keine Schwierigkeit weitere Bilder für die Dokumentation des Entfluchtungsablaufes der Analyse hinzuzufügen. Nach der Diskussion zu der Erstellung von Evakuierungsgutachten im RiMEA Workshop vom

26.02.2008 [74] wurde dazu vorgeschlagen, Abbildungen in Intervallen von 10% der Gesamtentfluchtungsdauer der Analyse hinzuzufügen. Bei Gebäuden mit wenigen Geschossen ist diese Aufteilung sinnvoll, jedoch würde die Darstellung jedes Geschosses beispielsweise bei einem Hochhaus mit Sicherheit den Rahmen einer Entfluchtungsanalyse sprengen, daher müssen auch hinsichtlich der Darstellung der Screenshots weitere geeignete Kriterien festgelegt werden. Auch wird wieder deutlich, dass die Videoanalyse in solchen Fällen ein geeigneteres Mittel für die Auswertung von Entfluchtungsabläufen ist. Forderung muss hier sein, dass in jedem Fall ein Screenshot mit der Anfangssituation aller mit Personen belegten Geschosse in der Dokumentation vorhanden sein muss, um die jeweiligen Personenbelegungen der einzelnen Bereiche und die Anfangspersonendichte beurteilen zu können. Außerdem muss die Regel sein, dass aus den Screenshots die Größe, die Dichte und die Dauer von etwaigen auftretenden Stauungen hervorgehen.

Staubetrachtung

Automatisierte Ausgaben über das Auftreten von Größe und Dauer von Personen-dichten sind nur über die Programme PedGo und SimWalk möglich. Die Art der Ausgabe ist jedoch variabel einstellbar. Die Kriterien, die zur Ausgabe genutzt werden, sind daher gesondert aufzuführen. In PedGo muss daher dokumentiert werden, welcher Grenzwert relativ zur Entfluchtungsdauer eingestellt wurde. In SimWalk ist dazu die Angabe des LOS-Konzeptes notwendig, welches für die Darstellung des Bildmodus *Density* verwendet wurde. Der Bildmodus *Loads* in SimWalk verdeutlicht wie viele Personen insgesamt einen bestimmten Bereich betreten haben, lässt allerdings nur indirekt auf eine Dichte schließen, da es sich lediglich um eine Aufsummierung handelt. Wie beim Bildmodus *Density*, ist auch für den Modus *Loads* die Angabe der Legende zur Deutung der Farbabstufungen erforderlich.

In anderen Programmen können Staubetrachtungen entweder über die Kurve der Personenbelegung oder manuell über eine Abfolge von Screenshots dargestellt werden. Gerade aus der Personenbelegungskurve ist die Angabe der Dichte innerhalb eines Bereiches zu errechnen. Durch Screenshots sind unter anderem die Größe, die Dauer und die Dichte der Stauungen ersichtlich und sollte daher in der Analyse dokumentiert werden.

Zur Bewertung können die Level-of-Service Konzepte und die Angaben aus RiMEA benutzt werden. Allerdings sei hier nochmals erwähnt, dass ein Stau ohne äußere Einflüsse noch keine Gefahrensituation darstellt. Insbesondere dort, wo Stauungen erwartet werden, ist das Verhalten von Personen anders (z.B. Personen im Sportstadion).

Beurteilung

Jede Entfluchtungsanalyse muss am Ende vom Ersteller einer Entfluchtungsanalyse bewertet werden. Dies schließt etwaige Vorschläge zu Optimierungs- und Verbesserungsmaßnahmen ein. Auch auf Problemstellen sollte gesondert hingewiesen werden.

8.4 ZUSAMMENFASSUNG WESENTLICHER BEURTEILUNGSKRITERIEN

Bei einer Prüfung der Analyse ist vorab zu kontrollieren, ob alle notwendigen Inhalte vorhanden sind. Wie bereits erwähnt, ist eine Prüfung der Modellierung nur schwer durchführbar, daher sollte hier der höchste Wert auf die Modellierung der Längenausdehnung und Proportionen, sowie der Modellierung von Treppenhäusern und Ausgängen gelegt werden. Desweiteren sollte ein hoher Wert auf die Entwicklung der unterschiedlichen Szenarien gelegt werden, da eine Aussage über die Entfluchtungsqualität nur dann erfolgen kann, wenn auch mehrere Szenarien in die Analyse herangezogen wurden. Der nächste Schritt muss sich mit der Dokumentation und der Umsetzung der Eingabeparameter, dargestellt in Häufigkeitsverteilungsdiagrammen, befassen. Zur Beurteilung liefern hier RiMEA und der vfdb-Leitfaden für Ingenieurmethoden Richtwerte. Freie Parameter bedürfen einer Angabe der Auswirkung auf die Entfluchtungsdauer. Ein Begehen durch Rauch sollte aufgrund der Problematik der Ermittlung der Schadstoffkonzentration im Rauch abgelehnt werden.

In den Ergebnissen ist vor allem darauf zu achten, dass eine statistische Analyse durchgeführt wurde, um weitere Unsicherheiten auszuschließen. Die Plausibilität der Entfluchtungsdauer kann zur ersten Einschätzung durch die Angabe von Personenflüssen und der Gleichförmigkeit überprüft werden. Richtwerte zu Personenflüssen sind ebenfalls im vfdb-Leitfaden und der RiMEA vorhanden. Weitere Betrachtungen und Beurteilungen müssen über Stauungen erfolgen, die Beurteilungskriterien dazu sind allerdings umstritten.

8.5 ZUSAMMENFASSUNG DER INHALTE DES LEITFADENS

1. Aufgabenstellung

- Beschreibung der ausgeführten Maßnahmen
- Hinweis auf genutzte Simulation
- Beschreibung der für die Bewertung genutzten Ergebnisse

2. Schutzziel

- Konkretisierung des Schutzzieles hinsichtlich der Personenrettung

3. Objektbeschreibung

- Objektspezifische Beschreibung der Art und der individuellen Eigenschaften des betrachteten Gebäudes
- Gebäudeausmaß (Längenausdehnung, Gebäudefläche, Höhe)
- Plandarstellung oder Visualisierung des Gebäudes
- Beschreibung der Lage und Umgebung (z.B. Straßen, Freiflächen oder nachbarliche Gebäude)
- Bezeichnung und Lokalisierung der Ausgänge mit den jeweiligen Ausgangsbreiten
- Beschreibung des gesicherten Bereiches
- Angriffswege der Feuerwehr
- Angaben zur Brandschutzmanagementausstattung (Personal, Alarmanlage, Sicherheitstreppe Räume)

4. Beschreibung der Nutzung des Gebäudes

- Darstellung der unterschiedlichen Nutzungen um nötige Eingaben für die Simulation zu erlangen

5. Abweichung

- Darstellung und Begründung der Art der Abweichung von den bestehenden Bauvorschriften

6. Definitionen

- Infolge häufiger synonymer Verwendung von Begriffen sind benutzte Begriffe (z.B. pre-movement time) entweder zu definieren oder auf eine Quelle zu verweisen
- Definitionen aus den genutzten Programmen darstellen

7. Programmbeschreibung

- Programm und Programmversion
- Klassifizierung des Modells
- Intervall des Updates
- Abbildung der Geometrie
- Wegführung
- Parameterdefinitionen der Personen
- Dokumentation des Einflusses der Einstellungsparameter auf die Bewegung
- Ergebnisauswertung
- Validierung (Art und Quelle)
- Verfügbarkeit des Benutzerhandbuchs

8. Modellierung der Geometrie

- Darstellung und Begründung vereinfachter Annahmen in der Modellbildung
- Dokumentation der Modellierung und der Dimensionen von Treppen
- Angaben der modellierten Ausgangsbreiten (Zellbreiten in diskreten Modellen)
- Darstellung der Modellierung besonderer Bauteile (z.B. Tribünen)
- Modellierung der Einrichtungsgegenstände bei Verringerung von Fluchtbreiten
- Angabe der Lokalisierung der modellierten Ziele
- Darstellung des Gebäudes im Modell

9. Szenarien

- Dokumentation und Begründung der Wahl der Szenarien
- jeweilige Nutzung der baulichen Anlage ist grundlegendes Szenario
- Beispiele aufbauender Szenarien:
 - Szenario nach bauaufsichtlichen Vorschriften

- Szenario der Abweichung mit Kompensationsmaßnahmen
- Veränderung des Wegverlaufes: 50% der Personen auf Hauptausgang
- Veränderung des Wegverlaufes: Sperrung des Rettungswegs mit der längsten Entfluchtungsdauer
- Maximale Personenzahl
- Sensitivitätsanalysen durch Variation der Parameter (z.B. Reaktionsdauer)

10. Eingabeparameter

- Dokumentation der Eingabedaten
- simulierte Gesamtpersonenzahl
- Aufenthaltsorte der Personen in der Anfangssituation
- Dokumentation der Fluchtwegführung zu den Zielen
- Dokumentation und Begründung der Bewegungsparameter der Personen
- Bestimmung der Reaktionsdauer
- Häufigkeitsverteilungsdiagramm Geschwindigkeit
- Häufigkeitsverteilungsdiagramm Körperproportionen
- Häufigkeitsverteilungsdiagramm Reaktionsdauer
- Darstellung der Auswirkung und Begründung der freien Parameter

11. Ergebnisse

- Entfluchtungsdauern aus statistischer Analyse für jedes Szenario
 - Angabe der minimalen, maximalen, mittleren und signifikanten Dauer
 - Angabe des mittleren Fehlers u zur Bestimmung der Gleichförmigkeit
- Angabe der Personenflüsse der Ausgänge
 - Globaler (spezifischer) Personenfluss über alle Ausgänge
 - Spezifischer Personenfluss je Ausgang
- Entfluchungskurven
 - globale Entfluchungskurve
 - Entfluchungskurve der einzelnen Ausgänge
 - Personenbelegungskurven markanter Bereiche (z.B. etagenweise)
- Animation
- Screenshots
 - Darstellung der Anfangssituation aller Geschosse
 - Intervall der Abbildungen im Abstand von 10% der Gesamtentfluchtungsdauer

- Abbildung aller relevanten Bereiche der Staubbildung hinsichtlich Größe, Dichte und Dauer
- Staubbetrachtungen
 - Dokumentation der Einstellung der Grenzwerte für automatisierte Ausgaben
 - Dokumentation der Staubbereiche hinsichtlich Dauer, Größe und Dichte

12. Bewertung

- Analyse der Ergebnisse
- Abschließende Beurteilung
- Problembereiche darstellen
- Optimierungs- und Verbesserungsmaßnahmen aufzeigen

8.6 ZUSAMMENFASSUNG DER BEURTEILUNGSKRITERIEN DER ENTFLUCHTUNGSDAUER

Beurteilung der Plausibilität der Entfluchtungsdauer

- Berechnung des mittleren Fehlers u der Gleichförmigkeit
- Angabe des globalen (spezifischen) Flusses über alle Ausgänge
- Angabe des spezifischen Flusses für jeden Ausgang
- Vergleichsrechnung mit Handrechenverfahren
- Vergleichsrechnung mit anderen Simulationsmodellen

9 SCHLUSSBETRACHTUNG

Ziel der vorliegenden Ausarbeitung war es, darzustellen, inwieweit die Prüfung einer Entfluchtungssimulation möglich ist. Dazu wurden zunächst Grundlagen und Randbedingungen für eine Simulation der Personenbewegung erklärt, um einen notwendigen Überblick über die Bewegungsdynamik und Verhaltensaspekte zu erhalten. Anhand von Programmbeschreibungen und dargestellten Untersuchungen wurde beschrieben, wie bestimmte Programme sich in ihren Einstellungen verhalten und welche Ausgabedaten die betrachteten Programme liefern. Grundsätzliche Anforderungen an Eingabedaten und Inhalte für die Aufstellung von Entfluchtungsanalysen sind in der Richtlinie für mikroskopische Entfluchtungsanalysen und dem vfdb-Leitfaden für Ingenieurmethoden im Brandschutz vorhanden. Dabei hat sich allerdings herausgestellt, dass teilweise Unterschiede zwischen den Richtlinien bezüglich des Umfangs, den Definitionen und den zugrunde liegenden Werten bestehen. Um eine zweckgemäße Prüfungs- und Erstellungsgrundlage zu erhalten, ist es hier von äußerster Notwendigkeit, dass diese Richtlinien weiter vereinheitlicht werden. Besonders die Angabe unterschiedlicher Werte bei gleicher Ausgangssituation, führt bei der Prüfung zu Verwirrung. Eine fehlende Harmonisierung ist allerdings im gesamten Themenbereich vorhanden. Wie bereits dargestellt, sind auch bereits in den Programmen, die zur Simulation von Personenströmen benutzt werden, Unterschiede in den Bezeichnungen zu finden. In Zukunft muss auch hier eine Vereinheitlichung angestrebt werden. Zusätzlich werden in den Richtlinien, insbesondere an den Umfang des Inhaltes, wenige Anforderungen gestellt. Eine Prüfung einer Analyse wird hierdurch erheblich erschwert.

In Anlehnung an die bereits konzeptionierten Richtlinien der Richtlinie für mikroskopische Entfluchtungsanalysen und dem vfdb-Leitfaden für Ingenieurmethoden des Brandschutzes wurde ein Leitfaden, der Anforderungen an die Inhalte von Entfluchtungsanalysen stellt, entworfen, um bestimmte Aspekte zu konkretisieren und Beurteilungskriterien darzustellen.

Die Resultate der Simulation hängen unweigerlich von den getroffenen Annahmen und Einstellungen ab. Ein vollständiges Nachvollziehen der Modellierung ist meistens schon technisch nicht möglich, daher ist eine Prüfung in der Regel nur über eine vorliegende Dokumentation zu realisieren. Dies setzt voraus, dass die Dokumentationen

in allen für die Prüfung relevanten Gesichtspunkten vollständig aufgestellt sind und damit erst als Prüfungsgrundlage dienen können.

Besonders hinsichtlich des Bewertungskriteriums der Entfluchtungsdauer wurde in der Vergangenheit festgestellt, dass die Fixierung auf dieses Kriterium häufig problematisch ist. Dies liegt zum Teil an der uneinheitlichen experimentellen Datenbasis und der daraus unterschiedlichen Implementierung der Bewegung in den Programmen (besonders im Vergleich mit der Bewegung auf Treppen). Mit zusätzlichen Angaben zur Gleichförmigkeit, Personenflüssen und sinnvoller Szenarienwahl, lässt sich die Plausibilität des Resultates der Entfluchtungsdauer besser überprüfen. Gerade da Personenflüsse besser eingrenzbar sind, lässt sich die Plausibilität einer Entfluchtungsdauer genauer beurteilen.

Durch Vergleiche von bauaufsichtlich vorgeschriebenen Geometrien mit den abweichenden Geometrien und der Kompensationsmaßnahme ist zudem eine von der absoluten Dauer unabhängige Relativaussage möglich.

Insgesamt bleibt weiterer Forschungsbedarf auf dem Gebiet der Personenbewegung und deren Simulation notwendig, sodass diese weiter vereinheitlicht werden kann. Validierungen und Verifizierungen der Programme bilden die elementaren Grundvoraussetzungen für eine sachgemäße Verwendung. Derzeit sind Programmvalidierungen allerdings nur begrenzt öffentlich zugänglich und in ihrer Art sehr uneinheitlich. Zur Erleichterung der Überprüfung von Entfluchtungsanalysen, müssen Validierungen der einzelnen Programme zentral vorhanden sein. Dies kann in Zukunft ein weiteres Ziel der Richtlinie für mikroskopische Entfluchtungsanalysen sein, da sie es sich zum Ziel gemacht hat, die Grundlagen für die Eingabe in Personenstromsimulationen für eine Prüfung zu standardisieren. Sinnvoll wäre es hier als zentrales Portal zu fungieren, welches weitere einheitliche Validierungskriterien (z.B. in Form von komplexeren Fallbeispielen) aufstellt und erfolgte Validierungen in vollständiger Dokumentation, oder zumindest die Verweise zu Validierungen, zur Verfügung stellt.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Schneider, Ulrich: *Grundlagen der Ingenieurmethoden im Brandschutz*, 1. Auflage. Werner Verlag, 2002.
- [2] Schneider, Ulrich: *Ingenieurmethoden im Baulichen Brandschutz*, 4. Auflage. expert Verlag, 2006.
- [3] Schneider, Ulrich: *Ingenieurmethoden im Brandschutz*; in: Fouad, Nabil A. (Hrsg.): *Bauphysik Kalender 2006*, Verlag Ernst & Sohn, 2006.
- [4] ARGEBAU: *Musterbauordnung (MBO)*, Fassung November 2002, www.is-argebau.de
- [5] Farmers, Gabriele: *Brandschutz im Bauordnungsrecht*, in: Fouad, Nabil A. (Hrsg.): *Bauphysik Kalender 2006*, Verlag Ernst & Sohn, 2006.
- [6] Mehl, Friedrich: *Richtlinien für die Erstellung und Prüfung von Brandschutzkonzepten*; in: Hosser, Dieter (Hrsg.): *Praxisseminar Brandschutz bei Sonderbauten*, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Heft 178, 2004.
- [7] Mehl, Friedrich: *Bautechnische Nachweise zum Brandschutz nach Bauordnungsrecht der Länder*; in: Fouad, Nabil A. (Hrsg.): *Bauphysik Kalender 2006*, Verlag Ernst & Sohn, 2006.
- [8] Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb), *vfdb-Richtlinie 01/01: Brandschutzkonzept*, Stand Mai 2000.
- [9] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: *Brandschutzleitfaden für Gebäude des Bundes*, 3. Auflage, Stand Juli 2006
- [10] Herzog, Irene: *Europäische Harmonisierung im Brandschutz*; in: Fouad, Nabil A. (Hrsg.): *Bauphysik Kalender 2006*, Verlag Ernst & Sohn, 2006.
- [11] Brein, Dieter: *Stand der internationalen Normung im Bereich Ingenieurmethoden*, vfdb Zeitschrift Heft 4/2007, Seiten 205-210.
- [12] *ISO/TR 13387-8:1999 (E): Fire Safety Engineering – Part 8: Life Safety – Occupant behaviour, location and condition*, 1999.
- [13] ARGEBAU: *Muster-Richtlinie über bauaufsichtliche Anforderungen an Schulen (MSchulbauR)*, Stand 10. Juli 1998, www.is-argebau.de.
- [14] ARGEBAU: *Muster-Verordnung über den Bau und Betrieb von Beherbergungsstätten (MBeVO)*, Fassung Dezember 2000, www.is-argebau.de.

- [15] ARGEBAU: *Muster-Richtlinie über den Bau und Betrieb von Hochhäusern (MHHR)*, Entwurf, Stand 17. August 2005, www.is-ergebau.de.
- [16] ARGEBAU: *Muster-Verordnung über den Bau und Betrieb von Verkaufsstätten (MVkVO)*, Fassung September 1995, www.is-ergebau.de.
- [17] ARGEBAU: *Muster-Verordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (MVStättV)*, Fassung Juni 2005, www.is-ergebau.de.
- [18] ARGEBAU: *Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau (MIndBauRL)*, Fassung März 2000, www.is-ergebau.de.
- [19] Wathling, Klaus-Dieter: *Akzeptanz und Bewertung der Ingenieurmäßigen Verfahren aus Sicht der Bauaufsicht*; vfdb Zeitschrift Heft 4/2007, Seiten 177-183.
- [20] ARGEBAU: *Begründung und Erläuterung zur Muster-Verordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (MVStättV)*, Fassung Juni 2005, www.is-ergebau.de.
- [21] Gröger, Gerd: *Anwendung der (Muster-) Versammlungsstättenverordnung (MVStättV) für den Bau und Betrieb von Messe- und Ausstellungshallen*; vfdb Zeitschrift Heft 1/2005, Seiten 17-24.
- [22] DIN EN 13200-1:2004-05: *Zuschaueranlagen – Teil 1: Kriterien für die räumliche Anordnung von Zuschauerplätzen – Anforderungen*; Mai 2004.
- [23] Klüpfel, Hubert, E-Mail Kommunikation, 2008.
- [24] Meyer-König, Tim: *RiMEA – Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen*; FM Facility Management 04/2004, Seiten 32-34, www.rimea.de/downloads/FM04-04.pdf.
- [25] International Maritime Organization (IMO), *Interim Guidelines for Evacuation Analyses for New and Existing Passenger Ships*, MSC/Circ.1033, Juni 2002, www.imo.org.
- [26] International Maritime Organization (IMO), *Interim Guidelines for Evacuation Analyses for New and Existing Passenger Ships*, MSC.1/Circ.1238, Oktober 2007, www.imo.org.
- [27] RiMEA-Projekt, *Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen*, Version 2.0.2; Stand 22.Juni 2007, www.rimea.de.
- [28] Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb), *vfdb-Leitfaden, Ingenieurmethoden des Brandschutzes*; Technischer Bericht vfdb TB 04/01, 1. Auflage Mai 2006.

- [29] Müller, Günther: *Kriterien für Evakuierungsempfehlungen bei Chemikalienfreisetzungen*; Bundesamt für Zivilschutz (Hrsg.), Zivilschutzforschung Neue Folge Band 32, 1998.
- [30] Wolf, Torsten: *Modellierung von Räumungen in Krankenhäusern und anderen Pflegeeinrichtungen*; Hans Hölemann und Klaus Schneider (Hrsg.): Wuppertaler Berichte zum Brand- und Explosionsschutz Band 2, 2001.
- [31] Purser, David: *Behaviour and travel interactions in emergency situations and data needs for engineering design*; in: Galea, Edwin R. (Hrsg.): Proceedings of the 2nd International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics, 2003, Seiten 355-369.
- [32] Tubbs, Jeffrey; Meacham, Brian: *Egress Design Solutions: A Guide to Evacuation and Crowd Management Planning*, 1. Auflage. Wiley & Sons, Mai 2007.
- [33] Proulx, Guylene: *Movement of People: The Evacuation Timing*; in: DiNenno, P. (Hrsg.): The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition. National Fire Protection Association, März 2002.
- [34] Müller, Klaus: *Praxiswissen Brandschutz – Brandgefährdungsanalyse und Evakuierung*, 1. Auflage. Erich Schmidt Verlag, 2005.
- [35] Paschen, Christian: *Grundsatzfragen zur Evakuierung und Räumung*; vfdb Zeitschrift Heft 4/2007, Seiten 165-170.
- [36] Purser, David: *Comparisons of Evacuation Efficiency and Pre-Movement Times in Response to a sounder and two different voice Alarm messages*; Vortrag vom 27. Februar 2008 auf der 4th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics, Wuppertal 2008.
- [37] Schneider, U.; Oswald, M.; Lebeda, C.: *Evakuierung bei Brandereignissen*, Brandschutz-Fachtagung Schloss Schallaburg bei Melk an der Donau, Österreich 3. Februar 2004.
- [38] Fahy, Rita; Proulx, Guylene: *Toward creating a database on delay times to start evacuation and walking speeds for use in evacuation modelling*; Bericht Nr. NRCC-44758 des National Research Council Canada, 2001.
www.nrc.ca/irc/ircpubs
- [39] Weidmann, Ulrich: *Transporttechnik der Fußgänger, Transporttechnische Eigenschaften des Fußgängerverkehrs*; Literatúrauswertung, Schriftenreihe des IVT Nr. 90, ETH Zürich, 2. Auflage März 1993.

- [40] Bryan, John L.: *Behavioral Response to Fire and Smoke*; in: DiNenno, P. (Hrsg.): *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Third Edition. National Fire Protection Association, März 2002.
- [41] Fruin, John J.: *Pedestrian Planning and Design*, Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, New York, 1971.
- [42] Rupprecht, Tobias: *Untersuchung zur Erfassung der Basisdaten von Personenströmen*, Diplomarbeit Bergische Universität Wuppertal, 2006.
- [43] Daamen, W.; Hoogendorn, S.; Bovy, P.H.L.: *First-order Pedestrian Traffic Flow Theory*; in: Transportation Research Board Annual Meeting 2005, Washington DC: National Academy Press, 2005.
- [44] Predtetschenski, V.M.; Milinski A.I.: *Personenströme in Gebäuden – Berechnungsverfahren für die Projektierung*, 1.Auflage. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, 1971.
- [45] www.ped-net.org
- [46] Forell, Burkhard: *Bewertung von Evakuierungen in Diskotheken und ähnlichen Vergnügungsstätten*; vfdb-Zeitschrift 2/2004, Seiten 95-103.
- [47] National Fire Protection Association: *NFPA Life Safety Code 101*, Edition 2006.
- [48] Eisenbahn Bundesamt: *Leitfaden für den Brandschutz in Personenverkehrsanlagen der Eisenbahnen des Bundes*; Januar 2001.
- [49] Grosshandler W.; Bryner, N.; Madrzykowski, D.; Kuntz, K.: *Report of the Technical Investigation of The Station Nightclub Fire*; Bericht Nr. NIST NCSTAR 2: Vol. I des National Institute of Standards and Technology (NIST), Juni 2005. www.nist.gov
- [50] Kraft, Markus: *Maßnahmen zur Panik-Prävention – Empfehlungen zur Entwicklung von Evakuierungsstrategien für große Menschenmengen*; Präsentation zur VDS-Fachtagung „Evakuierung und Räumung von Gebäuden“, 8. Juli 2004. www.kraftwelt.de
- [51] Still, G.K.: *Review of pedestrian and evacuation simulations*; in: Int.J. Critical Infrastructures, Vol. 3, Nos.3/4, 2007, Seiten 376-388.
- [52] Sandberg, Anders: *Unannounced evacuation of large retail stores – an evaluation of human behaviour and the computer model SIMULEX*, Technical Report, Lund Institute of Technology, Lund University, Oktober 1997.

- [53] Kersken, M.; Waldau, N.; Hoffmann, T.: *Berechnung von Entleerungszeiten für Fallbeispiele*; Forschungsbericht des DIBt, Fraunhofer IRB Verlag, September 2006.
- [54] Schadschneider, A.; Klingsch, W.; Klüpfel, H.; Kretz, T.; Rogsch, C.; Seyfried, A.: *Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications*; 2008. www.ped-net.org
- [55] Kuligowski, Erica D.; Peacock, Richard D.: *A Review of Building evacuation Models*; Technical Note 1471, National Institute of Standards and Technology, 2005.
- [56] *PedGo Benutzerhandbuch PedGo 2 und PedGo Editor 2*, Version 2.1.0, TraffGo HT GmbH, 2003. www.traffgo-ht.com
- [57] Klüpfel, Hubert: *Evacuation of Ships and Buildings based on a CA model*; Präsentation. www.traffgo-ht.com
- [58] Klüpfel, Hubert: *A Cellular Automaton Model for Crowd Movement and Egress Simulation*; Dissertation, Universität Duisburg, 2003.
- [59] Thompson, Peter: *SIMULEX: simulated people have needs too*; in: NIST Workshop on Building Occupant Movement during Fire Emergencies, 2004.
- [60] *SIMULEX User Guide*, <Virtual Environment> 5.8, IES Ltd ; www.iesve.com
- [61] Thompson, P.; Lindstrom, H. ; Ohlsson, P.A. ; Thompson, S. : *SIMULEX: Analysis and changes for IMO Compliance*, in: Galea, Edwin R. (Hrsg.): *Proceedings of the 2nd International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics*, 2003, Seiten 173-184.
- [62] *SimWalk Benutzerhandbuch*, Version 2.x; Savannah Simulations AG, www.simwalk.ch
- [63] *SimWalk User Guide*, Version 3.x.x; Savannah Simulations AG, www.simwalk.ch
- [64] ASERI Benutzerhandbuch, Version 4.5; I.S.T. Integrierte Sicherheits-Technik GmbH, Stand 21. Dezember 2007.
- [65] ASERI Referenzhandbuch, Version 4.5; I.S.T. Integrierte Sicherheits-Technik GmbH, Stand 12. Dezember 2007.
- [66] Rogsch, Christian: *Vergleichende Untersuchung zur dynamischen Simulation von Personenströmen*; Forschungszentrum Jülich, Zentralbibliothek, Berichte des Forschungszentrums Jülich JUEL-4185, 2005. <http://hdl.handle.net/2128/483>

- [67] Kuligowski, Erica D.: *The Evaluation of a performance-based design process for a Hotel building: The comparison of two egress models*; Graduate School of the University of Maryland, Thesis, 2003.
- [68] Otto, Manuela: *Evakuierungsberechnungen als Bestandteil der Risikoanalyse zur Erstellung von Brandschutzkonzepten und Nachweis für das Rettungswegkonzept*, Universität Leipzig, Diplomarbeit, 2005.
- [69] Kotthaus, Christoph: *Simulation vs. Realität – Anwendbarkeit von Evakuierungssimulationsprogrammen zur Vorhersage von Räumungszeiten für Bürohochhäuser*, Bergische Universität Wuppertal, Diplomarbeit, 2006
- [70] Weckman, H.; Lehtimäki, S.; Männikö, S.: Evacuation of a theatre: Exercise vs Calculation; in: Fire and Materials 23, Seiten 357-361, 1999.
- [71] Rogsch, C.; Klingsch, W.; Seyfried, A.; Weigel, H.: *How reliable are commercial Software-tools for evacuation calculation?*; in: Interflam 2007 – Conference Proceedings, Seiten 235-245, 2007.
- [72] Rogsch, Christian: *Vergleich der Simulationsprogramme ASERI, buildingEXODUS, PedGo und SIMULEX*; Vortrag vom 26.02.2007 beim RiMEA Workshop „Anwendung der Richtlinie für die Erstellung und Überprüfung von Gutachten“.
- [73] Klingsch, Wolfram: *Akzeptanzprobleme von Toxizitätsberechnungen bei Brandschutznachweisen*; vfdb Zeitschrift Heft 3/2007, Seite 141.
- [74] RiMEA Workshop „Anwendung der Richtlinie für die Erstellung und Überprüfung von Gutachten“ vom 26.02.2007.
- [75] Waldau, Nathalie: *Massenpanik in Gebäuden – Grundlagen und Simulationsmodelle, Planungskriterien zu Orientierung in Gebäuden bei steigender Stressbelastung*, TU Wien, Diplomarbeit, 2002.
- [76] Galea, E.: The UK WTC 9/11 Evacuation Study; Vortrag vom 27. Februar 2008 auf der 4th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics, Wuppertal 2008.
- [77] RiMEA Testprotokoll des Programms PedGo; TraffGo HT GmbH, 2007.
www.traffgo-ht.com
- [78] Seyfried, A.; Strupp, M.; Lippert, T.: *Verfeinerte Auswertung für Evakuierungssimulationen*; vfdb Zeitschrift Heft 4/2004, Seiten 214 ff.
- [79] Schneider, V; Könnecke R.: *Simulating Evacuation Processes with ASERI*; in: Schreckenberg, Michael (Hrsg.); Sharma, Som D. (Hrsg.): Pedestrian and Evacuation Dynamics, 2001, Seiten 303-313.

