Bergische Universität Wuppertal

Fachbereich D – Abteilung Sicherheitstechnik

Empirische Erfassung von Personenstromcharakteristika in Engstellen - Einfluss der Breite

Bachelor-Thesis

Simon Zens, Matrikel-Nr.: 0423553

Anschrift: Im Winkel 8, 51789 Lindlar

betreuender Hochschullehrer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfram Klingsch

betreuender wissenschaftlicher Mitarbeiter (BUW): Dipl.-Ing. Tobias Rupprecht

betreuender wissenschaftlicher Mitarbeiter (JSC): Dr. rer. nat. Armin Seyfried

Jülich Supercomputing Centre, Forschungszentrum Jülich

Tag der Ausgabe: 02. Januar 2008

Tag der Abgabe: 14. April 2008

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Bachelor-Thesis – einschließlich beigefügter Zeichnungen und Darstellungen – selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt habe, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Lindlar, den 14. April 2008 Simon Zens

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

2 Begriffsdefinitionen **3**

2.1 Dichte des Personenstroms 3

2.2 Personenfluss 4

2.3 „time gap“ 5

2.4 Beispielrechnung 6

3 Forschungsberichte und baurechtliche Grundlagen **8**

3.1 Seyfried et al.: New insights into pedestrian flow through bottlenecks . . 8

3.2 Kretz et al.: Experimental study of pedestrian flow through a bottleneck 11

3.3 Nagai et al.: Evacuation of crawlers and walkers from corridor through an exit 14

3.4 Hoogendoorn et al.: Pedestrian Behavior at Bottlenecks 16

3.5 Muir et al.: Effects of Motivation and Cabin Configuration on Emergency Aircraft Evacuation Behavior and Rates of Egress 21

3.6 Müller: Zur Gestaltung und Bemessung von Fluchtwegen für die Evakuierung von Personen aus Bauwerken auf der Grundlage von Modellversuchen 25

3.7 Baurechtliche Grundlagen 28

3.7.1 Musterbauordnung 28

3.7.2 Musterversammlungsstättenverordnung 29

3.7.3 Richtlinie über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten Sachsen-Anhalt . . . 30
3.7.4 Muster-Richtlinie über den Bau und Betrieb Fliegender Bauten . 30
3.7.5 Muster-Richtlinie über bauaufsichtliche Anforderungen an Schulen 31
3.8 Zusammenfassung . . . 31

4 Versuch **33**
4.1 Geometrie des Versuchsaufbaus . . . 33
4.2 Aufzeichnungsgeräte . . . 34
4.3 Versuchsablauf . . . 37

5 Auswertung **40**
5.1 Einführung . . . 40
5.2 Software Petrack . . . 40
5.3 Auslesen der Durchgangszeiten . . . 42
5.4 Umrechnung der Zeit-Frames . . . 43
5.5 Bestimmung der Gesamtlaufzeit eines Experimentes . . . 43
5.6 Berechnung der „time gaps“ . . . 44
5.7 Berechnung der mittleren personenbezogenen Geschwindigkeit . . . 48
5.8 Berechnung der zeitlichen Verläufe der Dichte . . . 50
5.9 Berechnung der mittleren personenbezogenen Dichte . . . 53
5.10 Berechnung des Flusses . . . 54

6 Analyse **57**
6.1 Einschwingvorgang . . . 57
6.2 Einfluss der Breite . . . 59
6.2.1 Geschwindigkeit . . . 61
6.2.2 Dichte . . . 62
6.2.3 Fluss . . . 64

6.2.4 Spezifischer Fluss 64
6.3 Vergleich mit Forschungsberichten und baurechtlichen Grundlagen 66

7 Fazit **69**

A Danksagung **71**

B Diagramme **72**

Tabellenverzeichnis

3.1 Spezifischer Fluss in Abhängigkeit der Engstellenbreite nach Seyfried [20] 10

3.2 Kapazitätsangaben für unterschiedliche Arten von Engstellen (Auszug) [4] 21

3.3 Evakuierungszeiten für die ersten 30 Personen, Ausgang 1 [13] 23

3.4 Evakuierungszeiten für die ersten 30 Personen, Ausgang 2 [13] 24

5.1 Teilnehmerzahl und Gesamtlaufzeit der Experimente 43

6.1 Mittlere Geschwindigkeit, Standardabweichung, Ausschnitt 61

6.2 Mittlere Dichte, Standardabweichung, Ausschnitt 63

6.3 Mittlerer Fluss, Standardabweichung, Ausschnitt 64

6.4 Mittlerer spezifischer Fluss, Standardabweichung, Ausschnitt 65

Abbildungsverzeichnis

2.1 Vereinfachte Darstellung der elliptischen Projektionsfläche einer Person . 4
2.2 Graphische Darstellung eines „time gap“ 6

3.1 Versuchsaufbau. Die Kreise markieren die Positionen der Kameras [20] . 9
3.2 Trajektorien (links); Wahrscheinlichkeit, eine Person an der Position x zu finden (Mitte) und Wahrscheinlichkeitsverteilung der „time gaps“ (rechts) für $N = 60$ und $b = 1,20\ m$ [20] 11
3.3 Fluss für alle Versuche in Abhängigkeit der Engstellenbreite [11] 13
3.4 Spezifischer Fluss für alle Versuche in Abhängigkeit der Engstellenbreite [11] 13
3.5 Anzahl der evakuierten Personen in Abhängigkeit der Evakuierungszeit für eine Ausgangsbreite von d = 0,40 m [14] 16
3.6 Anzahl der evakuierten Personen in Abhängigkeit der Evakuierungszeit für eine Ausgangsbreite von d = 1,20 m [14] 17
3.7 Personenfluss in Abhängigkeit der Ausgangsbreite für N = 60 Personen [14] 17
3.8 Trajektorien in der Engstelle, 1,00 m [4] 19
3.9 Trajektorien in der Engstelle, 2,00 m [4] 20
3.10 Spezifischer Fluss in Abhängigkeit der Breite nach Muir 24
3.11 Versuchsaufbau von Müller [12] 26
3.12 Abhängigkeit der Laufzeit von der Türöffnungsbreite nach Müller [12] . . 27
3.13 Abhängigkeit der Dichte von der Türöffnungsbreite nach Müller [12] . . . 28
3.14 Vergleich der Literaturdaten 32

4.1 Schematischer Versuchsaufbau 35
4.2 Industriekamera 36
4.3 Bild der Kamera über dem Eintrittsbereich 36
4.4 Bild der Kamera über der Engstelle 37
4.5 Versuchsablauf, Eintritt in die Engstelle 38
4.6 Versuchsablauf, Engstelle 39

5.1 Personengrößenverteilung für Engstellenversuche 41
5.2 Screenshot Petrack, Engstelle, b = 1,00 m 42
5.3 Gesamtlaufzeiten der Experimente 44
5.4 „time gaps“ über Zeit, b = 0,90 m 45
5.5 „time gaps“ über Zeit, b = 1,20 m 46
5.6 „time gaps“ über Zeit, b = 1,60 m 46
5.7 Vergleich der „time gaps“, b = 0,90 m 47
5.8 Geschwindigkeit über Zeit, b = 1,00 m 48
5.9 Geschwindigkeit über Zeit, b = 1,40 m 49
5.10 Dichte über Zeit, b = 1,00 m 51
5.11 Dichte über Zeit, b = 1,40 m 51
5.12 Dichte geglättet über Zeit, b = 1,00 m 52
5.13 Dichte geglättet über Zeit, b = 1,40 m 53
5.14 Personenbezogene Dichte über Zeit, b = 1,00 m 54
5.15 Personenbezogene Dichte über Zeit, b = 1,40 m 55
5.16 Fluss über Zeit, b = 0,90 m 56

6.1 Geschwindigkeit über Zeit, alle Breiten 57
6.2 Geschwindigkeit über Zeit, alle Breiten, Ausschnitt 58
6.3 Geschwindigkeit über Zeit, alle Breiten, gefitteter Ausschnitt 59
6.4 Dichte über Zeit, alle Breiten, Ausschnitt, geglättet 60
6.5 Mittlere Geschwindigkeit über alle Breiten, Ausschnitt 62

6.6 Mittlere Dichte über alle Breiten, Standardabweichung, Ausschnitt 63
6.7 Mittlerer Fluss über alle Breiten, Standardabweichung, Ausschnitt 65
6.8 Mittlerer spez. Fluss über alle Breiten, Standardabweichung, Ausschnitt . 66
6.9 Vergleich der Ergebnisse mit den Literaturdaten 67

B.1 Vergleich der Ergebnisse mit den Literaturdaten 72
B.2 „time gaps“, b=0,90 m 73
B.3 „time gaps“, b=1,00 m 73
B.4 „time gaps“, b=1,20 m 74
B.5 „time gaps“, b=1,40 m 74
B.6 „time gaps“, b=1,60 m 75
B.7 Geschwindigkeit, b=0,90 m 75
B.8 Geschwindigkeit, b=1,00 m 76
B.9 Geschwindigkeit, b=1,20 m 76
B.10 Geschwindigkeit, b=1,40 m 77
B.11 Geschwindigkeit, b=1,60 m 77
B.12 Dichte über Zeit, b=0,90 m 78
B.13 Dichte über Zeit, b=1,00 m 78
B.14 Dichte über Zeit, b=1,20 m 79
B.15 Dichte über Zeit, b=1,40 m 79
B.16 Dichte über Zeit, b=1,60 m 80
B.17 Dichte geglättet über Zeit, b=0,90 m 80
B.18 Dichte geglättet über Zeit, b=1,00 m 81
B.19 Dichte geglättet über Zeit, b=1,20 m 81
B.20 Dichte geglättet über Zeit, b=1,40 m 82
B.21 Dichte geglättet über Zeit, b=1,60 m 82
B.22 Personenbezogene Dichte über Zeit, b=0,90 m 83
B.23 Personenbezogene Dichte über Zeit, b=1,00 m 83

B.24 Personenbezogene Dichte über Zeit, b=1,20 m 84
B.25 Personenbezogene Dichte über Zeit, b=1,40 m 84
B.26 Personenbezogene Dichte über Zeit, b=1,60 m 85
B.27 Fluss über Zeit, b=0,90 m 85
B.28 Fluss über Zeit, b=1,00 m 86
B.29 Fluss über Zeit, b=1,20 m 86
B.30 Fluss über Zeit, b=1,40 m 87
B.31 Fluss über Zeit, b=1,60 m 87
B.32 Vergleich der „time gaps“, b=0,90 m 88
B.33 Vergleich der „time gaps“, b=1,00 m 88
B.34 Vergleich der „time gaps“, b=1,20 m 88
B.35 Vergleich der „time gaps“, b=1,40 m 88
B.36 Vergleich der „time gaps“, b=1,60 m 88

Abkürzungsverzeichnis und Glossar

Δ t ..... Zeitdifferenz

$\overline{v}_i$ ..... Mittlere personenbezogene Geschwindigkeit

ρ ..... Dichte

ρ_P ..... Personenbezogene Dichte

ρ_t ..... Zeitbezogene Dichte

A ..... Fläche

b ..... Breite

c ..... Kapazität nach Hoogendoorn (vgl. Kap. 3.4)

d ..... Durchmesser

f ..... Projektionsfläche einer Person

J ..... Fluss

J_s ..... Spezifischer Fluss

l_{Strom} ..... Länge eines Personenstromes

N ..... Anzahl Personen

s ..... Standardabweichung

t ..... Zeit

v ..... Geschwindigkeit

W ..... Breite nach Hoogendoorn (vgl. Kap. 3.4)

1 Einleitung

Immer wieder berichten Medien über die unterschiedlichsten Katastrophen und Unglücke, bei denen Menschen zu Schaden oder zu Tode gekommen sind. In vielen Fällen wird anschließend über die Sicherheit des Objektes diskutiert, in dem es zu dem Ereignis kam. Meist rücken schnell die Flucht- und Rettungswege in das Zentrum des Interesses. Auch wenn sie im öffentlichen Leben selten wahrgenommen werden, so bedeuten Fluchtwege einen großen Zugewinn an Sicherheit. Nahezu in jedem größeren Gebäude finden sich die grün-weißen Schilder wieder. Die Hintergründe für Anzahl und Breite der Ausgänge sind kaum jemandem bekannt. Dabei ist die ausreichende Dimensionierung von Fluchtwegen ein zentraler Aspekt der Sicherheit von Gebäuden und Veranstaltungsflächen. Nur wenn genügend Ausgänge mit hinreichenden Größen vorhanden sind, kann eine Evakuierung ihren optimalen Verlauf nehmen.

In den Bauvorschriften der Bundesländer sind für betreffende Objekte Mindestmaße für Rettungswegbreiten angegeben. Diese sind in den meisten Fällen abhängig von der Anzahl der darauf angewiesenen Personen. Ein Großteil der Gesetzestexte fordert eine stufenweise Erhöhung der Fluchtwegbreite, lässt also keine Zwischenwerte zu. Mehrere Forschungsarbeiten, die sich mit der Thematik der Evakuierung befasst haben, kommen jedoch zu dem Ergebnis, dass dieses Verfahren den eigentlichen Gegebenheiten von Personenströmen nicht entspricht. Der Einfluss der Engstellenbreite auf die charakteristischen Daten der Personenströme wird hier zudem auch noch unterschiedlich bewertet.

Um aussagekräftige Erkenntnisse zu erlangen, bedarf es realistischer Experimente mit einer ausreichend großen Teilnehmerzahl. Die Schwierigkeit hierin besteht zum einen in der Motivation der Versuchsteilnehmer. Diese sollte so wirklichkeitsnah wie möglich gestaltet sein, ohne dabei die Gesundheit der Probanden den Gefährdungen einer echten Evakuierung auszusetzen. Die weitere Problematik besteht in der Beschaffenheit des Versuchsaufbaus. Simulierte Engstellen sollten möglichst gut auf natürliche Situationen übertragbar sein. Dies erfordert eine Durchführung des Versuches mit vielen unterschiedlichen Engstellenbreiten.

In dem Versuch, der dieser Arbeit zu Grunde liegt, wurden Engstellenbreiten zwischen 0,80 m und 2,50 m simuliert. Das Experiment fand in Kooperation des Lehrstuhls für Baustofftechnologie und Brandschutz mit dem Zentralinsitut für angewandte Mathematik am Forschungszentrum Jülich und dem Institut für angewandte Physik an der Universität zu Köln durchgeführt wurde. 180 Soldaten des Fernmeldebataillon der Bergischen Kaserne in Düsseldorf-Hubbelrath durchliefen mehrere dutzend Mal eine hierfür errichtete Engstelle mit unterschiedlichen Durchgangsbreiten. Die Laufversuche wurden für eine spätere Untersuchung mit Videokameras aufgezeichnet. In dieser Arbeit werden Teilbereiche von fünf dieser Läufe hinsichtlich charakteristischer Daten wie Fluss, Dichte oder Geschwindigkeit ausgewertet. In der Analyse der Versuche werden die gewonnenen Daten auf eine Einwirkung der Engstellenbreite untersucht. Im Vorfeld wird ein Auszug von bestehenden Forschungsarbeiten und baurechtlichen Gesetzgebungen zusammengefasst. Anschließend erfolgt eine Bewertung dieser Ergebnisse im Vergleich mit der Literatur.

2 Begriffsdefinitionen

In dem folgenden Abschnitt werden in dieser Arbeit verwendete Begriffe, speziell die der Fußgängerdynamik, definiert und erläutert.

2.1 Dichte des Personenstroms

Für die Charakterisierung von Personenströmen werden in der Literatur verschiedene Definitionen der Dichte genutzt. Die allgemein genutzte Darstellung der Dichte ist der Quotient aus der Personenzahl N und der Betrachtungsfläche A:

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

Predtetschenski und Milinski verwenden in ihrem Werk eine andere Darstellungsform für die Dichte [16]:

$$\rho = \frac{\Sigma f}{b * l_{Strom}} \left[\frac{m^2}{m^2}\right] \tag{2.2}$$

Die Dichte D ist bestimmt durch das Verhältnis der Summe einzelner Projektionsflächen der Menschen $[m^2]$ zur Betrachtungsfläche. Die Projektionsflächen sind bei Predtetschenski / Milinski abhängig von Parametern wie Kleidung, Alter und Gepäck

der Personen. Grundlage der Flächenbestimmung ist die Annahme, dass die beanspruchte Fläche die Form einer Ellipse annimmt. Die Standfläche der Füße bleibt bei dieser Annahme unberücksichtigt.

Abbildung 2.1: *Vereinfachte Darstellung der elliptischen Projektionsfläche einer Person*

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird die wohl gebräuchlichere Variante genutzt. Die korrekte Dimension $1/m^2$ nach SI-Einheiten [15] wird in diesem Text zum besseren Verständnis in die früher teilweise verwendete Form $Personen/m^2$ abgeändert.

2.2 Personenfluss

Der Personenfluss gibt an, wie viele Personen pro Zeiteinheit eine definierte Messstelle passieren. In Anlehnung an die Dichte wird hier ebenfalls die Anzahl ΔN in der Dimension $Personen$ angegeben.

$$J = \frac{\Delta N}{\Delta t} \left[\frac{Personen}{s} \right] \tag{2.3}$$

Diese Formel lässt sich auch auf eine einzelne Person darstellen:

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

Wobei Δt_i der Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Personen ist.

Unter der Annahme, dass der Fluss linear abhängig von der Breite der Betrachtungsfläche ist, lässt sich der spezifische Fluss für die normierte Breite von 1,00 m angeben:

$$J_s = \frac{J}{b}\left[\frac{Personen}{s * m}\right] \tag{2.5}$$

Eine weitere Möglichkeit zur Darstellung des Personenflusses ist die Flussgleichung analog der Flussgleichung eines Fluides. Der Fluss ist das Produkt aus Dichte, Geschwindigkeit und Breite:

$$J = \rho * v * b\left[\frac{Personen}{s}\right] \tag{2.6}$$

Die Größen ρ und v sind gemittelte Werte.

Der spezifische Fluss nach dieser Gleichung ergibt sich also aus dem Produkt von Dichte und Geschwindigkeit:

$$J_s = \rho * v\left[\frac{Personen}{s * m}\right] \tag{2.7}$$

2.3 „time gap“

Ein „time gap“ ist definiert als der zeitliche Abstand, der zwischen dem Durchqueren einer Messlinie zweier unmittelbar hintereinander gehenden Personen liegt.

$$\Delta t_i = t_{Person2} - t_{Person1}[s] \tag{2.8}$$

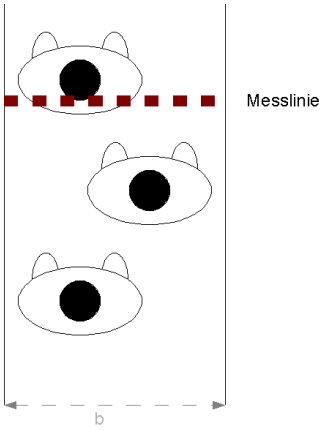

Abbildung 2.2: *Graphische Darstellung eines „time gap“*

2.4 Beispielrechnung

Um den Zusammenhang zwischen „time gaps“, Personenfluss und Dichte des Personenstroms zu verdeutlichen, folgt eine kurze Beispielrechnung:

In einem schmalen Gang mit einer Breite von $b = 1{,}00\ m$ erfolgt eine Messung der „time gaps“ zwischen drei aufeinander folgenden Personen. Zwischen der ersten und der zweiten Person wird eine zeitliche Differenz von 1,00 Sekunden gemessen, zwischen zweiter und dritter Person ein Abstand von 1,50 Sekunden. Die mittlere Dichte wird im Intervall zwischen $Person_1$ und $Person_2$ mit $\rho_1 = 1,5 \frac{Personen}{m^2}$ angenommen, im nächsten Intervall mit $\rho_2 = 1 \frac{Personen}{m^2}$. Die Zeit, die zum durchqueren der Messstelle mit einer Länge von $l = 1{,}00\ m$ benötigt wird, beträgt bei allen Personen 1,25 Sekunden.

Daraus lässt sich zuerst die mittlere Geschwindigkeit bestimmen:

$$v = \frac{b}{\Delta t} = \frac{1m}{1,25s} = 0,8 \frac{m}{s} \tag{2.9}$$

Durch Einsetzen der Werte in Formel 1.6 errechnet sich der Fluss:

$$J_1 = \rho_1 * v * b = 1,5\frac{Personen}{m^2} * 0,8\frac{m}{s} * 1m = 1,2\frac{Personen}{m * s} \tag{2.10}$$

$$J_2 = \rho_2 * v * b = 1\frac{Personen}{m^2} * 0,8\frac{m}{s} * 1m = 0,8\frac{Personen}{m * s} \tag{2.11}$$

Unter Anwendung der „time gaps“ berechnen sich folgende Personenflüsse:

$$J_1 = \frac{1}{\Delta t_i} = \frac{1}{1s} = 1\frac{1}{s} \tag{2.12}$$

$$J_2 = \frac{1}{\Delta t_i} = \frac{1}{1,5s} = 0,667\frac{1}{s} \tag{2.13}$$

Also beträgt der Fluss bei dieser Breite für eine Dichte von $\rho_1 = 1,5\frac{Personen}{m^2}$ und einem zeitlichen Abstand von 1,00 Sekunden $1\frac{1}{s}$. Für die gegebenen Werte im zweiten Intervall beträgt der Fluss $0,667\frac{1}{s}$.

3 Forschungsberichte und baurechtliche Grundlagen

Zur Bemessung von Rettungswegen ist es unabdingbar, die Breite von Engstellen in Anbetracht der darauf angewiesenen Personenzahl ausreichend zu dimensionieren, da es ansonsten zu Stauungen kommen kann. Dafür ist es erforderlich, den Einfluss der Breite auf Gehgeschwindigkeit, Fluss und Dichte zu kennen.

Im folgenden Kapitel wird eine Auswahl aus aktuellen und früheren Forschungsarbeiten aus dem Gebiet der Fußgängerdynamik vorgestellt. Weiterhin werden exemplarisch gesetzliche Regelungen aus den Bauverordnungen dargestellt.

3.1 Seyfried et al.: New insights into pedestrian flow through bottlenecks

In dem Artikel „New insights into pedestrian flow through bottlenecks“[1] [20] stellen Seyfried et al. die Ergebnisse von Versuchen zum unidirektionalen Personenstrom durch Engstellen vor.

Ziel des Experiments war die Darstellung des Einflusses der Engstellenbreite auf den Personen-Fluss. Ebenfalls sollte das Vorhandensein des Reißverschlusseffektes[2] unter-

[1] Deutsche Übersetzung: Neue Einblicke in den Personenfluss durch Engstellen

[2] Ein Reißverschlusseffekt entsteht, wenn sich Personen versetzt hintereinander einreihen. Bei zwei Linien vor einer Engstelle mit passender Breite reihen sich diese ähnlich einem Reißverschluss im Wechsel hintereinander ein, so dass eine Linie entsteht.

sucht werden. Dazu wurde auf dem Versuchsareal eine Engstelle in Form eines Korridors aus Tischen aufgebaut. Die Breite der Engstelle war variabel. Die Versuche wurden mit 20, 40 und 60 Personen durchgeführt.

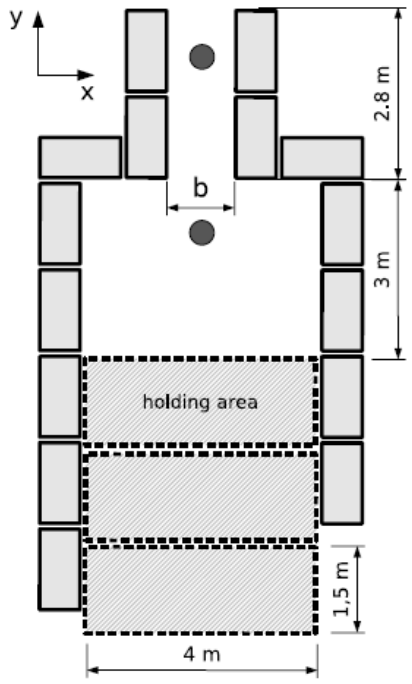

Abbildung 3.1: *Versuchsaufbau. Die Kreise markieren die Positionen der Kameras [20]*

Die Versuchsteilnehmer hielten sich zu Beginn des Versuches in einem Wartebereich, der „holding area“, auf. Die Dichte in diesem Bereich betrug $\rho = 3{,}30\ m^{-2}$. Nach einem akustischen Signal begannen die Teilnehmer, die Engstelle zu durchqueren. Sie waren von der Versuchsleitung angehalten, nicht „hektisch, aber entschlossen“ zu gehen. Der gesamte Durchlauf wurde von drei Kameras gefilmt. Anschließend konnte das Videomaterial ausgewertet werden.

In einem ersten Schritt wurde der spezifische Fluss als Durchschnitt über alle Teilnehmer in jedem Experiment gebildet:

$$J_s = \frac{\Delta N}{\Delta t * b} \left[(ms)^{-1}\right] \tag{3.1}$$

In Tabelle 3.1 sind die Werte in Abhängigkeit von Engstellenbreite und Personenzahl gesammelt.

b [m]	J_s $[(ms)^{-1}]$		
	$\Delta N = 60$	$\Delta N = 40$	$\Delta N = 20$
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

Tabelle 3.1: *Spezifischer Fluss in Abhängigkeit der Engstellenbreite nach Seyfried [20]*

Seyfried sieht für N = 60 einen kleinen, aber systematischen Anstieg des spezifischen Flusses mit der Engstellenbreite und deutet daraus einen beginnenden Einfluss des Reissverschlusseffektes. Diese Erkenntnis wird im nächsten Abschnitt des Artikels genauer untersucht.

Dazu wurden mit rechnergestützten Programmen die Trajektorien der Versuchspersonen im Bereich der Engstelle ermittelt und digitalisiert. Weiterhin wurde die Wahrscheinlichkeit bestimmt, eine Person an einer Position x in der Engstelle zu finden, sowie die Wahrscheinlichkeiten der individuellen „time gaps“. Dabei zeigten sich wieder die Ansätze eines Reissverschlusseffektes bei der Durchquerung der Engstelle. Ab einer Breite von b = 0,90 m bilden sich in den Trajektorien zwei Linien aus, welche sich bis b = 1,20 m weiter von einander abgrenzen. Gleichzeitig konnte man eine Verschiebung der Wahrscheinlichkeiten bei den „time gaps“, hin zu kürzeren Zeit-Differenzen, beobachten.

In Abbildung 3.2 ist am Beispiel der Engstellenbreite von b = 1,20 m die Darstellung der Ergebnisse von Seyfried gezeigt. Deutlich ist die Ausbildung von zwei Spuren in den Trajektorien zu sehen.

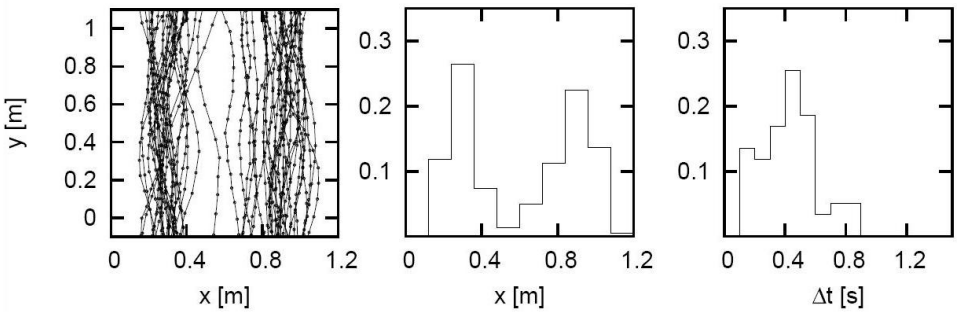

Abbildung 3.2: *Trajektorien (links); Wahrscheinlichkeit, eine Person an der Position x zu finden (Mitte) und Wahrscheinlichkeitsverteilung der „time gaps“ (rechts) für* $N = 60$ *und* $b = 1,20\ m$ *[20]*

Als Ergebnis von Seyfrieds Experiment ist anzusehen, dass durch die Ausbildung des Reissverschlusseffektes ein linearer Zusammenhang zwischen Engstellenbreite und gesammelten Daten besteht. So steigt der Fluss mit größerer Breite an, wenn die Personengruppe ausreichend groß ist. Der Reißverschlusseffekt tritt bei allen Engstellenbreiten mit b $>$ 0,70 m auf.

