



**BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL**

## **Bachelor-Thesis**

# **Analyse und Simulation der Fußgängerdynamik an Fahrtreppen im Evakuierungsfall**

Bergische Universität Wuppertal  
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik  
Fachgebiet für Verkehrssicherheit und Zuverlässigkeit

vorgelegt von:

Max Petter

Matrikelnummer: 1820825

max.petter@uni-wuppertal.de

Prüfer: Jun.-Prof. A. Tordeux, Bergische Universität Wuppertal  
Herr Korbmacher, Bergische Universität Wuppertal

Bearbeitungszeitraum: 12.11.2021 – 11.02.2022

---

## Eidesstattliche Erklärung

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

Wuppertal, den 07.02.2022

---

Max Petter

---

## Kurzfassung

Fahrtreppen erreichen hohe Beförderungsleistungen und können im Evakuierungsfall vermutlich wirksam die Kapazität des gesamten Objektes erhöhen. Dabei sind jedoch durch den hohen ankommenden Personenstrom und den engstellenähnlichen Charakter der Anlage gestaute Zustände wahrscheinlich. Während für andere Fußgängeranlagen umfangreiche theoretische und praktische Erkenntnisse vorliegen, sind die Dynamiken an und auf Fahrtreppen bisher weniger erforscht.

Diese Arbeit gibt einen Überblick über die grundsätzlichen Kenngrößen von Personenströmen und Arten von Fußgängermodellen einschließlich Beispielen. Zusätzlich werden vorherrschende Dynamiken an verschiedenen baulichen Anlagen wie Engstellen oder Treppen und weitere Phänomene beschrieben, um eine realistische Parametereinstellung zu erlauben. Ebenfalls erfolgt eine Zusammenfassung über computerbasierte Simulationsprogramme und den Ablauf einer Evakuierungssimulation. Nach einer Erläuterung des *collision-free speed model for pedestrian dynamics* von Tordeux et. al wird mit NetLogo sowohl das Modell anhand empirischer Daten verifiziert, als auch der Einfluss von Fahrtreppengeschwindigkeit, Breite der Fahrtreppe und Größe der Agenten untersucht.

Es zeigt sich, dass der Fluss der mit empirischen Daten eingestellten Simulation geringfügig zu hoch ist. Nach einer Anpassung der Parameter ist ein konkaver Anstieg des Flusses mit gleichzeitigem Sinken der Dichte bei steigender Geschwindigkeit zu erkennen. Dabei bestehen bei einer Geschwindigkeit von 0.5 m/s die meisten Ähnlichkeiten mit Angaben aus der Literatur. Wird die Breite der Fahrtreppe bei konstanter Geschwindigkeit vergrößert, steigt der Fluss ungefähr linear an. Sowohl spezifischer Fluss als auch Dichte sind näherungsweise konstant mit einem Hochpunkt bei 0.9 m Breite. Die Messergebnisse des Flusses sind dabei sehr ähnlich zu den von Predtetschenski und Milinski berechneten Werten. Bei einer Änderung der Agentengröße verlaufen Fluss und Dichte der einzelnen Größen ungefähr parallel zueinander. Eine Agentengröße von 0.30 m eignet sich zur Simulation von Spitzenbelastungen, dagegen weist eine Agentengröße von 0.40 m bzw. 0.45 m Ähnlichkeiten mit durchschnittlich gemessenen Kapazitäten auf. Durch die Bildung von Stauungen eignen sich diese jedoch nicht für die Simulation von geringen Breiten.

Das *collision-free speed model for pedestrian dynamics* kann bei richtiger Kalibrierung in der Praxis beobachtete Werte reproduzieren. Der Vorteil der starken Vereinfachung bildet gleichzeitig einen Nachteil durch die begrenzten Möglichkeiten zur Parametereinstellung.

---

# Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	II
Kurzfassung	III
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation .....	1
1.2 Gliederung.....	1
2 Theorie der Fußgänger- und Evakuierungsdynamik .....	2
2.1 Kenngrößen von Personenströmen .....	2
2.2 Fußgängermodelle.....	6
2.2.1 Einteilung der Fußgängermodelle .....	6
2.2.2 Geschwindigkeitsbasierte Modelle .....	7
2.2.3 Beschleunigungsbasierte Modelle .....	10
2.2.4 Zelluläre Automaten.....	12
2.2.5 Makroskopische Modelle .....	14
2.3 Empirische Charakteristiken .....	15
2.3.1 Fundamentaldiagramm.....	15
2.3.2 Geschwindigkeit von Fußgängern.....	16
2.3.3 Dimension und Platzbedarf von Personen .....	17
2.3.4 Stau und Verstopfung .....	18
2.3.5 Dichtewellen, Stop-and-Go Wellen .....	18
2.3.6 Engstellen.....	19
2.3.7 Treppen.....	22
2.3.8 Panik .....	24
3 Simulation der Fußgängerdynamik .....	26
3.1 Simulationsprogramme im Überblick.....	26
3.2 Ablauf einer Evakuierungssimulation von Gebäuden .....	27
4 Fahrtreppen .....	30
4.1 Geschichte .....	30
4.2 Aufbau und Funktionsweise .....	31
4.3 Parameter.....	33
4.3.1 Stufenmaße.....	33

---

4.3.2	Neigungswinkel .....	33
4.3.3	Nenngeschwindigkeit.....	34
4.4	Kapazität .....	34
4.4.1	Theoretische Förderkapazität .....	34
4.4.2	Normen und Richtlinien .....	35
4.4.3	Angaben der Hersteller .....	36
4.4.4	Planungshandbücher und Studien .....	38
4.5	Zusammenfassung .....	46
4.6	Besonderheiten und Herausforderungen .....	48
5	Analyse der Fußgängerdynamik an einer Fahrtreppe .....	50
5.1	Tordeux et. al: collision-free speed model for pedestrian dynamics .....	50
5.2	Definition der Modellparameter .....	53
5.3	Simulationen.....	55
5.3.1	Versuch 1: Validierung des collision-free speed model for pedestrian dynamics mit empirischen Daten .....	55
5.3.2	Versuch 2: Einfluss der Geschwindigkeit .....	62
5.3.3	Versuch 3: Einfluss der Breite.....	71
5.3.4	Versuch 4: Einfluss der Agentengröße.....	76
6	Fazit und Ausblick.....	81
7	Literaturverzeichnis.....	84
8	Anhang.....	90
8.1	Versuch 1 .....	90
8.2	Versuch 2 .....	91
8.3	Versuch 3 .....	92
8.4	Versuch 4 .....	93

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Messung der Durchschnittsgeschwindigkeit über ein Zeitintervall bzw. über eine bestimmte Distanz sowie deren Umrechnung .....	3
Abbildung 2: kumulative Funktion des Flusses .....	4
Abbildung 3: Systematik der Modelle zur Simulation von Fußgängerdynamiken.....	6
Abbildung 4: Mögliche Bewegungsrichtungen bei Neumannscher Nachbarschaftsrelation, Moorescher .....	13
Abbildung 5: Zusammenhang der möglichen Fundamentaldiagramme .....	15
Abbildung 6: $v(\rho)$ – Diagramm: Empirische Erhebungen (Datenpunkte) und Annahmen in Handbüchern (Linien) ..	16
Abbildung 7: beanspruchte Fläche nach Predtetschenski und Milinski.....	17
Abbildung 8: „Rechnerische Breite des Bewegungsweges“ .....	18
Abbildung 9: Reißverschlussverfahren .....	19
Abbildung 10: Kapazitäten von Engstellen nach ihrer Breite – Schätzungen und Messungen .....	20
Abbildung 11: Zusammenhang Fluss und Breite der Engstelle unter normalen Bedingungen .....	20
Abbildung 12: spezifischer Fluss diverser Engstellen, Ergebnisse von Seyfried et al.....	20
Abbildung 13: $J_s(\rho)$ -Diagramm von Engstellen .....	21
Abbildung 14: $J_s(\rho)$ und $v(\rho)$ – Diagramme beim Aufstieg von WM (schwarz), PM (rot), NM (grün) und FN (blau) ..	23
Abbildung 15: $J_s(\rho)$ und $v(\rho)$ – Diagramme beim Abstieg von WM (schwarz), PM (rot), NM (grün) und FN (blau) .....	23
Abbildung 16: $J_s(\rho)$ und $v(\rho)$ – Diagramme (linkes Diagramm: Abstieg, rechtes Diagramm: Aufstieg) .....	24
Abbildung 17: Modellmerkmale.....	27
Abbildung 18: Übersicht von verschiedenen Computermodellen für die Evakuierungssimulation von Gebäuden....	28
Abbildung 19: Abkürzungsverzeichnis für Abbildung 18 .....	28
Abbildung 20: Aufbau und Komponenten einer Fahrtreppe .....	31
Abbildung 21: Aufbau einer Fahrtreppe nach DIN EN 115-1 .....	32
Abbildung 22: Stufenmaße nach DIN EN 115-1 (1: Trittstufe 2: Setzstufe) .....	33
Abbildung 23: Maximale Förderleistung nach EN 115-1.....	35
Abbildung 24: Theoretische und praktische mögliche Förderleistung nach Schindler Österreich.....	36
Abbildung 25: Schindler Österreich .....	36
Abbildung 26: Abhängigkeit von Förderleistung und Geschwindigkeit nach Schindler Deutschland .....	37
Abbildung 27: Fluss von Fahrtreppe im Verhältnis zum Gesamtfluss der Treppenanlage.....	39
Abbildung 28: Besetzungsgrad der Stufen im Verhältnis zur Geschwindigkeit der Fahrtreppe .....	41
Abbildung 29: Zusammenhang von Geschwindigkeit und Leistungsfähigkeit einer Fahrtreppe .....	41
Abbildung 30: maximale Kapazität der untersuchten aufwärtsfahrenden Fahrtreppen.....	42
Abbildung 31: durchschnittliche und maximale Flüsse von [72].....	44
Abbildung 32: Fluss-Dichte-Tendenzen der Fahrtreppen (links: morgens, rechts: abends).....	44
Abbildung 33: Abhängigkeit des gemessenen Fluss nach Zeitintervall $t$ – Fahrtreppe in Einkaufscenter (links) und Bahnhof (rechts), aufwärts (rot) und abwärts (gelb) .....	45
Abbildung 34: Ellipse im Gesichtsbereich als Ort mit an der höchsten erwünschten Privatsphäre.....	48
Abbildung 35: Ausgangsbasis .....	50
Abbildung 36: Geschwindigkeitsmodell $V(\cdot)$ .....	51
Abbildung 37: Abstoßungsfunktion .....	52
Abbildung 38: Startoberfläche „Fahrtreppe“ im Programm NetLogo.....	54
Abbildung 39: Verstopfung bei einer Agentengröße $l$ von 0.35 m bzw. 0.40 m.....	56
Abbildung 40: Veränderung der Spannweite über die Zeit.....	58
Abbildung 41: V1.1-5 / V1.2-9 / V1.3-9 .....	58
Abbildung 42: V1 – vor Start der Simulation / V1.1-10.....	59
Abbildung 43: V1.2-4 ( $J = 1.37$ ped/min, $D = 3.38$ ped/m <sup>2</sup> ) / V1.2-5 ( $J = 1.35$ ped/min, $D = 3.33$ ped/m <sup>2</sup> ) .....	59
Abbildung 44: V1.3-5 (niedrigster Fluss und Dichte) / V1.3-9 (höchster Fluss und Dichte).....	59
Abbildung 45: Vergleich Versuch 1 mit Angaben aus der Literatur .....	61
Abbildung 46: V2.1-2 ( $J = 0.59$ ped/s, $D = 5.68$ ped/m <sup>2</sup> ) / V2.1-3 ( $J = 0.56$ ped/s, $D = 5.45$ ped/m <sup>2</sup> ) .....	63
Abbildung 47: Verlauf der Eingangsdichte bei Erhöhung der Geschwindigkeit in Versuch 2.....	63
Abbildung 48: V2.2 / V2.12 – Veränderung des Einzugstrichters und Bildung einer neuen Personenreihe.....	64
Abbildung 49: unsichere Zustände aufgrund der Geschwindigkeitsdifferenz bei V2.15 – $t = 600$ s / $t = 602$ s .....	64
Abbildung 50: graphische Darstellung der Ergebnisse von Versuch 2.....	65
Abbildung 51: Fluss-Dichte-Diagramm von Versuch 2.....	65
Abbildung 52: Vergleich Versuch 2 mit Angaben aus der Literatur .....	70
Abbildung 53: V 3.1-6 / 3.2-2 .....	71
Abbildung 54: doppelte Besetzung der Stufen bei V3.3-8 / V3.5-2 .....	72

---

Abbildung 55: dreifache Belegung einer Stufe in V3.6-8 / V3.7-7 .....	72
Abbildung 56: V3.8-10 / V3.9-10 .....	72
Abbildung 57: gleiche Ergebnisse trotz unterschiedlicher Stufenbelegung in V3.10.....	72
Abbildung 58: graphische Darstellung der Ergebnisse von Versuch 3.....	73
Abbildung 59: Vergleich der Ergebnisse von Abbildung 10 (Seyfried et al. [44]) und Versuch 3 .....	74
Abbildung 60: Vergleich Versuch 3 mit Messungen von Seyfried et al. [44] (s. Abb. 12).....	75
Abbildung 61: Verlauf der Dichte in Abhängigkeit von der Agentengröße .....	77
Abbildung 62: Verlauf des Flusses in Abhängigkeit von der Agentengröße.....	77
Abbildung 63: Fluss bei verschiedenen Geschwindigkeiten in Relation zur Agentengröße .....	78
Abbildung 64: Dichte bei verschiedenen Geschwindigkeiten in Relation zur Agentengröße .....	79
Abbildung 65: Vergleich der erreichten Theoretischen Kapazität.....	79

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick über diverse Simulationsprogramme zur Fußgänger- und Evakuierungssimulation.....	26
Tabelle 2: Kapazität der Z-Serie von Mitsubishi Electric in Personen pro Stunde.....	37
Tabelle 3: Kapazität der TX-Serie von Hitachi in Personen pro Stunde.....	37
Tabelle 4: Errechnete Kapazität nach PM in Personen pro Minute bzw. Personen pro Stunde.....	38
Tabelle 5: Theoretische Kapazität nach Barney in Personen pro Stunde / Personen pro Minute .....	42
Tabelle 6: Theoretische Kapazität nach [70] in Personen pro Stunde .....	43
Tabelle 7: Beobachtete Kapazitäten von sieben Fahrtreppen in Personen pro Minute .....	43
Tabelle 8: Theoretische Kapazität in Personen pro Minute / Personen pro Stunde .....	46
Tabelle 9: Kapazitäten in der Literatur in Personen pro Minute / Personen pro Stunde.....	46
Tabelle 10: Parameter, Wertebereich und Bedeutung der NetLogo Simulation.....	53
Tabelle 11: Auswertung Versuch 1 (Dichte in Personen pro Quadratmeter, Fluss in Personen pro Sekunde).....	57
Tabelle 12: Vergleich Versuch 1 mit theoretischer Kapazität in Personen pro Minute / Personen pro Stunde .....	60
Tabelle 13: Auswertung Versuch 2 (Dichte in Personen pro Quadratmeter, Fluss in Personen pro Sekunde).....	62
Tabelle 14: Vergleich Versuch 2 mit theoretischer Kapazität in Personen pro Minute / Personen pro Stunde .....	68
Tabelle 15: Auswertung Versuch 3 (Dichte in Personen pro Quadratmeter, Fluss in Personen pro Sekunde).....	71
Tabelle 16: Auswertung Versuch 4 (Dichte in Personen pro Quadratmeter, Fluss in Personen pro Sekunde).....	76
Tabelle 17: relative Kurvenverläufe der Agentengrößen zueinander .....	78

---

## Abkürzungsverzeichnis

Abb	–	Abbildung
BauO	–	Bauordnung
FR	–	Fruin
HG	–	Hoogendoorn und Daamen
NM	–	Nelson und Mowrer
NRW	–	Nordrhein-Westfalen
PM	–	Predtetschenski und Milinski
SFPE	–	Society of Fire Protection Engineers
Tab		Tabelle
WM	–	Weidmann

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

In Gefahrensituationen ist es für den Schutz von Personen essenziell, dass diese sicher und schnell den gefährdeten Bereich verlassen. Dieser organisierte Prozess wird auch als Evakuierung bezeichnet. [1]

Trotz gesetzlicher Reglementierung können Fußgängeranlagen durch das plötzliche und erhöhte Personenaufkommen in diesen Fällen schnell an ihre Kapazitätsgrenzen gelangen, wobei sich gestaute und andere unsichere Zustände bilden können. Auch wenn Fahrtreppen nach § 34 BauO NRW nicht als Flucht- und Rettungsweg gelten, kann die Evakuierung von Gebäuden unter Zuhilfenahme dieser durch die Erhöhung der Gesamtkapazität vermutlich in bedeutend kürzerer Zeit durchgeführt werden. Zur Fußgängerdynamik an diesen baulichen Anlagen liegen jedoch im Vergleich zu uni- bzw. bidirektionalen Strömen, Engstellen oder Kreuzungen weniger Erkenntnisse vor.

## 1.2 Gliederung

In dieser Arbeit werden zuerst die grundsätzlichen Variablen des Verkehrs und der Fußgängerdynamik erläutert. Anschließend erfolgt ein Überblick und eine Charakterisierung der wichtigsten Arten von Fußgängermodellen einschließlich deren limitierende Faktoren und relevanter Beispiele.

Nachfolgend werden die empirischen Charakteristiken an typischen baulichen Anlagen sowie die dort vorherrschenden Größen beschrieben, um eine realistische Einstellung der Modellparameter zu ermöglichen. Es folgt eine Zusammenfassung von relevanten Simulationsprogrammen für Fußgängerdynamiken sowie der grundsätzliche Ablauf einer Evakuierungssimulation. Im praktischen Teil wird abschließend die Fußgängerdynamik an einer Fahrtreppe mithilfe des *collision-free speed model for pedestrian dynamics* in NetLogo simuliert. Das Programm wird dazu mit möglichst realistischen Parametern eingestellt und die Ergebnisse statistisch aufbereitet mit Angaben aus der Literatur verglichen. Nach einer Kalibrierung werden die Auswirkungen von veränderter Geschwindigkeit, Breite der Fahrtreppe und Agentengröße auf Fluss, Dichte und das Agentenverhalten untersucht. Die Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgt mit Blick auf in Theorie und Praxis gewonnenen Erkenntnissen und zukünftige Herausforderungen.

## 2 Theorie der Fußgänger- und Evakuierungsdynamik

### 2.1 Kenngrößen von Personenströmen

#### Fußgänger

Eine Person, welche sich zu Fuß fortbewegt und kein Verkehrsmittel benutzt. Dieser wird in der Fußgängerdynamik auch als Agent oder Teilchen bezeichnet. [2]

#### Trajektorien

Als Trajektorien werden Bewegungsbahnen von Objekten bezeichnet. In der Fußgängerdynamik beschreiben diese den Verlauf des Ortes einer Person über die Zeit. Weitere Informationen über den Agenten können mit der Trajektorie verknüpft werden. [2]

#### Geschwindigkeit

Die *Geschwindigkeit*  $v$  bezeichnet das Verhältnis von *zurückgelegtem Weg*  $\Delta s$  zur dafür *benötigten Zeit*  $\Delta t$ .

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (1)$$

Da die Bewegung von Fußgängern im zweidimensionalen Raum stattfindet erfolgt eine Beschreibung demnach als Vektor mit zwei Komponenten.

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

Über den Betrag des Vektors lässt sich die Gehgeschwindigkeit ermitteln.

$$\text{Betrag } v = |\vec{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3)$$

Da die Formeln 1 – 3 nur für gleichförmige Bewegungen gelten, wird die momentane Geschwindigkeit bei nicht konstanter Bewegung zum *Zeitpunkt*  $t$  durch eine Ableitung der *Ortsfunktion*  $s(t)$  bestimmt [3].

$$v(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} = \frac{d}{dt} s(t) = \dot{s}(t) \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (4)$$

Bei gleichförmigen Bewegungen entspricht die aktuelle Geschwindigkeit der Durchschnittsgeschwindigkeit. Jedoch ist insbesondere bei der Berechnung der Durchschnittsgeschwindigkeit von Personen anhand ihrer Trajektorien der Unterschied zwischen zeitlicher und räumlicher Durchschnittsgeschwindigkeit zu beachten. [2, 4]

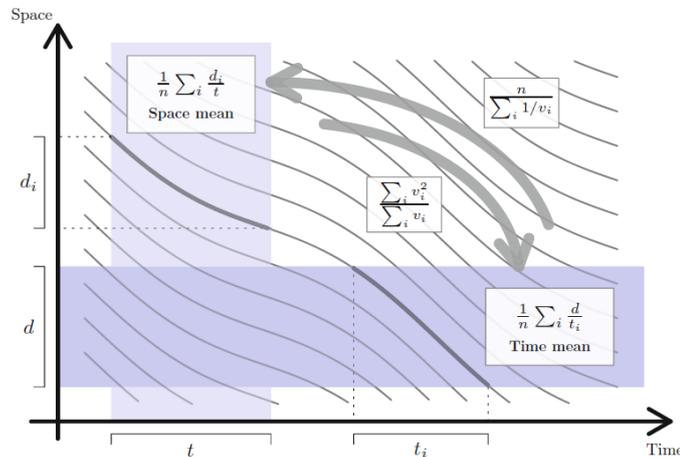


Abbildung 1: Messung der Durchschnittsgeschwindigkeit über ein Zeitintervall bzw. über eine bestimmte Distanz sowie deren Umrechnung [2, p. 7]

### Dichte

Die *Dichte*  $\rho$  (bzw.  $D$ ) beschreibt das Verhältnis von Anzahl der *Personen*  $N$  zu einer *Fläche*  $A$ . [2]

$$\rho = \frac{N}{A} \left[ \frac{1}{m^2} \right] \quad (5)$$

Predtetschenski und Milinski [5] (PM) beziehen die *beanspruchte Fläche*  $f$  der *Personen*  $P$  ein. Die *Fläche*  $A$  wird dabei durch das Produkt aus *Breite des Stroms*  $b - 2 \cdot \Delta b$  und *Länge des Personenstroms*  $l_{Strom}$  berechnet, wobei die *Breite* durch die *Zwischenräume*  $\Delta b$  zwischen Personen bzw. Person und umgebender Konstruktion vergrößert wird. Somit ist auch die Dichte des Stroms in der Mitte größer als an den Rändern. Durch die stetige Veränderung der sich bewegenden Menschen und der daraus folgende sich dynamisch verändernde Dichte kann der Faktor  $\Delta b$  allerdings vernachlässigt werden.

Für ungleichartig beschaffene Menschen (z. B. unterschiedlich bekleidete Erwachsene) berechnet sich die Dichte wie folgt:

$$D = \frac{\sum f}{A} = \frac{P \cdot f}{b \cdot l_{Strom}} [m^2 \cdot m^{-2}] \quad (6)$$

Fruin [6] (FR) verwendet anstelle der Dichte das Pedestrian Area Module was dem reziproken Wert dieser entspricht. Damit soll eine anschaulichere Visualisierung des Qualitätsgrades und der Umgebung erreicht werden.

## Fluss

Der *Fluss*  $J$  beschreibt die Anzahl von *Personen*  $N$ , die eine Messstelle in einer Zeiteinheit überschreiten. Dies wird auch als *Durchsatz* bezeichnet. Es existieren verschiedene Methoden, den Fluss zu messen. Dieser kann beispielsweise durch die Anzahl der gezählten Personen abgeschätzt werden. Dabei bezeichnet die *Zeitlücke*  $\Delta t = t_{i+1} - t_i$  zwei *aufeinanderfolgende Personen*  $i$  und  $i+1$ .

$$J = \frac{1}{\langle \Delta t \rangle} \text{ mit } \langle \Delta t \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_{i+1} - t_i) = \frac{t_{N+1} - t_1}{N} \left[ \frac{1}{s} \right] \quad (7)$$

Es besteht außerdem die Möglichkeit, den Fluss in einem definierten *Zeitintervall*  $T$  abzuschätzen. Dies erfolgt durch die *kumulative Funktion des Flusses*  $N(t)$  und dessen Änderung über die Zeit.

$$J_T = \frac{\Delta N}{T} \text{ mit } \Delta N = N(t) - N(t - T) \left[ \frac{1}{s} \right] \quad (8)$$

Der Verlauf kann durch ein  $N(t)$ -Diagramm visualisiert werden. Dabei werden die gemessenen Personen und deren Zeitstempel kumuliert. Die Ableitung der sich darauf ergebenden Funktion des Flusses  $N(t)$  nach der Zeit ergibt den Fluss zum *Zeitpunkt*  $t$ .

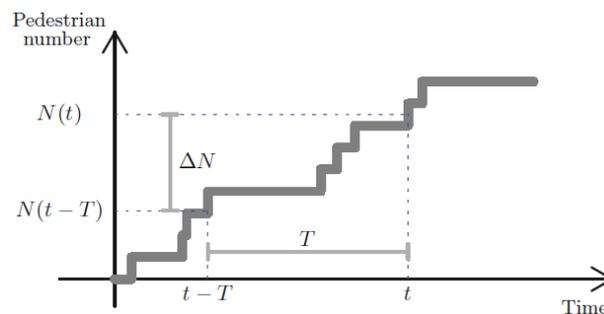


Abbildung 2: kumulative Funktion des Flusses [2, p. 4]

Die Höhe des Flusses ist dabei maßgeblich von der Dauer des betrachteten Zeitintervalls  $T$  beeinflusst [7].

Eine weitere Möglichkeit den Fluss zu bestimmen wurde aus der Dynamik der Fluide übernommen und wird auch als hydrodynamische Beziehung oder Flussgleichung bezeichnet. Dabei ist der Fluss das Produkt aus *Dichte*  $\rho$ , *Geschwindigkeit*  $v$  und *Breite*  $b$ . [2]

$$J = \rho \cdot v \cdot b = J_s \cdot b \left[ \frac{1}{s} \right] \quad (9)$$

Um eine vergleichbare Größe zu erschaffen wurde der *spezifische Fluss*  $J_s$  definiert. Dieser gibt den Fluss bezogen auf eine Einheitsbreite an und ist somit unabhängig von der Breite der Fußgängeranlage. [8]

$$J_s = \rho \cdot v = \frac{J}{b} \left[ \frac{1}{m \cdot s} \right] \quad (10)$$

In den Werken von Predtetschenski und Milinski [5], Weidmann [4] (WM), Fruin [6] und Nelson und Mowrer [9] (NM) wird ebenfalls eine hydrodynamische Beziehung verwendet. Die aufgestellten Gleichungen sind ähnlich zur Flussgleichung, definieren aber teilweise die Breite anders. Nelson und Mowrer lassen zusätzlich eine Konstante, bestehend aus Umrechnungsfaktor zwischen angloamerikanischen bzw. metrischen System und einer Größe für die Art der Fußgängeranlage, in die Gleichung einfließen. Die Geschwindigkeit ist außerdem abhängig von der Höhe der Dichte. Die Autoren verwenden für die Formeln eigene Notationen und Einheiten.

### **Kapazität**

Die *Kapazität*  $C$ ,  $J_C$  oder  $J_{max}$  einer Fußgängeranlage ist als deren maximal möglicher Fluss definiert. Die dabei vorherrschende Dichte wird als  $\rho_c$  bzw.  $\rho_{max}$  bezeichnet. [10]

### **Umrechnung und Beziehung der Variablen untereinander**

Aus mikroskopischen Variablen können makroskopische Variablen berechnet und in den Fundamentaldiagrammen dargestellt werden. Dies ist möglich, da aufgrund der Gesamtheit aller Agenten eines Systems dessen Zustand errechnet werden kann. Umkehrt ist dies nicht möglich, da bei makroskopischen Variablen eine Messung über den Ort oder die Zeit geschieht, sodass die individuellen Variablen für einen Fußgänger aus diesem Gesamtzustand nicht mehr abgeleitet werden können. Eine Ausnahme dafür stellen homogene Flüsse dar. Alle Agenten haben dabei gleichgroße mikroskopische Variablen, aus denen sich die makroskopischen berechnen lassen. [10]

## 2.2 Fußgängermodelle

### 2.2.1 Einteilung der Fußgängermodelle

Modelle zur Simulation der Fußgängerdynamik können durch ihre Eigenschaften bzw. Methodik verschieden klassifiziert werden.

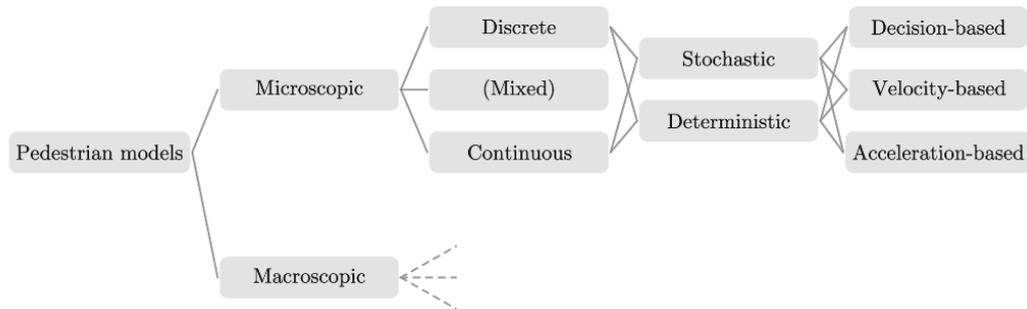


Abbildung 3: Systematik der Modelle zur Simulation von Fußgängerdynamiken [11, p. 5]

#### Mikroskopische vs. Makroskopische vs. Mesoskopische Modelle

In mikroskopischen Modellen wird jede einzelne Person für sich betrachtet. Somit können die individuellen Trajektorien und deren Parameter erfasst werden, wie zum Beispiel die persönliche Routenwahl und die aktuelle Position eines Agenten. Dagegen erfolgt in makroskopischen Modellen eine Beschreibung der Dynamiken von einem übergeordneten Blickwinkel. Anstatt einzelnen Fußgängern wird der Zustand des Systems als Ausdruck der Gesamtheit aller Agenten betrachtet. Eine Rückverfolgbarkeit eines einzelnen Individuums ist damit nicht gegeben. Der Zustand des Systems wird mit Variablen wie Dichte, Fluss oder Geschwindigkeit beschrieben. [8, 11]

Der mesoskopische Ansatz als Verbindung zwischen mikroskopischen und makroskopischen Modell stellt die Fußgänger ebenso einzeln dar, jedoch wird die Bewegung der Agenten einheitlich berechnet und entspricht somit keiner Individualisierung mehr. Dies wird mit Zellulären Automaten realisiert. [12]

#### Diskret vs. Kontinuierlich

Die Basisvariablen zur Beschreibung von Fußgängerdynamiken Zeit, Raum und Zustandsvariable können mit einer ganzzahligen oder reellen Zahl definiert werden. In den verschiedenen Modellen werden somit entweder diskrete oder kontinuierliche Größen eingesetzt. Auch eine Vermischung von beiden Typen ist möglich. [8]

### Deterministisch vs. Stochastisch

In deterministischen Systemen basiert das zukünftige Verhalten der Agenten auf ihrem aktuellen Zustand. Dagegen erfolgt in stochastischen Systemen die Entscheidungsfindung anhand von Wahrscheinlichkeiten. Eine gleiche Situation kann somit unterschiedlich aufgelöst werden. Dadurch ist es möglich, auch komplexes Verhalten in einfachen Systemen zu generieren und unbekannte Sachverhalte zu beschreiben. [8]

### 2.2.2 Geschwindigkeitsbasierte Modelle

Geschwindigkeitsbasierte Modelle basieren auf der Beobachtung das Fußgänger fast ohne Beschleunigungszeit ihre Wunschgeschwindigkeit erreichen können. Dabei wird keine Reaktionszeit benötigt und die Geschwindigkeit kann ohne Zeitverzögerung an die der Nachbaragenten angepasst werden. Auch eine hohe Beweglichkeit ist durch mögliche abrupte Bewegungsänderungen gegeben. Die Modelle werden mathematisch durch eine Differentialgleichung 1. Ordnung abgebildet und können als mikroskopische Modelle klassifiziert werden.

Die Geschwindigkeit einer betrachteten *Person*  $i$  ist dabei eine *Funktion*  $V$  welche durch die *relativen Positionen*  $x_j - x_i$  und *Geschwindigkeiten*  $v_j$  der *Nachbarn*  $j \in N_i$  bestimmt wird. [11]

$$\frac{dx_i}{dt} = V \left( (x_j - x_i, v_j), j \in N_i \right) \quad (11)$$

Kollisionen werden vom Grundprinzip durch eine Regelung bzw. Abänderung der Geschwindigkeit im Voraus durch den einzelnen Agenten vermieden. Somit wird sowohl die Position als auch die Geschwindigkeit in die Gleichung zur Modellierung einbezogen. Kommt ein Agent in einen Bereich, in dem eine Kollision mit anderen Agenten auftreten kann, muss er seine Geschwindigkeit entsprechend anpassen, um dieser zu entgehen. Um die zulässigen Geschwindigkeitsbereich zu finden bedienen sich die Modelle verschiedener Verfahren. [13] Im ursprünglich für Roboter entwickelten *Velocity-Obstacle-Modell* [14] soll das Ziel nur mit minimaler Beeinflussung der eigenen Wunschgeschwindigkeit erreicht werden. Für alle Nachbaragenten wird eine gleichbleibende Geschwindigkeit angenommen und ein kegelförmiger Bereich definiert, in dem es zu Kollisionen kommen kann. Die Beeinflussung der eigenen Geschwindigkeit erfolgt nun, um außerhalb dieses Bereichs der Nachbaragenten zu bleiben. Jedoch ist dabei das Auftreten von Oszillationen wahrscheinlich, da die Geschwindigkeit explizit von denen der Nachbaragenten abhängt, welche sich umgekehrt auch an ihren Nachbaragenten orientieren. Eine sichere Vermeidung von Überlappung in jedem Zustand konnte erst durch das *optimal reciprocal collision avoidance* [15, 16] gelöst werden, welches die Verantwortung für die Kollisionsvermeidung zwischen den Agenten aufteilt. Auf

diesem Ansatz aufbauend wurde eine Vielzahl von Modellen für die Modellierung von Personenströmen entwickelt. [11]

Auch die Definition einer richtungsabhängigen Geschwindigkeit ist möglich. Im *synthetic vision based steering Modell* [17] ist dabei die Geschwindigkeit durch die voraussichtliche Zeit bis zur Interaktion mit den Nachbaragenten bestimmt. Die Ermittlung der Richtung erfolgt ebenfalls durch die Zeitspanne bis zur Interaktion und zusätzlich mithilfe des Peilwinkels sowie dessen Ableitung. Das Modell orientiert sich dabei so nah wie möglich an realistischen menschlichen Interaktionen. Dies soll im Gegensatz zu anderen Modellen, welche mit geometrischen Verfahren Kollisionen vermeiden, durch das Sehvermögen einer realen Person auf ihre Umgebung geschehen. Die (virtuell) visuell erfahrenen Reize lösen dann die Bewegungsänderung bei den Agenten aus. Beim Menschen wird dies durch eine Ableitung des Peilwinkels der beobachteten Hindernisse sowie der eingeschätzten Zeit bis zur Kollision bestimmt. Bleibt die Ableitung des Peilwinkels null, ist eine Kollision zu erwarten und die Geschwindigkeit entsprechend zu ändern. [11]

Beim *Gradient Navigation Modell* [18] wird die Richtung des Geschwindigkeitsvektors eines Agenten durch Gradienten der Abstandsfunktionen zu anderen Agenten und Begrenzungen bestimmt. Außerdem werden das Blickfeld und weitere lokale Informationen einbezogen, sowie ein den Zellulären Automaten ähnliches Floor Field in die Navigationsfunktion implementiert. Die Beschreibung des Modelles erfolgt dabei mit drei Differentialgleichungen. Grundannahmen sind die hauptsächliche Beeinflussung der Agenten durch sich selbst und andere Agenten (und nicht durch übergeordnete Kräfte), das Ziel der Agenten die Route mit möglichst geringem Zeitaufwand zurückzulegen und die Anpassung der Geschwindigkeit an Hindernisse sowie andere Agenten nach einer bestimmten Reaktionszeit.

Im *Paris-Modell* [13, 19] erfolgt die Berechnung der für eine Kollisionsvermeidung zulässigen Geschwindigkeit durch einen diskreten Ansatz. Bei zwei Agenten A und B wird die zukünftige Position des vorderen bzw. kreuzenden Agenten B durch lineare Extrapolation der Position und dessen Geschwindigkeitsvektors gewonnen. Anschließend werden von Agent A aus für jede Zeitspanne zwei winkelförmigen Sektoren errechnet, in dem sich der Agent bewegen muss, um schneller bzw. langsamer als der andere Agent B zu sein und somit einer Kollision zu entgehen. Für jedes Zeitintervall wird außerdem die dafür benötigte Mindest- bzw. Höchstgeschwindigkeit ermittelt. Dies geschieht für alle benachbarten Agenten und Zeitintervalle, wobei unzulässige Geschwindigkeiten mitsamt ihren Winkelsektoren gemeldet werden. Durch eine Verlustfunktion wird anschließend die beste Lösung ausgewählt.

Auch die Übertragung des aus der Verkehrssimulation bekannten *Optimal Velocity Modells* auf die Fußgängerdynamik ist möglich. Die Geschwindigkeit wird dabei durch die Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Abstand (Optimal Velocity Funktion) und einer Abstoßungs-

funktion zu den Nachbaragenten bestimmt. [11, 20] Eine ausführliche Erläuterung dieses Modells erfolgt in Kapitel 5.1.

Nachteile geschwindigkeitsbasierter Modelle sind das mögliche Auftreten von oszillierenden Zuständen. Dies ist beispielsweise beim Velocity-Obstacle-Modell der Fall, da dabei die Geschwindigkeit explizit von denen Nachbaragenten abhängt, welche sich umgekehrt auch an ihren Nachbaragenten orientieren. Weitere Nachteile ergeben sich bei Modellen, welche lineare Extrapolation zur Berechnung von zukünftigen Trajektorien verwenden. Besonders in engen Bewegungszuständen mit vielen Richtungs- und Geschwindigkeitswechslern kann die gesamte Voraussage der Trajektorien beeinflusst und ungenau bzw. falsch werden. Zuletzt können Geschwindigkeitsbasierte Modelle durch die mangelnde Verdichtung bzw. Entzerrung keine Stop-and-Go-Wellen erzeugen. Um dies zu simulieren, ist die Einführung von Störungen notwendig. [11, 13]

### 2.2.3 Beschleunigungsbasierte Modelle

Beschleunigungs- oder auch kraftbasierte Modelle zählen ebenfalls zu Modellen mit mikroskopischem Ansatz. Im Grundprinzip wird in den Modellen angenommen, dass die Beschleunigung eines Agenten zu einem bestimmten Zeitpunkt proportional zu einer Kraft ist, welche den Agenten in eine bestimmte Richtung leitet. Dieses Prinzip wurde von der Newtonschen Bewegungsgleichung übernommen und basiert auf der Beobachtung, dass sich Fußgänger in Menschenmassen nicht geradlinig bewegen, weshalb eine Beschleunigung und folglich eine Kraft existiert. [21]

Die auf die Agenten einwirkenden Kräfte werden in verschiedene Teilkräfte aufgeteilt. Zum einen wirkt eine anziehende Kraft durch die bestimmte Wunschrichtung und Wunschgeschwindigkeit. Die Beschleunigung bis zur Wunschgeschwindigkeit erfolgt dabei meist exponentiell. Zum anderen existiert eine abstoßende Kraft durch andere Agenten und Objekte. Diese soll Kollisionen und Überlappungen verhindern. Insgesamt wird somit der Zustand des einzelnen Agenten und folglich auch deren Gesamtheit bzw. das System durch von außen einwirkenden Kräften bestimmt. [11, 22]

Nach Chraibi [21] wird das Modell mathematisch im Grundsatz wie folgt beschrieben: eine *Person*  $i$  mit den Koordinaten  $\vec{R}_i$  wird durch die Menge aller auf  $i$  einwirkenden Personen  $N_i$  sowie begrenzenden Objekte bzw. Hindernisse  $W_i$  beeinflusst. Die auf den Agenten mit einer Masse  $m_i$  ausgeübten Kräfte sind die von Person  $j$  auf Person  $i$  ausgehende abstoßende Kraft  $\vec{F}_{ij}^{rep}$ , die vom Hindernis  $w$  ausgehende abstoßende Kraft  $\vec{F}_{ij}^{rep}$  und die anziehende Kraft  $\vec{F}_i^{drv}$ .

$$m_i \ddot{\vec{R}}_i = \vec{F}_i = \vec{F}_i^{drv} + \sum_{j \in N_i} \vec{F}_{ij}^{rep} + \sum_{j \in W_i} \vec{F}_{ij}^{rep} \quad (12)$$

Im Mittelpunkt steht somit eine Differentialgleichung 2. Ordnung um die Trajektorien für jeden Agenten zu erhalten, welche numerisch gelöst wird.