- [80] Hosser, D.; Forell, B.; Schneider, V.: *Sicherheit in deutschen Stadien und Arenen – eine Nachlese*; vfdb Zeitschrift Heft 1/2007, Seiten 33-42.
- [81] Klüpfel, Hubert; Meyer-König, Tim: *Modelle für die Berechnung von Personenströmen und Evakuierungssimulationen*; in: VdS Fachtagung „Evakuierung und Räumung von Gebäuden“, 7. Juli 2005, Seiten 11-42. VdS, 2005.
- [82] Meyer-König, Tim: *Mikroskopische Simulation von Evakuierungsprozessen*; in: VDI Technische Überwachung Bd.43 Nr.9 2002, Seiten 10-13.
- [83] Proulx, Guylene: *Playing with fire: understanding human behaviour in burning buildings*; Bericht Nr. NRCC-46619 des National Research Council Canada, 2003. www.nrc.ca/irc/ircpubs

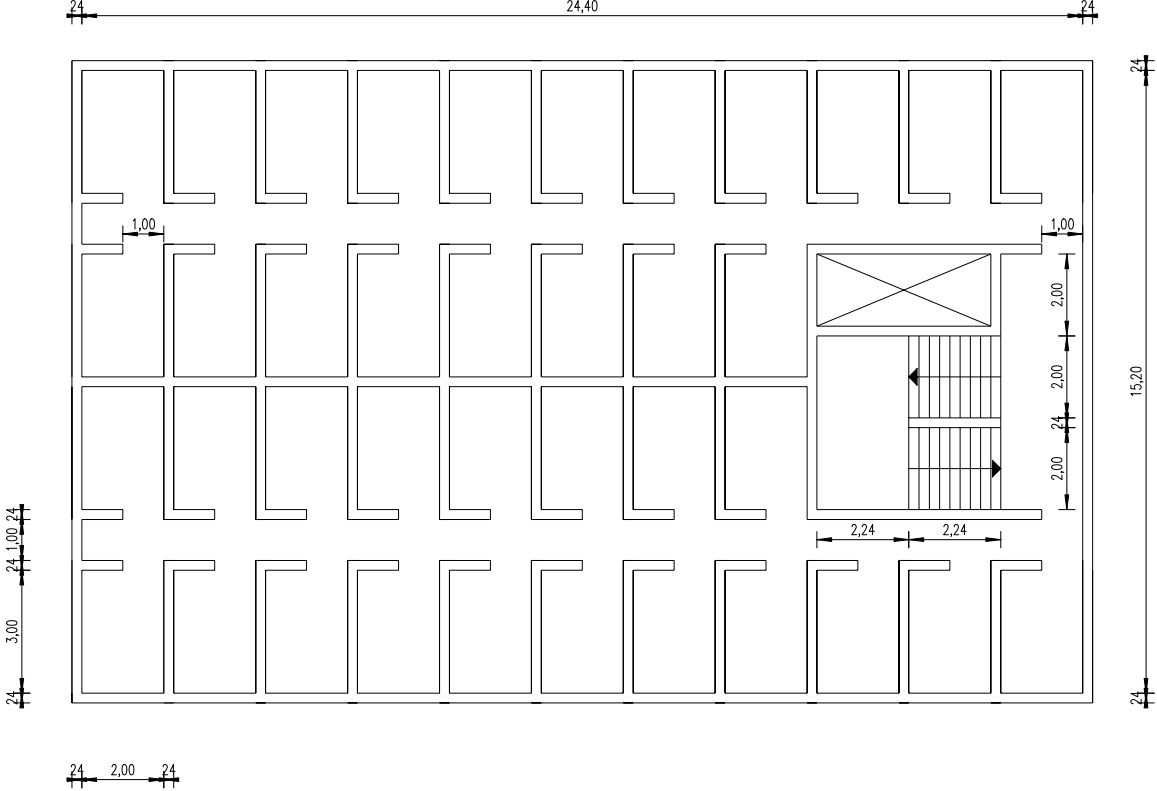


Abbildung A 2: Grundriss des 1. und 2.Obergeschosses

ANHANG B: PEDGO

B1 Bewertung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Geschwindigkeit

Anhand der folgenden Untersuchung wird die Entwicklung der Entfluchtungsdauer bei der Variation des Parameters Geschwindigkeit dargestellt.

Für das folgende Diagramm wurde allen Personen dieselbe Geschwindigkeit zugewiesen und untersucht, wie sich die Entfluchtungsdauer bei schrittweiser Erhöhung der Geschwindigkeit entwickelt.

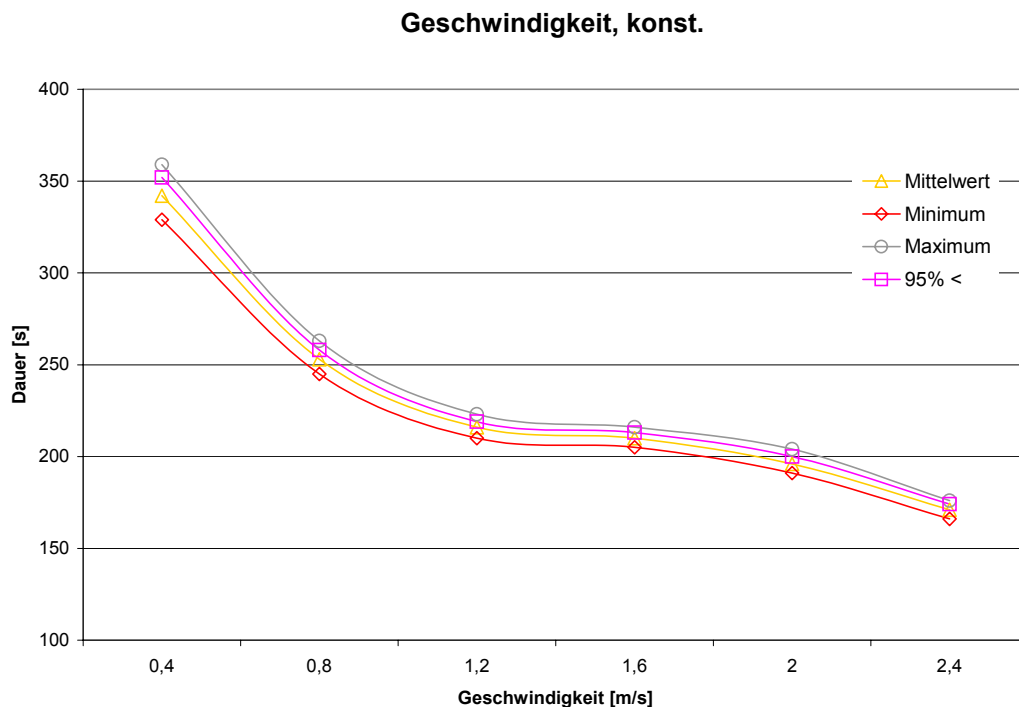


Abbildung A 3: Entwicklung der Entfluchtungsdauer bei schrittweiser Erhöhung der Geschwindigkeit (PedGo)

Das Diagramm zeigt, dass mit Erhöhung der Geschwindigkeit die Entfluchtungsdauer sinkt. Im Bereich von 0,4 bis 1,2 m/s fällt die Kurve allerdings stärker, als im Bereich von 1,2 bis 2,4 m/s.

Um die Auswirkung des Parameters weiter zu untersuchen, wurde die Geschwindigkeit über die Personen normalverteilt zugewiesen.

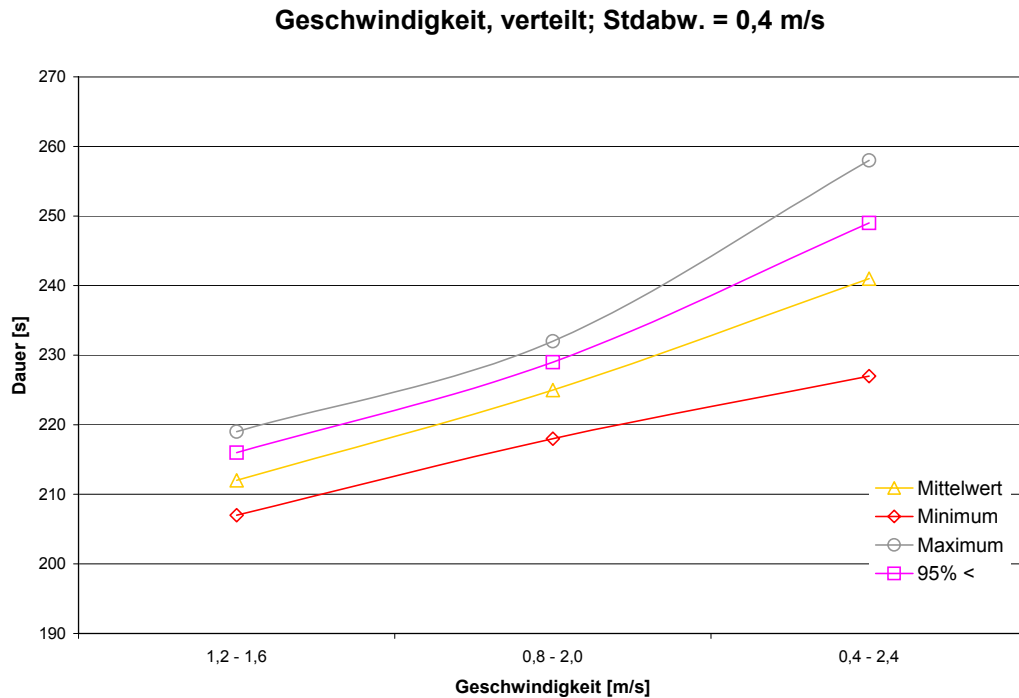


Abbildung A 4: Entwicklung der Entfluchtungsdauer bei normalverteilter Zuweisung (PedGo)

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass bei Vergrößerung der Verteilungsspanne die Entfluchtungsdauer ansteigt. Bei einer kleinen Spanne von 1,2 bis 1,6 m/s ist die Dauer am niedrigsten. Das ist darauf zurückzuführen, dass durch die annähernd einheitliche Geschwindigkeit wenige Blockierungen durch wesentlich langsamere Personen entstehen und damit die Bewegung weitestgehend unbehindert bleibt. Erhöht sich die Verteilungsspanne, so steigt die Entfluchtungsdauer, da mit zunehmendem Maße langsam laufende Personen maßgebend werden. Weiterhin erhöht sich die Spanne zwischen minimaler und maximaler Dauer. Im vorliegenden Fall liegt bei Vergrößerung der Spanne von 1,2 – 1,6 m/s auf 0,4 – 2,4 m/s der Unterschied bei etwa 14% für die Betrachtung der Mittelwertkurve.

Wird die Standardabweichung bei gleichem Mittelwert und gleicher Verteilungsspanne erhöht, so sinken die Entfluchtungsauern. Dies ist in Abbildung A 5 grafisch dargestellt.

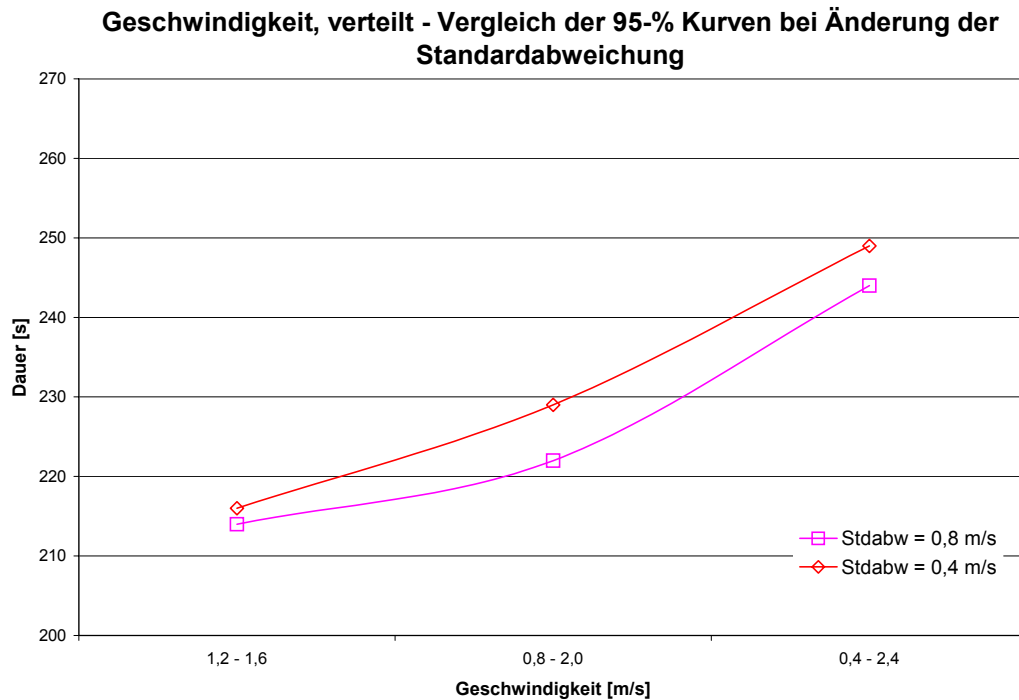


Abbildung A 5: Entwicklung der Entfluchtungsdauer bei Veränderung der Standardabweichung (Ped-Go)

Für den Vergleich herangezogen wurden dazu die 95%-Rechendurchläufe. Deutlich zu sehen ist, dass bei höherer Standardabweichung die Dauern geringer sind. Um die Ursache zu verdeutlichen, wird nachfolgend die Dichtefunktion der Normalverteilung erläutert.

Die Verteilung der Werte über eine Normalverteilung ermöglicht es Aussagen über die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Häufigkeit von zufallsbehafteten Größen zu treffen. Die Verteilungskurve der Normalverteilung wird über das Minimum und Maximum, den Mittelwert und die Standardabweichung definiert.

Die Standardabweichung ist der Abszissenabstand vom Wendepunkt der Kurve zum Mittelwert und legt das Maß der Streuung der Werte um den Mittelwert fest.

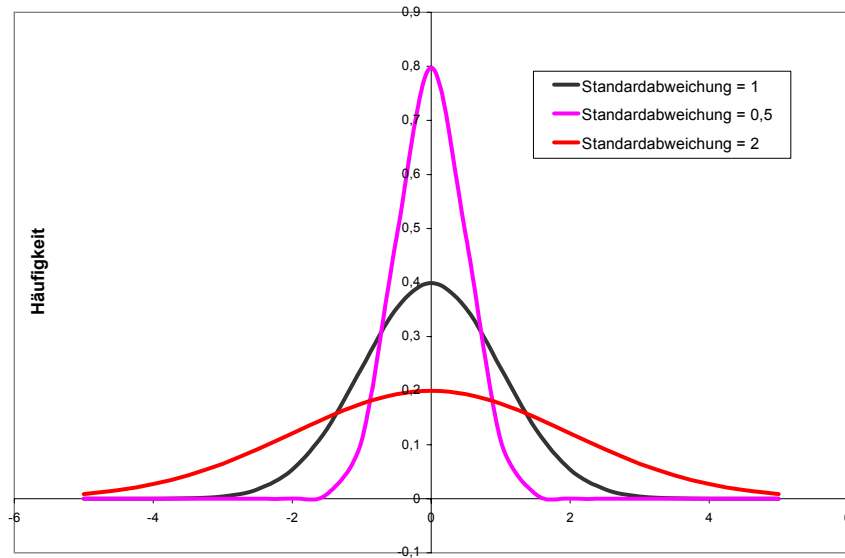


Abbildung A 6: Normalverteilung in Abhängigkeit der Standardabweichung für den Mittelwert 0

Wie in Abbildung A 6 zu erkennen führt eine Vergrößerung der Standardabweichung zu einer gleichmäßigeren Verteilung der Werte, da sich die Differenz der Häufigkeit verringert. Im Gegensatz dazu steigt die Häufigkeit der Werte bei einer geringeren Standardabweichung im Bereich des Mittelwertes an. Auf die Untersuchung bezogen, bedeutet eine höhere Standardabweichung also eine gleichmäßigere Verteilung der Laufgeschwindigkeit. Belegt wird dies durch eine Auswertung der Verteilung der Laufgeschwindigkeiten aus den beiden Durchläufen.

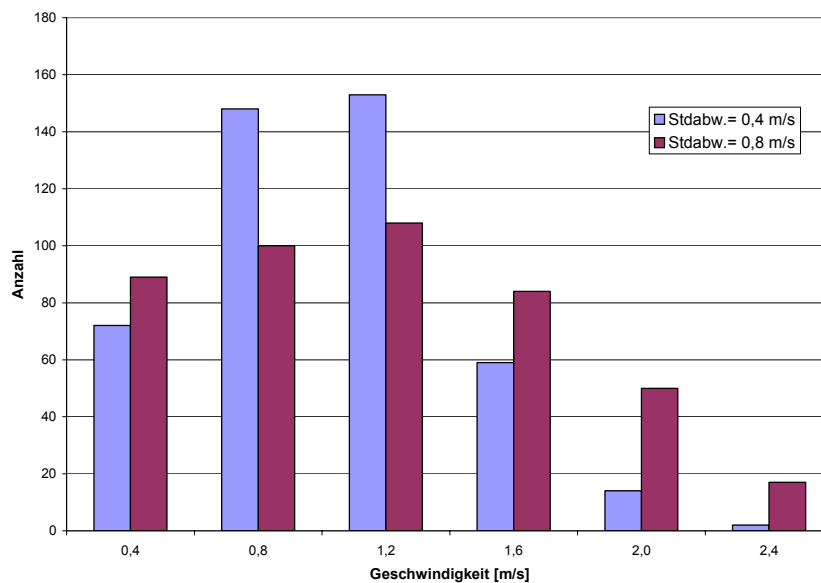


Abbildung A 7: Verteilung der Laufgeschwindigkeiten aus den 95%-Durchläufen mit unterschiedlicher Standardabweichung (PedGo)

Der Vergleich zeigt, dass gerade im höheren Geschwindigkeitsbereich die Häufigkeit der zugewiesenen Laufgeschwindigkeiten steigt.

Reaktionsdauer

Um die Reaktionsdauer zu untersuchen, wurde zunächst die Auswirkung auf die Entfluchtungsdauer bei einer konstanten Einstellung überprüft.

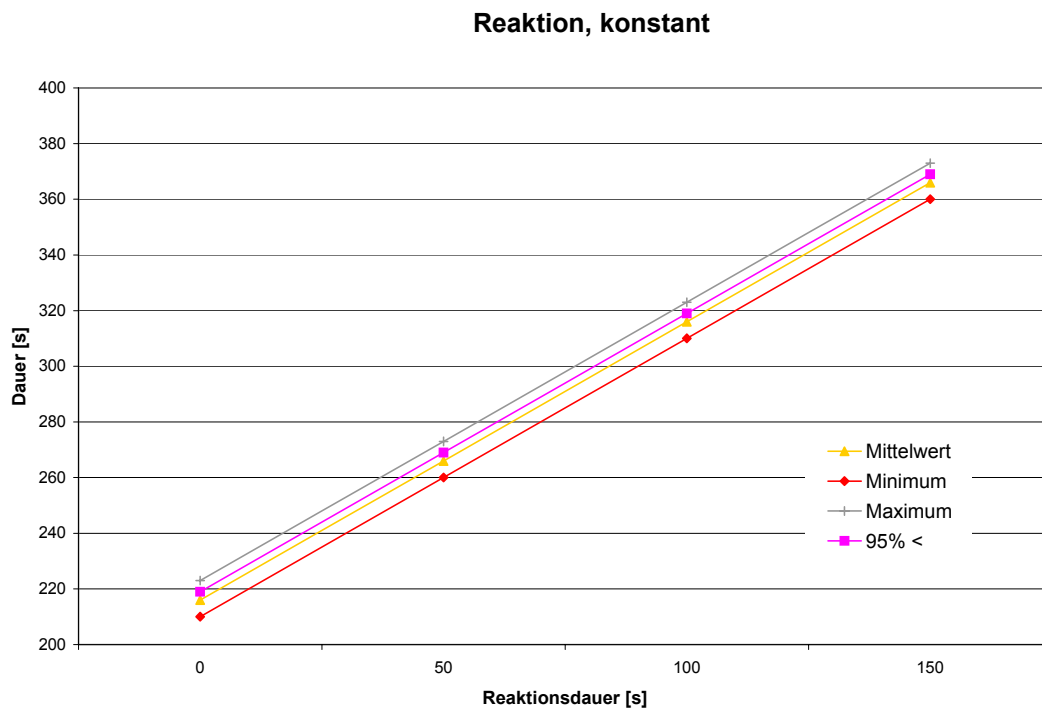


Abbildung A 8: Entwicklung der Entfluchtungsdauer bei Variation der Reaktionsdauer (PedGo)

Das Diagramm zeigt einen linearen Verlauf. Bleibt also die Reaktionsdauer für alle Personen gleich, ist kein Einfluss auf den Ablauf der Entfluchtungsdauer bei Variation der Einstellungen festzustellen.

Abbildung A 9 zeigt einen Vergleich der 95%-Kurven bei normalverteilter Reaktionsdauer, die sich nur in der Einstellung der Standardabweichung unterscheiden. Minimal-, Maximal und Mittelwert bleiben gleich.

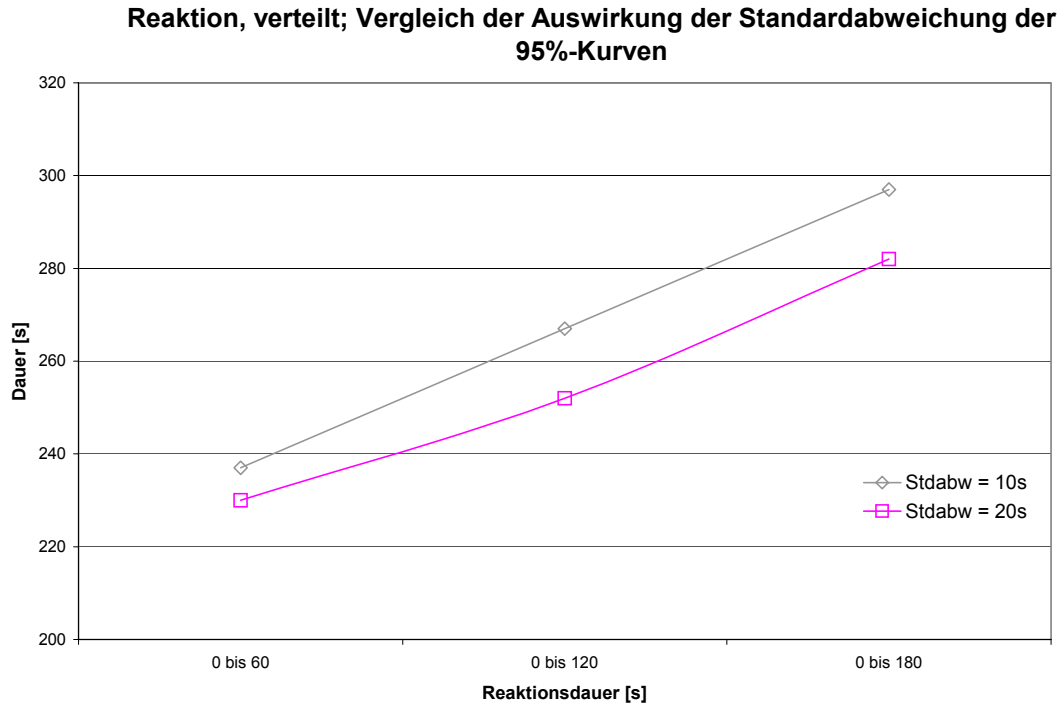


Abbildung A 9: Auswirkung der Standardabweichung bei Normalverteilung der Reaktionsdauer auf die Entfluchtungsdauer (PedGo)

Beide Kurven zeigen einen annähernd linearen ansteigenden Verlauf bei Erhöhung der Reaktionsdauer, der bei geringer Standardabweichung stärker ausgeprägt ist. Hierbei konzentrieren sich die Startzeitpunkte um den eingestellten Mittelwert (siehe Abbildung A 11). Weiterhin deutet der lineare Verlauf aus Abbildung A 9 an, dass die Einstellung des Mittelwertes in Zusammenhang mit geringer Standardabweichung maßgebend ist.

Im Vergleich mit der Standardabweichung 20 Sekunden, weist der Verlauf mit der Standardabweichung 10 Sekunden auf höhere Entfluchtungsauern hin. Die höhere Standardabweichung bewirkt eine gleichmäßigere Verteilung der Dauern auf die simulierten Personen.

Werden die Ergebnisse der Entfluchtungsdauer mit verteilten Reaktionsdauern mit dem Ergebnis aus den konstanten Einstellungen aus Abbildung A 8 gegenübergestellt, so wird weiter bestätigt, dass sich bei der Konzentration auf einen Wert die Entfluchtungsdauer erhöht. Für den Vergleich in Abbildung A 10 wurden die 95% - Werte der Verläufe für den Mittelwert 90 Sekunden herangezogen. Wird die Reaktionsdauer für alle Personen auf konstant 90 Sekunden eingestellt, liegt die Dauer der

Entfluchtung bei 309 Sekunden. Bei einer Verteilung der Reaktionsdauer mit dem Mittelwert 90 Sekunden und einer Standardabweichung von 20 Sekunden ergibt sich eine Dauer von 282 Sekunden. Der Unterschied zur Dauer mit konstanter Reaktionsdauer entspricht aus der vorliegenden Untersuchung etwa 9 %.

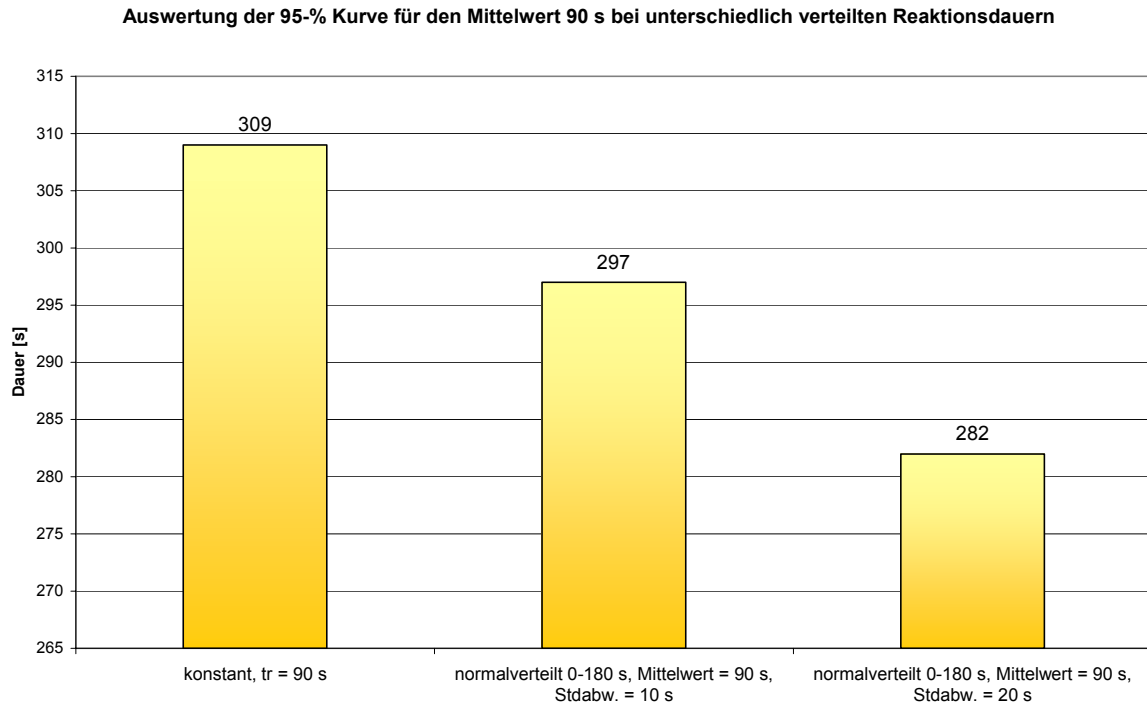


Abbildung A 10: Vergleich der Entfluchtungsdauer bei unterschiedlich verteilten Reaktionsdauern für den Mittelwert 90 Sekunden (PedGo)

Bei einer gleichmäßigeren Aufteilung der Reaktionsdauer durch höhere Standardabweichung, entspannt sich der Personenstrom. Personen bewegen sich an unterschiedlichen Zeitpunkten und verringern so die Staubildungen. Damit werden geringere Entfluchtungsdauern erzielt.

Um die Verteilung der Reaktionsdauer genauer zu quantifizieren wurde aus den Einzeldurchläufen mit verteilter Reaktionsdauer und unterschiedlicher Standardabweichung, die Reaktionsdauer der einzelnen Personen ermittelt. Das Diagramm zeigt die Spannweite der Reaktionsdauern für unterschiedliche Standardabweichungen und die jeweilige Häufigkeit der Reaktionsdauer. Bei der Standardabweichung 10 Sekunden (rot) ist die Konzentration um den Mittelwert deutlich zu erkennen, während für die Standardabweichung 20 Sekunden (blau) eine klare Vergrößerung der Spannweite der Reaktionsdauern sichtbar ist.

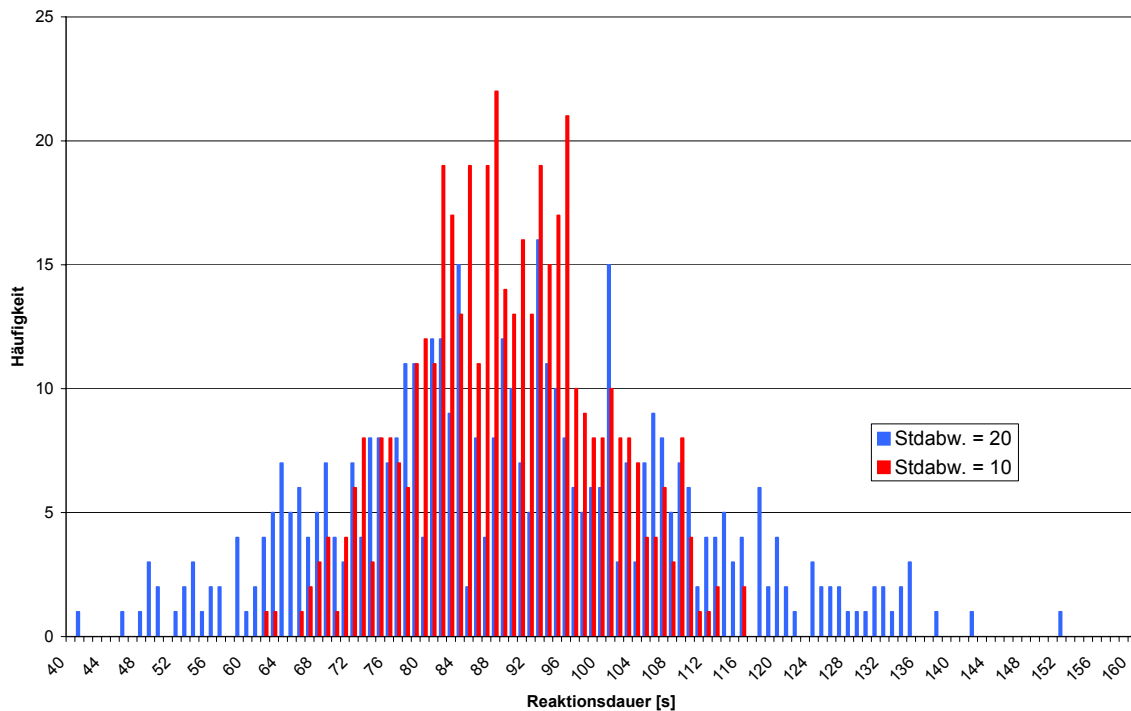


Abbildung A 11: Häufigkeitsverteilung der Reaktionsdauer für unterschiedliche Standardabweichungen bei normalverteilter Reaktionsdauer von 0 bis 180 Sekunden (PedGo)

Die Verteilung der Reaktionsdauern zeigt jedoch auch, dass die Standardabweichung bei einer Normalverteilung entsprechend höher gewählt werden muss, um Minimal- und Maximalwerte zu erreichen.

Schwanken

Um das Schwanken zu untersuchen, wurde der Parameter bei gleich bleibender Einstellung aller anderen Parameter variiert. Bei der Variation des Parameters Schwanken wird deutlich, dass eine Anhebung die Entfluchtungsdauer erhöht. Das Schwanken bewirkt eine Reduzierung der Laufgeschwindigkeit, wodurch sich die höheren Entfluchtungsdauern ergeben. Zwischen 1 % und 6 % Schwanken, steigt die Entfluchtungsdauer im vorliegenden Fall um etwa 13 % an.