3.2 Kretz et al.: Experimental study of pedestrian flow through a bottleneck

In dem Artikel „Experimental study of pedestrian flow through a bottleneck“[3] [11] von Tobias Kretz, Anna Grühnebohm und Michael Schreckenberg, veröffentlicht im Oktober 2006 im „Journal of Statistical Mechanics“, wird ein Experiment zur Untersuchung des Einflusses der Engstellenbreite auf Fluss, spezifischen Fluss und „time gaps“ vorgestellt.

Der Versuch wurde mit 94 Probanden in einem Gebäude der Universität Duisburg-Essen durchgeführt. Die Engstelle war mit zwei Schränken dargestellt, welche jeweils eine Tiefe von 0,40 m hatten. Die Engstelle glich also mehr einer Tür als einem schmalen Flur.

[3]Deutsche Übersetzung: Experimentelle Studie zum Personenfluss durch eine Engstelle

Die Breite der Engstelle konnte variiert werden. Es wurden insgesamt 34 Versuche mit 10 verschiedenen Breiten zwischen 0,40 m und 1,60 m durchgeführt. Zu Beginn des Experiments befanden sich die Probanden auf einer Fläche von 4,00 m x 9,00 m direkt vor der Engstelle. Die Laufversuche wurden zur anschließenden Auswertung mit einer Kamera über der Engstelle aufgezeichnet.

In der Analyse der Läufe wurde zuerst die Frage verfolgt, ob der Prozess des Durchlaufens der Engstelle Zeit benötigt, bis sich ein statisches Niveau einstellt oder ob die Messergebnisse von Beginn bis Ende eines Durchlaufes die gleichen sind. Dazu vergleicht Kretz die Zeitleiste der „time gaps“ mit verschiedenen Funktionen von Regressionsgeraden. Während bei einigen Breiten eine Übereinstimmung sichtbar zu sein scheint, lässt sich bei anderen Breiten keine Tendenz feststellen. Daraus resultierend sieht Kretz keine Veranlassung, Einschwingvorgänge weiter zu untersuchen.

Bei der Auswertung von Personenfluss und spezifischem Fluss kommt Kretz zu folgendem Ergebnis: Während der Fluss zwischen Engstellenbreiten von 0,40 m und 1,00 m nahezu über alle Versuche linear ansteigt, kommt es bei breiteren Engstellen zu einer größeren Bandbreite an Ergebnissen (vgl. Abbildung 3.3). Dies führen die Autoren aber auf Randbedingungen des Experimentes zurück.

Für die Entwicklung des spezifischen Flusses in Abhängigkeit der Engstellenbreite findet Kretz keine Erklärung. Ein Abfall des spezifischen Flusses bis zu einer Breite von 0,70 m, gefolgt von einem stationären Zustand bis 1,20 m und einem anschließenden Sinken bis zur größten gemessenen Breite von 1,60 m, entspricht nicht der monotonen Funktion, die erwartet wurde. Die Ergebnisse im ersten angegebenen Intervall führt Kretz darauf zurück, dass die schmalen Engstellen durch eine Drehung der Körper von den Probanden effektiv genutzt wurden. In diesem Bereich kann sich jedoch kein Reißverschlusseffekt einstellen.

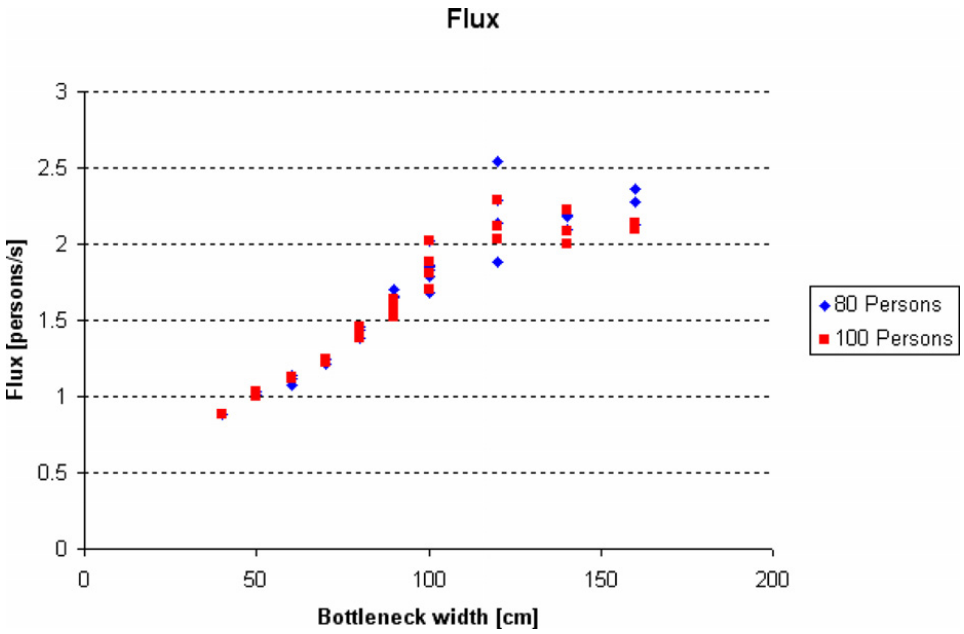

Abbildung 3.3: *Fluss für alle Versuche in Abhängigkeit der Engstellenbreite [11]*

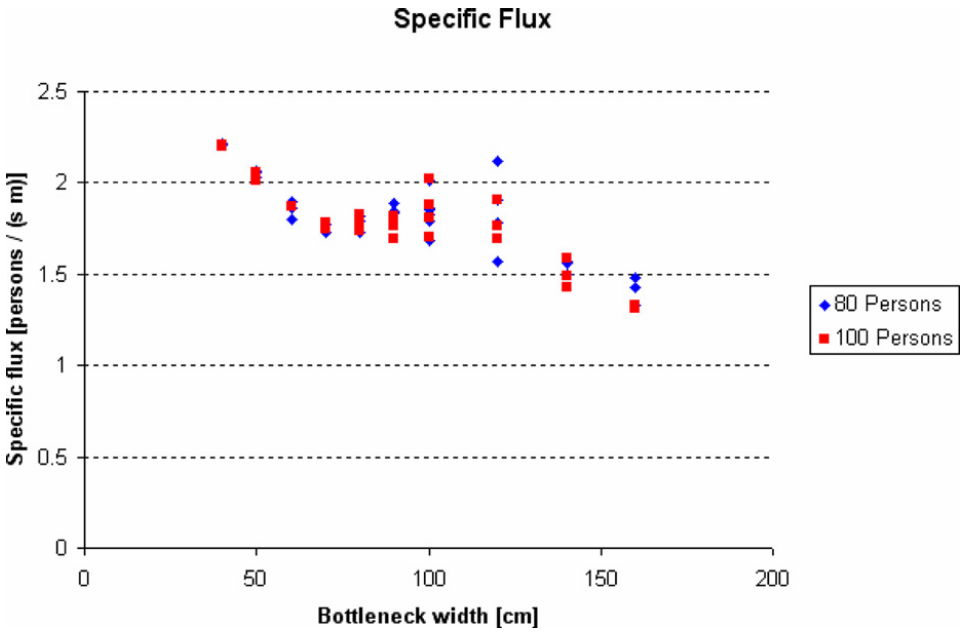

Abbildung 3.4: *Spezifischer Fluss für alle Versuche in Abhängigkeit der Engstellenbreite [11]*

Die Verringerung des spezifischen Flusses bei Breiten von 1,40 m und 1,60 m lässt sich darauf zurückführen, dass sich im Austrittsbereich der Engstelle Stauungen gebildet haben. Diese wurden durch Probanden verursacht, die den Bereich hinter der Engstelle nicht schnell genug verlassen hatten.

3.3 Nagai et al.: Evacuation of crawlers and walkers from corridor through an exit

Ryoichi Nagai, Masahiro Kukamachi und Takashi Nagatani untersuchen in ihrem Artikel „Evacuation of crawlers and walkers from corridor through an exit“[4] [14] den Unterschied bezüglich der Evakuierungszeiten zwischen kriechenden, also sich auf Händen und Knien fortbewegenden, und aufrecht gehenden Personen. Dazu führen sie jeweils Experimente sowie numerische Simulationen durch.

Evakuierungen erfolgen laut den Autoren oftmals in kriechenden Bewegungen. Als Gründe dafür führen die Autoren Brandrauch oder Erdbeben an. Das dynamische Verhalten ist bei dieser Fortbewegung jedoch grundlegend verschieden zu dem normal gehender Personen. Ziel der Experimente von Nagai war es, den Fluss durch eine Engstelle von gehenden und krabbelnden Probanden miteinander zu vergleichen. Ausserdem sollte der Einfluss der Breite des Ausganges auf die Versuchszeit untersucht werden.

Für beide Gangarten gestaltete sich der Versuchsaufbau gleich: Mit Tischen und Stühlen wurde ein Korridor begrenzt, der 6,00 m lang und 2,00 m breit war. An einer 2,00 m breiten Seite war von einer Ecke aus ein Ausgang mit einer variabel einstellbaren Durchgangsbreite angeordnet. Die Versuche wurden mit zwei Videokameras aufgezeichnet. Sie liefen alle nach demselben Schema ab: Die Personen verteilten sich auf der Startfläche

[4] Deutsche Übersetzung: Evakuierung von kriechenden und normal gehenden Personen aus einem Korridor durch einen Ausgang

und bewegten sich nach einem Startkommando mit normaler Geschwindigkeit zum Ausgang. Die Personenzahl belief sich für die Kriech-Versuche auf bis zu 35 Personen, für die Geh-Versuche auf maximal 75 Personen. In der weiteren Zusammenfassung der Versuche von Nagai werden nur die normalen Geh-Versuche betrachtet, da die Daten der kriechenden Probanden für diese Arbeit nicht von Interesse sind.

Die Versuche wurden mehrmals mit verschiedenen Personenzahlen und Ausgangsbreiten durchgeführt. Danach wurden die Videoaufzeichnungen in Hinblick auf die Trajektorien und die Evakuierungszeiten für jeden Probanden ausgewertet. Die Evakuierungszeit wurde dabei bestimmt, also die Zeit zwischen Startsignal und Passieren des Ausgangs. Anschließend wurde die durchschnittliche Evakuierungszeit für jede Ausgangsbreite bestimmt.

In Abbildung 3.5 ist die Anzahl der evakuierten Probanden in Abhängigkeit der Zeit aufgetragen. Für kleine Personenzahlen ist die Evakuierungszeit kürzer als bei großen Personengruppen. Dies hängt damit zusammen, dass sich kleine Gruppen besser organisieren können. Die Steigung der Geraden ist konstant, was auf einen kontinuierlichen Fluss hindeutet.

Die evakuierten Personen über die Zeit für eine Ausgangsbreite von 1,20 m ist in Abbildung 3.6 aufgetragen. Im Gegensatz zu der Ausgangsbreite von 0,40 m sind die Geraden hier leicht wellig, jedoch wächst die Steigung wieder mit der Anfangsdichte.

Anschließend wurde der Personenfluss in Abhängigkeit der Ausgangsbreite ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.7 dargestellt. Die gefüllten Dreiecke geben die Mittelwerte der Messergebnisse für die Fußgängerversuche mit Ausgangsbreiten von d = 0,40; 0,80; 1,20 und 1,60 m an. Der Fluss steigt mit der Breite an. Die Steigung der Ausgleichsgerade ist nahezu linear.

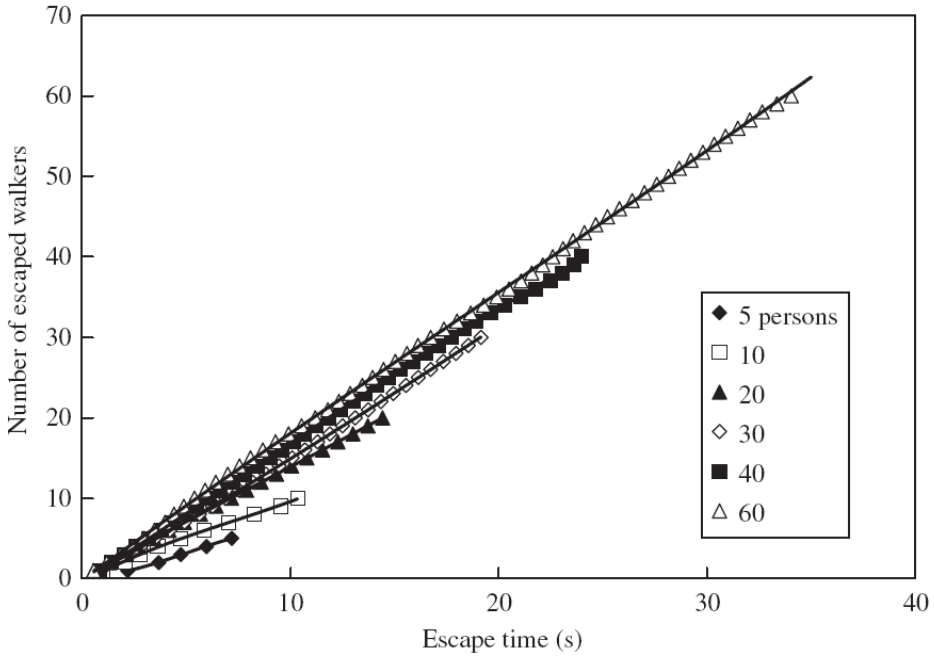

Abbildung 3.5: *Anzahl der evakuierten Personen in Abhängigkeit der Evakuierungszeit für eine Ausgangsbreite von d = 0,40 m [14]*

3.4 Hoogendoorn et al.: Pedestrian Behavior at Bottlenecks

Serge P. Hoogendoorn und Winnie Daamen untersuchten für den Artikel „Pedestrian Behavior at Bottlenecks“[5] [4] das Verhalten von Fußgängern in Engstellen. Im Gegensatz zu anderen Versuchen stand nicht die Bestimmung makroskopischer Daten im Vordergrund, sondern eine Betrachtung der menschlichen Verhaltensweisen vor und in Engstellen.

Das Experiment wurde mit folgendem Aufbau durchgeführt: Auf einer Fläche von etwa 14,00 m x 12,00 m wurde eine variable Lauffläche errichtet, welche mit einer Kamera erfasst wurde. Diese Lauffläche wurde in zehn Experimenten von jeweils 60 bis 90 Probanden durchlaufen. Für diese Arbeit sind nur die Engstellenexperimente mit einer lichten Breite von 1,00 m bzw. 2,00 m und einer Länge von 5,00 m interessant. Die Teilnehmer wurden in acht Gruppen eingeteilt, mit verschiedenen Aufgaben, zum

[5]Deutsche Übersetzung: Verhalten von Personen an Engstellen

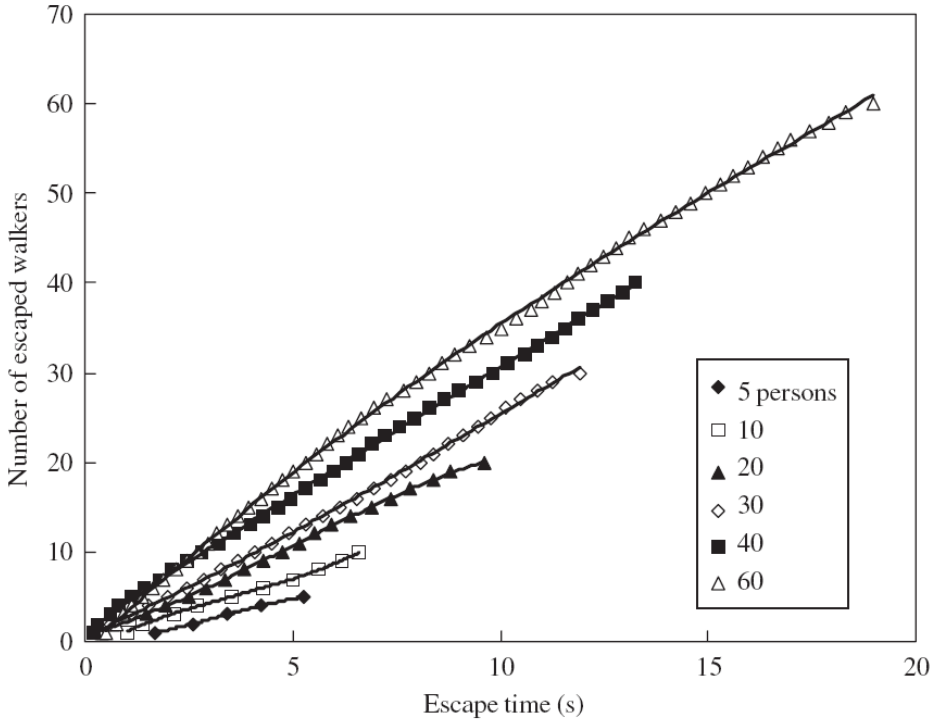

Abbildung 3.6: *Anzahl der evakuierten Personen in Abhängigkeit der Evakuierungszeit für eine Ausgangsbreite von d = 1,20 m [14]*

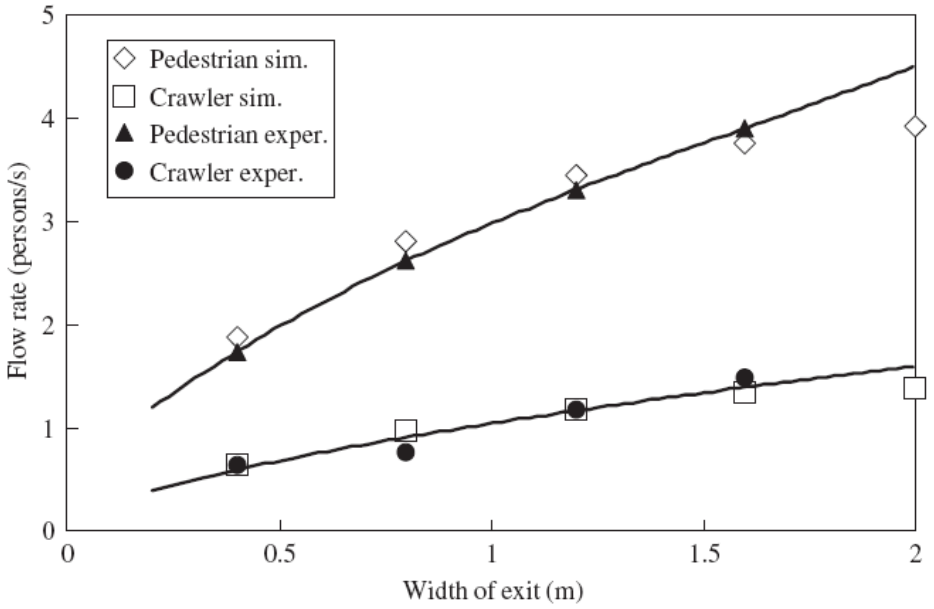

Abbildung 3.7: *Personenfluss in Abhängigkeit der Ausgangsbreite für N = 60 Personen [14]*

Beispiel langsames Gehen, schnelles Gehen usw. Die Unterteilung der Gruppen erfolgte über farbige Kappen. Der Ablauf der Engstellen-Versuche war wie folgt: Nachdem die Gruppe die Engstelle durchlaufen hat, geht sie außen herum zurück an den Startpunkt und beginnt die Runde erneut. Am Anfang läuft eine Gruppe alleine, anschließend kommen stufenweise die weiteren Gruppen hinzu, bis schließlich alle Personen gleichzeitig den Versuch durchlaufen. Am Ende des Versuchs wird die Personenzahl nach gleichem Muster wieder verringert.

Vor der eigentlichen mikroskopischen Auswertung fassen Hoogendoorn und Daamen kurz die makroskopischen Ergebnisse zusammen: Wenn die maximale Kapazität der Engstelle überschritten wird, bildet sich eine Stauung vor dem Eintritt, welche sich jedoch in der Engstelle wieder auflöst. Weiterhin kann der Prozess des Durchschreitens der Engstelle in drei Phasen aufgeteilt werden. Während der ersten Phase gehen die Versuchsteilnehmer mit relativ hoher Geschwindigkeit und geringer Dichte durch die Engstelle. In der anschließenden Zeitperiode sind die Dichten weiterhin relativ gering, jedoch ist es nicht mehr möglich, die Geschwindigkeit frei zu wählen. In der dritten Phase kommt es dann zur Bildung eines Staus. Die Dichte in der Engstelle steigt auf 2,5 $Personen/m^2$. Die Geschwindigkeit beträgt in der Engstelle ungefähr 1,00 m/s, vor der Engstelle etwa 0,30 m/s.

In der mikroskopischen Auswertung werden die Trajektorien jedes Versuchsteilnehmers erfasst. Bereits während der Versuche gemachte Beobachtungen bestätigten sich in der grafischen Auswertung der Trajektorien: Mit zunehmender Dichte bilden sich Linien innerhalb der Engstelle aus, auf denen die Probanden sich bewegen. Bei einer Engstellenbreite von 1,00 m sind es zwei Linien, bei einer Breite von 2,00 m sind es vier bis fünf Linien. Die Linienbildung ist bei der breiteren Engstelle nicht so stabil und stark ausgeprägt wie bei der schmaleren, vgl. Abbildungen 3.8 und 3.9. Als Grund dafür nehmen die Autoren an, dass die Kapazität der Engstelle mit einer Breite von 2,00 m noch nicht

erreicht war, der Fluss also geringer war. Dadurch entstehen kurzlebige, dynamische Linien.

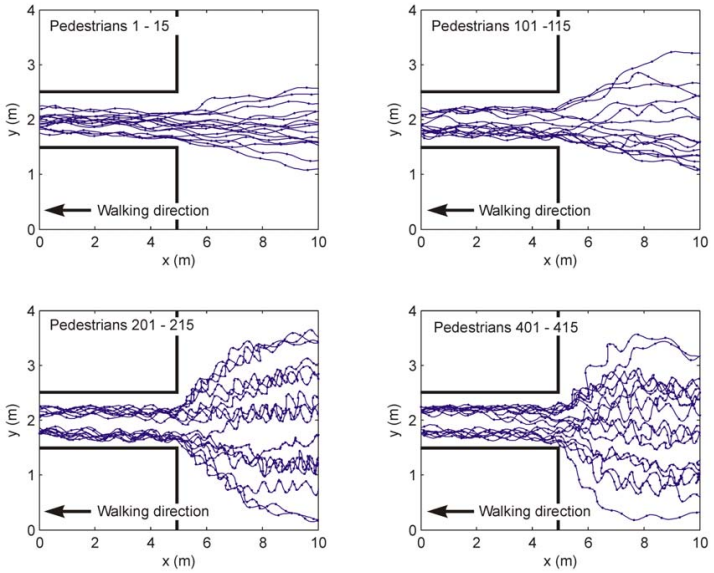

Abbildung 3.8: *Trajektorien in der Engstelle, 1,00 m [4]*

Hoogendoorn und Daamen haben die Abstände zwischen den Linien analysiert und sind zu dem Ergebnis gekommen, dass diese ungefähr 0,45 m betragen, unabhängig von der Engstellenbreite. Somit ist der Abstand zwischen den Trajektorien-Linien geringer als der Platz, den zwei nebeneinander gehende Personen bräuchten. Der Platz, den eine Person benötigt, setzt sich zusammen aus Schulterbreite und der Schwankungsbreite beim Gehen. Dies führt zur Ausbildung eines Reißverschlusseffektes.

Da laut Hoogendoorn der Abstand zwischen den sich ausbildenden Linien immer gleich ist, steigt der Fluss mit wachsender Engstellenbreite nicht linear, sondern stufenweise an. Die Kapazität der Engstelle ist dabei abhängig von der effektiven Breite. Anhand dieser lässt sich die Anzahl der Linien bestimmen, die sich bei Auslastung des Durchgangs bilden können. Die effektive Breite definieren Hoogendoorn und Daamen wie folgt [4]:

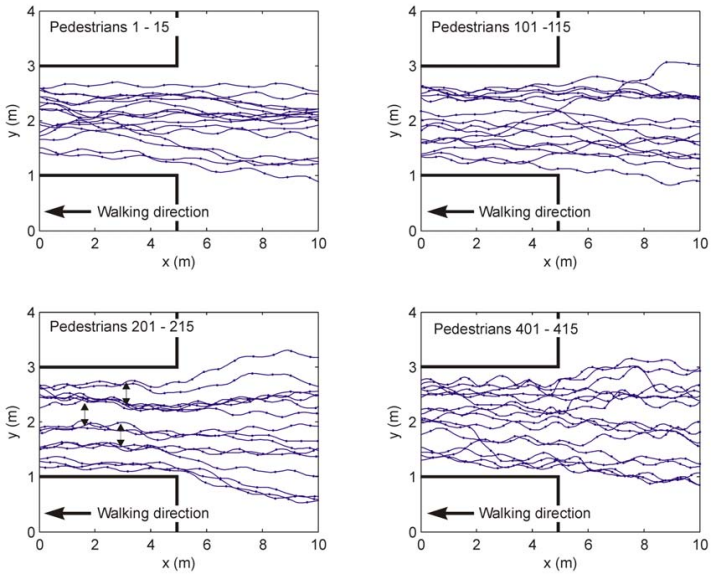

Abbildung 3.9: *Trajektorien in der Engstelle, 2,00 m [4]*

$$W_{eff} = W - W_{unused} \tag{3.2}$$

W_{unused} ist der ungenutzte Raum zwischen Person und Wand (siehe Tabelle 3.2). Ebenfalls Einfluss auf die Kapazität hat die maximale Schulterbreite eines Fußgängers W_{max}, welche mit 0,50 m angenommen wird, sowie der Abstand d_{layer} zwischen zwei Linien (0,45 m). Die Autoren nehmen den Fluss einer einzelnen Linien mit $c_l = 0{,}78\ Personen/s$ an.

Anhand dieser Daten kann der Personenfluss berechnet werden:

$$c = c_l * \left[\frac{W_{eff} - (W_{max} - d_{layer})}{d_{layer}} \right] \tag{3.3}$$

Wandmaterial	Ungenutzte Breite	Benötigte Mindestbreite				
Beton	0,25 (0,50)	1,00	1,45	1,90	2,35	2,80
Metall	0,20 (0,40)	0,90	1,35	1,80	2,25	2,70
ausgebildete Linien		1	2	3	4	5
Kapazität (P/s)		0,78	1,56	2,34	3,12	3,90

Tabelle 3.2: *Kapazitätsangaben für unterschiedliche Arten von Engstellen (Auszug) [4]*

3.5 Muir et al.: Effects of Motivation and Cabin Configuration on Emergency Aircraft Evacuation Behavior and Rates of Egress

Der Artikel von Helen C. Muir und Co-Autoren[6] [13] stellt die Ergebnisse einer Untersuchung von zwei Flugzeug-Unfällen sowie eines von Ihnen durchgeführten Experiments vor. Ziele dieses Experimentes waren die Untersuchung des Verhaltens von Personen bei Evakuierungen, die Bestimmung der optimalen Breiten von Gängen und Sitzreihen in Flugzeugen in Anbetracht von Evakuierungen sowie die Ursachenforschung für Stauungen an Engstellen.

Im Auftrag der britischen Zivilluftfahrtbehörde untersuchte Muir zunächst zwei Flugzeugunglücke aus den Jahren 1984 und 1985. Ausschlaggebend für diese Untersuchung war, dass beide Unfälle nahezu identische Ausgangsbedingungen hatten, jedoch völlig verschiedene Ausgänge. So überlebten den Unfall in Calgary 1984 alle 118 Passagiere, während es bei einem Unfall in Manchester mit 137 Passagieren 55 Tote gab. Ursache war in beiden Fällen ein Triebwerkfeuer während der Startphase bei einer Boeing 737. Ursächlich für die Todesopfer waren Blockaden an den Typ III-Ausgängen (Notausgänge über den Tragflächen) sowie in dem Korridor, der zu den Typ I-Ausgängen (Ein- und Ausstiege) führt. Diese Tatsachen führten zu der These, dass die individuelle Kabinen-

[6] Deutsche Übersetzung: Effekte der Motivation und Kabinen-Konfiguration auf das Verhalten und den Fluss bei Notfall-Evakuierungen von Flugzeugen

konfiguration Einfluss auf Stauungen bzw. die Räumungszeit hat. Zur Verfolgung dieser These wurden Praxisversuche durchgeführt.

Die Versuche wurden unterteilt in Räumungen über Typ I-Ausgänge (im Folgenden als Ausgang 1 bezeichnet) und Typ III-Ausgänge (Ausgang 2), sowie in Durchgänge mit und ohne Belohnung. Unter Belohnung ist Folgendes zu verstehen: Zusätzlich zur Bezahlung in Höhe von 10 Pfund, welche alle Probanden erhielten, wurden die ersten 50 % eines Versuches mit zusätzlich 5 Pfund belohnt.