Das *Herai-Tarui Modell* wurde als erstes bekanntes raumkontinuierliches kraftbasiertes Modell für Personengruppen in ‚Panik‘ entwickelt [21, 22]. Die Personen wollen sich dabei kollisionsfrei in eine bestimmte Richtung bewegen. Auf die einzelnen Agenten wirken folgende Kräfte ein: eine Kraft um den Agenten in gleichförmiger Geschwindigkeit in die gewünschte Richtung zu bewegen, eine Kraft welche die Interaktion zwischen dem Agenten und anderen Individuen beschreibt und eine Kraft welche wirkt, wenn sich das Individuum in einer Gruppe befindet. [11]

Das am meisten untersuchte kraftbasierte Modell ist das *Social Force Modell*. Es besteht aus mehreren Gleichungen, welche die Bewegung von Personen auf rein operativer Ebene beschreiben. Einflüsse durch das menschliche Verhalten bzw. andere Reize werden im Modell

somit nicht betrachtet. Zuerst wird die (exponentielle) Beschleunigung von einer *Person i* auf ihre Wunschgeschwindigkeit inklusive ihrer bevorzugten Richtung beschrieben. Danach erfolgt die Sicherstellung eines ausreichenden Abstandes zu Begrenzungen und anderen Personen, dessen Höhe von der Dichte und dem gewünschten Tempo bestimmt wird. Im Modell werden diese Effekte durch abstoßende Kräfte ausgedrückt. Die Stärke der Kräfte bei anderen Personen wird mit größerem Abstand geringer und hat die Form von elliptischer Äquipotentiallinien in Richtung der gewünschten Bewegung, um so den benötigten Platzbedarf durch die Schritte zu repräsentieren. Zu Begrenzungen ist der geringste Abstand zwischen Person und Barriere für die Stärke der Kraft ausschlaggebend. Außerdem werden anziehende Kräfte zu anderen Personen oder Objekten mit demselben Prinzip wie die abstoßenden Kräfte und zusätzlich mit einem Zeitparameter eingebunden. Anschließend erfolgt noch eine Gewichtung der Kräfte durch den Sichtbereich der Person. Zuletzt wird das Verhältnis von gewünschter und reell erreichbarer Geschwindigkeit einbezogen. Das hier beschriebene originale Modell wurde vielfach weiterentwickelt und insbesondere die Vermeidung von Überlappungen verbessert. [11, 21, 23]

Viele Nachteile der beschleunigungsbasierten Modelle ergeben sich aus dem abgeleiteten Ansatz der Newtonschen Dynamik. Um das Grundprinzip der Newtonschen Bewegungsgleichung hinter den beschleunigungsbasierten Modellen gelten zu lassen müssen diverse Bedingungen bzw. Annahmen erfüllt sein. Nach dem dritten Newtonschen Gesetz (Wechselwirkungsgesetz) [24] sind die Kräfte, wenn zwei Körper aufeinander einwirken, immer gleich groß und wirken entgegengesetzt. Dies ist bei Fußgänger nicht der Fall, da z. B. nebeneinandergehende Personen keine Kräfte aufeinander ausüben. Zusätzlich erfolgt in der Newtonschen Mechanik die Beschleunigung eines Körpers auf einer Achse mit der wirkenden Kraft. Bei einer Zusammenfassung aller auf den Fußgänger überlagernd einwirkenden Kräfte mit ihren Richtungen kann eine resultierende Gesamtkraft einschließlich ihrer Richtung berechnet werden, die jedoch besonders in Situationen mit hohen Dichten zu Verfälschungen bzw. unrealistischen Bewegungen führen kann.

Ein weiteres Problem ist die mögliche Überlappung und Oszillation der Agenten durch die Newtonschen Bewegungsgleichung, wenn Teilchen mit Trägheit beschrieben werden. Die Überlappung verletzt das Prinzip des Volumenausschlusses, während die Oszillation durch Abstoßungskräfte entstehen kann. Beide Probleme können aufgrund ihres gemeinsamen Ursprungs durch die Abstoßungskräfte nicht gleichzeitig gelöst werden. Die Lösung eines Problems würde das andere verstärken. Somit müssen ergänzende Regeln eingeführt werden, mit denen beide Konflikte simultan zumindest abgeschwächt werden können. [22]

Zuletzt benötigen beschleunigungsbasierte Modelle aufgrund der zu lösenden Differentialgleichungen 2. Ordnung eine hohe Rechenkapazität [11].

### 2.2.4 Zelluläre Automaten

Die Simulation von Fußgängerdynamiken kann auch mit Hilfe von Zellulären Automaten erfolgen, welche bereits in anderen Bereichen der Modellierung eingesetzt werden. Das mikroskopische und regelbasierte Prinzip wurde analog zu Fahrzeugfolgmodellen wie zum Beispiel dem *Nagel-Schreckenberg-Modell* [25] übernommen. Jedoch stellt sich die Situation beim Fußgängerverkehr durch den zweidimensionalen Charakter und die vielfach erhöhte Möglichkeit von Kollisionen als komplexer dar. [11, 26]

Es erfolgt eine Einteilung des Raums in Zellen, welche durch ein gleichmäßiges geometrisches Gitter derselben Struktur dargestellt werden [27]. Jede Zelle bietet Platz für genau einen Agenten und kann somit zu einem Zeitpunkt entweder frei oder belegt sein. Der Agent kann sich in alle Richtungen und in üblicherweise einer Distanz von einer Zelle bzw. über die Anzahl der Zellen proportional zur gewählten Maximalgeschwindigkeit bewegen. Anschließend werden Regeln bzw. stochastische Zusammenhänge für die Positionsänderungen der Agenten definiert, da rein deterministische Verfahren zum Zellübergang meist nicht ausreichen um realistische Szenarien zu reproduzieren. Dies ist der teilweisen Ungewissheit über den exakten Zustand des Systems sowie dem irrationalen menschlichen Verhalten geschuldet, was aber auch gleichzeitig einen Vorteil der stochastischen Zellübergänge darstellt. Eventuell auftretende Unsicherheiten können so mithilfe von Wahrscheinlichkeiten abgeschätzt werden. Die Höhe dieser Übergangswahrscheinlichkeiten wird durch die gewünschte Bewegungsrichtung und Interaktionen mit anderen Agenten sowie mit der Infrastruktur bestimmt. Durch eine Diskretisierung der Zeit kann das System in festen Zeitschritten aktualisiert werden, wobei jeweils die Position der Agenten geändert wird. Ein Verbleiben in derselben Zelle ist dabei ebenfalls zulässig. Die Aktualisierung erfolgt typischerweise parallel für alle Agenten, kann jedoch in verschiedenen aufeinanderfolgenden Schritten ablaufen um Konflikte zu vermeiden. [11, 26]

Insgesamt sind besonders die Parameter Zellgröße und die Länge des Zeitschritts von hervorgehobener Bedeutung für das Modell. Erstere kann anhand der maximalen Dichte von Fußgängern und somit dem resultierenden Platzbedarf pro Person abgeleitet werden. Üblicherweise wird die Kantenlänge einer quadratischen Zelle mit 0.40 m [28, 29] gewählt, da sich daraus bei einer Zeitschrittlänge von 0.3 s die beobachtete mittlere Gehgeschwindigkeit von Fußgängern mit 1.3 m/s ergibt und 0.16 m<sup>2</sup> annähernd dem üblichen Platzbedarf einer Person in einer maximal dichten Menschenmasse entspricht [4]. Zusätzlich wurden Zelluläre Automaten mit einer größeren quadratischen Zellgröße als 0.16 m<sup>2</sup> entwickelt. [11]

Bei einer quadratischen Form der Zellen wird die Bewegungsrichtung auf vier Seiten (Neumannsche Nachbarschaftsrelation) oder acht Seiten (Moore'sche Nachbarschaftsrelation) begrenzt. Bei Letzterer sind jedoch zur Vermeidung von unrealistischen Bewegungen diverse Manöver nicht zugelassen und werden mit der Einführung von Regeln ausgeschlos-

sen. [26, 30] Üblicherweise wird eine quadratische Form gewählt, jedoch bringen auch andere Zellformen Vorteile mit sich: ein hexagonales Design ermöglicht z. B. eine realistischere Anordnung der Personen im Raum oder eine gleiche Distanz in alle Richtungen, bringt jedoch auch eine Vielzahl von Nachteilen mit sich [31].

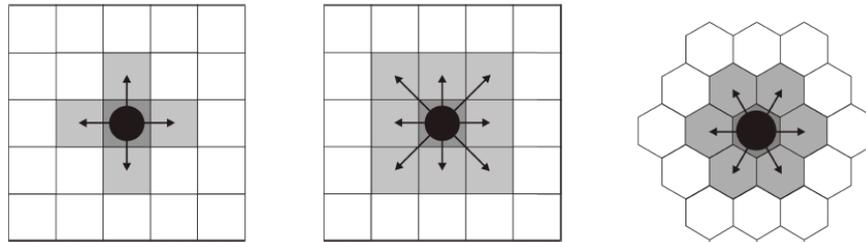


Abbildung 4: Mögliche Bewegungsrichtungen bei Neumannscher Nachbarschaftsrelation, Moorescher Nachbarschaftsrelation und hexagonalen Zellen [31, p. 80]

Die Wahl der Länge des Zeitschritts ist beispielsweise abhängig von der Zellgröße, der gewählten Maximalgeschwindigkeit der Agenten und der Anzahl möglicher Zellübergänge pro Zeitschritt. Eine Verringerung der Zeitschrittlänge erhöht dabei den Rechenaufwand der Simulation. [26, 28]

Durch die Einführung von Floor Fields (Bodenfeld) ist es möglich, die Modelle zu erweitern. Dadurch können beobachtete Phänomene implementiert, sowie räumliche Interaktionen in lokale transferiert werden. Zusätzlich benötigen die Agenten nur eine geringe Intelligenz, da sie die Interaktionen mit den Zellnachbarn und Zellen nutzen. Durch die Floor Field werden somit die Wahrscheinlichkeiten für einen Wechsel zu einer bestimmten Zelle beeinflusst. Ein sich nicht veränderndes statisches Floor Field ist beispielsweise eine Wand oder ein Hindernis. Dem Agenten ist es dadurch unmöglich in die jeweilige Zelle zu wechseln. Dagegen wird das dynamische Floor Field ähnlich einer Spur von anderen Agenten bestimmt und ändert sich über die Zeit. Dadurch können Effekte wie dem direkten Folgen anderer Agenten oder auch Gruppendynamiken erzeugt werden. [11]

Der genaue Ablauf der Aktualisierungsvorgänge wird durch das jeweilige Modell bestimmt. Es existieren eine Vielzahl von einfachen und komplizierten Algorithmen die jeweils pro Zeitschritt ausgeführt werden. Beispielsweise erfolgt im *Blue-Adler-Modell* die Aktualisierung in vier parallel ausgeführten Schritten ähnlich dem *Nagel-Schreckenberg-Modell* auf mehrspurigen Straßen. Die Regeln bzw. Wahrscheinlichkeiten für Zellübergänge sowie die Auflösung von Konflikten erfolgt ebenfalls verschieden je nach zugrundeliegenden Modell. [11]

Zelluläre Automaten können Fußgängerdynamiken in einem günstigen Verhältnis von Effizienz und Komplexität simulieren. Die Modelle sind mit einem vertretbaren Rechenaufwand entsprechend realitätsnah [32]. Auch komplexe Phänomene können durch vergleichsweise einfache Regeln im Modell nachgebildet werden. Nachteile von Zellulären Automaten ergeben sich jedoch aus der Gitterstruktur. Durch die Diskretheit ist die räumliche Auflösung ein-

geschränkt und somit die Darstellung von Gebäudegeometrien durch die Auflösung der Zellen bestimmt. Um alle Gebäudegeometrien zu realisieren, muss die Zellgröße angepasst werden bzw. die Implementierung von gesonderten Regeln ist erforderlich. Zusätzlich sind Bewegungen, welche nicht parallel zur Gitterstruktur ausgeführt werden, schwer zu erreichen. Zuletzt ist immer eine genaue Beachtung des Updatevorgang gefordert, um Konflikte durch die einzelnen Agenten zu vermeiden bzw. aufzulösen. [11]

### 2.2.5 Makroskopische Modelle

Vielfach wurden wie auch bei der Simulation des Verkehrs Analogien zur Dynamik von Fluiden beobachtet und diverse Theorien abgeleitet. Meistens beruhen diese auf Erhaltungsgesetzen wie der Massenerhaltung oder Energieerhaltung. Die Streuung der Geschwindigkeit von Personen in Fußgängergruppen hat bei geringen Dichten Ähnlichkeiten mit der Maxwell-Boltzmann-Verteilung. Aus diesem Ansatz entwickelte Henderson ein Modell, bei der die Bewegungen der Agenten als Teilchen beschrieben werden, die Energie und Impuls austauschen. Hughes entwickelte ein Modell welches das Unbehagen von Fußgängern bei hohen Dichten und eine möglichst niedrige Reisezeit einschließt. Dabei stellt sich jedoch die Deutung der verwendeten physikalischen Größen als schwierig dar. [11]

Weitere makroskopische Modelle gehen von einem gaskinetischen Ansatz aus. Im *Fluid Dynamic Model* [33] von Helbing wird daraus eine eigene Theorie entwickelt und nicht von Impuls- und Energieerhaltung ausgegangen. Es erfolgt eine Aufteilung der einzelnen Personen nach ihrer Richtung zum *Zeitpunkt t*, sodass ihr Ort sowie ihre aktuelle und ihre Wunschgeschwindigkeit bestimmt werden kann. Dadurch ist es möglich, ein *Gebiet A* mit einer spezifischen Dichte zu bilden. Mithilfe den aus diesen Parametern gebildeten Differentialgleichungen wird anschließend die räumliche Dichte, Durchschnittsgeschwindigkeit und Streuung der Geschwindigkeit berechnet. Mit zusätzlichen Termen können außerdem Einflüsse durch die Interaktionen und Ziele der Personen beschrieben werden. Eine andere Klasse makroskopischer Modelle ist inspiriert von der Warteschlangentheorie und wird durch ein Netzwerk aus Verbindungen und Knoten ausgedrückt. Das erlaubt eine schnelle Simulation von Ereignissen mit einer sehr hohen Anzahl an Agenten. Auch existieren hybride Modelle, welche verschiedene Gruppierungen von Personen auf unterschiedlichen Ebenen simulieren können. Dies stellt einen Mittelweg aus benötigtem Rechenaufwand und Präzision dar. [11]

Nachteile der gaskinetischen und fluiddynamischen makroskopischen Modelle ergeben sich aus der begrenzten Möglichkeit, die Bedingungen der physikalischen Gleichungen auf den Fußgängerverkehr zu übertragen. So ist die Energie- und Impulserhaltung für Interaktionen zwischen Personen nicht gegeben und weitere Unterschiede zwischen Personenströmen und Fluiden auffällig. [11]

## 2.3 Empirische Charakteristiken

### 2.3.1 Fundamentaldiagramm

Das Fundamentaldiagramm zeigt die empirische Beziehung zwischen der Dichte  $\rho$  und dem Fluss  $J$  bzw.  $J_s$  [8]. Durch die Verknüpfung der Variablen mit der Flussgleichung ist auch die Beschreibung der drei Zusammenhänge  $J_s(\rho)$ ,  $v(\rho)$  und  $v(J_s)$  möglich, wie in Abbildung 5 dargestellt. Anhand des Fundamentaldiagramms kann somit ein schneller Überblick über die wichtigsten makroskopischen Zusammenhänge erlangt werden. Des Weiteren bilden die Diagramme die Grundlage für Handrechenverfahren. [2, 10]

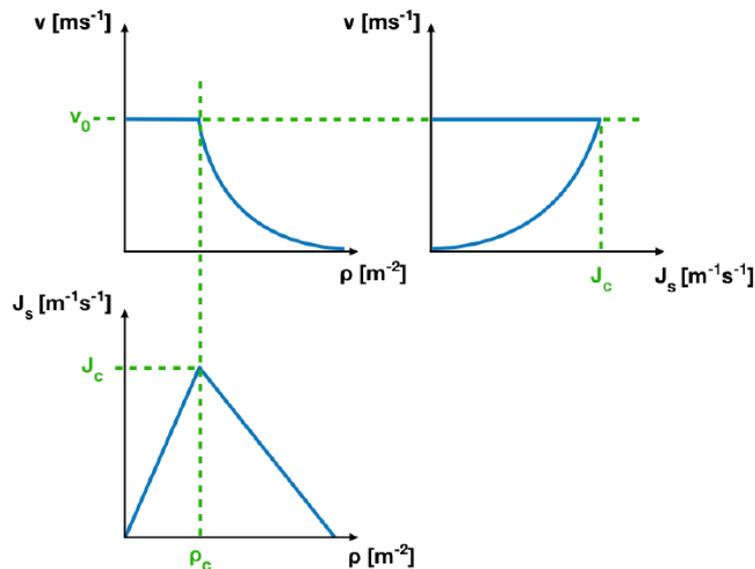


Abbildung 5: Zusammenhang der möglichen Fundamentaldiagramme [10, p. 39]

Im Fluss-Dichte-Diagramm gibt der aufsteigende Graph den freien Fluss der Personen an. Bis zum Maximum der Funktion können sich diese mit ihrer Wunschgeschwindigkeit  $v_0$  bewegen. Mit dem Maximum ist allerdings die Kapazität der Anlage und somit der maximale Fluss  $J_c$  erreicht. Steigt die Dichte weiter an, nimmt der Fluss ab da auch die Geschwindigkeit und somit der Durchsatz der Personen aufgrund des mangelnden Platzes kleiner wird.

Für die verschiedenen Typen von Fußgängeranlagen wurde eine Vielzahl von Studien und Experimenten durchgeführt, anhand der die empirisch beobachteten makroskopischen Kenngrößen in die Fundamentaldiagramme eingetragen werden können. Die Diagramme in Abbildung 5 zeigen somit nur beispielhafte Daten an. Eine Gemeinsamkeit ist jedoch, dass mit einer Erhöhung der Dichte die Geschwindigkeit abnimmt. [2]

Das Fundamentaldiagramm kann entscheidend durch die Messmethode beeinflusst werden. Der Fluss kann beispielsweise über die Zeit bzw. den Ort gemessen werden. Außerdem ist die Flussgleichung immer nur eine Abschätzung, da der Fluss als zeitlicher Durchschnitt an einer bestimmten Stelle, die Dichte jedoch als aktueller Wert über eine Fläche gemessen

wird. Einzelne schnellere Personen können somit gerade bei hohen Dichten eine veränderte Gewichtung bei der Bildung des Durchschnitts erhalten und das Messergebnis verfälschen. Daraus folgend sollte unter Berücksichtigung der Freiheitsgrade Zeit und Ort bei der Simulation und Auswertung die gleiche Messmethode verwendet werden. Weitere Unterschiede in den nachfolgenden Fundamentaldiagrammen lassen sich beispielsweise durch verschiedene kulturelle Aspekte der Personen, Unterschiede zwischen uni- und bidirektionalem Fluss, Fluktuationen im Nahbereich, psychologische Faktoren und der Art des beobachteten Verkehrs erklären. [8, 10, 34, 35]

### 2.3.2 Geschwindigkeit von Fußgängern

Die *freie Gehgeschwindigkeit*  $v_0$  von Fußgängern wird in der Literatur mit verschiedenen Werten angegeben. Die Spannweite ist laut Fruin [6] von 0.76 bis 1.76 m/s und wird im Durchschnitt mit 270 ft/min<sup>1</sup> (entspricht 1.37 m/s) angegeben. Weidmann [4] wertete 52 Quellen aus, wobei die Gehgeschwindigkeit in einer Bandbreite von 0.97 bis 1.65 m/s gegeben ist. Die meisten Werte lagen jedoch zwischen 1.25 und 1.45 m/s. Die durchschnittliche Gehgeschwindigkeit beziffert Weidmann mit 1.34 m/s. Westphal [36] beschreibt die Gehgeschwindigkeit mit 1.29 m/s  $\pm$ 0.03 m/s und eine aktuelle Studie der SFPE Foundation [37] mit durchschnittlich 1.32 bis 1.64 m/s je nach Altersgruppe.

Nachfolgende Abbildung zeigt ein Fundamentaldiagramm der Geschwindigkeits-Dichte-Beziehung. Die Geschwindigkeit nimmt demnach grundsätzlich mit höherer Dichte ab. Die bei  $\rho_0$  eingetragenen Geschwindigkeiten entsprechen der jeweils nach den verschiedenen Autoren ermittelten freien Gehgeschwindigkeiten. Ab einer Stoppdichte von ca. 3.8 – 10 Personen pro Quadratmeter staut sich die Bewegung des Personenstroms. [38]

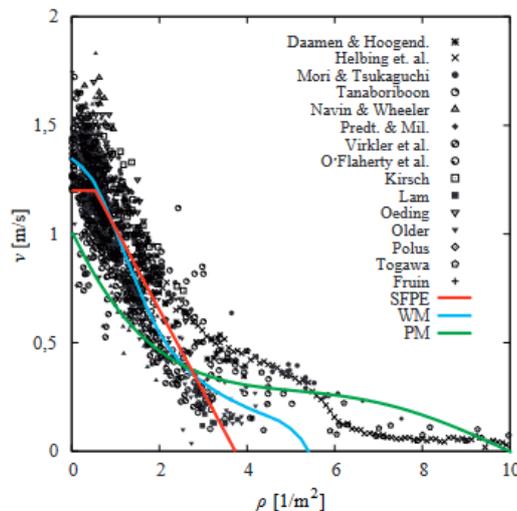


Abbildung 6:  $v(\rho)$  – Diagramm: Empirische Erhebungen (Datenpunkte) und Annahmen in Handbüchern (Linien) [38, p. 3]

<sup>1</sup> 1 ft/min = ca. 0.00508 m/s [39]

Die Geschwindigkeit von Personen wird von vielen Faktoren beeinflusst. Dazu zählen unter anderem die Eigenschaften der Fußgänger (z. B. Geschlecht, Alter), die Begleitumstände der Bewegung (z. B. Verkehrszweck, Jahres-/Tageszeit, Witterung/Klima), die Charakteristiken der Anlage (z. B. Gehen auf Rampen oder Treppen) und die Fußgängerdichte. [4]

### 2.3.3 Dimension und Platzbedarf von Personen

Für eine realitätsnahe Einstellung der Parameter der Simulation ist es wichtig den realistischen Platzbedarf eines Fußgängers zu kennen. Eine Änderung dieser Größe hat direkte oder indirekte Auswirkungen auf die elementaren Kenngrößen wie z. B. die Dichte.

Die Darstellung von Personen erfolgt meist vereinfacht als Ellipse mit den größten Durchmessern an Schulter und Brust [4, 5, 6].

Weidmann [4] führte eine umfangreiche Literaturrecherche durch und wertete eine Vielzahl von Quellen aus. Demnach beträgt der mittlere Platzbedarf einer Person  $0.15 \text{ m}^2$ . Dies ergibt eine maximale Dichte von 6.7 Personen pro Quadratmeter. Fruin [6] beschreibt den Platzbedarf einer durchschnittlichen männlichen Person ebenfalls mit  $0.15 \text{ m}^2$ . Die Achsen der angenommenen Ellipse haben die Maße 0.33 m und 0.58 m. Nach Predtetschenski und Milinski [5] ist die von einer Person beanspruchte Fläche abhängig von den physischen Werten, dem Alter der Personen, sowie ihrer Kleidung. Die Autoren ermittelten durchschnittliche Werte für eine Vielzahl von möglichen Personen bzw. Konstellationen.

Alter, Bekleidung und Gepäck der Person	Fläche $f$ in $\text{m}^2$
Kind	0,04 ... 0,06
Jugendlicher	0,06 ... 0,09
Erwachsener:	
in Sommerkleidung bzw. Hausbekleidung	0,100
in Übergangsstraßenkleidung	0,113
in Winterstraßenkleidung	0,125
Erwachsener in Übergangsstraßenkleidung:	
mit leichtem Gepäck (z. B. Aktentasche)	0,180
mit einem Koffer	0,240
mit Rucksack	0,260
mit schwerem Gepäck (z. B. zwei Koffer)	0,390
mit einem Kind an der Hand	0,200
mit einem Kind auf dem Arm	0,260
mit einem Kind an der Hand (einschl. Gepäck)	0,320

Abbildung 7: beanspruchte Fläche nach Predtetschenski und Milinski [5, p. 42]

Auf Fahrtreppen besteht eine Begrenzung des zu Verfügung stehenden Raumes durch die seitliche Balustrade mit Handlauf. Diese ist üblicherweise unterhalb der Schulterhöhe von Erwachsenen und teilweise Jugendlichen. Der tatsächliche Platzbedarf kann somit als geringfügig kleiner angenommen werden, da eine Person einen Teil der von ihr beanspruchten Fläche außerhalb der Grundfläche der Fahrtreppe nutzt. [5]

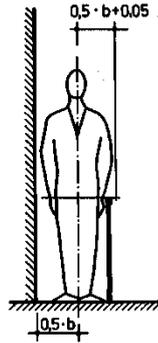


Abbildung 8: „Rechnerische Breite des Bewegungsweges“ [5, p. 43]

Auf geneigten Wegen wie Treppen oder Rampen entfällt dies jedoch, da die Personen es vermeiden sich zu dicht an die Begrenzung zu begeben. Eine Einschätzung ob der Faktor bei Fahrtreppen eine Rolle spielt erfolgt seitens der Autoren nicht.

Ohne Deformation der Ellipsen kann eine maximale Dichte von 0.92 erreicht werden, was 9.2 Personen pro Quadratmeter entspricht. Durch die Elastizität des Körpers kann diese in der Realität jedoch noch übertroffen werden. [5]

### 2.3.4 Stau und Verstopfung

Gestaute Zustände treten grundsätzlich auf, wenn der eintretende Fluss größer als die Kapazität der Anlage ist. Dies ist beispielsweise bei Engstellen (s. Kapitel 2.3.6) der Fall. Das Phänomen wird dabei nicht durch das Verhalten von einzelnen Personen bestimmt, sondern tritt generell dadurch auf, dass ein Volumen nur von einem Objekt ausgefüllt werden kann.

Typische Beispiele für Staus oder Verstopfungen von Personen sind die Aufwölbungen vor einer Engstelle und gestaute Zustände im sehr hohen bidirektionalen Fluss, wenn aufgrund der hohen Dichte Personen nicht mehr um sich herum bzw. zurück navigieren können. [2, 5]

### 2.3.5 Dichtewellen, Stop-and-Go Wellen

Bei Dichtewellen ändert sich zeitlich bzw. räumlich die Dichte ungefähr periodisch. Das Phänomen kann beispielsweise in Korridoren mit vielen Personen auftreten, wobei sich die Dichte in der Personengruppe verändert und entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung der Gruppe ausbreitet. [2]

Ähnliche Stop-and-Go Wellen wurden während diverser großer Menschenansammlungen beobachtet. Die genauen Dynamiken sind noch nicht abschließend geklärt, können jedoch nicht mithilfe von Trajektorien und durchschnittlichen Werten für Geschwindigkeit und Dichte ergründet werden. Scheinbar teilen sich die Personen in eine stehende und eine sich langsam bewegende Phase auf. Die sich daraus ergebende Durchschnittsgeschwindigkeit der Phase in Bewegung ist unabhängig von der Gesamtdichte-Geschwindigkeitsbeziehung des Systems. [2, 40]

### 2.3.6 Engstellen

Engstellen, auch als Flaschenhals oder Bottleneck bezeichnet, bieten ein hohes Risiko für Stauungen und somit unsichere Zustände, da sich die Kapazität der Anlage verkleinert.

Grundsätzlich kommt es zu Verstopfungen, wenn der ankommende Fluss höher als die Kapazität der Engstelle ist. Dabei ist die Personendichte innerhalb der Verstopfung vor der Engstelle höher als in der Engstelle. [2, 41]

Zusätzlich sind verschiedene noch nicht vollständig erforschte Phänomene zu beobachten, wie beispielsweise der Zusammenhang zwischen dem Fundamentaldiagramm und dem Fluss in der Engstelle. Das im Fundamentaldiagramm abgebildete Maximum kann dabei signifikant niedriger als der maximal in der Engstelle gemessene Fluss sein. [34]

Des Weiteren ist Gegenstand aktueller Forschung, wie die Kapazität einer Engstelle bei Veränderung der Breite beeinflusst wird. Auf den ersten Blick scheint dies ein schrittweiser Vorgang, da mit ausreichender Verbreiterung eine neue Spur erzeugt werden kann – besonders wenn sich die Personen auf nicht voneinander beeinflussten Spuren bewegen. Dies wird auch beispielsweise in der Muster-Versamlungsstättenverordnung [42] angenommen. [2]

Hoogendoorn und Daamen [43] (HG) führen den schrittweisen Anstieg der Kapazität im gestauten Zustand auf eine Bildung von dynamischen Schichten in der Engstelle zurück, deren Abstand geringer als die Breite der in der Spur gehenden Personen ist. Dieser Ausdruck der Selbstorganisation wird auch als Reißverschlussverfahren bezeichnet und setzt beim Eintreten in die Verengung ein. Dabei optimieren die Fußgänger den begrenzten Platz und ihre Geschwindigkeit innerhalb der Engstelle. [44]

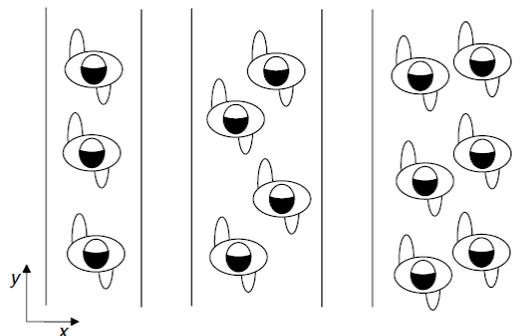


Abbildung 9: Reißverschlussverfahren [44, p. 401]

Nach den Beobachtungen der Autoren bewegen sich die Personen aufgrund des Platzbedarfs für die Schritte hintereinander, während der Abstand der Spuren konstant ist und sich nicht mit der Engstellenbreite ändert. Die Berechnung der Kapazität geschieht somit durch die Bestimmung der effektiven Breite und die Anzahl der möglichen Spuren. Insgesamt wird die Kapazität daher nur erhöht, wenn sich eine neue Spur bildet. Daraus würde allerdings auch folgen, dass entweder bei Verbreiterung der Engstelle und Ausbleiben einer neuen

Spur der spezifische Fluss verringert wird oder die Flussgleichung als Beziehung zwischen Breite, Dichte und Geschwindigkeit falsch wäre. [43, 44]

Die Mehrzahl der Forscher geht jedoch von einem linearen Zusammenhang aus. Im Folgenden sind die geschätzten bzw. gemessenen Kapazitäten von Engstellen anhand ihrer Breite dargestellt. Die Ergebnisse variieren jedoch auch durch verschiedene Messmethoden bzw. weitere Parameter und Annahmen. Alle Werte basieren auf einem normalen Verhalten der Personen. [44]

$b$ [m]	$C = J_{\max} \text{ [s}^{-1}\text{]}$						
	Estimation				Measurement		
	SFPE	PM	WM	HG	Kretz	Nagai	Müller
0.8	1.04	1.28	0.98		1.43	2.58	
0.9	1.17	1.44	1.10		1.58		2.26
1.0	1.30	1.60	1.23	0.78	1.85		
1.2	1.56	1.92	1.47	0.78	2.15	3.27	2.75
1.5	1.95	2.40	1.84	1.56			3.59
1.6	2.08	2.56	1.96	1.56		3.86	

*Note.* The results reveal differences not only between measurements and estimations, but also among the estimation methods or specifications.

Abbildung 10: Kapazitäten von Engstellen nach ihrer Breite – Schätzungen und Messungen [44, p. 396]

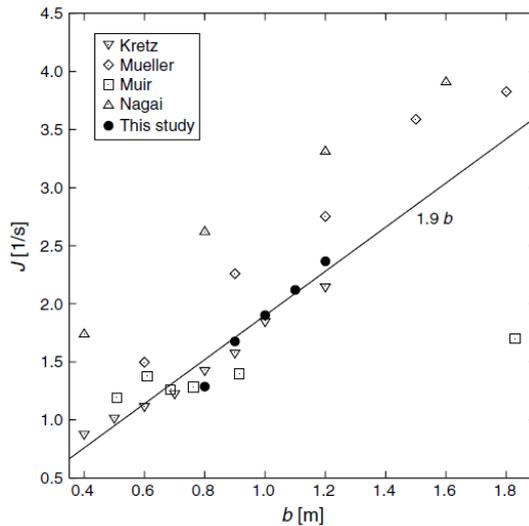


Abbildung 11: Zusammenhang Fluss und Breite der Engstelle unter normalen Bedingungen [44, p. 402]

$b$ [m]	$J_s \text{ [(ms)}^{-1}\text{]}$		
	$\Delta N = 60$	$\Delta N = 40$	$\Delta N = 20$
0.8	1.61	1.77	1.86
0.9	1.86	1.91	2.06
1.0	1.90	2.08	2.19
1.1	1.93	1.93	1.78
1.2	1.97	1.81	2.31

*Note.* The time interval  $\Delta t$  between the passage of the first person and last person is measured at the center of the bottleneck at  $y = 0.4$  m.

Abbildung 12: spezifischer Fluss diverser Engstellen, Ergebnisse von Seyfried et al. [44, p. 398]

Nach Seyfried et al. [44] zeigt sich ein linearer Anstieg des Flusses bei Vergrößerung der Breite. Einige Daten deuten jedoch auf einen schritthaften Anstieg des Flusses bei einer Breite von 0.7 m hin, was der genauen Breite zum Beginn des Reißverschlussverfahrens entspricht. Daraus kann aber kein grundsätzlicher schrittweiser Anstieg abgeleitet werden und das Reißverschlussverfahren scheint somit nur eine untergeordnete Rolle zu spielen. Eine unterschiedliche Geometrie der Engstelle hat nur einen geringen Einfluss auf die Parameter. Der in [44] verwendete Aufbau hat dabei die höchste Ähnlichkeit zu einer Fahrtreppe. Es wird jedoch vermutet, dass es zu Stauungen kommt bevor die maximale Dichte der Engstelle erreicht wird. Das wird einerseits mit Fluktuationen des Flusses erklärt, da lokale Zustände mit sehr hoher Dichte zulasten der Dichte des Gesamtsystems aufgelöst werden müssen. Andererseits ist eine lokale Organisation der Personen von Nöten, um die den maximalen Fluss zu erreichen. Dies erfordert bei Zuständen mit hohen Dichten eine andauernde Änderung der Position und ist in der Realität bei einem zufälligen Ankommen nur schwer möglich. Zuletzt achten die Personen bei ungefährlichen Situationen auf einen ausreichenden Abstand zur nächsten Person.

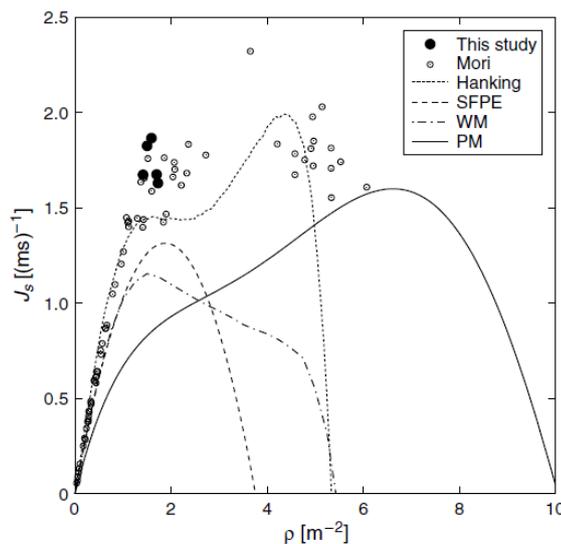


Abbildung 13:  $J_s(\rho)$ -Diagramm von Engstellen [44, p. 404]

Ein großer Teil der unterschiedlichen Ergebnisse der Autoren in Bezug auf die Daten in den Fundamentaldiagrammen scheint nach Seyfried et al. [34] aus der Verwendung von unterschiedlichen Messmethoden zu resultieren. Diese Annahme beruht auf der Beobachtung, dass es schon bei einfachsten Systemen (unidirektionaler einspuriger Personenstrom) und Verwendung von unterschiedlichen Messmethoden zu großen Differenzen kommt. Als Grund wird „eine Mittelwertbildung über verschiedene Freiheitsgrade in einem diskreten System mit großen Inhomogenitäten“ [p. 155] genannt. Somit sollte eine Diskussion über die Kultur und Bevölkerungsstruktur stattfinden und nur Studien verglichen werden, die auf dem gleichen Messansatz beruhen, um vergleichbare Ergebnisse zu generieren.

Bei Engstellen haben Personen außerdem die Wahl eines kooperativen oder kompetitiven Verhaltens, welches die Dynamik zusätzlich beeinflusst. Letzteres wird dabei durch eine Belohnung gereizt – diese kann von einer geringeren Wartezeit bis bei z. B. einer Evakuierung das Überleben sein. Daraus folgen Strategien wie Drängeln oder Drücken die wiederum zu Verstopfungen führen können. Die Korrelation aus Anreiz und Drängeln wird dabei von soziopsychologischen Faktoren bestimmt. [2]

Muir et al. [45] erforschten den Einfluss der Engstellenbreite auf die Evakuierungszeiten mit und ohne Anreiz bei einer Flugzeugevakuierung. Bei den Experimenten mit Belohnung war ein Zusammenhang zwischen Engstellenbreite und Fluss erkennbar: die Höhe des Flusses steigt mit der Breite des Ausgangs an. Zuerst wurden die normalen Ein-/Ausgänge untersucht. Bei engen Engstellen war die Evakuierungszeit mit Motivation geringer als ohne Anreiz. Bei höheren Breiten war die Zeit dafür mit einer normalen Motivation geringer. Blockaden traten nur bei geringen Breiten auf, wobei es (mit Belohnung) bei einer Breite von 24 Zoll<sup>2</sup> zu mehr Stauungen und daraus resultierenden höheren Evakuierungszeit als bei einer Breite von 20 Zoll kam. Die Autoren erklärten dies dadurch, dass die geringe Breite Personen zum Warten veranlasste, während bei 24 Zoll die Teilnehmer ein gleichzeitiges Durchqueren mit mehreren Personen versuchten, was eine Verstopfung verursachte. Die empfohlene Breite wurde mit 27 bis 30 Zoll angegeben.

Bei den Notausgängen über den Tragflächen waren die Zeiten im Gegensatz dazu ohne Motivation geringer als mit. Des Weiteren trat ohne Belohnung bei einer lichten Breite zwischen den zum Ausgang führenden Sitzreihen von 34 Zoll die schnellste Durchschnittszeit auf – bei Versuchen ohne Belohnung war dies jedoch die zweitlangsamste Zeit. Als Grund dafür wurden zwei sich vereinigende Ströme beobachtet. Schnellere Zeiten wurden erreicht, wenn sich ein Strom in den anderen einreihen musste.

Insgesamt wurde bei Situationen mit Motivation ein höherer Fluss erreicht – solange keine Verstopfungen auftraten. Die Häufigkeit dieser Blockaden wurde mit zunehmender Engstellenbreite geringer. Säulen können den Fluss bei hoher Motivation und geringen Breiten zusätzlich erhöhen. [2]

### **2.3.7 Treppen**

Durch ihre bauliche Art können Treppen als Engstellen angesehen werden. Dies resultiert aus dem begrenzten Platz und der verringerten Geschwindigkeit beim Begehen der Anlage. Zusätzlich besitzt das System mehr Freiheitsgrade wie z. B. die Neigung, Stufenlänge oder die höhere körperliche Belastung beim Aufsteigen als beim ebenerdigen Gehen. Es wurde eine Vielzahl von Studien durchgeführt, jedoch lassen sich die Darstellungen im Fundamentaldiagramm durch die unter anderem in Kapitel 2.3.1 beschriebenen Gründe sowie die hö-

---

<sup>2</sup> 1 Zoll = 2.54 cm

here Anzahl an Freiheitsgraden nur schwer vergleichen. Grundsätzlich wurde in den Werken von WM [4], PM [5], FR [6] und NM [9] bei einer Erhöhung der Dichte (teils ab einem bestimmten Schwellenwert) eine Verringerung der Gehgeschwindigkeit beobachtet. Der spezifische Fluss steigt anfangs mit geringen Abweichungen ungefähr linear an. Beim Aufsteigen wird die Gehgeschwindigkeit mit 0.55 – 0.8 m/s, die maximale Dichte mit 3.8 – 9.2 Personen pro Quadratmeter angegeben. Beim Absteigen beträgt die Geschwindigkeit 0.63 – 0.8 m/s während sich die maximale Dichte wieder mit 3.8 – 9.2 Personen pro Quadratmeter, jedoch mit teils unterschiedlichen Verläufen, beschrieben wird. [2, 46, 47]

Die Fundamentaldiagramme von  $J_s(\rho)$  und (horizontaler)  $v(\rho)$  sind in Abbildung 14 und Abbildung 15 dargestellt.