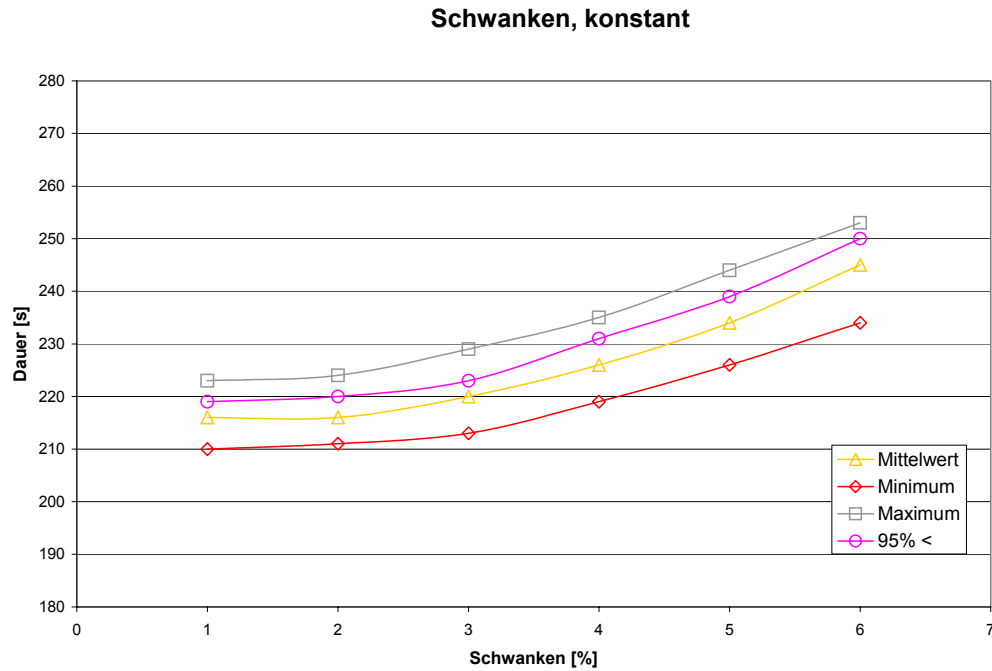


Abbildung A 12: Auswirkung des Schwankens auf die Entfluchtungsdauer (PedGo)

Trägheit

Um die Auswirkung des Parameters Trägheit darzustellen, wurden die übrigen Parameter konstant belassen und die Trägheit schrittweise erhöht.

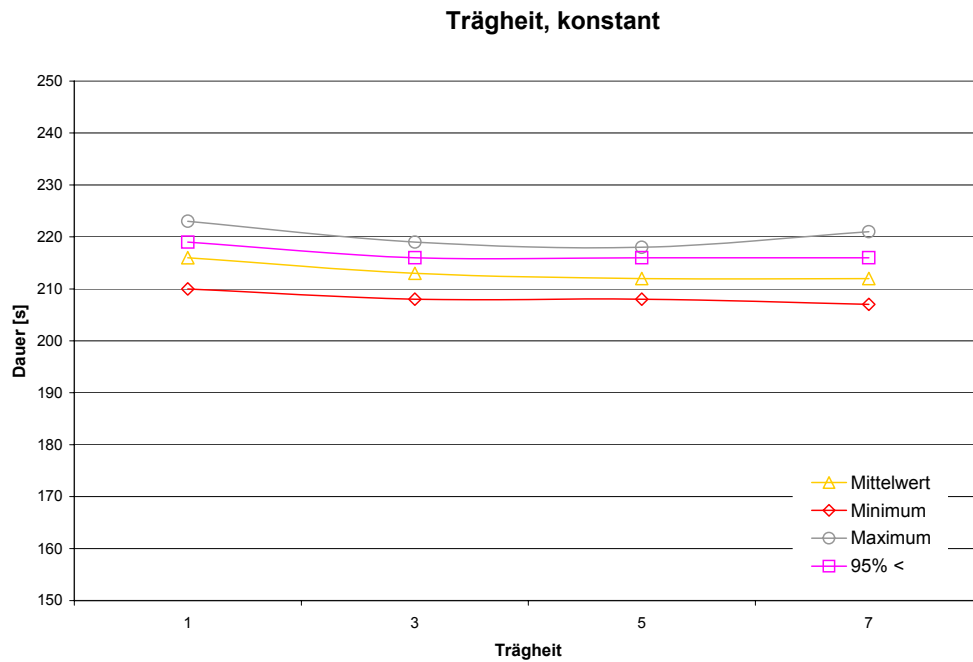


Abbildung A 13: Auswirkung der Trägheit auf die Entfluchtungsdauer (PedGo)

Aus der Untersuchung geht hervor, dass die alleinige Variation des Parameters nur geringe Auswirkungen hat. Der Verlauf ist annähernd konstant. Tendenziell wirkt sich die Trägheit eher senkend auf die Entfluchtungsdauer aus.

Um den Parameter Trägheit weiter zu untersuchen wurde ein Vergleich im Zusammenhang mit dem Parameter Schwanken durchgeführt. Dazu wurde das Schwanken mit konstanten Einstellungen variiert und mit unterschiedlichen Einstellungen für die Trägheit verglichen.

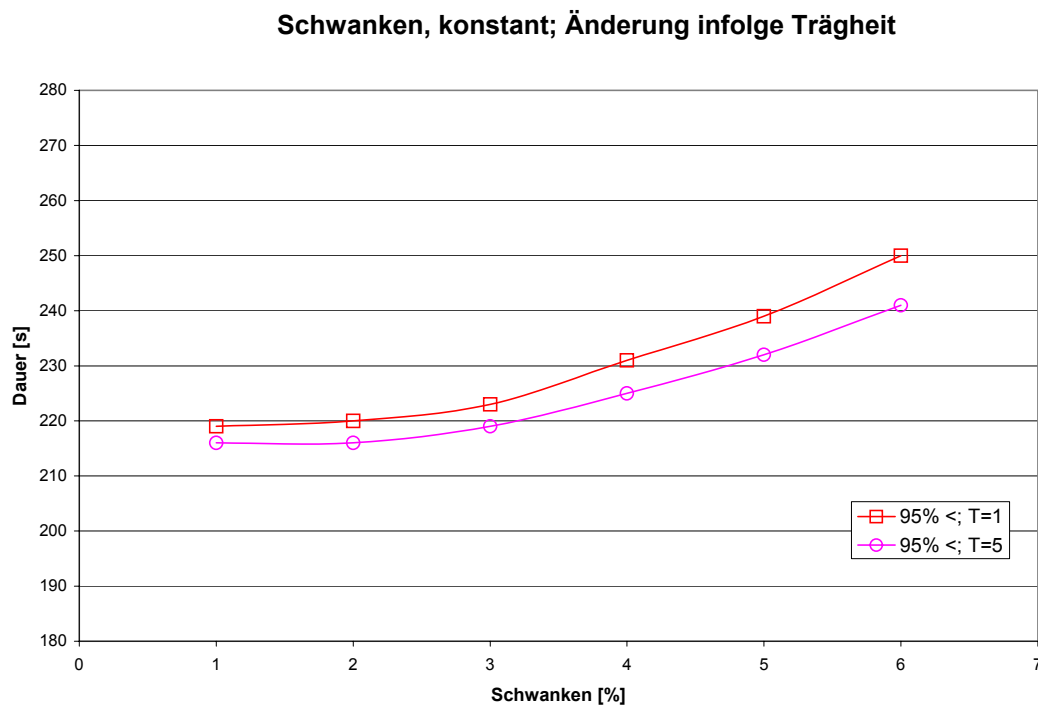


Abbildung A 14: Auswirkungen der Trägheit auf die Entfluchtungsdauer bei Variation des Schwankens (PedGo)

Verglichen mit Abbildung A 13, ist eine höhere Differenz in der Entfluchtungsdauer bei der Betrachtung der 95%-Kurven zu erkennen, als bei alleiniger Variation der Trägheit. Die Unterschiede sind allerdings minimal. Weiterhin ist sichtbar, dass bei höherer Trägheit die Dauer der Entfluchtung etwas geringer ist. Im vorliegenden Beispiel liegt der Unterschied zwischen der Trägheitseinstellung 1 und 5 bei einem Schwanken von 6 % bei etwa 4 %.

Trödelwahrscheinlichkeit

Um den Einfluss der Trödelwahrscheinlichkeit auf die Entfluchungsdauer festzustellen, wurde der Parameter, bei konstanter Einstellung der anderen Parameter, schrittweise vergrößert.

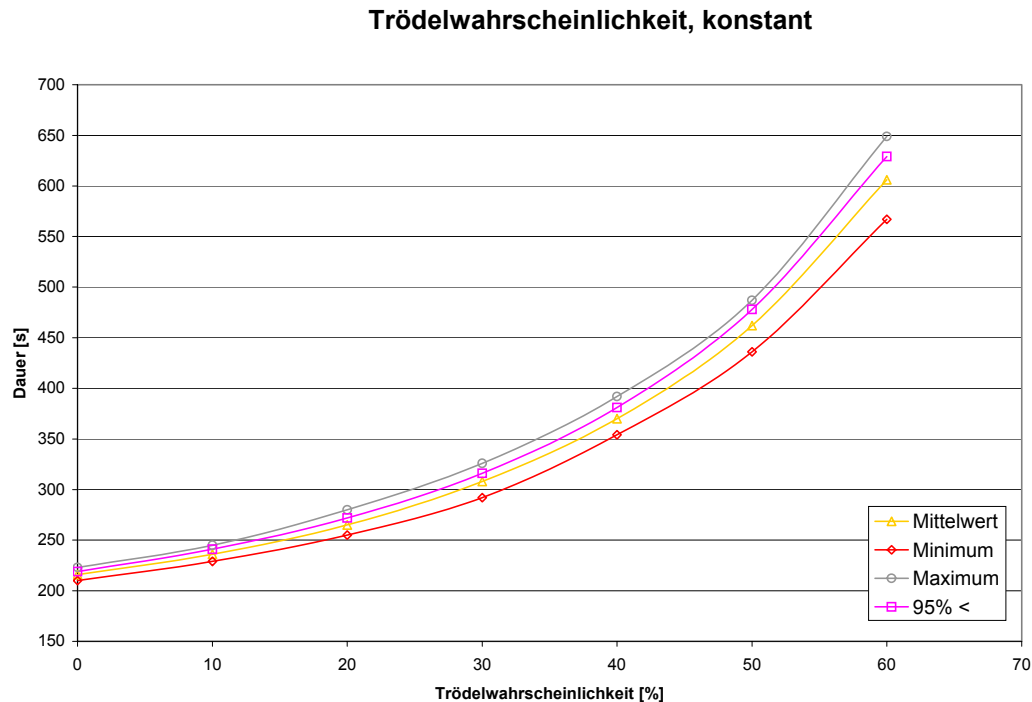


Abbildung A 15: Auswirkung der Trödelwahrscheinlichkeit auf die Entfluchungsdauer (PedGo)

Im Gegensatz zu den anderen Parametern ist der Einfluss wesentlich ausgeprägter. Mit steigender Trödelwahrscheinlichkeit steigt die Entfluchungsdauer bedeutend an. Ebenfalls ist hier die Vergrößerung der Spanne zwischen Minimum und Maximum sehr ausgebildet.

Gruppenzusammenhalt

Um den Gruppenzusammenhalt zu untersuchen, wurde den Personen, die sich in einem Raum befinden, jeweils eine Gruppe zugeordnet. Die Parametereinstellungen wurden für die Untersuchungen in den Standardeinstellungen belassen. Lediglich die Reaktionsdauer wurde konstant zu Null angesetzt, was eine gleichzeitige Bewegung bedeutet. Jeder Gruppe wurden dieselben Parametereinstellungen zugewiesen. Der Vergleich zeigt die Entwicklung der Entfluchungsdauer mit steigendem Gruppenzusammenhalt.

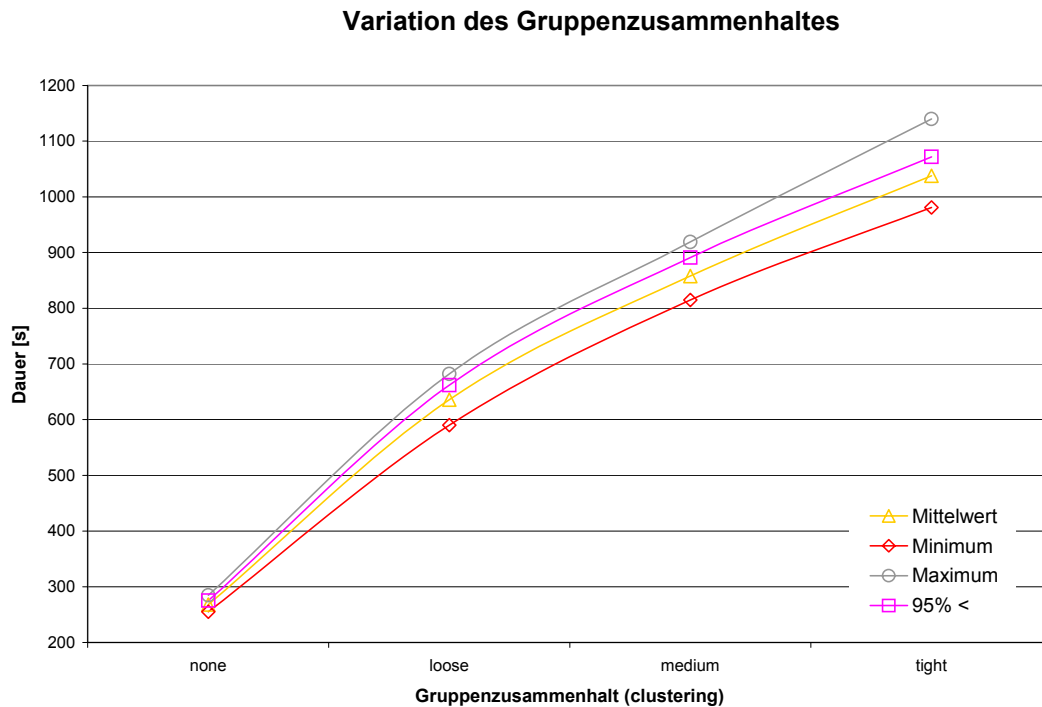


Abbildung A 16: Entwicklung der Entfluchtungsdauer bei Variation des Gruppenzusammenhaltes (PedGo)

Bei der Untersuchung wird deutlich, dass die Entfluchtungsdauer bei der Zuweisung des Gruppenzusammenhaltes stetig anwächst. Zwischen dem engen (tight) und fehlenden Gruppenzusammenhalt ist ein Anstieg um etwa das Vierfache festzustellen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass sich alle simulierten Personen in einem Gruppenzusammenhalt befinden und daher ein Überholen kaum möglich wird. Vielmehr werden die schnelleren Gruppen durch langsamere blockiert. Je enger der Gruppenzusammenhalt wird, desto höher sind die Entfluchtungsauern für das Beispielobjekt. Außerdem werden Entfluchtungsauern steigen, wenn sich ein geringer Anteil der Personen in einem Gruppenzusammenhalt befindet.

Zusammenfassung

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass sich bis auf die Parameter Geschwindigkeit und Trägheit, die steigenden Einstellungen in den Parametern erhöhend auf die Entfluchtungsdauer auswirken. Als Parameter mit sehr ausgeprägtem Einfluss auf die Entwicklung der Entfluchtungsdauer seien hier die Geschwindigkeit, die Trödelwahrscheinlichkeit und das Gruppenzusammenhalten genannt. Außerdem kann festgestellt werden, dass die Einstellungen maßgebend für die Simulation sind. Gerade im

Hinblick auf die Reaktionsdauer ist beispielsweise durch Einstellung der Minimal- und Maximalwerte alleine nicht gewährleistet, dass die simulierten Personen diese Zeitspanne auch ausnutzen. Vielmehr muss hier Wert auf die Einstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen gelegt werden. Auch muss erwähnt werden, dass bei einer höheren Spannweite in der Geschwindigkeitsverteilung höhere Entfluchtungs-dauern feststellbar sind. Eine Erhöhung der Spannweite bei der Reaktionsdauer bewirkt hingegen eine Senkung der Dauer aufgrund geringerer Staubildung.

Für PedGo wurde bereits für den Validierungsprozess der RiMEA ein Testbericht veröffentlicht [77] , in dem unter anderem weitere Sensitivitätsanalysen vorhanden sind.

B2 Eingangsdaten und Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Geschwindigkeit, konstant variiert

Statistik der Mittelwertrechnungen

Simulationsdurchläufe:	500
Personen:	448
erfolgreich:	500
nicht erfolgreich:	0

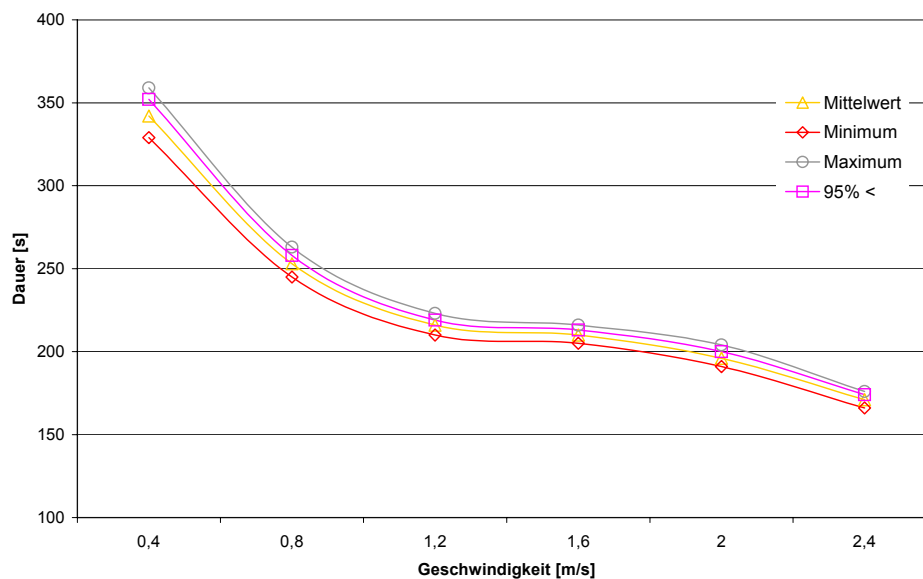
Personenparameter

Group 0 'Rimea Test 8':					
	min	max	mean	stddev	distribution
VMax:	variiert				normal
Sway:	1	1	1	1	normal
Reaction:	0	0	0	0	normal
Dawdle:	0	0	0	0	normal
Inertia:	1	1	1	1	normal

Ergebnisse der Variation

Geschwindigkeit	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4
mean	342	253	216	210	196	171
stddev	6	3	2	2	2	2
95% <	352	258	219	213	200	174
min	329	245	210	205	191	166
max	359	263	223	216	204	176

Geschwindigkeit, konst.



Geschwindigkeit, verteilt variiert; Standardabweichung 0,4 m/s

Statistik der Mittelwertrechnungen

Simulationsdurchläufe:	500
Personen:	448
erfolgreich:	500
nicht erfolgreich:	0

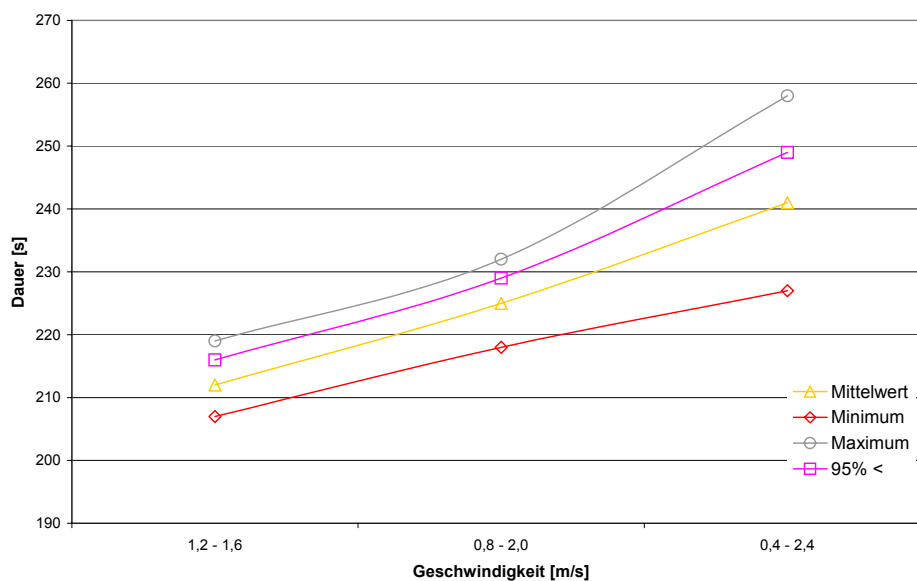
Personenparameter

Group 0 'Rimea Test 8':					
	min	max	mean	stddev	distribution
VMax:	variiert		3	1	normal
Sway:	1	1	1	2	normal
Reaction:	0	0	0	1	normal
Dawdle:	0	0	0	0	normal
Inertia:	1	1	1	1	normal

Ergebnisse der Variation

Geschwindigkeit	1,2 - 1,6	0,8 - 2,0	0,4 - 2,4
mean	212	225	241
stddev	2	3	5
95% <	216	229	249
min	207	218	227
max	219	232	258

Geschwindigkeit, verteilt; Stdabw. = 0,4 m/s



Geschwindigkeit, verteilt variiert; Standardabweichung 0,8 m/s

Statistik der Mittelwertrechnungen

Simulationsdurchläufe:	500
Personen:	448
erfolgreich:	500
nicht erfolgreich:	0

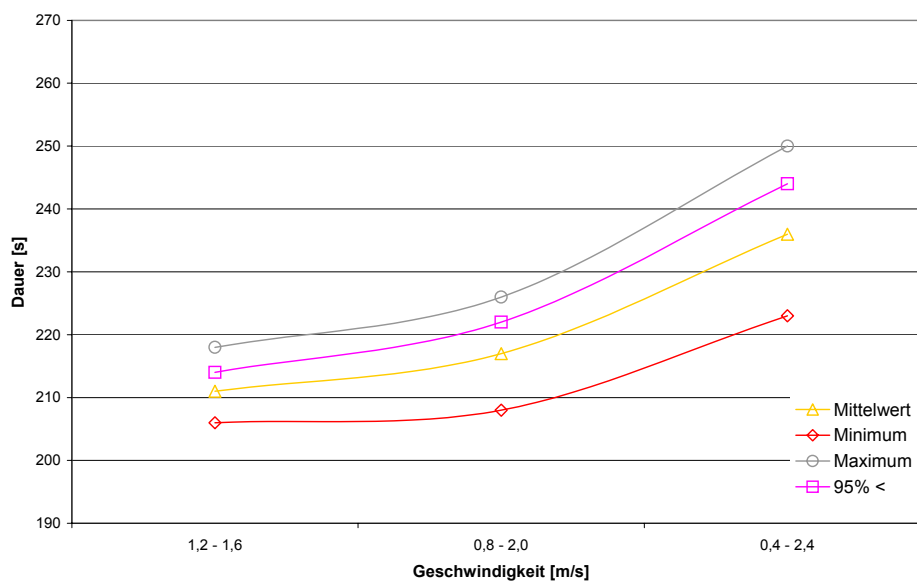
Personenparameter

Group 0 'Rimea Test 8':					
	min	max	mean	stddev	distribution
VMax:	variiert		3	2	normal
Sway:	1	1	1	2	normal
Reaction:	0	0	0	1	normal
Dawdle:	0	0	0	0	normal
Inertia:	1	1	1	1	normal

Ergebnisse der Variation

Geschwindigkeit	1,2 - 1,6	0,8 - 2,0	0,4 - 2,4
mean	211	217	236
stddev	2	3	5
95% <	214	222	244
min	206	208	223
max	218	226	250

Geschwindigkeit, verteilt; Stdabw. = 0,8 m/s



Reaktionsdauer, konstant

Statistik der Mittelwertrechnungen

Simulationsdurchläufe:	500
Personen:	448
erfolgreich:	500
nicht erfolgreich:	0

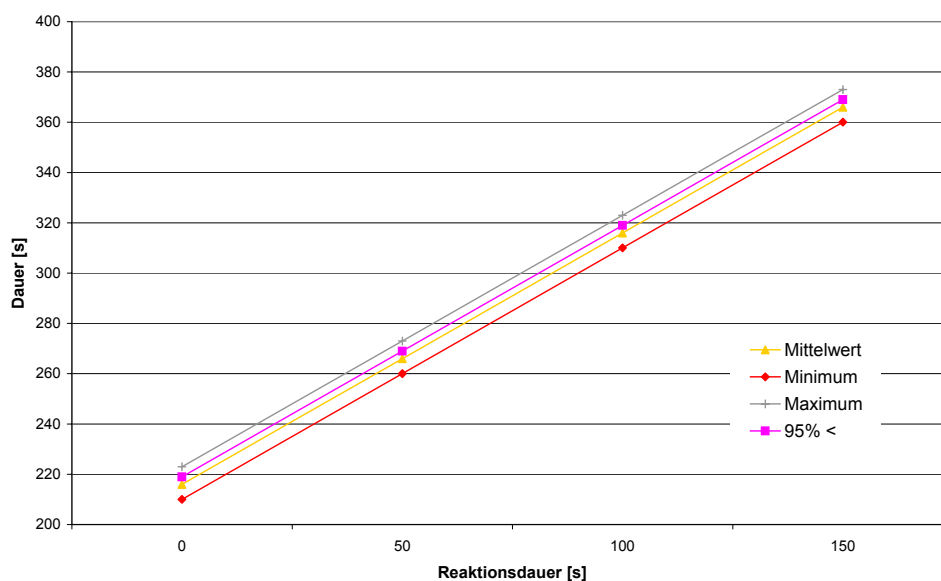
Personenparameter

Group 0 'Rimea Test 8':					
	min	max	mean	stddev	distribution
VMax:	3	3	3	1	normal
Sway:	1	1	1	1	normal
Reaction:	variiert				normal
Dawdle:	0	0	0	0	normal
Inertia:	1	1	1	1	normal

Ergebnisse der Variation

Reaktion [s]	0	50	100	150
Mean	216	266	316	366
Stddev	2	2	2	2
95% <	219	269	319	369
Min	210	260	310	360
Max	223	273	323	373

Reaktion, konstant



Reaktionsdauer, verteilt, Standardabweichung 10 Sekunden

Statistik der Mittelwertrechnungen

Simulationsdurchläufe:	500
Personen:	448
erfolgreich:	500
nicht erfolgreich:	0

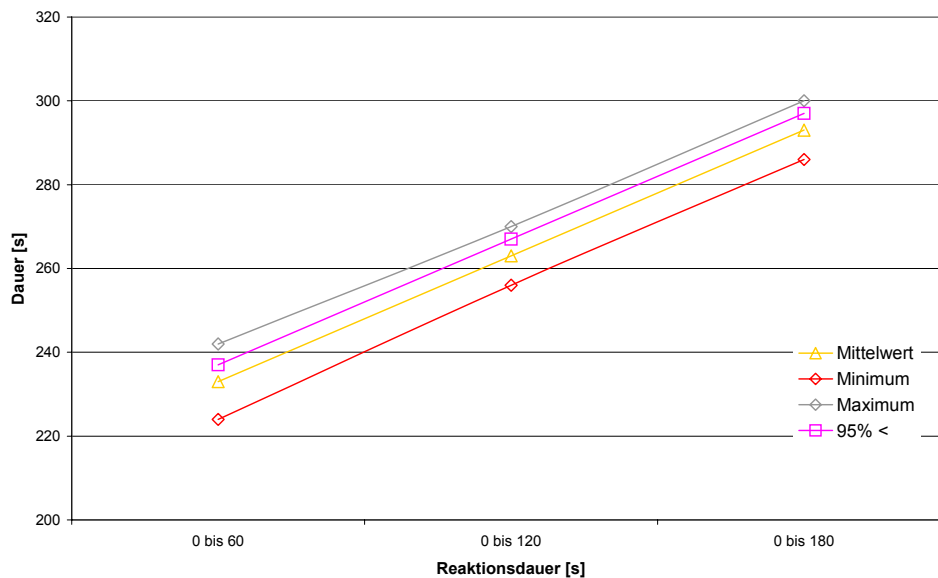
Personenparameter

Group 0 'Rimea Test 8':						
	min	max	mean	stddev	distribution	
VMax:	3	3	3	1	normal	
Sway:	1	1	1	1	normal	
Reaction:	0	variiert		10	normal	
Dawdle:	0	0	0	0	normal	
Inertia:	1	1	1	1	normal	

Ergebnisse der Variation

Reaktion [s]	0 bis 60, MW=30	0 bis 120, MW=60	0 bis 180, MW=90
Mean	233	263	293
Stddev	2	3	3
95% <	237	267	297
Min	224	256	286
Max	242	270	300

Reaktion verteilt; Stdabw. = 10 s



Reaktionsdauer, verteilt, Standardabweichung 20 Sekunden

Statistik der Mittelwertrechnungen

Simulationsdurchläufe:	500
Personen:	448
erfolgreich:	500
nicht erfolgreich:	0

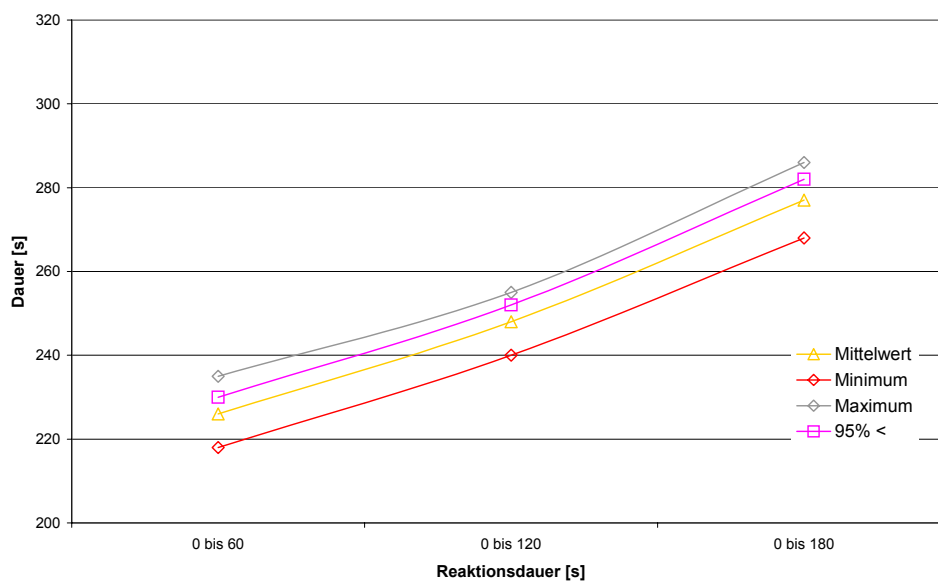
Personenparameter

Group 0 'Rimea Test 8':					
	min	max	mean	stddev	distribution
VMax:	3	3	3	1	normal
Sway:	1	1	1	1	normal
Reaction:	0	variiert		20	normal
Dawdle:	0	0	0	0	normal
Inertia:	1	1	1	1	normal

Ergebnisse der Variation

Reaktion [s]	0 bis 60, MW=30	0 bis 120, MW=60	0 bis 180, MW=90
Mean	226	248	277
Stddev	3	3	3
95% <	230	252	282
Min	218	240	268
Max	235	255	286