Die Versuche wurden so realistisch wie möglich durchgeführt. Dazu wurde ein aktueller Flugzeugtyp verwendet, weiterhin wurden die Probanden in große Gruppen aufgeteilt. Pro Versuch waren bis zu 60 Personen in einer Gruppe. Um die Atmosphäre einer reellen lebensbedrohlichen Szenerie zu erwecken, wurde über die Kabinensprechanlage ein Tonband abgespielt, auf dem entsprechende Geräusche zu hören waren. Angedacht war die Simulation eines Startabbruches infolge eines Triebwerkfeuers. Um auch unter dieser Gefährdung die Sicherheit der Versuchsteilnehmer zu erhöhen, wurde das Alter zwischen 20 und 50 Jahre begrenzt und die körperliche Fitness durch eine kurze medizinische Untersuchung sichergestellt. Die Aufzeichnung der Versuche erfolgte mit acht Videokameras. Zusätzlich wurden die subjektiven Eindrücke der Probanden mit Fragebögen ermittelt.

Der Ablauf der Versuche gestaltete sich zu Beginn wie bei einem richtigen Flug. Nach einer Sicherheitsunterweisung wurden Geräusche wie die eines startenden Flugzeuges eingespielt, worauf dann die eines Startabbruches folgten. Nach einer kurzen Pause wurde dann schließlich das Kommando gegeben, das Flugzeug zu verlassen. Die ersten 50 % der Probanden erhielten im Freien einen Gutschein über die Belohnungszahlung.

Insgesamt wurden 110 Durchgänge mit Belohnung durchgeführt, an denen 1558 Freiwillige teilnahmen. Versuche ohne Belohnung fanden mit 24 deutlich weniger statt. Auch die Zahl der Teilnehmer war mit 704 geringer. Muir beginnt die Analyse der Versu-

che mit der Auswertung des menschlichen Verhaltens, welches für diese Arbeit jedoch nicht von Interesse ist. Die Auswertungen hinsichtlich des Einflusses der Breite auf die Evakuierungszeiten lieferten für Ausgang 1 die folgenden Ergebnisse. Für Versuche mit Belohnung wurde ein deutlicher Zusammenhang zwischen Durchgangsbreite und Fluss ersichtlich: Je breiter der Gang, desto schneller der Durchfluss. Bei den Versuchen ohne Belohnung ist diese Entwicklung nicht so eindeutig. Dies führt Muir auf die geringere Anzahl an Experimenten zurück. Im Gegensatz zu ihren Erwartungen bildeten sich bei einer Durchgangsbreite von 24 Inch[7] mehr Stauungen als bei einer Breite von 20 Inch. Muir führt dies darauf zurück, dass die Probanden den Gang mit einer Breite von 20 Inch als zu eng ansahen, um ihn mit mehr als einer Person gleichzeitig zu durchqueren. Dadurch erfolgte vor der Engstelle eine Sortierung.

	Mit Belohnung	Ohne Belohnung
Breite [in.]	Zeit [s]	Zeit [s]
20	26,33	25,15
24	24,06	21,80
27	23,25	23,75
30	18,43	23,40
36	17,24	21,42
72	14,73	17,65

Tabelle 3.3: *Evakuierungszeiten für die ersten 30 Personen, Ausgang 1 [13]*

Bei der Auswertung der Evakuierungen durch die Notausgänge über den Tragflächen fällt auf, dass die Versuchszeiten ohne Belohnung schneller sind als die mit Belohnung. Weiterhin wurde die schnellste Durchschnittszeit ohne Belohnung bei einer Konfiguration ermittelt, die eine vertikale Projektion von 34 Inch zur Verfügung stellte. Bei den Versuchen ohne Belohnung wurde bei dieser Breite jedoch die zweit langsamste Durchschnittszeit registriert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich zwei Ströme gebildet haben, die in der Engstelle aufeinander treffen. Anhand der Videoaufzeichnungen konnte beobachtet werden, dass eine schnelle Evakuierungszeit erzielt wurde, wenn einer der

[7] 1 Inch entspricht 2,54 cm

beiden Ströme dominant war und sich in den bestehenden Fluss einreihte. Langsamere Zeiten wurden gemessen, wenn sich beide Ströme nicht einig waren. Dies führte zu Blockaden. In zwei Fällen musste der Versuch sogar abgebrochen werden.

	Mit Belohnung	Ohne Belohnung
Vertikale Projektion [in.]	Zeit [s]	Zeit [s]
3	71,47	53,20
6	52,26	39,55
13	55,92	39,95
18	53,75	37,25
25	52,62	40,80
34	62,33	35,35

Tabelle 3.4: *Evakuierungszeiten für die ersten 30 Personen, Ausgang 2 [13]*

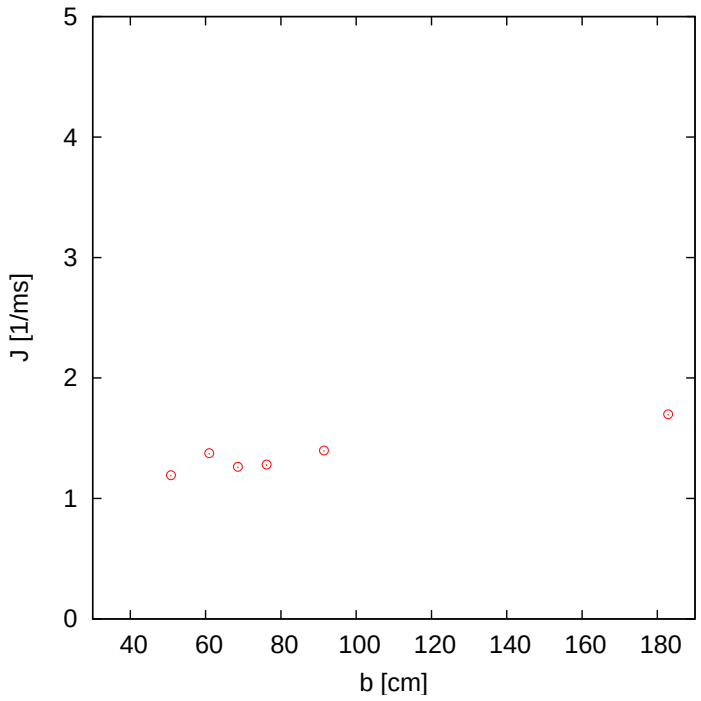

Abbildung 3.10: *Spezifischer Fluss in Abhängigkeit der Breite nach Muir*

In der Schlussbetrachtung empfiehlt Muir, in Anlehnung an die Ergebnisse der Evakuierungen über den Ausgang 2, die lichte Breite groß genug für eine Person zu wählen, aber nicht so groß, dass es möglich ist, nebeneinander die Engstelle zu passieren oder

andere Personen zu überholen. Weiterhin stellt sie fest, dass bei Versuchen, bei denen die Probanden mit Belohnungen motiviert waren, viel häufiger Blockaden und Stauungen auftraten als bei Versuchen ohne Belohnungen. Dies ändert sich auch nicht bei einer Vergrößerung der Engstellenbreite.

3.6 Müller: Zur Gestaltung und Bemessung von Fluchtwegen für die Evakuierung von Personen aus Bauwerken auf der Grundlage von Modellversuchen

In der Dissertation von Klaus Müller aus dem Jahre 1981 [12] werden zur Erforschung der Gesetzmäßigkeiten von Personenströmen neben Modellversuchen mit Stahlkugeln auch Praxisversuche mit Versuchspersonen in einem so genannten „Laufgatter“ beschrieben. Die Modellversuche mit Stahlkugeln wurden zur Untersuchung von eventuell auftretender Bogenbildungen vor Öffnungen durchgeführt, die Laufexperimente dienten dem Ziel, „Evakuierungsvarianten als häufig wiederholbare ermüdungsfreie und statisch gesicherte Versuchsreihen am Modell zu simulieren“ [12].

Die Versuchsanlage bestand aus einem Laufgang und einer Türöffnung, welche beide unabhängig voneinander auf verschiedene Breiten eingestellt werden konnten. Die Versuche wurden durch Video- und Fotokameras zur späteren Auswertung aufgezeichnet. Die Anzahl der Probanden betrug am ersten Tag 195, an den Tagen zwei und drei jeweils 150 Personen. Die vier Versuche wurden mit Gangbreiten zwischen 2,00 m und 3,80 m durchgeführt. Die Personenzahlen bei den Versuchen mit verschiedenen Gangbreiten verteilten sich wie folgt: Breite von 3,80 m und 3,20 m 195 Probanden, Breiten von 2,60 m und 2,00 m 150 Probanden.

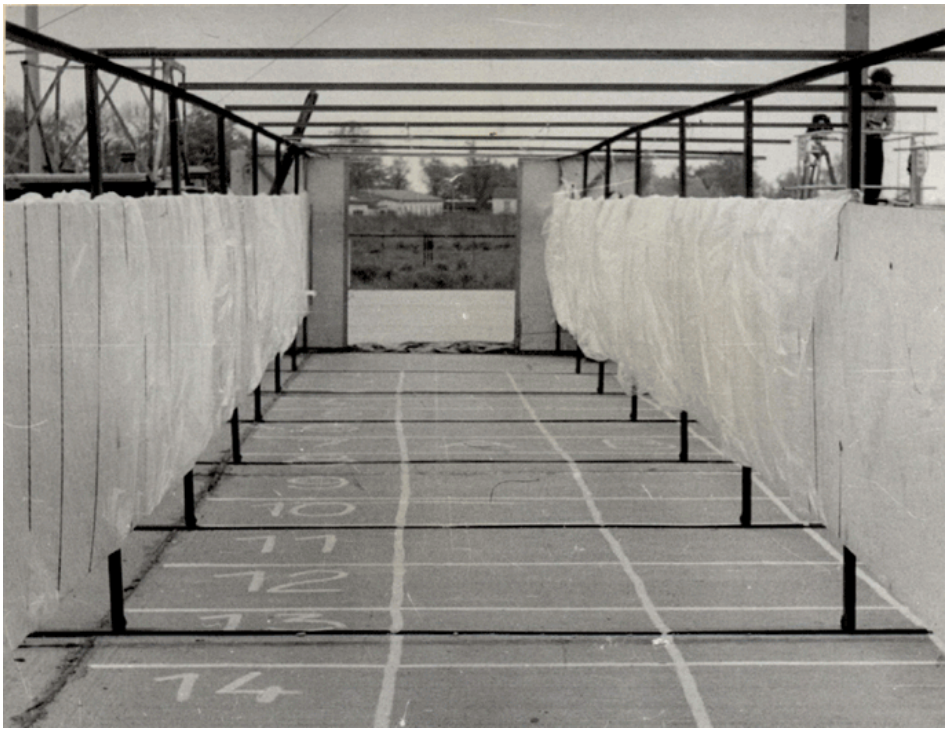

Abbildung 3.11: *Versuchsaufbau von Müller [12]*

Die Durchführung des Versuches sah wie folgt aus: Die Personen wurden mit einer Ausgangsdichte von 6 $Personen/m^2$ gleichmäßig in einem Abstand von 2,50 m vor der Türöffnung positioniert. Nach dem Startsignal bewegten sie sich durch den Gang und die Türöffnung.

Zur Auswertung ermittelte Müller den Platzbedarf einer Person anhand der Durchschnittswerte seiner von ihm vermessenen Versuchspersonen. Die Form nimmt er, ähnlich wie Predtetschenski / Milinksi [16], als Ellipse an. Müller bestätigt ebenfalls die von P/M ermittelte maximale Dichte von 0,92 m^2/m^2 unter Normalbedingungen. Unter Gefahrenbedingungen beobachtet Müller Maximaldichten zwischen 9,6 $Personen/m^2$ und 10,0 $Personen/m^2$. Beide Autoren führen dies übereinstimmend auf die Verformbarkeit des menschlichen Körpers zurück.

In Abbildung 3.12 sind die Laufzeiten der Experimente über der Engstellenbreite aufgetragen. Hier ist zu sehen, dass die Gangbreite nur minimalen Einfluss auf die benötigte Zeit hat. Weiterhin nimmt die Zeit mit steigender Breite ab, woraus sich auf eine Steigung des Personenflusses schließen lässt.

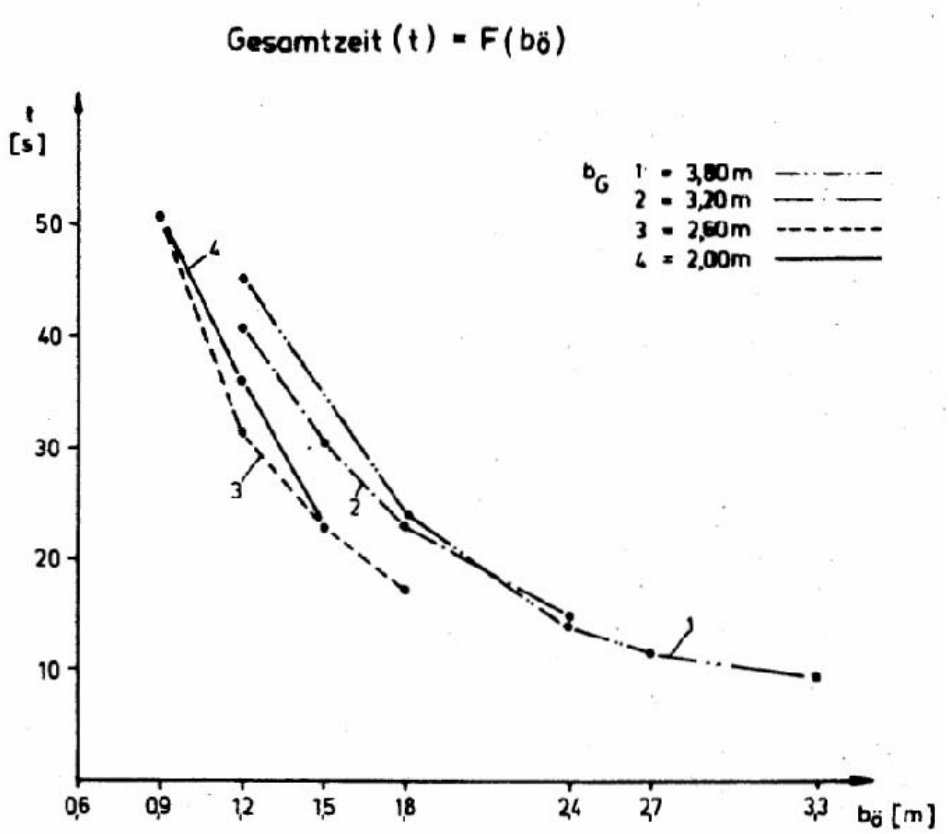

Abbildung 3.12: *Abhängigkeit der Laufzeit von der Türöffnungsbreite nach Müller [12]*

Bei der weiteren Auswertung der Dichte in Abhängigkeit von der Gangbreite kommt Müller zu dem Schluss, dass hohe Dichten wahrscheinlicher werden, je schmaler die Gänge werden; mit einem Maximum bei einer Öffnungsbreite von 1,20 m. Dieses Maximum wird von ihm begründet durch die Bögenbildung bei kleineren Öffnungsbreiten.

Schlussfolgernd empfiehlt Müller, Türöffnungen in Evakuierungswegen ab 100 darauf angewiesener Personen nicht unter einer Breite von 1,20 m zu wählen.

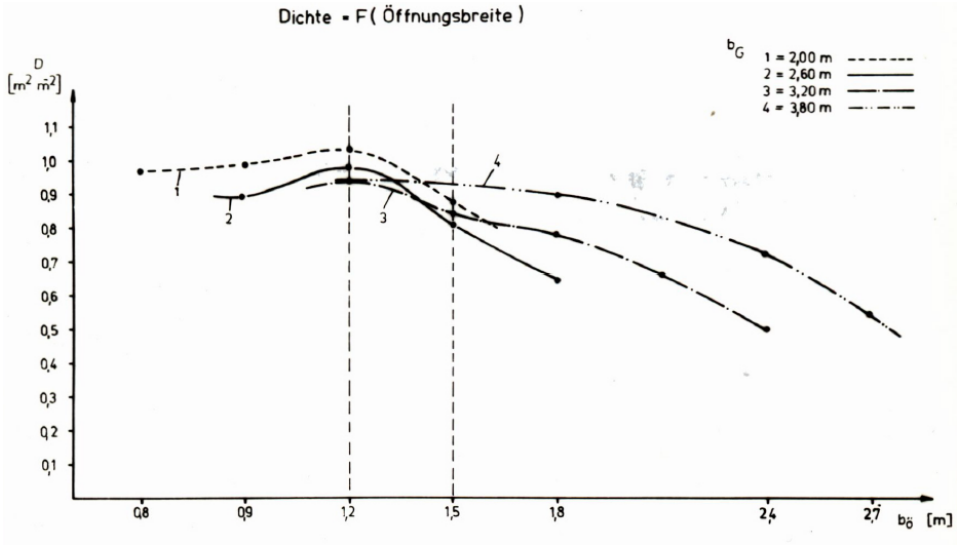

Abbildung 3.13: *Abhängigkeit der Dichte von der Türöffnungsbreite nach Müller [12]*

3.7 Baurechtliche Grundlagen

In dem folgenden Abschnitt werden die Anforderungen an Rettungswege aus einer kleinen Auswahl von deutschen Gesetzgebungen zusammengefasst. In der Bundesrepublik Deutschland liegt die Kompetenz des Bauordnungsrechts bei den Bundesländern. Die Bauministerkonferenz (Konferenz der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren der Länder - ARGEBAU) macht Vorschläge durch Ausarbeitung von Musterordnungen und -richtlinien, welche im Normalfall in die Ländergesetzgebung aufgenommen werden. Im Wesentlichen gleichen sich deshalb die Gesetze und Richtlinien der Länder, abgesehen von einigen marginalen Details.

3.7.1 Musterbauordnung

Die Musterbauordnung (MBO) [10] und die entsprechenden Landesbauordnungen (LBO) gelten vor allem für Wohngebäude, welche durch die bauliche Höhe noch nicht als Hochhäuser kategorisiert werden. Für Hochhäuser und weitere bauliche Objekte, bei denen

mit Menschenansammlungen oder anderen Gefahren zu rechnen ist, existieren Sonderbauvorschriften.

3.7.2 Musterversammlungsstättenverordnung

In § 1 (Anwendungsbereich) der Musterverordnung über den Bau und den Betrieb von Versammlungsstätten (MVStättV) [9] sind die Bauten aufgeführt, auf die die Vorschriften dieser Verordnungen angewandt werden müssen. Dazu zählen Versammlungsstätten mit Räumen, die einzeln mehr als 200 Besucher fassen. Dies gilt ebenfalls für Versammlungsstätten, deren Räume zusammen mehr als 200 Besucher fassen und deren Rettungswege gemeinsam genutzt werden. Weiterhin zählen hierzu Sportstadien, die mehr als 5000 Besucher fassen sowie Versammlungsstätten im Freien mit Szenenflächen, deren Besucherbereich mehr als 1000 Besucher fasst.

In § 7 werden Anforderungen an die Bemessung der Rettungswege gestellt: Die lichte Breite[8] eines jeden Rettungsweges muss mindestens 1,20 m betragen. Sie richtet sich nach der Zahl der darauf angewiesenen Personen:

- Bei Versammlungsstätten im Freien sowie Sportstadien 1,20 m je 600 Personen.
- Bei anderen Versammlungsstätten 1,20 m je 200 Personen.

Staffelungen sind nur in Schritten von 0,60 m gestattet.

In der Begründung und Erläuterung zur Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten [5] werden diese Breiten wie folgt erklärt: Zugrunde liegt das Modul der DIN EN 13200-1 „Zuschauertribünen“ [3]. Hier wird eine Mindestbreite von 1,20 m gefordert, da durch eine Engstelle dieser Breite zwei Personen gleichzeitig gehen

[8] die lichte Breite bezeichnet die maximal nutzbare Breite, bspw. bei Treppen die Breite zwischen den Handläufen

können. 100 Personen brauchen dafür etwa eine Minute. Es wird also ein spezifischer Fluss von 1,38 $1/ms$ angesetzt. Der Normentwurf aus dem Jahre 1998 [2] gibt eine erforderliche Durchgangsbreite für eine Person von 0,60 m an. Weiterhin wird angenommen, dass jeweils zwei Personen ohne gegenseitige Behinderung einen Rettungsweg nutzen können. Da demnach bei Breiten von 0,80 m bis 1,00 m nur jeweils eine Person eine Engstelle passieren kann, ändert sich die Räumungszeit zu einer Breite von 0,60 m nicht. Erst durch eine Verdopplung auf 1,20 m wird auch eine Verdopplung der Kapazität erreicht. Das heißt, die MVStättV lässt ein versetztes Gehen, also den Reißverschlusseffekt, unberücksichtigt.

3.7.3 Richtlinie über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten Sachsen-Anhalt

Die Richtlinie über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten des Landes Sachsen-Anhalt (VStättR) [18] fordert im Gegensatz zur MVStättV keine Staffelung der Breiten, sondern lässt auch Zwischenwerte zu. Auch die geforderte Breite weicht ab, sie liegt für Versammlungsräume bei 1,00 m je 150 Personen. Weiterhin werden Mindestwerte für die lichte Breite gefordert, die für diese Arbeit jedoch nicht relevant sind.

3.7.4 Muster-Richtlinie über den Bau und Betrieb Fliegender Bauten

Der Geltungsbereich der Muster-Richtlinie über den Bau und Betrieb Fliegender Bauten [6], kurz MFlBauR, ist in § 76 Abs. 1 der Musterbauordnung [10] geregelt. Anforderungen an Rettungswegbreiten finden sich in der MFlBauR unter Punkt 2.2.2. Dieser verlangt je 200 darauf angewiesener Personen eine lichte Breite von 1,20 m. Staffelungen sind in Schritten von 0,60 m erlaubt. Die Mindestbreite für Rettungswege beträgt 1,20 m.

3.7.5 Muster-Richtlinie über bauaufsichtliche Anforderungen an Schulen

Die Muster-Richtlinie über bauaufsichtliche Anforderungen an Schulen [7], kurz MSchulBauR, behandelt ebenfalls Mindestanforderungen an Rettungswege. Der Anwendungsbereich der MSchulBauR erstreckt sich auf allgemeinbildende und berufsbildende Schulen, benannt in § 56 Abs. 1 der Musterbauordnung [10]. In Abschnitt 3.4 wird die Breite von Rettungswegen bestimmt. Auch in dieser Richtlinie ist die Mindestbreite in Abhängigkeit von der Personenzahl gestaffelt, nämlich pro 150 darauf angewiesener Personen muss jeder notwendige Flur und jede notwendige Treppe eine nutzbare Breite von mindestens 1,00 m haben.[9] Weiterhin sind Mindestbreiten für verschiedene Wege und Flure angegeben, welche jedoch nicht von Priorität für diese Arbeit sind.

3.8 Zusammenfassung

Nach Durchsicht der verschiedenen Forschungsarbeiten und Bauverordnungen zeigt sich, wieviele unterschiedlichen Annahmen zum Personenfluss durch Engstellen es gibt und in welcher Weise dieser durch die Engstellenbreite beeinflusst wird. So sehen Seyfried, Nagai und Müller einen linearen Anstieg des Flusses mit der Engstellenbreite, während Hoogendoorn und Daamen zwar auch einen Reißverschlusseffekt beobachten konnten, hierbei wurde jedoch eine Linienbildung festgestellt und daraus auf einen stufenmäßigen Anstieg des Flusses mit der Linienanzahl geschlossen. Während die meisten Autoren den Reißverschlusseffekt unabhängig von der Breite erfassten, konnte Kretz nur bei bestimmten Breiten seines Experimentes die Ausbildung eines Reißverschlusseffektes beobachten.

Die Bauverordnungen, die für diese Arbeit untersucht wurden, lassen, bis auf die Versammlungsstättenrichtlinie des Landes Sachsen-Anhalt, jedoch keine Interpolation der

[9] Ab 180 darauf angewiesener Personen gilt eine Mindestbreite von 2,00 m.

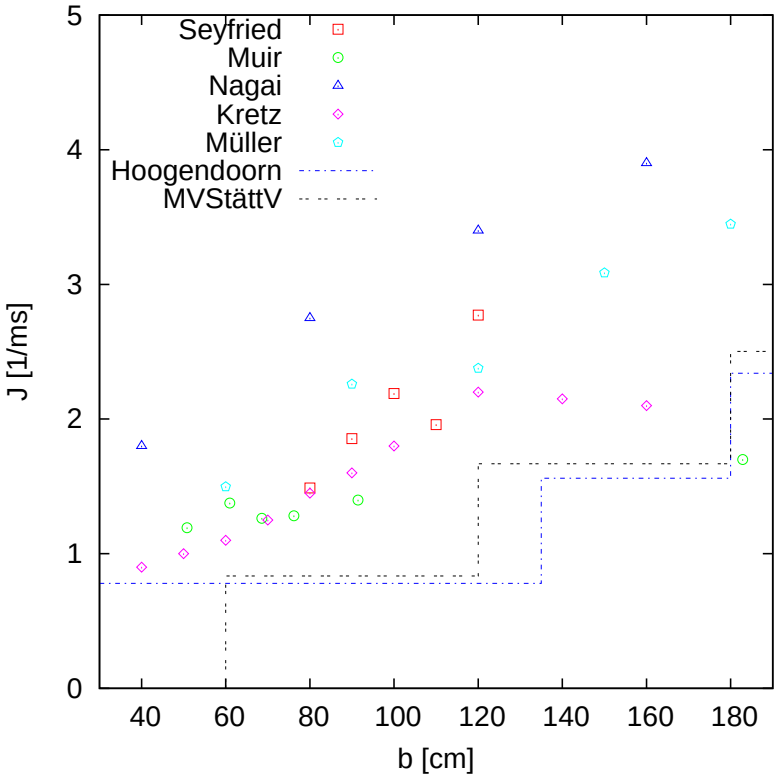

Abbildung 3.14: *Vergleich der Literaturdaten*

Rettungswegbreiten in Abhängigkeit der darauf angewiesenen Personen zu. Das heißt, die Bauvorschriften gehen auch von einem schrittweisen Anstieg des Flusses mit der Engstellenbreite aus.

4 Versuch

Auf den folgenden Seiten wird ein Laufversuch dargestellt, dessen teilweise Auswertung Ziel dieser Arbeit ist. Die Versuchsleitung ist eine Kooperation des Forschungszentrum Jülich mit der Bergischen Universität Wuppertal und der Universität zu Köln. Die Versuche fanden vom 27.11.2006 bis 01.12.2006 in der Bergischen Kaserne in Düsseldorf-Hubbelrath unter Mitwirkung von 180 Soldaten[1] des Fernmeldebataillon 820 statt. Diese Probanden passierten mehrfach eine aufgebaute Engstelle aus Stellwänden, deren Durchgangsbreite variabel einstellbar war. Die bei dem Versuch aufgezeichneten Videos bilden die Datengrundlage für die anschließende Auswertung. Für diese Arbeit interessiert vor allem der Einfluss der Engstellenbreite auf die charakteristischen Daten des Personenflusses.

4.1 Geometrie des Versuchsaufbaus

Die Versuchsfläche lässt sich aufteilen in drei Areale:

- Die Aufstellfläche, auf der sich die Personen bei Versuchsbeginn befinden,
- die Freifläche zwischen Aufstellfläche und Engstelle, sowie
- die Engstelle.

[1] Nicht bei allen Versuchen war die Teilnehmerzahl konstant bei 180 Personen. Näheres dazu im Kapitel 5.5

Die Aufstellfläche war unterteilt in drei gleich große Felder, welche auf dem Boden durch Klebeband markiert waren. Die Felder waren jeweils 7,00 m breit und 2,00 m lang und befanden sich hintereinander. Diese Unterteilung sollte sicherstellen, dass zu Beginn des Versuches eine gleichmäßige Personendichte vorherrschte. Diese sollte ungefähr 2,6 $Personen/m^2$ betragen. So sollten in jedem Feld 36 Personen stehen. Die restlichen 72 Personen stellen sich gleichmäßig verteilt hinter diesen drei Feldern auf. Die Freifläche zwischen Aufstellfläche und Engstelle war 4,00 m lang und ebenfalls 7,00 m breit. An diese Freifläche schloss sich die Engstelle an, deren Breite mit Stellwänden variabel eingestellt werden konnte. Die Stellwände waren ca. 2,00 m hoch, somit war die Durchgangsbreite auch in Schulterhöhe begrenzt. Dies ist deshalb so wichtig, da die Körperbreite eines Menschen in dieser Höhe am größten ist.