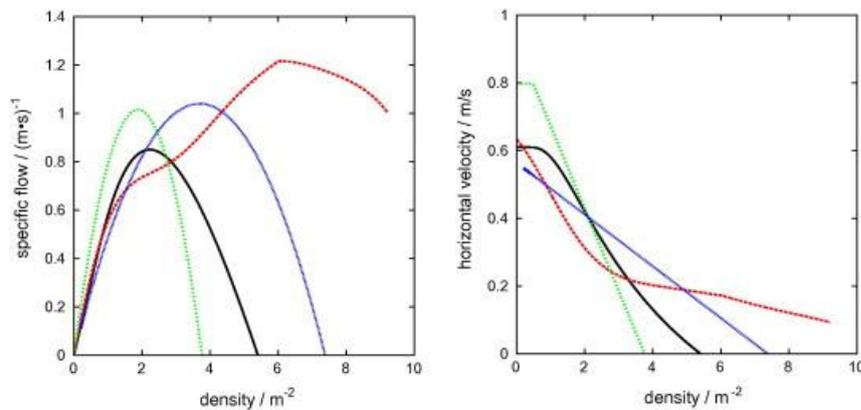


Abbildung 14:  $J_s(\rho)$  und  $v(\rho)$  – Diagramme beim Aufstieg von WM (schwarz), PM (rot), NM (grün) und FN (blau) [47, p. 269]

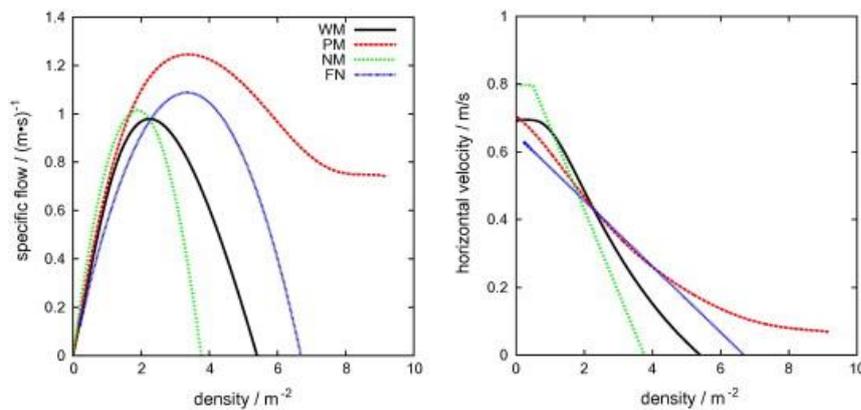


Abbildung 15:  $J_s(\rho)$  und  $v(\rho)$  – Diagramme beim Abstieg von WM (schwarz), PM (rot), NM (grün) und FN (blau) [47, p. 269]

In einer Literaturstudie von Burghard et al. [47] wurde ebenfalls ein linearer Anstieg des spezifischen Flusses bei geringen Dichten beobachtet (s. Abbildung 14 – 16). Das lineare Wachstum der Funktionen ist dabei ähnlich und dauert bis zu einer Dichte von ca. 2 Personen pro Quadratmeter an, wobei der spezifischer Fluss beim Abstieg höher ist und [5] bzw. [6] die höchsten Werte angeben. Außerdem ist bei den eigenen von [47] durchgeführten Ex-

perimenten bei der absteigenden Treppe (s. Abbildung 16, Diagramm mit verkleinerter Auflösung) die Ausbildung eines Plateaus des spezifischen Flusses bei Dichten ab ca. 2.0 Personen pro  $m^2$  zu erkennen während beim Aufsteigen der spezifische Fluss bei dieser Dichte noch näherungsweise linear verläuft. [2]

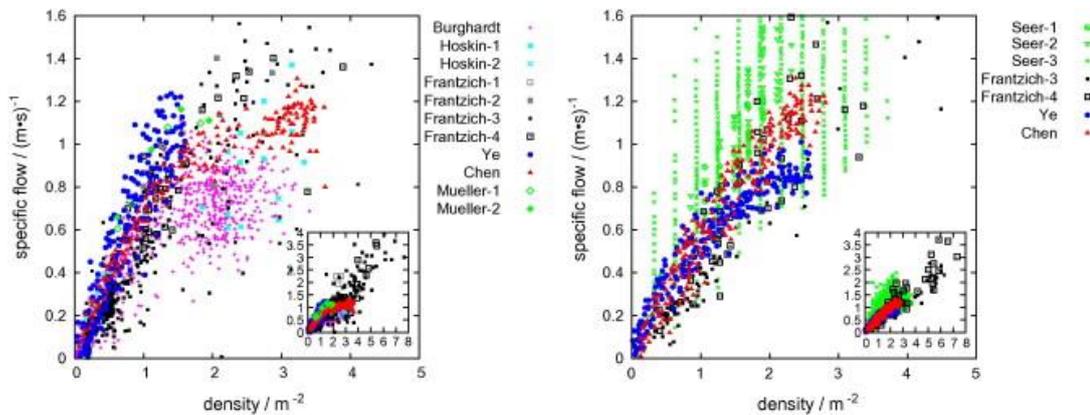


Abbildung 16:  $J_s(\rho)$  und  $v(\rho)$  – Diagramme (linkes Diagramm: Abstieg, rechtes Diagramm: Aufstieg) [47, p. 271]

Auch hierbei basieren die gewonnenen empirischen Daten auf unterschiedlichen Methoden und Parametern. [2]

### 2.3.8 Panik

Während Notfällen und anderen bedrohlichen Situationen treten oft Massenphänomene auf, welche als ‚Panik‘ bzw. ‚panisches Verhalten‘ bezeichnet werden. Dafür existiert jedoch weder eine genaue und im wissenschaftlichen Kontext akzeptierte Definition, noch eine Theorie. Üblicherweise wird ‚Panik‘ mit irrationalen und egoistischen Verhalten beschrieben, bei der Personen um eine „knappe oder geringer werdende Ressource kämpfen“ [2, p. 679]. Dabei treten unter anderem Charakteristiken wie eine schnellere Bewegung der Personen mit erhöhter körperlicher Interaktion und weniger Koordination auf. Auch kann es zu Bogenbildung und Verstopfung an Ausgängen kommen und alternative Routen übersehen werden. Die Auslöser dieses Verhaltens können von z. B. einer besseren Sichtposition während eines Konzerts bis zum Überleben während einer gefährlichen Situation reichen. Die daraus folgenden beschriebenen Handlungen können sich auch auf Gruppen ausbreiten. [2, 48]

Bei vielen Unglücken spielen diese Ursachen jedoch keine Rolle und einfachere Gründe wie eine für die Personenzahl zu geringer Kapazität lösten die Katastrophe aus. Oft wirkt das Verhalten von Menschen dabei von außen betrachtet paradox – vom Standpunkt der Betroffenen ist ein Kampf um Ressourcen etc. und ein damit verbundener Egoismus sowie entsprechende Handlungen jedoch keinesfalls irrational. Bei Bränden scheint Panik im Sinne von absurden Verhalten ebenfalls im Gegensatz zur öffentlichen Meinung selten vorzukom-

men. Die Personen scheinen mehr durch Ängste bestimmt. Zusätzlich kann die Einschätzung, ob ein panikartiges Verhalten vorgelegen hat auch vom Ergebnis der Situation beeinflusst werden. Insgesamt spielt der Informationsgrad der Personen eine herausragende Rolle: die Entscheidungen bei einer Evakuierung müssen schnell und mit dem (oft spärlich) vorhandenen Wissen getroffen werden während zusätzlich die Konsequenzen teils unumkehrbar und schwerwiegend sind. Somit ist eine ausreichende Information aller Personen und insbesondere des Personals von entscheidender Bedeutung um ‚Panik‘ zu verhindern und gefährliche Situationen sicherer zu gestalten. [48, 49]

## 3 Simulation der Fußgängerdynamik

### 3.1 Simulationsprogramme im Überblick

Durch die immer höher werdende Leistungsfähigkeit von Computern und deren Software wurde die Simulation von Personenströmen möglich gemacht. Dadurch kann Aufwand und Kosten reduziert, sowie flexibel auf unterschiedliche Anforderungen und komplexe Gebäudegeometrien reagiert werden. Die Simulation dienen beispielsweise zur Evakuierungsplanung, zur Kapazitätsanalyse oder um Kundenverkehr nachzubilden. [50]

Es existieren sowohl quelloffene (open source) als auch kommerzielle Fußgängersimulationsprogramme. Zusätzlich bieten 3D Entwicklungsumgebungen durch z. B. Erweiterungen die Möglichkeit, Fußgängerdynamiken zu simulieren. Zuletzt können Multi-Agenten-Programme bzw. Modellierungsumgebungen basierend auf entsprechenden Programmiersprachen Fußgängerdynamiken darstellen. Die Einteilung ist dabei nicht statisch und Kategorien können sich überschneiden. [51]

Tabelle 1: Überblick über diverse Simulationsprogramme zur Fußgänger- und Evakuierungssimulation [51]

Kategorie	Beispiele
Programme – quelloffen	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Vadere</li> <li>– cromosim (Python Bibliothek)</li> <li>– Menge</li> <li>– Crowd Dynamics (veraltet)</li> <li>– PedSim (Simulator Plug-In für Rhino/Grasshopper)</li> <li>– JuPedSim</li> <li>– jCrowdSimulator</li> <li>– Mesa (Python Bibliothek)</li> <li>– Fire Dynamics Simulator (spezifisch für Brände)</li> <li>– Agents.jl (Erweiterung für Julia-Programmiersprache)</li> </ul>
Programme – kommerziell	<ul style="list-style-type: none"> <li>– AnyLogic Fußgängerbibliothek</li> <li>– INCONTROL Pedestrian Dynamics</li> <li>– Oasys MassMotion</li> <li>– Quadstone Paramics</li> </ul>
3D Entwicklungsumgebung bzw. Erweiterung	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Blender (3D Entwicklungsumgebung)</li> <li>– UCrowds (Plugin für Unity)</li> <li>– Crowd.Lab (Java Script zur Simulation von Menschenmengen)</li> </ul>
Multi-Agenten-Lösung bzw. agentenbasierte Programme	<ul style="list-style-type: none"> <li>– NetLogo</li> <li>– MASON</li> <li>– repast</li> </ul>

### 3.2 Ablauf einer Evakuierungssimulation von Gebäuden

Nach Kuligowski [50] besteht die Evakuierungssimulation aus folgenden Schritten:

1. Festlegen der Anforderungen des Projekts
2. Auswahl des passenden Modells
3. Entwicklung von Szenarien mit verschiedenen Modellparametern
4. Anwendung des Modells
5. Generierung von Ergebnissen
6. Analyse der Ergebnisse

Die Anforderungen des Projekts sind im Wesentlichen durch die verfügbaren Informationen, Zeit und Mittel, sowie den erwünschten Ertrag und Anwendungsrahmen bestimmt.

Bei der Auswahl des passenden Modells sollten die zugrundeliegenden Mechaniken sowie Stärken und Limits verstanden und mit den zur Verfügung stehenden Mitteln und Zielen abgeglichen werden. Die Modellierungsmethode bzw. Art des Modells (s. Kapitel 2.2) erlaubt eine allgemeine Simulation von Bewegungsströmen von Personen oder einen Einbezug des individuellen Verhaltens und eignet sich für unterschiedliche Anwendungsbereiche. Es ist bei der Auswahl insbesondere auf den Umfang und Bereich der vorausgegangenen Validation des Modells zu achten, um realistische Ergebnisse zu generieren. Weitere Kriterien betreffen z. B. den möglichen Darstellungsbereich (Gebäudegeometrie, Personenzahl etc.), die Art und Umfang der erwünschten Ergebnisse und den Detailgrad.

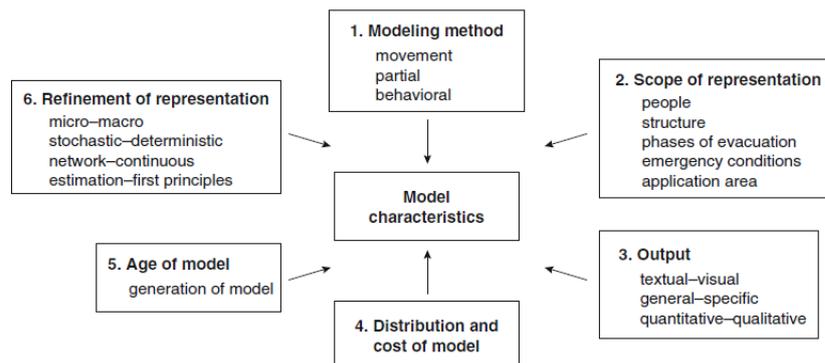


Abbildung 17: Modellmerkmale [50, p. 2157]

In der Praxis bestimmen besonders die Rahmenbedingungen wie Zweckmäßigkeit, Verfügbarkeit und wirtschaftliche Überlegungen die Auswahl mehr als ein exakt für das Szenario passendes Modell. [50]

Im Folgenden ist ein Überblick von 26 Modellen zur Simulation von Evakuierungen aus Gebäuden einschließlich relevanten Charakteristiken dargestellt.

Model	Background of model		Model characteristics					
	Developer/institution	Validation	Availability	Modeling method	Refinement of population	Refinement of structure	Refinement of behavior	Output
EVACNET4	Kisko, Francis, and Nobel/Univ. of FL, U.S.	FD	Y	M-O	Ma	C	N/A	T
WAYOUT	Shestopal/Fire Modelling & Computing, AU	FD	Y	M	Ma	C	N/A	V
STEPS	Mott MacDonald, U.K.	C, FD, PE	Y	M/PB	Mi	F	D	V
PedGo	TraffGo, Germany	FD, PE, OM, 3P	Y	PB/B	Mi	F	S	V
PEDROUTE	Halcrow Fox Associates, U.K.	N	Y/N3	PB	Ma	C	D	V
Simulex	Thompson/IES, U.K.	FD, PE, OM, 3P	Y	PB	Mi	Co	D	V
GridFlow	Purser and Bensilum/BRE, U.K.	FD, PE	Y	PB	Mi	Co	D	V
ASERI	Schneider/LS.T. GmbH, Germany	FD, PE	Y	B-RA	Mi	Co	S	V
BldEXODUS	Galea and FSEG/University of Greenwich, U.K.	FD, PE, OM, 3P	Y	B	Mi	F	S	V
Legion	Legion International, Ltd., U.K.	C, FD, PE, 3P	Y	B	Mi	Co	S	V
FDS + Evac	VTT, NIST, Helsinki Univ of Tech	FD, PE, OM	Y	PB	Mi	Co	S	V
PathFinder 2009	Thunderhead Engineering	C, FD, PE, OM	Y	PB	Mi	Co	D	V
SimWalk	Savannah Simulations AG	FD, PE, 3P	Y	PB	Mi	Co	S	V
PEDFLOW	Edinburgh Napier University, Transport Research Institute	PE	Y	B	Mi	Co	S	V
SpaceSensor	Sun/de Vries	FD, OM	Y	B	Mi	Co	S	V
EPT	Regal Decision Systems, Inc.	FD	Y, N1	B	Mi	C, F, Co	AI	V
MassMotion	Arup	C, FD, PE, OM	Y, N1	B	Mi	Co	AI, S	V
Myriad II	Keith Still	PE, 3P	Y, N1	B	Mi	C, F, Co	AI	V
Pathfinder	Rolf Jensen and Associates, Inc.	N	N1	M	Mi	F	N/A	V
ALLSAFE	InterConsult Group ASA, Norway	OM	N1	PB	Ma	C	D	V
CRISP	Fraser-Mitchell/BRE, U.K.	FD	N1	B-RA	Mi	F	S	V
EGRESS 2002	Ketchell/AEA Technology, U.K.	FD	N1	B	Mi	F	S	V
SGEM	Lo/University in Hong Kong	FD, OM	N1	PB	Mi	Co	D	V
EXIT89	Fahy/NFPA, U.S.	FD, OM	N2	PB	Mi	C	D	T
MASSEgress	Stanford University (Civil and Env Engineering)	PE, OM	N2	B	Mi	Co	S	V
EvacuationNZ	Spearpoint/Univ of Canterbury, NZ	FD, PE, OM	N2	B	Mi	C	S	V

Abbildung 18: Übersicht von verschiedenen Computermodellen für die Evakuierungssimulation von Gebäuden [50, p. 2160]

**Key to reading the table:**

*Validation:*

- C Validation against codes
- FD Validation against fire drills or other people movement experiments/trials
- PE Validation against literature on past experiments (flow rates, etc.)
- OM Validation against other models
- 3P Third-party validation
- N No validation work could be found on the model

*Availability to the Public:*

- Y The model is available to the public for free or a fee
- N1 The company uses the model for the client on a consultancy basis
- N2 The model has not yet been released
- N3 The model is no longer in use
- U Unknown

*Modeling Method:*

- M Movement model
- M-O Movement/optimization models
- PB Partial behavioral model
- B Behavioral model
- B-RA Behavioral model with risk assessment capabilities
- B-AI Behavioral model with artificial intelligence capabilities

*Refinement of the Population:*

- Ma Macroscopic
- Mi Microscopic

*Refinement of Structure:*

- C Coarse network
- F Fine network
- Co Continuous

*Refinement of the Behavior:*

- D Deterministic
- S Stochastic

*Output:*

- T Textual output
- V Visual output

Abbildung 19: Abkürzungsverzeichnis für Abbildung 18 [50, p. 2161]

Der dritte Schritt umfasst die Modulation des Gebäudes, der Personen sowie Prozesse (z. B. Routenwahl) und Umweltbedingungen. Dabei werden mögliche Szenarien entwickelt, die durch die Evakuierungssimulation reproduziert werden können.

Die Schritte 4 – 6 der Evakuierungssimulation bedürfen schließlich einer individuellen Beschreibung, da diese sehr modell- und projektspezifisch sind. [50]

## 4 Fahrtreppen

Eine Fahrtreppe – auch umgangssprachlich Rolltreppe genannt – ist nach DIN EN 115-1:2018-01 [52] als

„kraftbetätigte, geneigte, sich kontinuierlich bewegende Treppe zum Heben und Senken von Personen, bei der die den Nutzer aufnehmende Fläche (z. B. Stufe) horizontal verbleibt

Anmerkung 1 zum Begriff: Fahrtreppen sind Maschinen — auch wenn sie nicht in Betrieb sind — und können nicht als fest eingebaute Treppen angesehen werden.“

[p. 13] definiert.

### 4.1 Geschichte

Die Fahrtreppe wurde im 19. Jahrhundert in den Vereinigten Staaten erfunden. Nathan Ames erhielt 1859 ein Patent auf die ‚Revolving Stairs‘ (‚umlaufende Treppen‘), welches den ersten Entwurf einer Fahrtreppe darstellt. Eine Verwirklichung erfolgte jedoch aufgrund der hohen Komplexität und ungelösten Problemen nie. Leamon Souder entwickelte mehrere Ideen Ames‘ weiter und bekam dafür ab 1889 eigene Patente erteilt. Die Entwürfe wurden jedoch ebenfalls nie umgesetzt.

Die erste funktionierende Fahrtreppe wurde schließlich von Jesse W. Reno 1892 patentiert und 1895 in einem Vergnügungspark in den USA installiert. Der Aufbau war jedoch eher ein Fahrsteig und diente zum Amüsieren von Personen. Ebenfalls 1892 entwickelte George A. Wheeler eine eigene Konstruktion, die eine höhere Ähnlichkeit mit Fahrtreppen hat und dessen Patent schließlich von Charles Seeberger aufgekauft wurde. Dieser entwickelte das Konzept weiter und gab der Fahrtreppe auch ihren englischen Namen: Escalator. In Kooperation mit der Otis Elevator Company wurde 1900 auf der Pariser Weltausstellung die erste kommerzielle Fahrtreppe einer breiten Öffentlichkeit bekannt. Das Design der heutigen Fahrtreppen wurde im Jahr 1921 von Otis entwickelt. [53, 54]

## 4.2 Aufbau und Funktionsweise

Das Gerüst der Fahrtreppe dient als Träger für alle Bauteile und Komponenten und ist in die umgebende Infrastruktur eingebettet. Im unteren Bereich befindet sich die Umkehrstation während im oberen Bereich die Antriebsstation eingebaut ist. Im Stufenbandsystem werden die auf Rollen laufenden und mit einer Kette verbundenen Treppenstufen auf Schienen innerhalb des Gerüsts geführt. Unter der Kammplatte am unteren bzw. oberen Ende der Fahrtreppe werden die Stufen umgelenkt und kommen so zum Vorschein bzw. werden wieder in die Konstruktion abgesenkt. Das genaue Aussehen der Stufen ist dabei je nach Hersteller unterschiedlich. Der Antrieb erfolgt durch einen Elektromotor, welcher mit einem Zahnrad die Kette bewegt. Über die Landestation betreten und verlassen die Personen die Fahrtreppe. Eine seitliche Begrenzung erfolgt durch die Balustrade, auf welcher der Handlauf entlangläuft. Dieser sollte sich mit gleicher Geschwindigkeit wie die Fahrtreppe bewegen (maximal 2 % Abweichung nach EN 115-1), sodass sich die Personen daran festhalten können. [55]



Abbildung 20: Aufbau und Komponenten einer Fahrtreppe ([56, p. 210] zit. n. [57])

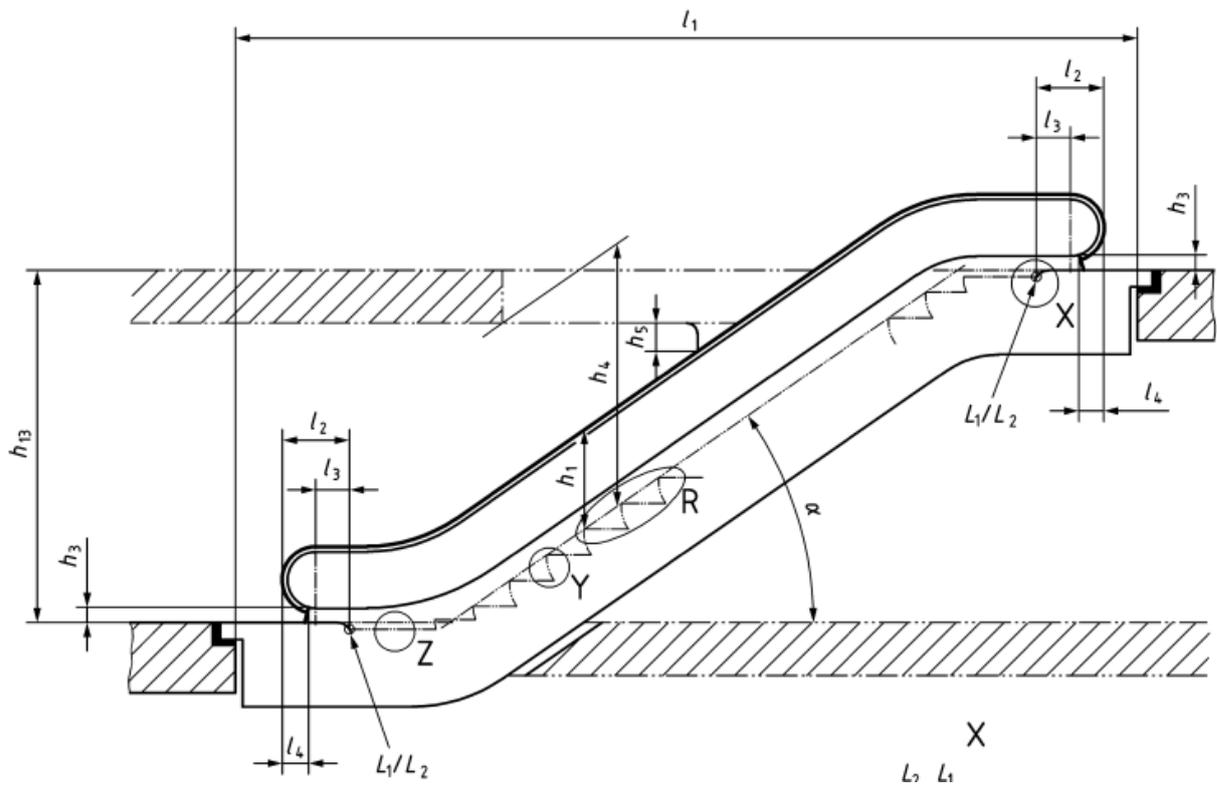


Abbildung 21: Aufbau einer Fahrtreppe nach DIN EN 115-1 [52, p. 46]

Durch die Anmerkung in der Definition gemäß DIN EN 115-1:2018-01 können Fahrtreppen nicht als Flucht- und Rettungsweg gewertet werden.

## 4.3 Parameter

Die folgenden Parameter der Fahrtreppe erlauben eine Unterscheidung der Fahrtreppe. Eine Normierung in erfolgt in Deutschland durch die Norm DIN EN 115-1:2018-01 *Sicherheit von Fahrtreppen und Fahrsteigen – Teil 1: Konstruktion und Einbau* [52], welche die nationale Fassung der europäischen Norm EN 115-1:2017 darstellt.

### 4.3.1 Stufenmaße

Die Nennbreite  $z_1$  muss mindestens 0.58 m und darf höchstens 1.10 m betragen. Die Höhe der Stufen  $x_1$  ist dabei bis 0.24 m zulässig. Die Stufentiefe  $y_1$  muss sich mindestens auf 0.38 m belaufen. [52]

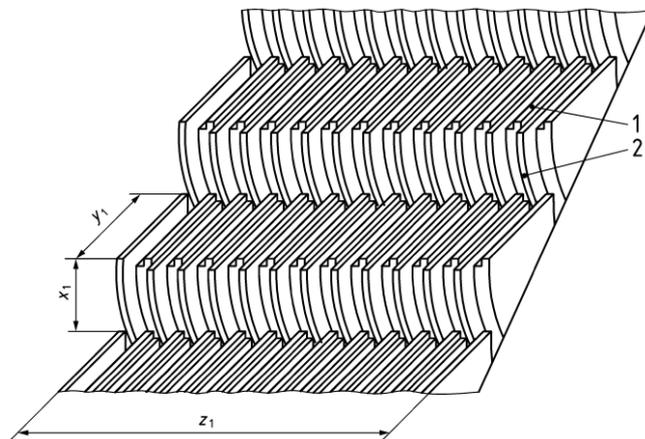


Abbildung 22: Stufenmaße nach DIN EN 115-1 (1: Trittstufe 2: Setzstufe) [52, p. 50]

Die Stufen müssen sich auf den Zu- und Abgängen mindestens 0.80 m horizontal bewegen. Bei Nenngeschwindigkeiten von 0.50 m/s – 0.65 m/s und einer Förderhöhe  $h_{13}$  über 6 m muss die horizontale Bewegungsfläche 1.20 m lang sein. Bei Nenngeschwindigkeiten über 0.65 m/s ist eine Länge von 1.60 m erforderlich. [52]

### 4.3.2 Neigungswinkel

Der Neigungswinkel  $\alpha$  ist als „maximaler Winkel zur Horizontalen, in dem sich die Stufen, die Paletten oder der Gurt bewegen“ [52, p. 12] definiert und darf maximal 30° betragen. Bei einer Förderhöhe  $h_{13}$  bis 6 m und Nenngeschwindigkeiten bis maximal 0.50 m/s ist eine Erhöhung des Neigungswinkels bis maximal 35° zulässig.

### 4.3.3 Nenngeschwindigkeit

Die Nenngeschwindigkeit bezeichnet die Geschwindigkeit der Stufen ohne Belastung bei Nennspannung und Nennfrequenz. Die Angabe erfolgt durch den Hersteller. Im Betrieb ist bei Nennfrequenz und Nennspannung eine Toleranz ist maximal 5 % zulässig. Die Nenngeschwindigkeit darf einem Neigungswinkel  $\alpha$  bis maximal 30° höchstens 0.75 m/s und bei einem Neigungswinkel  $\alpha$  von 30° – 35° höchstens 0.50 m/s betragen. [52]

Typische Nenngeschwindigkeiten in Deutschland sind 0.50 m/s, 0.65 m/s und 0.75 m/s.

## 4.4 Kapazität

### 4.4.1 Theoretische Förderkapazität

Nach Barney [58] ist die Förderkapazität das Produkt aus der *Geschwindigkeit der Fahrtreppe*  $v$ , der *Personendichte*  $k$  (Anzahl Personen pro Stufe) und *Anzahl der Stufen der Fahrtreppe*  $s$  pro Meter.

$$\text{Förderkapazität} = 60 \cdot v \cdot k \cdot s \left[ \frac{\text{Personen}}{\text{Minute}} \right] \quad (13)$$

Die theoretische Personendichte  $k$  wird dabei wie folgt angegeben:

- $k = 1.0$  bei einer Stufenbreite von 600 mm (1 Person pro Stufe)
- $k = 1.5$  bei einer Stufenbreite von 800 mm (1.5 Personen pro Stufe)
- $k = 2.0$  bei einer Stufenbreite von 1000 mm (2 Personen pro Stufe)

Grundsätzlich steigt mit der Geschwindigkeit und Stufenbreite die Zahl der Personen, welche befördert werden können. Dies ist allerdings kein unendlicher Vorgang, sondern es wird zu einem bestimmten Punkt eine Sättigung erreicht. Weitere Faktoren wie z. B. die Gebäudegeometrie, das Vorhandensein von Aufzügen oder Anzahl von Ein- und Ausgängen beeinflussen zusätzlich den Personenstrom. [55]

Die theoretische Kapazität gibt dabei nur die in der Theorie durch die Parameter der Fahrtreppe möglichen Leistungen an. In der Praxis werden diese Werte nicht erreicht. Die Förderkapazität wird auch als Förderleistung oder Leistungsfähigkeit bezeichnet. [4]

## 4.4.2 Normen und Richtlinien

### 4.4.2.1 EN 115-1

Die EN 115-1 verwendet den Begriff der maximalen Förderleistung zur Angabe der Kapazität einer Fahrtreppe. Diese wird als „höchster Durchsatz an Personen, der unter Betriebsbedingungen erreicht werden kann“ [52, p. 14] bezeichnet. Die Angaben in der Norm sind dabei rein informativer Natur.

#### H.1 Maximale Förderleistung

Für die Planung des Verkehrsflusses ist die maximale Anzahl der Personen, die in einer Stunde von einer Fahrtreppe oder einem Fahrsteig befördert werden können, in Tabelle H.1 aufgeführt.

Tabelle H.1 — Maximale Förderleistung

Stufen-/Palettenbreite $z_1$ m	Nenngeschwindigkeit $v$ , m/s		
	0,50	0,65	0,75
0,60	3 600 Personen/h	4 400 Personen/h	4 900 Personen/h
0,80	4 800 Personen/h	5 900 Personen/h	6 600 Personen/h
1,00	6 000 Personen/h	7 300 Personen/h	8 200 Personen/h
ANMERKUNG 1 Die Benutzung von Einkaufs- und Kofferwagen (siehe Anhang I) verringert die Förderleistung um etwa 80 %.			
ANMERKUNG 2 Bei Fahrsteigen mit einer Palettenbreite von mehr als 1,00 m erhöht sich die Förderleistung nicht, da der Benutzer sich am Handlauf festhalten muss; die zusätzliche Breite dient dazu, den Einsatz von Einkaufs- und Kofferwagen grundsätzlich zu ermöglichen.			

Abbildung 23: Maximale Förderleistung nach EN 115-1 [52, p. 108]

### 4.4.2.2 ASME A17.1-2016 / CSA B44-16

Der von der *American Society of Mechanical Engineers* herausgegebene Safety Code for Elevators and Escalators [59] ist die nationale Norm für Fahrstühle, Fahrtreppen und Fahrsteige in den USA und Kanada. Danach soll die Nenngeschwindigkeit maximal 100 ft/min (0.5 m/s) betragen. Die zulässige Breite der Trittstufen wird mit 22 Zoll – 40 Zoll (0.56 m – 1.020 m) angegeben.

### 4.4.3 Angaben der Hersteller

Schindler Österreich [60] unterteilt die möglichen Förderleistungen abhängig vom Verkehrsaufkommen in locker, mittel und gedrängt. Letztere Stufe entspricht dabei den in der EN 115-1 gegebenen Werten. Geschwindigkeiten von 0.5 m/s werden bei kontinuierlichem Personenfluss, 0.60 m/s bzw. 0.65 m/s bei einer stoßweisen Auslastung empfohlen. Für eine Geschwindigkeit bis 0.75 m/s spricht der Hersteller aufgrund der Sturzgefahr und nicht mehr ansteigenden praktischen Förderleistung keine Empfehlung aus. Die praktische Förderleistung wird mit 40 % bis 80 % der theoretischen Förderleistung angegeben und durch das Personenaufkommen und die Stufenbreite beeinflusst.

Stufenbreite	Theoretische Förderleistung	Praktisch mögliche Förderleistung bei einer Nenngeschwindigkeit von			
		v = 0,5 m/s locker	v = 0,5 m/s mittel	v = 0,5 m/s gedrängt	v = 0,65 m/s gedrängt
600 mm	4.500 Pers./h	1.800 Pers./h	2.700 Pers./h	3.600 Pers./h	4.400 Pers./h
800 mm	6.750 Pers./h	2.400 Pers./h	3.600 Pers./h	4.800 Pers./h	5.900 Pers./h
1000 mm	9.000 Pers./h	3.000 Pers./h	4.500 Pers./h	6.000 Pers./h	7.300 Pers./h

Abbildung 24: Theoretische und praktische mögliche Förderleistung nach Schindler Österreich [60, p. 8]

Der Zusammenhang zwischen theoretischer und praktischer Kapazität stellt sich wie folgt dar. Die im Diagramm bei 0.5 m/s bzw. 0.65 m/s eingezeichnete Förderleistung stimmt jedoch nicht mit den Werten von Abbildung 24 überein.

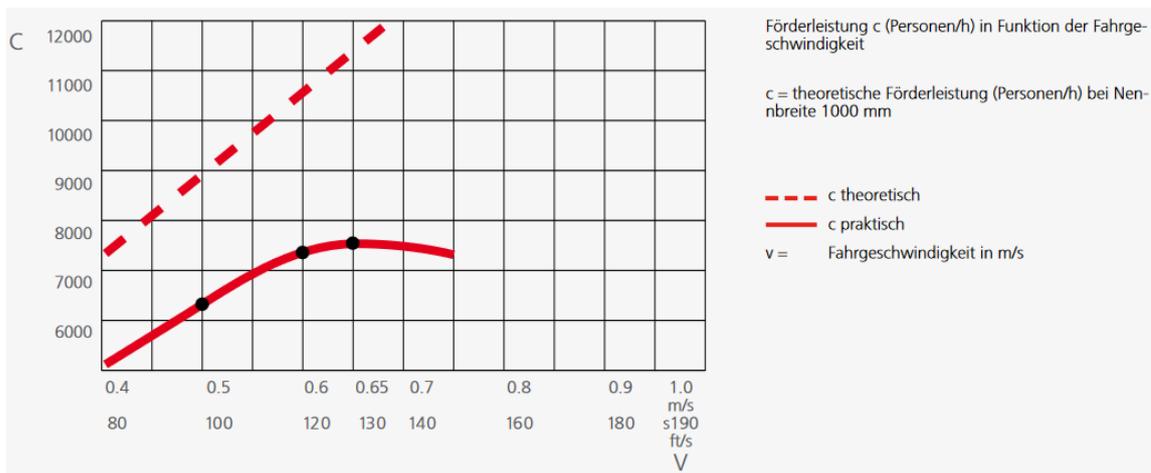


Abbildung 25: Schindler Österreich [60, p. 13]

Schindler Deutschland [61] verwendet analog die Werte der EN 115-1, jedoch wird im Gegensatz zu Schindler Österreich die Förderleistung ab einer Geschwindigkeit von 0.65 m/s als „nicht mehr wesentlich“ [p. 20] ansteigend bezeichnet. Die Verwendung dieser Geschwindigkeit wird ebenfalls nicht empfohlen.

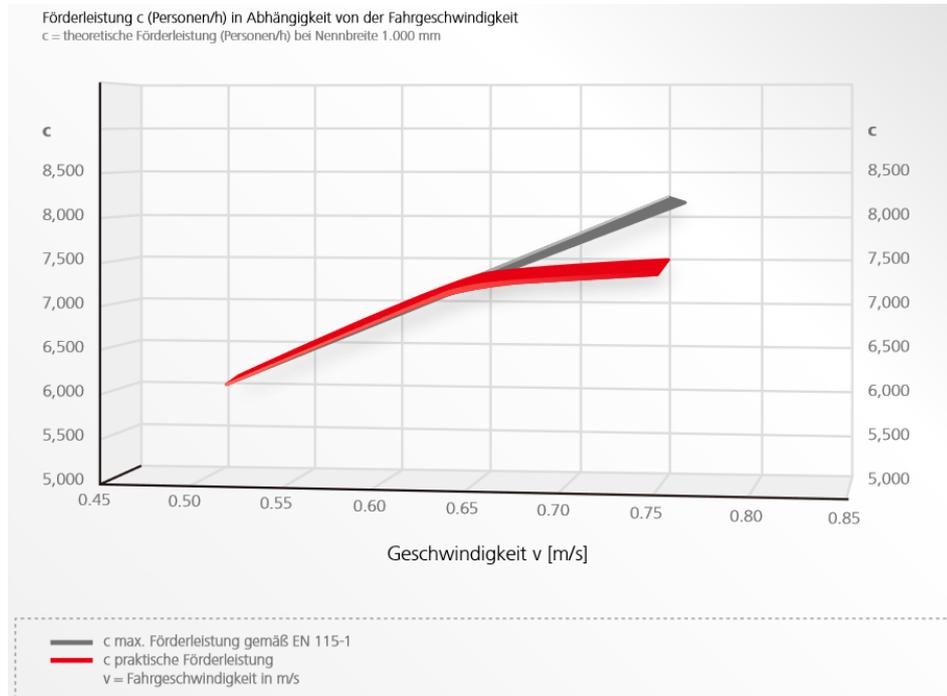


Abbildung 26: Abhängigkeit von Förderleistung und Geschwindigkeit nach Schindler Deutschland [61, p. 20]

Mitsubishi Electric [62] gibt die theoretische Kapazität der Z-Serie für eine Geschwindigkeit von 0.5 m/s an, welche jedoch von den vorherrschenden Verkehrsbedingungen abhängt.

Tabelle 2: Kapazität der Z-Serie von Mitsubishi Electric in Personen pro Stunde

Geschwindigkeit	Stufenbreite 0.604 m	Stufenbreite 0.804 m	Stufenbreite 1.004 m
0,50 m/s	4500	6750	9000

Hitachi [63] beschreibt die maximale Kapazität der TX-Serie wie folgt:

Tabelle 3: Kapazität der TX-Serie von Hitachi in Personen pro Stunde

Geschwindigkeit	-	Stufenbreite 0.802 m	Stufenbreite 1.004 m
0,50 m/s	-	4800	6000

Thyssen Krupp [64] und KONE [65] verwenden in ihren Planungsrechnern für Fahrtreppen die Werte der EN 115-1. KLEEMANN [66] verweist ebenfalls auf die EN 115-1, OTIS veröffentlicht keine aktuellen Daten.

#### 4.4.4 Planungshandbücher und Studien

##### 4.4.4.1 Predtetschenski und Milinski: Personenströme in Gebäuden

Predtetschenski und Milinski [5] erweitern Formel 13 zur Berechnung der theoretischen Kapazität um einen *Koeffizienten für die Besetzungsdichte*  $\psi$ . Die rechnerische *Leistung der Fahrtreppe*  $Q_{r,T}$  wird somit aus dem Produkt von *Anzahl der Stufen pro Meter*  $\frac{1}{\Delta l_{st}}$ , *Anzahl der Personen pro Stufe*  $n$ , *Geschwindigkeit der Fahrtreppe*  $v_T$  und  $\psi$  berechnet.

$$Q_{r,T} = 3600 \cdot \frac{1}{\Delta l_{st}} \cdot n \cdot v_T \cdot \psi \left[ \frac{\text{Personen}}{\text{Stunde}} \right] \quad (14)$$

Der Mittelwert des Koeffizienten  $\psi$  wird mit 0.74 angegeben. Folglich entspricht die rechnerische Leistung der Fahrtreppe 74 % der theoretischen Kapazität.

Tabelle 4: Errechnete Kapazität nach PM in Personen pro Minute bzw. Personen pro Stunde

Breite	0.50 m/s	0.65 m/s	0.75 m/s
0.60 m	55.5 / 3330	72.2 / 4329	83.3 / 6750
0.80 m	83.3 / 4995	108.3 / 6493.5	124.9 / 7492.5
1.00 m	111 / 6660	144.3 / 8658	166.5 / 9990

Die Bekleidung der Personen beeinflusst dabei die Dichte des Personenstroms auf der Fahrtreppe, jedoch nicht deren Kapazität.

##### 4.4.4.2 Westphal: Untersuchungen von Fußgängerbewegungen auf Bahnhöfen mit starkem Nahverkehr

In der Literaturlauswertung von Westphal [36] wird die Kapazität von Fahrtreppen mit einer Breite von 1.00 m und einer Geschwindigkeit von 0.50 m/s mit 3600 – 16 000 Personen pro Stunde angegeben.

Bei eigenen Messungen mit den gleichen Parametern der Fahrtreppe liegt die durchschnittliche Leistungsfähigkeit unter andauerndem Stau bei maximal 100 Personen pro Minute (6000 Personen pro Stunde) was ca. 70 % der theoretischen Leistungsfähigkeit entspricht. Die maximale Leistungsfähigkeit während Belastungsspitzen kann in einem gemessenen Zeitintervall von:

- 1.00 min: 109 %
- 0.50 min: 116 %
- 0.25 min: 123 %

der durchschnittlichen Leistungsfähigkeit erreichen.

#### 4.4.4.3 Oeding: Verkehrsbelastung und Dimensionierung von Gehwegen und anderen Anlagen des Fußgängerverkehrs

Oeding [67] untersuchte die Kapazität von Fahrtreppen (1.00 m Breite) in drei deutschen Städten. Dabei wurde ein maximaler Durchfluss von ca. 60 Personen pro Stunde als praktische Vollauslastung beobachtet, bei der sich Passanten (noch) nicht gegenseitig beeinträchtigen. Bei den anderen zwei Messungen standen Treppen als Alternative zur Fahrtreppe zur Verfügung, welche von ca. 7 % – 8 % der Personen benutzt wurden. Unter Rückstau wurde maximal eine Kapazität der Fahrtreppe von 80 – 90 Personen pro Minute beobachtet. Jenseits dieses Flusses war die Wartezeit der Personen an der Landestelle zu hoch, sodass diese die alternative Treppe wählten.

Abbildung 27 zeigt den Fluss auf der Fahrtreppe im Verhältnis zur Gesamtbelastung von Treppe und Fahrtreppe an. Bis zu einer Gesamtbelastung von 70 Personen pro Minute kann der gesamte Fluss noch annähernd linear dargestellt werden. Danach ist eine verringerte prozentuale Nutzung der Fahrtreppe zu erkennen, welche bei einem Fluss von ca. 60 Personen pro Minute auf der Fahrtreppe einsetzt und im Diagramm durch eine stärker wachsende Differenz zur 100%-Linie sichtbar ist.