Reaktion, verteilt; Stdabw. = 20s



Schwanken, konstant

Statistik der Mittelwertrechnungen

Simulationsdurchläufe:	500
Personen:	448
erfolgreich:	500
nicht erfolgreich:	0

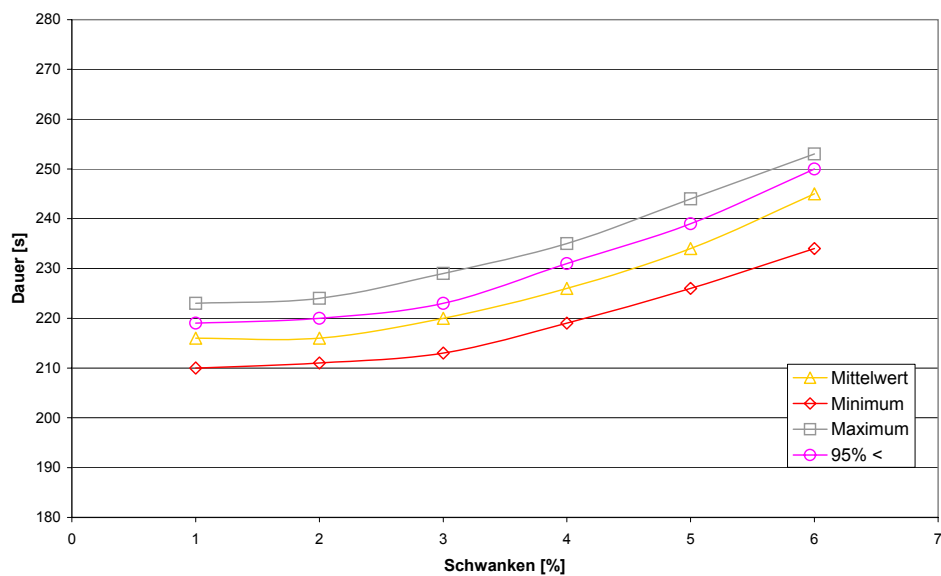
Personenparameter

Group 0 'Rimea Test 8':					
	min	max	mean	stddev	distribution
VMax:	3	3	3	1	normal
Sway:	variiert				normal
Reaction:	0	0	0	1	normal
Dawdle:	0	0	0	0	normal
Inertia:	1	1	1	1	normal

Ergebnisse der Variation

Sway [%]	1	2	3	4	5	6
mean	216	216	220	226	234	245
stddev	2	2	2	3	3	3
95% <	219	220	223	231	239	250
min	210	211	213	219	226	234
max	223	224	229	235	244	253

Schwanken, konstant



Schwanken bei Steigerung der Trägheit

Statistik der Mittelwertrechnungen

Simulationsdurchläufe:	500
Personen:	448
erfolgreich:	500
nicht erfolgreich:	0

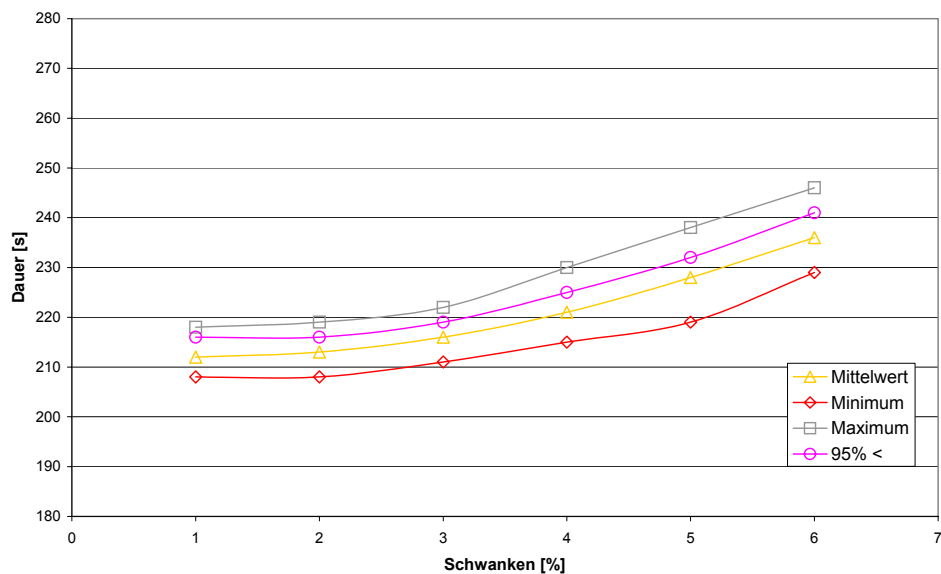
Personenparameter

Group 0 'Rimea Test 8':					
	min	max	mean	stddev	distribution
VMax:	3	3	3	1	normal
Sway:	variiert				normal
Reaction:	0	0	0	1	normal
Dawdle:	0	0	0	0	normal
Inertia:	5	5	5	2	normal

Ergebnisse der Variation

Sway [%]	1	2	3	4	5	6
mean	212	213	216	221	228	236
stddev	2	2	2	2	3	3
95% <	216	216	219	225	232	241
min	208	208	211	215	219	229
max	218	219	222	230	238	246

Schwanken, konstant; Trägheit = 5



Trödelwahrscheinlichkeit, konstant

Statistik der Mittelwertrechnungen

Simulationsdurchläufe: 500
 Personen: 448
 erfolgreich: 500
 nicht erfolgreich: 0

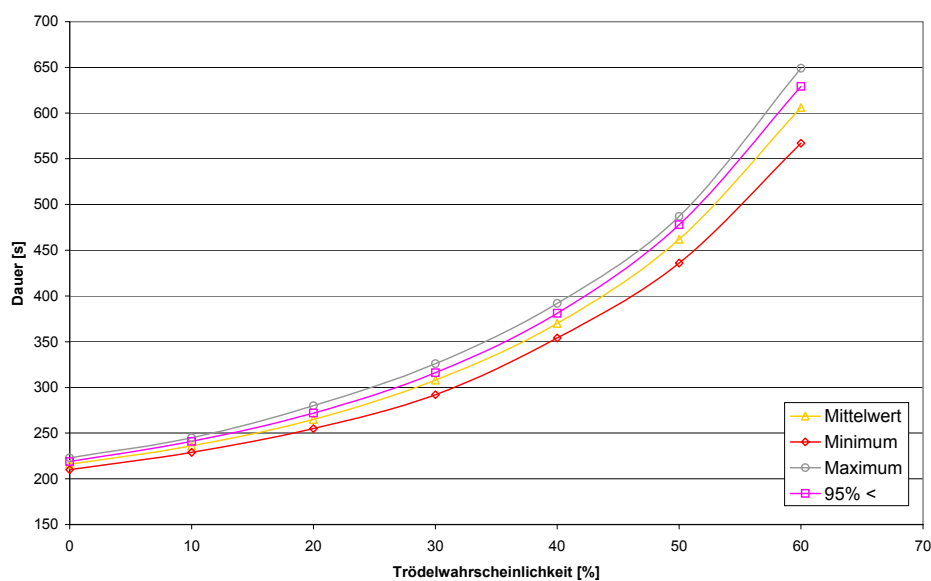
Personenparameter

Group 0 'Rimea Test 8':						
	min	max	mean	stddev	distribution	
VMax:	3	3	3	1	normal	
Sway:	1	1	1	1	normal	
Reaction:	0	0	0	1	normal	
Dawdle:	variiert				normal	
Inertia:	1	1	1	1	normal	

Ergebnisse der Variation

Dawdle [%]	0	10	20	30	40	50	60
mean	216	236	265	308	370	462	606
stddev	2	3	4	5	7	9	13
95% <	219	241	272	316	381	478	629
min	210	229	255	292	354	436	567
max	223	245	280	326	392	487	649

Trödelwahrscheinlichkeit, konstant



Gruppenzusammenhalt

Statistik der Mittelwertrechnungen

Simulationsdurchläufe:	500
Personen:	448
erfolgreich:	500
nicht erfolgreich:	0

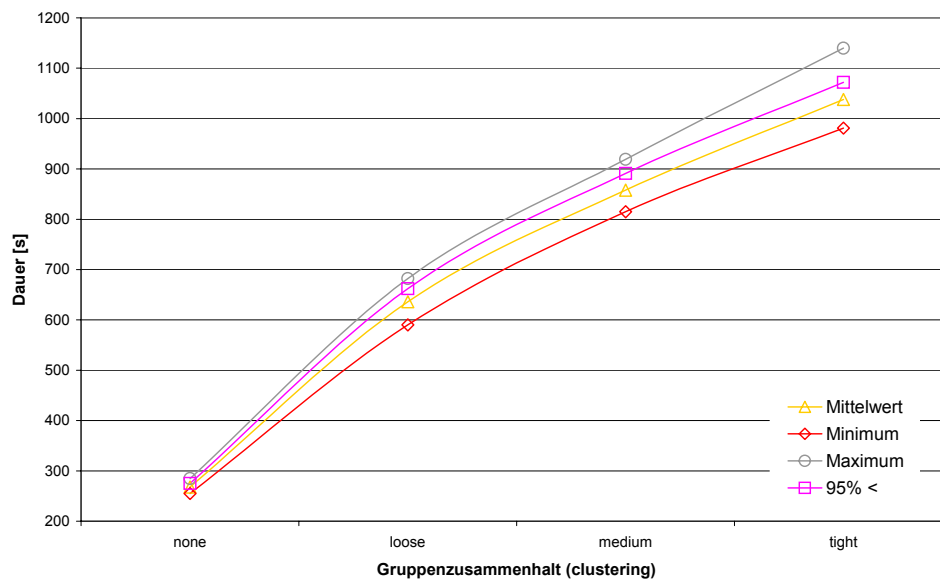
Personenparameter

Group 0 – Parametereinstellungen über alle Gruppen gleich					
	min	max	mean	stddev	distribution
VMax:	2	5	3	1	normal
Sway:	1	5	3	2	normal
Reaction:	0	0	0	2	normal
Dawdle:	0	30	15	5	normal
Inertia:	1	5	3	2	normal
Clustering:	variiert				

Ergebnisse der Variation

Clustering	none	loose	medium	tight
mean	268	636	858	1038
stddev	5	15	19	20
95% <	275	662	891	1072
min	255	590	815	981
max	285	682	919	1140

Variation des Gruppenzusammenhaltes



B3 Erklärung der Ergebnisdateien

Mittelwertrechnung

Demographics (Personen- bzw. Gruppeneigenschaften)

Gruppennummer und Bezeichnung	Demographics Log File				
	min	max	mean	stddev	distribution
Geschwindigkeit Schwanken Reaktion Trödeln Trägheit Gruppenzusammenhalt	Group 0 'R112':				
	VMax:	2	5	3	1
	Sway:	1	5	3	2
	Reaction:	0	0	0	2
	Dawdle:	0	30	15	5
	Inertia:	1	5	3	2
	Clustering:	tight			
	Group 1 'formerly Crew':				
	VMax:	2	5	3	1
	Sway:	1	5	3	2
	Reaction:	0	0	0	2
	Dawdle:	0	30	15	5
	Inertia:	1	5	3	2
	Clustering:	tight			
	Group 2 'R01':				
	VMax:	2	5	3	1
	Sway:	1	5	3	2
	Reaction:	0	0	0	2
	Dawdle:	0	30	15	5
	Inertia:	1	5	3	2
	Clustering:	tight			
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Art der Verteilung

Abbildung A 17: Beschreibung der Ausgabe Demographics aus PedGo

In dieser Ausgabedatei werden alle vorhandenen Gruppen mit Nummer und Bezeichnung und den zugewiesenen Personeneigenschaften aufgeführt.

Auswertung der Durchläufe

Die Ergebnisse der Mittelwertrechnung geben Aufschluss über die statistische Verteilung mehrerer Durchläufe.

Art der Rechnung Projektpfad Programmversion	PedGo result file, mean run: project file: D:\PedGo\Test.pg2 program version: 2.3.1									
Statistik Anzahl der Rechendurchläufe simulierte Personenzahl	statistics: simulations: 500 persons: 448 success: 500 no success: 0									
Statistische Auswertung Mittelwert Standardabweichung 95%-Wert Minimum Maximum	/s /(min:s) seed mean 1038 17:18 4848 stddev 20 00:20 --- 95% < 1072 17:52 4809 min 981 16:21 4729 max 1140 19:00 4860									
Gruppennummer und Bezeichnung	Group Data: Number Name File Name 0 R112 no file 1 R00 no file									
Blockierzeiten der Ausgänge absolute Blockierzeit Blockierzeit pro Person	exit blocking times /s: min max mean stddev absolute: 0 0 - - per person: 0 0 - -									
Häufigkeitsverteilung ermittelte Entfluchungsdauern Häufigkeit ermittelter Dauern	time distribution: time /s: 981 982 983 984 985 986 frequency: 1 1 0 0 0 0									
Daten für Entfluchungskurve Anzahl der geretteten Personen Mittelwert 95%-Wert Minimum Maximum	evacuation curves: saved pers.: 0 10 20 30 40 50 mean /s: 0 75 98 127 163 189 95%< /s: 0 94 121 144 175 198 max /s: 0 92 119 139 195 224 min /s: 0 83 97 120 151 195									
Aufstellung aller Durchläufe	calculated times: saved persons and times /s: seed duration saved 0 10 20 30 4711 1034 448 0 76 120 143 4712 1079 448 0 74 113 150 4713 1035 448 0 81 124 150									
	Anzahl geretteter Personen									
	Dauer, wann o.g. Personen das Ziel erreicht haben									
	Dauer, wann o.g. Personen das Ziel erreicht haben									

Nummern der Durchläufe (seeds)

Entfluchungsdauer des Durchlaufs

Anzahl geretteter Personen

Abbildung A 18: Erklärung der Ergebnisdatei der Mittelwertrechnung

Duration Distribution (Häufigkeitsverteilung)

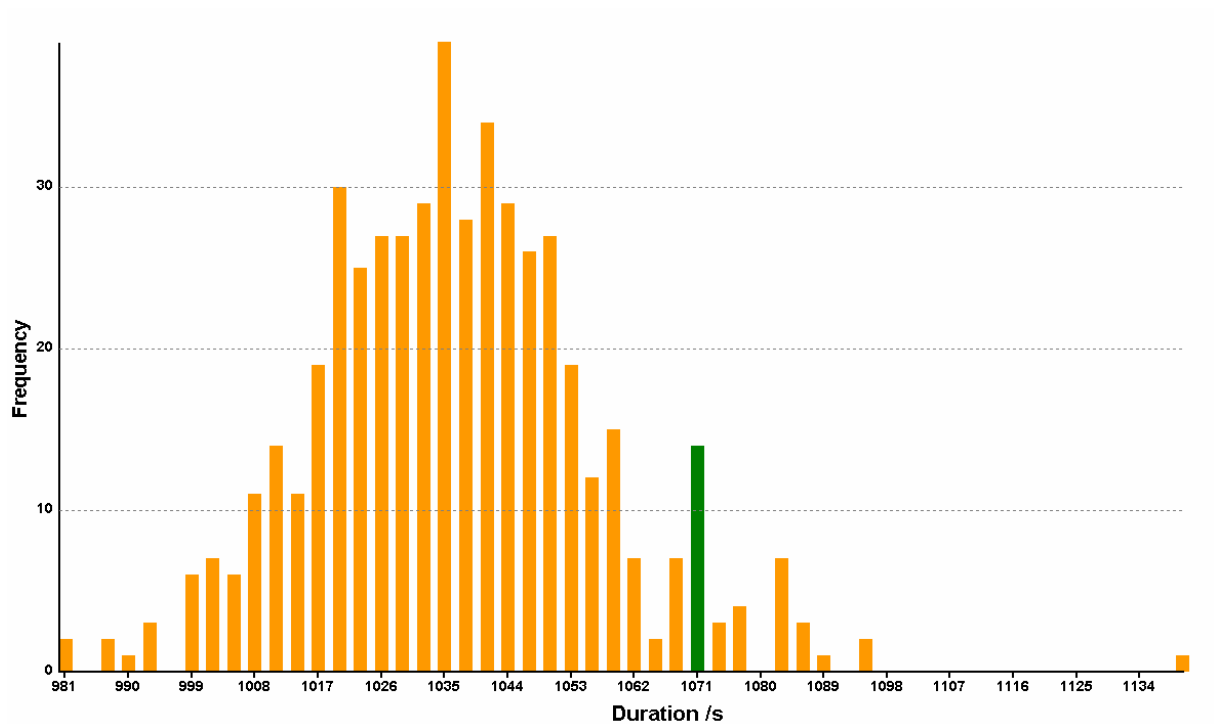


Abbildung A 19: Histogramm der Häufigkeitsverteilung der Entfluchtungsauern aus PedGo

Aus der Ergebnisdatei der Mittelwertrechnung ist die Verteilung aller ermittelten Entfluchtungsauern ersichtlich, um eine statistische Analyse durchzuführen. Der grüne Balken stellt den signifikanten 95%-Wert dar. Weiter ist erkennbar, wie oft Minimal- und Maximalauern erreicht wurden.

Einzelrechnung

Person data (Personendaten)

Im ersten Teil der Datei sind die Einstellungen aus der Projektdatei dokumentiert.

Art der Rechnung Projektpfad Programmversion	PedGo result file, single run: project file: D:\PedGo\Test.pg2 program version: 2.3.1															
Nummer des Durchlaufs Dauer in [s] simulierte Personen	seed:	4809														
	duration /s:	1072														
	persons:	448														
<u>Gruppennummer und Bezeichnung</u>	Group Data: <table><tr><td>Number</td><td>Name</td><td>File Name</td></tr><tr><td>0</td><td>R112</td><td>no file</td></tr><tr><td>1</td><td>R00</td><td>no file</td></tr><tr><td>2</td><td>R01</td><td>no file</td></tr></table>				Number	Name	File Name	0	R112	no file	1	R00	no file	2	R01	no file
Number	Name	File Name														
0	R112	no file														
1	R00	no file														
2	R01	no file														
<u>Blockierzeiten der Ausgänge</u>	exit blocking times /s:															
	min	max	mean	stddev												
absolute Blockierzeit	absolute:	0	0 -	-												
Blockierzeit pro Person	per person:	0	0 -	-												
<u>definierte Ziele</u>	defined routes: <table><tr><td>number</td><td>type</td><td>name</td></tr><tr><td>0</td><td>pax</td><td>Ausgang</td></tr></table>				number	type	name	0	pax	Ausgang						
number	type	name														
0	pax	Ausgang														

Abbildung A 20: Erklärung der Einstellungsdaten aus der Einzelrechnung

Im zweiten Teil sind die detaillierten Daten zu den Personen aufgeführt.

person	group	start coordinates:			destination coordinates:			goal	time	distance	multiple of Vmax				
		sx	sy	sz	dx	dy	dz	#	/s	cells	0	0,25	0,5	0,75	1
1	2	1	4	2	50	0	0	0	927	466	606	209	0	77	34
2	2	3	3	2	50	0	0	0	954	578	545	0	239	0	169
Personennummer	zugehörige Gruppe	Startkoordinaten			Zielkoordinaten			Zielbezeichnung	Entfluchtungsdauer	gelaufene Distanz	Dauer mit der das jeweilige Vielfache der Geschwindigkeit gelaufen wurde				

person	group	parameters:					
		Vmax	patience	sway	reaction	dawdle	inertia
1	2	3	-	1	0	17	3
2	2	2	-	4	0	17	3
Personennummer	zugehörige Gruppe	zugewiesene Parameter					

Abbildung A 21: Erklärung der Personendaten der Ergebnisse der Einzelrechnung

Logpoints

Logpoints geben die Personenanzahl in einem vorher definierten Bereich zu einem bestimmten Zeitpunkt an. Durch eine Auswertung ist damit eine lokale Dichteberechnung oder die grafische Darstellung des Entfluchtungsablaufes für bestimmte Bereiche möglich.

Art der Rechnung Projektpfad Programmversion	PedGo log points file: project file: D:\PedGo\test.pg2 program version: 2.3.1																			
definierte Bereiche und Bezeichnung	defined points: <table><tr><td>number</td><td>x</td><td>y</td><td>z</td><td>name</td></tr><tr><td>0</td><td>52</td><td>16</td><td>2</td><td>2OG</td></tr><tr><td>1</td><td>52</td><td>16</td><td>1</td><td>1OG</td></tr></table>					number	x	y	z	name	0	52	16	2	2OG	1	52	16	1	1OG
number	x	y	z	name																
0	52	16	2	2OG																
1	52	16	1	1OG																
Personenzahl, die sich im definierten Bereich befindet	time /s	2OG	1OG																	
	0	0	0																	
	1	0	0																	
	2	0	0																	
	3	0	0																	
	4	0	0																	
	5	0	0																	
	6	0	0																	
	7	0	0																	
	8	0	0																	
	9	1	0																	
	10	1	0																	
	11	1	0																	
	12	2	0																	
	13	2	0																	
	14	1	0																	
	15	1	0																	
	16	1	0																	
	17	2	1																	
	18	3	1																	
	19	3	2																	
20	4	3																		
	Zeitpunkte in Schritten von einer Sekunde	Anzahl der Personen die sich zum Zeitpunkt im definierten Bereich aufhalten																		

Abbildung A 22: Erklärung der logpoints-Datei der Einzelrechnung aus PedGo

Density Plot

Die nachfolgende Tabelle gibt die Farbskalierung für die so genannten Dichteplots (density plots) an.

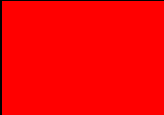

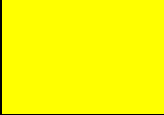


Farbe	Prozent	Farbzusammensetzung (rot, grün, blau)
	100% (Dichte >4 P/m ² während x % der Entfluchtungsdauer)	(255, 0, 0)
	75% (Dichte >4 P/m ² während 0,75 * x % der Entfluchtungsdauer)	(255, 120, 0)
	50% (Dichte >4 P/m ² während 0,5 * x % der Entfluchtungsdauer)	(255, 255, 0)
	25% (Dichte >4 P/m ² während 0,25 * x % der Entfluchtungsdauer)	(120, 255, 0)
	1% (Dichte >4 p/m ² während einer Sekunde)	(0, 255, 0)

Tabelle A 1: Erläuterung der Farbskalierung der Dichteplots aus PedGo (nach Tim Meyer-König)

Die einzelnen Prozentwerte für die jeweiligen Farben beziehen sich auf den eingestellten maximalen Grenzwert. 100 % bedeutet, dass eine Dichte von 4 Personen/m² über die gesamte Dauer des Grenzwertes x überschritten wurde. 50 % heißt hingegen, dass eine Dichte nur für die Hälfte der Dauer des vorgegebenen Grenzwertes erreicht wurde. 1 % stellt die Bereiche dar, in denen eine Dichte von 4 Personen/m² nur sehr kurz überschritten wurde, mindestens aber für den Zeitschritt von einer Sekunde.

Screenshots

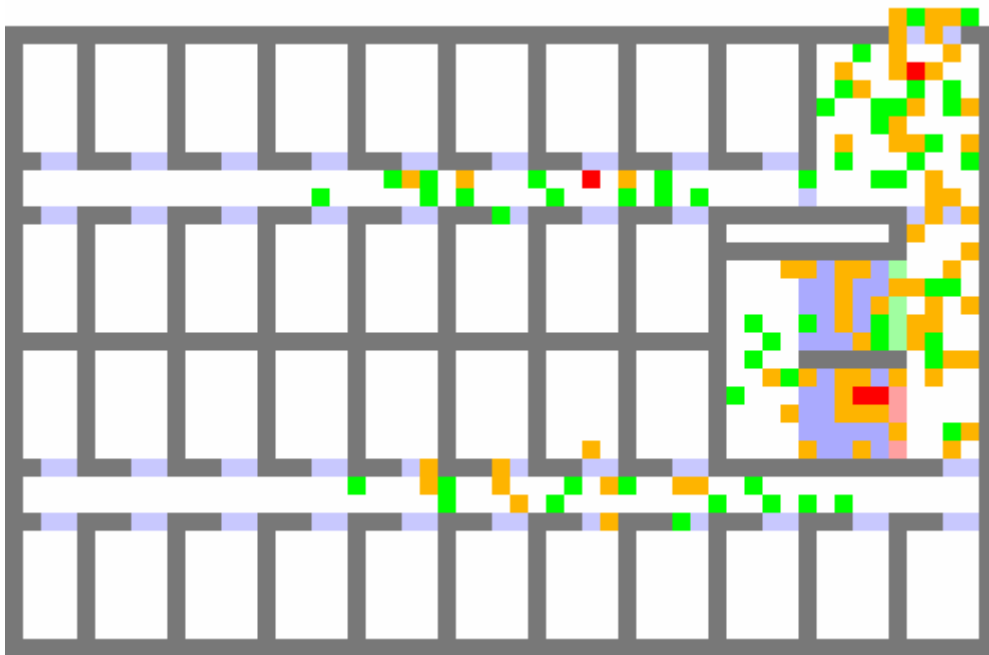


Abbildung A 23: Beispiel eines Screenshots aus PedGo

Jeder Pixel der grafischen Darstellung repräsentiert eine Zelle. Unterschiedliche Farben entsprechen unterschiedlichen Merkmalen. Die Bedeutung der einzelnen Farben kann Tabelle A 2 entnommen werden. Personen werden abhängig von ihrer Geschwindigkeit in unterschiedlichen Farben dargestellt. Anhäufungen von gelben Punkten stellen somit einen langsam fließenden Personenstrom dar, wohingegen Anhäufungen von roten Punkten Personen im Stillstand und dadurch Stauungen wiedergeben.

Farbe	Bedeutung
weiß	begehbare Zellen
grau	nicht begehbare Zellen (Wände)
blau	Treppen
hellblau	Türen und Schwellen
rot	Personen die stehen
gelb	Personen mit mittlerer Geschwindigkeit
grün	Personen mit maximaler Geschwindigkeit
orange	Rettungsfelder

Tabelle A 2: Farbcodierung der graphischen Ausgabe.

ANHANG C: SIMULEX

C1 Bewertung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Für die Modellierung des dreigeschossigen Gebäudes in SIMULEX, wurde der Treppenraum vereinfachend verändert. Anstatt zweier gegenläufiger Treppenläufe wurde für die Verbindung zwischen zwei Geschossen jeweils nur ein Treppenhaus modelliert. Als Kompensationsmaßnahme wurde zu den geneigten Lauflängen die zweifache Treppenlaufbreite addiert. Dies erfolgte, um den Laufweg auf dem Zwischenpodest zu berücksichtigen. Das Resultat ist, dass aufgrund dieser Modellierung nur eine 180° Wendung anstatt von zweien erfolgt.

Geschwindigkeit

Um den Einfluss der Geschwindigkeit festzustellen, wurde die Geschwindigkeit für alle Personen konstant eingestellt und variiert. Die Variation erfolgt in Schritten von 0,2 m/s in einem Bereich von 0,6 bis 1,8 m/s. Es wurde weiter nur ein Personentyp angenommen und die Reaktionsdauer zu Null gesetzt. Damit bewegen sich alle Personen zum gleichen Startzeitpunkt.

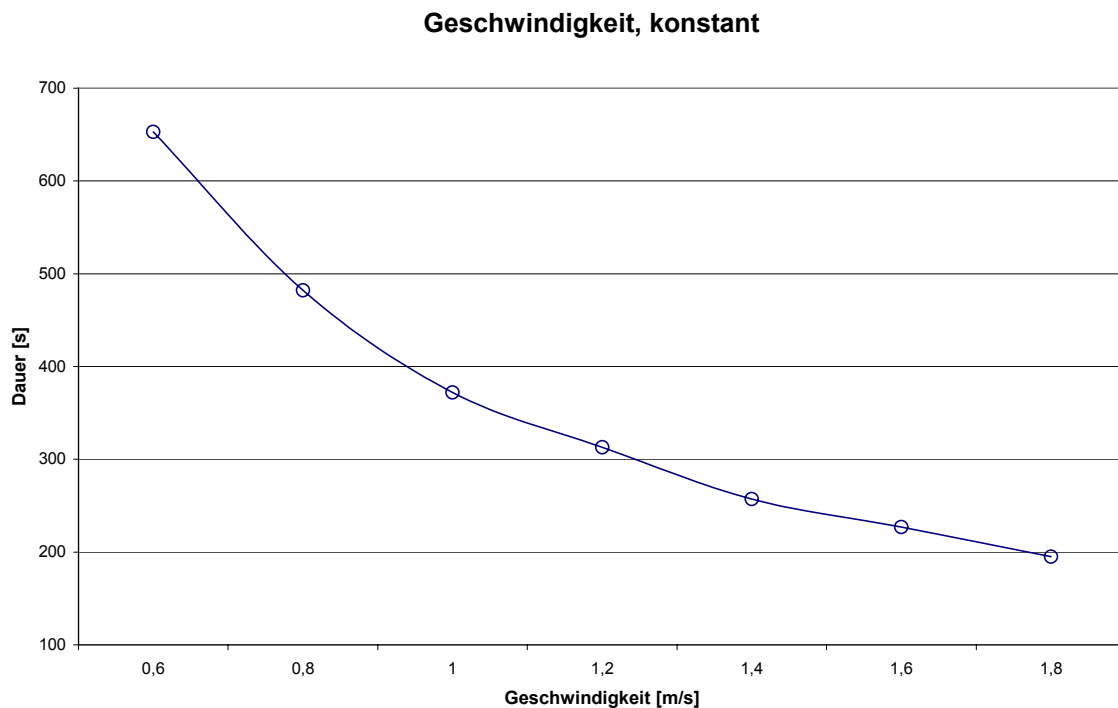


Abbildung A 24: Entwicklung der Entfluchtungsdauer bei schrittweiser Erhöhung der Geschwindigkeit (SIMULEX)

Auch hier ist mit anwachsender Geschwindigkeit die Senkung der Entfluchtungsdauer zu erkennen.

Weiter wurde geprüft, wie sich die Entfluchtungsdauer entwickelt, wenn die Geschwindigkeit verteilt auf die Personen zugewiesen wird. Dazu wurde eine schrittweise Erhöhung der Abweichung bei einem Mittelwert von 1,2 m/s vorgenommen.

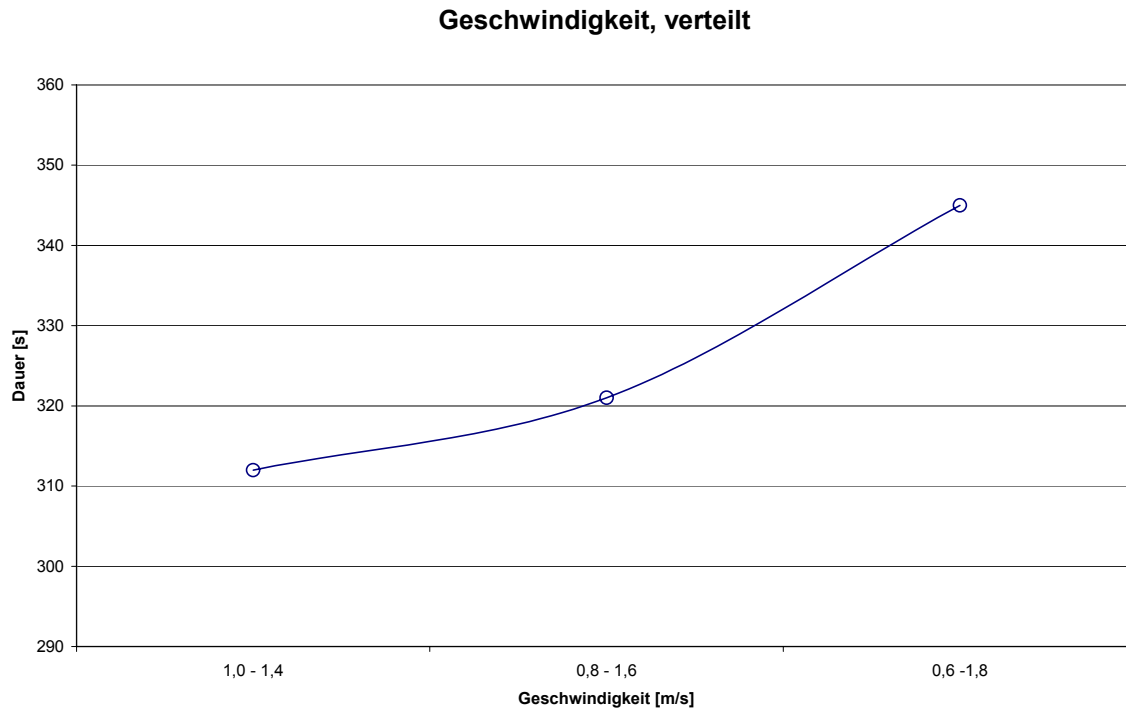


Abbildung A 25: Entwicklung der Entfluchtungsdauer bei verteilter Zuweisung der Geschwindigkeit (SIMULEX)

Die Verringerung der Verteilungsspanne senkt die Entfluchtungsdauer. Wird die Verteilungsspanne von 1,0 bis 1,4 m/s auf 0,6 bis 1,8 m/s erhöht, steigt die Dauer um etwa 11%. Durch die breitere Verteilung werden schneller laufende Personen durch langsam laufende behindert.

