Bergische Universität Wuppertal

Fachbereich D – Abteilung Sicherheitstechnik

Lehrstuhl für Baustofftechnologie und Brandschutz

Empirische Erfassung des Fundamentaldiagrammms für geringe Wegbreiten

Bachelor-Thesis

Christian Böhlefeld, Matrikel-Nr.: 443135

Anschrift: Ulrichstraße 15, 51688 Wipperfürth

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

betreuender wissenschaftlicher Mitarbeiter: Dr. rer. nat. Armin Seyfried

Zentralinstitut für Angewandte Mathematik, Forschungszentrum Jülich

Tag der Ausgabe: 02. Januar 2008

Tag der Abgabe: 30. April 2008

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

2 Begriffe **4**

2.1 Dichte 4

2.2 Geschwindigkeit 7

2.3 Fluss 7

2.4 Fundamentaldiagramme 8

2.5 Uni- / Bidirektional 10

3 Veröffentlichungen **12**

3.1 Hankin & Wright (1958) 12

3.2 Oeding (1963) 14

3.3 Older (1968) 17

3.4 Navin & Wheeler (1969) 19

3.5 Mori and Tsukaguchi (1986) 21

3.6 Weidmann (1993) 22

3.7 Seyfried et al. (2005) 24

3.8 Helbing et al. (2007) 26

3.9 Zusammenfassung 28

4 Versuch **30**

4.1 Geometrische Versuchsanordnung 30

4.2 Messgeräte 32
4.3 Ablauf der Versuche 34

5 Auswertung **36**

5.1 Ermittlung der Rohdaten 36
5.2 Umrechnung 41
5.3 Zeitliche Verläufe von Dichte und Geschwindigkeit 42
5.4 Geschwindigkeit in Abhänghigkeit von der Dichte 48

6 Analyse **52**

6.1 Hankin & Wright 53
6.2 Oeding 55
6.3 Older 56
6.4 Navin & Wheeler 58
6.5 Mori & Tsukaguchi 60
6.6 Weidmann 62
6.7 Seyfried et al. 63
6.8 Helbing et al. 65

7 Fazit **67**

Literaturverzeichnis **70**

Tabellenverzeichnis

2.1 Flächen f nach Predtetschenski/Milinski ([8]) ; Unterscheidung nach Personengruppen 6

3.1 Maße der observierten Wege nach Older ([6]) 17

3.2 Maße der observierten Bürgersteige nach Navin & Wheeler ([7]) 19

Abbildungsverzeichnis

2.1 Fundamentaldiagramm für den Spezifischen Fluss in der Ebene nach Weidmann [11] 9
2.2 Fundamentaldiagramm für Geschwindigkeit in der Ebene nach Weidmann [11] 10

3.1 Geschwindigkeit über Dichte nach Hankin & Wright [2] 14
3.2 Geschwindigkeit über Dichte nach Oeding ([5]) 16
3.3 Geschwindigkeit über Dichte nach Older ([6]) 18
3.4 Geschwindigkeit über Dichte nach Navin und Wheeler ([7]) 20
3.5 Geschwindigkeit über Dichte nach Mori und Tsukaguchi ([4]) 22
3.6 Fundamentaldiagramm für Geschwindigkeit in der Ebene nach Weidmann [11] 23
3.7 Aufbau des Versuchs von Seyfried et al. ([9]) 24
3.8 Geschwindigkeit über Dichte nach Seyfried et al.([9]) 26
3.9 Geschwindigkeit über Dichte nach Helbing ([3]) 27
3.10 Geschwindigkeit über Zeit für alle genannten Literaturquellen 28

4.1 Schematische Versuchsanordnung 31
4.2 Versuchsaufbau 32
4.3 Kamera 1 (schwarz) mit DV-Kamera 33
4.4 Kamera 2 (schwarz) mit BumbleBee 33
4.5 Probanden im Messbereich (hier bei N=75) 35
4.6 Probanden im Rundgang (hier bei N=75) 35

5.1 Auswertung der Filme mit Patrack (hier bei N=40); zur Messung wurden die drei senkrechten Linien im Zentrum der Aufnahme verwendet 37
5.2 Tabelle der Durchgangszeiten (in Frames) für N=65 38
5.3 Schematische Darstellung der Zustände im Messbereich bei den Durchgängen der 3 Linien von Person 6 mit Zeitangabe in Frames und berechneter Dichte . 40
5.4 zeitliche Verläufe von Zeit und Geschwindigkeit bei N=20 43
5.5 zeitliche Verläufe von Zeit und Geschwindigkeit bei N=30 43
5.6 zeitliche Verläufe von Zeit und Geschwindigkeit bei N=70 44
5.7 zeitliche Verläufe von Zeit und Geschwindigkeit bei N=80 44
5.8 Aufentahltszeiten der Probanden im Messfeld bei N=70 46
5.9 Aufentahltszeiten der Probanden im Messfeld bei N=80 46
5.10 Geschwindigkeit über Dichte für alle N über den gesamten Messzeitraum (dynamisch) 48
5.11 Geschwindigkeit über Dichte für alle N über den gesamten Messzeitraum (stationär) 50

6.1 Geschwindigkeit über Zeit (Hankin & Wright und diese Studie) 53
6.2 Geschwindigkeit über Zeit (Oeding und diese Studie) 55
6.3 Geschwindigkeit über Zeit (Older und diese Studie) 56
6.4 Geschwindigkeit über Zeit (Navin & Wheeler und diese Studie) 58
6.5 Geschwindigkeit über Zeit (Mori & Tsukaguchi und diese Studie) 60
6.6 Geschwindigkeit über Zeit (Weidmann und diese Studie) 62
6.7 Geschwindigkeit über Zeit (Seyfried at al. und diese Studie) 63
6.8 Geschwindigkeit über Zeit (Helbing et al. und diese Studie) 65

1 Einleitung

In den letzten 50 Jahren wurde ein großer Aufwand darin betrieben, die grundlegenden Gesetzmäßigkeiten der Bewegungen von Fußgängerströmen zu ermitteln und in einen sinnvollen Zusammenhang zu bringen.
Heute stellt man fast: So viele Untersuchungen darüber stattgefunden haben, so vielfältig sind auch die dabei erlangten Ergebnisse!
Die heute existierenden Fundamentaldiagramme (s. Kap.2.4), in denen die Beziehung zwischen der Dichte eines Personenstroms und der Geschwindigkeit der darin befindlichen Personen bzw. des spezifischen Personenflusses dargestellt ist, haben bei erster Betrachtung eine gewisse Verwandschaft, sind jedoch so gravierend verschieden, dass sie für eine einheitliche Verwendung als Berechnungsgrundlage nicht in Einklang zu bringen sind. Der geneigte Betrachter hat also hier die Qual der Wahl, sich für ein geeignetes Diagramm zu entscheiden. Ulrich Weidmann, der 1993 25 Untersuchungen über das Fundamentaldiagramm zusammengetragen hat, um diese in einem Diagramm zu vereinigen, sagt dazu: "...erstaunlich sind die in der Literatur anzutreffenden großen Unterschiede. Neben Differenzen bezüglich des Geschwindigkeitsniveaus betreffen sie auch den Kurvenverlauf.." ([11])
Die auf den ersten Blick trivial erscheinende Beziehung zwischen Dichte und Geschwindigkeit scheint nicht auf einfachem Wege erfassbar zu sein. Es stellt sich die Frage, durch welche Einflüsse bei so vielen, meist sehr aufwändigen Untersuchungen solch große Unterschiede in den Ergebnissen entstehen.
Die Beantwortung dieser Fragestellung wird ein zentrales Thema in dieser Arbeit sein. Die äußeren Einflussmöglichkeiten auf die Ergebnisse sind wohl auch sehr vielfältig.

Natürlicherweise können Untersuchungen über das menschliche Verhalten nie einen reinen Laborcharakter haben, bei dem die Umgebungsbedingungen immer gleich bleiben müssten. Schon die Zusammensetzung der Personengruppe, an der die Beobachtungen gemacht werden ist auschlaggebend. So wird man auf gleicher Grundfläche zum Beispiel mehr kinder als Erwachsene unterbringen können, wodurch man die Personendichte bei Kindern höher erwartet als bei Erwachsenen. Oder besteht die Personenguppe zum Beispiel nur aus Studenten, wird diese wohl eine höhere mittlere Geschwindigkeit aufweisen als eine Personengruppe bestehend aus Rentnern.

Auch ist die Motivation der Personen von zentraler Bedeutung. Bei Untersuchungen unter Laborbedingungen sind die Personen in der Regel entspannt und nicht dazu geneigt, sich besonders zu beeilen (sollte dies nicht eine ausdrückliche Anweisung sein). Anders sieht dies unter Realbedingungen, zum Beispiel in Bahnhöfen aus, wo einige Personen unter Zeitdruck stehen können, während andere hingegen mehr Zeit haben.

Auch ist es von Bedeutung, ob sich die Personengruppe in dieselbe Richtung bewegt (unidirektional / bidirektional (s. Kap.2.5)). Bei bidirekrionaler Bewegung geht man davon aus, dass sich die Personen gegenseitig behindern und die Geschwindigkeit dadurch verringert wird.

Ebenfalls einen großen Einfluss auf die Ergebnisse der Untersuchungen hat die Methode, mit der die Messungen der Personenbewegungen durchgeführt werden. Hat man zum Beispiel die Möglichkeit, jede einzelne Person zu betrachten und ihre Bewegung zu messen, oder betrachtet man die gesamte Personengruppe? Welche Genauigkeit kann man mit der zur Verfügung stehenden Aufnahmetechnik erreichen?

In dieser Arbeit befasse ich mich mit der Auswertung und Einstufung eines Teils einer weiteren Versuchsreihe über die Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Dichte von Fußgängerströmen. Dabei fließen in meine Betrachtungen nur Gehversuche mit unidirektionaler Bewegung und einer Wegbreite von 0,85m ein.

Die Versuche fanden in Kooperation des Forschungszentrum Jülich mit der Bergischen Universität Wuppertal und der Universität zu Köln statt.

Die Ergebnissen der Versuchsreihe sollen einen Anhaltspunkt liefern, die bisherigen Litera-

turquellen kritisch einzuordnen, sowie zu kären, in wie weit sich eine geringe Wegbreite auf das Fundamentaldiagramm auswirkt.

Als erstes werde ich die benötighten Größen, die zur Erstellung eines Fundamentaldiagramms benötigt werden, sowie weitere wichtige Begriffe, erläutern (2). In Kapitel 3 werde ich einige der früheren Veröffentlichungen vorstellen. Dabei wird wichtig sein, wie sich bei den Versuchen die Rahmenbedingungen darstellten, und wie die charakteristischen Größen ermittelt wurden. Das Kapitel 4 beinhaltet den Aufbau und die Durchführung des o.g. Versuchs, der im Kapitel 5 auf die genannte Fragestellung untersucht wird.

Mit den gewonnenen Ergebnissen soll in Kapitel 6 versucht werden, die gewonnenen Ergebnisse dieser Versuchsreihe mit den angesprochenen Literaturquellen zu vergleichen. Als Fazit (7) könnte dann ein erster Anhaltspunkt entstehen, die Literatur kritisch einzuordenen und den Einfluss einer geringen Wegbreite zu benennen.

2 Begriffe

Die Charakterisierung von Fußgängerbewegungen kann mit bestimmten Messgrößen ausgedrückt werden. Dise sind Geschwindigkeit, Dichte und Fluss des Personenstroms.
Mit ihnen ist es möglich, quantitative Aussagen über die Versuchsbeobachtungen zu treffen, und diese mit denen in anderen Veröffentlichungen zu vergleichen.
Im Folgenden werden diese Größen erklärt.
Eine Darstellung der Beziehungen dieser Größen kann in sogenannten fundamentaldiagrammen ausgedrückt werden. In diesem Kapitel werde ich diese Diagramme kurz einführen.
Auch werde ich kurz erläutern, in wie weit sich die Farge, ob der Personenstrom unidirektional oder bidirektional ist, auf Untersuchungsergebnisse auswirken kann.

2.1 Dichte

Es gibt im Grunde zwei Definitionen der Dichte eines Personenstroms. In den meisten Veröffentlichungen wird die Dichte ρ als der Quotient aus Personenzahl N und Grundfläche A, die die Personen beanspruchen, berechnet (s.[10]):

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

In anderen Literaturquellen wird die Dichte über eine andere Rechnung, erstmals formuliert durch Predtetschinski / Milinski ([8]), ermittelt:

$$D = \frac{\sum f}{A} \left[\frac{m^2}{m^2}\right] \tag{2.2}$$

Hier wird die Dichte D genannt. $\sum f$ ist der gesamte, auf die Grundfläche projezierte, Platzbedarf der Personen und A die betrachtete Grundfläche. Dabei wird die im Grundriss einer Person beanspruchte Fläche als Fläche einer Ellipse genommen. Breite und Länge des Menschen ergeben die Hauptachsen der Ellipse. Die Breite wird an den Schultern, die Länge in Höhe der Brust gemessen. Der Wert von f ist dabei abhängig von Alter, Bekleidung und Gepäck der einzelnen Personen. Diese Werte sind einer Tabelle (s. Abb.2.1) bei Predtetschinski/Milinski ([8]) zu entnehmen. Im Unterschied zur ersten Definition der Dichte kann es also bei der Definition nach Predtetschinski/Milinski bei gleicher Personenzahl und gleicher Grundfläche zu unterschiedlichen Dichten kommen, je nach Projetionsfläche der betrachteten Personen.

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

Tabelle 2.1: Flächen f nach Predtetschenski/Milinski ([8]) ; Unterscheidung nach Personengruppen

Im Verlauf dieser Arbeit werde ich ausschließlich die erste Definition (2.1) der Dichte verwenden. Diese Definition wird auch in den von mir betrachteten Literaturquellen (siehe Kap. 3) verwendet.

2.2 Geschwindigkeit

Der Begriff der Geschwindigkeit ist eindeutig definiert. Diese Größe ergibt sich als Quotient aus zurückelegtem Weg Δs und der dafür benötigten Zeit Δt:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \left[\frac{m}{s}\right] \tag{2.3}$$

Durch diese Rechnung ist es möglich, die gemittelte Geschwindigkei über ein bestimmtes Zeitintervall zu ermitteln. Die auf diese Weise ermittelte Geschwindigkeit wird als Grundlage für eine makroskopische Betrachung, wie sie im Kapitel 5 durchgeführt wird, verwendet.

2.3 Fluss

Bei der Berechnung des Personenflusses gibt es zwei verschiedene Ansätze.
In Anlehnung an die Dynamik von Flüssigkeiten ist ein Ansatz, den Fluss J als das Produkt aus Dichte ρ, Geschwindigkei v und verfügbarer Breite des Weges b zu Berechnen (vgl. u.a. [1], [2], [8], [11]):

$$J \left[\frac{1}{s}\right] = \rho \left[\frac{1}{m^2}\right] \cdot v \left[\frac{m}{s}\right] \cdot b\,[m] \tag{2.4}$$

Der zweite Ansatz geht von der Definition aus, dass der Fluss J ein Maß dafür ist, wieviele Personen ΔN in einem Zeitintevall Δt eine Messstelle passieren:

$$J = \frac{\Delta N}{\Delta t} \left[\frac{1}{s}\right] \tag{2.5}$$

Das Zeitintevall Δt_i zwischen zwei aufeinanderfolgenden Personen wird als Timegap oder Headway bezeichnet.

Der Spezifische Fluss J_s gibt den Fluss pro Einheitsbreite an:

$$J_s = \frac{J}{b} \left[\frac{1}{m \cdot s}\right] \tag{2.6}$$

Und somit:

$$J_s = \frac{\Delta N}{\Delta t \cdot b} \left[\frac{1}{m \cdot s}\right] \tag{2.7}$$

oder

$$J_s = \rho \cdot v \left[\frac{1}{m \cdot s}\right] \tag{2.8}$$

Zur Auslegung von Fußgängerwegen (z.B. an Engstellen) hat diese Größe eine zentrale Bedeutung. Kennt man den Fluss an einer kritischen Stelle des Weges, lässt sich abschätzen, wieviele Personen in einem bestimmten Zeitintervall die Stelle passieren können.

2.4 Fundamentaldiagramme

Das Fundamentaldiagramm (siehe Abb.2.1) stellt die empirische Beziehung zwischen Dichte und spezifischem Fluss $J_s(\rho)$ in Verkehrsströmen dar. Ursprünglich wurde es für Darstellungen des Autoverkehrs eingeführt. Analog lässt es sich aber auch auf den Fußgängerverkehr anwenden.
Abhängig von den Anlagentypen (Flure, Treppen, Rampen,...) gibt es unterschiedliche Fundamentaldiagramme.
Heute bauen alle makroskopischen Handrechenverfahren zur Berechnung von Räumungszeiten auf dieser Beziehung auf. Mit Hilfe dieser Berechnungsverfahren ist es möglich, die Kapazität eines Fußgängerweges zu bestimmen, und zum Beispiel Fluchtwege für eine bestimmte Menschenmenge ausreichend zu dimensionieren.

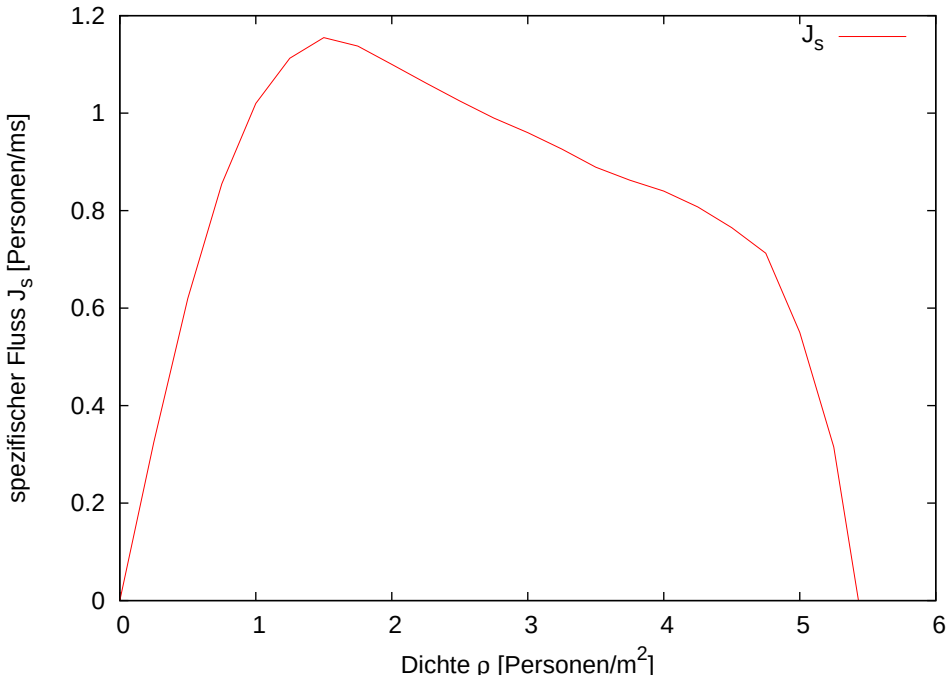


Abbildung 2.1: Fundamentaldiagramm für den Spezifischen Fluss in der Ebene nach Weidmann [11]

Laut diesem Diagramm beträgt die Kapazität, also der größtmögliche spezifische Fluss bei der Bewegung in der Ebene etwa 1,2 $\frac{1}{ms}$ bei einer Dichte von etwa 1,5 $\frac{1}{m^2}$.
Die Flussgleichung (2.4) ermöglicht es, das Fundamtaldiagramm in verschiedenen Formen darzustellen ($J(\rho)$, $v(\rho)$, $v(J)$,...).
Im Laufe dieser Arbeit werde ich mich auf das Fundamentaldiagramm der Beziehung zwischen Dichte und Geschwindigkeit $v(\rho)$ konzentriren (siehe Abb. 2.2) .