Die Engstellenbreite wurde bei den Versuchen variiert zwischen 0,80 m und 2,50 m. Insgesamt wurden 11 verschiedene Engstellenbreiten durchlaufen.

4.2 Aufzeichnungsgeräte

Zur Aufzeichnung der Durchläufe wurden drei Kameras eingesetzt, die einmal den Eintrittsbereich in die Engstelle sowie die Engstelle selbst überblickten. Zusätzlich wurde eine Seitenansicht des Versuches aufgenommen. Für diese Arbeit interessant ist die Kamera direkt über der Engstelle. Mit Hilfe dieser Aufnahmen erfolgt die Auswertung.

Die Aufzeichnungsgeräte waren Industriekameras des Typs uEye UI UI-2230 2230-C, welche in einer Höhe von 5,37 m montiert und senkrecht zum Boden ausgerichtet waren.

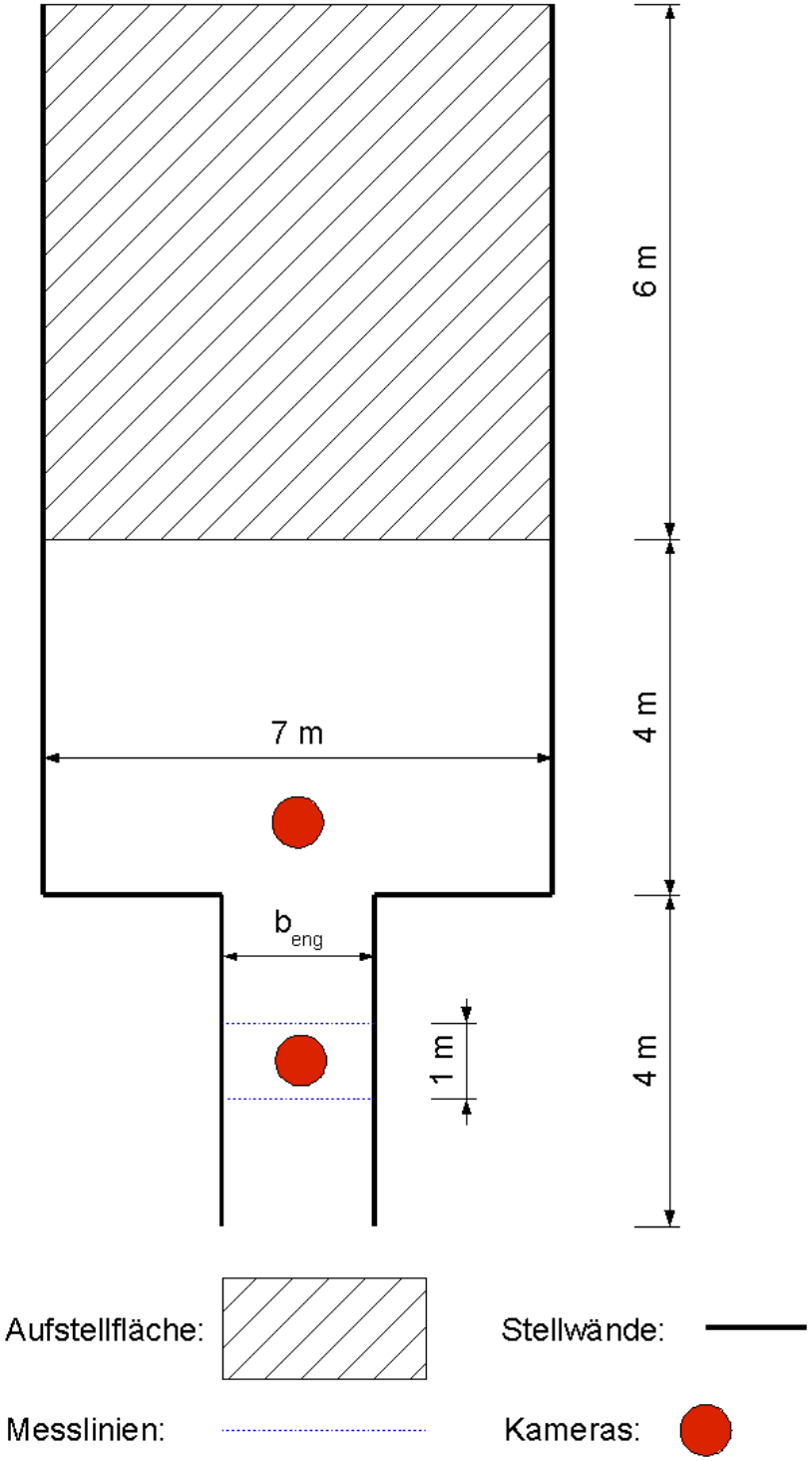

Abbildung 4.1: *Schematischer Versuchsaufbau*

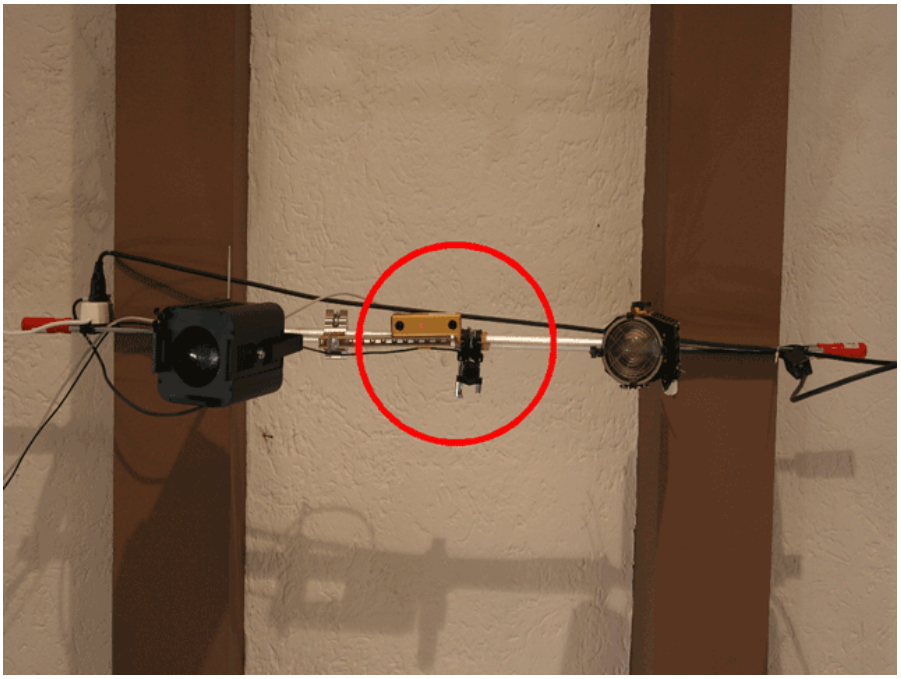

Abbildung 4.2: *Industriekamera*

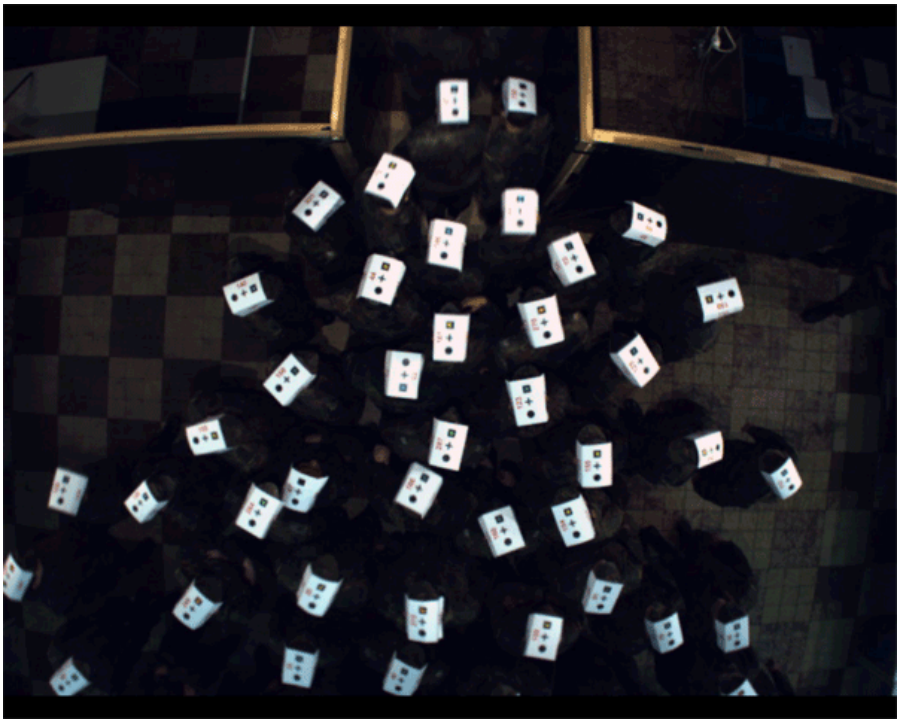

Abbildung 4.3: *Bild der Kamera über dem Eintrittsbereich*

Abbildung 4.4: *Bild der Kamera über der Engstelle*

4.3 Versuchsablauf

Die Versuche wurden mit 180 Soldaten durchgeführt, die gebeten wurden, die Engstelle mit normaler Geschwindigkeit und ohne Drängeln, jedoch zügig zu durchlaufen. Die Soldaten trugen auf dem Kopf Markierungsschilder, auf die eine fortlaufende Nummer und von vorne nach hinten drei Symbole aufgedruckt waren:

- Ein Quadrat, gefüllt mit einem farbigen Kreis,
- ein Kreuz und
- ein Kreis.

Hintergrund für die Anbringung dieser Schilder ist, die computergestützte Auswertung mit Programmen zu verbessern. Jedoch haben die Schilder auch auf die Auswertungen in dieser Arbeit Auswirkungen. Mehr dazu im Kapitel 5.2.

Abbildung 4.5: *Versuchsablauf, Eintritt in die Engstelle*

Die Nummer dient der Identifizierung des Soldaten. Anhand der drei Symbole soll die Software die Blickrichtung des Probanden erkennen und mit Hilfe des farbigen Kreises lässt sich die Körpergröße der Person erkennen, da einer bestimmten Farbe ein Größenintervall zugeordnet ist.

Da diese Engstellenversuche am vierten und fünften Tag einer Versuchsreihe stattfanden und die Probanden mit den Abläufen vertraut waren, musste kein Probedurchgang durchgeführt werden. Weiterhin ist davon auszugehen, dass keine Kameraeffekte aufgetreten sind, so dass größtenteils nur natürliche Bewegungsabläufe zu beobachten sind. Ein Problem war jedoch die teils nachlassende Disziplin der Soldaten, welche sich durch Rempeln, zur Seite Schauen und das Provozieren von Staus äußerte.

Abbildung 4.6: *Versuchsablauf, Engstelle*

Die Versuche wurden entweder durch das Signal einer Trillerpfeife oder auch durch mündliche Kommandos gestartet.

Durch einen ausreichend großen Platz hinter der Engstelle konnte eine Verfälschung der Ergebnisse durch Rückstauungen, weil die Probanden kurz hinter der Engstelle stehen bleiben, vermieden werden.

5 Auswertung

5.1 Einführung

Ziel der Auswertung dieses Versuches soll sein, die Kenngrößen der Personenströme in Engstellen zu erfassen, zu analysieren und mit bestehenden Literaturdaten zu vergleichen. In diesem Kapitel wird geschildert, wie die Daten anhand der Videoaufzeichnungen erfasst werden. Eine Analyse folgt dann im nächsten Kapitel. Die Auswertung erfolgt auch hinsichtlich der Fragestellung, ob die Breite der Engstelle Einfluss auf bestimmte Charakteristika der Personenströme hat.

Die Auswertung der Videos erfolgte im Forschungszentrum Jülich. Die Videoaufzeichnungen standen als einzelne Dateien für jede Kamera und Engstellenbreite zur Verfügung. Die Auflösung von 1024 x 768 Pixeln und die zeitliche Auflösung von 25 Frames pro Sekunde war völlig ausreichend für die Zwecke dieser Arbeit.

5.2 Software Petrack

Die Software Petrack, entwickelt von Maik Boltes, Forschungszentrum Jülich, ist ein Programm zur automatischen Erfassung von Fußgängertrajektorien und damit verbunden der mikroskopischen Kenndaten des Fußgängers. Für diese Arbeit diente das Programm jedoch nur als Hilfsmittel, die Auswertung erfolgte durch eine Handzählung.

Dazu erfolgt durch die Software zuerst eine Entzerrung des Kamerabildes. Bedingt durch die Anbringung der Kamera über der Versuchsstrecke, sind die Bilder perspektivisch verzerrt. Durch diese Verzerrung kann die Auswertung verfälscht werden, da beispielsweise die Personen aus einem falschen Winkel betrachtet werden. Die Entzerrung läuft dabei folgendermaßen ab: Ein bekanntes Muster, zum Beispiel das eines Schachbretts, wird mit einer Kamera aus verschiedenen Perspektiven aufgenommen. Anhand der Entfernung der verzerrten Punkte von der tatsächlichen Lage kann die Verzerrung berechnet werden und anhand dieser Ergebnisse das tatsächliche Bild konstruiert werden.

Ebenfalls wichtig in Anbetracht der Verzerrung ist die Lage der virtuellen Linien, welche jetzt vorgestellt werden. Zur Erfassung der Messwerte werden in Petrack zwei Hilfslinien quer zum Verlauf der Engstelle gezogen, mit einem Abstand von 1,00 m, vom Boden aus gemessen in einer Höhe von 1,80 m. Dies entspricht ungefähr der mittleren Körpergröße der Soldaten. Der Hintergrund hierfür ist, dass die Auswertung anhand Markierungsschilder erfolgt, die die Soldaten auf dem Kopf trugen.

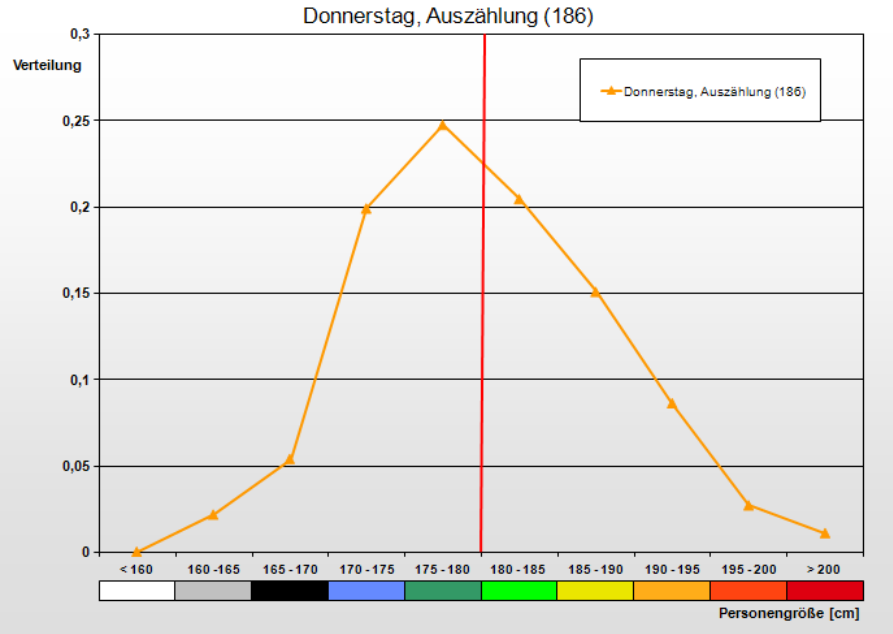

Abbildung 5.1: *Personengrößenverteilung für Engstellenversuche*

5.3 Auslesen der Durchgangszeiten

Die Filme werden Frame für Frame abgespielt. Sobald ein Kreuz der Markierungsschilder auf den Köpfen der Probanden eine Hilfslinie passiert, wird der Frame und die entsprechende Linie notiert. Durch dieses Vorgehen erhält man zu jedem Probanden die Eintritts- sowie Austrittszeit des Messfeldes. In Abbildung 5.2 ist ein Screenshot der Auswertung zu sehen. Die genutzten Hilfslinien befinden sich in der Bildmitte. Dies wurde so gewählt, da hier die geringste Verzerrung zu beobachten ist. Da die Bewegungsrichtung von links nach rechts war, wurde die linke Hilfslinie in der Protokollierung als $Linie_1$ bezeichnet, die rechte Linie dementsprechend als $Linie_2$. Die Personennummer (eine laufende Durchnummerierung) und die Ein- und Austrittszeiten, sprich Überquerung von $Linie_1$ und $Linie_2$, wurden in eine Tabelle eingetragen.

Abbildung 5.2: *Screenshot Petrack, Engstelle, b = 1,00 m*

Im weiteren Verlauf der Auswertung wurden die Zeitreihen relativiert, das heißt der Zeitpunkt, an dem der erste Proband die erste Messlinie überquert, wird als Zeitpunkt $t = 0s$ gesetzt. Dies ermöglicht erst den Vergleich der unterschiedlichen Läufe.

Breite [cm]	Teilnehmerzahl	t_{ges} [s]
90	172	110,12
100	180	99,56
120	180	79,12
140	178	67,16
160	180	66,80

Tabelle 5.1: *Teilnehmerzahl und Gesamtlaufzeit der Experimente*

5.4 Umrechnung der Zeit-Frames

Jeder Frame der Videoaufzeichnungen wurde in Petrack mit der dazugehörigen Framenummer angezeigt. Da die Aufnahme mit einer zeitlichen Auflösung von 25 Frames pro Sekunde aufgenommen wurde, lässt sich die tatsächliche Zeit über folgende Formel berechnen:

$$t = \frac{N_{Frame}}{25} \tag{5.1}$$

Die Differenz zwischen der so berechneten Eintritts- und Austrittszeit ergibt dann die Zeit, die der Proband benötigt hat, um das Messfeld mit einer Länge von 1,00 m zu durchlaufen.

5.5 Bestimmung der Gesamtlaufzeit eines Experimentes

Die Gesamtlaufzeit t_{ges} eines Durchlaufes ist die Zeit zwischen dem Überschreiten der ersten Linie durch den ersten Versuchsteilnehmer und der Überquerung der zweiten Messlinie durch den letzten Probanden. Die Zeiten sind in Tabelle 5.1 wiedergegeben.

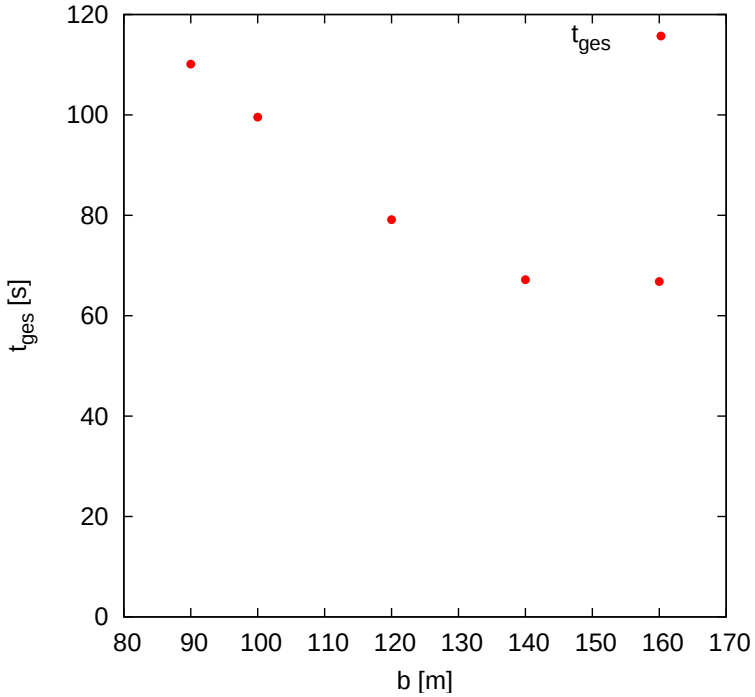

Abbildung 5.3: *Gesamtlaufzeiten der Experimente*

Die ermittelten Zeiten wurden über die Breite in ein Diagramm aufgetragen (Abbildung 5.3).

Bis auf die Breite von b = 1,60 m zeichnet sich eine lineare Abnahme der Zeit ab. Daraus lässt sich bereits auf einen kontinuierlich steigenden Fluss schließen. Die Abweichung für die genannte Breite lässt sich eventuell durch größere Abstände zwischen den Soldaten zum Ende des Versuches hin erklären.

5.6 Berechnung der „time gaps“

Die Definition eines „time gap“ wird bereits in Kapitel 2.3 erläutert. Nach der dort angegebenen Formel (2.8) werden die „time gaps“ für beide Messlinien errechnet. Somit stehen zwei „time gaps“ für jeden Versuchsteilnehmer zur Verfügung.

Anschließend werden die „time gaps“ über die Gesamtzeit in Diagrammen aufgetragen:

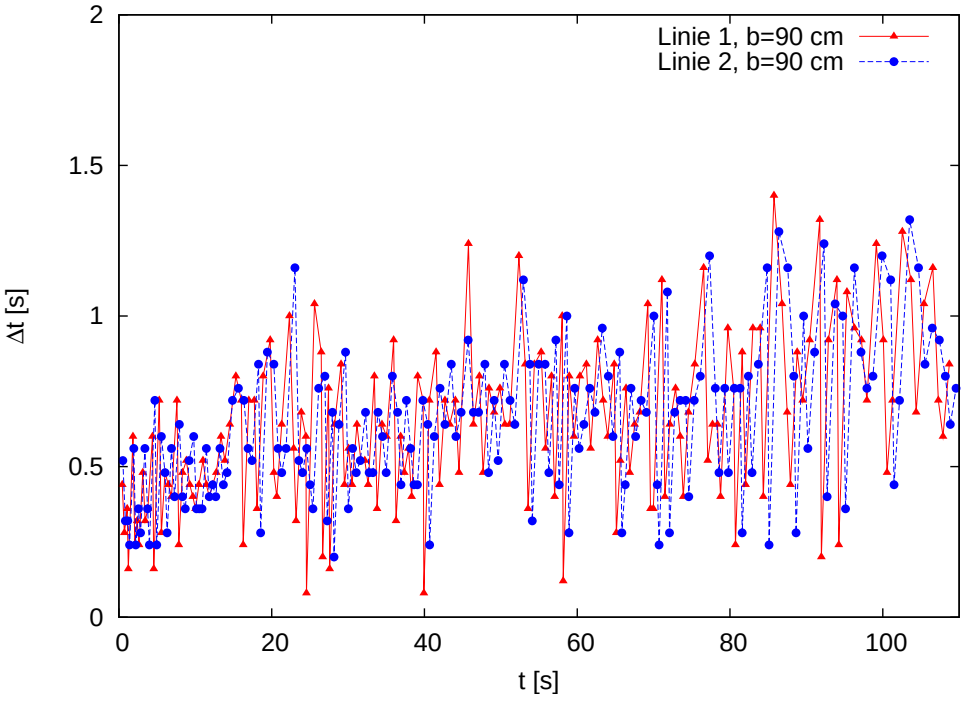

Abbildung 5.4: *„time gaps“ über Zeit, b = 0,90 m*

Aus diesen Diagrammen lassen sich erste Auffälligkeiten ablesen:

- Anhand des Aufeinanderfolgens von einem langen und einem kurzen „time gap“ lässt sich der Reißverschluss-Effekt erkennen. Die Versuchsteilnehmer gehen in der Engstelle versetzt, die nachfolgende Person orientiert sich zur anderen Wandseite hin.

- Bei einer Breite von b = 1,00 m gehen die ersten beiden Personen zeitgleich über eine Messlinie, sie gehen nebeneinander oder zumindest in sehr geringem Abstand.

Zur Untersuchung der Ergebnisse auf Messfehler oder sogenannte „Ausreißer“ wurden die „time gaps“ der beiden Linien miteinander verglichen. Dazu wurden die „time gaps“ der Linie 1 auf der x-Achse aufgetragen, die Ergebnisse von Linie 2 auf der y-Achse.

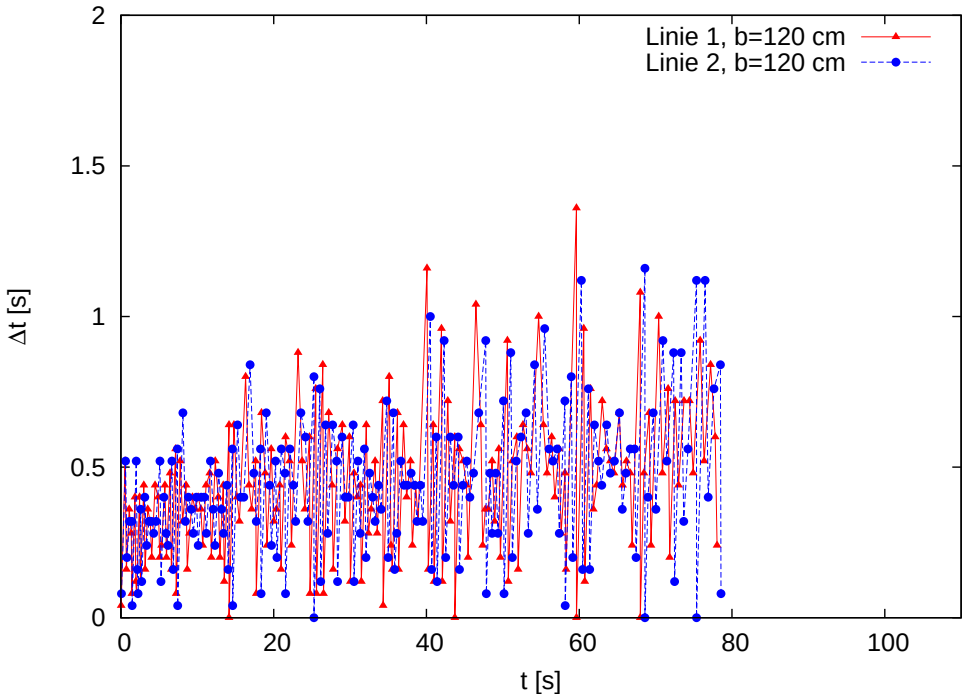

Abbildung 5.5: *„time gaps“ über Zeit, b = 1,20 m*

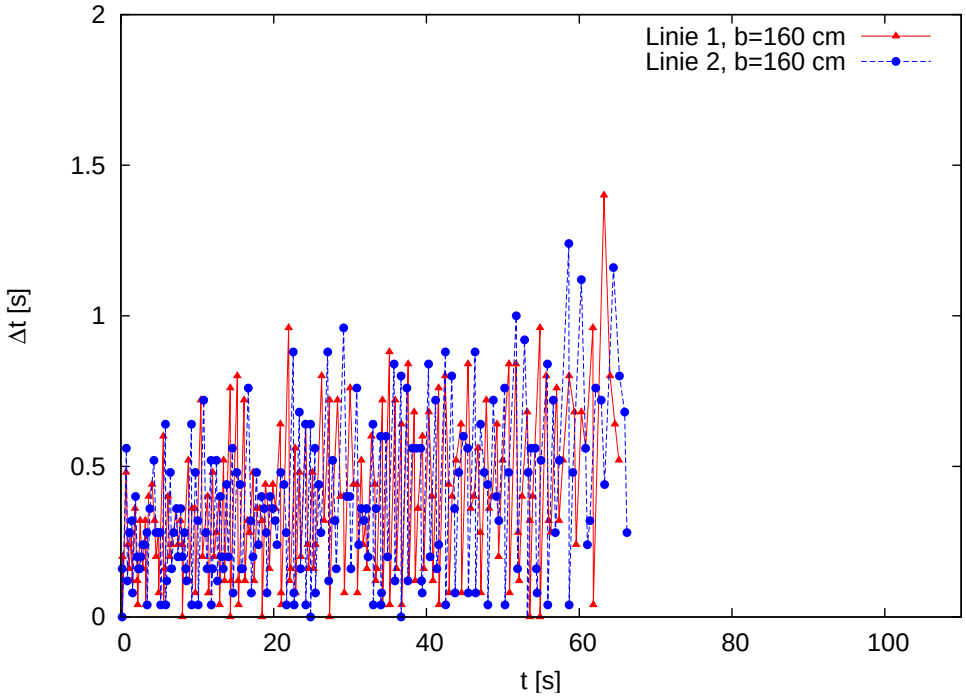

Abbildung 5.6: *„time gaps“ über Zeit, b = 1,60 m*

Zusätzlich wurde eine Linie im 45°-Winkel eingezeichnet. Wenn die Ergebnisse der beiden Linien übereinstimmen, liegen die Funktionswerte auf dieser Hilfslinie. Weiterhin lässt sich an Hand dieser Diagramme die Verteilung der „time gaps“ grob bestimmen. Zum Beispiel liegt die Mehrheit der „time gaps“ bei einer Engstellenbreite von b = 0,90 m zwischen 0,3 s und 0,9 s, während die meisten „time gaps“ bei einer Breite von b = 1,60 m unterhalb von 0,6 s liegen.