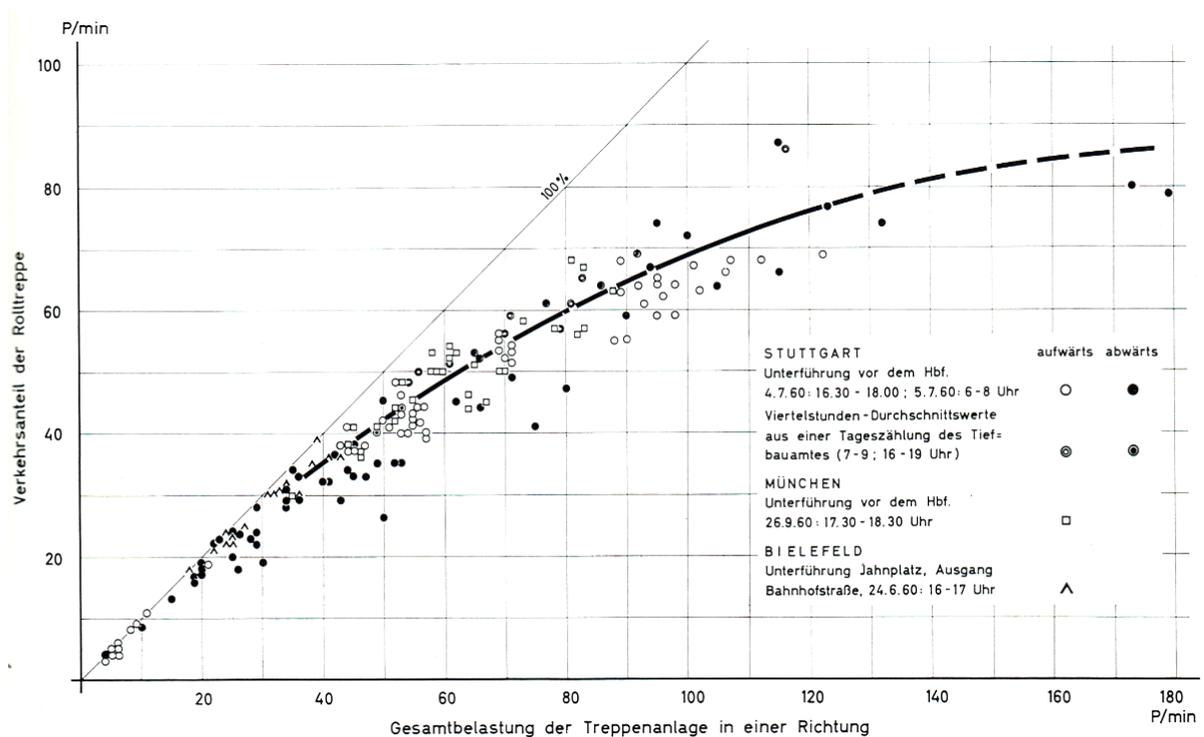


Abbildung 27: Fluss von Fahrtreppe im Verhältnis zum Gesamtfluss der Treppenanlage [67, p. 39]

#### 4.4.4.4 Weidmann: Transporttechnik der Fussgänger

Weidmann [4] berechnet angelehnt an Formel 13 die *Leistungsfähigkeit einer Fahrtreppe*  $L_R$  mit der *Schräggeschwindigkeit der Fahrtreppe*  $v_{R,s}$ , der *Stufentiefe der Fahrtreppe*  $a_R$  und der *diskreten Verteilung der Personen auf den Treppenstufen*  $F_{ST}$ .

$$L_R = \frac{F_{ST} \cdot v_{R,s}}{a_R} \left[ \frac{\text{Personen}}{\text{Sekunde}} \right] \quad (15)$$

Eine Fahrtreppe mit einer Breite von 1.00 m ist dabei der beste Kompromiss aus Kosten und Leistung. Damit sich jeder Benutzer am Handlauf festhalten kann, soll die Breite nicht mehr als 1.10 m betragen. Die Stufentiefe soll mit mindestens 0.38 m ausgelegt sein.

Werden bei einer 1.00 m breiten Fahrtreppe mit einer Stufentiefe von 0.38 m und einer Geschwindigkeit von 0.50 m/s nun alle Stufen besetzt, ergibt dies eine theoretische Leistungsfähigkeit von 2.6 Personen pro Sekunde. Bei einer Geschwindigkeit der Fahrtreppe von 0.75 m/s wäre eine theoretische Leistungsfähigkeit von 4 Personen pro Sekunde möglich.

Die praktische Leistungsfähigkeit ist allerdings durch die benötigte Sicherheit beim Betreten der Fahrtreppe und aufgrund des Engstellencharakters geringer. So ist eine maximale praktische Leistungsfähigkeit des Eintritts bei doppelspurigen Fahrtreppen (Breite 1.00 m) mit 1.75 Personen pro Sekunde gegeben. Trotz einer möglichen höheren Kapazität der Fahrtreppe ist diese somit durch die Landestellen begrenzt. Beobachtungen zeigen außerdem Stockungen beim Betreten bei Geschwindigkeiten über 0.68 m/s bei aufwärtsfahrenden und 0.58 m/s bei abwärtsfahrenden Fahrtreppen. Eine weitere Verringerung der Kapazität ergibt sich aus Gruppenbildung und dem erhöhten Platzbedarf der sich auf Fahrtreppe bewegendenden Personen.

Der Besetzungsgrad der Stufen nimmt zusätzlich bei höherer Geschwindigkeit ab und sinkt von annähernd 2 Personen pro Stufe bei 0.50 m/s auf ungefähr die Hälfte bei 0.90 m/s ab.

Dadurch steigt die Leistungsfähigkeit trotz höherer Geschwindigkeit von 0.50 m/s auf 0.65 m/s kaum an und ist nicht wie die theoretische Leistungsfähigkeit linear. Als leistungsoptimale Geschwindigkeit werden ca. 0.70 m/s angegeben.

Insgesamt ist eine exakte Angabe der praktischen Leistungsfähigkeit durch verschiedenste Werte in der Literatur nicht möglich. Je nach Autor kann die theoretische Leistungsfähigkeit in der Praxis zu 41% – 80% erreicht werden. Nach den von [36] ermittelten Werten kann die maximale praktische Durchschnittsleistungsfähigkeit von 1.75 Personen pro Sekunde bei 1.00 m Breite je nach gemessenen Zeitintervall um bis zu 23 % auf 2.15 Personen pro Sekunde anwachsen. Dies setzt jedoch ein starkes Gedränge an der Eintrittsstelle voraus. Der Unterschied, ob die Fahrtreppe auf- oder abwärts fährt ist gering, bei tendenziell höheren Werten einer Aufwärtsfahrt.

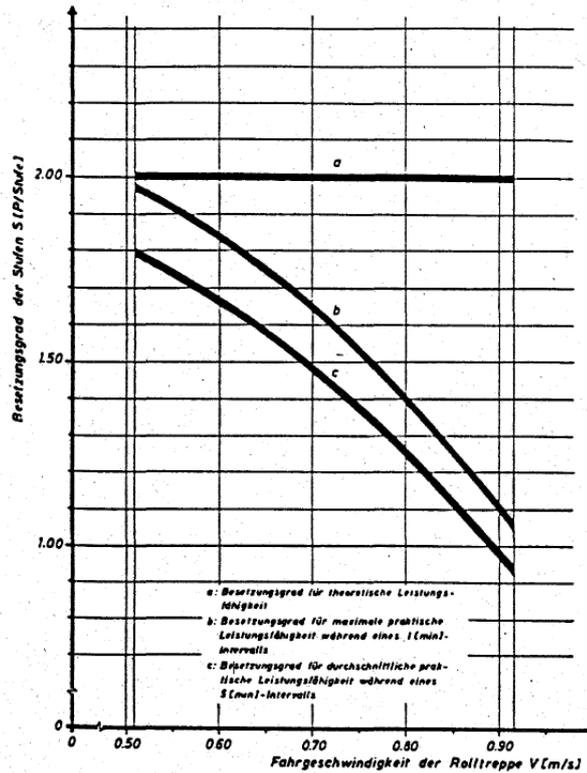


Abbildung 28: Besetzungsgrad der Stufen im Verhältnis zur Geschwindigkeit der Fahrtrepe (a – theoretische Leistungsfähigkeit, b – Besetzungsgrad für maximale praktische Leistungsfähigkeit in einem einminütigen Intervall, c – Besetzungsgrad für durchschnittliche praktische Leistungsfähigkeit in einem fünfminütigen Intervall) ([4, p. 71], zit. n. [68])

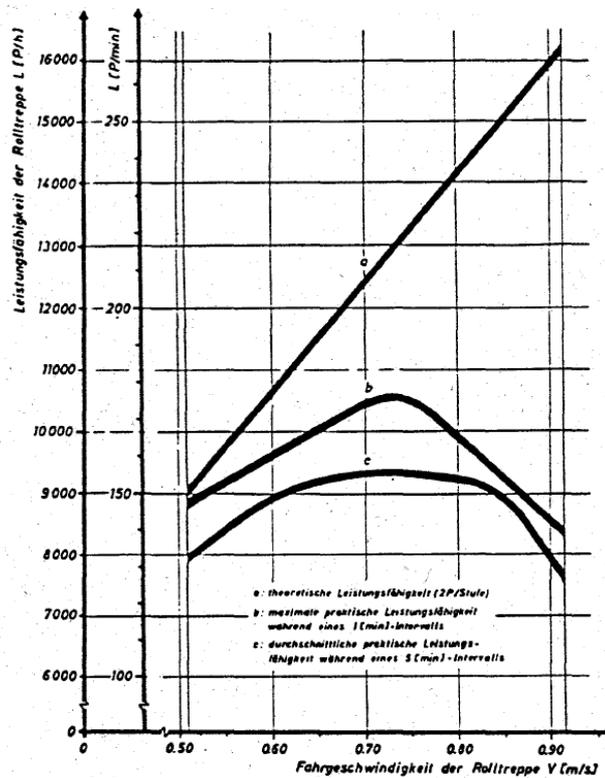


Abbildung 29: Zusammenhang von Geschwindigkeit und Leistungsfähigkeit einer Fahrtrepe (a – theoretische Leistungsfähigkeit, b – maximale praktische Leistungsfähigkeit in einem einminütigen Intervall, c – durchschnittliche praktische Leistungsfähigkeit in einem fünfminütigen Intervall) ([4, p. 72], zit. n. [68])

#### 4.4.4.5 Elevator Traffic Handbook: Theory and Practice

Die Kapazität von Fahrtreppen wird laut Barney [58] mit Formel 13 berechnet. Dies ergibt:

Tabelle 5: Theoretische Kapazität nach Barney in Personen pro Stunde / Personen pro Minute

Geschwindigkeit	Stufenbreite 0,60 m	Stufenbreite 0,80 m	Stufenbreite 1,00 m
0,50 m/s	4500 / 75	6750 / 113	9000 / 150
0,65 m/s	5850 / 98	8775 / 146	11700 / 195
0,75 m/s	6750 / 113	10125 / 169	13500 / 225

Üblicherweise wird die Hälfte des Platzes belegt und die tatsächliche Kapazität einer Fahrtreppe entspricht bei ausschließlich stehenden Personen die Hälfte der in Tabelle 5 genannten Werte. [58]

#### 4.4.4.6 Estimation of Capacity of Escalators in London Underground

Davis und Dutta [69] erhoben Daten von 10 Fahrtreppen in der Londoner Metro und werteten diese aus. Aufgrund der Beschaffenheit der Stationen und Eigenschaften der Fahrgäste (Pendler) wurden größtenteils aufwärtslaufende Fahrtreppen untersucht. Der Fokus lag bei gestauten Zuständen bei denen eine größtmögliche Dichte des ankommenden Personenstroms beobachtet wurde. Die theoretische Kapazität der mit 43.2 Meter pro Minute (0.72 m/s) laufenden Fahrtreppe wird mit 216 Personen pro Minute angegeben, die Breite beträgt 1.00 m bei einer Stufentiefe von 0.40 m. Die Personen teilen sich in eine stehende und bewegende Gruppe auf, die jeweils die Hälfte der Breite in Anspruch nimmt. Bei einer Belegung von jeder zweiten Stufe ergibt dies nach Formel 13 eine Förderkapazität von 54 Personen pro Minute für den stehenden Teil.

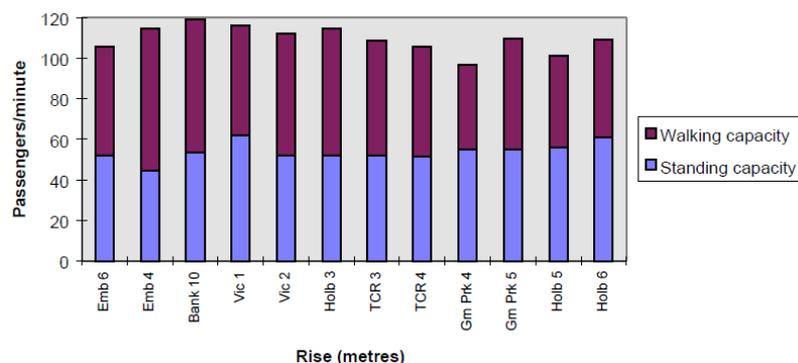


Abbildung 30: maximale Kapazität der untersuchten aufwärtsfahrenden Fahrtreppen (violett: gehender Anteil, blau: stehender Anteil) [69, p. 18]

Die beobachtete Kapazität der stehenden Gruppe liegt zwischen 45 und 61 Personen pro Minute. Die Autoren empfehlen eine maximale Kapazität für sowohl stehende als auch gehende Personen von 110 Personen pro Minute aufwärts und 125 Personen pro Minute abwärts zu verwenden.

#### 4.4.4.7 Escalators: A professional's guide for better planning & installation

Die theoretische Kapazität wird in dieser umfangreichen Zusammenfassung über Fahrtreppen wie folgt angegeben:

Tabelle 6: Theoretische Kapazität nach [70] in Personen pro Stunde

Geschwindigkeit	Stufenbreite 0,60 m	Stufenbreite 0,80 m	Stufenbreite 1,00 m
0,50 m/s	2500	6750	9000

#### 4.4.4.8 Escalator Handling Capacity: Standards versus Practise

Al-Sharif [71] untersuchte in der Studie die praktische Kapazität von Fahrtreppen in der Londoner Metro. Die Fahrtreppen hatten eine Breite von 1.00 m und eine Geschwindigkeit von 0.75 m/s. Der beobachtete maximale Fluss liegt zwischen 86 – 140 Personen pro Minute. Der Fluss wurde in einem Intervall von 30 s gemessen, jedoch ein einminütiges Intervall verwendet. Die ermittelten Werte werden in Personen pro Minute angegeben.

Tabelle 7: Beobachtete Kapazitäten von sieben Fahrtreppen in Personen pro Minute [71]

Geschwindigkeit	1	2	3	4	5	6	7
0,75 m/s	101	104	140	122	123	86	92

#### 4.4.4.9 Analysis of Flow Characteristics and Step Size of Escalators at Metro Stations

Kahali und Rastogi [72] untersuchten die Auslastung von 9 Fahrtreppen in Neu-Delhi (Indien) während Stoßzeiten auf Bahnhöfen. Die Fahrtreppen hatten eine Breite von 1.00 m bei 0.40 m Stufentiefe und wurden mit einer Geschwindigkeit von 0.65 m/s betrieben. Die Fahrtreppe mit der höchsten Belastung weist dabei einen (kurzzeitigen) maximalen Fluss von 154 Personen pro Minute auf, während der durchschnittliche Fluss bei dieser Fahrtreppe 70.75 Personen pro Minute beträgt.

Insgesamt zeigte sich ein proportionaler Anstieg von Fluss und Dichte bis in den Bereich zu einer Dichte von 1.5 – 2.0 Personen pro Quadratmeter. Ab einer Dichte von 3.5 Personen pro Quadratmeter flacht sich diese Relation ab. Die Autoren geben eine theoretisch mögliche Dichte von 5.0 Personen pro Quadratmeter an.

Escalators	Selected locations	Peak flow rate (p/m/min)		Average flow rate (p/m/min)	
		M	E	M	E
Esc 1-L-U	Location-1	140	132	46.61	60.86
Esc 2-M-U	Location-1	140	124	35.11	51.96
Esc 3-R-U	Location-1	122	120	31.44	55.46
Esc 4-U	Location-2	154	138	70.75	61.60
Esc 5-D	Location-2	138	148	60.66	66.68
Esc 6-U	Location-3	104	126	36.54	60.35
Esc 7-U	Location-4	66	76	33.10	39.48
Esc 8-U	Location-5	74	86	45.27	55.58
Esc 9-U	Location-6	126	128	48.33	49.19

Note: M-Morning, E-Evening, L-Left; M-Middle; R-Right; U-Up; D-Down

Abbildung 31: durchschnittliche und maximale Flüsse von [72, p. 1047]

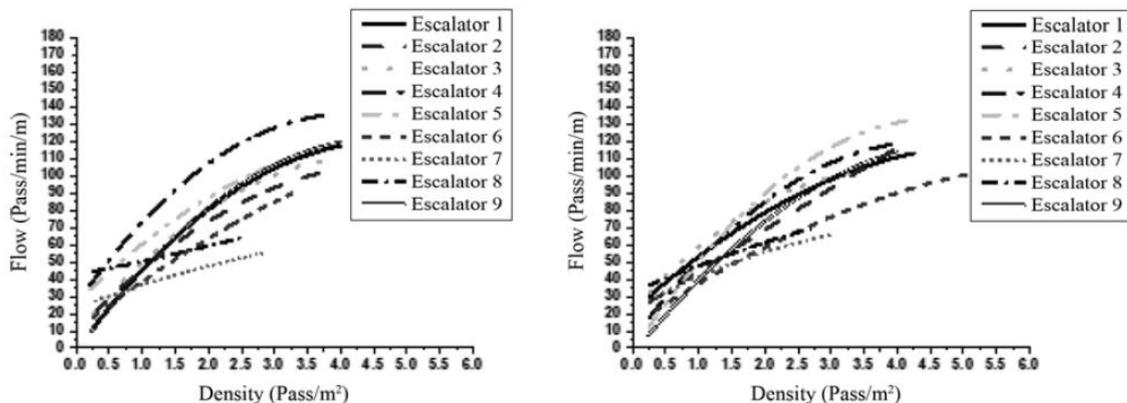


Abbildung 32: Fluss-Dichte-Tendenzen der Fahrtreppen (links: morgens, rechts: abends) [72, p. 1050]

#### 4.4.4.10 Field studies on the capacity of escalators

Bodendorf et al. [73] erforschten bei 62 Messungen die Kapazität von Fahrtreppen bei einer Geschwindigkeit von 0.5 m/s. Dabei wurde der Einfluss des Zeitintervalls, in welchem eine Messung durchgeführt wurde, deutlich: je größer dieses gewählt wurde, desto niedriger war die gemessene Kapazität. Bei einem *Zeitintervall*  $t$  von 10 Sekunden wurden insgesamt sowohl in einem Einkaufszentrum als auch in einem Bahnhof die höchsten Kapazitäten gemessen. Da diese jedoch Spitzenbelastungen darstellen ist für eine Bestimmung der praktischen Kapazität ein Zeitintervall  $\Delta t$  von 120 Sekunden oder der Durchschnittsfluss besser geeignet, wobei es jedoch in Stoßzeiten zu Verstopfungen kommen kann.

Abbildung 33 zeigt die Abhängigkeit des maximalen Flusses vom Zeitintervall  $t$ . Dieser ist exponentiell und nähert sich mit größer werdenden  $t$  einer horizontalen Linie an. Die Fehlerbalken dienen zur Anzeige der Standardabweichung.

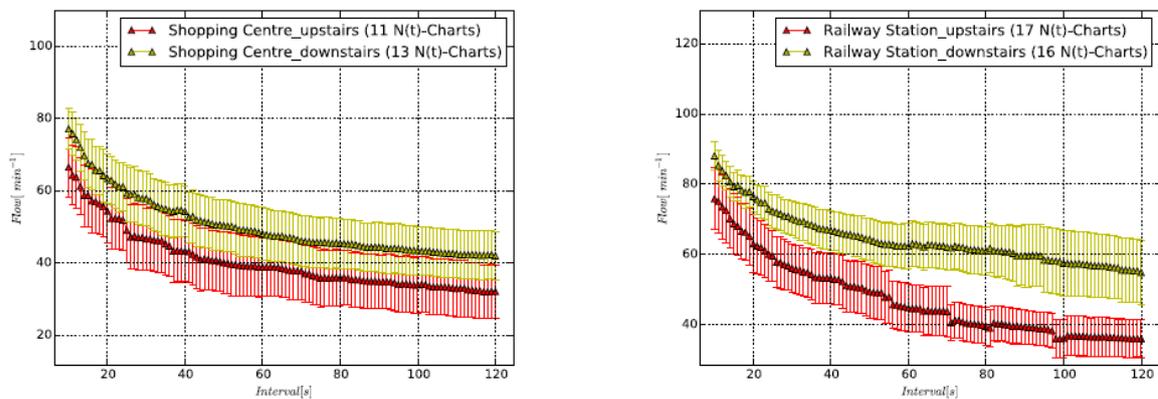


Abbildung 33: Abhängigkeit des gemessenen Fluss nach Zeitintervall  $t$  – Fahrtreppen in Einkaufszentrum (links) und Bahnhof (rechts), aufwärts (rot) und abwärts (gelb) [73, p. 217]

Bei  $\Delta t = 10$  s wurde ohne Betrachtung der Richtung ein maximaler Fluss von 91.50 Personen pro Minuten im Einkaufszentrum bzw. 107.72 Personen pro Minuten im Bahnhof gemessen. Dagegen erreichten die durchschnittlichen Flüsse nur einen maximalen Wert von 55.54 Personen pro Minuten im Einkaufszentrum und 77.77 Personen pro Minuten im Bahnhof.

Abwärtsfahrende Fahrtreppen erreichten dabei insgesamt die höhere Kapazität.

## 4.5 Zusammenfassung

Für die in der Praxis üblichen Breiten und Geschwindigkeiten lässt sich die theoretische Kapazität mit Formel 13 berechnen.

Tabelle 8: Theoretische Kapazität in Personen pro Minute / Personen pro Stunde

Breite	0.50 m/s	0.65 m/s	0.75 m/s
0.60 m	75 / 4500	97.5 / 5850	112.5 / 6750
0.80 m	112.5 / 6750	146.3 / 8775	168.8 / 10125
1.00 m	150 / 9000	195 / 11700	225 / 13500

Die praktische bzw. beobachtete Kapazität von Fahrtreppen ist nachfolgend dargestellt. Berechnete Werte wurden auf eine Nachkommastelle gerundet.

Tabelle 9: Kapazitäten in der Literatur in Personen pro Minute / Personen pro Stunde

Norm/Hersteller/Studie	v	Breite			Bemerkung
		0.60 m	0.80 m	1.00 m	
EN 115-1	0.50 m/s	60 / 3600	80 / 4800	100 / 6000	„maximale Förderleistung“
	0.65 m/s	73.3 / 4400	98.3 / 5900	121.7 / 7300	
	0.75 m/s	81.6 / 4900	110 / 6600	136.7 / 8200	
ASME A17.1-2016 / CSA B44-16	0.5 m/s	keine Kapazität angegeben			Breite: 0.56 m – 1.020 m
Schindler Österreich	0.50 m/s	locker: 30 / 1800 mittel: 45 / 2700 gedrängt: 60 / 3600	locker: 40 / 2400 mittel: 60 / 3600 gedrängt: 80 / 4800	locker: 50 / 3000 mittel: 75 / 4500 gedrängt: 100 / 6000	Aufschlüsselung nach Personendichte, gedrängt entspricht Werten der DIN ISO 115-1: Praktische Förderleistung liegt bei 40 % – 80 % der Werte.
Schindler Deutschland	0.50 m/s			100 / 6000	
	0.65 m/s			121.7 / 7300	
	0.75 m/s			125 / 7500	
Mitsubishi Electric	0.50 m/s	75 / 4500	112.5 / 6750	150 / 9000	Verwendung theoretische Kapazität, Breite gerundet
Hitachi	0.50 m/s	80 / 4800	100 / 6000		Breite gerundet
Thyssen Krupp	Werte nach EN 115-1				
KONE	Werte nach EN 115-1				
KLEEMANN	Werte nach EN 115-1				
PM: Personenströme in Gebäuden	0.50 m/s	55.5 / 3330	83.3 / 4995	111 / 6660	praktische Leistungsfähigkeit entspricht im Mittelwert 74% der theoretischen Leistungsfähigkeit
	0.65 m/s	72.2 / 4329	108.3 / 6493.5	144.3 / 8658	
	0.75 m/s	83.3 / 6750	124.9 / 7492.5	166.5 / 9990	
Westphal: Untersuchungen von Fußgängerbewegungen auf Bahnhöfen mit starkem Nahverkehr	0.5 m/s			Literaturlauswertung: 60 / 3600 – 266.7 / 16 000 Eigene Messungen: ca. 100 / 6000	

## Fahrtreppen

Norm/Hersteller/Studie	v	Breite			Bemerkung
		0.60 m	0.80 m	1.00 m	
Oeding: Verkehrsbelastung und Dimensionierung von Gehwegen und anderen Anlagen des Fußgängerverkehrs	0.50 m/s			Vollauslastung: 60 / 3600 praktische Höchstleistung: 80 – 90 / 4800 – 5400	
Weidmann: Transporttechnik der Fussgänger	0.50 m/s			theoretische Leistungsfähigkeit: 157.9 / 9473.7	Leistungsoptimale Geschwindigkeit: 0.70 m/s maximale praktische Leistungsfähigkeit 41% – 80 % der theoretischen Leis- tungsfähigkeit; Stufentiefe 0.38m
	0.75 m/s			theoretische Leistungsfähigkeit: 236.8 / 14 210	
Barney: Elevator Traffic Handbook: Theory and Practice	0.50 m/s	37.5 / 2250	56.3 / 3375	75 / 4500	entspricht 50 % der theoretischen Kapazität
	0.65 m/s	48.8 / 2925	73.1 / 4387.5	97.5 / 5850	
	0.75 m/s	56.3 / 3375	84.4 / 5062.5	112.5 / 6750	
Davis und Dutta: Estimation of Capacity of Escalators in London Un- derground	0.72 m/s			theoretisch: 216 / 12960 $J_{max}$ ermittelt auf $\frac{1}{2}$ Fahrtreppe: 45 – 61 / 2700 – 3660	Betrachtung von Fahrtreppe mit jeweils zur Hälfte stehenden und gehenden Personen
Escalators: A profession- al's guide for better planning & installation	0.50 m/s	41.7 / 2500	112.5 / 6750	150 / 9000	
Al-Sharif: Escalator Handling Capacity: Standards versus Practise	0.75 m/s			86 – 140 / 5160 – 8400	Daten von 7 Fahrtreppen in Londoner Metro
Kahali und Rastogi: Analy- sis of Flow Characteristics and Step Size of Escala- tors at Metro Stations	0.65 m/s			154 / 9240	nur kurzzeitig auf einer Fahrtreppe erreicht
Bodendorf et al.: Field studies on the capacity of escalators	0.5 m/s			48.7 – 107.7 / 2922 – 6462	$\Delta t = 10$ s

## 4.6 Besonderheiten und Herausforderungen

Die Kapazität der Fahrtreppe wird besonders durch das Verhalten der Personen beim Betreten und Verlassen bestimmt. Generell scheint die Kapazität von abwärtsfahrenden Fahrtreppen höher zu sein als die von Aufwärtsfahrenden, jedoch ist dies noch nicht abschließend geklärt. [4, 73]

Fruin [6] beschreibt, dass die Kapazität einer Fahrtreppe besonders vom Prozess des Betretens und der daraus folgenden Verteilung der Personen auf der Fahrtreppe abhängt. Es wurde beobachtet, dass die Personen auch bei hohen Dichten eine Pufferzone zur nächsten Person einhalten, was ein Teil der Erklärung des Vorhandenseins von Lücken auf der Fahrtreppe darstellt. Aufgrund der erwünschten Privatsphäre benutzen die Personen nicht die genau darauffolgende Stufe bzw. den Platz auf derselben Stufe neben einer anderen Person, sondern lassen diese frei. Ob eine Stufe freigelassen ist unter anderem von den individuellen Eigenschaften der Person, der körperlichen Maße sowie von dem Vorhandensein von Gepäck usw. abhängig.

Die benötigte Privatsphäre ist möglicherweise direkt vor dem eigenen Gesicht am höchsten, was bei einer abwärtsfahrenden Fahrtreppe auch auf der direkt folgenden Stufe gegeben ist. Somit tendieren die Personen auf diesen eher, sich direkt hinter eine andere Person zu stellen. [69]

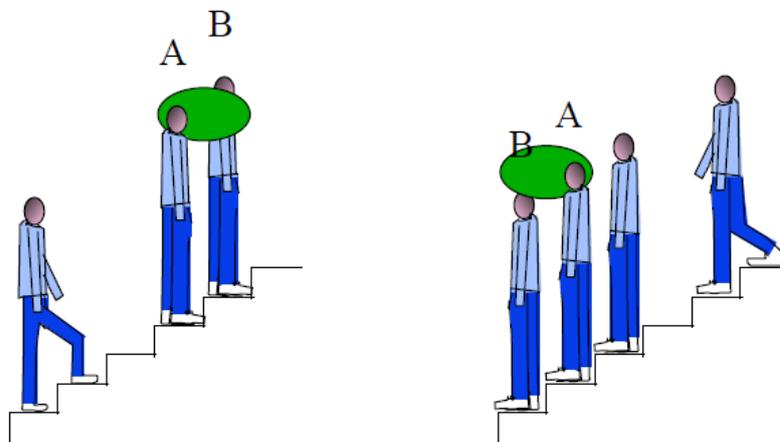


Abbildung 34: Ellipse im Gesichtsbereich als Ort mit an der höchsten erwünschten Privatsphäre (links: aufwärtsfahrende Fahrtreppe / rechts: abwärtsfahrende Fahrtreppe) [69, p. 23]

Bei abwärtsfahrenden Fahrtreppen wurde außerdem beobachtet, dass ab einem bestimmten Fluss der sich bewegende Teil der Personen praktisch zum Stehen kommt, da die Kapazität der Ausgangslandestelle zu niedrig für den ankommenden Personenstrom der Fahrtreppe ist. Dadurch bildet sich ein Rückstau der ausgehend von der unteren Landestelle nach oben wandert. Zusätzlich achten die Personen beim Verlassen auf eine korrekte Positionierung der Füße und verstärken damit das Problem. [69]

Laut Weidmann [4] wird die Kapazität der Fahrtreppe durch die der Landezone entscheidend bestimmt. Hohe Geschwindigkeiten sorgen für Unsicherheiten bei den Personen welche ihre Geschwindigkeit beim Betreten der Fahrtreppe drosseln. Dies wurde bei aufwärtsfahrenden Fahrtreppen ab 0.68 m/s und abwärtsfahrenden Fahrtreppen ab 0.58 m/s beobachtet. Zusätzlich kommt es zu Paarbildungen durch sozial zusammengehörende Gruppen.

Ein weiterer Einflussfaktor stellt die Intention der Fußgänger dar. In [69] wurde beobachtet, dass Fahrtreppen mit Pendlern eine um ca. 10 Personen pro Minute höhere Kapazität als Fahrtreppen mit nicht pendelnden Personen erreichen. Dies wurde jedoch durch einen höheren Fluss der sich bewegenden Personen erreicht.

Zusätzliche Einschränkungen ergeben sich aus den unterschiedlichen Geschwindigkeitsdifferenz, wenn Personen die Fahrtreppe verlassen. Die freie Gehgeschwindigkeit beträgt rund 1.3 m/s (s. Kapitel 2.3.2), die horizontale Geschwindigkeit auf Treppen wird mit ca. 0.7 m/s angegeben (s. Kapitel 2.3.7). Bewegt sich z. B. eine Person auf einer Fahrtreppe mit einer Geschwindigkeit von 0.75 m/s ist die Gesamtgeschwindigkeit 1.45 m/s und somit eine Geschwindigkeitsdifferenz von 0.15 m/s beim Verlassen der Fahrtreppe zu überwinden. Dies stellt schon bei geringen Geschwindigkeitsunterschieden einen erheblichen Unsicherheitsfaktor dar, welcher sich mit steigender Differenz erhöht. [74]

## 5 Analyse der Fußgängerdynamik an einer Fahrtreppe

Das in dieser Simulation verwendete Modell wurde von Tordeux et al. [20] unter dem Namen *collision-free speed model for pedestrian dynamics* entwickelt. Das mikroskopische zweidimensionale Modell ist inhärent kollisionsfrei und eignet sich sowohl für theoretische Fragestellungen als auch für praktische Anwendungen. Die Ausführung erfolgt mit dem multi-Agenten Modellierungsprogramm NetLogo [75]. Dieses erlaubt eine Simulation und Modellierung von Systemen über die Zeit mit mehreren Agenten. Durch hohe Anzahl von unabhängig handelnden Agenten ist es möglich, die Zusammenhänge des Verhaltens auf mikro-Ebene und Auswirkungen auf der makro-Ebene zu beobachten. Umfangreiche Ausgabemöglichkeiten der Ergebnisse sowie eine plattformübergreifende Nutzung vervollständigen das Programm. [76]

Die im Folgenden verwendete Anwendung wurde von Prof. A. Tordeux erstellt.

### 5.1 Tordeux et. al: collision-free speed model for pedestrian dynamics

Die Darstellung des Fußgängers erfolgt durch eine kreisförmige Scheibe mit dem Durchmesser  $l$ . Die *Position der Person  $i$*  wird mit  $x_i$  bezeichnet, welche sich mit der *Geschwindigkeit  $v_i$*  in eine *Richtung* gegeben durch den *Einheitsvektor  $e_i = (\cos \theta_i, \cos \theta_j)$*  bewegt. Die Bewegungsrichtung von *anderen Personen  $j, k$*  usw. mit ihren *Positionen  $x_j, x_k$*  usw. *bezogen auf die betrachtete Person  $i$*  werden mit den *Einheitsvektoren  $e_{i,j}, e_{i,k}$*  usw. angegeben. Der *Abstand zwischen den zwei Personen  $i$  und  $j$*  wird als  $s_{i,j} = \|x_i - x_j\|$  bezeichnet.

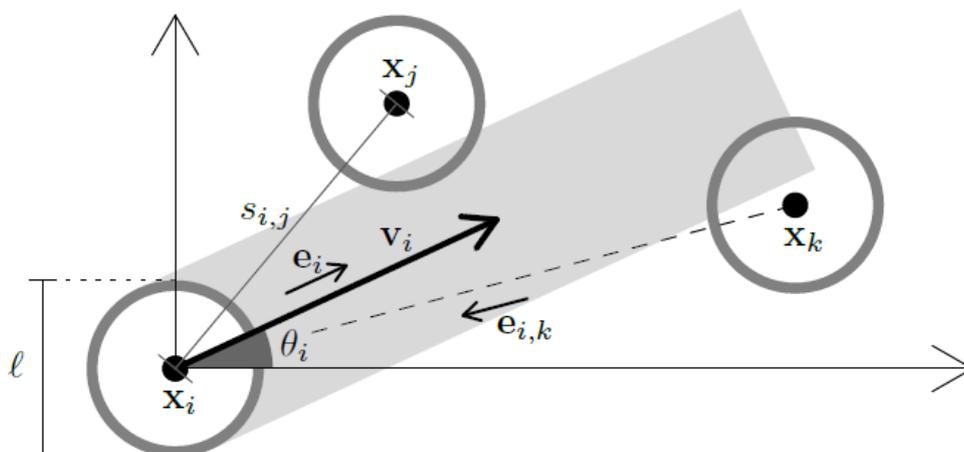


Abbildung 35: Ausgangsbasis [20, p. 227]

Somit wird der Bewegungskorridor der Person  $i$  durch das graue Band in Abbildung 35 dargestellt und die Vorderpersonen innerhalb des Korridors durch

$$J_i = \left\{ j, e_i \cdot e_{i,j} \leq 0 \text{ und } |e_i^\perp \cdot e_{i,j}| \leq \frac{l}{s_{i,j}} \right\} \quad (16)$$

beschrieben. Der geringste Abstand der Personen (hier: Person  $j$  zu Person  $i$ ) wird bezeichnet als:

$$s_i = \min_{j \in J_i} s_{i,j} \quad (17)$$

Das Geschwindigkeitsmodell ist eine *optimal velocity function (OV function)*  $V(\cdot)$ . Diese wurde aus den Fahrzeugfolgmodellen übernommen und orientiert sich am Abstand zur nächsten Person im Bewegungskorridor. Beträgt der Abstand weniger als der Durchmesser  $l$ , ist die Geschwindigkeit 0. Ist der Abstand größer als  $l$  steigt die Geschwindigkeit der Person linear bis zur *Wunschgeschwindigkeit*  $v_0 = \frac{s-l}{T}$  an. Die *Zeitlücke* wird durch den Parameter  $T$  definiert.

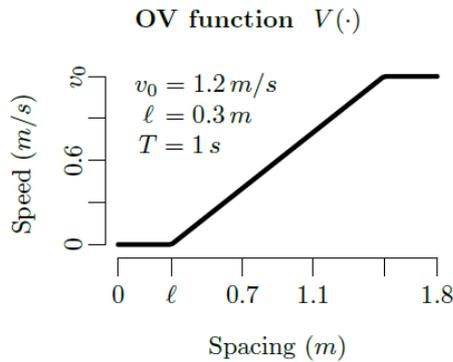


Abbildung 36: Geschwindigkeitsmodell  $V(\cdot)$  [20, p. 228]

Durch die *optimal velocity function* sind Kollisionen somit ausgeschlossen, da eine Person vor Auftreffen auf eine andere Person stoppt.

Das *Richtungsmodell*  $e_i$  wird mithilfe einer *Repulsion function*  $R(\cdot)$  (Abstoßungsfunktion) beschrieben.

$$e_i(x_i, x_j, \dots) = \frac{1}{N} \left( e_0 + \sum_j R(s_{i,j}) e_{i,j} \right) \quad (18)$$

Die Höhe der Abstoßung (Repulsion) ist dabei durch die *Distanz* (Spacing) zu den *Nachbaragenten*  $s_{i,j}$  bestimmt.  $N$  ist eine *Normierungskonstante* damit  $\|e_i\| = 1$  und die Abstoßungsfunktion wird durch

$$R(s) = a \cdot e^{\left(\frac{l-s}{D}\right)} \quad (19)$$

berechnet. Der *Reaktionsabstand*  $D$  ( $D > 0$ ) bestimmt den Abstand und daraus folgend auch die Zeitspanne wann eine Person einer Kollision ausweicht, während der Kalibrierungsfaktor  $a$  ( $a > 0$ ) die Stärke des Ausweichmanövers bestimmt.

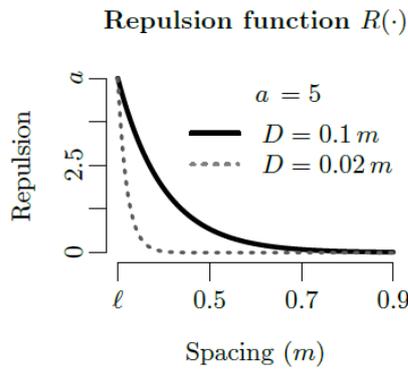


Abbildung 37: Abstoßungsfunktion [20, p. 228]

Somit ist die *Geschwindigkeit einer Person*  $\dot{x}_i$  das Kreuzprodukt aus *optimal velocity function* und dem Richtungsmodell:

$$\dot{x}_i = V\left(s_i(x_i, x_j, \dots)\right) \times e_i(x_i, x_j, \dots) \quad (20)$$

In der Simulation wird die stetige Differentialgleichung mithilfe des expliziten Euler-Verfahrens in diskrete Zahlenschritte transformiert. Für *jede Person*  $i$  erfolgt eine Berechnung der neuen Position in den *Zeitschritten*  $t$  mit:

$$1. \quad e_i(t) = \frac{1}{N} \left( e_0(x_i(t), t) + \sum_j R\left(s_{i,j}(t)\right) e_{i,j}(t) \right) \quad (21)$$

$$2. \quad J_i = \left\{ j, e_i(t) \cdot e_{i,j}(t) \leq 0 \text{ and } |e_i^\perp(t) \cdot e_{i,j}(t)| \leq \frac{l}{s_{i,j}(t)} \right\} \quad (22)$$

$$3. \quad s_i(t) = \min_{j \in J_i} s_{i,j}(t) \quad (23)$$

$$4. \quad x_i(t + dt) = x_i(t) + dt \times V(s_i(t)) e_i(t) \quad (24)$$

Im ersten Schritt wird somit die Richtung des Agenten festgelegt. Anschließend erfolgt die Definition des Korridors, in welchem Kollisionen auftreten können. Danach wird der Agent mit dem geringsten Abstand ausgewählt und im vierten Schritt die neue Position der Person durch deren alte Position und dem Kreuzprodukt aus Zeitlücke und der Geschwindigkeit in berechneter Richtung ermittelt. [77]

## 5.2 Definition der Modellparameter

In der Simulation der Fahrtreppe in NetLogo ist die Einstellung der folgenden Parameter möglich:

Tabelle 10: Parameter, Wertebereich und Bedeutung der NetLogo Simulation

Parameter	Option/Wertebereich	Bedeutung
Dcretion-model	Spacing / TTC	Richtungsmodell (time to collision/Abstand)
Predestrian-nb		Anzahl der ankommenden Fußgänger
<b>Fußgängermodell</b>		
v0	0.0 – 2.0 [m/s]	Wunschgeschwindigkeit
T	0.1 – 3.0 [s]	Zeitlücke
l	0.00 – 1.00 [m]	Größe (Durchmesser) der Personen
a	0.0 – 10.0	Kalibrierungsfaktor der Abstoßungsfunktion: je höher a, desto stärker erfolgt eine Reaktion (Abstoßung) auf Nachbaragenten
D	0.05 – 1.00 [m]	Reaktionsabstand der Abstoßungsfunktion: je höher D, desto früher/weiter erfolgt die Reaktion auf Nachbaragenten
h0	-180 – 180 [°]	Winkel des ankommenden Personenstroms
<b>Fahrtreppe</b>		
ESC?	On / Off	Vorhandensein der Fahrtreppe
ESClength	1 – 10 [m]	Länge der Fahrtreppe
ESCwidth	0.5 – 2.0 [m]	Breite der Fahrtreppe
VE	0.0 – 5.0 [m/s]	Geschwindigkeit der Fahrtreppe
<b>Zyklus</b>		
cycle?	On / Off	Vergleich von Engstelle und Fahrtreppe im stationären Zustand
t-wait	10 – 500 [s]	Wartezeit zum stationären Zustand
<b>weitere Einstellungen</b>		
Create/Remove Objects	CRT / DEL	Einblenden von Hindernissen
write traj?	On / Off	Trajektorien in Textdokument ausgeben

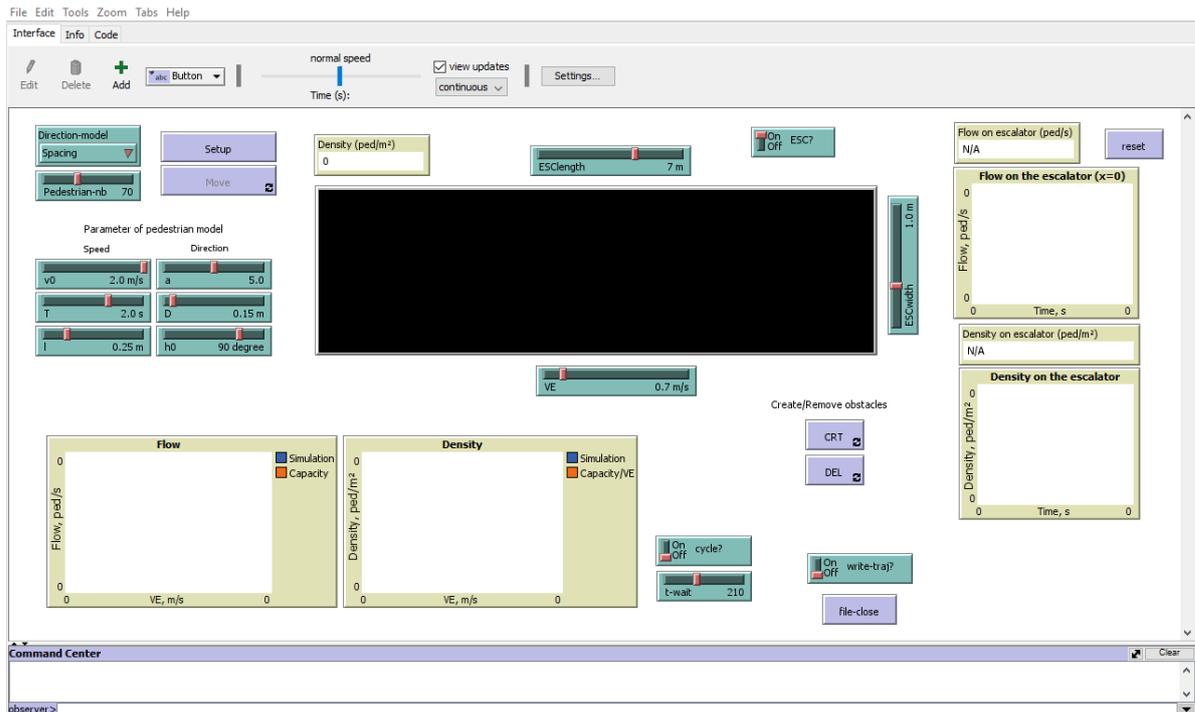


Abbildung 38: Startoberfläche „Fahrtreppe“ im Programm NetLogo

Von der Simulation wird einerseits der Fluss  $J$  und die Dichte auf der Fahrtreppe  $D_{ESC}$  (jeweils als Diagramm über die Zeit und als aktuellen Wert mit fünf Nachkommastellen Genauigkeit) und andererseits für Experimente mit dem Zyklus je ein Fluss-Fahrtreppengeschwindigkeits- und Dichte-Fahrtreppengeschwindigkeits-Diagramm ausgegeben. Zusätzlich wird die Dichte vor Simulationsstart  $D_{ST}$  angezeigt, welche später nach Start die Dichte vor der Fahrtreppe (Eingangsdichte)  $D_E$  wiedergibt.