Um die Verteilung der Geschwindigkeit auf die Personen darzustellen, ist nachfolgend beispielhaft die Geschwindigkeitsverteilung von Personen dargestellt. Anhand eines Raumes, der mit 100 Personen besetzt wurde, sind die individuellen Geschwindigkeiten der Personen manuell ausgelesen worden.

Die Geschwindigkeiten wurden dazu in Klassen mit Intervallen von jeweils 0,05 m/s in ein Diagramm aufgetragen. Untersucht wurde jeweils die Verteilung bei einem Mittelwert von 1,2 m/s. Für die Untersuchung wurde nur die Abweichung verändert.

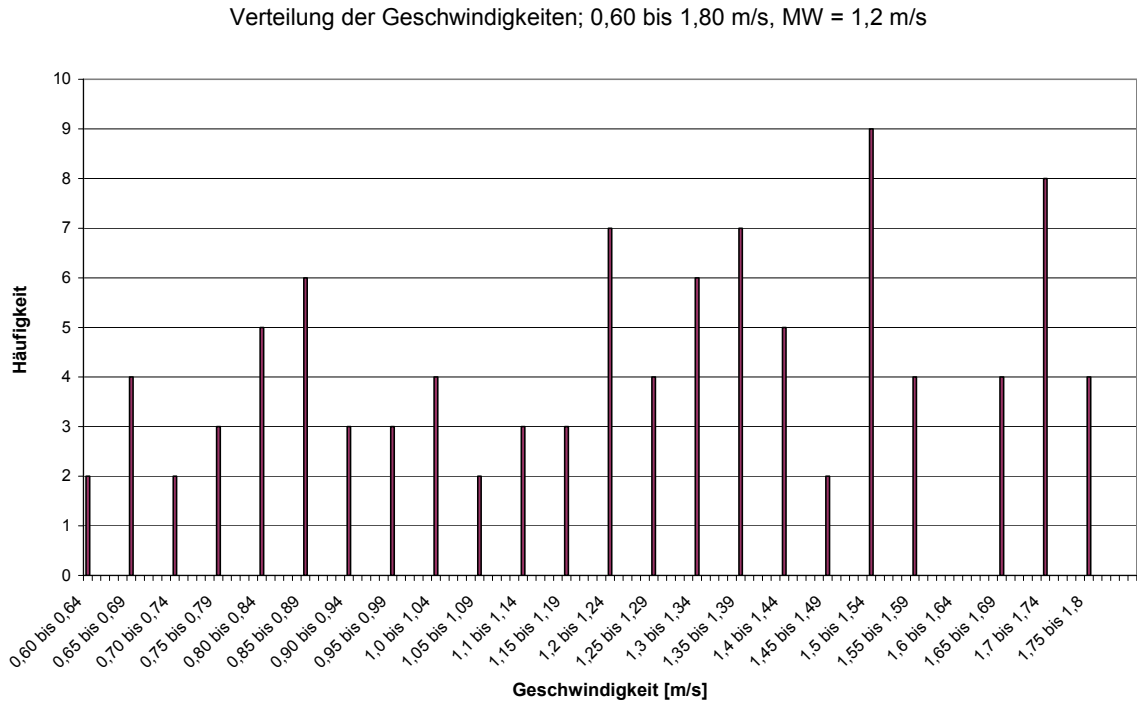


Abbildung A 26: Verteilung der Geschwindigkeiten in SIMULEX für einen Mittelwert von 1,2 m/s und einer Abweichung von 0,6 m/s

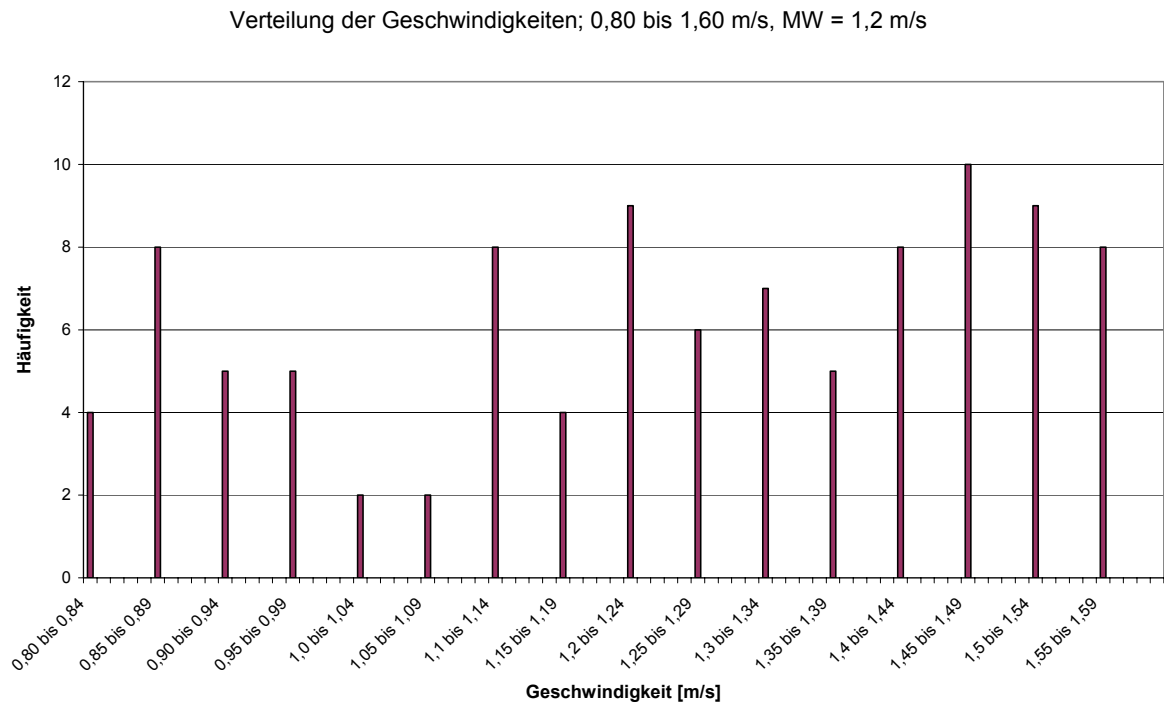


Abbildung A 27: Verteilung der Geschwindigkeiten in SIMULEX für einen Mittelwert von 1,2 m/s und einer Abweichung von 0,4 m/s

Aus den Diagrammen ist zu entnehmen, dass die Verteilung der Geschwindigkeit annähernd gleichverteilt erfolgt.

Reaktionsdauer

Um die Einstellung der Reaktionsdauer zu untersuchen, wurde zunächst die Dauer ohne Abweichung schrittweise erhöht. Das bedeutet, alle Personen beginnen zur gleichen Zeit mit der Fluchtbewegung. Eine Variation der Entfluchtungsdauer ohne eingestellte Abweichung liefert folgende Ergebnisse.

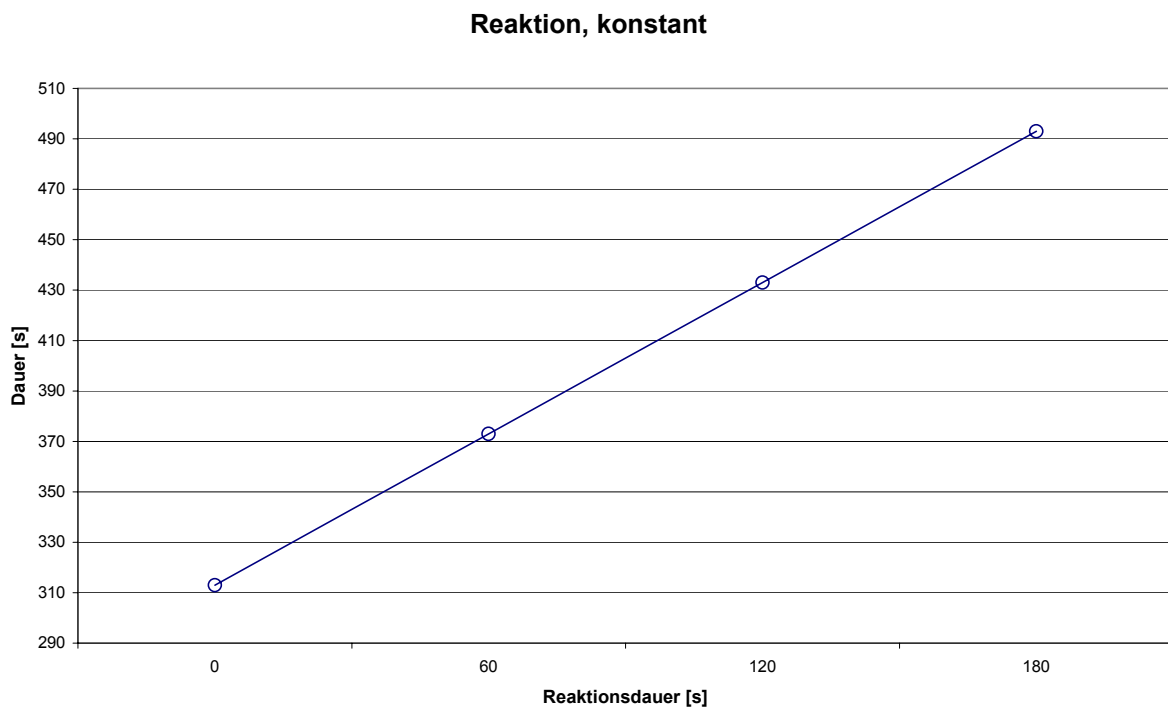


Abbildung A 28: Entwicklung der Entfluchtungsdauer bei Variation der Reaktionsdauer (SIMULEX)

Auch hier ist, wie bei PedGo, ein linearer Verlauf feststellbar. Es ist also kein Einfluss der Höhe der Reaktionsdauer auf die Entwicklung der Dauer festzustellen, wenn alle Personen gleichzeitig reagieren.

Zur weiteren Untersuchung wurde die Entfluchtungsdauer bei verschiedenen Verteilungen der Reaktionsdauer untersucht. Der Mittelwert wurde dazu zu 90 Sekunden gewählt und die Abweichung schrittweise erhöht.

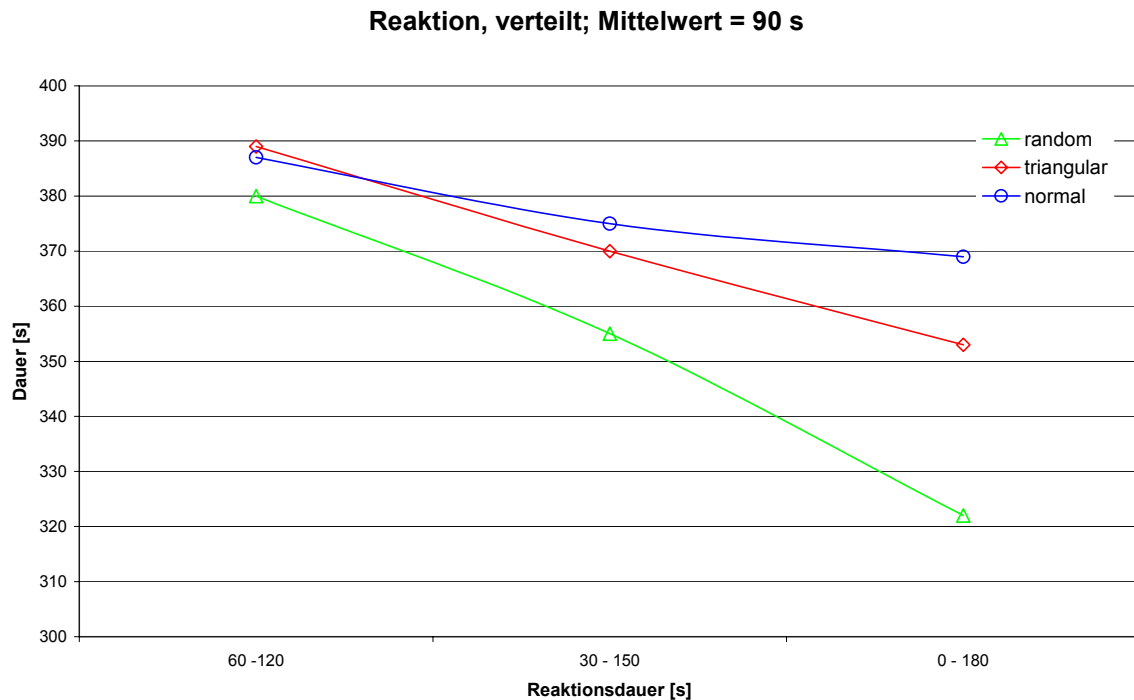


Abbildung A 29: Entwicklung der Entfluchtungsdauer bei unterschiedlicher Verteilung der Reaktionsdauer (SIMULEX)

Durch die gleichmäßigere Verteilung der Reaktionsdauer, aufgrund der steigenden Abweichungen, wird der Personenstrom entspannt und die Staubildung verringert. Deutlich erkennbar ist, dass mit der Einstellung random (gleichverteilt), die Entfluchtungsauern durchgehend geringer sind. Die Verteilungen triangular und normal sind bei geringer Verteilungsspanne ungefähr gleich. Mit zunehmender Verteilungsspanne sinkt die Entfluchtungsdauer schneller bei der triangularen Verteilung als bei der Normalverteilung.

Beispielhaft ist für einen simulierten Raum mit 50 Personen die individuelle Reaktionsdauer je nach Art der Verteilung manuell ausgelesen und in einem Diagramm aufgetragen worden. Der eingestellte Mittelwert betrug 60 Sekunden mit einer Abweichung von 30 Sekunden.

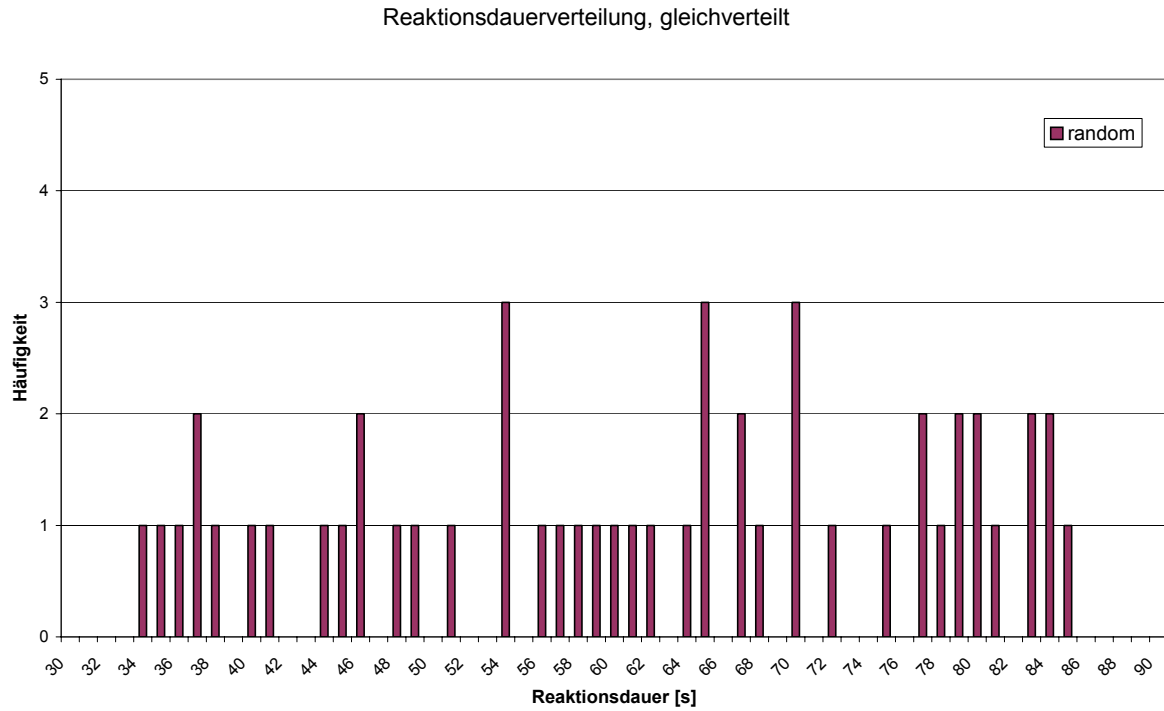


Abbildung A 30: ausgelesene gleichverteilte Reaktionsdauern eines Raumes mit 50 Personen

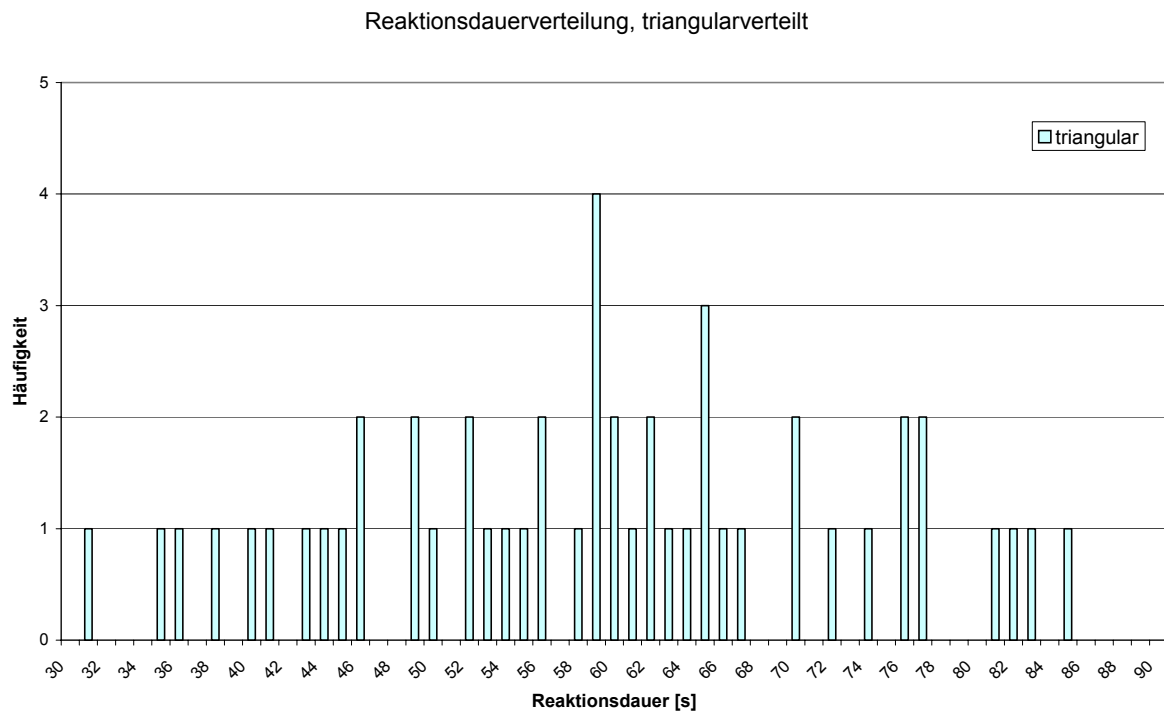


Abbildung A 31: ausgelesene triangularverteilte Reaktionsdauern eines Raumes mit 50 Personen

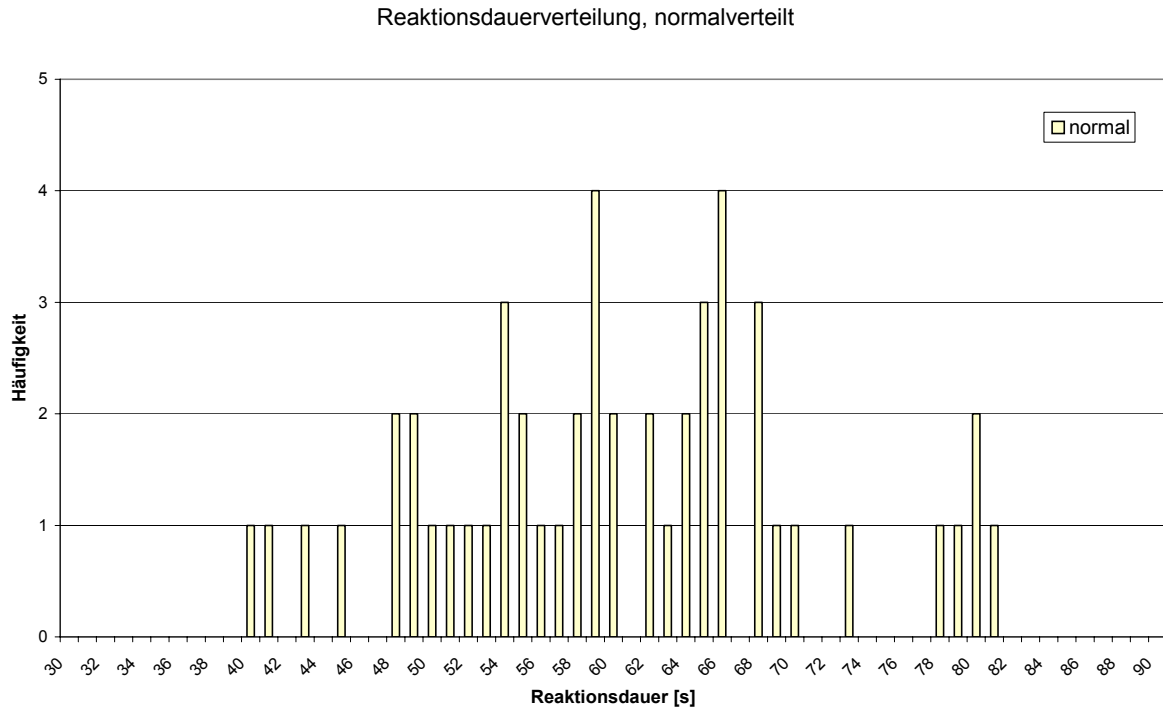


Abbildung A 32: ausgelesene normalverteilte Reaktionsdauern eines Raumes mit 50 Personen

Trotz der geringen Anzahl der Personen, ist hinsichtlich der Normalverteilung zu erkennen, dass im Gegensatz zu den übrigen Verteilungen eine stärkere Konzentration der Werte um den eingestellten Mittelwert von 60 Sekunden erfolgt.

Körperproportionen

Für die nachfolgende Untersuchung wurde ermittelt, wie sich die Körperproportionen auf die Entfluchtdauer auswirken. Dazu wurden vier Simulationsdurchläufe für vier unterschiedliche Körperproportionen erstellt. Die Geschwindigkeit blieb für alle Personen gleich und konstant.

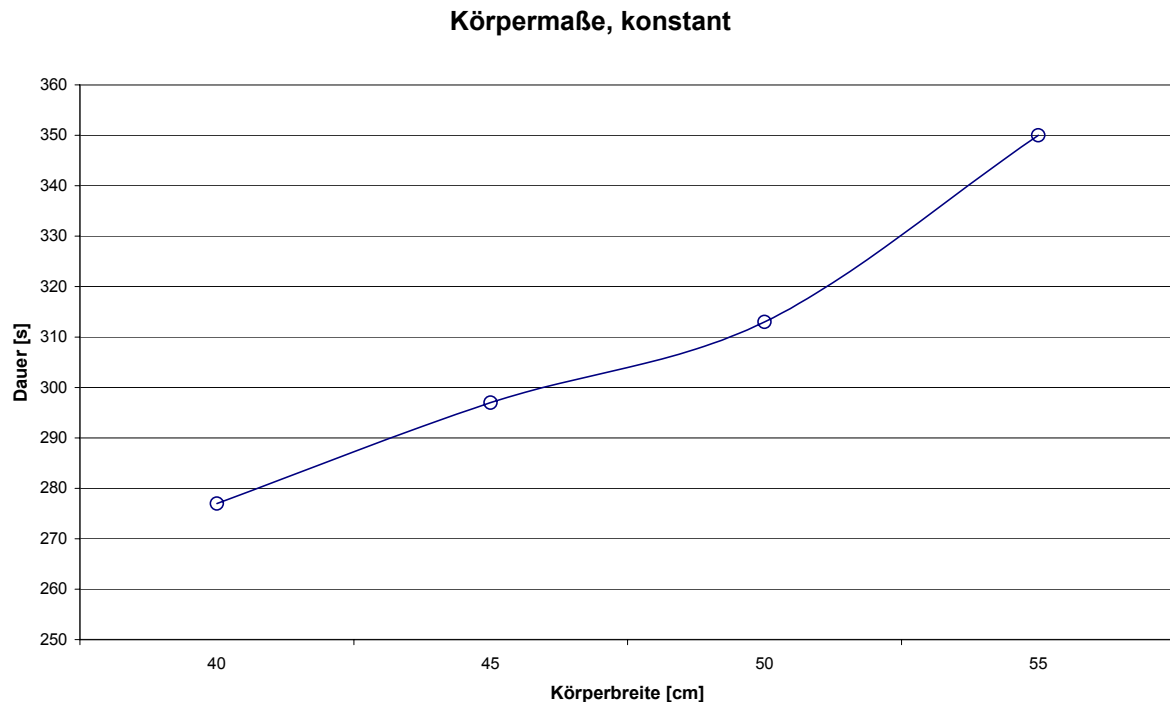


Abbildung A 33: Entwicklung der Entfluchtungsdauer bei Variation der Körpermaße

Gezeigt ist die Entwicklung der Dauer über die Körperbreite und stellt ein erwartetes Ergebnis dar. Durch die Vergrößerung der Körpermaße, steigt die Entfluchtungsdauer. Zunehmende Körperbreiten senken den Personenfluss und bewirken das Ansteigen der Dauer. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Treppenläufe und Ausgänge mit 2 Metern Breite bereits sehr hoch sind. Eine kleinere Dimensionierung der Durchgangsbreite, beispielsweise mit 0,8 Metern, würde diese Ergebnisse vermutlich nicht liefern, da von Anfang an die Kapazität beschränkt würde.

Zusammenfassung

Es wird weiter bestätigt, dass mit steigender Geschwindigkeit die Entfluchtungsdauer sinkt. Anwachsende Geschwindigkeiten erhöhen die mittlere Geschwindigkeit und damit den Personenfluss. Werden Geschwindigkeiten in einem höheren Spektrum verteilt, nehmen die langsamen Personen Einfluss auf die Entwicklung der Entfluchtungsdauer. Auch die Art der Verteilung kann erheblichen Einfluss auf die Dauer haben.

C2 Eingangsdaten und Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Geschwindigkeit, konstant

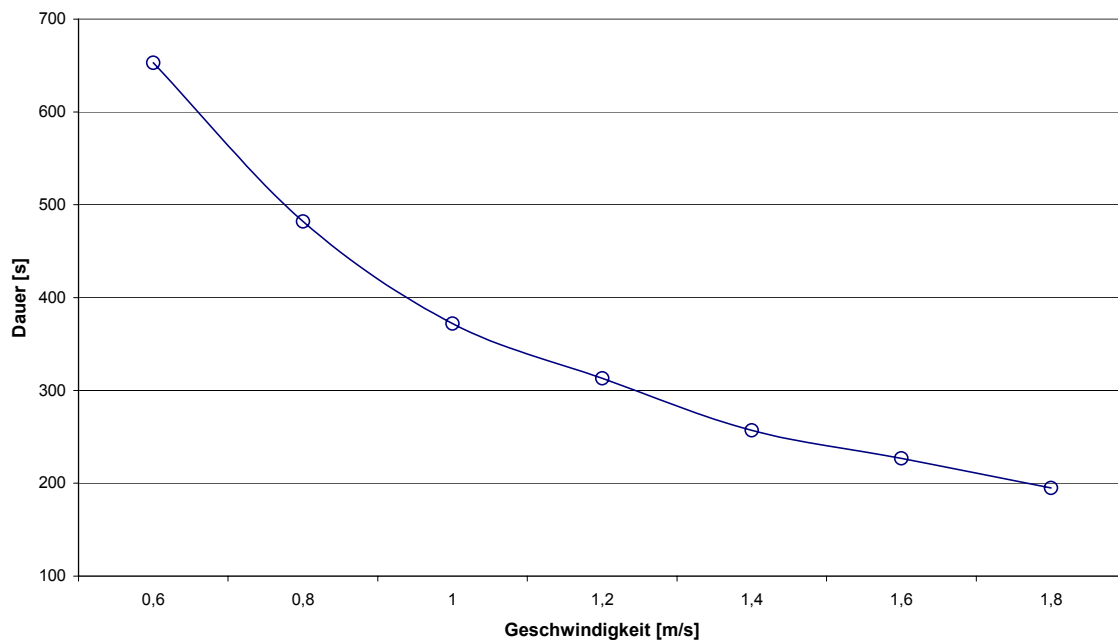
Definition der Populationsgruppe:

Parameter	Wert
Körperradius R(b) [m]	0,25
Torsoradius R(t) [m]	0,15
Schulterradius R(s) [m]	0,10
Geschwindigkeit [m/s]	variiert
Geschwindigkeitsabweichung [m/s]	0
Multiplikationsfaktor Treppen auf/ab [-]	0,6 / 0,5
Reaktionsdauer [s]	0

Ergebnisse der Variation:

Geschwindigkeit [m/s]	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
Entfluchtungsdauer [s]	653	482	372	313	257	227	195

Geschwindigkeit, konstant



Geschwindigkeit, verteilt

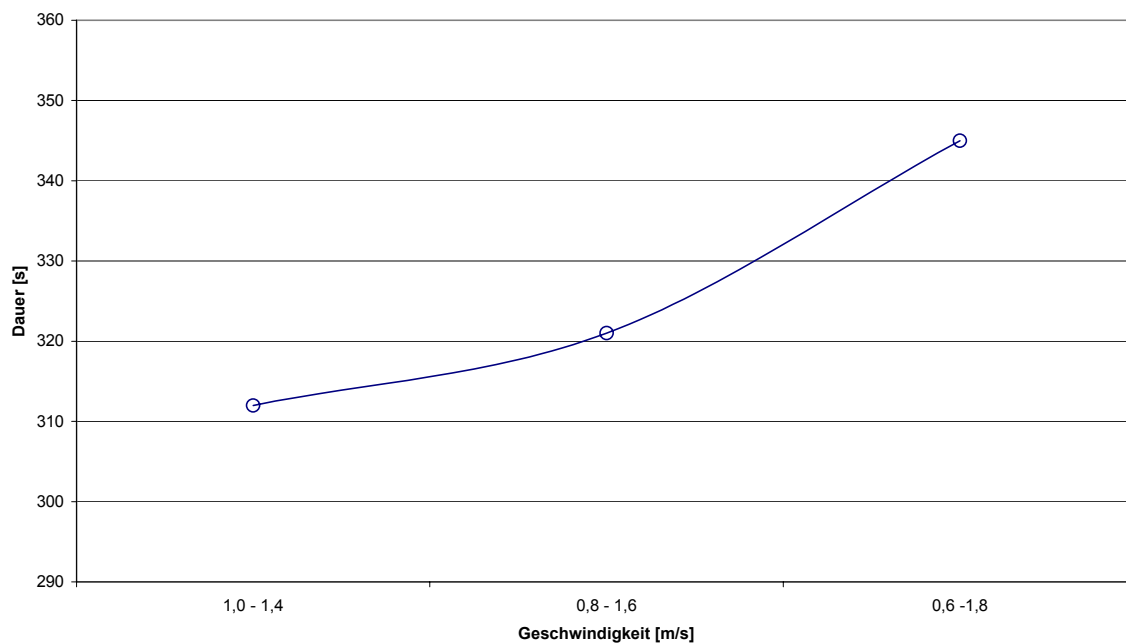
Definition der Populationsgruppe:

Parameter	Wert
Körperradius R(b) [m]	0,25
Torsoradius R(t) [m]	0,15
Schulterradius R(s) [m]	0,10
Geschwindigkeit [m/s]	variiert
Geschwindigkeitsabweichung [m/s]	variiert
Multiplikationsfaktor Treppen auf/ab [-]	0,6 / 0,5
Reaktionsdauer [s]	0

Ergebnisse der Variation:

Geschwindigkeit [m/s]	1,0 - 1,4	0,8 - 1,6	0,6 - 1,8
Entfluchtungsdauer [s]	312	321	345

Geschwindigkeit, verteilt



Reaktionsdauer, konstant

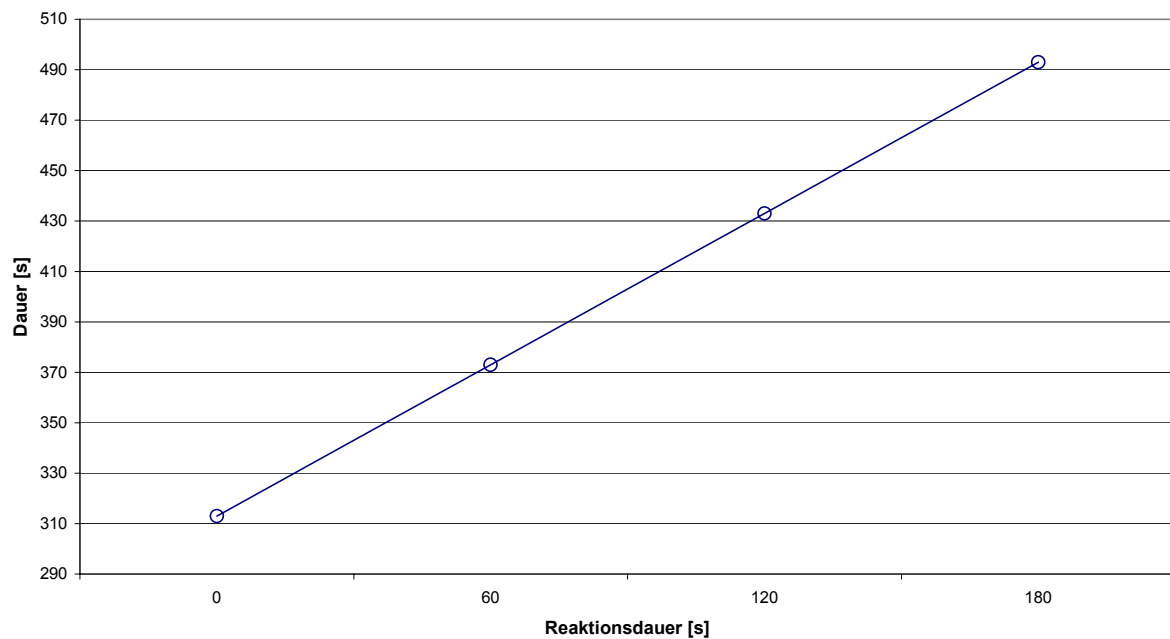
Definition der Populationsgruppe:

Parameter	Wert
Körperradius R(b) [m]	0,25
Torsoradius R(t) [m]	0,15
Schulterradius R(s) [m]	0,10
Geschwindigkeit [m/s]	1,20
Geschwindigkeitsabweichung [m/s]	0
Multiplikationsfaktor Treppen auf/ab [-]	0,6 / 0,5
Reaktionsdauer [s]	variiert

Ergebnisse der Variation:

Reaktionsdauer [s]	0	60	120	180
Entfluchtungsdauer [s]	313	373	433	493

Reaktion, konstant



Reaktionsdauer, verteilt

Definition der Populationsgruppe:

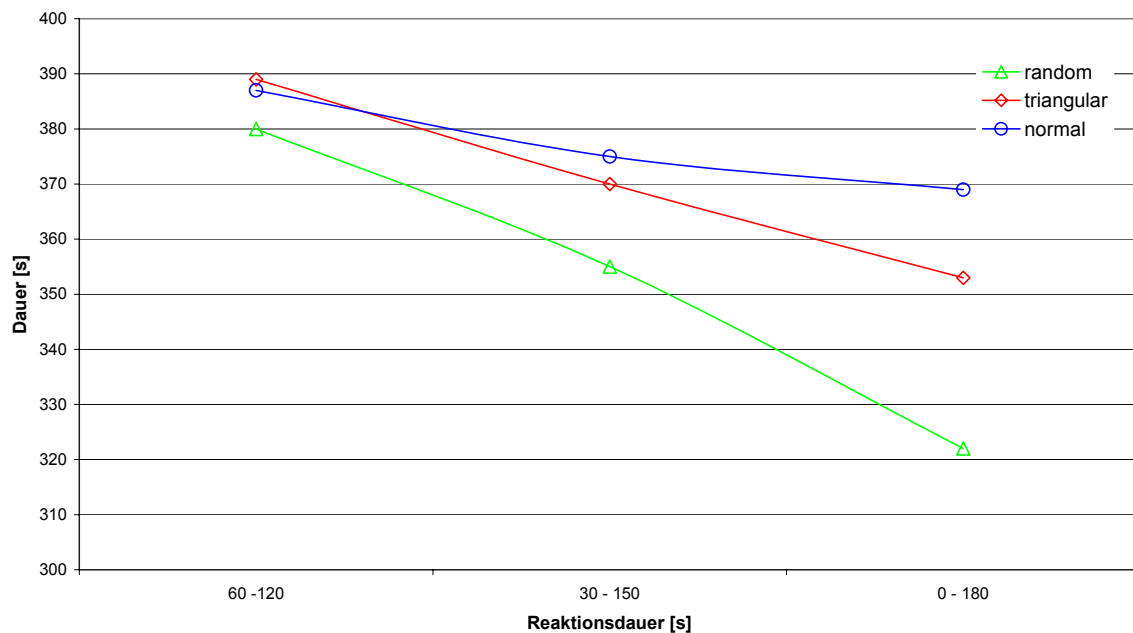
Parameter	Wert
Körperradius R(b) [m]	0,25
Torsoradius R(t) [m]	0,15
Schulterradius R(s) [m]	0,10
Geschwindigkeit [m/s]	1,20
Geschwindigkeitsabweichung [m/s]	0
Multiplikationsfaktor Treppen auf/ab [-]	0,6 / 0,5
Reaktionsdauer [s]	variiert

Ergebnisse der Variation:

Eingestellter Mittelwert = 90 Sekunden

Reaktionsdauer [s]	60 - 120	30 - 150	0 - 180
random	380	355	322
triangular	389	370	353
normal	387	375	369

Reaktion, verteilt; Mittelwert = 90 s



Körpermaße

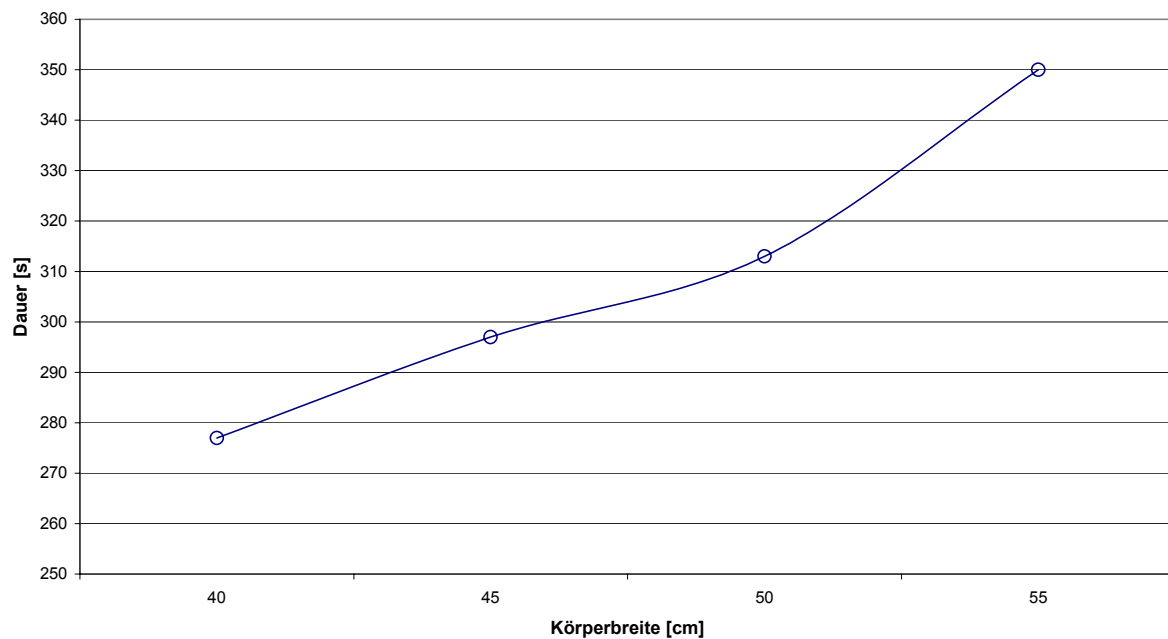
Definition der Populationsgruppen:

Parameter	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4
Körperradius R(b) [m]	0,20	0,225	0,25	0,275
Torsoradius R(t) [m]	0,12	0,14	0,15	0,16
Schulterradius R(s) [m]	0,07	0,09	0,10	0,10
Geschwindigkeit [m/s]	1,20			
Geschwindigkeitsabweichung [m/s]	0			
Multiplikationsfaktor Treppen auf/ab [-]	0,6 / 0,5			
Reaktionsdauer [s]	0			

Ergebnisse der Variation:

Körperradius [cm]	40	45	50	55
Entfluchtungsdauer [s]	277	297	313	350

Körpermaße, konstant



C3 Erklärung der Ergebnisdatei

Auf der rechten Seite der Abbildung ist die ausgegebene Ergebnisdatei aus SIMULEX abgebildet. Links ist die Erklärung zu den einzelnen Positionen aufgeführt.

<u>Angaben zur Modellierung</u> Anzahl der Ebenen Anzahl der Treppenträume Anzahl der Ziele Anzahl der Verknüpfungen Anzahl der simulierten Personen	Number of Floors = 3 Number of Staircases = 2 Number of Exits = 2 Number of Links = 4 Number of People = 448
Dimensionen der einzelnen Ebenen und Treppenträume mit Lokalisierung der Verknüpfungen und Ziele	<p>Floor 0 (DXF file: Test 8_eg.dxf) (Size: 24.880,15.680 metres) Number of People Initially in This Floor = 144 Link 4 : (22.65,7.93 m), 180.00 degrees, 2.00 m wide, connected to Staircase 0 Exit 1 : (22.45,15.85 m), -90.48 degrees, 3.00 m wide</p> <p>Floor 1 (DXF file: Test 8_1og_b.dxf) (Size: 24.880,15.680 metres) Number of People Initially in This Floor = 152 Link 2 : (22.65,7.97 m), 180.00 degrees, 2.00 m wide, connected to Staircase 1 Link 3 : (22.68,5.78 m), 180.00 degrees, 2.00 m wide, connected to Staircase 0</p> <p>Floor 2 (DXF file: Test 8_1og_b.dxf) (Size: 24.880,15.680 metres) Number of People Initially in This Floor = 152 Link 1 : (22.65,5.78 m), 180.00 degrees, 2.00 m wide, connected to Staircase 1</p> <p>Staircase 0 (Size: 2.000,9.400 metres) Number of People Initially in This Stair = 0 Link 3 : (0.98,0.00 m), 270.00 degrees, 2.00 m wide, connected to Floor 1 Link 4 : (1.00,9.40 m), 90.00 degrees, 2.00 m wide, connected to Floor 0</p> <p>Staircase 1 (Size: 2.000,9.400 metres) Number of People Initially in This Stair = 0 Link 1 : (0.98,0.00 m), 270.00 degrees, 2.00 m wide, connected to Floor 2 Link 2 : (1.00,9.40 m), 90.00 degrees, 2.00 m wide, connected to Floor 1</p>
Gesamtentfluchtungsdauer	All people reached the exit in 4:17.4.
Anzahl der Personen die jeweils in einem Intervall von 5 Sekunden alle Ziele erreichen	Number of people through all exits over 5-second periods Time(s) N (People) 5 0 10 7 15 14 20 15
Anzahl der Personen, die jeweils in einem Intervall von 5 Sekunden Ziel Nr. 1 erreichen	Number of people through Exit 1 over 5-second periods Time(s) N (People) 5 0 10 5 15 12 20 11
Anzahl der Personen, die jeweils in einem Intervall von 5 Sekunden Ziel Nr. 2 erreichen	Number of people through Exit 2 over 5-second periods Time(s) N (People) 5 0 10 2 15 2 20 4
Anzahl der Personen, die jeweils in einem Intervall von 5 Sekunden durch Link Nr. 1 gehen	Number of people through Link 1 over 5-second periods Time(s) N (People) 5 1 10 7 15 8 20 8
Anzahl der Personen, die jeweils in einem Intervall von 5 Sekunden durch Link Nr. 2 gehen	Number of people through Link 2 over 5-second periods Time(s) N (People) 5 0 10 0 15 0 20 1

Abbildung A 34: Ergebnisdatei aus SIMULEX und Erklärung der Positionen

C4 Personenkonfiguration

Auflistung der vordefinierten Personentypen in SIMULEX, ergänzt um resultierende Körperbreite und -tiefe:

Personentyp	Radius des Gesamtkörpers [m]	Torsoradius [m]	Schulterradius [m]	Maximale Laufgeschwindigkeit [m/s]	Abweichung von maximaler Laufgeschwindigkeit [m/s]	Multiplikationsfaktor Treppen abwärts	Multiplikationsfaktor Treppen aufwärts	Farbe	Breite [m]	Tiefe [m]
0 ="Median"	0,25	0,15	0,10	1,30	0,00	0,60	0,50	13	0,50	0,30
1 ="Adult Male"	0,27	0,16	0,10	1,35	0,20	0,60	0,50	13	0,54	0,32
2 ="Adult Female"	0,24	0,14	0,09	1,15	0,20	0,60	0,50	13	0,48	0,28
3 ="Child"	0,21	0,12	0,07	0,90	0,30	0,60	0,50	13	0,42	0,24
4 ="Elderly"	0,25	0,15	0,09	0,80	0,30	0,60	0,50	13	0,50	0,30
5 ="NFPA-1 m/s"	0,25	0,15	0,10	1,00	0,00	0,60	0,50	13	0,50	0,30
6 ="SFPE-1.4 m/s"	0,25	0,15	0,10	1,40	0,00	0,60	0,50	13	0,50	0,30
7 ="SFV-1.2m/s"	0,25	0,16	0,10	1,20	0,00	0,60	0,50	13	0,50	0,32
8 ="SFV-1.2m/s(+jacket)"	0,25	0,24	0,10	1,20	0,00	0,60	0,50	13	0,50	0,47
9 ="HK Male"	0,24	0,13	0,08	1,35	0,20	0,60	0,50	13	0,47	0,25
10 ="HK Female"	0,22	0,13	0,08	1,15	0,20	0,60	0,50	13	0,44	0,25
11 ="HK Child"	0,20	0,11	0,07	0,90	0,30	0,60	0,50	13	0,39	0,22
12 ="Male-0.5m/s"	0,27	0,16	0,10	0,50	0,00	0,60	0,50	13	0,54	0,32
13 ="IMO Young Female"	0,24	0,14	0,09	1,24	0,31	0,60	0,46	13	0,48	0,28
14 ="IMO Mid-Age Female"	0,24	0,14	0,09	0,95	0,24	0,69	0,57	13	0,48	0,28
15 ="IMO Elderly Female"	0,24	0,14	0,09	0,75	0,19	0,80	0,60	13	0,48	0,28
16 ="IMO Impair Female 1"	0,24	0,14	0,09	0,57	0,14	0,79	0,60	13	0,48	0,28
17 ="IMO Impair Female 2"	0,24	0,14	0,09	0,49	0,12	0,79	0,58	13	0,48	0,28
18 ="IMO Young Male"	0,27	0,16	0,10	1,48	0,37	0,68	0,41	13	0,54	0,32
19 ="IMO Mid-Age Male"	0,27	0,16	0,10	1,30	0,33	0,66	0,44	13	0,54	0,32
20 ="IMO Elderley Male"	0,27	0,16	0,10	1,12	0,28	0,60	0,42	13	0,54	0,32
21 ="IMO Impair Male 1"	0,27	0,16	0,10	0,85	0,21	0,60	0,42	13	0,54	0,32
22 ="IMO Impair Male 2"	0,27	0,16	0,10	0,73	0,18	0,60	0,42	13	0,54	0,32
23 ="IMO Crew Female"	0,24	0,14	0,09	1,24	0,31	0,60	0,46	9	0,48	0,28
24 ="IMO Crew Male"	0,25	0,15	0,09	1,48	0,37	0,68	0,41	9	0,50	0,30
25 ="1.0 m/s any incline"	0,25	0,15	0,10	1,00	0,00	1,00	1,00	13	0,50	0,30
26 ="Japan:Theatre"	0,25	0,15	0,10	1,00	0,00	0,60	0,45	13	0,50	0,30
27 ="Japan:Hall/Hotel+"	0,25	0,15	0,10	1,00	0,00	0,60	0,45	13	0,50	0,30
28 ="Japan:School/Office"	0,25	0,15	0,10	1,30	0,00	0,60	0,45	13	0,50	0,30
29 ="Disabled"	0,25	0,15	0,10	0,80	0,37	0,40	0,40	13	0,50	0,30
30 ="SFPE unimpeded"	0,25	0,15	0,10	1,20	0,00	0,60	0,50	13	0,50	0,30
31 ="Men jackets"	0,27	0,26	0,10	1,35	0,20	0,60	0,50	13	0,54	0,51
32 ="Women jackets"	0,24	0,22	0,09	1,15	0,20	0,60	0,50	13	0,48	0,45
33 ="Children jackets"	0,21	0,19	0,07	0,90	0,30	0,60	0,50	13	0,42	0,38
34 ="Elderly jackets"	0,25	0,24	0,09	0,80	0,30	0,60	0,50	13	0,50	0,48

Anhang C: SIMULEX

Auflistung vordefinierter Populationsgruppen in SIMULEX:

Populationsgruppe	Personentyp- anzahl	Anteil [%] der jeweiligen Personentypen																																						
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34				
0="Office Staff"	2		60	40																																				
1="Commuters"	3		50	40	10																																			
2="Shoppers"	4		35	40	15	10																																		
3="School population"	3		3	7	90																																			
4="All Male"	1		100																																					
5="All Female"	1			100																																				
6="All Children"	1				100																																			
7="All Elderly"	1					100																																		
8="All 1.0 m/s"	1						100																																	
9="All 1.3 m/s"	1	100																																						
10="All 1.4 m/s"	1							100																																
11="SFV-1.2m/s"	1								100																															
12="SFV-1.2m/s(+jacket)"	1									100																														
13="HK Office Staff"	2										60	40																												
14="HK Commuters"	3										50	40	10																											
15="All HK Male"	1										100																													
16="All HK Female"	1											100																												
17="All HK Children"	1												100																											
18="All Male-0.5m/s"	1													100																										
19="IMO Ship Passengers"	10														7	7	16	10	10	7	7	16	10	10																
20="IMO Ship Crew"	2																								50	50														
21="IMO Male 30-50 yrs"	1																				100																			
22="1.0 m/s any incline"	1																										100													
23="Japan:Theatre"	1																											100												
24="Japan:Hall/Hotel+"	1																												100											
25="Japan:School/Office"	1																													100										
26="Hotel"	4		49	35	5	11																																		
27="Hotel with Dis"	5		47	34	5	11																													3					
28="All Disabled"	1																																		100					
29="All Median"	1	100																																						
30="All SFPE"	1																																			100				
31="Winter jackets hotel"	4																																				49	35	5	11

Darstellung der Personenkonfigurationsdatei aus SIMULEX:

```
[SIMULEX Population File]
Version = 1.1
Delimiter = ","
Whitespace = "    ", " "

[Comments: Parameters for Body Types]
1st= Body type index, starting at 0, up to 199
2nd= Body type name (max. 19 characters)
3rd= Total Radius (m) of body circle
4th= Radius (m) of main torso circle
5th= Radius (m) of shoulder circles
6th= Unimpeded walking velocity on flat terrain
7th= Distributed variation of unimpeded walking velocity on flat terrain(+/-)
8th= Multiplication factor for walking speed down stairs
9th= Multiplication factor for walking speeds up stairs
10th= Body color (0-19)
      (Black=0,Maroon=1,DarkGreen=2,Olive=3,DarkBlue=4,Purple=5,DarkMarine=
      6,MedGrey=7,SteelGrey=8,LightBlue=9,Cream=10,MedDarkGrey=11,DarkGrey=
      12,Red=13,Green=14,Yellow=15, Blue=16, Magenta=17,Cyan=18)
```

Just add new body sizes with this format, incrementing the body size index

```
[Body Types]
0 = "Median",           0.25, 0.15, 0.10, 1.3,  0.0,  0.6,  0.5, 13,
1 = "Adult Male",      0.27, 0.16, 0.10, 1.35, 0.2,  0.6,  0.5, 13,
2 = "Adult Female",    0.24, 0.14, 0.09, 1.15, 0.2,  0.6,  0.5, 13,
3 = "Child",           0.21, 0.12, 0.07, 0.9,  0.3,  0.6,  0.5, 13,
4 = "Elderly",         0.25, 0.15, 0.09, 0.8,  0.3,  0.6,  0.5, 1
5 = "NFPA-1 m/s",      0.25, 0.15, 0.10, 1.0,  0.0,  0.6,  0.5, 13,
6 = "SFPE-1.4 m/s",    0.25, 0.15, 0.10, 1.4,  0.0,  0.6,  0.5, 13,
7 = "SFV-1.2m/s",      0.25, 0.16, 0.10, 1.2,  0.0,  0.6,  0.5, 13,
8 = "SFV-1.2m/s(+jacket)", 0.25, 0.235,0.10, 1.2,  0.0,  0.6,  0.5, 13,
9 = "HK Male",         0.235,0.125,0.08, 1.35, 0.2,  0.6,  0.5, 13,
10="HK Female",        0.218,0.125,0.08, 1.15, 0.2,  0.6,  0.5, 13,
11="HK Child",         0.195,0.11, 0.065,0.9,  0.3,  0.6,  0.5, 13,
12="Male-0.5m/s",      0.27, 0.16, 0.10, 0.5,  0.0,  0.6,  0.5, 13,
13="IMO Young Female",  0.24, 0.14, 0.09, 1.24, 0.31, 0.60, 0.46, 13,
14="IMO Mid-Age Female", 0.24, 0.14, 0.09, 0.95, 0.24, 0.69, 0.57, 13,
15="IMO Elderly Female", 0.24, 0.14, 0.09, 0.75, 0.19, 0.80, 0.60, 13,
16="IMO Impair Female 1", 0.24, 0.14, 0.09, 0.57, 0.14, 0.79, 0.60, 13,
17="IMO Impair Female 2", 0.24, 0.14, 0.09, 0.49, 0.12, 0.79, 0.58, 13,
18="IMO Young Male",    0.27, 0.16, 0.1,  1.48, 0.37, 0.68, 0.41, 13,
19="IMO Mid-Age Male",  0.27, 0.16, 0.1,  1.3,  0.33, 0.66, 0.44, 13,
20="IMO Elderley Male",  0.27, 0.16, 0.1,  1.12, 0.28, 0.60, 0.42, 13,
21="IMO Impair Male 1",  0.27, 0.16, 0.1,  0.85, 0.21, 0.60, 0.42, 13,
22="IMO Impair Male 2",  0.27, 0.16, 0.1,  0.73, 0.18, 0.60, 0.42, 13,
23="IMO Crew Female",   0.24, 0.14, 0.09, 1.24, 0.31, 0.60, 0.46, 9,
24="IMO Crew Male",     0.25, 0.15, 0.09, 1.48, 0.37, 0.68, 0.41, 9,
25="1.0 m/s any incline", 0.25, 0.15, 0.10, 1.0,  0.0,  1.0,  1.0, 13,
26="Japan:Theatre",     0.25, 0.15, 0.10, 1.0,  0.0,  0.6,  0.45, 13,
27="Japan:Hall/Hotel+", 0.25, 0.15, 0.10, 1.0,  0.0,  0.6,  0.45, 13,
28="Japan:School/Office", 0.25, 0.15, 0.10, 1.3,  0.0,  0.6,  0.45, 13,
29="Disabled",          0.25, 0.15, 0.10, 0.8,  0.37, 0.4,  0.4, 13,
30="SFPE unimpeded",    0.25, 0.15, 0.10, 1.2,  0.0,  0.6,  0.5, 13,
31="Men jackets",       0.27, 0.256,0.10, 1.35, 0.2,  0.6,  0.5, 13,
32="Women jackets",     0.24, 0.224,0.09, 1.15, 0.2,  0.6,  0.5, 13,
33="Children jackets",  0.21, 0.192,0.07, 0.9,  0.3,  0.6,  0.5, 13,
34="Elderly jackets",   0.25, 0.24, 0.09, 0.8,  0.3,  0.6,  0.5, 13,
```

Anhang C: SIMULEX

[Comments: Parameters for Populations]

1st= Population index, starting at 0, up to 199

2nd= Population name (max. 19 characters)

3rd= Number of different body sizes in population

4th= Body size index no.

5th= % of this Body Size in population (integer)

6th as 4th for another body size

7th as 5th for another body size

etc. etc. up to a maximum of 10 body sizes included

Just add new populations with this format, incrementing the population index

[Populations]

0="Office Staff",	2,	1, 60, 2, 40,
1="Commuters",	3,	1, 50, 2, 40, 3, 10,
2="Shoppers",	4,	1, 35, 2, 40, 3, 15, 4, 10,
3="School population",	3,	1, 3, 2, 7, 3, 90,
4="All Male",	1,	1, 100,
5="All Female",	1,	2, 100,
6="All Children",	1,	3, 100,
7="All Elderly",	1,	4, 100,
8="All 1.0 m/s",	1,	5, 100,
9="All 1.3 m/s",	1,	0, 100,
10="All 1.4 m/s",	1,	6, 100,
11="SFV-1.2m/s",	1,	7, 100,
12="SFV-1.2m/s(+jacket)",	1,	8, 100,
13="HK Office Staff",	2,	9, 60, 10, 40,
14="HK Commuters",	3,	9, 50, 10, 40, 11, 10,
15="All HK Male",	1,	9, 100,
16="All HK Female",	1,	10, 100,
17="All HK Children",	1,	11, 100,
18="All Male-0.5m/s",	1,	12, 100,
19="IMO Ship Passengers",	10,	13, 7, 14, 7, 15, 16, 16, 10, 17, 10, 18, 7, 19, 7, 20, 16, 21, 10, 22, 10,
20="IMO Ship Crew",	2,	23, 50, 24, 50,
21="IMO Male 30-50 yrs",	1,	19, 100,
22="1.0 m/s any incline",	1,	25, 100,
23="Japan:Theatre",	1,	26, 100,
24="Japan:Hall/Hotel+",	1,	27, 100,
25="Japan:School/Office",	1,	28, 100,
26="Hotel",	4,	1, 49, 2, 35, 3, 5, 4, 11,
27="Hotel with Dis",	5,	1, 47, 2, 34, 3, 5, 4, 11, 29, 3,
28="All Disabled",	1,	29, 100,
29="All Median",	1,	0, 100,
30="All SFPE",	1,	30, 100,
31="Winter jackets hotel",	4,	31, 49, 32, 35, 33, 5, 34, 11,

ANHANG D: SIMWALK

D1 Bewertung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Durchgeführt wurde die Sensitivitätsanalyse mit der Programmversion 2.1. Dazu ist zu bemerken, dass SimWalk bereits in der Version 3 veröffentlicht wurde.

Die Analyse wurde in SimWalk nur für zwei Geschosse durchgeführt. Daraus bedingt sinkt die Personenzahl von 448 auf 296 Personen. Für die Verbindung vom Erdgeschoss zum ersten Obergeschoss wurde eine Zwischenebene für das Zwischenpodest im Treppenraum hinzumodelliert, um die Bewegung um die beiden 180° Wendungen zu berücksichtigen.

Geschwindigkeit

Um den Einfluss der Geschwindigkeit in SimWalk zu untersuchen, wurde die Geschwindigkeit für alle Personen konstant eingestellt und schrittweise erhöht. Die Variation erfolgt in Schritten von 0,3 m/s in einem Bereich von 0,9 bis 1,8 m/s. Die Körperproportionen und alle übrigen Parameter sind für alle Personen gleich gewählt. Die Reaktionsdauer beträgt für alle Personen Null, was eine gleichzeitige Bewegung aller Personen bedeutet. Für die statistische Analyse wurden 5 Simulationsdurchläufe durchgeführt.

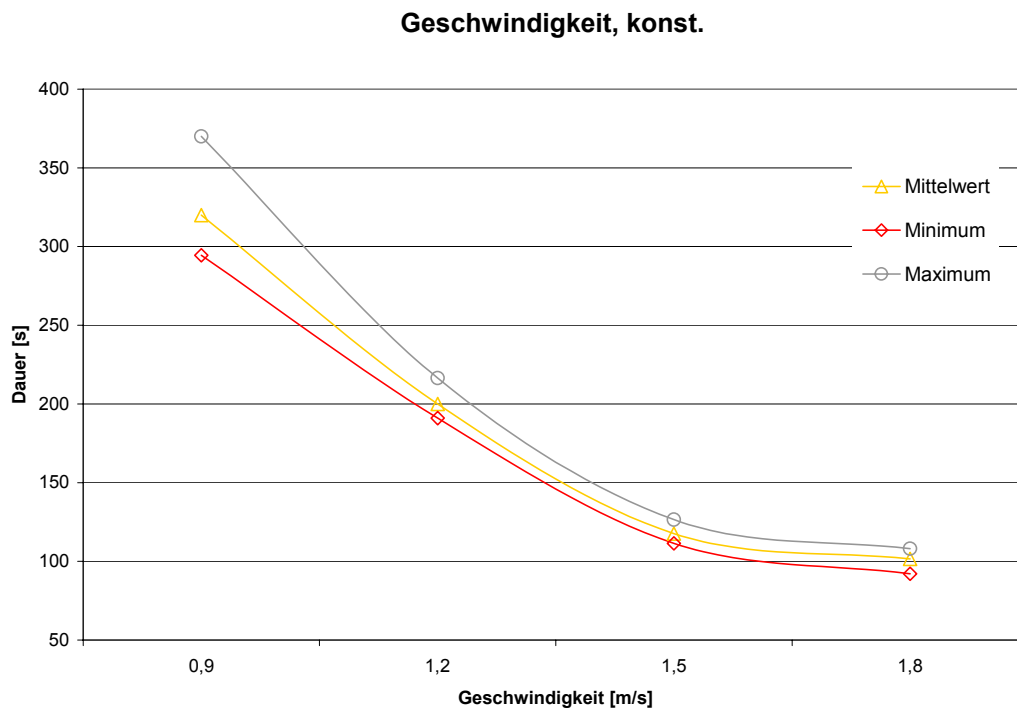


Abbildung A 35: Entwicklung der Entfluchtungsdauer bei schrittweiser Erhöhung der Geschwindigkeit (SimWalk)

Mit anwachsender Geschwindigkeit wird die Entfluchtungsdauer gesenkt. Zu erkennen ist auch eine sinkende Schwankungsbreite in den Ergebnissen bei steigender Gehgeschwindigkeit aller Personen.

Nachfolgend ist dargestellt, wie sich die Entfluchtungsdauer bei verteilter Geschwindigkeit der Personen entwickelt. Der Mittelwert wurde zu 1,2 m/s angenommen. Für die Auswertung bei verteilten Geschwindigkeiten wurden für jeden Wert 10 Simulationen durchläufe vorgenommen und daraus die Minimal-, Maximal-, und Mittelwerte bestimmt.