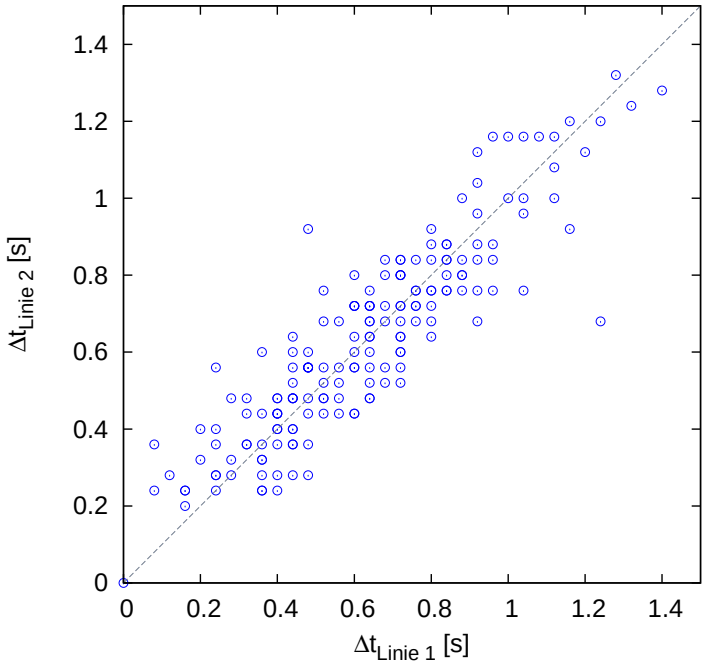

Abbildung 5.7: *Vergleich der „time gaps“, b = 0,90 m*

Nach Betrachtung der Diagramme ist festzustellen, dass es keine zu großen Ausreißer gibt, die für die weiteren Auswertungen extrahiert werden müssten.

5.7 Berechnung der mittleren personenbezogenen Geschwindigkeit

Die mittlere personenbezogene Geschwindigkeit wird ermittelt über die Zeit $t_{(i,Linie2)-(i,Linie1)}$, die eine Person i im Messfeld verbrachte, geteilt durch die Länge des Messfeldes l_{Mess}, hier also 1,00 m.

$$\overline{v}_i = \frac{l_{Mess}}{t_{(i,Linie2)-(i,Linie1)}} \tag{5.2}$$

Die Ergebnisse werden ebenfalls über der Zeit in Diagramme eingetragen.

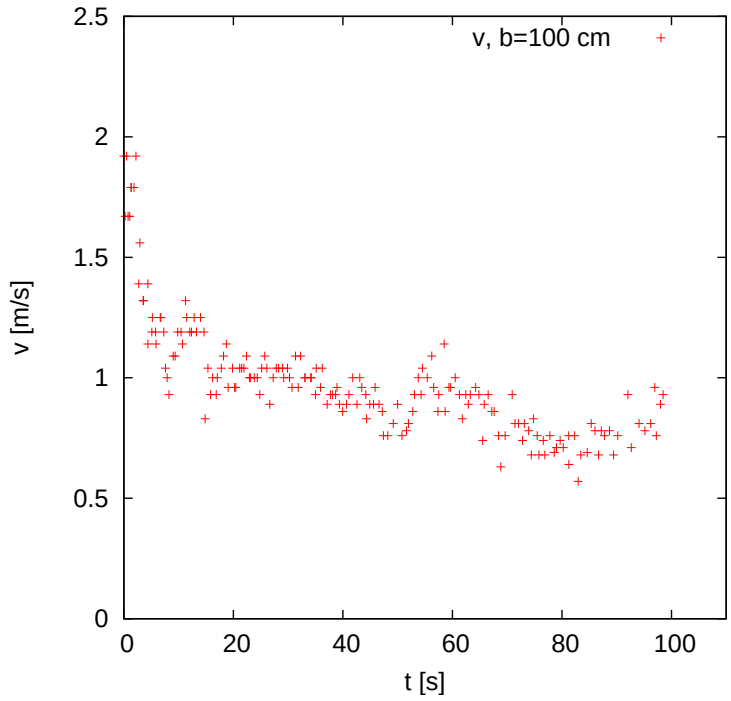

Abbildung 5.8: *Geschwindigkeit über Zeit, b = 1,00 m*

Auch hier lassen sich bereits erste Charakteristika erkennen:

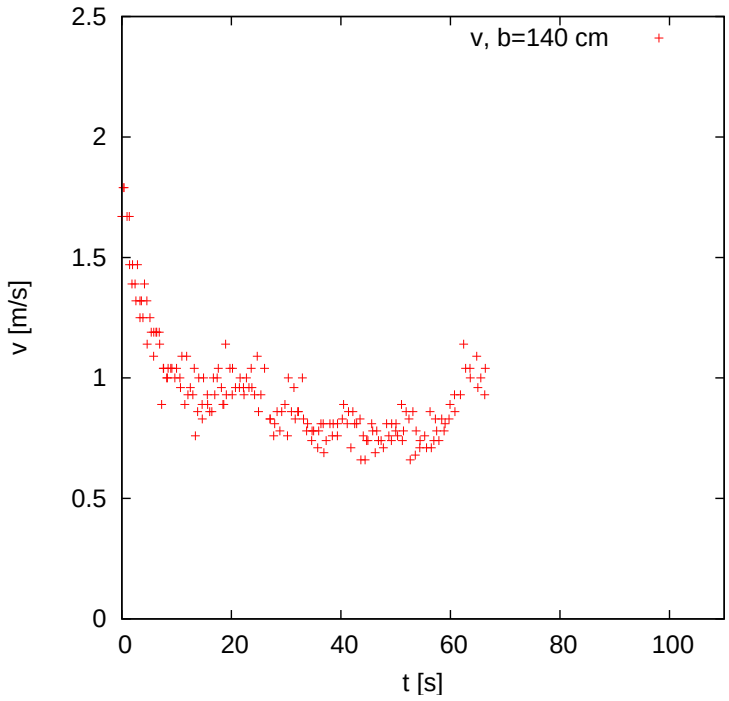

Abbildung 5.9: *Geschwindigkeit über Zeit, b = 1,40 m*

- Die Geschwindigkeit erreicht erst nach etwa 20 Sekunden einen stationären Wert. Davor ist ein Einschwingvorgang zu erkennen.

- Der statische Wert steigt auch bei großen Breiten kaum an.

- Bei den letzten Probanden ist ein leichter Anstieg der Geschwindigkeit erkennbar. Hierbei handelt es sich um „Trödler“, die die Engstelle ohne einen Stau passieren können.

5.8 Berechnung der zeitlichen Verläufe der Dichte

Die Definition der Dichte eines Personenstroms wurde bereits in Kapitel 1 erläutert. In dieser Auswertung wird die Dichte bestimmt über die Summe der Personen im Messfeld zum Zeitpunkt t ΣP_t bezogen auf die Fläche des Messfeldes A für jeden Zeitframe.

Die betrachtete Messfläche beträgt für die Engstellenbreite b:

$$A = b * 1,00m \tag{5.3}$$

Die Summe der Personen im Messfeld wird ermittelt über die Ein- und Austrittszeiten in das Messefeld.

Die Formel für die Dichte lautet demnach:

$$\rho_t = \frac{\Sigma P_t}{A} \tag{5.4}$$

Nach dem Auftragen der Daten in Diagramme ergeben sich beispielhaft folgende Bilder:

Folgende Erkenntnisse können aus diesen Abbildungen gezogen werden:

- Der vom Autor erwartete Einschwingvorgang analog der Geschwindigkeit ist nicht in der gleichen Intensität erkennbar, zumindest nicht bei allen Breiten. Bei einer Breite von b=1,00 m kann ein leichtes Einschwingen beobachtet werden. Es ist unklar, ob die teilweise unübersichtliche Darstellungsform Einfluss auf diese Schlüsse hat.

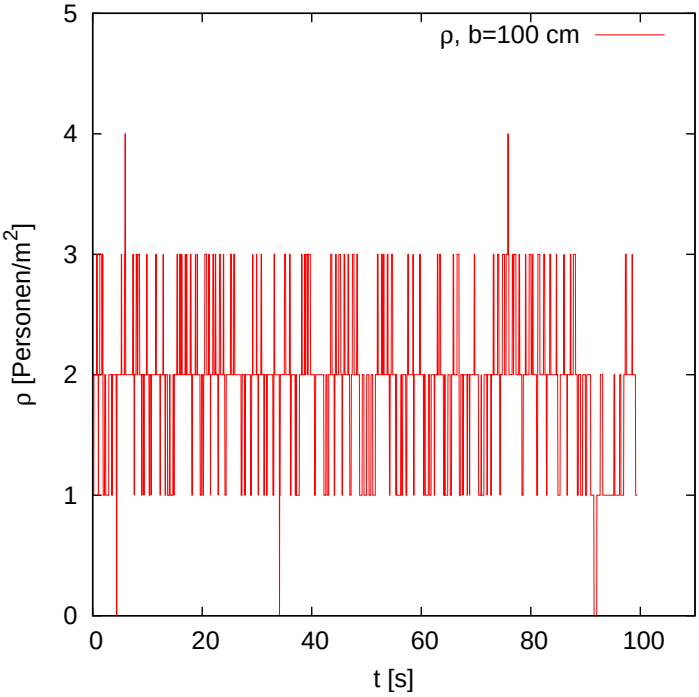

Abbildung 5.10: *Dichte über Zeit, b = 1,00 m*

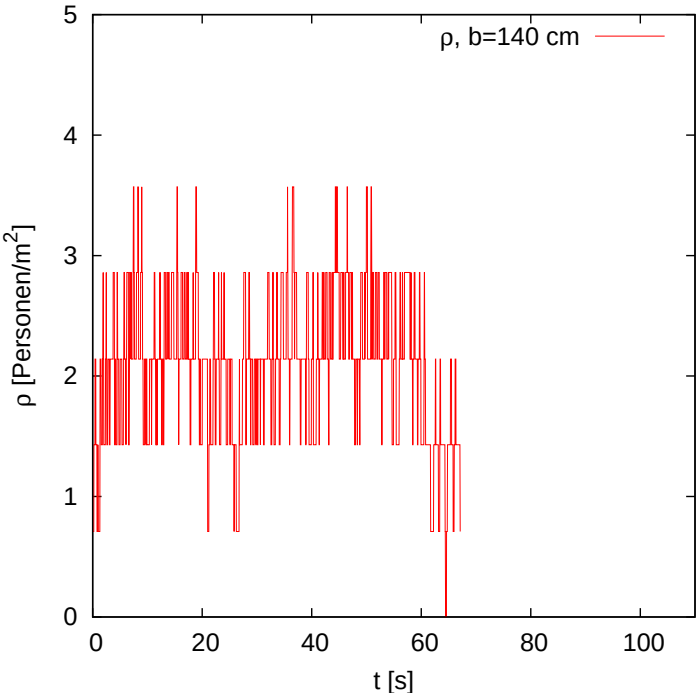

Abbildung 5.11: *Dichte über Zeit, b = 1,40 m*

- Es ist nicht zu beobachten, dass der Dichteverlauf mit der Zeit ansteigt. Dies deutet darauf hin, dass die Probanden den Personenfluss während eines Durchlaufes nicht optimieren konnten. Grund hierfür könnte sein, dass bereits zu Beginn eines Durchlaufes eine relativ hohe Dichte vorherrschte.

Um einen besseren Einblick in die zeitliche Entwicklung der Dichte zu bekommen, wird eine Glättung durchgeführt. Dazu wird für jeden Zeitframe die Durchschnittsdichte aus der aktuellen Dichte sowie den Werten der vier Zeitframes davor und danach ermittelt. Dadurch werden in den folgenden Diagrammen die ersten und letzten acht Personen nicht berücksichtigt.

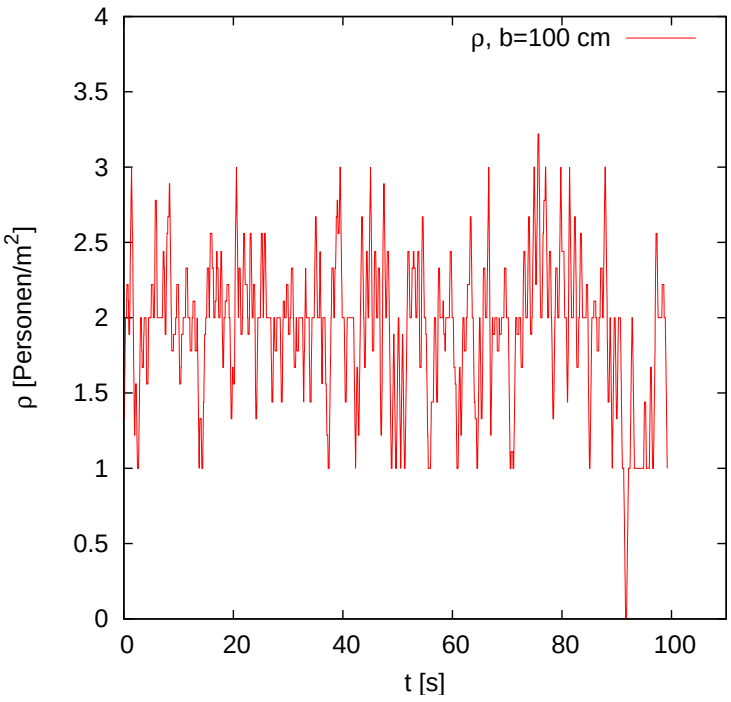

Abbildung 5.12: *Dichte geglättet über Zeit, b = 1,00 m*

Bei einer Breite von b = 1,40 m ist jetzt ebenfalls ein deutlicher Einschwingvorgang zu erkennen. Dies lässt sich jedoch nicht auf b = 1,00 m übertragen. Analog zur Geschwindigkeitsreihe lässt sich auch bei der Dichteentwicklung zum Ende das Auftreten von „Trödlern“ beobachten.

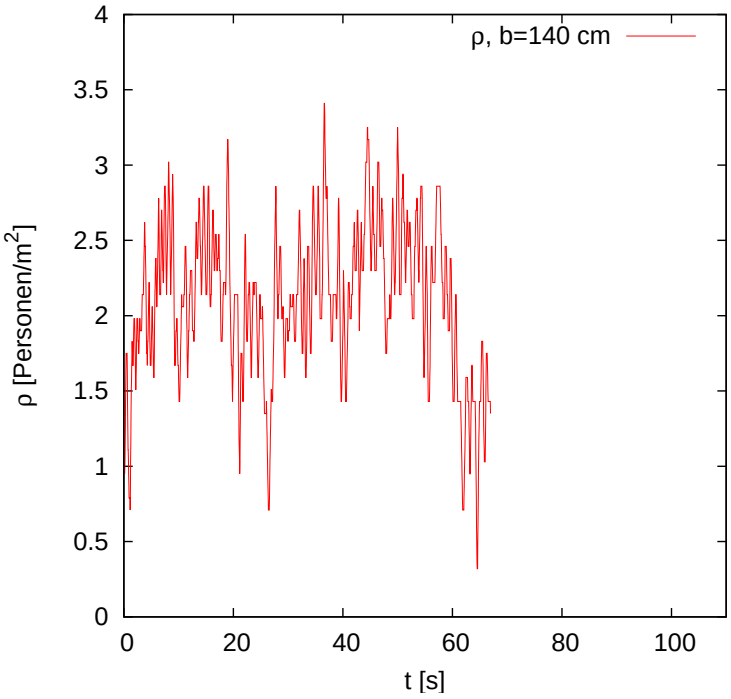

Abbildung 5.13: *Dichte geglättet über Zeit, b = 1,40 m*

5.9 Berechnung der mittleren personenbezogenen Dichte

Zur Bestimmung der mittleren personenbezogenen Dichte wird der Durchschnittswert der Dichten zu den Zeitframes, während derer sich die Person im Messfeld befindet, gebildet. Wenn t_1 der Zeitpunkt ist, an dem die Person die Linie 1 überschreitet und damit in das Messfeld eintritt, und t_2 die Zeit ist, bei der das Messfeld verlassen wird, lautet die Formel für die personenbezogene Dichte

$$\overline{\rho}_p = \frac{\sum_{i=t_1}^{t_2} \rho_t}{t_2 - t_1} \tag{5.5}$$

Aus den mit diesen gewonnenen Daten erstellten Diagrammen lassen sich folgende Punkte ableiten:

- Die vorgenommene Glättung ist eine gute Option, um die in der anfänglichen Darstellung recht schwer zu deutenden Dichteverläufe besser zu visualisieren. Die Verläufe der Glättungen und der personenbezogenen Dichten sind sehr ähnlich.

- Mit steigender Durchgangsbreite steigt auch die personenbezogene Dichte an. (vgl. 5.14 und 5.15).

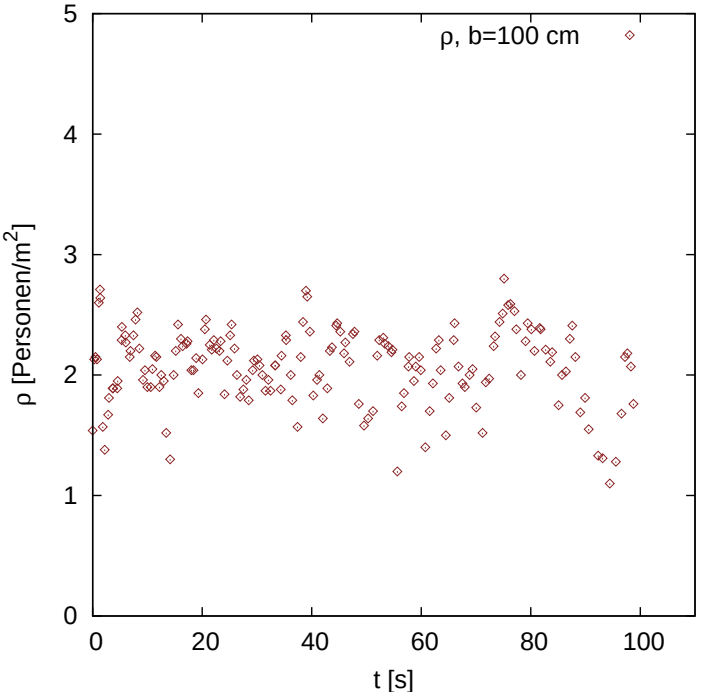

Abbildung 5.14: *Personenbezogene Dichte über Zeit, b = 1,00 m*

5.10 Berechnung des Flusses

Wie schon in 2.2 erläutert, lässt sich der Fluss auf zwei verschiedene Wege bestimmen. In diesem Fall ist die Berechnung des Flusses analog der Flussgleichung eines Fluides besser geeignet, da vereinzelt „time gaps“ von 0 Sekunden gemessen wurden, was dazu führt, dass es bei der Bestimmung des Flusses über die „time gaps“ zu einer Division

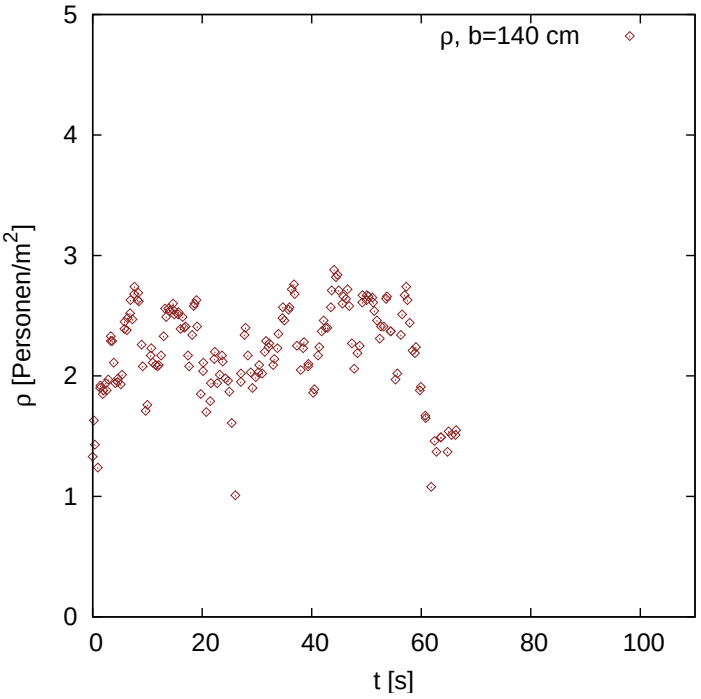

Abbildung 5.15: *Personenbezogene Dichte über Zeit, b = 1,40 m*

durch Null kommt. Da diese mathematisch nicht definiert ist, müsste man ein Ergebnis durch Annäherung an Null bestimmen. Der Fluss, den man als Ergebnis erhalten würde, nähert sich dabei allerdings Unendlich. Weiterhin führt ein „time gap“ im Abstand eines Zeitframes, also von 0,04 Sekunden, zu einem rechnerischen Fluss von 25 $\frac{Personen}{s}$. Bei der Herleitung des Flusses über die Formel $J = \rho * v * b \left[\frac{Personen}{s}\right]$ entsteht ein relativ stationäres Bild in den gewonnenen Diagrammen. Beispielhaft wird dies am Diagramm für eine Engstellenbreite von b = 0,90 m gezeigt (Abbildung 5.16).

Die y-Achse wurde hierbei zur besseren Ablesbarkeit begrenzt auf einen Fluss von 7 $\frac{Personen}{s}$. „Fluss 1“ gibt den Fluss in Abhängigkeit der „time gaps“ an Messlinie 1 an, „Fluss 2“ dementsprechend für Linie 2. „Fluss (ρ*v*b)“ bildet den Fluss ab, welcher über die Fluidgleichung berechnet wurde. Gut sichtbar ist in dieser Darstellung die Beeinflussbarkeit durch die kurzen „time gaps“.

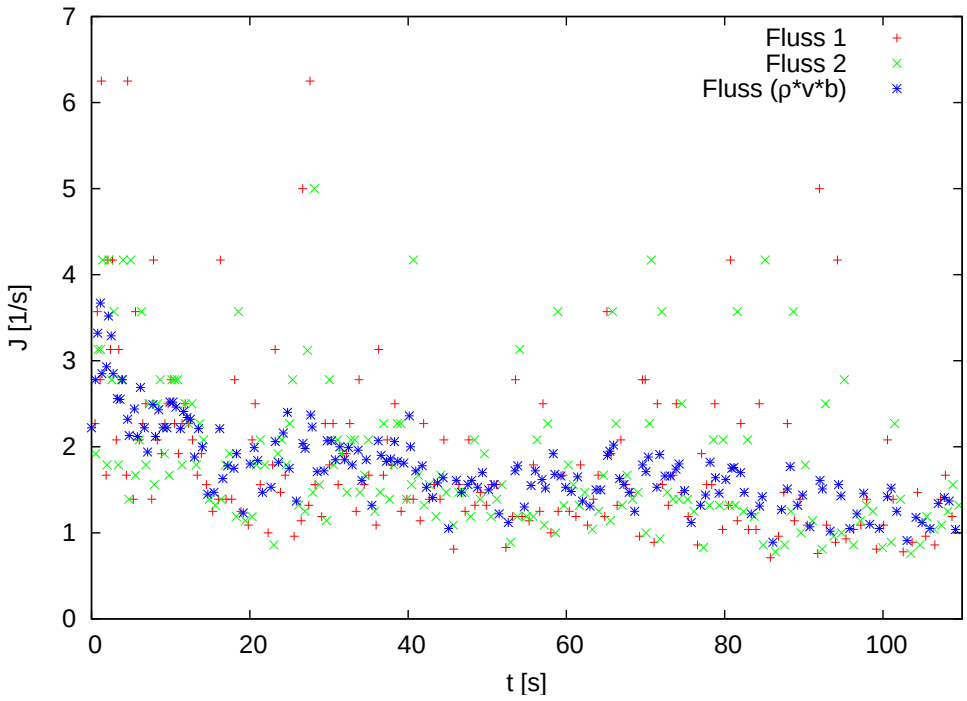

Abbildung 5.16: *Fluss über Zeit, b = 0,90 m*

Bei Betrachtung der blauen Funktionsreihe lässt sich folgendes feststellen:

- Aufgrund der Abhängigkeit von der Geschwindigkeit findet sich auch beim „Fluss (ρ*v*b)“ ein Einschwingvorgang wieder.

- Der Fluss nimmt mit der Zeit leicht ab, was aber ebenfalls auf das Verhalten der Geschwindigkeitsreihe zurückzuführen ist.

6 Analyse

6.1 Einschwingvorgang

Bei der Auswertung der mittleren Geschwindigkeit wurde bereits ersichtlich, dass sich die Geschwindigkeit offenbar einschwingt, bevor sie einen stationären Wert erreicht. Um zu untersuchen, ob sich dieses Verhalten bei allen Breiten zeigt, wurden die Geschwindigkeits-Zeit-Verläufe von allen Experimenten in ein Diagramm eingetragen (Abbildung 6.1).

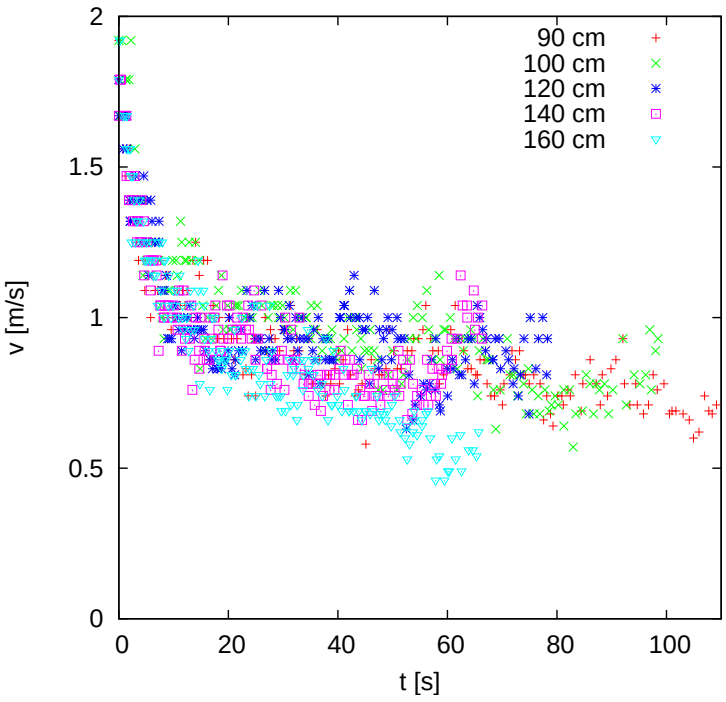

Abbildung 6.1: *Geschwindigkeit über Zeit, alle Breiten*

Bereits bei dieser noch recht unübersichtlichen Darstellung lässt sich erkennen, dass sich der Einschwingvorgang bei allen Engstellenbreiten ereignet. In Abbildung 6.2 wurden die ersten 40 Sekunden aller Experimente ausgeschnitten, um diese genauer zu betrachten. Sowohl in dieser Darstellung als auch in den gefitteten Graphen (Abbildung 6.3) zeigt sich, dass bei dem Einschwingen sowohl die Anfangsgeschwindigkeit als auch die stationäre Geschwindigkeit, die sich nach ungefähr 25 Sekunden einstellt, relativ konstant über alle Breiten sind.

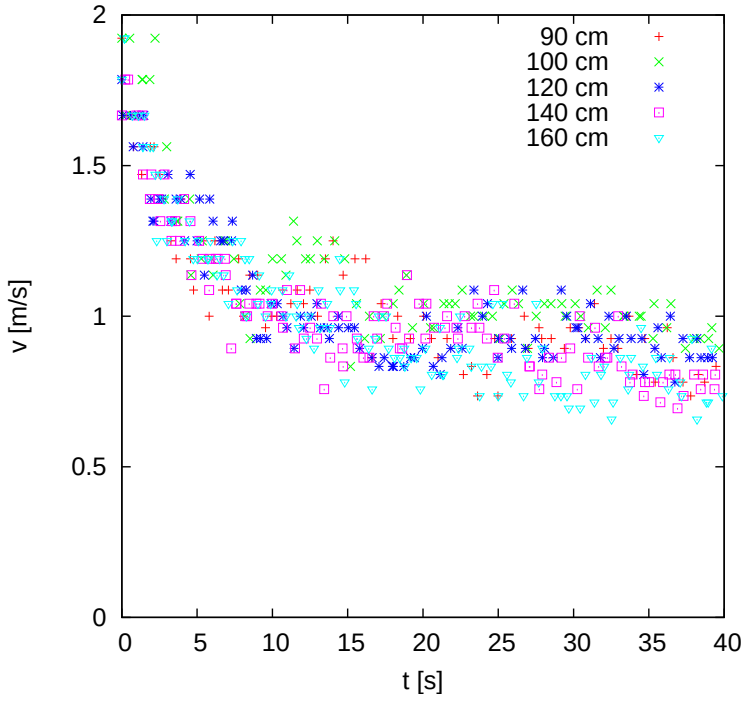

Abbildung 6.2: *Geschwindigkeit über Zeit, alle Breiten, Ausschnitt*

Dieses Verhalten ist darauf zurückzuführen, dass es zu Beginn der Versuche noch möglich ist, die Engstelle in der freien Gehgeschwindigkeit zu durchqueren, bevor es im weiteren Verlauf zu Behinderungen der Probanden untereinander kommt.