## 5.3 Simulationen

### Stationärer Zustand

Oft weichen die ermittelten Ergebnisse am Anfang einer Simulation von denen im späteren Verlauf ab, da sich das System noch nicht im stationären Zustand befindet.

Im stationären Zustand erfolgt dagegen keine zeitliche Änderung der betrachteten Größe, was ein guter Indikator für das Verlassen des Anfangszustandes ist [10].

Die im folgenden präsentierten Simulationsergebnisse wurden im stationären Zustand gewonnen. Dadurch sind die Ergebnisse besser vergleichbar und unabhängig vom zufällig erzeugten Anfangszustand der Simulation. Darstellungen in Diagrammen wurden außerdem zwischen den Messwerten linear interpoliert.

### 5.3.1 Versuch 1: Validierung des *collision-free speed model for pedestrian dynamics* mit empirischen Daten

In diesem Kapitel wird das in NetLogo simulierte *collision-free speed model for pedestrian dynamics* mit verschiedenen (möglichst) realitätsnahen Parametern ausgeführt und die Ergebnisse mit den in der Praxis beobachteten Werten verglichen. Da die Geschwindigkeit der Fahrtreppe nur auf eine Nachkommastelle eingestellt werden kann, werden in Versuch 1 die unterschiedlichen Breiten nach EN 115-1 mit einer Nenngeschwindigkeit von 0.5 m/s untersucht.

Die Geschwindigkeit der Fußgänger  $v_0$  wird nach Kapitel 2.3.2 auf 1.3 m/s gesetzt. Der Platzbedarf wird nach Kapitel 2.3.3 mit  $0.10 \text{ m}^2 - 0.15 \text{ m}^2$  angegeben. Die Grundfläche einer Person ist dabei vereinfacht als Ellipse dargestellt. Da im hier verwendeten Modell die Personen jedoch als kreisförmige Scheibe dargestellt sind, ist eine Umrechnung notwendig.

Die Fläche  $A$  einer Scheibe wird mit der *Kreiszahl*  $\pi$  und dem *Radius*  $r$  berechnet.

$$A = \pi \cdot r^2 \quad (25)$$

Die Fläche  $A$  einer Ellipse wird mit der *Kreiszahl*  $\pi$  und den *Halbachsen*  $a$  bzw.  $b$  berechnet.

$$A = \pi \cdot a \cdot b \quad (26)$$

Bei Einsetzen des mittleren Platzbedarfs nach [4] bzw. den Maßen der Ellipse nach [6] beträgt der *Durchmesser der Scheibe*  $l$  (*Agentengröße*) ca. 0.43 m, nach den von [5] verwendeten Werten einer erwachsenen Person in Sommerkleidung ca. 0.36 Meter. Somit erscheint eine Einstellung des Parameters  $l = 0.40 \text{ m}$  als realistisch.

Beim Start der Simulation mit diesen Werten kommt es jedoch bei einer Breite von 0.60 m nach wenigen Sekunden zu Verstopfungen. Auch bei einer Verringerung der Agentengröße auf  $l$  auf 0.35 m ist dies der Fall. Somit erfolgt eine Einstellung des Parameters  $l$  auf 0.30 m. Eine Untersuchung der Personengröße  $l$  erfolgt in Versuch 4.



Abbildung 39: Verstopfung bei einer Agentengröße  $l$  von 0.35 m bzw. 0.40 m

Da die Ergebnisse im gestauten Zustand beobachtet werden sollen, muss die Abstoßungsfunktion auf entsprechende Werte eingestellt werden:

- $a = 5.0$
- $D = 0.10 \text{ m}$

In der Praxis würden die Personen mit somit erst sehr spät (d. h. mit sehr geringem Abstand zur nächsten Person) und mit üblicher Abweichung von ihrem Wunschkurs reagieren (können).

Die Menge der ankommenden Personen wird mit 70 Personen auf der Grundeinstellung belassen, was einen ausreichend großen ankommenden Personenstrom für gestaute Zustände erzeugt.

Für die Zeitlücke  $T$  wurden in Engstellen Werte von 0.5 s bzw. 0.6 s und in Korridoren 0.8 s bzw. 1.0 s kalibriert. Der Wert wird aufgrund des engstellenähnlichen Charakters der Fahrtreppe auf 0.6 s gesetzt. Die Länge der Fahrtreppe bleibt bei voreingestellten 7 m.

Für jeden Teilversuch werden als Stichprobe 10 Versuchsreihen durchgeführt. Dabei erfolgt eine Dokumentation der vom Programm ausgegebenen Parameter nach 30 s, 60 s, 120 s, 300 s und 600 s. Es folgt eine Berechnung der statistischen Kenngrößen Spannweite, Durchschnitt, Median, Varianz und Standardabweichung. Versuch 1 umfasst 630 Messwerte. Alle Originaldaten sind im Anhang aufgelistet.

Tabelle 11: Auswertung Versuch 1 (Dichte in Personen pro Quadratmeter, Fluss in Personen pro Sekunde)

Zeitpunkt Messung	0 s	30 s				60 s				120 s				300 s				600 s			
Versuch 1.1: Breite = 0.60 m																					
	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	J <sub>s</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	J <sub>s</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	J <sub>s</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	J <sub>s</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	J <sub>s</sub>
Durchschnitt	0.61	4.81	2.53	1.13	1.88	4.87	2.82	1.04	1.73	4.87	2.96	0.98	1.64	4.85	3.06	0.96	1.59	4.92	3.09	0.95	1.58
Minimum	0.20	4.60	2.27	0.95	1.58	4.70	2.67	0.95	1.58	4.70	2.89	0.94	1.57	4.70	3.02	0.94	1.57	4.80	3.07	0.94	1.57
Maximum	1.20	5.10	2.67	1.25	2.08	5.00	2.91	1.09	1.82	5.00	3.01	1.01	1.68	5.00	3.07	0.97	1.62	5.00	3.10	0.97	1.62
Spannweite	1.00	0.50	0.40	0.30	0.50	0.30	0.24	0.14	0.23	0.30	0.12	0.07	0.12	0.30	0.05	0.03	0.05	0.20	0.03	0.03	0.05
Median	0.60	4.75	2.57	1.15	1.91	4.90	2.82	1.04	1.73	4.90	2.96	0.99	1.65	4.90	3.06	0.96	1.60	4.90	3.09	0.95	1.58
Varianz	0.08	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Standardabweichung	0.28	0.16	0.12	0.09	0.15	0.11	0.06	0.04	0.07	0.09	0.03	0.02	0.04	0.10	0.01	0.01	0.01	0.08	0.01	0.01	0.02
Versuch 1.2: Breite = 0.80 m																					
	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	J <sub>s</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	J <sub>s</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	J <sub>s</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	J <sub>s</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	J <sub>s</sub>
Durchschnitt	0.81	4.11	2.67	1.40	1.74	4.12	3.06	1.40	1.75	4.22	3.23	1.37	1.72	4.18	3.32	1.37	1.71	4.19	3.36	1.36	1.70
Minimum	0.60	4.00	2.52	1.31	1.64	4.00	2.97	1.34	1.68	4.00	3.14	1.34	1.68	3.90	3.30	1.35	1.69	4.10	3.33	1.35	1.69
Maximum	1.10	4.20	3.08	1.52	1.90	4.30	3.30	1.56	1.95	4.40	3.35	1.41	1.76	4.40	3.36	1.38	1.73	4.30	3.38	1.37	1.71
Spannweite	0.50	0.20	0.56	0.21	0.26	0.30	0.33	0.22	0.28	0.40	0.21	0.07	0.09	0.50	0.06	0.03	0.04	0.20	0.05	0.02	0.03
Median	0.80	4.10	2.65	1.38	1.73	4.10	3.04	1.37	1.71	4.25	3.23	1.37	1.71	4.20	3.32	1.37	1.71	4.20	3.37	1.36	1.70
Varianz	0.03	0.01	0.03	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Standardabweichung	0.17	0.07	0.16	0.07	0.08	0.10	0.09	0.06	0.08	0.12	0.06	0.02	0.03	0.15	0.02	0.01	0.01	0.09	0.02	0.01	0.01
Versuch 1.3: Breite = 1.00 m																					
	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J / J <sub>s</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J / J <sub>s</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J / J <sub>s</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J / J <sub>s</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J / J <sub>s</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J / J <sub>s</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>
Durchschnitt	0.74	3.46	2.75	1.71	3.44	3.07	1.71	3.41	3.26	1.72	3.42	3.38	1.72	3.47	3.42	1.73	3.47	3.42	1.73	3.47	3.42
Minimum	0.60	3.40	2.62	1.56	3.30	3.02	1.62	3.30	3.22	1.68	3.30	3.34	1.70	3.40	3.40	1.72	3.40	3.40	1.72	3.40	3.40
Maximum	0.90	3.50	2.85	1.85	3.60	3.12	1.80	3.50	3.29	1.75	3.50	3.40	1.74	3.60	3.44	1.74	3.60	3.44	1.74	3.60	3.44
Spannweite	0.30	0.10	0.23	0.29	0.30	0.10	0.18	0.20	0.07	0.07	0.20	0.06	0.04	0.20	0.04	0.02	0.20	0.04	0.02	0.20	0.04
Median	0.75	3.50	2.78	1.71	3.40	3.08	1.72	3.40	3.27	1.72	3.40	3.39	1.72	3.45	3.42	1.73	3.45	3.42	1.73	3.45	3.42
Varianz	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
Standardabweichung	0.12	0.05	0.07	0.10	0.11	0.04	0.06	0.07	0.02	0.03	0.06	0.02	0.01	0.08	0.01	0.01	0.08	0.01	0.01	0.08	0.01

Die Versuche zeigen, dass die Simulation und das zugrundeliegende Modell konstante Werte für eine Vielzahl von unterschiedlichen Startbedingungen ausgeben. Obwohl die Startdichte  $D_{ST}$  eine hohe Spannweite hat, zeigen die Resultate (Tabelle 11, 600 s) bei allen drei Versuchen geringe Spannweiten. Die Streuung der Startdichte nimmt dabei bei größer werdender Fahrtreppe ab.

Die durchschnittliche Eingangsdichte  $D_E$  steigt in im Vergleich von erster zu letzter Messung in allen drei Versuchen leicht an, wobei das Wachstum mit größerer Fahrtreppebreite geringer ausfällt.  $D_E$  ist zusätzlich bei einer geringeren Breite erheblich höher, was auch in Versuch 3 beobachtet werden kann. Die Spannweite verringert sich dabei über die Versuche von 0.50 auf 0.10.

Zusätzlich ist die Entwicklung zum stationären Zustande zu beobachten. In allen drei Versuchen sinkt die Spannweite von  $D_{ESC}$  und  $J$  kontinuierlich, je länger die Simulation ausgeführt wird (Abb. 40). Auch die Standardabweichung nimmt kontinuierlich ab. Eine Ausnahme bildet lediglich die zweite Messreihe bei Versuch 1.2 nach 60 Sekunden. Dabei erhöht sich die Spannweite des Flusses um 0.01, jedoch ist dies einem hohen Wert in Versuch 1.2-8 geschuldet. Ohne diesen Messwert würde die Spannweite 0.09 (anstatt 0.22) betragen und somit ebenfalls kontinuierlich sinken.

Die Ergebnisse streuen somit weniger und nähern sich unabhängig von den zufälligen Anfangsbedingungen und eventuellen Anomalien dem wahren Wert an. Der genaue Zeitpunkt der Messung wird damit weniger relevant, was auf ein Erreichen des stationären Zustands bei hindeutet. Die Spannweite ist insgesamt jedoch ein absolutes Maß und daher über verschiedene Simulationseinstellungen nur begrenzt vergleichbar.

Der spezifische Fluss als Maß für die Leistungsfähigkeit sinkt bei Versuch 1.1 und 1.2 und bleibt bei Versuch 1.3 ungefähr konstant. Da die Fahrtreppenbreite von 1.00 Meter den vergleichsweise höchsten  $J_s$  erreicht, deutet dies auf die beste Effizienz im Sinne von Kapazität zu benötigtem Platz hin. Die Dichte auf der Fahrtreppe steigt bei allen Versuchen über die Zeit an, wobei bei geringerer Breite eine niedrigere Dichte vorherrscht.

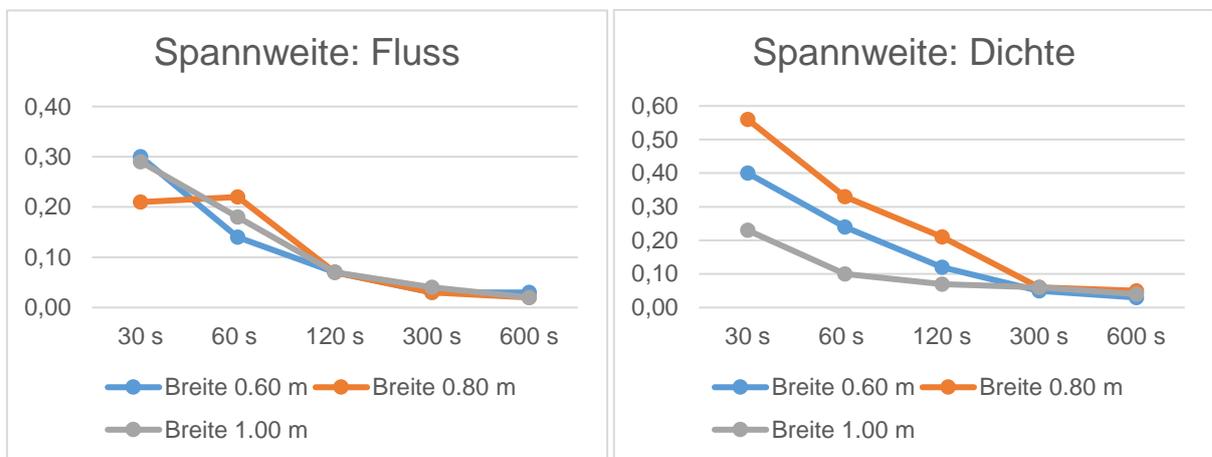


Abbildung 40: Veränderung der Spannweite über die Zeit

Die graphische Darstellung in NetLogo lässt bei Versuch 1.2 und 1.3 ein kurzes Absinken des Flusses sofort nach Start der Simulation zu erkennen (Abb. 41). Die Tiefe des Absinkens scheint mit der Breite der Fahrttreppe zuzunehmen, jedoch ist dies aufgrund der unterschiedlichen Maßstäbe der Achsen schwer miteinander zu vergleichen. Als wahrscheinlicher Grund kommt in Frage, dass die Fahrttreppe in den ersten Sekunden nach Simulationsstart (fast) leer ist, die Ergebnisse jedoch schon in das Diagramm eingetragen werden.

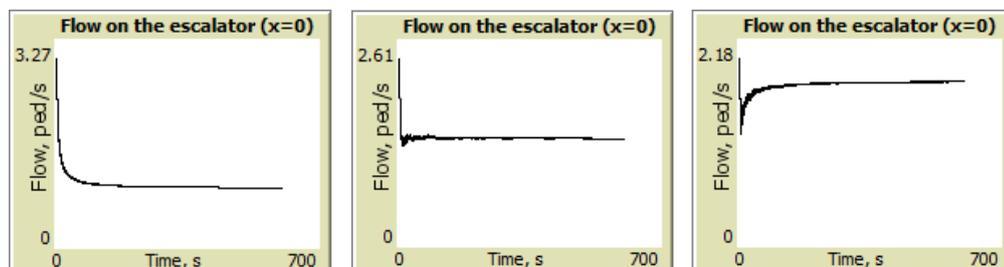


Abbildung 41: V1.1-5 / V1.2-9 / V1.3-9

In NetLogo befinden sich die Personen vor Starten der Simulation zufällig verteilt sowohl vor und hinter, als auch auf der Fahrtreppe. Nach dem Beginn bildet sich sofort ein Stau mit 4 – 5 Personenreihen über der gesamten Breite der Barriere (blau) und dem Fahrtreppeneingang. Dies resultiert einerseits auf der gewünschten hohen Personenzahl  $n_b$  und andererseits aus den Einstellungen des Skripts, dass die Agenten nach rechts streben und nicht direkt zur Landestelle der Fahrttreppe.

Bei Versuch 1.1 ist eine einzelne versetzte Belegung der Stufen durch die Agenten zu sehen.

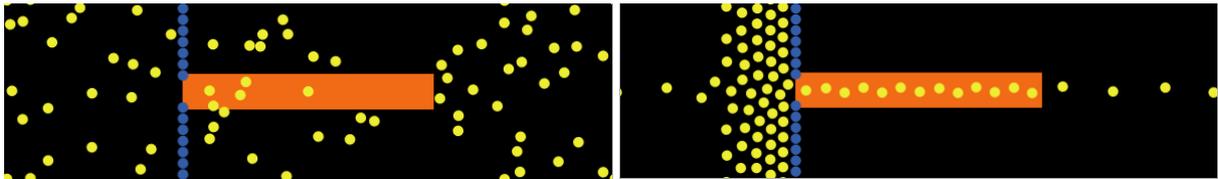


Abbildung 42: V1 – vor Start der Simulation / V1.1-10

Ab einer Fahrttreppebreite von 0.80 m in Versuch 2 erfolgt eine teilweise doppelte Besetzung der Stufen. Jedoch resultiert aus dieser kein höherer Fluss. Insgesamt kann eine (teilweise) regelmäßige oder unregelmäßige Belegung der Stufen beobachtet werden.

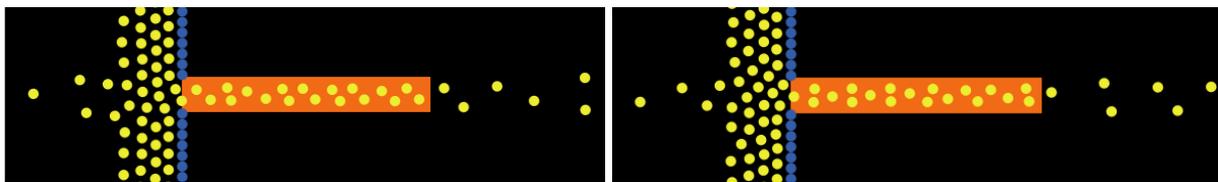


Abbildung 43: V1.2-4 ( $J = 1.37 \text{ ped/min}$ ,  $D = 3.38 \text{ ped/m}^2$ ) / V1.2-5 ( $J = 1.35 \text{ ped/min}$ ,  $D = 3.33 \text{ ped/m}^2$ )

Die Häufigkeit von regelmäßigen und musterförmigen Besetzungsgraden nimmt bei Versuch 1.3 mit 1.00 m breiter Fahrttreppe weiter zu. Die Agenten stehen dabei wie in Versuch 1.1 (jetzt in einer Doppelreihe) versetzt auf der Fahrttreppe oder in einer 2-1-2 Personenverteilung (siehe Anfang der Fahrttreppe V1.3-9 in Abbildung 44).

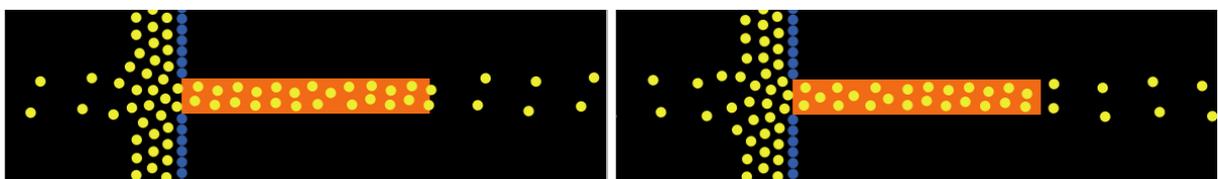


Abbildung 44: V1.3-5 (niedrigster Fluss und Dichte) / V1.3-9 (höchster Fluss und Dichte)

Versuch 1 liegt deutlich unter den Werten der theoretischen Kapazität, wobei die Differenz mit größerer Fahrtreppenbreite zunimmt (Tab. 12). Jedoch finden sich Überschneidungen mit PM [5], welche von einer praktischen Kapazität in Höhe von 74 % der theoretischen Kapazität ausgehen (s. Tabelle 4). Diese Werte wurden bei  $b = 0.60$  nur um 1.5 Personen pro Minute überschritten und auch bei 0.80 m bzw. 1.00 m sind die Angaben von [5] nur leicht höher, wobei die Differenz jedoch zunimmt. Die ebenfalls aus der theoretischen Kapazität abgeleiteten Angaben von Barney [58] liegen jedoch deutlich unter den Werten von Versuch 1.

Tabelle 12: Vergleich Versuch 1 mit theoretischer Kapazität in Personen pro Minute / Personen pro Stunde

Breite	th. Kapazität $C_{th}$	Versuch 1 (600 s)	Abweichung Versuch 1	erreichte th. Kapazität
0.60 m	75 / 4500	56.88 / 3420	- 24,16 %	75.84 %
0.80 m	112.50 / 6750	81.78 / 4896	- 27.47 %	72.53 %
1.00 m	150 / 9000	103.62 / 6228	- 30.80 %	69.20 %

Ein Vergleich mit der EN 115-1 [52] zeigt bei 0.60 m einen 5.2 % niedrigeren Fluss bei Versuch 1. Bei 0.80 m bzw. 1.00 m liegen die Werte 2.2 % bzw. 3.6 % höher als [52].

Versuch 1 liegt im von Weidmann [4] angegebenen Intervall in Höhe von 41 % – 80 % der erreichbaren theoretischen Leistungsfähigkeit. Auch ist Versuch 1.3 knapp unter der maximalen Kapazität des Eintrittsquerschnitts bei einer doppelspurigen Fahrtreppe in Höhe von 105 Personen pro Minute, was gleichzeitig die maximale praktische Durchschnittsleistungsfähigkeit darstellt. Auch bewegt sich Versuch 1 im sehr breiten Intervall der Literaturlauswertung von Westphal [36]. Die eigenen Untersuchungen des Autors liegen mit einer Kapazität von 100 Personen pro Stunde unter andauerndem Stau geringfügig niedriger als Versuch 1.3. Die Versuche 1.1 und 1.2 sind dagegen im Intervall der maximalen Leistungsfähigkeit bei Belastungsspitzen innerhalb eines einminütigen Messungszeitintervalls.

Die Beobachtungen von Oeding [67] liegen unter den Ergebnissen von Versuch 1. Der maximal beobachtete Durchfluss ist bedeutend geringer, auch würde nach seinen Beobachtungen in der Praxis bereits bei einer alternativen Treppe ein signifikanter Personenanteil diese nutzen, da der Rückstau vor der Fahrtreppe zu groß ist. Die mit 80 – 90 Personen pro Minute erreichbare maximale Kapazität wird somit übertroffen.

Dagegen wird die von [70] gegebene Kapazität bei 0.60 m Breite deutlich überschritten. Die Werte bei 0.80 m bzw. 1.00 m decken sich dabei mit der theoretischen Kapazität.

Ein Vergleich zur Studie von Bodendorf et al. [73] zeigt, dass die Kapazität aus Versuch 1 (Breite 1.00 m) exakt mit der leistungsfähigsten aufwärtsfahrenden Fahrtreppe im Bahnhof übereinstimmt. Dies gilt jedoch nur für ein Zeitintervall von 10 Sekunden und stellt somit einen nur kurz erreichten Spitzenbelastungswert wieder. Im selben Zeitintervall wurde außerdem mit ca. 107.2 Personen pro Minute ein höherer Fluss bei einer abwärtsfahrenden Fahrtreppe im Bahnhof gemessen. Die Durchschnittswerte liegen jedoch mit maximal 77.77

Personen pro Minute deutlich unter den Ergebnissen aus Versuch 1. Auch wurden die Werte aus Versuch 1 im Einkaufscenter von keiner Fahrtreppe, auch nicht bei einem sehr kurzen Messzeitintervall, erreicht.

Eine Übersicht der bei einer Geschwindigkeit von 0.5 m/s berechneten bzw. ermittelten Werte ist im Folgenden zu sehen.

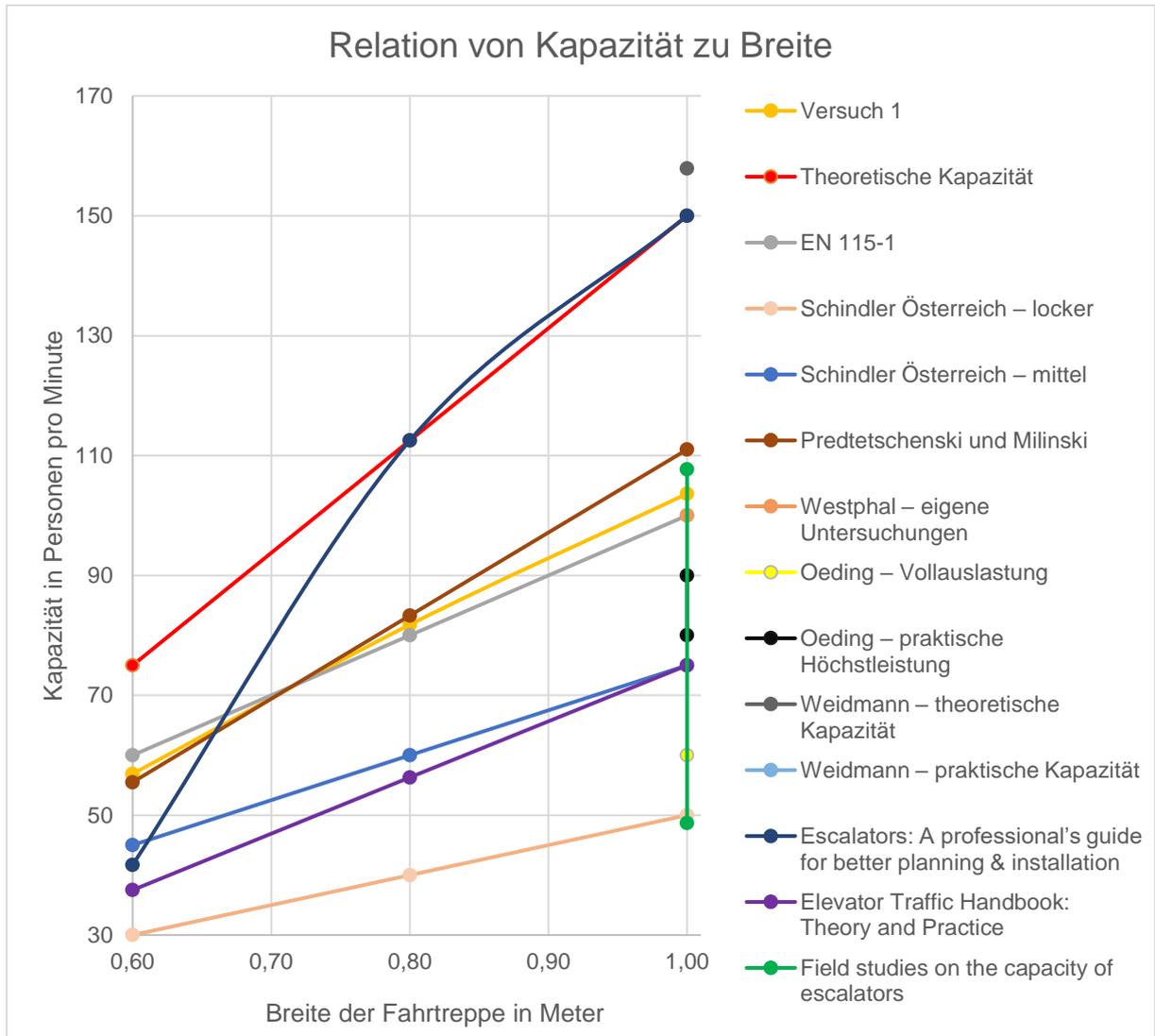


Abbildung 45: Vergleich Versuch 1 mit Angaben aus der Literatur

### 5.3.2 Versuch 2: Einfluss der Geschwindigkeit

In Versuch 2 soll der Einfluss der Geschwindigkeit auf Fluss und Dichte, sowie das Verhalten der Agenten vor und auf der Fahrtreppe untersucht werden. Die NetLogo-Simulation wird dazu mit den Parametern aus Versuch 1 eingestellt. Im Vergleich zur EN 115-1 fällt der Fluss in Versuch 1 jedoch geringfügig zu hoch aus. Daher wird die Zeitlücke T auf 0.7 s erhöht, was einen minimal niedrigeren Fluss verursacht:

- Breite 0.60 m: J = ca. 52.8 Personen pro Minute ( $J_{EN\ 115-1} = 60$  Personen pro Minute)
- Breite 0.80 m: J = ca. 78 Personen pro Minute ( $J_{EN\ 115-1} = 80$  Personen pro Minute)
- Breite 1.00 m: J = ca. 97.2 Personen pro Minute ( $J_{EN\ 115-1} = 100$  Personen pro Minute)

Die Breite der Fahrtreppe wird auf 1.00 m gesetzt, da für dieses Maß die meisten Daten vorliegen.

Es wurden insgesamt 15 Teilversuchen mit je 10 Messreihen im stationären Zustand nach 600 Sekunden durchgeführt. Die in Summe 600 Messergebnisse werden mit den statistischen Kenngrößen wie in Versuch 1 ausgewertet und sind in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13: Auswertung Versuch 2 (Dichte in Personen pro Quadratmeter, Fluss in Personen pro Sekunde)

	V2.1: vESC = 0.1 m/s				V2.2: vESC = 0.2 m/s				V2.3: vESC = 0.3 m/s				V2.4: vESC = 0.4 m/s				V2.5: vESC = 0.5 m/s			
	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J
Durchschnitt	0.65	2.51	5.59	0.58	0.72	3.05	4.70	0.96	0.75	3.32	3.97	1.21	0.64	3.45	3.58	1.45	0.82	3.50	3.22	1.63
Minimum	0.50	2.40	5.45	0.55	0.40	2.90	4.65	0.94	0.50	3.20	3.92	1.20	0.20	3.40	3.56	1.44	0.60	3.40	3.18	1.61
Maximum	1.00	2.70	5.70	0.59	1.00	3.20	4.74	0.97	1.10	3.40	4.01	1.23	1.00	3.60	3.61	1.46	1.30	3.70	3.25	1.65
Spannweite	0.50	0.30	0.25	0.04	0.60	0.30	0.09	0.03	0.60	0.20	0.09	0.03	0.80	0.20	0.05	0.02	0.70	0.30	0.07	0.04
Median	0.60	2.50	5.62	0.58	0.75	3.05	4.69	0.96	0.70	3.30	3.97	1.21	0.65	3.40	3.59	1.45	0.80	3.50	3.22	1.62
Varianz	0.03	0.01	0.01	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.05	0.01	0.00	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00
Standardabweichung	0.16	0.09	0.10	0.02	0.18	0.08	0.03	0.01	0.18	0.06	0.03	0.01	0.22	0.08	0.02	0.01	0.21	0.08	0.02	0.01
	V2.6: vESC = 0.6 m/s				V2.7: vESC = 0.7 m/s				V2.8: vESC = 0.8 m/s				V2.9: vESC = 0.9 m/s				V2.10: vESC = 1.0 m/s			
	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J
Durchschnitt	0.69	3.64	2.90	1.76	0.76	3.63	2.64	1.87	0.67	3.64	2.45	1.97	0.73	3.53	2.29	2.07	0.82	3.66	2.14	2.16
Minimum	0.40	3.50	2.87	1.73	0.30	3.40	2.62	1.85	0.20	3.10	2.44	1.96	0.20	3.30	2.27	2.05	0.50	3.20	2.13	2.15
Maximum	1.10	3.90	2.92	1.77	1.00	3.80	2.67	1.88	1.10	4.00	2.46	1.98	1.10	3.80	2.30	2.08	1.10	3.90	2.15	2.17
Spannweite	0.70	0.40	0.05	0.04	0.70	0.40	0.05	0.03	0.90	0.90	0.02	0.02	0.90	0.50	0.03	0.03	0.60	0.70	0.02	0.02
Median	0.60	3.60	2.90	1.76	0.80	3.65	2.65	1.87	0.65	3.70	2.45	1.98	0.80	3.55	2.29	2.07	0.85	3.70	2.14	2.16
Varianz	0.07	0.02	0.00	0.00	0.04	0.02	0.00	0.00	0.07	0.06	0.00	0.00	0.08	0.02	0.00	0.00	0.06	0.04	0.00	0.00
Standardabweichung	0.26	0.13	0.02	0.01	0.21	0.13	0.01	0.01	0.27	0.24	0.01	0.01	0.29	0.16	0.01	0.01	0.24	0.19	0.01	0.01
	V2.11: vESC = 1.1 m/s				V2.12: vESC = 1.2 m/s				V2.13: vESC = 1.3 m/s				V2.14: vESC = 1.4 m/s				V2.15: vESC = 1.5 m/s			
	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J
Durchschnitt	0.86	3.56	2.03	2.24	0.77	3.72	1.92	2.31	0.74	3.64	1.83	2.38	0.71	3.66	1.75	2.45	0.77	3.66	1.67	2.51
Minimum	0.50	3.20	2.01	2.22	0.40	3.50	1.91	2.30	0.50	3.40	1.81	2.36	0.30	3.40	1.73	2.43	0.50	3.30	1.66	2.50
Maximum	1.40	4.00	2.04	2.26	1.20	4.00	1.93	2.32	1.00	3.90	1.84	2.41	1.00	3.80	1.76	2.47	1.00	3.90	1.68	2.54
Spannweite	0.90	0.80	0.03	0.04	0.80	0.50	0.02	0.02	0.50	0.50	0.03	0.05	0.70	0.40	0.03	0.04	0.50	0.60	0.02	0.04
Median	0.90	3.50	2.03	2.24	0.65	3.75	1.92	2.31	0.70	3.60	1.82	2.38	0.75	3.65	1.74	2.45	0.75	3.65	1.66	2.51
Varianz	0.08	0.07	0.00	0.00	0.10	0.03	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00	0.00	0.06	0.02	0.00	0.00	0.03	0.04	0.00	0.00
Standardabweichung	0.28	0.26	0.01	0.01	0.32	0.17	0.01	0.01	0.18	0.16	0.01	0.02	0.24	0.14	0.01	0.02	0.18	0.20	0.01	0.01

In der Simulation sind besonders bei niedrigen Geschwindigkeiten sehr unterschiedliche Personenverteilungen zu erkennen. Analog zu Versuch 1 (s. Abbildung 43) bildet sich im stationären Zustand eine (teil-) regelmäßige oder unregelmäßige Besetzung der Stufen aus, wobei der Fluss und die Dichte bei regelmäßiger Besetzung höher sind.

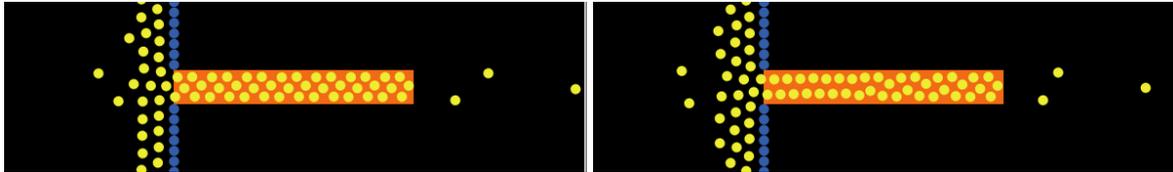


Abbildung 46: V2.1-2 ( $J = 0.59 \text{ ped/s}$ ,  $D = 5.68 \text{ ped/m}^2$ ) / V2.1-3 ( $J = 0.56 \text{ ped/s}$ ,  $D = 5.45 \text{ ped/m}^2$ )

Mit steigender Fahrtreppengeschwindigkeit wird außerdem der Abstand der Agenten auf der Fahrtreppe erhöht, da diese die Fahrtreppe zu langsam betreten. Der Stau vor der Fahrtreppe wird tendenziell größer, da sich im Verlauf des Versuchs (ab ca. 1.2 m/s) eine neue, jedoch dynamische und instabile, Reihe an wartenden Personen bildet. Die Eingangsdichte bleibt nach der anfänglichen Steigerung jedoch näherungsweise konstant (Abb. 47). Dies ist der Fall, da bei niedriger Geschwindigkeit viele Personen die Fahrtreppe belegen (s. hohe Dichte auf der Fahrtreppe bei niedrigen Geschwindigkeiten) und folglich aufgrund der konstanten Personenzahl  $n_b$  nur vergleichsweise wenige Personen nachströmen.

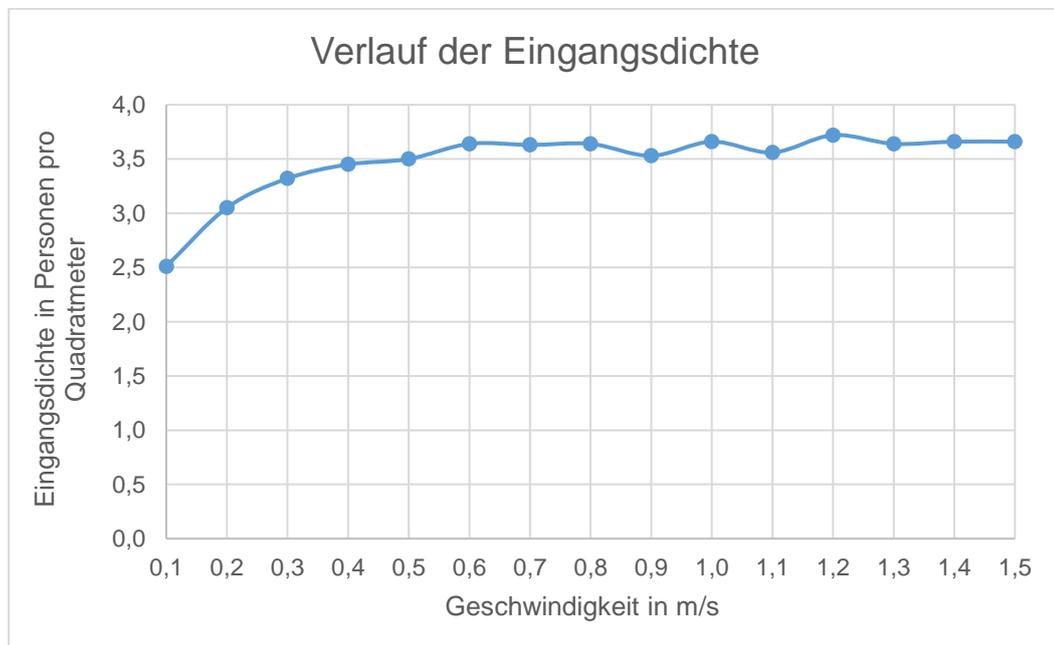


Abbildung 47: Verlauf der Eingangsdichte bei Erhöhung der Geschwindigkeit in Versuch 2

Es verändert sich daher auch der Einzugsstrichter der Fahrtreppe. Bei niedrigen Geschwindigkeiten hat dieser eine schmale Form und der ankommende Personenstrom kann direkt die Fahrtreppe betreten. Bei höheren Geschwindigkeiten kommt es somit trotz des größeren Flusses der Fahrtreppe zu mehr Stauungen am Eingang. Aufgrund der gleichbleibenden Personenzahl  $n_b$  wird der ausfließende und folglich auch der einfließende Personenstrom erhöht. Diese Mehrzahl an Personen, sowie die wegen der höheren Geschwindigkeit schneller aufnehmende Fahrtreppe vergrößern den Einzugsstrichter.