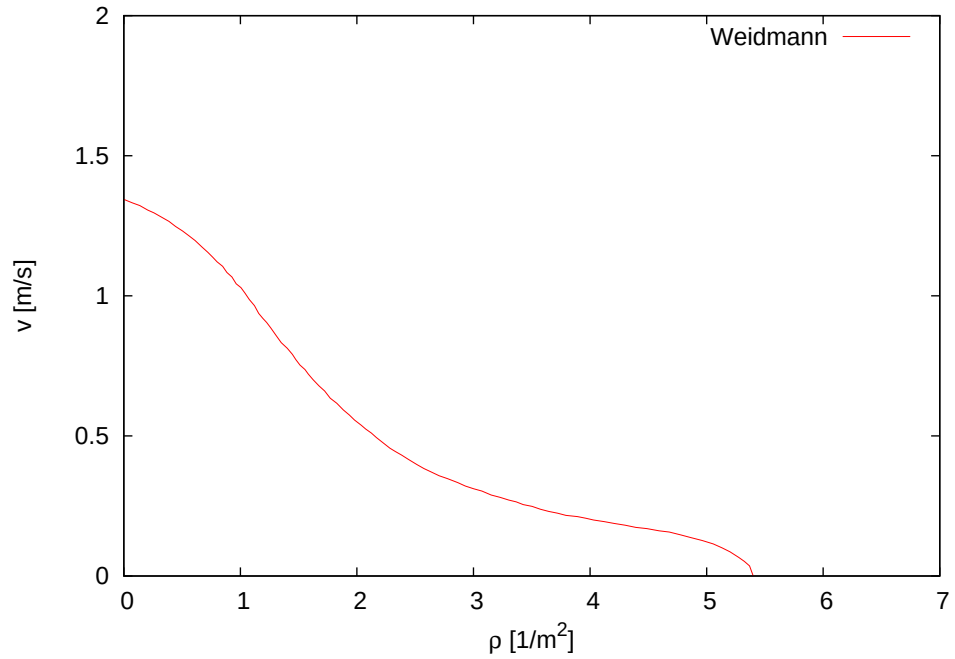


Abbildung 2.2: Fundamentaldiagramm für Geschwindigkeit in der Ebene nach Weidmann [11]

Über das Fundamentaldiagramm hat es, wie gesagt, bereits eine Vielzahl von Untersuchungen gegeben, die zum Teil zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen gekommen sind. Die oben dargestellten Fundamentaldiagramme stammen aus der Veröffentlichung von Weidmann ([11]), der sie aus den Daten von insgesamt 25 Veröffentlichungen erstellt hat.
Darüber hinaus gibt es eine vielzahl weiterer Untersuchungen. Eine genauere Betrachtung einiger dieser Untersuchungen folgt in Kapitel 3.

2.5 Uni- / Bidirektional

Der Zustand uni- bzw bidirektionale Bewegung sagt aus, ob sich die Personen in einem Personenstrom in die gleiche oder in entgegesetzte Richtungen bewegen.

Unidirektional bedeutet, alle Personen bewegen sich in die gleiche Richtung.
Bidirektinal bedeutet, dass sich die Personen zu einem gewissen Anteil in die eine Richtung bzw in die entgegesetzte Richtung bewegen.
Bei bidirektionalen Bewegungen, zum Beispiel auf einem Bürgersteig oder in Einkaufsstraßen, ist zu erkennen, dass sich bei höherer Dichte Linien ausbilden. Entlang dieser Linien bewegen sich die Personenströme abhängig nach ihrer Bewegungsrichtung. Dabei lässt sich experimentell feststellen, dass die Anzahl der Linien, die sich bilden, abhängig von der Breite des Weges ist.
Auch wurde festgestellt, dass der Anteil einer Linie am gesamten Gehweg proportional zum Anteil der Personen dieser Linie am Gesamtfluss ist (siehe u.a. [7], [10]). Besteht der Personenfluss zum Beispiel zur Hälfte aus Personen mit Bewegung in die eine und zur anderen Hälfte aus Personen mit Bewegung in die andere Richtung, werden die Linien, die sich bilden jeweils die Hälfte des gesamten Gehwegs einnehmen.

3 Veröffentlichungen

Wie schon in Kapitel 2.4 erwähnt, gibt es eine Vielzahl von Untersuchungen über die Beziehung zwischen Dichte ρ und Geschwindigkeit v bzw. Spezifischem Fluss J_s bei Fußgängerverkehr.
Die älteste der Untersuchungen, die ich für einen Literaturvergleich heranziehe, stammt aus dem Jahre 1958, die neueste ist von 2007.
Hier ist festzuhalten, dass die folgende Auflistung der Untersuchungsergebnisse keinen Anspruch auf Vollständigkeit hat. Die Literaturauszüge stellen lediglich eine beispielhafte Aufzählung empirisch ermittelter Daten dar, die ich als Vergleichsmöglichkeit meiner Untersuchungsergebnisse heranziehe.
Im Folgenden stelle ich einige Veröffentlichungen chronologisch nach dem Jahr ihres Erscheinens vor.

3.1 Hankin & Wright (1958)

Wie oben erwähnt, reichen die ersten systematischen Untersuchungen von Personenströmen zurück in die 50er Jahre des 20. Jahrhunderts.
Unter den Pionieren auf diesem Gebiet befinden sich auch B.D Hankin und R.A.Wright, die 1958 im Auftrag des zuständigen Bauingenieurs der Londoner U-Bahn eine Untersuchungsreihe über Personenströme durchführten([2]).
Im Zuge des Ausbaus des Londoner U-Bahn-Netzes wollte man fundierte Grundlagen erar-

beiten, die bei der Planung neuer U-Bahn-Stationen als Basis dienen sollten.
Bis dato hatte man Einrichtungen nach relativ groben Maßstäben entworfen, die sich wohl eher auf Erfahrungswerte als auf logisch fundierte Theorien stützen.
Die ersten Untersuchungen fanden an einer Jungenschule statt. Zwei konzentrische Ringe wurden mit Lattenzäunen gebildet. Der Abstand der Ringe betrug etwa 1,3m, der Durchmesser des inneren Rings etwa 9,1m.
Nach und nach betraten Schüler den Rundlauf, bis am Ende 200 Jungen im eingezäunten Bereich gingen.
Bei unterschiedlichen Konzentrationen von Schülern wurden Gechwindigkeitsmessungen durchgeführt und später in ein Diagramm (s. Abb.3.1, Schoolboys) übertragen. Über die Methode, mit der dabei die Geschwindigkeit und die Dichte ermittelt wurden, werden in dem Artikel keine Angaben gemacht.
Weitere Beobachtungen wurden später in Londoner U-Bahn-Stationen selbst durchgeführt. Die Beobachtungsobjekte waren hier gewöhnliche Passagiere, die ahnungslos waren.
Die Geschwindigkeits- und Dichteermittlung ging dabei wie folgt von statten:
Zwei Beobachter mit Stoppuhren positionierten sich in der U-Bahn mit einem gewissen Abstand voneinander. Bei einem Signal starteten beide Beobachter die Zeitmessung. Beim Start der Zeitmessung mischte sich Beobachter 1 in den Personenfluss. Beobachter 2 fing an, alle Personen zu zählen, die ihn passierten. Als die beiden Beobachter zusammentrafen stoppten sie die Zeit. Auf diese Art erhielt man die Zahl der Personen, die sich ursprünglich im betrachteten Feld aufgehalten hatte (und somit die Personendichte) sowie die Geschwindigkeit von Beobachter 1 (und somit die Geschwindigkeit des Personenflusses).
Die Ausmaße der Messbereiche in den U-Bahn-Stationen sind dem Artikel nicht zu entnehmen.
Nach einer Reihe von Beobachtungen wurden die Ergebnisse ebenfalls in das Diagramm 3.1 übertragen.

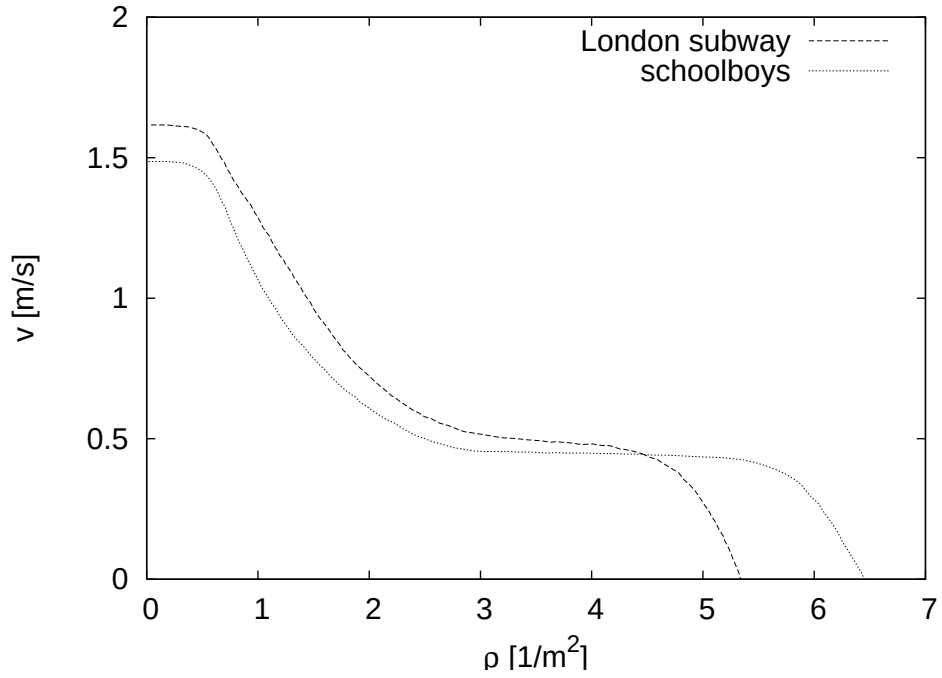


Abbildung 3.1: Geschwindigkeit über Dichte nach Hankin & Wright [2]

3.2 Oeding (1963)

Im Auftrag des Bundesverkehrsministeriums und der Forschungsgesellschaft für Straßenwesen führte Dipl.-Ing. Detlef Oeding von der technischen Hochschule Braunschweig (Institut für Stadtbauwesen) eine Studie über die Verkehrsbelastung und dimensionierung von Gehwegen und anderen Anlagen des Fußgängerverkehrs [5] durch.
Seine Beobachtungen führte Oeding dabei an öffentlichen Verkehrswegen unterschiedlicher Einstufungen durch, wobei die beobachteten Personen völlig ahnungslos waren.
Die öffentlichen Verkehrswege teilt Oeding in vier verschiedene Verkehrstypen ein:

Gemischter Berufsverkehr Hauptsächlich morgens, an Werktagen, wurden zwischen 6 und 8 Uhr Passantenströme an innerstädtischen Gehwegen aufgenommen. Diese setz-

ten sich hauptsächlich aus Beschäftigten verschiedener Arbeitsstätten zusammen und bewegten sich größtenteils in eine Richtung (unidirektional).

Werkverkehr An Gehwegen dicht an Werkseingängen von großen Industriebetrieben (Volkswagen in Wolfsburg und Linke-Hofmann-Busch in Salzgitter) wurden die Beschäftigten beobachtet. Dabei handelt es sich bei allen Beobachtungen um ausgesprochenen Richtungsverkehr (unidirektional) von besonders eingeübten Fußgängern.

Einkaufsverkehr Fußgängerströme wurden in innerstädtischen Geschäftsstraßen beobachtet. Dabei war der Verkehr immer ungefähr zu gleichen Teilen gegenläufig (bidirektional). Im Vergleich zu den oberen Anlagentypen bestand die Personenmenge hierbei zu größeren Anteilen aus älteren, vor allem weiblichen, Personen und Kindern.

Veranstaltungsverkehr Die Mehrzahl der aufgetragenen Messwerte wurde aus Fußgängerablaufwellen von einem Sportstadion (Stadion von Eintracht Braunschweig) gewonnen. Bei den Personenströmen trat laut Oeding ein ausgesprochener Richtungsverkehr (unidirektional) auf.

Insgesamt wurden über drei Jahre hinweg 63 Aufnahme-Serien durchgeführt. Aus den ermittelten Werten für Fußgängergeschwindigkeit und -dichte trug Oeding jeweils die Mittelwerte jeder Versuchsserie in ein Diagramm (s. Abb.3.2) ein.
Über die Ermittlung der empirischen Beobachtungswerte macht Oeding in seinem Artikel ausführliche Angaben.
Die Erfassung der Personenströme erfolgte bei den Beobachtungen durch fotografische bzw. Filmaufnahmen. Im Laufe der Jahre, die die Untersuchungen dauerten, entwickelte man seine Aufnahmetechnik stetig weiter. So kam Anfangs eine Fotokammera zum Einsatz, mit der Bildserien mit bestimmten Bildabständen gemacht wurden. Anhand der Bildserien mit Zeitangaben konnten dann die Geschwindigkeit und die Dichte mithilfe eines von Hand gezeichneten Rasters ermittelt werden.

Später kamen Filmkameras zum Einsatz, die eine bestimmte Bildfrequenz aufwiesen. Die Auswertung geschah dabei prinzipiell so wie mit der Fotokamera. Es konnte aber eine höhere zeitliche Auflösung der Bewegungen, und somit eine höhere Genauigkeit erreicht werden.

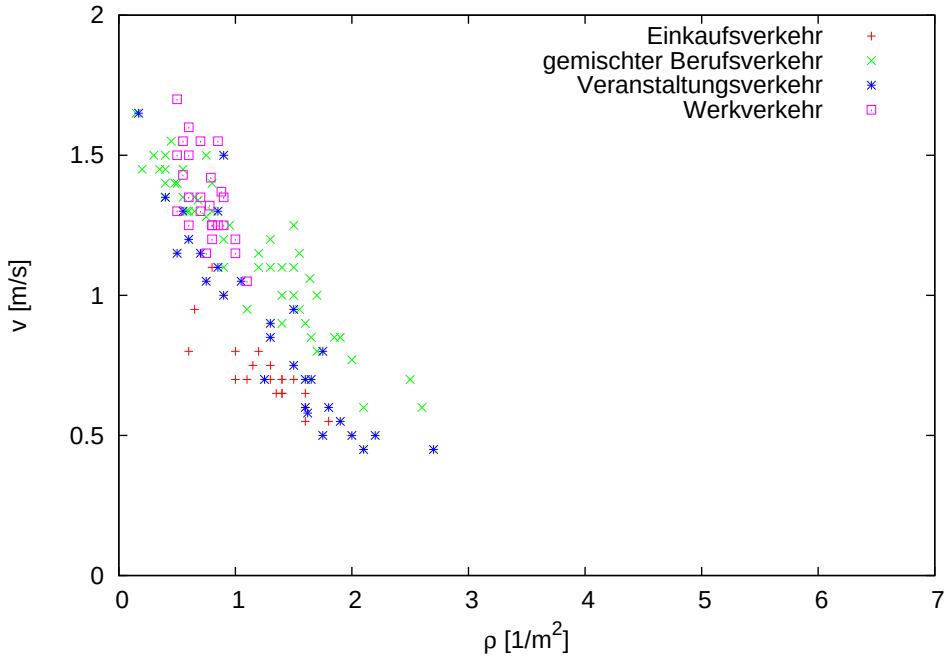


Abbildung 3.2: Geschwindigkeit über Dichte nach Oeding ([5])

Im Diagramm gut zu erkennen sind die unterschiedlichen Verteilungen der einzelnen Punktehaufen. Der Einkaufsverkehr weist die geringsten Geschwindigkeiten auf. Dies könnte durch die gegenläufigen Verkehrsströme zustande kommen. Auch denkbar zur Erklärung ist, dass sich unter den Betrachten Personen im Einkaufsverkehr größtenteils Frauen und Kinder befanden, die eine geringere Gehgeschwindigkeit aufweisen.

Beim Veranstaltungsverkehr treten ebenfalls vergleichsweise geringere Geschwindigkeiten auf als beim Werk- bzw. Berufsverkehr. Eine Erklärung ist die bessere 'Übung' der Personen im Berufsverkehr.

Bei allen Beobachtungen beträgt die Personendichte nicht mehr als etwa 3 $1/m^2$. Oeding

schreibt dazu, dass dies auf eine ausreichende Dimensionierung der untersuchten Verkehrswege schließen lassen kann.
Über die tatsächlichen Maße der einzelnen Gehwege macht Oeding in seinem Artikel keine Angaben.