Um zu überprüfen, ob dieses Verhalten auch auf den zeitlichen Verlauf der Dichte übertragbar ist, wurden dafür ebenfalls die ersten 40 Sekunden der geglätteten Graphen ausgeschnitten (Abbildung 6.4). Auch hier ist ein Einschwingen feststellbar, hier jedoch

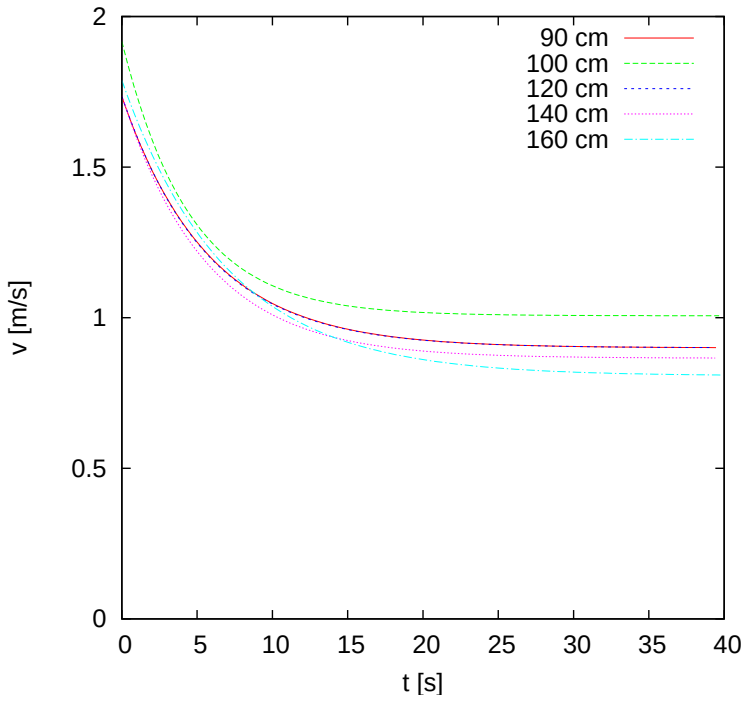

Abbildung 6.3: *Geschwindigkeit über Zeit, alle Breiten, gefitteter Ausschnitt*

von einem geringeren Startwert auf einen etwas höheren stationären Bereich, der sich etwa ab Sekunde 15 einstellt.

Dieses Muster ist ebenfalls auf den gleichen Grund zurückzuführen wie bei der Geschwindigkeit: Zu Beginn befinden sich nur wenige Versuchsteilnehmer in der Engstelle. Sobald es zu Behinderungen kommt, verlangsamt sich die Gehgeschwindigkeit und die Dichte erhöht sich.

6.2 Einfluss der Breite

In den folgenden Abschnitten wird untersucht, ob ein Einfluss der Breite auf die charakteristischen Daten der Personenströme festgestellt werden kann. Dazu werden die ermittelten Daten der verschiedenen Engstellenbreiten miteinander verglichen. Anhand

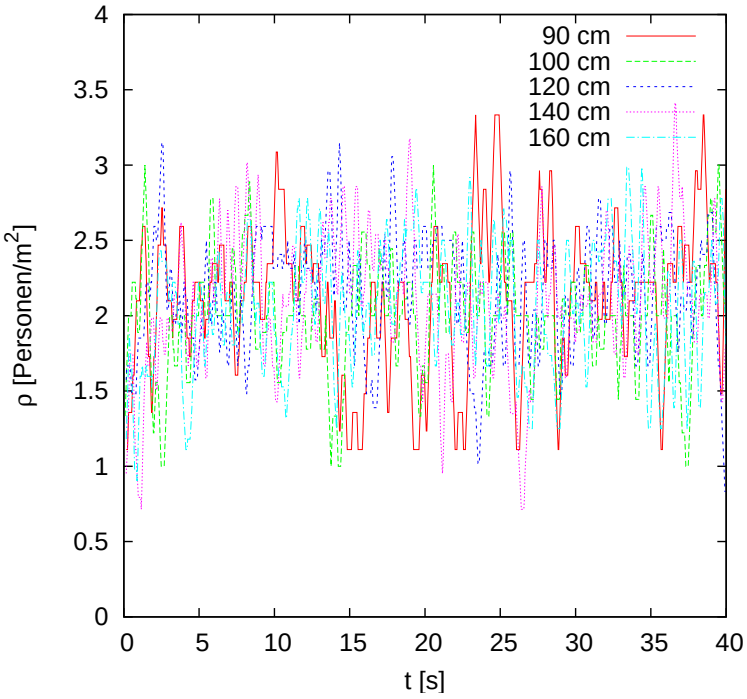

Abbildung 6.4: *Dichte über Zeit, alle Breiten, Ausschnitt, geglättet*

der Standardabweichung wird untersucht, ob sich eine signifikante Entwicklung feststellen lässt. Die Standardabweichung wurde über folgende Formel ermittelt:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})} \tag{6.1}$$

mit den Einzelwerten x_i, dem Mittelwert $\overline{x}$ und der Anzahl der Breiten n.

Bei eine großen Standardabweichung liegt auch eine große Streuung der Einzelergebnisse um den Mittelwert vor. Bei den folgenden Ergebnissen handelt es sich jeweils um Ausschnitte aus den Gesamtdaten. Bei jedem Experiment blieben 20 Sekunden am Anfang und 20 Sekunden am Ende unberücksichtigt. Zum einen werden die Ergebnisse sonst von dem Einschwingvorgang beeinflusst, zum anderen werden die Trödler am Ende der Versuche ausgeschlossen. Natürlich ist dabei zu beachten, das bei einem großen Fluss durch

Breite $[m]$	mittl. Geschw. $[m/s]$	Std.abw. $[m/s]$
0,90	0,84	0,09
1,00	0,91	0,12
1,20	0,91	0,10
1,40	0,82	0,10
1,60	0,77	0,11

Tabelle 6.1: *Mittlere Geschwindigkeit, Standardabweichung, Ausschnitt*

die Herausnahme von 40 Sekunden eine beachtliche Datenmenge verloren geht. So ist bei Betrachtung dieser Ergebnisse nicht mehr von einer Datenbasis von 180 Probanden auszugehen.

6.2.1 Geschwindigkeit

Die mittlere personenbezogene Geschwindigkeit wurde nach Berechnung der Standardabweichung in Tabelle 6.1 für alle untersuchten Breiten gesammelt. Anhand dieser Daten lässt sich bereits erkennen, dass es sich nicht um eine lineare Entwicklung der Geschwindigkeit mit der Breite handelt. Nach dem Auftragen der Daten in ein Diagramm (Abbildung 6.5) wird deutlich, dass die Geschwindigkeit ein Maximum bei Breiten zwischen 1,00 m und 1,20 m aufweist. Bei kleineren und größeren Breiten wurden geringere Mittelwerte der Geschwindigkeit ermittelt.

Weiterhin ist zum Vergleich die mittlere Gehgeschwindigkeit nach Weidmann (1,34 m/s) [19] eingezeichnet. Die in diesem Versuch gemessenen Geschwindigkeiten lagen im Durchschnitt also um einiges unter dem Wert von Weidmann. Dies lässt sich zurückführen auf die hohe Anfangsdichte, welche dazu führte, dass sich die Probanden relativ schnell stauten und es ihnen nicht möglich war, sich mit der freien Gehgeschwindigkeit zu bewegen.

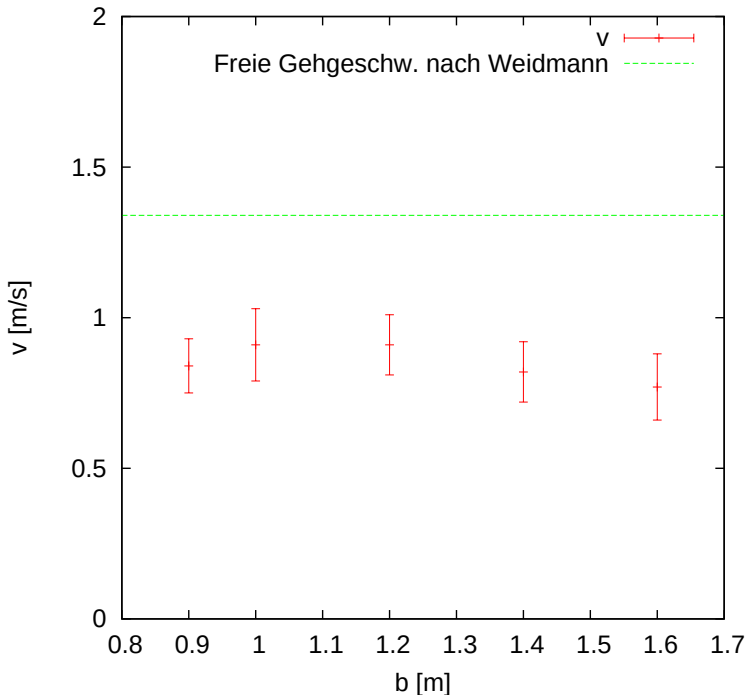

Abbildung 6.5: *Mittlere Geschwindigkeit über alle Breiten, Ausschnitt*

6.2.2 Dichte

In Tabelle 6.2 sind Mittelwerte und Standardabweichungen der zeitbezogenen Dichte zusammengestellt. Die Mittelwerte schwanken in einem Bereich zwischen 2,10 $\frac{Personen}{m^2}$ und 2,23 $\frac{Personen}{m^2}$. Auch hier lässt sich kein linearer Zusammenhang zwischen Breite der Engstelle und Dichte erkennen. Dies bestätigt auch Abbildung 6.6. Wie dort zu sehen ist, variiert die Dichte im Bereich der Standardabweichung, so dass hier keine signifikanten Ergebnisse zu registrieren sind. Die Geschwindigkeit ist also unabhängig von der Engstellenbreite.

Breite $[m]$	mittl. Dichte $[1/m^2]$	Std.abw. $[1/m^2]$
0,90	2,19	0,37
1,00	2,10	0,29
1,20	2,17	0,28
1,40	2,23	0,33
1,60	2,20	0,22

Tabelle 6.2: *Mittlere Dichte, Standardabweichung, Ausschnitt*

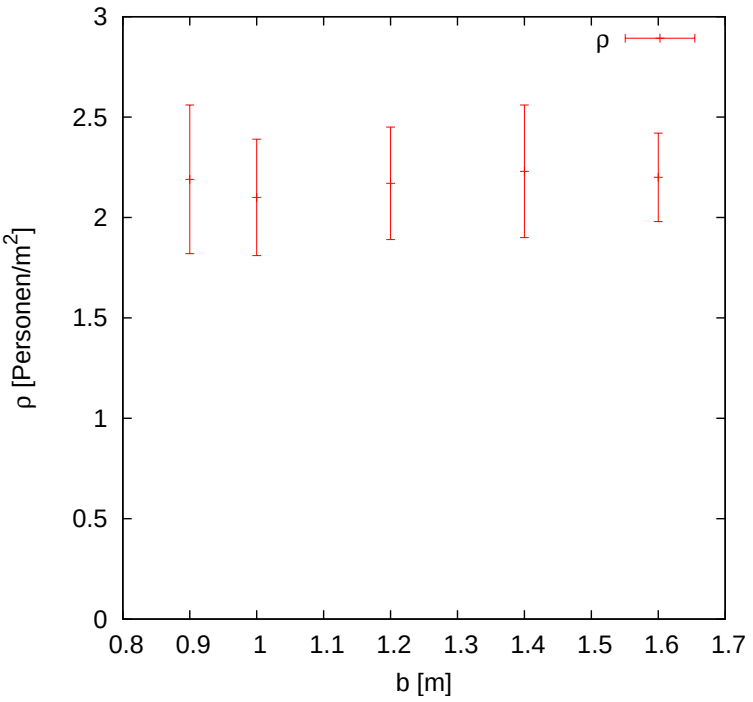

Abbildung 6.6: *Mittlere Dichte über alle Breiten, Standardabweichung, Ausschnitt*

Breite $[m]$	mittl. Fluss $[1/s]$	Std.abw. $[1/s]$
0,90	1,65	0,30
1,00	1,91	0,31
1,20	2,37	0,33
1,40	2,61	0,30
1,60	2,81	0,47

Tabelle 6.3: *Mittlerer Fluss, Standardabweichung, Ausschnitt*

6.2.3 Fluss

Bei der Auswertung des Personenflusses (Tabelle 6.3, Abbildung 6.7) zeigt sich zunächst das zu erwartende Ergebnis: Ein Anstieg des Flusses mit steigender Breite. Nach Auswertung der Grafik zeigt sich, dass es sich jedoch nicht um eine lineare Entwicklung handelt. Der Fluss steigt im Bereich der großen Breiten nicht mehr so stark an wie bei den kleineren Breiten. Eine lineare Regressionsgerade durch die ersten drei Punkte würde jedoch auch noch im Bereich der Fehlerbalken der anderen beiden Punkte liegen. Es kann also nicht mit Sicherheit bestimmt werden, ob sich der Fluss bei einem Wert einpendelt oder weiter mit wachsender Breite ansteigt.

6.2.4 Spezifischer Fluss

Die Mittelwerte des spezifischen Flusses liegen in einem relativ konstanten Bereich, wie es auch nach Auswertung des Flusses erwartet wurde. Es lassen sich keine eindeutigen Tendenzen erkennen. Das bedeutet, dass sich, zumindest in dieser Arbeit, kein Einfluss der Breite auf den spezifischen Fluss zeigt.

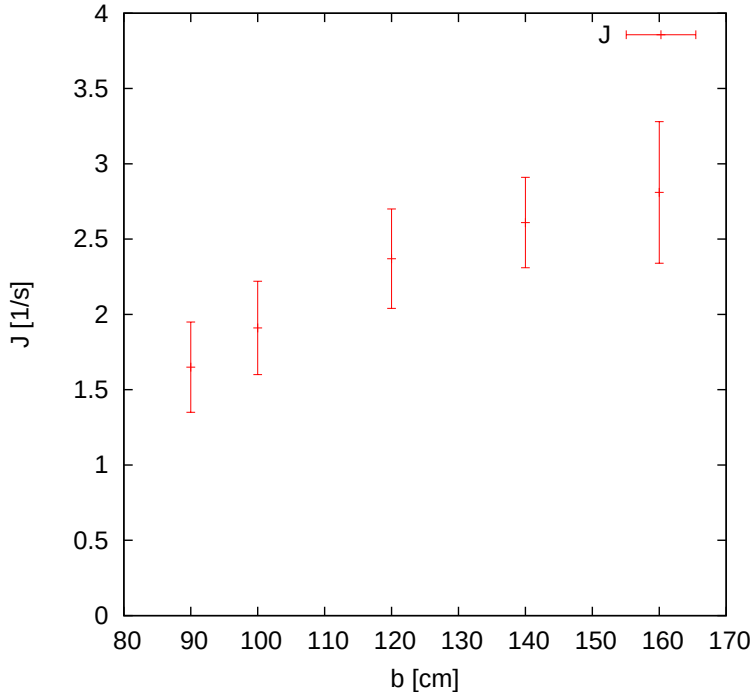

Abbildung 6.7: *Mittlerer Fluss über alle Breiten, Standardabweichung, Ausschnitt*

Breite $[m]$	mittl. spez. Fluss $[1/m * s]$	Std.abw. $[1/m * s]$
0,90	1,83	0,33
1,00	1,91	0,31
1,20	1,98	0,28
1,40	1,86	0,22
1,60	1,76	0,30

Tabelle 6.4: *Mittlerer spezifischer Fluss, Standardabweichung, Ausschnitt*

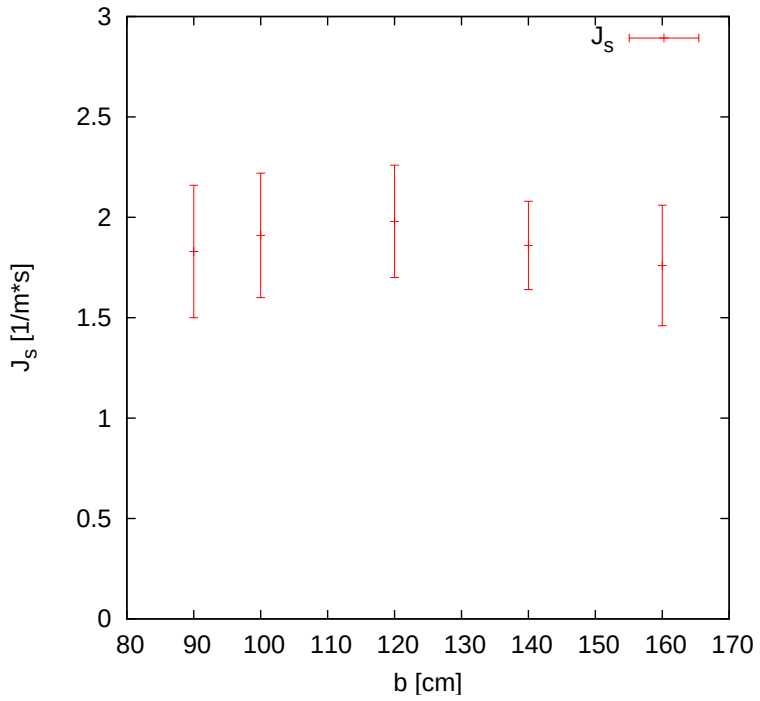

Abbildung 6.8: *Mittlerer spez. Fluss über alle Breiten, Standardabweichung, Ausschnitt*

6.3 Vergleich mit Forschungsberichten und baurechtlichen Grundlagen

Nach der Auswertung des Personenflusses für das in dieser Arbeit untersuchte Experiment lässt sich feststellen, dass sich der Personenfluss mit zunehmender Engstellenbreite erhöht. Dieser Anstieg ist nahezu linear. Dies stimmt überein mit den Ergebnissen von Seyfried, Nagai und Müller. Auch Kretz sieht bei seinen Auswertungen einen Anstieg des Flusses mit steigender Breite. Im quantitativen Vergleich zeigt sich, dass der gemessene Personenfluss dieser Arbeit etwas niedriger liegt als der von Seyfried. Die Ergebnisse von Kretz liegen bis zu einer Breite von 1,20 m im Bereich dieser Arbeit. Der ermittelte Fluss von Nagai liegt deutlich höher als der dieser Arbeit, dies lässt sich jedoch auf eine höhere Anfangsdichte zurückführen.

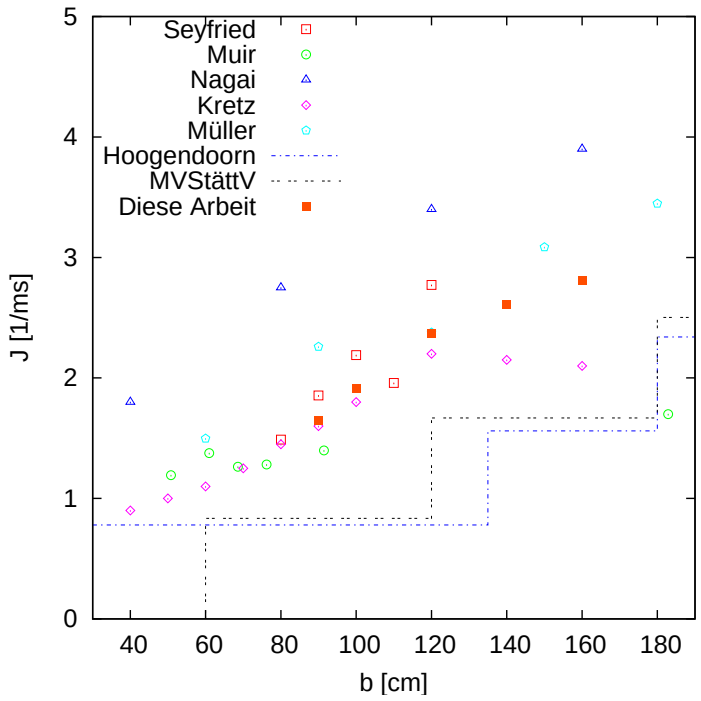

Abbildung 6.9: *Vergleich der Ergebnisse mit den Literaturdaten*

Zu einem anderen Resultat kommt Muir. Sie sieht einen Anstieg des Flusses nur bis zu einer Breite von 0,60 m. Die Vergleichbarkeit mit diesem Versuch ist auch nicht unbedingt gegeben, da die untersuchten Breiten bei Muir von 0,90 m direkt auf 1,80 m springen. Auch Hoogendoorn und Daamen sehen keinen linearen Anstieg des Flusses, sondern einen stufenweisen Anstieg mit der Breite, ähnlich den Vorschriften von Versammlungsstättenverodnung und Muster-Richtlinie über den Bau und Betrieb Fliegender Bauten. Hier wird ein größerer Fluss erst erwartet, sobald zwei Personen nebeneinander laufen können. Anzeichen dafür können in dieser Arbeit nicht gefunden werden, da die Entwicklung des Reißverschlusseffektes bei allen untersuchten Breiten beobachtet werden konnte.

Einige Anmerkungen müssen zur generellen Vergleichbarkeit dieses Experimentes mit anderen Forschungsarbeiten gemacht werden: Bei den Probanden handelte es sich nur um eine einzige Personengruppe, nämlich Soldaten. Es wird angenommen, dass diese

in vergleichsweise guter körperlicher Verfassung sind und auch das Gehen in Gruppen gewöhnt sind. Weiterhin sind bei den angesprochenen Forschungsberichten teilweise andere Versuchsanordnungen genutzt worden, welche zu abweichenden Ergebnissen führen könnten. Nur wenn die Versuchsaufbauten komplett übereinstimmen, ist die maximale Vergleichbarkeit gegeben. Zur Vergleichbarkeit bezüglich der Auswertung kann an dieser Stelle keine Aussage getroffen werden, da nicht für alle erwähnten Forschungsberichte deren verwendete Auswertemethode bekannt ist. Es ist jedoch anzumerken, dass eine Handzählung, wie in dieser Arbeit, andere Ergebnisse liefern kann als eine automatische Erfassung der Trajektorien mit anschließender Auswertung. Die Problematik einer Handauswertung liegt beispielsweise darin, dass die Überschreitung einer Messlinie durch eine Person je nach Auswerter von unterschiedlichen Kriterien abhängt. Somit findet bei einer Handauswertung immer eine subjektive Bewertung der auswertenden Person statt. Eine weitere Einschränkung der Vergleichbarkeit liegt darin, dass die Ergebnisse dieser Arbeit nur den statischen Bereich der Versuche behandeln. Würden die Einschwingvorgänge bei den Mittelwerten berücksichtigt, lägen diese dementsprechend höher.

7 Fazit

Die Aufgabe dieser Bachelor-Thesis ist es, in einem Laufversuch gewonnene empirische Daten auszuwerten und auf den Einfluss der Engstellenbreite hin zu untersuchen. Die vorgestellten Forschungsarbeiten zeigten dahingehend keine einheitliche Aussage. So vertritt beispielsweise Hoogendoorn das Modell einer Stufenfunktion. Dies entspricht auch der Mehrheit der aufgezeigten Bauvorschriften. Andere Autoren hingegen sehen einen linearen Anstieg des Personenflusses mit der Engstellenbreite. Auch die Ergebnisse diese Arbeit zeigen einen qualitativen Einfluss der Breite der Engstelle auf charakteristische Daten. Vor allem Personenfluss und Dichte stiegen kontinuierlich an. Die Geschwindigkeit war jedoch stationär über alle Breiten. Alle gewonnen Daten widersprechen einem Stufenmodell. Weiterhin konnte bei allen untersuchten Breiten die Ausbildung eines Reißverschlusseffektes beobachtet werden. Ebenfalls charakteristisch für dieses Experiment war der Einschwingvorgang bei Geschwindigkeit und Dichte.

Mit einer Datengrundlage von 180 Personen erscheint dieser Versuch recht umfangreich. Es ist jedoch nicht zu vernachlässigen, dass bei der Analyse jeweils 20 Sekunden am Anfang und am Ende der Versuchszeitreihe verworfen wurden. Hierdurch blieben der Einschwingvorgang zu Beginn und das Trödeln am Ende unberücksichtigt. Weiterhin sollte ein Versuch möglichst viele Personengruppen berücksichtigen, also ein größeres Spektrum an Alter und Mobilität bzw. körperlicher Fitness bieten. Auf Grund dieses einseitigen Personenpools sollten die gewonnenen Daten nicht für die Bemessung von Rettungswegen verwendet werden.

Das Ziel dieser Thesis konnte mit der Methodik einer Handauswertung erreicht werden. Genauere Ergebnisse lassen sich jedoch nur mit einer automatischen Auswertung der Trajektorien erreichen. Diese Analysemethode würde ausserdem völlig andere Versuchsdimensionen zulassen. Zur Zeit können Auswertungen nur an Orten stattfindet, die eine ausreichende Deckenhöhe aufweisen, da die Kameras in einer hohen Position befestigt werden müssen, um die Verzerrung so gering wie möglich zu halten. Mit fortschreitender Entwicklung der Kameratechnik wird diese Mindesthöhe jedoch sinken. Damit werden Analysen von realen Personenströmen, beispielsweise in Kaufhäusern oder anderen personenfrequentierten Gebäuden, immer einfacher durchführbar sein.

A Danksagung

Zum Schluss möchte ich all diejenigen erwähnen, die mit ihrer Unterstützung an dieser Arbeit beteiligt waren:

Professor Dr. Wolfram Klingsch stellte mir nicht nur den Themenvorschlag zur Verfügung, sondern auch einen Arbeitsplatz an seinem Lehrstuhl. In einem angenehmen Arbeitsumfeld erhielt ich von allen Mitarbeitern Unterstützung bei meiner Arbeit.

Neben denen, die an der Organisation und Durchführung des Experimentes beteiligt waren, möchte ich mich vor allem bei den Soldaten für ihre Zeit und Geduld bedanken. Maik Boltes wies mich in die Auswertung der Versuche ein.

Einen ganz besonderen Dank möchte ich an meine Betreuer, Dr. Armin Seyfried und Tobias Rupprecht richten. Neben einer umfangreichen Einarbeitung in das Thema, erhielt ich von ihnen wichtige Ideen und Ratschläge für die Realisierung dieser Bachelor-Thesis. Auch Andreas Winkens stand immer für hilfreiche Diskussionen zur Verfügung, genauso wie Christian Böhlefeld. Meine Lebensgefährtin Anne Heller las die Arbeit Korrektur und brachte während der Bearbeitungszeit viel Geduld und Verständnis auf.

Allen oben genannten und denjenigen, die hier nicht aufgeführt sind, möchte ich ein Herzliches Dankeschön aussprechen!