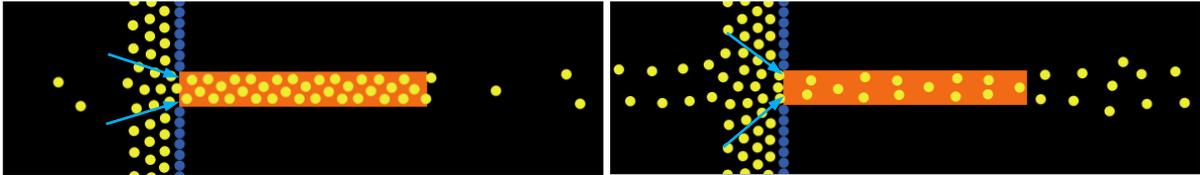


Abbildung 48: V2.2 / V2.12 – Veränderung des Einzugsstrichters und Bildung einer neuen Personenreihe ankommender Personen

Zusätzlich zeigen sich an der zweiten Landestelle, an welcher die Personen die Fahrtreppe verlassen, aufgrund der Geschwindigkeitsdifferenz unsichere Zustände. Dies tritt auf, wenn  $v_{ESC}$  größer als  $v_0$  ist. Einerseits stellt die Geschwindigkeitsdifferenz an sich ein Risiko durch z. B. die Stolpergefahr dar (besonders wenn wie in der Realität die Personen sich zusätzlich auf der Fahrtreppe bewegen können), andererseits sind aufgrund des verringerten Flusses der Landestelle Rückstaus möglich.

Zwar treten durch die hohen Abstände zwischen den Personen keine Kollisionen auf, jedoch verringern die Agenten beim Verlassen der Fahrtreppe ihre Geschwindigkeit zurück auf  $v_0$ . Daher ist in der Simulation deutlich zu erkennen, wie sich auch der Abstand zwischen den landenden und gerade die Landestelle verlassenden Personen sich verringert. Bei einer weiteren Erhöhung der Geschwindigkeit bzw. der Personenzahl  $n_b$  sind demnach Kollisionen nicht ausgeschlossen.

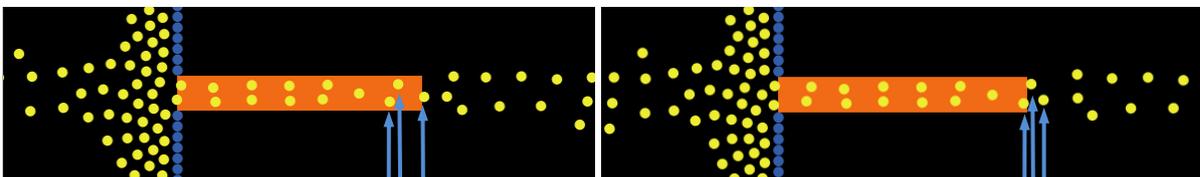


Abbildung 49: unsichere Zustände aufgrund der Geschwindigkeitsdifferenz bei V2.15 –  $t = 600 \text{ s} / t = 602 \text{ s}$

Die statistische Auswertung von Versuch 2 zeigt folgenden Verlauf von Fluss und Dichte:

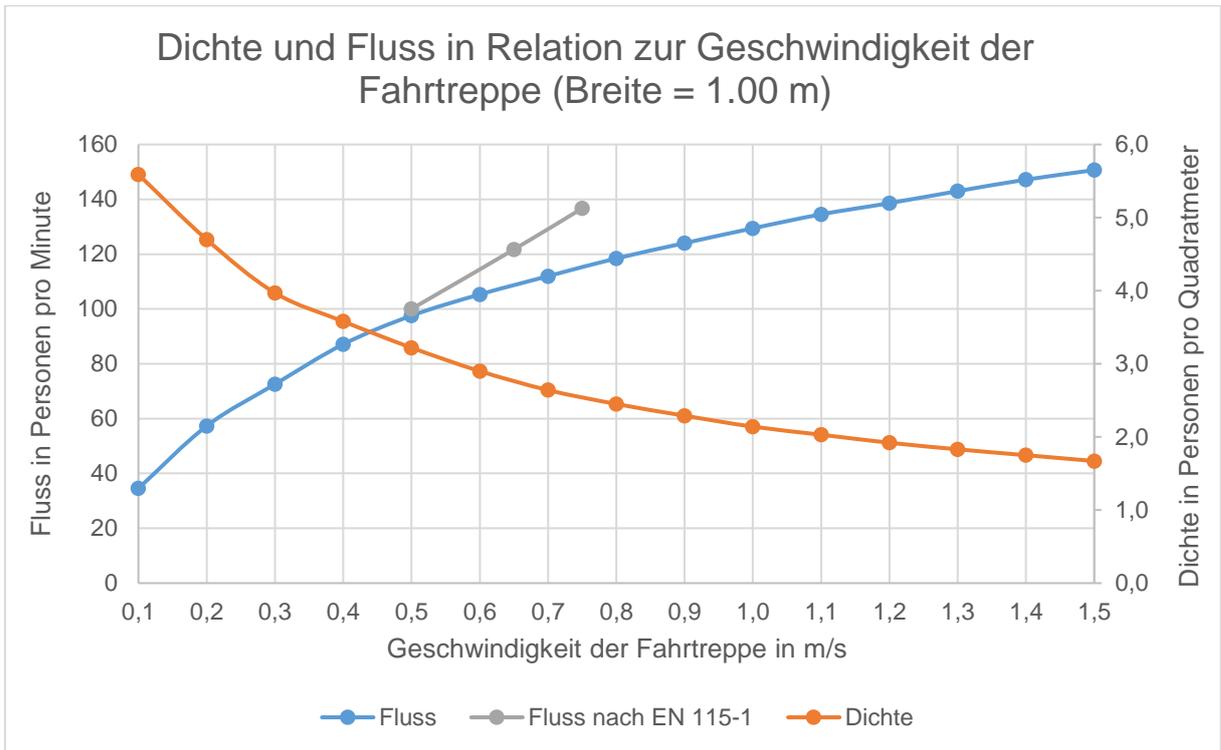


Abbildung 50: graphische Darstellung der Ergebnisse von Versuch 2

Mit schneller werdender Geschwindigkeit ist eine kontinuierliche Steigerung des Flusses auf der Fahrtreppe zu erkennen, während die Personendichte sinkt (Abb. 50 und 51). Die abnehmende Dichte wird somit durch Erhöhung der Fahrtreppengeschwindigkeit und dem daraus folgenden höheren Fluss kompensiert.

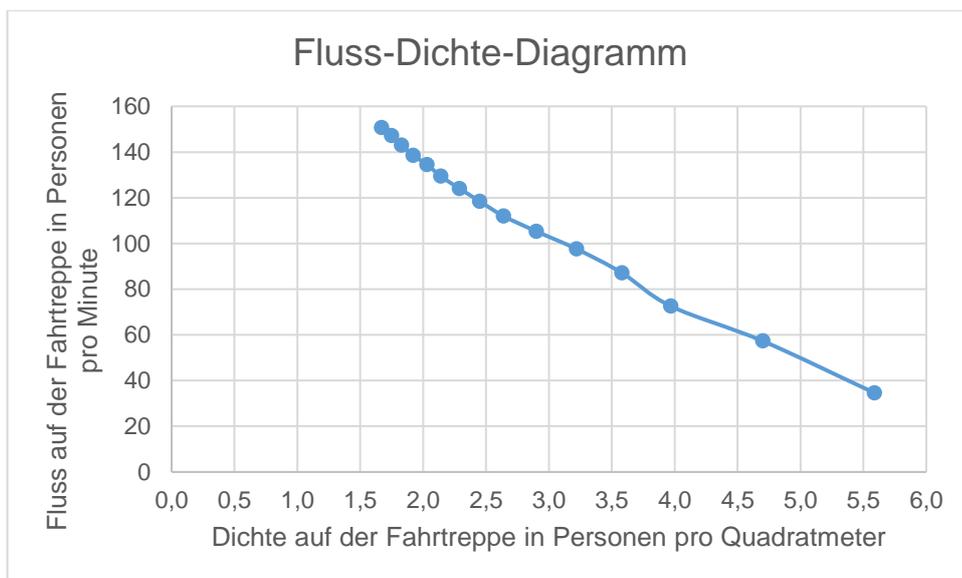


Abbildung 51: Fluss-Dichte-Diagramm von Versuch 2

Der Durchschnitt der Startdichte bewegt sich bei allen Versuchen im Intervall von 0.6 – 0.9 Personen pro Quadratmeter. Dagegen nimmt die Eingangsdichte, d.h. die Dichte vor Beginn der Fahrtreppe, anfangs stets zu und erreicht in den Versuchen V2.6 – V2.15 mit Werten im Intervall von 3.53 – 3.72 Personen pro Quadratmeter ein Plateau. Von diesen neun Versuchen befindet sich  $D_E$  dabei sieben Mal im Intervall von 3.63 – 3.66 Personen pro Quadratmeter. Dies deutet an, dass die Dichte der Stauung vor der Fahrtreppe in der Simulation nur unwesentlich von der Fahrtreppengeschwindigkeit beeinflusst wird. Jedoch nimmt die Kapazität der Fahrtreppe bei Erhöhung der Geschwindigkeit zu; somit hängt die konstante Dichte am Eingangsbereich wahrscheinlich mit der Personenzahl  $n_b$  (= 70 in Versuch 2) zusammen: umso schneller die Personen befördert werden und die Simulation verlassen, desto höher wird vom Programm der ankommende Personenstrom eingestellt.

Der Vergleich zu stationären Treppen zeigt, dass der Fluss von Versuch 2 insgesamt höher ist. In Abbildung 14 und Abbildung 15 ist ein spezifischer Fluss von ca. 48 – 75 Personen pro Minute zu erkennen. Dieser wird meist bei Dichten von ca. 2 Personen pro Quadratmeter erreicht, wobei Fruin [6] und Predtetschenski und Milinski [5] von Dichten um 4 Personen pro Quadratmeter bzw. [5] bei aufsteigenden Treppen von ca. 6.5 Personen pro Quadratmeter ausgehen.

Bei Versuch 2 werden Dichten um 2 Personen pro Quadratmeter nur bei Geschwindigkeiten um 1.0 m/s erreicht, welche jedoch mit einer doppelten oder dreifachen Beförderungskapazität verbunden sind. Dichten um 4 Personen pro Quadratmeter werden bei niedrigen Geschwindigkeiten von ca. 0.3 m/s beobachtet, wobei der Fluss mit ca. 72 Personen pro Minute etwas höher als die von [6] beschriebenen ca. 60 Personen pro Minute ist. Dies stellt die einzige Überschneidung mit den Daten von Treppen überein. Auch das von Burghard et al. [47] beschriebene Plateau bei Dichten ab 2.0 Personen pro Quadratmeter tritt in Versuch 2 nicht auf.

Der Fluss in Versuch 1 liegt bei 0.50 m/s mit 57 Personen pro Minute aufgrund der fast identischen Parameter nur geringfügig über den Werten von Versuch 2.

Ein Vergleich zu den in der EN 115-1 [52] gegebenen Werten zeigt, dass sich die Differenz der Kapazitäten mit schnellerer Geschwindigkeit vergrößert und die Simulation durchgängig geringere Werte als [52] ausgibt. Bei den in der Praxis verwendeten Geschwindigkeiten von 0.65 m/s bzw. 0.75 m/s erreicht die Simulation einen (interpolierten) Fluss von ca. 108.9 Personen pro Minute und ca. 115.2 Personen pro Minute. Dies entspricht bei 0.65 m/s 89.5 % und bei 0.75 m/s 84.3 % der maximalen Förderleistung der EN 115-1.

Bei einer Geschwindigkeit von 0.50 m/s liegt Versuch 2 ungefähr in der Mitte der Spannweite der Literaturangaben. Bei 0.65 m/s zeigt Versuch 2 den zweitniedrigsten Fluss an, jedoch sind für diese Geschwindigkeit nur wenige Werte gegeben. Bei der maximal üblichen Ge-

schwindigkeit von 0.75 m/s befindet sich der Fluss von Versuch 2 im unteren Drittel der recherchierten Daten.

Die theoretische Kapazität nach Formel 13 kann nicht erreicht werden. Nur PM [5], Barney [58], sowie die EN 115-1 [52] geben (bei einer Breite von 1.00 Meter) die Kapazität für die in der Praxis üblichen Geschwindigkeiten an. In allen Werken zeigt sich ein linearer Anstieg des Flusses bei Geschwindigkeitserhöhung. Versuch 2 hat in diesem Geschwindigkeitsintervall ebenfalls einen (fast) linearen Anstieg, jedoch ist das Wachstum deutlich geringer. Die Ähnlichkeit mit [5] ist bei 0.5 m/s am größten, bei 0.75 m/s mit [58]. Beide Quellen stützen sich jedoch auf einen bestimmten in der Praxis erreichbaren Prozentsatz der theoretischen Kapazität.

Schindler Österreich [60] empfiehlt nur eine Verwendung von Geschwindigkeiten bis 0.65 m/s und deutet in Abbildung 25 ein Absinken der Kapazität an. Im Gegensatz dazu zeichnet Schindler Deutschland [61] in Abbildung 26 ein lineares, jedoch nur sehr geringes Wachstum der Förderleistung über Geschwindigkeiten von 0.65 m/s an. Die Angaben der anderen Hersteller sind deckungsgleich mit der EN 115-1 bzw. theoretischen Kapazität.

In der Praxis beobachtete Westphal [36] einen fast gleichen Fluss wie Versuch 2 bei 0.5 m/s im gestauten Zustand. Die Werte können je nach gemessenen Zeitintervall noch höher liegen und wären beispielsweise bei einem Messungszeitintervall von einer Minute nur geringfügig niedriger als die Angaben von [5]. Oeding's [67] Beobachtungen fanden wie [36] unter gestauten Bedingungen statt und erreichen mit einem Fluss von 80 – 90 Personen pro Minute fast die Ergebnisse aus Versuch 2. Jedoch deutet [36] die Werte als durchschnittliche Leistungsfähigkeit und [67] als maximale Kapazität. Die Wachstumskurve des Flusses hat dabei eine ähnliche Form wie die interpolierten Ergebnisse von [67] in Abbildung 27. Jedoch stand den Personen dabei eine Handlungsalternative in Form einer Treppe zur Verfügung und es traten ab einem Fluss von 60 Personen pro Minute bereits Beeinträchtigungen auf.

Die Höhe des Flusses ist bei 0.5 m/s ähnlich mit der von Weidmann [4] beschriebenen Kapazität der Landestelle als limitierender Faktor der gesamten Fahrtreppe, welche bei 105 Personen pro Minute liegt. Durch beobachtete Stockungen und den geringer werdenden Besetzungsgrad der Stufen würde die Kapazität allerdings im Gegensatz zu Versuch 2 nur noch geringfügig ansteigen bzw. sich verringern. In Versuch 2 schwächt sich das Wachstum ebenfalls ab, jedoch bereits ab ca. 0.4 m/s und wesentlich geringer. Insgesamt bewegt sich der Fluss bei allen üblichen Geschwindigkeiten im Intervall der praktisch erreichbaren theoretischen Leistungsfähigkeit, welche in der Literaturlauswertung mit 41 % – 80 % angegeben wird.

Tabelle 14: Vergleich Versuch 2 mit theoretischer Kapazität in Personen pro Minute / Personen pro Stunde

<b>Geschwindigkeit</b>	<b>th. Kapazität <math>C_{th}</math></b>	<b>Versuch 2</b>	<b>Abweichung Versuch 2</b>	<b>erreichte th. Kapazität</b>
0.50 m/s	150 / 9000	97.56 / 5853.6	- 34.96 %	65.04 %
0.65 m/s	195 / 11700	108.90 / 6534	- 44.15 %	55.85 %
0.75 m/s	225 / 13500	115.20 / 6912	- 48.80 %	52.20 %

Die Werte sind bei 0.65 m/s und besonders 0.75 m/s fast deckungsgleich mit der von Barney [58] angegebenen praktisch erreichbaren 50 % der theoretischen Kapazität (Tab. 14). Jedoch würde sich diese bei vergrößernder Geschwindigkeit durch den stärker wachsenden (linearen) Verlauf wieder von den Ergebnissen aus Versuch 2 entfernen.

Bei einer Geschwindigkeit von 0.72 m/s ist der Fluss mit ca. 113.3 Personen pro Minute (interpoliert) im Bereich des von Davis und Dutta [69] empfohlenen Wertes für aufwärtsfahrende Fahrtreppen. Auch zeigt sich ein ähnlicher Fluss bei mehreren beobachteten Fahrtreppen mit gehenden, sowie stehenden Personen (s. Abbildung 30). Ebenso liegt Versuch 2 im von Al-Sharif [71] gemessenen Intervall (Geschwindigkeit = 0.75 m/s), jedoch weist keine der sieben untersuchten Fahrtreppen eine näherungsweise Überschneidung auf.

Dagegen erreichen bzw. überschreiten die mit 0.65 m/s betriebenen und von Kahali und Rastogi [72] untersuchten Fahrtreppen die Kapazität von Versuch 2. Bei der Fahrtreppe mit der höchsten Spitzenkapazität Esc 4-U (Messung am Morgen) wird der Fluss bei einer Dichte von 2.0 Personen pro Quadratmeter, im Gegensatz zur (interpolierten) höheren Dichte von 2.8 Personen pro Quadratmeter aus Versuch 2, erzielt. Vier andere Fahrtreppen erreichen diesen Fluss bei einer Dichte von 3.0 bzw. 3.3 Personen pro Quadratmeter am Morgen. Abends nähert sich die Dichte von Esc 4-U mit knapp 3.0 Personen pro Quadratmeter an Versuch 2 an, auch Esc 5-D hat mit einer Dichte von ca. 2.6 Personen pro Quadratmeter näherungsweise dieselbe Höhe. Die anderen Fahrtreppen benötigen für den Fluss aus Versuch 2 jedoch Dichten um die 3.6 Personen pro Quadratmeter. Im Vergleich zu [72] ist die Dichte in Versuch 2 somit mit Ausnahme der Fahrtreppe Esc 4-U zu gering. Insgesamt sind die gemessenen maximalen Flüsse jedoch teils deutlich über und die durchschnittlichen gemessenen Flüsse deutlich unter den Werten von Versuch 2.

Die durchschnittlichen von Bodendorf et al. [73] gemessenen Flüsse ( $v_{ESC} = 0.5$  m/s) liegen ebenfalls alle stark unter den Ergebnissen der Simulation. Jedoch sind die maximal in einem Zeitintervall von 10 Sekunden in der Bahnstation aufgezeichneten Flüsse mit 103.77 bzw. 107.72 Personen pro Minute höher als Versuch 2. Im Einkaufscenter sind die maximal erfassten Kapazitäten in Höhe von ca. 91 Personen pro Minute (Zeitintervall 10 Sekunden) etwas niedriger. Die größte Ähnlichkeit mit Versuch 2 tritt insgesamt mit Messung ID 7 auf, wobei ein durchschnittlicher Fluss von 77.77 Personen pro Minute und ein maximaler Fluss im Zeitintervall von 10 Sekunden von 102.09 Personen pro Minute beobachtet wurde.

Der Besetzungsgrad der Stufen nimmt nach Abbildung 28 von 0.5 m/s zu 0.75 m/s von theoretisch 2 auf ca. 1.55 (praktische Leistungsfähigkeit, einminütiges Intervall) respektive ca. 1.38 (praktische Leistungsfähigkeit, fünfminütiges Intervall) ab. Fügt man diese Werte in Formel 13 zur Berechnung der theoretischen Kapazität ein, ergibt das die in Abbildung 29 dargestellten Flussverläufe. Demnach ist im einminütigen Intervall die maximale praktische Leistungsfähigkeit bei ca. 0.75 m/s und fällt dann stark ab, in einem fünfminütigen Intervall dagegen hat diese die Form eines Plateaus von ca. 0.65 – 0.75 m/s. Ein Vergleich dieser Besetzungsdichten bei 0.75 m/s ergibt bei einer Stufenbreite von 1.00 m und Stufenlänge von 0.40 m eine Personendichte von 3.875 bzw. 3.45 Personen pro Quadratmeter. Versuch 2 zeigt bei dieser Geschwindigkeit dagegen nur eine (interpolierte) Dichte von 2.55 Personen pro Quadratmeter an. Diese Differenz ergibt sich aus dem unterschiedlichen Fluss. Eine Berechnung der Besetzungsdichte der Simulation mit Formel 13 bei einer Geschwindigkeit von 0.75 m/s (Fluss = 115.2 Personen pro Minute, Breite = 1.00 m, Stufenlänge = 0.40 m) ergibt eine Belegung von 1.024 Personen pro Fahrtreppenstufe. Dieser Besetzungsgrad würde nach Abbildung 28 erst bei einer Geschwindigkeit von ca. 0.90 m/s vorherrschen.

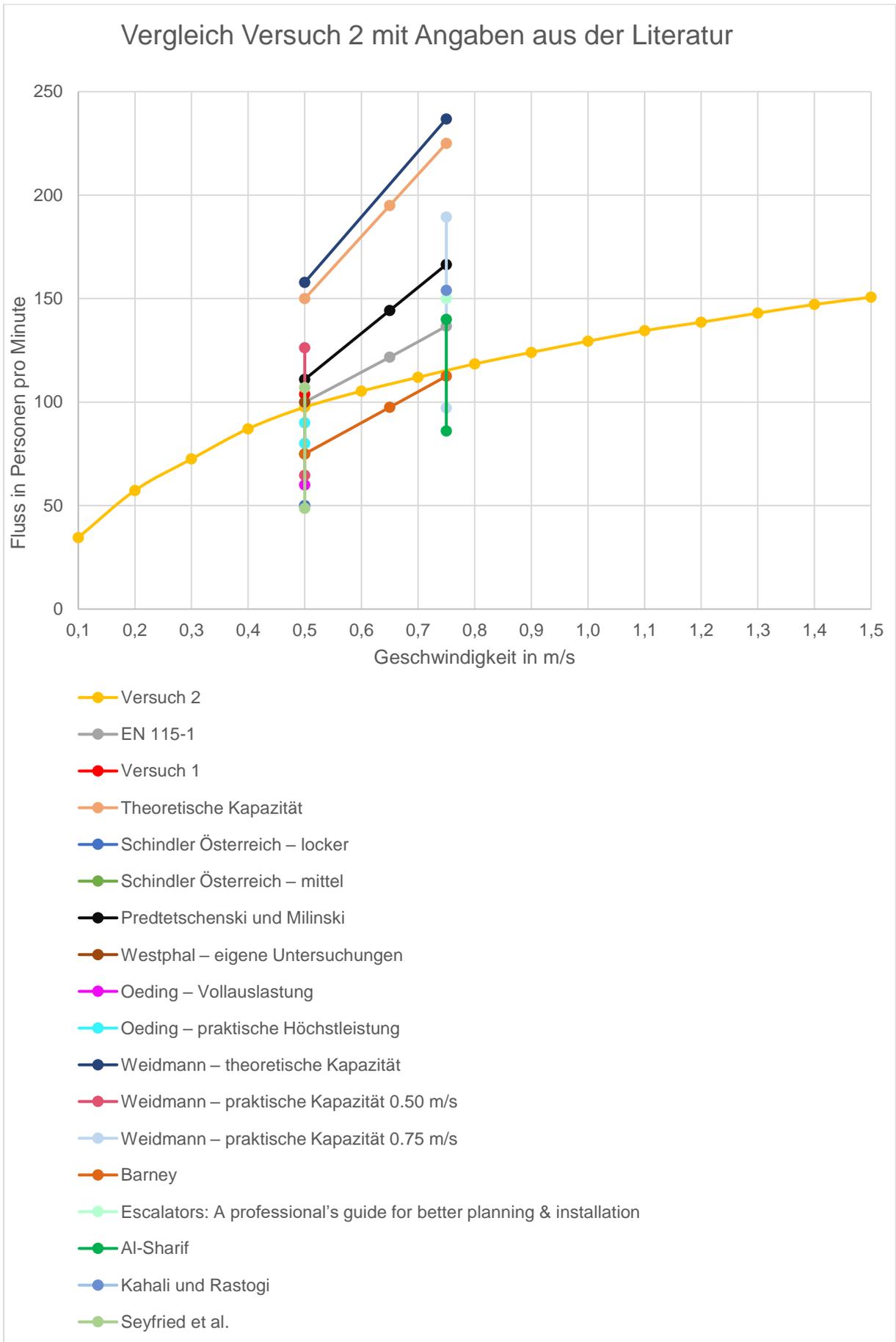


Abbildung 52: Vergleich Versuch 2 mit Angaben aus der Literatur

### 5.3.3 Versuch 3: Einfluss der Breite

In diesem Versuch wird der Einfluss einer Veränderten Stufenbreite untersucht. Die Simulation wird mit den gleichen Parametern wie in Versuch 2 eingestellt und es erfolgt eine schrittweise Vergrößerung der Breite von 0.5 m auf 1.5 m bei einer gleichbleibenden Geschwindigkeit von 0.5 m/s. Da sich bei einer Breite von 0.50 m nach wenigen Sekunden stets ein nicht auflösbarer Stau bildet, wurde der Durchmesser der Personen I bei dieser Messreihe auf 0.25 m verringert. Da die Ergebnisse nicht vergleichbar sind, ist dieser Versuch V3.0 nur im Anhang aufgelistet und nicht Gegenstand der Auswertung.

Versuch 3 umfasst somit 10 Teilversuche mit 400 Messwerten, welche jeweils nach 600 Sekunden aufgenommen wurden. Die Ergebnisse der statistischen Auswertung des Versuchs sind in Tabelle 15 abgebildet.

Tabelle 15: Auswertung Versuch 3 (Dichte in Personen pro Quadratmeter, Fluss in Personen pro Sekunde)

	V3.1 b = 0.6 m				V3.2 b = 0.7 m				V3.3 b = 0.8 m				V3.4 b = 0.9 m				V3.5 b = 1.0 m			
	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J
Durchschnitt	0.66	4.91	2.88	0.88	0.70	4.73	2.97	1.06	0.81	4.30	3.18	1.29	0.77	3.86	3.25	1.48	0.82	3.50	3.22	1.63
Minimum	0.50	4.80	2.86	0.87	0.20	4.60	2.92	1.04	0.60	4.20	3.15	1.27	0.30	3.60	3.21	1.46	0.60	3.40	3.18	1.61
Maximum	0.80	5.00	2.89	0.89	1.00	4.90	3.01	1.07	1.20	4.50	3.20	1.29	1.20	4.10	3.27	1.49	1.30	3.70	3.25	1.65
Spannweite	0.30	0.20	0.03	0.02	0.80	0.30	0.09	0.03	0.60	0.30	0.05	0.02	0.90	0.50	0.06	0.03	0.70	0.30	0.07	0.04
Median	0.65	4.90	2.88	0.88	0.80	4.70	2.98	1.06	0.80	4.30	3.17	1.29	0.80	3.90	3.25	1.48	0.80	3.50	3.22	1.62
Varianz	0.01	0.01	0.00	0.00	0.06	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.07	0.02	0.00	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00
Standardabweichung	0.10	0.09	0.01	0.01	0.25	0.09	0.02	0.01	0.17	0.09	0.02	0.01	0.26	0.14	0.02	0.01	0.21	0.08	0.02	0.01
	V3.6 b = 1.1 m				V3.7 b = 1.2 m				V3.8 b = 1.3 m				V3.9 b = 1.4 m				V3.10 b = 1.5 m			
	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J
Durchschnitt	0.81	3.41	3.11	1.73	0.77	3.14	3.08	1.86	0.76	3.15	2.98	1.95	0.82	2.44	3.09	2.18	0.73	2.19	3.04	2.30
Minimum	0.50	3.30	3.09	1.71	0.40	2.90	3.06	1.85	0.50	3.00	2.91	1.91	0.60	2.30	3.07	2.16	0.40	2.00	3.03	2.28
Maximum	1.10	3.50	3.15	1.74	1.20	3.40	3.10	1.87	1.20	3.20	3.08	2.00	1.00	2.60	3.11	2.19	1.30	2.30	3.05	2.30
Spannweite	0.60	0.20	0.06	0.03	0.80	0.50	0.04	0.02	0.70	0.20	0.17	0.09	0.40	0.30	0.04	0.03	0.90	0.30	0.02	0.02
Median	0.80	3.40	3.11	1.73	0.75	3.15	3.08	1.87	0.75	3.20	2.98	1.96	0.85	2.45	3.10	2.18	0.70	2.20	3.04	2.30
Varianz	0.04	0.00	0.00	0.00	0.07	0.03	0.00	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.07	0.01	0.00	0.00
Standardabweichung	0.20	0.06	0.02	0.01	0.26	0.17	0.01	0.01	0.21	0.08	0.05	0.03	0.15	0.13	0.01	0.01	0.27	0.09	0.01	0.01

Nur bei einer Breite von 0.60 m werden die Stufen nur von einzelnen Personen belegt. Schon bei Breiten ab 0.70 m erfolgt eine Doppelbelegung, wobei dies bei 0.70 m nicht bei jedem Agenten der Fall ist. Die Anzahl der Doppelbelegungen nimmt mit breiter werdender Fahrtreppe zu, jedoch findet eine ausschließliche Doppelbelegung erst bei 0.90 m und häufiger bei 1.00 m statt.

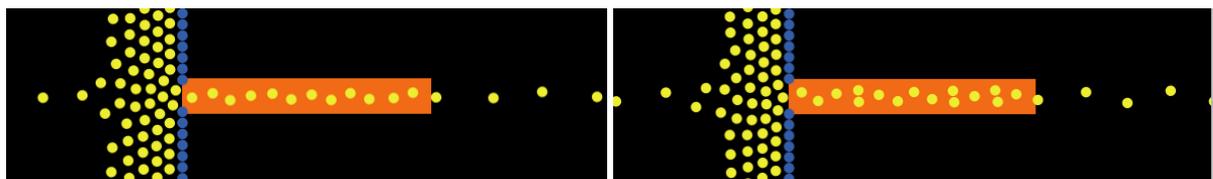


Abbildung 53: V 3.1-6 / 3.2-2

Die Agentenpaare verteilen sich fast immer mit oszillierendem Abstand zur Balustrade der Fahrtreppe (s. Abbildung 54 V3.5-2).

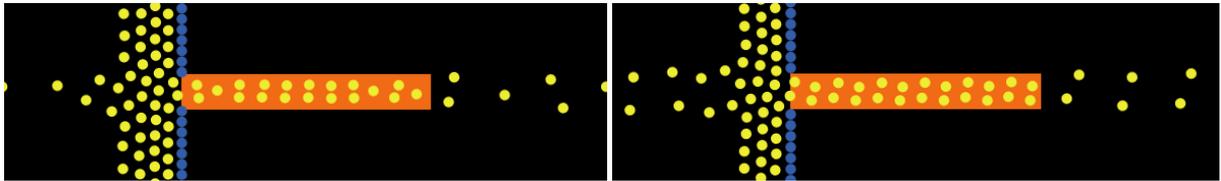


Abbildung 54: doppelte Besetzung der Stufen bei V3.3-8 / V3.5-2

Ab einer Breite von 1.10 m werden die oszillierenden gleichmäßigen Strukturen oft durch eine dreifache oder einfache Belegung einer Stufe unterbrochen. Die Häufigkeit von Dreifachbelegungen nimmt bei höherer Breite zu. Außerdem treten ab 1.20 m die Agenten optisch in der Simulation über den Rand der Fahrtreppe.

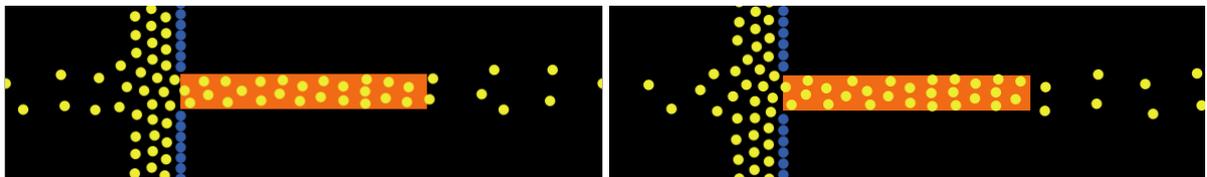


Abbildung 55: dreifache Belegung einer Stufe in V3.6-8 / V3.7-7

Bei 1.30 m Breite tritt wieder eine regelmäßige und musterförmige Verteilung der Personen auf, welche sich ab 1.40 m Breite wieder zu einer (unregelmäßigen) Dreifachbelegung wandelt.

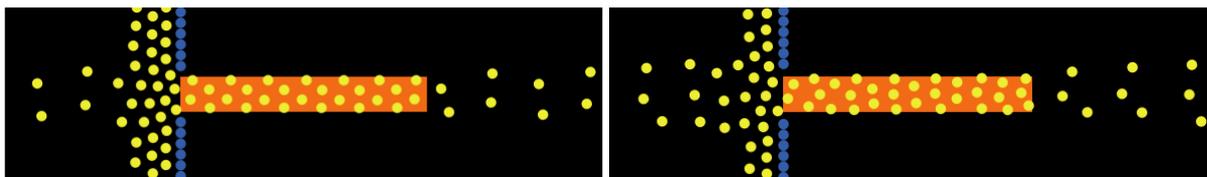


Abbildung 56: V3.8-10 / V3.9-10

Bei 1.50 m konnte die teilweise Bildung von Mustern beobachtet werden. Trotz unterschiedlicher Verteilung der Personen sind die Parameter in Abbildung 57 mit  $J = 2.30$  Personen pro Sekunde und  $D = 3.05$  Personen pro Quadratmeter gleich. Meistens ist die Verteilung der Personen jedoch unregelmäßig bzw. in Dreifachbesetzung.

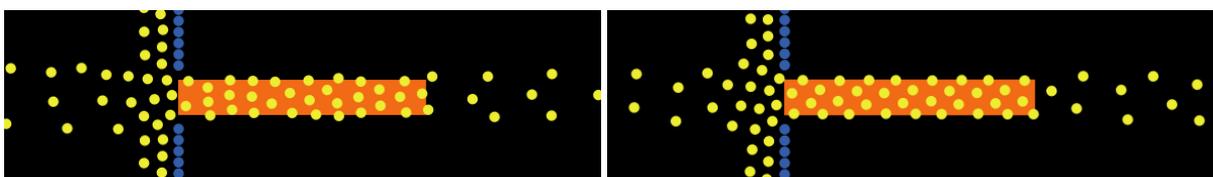


Abbildung 57: gleiche Ergebnisse trotz unterschiedlicher Stufenbelegung in V3.10

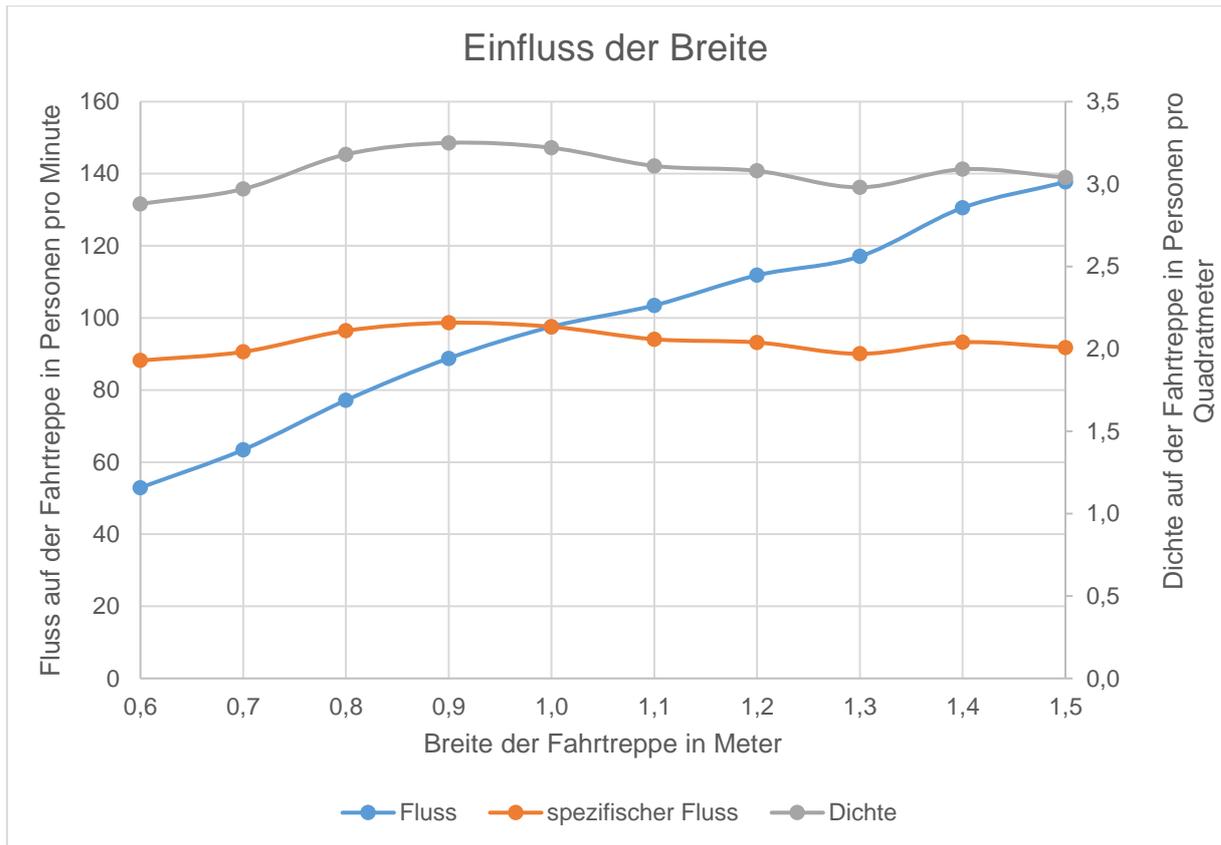


Abbildung 58: graphische Darstellung der Ergebnisse von Versuch 3

Versuch 3 zeigt, dass der Fluss der Fahrtreppe mit Erhöhung der Fahrtreppenbreite von ca. 53 Personen pro Minute bei  $b = 0.60$  m bis ca. 138 Personen pro Minute bei  $b = 1.50$  m ansteigt. Der spezifische Fluss ist annähernd konstant und bewegt sich im Bereich von 90 – 100 Personen pro Minute, wobei bei  $b = 0.90$  m der höchste und bei  $b = 1.30$  m der niedrigste spezifische Fluss aufgezeichnet wurde. Der Verlauf der Dichte ist ansteigend bis ca. 3.25 Personen pro Quadratmeter bei  $b = 0.90$  m und sinkt danach auf knapp 3 Personen pro Quadratmeter bei 1.30 m/s. Danach steigt die Dichte abermals bis ca. 3.09 Personen pro Quadratmeter bei  $b = 1.40$  m an und sinkt schließlich auf 3.04 Personen pro Quadratmeter bei 1.50 m/s (Abb. 58).

Der Anstieg des Flusses hat einen annähernd linearen Verlauf, welcher auch von Seyfried et al. [44] und anderen Autoren angenommen wird. Eine wie von Hoogendoorn und Daamen [43] angenommene schrittweise Vergrößerung ist nicht sichtbar. Auch konnte kein schrittweiser Anstieg der Kapazität bei ca. 0.7 m aufgrund des Reißverschluss-effektes in der Simulation festgestellt werden. Zwar steigerte sich der Fluss von

- $b = 0.6$  m zu  $b = 0.7$  m um 20.45 %
- $b = 0.7$  m zu  $b = 0.8$  m um 21.70 %
- $b = 0.8$  m zu  $b = 0.9$  m um 14.73 %

und die Steigerungsrate ist somit im entsprechenden Intervall am höchsten, jedoch kann aufgrund der niedrigen Differenzen kein stufenweiser Anstieg abgeleitet werden (s. auch Kurvenverlauf in Abbildung 58).