3.3 Older (1968)

Wie zum Teil schon Oeding hat Older die Fußgängerbewegungen in Einkaufspassagen untersucht. Es handelt sich dabei also hauptsächlich um bidirektionale Bewegungen. Die in seinem Artikel ([6]) erwähnten Untersuchungsorte befanden sich in der Oxford Street in London, sowie in der High Street in Slough.
Die Dimensionierungen der observierten Fußgängerwege gibt er in folgender Tabelle an:

Ort	**Länge des observierten Weges**	**Breite des observierten Weges**
Oxford Street (Ort 1)	3,78 m	2,29 m
Oxford Street (Ort 2)	5,18 m	3,75 m
Slough High Street	5,06 m	3,14 m

Tabelle 3.1: Maße der observierten Wege nach Older ([6])

Die Aufnahmen der Fußgängerströme führte Older mit einer Filmkamera durch, die er auf einem Hausdach in ausreichender Höhe befestigte. Die Kamera hatte eine Filmgeschwindigkeit von ungefähr 10 Bildern pro Sekunde, was durch das Mitfilmen einer Stoppuhr kontrolliert wurde.
Mit den so gewonnenen Filmen wurde die Zeit, eine gewisse Strecke zurückzulegen, für eine Anzahl von Menschen gewonnen. Daraus konnte man die Geschwindigkeit errechnen. Die Dichte wurde dadurch ermittelt, dass, wenn der beobachtete Passant in der Mitte des Beobach-

tungsbereiches war, die Anzahl der Personen im Messbereich gezählt und die Anzahl durch die Fläche des Bereichs dividiert wurde.

Die Auftragung dieser emirischen Daten ist in Diagramm 3.3 abzulesen. Older gibt an, dass sich an Teilen zweier der Beobachtungsorte (Oxford Street (Ort2) und Slough High Street) Schaufenster befanden. An diesen blieben gelegentlich Personen stehen, um hinein zu schauen. Diese wurden bei den Peronenzählungen mit berücksichtigt und gingen mit in die Dichteberechnung ein, wodurch teilweise die Dichte des Personenstroms (nur die in Bewegung bleibenden Personen) selbst zu hoch ausgefallen sein dürfte.

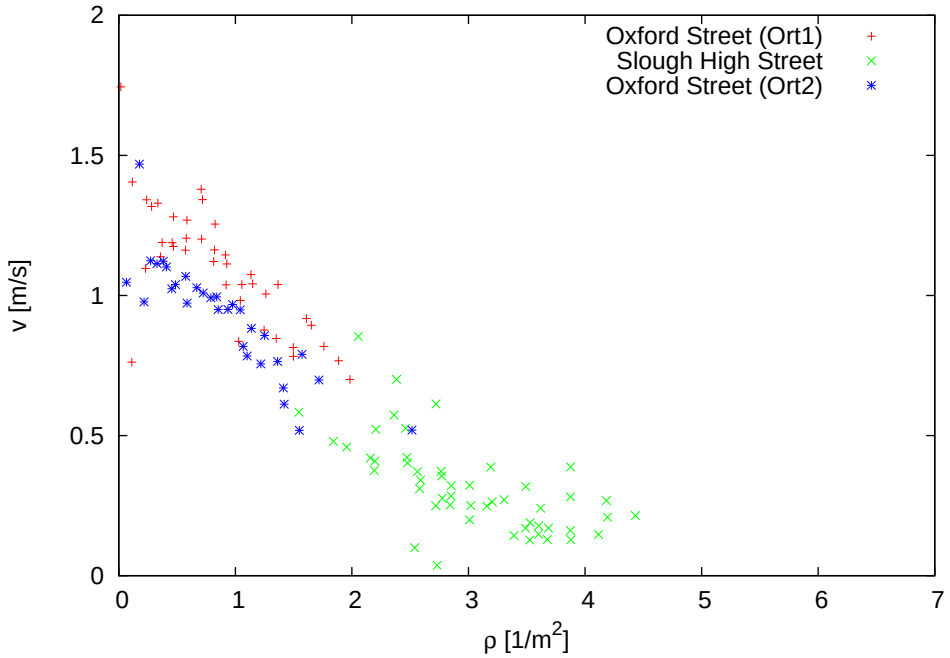


Abbildung 3.3: Geschwindigkeit über Dichte nach Older ([6])

3.4 Navin & Wheeler (1969)

Navin und Wheeler führten Ihre Untersuchungsreihe an Bürgersteigen an der Universität von Missouri, Columbia und am Stephens College in Missouri durch. In ihrer Veröffentlichung ([7]) stellen sie die Ergebnisse von 4 Bürgersteigabschnitten dar, die folgende Bemaßungen aufwiesen:

Ort	**Breite**	**Seitliche Begrenzung**
Univ. v. Missouri (Ort 1)	1,22 m	Mauer mit h=0,61 m (einseitig)
Univ. v. Missouri (Ort 2)	2,14 m	Bordstein mit h=0,15 m (einseitig)
Univ. v. Missouri (Ort 3)	2,44 m	keine
Stephens College	1,83 m	Mauer mit h=0,3 m (einseitig)

Tabelle 3.2: Maße der observierten Bürgersteige nach Navin & Wheeler ([7])

Am Stephens College bestand die untersuchte Personengruppe ausschließlich aus Frauen. An den anderen Untersuchungsorten lag eine homogene Aufteilung von männlichen und weiblichen Personen vor. Alle Gruppen setzten sich aus jungen Erwachsenen (ca. 18 bis 25 Jahre) zusammen.

Da es sich auch hierbei um reine Feldstudien handelte, die an öffentlichen Bürgersteigen stattfanden, wo Personen in der Regel in beide Richtungen gehen können, handelte es sich um bidirektionale Bewegungen.

Die Aufnahmen machten Navin und Wheeler in Form von Farbfotografien, die sie mit einer Frequenz von 4 Bildern pro Sekunde von einer erhöhten Position schossen. Als Bezugspunkte für die Auswertung der Aufnahmen platzierten sie an den Rändern des Aufnahmebereiches feste Markierungen, sowie ein Rastergitter, das sie fotografierten und wieder entfernten. Bei der Auswertung wurde das Rastergitter auf die Aufnahmen gelegt, um eine örtliche und zeitliche Einordnung der Personen durchzuführen.

Neben dem Zweck, Erkenntnisse über Gehwegdimensionierung für bidirektionale Bewegung, sowie Geschwindigkeitsunterschiede zwischen Männern und Frauen, zu gelangen, sollte diese Studie auch als Vergleichsmöglichkeit mit den Ergebnissen über die Geschwindigkeits-Dichte-Beziehung von Hankin und Wright (Kap.3.1) dienen.
Deshalb trugen Navin und Wheeler die erfassten Geschwindigkeiten gegen die Dichte in einem Diagramm (s. Abb.3.4) auf. Über die Vorgehensweise, wie sie dabei die Werte berechnet haben, machen sie in diesem Artikel leider keine genauen Angaben.

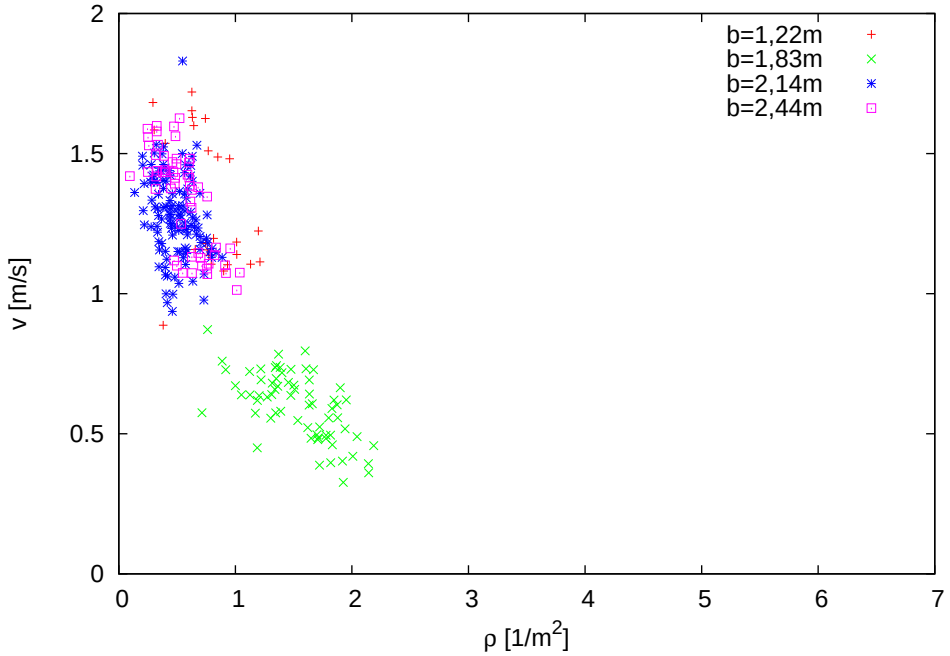


Abbildung 3.4: Geschwindigkeit über Dichte nach Navin und Wheeler ([7])

Gut zu erkennen ist hier, dass die Geschwindigkeiten bei der Breite von $1,85m$ erheblich geringer ausfallen als die übrigen Geschwindigkeiten bei vergleichbarer Dichte (um ca. 1 $\frac{m}{s}$). Ein Grund könnte die Zusammensetzung aus Frauen in dieser Gruppe sein, die eine geringere Gehgeschwindigkeit als Männer aufweisen.

3.5 Mori and Tsukaguchi (1986)

Bei ihren Feldstudien ([4]) wollten Mori und Tsukaguchi eine Methode entwickeln, mit der man das Level Of Service [1] für Bürgersteige ermitteln kann. Basieren sollte die Methode auf dem Verhalten und dem Bewustsein der Fußgänger, sprich den physikalischen Vorgängen in Personenströmen sowie dem persönlichen Empfinden der Personen.
Ich möchte mich hier nur mit der Ermittlung und Darstellung der dabei gewonnen Basisdaten über das Verhältnis von Geschwindigkeit und Dichte (siehe Diagramm 3.5) befassen.
Die Daten wurden in der Innenstadt von Osaka City gesammelt. Dabei wurden Gehwege untersucht, die Breiten von 2,2 bis 4,5 m aufwiesen.
Die Personenströme waren laut den Autoren unidirektional.
Verwendet wurden auch hier Zeitraffer-Fotografien, die von erhöhten Punkten aus der Vogelperspektive gemacht wurden.
Über die genaue Entstehung der Fotos, deren Auswertung sowie die Errechnung der Geschwindigkeits- und Dichtewerte machen die Autoren in Ihrem Artikel keine weiteren Angaben.

[1] Beim Level Of Service Konzept wird neben der Betrachtung des maximalen Personenflusses in Verkehrsanlagen auch das subjektive empfinden des Fußgängers betrachtet.Es fließen Faktoren ein, wie Wahl der freien Gehgeschwindigkeit, Überholungsmöglichkeit,usw.

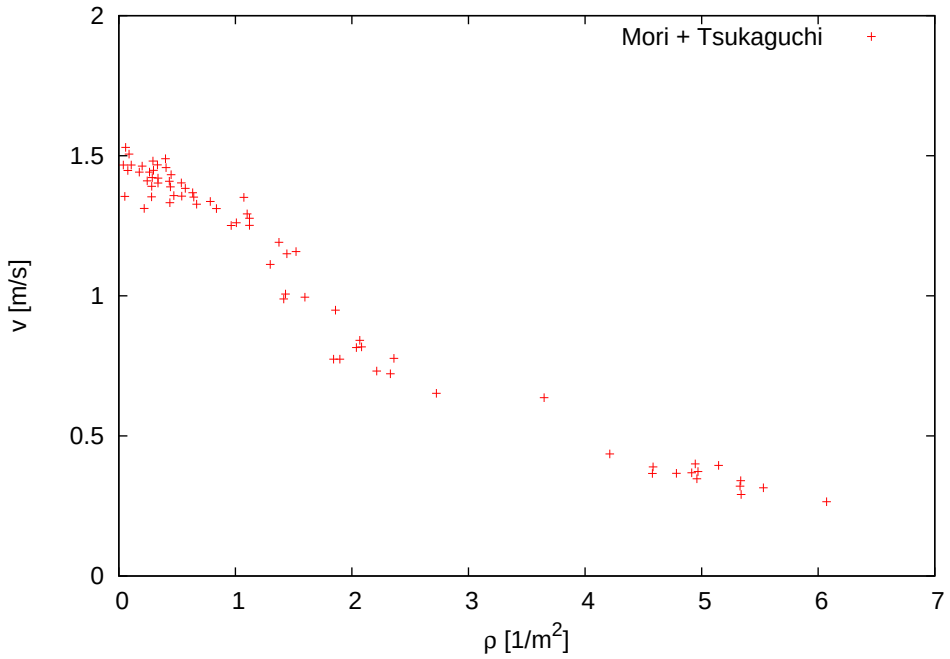


Abbildung 3.5: Geschwindigkeit über Dichte nach Mori und Tsukaguchi ([4])

3.6 Weidmann (1993)

Ein Fundamentaldiagramm, das immer wieder gerne herangezogen wird, ist das von Ulrich Weidmann (s. Abb.3.6). In seiner Veröffentlichung *Transporttechnik der Fußgänger*([11]) stellt Weidmann dieses Fundamentaldiagramm dar. Für die Ausarbeitung der Veröffentlichung hat er eine Vielzahl von Literaturquellen zusammengetragen und den Verlauf ihrer Mittelwerte in einem Diagramm aufgetragen.

Alleine in die Ausarbeitung des Fundamentaldiagramms der Geschwindigkeit flossen 25 unterschiedliche Quellen ein, darunter auch einige derer, die ich oben angesprochen habe (Older (Kap.3.3), Hankin und Wright (Kap.3.1), Navin und Wheeler (Kap.3.4)).

Wie bereits in der Einleitung (1) erwähnt, sagt Weidmann, dass es zwischen den Literaturquellen teilweise große Unterschiede, den Kurvenverlauf und das Geschwindigkeitsnivea betreffend, gibt. Für unterschiedliche Dichtebereiche wiesen die Quellen teilweise sehr unter-

schiedlich Verläufe der Geschwindigkeit auf. Ein Teil der Autoren nähere ihren Kurvenverlauf teilweise einer Geraden an, wodurch bei ca. 3 bis 4 $[Personen/m^2]$ ein Sillstand des Personenstroms auftreten müsste, was nicht den Beobachtungen entspräche. Ein anderer Teil der Autoren nähere seinen Verlauf einer Funktion der Form k/x an, wodurch ein größerer Dichtebereich abgedeck würde, die Werte für geringe Dichten aber kaum plausibel seien. Einzelne Autoren beschrieben den Verlauf einer doppel-S-förmigen Kurve.

Einig seien sich alle Quellen, dass der entscheidende Geschwindigkeitsabfall im Dichtebereich von etwa 0,5 bis 2,0 $[1/m^2]$ eintritt.

So trug Weidmann in seinem Diagramm nur die Daten aus Teilbereichen der Dichte zusammen, die ihm plausibel erschienen.

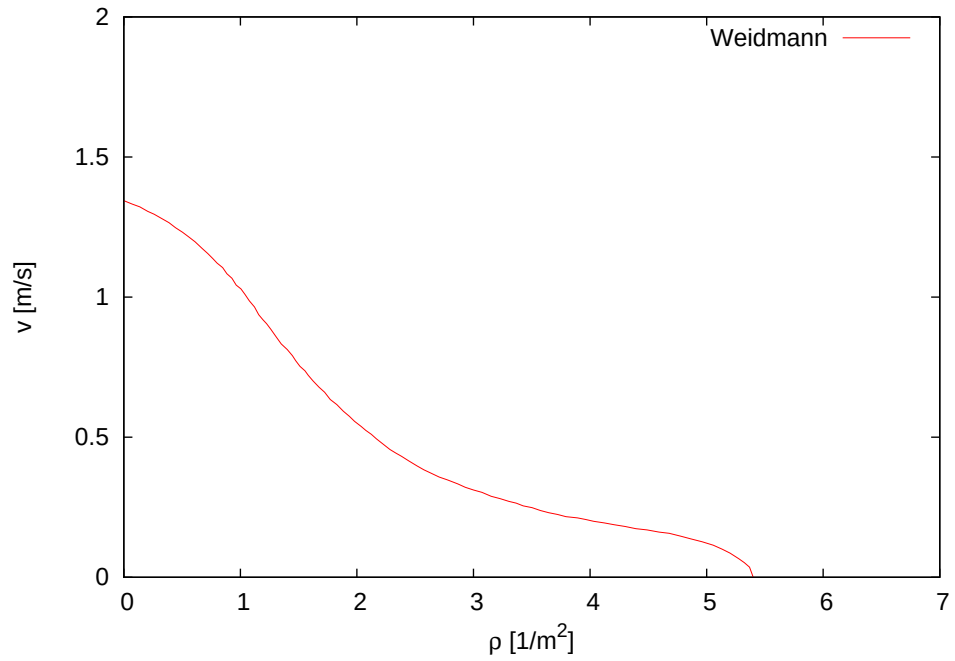


Abbildung 3.6: Fundamentaldiagramm für Geschwindigkeit in der Ebene nach Weidmann [11]

3.7 Seyfried et al. (2005)

Bereits in 2005 wurde eine Untersuchungsreihe zur Ermittlung des Fundamentaldiagramms vom Forschungszentrum Jülich in Kooperation mit der Bergischen Universität Wuppertal durchgeführt. Der Aufbau dieser Versuche (s. Abb.3.7) ist mit dem Aufbau der Versuche (s. Abb.4), die als Grundlage meiner Arbeit dienen, gut vergleichbar. Auch gleicht er dem Aufbau des Versuchs an der Jungenschule von Hankin und Wright (Kap.3.1). In diesem Versuch wurden Messungen über das Verhältnis zwischen Geschwindigkeit und Dichte von Fußgängern für die Bewegung in einer Reihe gemacht.