B Diagramme

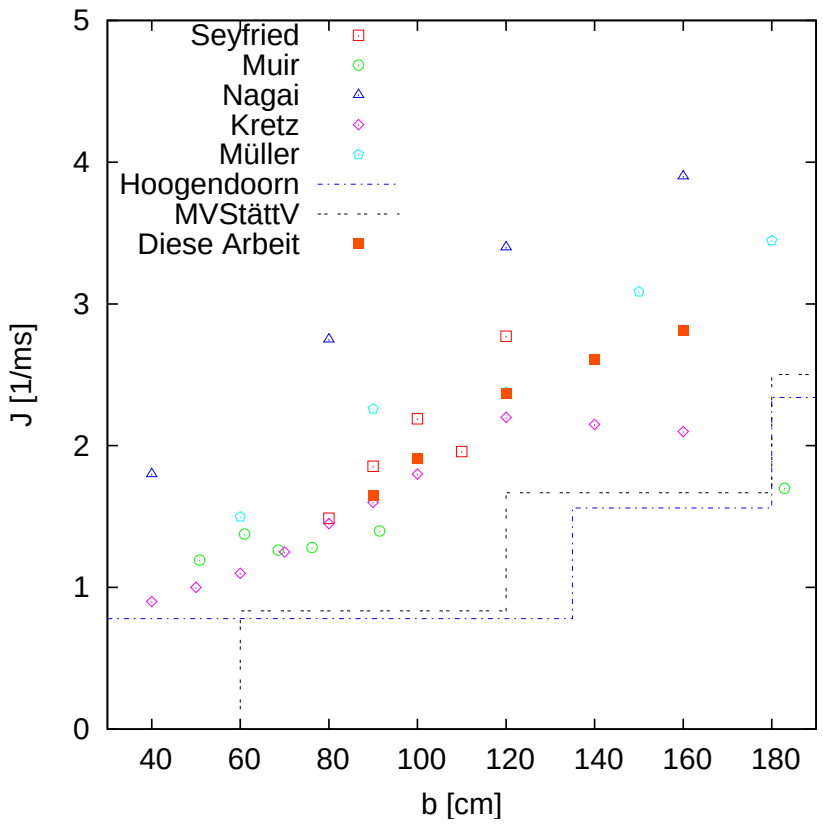

Abbildung B.1: *Vergleich der Ergebnisse mit den Literaturdaten*

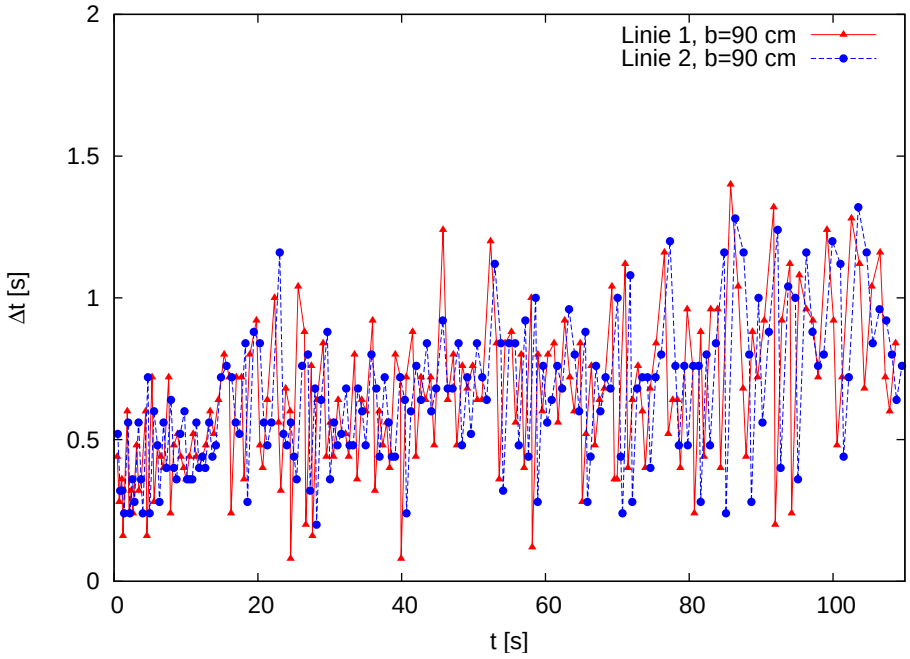

Abbildung B.2: *„time gaps“, b=0,90 m*

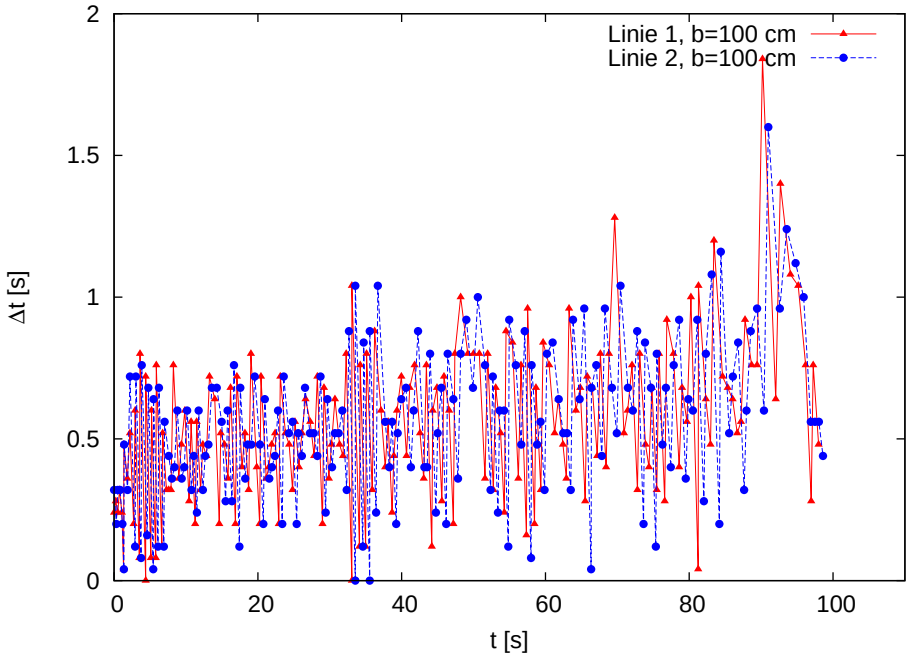

Abbildung B.3: *„time gaps“, b=1,00 m*

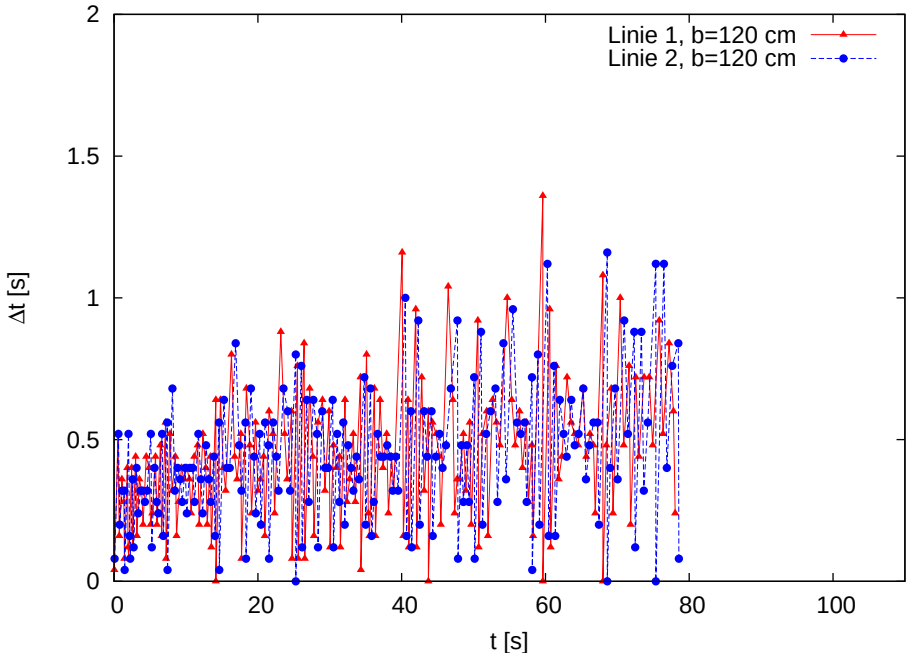

Abbildung B.4: *„time gaps“, b=1,20 m*

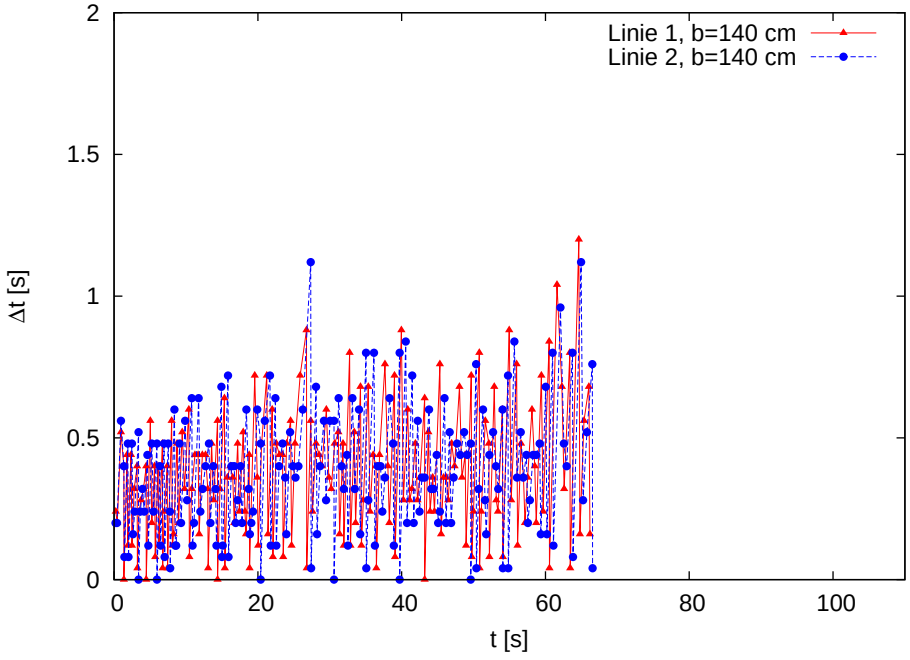

Abbildung B.5: *„time gaps“, b=1,40 m*

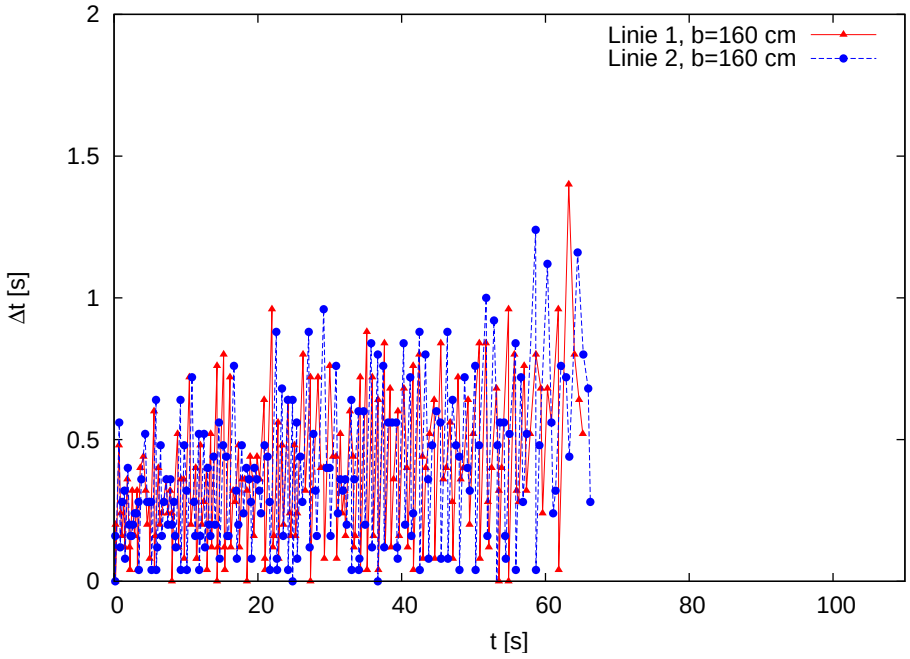

Abbildung B.6: *„time gaps“, b=1,60 m*

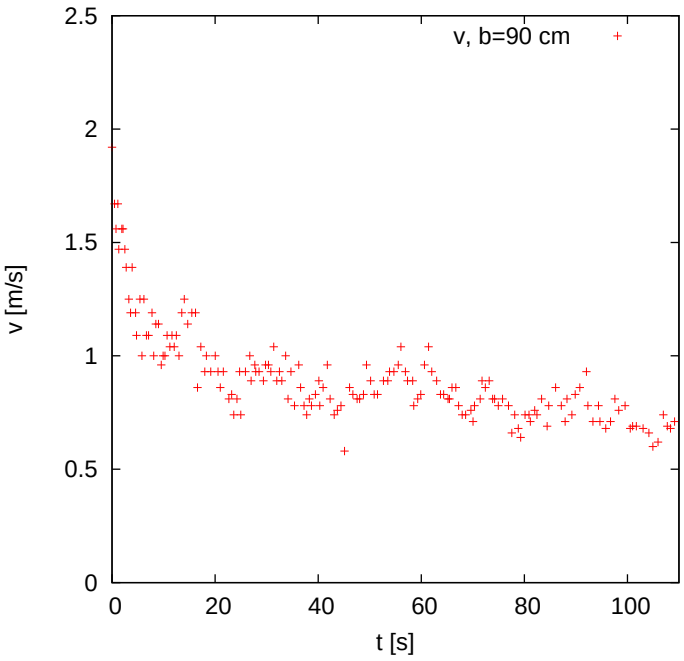

Abbildung B.7: *Geschwindigkeit, b=0,90 m*

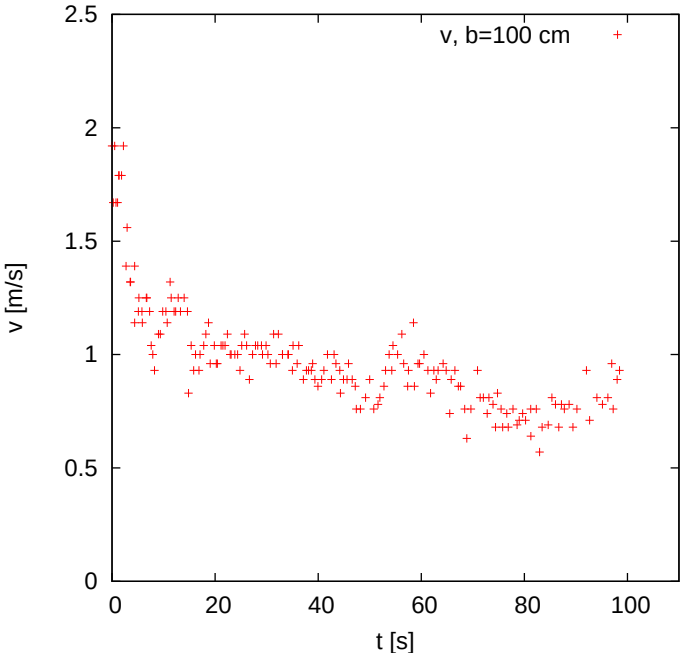

Abbildung B.8: *Geschwindigkeit, b=1,00 m*

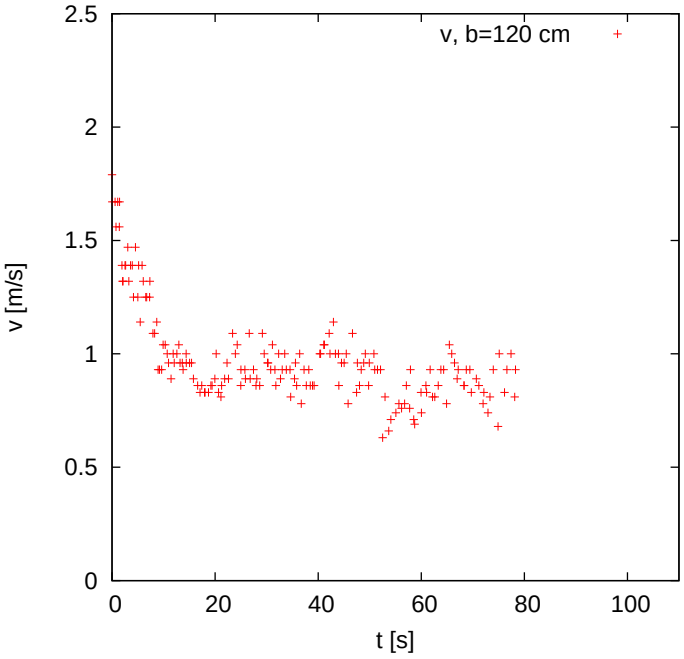

Abbildung B.9: *Geschwindigkeit, b=1,20 m*

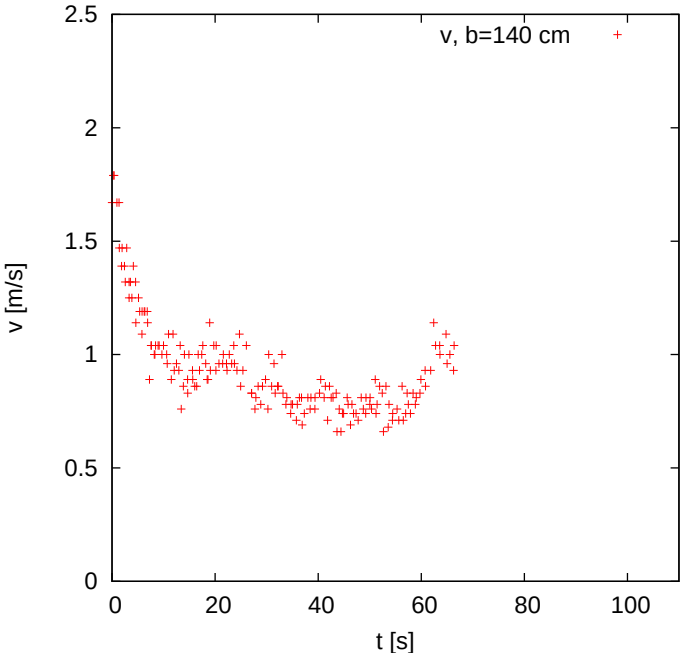

Abbildung B.10: *Geschwindigkeit, b=1,40 m*

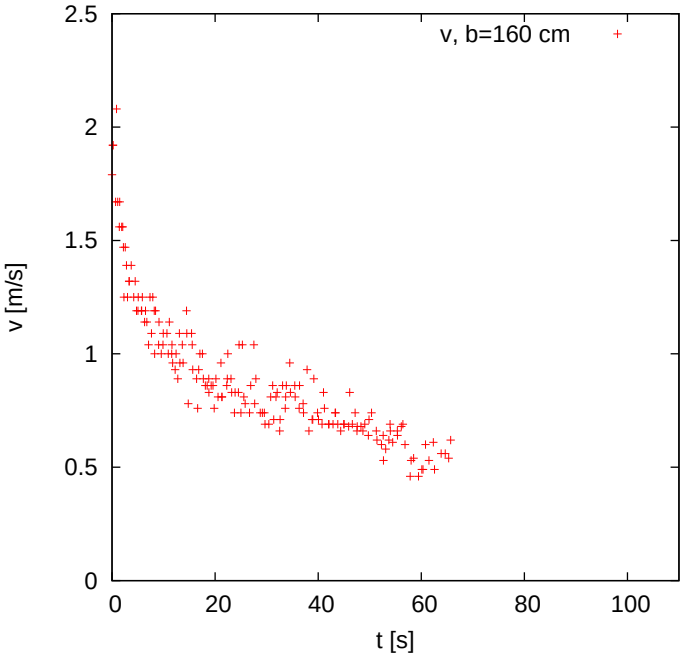

Abbildung B.11: *Geschwindigkeit, b=1,60 m*

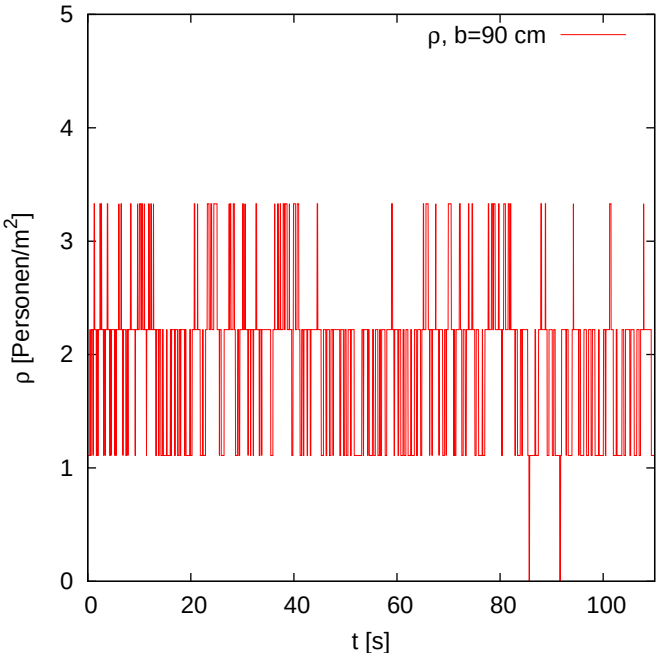

Abbildung B.12: *Dichte über Zeit, b=0,90 m*

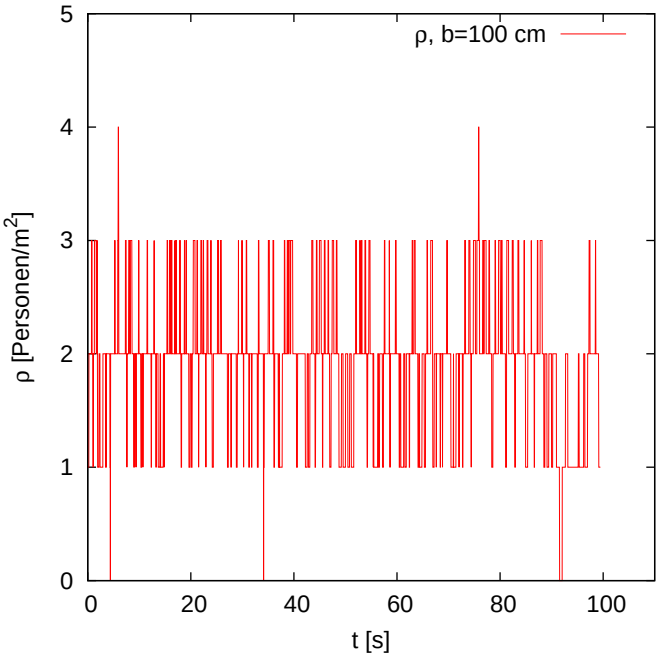

Abbildung B.13: *Dichte über Zeit, b=1,00 m*

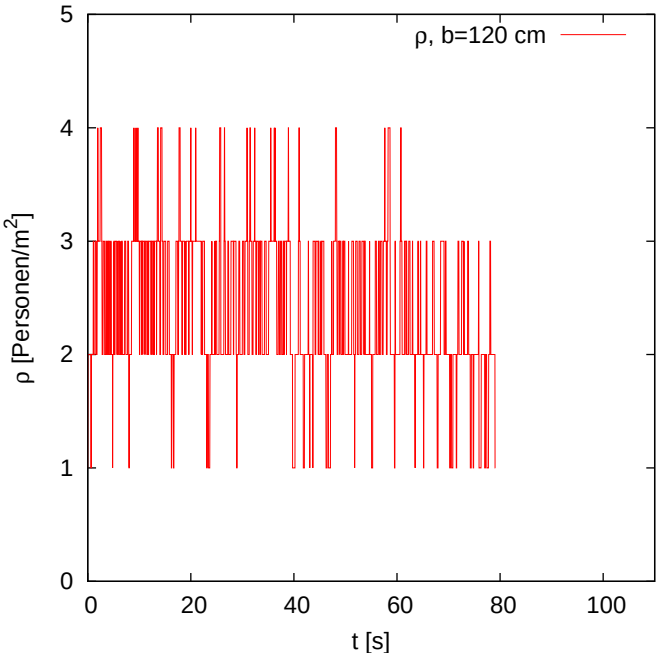

Abbildung B.14: *Dichte über Zeit, b=1,20 m*

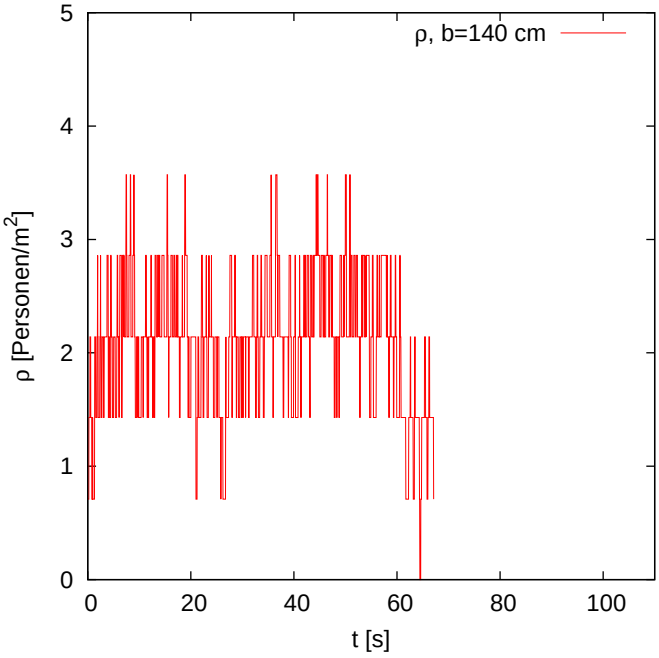

Abbildung B.15: *Dichte über Zeit, b=1,40 m*

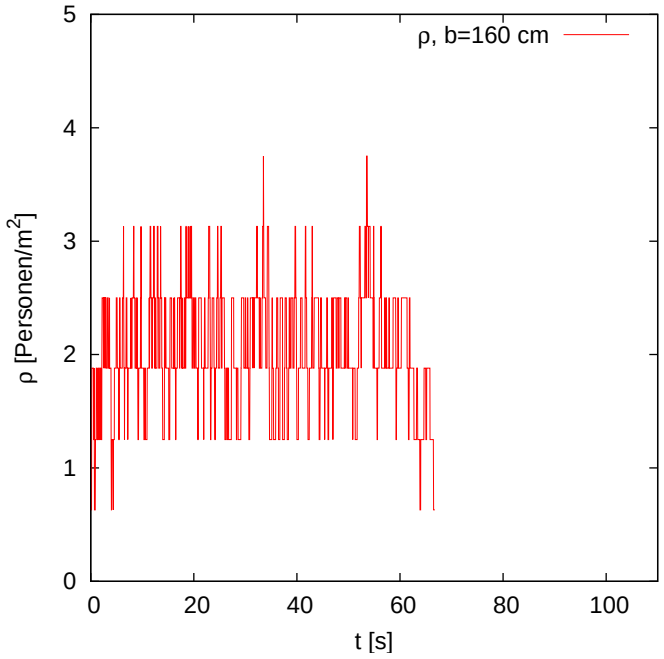

Abbildung B.16: *Dichte über Zeit, b=1,60 m*

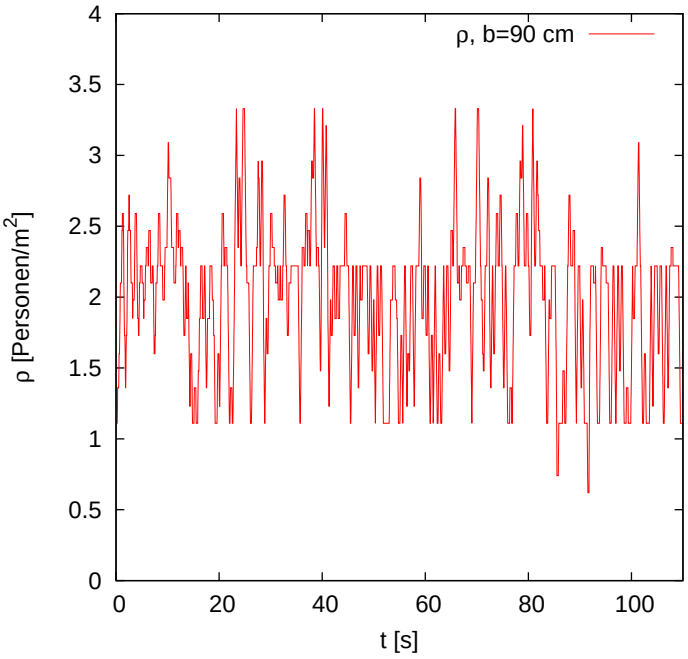

Abbildung B.17: *Dichte geglättet über Zeit, b=0,90 m*

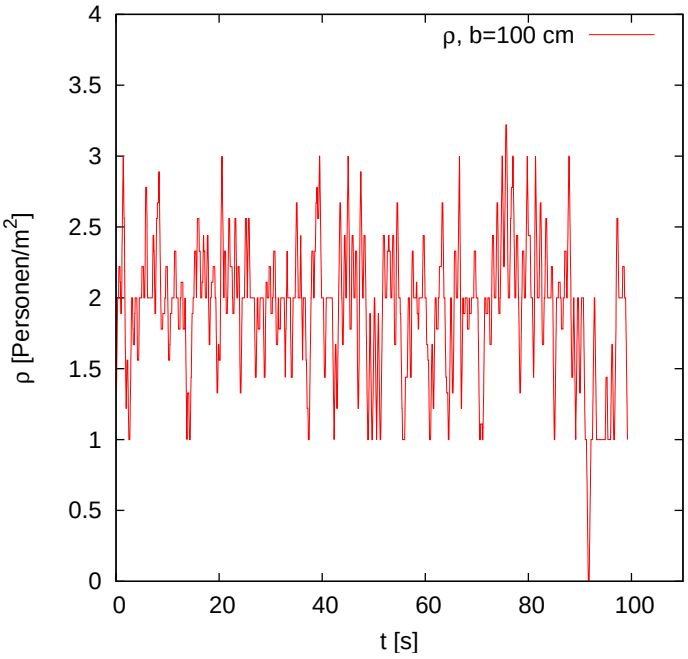

Abbildung B.18: *Dichte geglättet über Zeit, b=1,00 m*

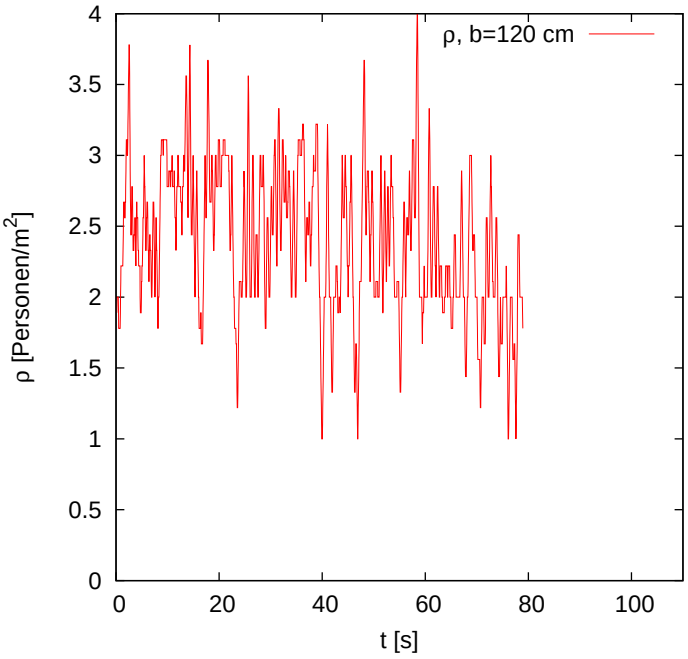

Abbildung B.19: *Dichte geglättet über Zeit, b=1,20 m*

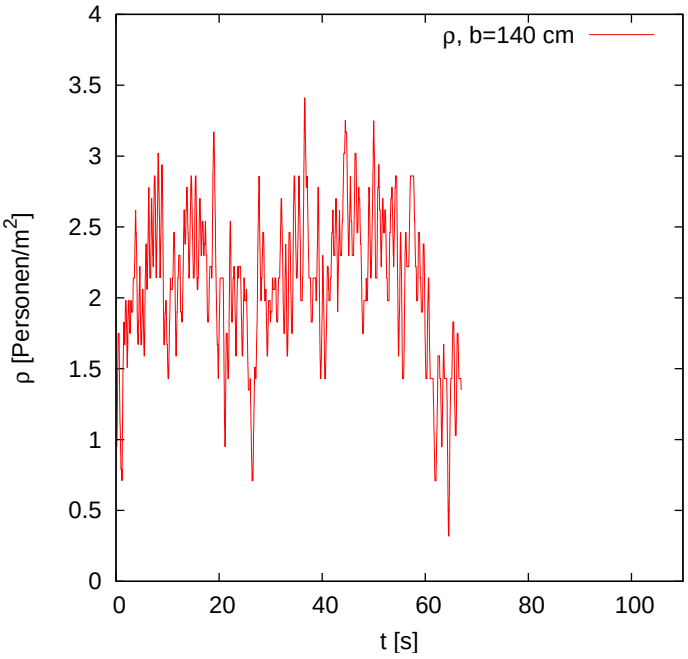

Abbildung B.20: *Dichte geglättet über Zeit, b=1,40 m*

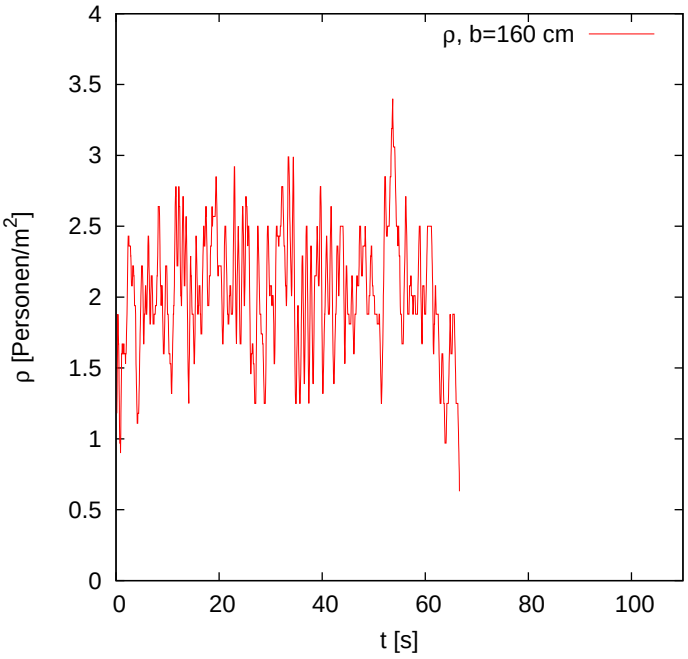

Abbildung B.21: *Dichte geglättet über Zeit, b=1,60 m*

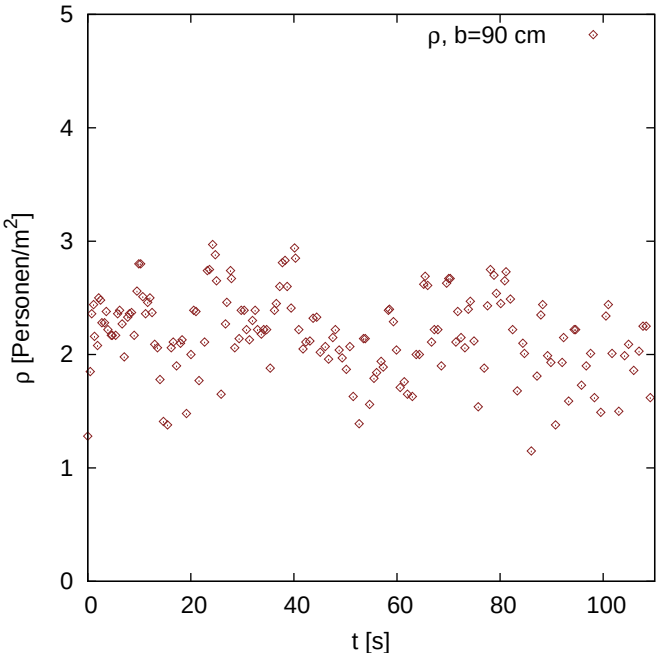

Abbildung B.22: *Personenbezogene Dichte über Zeit, b=0,90 m*

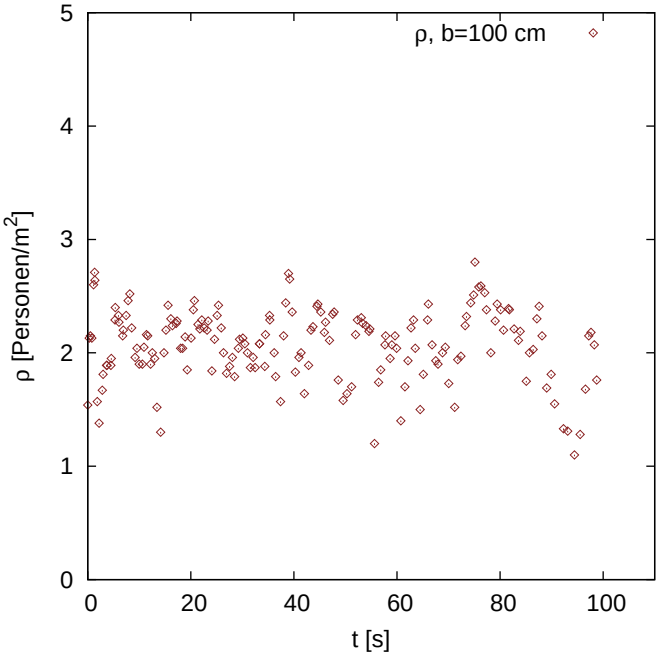

Abbildung B.23: *Personenbezogene Dichte über Zeit, b=1,00 m*

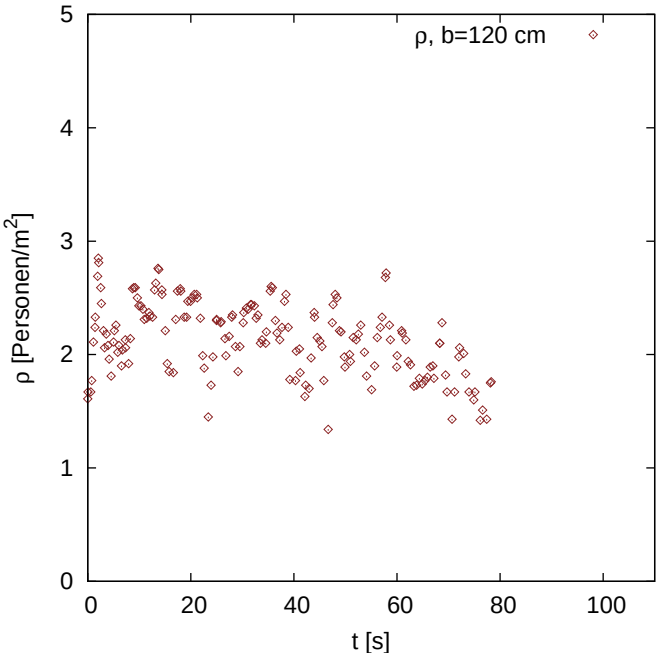

Abbildung B.24: *Personenbezogene Dichte über Zeit, b=1,20 m*

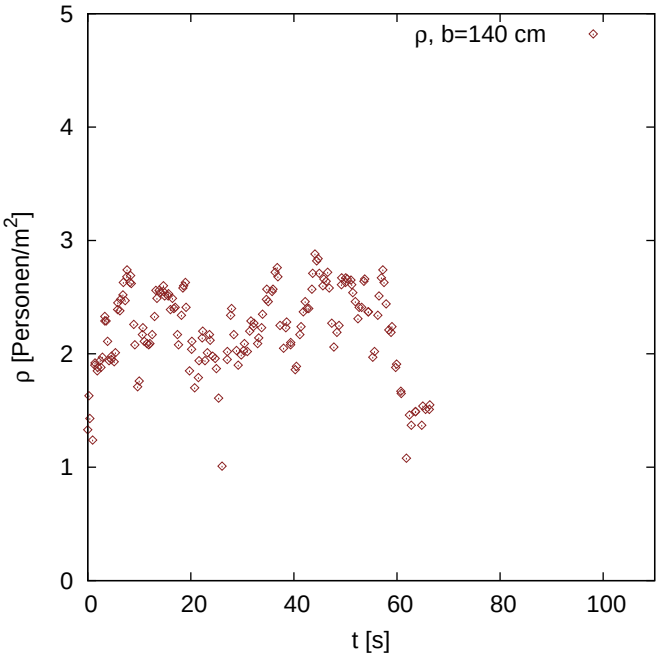

Abbildung B.25: *Personenbezogene Dichte über Zeit, b=1,40 m*

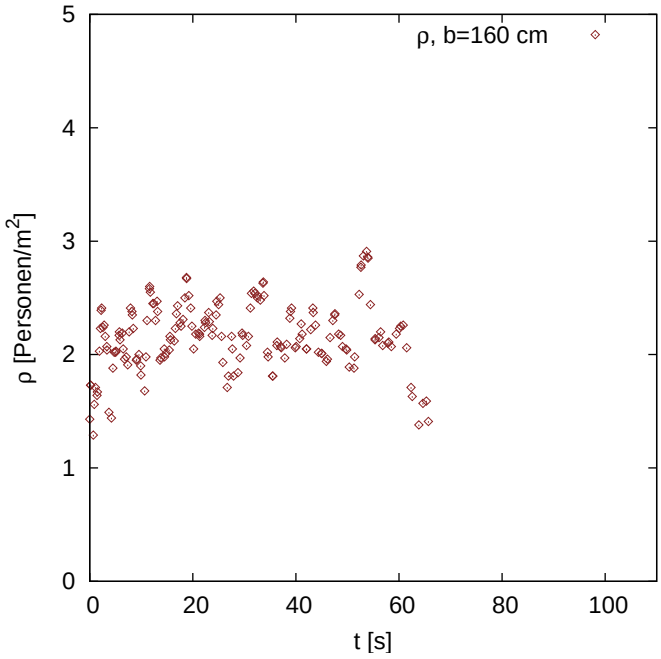

Abbildung B.26: *Personenbezogene Dichte über Zeit, b=1,60 m*

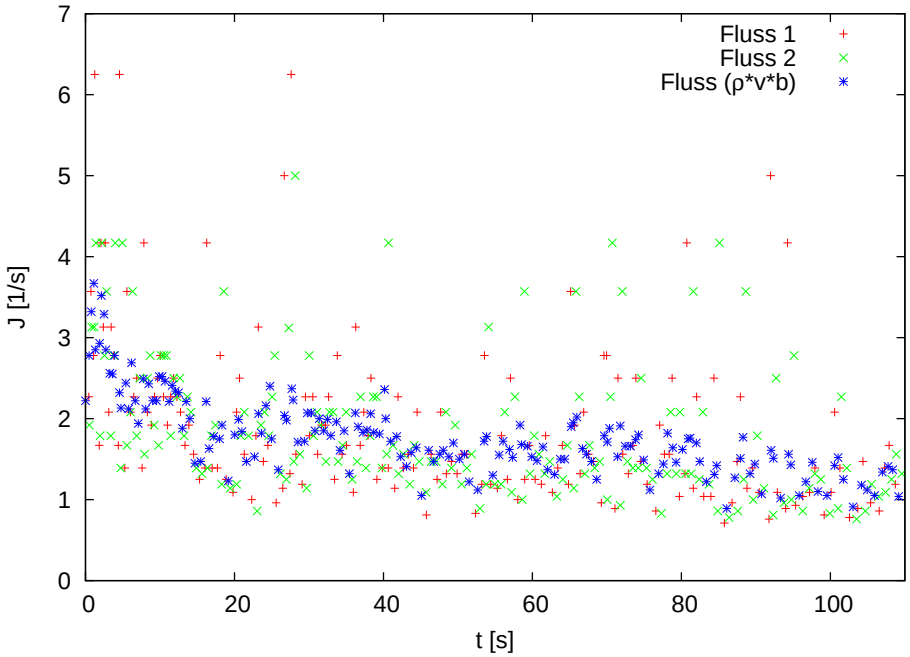

Abbildung B.27: *Fluss über Zeit, b=0,90 m*

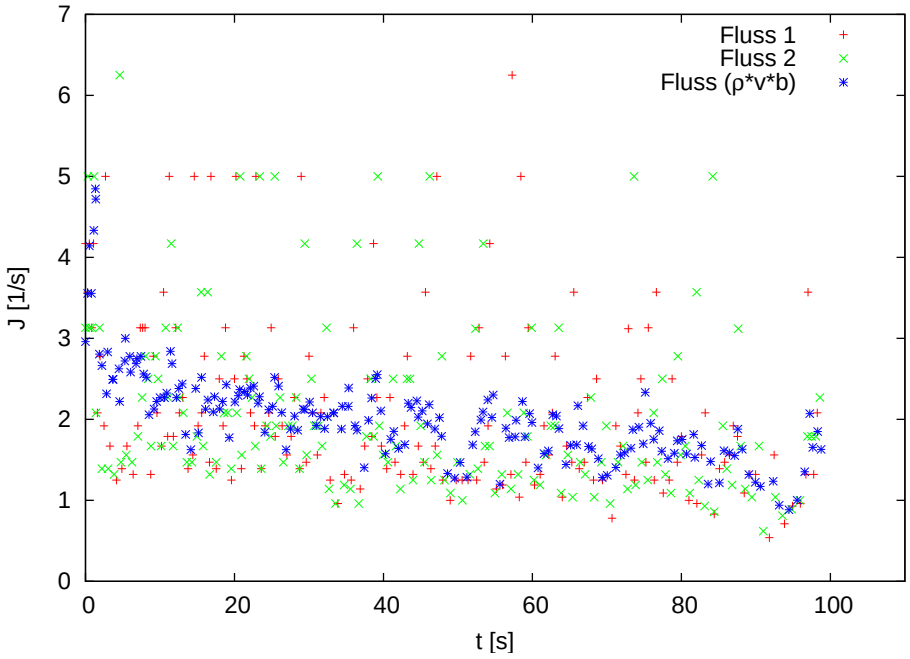

Abbildung B.28: *Fluss über Zeit, b=1,00 m*

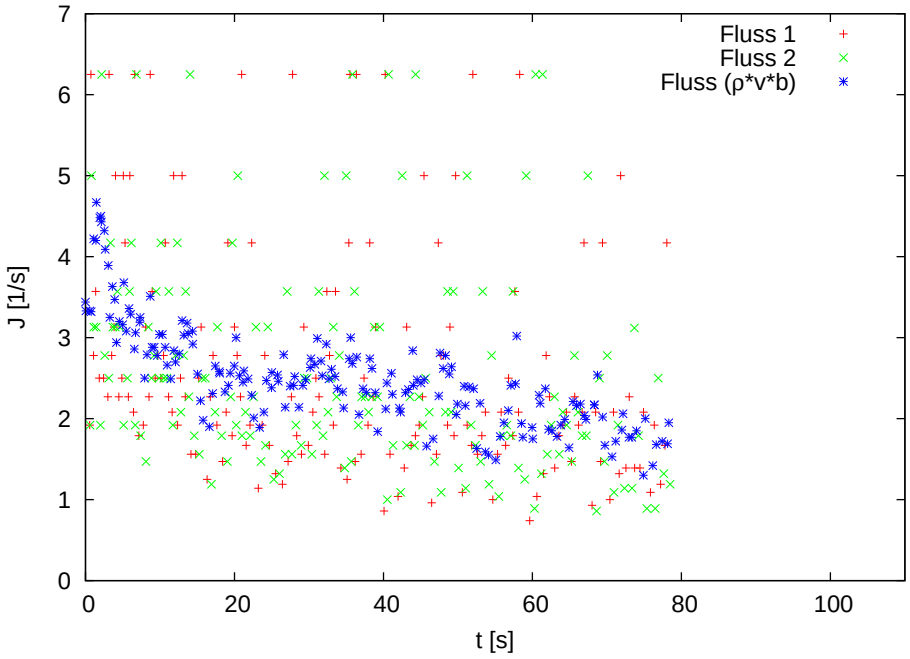

Abbildung B.29: *Fluss über Zeit, b=1,20 m*

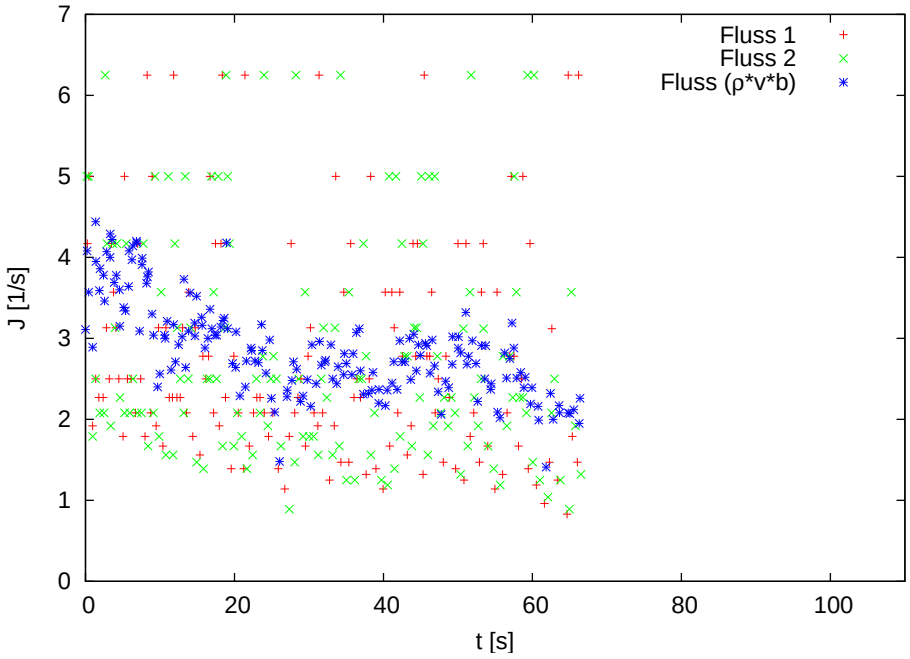

Abbildung B.30: *Fluss über Zeit, b=1,40 m*

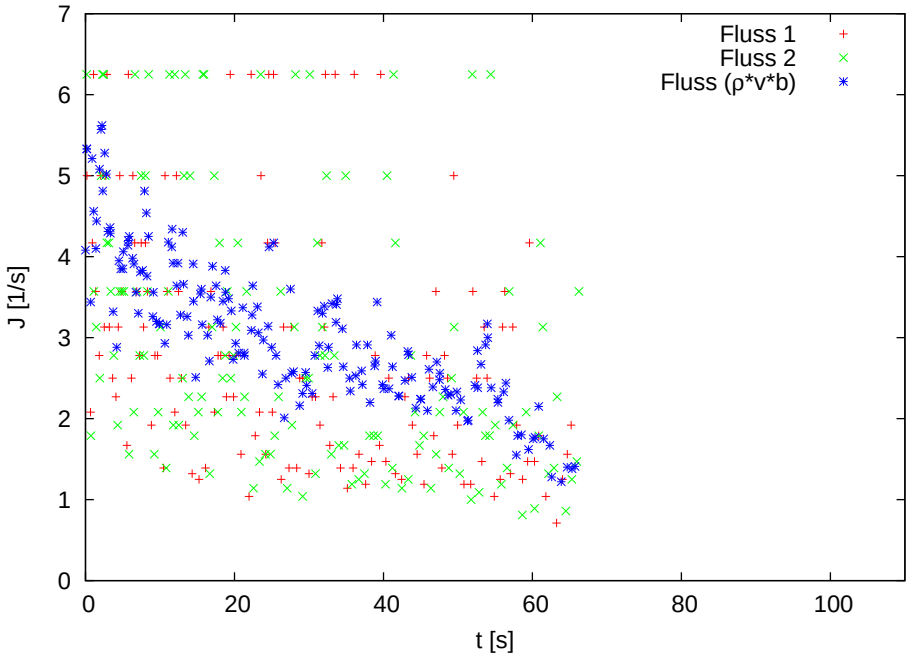

Abbildung B.31: *Fluss über Zeit, b=1,60 m*

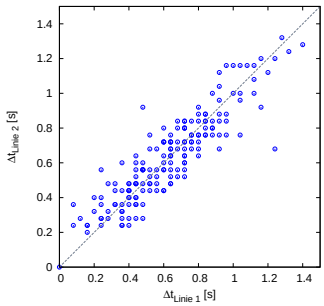

Abbildung B.32: *Vergleich der „time gaps“, b=0,90 m*

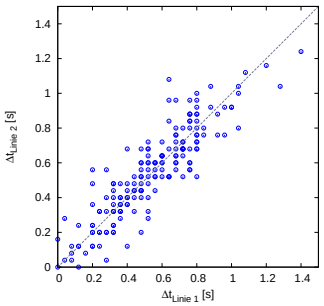

Abbildung B.33: *Vergleich der „time gaps“, b=1,00 m*

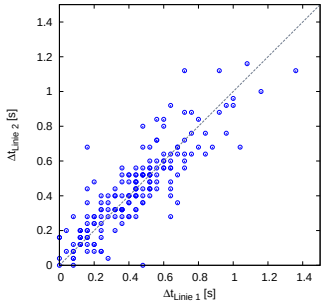

Abbildung B.34: *Vergleich der „time gaps“, b=1,20 m*

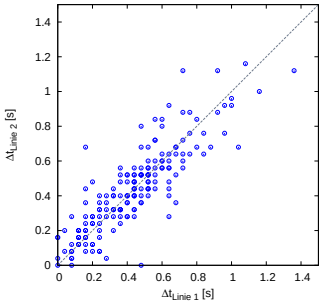

Abbildung B.35: *Vergleich der „time gaps“, b=1,40 m*

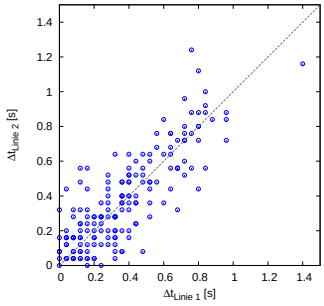

Abbildung B.36: *Vergleich der „time gaps“, b=1,60 m*

Literaturverzeichnis