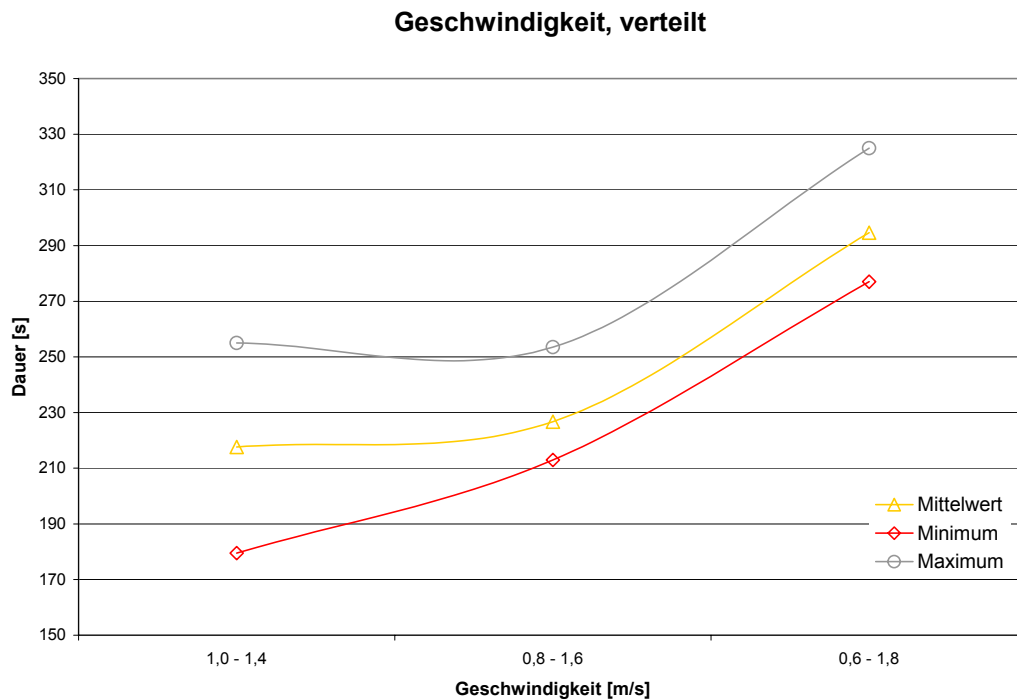


Abbildung A 36: Entwicklung der Entfluchtungsdauer bei verteilter Zuweisung der Geschwindigkeit (SimWalk)

Auch hier ist zu erkennen, dass mit sinkender Spanne zwischen der minimal und maximal möglichen Gehgeschwindigkeit die Entfluchtungsdauer sinkt. Jedoch bleibt das Maximum von 0,8 - 1,6 bis 1,0 - 1,4 m/s ungefähr gleich. Das Minimum hingegen sinkt deutlich, was auch zu einer Verringerung der mittleren Entfluchtungsdauer führt. Die Verringerung der Spanne von 0,6-1,8 m/s auf 1,0-1,4 m/s senkt die mittlere Entfluchtungsdauer um 26 %. Langsam laufende Personen haben also einen hohen Einfluss.

In Abbildung A 37 und Abbildung A 38 sind die Häufigkeitsverteilungen der zugewiesenen und der resultierenden Geschwindigkeit von 0,6 bis 1,8 m/s dargestellt. Die Geschwindigkeiten sind zur Übersichtlichkeit in Klassen zu je 0,05 m/s eingeteilt worden.

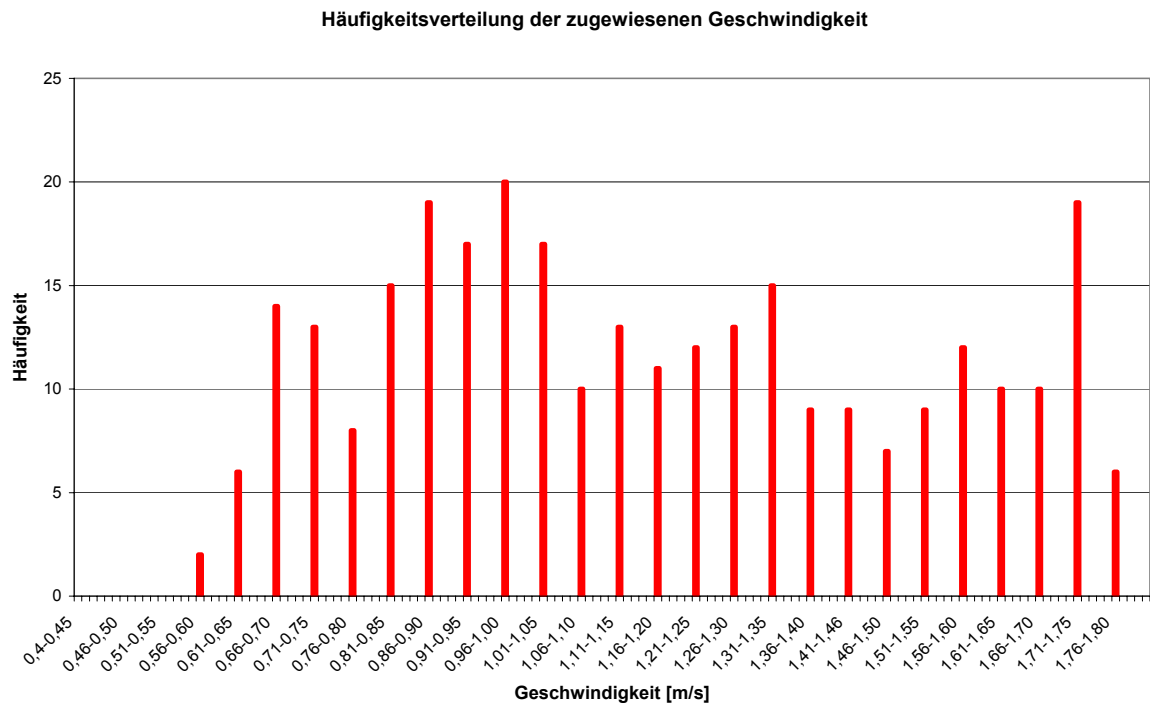


Abbildung A 37: Verteilung der zugewiesenen Geschwindigkeiten in SimWalk für einen Mittelwert von 1,2 m/s bei einer Spanne von 0,6 – 1,8 m/s

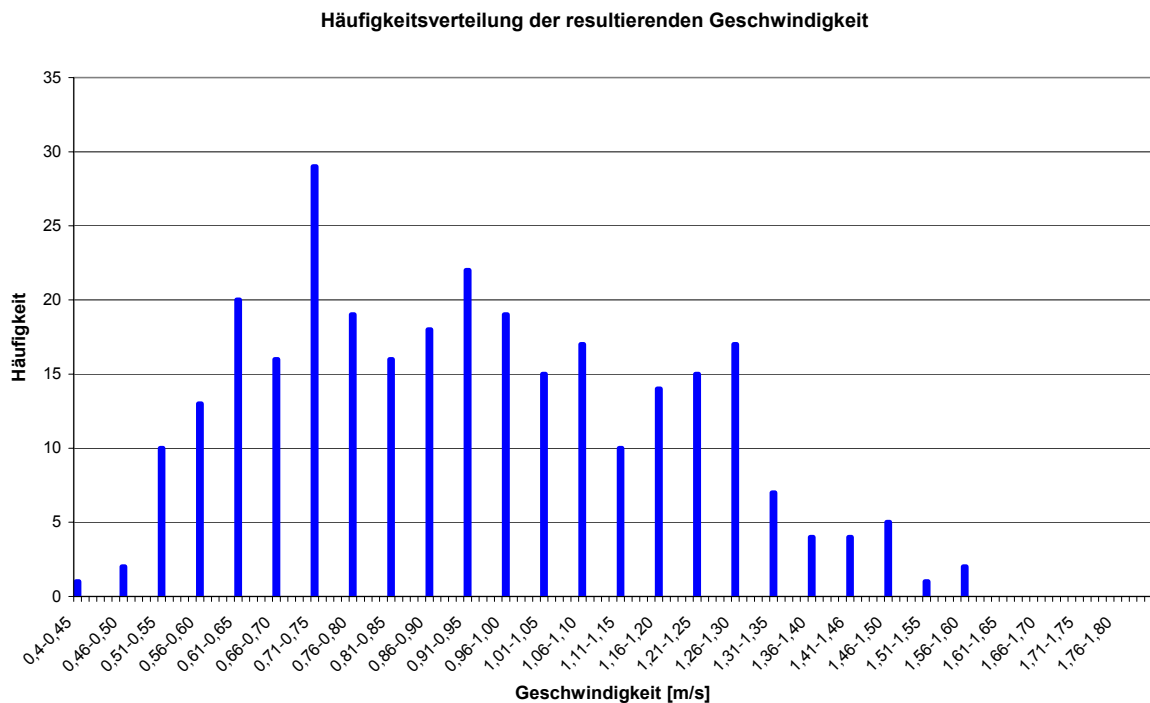


Abbildung A 38: Verteilung der resultierenden Geschwindigkeiten in SimWalk für einen Mittelwert von 1,2 m/s bei einer Spanne von 0,6 – 1,8 m/s

Erkennbar ist, dass die resultierenden Geschwindigkeiten geringer als die zugewiesenen Gehgeschwindigkeiten sind. Dies lässt darauf schließen, dass aufgrund von Blockierungen durch andere Personen die Geschwindigkeit reduziert wird. Außerdem ist damit indirekt die Folgerung auf die Höhe der Stauungen möglich.

Körperproportionen

Die nachfolgende Untersuchung zeigt, wie sich die Entfluchtungsdauer bei Veränderung der Körperproportionen auswirkt. Die Körpermaße wurden für alle Personen gleich gewählt. Zu jedem Körpermaß wurden 5 Simulationsdurchläufe erstellt. Die Geschwindigkeit war für alle Personen gleich und konstant.

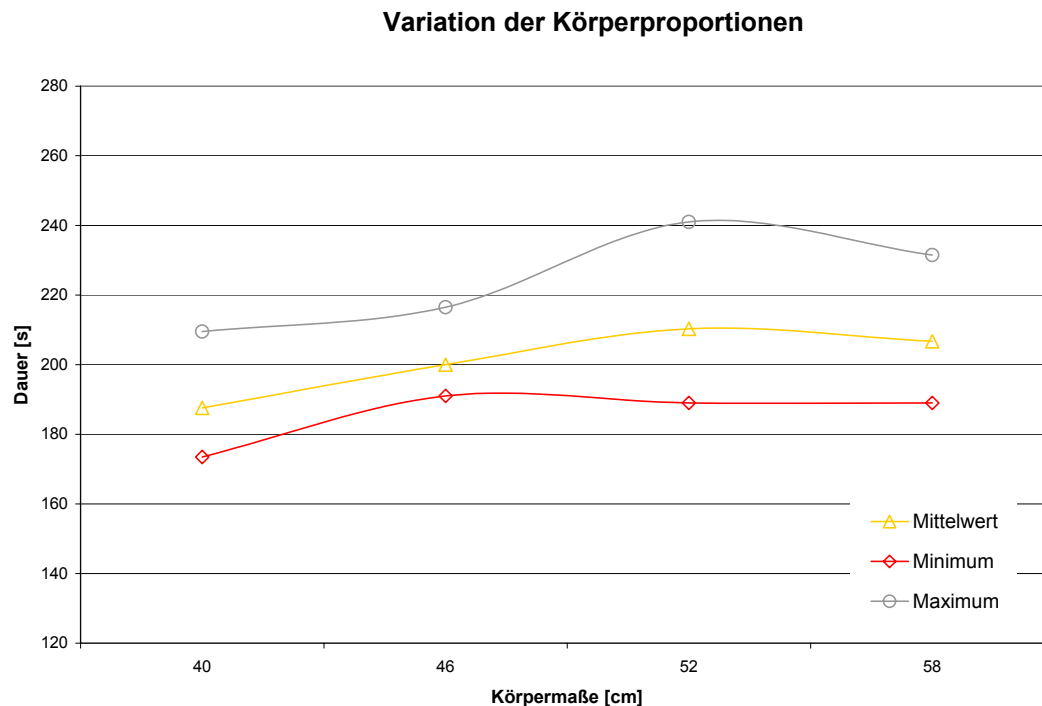


Abbildung A 39: Entwicklung der Entfluchtungsdauer bei Variation der Körpermaße

Bis zu einem Körperdurchmesser von 52 cm steigt die Entfluchtungsdauer an. Danach sind nur noch geringe Unterschiede in der Entwicklung der Entfluchtungsdauer zu erkennen. Das kann zum einen daran liegen, dass mit 5 Simulationsdurchläufen nicht das gesamte Ergebnisspektrum erfasst wurde, oder dass die Gang- und die Treppenbreite ab einem bestimmten Körperdurchmesser nur noch eine Person in einer Reihe zulässt.

Konfigurationen

Für die weitere Analyse ist untersucht worden, inwiefern sich bestimmte Konfigurationseinstellungen auf die Entfluchtungsdauer auswirken. Dazu wurden die Konfigurationseinstellungen *Interaction Range* und *Pressure Factor* untersucht.

Interaction Range (Personenabstand)

Der Parameter Interaction Range beschreibt den Abstand der zwischen den Personen eingehalten werden muss, um die unbehinderte zugewiesene Gehgeschwindigkeit ausüben zu können. Verringert sich der Abstand zwischen den Personen unter dem eingestellten Wert, so reagieren Personen darauf durch Ausweich- und Überholmanöver oder durch Verringerung der Geschwindigkeit.

Um die Auswirkung auf die Entfluchtungsdauer zu untersuchen, wurde der Wert in einem Bereich von 1,00 bis 1,71 m variiert. Andere Einstellungen blieben während der Variation gleich. Statistische Analysen wurden aus jeweils 5 Simulationsdurchläufen erstellt.

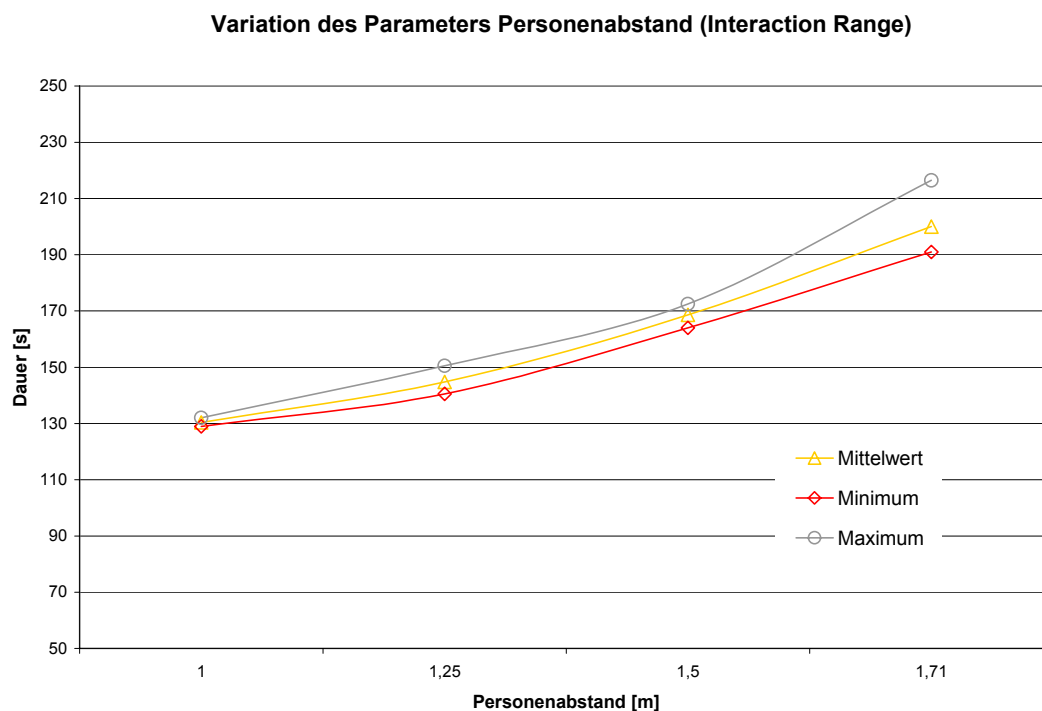


Abbildung A 40: Variation des Parameters Interaction Range (Personenabstand) in SimWalk

Die Verringerung des Abstandes führt erwartungsgemäß zu höheren Entfluchtungsdauern. Außerdem vergrößert sich die Zeitspanne zwischen minimaler und maximaler

ler Entfluchtungsdauer. Bezogen auf die mittlere Entfluchtungsdauer führt eine Verringerung des Personenabstandes von 1,71 m auf 1,00 m zu einer Senkung der Entfluchtungsdauer um etwa 35%.

Pressure Factor (Druckfaktor)

Der Druckfaktor soll den Personendruck an die Kraft des Algorithmus des Potenzialfeldes anpassen. Ist dieser Null, wird er ignoriert. Dem Handbuch zufolge [62] hat sich anhand von Feldstudien ein Wert von 1,5 als realistisch erwiesen. Um den Einfluss auf die Entfluchtungsdauer zu überprüfen, wurde dieser Wert von 0,5 bis 2,0 variiert, während alle anderen Einstellungen gleich blieben. Für eine statistische Analyse wurden 5 Simulationsdurchläufe durchgeführt.

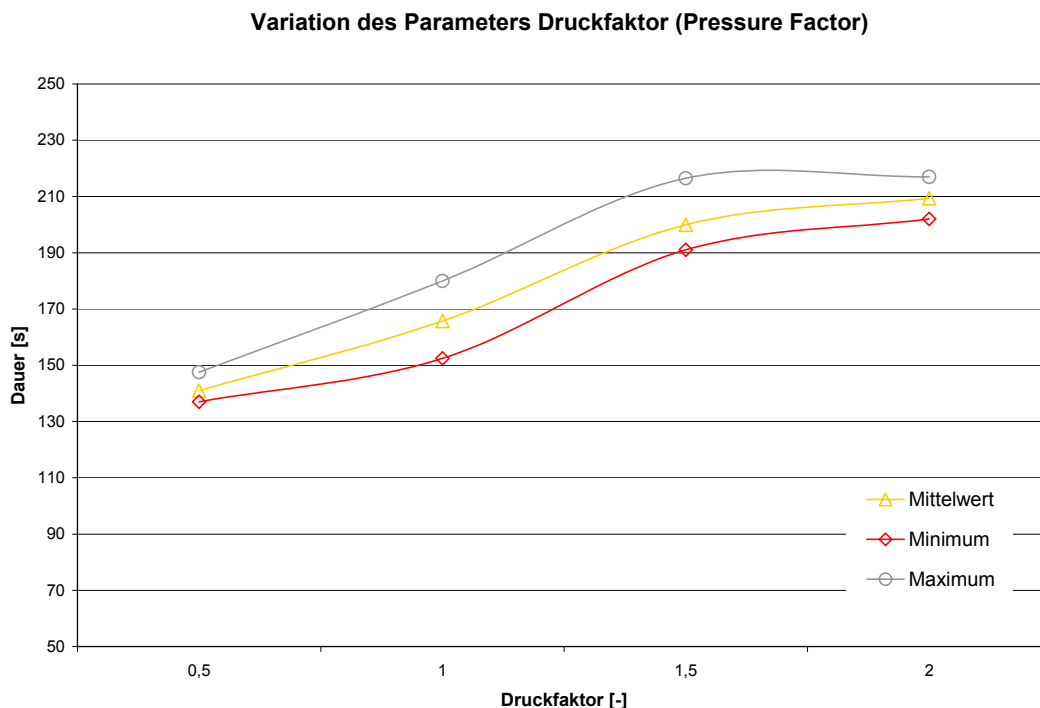


Abbildung A 41: Variation des Parameters Druckfaktor in SimWalk

Mit Erhöhung des Druckfaktors erhöht sich die Dauer der Entfluchtung. Bis zu dem Wert 1,5 ist ein höherer Anstieg zu erkennen, als vom Wert 1,5 bis 2,0. Außerdem ist eine Verringerung der Spanne zwischen Minimal- und Maximaldauer zu erkennen. Der Anstieg vom Ergebnis mit dem Druckfaktor 0,5 bis zu dem Ergebnis mit dem Druckfaktor 2,0 beträgt 48%.

Zusammenfassung

Wie in den Analysen zuvor, wird deutlich, dass bei einer geringen Spanne in der Geschwindigkeitsverteilung geringere Entfluchtungsauern erzielt werden. In SimWalk kann festgestellt werden, dass zum Teil sehr hohe Schwankungen in den Ergebnissen bei mehreren Durchläufen erreicht werden. Diese müssen durch eine entsprechende Anzahl an wiederholten Läufen entweder bestätigt oder ausgeschlossen werden. In der Version 3 ist die Durchführung mehrfacher Rechendurchläufe auch automatisiert möglich, sodass eine Anzahl von mindestens 10 Durchläufen ohne Mehraufwand wiederholt werden kann.

Außerdem sind in SimWalk sehr viele Konfigurationseinstellungen, die in erster Linie der Aufstellung der Simulation dienen, enthalten, die bei Variation einen erheblichen Einfluss auf das Simulationsergebnis haben.

D2 Eingangsdaten und Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Geschwindigkeit, konstant

Statistik der Mittelwertrechnungen

Simulationsdurchläufe: 5
 Personen: 296

Konfigurationsparameter

Potential Cell size [m]:	0,5
Density Cell Size [m]:	5
Interaction range [m]:	1,71
Pressure factor [-]:	1,5
Agent radius [m]:	0,23
Object range [m]:	0,20
Time Step [s]:	0,5
Log Interval [steps]:	10

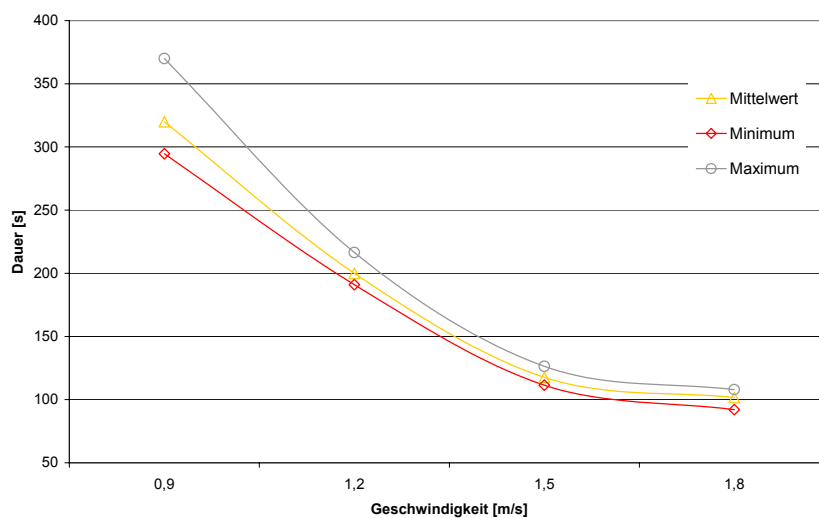
Personenparameter

Geschwindigkeit [m/s]:	Variiert
Reaktionsdauer [s]:	0

Ergebnisse der Variation

Geschwindigkeit [m/s]	0,9	1,2	1,5	1,8
Mittelwert	294,5	191	111,5	92
Minimalwert	370	216,5	126,5	108
Maximalwert	319,9	200	117,7	101,6

Geschwindigkeit, konst.



Geschwindigkeit, verteilt

Statistik der Mittelwertrechnungen

Simulationsdurchläufe: 10
 Personen: 296

Konfigurationsparameter

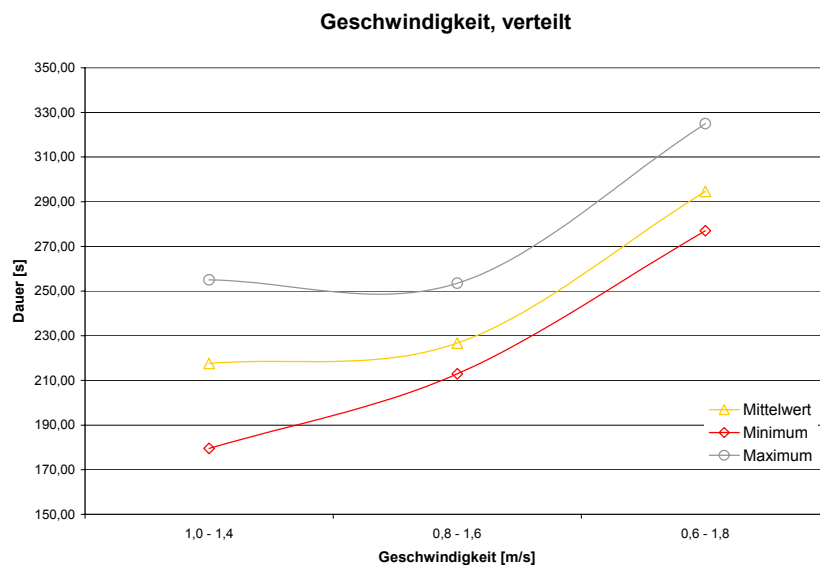
Potential Cell size [m]:	0,5
Density Cell Size [m]:	5
Interaction range [m]:	1,71
Pressure factor [-]:	1,5
Agent radius [m]:	0,23
Object range [m]:	0,20
Time Step [s]:	0,5
Log Interval [steps]:	10

Personenparameter

Geschwindigkeit [m/s]:	Variiert
Reaktionsdauer [s]:	0

Ergebnisse der Variation

Geschwindigkeit [m/s]	1,0-1,4	0,8-1,6	0,6-1,8
Mittelwert	217,65	226,70	294,60
Minimalwert	179,50	213,00	277,00
Maximalwert	255,00	253,50	325,00



Körperproportionen

Statistik der Mittelwertrechnungen

Simulationsdurchläufe: 5
 Personen: 296

Konfigurationsparameter

Potential Cell size [m]:	0,5
Density Cell Size [m]:	5
Interaction range [m]:	1,71
Pressure factor [-]:	1,5
Agent radius [m]:	variiert
Object range [m]:	0,20
Time Step [s]:	0,5
Log Interval [steps]:	10

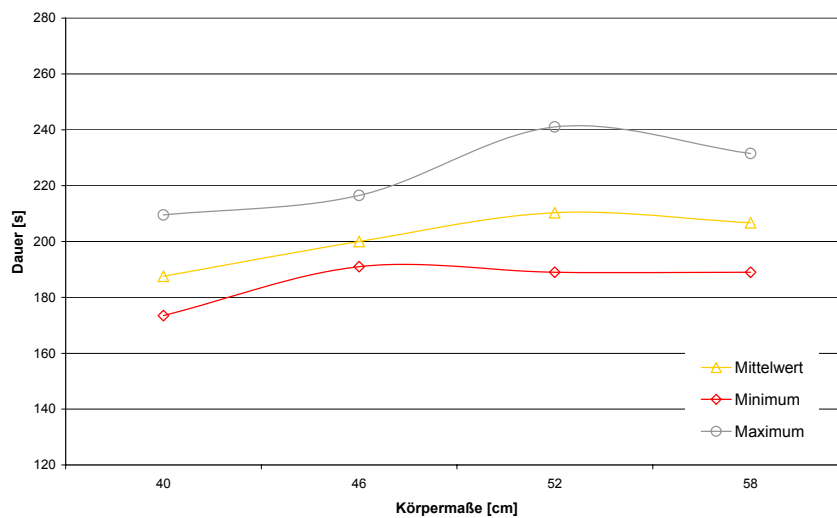
Personenparameter

Geschwindigkeit [m/s]:	1,20
Reaktionsdauer [s]:	0

Ergebnisse der Variation

Körperdurchmesser [cm]:	40	46	52	58
Mittelwert	187,6	200	210,3	206,7
Minimalwert	173,5	191	189	189
Maximalwert	209,5	216,5	241	231,5

Variation der Körperproportionen



Personenabstand (Interaction range)

Statistik der Mittelwertrechnungen

Simulationsdurchläufe: 5
 Personen: 296

Konfigurationsparameter

Potential Cell size [m]:	0,5
Density Cell Size [m]:	5
Interaction range [m]:	variiert
Pressure factor [-]:	1,5
Agent radius [m]:	0,23
Object range [m]:	0,20
Time Step [s]:	0,5
Log Interval [steps]:	10

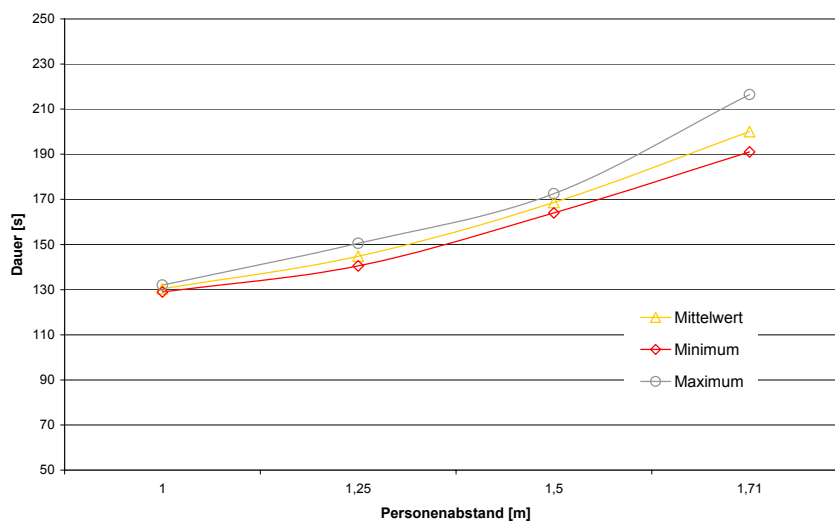
Personenparameter

Geschwindigkeit [m/s]:	1,20
Reaktionsdauer [s]:	0

Ergebnisse der Variation

Personenabstand [m]:	1,0	1,25	1,5	1,71
Mittelwert	130,4	144,8	168,6	200
Minimalwert	129	140,5	164	191
Maximalwert	132	150,5	172,5	216,5

Variation des Parameters Personenabstand (Interaction Range)



Druckfaktor (Pressure factor)

Statistik der Mittelwertrechnungen

Simulationsdurchläufe: 5
 Personen: 296

Konfigurationsparameter

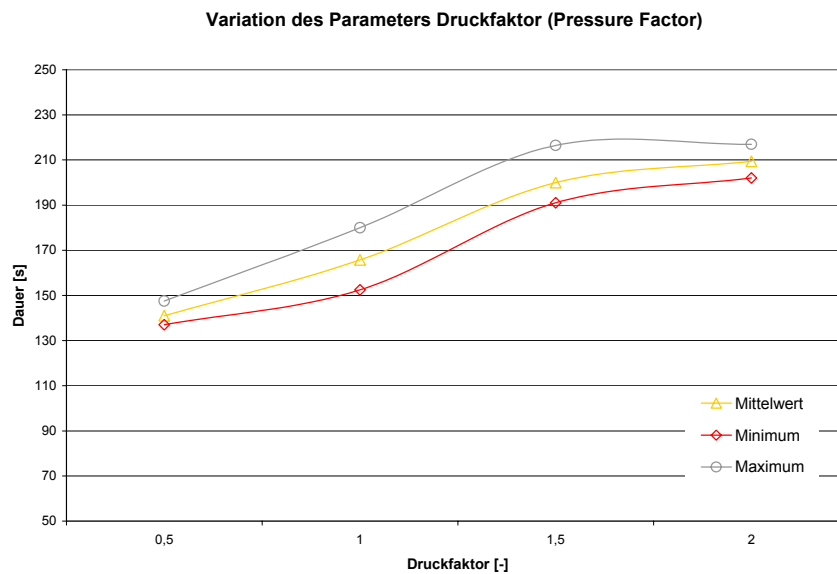
Potential Cell size [m]:	0,5
Density Cell Size [m]:	5
Interaction range [m]:	1,71
Pressure factor [-]:	variiert
Agent radius [m]:	0,23
Object range [m]:	0,20
Time Step [s]:	0,5
Log Interval [steps]:	10

Personenparameter

Geschwindigkeit [m/s]:	1,20
Reaktionsdauer [s]:	0

Ergebnisse der Variation

Druckfaktor [-]:	0,5	1,0	1,5	2,0
Mittelwert	141	165,7	200	209,4
Minimalwert	137	152,5	191	202
Maximalwert	147,5	180	216,5	217



D3 Erklärung der Ergebnisdatei

Dargestellt ist der Report der von SimWalk ausgegeben wird. Die Beschriftung an den Außenseiten beschreibt die Daten aus dem Report.