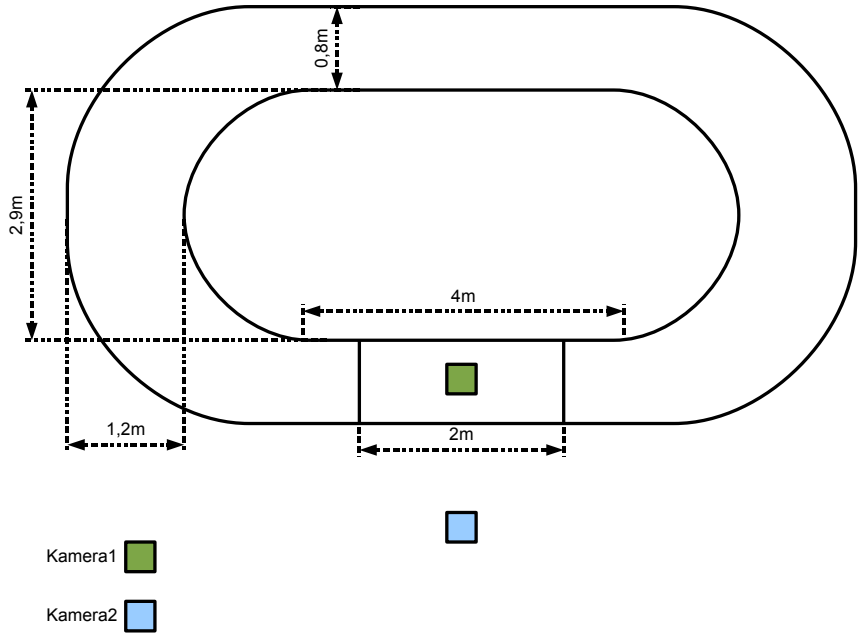


Abbildung 3.7: Aufbau des Versuchs von Seyfried et al. ([9])

Der Flur wurde hier mit Stülen und Seilen errichtet. Die Breite des Flures im Messbereich betrug 0,8m, wodurch Überholen nicht möglich war (wenn man von einer durchschnittlichen Schulterbreite von ca. 0,5m ausgeht). Seyfried sagt dazu aber, dass die Breite des Weges für ihre Untersuchungen nicht von Bedeutung sei, solange sie nicht die freie Bewegungsmög-

lichkeit der Arme der Probandten behinderten, und solange keine Bewegung entlang zweier überlagernder Linien möglich sei.
Die Gruppe der Testpersonen bestand aus Studenten und Mitarbeitern des Forschungszentrum Jülich.
Um eine normale Bewegung zu gewährleisten bekamen die Testpersonen die Anweisung, sich nicht zu beeilen und nicht zu überholen, wodurch bei den Werten für die freie Gehgeschwindigkeit relativ geringe Werte ermittelt wurden.
Es wurden sechs Versuche mit $N = 1, 15, 20, 25, 30, 34$ Personen im Rundlauf durchgeführt, wodurch sehr unterschiedliche Dichtebereiche abgedeckt werden konnten.
Für die Messung der charakteristischen Werte des Personenstroms benutze man sowohl eine manuelle als auch eine automatische Auswertung. Hier werde ich nur die manuelle Methode anspechen, da sie mit meiner Methodik vergleichbar ist.
Die manuelle Auswertung wurde anhand von Aufnahmen (Kamera2 in Abb. 3.7) einer DV Kamera (PAL Format, 25 Bilder pro Sekunde) gemacht. Am Rechner wurden die Aufnahmen bearbeitet und mit einem Zeitstempel, Bildnummer und virtuellem Messrahmen versehen. Die Aufnahmen wurden so Bildweise analysiert, und die Durchgangszeiten der einzelnen Personen aufgezeichnet. Die Genauigkeit der Aufnahmen betrug bei 25 Bildern pro Sekunde 0,04 s. So wurden mit den notierten Durchgangszeiten der Testpersonen die Werte für Geschwindigkeit und Dichte für jede Person errechnet und in folgender Grafik aufgetragen (s. Abb.3.8). Man beachte hier, dass die Dichte in $[1/m]$ angegeben ist. Diese Einheit ist zu erklären mit der Tatsache, dass nur die Bewegung in einer Reihe, also ein 1-dimensionals System, betrachtet wurde. Für einen späteren Vergleich mit meinen Ergebnissen, die im 2-dimensionalen Bereich ermittelt wurden, muss dann noch eine Umrechnung in $[1/m^2]$ erfolgen. Im Kapitel 5 werde ich diese Umrechnung machen, wobei ich die Breite von 0,5 m zugrunde lege, da dies die mittlere Schulterbreite des Menschen ist.

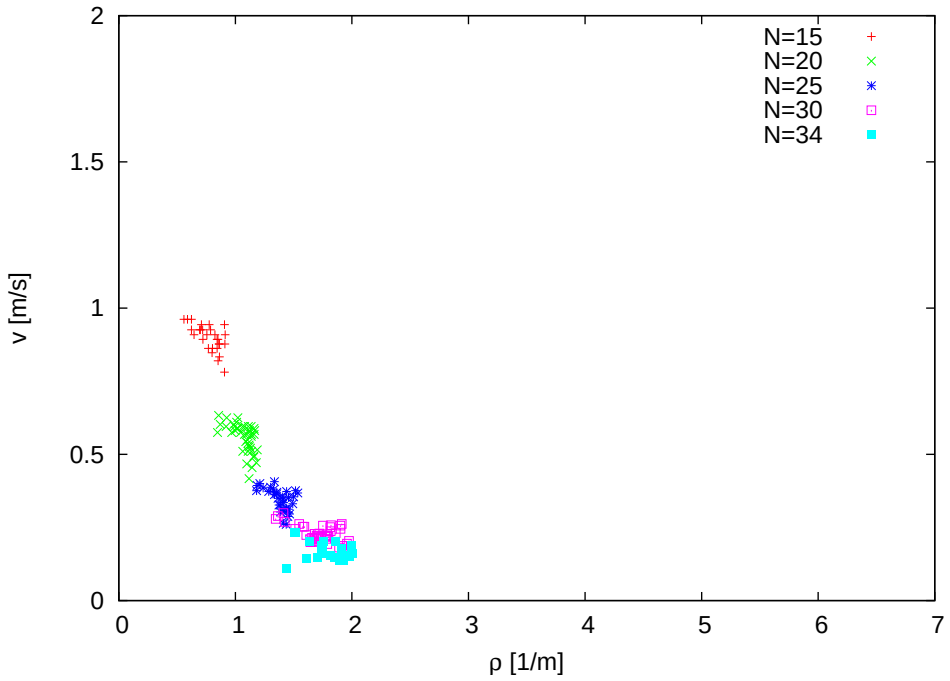


Abbildung 3.8: Geschwindigkeit über Dichte nach Seyfried et al.([9])

3.8 Helbing et al. (2007)

Dies ist die neuste Studie ([3]), die ich in meiner Arbeit als Vergleichsmöglichkeit heranziehe. Ziel dieser studie war es, Erkenntnisse über die Dynamik von Menschenmassen, besonders in Hinblick auf mögliche Paniksituationen, zu erarbeiten.

Als Untersuchungsobjekt dienten hierfür Filmaufnahmen einer Massenpanik in einer großen Menschenmasse in Mina/Mekka (Saudi Arabien) während der Hajj [1] am 12. Januar 2006.

Bei der Auswertung der Aufnahmen entdeckten die Autoren eine nachlaufende, plötzliche Umwandlung des laminaren, gleichmäßigen Flusses in einen Stop-And-Go-Fluss bzw. in einen turbulenten Fluss. Diese Beobachtungen werde ich aber hier nicht weiter betrachten. Außerdem erstellten die Autoren auch ein Fundamentaldiagramm für Geschwindigkeit und Dich-

[1] Hajj: allgemein eine religiöse Pilgerfahrt (bei Christen oder bei Muslimen) und wird ausserhalb der arabischen Welt hauptsächlich mit der islamischen Pilgerfahrt nach Mekka assoziiert.([12])

te des Personenstroms. Als Grundlage der Daten dienten hierbei Videoaufnahmen eines ca. 27,7m x 22,5m großen Areals vor einem 44m breiten Zugang zu einer Brücke im Zentum der Menschenmenge. Diese passierten bis zu 3 Millionen Pilger innerhalb von 24 Stunden.
Als Messbereich wurde ein zentrales Feld von 20m x 12m betrachtet. Die Auflösung der Kamera betrug 25 Pixel pro Meter und 8 Bilder pro Sekunde. Die Auswertung der Aufnahmen geschah mit Hilfe eines Programms, das automatisch einzelne Personen erkannte und ihnen Position $r(t)$ und Geschwindigkeit $v(t)$ in Abhängigkeit der Zeit zuordnete. Mit Hilfe dieser Daten wurden die lokale Geschwindigkeit und die lokale dichte berechnet und in folgendes Diagramm (3.9) übertragen.

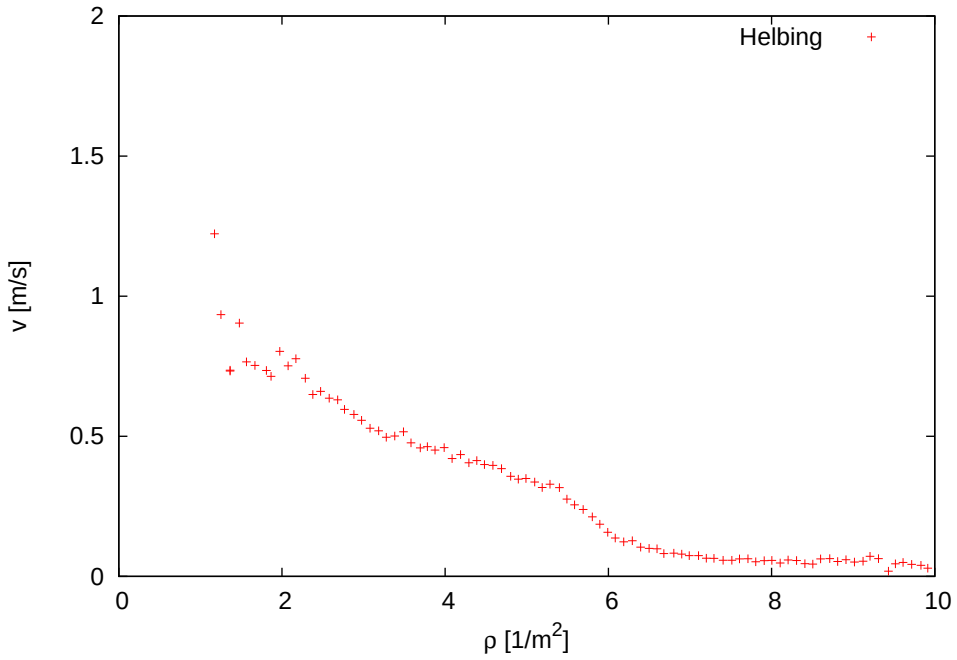


Abbildung 3.9: Geschwindigkeit über Dichte nach Helbing ([3])

Bemerkenswert ist in diesem Diagramm, dass auch bei einer enorm hohen Dichte von bis zu 10 oder 11 $[1/m^2]$ die Geschwindigkeit nicht ganz auf Null sinkt. Es gibt keinen absoluten Stillstand der Menschenmasse.

3.9 Zusammenfassung

Die Daten aller oben genannten Literaturquellen habe ich zusammen in folgendem Diagramm eingetragen (Abb. 3.10).

Bei der Darstellung der 2-dimensionalen Darstellung des Grafen von Seyfried habe ich dort eine Breite des Flures von 0,5 m zugrundegelegt, um die Flächenmäßige Dichte zu berechnen. Dieser Faktor entspricht etwa der durchschnittlichen Schulterbreite des Menschen.

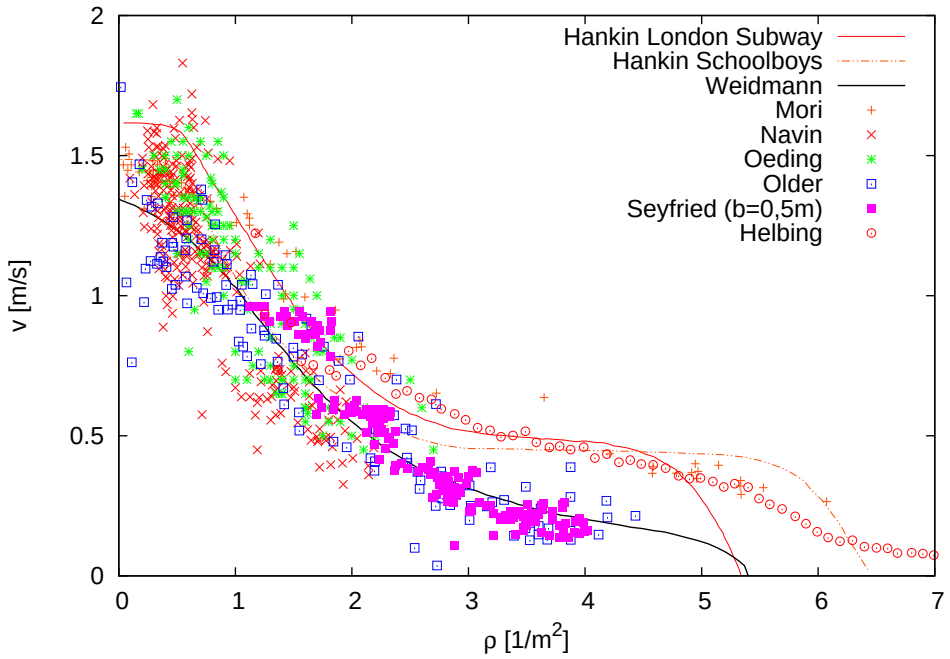


Abbildung 3.10: Geschwindigkeit über Zeit für alle genannten Literaturquellen

Die Grundaussage, dass die Geschwindigkeit der Fußgänger mit zunehmender Dichte abnimmt, wird durch alle Untersuchungen belegt.

Allerdings sind beim Verlauf der Verschiedenen Grafen zum Teil große Unterschiede festzustellen.

Für geringe Dichten unterhalb von 1 $\frac{1}{m^2}$ ballen sich die Punkte bzw. Grafen in einem relativ engen Gebiet, zwischen 1 und 1,7 $\frac{m}{s}$, was die freie Gehgeschwindigkeit von 1,34 $\frac{m}{s}$ nach

Weidmann als Mittelwert zu bestätigen scheint. Lediglich bei Seyfried et al. liegen für eine solch geringe Dichte keine Daten vor.

Je größer die betrachtete Dichte im Grafen wird, desto weiter laufen einige Untersuchungsergebnisse auseinander.

So fallen die Grafen von Older, Seyfried und Weidmann verhältnismäßig steil ab, bis sie bei einer Fortführung der Grafen eine maximale Dichte von etwa 5 $\frac{1}{m^2}$ erreichen würden, bei der der Personenstrom zum stehen käme.

Dagegen fallen die Grafen bei Helbing und Mori & Tsakaguchi sehr flach ab und erreichen eine Dichte von bis zu 10 $\frac{1}{m^2}$.

4 Versuch

In diesem Kapitel werde ich die Versuche, die als Grundlage für meine Daten dienten, kurz beschreiben.
Dabei werde ich vorab den geometrischen Versuchsaufbau, sowie die verwendete Messtechnik erläutern. Danach werde ich auf den Ablauf der Versuche eingehen.
Die Versuche fanden am 27.und 28. November 2006 in einem Raum der Bergische Kaserne (Fern-Melde-Bataillon 820) in Düsseldorf Hubbelrath statt. Die Gruppe der Versuchspersonen bestand aus dort stationierten Soldaten.
Die Probanden gingen durch einen künstlich hergestellten Rundgang. Dabei wurden ihre Bewegungen aufgenommen, was die Grundlage für die Auswertung von Geschwindigkeit, Dichte und Fluss der Personenströme lieferte. Die genaue Gewinnung und Auswertung der Daten wird in Kapitel 5 noch vertieft werden.
Ziel der Versuche ist es, durch den definierten Aufbau der Versuche, vergleichbare Daten über das Verhältnis von Dichte und Geschwindigkeit in einem Personenstrom unter Laborbedingungen zu erhalten.

4.1 Geometrische Versuchsanordnung

Die Versuchsanordnung (Abb.4.1) besteht im Grunde aus einem ovalen Rundgang. Die Seiten des Rundgangs sind durch zwei Stuhlreihen begrenzt. An den Längsseiten befinden sich die Messbereiche, die seitlich durch zwei aneinander gestellte Tische, an die Stuhlreihen anschie-

ßend, begrenzt sind. Im Inneren des Rundgangs wurde ein Raum als eine Art Messzentrale errichtet. Die Wände dieses Raums dienen teilweise auch als innere Begrenzung des Rundlaufs (siehe Abb.4.2).

Die Lauflänge in den Habkreisen an den kurzen Seiten des Rundgangs beträgt ca. 7 m. Über die gesamte Strecke des Rundgangs beträgt die Breite des Gangs 0,85 m.

Der in der schematischen Darstellung (s. Abb.4.1) eingezeichnete Ausgang wird dadurch geöffnet, dass am Ende der Versuche einfach einige Stühle aus dem äußeren Kreis entfernt wurden.

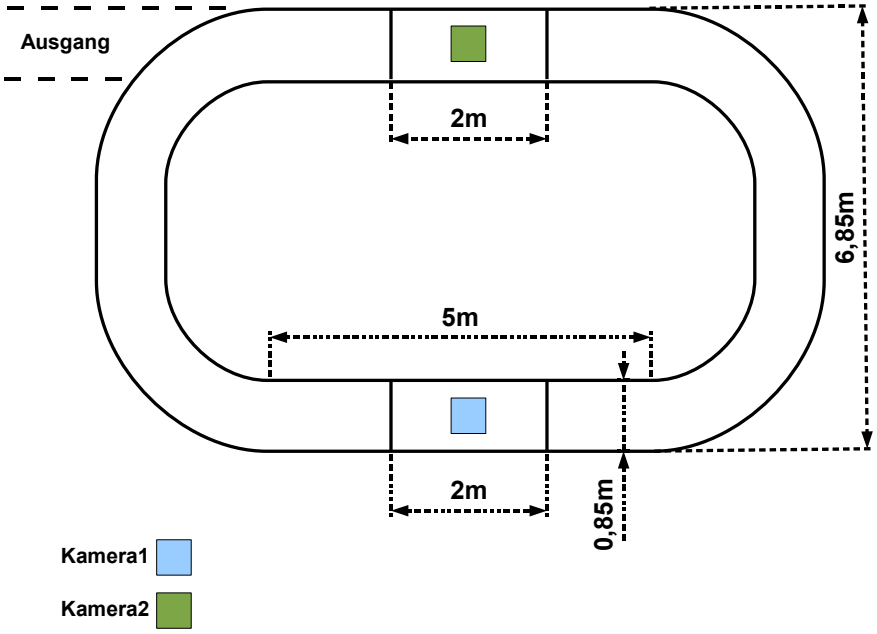


Abbildung 4.1: Schematische Versuchsanordnung

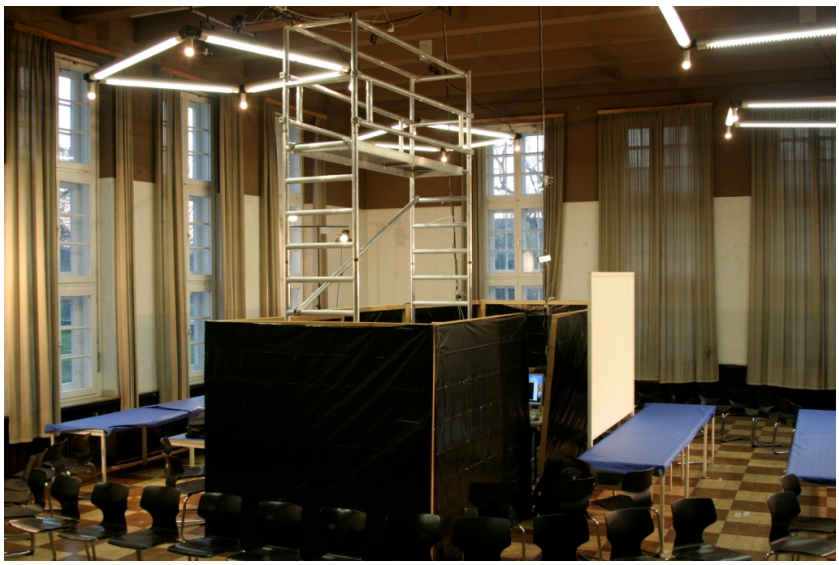


Abbildung 4.2: Versuchsaufbau

4.2 Messgeräte

Zur Aufzeichnung der Personenbewegungen wurden mehrere Kameras verwendet. Zum Einsatz kamen zwei normale DV-Kameras, eine BumbleBee Stereo Kamera, sowie zwei Industriekameras vom Typ uEye UI-2230-C. Die Aufnahmen einer der beiden Industriekameras dienten als Grundlage meiner Auswertung.