Die Ergebnisse der Literaturrecherche von Seyfried et al. [44] aus Abbildung 10 sind im Folgenden visualisiert:

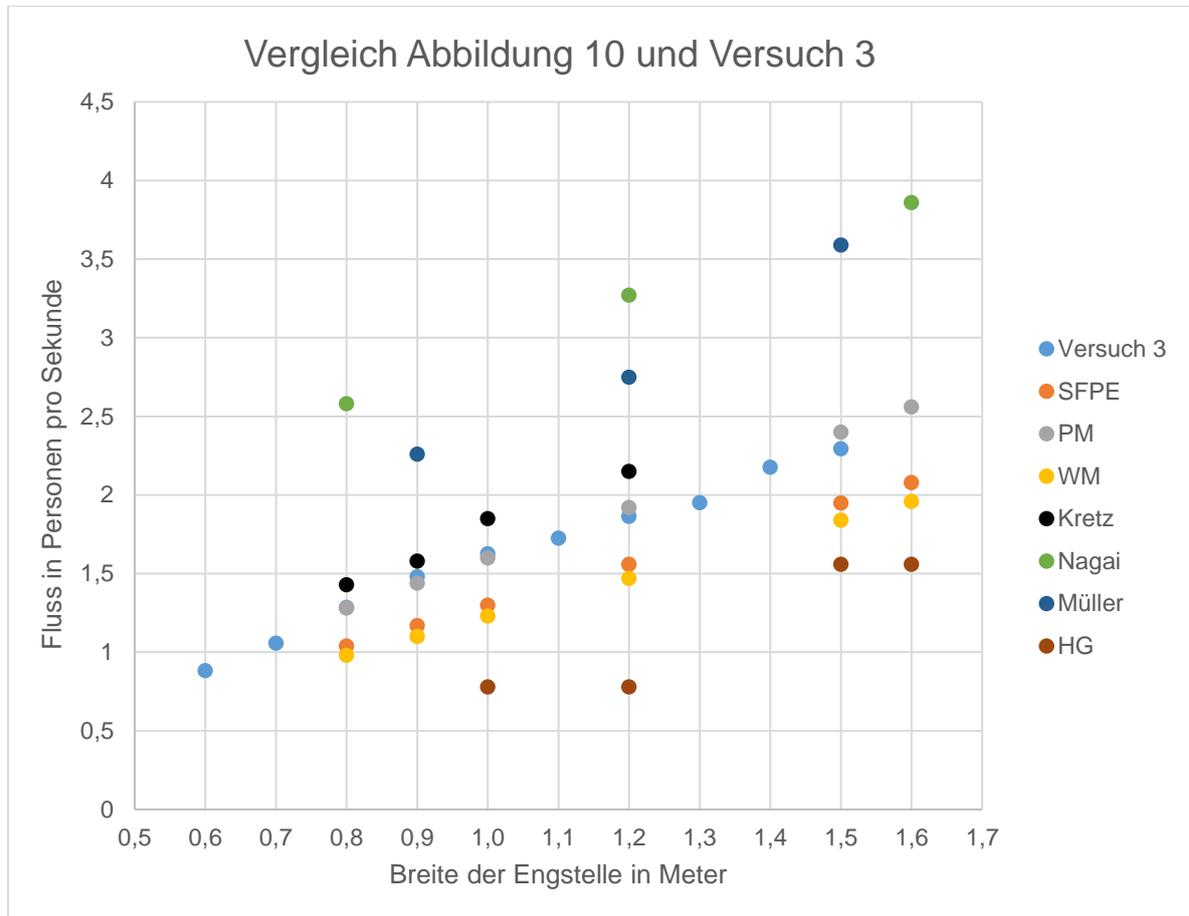


Abbildung 59: Vergleich der Ergebnisse von Abbildung 10 (Seyfried et al. [44]) und Versuch 3

Bei einer Breite von 0.8 m gibt Versuch 3 einen Fluss von 1.29 Personen pro Sekunde aus, was nach Abbildung 10 fast exakt mit der von PM [5] errechneten Kapazität von 1.28 Personen pro Sekunde bei einer Engstelle dieser Größe entspricht. Weidmann [4] und SPFE [9] liegen unter den ausgegebenen Werten, Kretz et al. [78] darüber. Auch bei Vergrößerung der Engstellenbreite sind die Ergebnisse von [5] fast deckungsgleich, die Differenz wird jedoch mit Vergrößerung der Breite höher. Die von [9] errechneten Werte liegen wie die von [4] unter Ergebnissen von Versuch 3. Der Anstieg fällt bei den Daten von [4] etwas geringer aus, allerdings ist das Wachstum sowohl von [9] als auch [4] ähnlich mit Versuch 3.

Die Messungen von Nagai et al. [79] und Müller [80] liegen deutlich über den Werten von Versuch 3. Die Daten von [79] zeigen keinen klaren linearen Verlauf, wobei die von [80] beobachteten Werte näherungsweise linear, jedoch mit höherem Fluss und stärkerem Wachs-

tum sind. Die von [78] gemessenen Werte sind näherungsweise wie Versuch 3, doch im Gegensatz zu den berechneten Werten etwas höher (als Versuch 3), sowie mit stärkerem Wachstum. Unterschiede in den Ergebnissen können jedoch auch durch verschiedene in den Berechnungen/Studien verwendete Methoden etc. resultieren.

Wie bei den Versuchen von Muir et al. [45] mit hoher Motivation trat eine Vergrößerung des Flusses bei Vergrößerung der Fahrtreppenbreite auf. Außerdem kommt es bei einer Breite von 0.50 m zu einer Blockierung an der Engstelle. Bei der von [45] empfohlenen Breite von 27 – 30 Zoll (ca. 0.69 – 0.76 m) ist ein ansteigender spezifischer Fluss zu beobachten, welcher bei 0.80 m den dritthöchsten Wert erreicht. Bei 0.90 m Breite ist der höchste spezifische Fluss zu beobachten, was nahe am Messpunkt mit der schnellsten Durchschnittszeit bei einer Evakuierung über die Tragflächen mit Motivation (Breite = 34 Zoll) liegt.

Ein Vergleich mit den von [44] ermittelten Werten (Engstellenlänge 2.80 m, Abb. 60) zeigt einen fast gleichen spezifischen Fluss bei 0.80 m Breite bei 60 Personen. Bis 1.00 m ist der Trend jedoch entgegengesetzt, da sich bei den von [44] ausgeführten Versuchen der Personenfluss erhöht. Von 1.00 – 1.20 m ist der spezifische Fluss wie bei den Messungen mit 40 Personen sinkend, jedoch das negative Wachstum schwächer. Die Versuche mit 60 Personen zeigen einen leicht ansteigenden spezifischen Fluss während  $J_s$  mit 20 Personen bei 1.10 m den niedrigsten und bei 1.20 m den höchsten Wert hat. Die Versuche fanden allerdings aufgrund der zu geringen Personenzahl meist nicht im stationären Zustand statt. Zusätzlich ist zu beachten, dass die Engstelle bzw. Fahrtreppe in Versuch 3 eine Länge von 7 m hat und von den Personen in der konstanten Fahrtreppengeschwindigkeit von 0.5 m/s durchschritten wird. Der Aufbau der Engstelle in den oben genannten Studien ist jedoch verschieden, beispielsweise als kurzer Korridor oder Türöffnung.

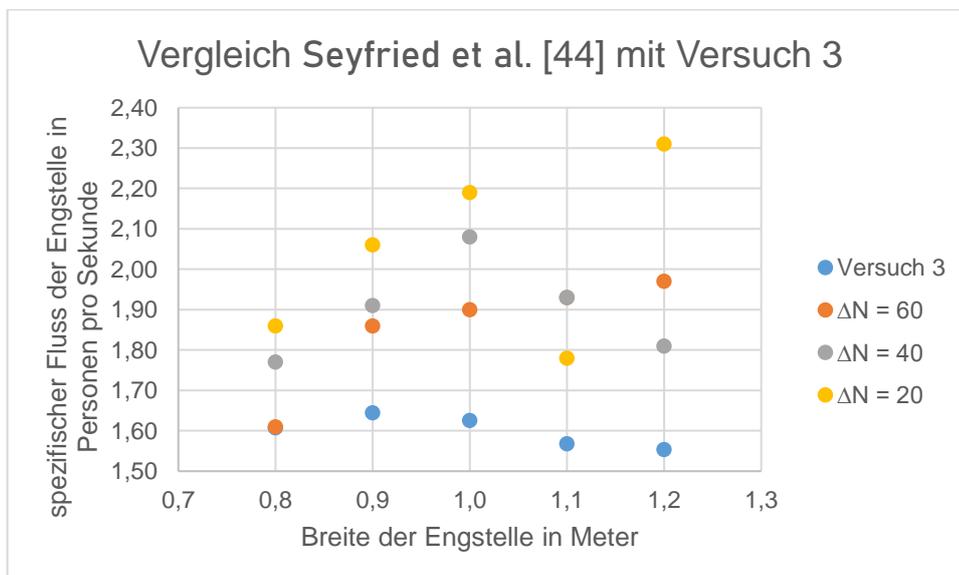


Abbildung 60: Vergleich Versuch 3 mit Messungen von Seyfried et al. [44] (s. Abb. 12)

Ein zu [44] ähnlicher Fluss bei einer 1.00 m breiten Fahrtreppe würde beispielsweise mit einer 3.00 Meter langen Fahrtreppe mit einer Geschwindigkeit von 0.9 m/s, sowie einer auf 60 verringerten Personenzahl nb reproduziert werden können.

### 5.3.4 Versuch 4: Einfluss der Agentengröße

Da bei Versuch 1 die als realistisch betrachtete Personengröße von 0.10 – 0.15 m<sup>2</sup> und folglich einen Durchmesser der Scheibe bzw. Größe des Agenten  $l = 0.40$  m zu Verstopfungen am Eingang der Fahrtreppe führte, wird in diesem Versuch der Einfluss der Personengröße untersucht.

Versuch 4 umfasst 12 Teilversuche mit jeweils 10 Messreihen nach 600 Sekunden. Die 480 Messwerte wurden statistisch aufbereitet und sind in Tabelle 16 dargestellt.

Tabelle 16: Auswertung Versuch 4 (Dichte in Personen pro Quadratmeter, Fluss in Personen pro Sekunde)

	V4.1 $l = 0.30$ m $v_{ESC} = 0.5$ m/s				V4.2 $l = 0.35$ m $v_{ESC} = 0.5$ m/s				V4.3 $l = 0.40$ m $v_{ESC} = 0.5$ m/s				V4.4 $l = 0.45$ m $v_{ESC} = 0.5$ m/s			
	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J
Durchschnitt	0.82	3.50	3.22	1.63	0.76	3.97	2.63	1.33	0.72	3.71	2.02	1.03	0.68	3.38	1.51	0.77
Minimum	0.60	3.40	3.18	1.61	0.20	3.90	2.58	1.31	0.50	3.50	1.98	1.00	0.50	3.30	1.50	0.77
Maximum	1.30	3.70	3.25	1.65	1.30	4.10	2.67	1.35	1.00	3.80	2.04	1.04	0.80	3.40	1.52	0.78
Spannweite	0.70	0.30	0.07	0.04	1.10	0.20	0.09	0.04	0.50	0.30	0.06	0.04	0.30	0.10	0.02	0.01
Median	0.80	3.50	3.22	1.62	0.75	3.95	2.64	1.34	0.75	3.70	2.02	1.03	0.70	3.40	1.51	0.77
Varianz	0.04	0.01	0.00	0.00	0.08	0.01	0.00	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Standardabweichung	0.21	0.08	0.02	0.01	0.28	0.08	0.02	0.01	0.19	0.10	0.02	0.01	0.10	0.04	0.01	0.01
	V4.5 $l = 0.30$ m $v_{ESC} = 0.6$ m/s				V4.6 $l = 0.35$ m $v_{ESC} = 0.6$ m/s				V4.7 $l = 0.40$ m $v_{ESC} = 0.6$ m/s				V4.8 $l = 0.40$ m $v_{ESC} = 0.6$ m/s			
	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J
Durchschnitt	0.69	3.64	2.90	1.76	0.64	3.98	2.39	1.45	0.55	3.71	1.82	1.11	0.71	3.38	1.37	0.84
Minimum	0.40	3.50	2.87	1.73	0.30	3.90	2.33	1.41	0.30	3.50	1.79	1.08	0.50	3.30	1.32	0.81
Maximum	1.10	3.90	2.92	1.77	1.10	4.10	2.41	1.47	0.90	3.90	1.84	1.12	1.00	3.50	1.39	0.86
Spannweite	0.70	0.40	0.05	0.04	0.80	0.20	0.08	0.06	0.60	0.40	0.05	0.04	0.50	0.20	0.07	0.05
Median	0.60	3.60	2.90	1.76	0.55	4.00	2.40	1.46	0.55	3.70	1.83	1.11	0.70	3.40	1.39	0.85
Varianz	0.07	0.02	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00
Standardabweichung	0.26	0.13	0.02	0.01	0.25	0.06	0.03	0.02	0.18	0.12	0.02	0.02	0.18	0.08	0.03	0.02
	V4.9 $l = 0.30$ m $v_{ESC} = 0.7$ m/s				V4.10 $l = 0.35$ m $v_{ESC} = 0.7$ m/s				V4.11 $l = 0.40$ m $v_{ESC} = 0.7$ m/s				V4.12 $l = 0.40$ m $v_{ESC} = 0.7$ m/s			
	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J
Durchschnitt	0.67	3.64	2.45	1.97	0.71	3.90	2.18	1.54	0.83	3.72	1.68	1.19	0.70	3.35	1.28	0.92
Minimum	0.20	3.10	2.44	1.96	0.50	3.70	2.16	1.53	0.60	3.60	1.65	1.17	0.50	3.20	1.26	0.90
Maximum	1.10	4.00	2.46	1.98	1.00	4.00	2.20	1.55	1.10	3.80	1.72	1.22	0.90	3.40	1.29	0.98
Spannweite	0.90	0.90	0.02	0.02	0.50	0.30	0.04	0.02	0.50	0.20	0.07	0.05	0.40	0.20	0.03	0.08
Median	0.65	3.70	2.45	1.98	0.65	3.95	2.18	1.54	0.85	3.70	1.67	1.19	0.70	3.40	1.28	0.91
Varianz	0.07	0.06	0.00	0.00	0.04	0.02	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00
Standardabweichung	0.27	0.24	0.01	0.01	0.20	0.12	0.01	0.01	0.16	0.08	0.02	0.02	0.16	0.08	0.01	0.03
	V4.13 $l = 0.30$ m $v_{ESC} = 0.8$ m/s				V4.14 $l = 0.35$ m $v_{ESC} = 0.8$ m/s				V4.15 $l = 0.40$ m $v_{ESC} = 0.8$ m/s				V4.16 $l = 0.40$ m $v_{ESC} = 0.8$ m/s			
	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	D <sub>ESC</sub>	J
Durchschnitt	0.67	3.64	2.45	1.97	0.78	3.95	2.01	1.63	0.71	3.68	1.55	1.26	0.66	3.37	1.19	0.97
Minimum	0.20	3.10	2.44	1.96	0.50	3.80	1.98	1.60	0.50	3.50	1.54	1.25	0.50	3.30	1.19	0.96
Maximum	1.10	4.00	2.46	1.98	1.00	4.10	2.05	1.65	1.10	3.80	1.57	1.27	0.80	3.40	1.19	0.97
Spannweite	0.90	0.90	0.02	0.02	0.50	0.30	0.07	0.05	0.60	0.30	0.03	0.02	0.30	0.10	0.00	0.01
Median	0.65	3.70	2.45	1.98	0.75	3.90	2.02	1.63	0.65	3.70	1.55	1.25	0.70	3.40	1.19	0.97
Varianz	0.07	0.06	0.00	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00	0.05	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Standardabweichung	0.27	0.24	0.01	0.01	0.19	0.10	0.02	0.02	0.22	0.09	0.01	0.01	0.11	0.06	0.00	0.01

Ab einer Agentengröße von 0.45 m sind teilweise Staus in den einzelnen Messreihen zu beobachten. Im Anhang wurden die Variablen in diesen unauflösbaren Messreihen mit 0 angegeben. Die statistischen Kenngrößen wurden aus den verfügbaren Daten ohne gestaute Messreihen berechnet.

Bei Erhöhung der Geschwindigkeit ist unabhängig von der gewählten Agentengröße ein annähernd linearer Verlauf des Flusses (Abb. 62) zu sehen. Da das gemessene Geschwindigkeitsintervall in Vergleich zu Versuch 2 jedoch sehr kurz ist, kann keine konkave Form der Funktion beobachtet werden. Aufgrund des höheren Platzbedarfs sinkt die Dichte (Abb. 61) und daraus folgend auch die Kapazität bei Erhöhung der Agentengröße.

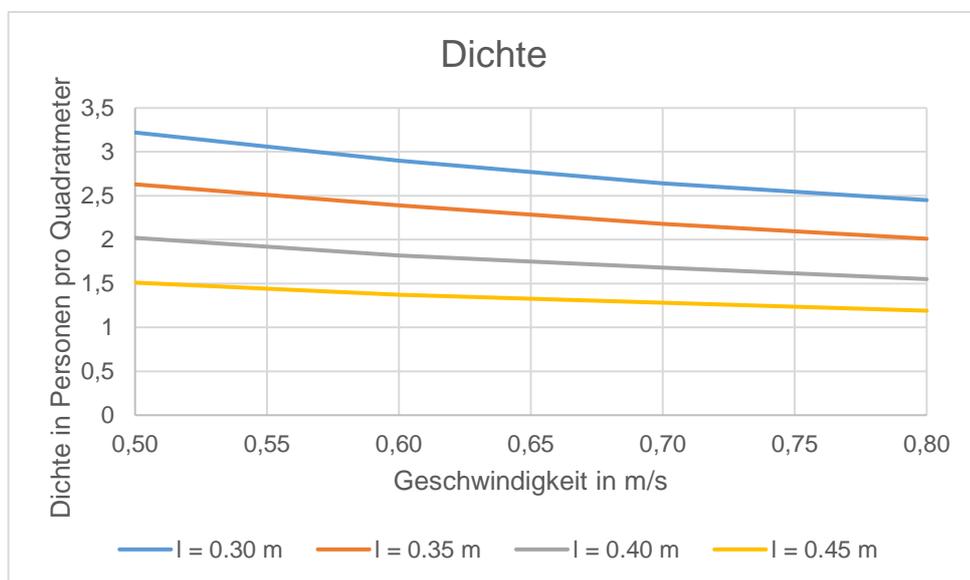


Abbildung 61: Verlauf der Dichte in Abhängigkeit von der Agentengröße

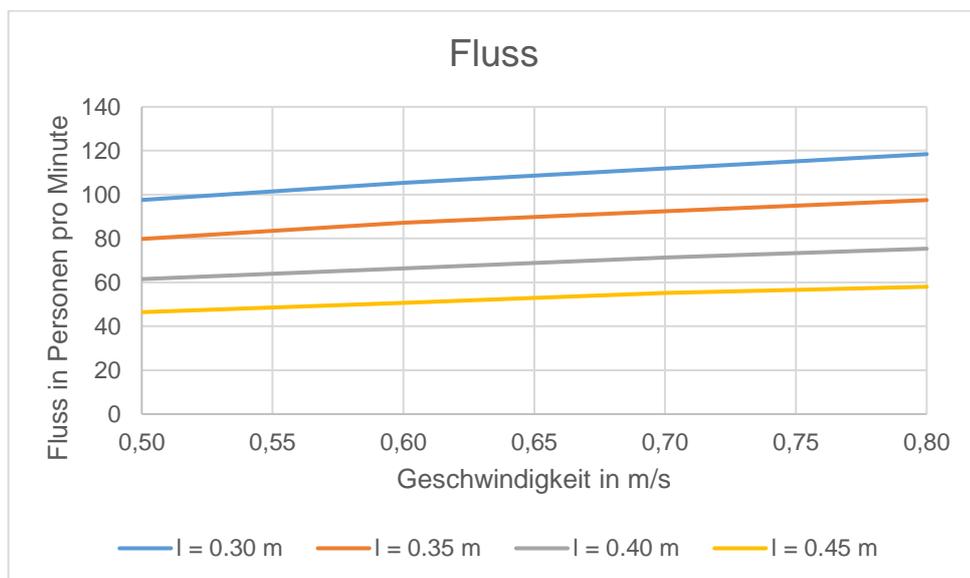


Abbildung 62: Verlauf des Flusses in Abhängigkeit von der Agentengröße

Der Abstand zwischen den Kurven verringert sich außerdem leicht bei schneller werdender Fahrtreppe:

Tabelle 17: relative Kurvenverläufe der Agentengrößen zueinander

Abstand der Kurven	Messpunkt 0.50 m/s		Messpunkt 0.80 m/s	
	Fluss	Dichte	Fluss	Dichte
0.45 m auf 0.40 m	+ 33.77 %	+ 33.77 %	+ 29.90 %	+ 30.25 %
0.40 m auf 0.35 m	+ 29.12 %	+ 30.20 %	+ 29.37 %	+ 29.68 %
0.35 m auf 0.30 m	+ 22.55 %	+ 22.43 %	+ 20.85 %	+ 21.89 %

Über die verschiedenen Agentengrößen zeigt sich ein fast identischer Kurvenverlauf, welcher sich nur in der Höhe unterscheidet. Bei einer Größe  $l$  von 0.50 m staute sich das System unauflösbar an der Fahrtreppe über alle Geschwindigkeiten. Fluss und Dichte sinken dabei linear mit einer Erhöhung der Agentengröße. Jedoch tritt in den nachfolgenden Diagrammen (Abb. 63 und 64) ein Bereich mit geringerem negativem Wachstum zwischen 0.40 m und 0.45 m Agentengröße auf. Dies resultiert jedoch aus der linearen Interpolation – ohne einen angenommenen Fluss von 0 als Ausdruck eines Staus bei 0.50 m Agentengröße verlaufen die Kurven linear bis  $l = 0.45$  m.

Die interpolierte Veränderung des Flusses (Abb. 63) und der Dichte (Abb. 64) bei einer spezifischen Geschwindigkeit über die einzelnen Agentengrößen ist im Folgenden dargestellt.

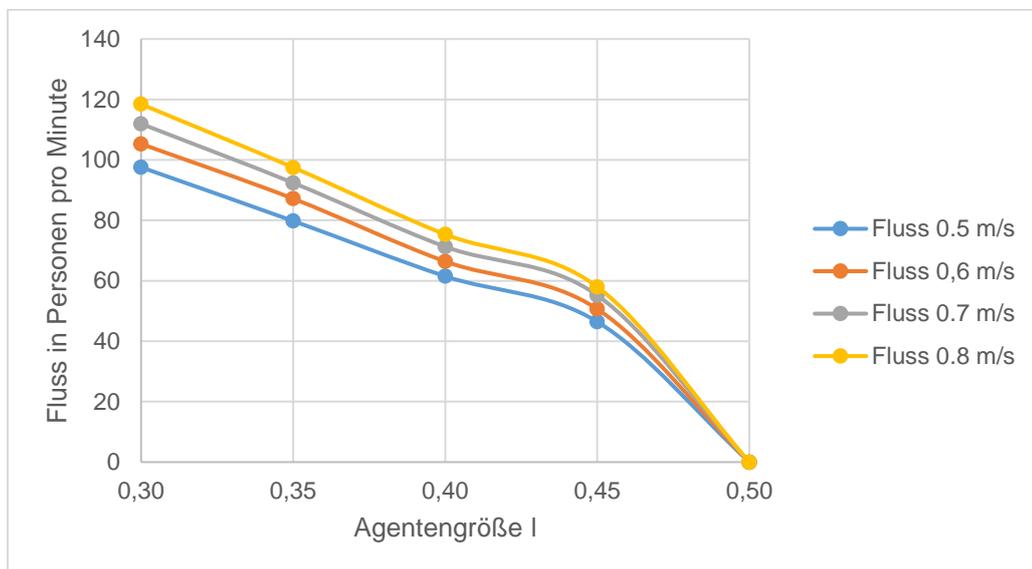


Abbildung 63: Fluss bei verschiedenen Geschwindigkeiten in Relation zur Agentengröße

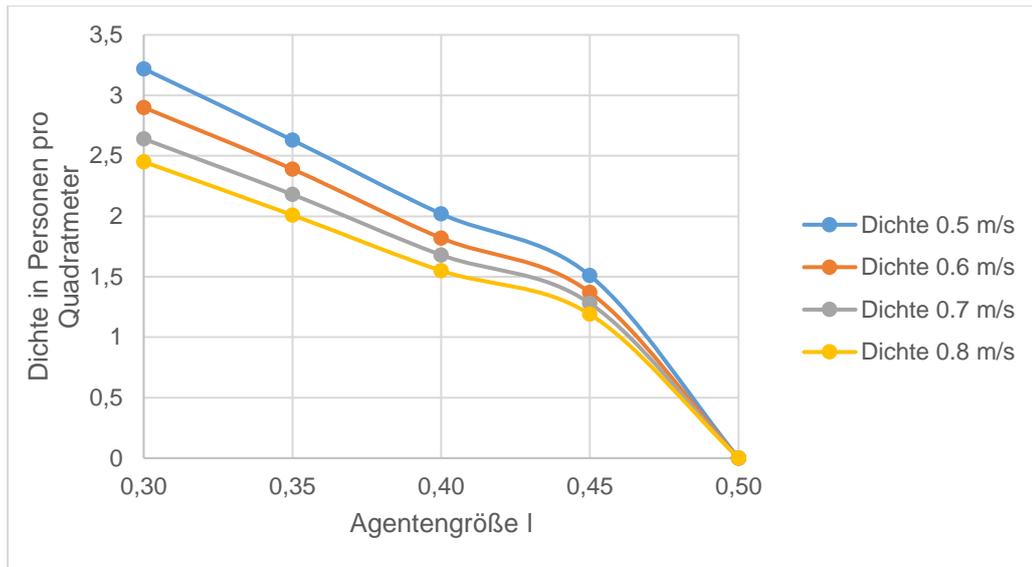


Abbildung 64: Dichte bei verschiedenen Geschwindigkeiten in Relation zur Agentengröße

Im Vergleich zur theoretischen Kapazität liegen die Ergebnisse von  $l = 0.30$  m und  $l = 0.35$  m im von Weidmann [4] angegebenen Intervall der erreichbaren theoretischen Kapazität. Eine Agentengröße von  $0.40$  m stimmt lediglich bei  $0.5$  m/s mit der unteren Intervallgrenze in Höhe von  $41\%$  überein. Die erreichbare theoretische Kapazität nach PM [5] liegt deutlich höher, deckt sich jedoch teils sehr gut mit den Ergebnissen von  $l = 0.30$  m (s. Versuch 3). Die Angaben von Barney [58] decken sich bis ca.  $0.65$  m/s gut mit einer Agentengröße von  $0.35$  m und bei höherer Geschwindigkeit mit  $l = 0.30$  m. Abbildung 65 zeigt die abhängig von der Agentengröße erreichten prozentualen Anteile der theoretischen Kapazität.

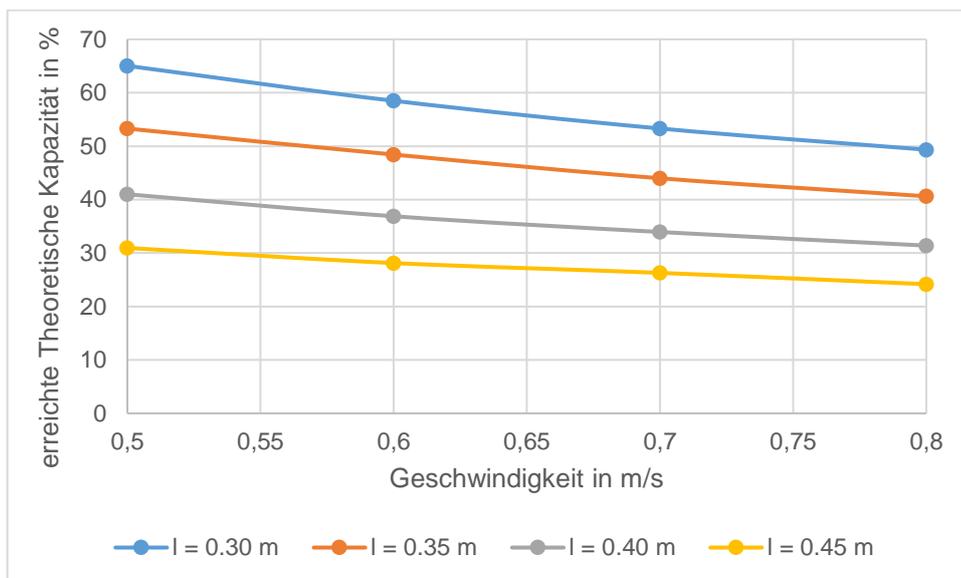


Abbildung 65: Vergleich der erreichten Theoretischen Kapazität

Im Vergleich bei einer gewählten Agentengröße von 0.35 m bzw. 0.40 m mit den Angaben in der Literatur zeigen sich deutlich niedrigere Werte als in der EN 115-1 [52]. Nach Schindler Österreich [60] würde die Fahrtreppe ‚locker‘ bis ‚mittel‘ ausgelastet sein, bei  $l = 0.45$  m wäre die Auslastung dagegen geringer als ‚locker‘. Eine Agentengröße von 0.40 m stimmt mit den von Oeding [67] angegebenen Werten als praktische Vollaustattung in Höhe von 60 Personen pro Minute überein. Diese liegt jedoch unter den Angaben der maximalen Kapazität unter Rückstau, welcher auch in der Simulation vorkommt. Westphal [36] beobachtete dagegen höhere Werte, so gibt der Autor bei  $l = 0.45$  m mehr um mehr als die doppelte Kapazität an. Ebenfalls liegen die Daten über einer Agentengröße von 0.30 m unter der maximalen Kapazität der Landestelle nach Weidmann [4]. Diese würde selbst bei 0.8 m/s von allen Agentengrößen unterschritten werden, wobei eine Agentengröße von 0.35 m einen Fluss von 97.5 Personen pro Minute bei 0.8 m/s aufweist. Durch den annähernd parallelen linearen Verlauf der Kapazitäten in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Agentengröße kann kein Absinken des Flusses durch die geringer werdende Besetzungsdichte (s. Abbildung 28 und 29) festgestellt werden. Auch liegt die Kapazität aller Agentengrößen über 0.30 m unter den von Davis und Dutta [69] bei  $v_{ESC} = 0.72$  m/s empfohlenen maximalen Kapazitäten. Bei einer Agentengröße von 0.35 m deckt sich der Fluss von (interpoliert) 93.4 Personen pro Minute allerdings mit einer der zehn untersuchten Fahrtreppen (s. Abbildung 30). Auch bei den von Al-Sharif [71] beobachteten Fahrtreppen tritt eine Übereinstimmung mit einer Fahrtreppe (Nr. 7) auf, bei einer größeren Agentengröße von beispielsweise 0.40 m sind die in Versuch 4 erreichten Kapazitäten allerdings zu gering. Die maximal von Kahali und Rastogi [72] gemessenen Flüsse ( $v_{ESC} = 0.65$  m/s) sind ebenfalls höher, jedoch stimmen die bei  $l = 0.40$  m bzw.  $l = 0.45$  m ausgegeben Werte in Höhe von 68.8 bzw. 52.9 Personen pro Minute gut mit den durchschnittlichen gemessenen Flüssen (s. Abbildung 31) überein. Der durchschnittliche Fluss aller 9 Fahrtreppen lag dabei bei morgens ca. 45.31 Personen pro Minute und abends bei ca. 55.68 Personen pro Minute. Die Agentengröße 0.45 m liegt zwischen diesen Werten, wobei die Größe 0.40 m noch unter dem höchsten durchschnittlichen Fluss mit 70.75 Personen pro Minute liegt. Die beobachteten Dichten (s. Abbildung 32 und 61) liegen dabei ungefähr gleich, wobei in [72] der Fluss von  $l = 0.45$  m bei Dichten (bzw. Dichtendenzen) im Intervall von 0.5 – 1.7 Personen pro Quadratmeter beobachtet wurde. Bei Versuch 3 liegt diese bei 1.33 Personen pro Quadratmeter. Bei 0.5 m/s ist zuletzt eine Überschneidung der Werte mit den von Bodendorf et al. [73] beobachteten Kapazitäten zu erkennen. Eine Agentengröße von  $l = 0.40$  m bzw. 0.45 m liegt innerhalb der durchschnittlich gemessenen Flüsse,  $l = 0.35$  m knapp über dem höchsten im Bahnhof gemessenen durchschnittlichen Fluss. Je nach betrachteten Messungszeitintervall sind zwischen den Daten noch weitere Parallelen zu erkennen.

## 6 Fazit und Ausblick

Die Simulation und Analyse von Fußgängerdynamiken ist ein sehr komplexes Thema. Es liegen insgesamt nur wenige universal gültige Erkenntnisse und dagegen viele Widersprüche vor, wobei auch teils einfache Sachverhalte noch nicht vollständig erforscht sind. Erschwert wird der Erkenntnisgewinn durch die schwere Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Berechnungen und Studien. Durch die vielen Freiheitsgrade des Systems ergibt sich eine Vielzahl an Parametern und Kombinationsmöglichkeiten. Diese reichen beispielsweise von unterschiedlichen Definitionen der Basisvariablen über unterschiedliche menschliche und umweltbezogene Faktoren bis hin zum grundsätzlichen Aufbau eines Experiments. Somit bedarf es einer individuellen Betrachtung der Situation, Methoden und Ziele, um anschließend die beste und dafür passende Vorgehensweise auszuwählen und Ergebnisse miteinander vergleichen zu können.

Zahlreiche Parameter im Zusammenhang mit der Fußgängerdynamik an Fahrtreppen können noch (weiter) erforscht werden. Dies sind einerseits menschliche Faktoren, wie beispielsweise der Einfluss der Kultur, die Zusammensetzung der Personen (Pendler, Touristen etc.), das Vorhandensein von Gepäck oder das Verhalten der Personen (Kooperation, Konkurrenz). Weitere Möglichkeiten sind der Einfluss von Fahrtreppenparametern und deren Umgebung, wie z. B. das Vorhandensein einer alternativen Treppe, die Anzahl der Fahrtreppen nebeneinander, der Einfluss von Länge, Neigungswinkel und Stufengröße oder die Lenkung von Personenströmen durch Barrieren. Auch ist noch nicht abschließend erforscht, ob sich auf der Fahrtreppe bewegende Personen wesentlich die Kapazität erhöhen.

Das *collision-free speed model for pedestrian dynamics* kann mit den verwendeten Parametern eine teilweise realistische Simulation des Fußgängerverhaltens erzeugen. Der Fluss war bei einer möglichst realistischen Parameterwahl in Versuch 1 geringfügig zu hoch. Nach einer Kalibrierung konnte bei Erhöhung der Geschwindigkeit ein konkaver Kurvenverlauf erzeugt werden, welcher jedoch ungenügend z. B. den geringer werdenden Besetzungsgrad der Fahrtreppenstufen und die daraus in der Realität bei Geschwindigkeiten über ca. 0.70 m/s abnehmenden bzw. nur noch geringfügig steigenden Personenfluss nachbilden konnte. In der Simulation stieg der Fluss somit grundsätzlich mit höherer Geschwindigkeit immer weiter an. Bei Vergrößerung der Breite konnte dagegen der in der Literatur favorisierte lineare Anstieg der Kapazität erzeugt werden, wobei der spezifische Fluss jedoch annähernd konstant blieb. Aufgrund der Stauungen am Eingang bei einer Agentengröße ab 0.35 m wurde in Versuch 4 der Einfluss dieses Parameters bei einer 1.00 m breiten Fahrtreppe untersucht. Bei Einstellung des Parameters  $l$  auf 0.35 m bzw. 0.40 m war der resultierende Fluss teils wesentlich geringer als die in der Literatur beschriebenen maximalen Kapazitäten. Jedoch repräsentieren die resultierenden Ergebnisse bei Verwendung dieser Agentengröße

in der Praxis beobachtete durchschnittliche Flüsse bzw. Flüsse über ein längeres Zeitintervall. Je nach den Zielen der Simulation scheint somit eine Agentengröße von 0.30 m bis 0.40 m zufriedenstellende Ergebnisse zu liefern. Nach den Angaben in der Literatur, sowie den Daten aus den Versuchen scheint außerdem eine Fahrtreppe mit einer Breite von 0.80 – 1.00 m und einer Geschwindigkeit von 0.65 – 0.70 m/s der beste Kompromiss aus Leistung und Sicherheit zu sein. Die Ansprüche und örtlichen Gegebenheiten beeinflussen jedoch essentiell auch die Höhe dieser Parameter in der Praxis.

Die geringe Komplexität des verwendeten Modells und die vergleichsweise wenigen Einstellmöglichkeiten erlauben eine einfache und schnelle Simulation der Fußgängerdynamik auf Fahrtreppen. Jedoch sind dem Modell dadurch auch Grenzen gesetzt.

So ist die Darstellung der Personen als Scheibe stark vereinfacht und entspricht nicht der Realität. Die Abbildung durch eine ellipsenartige Form würde näher mit der Proportion des menschlichen Körpers übereinstimmen. Außerdem könnte der Platzbedarf mit beobachteten Daten realitätsnaher eingestellt werden, was besonders für die Simulation von Fahrtreppen wichtig ist, da die Dynamiken und Ergebnisse zu einem großen Teil von der Fahrtreppenbreite und Stufenbesetzung als kritische Parameter abhängen. Durch die Form der Personen werden außerdem unauflösbare Verstopfungen (Gridlock) erzeugt. Dadurch kann weder eine Fahrtreppenbreite von 0.60 m mit einer Agentengröße von 0.35 m simuliert werden, noch beispielsweise eine 1.00 breite Fahrtreppe mit 0.50 m großen Agenten. Die Schulterbreite von Personen beträgt nach [6] jedoch ca. 0.58 m.

Das Richtungsmodell in NetLogo bewegt außerdem die Personen von links nach rechts, nicht jedoch zum Eingang der Fahrtreppe. Dies hat einen gleichmäßigen und dauernden Stau vor der Barriere zur Folge und die Personen am Rand können die Fahrtreppe nicht betreten. Die Simulation von in der Praxis beobachteten halbkreisförmigen Aufwölbungen vor der Engstelle kann damit ebenfalls nicht realisiert werden. Außerdem erfolgt keine Betrachtung von menschlichen Faktoren und alle Agenten bewegen sich anfangs mit einheitlicher Geschwindigkeit.

Auch die konstante Personenzahl  $n_b$  stellt sich herausfordernd für die Realisierung von praxisnahen Zuständen dar. Ein mit höherer Dichte niedriger werdender Fluss bis hin zum Stillstand des Systems kann nicht realisiert werden, da immer nur so viele Personen neu ankommen, wie die Simulation verlassen. Dies ist auch in der Realität bei Gebäudeevakuierungen oft nicht der Fall, da dabei der eintreffende Personenstrom höher als die Kapazität der Anlage (und somit der abfließende Strom) ist, was gestaute Zustände zur Folge hat. Diese Kontinuität beruht jedoch auf dem in NetLogo ausgeführten Programm und nicht auf dem dahinterstehenden Modell.

Durch die Einführung von neuen Parametern und Funktionen kann die Simulation erweitert werden. Eine Begrenzung besteht durch die vereinfachte Darstellung der Fahrtreppe. So wird die Stufengröße nicht beachtet und der Einfluss auf die Kapazität kann nicht untersucht werden. Die Einführung von diskreten Abständen bzw. Feldern, auf welchen sich die Agenten auf der Fahrtreppe aufhalten und deren Anzahl eingestellt werden kann, stellt eine Möglichkeit zur Erweiterung des Programms dar. Außerdem könnte das Skript durch die Möglichkeit von sich auf der Fahrtreppe bewegendem Personen erheblich erweitert werden. Dazu wäre auch ein Parameter für einen prozentualen Anteil der Personenphasen sinnvoll. Eine weitere Erweiterungsmöglichkeit würde sich aus einem stoßweisen Eintreffen der Personen ergeben. Dies würde die Simulationsergebnisse stärker von der Wahl des betrachteten Zeitintervalls abhängig machen, welches in der Praxis einen großen Einfluss auf die Studienergebnisse und die Vergleichbarkeit hat. Zusätzliche Möglichkeiten ergeben sich aus dem Umfeld der Fahrtreppe. So könnte durch die Bereitstellung einer stationären Treppe als Alternative, sowie einem Parameter ab welcher Dichte (bzw. gestauten Personenanzahl) diese benutzt werden würde, die Simulation praxisnaher gestaltet werden. Bei allen Erweiterungen der Simulation ist jedoch für ein realistisches Verhalten der Agenten eine gute Kalibrierung der eingestellten Parameter essenziell. Um die Simulation(en) zu ergänzen sind somit insbesondere transparente Experimente in der Praxis wichtig um die benötigten Daten zu gewinnen.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V., DGUV Information 205-033, Berlin, Deutschland, 2019.
- [2] M. Boltes, J. Zhang, A. Tordeux, A. Schadschneider und A. Seyfried, „Empirical Results of Pedestrian and Evacuation Dynamics,“ in *Complex Dynamics of Traffic Management*, B. Kerner, Ed., New York, NY, USA: Springer, 2018, pp. 671-699.
- [3] Online-Brückenkurs Physik, „4.2.1 Geschwindigkeit und Beschleunigung,“ MINT-Kolleg- Baden-Württemberg, 2021. [Online]. Available: <https://lx3.mint-kolleg.kit.edu/onlinekursphysik/html/1.4.2/modstart.html>. [Accessed 22.11.2021].
- [4] U. Weidmann, „Transporttechnik der Fussgänger: Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs, Literaturlauswertung,“ Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau (IVT), ETH Zürich, Zürich, Schweiz, 1993.
- [5] W. M. Predteenskij und A. I. Milinskij, *Personenströme in Gebäuden*, Berlin, Deutsche Demokratischen Republik: Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik, 1971.
- [6] J. J. Fruin, *Pedestrian Planning and Design, revised edition*, Mobile, AL, USA: Elevator World, 1987.
- [7] D. Kahali und R. Rastogi, „Passenger Flows at Escalators – Arriving at Count Interval for Design Flow Estimation,“ *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, vol. 21, no. 4, pp. 62-80, 2021.
- [8] A. Schadschneider, W. Klingsch, H. Klüpfel, T. Kretz, C. Rogsch und A. Seyfried, „Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications,“ in *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, R. Meyer, Ed., New York, NY, USA: Springer, 2009.
- [9] H. E. Nelson und F. W. Mowrer, „Emergency Movement,“ in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, P. J. Dinunno, Ed., 3rd ed., Quincy, MA, USA: National Fire Protection Association, 2002, pp. 367-380.
- [10] F. Fiedrich und A. Seyfried, *Vorlesungsfolien "Grundlagen der Evakuierungsplanung"*, Wuppertal, Deutschland: Bergische Universität Wuppertal, 2021.
- [11] M. Chraïbi, A. Tordeux, A. Schadschneider und A. Seyfried, „Modelling of Pedestrian and Evacuation Dynamics,“ in *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, R. Meyer, Ed., New York, NY, USA: Springer, 2018, pp. 649-669.
- [12] D. H. Biedermann, P. M. Kielar und O. Handel, „Betrachtung der Modellierung und Simulation von Fußgängern im Kontext verschiedener Skalen,“ in *Forum Bauinformatik*, vol. 26, Darmstadt, Deutschland, Sep. 2014.
- [13] J. Pettré, D. Wolinski und A.-H. Olivier, „Velocity-based models for crowd simulation,“ in *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012*, U. Weidmann, U. Kirsch, M. Schreckenberg, Eds., Cham, Schweiz: Springer International Publishing, 2014, pp. 1065-1078.
- [14] P. Fiorini und Z. Shiller, „Motion Planning in Dynamic Environments Using Velocity Obstacles,“ *The International Journal of Robotics Research*, vol. 17, no. 7, pp. 760-772, July 1998.
- [15] J. van den Berg, G. J. Stephen, J. Snape und D. Manchora, „Optimal Reciprocal Collision Avoidance,“ Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill, [Online]. Available: <https://gamma.cs.unc.edu/ORCA/>. [Accessed 03.12.2021].