Projektinformationen	SimWalk Simulation Report						12.04.2008	15:10	Projektdatei Anzahl der Ebenen (Drawing layers) Dimension des Grundrisses
	Project Information								
	Project name:	T8g		Project run:	v180al decks				
	Organisation:	SHe		Operator:	Sven Hebben				
	Drawing file:	Test08_Simwalk_c.swd		Drawing layers:	5				
	Drawing width:	26.00 m		Drawing height:	19.00 m				
	Comment:								
Konfigurationen	Configuration Settings								
	Potential cell size:	0.50 m		Agent radius:	0.23 m		Körperproportion der Personen (Agent radius)		
	Density cell size:	5 m		Object range:	0.20 m		Abstand zu Gegenständen (Object range)		
	Interaction range:	1.71 m		Time step:	0.50 s		Abstand zu Personen (Interaction range)		
	Pressure factor:	1.50		Log interval:	10 steps				
Ergebnisse	Simulation Results								
	Start time:	15:05:58		Total agents:	448		Anzahl der simulierten Personen (Total Agents)		
	End time:	15:09:31		Agent groups:	1		Anzahl der Personengruppen (agent groups)		
	Real time:	00:03:33		Simulation steps:	620				
	Run time:	00:02:34.50		Logged events:	896		Entfluchtungsdauer (Run Time)		
Angaben zu den Personen (Agenten)	Agents Plan								
	Start point	Exit point	Agents	Start time	Speed	Wait			
	ges01 (EG)	ex (EG)	36 show	0 - 0	180 - 180				
	ges02 (EG)	ex (EG)	64 show	0 - 0	180 - 180				
	ges03 (EG)	ex (EG)	44 show	0 - 0	180 - 180				
	ges11 (1OG)	ex (EG)	44 show	0 - 0	180 - 180				
	ges12 (1OG)	ex (EG)	64 show	0 - 0	180 - 180				
	ges13 (1OG)	ex (EG)	44 show	0 - 0	180 - 180				
	ges21 (2OG)	ex (EG)	44 show	0 - 0	180 - 180				
	ges22 (2OG)	ex (EG)	64 show	0 - 0	180 - 180				
	ges23 (2OG)	ex (EG)	44 show	0 - 0	180 - 180				
	SimWalk Vers. 2.1 - Copyright by Savannah Simulations AG						Programmversion		

ANHANG E: ASERI

E1 Sensitivitätsanalyse

Zur Darstellung der Auswirkung ausgewählter Parameter wird eine Untersuchung über eine Nachbildung einer Evakuierungsübung in einem Theater herangezogen. An dieser Übung nahmen bei einer Kapazität von 750 Personen 612 Personen teil. Die Auslastung des Theaters lag damit etwa bei 82%. Bei der Errechnung der Entfluchtungsauern wurden mit ASERI Parametervariationen [79] erstellt, die die Sensitivität ausgewählter Einstellungen anzeigt. Die Ergebnisse der Variationen sind in nachstehender Tabelle dargestellt.

	Gesamtentfluchtungs- dauer	Entfluchtungsdauer des Auditoriums	Erste Person im Erd- geschoss
Gemessene Dauer in der Evakuierungsübung	5:20	3:37	1:10
Simulation im Modus Entfluchtung	5:32 ± 0:06	4:02 ± 0:06	1:15 ± 0:03
Simulation im Modus Gefahr	4:35 ± 0:09	3:07 ± 0:08	1:14 ± 0:03
Simulation für homogene Personengruppe	3:27 ± 0:03	2:25 ± 0:05	1:17 ± 0:02
Simulation der vollen Auslastung des Theaters	6:17 ± 0:13	4:48 ± 0:11	1:21 ± 0:06

Tabelle A 3: Gemessene und anhand des Programms ASERI errechnete Entfluchtungsauern bezüglich der Evakuierungsübung eines Theaters [79]

Die Tabelle zeigt, dass im Modus Gefahr die Gesamtentfluchtungsauer etwa 83% der Dauer im Modus Entfluchtung beträgt. Ähnliche Ergebnisse wurden bei einer Untersuchung mit einer Verkaufsstätte [53] erzielt. Hier beträgt die Entfluchtungsauer im Modus Gefahr 82% der Dauer im Modus Entfluchtung. Die Dauer die für das Verlassen der ersten Person erreicht wird, ändert sich in diesem Fall für die Variation der Bewegungsarten nur sehr minimal. Hinsichtlich der Bewegungsarten wird in ASERI für den Modus Gefahr eine höhere Personendichte von 6 Personen/m² erlaubt [65]. Diese ist damit um eine Person pro m² höher als im Modus Entfluchtung.

Außerdem wurde die Entfluchtungsdauer für die Auslastung des Theaters verglichen. Bei voller Auslastung steigt die Entfluchtungsdauer um 14 %.

Weiterhin wurde der Einfluss der Personenzusammensetzung überprüft. Im Normalfall wurde für die Geschwindigkeit eine Spannweite von 0,7 bis 1,5 m/s und für die beanspruchte Personenfläche ein Bereich von 0,12 bis 0,22 m² angenommen. Für den homogenen Fall sinken erwartungsgemäß die Entfluchtungsauern. Homogen bedeutet in diesem Fall, dass Geschwindigkeit und Körperproportionen aneinander angepasst wurden. Es wird deutlich, dass die niedrigsten Geschwindigkeiten maßgeblich für die Entwicklung der Entfluchtungsdauer werden. Dies wird an einer weiteren Sensitivitätsanalyse bestätigt. Für die Simulation eines Stadions [80] wurde die Entwicklung der Entfluchtungsdauer anhand der Variation von Mobilitätsparametern untersucht. Tabelle A 4 enthält zur Verdeutlichung die mittleren ermittelten Entfluchtungsauern von Ober- und Unterrang.

	Szenario A [min]	Szenario B [min]	Szenario C [min]
Unterrang	5	9	8
Oberrang	6	11	9

Tabelle A 4: Ermittelte Entfluchtungsauern eines Stadions für unterschiedliche Eigenschaften der Personen [80]

Szenario A wurde dabei mit einer homogenen Personengruppe eines durchschnittlichen Erwachsenen mit einer Gehgeschwindigkeit von 1,4 m/s, einer Schulterbreite von 50 cm, einer Brustbreite von 30 cm und des daraus resultierenden Flächenbedarfes von 0,10 m² durchgeführt. In Szenario B wurde die Gehgeschwindigkeit auf 1,0 m/s gesenkt und die Körperproportionen auf 0,13 m² erhöht. Szenario C wurde aus einer Mischung der vorangegangenen Szenarien zusammengestellt.

Deutlich wird die erhöhte Zunahme bei der Änderung der Personeneigenschaften von Szenario A zu B. Die Simulation mit der inhomogenen Personengruppe aus Szenario C zeigt eine Ähnlichkeit mit Szenario B, was darauf schließen lässt, dass der Einfluss langsamerer Personen bedeutend ist.

ANHANG F: TABELLEN

F1 Geschwindigkeit

Geschwindigkeitstabellen nach MSC 1238

Populationsgruppe	Gehgeschwindigkeit in der Ebene	
	Minimum [m/s]	Maximum [m/s]
Frauen, jünger als 30 Jahre	0.93	1.55
Frauen, 30 – 50 Jahre	0.71	1.19
Frauen, älter als 50 Jahre	0.56	0.94
Frauen, älter als 50 Jahre, beeinträchtigte Mobilität (1)	0.43	0.71
Frauen, älter als 50 Jahre, beeinträchtigte Mobilität (2)	0.37	0.61
Männer, jünger als 30 Jahre	1.11	1.85
Männer, 30 – 50 Jahre	0.97	1.62
Männer, älter als 50 Jahre	0.84	1.40
Männer, älter als 50 Jahre, beeinträchtigte Mobilität (1)	0.64	1.06
Männer, älter als 50 Jahre, beeinträchtigte Mobilität (2)	0.55	0.91

Tabelle A 5: Gehgeschwindigkeit in der Ebene abhängig vom Alter und Geschlecht nach [26]

Populationsgruppe	Gehgeschwindigkeit auf Treppen [m/s]			
	Treppen abwärts		Treppen aufwärts	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Frauen, jünger als 30 Jahre	0.56	0.94	0.47	0.79
Frauen, 30 – 50 Jahre	0.49	0.81	0.44	0.74
Frauen, älter als 50 Jahre	0.45	0.75	0.37	0.61
Frauen, älter als 50 Jahre, beeinträchtigte Mobilität (1)	0.34	0.56	0.28	0.46
Frauen, älter als 50 Jahre, beeinträchtigte Mobilität (2)	0.29	0.49	0.23	0.39
Männer, jünger als 30 Jahre	0.76	1.26	0.5	0.84
Männer, 30 – 50 Jahre	0.64	1.07	0.47	0.79
Männer, älter als 50 Jahre	0.5	0.84	0.38	0.64
Männer, älter als 50 Jahre, beeinträchtigte Mobilität (1)	0.38	0.64	0.29	0.49
Männer, älter als 50 Jahre, beeinträchtigte Mobilität (2)	0.33	0.55	0.25	0.41

Tabelle A 6: Gehgeschwindigkeit auf Treppen abhängig vom Alter und Geschlecht nach [26]

Geschwindigkeitsangaben nach RiMEA

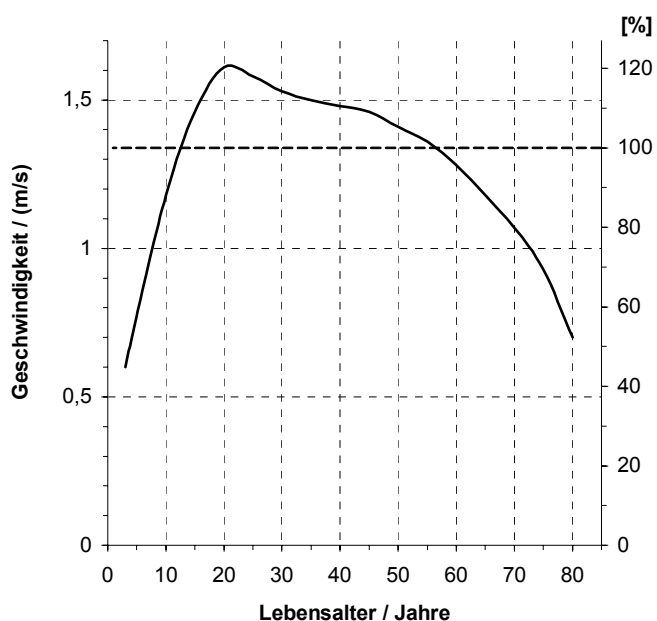


Abbildung A 43: mittlere Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Lebensalter [27]

Personengruppe	Gehgeschwindigkeit in der Ebene	
	Minimum [m/s]	Maximum [m/s]
Unter 30 Jahre	0,58	1,61
30 bis 50 Jahre	1,41	1,54
Über 50 Jahre	0,68	1,41
Personen mit beeinträchtigter Mobilität	0,46	0,76

Tabelle A 7: Gehgeschwindigkeit in der Ebene abhängig vom Alter und Geschlecht nach [27]

Personengruppe	Mittlere Gehgeschwindigkeiten auf Treppen [m/s]			
	Treppe abwärts		Treppe aufwärts	
	(1)	(2)	(1)	(2)
Unter 30 Jahre	0,76	0,81	0,55	0,58
30 bis 50 Jahre	0,65	0,78	0,50	0,58
Über 50 Jahre	0,55	0,59	0,42	0,42
Personen mit beeinträchtigter Mobilität	0,42		0,32	

Tabelle A 8: Gehgeschwindigkeit auf Treppen abhängig vom Alter und Geschlecht nach [27]

F2 Level-of-Service Konzepte

LOS-Konzepte nach Fruin [41]:

Gehwege:

Level of Service Konzept nach Fruin für Gehwege		
LOS	Dichte [P/m^2]	Charakterisierung
A	< 0,31	Geschwindigkeit frei wählbar Überholen von anderen Personen möglich Vermeiden von Querungen möglich
B	0,31 – 0,43	Personen können sich mit normaler Geschwindigkeit bewegen Überholen von Personen möglich Geringe Konflikte bei Querungen und entgegengesetzter Bewegung
C	0,43 – 0,72	Geschwindigkeitswahl nicht mehr frei wählbar Überholen anderer Personen ist beschränkt Konflikte bei Querungen und entgegengesetzter Bewegung Richtungswechsel und Geschwindigkeitsanpassung notwendig um Kontakt mit anderen Personen zu vermeiden
D	0,72 – 1,07	Geschwindigkeit ist bei Mehrheit der Personen begrenzt und reduziert Schwierigkeiten beim Überholen von langsam laufenden Personen Schwere Begrenzung von Querungen und entgegengesetzter Bewegung
E	1,07 – 2,17	Geschwindigkeit ist bei allen Personen reduziert Stetige Anpassung der Geschwindigkeit und der Richtung notwendig Querungen und entgegengesetzte Bewegung nur sehr schlecht möglich
F	> 2,17	Keine freie Geschwindigkeitswahl, Geschwindigkeiten sind extrem herabgesetzt Unbeabsichtigtes Berühren anderer ist unvermeidbar Querungen und entgegengesetzte Bewegung unmöglich Bewegung ist von den Personen an der Spitze abhängig

Tabelle A 9: LOS-Konzept für Gehwege [41]

Treppen:

Level of Service Konzept nach Fruin für Treppen		
LOS	Dichte [P/m ²]	Charakterisierung
A	< 0,50	Geschwindigkeit frei wählbar Überholen von anderen Personen ohne Schwierigkeiten möglich Keine Schwierigkeiten bei entgegengesetzter Bewegung
B	0,50 – 0,72	Personen können sich mit normaler Geschwindigkeit bewegen Überholen von Personen bei geringen Schwierigkeiten möglich Geringe Konflikte bei entgegengesetzter Bewegung
C	0,72 – 1,07	Geschwindigkeitswahl nicht mehr frei wählbar, leicht reduziert Überholen anderer Personen unmöglich Entgegengesetzte Bewegung verursacht geringe Schwierigkeiten
D	1,07 – 1,42	Geschwindigkeit ist bei Mehrheit der Personen begrenzt und reduziert Entgegengesetzte Bewegung verursacht Probleme
E	1,42 – 2,50	Geschwindigkeit ist bei allen Personen reduziert Entstehung von temporären Staus wahrscheinlich
F	> 2,50	Geschwindigkeiten sind extrem herabgesetzt Häufiges Stehenbleiben der Personen Bewegung ist von den Personen an der Spitze abhängig

Tabelle A 10: LOS-Konzept für Treppen [41]

Wartepositionen:

Level of Service Konzept nach Fruin für Personen in Wartepositionen		
LOS	Dichte [P/m ²]	Charakterisierung
A	< 0,83	„Free Circulation Zone“ Stehen ohne Berührung anderer möglich Körperrotation ohne Körperkontakt möglich
B	0,83 – 1,07	„Restricted Circulation Zone“ Stehen ohne Berührung anderer möglich Körperrotation ohne Körperkontakt ist nur beschränkt möglich
C	1,07 – 1,54	„Personal Comfort Zone“ Grenze des persönlichen Komforts Stehen ohne Berührung anderer möglich Körperrotation ohne Körperkontakt ist nicht mehr möglich
D	1,54 – 3,57	„No Touch Zone“ Stehen ohne Berührung anderer möglich Körperrotation ist stark beschränkt Vorwärtsbewegung als Gruppe möglich Ungeeignet für lange Warteperioden
E	3,57 – 5,26	„Touch Zone“ Körperkontakt ist beim Stehen unvermeidlich Körperrotation unmöglich Nur für kurze Warteperioden empfehlenswert (z.B. in Aufzügen)
F	> 5,26	„Body Ellipse“ Stehen nur mit engem Körperkontakt zwischen den Personen möglich Beanspruchte Fläche einer Person entspricht ihrer Körperellipse Bewegung nur bei den Personen an der Spitze möglich

Tabelle A 11: LOS-Konzept für Wartepositionen [41]

LOS-Konzepte nach Weidmann [39]:

Erklärung der Kriterien K1 – K8:

- K1 Möglichkeit zur freien Geschwindigkeitswahl
- K2 Häufigkeit eines erzwungenen Geschwindigkeitswechsels
- K3 Zwang zur Beachtung anderer Fußgänger
- K4 Häufigkeit eines erzwungenen Richtungswechsels
- K5 Behinderung bei Querung eines Fußgängerstromes
- K6 Behinderung bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung
- K7 Behinderung beim Überholen
- K8 Häufigkeit unbeabsichtigter Berührungen

Gehwege:

Level of Service Konzept nach Weidmann für Gehwege		
LOS	Krit.	Charakterisierung
LOS A 0.00 bis 0.10 P/m ²	K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8	Freie Geschwindigkeitswahl Keine erzwungenen Geschwindigkeitswechsel Beachtung anderer Fußgänger nicht erforderlich Kein erzwungener Richtungswechsel Keine Behinderung bei Querung eines Fußgängerstromes Keine Behinderung bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung Keine Behinderung beim Überholen Keine unbeabsichtigte Berührung
LOS B 0.10 bis 0.30 P/m ²	K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8	Freie Geschwindigkeitswahl Keine erzwungenen Geschwindigkeitswechsel Beachtung anderer Fußgänger erforderlich Kein erzwungener Richtungswechsel Keine Behinderung bei Querung eines Fußgängerstromes Keine Behinderung bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung Keine Behinderung beim Überholen, aber Richtungswechsel nötig Keine unbeabsichtigte Berührung
LOS C 0.30 bis 0.45 P/m ²	K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8	Geschwindigkeitswahl bei Gegenverkehr leicht eingeschränkt Keine erzwungenen Geschwindigkeitswechsel Beachtung anderer Fußgänger erforderlich Gelegentliche Richtungswechsel nötig, vor allem bei Gegenverkehr Bis zur Hälfte der Querungen eines Fußgängerstromes werden behindert Gelegentliche Behinderungen bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung Leichte Behinderung beim Überholen, Richtungswechsel nötig Keine unbeabsichtigte Berührung

Anhang F: Tabellen

<p>LOS D</p> <p>0.45 bis 0.60 P/m²</p>	<p>K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8</p>	<p>Geschwindigkeit nicht mehr frei wählbar Vermehrt erzwungene Geschwindigkeitswechsel Beachtung anderer Fußgänger erforderlich Richtungswechsel nötig Über die Hälfte der Querungen eines Fußgängerstromes werden behindert Starke Behinderungen bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung Starke Behinderung beim Überholen, Richtungswechsel nötig Keine unbeabsichtigte Berührung</p>
<p>LOS E</p> <p>0.60 bis 0.75 P/m²</p>	<p>K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8</p>	<p>Geschwindigkeit deutlich eingeschränkt Häufige erzwungene Geschwindigkeitswechsel Beachtung anderer Fußgänger erforderlich Richtungswechsel nötig Nahezu alle Querungen eines Fußgängerstromes werden behindert Starke Behinderungen bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung Überholen schwierig Keine unbeabsichtigte Berührung</p>
<p>LOS F</p> <p>0.75 bis 1.00 P/m²</p>	<p>K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8</p>	<p>Massiv eingeschränkte Geschwindigkeitswahl Häufige erzwungene Geschwindigkeitswechsel Beachtung anderer Fußgänger erforderlich Häufige erzwungene Richtungswechsel Alle Querungen eines Fußgängerstromes behindert Massive Behinderungen bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung, Gegenverkehr nahezu unmöglich Überholen nur bei gegenseitiger Berührung möglich Keine unbeabsichtigte Berührung</p>
<p>LOS G</p> <p>1.00 bis 1.50 P/m²</p>	<p>K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8</p>	<p>Keine freie Geschwindigkeitswahl Häufige erzwungene Geschwindigkeitswechsel Beachtung anderer Fußgänger erforderlich Häufige erzwungene Richtungswechsel Alle Querungen eines Fußgängerstromes behindert, mit gegenseitiger Berührung verbunden Massive Behinderungen bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung, Gegenverkehr nahezu unmöglich, mit gegenseitiger Berührung verbunden Überholen unmöglich Unbeabsichtigte Berührungen</p>
<p>LOS H</p> <p>1.50 bis 2.00 P/m²</p>	<p>K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8</p>	<p>Keine freie Geschwindigkeitswahl, Gedränge Häufige erzwungene Geschwindigkeitswechsel Beachtung anderer Fußgänger erforderlich Häufige erzwungene Richtungswechsel Alle Querungen eines Fußgängerstromes behindert, mit gegenseitiger Berührung verbunden Massive Behinderungen bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung, Gegenverkehr nahezu unmöglich, mit gegenseitiger Berührung verbunden Überholen unmöglich Unbeabsichtigte Berührungen häufig</p>

LOS I 2.00 bis 5.00 P/m ²	K1	Keine freie Geschwindigkeitswahl, Stillstand bei etwa 5 P/m ²
	K2	Häufige erzwungene Geschwindigkeitswechsel, stoßweise Fortbewegung
	K3	Beachtung anderer Fußgänger erforderlich, Verhalten wie in Kolonne
	K4	Häufige erzwungene Richtungswechsel
	K5	Querungen unmöglich
	K6	Gegenverkehr unmöglich
	K7	Überholen unmöglich
	K8	Unbeabsichtigte Berührungen unvermeidbar

Tabelle A 12: LOS-Konzept für Gehwege [39]

Treppen:

Level of Service Konzept nach Weidmann für Treppen										
LOS	Dichte [P/m ²]	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	Gesamtcharakterisierung
A	0,00 – 0,20	+	+	+	+	+	+	+	+	Abs. freie Bewegung
B	0,20 – 0,60	+	+	=	+	+	+	+	+	Freie Bewegung
C	0,60 – 0,75	=	+	=	=	=	=	=	+	Schwache Behinderung
D	0,75 – 0,90	=	=	=	=	-	-	-	+	Mäßige Behinderung
E	0,90 – 1,15	-	-	-	=	-	-	-	+	Starke Behinderung
F	1,15 – 1,65	-	-	-	-	-	-	-	+	Dichter Verkehr
G	1,65 – 2,15	-	-	-	-	-	-	-	=	Mäßiges Gedränge
H	2,15 – 2,60	-	-	-	-	-	-	-	-	Starkes Gedränge
I	2,60 – 5,40	-	-	-	-	-	-	-	-	Massives Gedränge

Legende: + gut
 = mittelmäßig
 - schlecht

Tabelle A 13: LOS-Konzept für Treppen [39]

ANHANG G: BERECHNUNG ZUM NACHTCLUB „THE STATION“

Berechnungen der Ausgangsauslastung des Station Night Club nach [49]:

Verteilung der überlebenden Personen auf die Ausgänge und Fenster:

Kitchen	12
Main Bar	46
Front Entrance	91
Platform	20
Fenster	79
Summe:	248

Verteilung der überlebenden Personen auf die Ausgänge ohne Fenster:

Kitchen	12
Main Bar	46
Front Entrance	91
Platform	20
Summe:	169

Hieraus ergibt sich folgende prozentuale Verteilung:

Ausgangsbelegung ohne Flucht durch Fenster

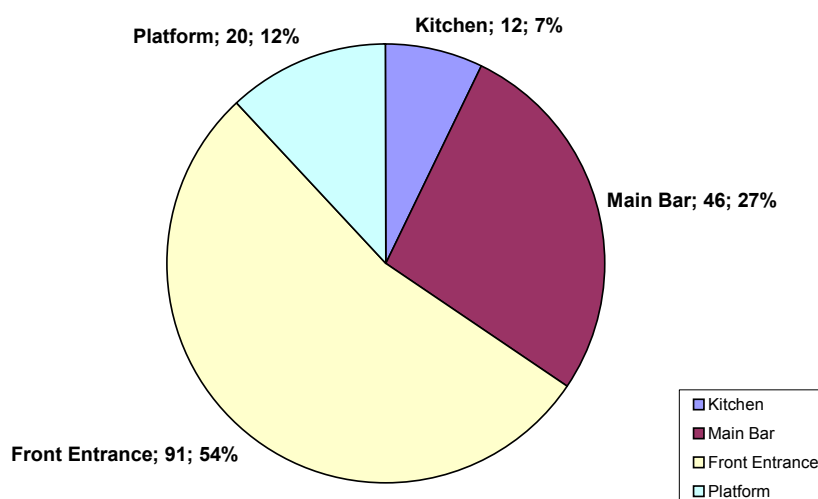


Abbildung A 44: Ausgangsbelegung ohne Flucht durch Fenster [49]

Verteilung auf die Ausgänge aller Personen:

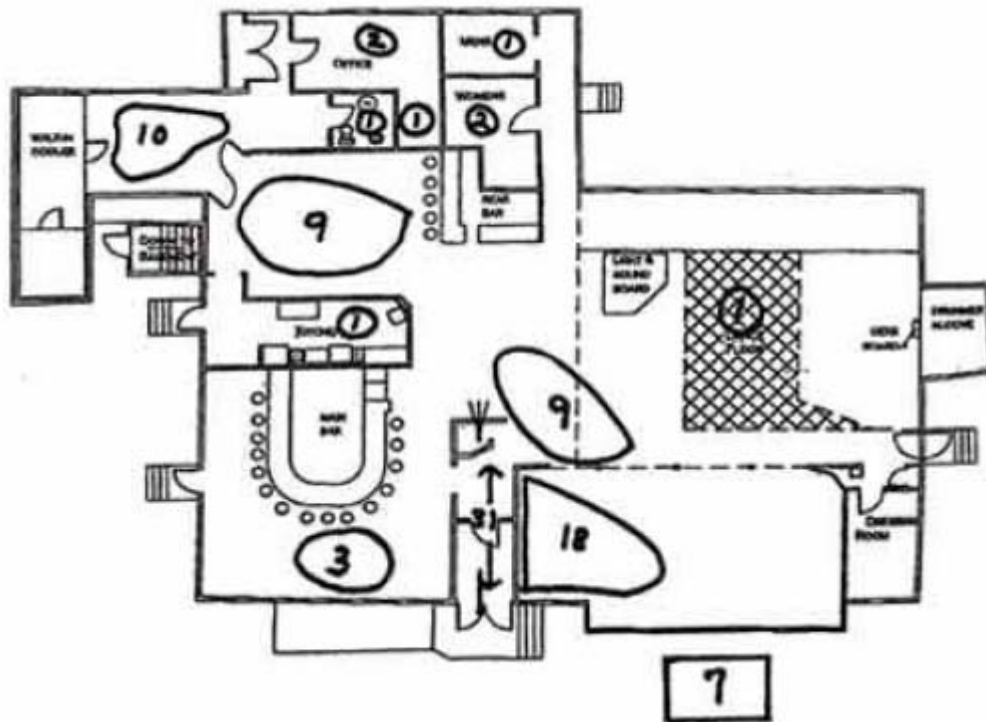


Abbildung A 45: Fundorte der Opfer [49]

Tabellarische Zusammenstellung:

Kitchen	1
Dart Room	9
Sanitärbereich	3
Office	14
Main Bar	3
Front Entrance	40
Sunroom	18
Platform	1
Fenster	7
Summe:	96

Berechnung der Verteilung aller Personen

Überlebende	Platform		20
	Kitchen		12
	Main Bar		46
	Front Entrance	(durch Hauptaussgang und Fenster)	170
Opfer	Übrige Bereiche		38
	Front Entrance	(Hauptaussgang und Sunroom)	58

Damit ergibt sich folgende prozentuale Verteilung auf die Ausgänge bei Berücksichtigung aller Personen:

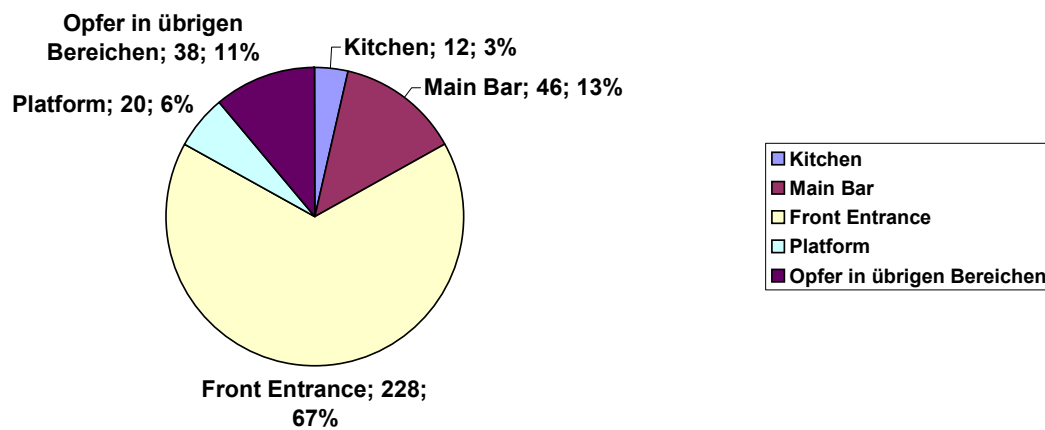


Abbildung A 46: Darstellung der Verteilung aller Personen

Berechnung der Ungleichförmigkeit der Verteilung auf die Ausgänge

Für die Berechnung der Gleichförmigkeit wurden nur die Personen herangezogen, die das Gebäude tatsächlich durch den Ausgang verlassen haben. Die Gleichförmigkeit wurde also nur für 169 Personen berechnet.

Angaben und Berechnungen zu den Ausgängen:

Ausgänge	Breite [m]	a_i / a_{ges}
a_1 Kitchen	0,91	0,2
a_2 Bar	0,91	0,2
a_3 Platf	0,91	0,2
a_4 Main	1,82	0,4
a_{ges}	4,55	

$$n = 4$$

$$\sqrt{n \cdot (n-1)} = 3,46$$

Angaben und Berechnungen zu den Personen:

Personen	Anzahl	$P_{i,opt}$	$P_i / P_{i,opt}$	$ 1 - P_i / P_{i,opt} $
P_1 Kitchen	12	33,8	0,36	0,64
P_2 Bar	46	33,8	1,36	0,36
P_3 Platf	20	33,8	0,59	0,41
P_4 Main	91	67,6	1,35	0,35
P_{ges}	169			

$$\sum |1 - P_i / P_{i,opt}| = 1,76$$

Aus der Berechnung von

$$u = \frac{\sum |(1 - P_i / P_{i,opt})|}{\sqrt{n \cdot (n-1)}}, \text{ ergibt sich damit:}$$

$$\underline{u = 51 \%}$$

EIDESSTATTLICHE VERSICHERUNG

ERKLÄRUNG ZUR VERWERTUNG DER ARBEIT

Ich bin damit einverstanden, dass die Arbeit von Mitarbeitern des Instituts für Bauphysik und Materialwissenschaft für weitere Diplomarbeiten, für Forschungsvorhaben und Gutachten sowie zu Publikationen verwertet werden kann.

Mir ist bekannt, dass Ergebnisse, die mit Mitteln und Geräteausstattung der Hochschule bzw. der Drittmittelgeber (z.B. DFG) erzielt werden, Eigentum des Instituts sind und ich bestätige, dass ich diese nicht ohne Genehmigung an Dritte weitergeben werde.

Ort, Datum Unterschrift

VERSICHERUNG AN EIDES STATT

Ich,

(Vorname, Name, Anschrift, Matr,-Nr.)

versichere an Eides Statt durch meine Unterschrift, dass ich die vorstehende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und alle Stellen, die ich wörtlich oder annähernd wörtlich aus Veröffentlichungen entnommen habe, als solche kenntlich gemacht habe, mich auch keiner anderen als der angegebenen Literatur oder sonstiger Hilfsmittel bedient habe.

Ich versichere an Eides Statt, dass ich die vorgenannten Angaben nach bestem Wissen und Gewissen gemacht habe und dass die Angaben der Wahrheit entsprechen und ich nichts verschwiegen habe.

Die Strafbarkeit einer falschen eidesstattlichen Versicherung ist mir bekannt, namentlich die Strafandrohung gemäß § 156 StGB bis zu drei Jahren Freiheitsstrafe oder Geldstrafe bei vorsätzlicher Begehung der Tat bzw. gemäß § 163 Abs.7 SE.

Ort, Datum Unterschrift