Die Auflösunf der Industriekameras beträgt 1024x768 Pixel. Die Bildrate beträgt bis zu 30 Bildern pro Sekunde. Für diese Versuche wurde die Bildrate auf 25 Bilder pro Sekunde eingestellt.

Die Kameras (Abb.4.3 / Abb.4.4) waren über den beiden Messbereichen an den Längsseiten des Rundgangs (siehe Abb.4.1) in einer Höhe von ca 5,35m an der Decke angebracht. Zur Ausrichtung der Kameras dienten am Boden angebrachte Markierungen. Die Kameras waren mit einem Spezial-USB-Kabel, mit einer aktiven Verlängerung auf insgesamt 10 m verlängert, an zwei separaten Rechnern angeschlossen, auf denen die Aufnahmen gespeicht wurden.

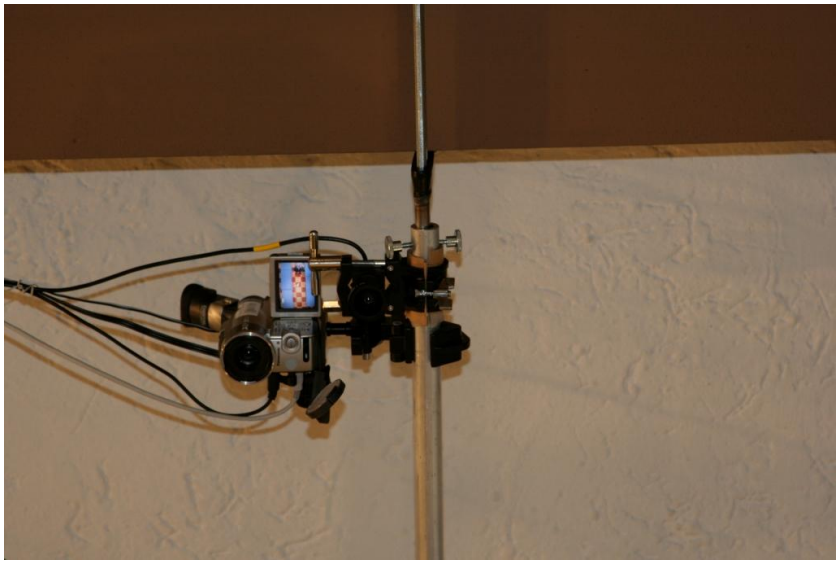


Abbildung 4.3: Kamera 1 (schwarz) mit DV-Kamera

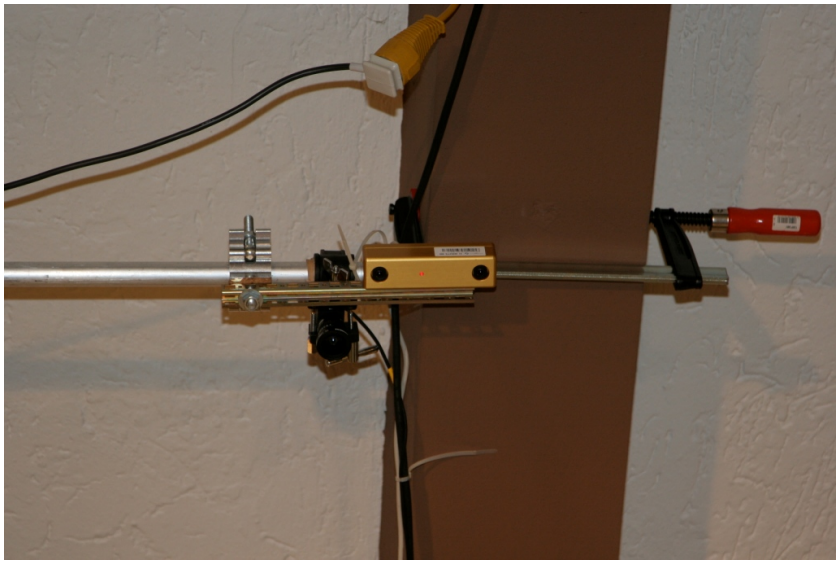


Abbildung 4.4: Kamera 2 (schwarz) mit BumbleBee

4.3 Ablauf der Versuche

Die Versuche wurden immer mit derselben Versuchsanordnung durchgeführt. Die Bewegungsrichtung war jedesmal unidirektional, es wurde keine Motivation für die Probanden vorgegeben.

Variiert wurde die Anzahl der Probanden im Rundgang. Insgesamt wurden 10 Versuche durchgeführt mit folgenden Pesonenzahlen:

$N = 20, 30, 40, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80$

Die Personen betraten vor Versuchsbegin den Rundlauf und verteilten sich dort relativ gleichmäßig. Bei einem Signal setzte sie sich dann in Bewegung.

Die Versuche dauerten etwa bis zu 2,5 Minuten. Am Ende des Versuchs wurde der Ausgang geöffnet, und die Probanden verließen den Rundgang.

Durch die relativ geringe Wegbreite des Rundgangs war Überholen für die Probanden so gut wie ausgeschlossen.

Es sei hier darauf hingewiesen, dass die Disziplin der Probanden bei den Versuchen mäßig war. Es wurde nach oben und unten, zur Seite und nach hinten geschaut. Zum Teil wurden Staus provoziert oder gerempelt. Ein Einfluss dieses Verhaltens auf die Messergebnisse kann nicht ausgeschlossen werden.

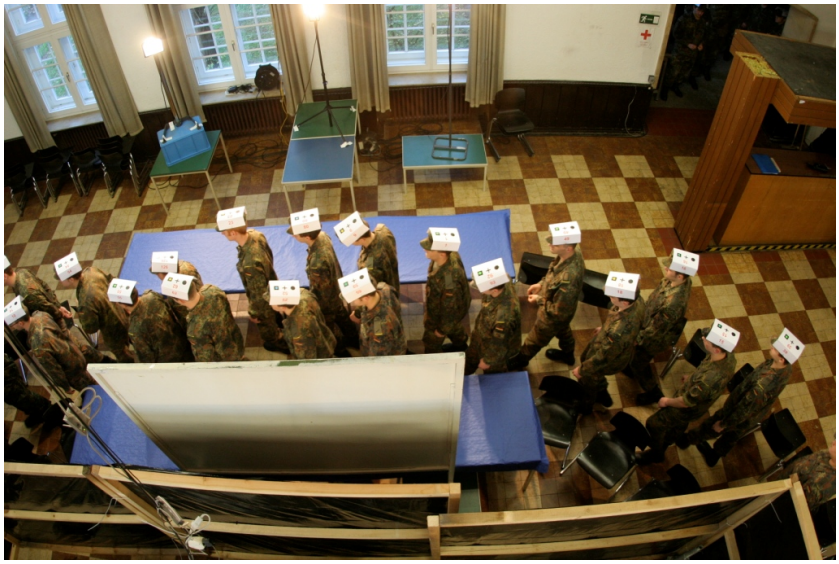


Abbildung 4.5: Probanden im Messbereich (hier bei N=75)

Abbildung 4.6: Probanden im Rundgang (hier bei N=75)

5 Auswertung

Wie bereits oben erwähnt, wird in diesem Kapitel die Auswertung der Aufnahmen im einzelnen beschrieben, die bei der Durchführung der Versuche gemacht wurden. Diese Auswertung erfolgte manuell durch Betrachtung der Aufnahmen und Notieren der personenbezogenen Durchgangszeiten durch das Messfeld.
Ziel der Auswertung ist es, auf Grundlage der zeitlichen personenbezogenen Bewegungsverläufe in den einzelnen Versuchen, ein Fundamentaldiagramm des Geschwindigkeits- Dichte-Verlaufs zu erstellen.
Ein Vergleich der gewonnenen Ergebnisse mit anderen Literaturquellen wird dann in Kapitel 6 durchgeführt.

5.1 Ermittlung der Rohdaten

Wie erwähnt, wurden während der einzelnen Versuche, die etwa je 2 bis 3 Minuten dauerten, mit mehreren Kameras Filmaufnahmen gemacht. Dabei waren die Kameras in einer erhöhten Position über den Messbereichen an der Decke des Raums angebracht. Dadurch war es möglich, den gesamten Messbereich einschließlich der Tische aufzunehmen.
Die Filme wurden dabei digital auf Rechnern gespeichert.
In dieser Arbeit habe ich ausschließlich die Aufnahmen von Kamera 2 (die Position ist in Abb.4.1 zu erkennen) ausgewertet.
Die Datenermittlung wurde mit dem Betrachtungs-Programm Petrack durchgeführt, nachdem

die Aufnahmen von Maik Boltes vom Forschungszentrum Jülich entzerrt wurden. Die Verzerrungen waren perspektivischer Art. Da der Boden des Raums, in dem die Versuche durchgeführt wurden, ein Schachbrett-Muster hat, diente dieses als gutes Orientierungsgitter für eine perspektivische Entzerrung. Über den genauen Vorgang der Entzerrung werde ich hier nicht weiter eingehen. Diese perspektivische Entzerrung ist recht genau, und es kann von einem maximalen Fehler von ca 1,5 cm am Bildrand der Aufnahmen ausgegangen werden. Im Zentrum der Aufnahmen, wo sich der Messbereich befindet, ist der Fehler fast Null.
Zur Vermessung der Bewegungen legten wir mit Petrack drei virtuelle parallele Linien im Bereich des Messfeldes über die Aufnahmen (s. Abb.5.1). Die Linien hatten einen Abstand von 1 m. Damit war es möglich, eine räumliche Vermessung vorzunehmen. Bei der Auswertung der Videos legte ich die Daten für Linien 1 und 3 zugrunde. Damit hatte das Messfeld eine Länge von 2 m. Bei einer Breite des Rundgangs von 0,85 m ergibt sich daraus eine Grundfläche des Messfeldes von $A = l \cdot b = 1,7m^2$.

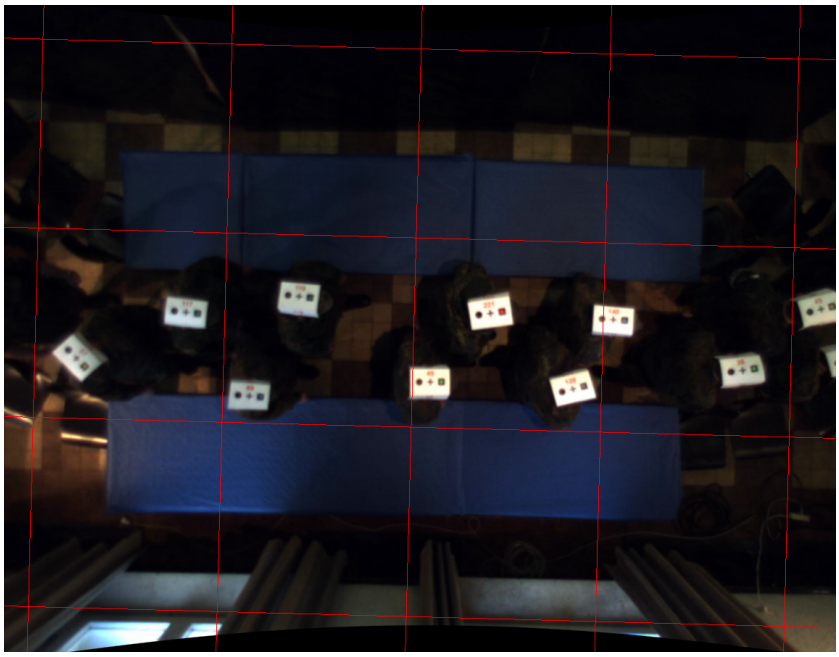
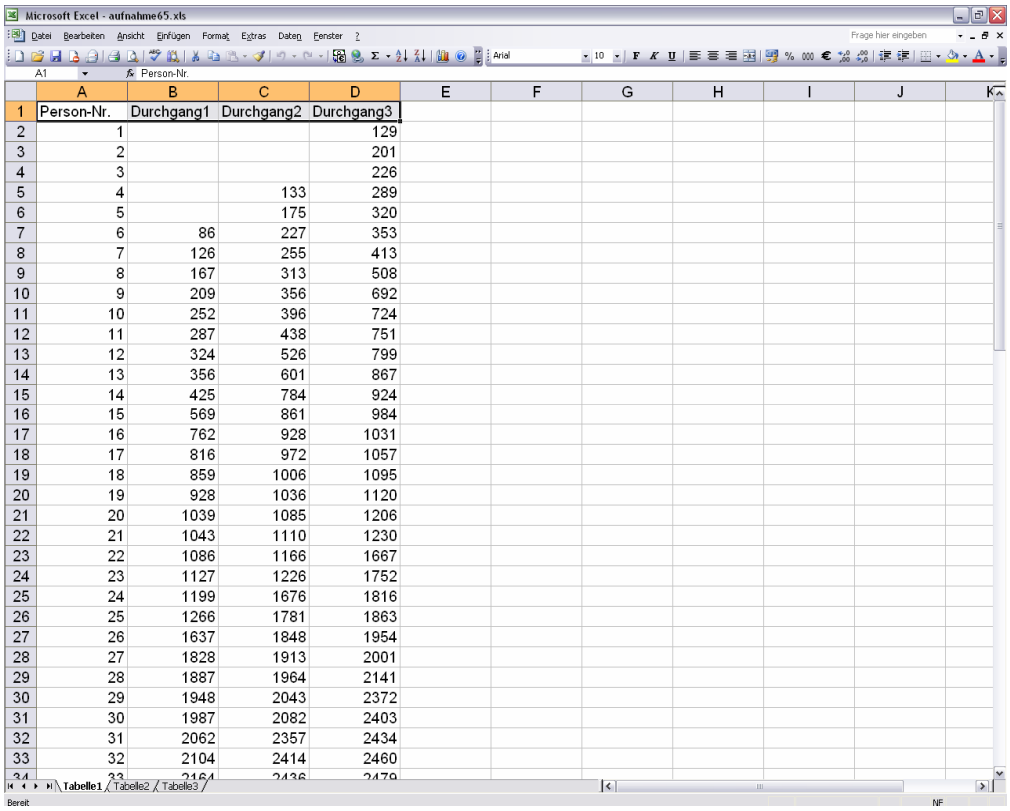


Abbildung 5.1: Auswertung der Filme mit Patrack (hier bei N=40); zur Messung wurden die drei senkrechten Linien im Zentrum der Aufnahme verwendet

Die Zeitliche Vermessung wurde mit Hilfe eines Zeitstempels durchgeführt, der in einem separaten Fenster des Programms mitlief. Dieser gab die Zeit in Frames (Bildern) wieder. Es war möglich, das Viedeo Frame für Frame zu betrachten, also mit einer Auflösung von 0,04s (mit 25 Frames pro Sekunde).

Bei der manuellen Auswertung betrachtete ich die Aufnahmen und notierte zum Zeitpunkt des Durchgangs über jede der Linien für jede Person die Zahl der Frames. Als Orientierungspunkt diente dabei das Kreuz, das gut sichtbar auf den Mützen der Probanden angebracht war.

Die Duchgangszeiten übertrug ich in eine Excel Tabelle (s. Abb.5.2).



Microsoft Excel - aufnahme65.xls

	A	B	C	D
1	Person-Nr.	Durchgang1	Durchgang2	Durchgang3
2	1			129
3	2			201
4	3			226
5	4		133	289
6	5		175	320
7	6	86	227	353
8	7	126	255	413
9	8	167	313	508
10	9	209	356	692
11	10	252	396	724
12	11	287	438	751
13	12	324	526	799
14	13	356	601	867
15	14	425	784	924
16	15	569	861	984
17	16	762	928	1031
18	17	816	972	1057
19	18	859	1006	1095
20	19	928	1036	1120
21	20	1039	1085	1206
22	21	1043	1110	1230
23	22	1086	1166	1667
24	23	1127	1226	1752
25	24	1199	1676	1816
26	25	1266	1781	1863
27	26	1637	1848	1954
28	27	1828	1913	2001
29	28	1887	1964	2141
30	29	1948	2043	2372
31	30	1987	2082	2403
32	31	2062	2357	2434
33	32	2104	2414	2460

Abbildung 5.2: Tabelle der Durchgangszeiten (in Frames) für N=65

Folgende Ausführungen beziehen sich auf den Versuch mit $N = 65$ Personen. Diese sind analog auf alle übrigen Versuche zu übertragen.

Bei obigem Beispiel (Abb.5.2) befinden sich bei Versuchsbeginn 5 Personen innerhalb des Messfeldes. Zu erkennen ist dies daran, dass bei diesen Personen keine Durchgangszeiten für Linie 1 vorliegen. Dies ist der Fall, da sich die Probanden vor Versuchsbeginn, wie erwähnt, relativ gleichmäßig im Rundgang verteilten. Bei der Auswertung der Daten habe ich diese, im Messfeld losgehenden Personen nicht berücksichtigt.

Desweiteren habe ich Personen 6 bis 12 nicht mit in die Auswertung hinein genommen. Erst als Person 6 bei $t = 353$ Frames über Linie 3 schreitet, fange ich an, die Daten der Personen, die in den Messbereich eintreten, zu verwenden. Das bedeutet, dass Person 13, die bei $t = 356$ Frames Linie 1 überschreitet, die erste Person ist, deren Daten in die Auswertung einfließen. Dies möchte ich im Folgenden kurz erläutern.