[1] Boltes, Maik: *Automatische Gewinnung von Trajektorien aus Überkopfaufnahmen.* Präsentation Forschungszentrum Jülich, Zentralinstitut für Angewandte Mathematik.

[2] Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin: *Normentwurf DIN EN 13200-1*, Juni 1998. Deutsche Fassung.

[3] Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin: *Norm DIN EN 13200-1*, Mai 2004. Deutsche Fassung.

[4] Hoogendoorn, Serge P. und W. Daamen: *Pedestrian Behavior at Bottlenecks.* Transportation Science, 2004.

[5] Konferenz der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren der Länder (ARGEBAU): *Begründung und Erläuterung zur Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten.* http://www.is-argebau.de. Fassung 2005.

[6] Konferenz der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren der Länder (ARGEBAU): *Muster-Richtlinie über den Bau und Betrieb fliegender Bauten - M-FlBauR.* http://www.is-argebau.de. Fassung Mai 2007.

[7] Konferenz der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren der Länder (ARGEBAU): *Muster-Schulbau-Richtlinie - MSchulbauR.* http://www.is-argebau.de. Fassung Juli 1998.

[8] Konferenz der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren der Länder (ARGEBAU): *Muster-Verkaufsstättenverordnung - MVkVO.* http://www.is-argebau.de. Fassung September 1995.

[9] Konferenz der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren der Länder (ARGEBAU): *Muster-Versammlungsstättenverordnung - MVStättV.* http://www.is-argebau.de. Fassung Juni 2005.

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

[11] Kretz, Tobias, Anna Grünebohm und Michael Schreckenberg: *Experimental study of pedestrian flow through a bottleneck.* Journal of statistical Mechanics, 2006.

[12] Müller, Klaus: *Zur Gestaltung und Bemessung von Fluchtwegen für die Evakuierung von Personen aus Bauwerken auf der Grundlage von Modellversuchen.* Doktorarbeit, Technische Hochschule Otto von Guericke Magdeburg, 1981.

[13] Muir, Helen C., David M. Bottomley und Claire Marrison: *Effects of Motivation and Cabin Configuration on Emergency Aircraft Evacuation Behavior and Rates of Egress.* The International Journal of Aviation Psychology, 2006.

[14] Nagai, Ryoichi, Masahiro Fukamachi und Takashi Nagatini: *Evacuation of crawlers and walkers from corridor through an exit.* Physica A, 2005.

[15] Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig und Berlin: *Einheiten in Deutschland.* http://www.ptb.de, Oktober 2006.

[16] Predtetschenski, Wselelod und Anatolie Milinski: *Personenströme in Gebäuden.* Verlagsgesellschaft Rudolf Müller Köln-Braunsfeld, 1971.

[17] Rupprecht, Tobias: *Untersuchung zur Erfassung der Basisdaten von Personenströmen.* Diplomarbeit, Bergische Universität Wuppertal, FB D - Abt. Sicherheitstechnik, 2006.

[18] Sachsen-Anhalt, Land: *Richtlinie über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten- VStättR.* http://www.umwelt-online.de. Fassung Mai 2002.

[19] Seyfried, Armin: *Vorlesungsskript Evakuierung.* Bergische Universität Wuppertal, Fachbereich D, Master of Science Fire Safety Engineering, Wintersemester 2007/2008.

[20] Seyfried, Armin, Oliver Passon, Bernhard Steffen, Maik Boltes, Tobias Rupprecht und Wolfram Klingsch: *New insights into pedestrian flow through bottlenecks.* Transportation Science, 2007.

[21] Winkens, Andreas: *Analyse der lokalen Dichte in Fußgängerströmen vor Engstellen.* Diplomarbeit, Bergische Universität Wuppertal, FB D - Abt. Sicherheitstechnik, 2007.