- [16] J. van den Berg, S. J. Guy, M. C. Lin und D. Manocha, „Reciprocal n-Body Collision Avoidance,“ in *Robotics Research. Springer Tracts in Advanced Robotics*, C. Pradalier, R. Siegwart, G. Hirzinger, Eds., vol. 70, Berlin/Heidelberg, Deutschland: Springer, 2011, pp. 3-19.
- [17] J. Ondrej, J. Pettré, A.-H. Olivier und S. Donikian, „A Synthetic-Vision Based Steering Approach for Crowd Simulation,“ in *SIGGRAPH 2010 Papers*, vol. 4, no. 123, July 2010, pp. 1-9.
- [18] F. Dietrich und G. Köster, „Gradient Navigation Model for Pedestrian Dynamics,“ *Physical Review E*, vol. 89, no. 6, June 2014.
- [19] S. Paris, J. Pettré und S. Donikian, „Pedestrian Reactive Navigation for Crowd Simulation: a Predictive Approach,“ *Computer Graphics Forum*, vol. 26, no. 3, pp. 665-674, Sep. 2007.
- [20] A. Tordeux, M. Chraibi und A. Seyfried, „Collision-free speed model for pedestrian dynamics,“ in *Traffic and Granular Flow '15*, V. Knoop, W. Daamen, Eds., Cham, Schweiz: Springer International Publishing, 2016, pp. 225-232.
- [21] M. Chraibi, „Validated force-based modeling of pedestrian dynamics,“ Dissertation, Universität Köln, Köln, Deutschland, 2012.
- [22] M. Chraibi, A. Schadschneider und A. Seyfried, „On Force-Based Modeling of Pedestrian Dynamics,“ in *Modeling, Simulation and Visual Analysis of Crowds*, S. Ali, K. Nishino, D. Manocha, M. Shah., Eds., 11th ed., New York, NY, USA: Springer, 2013, pp. 23-42.
- [23] D. Helbing und M. Péter, „Social force model for pedestrian dynamics,“ *Physical Review E*, vol. 51, no. 5, pp. 4282-4286, May 1995.
- [24] IFIphysik, „3. NEWTONsches Gesetz (Wechselwirkungsprinzip),“ Joachim Herz Stiftung, [Online]. Available: <https://www.leifiphysik.de/mechanik/kraft-und-bewegungsänderung/grundwissen/3-newtonsches-gesetz-wechselwirkungsprinzip> [Accessed 27.11.2021].
- [25] K. Nagel und M. Schreckenberg, „A cellular automaton model for freeway traffic,“ *Journal de Physique I*, vol. 2, no. 12, pp. 2221-2229, 1992.
- [26] T. F. Bitzer, „Mikroskopische Modellierung und Simulation des Fußgängerverkehrs,“ Dissertation, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland, 2010.
- [27] U. Schneider und H. Kirchberger, „Evakuierungsberechnungen bei Brandereignissen mittels Ingenieurmethoden,“ in *Brandschutz- und Arbeitssicherheitsjahrbuch 2006/2007*, Wien, Österreich: W&H Media Druck + Verlag GmbH, 2007, pp. 62-76.
- [28] A. Schadschneider, „Cellular Automaton Approach to Pedestrian Dynamics – Theory,“ in *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, M. Schreckenberg, S.D. Sharma, Eds., Berlin/Heidelberg, Deutschland: Springer, 2002, pp. 75-86.
- [29] C. Burstedde, K. Klauck, A. Schadschneider und J. Zittartz, „Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton,“ *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 295, pp. 507–525, 2001.
- [30] D. Das, „A Survey on Cellular Automata and Its Applications,“ in *Global Trends in Computing and Communication Systems. ObCom 2011. Communications in Computer and Information Science*, P.V. Krishna, M.R. Babu, E. Ariwa, Eds., vol. 269, Berlin/Heidelberg, Deutschland: Springer, 2012, pp. 753-762.
- [31] C. Kinkeldey und M. Rose, „Fußgängersimulation auf der Basis sechseckiger zellulärer Automaten.,“ in *Forum Bauinformatik 2003 – Junge Wissenschaftler forschen*, K. Kapke, A. Wulf, Eds., Aachen, Deutschland: Shaker, 2003, pp. 77-86.

- [32] A. Schadschneider und K. Klauck, „Fussgängerdynamik und Optimierung von Fluchtwegen,“ Institut für Theoretische Physik, Universität Köln [Online]. Available: <http://www.thp.uni-koeln.de/zitt/phys/fussgaenger/main.html> [Accessed 03.12.2021].
- [33] D. Helbing, „A Fluid Dynamic Model for the Movement of Pedestrians,“ *Complex Systems*, vol. 6, no. 5, pp. 391-414, 1992.
- [34] A. Seyfried, M. Boltes, J. Kähler, W. Klingsch, A. Portz, T. Rupperecht, A. Schadschneider, B. Steffen und A. Winkens, „Enhanced Empirical Data for the Fundamental Diagram and the Flow Through Bottlenecks,“ in *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, W. Klingsch, C. Rogsch, A. Schadschneider, M. Schreckenberg, Eds., Berlin/Heidelberg, Deutschland: Springer, 2010, pp. 145-156.
- [35] U. Chattaraj, A. Seyfried und P. Chakroborty, „Comparison of Pedestrian Fundamental Diagram Across Cultures,“ *Advances in Complex Systems*, vol. 12, no. 3, pp. 393-405, June 2009.
- [36] J. Westphal, „Untersuchung von Fußgängerbewegungen auf Bahnhöfen mit starkem Nahverkehr,“ Dissertation, Lehrstuhl und Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb, Technischen Universität Hannover, Hannover, Deutschland, 1971.
- [37] J. Gales, J. Ferri, G. Harun, C. Janneret, T. Young, M. Kinsey, W. Wong, J. Stock, L. Chen, P. Tompson, H. Frantzich, S. Arias und J. Friholm, „Anthropomorphic Data and Movement Speeds,“ SFPE Scientific and Educational Foundation Inc., Gaithersburg, MD, USA, Final Report, May 2020.
- [38] M. Boltes, *Automatische Erfassung präziser Trajektorien in Personenströmen mit hoher Dichte*, Jülich, Deutschland: Forschungszentrum Jülich GmbH, 2015.
- [39] S. Banse, „Thema Geschwindigkeiten - Umrechner Meter pro Minute zu Fuß pro Minute,“ Smart-Rechner.de, 02.11.2021. [Online]. Available: [https://www.smart-rechner.de/geschwindigkeiten\\_umr/infothek/umrechner\\_mm\\_ftm.php](https://www.smart-rechner.de/geschwindigkeiten_umr/infothek/umrechner_mm_ftm.php) [Accessed 08.12.2021].
- [40] A. Seyfried, A. Portz und A. Schadschneider, „Phase Coexistence in Congested States of Pedestrian Dynamics,“ in *Cellular Automata. ACRI 2010. Lecture Notes in Computer Science*, S. Bandini, S. Manzoni, H. Umeo, G. Vizzari, Eds., Berlin/Heidelberg, Deutschland: Springer, 2010, pp. 496-505
- [41] A. Winkens, T. Rupperecht, A. Seyfried und W. Klingsch, „Empirical Study of Pedestrians' Characteristics at Bottlenecks,“ in *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, W. Klingsch, C. Rogsch, A. Schadschneider, M. Schreckenberg, Eds., Berlin/Heidelberg, Deutschland: Springer, 2010, pp. 263-268.
- [42] ARGEBAU Fachkommission Bauaufsicht, „Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (Muster-Versammlungsstättenverordnung – (MVStättVO)). Fassung Juni 2005. Zuletzt geändert durch Beschluss der Fachkommission Bauaufsicht vom Juli 2014.“ [Online]. Available: <https://www.is-argebau.de/Dokumente/4231724917250.pdf> [Accessed 13.12.2021].
- [43] S. P. Hoogendoorn und W. Daamen, „Pedestrian Behavior at Bottlenecks,“ *Transportation Science*, vol. 39, no. 2, pp. 147-159, May 2005.
- [44] A. Seyfried, O. Passon, B. Steffen, M. Boltes, T. Rupperecht und W. Klingsch, „New Insights into Pedestrian Flow Through Bottlenecks,“ *Transportation Science*, vol. 43, no. 3, pp. 395–406, Aug. 2009.
- [45] H. C. Muir, D. M. Bottomley und C. Marrison, „Effects of Motivation and Cabin Configuration on Emergency Aircraft Evacuation Behavior and Rates of Egress,“ *The International Journal of Aviation Psychology*, vol. 6, no. 1, pp. 57-77, 1996.

- [46] S. Burghardt, Dynamik von Personenströmen in Sportstadien, Dissertation, Fachbereich D – Abteilung Bauingenieurwesen, Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, Deutschland, 2013.
- [47] S. Burghardt, A. Seyfried und A. Klingsch, "Performance of stairs – Fundamental diagram and topographical measurements," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 37, pp. 268-278, Dec. 2013.
- [48] D. Helbing und A. Johansson, „Pedestrian, Crowd, and Evacuation Dynamics,“ in *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, R. Meyers, Ed., New York, NY, USA: Springer, 2009, pp. 6476-6495.
- [49] L. Aiman, R. F. Fahy und G. Proulx, „'Panic' and human behaviour in fire,“ in *Proceedings of the 4th International Symposium on Human Behaviour in Fire*, Robinson College, Cambridge, Vereinigtes Königreich, pp. 387-398, July 2009.
- [50] E. D. Kuligowski, „Computer Evacuation Models for Buildings,“ in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, M. Hurley, Ed., New York, NY, USA: Springer, 2016, pp. 2152-2180.
- [51] T. Richards, „Pedestrian Simulation Software Review,“ Leeds Institute for Data Science (LIDA), University of Leeds [Online]. Available: [https://urban-analytics.github.io/dust/docs/ped\\_sim\\_review](https://urban-analytics.github.io/dust/docs/ped_sim_review) [Accessed 05.01.2022].
- [52] *Sicherheit von Fahrtreppen und Fahrsteigen – Teil 1: Konstruktion und Einbau*, DIN EN 115-1:2018-01, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Deutschland, 2018.
- [53] Kone GmbH, „Als die Rolltreppe ein Aufzug war,“ [Online]. Available: <https://www.kone.de/unternehmen/geschichten/geschichte-rolltreppe.aspx> [Accessed 18.12.2021].
- [54] Target Study, „Escalator,“ Target Informatics Private Limited, 23.04.2011. [Online]. Available: <https://targetstudy.com/knowledge/invention/150/escalator.html> [Accessed 18.12.2021].
- [55] D. Unger, Aufzüge und Fahrtreppen, 4th ed., Berlin/Heidelberg, Deutschland: Springer Vieweg, 2021.
- [56] D. Unger, Aufzüge und Fahrtreppen, Berlin/Heidelberg, Deutschland: Springer Vieweg, 2013.
- [57] Schindler Aufzüge und Fahrtreppen GmbH, Berlin.
- [58] G. C. Barney, Elevator Traffic Handbook: Theory and Practice, London, Vereinigtes Königreich: Taylor & Francis Routledge, 2003.
- [59] *Safety Code for Elevators and Escalators*, ASME A17.1-2016/CSA B44-16, The American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, USA, 2016.
- [60] Schindler Aufzüge und Fahrtreppen GmbH, „Planungsleitfaden für Fahrtreppen und Fahrsteige,“ [Online]. Available: [https://www.schindler.com/at/internet/de/aufzuege-und-fahrtreppen/produkte-und-dienstleistungen/fahrtreppen/\\_jcr\\_content/iTopPar/downloadlist/downloadList/50\\_1348578905245.download.asset.50\\_1348578905245/planungsleitfaden-fuer-fahrtreppen-und-fahrsteige-aut-version.pdf](https://www.schindler.com/at/internet/de/aufzuege-und-fahrtreppen/produkte-und-dienstleistungen/fahrtreppen/_jcr_content/iTopPar/downloadlist/downloadList/50_1348578905245.download.asset.50_1348578905245/planungsleitfaden-fuer-fahrtreppen-und-fahrsteige-aut-version.pdf) [Accessed 27.12.2021].
- [61] Schindler Aufzüge und Fahrtreppen GmbH, „Planungsleitfaden für Fahrtreppen und Fahrsteige,“ 2020. [Online]. Available: [https://www.schindler.de/content/dam/website/de/docs/schindler-fahrtreppen-und-fahrsteige-planung.pdf/\\_jcr\\_content/renditions/original./schindler-%20fahrtreppen-und-fahrsteige-planung.pdf](https://www.schindler.de/content/dam/website/de/docs/schindler-fahrtreppen-und-fahrsteige-planung.pdf/_jcr_content/renditions/original./schindler-%20fahrtreppen-und-fahrsteige-planung.pdf) [Accessed 27.12.2021].

- [62] Mitsubishi Electric Corporation, „Escalators Series Z,“ 2021. [Online]. Available: [https://www.mitsubishielectric.com/elevator/products/basic/escalators/z\\_type\\_es/pdf/brochure.pdf](https://www.mitsubishielectric.com/elevator/products/basic/escalators/z_type_es/pdf/brochure.pdf) [Accessed 28.12.2021].
- [63] Hitachi Elevator (China) Co., Ltd., „Hitachi Escalator | TX Series,“ 2019. [Online]. Available: [http://www.hitachi-lift.co.in/pdf/20191028\\_Hitachi-Lift-TX-Series.pdf](http://www.hitachi-lift.co.in/pdf/20191028_Hitachi-Lift-TX-Series.pdf) [Accessed 28.12.2021].
- [64] TK Elevator, „TK Elevator eSlider,“ 2021. [Online]. Available: <https://eslider.tkelevator.com> [Accessed 28.12.2021].
- [65] KONE Corporation Finland, „KONE Escalator Planner,“ 2021. [Online]. Available: <https://rolltreppen-planer.kone.de> [Accessed 29.12.2021].
- [66] KLEEMANN, „Escalators & Moving Walks,“ 2021. [Online]. Available: [https://kleemannlifts.com/sites/default/files/inline-files/products-escalators\\_%26\\_moving\\_walks-ende-20210608\\_1.pdf](https://kleemannlifts.com/sites/default/files/inline-files/products-escalators_%26_moving_walks-ende-20210608_1.pdf) [Accessed 28.12.2021].
- [67] D. Oeding, „Verkehrbelastung und Dimensionierung von Gehwegen und anderen Anlagen des Fußgängerverkehrs,“ Institut für Stadtbauwesen, Technische Hochschule Braunschweig, Braunschweig, Deutschland, Forschungsbericht 22, 1963.
- [68] F. S. P. Turner, „Preliminary planning for a new tube railway across London,“ *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, pp. 19-38, Jan. 1959.
- [69] P. Davis und G. Dutta, „Estimation of Capacity of Escalators in London Underground,“ IIMA Working Papers WP2002-11-01, Indian Institute of Management Ahmedabad, Research and Publication Department, Jan. 2002.
- [70] Buildingandinteriors.com, „Escalators: A professional’s guide for better planning & installation,“ Forma Advisory Services LLP, 06.20.2021. [Online]. Available: [https://buildingandinteriors.com/escalators-a-professionals-guide-for-better-planning-installation/#Optimal\\_speed\\_and\\_capacity\\_of\\_escalators](https://buildingandinteriors.com/escalators-a-professionals-guide-for-better-planning-installation/#Optimal_speed_and_capacity_of_escalators) [Accessed 28.12.2021].
- [71] L. Al-Sharif, „Escalator Handling Capacity: Standards versus Practice,“ in *Elevator World*, vol. 44 no. 12, Mobile, AL, USA, Dec. 1996.
- [72] D. Kahali und R. Rastogi, „Analysis of Flow Characteristics and Step Size of Escalators at Metro Stations,“ *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 25, no. 3, pp. 1043-1055, 2021.
- [73] H. Bodendorf, M. Osterkamp, A. Seyfried und S. Holl, „Field studies on the capacity of escalators,“ *Transportation Research Procedia*, vol. 2, pp. 213-218, 2014. The Conference of Pedestrian and Evacuation Dynamics 2014 (PED 2014), Oct. 22-24, 2014, Delft, Niederlande.
- [74] J. May, „If we want to increase escalator capacity, why don’t we just run the things faster?,“ New Statesman Media Group Ltd., 17 02 2016. [Online]. Available: <https://citymonitor.ai/community/if-we-want-increase-escalator-capacity-why-don-t-we-just-run-things-faster-1844> [Accessed 29.12.2021].
- [75] U. Wilensky, „NetLogo,“ Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL, USA, 1999. [Online]. Available: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo> [Accessed 05.01.2022].
- [76] U. Wilensky, „What is NetLogo?,“ Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL, USA, 2021. [Online]. Available: <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/doc>. [Accessed 05.01.2022]
- [77] A. Tordeux, M. Chraibi und A. Seyfried, „Collision-free first order pedestrian model,“ presented at *Traffic and Granular Flow '15*, Nootdorp, Niederlande, Oct. 28-30, 2015.

- [78] T. Kretz, A. Grünebohm und M. Schreckenberg, „Experimental study of pedestrian flow through a bottleneck,“ *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, Oct. 2006.
- [79] R. Nagai, M. Fukamachi und T. Nagatani, „Evacuation of crawlers and walkers from corridor through an exit,“ *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, vol. 367, pp. 449-460, July 2006.
- [80] K. Müller, Zur Gestaltung und Bemessung von Fluchtwegen für die Evakuierung von Personen aus Bauwerken auf der Grundlage von Modellversuchen, Dissertation, Technische Hochschule Otto von Guericke Magdeburg, Deutschland, 1981.

## 8 Anhang

### 8.1 Versuch 1

	Breite 0.60 m					Breite 0.80 m					Breite 1.00 m				
	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	J	D <sub>ESC</sub>	J <sub>s</sub>	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	J	D <sub>ESC</sub>	J <sub>s</sub>	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	J	D <sub>ESC</sub>	J <sub>s</sub>
30 s	0.70	4.70	1.10	2.67	1.83	0.60	4.00	1.36	2.59	1.70	0.80	3.40	1.80	2.85	1.80
	0.40	4.70	0.95	2.64	1.58	0.80	4.10	1.49	2.55	1.86	0.80	3.50	1.62	2.72	1.62
	0.80	5.00	1.16	2.59	1.93	0.80	4.10	1.34	2.52	1.68	0.60	3.50	1.68	2.78	1.68
	0.70	4.90	1.20	2.43	2.00	0.80	4.20	1.37	2.64	1.71	0.90	3.40	1.59	2.78	1.59
	1.20	4.60	1.17	2.60	1.95	1.10	4.10	1.35	2.74	1.69	0.90	3.50	1.74	2.78	1.74
	0.50	4.90	1.02	2.58	1.70	0.70	4.10	1.31	2.68	1.64	0.70	3.50	1.69	2.65	1.69
	0.50	4.80	1.25	2.49	2.08	0.80	4.10	1.39	3.08	1.74	0.80	3.50	1.84	2.80	1.84
	0.40	5.10	1.13	2.47	1.88	0.80	4.00	1.52	2.58	1.90	0.70	3.40	1.72	2.78	1.72
	0.70	4.70	1.13	2.56	1.88	0.60	4.20	1.40	2.66	1.75	0.60	3.40	1.56	2.62	1.56
	0.20	4.70	1.19	2.27	1.98	1.10	4.20	1.42	2.69	1.78	0.60	3.50	1.85	2.74	1.85
60 s	4.70	1.03	2.91	1.72	1.36	2.98	1.70	1.36	3.30	1.73	3.11	1.73			
	4.80	0.95	2.86	1.58	1.43	2.97	1.79	1.43	3.40	1.65	3.03	1.65			
	5.00	1.03	2.82	1.72	1.37	3.02	1.71	1.37	3.40	1.71	3.09	1.71			
	4.90	1.08	2.82	1.80	1.37	3.06	1.71	1.37	3.50	1.62	3.02	1.62			
	4.90	1.05	2.84	1.75	1.34	3.08	1.68	1.34	3.60	1.73	3.08	1.73			
	4.90	1.00	2.85	1.67	1.36	3.07	1.70	1.36	3.30	1.71	3.07	1.71			
	4.70	1.09	2.80	1.82	1.41	3.30	1.76	1.41	3.60	1.80	3.12	1.80			
	4.90	1.03	2.78	1.72	1.56	3.02	1.95	1.56	3.40	1.72	3.11	1.72			
	5.00	1.05	2.82	1.75	1.37	3.02	1.71	1.37	3.40	1.64	3.02	1.64			
	4.90	1.05	2.67	1.75	1.43	3.09	1.79	1.43	3.50	1.78	3.06	1.78			
120 s	5.00	0.99	3.01	1.65	4.20	1.34	3.14	1.68	3.40	1.74	3.28	1.74			
	4.90	0.94	2.99	1.57	4.40	1.39	3.18	1.74	3.50	1.70	3.26	1.70			
	4.80	0.96	2.96	1.60	4.30	1.36	3.19	1.70	3.40	1.72	3.27	1.72			
	4.90	1.01	2.96	1.68	4.10	1.37	3.23	1.71	3.40	1.68	3.25	1.68			
	4.80	1.00	2.98	1.67	4.30	1.36	3.24	1.70	3.40	1.70	3.22	1.70			
	4.90	0.96	2.99	1.60	4.10	1.36	3.25	1.70	3.30	1.73	3.29	1.73			
	4.80	1.01	2.96	1.68	4.30	1.38	3.35	1.73	3.50	1.75	3.27	1.75			
	4.70	0.98	2.94	1.63	4.30	1.40	3.20	1.75	3.50	1.72	3.28	1.72			
	4.90	0.99	2.96	1.65	4.20	1.37	3.22	1.71	3.30	1.68	3.24	1.68			
	5.00	1.00	2.89	1.67	4.00	1.41	3.28	1.76	3.40	1.75	3.25	1.75			
300 s	4.90	0.95	3.06	1.58	4.30	1.36	3.31	1.70	3.50	1.73	3.38	1.73			
	4.90	0.94	3.07	1.57	4.20	1.37	3.30	1.71	3.30	1.72	3.39	1.72			
	4.90	0.96	3.06	1.60	4.00	1.36	3.31	1.70	3.40	1.72	3.38	1.72			
	4.90	0.96	3.05	1.60	4.10	1.37	3.34	1.71	3.50	1.70	3.37	1.70			
	4.80	0.96	3.05	1.60	4.20	1.35	3.30	1.69	3.40	1.71	3.34	1.71			
	5.00	0.95	3.06	1.58	4.20	1.36	3.36	1.70	3.40	1.73	3.40	1.73			
	4.90	0.97	3.07	1.62	4.20	1.37	3.32	1.71	3.40	1.74	3.39	1.74			
	4.70	0.95	3.05	1.58	4.40	1.37	3.30	1.71	3.40	1.72	3.37	1.72			
	4.70	0.96	3.06	1.60	3.90	1.37	3.34	1.71	3.40	1.72	3.39	1.72			
	4.80	0.96	3.02	1.60	4.30	1.38	3.36	1.73	3.50	1.74	3.39	1.74			
600 s	5.00	0.94	3.09	1.57	4.30	1.36	3.35	1.70	3.60	1.72	3.41	1.72			
	4.90	0.94	3.09	1.57	4.20	1.37	3.37	1.71	3.40	1.72	3.41	1.72			
	5.00	0.95	3.10	1.58	4.10	1.36	3.36	1.70	3.40	1.73	3.42	1.73			
	5.00	0.95	3.08	1.58	4.20	1.37	3.38	1.71	3.60	1.72	3.41	1.72			
	4.80	0.94	3.08	1.57	4.20	1.35	3.33	1.69	3.50	1.72	3.40	1.72			
	4.90	0.94	3.09	1.57	4.30	1.36	3.37	1.70	3.40	1.72	3.40	1.72			
	4.80	0.97	3.10	1.62	4.10	1.37	3.38	1.71	3.50	1.74	3.43	1.74			
	4.90	0.95	3.09	1.58	4.10	1.36	3.34	1.70	3.40	1.73	3.42	1.73			
	4.90	0.95	3.09	1.58	4.10	1.36	3.37	1.70	3.40	1.74	3.44	1.74			
	5.00	0.95	3.07	1.58	4.30	1.37	3.37	1.71	3.50	1.73	3.42	1.73			

## 8.2 Versuch 2

	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	J	D <sub>ESC</sub>		D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	J	D <sub>ESC</sub>		D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	J	D <sub>ESC</sub>
V2.1	0.60	2.50	0.58	5.62	V2.2	0.70	3.00	0.97	4.74	V2.3	0.60	3.30	1.21	4.00
	0.50	2.40	0.59	5.68		0.90	3.00	0.94	4.65		0.70	3.40	1.21	4.00
	1.00	2.70	0.56	5.45		0.40	2.90	0.95	4.67		0.70	3.30	1.20	3.92
	0.60	2.40	0.59	5.68		0.50	3.10	0.96	4.67		0.80	3.30	1.23	4.01
	0.70	2.50	0.57	5.57		0.80	3.00	0.96	4.74		1.10	3.30	1.21	3.96
	0.60	2.50	0.55	5.45		0.60	3.00	0.96	4.70		0.70	3.40	1.21	3.97
	0.50	2.50	0.59	5.70		0.80	3.10	0.94	4.67		0.50	3.40	1.20	3.95
	0.80	2.50	0.59	5.68		0.80	3.10	0.96	4.68		0.70	3.30	1.21	3.98
	0.50	2.50	0.58	5.61		1.00	3.10	0.96	4.71		1.00	3.30	1.21	3.95
	0.70	2.60	0.56	5.47		0.70	3.20	0.95	4.72		0.70	3.20	1.20	3.96
V2.4	0.70	3.60	1.46	3.61	V2.5	0.80	3.50	1.62	3.22	V2.6	0.60	3.70	1.75	2.89
	0.80	3.40	1.46	3.60		1.00	3.50	1.62	3.22		0.60	3.60	1.76	2.91
	0.60	3.40	1.44	3.56		0.60	3.50	1.61	3.18		0.40	3.50	1.76	2.91
	0.50	3.40	1.45	3.57		0.70	3.50	1.63	3.23		0.60	3.70	1.75	2.88
	0.50	3.40	1.45	3.59		1.30	3.40	1.61	3.18		1.00	3.60	1.75	2.89
	0.60	3.40	1.45	3.56		0.80	3.70	1.62	3.21		1.10	3.50	1.77	2.92
	0.80	3.40	1.45	3.59		0.60	3.50	1.62	3.20		0.50	3.90	1.73	2.87
	0.20	3.40	1.45	3.57		0.70	3.40	1.64	3.24		1.00	3.80	1.74	2.87
	0.70	3.50	1.46	3.60		0.80	3.50	1.64	3.24		0.70	3.60	1.77	2.92
	1.00	3.60	1.45	3.58		0.90	3.50	1.65	3.25		0.40	3.50	1.77	2.91
V2.7	0.80	3.50	1.87	2.63	V2.8	0.20	3.70	1.97	2.45	V2.9	1.00	3.40	2.07	2.30
	0.90	3.80	1.86	2.64		0.70	3.70	1.97	2.44		0.80	3.30	2.06	2.27
	0.60	3.50	1.87	2.65		0.40	3.80	1.98	2.45		0.50	3.60	2.06	2.28
	0.60	3.70	1.87	2.65		0.50	3.60	1.98	2.46		0.80	3.60	2.08	2.29
	0.80	3.70	1.86	2.63		0.80	3.70	1.98	2.45		0.20	3.50	2.05	2.27
	0.80	3.70	1.87	2.65		0.80	3.80	1.96	2.44		1.00	3.70	2.07	2.29
	0.30	3.60	1.85	2.63		1.10	3.10	1.97	2.44		1.10	3.40	2.08	2.30
	0.90	3.40	1.86	2.62		1.00	3.50	1.97	2.44		0.70	3.40	2.06	2.28
	0.90	3.80	1.87	2.65		0.60	4.00	1.98	2.45		0.40	3.80	2.06	2.28
	1.00	3.60	1.88	2.67		0.60	3.50	1.98	2.44		0.80	3.60	2.08	2.29
V2.10	1.10	3.80	2.16	2.14	V2.11	0.50	3.40	2.26	2.04	V2.12	0.80	3.90	2.32	1.93
	0.60	3.70	2.15	2.14		1.10	3.50	2.23	2.01		1.20	3.80	2.30	1.91
	0.80	3.20	2.16	2.15		1.40	3.70	2.25	2.03		0.60	3.50	2.31	1.91
	0.50	3.70	2.15	2.13		1.00	3.30	2.26	2.04		0.50	3.60	2.32	1.92
	0.50	3.70	2.16	2.15		0.70	3.40	2.24	2.02		1.20	3.70	2.32	1.93
	0.90	3.50	2.15	2.13		0.70	3.50	2.24	2.03		1.20	3.50	2.31	1.92
	1.10	3.90	2.15	2.13		0.90	3.70	2.25	2.03		0.50	4.00	2.30	1.91
	1.10	3.70	2.16	2.15		0.90	3.20	2.23	2.01		0.70	3.60	2.32	1.92
	0.70	3.70	2.17	2.15		0.50	3.90	2.24	2.03		0.60	3.80	2.30	1.91
	0.90	3.70	2.16	2.14		0.90	4.00	2.22	2.02		0.40	3.80	2.30	1.91
V2.13	0.70	3.70	2.37	1.82	V2.14	1.00	3.60	2.47	1.75	V2.15	0.70	3.60	2.51	1.66
	1.00	3.60	2.37	1.82		0.90	3.60	2.44	1.74		0.60	3.80	2.50	1.66
	0.70	3.50	2.40	1.83		0.40	3.70	2.44	1.73		0.50	3.90	2.54	1.68
	0.50	3.70	2.41	1.84		0.60	3.80	2.47	1.76		0.60	3.40	2.51	1.67
	0.50	3.60	2.40	1.84		0.30	3.60	2.45	1.74		0.70	3.60	2.52	1.67
	0.70	3.60	2.41	1.84		0.80	3.80	2.44	1.74		0.90	3.90	2.50	1.66
	0.60	3.90	2.36	1.82		0.60	3.80	2.43	1.73		1.00	3.30	2.50	1.66
	0.80	3.50	2.38	1.82		1.00	3.80	2.45	1.74		0.90	3.60	2.50	1.66
	1.00	3.40	2.37	1.82		0.80	3.40	2.47	1.76		1.00	3.80	2.52	1.67
	0.90	3.90	2.36	1.81		0.70	3.50	2.47	1.76		0.80	3.70	2.51	1.66

### 8.3 Versuch 3

	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	J	D <sub>ESC</sub>		D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	J	D <sub>ESC</sub>		D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	J	D <sub>ESC</sub>
<b>V3.1</b>	0.70	5.00	0.88	2.86	<b>V3.2</b>	0.20	4.80	1.04	2.92	<b>V3.3</b>	0.80	4.30	1.29	3.17
	0.80	4.80	0.89	2.88		0.80	4.70	1.06	2.97		1.00	4.30	1.28	3.16
	0.50	5.00	0.89	2.88		0.80	4.70	1.06	2.98		0.70	4.20	1.28	3.15
	0.60	5.00	0.88	2.88		0.40	4.60	1.06	2.98		0.80	4.30	1.29	3.17
	0.60	5.00	0.88	2.89		0.50	4.60	1.06	2.97		1.20	4.50	1.27	3.16
	0.60	4.80	0.88	2.88		0.70	4.80	1.07	2.98		0.80	4.30	1.29	3.19
	0.60	4.90	0.88	2.88		0.90	4.70	1.07	3.01		0.60	4.20	1.29	3.17
	0.80	4.80	0.89	2.89		0.90	4.70	1.06	2.96		0.70	4.20	1.29	3.20
	0.70	4.90	0.88	2.88		0.80	4.90	1.04	2.95		0.80	4.40	1.29	3.18
	0.70	4.90	0.87	2.87		1.00	4.80	1.05	2.98		0.70	4.30	1.29	3.20
<b>V3.4</b>	0.60	3.80	1.46	3.22	<b>V3.5</b>	0.80	3.50	1.62	3.22	<b>V3.6</b>	0.90	3.40	1.73	3.11
	0.90	3.90	1.48	3.24		1.00	3.50	1.62	3.22		0.70	3.40	1.72	3.09
	1.00	3.60	1.49	3.27		0.60	3.50	1.61	3.18		0.90	3.50	1.71	3.10
	0.80	3.90	1.48	3.24		0.70	3.50	1.63	3.23		1.10	3.40	1.73	3.11
	0.90	3.90	1.48	3.24		1.30	3.40	1.61	3.18		0.60	3.50	1.74	3.15
	0.30	3.90	1.48	3.26		0.80	3.70	1.62	3.21		0.70	3.30	1.72	3.09
	1.20	3.70	1.49	3.27		0.60	3.50	1.62	3.20		0.70	3.40	1.72	3.10
	0.50	4.10	1.49	3.26		0.70	3.40	1.64	3.24		1.10	3.40	1.73	3.12
	0.80	3.90	1.49	3.26		0.80	3.50	1.64	3.24		0.50	3.40	1.73	3.11
	0.70	3.90	1.46	3.21		0.90	3.50	1.65	3.25		0.90	3.40	1.72	3.10
<b>V3.7</b>	0.80	3.10	1.87	3.09	<b>V3.8</b>	1.00	3.20	2.00	3.08	<b>V3.9</b>	0.90	2.30	2.17	3.09
	0.90	3.30	1.86	3.07		0.60	3.00	1.97	2.99		0.90	2.60	2.19	3.11
	0.70	3.20	1.86	3.08		0.80	3.20	1.92	2.94		0.60	2.50	2.19	3.10
	1.00	3.00	1.87	3.09		0.60	3.20	1.92	2.94		0.80	2.30	2.19	3.10
	0.50	3.30	1.87	3.10		0.60	3.10	1.97	3.01		1.00	2.30	2.17	3.08
	0.70	3.10	1.86	3.07		0.80	3.20	1.92	2.93		1.00	2.30	2.18	3.10
	1.20	2.90	1.85	3.06		0.80	3.20	1.95	2.96		0.60	2.50	2.17	3.10
	1.00	3.20	1.86	3.08		0.50	3.00	1.96	3.01		0.90	2.60	2.16	3.07
	0.50	3.40	1.87	3.07		1.20	3.20	1.99	3.04		0.80	2.60	2.16	3.07
	0.40	2.90	1.87	3.09		0.70	3.20	1.91	2.91		0.70	2.40	2.18	3.09
<b>V3.10</b>	0.90	2.20	2.30	3.04	<b>V3.0</b>	0.90	4.90	0.96	3.75					
	1.30	2.30	2.28	3.03		0.80	4.90	0.97	3.78					
	0.90	2.20	2.29	3.04		0.90	4.90	0.96	3.80					
	0.50	2.10	2.30	3.04		0.50	4.90	0.97	3.77					
	0.80	2.20	2.30	3.05		1.10	4.90	0.97	3.79					
	0.60	2.20	2.29	3.04		0.70	4.90	0.96	3.77					
	0.60	2.00	2.29	3.04		1.20	4.90	0.96	3.78					
	0.40	2.20	2.30	3.04		1.10	5.00	0.96	3.79					
	0.50	2.20	2.30	3.05		0.50	4.90	0.97	3.78					
	0.80	2.30	2.30	3.04		0.60	4.90	0.96	3.76					

## 8.4 Versuch 4

	D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	J	D <sub>ESC</sub>		D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	J	D <sub>ESC</sub>		D <sub>ST</sub>	D <sub>E</sub>	J	D <sub>ESC</sub>
<b>V4.1</b>	0.80	3.50	1.62	3.22	<b>V4.2</b>	0.20	3.90	1.35	2.67	<b>V4.3</b>	0.70	3.80	1.03	2.03
	1.00	3.50	1.62	3.22		0.60	4.10	1.32	2.58		0.80	3.80	1.02	2.01
	0.60	3.50	1.61	3.18		0.90	3.90	1.34	2.64		0.50	3.50	1.04	2.03
	0.70	3.50	1.63	3.23		0.80	4.00	1.33	2.62		0.80	3.80	1.00	1.98
	1.30	3.40	1.61	3.18		0.80	4.00	1.32	2.62		0.90	3.70	1.02	1.99
	0.80	3.70	1.62	3.21		0.70	3.90	1.33	2.63		0.50	3.80	1.04	2.04
	0.60	3.50	1.62	3.20		0.90	3.90	1.31	2.61		1.00	3.70	1.04	2.04
	0.70	3.40	1.64	3.24		1.30	4.10	1.34	2.64		0.90	3.70	1.01	2.00
	0.80	3.50	1.64	3.24		0.70	4.00	1.34	2.65		0.60	3.60	1.03	2.03
	0.90	3.50	1.65	3.25		0.70	3.90	1.34	2.64		0.50	3.70	1.02	2.01
<b>V4.4</b>	0.60	3.40	0.77	1.51	<b>V4.5</b>	0.60	3.70	1.75	2.89	<b>V4.6</b>	0.70	4.00	1.44	2.37
	0.60	3.40	0.78	1.52		0.60	3.60	1.76	2.91		0.50	4.00	1.46	2.41
	0.80	0	0	0		0.40	3.50	1.76	2.91		0.90	4.00	1.45	2.40
	0.70	3.40	0.77	1.51		0.60	3.70	1.75	2.88		0.60	3.90	1.44	2.38
	0.60	0	0	0		1.00	3.60	1.75	2.89		0.30	3.90	1.47	2.41
	0.50	3.30	0.78	1.52		1.10	3.50	1.77	2.92		0.90	3.90	1.41	2.33
	0.80	3.40	0.77	1.50		0.50	3.90	1.73	2.87		0.40	4.00	1.46	2.40
	0.80	0	0	0		1.00	3.80	1.74	2.87		0.50	4.00	1.47	2.41
	0.70	0	0	0		0.70	3.60	1.77	2.92		0.50	4.00	1.47	2.41
	0.70	0	0	0		0.40	3.50	1.77	2.91		1.10	4.10	1.46	2.40
<b>V4.7</b>	0.30	3.70	1.08	1.79	<b>V4.8</b>	0.90	0	0	0	<b>V4.9</b>	0.80	3.50	1.87	2.63
	0.50	0	0	0		0.60	0	0	0		0.90	3.80	1.86	2.64
	0.60	3.90	1.12	1.84		0.70	0	0	0		0.60	3.50	1.87	2.65
	0.60	3.80	1.09	1.80		0.90	3.30	0.85	1.39		0.60	3.70	1.87	2.65
	0.50	3.60	1.12	1.84		0.60	3.40	0.85	1.39		0.80	3.70	1.86	2.63
	0.90	3.70	1.12	1.84		0.60	3.40	0.81	1.32		0.80	3.70	1.87	2.65
	0.70	3.50	1.09	1.80		0.50	3.50	0.86	1.39		0.30	3.60	1.85	2.63
	0.60	3.80	1.11	1.83		0.70	0	0	0		0.90	3.40	1.86	2.62
	0.50	3.70	1.11	1.82		1.00	3.30	0.85	1.38		0.90	3.80	1.87	2.65
	0.30	3.70	1.12	1.84		0.70	0	0	0		1.00	3.60	1.88	2.67
<b>V4.10</b>	0.80	3.90	1.53	2.16	<b>V4.11</b>	0.80	3.70	1.22	1.72	<b>V4.12</b>	0.70	3.40	0.90	1.27
	0.50	4.00	1.54	2.18		0.60	3.70	1.18	1.66		0.60	0	0	0
	0.60	3.70	1.55	2.20		0.90	3.60	1.18	1.66		0.90	3.40	0.91	1.28
	0.50	3.80	1.55	2.19		1.00	3.70	1.20	1.69		0.90	3.40	0.92	1.29
	0.70	4.00	1.55	2.19		0.90	3.80	1.17	1.66		0.60	0	0	0
	0.60	3.70	1.53	2.16		1.10	3.70	1.17	1.65		0.50	3.30	0.91	1.28
	1.00	3.90	1.54	2.17		0.80	3.80	1.18	1.66		0.50	3.40	0.91	1.28
	0.50	4.00	1.53	2.17		0.90	3.80	1.19	1.68		0.70	3.20	0.91	1.28
	1.00	4.00	1.54	2.18		0.70	3.60	1.20	1.69		0.70	3.40	0.92	1.29
	0.90	4.00	1.54	2.18		0.60	3.80	1.19	1.68		0.90	3.30	0.98	1.26
<b>V2.13</b>	0.20	3.70	1.97	2.45	<b>V4.14</b>	0.60	3.90	1.64	2.02	<b>V4.15</b>	1.00	3.70	1.27	1.56
	0.70	3.70	1.97	2.44		0.80	3.90	1.62	2.01		0.50	3.60	1.25	1.54
	0.40	3.80	1.98	2.45		1.00	4.00	1.63	2.02		0.90	3.70	1.25	1.55
	0.50	3.60	1.98	2.46		0.70	3.90	1.61	2.00		0.60	3.80	1.25	1.54
	0.80	3.70	1.98	2.45		0.50	3.90	1.63	2.05		1.10	3.70	1.25	1.55
	0.80	3.80	1.96	2.44		0.90	4.10	1.63	2.01		0.50	3.70	1.26	1.55
	1.10	3.10	1.97	2.44		1.00	4.00	1.64	2.03		0.50	3.70	1.25	1.54
	1.00	3.50	1.97	2.44		1.00	3.80	1.65	2.04		0.70	3.80	1.26	1.55
	0.60	4.00	1.98	2.45		0.60	4.10	1.60	1.98		0.60	3.60	1.27	1.57
	0.60	3.50	1.98	2.44		0.70	3.90	1.60	1.98		0.70	3.50	1.25	1.54
<b>V4.16</b>	0.50	0	0	0										
	0.80	0	0	0										
	0.50	3.30	0.96	1.19										
	0.70	0	0	0										
	0.70	0	0	0										
	0.80	0	0	0										
	0.60	0	0	0										
0.70	3.40	0.97	1.19											
0.60	3.40	0.97	1.19											
0.70	0	0	0											

Einheiten:

- D<sub>ST</sub> / D<sub>E</sub> / D<sub>ESC</sub> in Personen pro Quadratmeter
- J / J<sub>s</sub> in Personen pro Sekunde