Da ich die Personen, die von Anfang an im Messbereich standen, gar nicht betrachtet habe, stellt sich die schematische Anordnung im Messfeld für Personen 6 bis 12 dar, wie in Abb.5.3. Bei der Ermittlung der Dichte im Messfeld werden alle Personen ab Person 6 gezählt. Wenn Person 6 über Linie 1 geht (bei t=86 Frames), ist sie die einzige Person im Messfeld, die gezählt wird, wodurch sich eine geringe Dichte errechnet. In Wirklichkeit ist Person 6 zu diesem Zeitpunkt nicht die einzige Person im Messfeld. Die Personen, die sich beim Versuchsbeginn im Messfeld befanden, werden ,wie gesagt, jedoch nicht berücksichtigt.

Aus diesem Grund ist eine realistische Darstellung der Dichte im Messfeld erst nach dem Zeitpunkt t=353 Frames möglich, wenn Person 6 Linie 3 passiert. Danach gibt es keine 'unsichtbaren' Personen mehr.

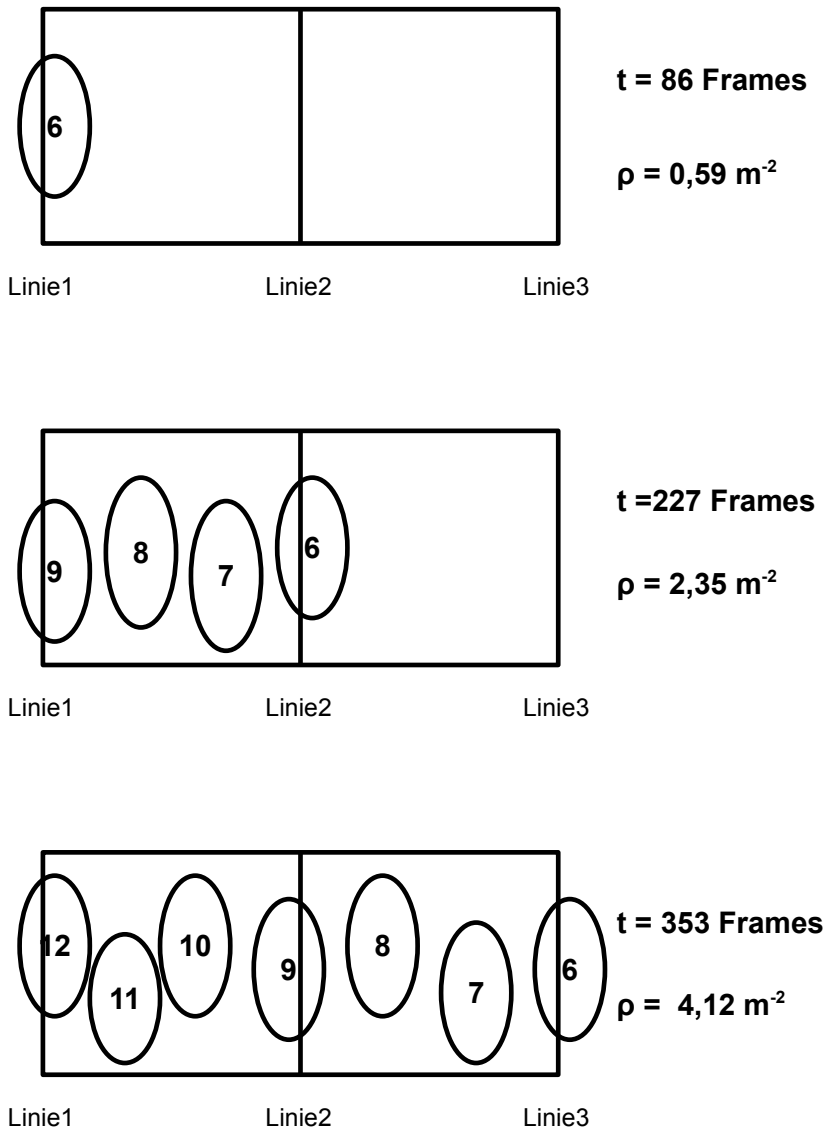


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung der Zustände im Messbereich bei den Durchgängen der 3 Linien von Person 6 mit Zeitangabe in Frames und berechneter Dichte

5.2 Umrechnung

Die Durchgangszeiten der einzelnen Personen sowie die räumlichen Maße des Messfeldes bilden die Grundlage für die Auswertung und wurden in verwertbare Daten umgerechnet.
Um die Zeit in Sekunden anstelle von Frames anzugeben, habe ich die Durchgangzeiten zuerst mit der Formel

$$t\,[s] = \frac{t\,[frames]}{25\left[\frac{frames}{s}\right]} \tag{5.1}$$

umgerechnet.

Die Geschwindigkeit jeder Person wird, wie schon in Kapitel 2.2 erwähnt, nach der Formel

$$\overline{v}_i = \frac{\Delta s}{\Delta t_i}\left[\frac{m}{s}\right] \tag{5.2}$$

berechnet, mit

$$\Delta s = 2m \tag{5.3}$$

und

$$\Delta t_i = t_{3,i} - t_{1,i} \tag{5.4}$$

Es handelt sich bei der Einheit also um die mittlere Geschwindigkeit von Peson i innerhalb des Messfeldes zwischen Linie 1 und Linie 3.

Die Dichte ist hier ebenfalls eine gemittelte personenbezogene Größe. Die grundlegende Formel ist 2.1.
Zur berechnung der Dichte im Messfeld über den gesamten Zeitraum Δt_i wird der Mittelwert errechnet über

$$\overline{\rho_i} = \frac{\sum_{k=n_{1,i}}^{n_{3,i}} N_k}{A} \cdot \frac{1}{n_{3,i} - n_{1,i}}\left[\frac{1}{m^2}\right] \tag{5.5}$$

wobei

$$n_{3,i} = t_{3,i}\,[s] \cdot 25\left[\frac{frames}{s}\right] \tag{5.6}$$

und

$$n_{1,i} = t_{1,i}\,[s] \cdot 25 \left[\frac{frames}{s}\right] \tag{5.7}$$

Der Mittelwert berechnet sich über die frame-weise Summierung der Personenzahl N innerhalb des Messfeldes, dividiert durch die Summe der Frames im Zeitraum t_1 bis t_3 und dividiert durch die Grundfläche $A = 1,7m^2$.

5.3 Zeitliche Verläufe von Dichte und Geschwindigkeit

Im Folgenden stelle ich die zeitlichen Verläufe von Dichte und Geschwindigkeit über die gesamten Messzeiträume beispielhaft für $N = 20$ (Abb.5.4), $N = 30$ (Abb.5.5), $N = 70$ (Abb.5.6) und $N = 80$ (Abb.5.7) dar.
Dazu habe ich die personenbezogenen Mittelwerte, sowohl von Dichte als auch von Geschwindigkeit, den Zeiträumen zugeordnet, in denen sich die Personen im Messfeld aufgehalten haben. Die Längen dieser Zeiträume entsprechen den Längen der Balken im Grafen.
Auf der x-Achse ist die Zeit der Versuche aufgetragen. Die Skalierung der Dichte ist auf der y-Achse am linken Rand der Grafik zu sehen. Dort habe ich den Maximalwert auf 5 $\frac{1}{m^2}$ gesetzt, da sich der Maximalwert der Dichte bei $N = 70$ auf 4,54 $\frac{1}{m^2}$ belief. An der Skala am rechten Rand der Grafik ist die Geschwindigkeit abzulesen. Hier betrug der Maximalwert 1,45 $\frac{m}{s}$ bei $N = 20$. Der Maximalwert der Skalierung ist auf 1,5 $\frac{m}{s}$ festgelegt.

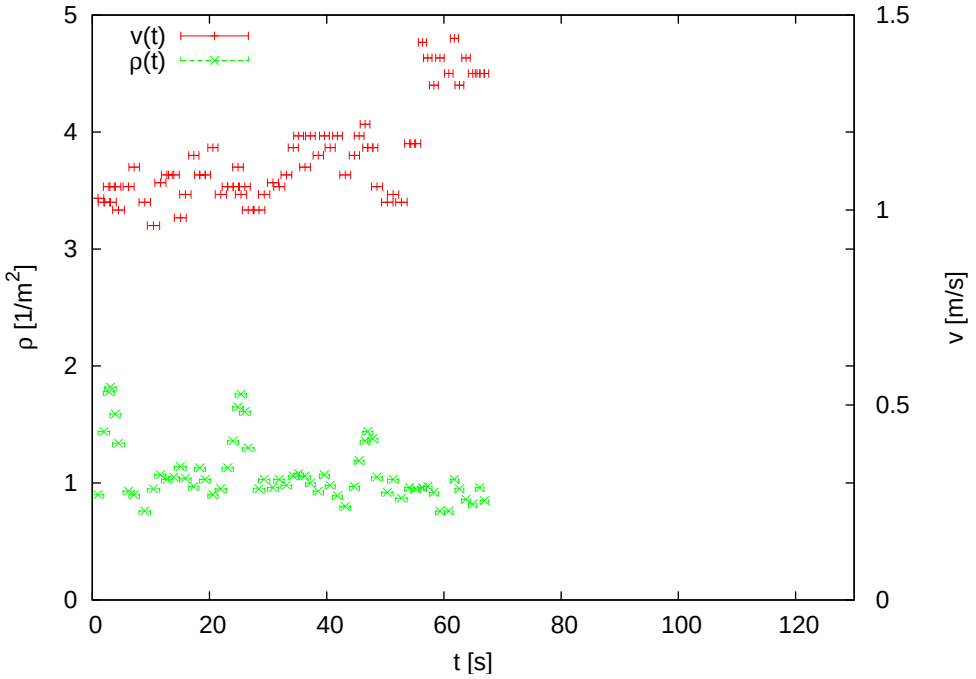


Abbildung 5.4: zeitliche Verläufe von Zeit und Geschwindigkeit bei N=20

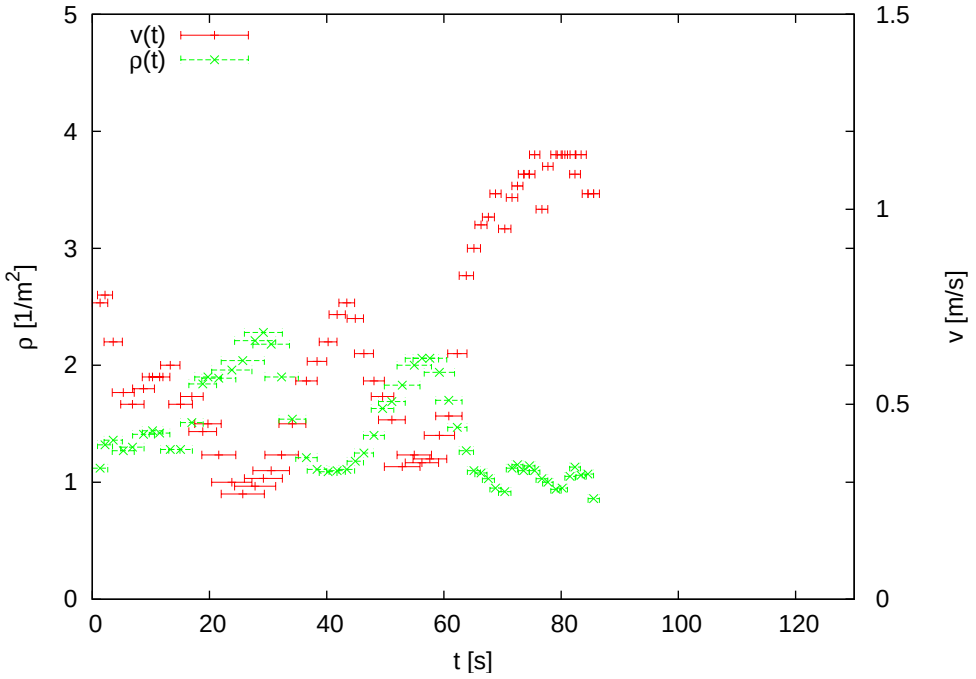


Abbildung 5.5: zeitliche Verläufe von Zeit und Geschwindigkeit bei N=30

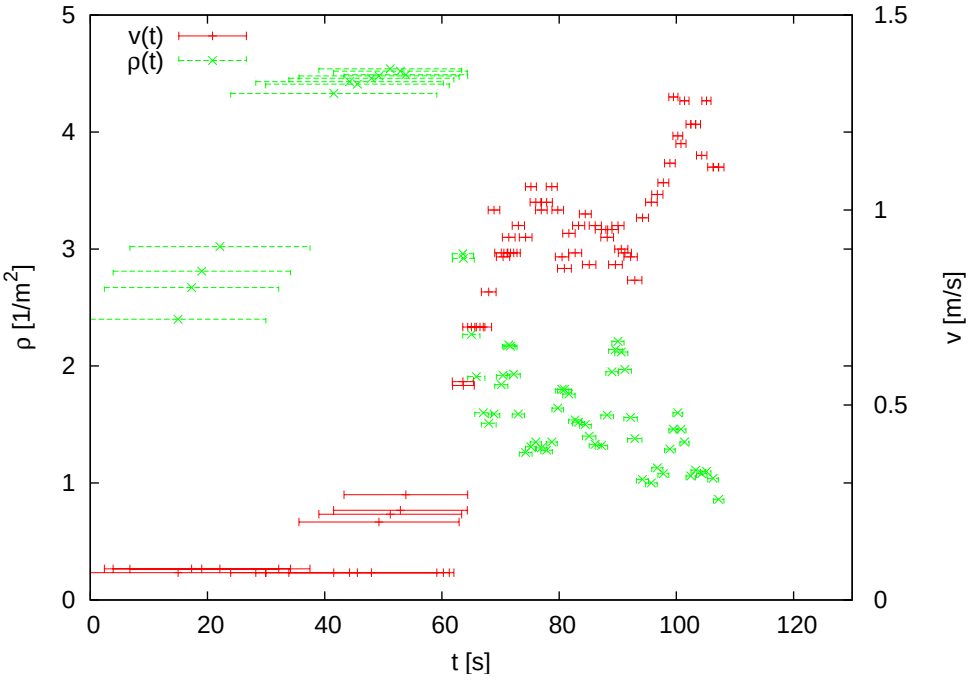


Abbildung 5.6: zeitliche Verläufe von Zeit und Geschwindigkeit bei N=70

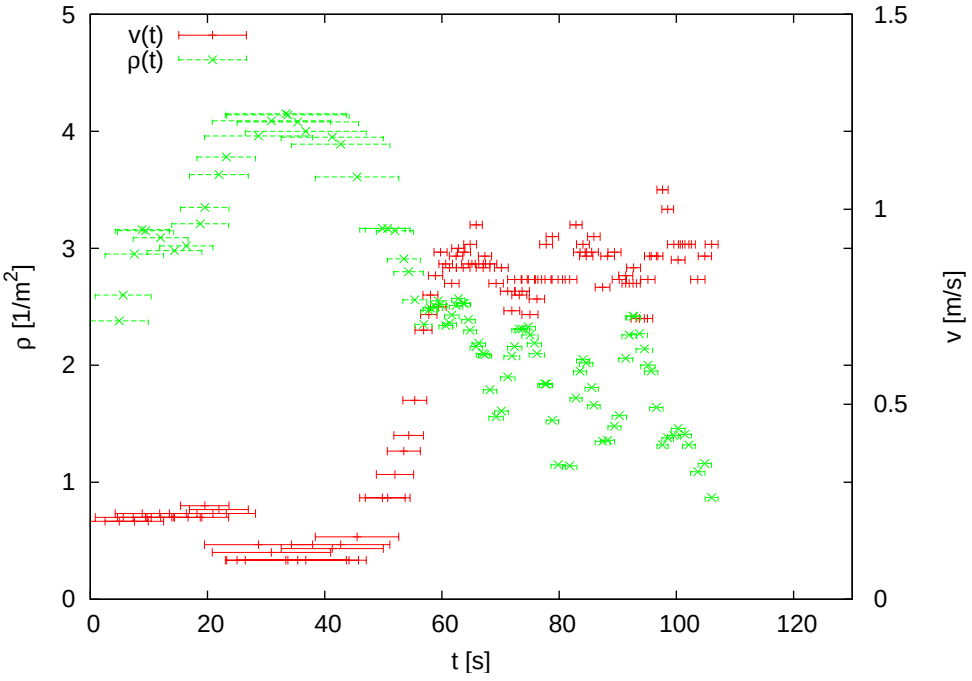


Abbildung 5.7: zeitliche Verläufe von Zeit und Geschwindigkeit bei N=80

Gut zu erkennen an den Grafiken ist die Korrelation der Fluktiuationen von Dichte und Geschwindigkeit. Dies ist erwartungsgemäß. Bei geringer Dichte sind hohe Gechwindigkeiten möglich, bei höherer Dichte sinkt dagegen die Möglichkeit, sich frei zu bewegen, und die Geschwindigkeit wird reduziert.
Auch zu erkennen ist, dass die Geschwindigkeiten zum Ende der Versuche steil ansteigen und hohe Werte erreichen, die im Bereich der freihen Gehgeschwindigkeit liegen. Diese ist bei Weidmann ([11]) mit 1,34 $\frac{m}{s}$ angegeben.
Dieser plötzliche steile Anstieg ist mit der Öffnung des Ausgangs des Rundgangs zu erklären. Sobald der Ausgang geöffnet ist, strömen die Probanden aus dem Rundgang, wodurch die Dichte fällt und damit die Geschwindigkeit steigt. Auf diese Unregelmäßigkeit im Verlauf der Grafen werde ich später noch eingehen.
Desweiteren fällt auf, dass die Zeit-Balken bei hoher Dichte sehr lang werden. Dies bedeutet, dass sich die Probanden über längere Zeiträme im Messfeld aufgehalten haben.
Die Aufenthaltsdauern Δt_i der Probanden im Messfeld habe ich beispielhaft für $N = 70$ und $N = 80$ in folgenden Diagrammen aufgetragen:

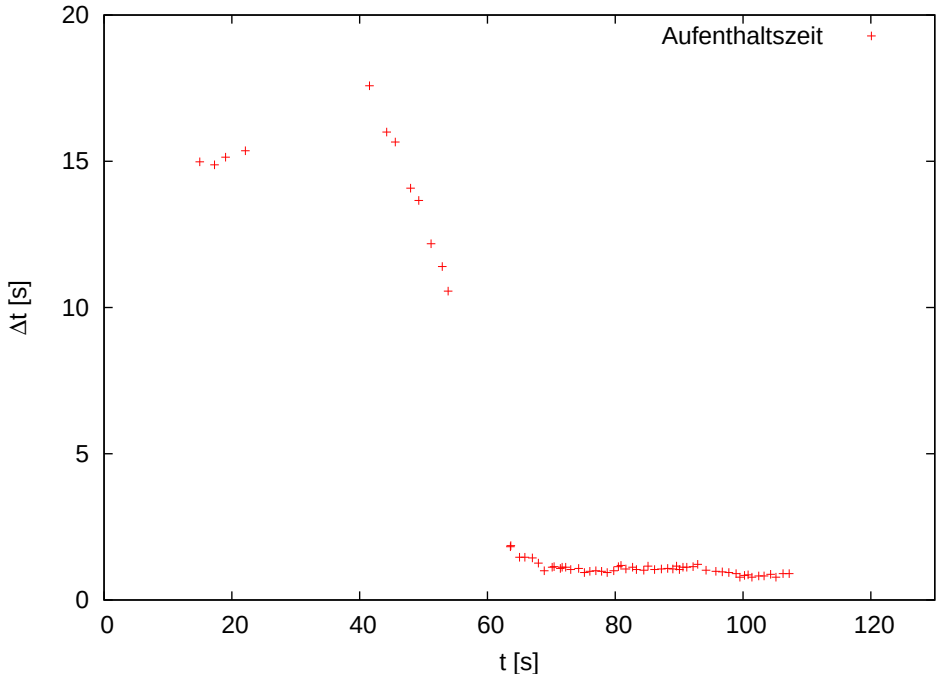


Abbildung 5.8: Aufentahltszeiten der Probanden im Messfeld bei N=70

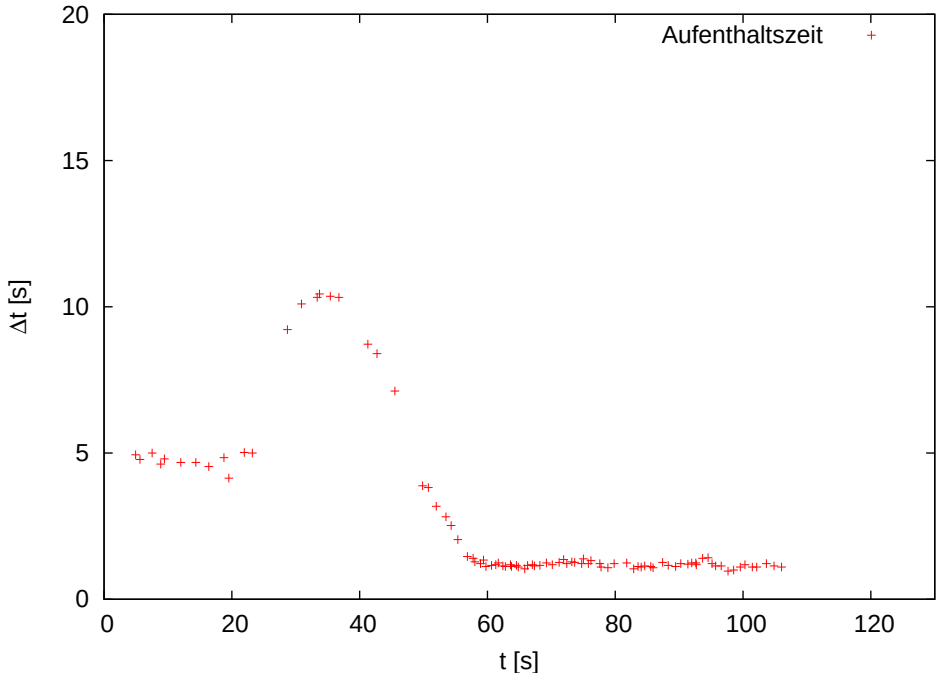


Abbildung 5.9: Aufentahltszeiten der Probanden im Messfeld bei N=80

Besonders bei $N = 70$ (Abb.5.8) fällt auf, dass die Aufenthaltszeiten im Messfeld ausgesprochen lang sind. Bei der Betrachtung der Filmaufnahmen ist mir aufgefallen, dass bei der Personenzahl von 70 nahezu kein Personenstrom stattfindet, bis der Ausgang geöffnet wird.
Aufgrund des zeitweisen Stillstands der Personen bei $N = 70$ (s. Abb.5.6) bei einer Dichte von ca. 4,5 $\frac{1}{m^2}$ stelle ich fest, dass dies die maximale Dichte ist, die ich in den Versuchen ermittelt habe. Bei dieser Dichte errscht Stillstand!
Beim Versuch mit $N = 80$ (Abb.5.9) sind die Verweilzeiten zwar auch lang, aber bei der Betrachtung der Aufnahme ist eine nahezu stetige Beweung der Personen im 'Trippelschritt' zu erkennen.
Da bei Versuch mit $N = 70$ kein verwertbarer Personenstrom auftritt, habe ich diese Aufnahme in meiner weiteren Betrachtung nicht berücksichtigt.
Bei allen übrigen Versuchen waren die Verweilzeiten geringer als bei $N = 80$. Daher habe ich bis auf $N = 70$ alle Aufnahem weiter analysiert.
Als Besonderheit soll hier noch festgestellt werden, dass ausschließlich beim Versuch mit $N = 20$ (Abb.5.4) keinerlei Staus auftraten. Lediglich bei diesem Versuch kam es vor, dass im stationären Zustand der Messung Geschwindigkeiten oberhalb von 1 $\frac{m}{s}$ bis hin zur freien Gehgeschwindigkeit nach Weidmann ([11]) festgestellt wurden. Die im Diagramm plötzlich auftretenden Anstiege der Dichte entstanden dadurch, dass sich einzelne Personenhäufungen mit stetiger Geschwindigkeit durch das Messfeld bewegten. Die Geschwindigkeit wurde durch die höhere Dichte dabei nicht beeinflusst.
Die sehr hohen Geschwindigkeiten am Ende des Versuchs mit $N = 20$ folgen nicht dem übrigen Verlauf des Grafen. Sie entstanden vielmehr dadurch, dass sich die Personen, die den geöffneten Ausgang vor Augen hatten, besonders beeilten, den Rundgang zu verlassen. Zur Erstellung des stationären Diagramms (Abb.5.11) werde ich diese Daten nicht verwenden.

5.4 Geschwindigkeit in Abhänghigkeit von der Dichte

Folgendes Diagramm (Abb. 5.10) stellt die personenbezogene Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Dichte dar.

Aufgetragen sind die Daten über den gesamten Messzeitraum, abgesehen von den ausgefilterten Daten zu Anfang jedes Versuchs, was ich in Kapitel 5.1 erläutert habe.

Diese Darstellung, die auch den nicht stationären Messzustand nach Öffnung des Ausgangs zeigt, nenne ich im weiteren Verlauf der Auswertungen dynamisches Diagramm.

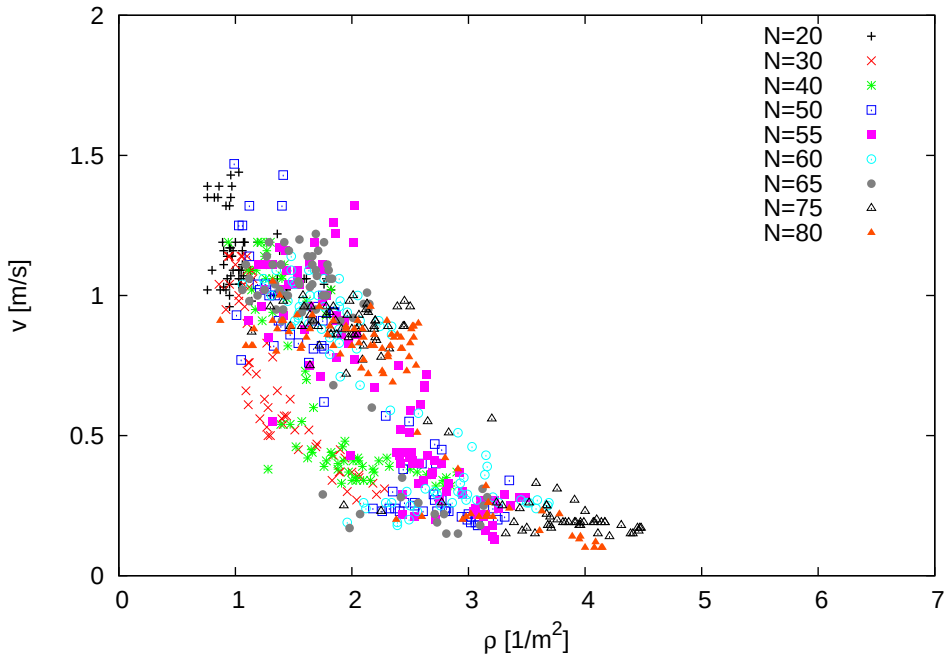


Abbildung 5.10: Geschwindigkeit über Dichte für alle N über den gesamten Messzeitraum (dynamisch)

Zu erkennen ist, dass sich die Punkte grob in zwei Verteilungshaufen aufteilen.

Eine Häufung tritt im Bereich der Dichte von 0,8 bis 2,6 $\frac{1}{m^2}$ und der Geschwindigkeit von 0,7 bis 1,5 $\frac{m}{s}$ auf.

Diese Punkte stellen hautsächlich die Personen dar, die nach dem Öffnen des Ausgangs das

Messfeld passierten, sowie alle Personen des Versuchs mit $N = 20$. Hier ist die Dichte relativ gering, wodurch die Geschwindigkeit hoch werden kann.
Eine weiter Häufung tritt in einem breiten Bereich mit der Dichte von 1,8 bis 4,5 $\frac{1}{m^2}$ und Geschwindigkeit von 0,1 bis 0,5 $\frac{m}{s}$ auf. Darin sind die Personen aufgetragen, die bei hoher Dichte nur geringe Geschwindigkeiten erreichen. Bei ihnen ist der Ausgang nicht geöffenet und das Messsystem befindet sich in einem stationären Zustand.
Zur Darstellung des stationären Zustands habe ich die Messdaten, die am Ende der Versuche nach dem Öffnen des Ausgangs entstanden sind, ausgeschnitten.
Als Ansatzpunkt für dieses Schneiden dient der Zeitpunkt, an dem die zeitlichen Verläufe der Geschwindigkeit an den Versuchsenden beginnen, stark anzusteigen. Bei $N = 30$ ist dies zum Beispiel bei $t = 58s$ (s. Abb.5.5). Auch ausgeschnitten von den Datensätzen habe ich die Daten bis zu 10 Sekunden vor dem Zeitpunkt des steilen Anstiegs der Geschwindigkeitskurve am Ende der Versuche. Dadurch soll sichergestellt werden, dass wirklich alle Daten aus den stationären Verläufen der Versuche stammen.
Außerdem habe ich die Daten, die aus den ersten 10 Sekunden jedes Versuchs stammen ausgeschlossen. Dadurch sollen eventuelle Unregelmäßigkeiten zu Anfang der Versuche, wie das Einpendeln der Geschwindigkeit oder Unaufmerksamkeiten der Probanden beim Losgehen, vermieden werden.
Die staionären Daten habe ich in folgendem Diagramm (Abb.5.11) als Geschwindigkeit über Dichte aufgetragen.

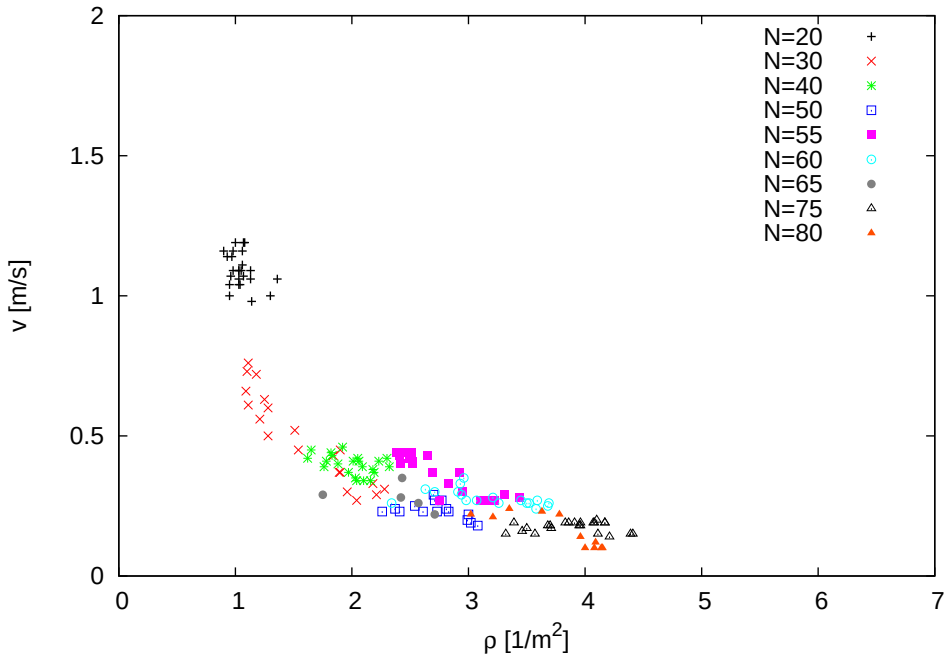


Abbildung 5.11: Geschwindigkeit über Dichte für alle N über den gesamten Messzeitraum (stationär)

Zu erkennen ist, dass der erwähnte Punktehaufen mit den hohen Geschwindigkeiten, bis auf die Punkte von $N = 20$, vollständig verschwunden ist.
Dies bestätigt die Annhame, dass dieser Punktehaufen die Daten des nicht stationären Verlaufs der Versuche beinhalt.
Die Personen bei $N = 20$ bewegen sich im Vergleich zu $N = 30$ mit höheren Geschwindigkeiten bei gleicher Dichte und fallen damit etwas aus dem Rahmen. Eine Erklärung dafür könnte sein, dass beim Versuch mit $N = 20$ keine Staus aufgetreten sind. Deshalb ist es denkbar, dass sich die Personen 'sicherer' gefühlt und an einen schnelleren Personenfluss gewöhnten haben. Außerdem fallen die Verzögerungs- und Beschleunigungszeiten weg, die die Personen nach dem Auflösen eines Staus benötigen, wieder die vorherige Gehgeschwindigkeit zu erlangen.
Die Tatsache, dass sich ausschließlich bei $N = 20$ keine Staus gebildet haben, soll hier noch

einmal besonders genannt werden. In der Analyse (Kap.6) der Ergebnisse wird diese Tatsache aufgegriffen.

6 Analyse

In diesem Kapitel werde ich die Literaturquellen, die ich im Kapitel 3 vorgestellt habe, mit meinen Versuchsergebnissen vegleichen.
Dazu werde ich die jeweiligen Fundamentaldiagramme der Geschwindigkeit mit dem von mir ermittelten vergleichen.
Auf Basis dieser Gegenüberstellung der Fundamentaldiagramme werde ich versuchen, Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Literaturquellen mit meinen Untersuchungen zu erarbeiten.
Von Interesse ist hierbei zum Beispiel, in wie weit die äußeren Versuchsbedingungen, wie die Breiten der beobachteten Wege, die Bewegungsrichtung (uni- / bidirektional) oder die Motivation der Probanden die Ergebnisse der Untersuchung beeinlussen.
Ferner werde ich versuchen, eine Aussage darüber zu machen, wie sich die Anwendung moderner Aufnahmetechnik und der damit verbundenen hohen Auflösung und zeitlichen Genauigkeit der Aufnahmen, im Vergleich zu älteren Verfahren auf die Ergebnisse auswirkt.

6.1 Hankin & Wright

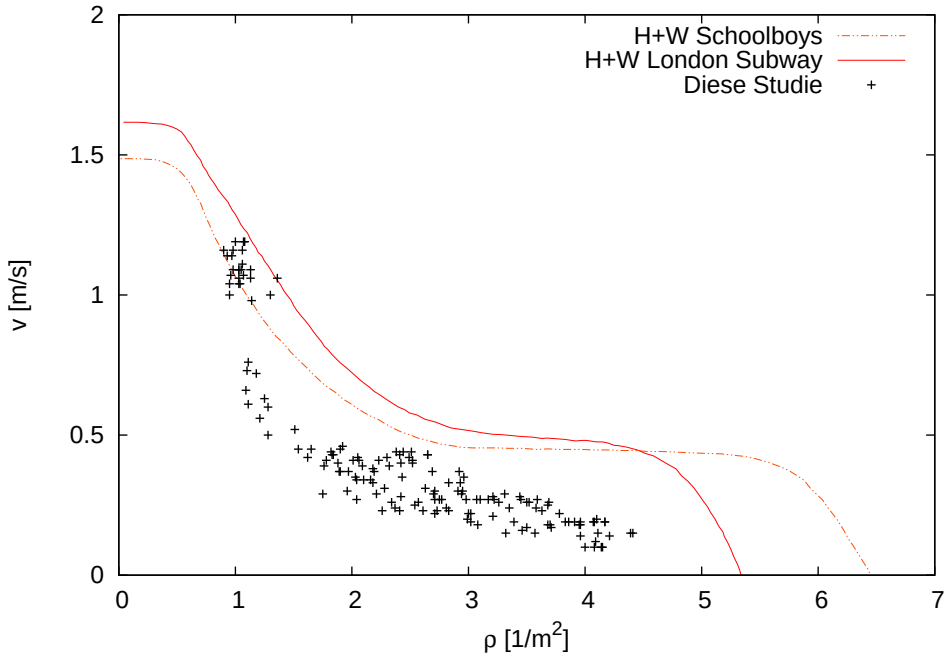


Abbildung 6.1: Geschwindigkeit über Zeit (Hankin & Wright und diese Studie)

Beim Vergleich der Kurvenverläufe von Hankin & Wright (s. auch Kap.3.1) mit meinem Kurvenverlauf lässt sich feststellen, dass sie für die Personenzahl von 20 in meinen Untersuchungen recht gut übereinstimmen.

Bei den übrigen Personenzahlen erreichen die Grafen von Hankin & Wright eine höhere Geschwindigkeit bei gleicher Dichte.

Da bei meinen Untersuchungen lediglich beim Versuch mit $N = 20$ keine Staus aufgetreten sind, könnte man darauf schließen, dass bei den Versuchen von Hankin & Wright bei keiner Dichte Staus aufgetreten sind. Dadurch könnten die Geschwindigkeiten bei gleicher Dichte wie bei meinen Untersuchungen höhere Werte erreichen. Der bereits genannte Effekt des Geschwindigkeitsverlustes durch die Verzögerung und Beschleunigung bei auftretenden Stauwellen würde nicht stattfinden.

Betrachtet man die Art der Versuchsdurchführung bei Hankin & Wright, ist allerding die Mög-

lichkeit, dass keine Staus aufgetreten sind zumindest beim Versuch mit den Schuljungen gering.

Bei den Versuchen in der U-Bahn machen die Autoren keine Angaben über die Maße der Messräume. Es ist also möglich, dass der Personenstrom seitlich nicht eingegrenzt war und bei Staubildung ausweichen konnte.

Doch beim Versuch an der Schule, wo die Breite des Weges $1,30m$ betrug, müsste man eigentlich mit Staubildung bei hoher Dichte rechnen, da die seitliche Begrenzung des weges durch Lattenzäune ein Ausweichen der Versuchspersonen verhinderte. Hohe Dichten wurde mit bis zu 6 $\frac{1}{m^2}$ durchaus erreicht.

Es ist hier denkbar, dass bei den Versuchen die Fasen, in denen Staus aufgetreten sind, gar nicht in der Auswertung berücksichtigt wurden, was die Ergebnisse beeinflussen würde.

Auch wird die Messmethode, die bei den Versuchen in den U-Bahn-Staionen relativ genau beschrieben wurde, keine hohe Messgenauigkeit liefern können, was die Vergleichbarkeit weiter erschwert.

Eine eindeutige Aussage über die Vergleichbarkeit der Ergebnisse kann ich hier nicht treffen, da ich nicht genügend Informationen über die Durchführung der Versuche und die Berechnung der Daten habe.

6.2 Oeding

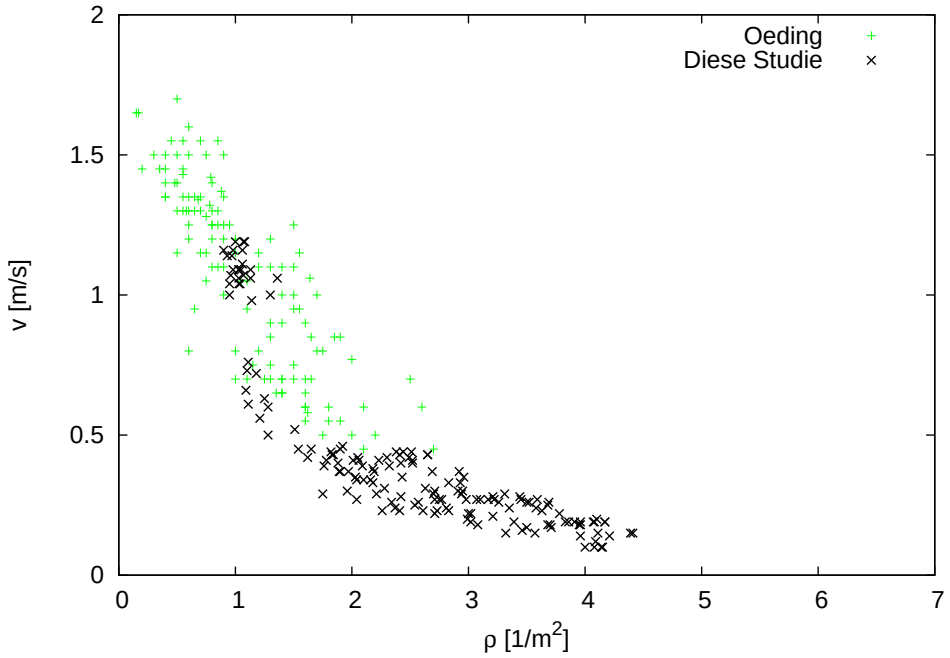


Abbildung 6.2: Geschwindigkeit über Zeit (Oeding und diese Studie)

Die Daten, die Oeding (s. auch Kap.3.2) ermittelt hat, stellen sich bis zu einer Dichte von ca. 2 $\frac{1}{m^2}$ ähnlich dar, wie die Grafen von Hankin & Wright.

Auch hier stimmen die Daten meiner Untersuchungen bei $N = 20$ sehr gut mit den Ergebnissen Oedings überein.

Ebenso sind die Geschwindigkeiten bei Oeding, im Vergleich zu denen, die ich bei anderen Personenzahlen ermittelt habe, für die gleichen Dichten höher.

Da Oeding keine Daten für Dichten oberhalb von ca. 2,8 $\frac{1}{m^2}$ liefert, kann ich hierfür keinen Vergleich anstellen.

Leider sind in der Veröffenlichung von Oeding keine Informationen über die dimensionierungen der Messbereiche zu entnehmen. Man kann aber aufgrund der geringen Dichten davon ausgehen, dass die beobachteten Gehwege in Innenstädten, an Werksgeländen und Soprtstadien relativ große Breiten aufwiesen.

Die Tatsache, dass die Geschwindikeiten im Vergleich zu meinen Untersuchungen relativ höher waren (außer bei $N = 20$) lässt auch hier darauf schließen, dass bei Oedings Beobachtungen keine Staus aufgetreten sind. Die Personenströme hatten wohl relativ gleichmäßige Verläufe.

Auch die Motivation der Fußgänger kann hier eine Rolle spielen. Es kann davon ausgegangen werden, dass Menschen im Berufs- und Werkverkehr eine größere Eile an den Tag legen als die Probanden in unseren Versuchen.

Die Ermittlung der Daten hat bei Oeding schon eine realtiv hohe Genauigkeit. Sie wurde nicht vor Ort durch Zählungen, sondern durch die Analyse von Filmaufnahmen durchgeführt. Deshalb kann man eine grobe Fehlerbildung bei der Auswertung hier wohl ausschließen.

6.3 Older

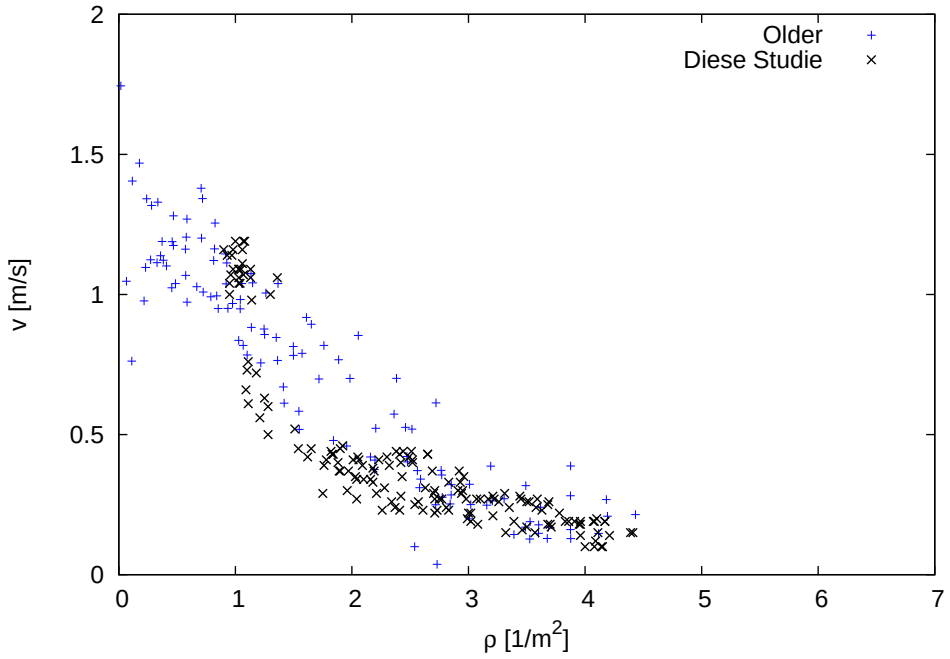


Abbildung 6.3: Geschwindigkeit über Zeit (Older und diese Studie)

Die Daten von Older (s. auch Kap.3.3) weisen im Vergleich zu denen von Oeding leicht niedrigere Geschwindigkeiten bei gleichen Dichten auf. Besonders ausgeprägt ist dies im Vergleich zum Berufs- und Werkverkehr bei Oeding.
Dies könnte durch den überwiegend bidirektionalen Personenstrom bei Olders Untersuchungen, sowie die höhere Mativation beim Berufs- und Werkverkehr bei Oeding, zu erklären sein. Beim Vergleich mit meinen Daten wird dieser Eindruck bestätigt. Für $N = 20$ sind auch bei meinen Daten die Geschwindigkeiten etwas höher als bei Older.
Older liefert, wie auch meine Untersuchungen, Daten für den Bereich hoher Dichte bis zu ca. 4,5 $\frac{1}{m^2}$.
Im Dichtebereich von 2,5 bis 4,5 $\frac{1}{m^2}$ stimmen die Daten von Older gut mit meinen überein. Allerdings müsste man hinsichtlich der relativ großen Breiten der Gehwege bei Older erwarten, dass die Geschwindigkeiten bei dieser Dichte höher liegen als bei meinen Daten. Die Staubildung sollte hier nicht so ausgeprägt sein.
Dass die Geschwindigkeiten trotzdem sehr gering sind, könnte ebenfalls mit der bidirektionalen Bewegung zusammenhängen. Bei hoher Dichte wird ein regelmäßiger einheitlicher Personenstrom verhindert. Es bilden sich Linien aus, entlang derer sich Personen in gleicher Richtung bewegen (s. [7]). Dadurch wird die eigentliche Breite des Gehwegs für beide Richtungen verringert, Staubildung wird gefördert.
Außerdem könnten Behinderungen des Personenstroms durch Passanten, die an Schaufenstern stehen geblieben sind, aufgetreten sein, die zu einer Verringerung der Geschwindigkeit geführt haben könnten. Außerdem seien laut Older diese 'Bummler' mit in die Dichteberechnung eingeflossen, wodurch eigentlich zum Teil die Dichte bei gleicher Geschwindigkeit etwas niedriger liegen müsste. Bei wie vielen Daten dies der Fall gewesen ist, ist dem Artikel von Older aber nicht zu entnehmen.
Bei Dichten unterhalb von 2,5 $\frac{1}{m^2}$ erkennt man, dass die Geschwindigkeit bei Older höher ist als bei meinen Daten. Wiederum könnte hier genannt werden, dass sich bei der ausreichenden Breite der Gehwege (s .Abb3.1) bei diesen Dichten, trotz der bidirektionalen Bewegung, keine Staus gebildet haben. Dadurch ist die Geschwindigkeit insgesamt höher.

6.4 Navin & Wheeler

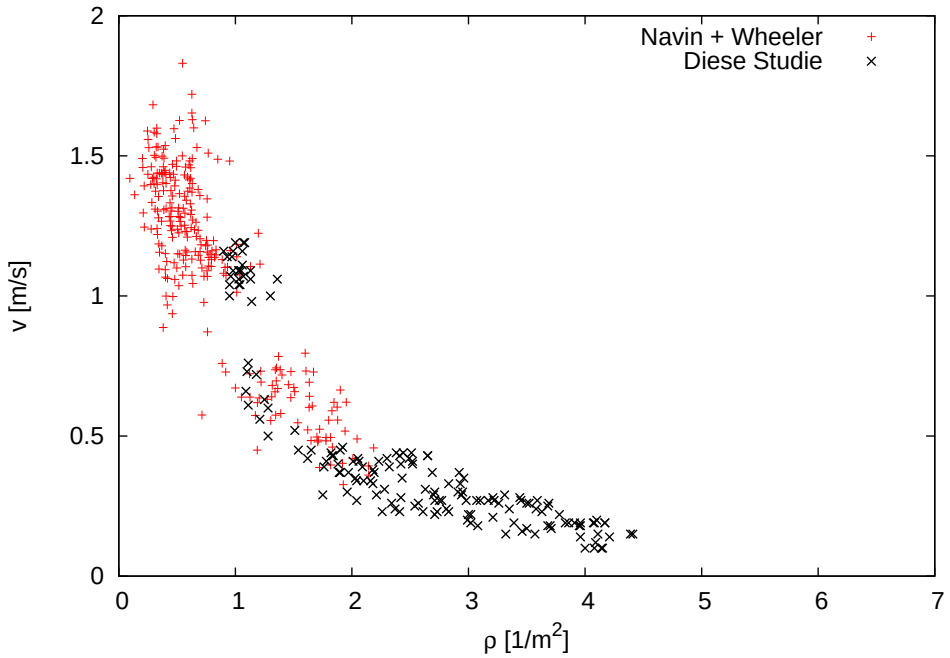


Abbildung 6.4: Geschwindigkeit über Zeit (Navin & Wheeler und diese Studie)

Der größte Teil der Daten, die durch Navin & Wheeler (s. auch Kap.3.4) ermittelt wurden, liegt für Dichten unterhalb von 1 $\frac{1}{m^2}$ vor. In diesem Dichtebereich ist ihr Graf nicht mit dem aus dieser Studie vergleichbar, in der die geringste Dichte ca 1 $\frac{1}{m^2}$ betrug.
Auch haben die Autoren keine Daten für Dichten oberhalb von ca. 2,2 $\frac{1}{m^2}$ ermittelt.
Die Geschwindigkeiten, die aus dem Versuch mit $N = 20$ in meiner Studie stammen, liegen am oberen Rand der Punktverteilung von Navin & Wheeleer.
Die Daten der anderen meiner Versuche liegen eher etwas unterhalb der Daten der Autoren. Es ist jedoch eine bessere Übereinstimmung als bei den oben dargestellten Vergleichen zu erkennen.
Der vergleichsweise steile Abfall der Geschwindigkeit bei der Dichte zwischen 1 und 2 $\frac{1}{m^2}$, der in meiner Auswertung auftritt, ist auch bei den Daten von Navin & Wheeler zu sehen.
Der obere Punkthaufen bei Navin & Wheeler für die geringe Dichten wird die Daten enthal-

ten, in denen sich die Personen ungehindert mit der freien Gehgeschwindigkeit ihrer Wahl bewegen konnten. Dabei werden Geschwindigkeiten erreicht, die zum Teil außergewöhnlich hoch sind (bis zu 1,8 $\frac{m}{s}$), sodass davon ausgegangen werden muss, dass sich einige Personen sehr beeilt haben.

Die Tastache, dass die übrigen Daten mit denen der Autoren überein stimmen, dass also relativ geringe Geschwindigkeiten bei der Dichte von 1 bis 2 $\frac{1}{m^2}$ aufgetreten sind könnte auch hier am bidirektionalen Strom liegen. Durch den bidirektionalen Fluss kommt es zu Behinderungen, wodurch die Geschwindigkeit verringert wird.

Außerdem kann man wohl bei Navin & Wheeler von Staubildung ausgehen, wie sie bei meinen Versuchen stattgefunden hat. Diese könnte zum Beispiel durch die Linienbildung bei bidirektionalen Bewegungen begünstigt werden, wobei die Breite der sich bildenden Korridore, je nach richtungsabhängigem Anteil am Gesamtfluss, sinkt. Gerade beim Versuch am Stephens College (s. Abb.3.4) mit einer Breite des Gehwegs von 1,82 m und einer seitlichen Begrenzung, könnte dies eine Rolle gespielt haben. Nimmt man an, dass sich der Personenstrom zu gleichen Anteilen in entgegengesetzte Richtungen bewegte, entständen zwei schmale Korridore mit jeweils einer Breite von etwa 90 cm.

6.5 Mori & Tsukaguchi

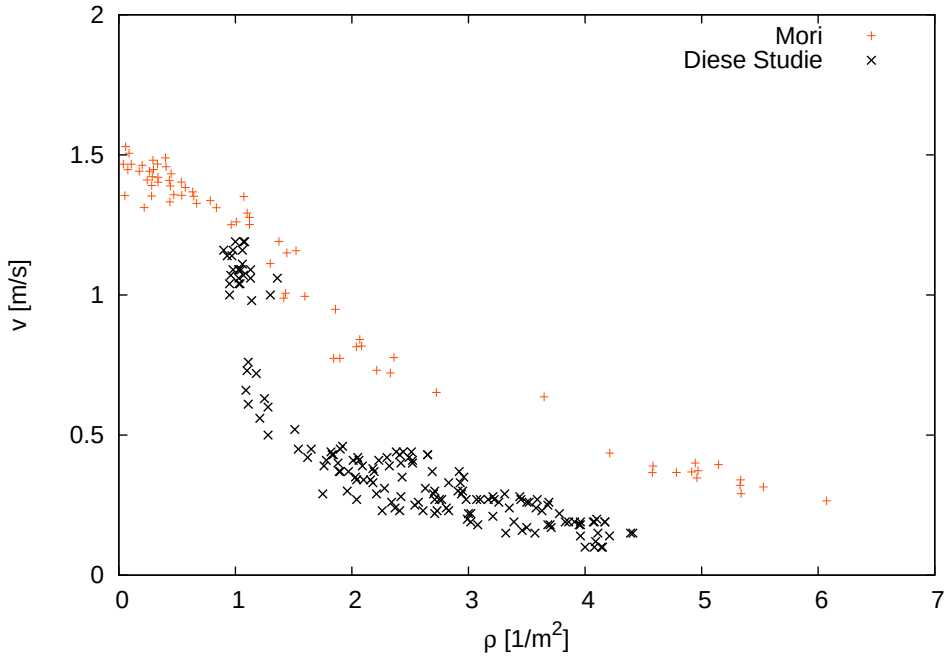


Abbildung 6.5: Geschwindigkeit über Zeit (Mori & Tsukaguchi und diese Studie)

Auch beim Vergleich mit den Ergebnissen von Mori & Tsukaguchi (s. auch Kap3.5) erkennt man bei meinen Daten die schon oben beschriebene Unterteilung in jene, die aus dem Versuch mit $N = 20$ und solche, die aus allen anderen meiner Versuche stammen.

Die aus dem Versuch mit $N = 20$ passen gut in den Kurvenvelauf von Mori & Tsakaguchi. Dieser scheint einen relativ geraden Verlauf zu nehmen bis zu einer maximalen Dichte von ca. 6 $\frac{1}{m^2}$, was ein sehr hoher Wert ist, bedenkt man, dass bei den Versuchen in meiner Studie bei 4,5 $\frac{1}{m^2}$ bereits der Stillstand eingetreten ist. Dies lässt auf sehr gleichmäßige Personenströme bei den Untersuchungen in Osaka schließen.

Die Daten aus den übrigen meiner Versuche weisen Gechwindigkeiten auf, die im Mittel etwa 0,5 $\frac{m}{s}$ geringer ausfallen als die der Autoren. Der Unterschied ist hier sehr deutlich zu erkennen.

Auch hier ist eine Erklärung möglicherweise in der Staubildung bei meinen Versuchen zu su-

chen. Die Tatsache, dass die Daten vom Versuch mit $N = 20$, bei dem kein Stau aufgetreten ist und die Personen sich frei bewegen konnten, gut zu denen von Mori & Tsakaguchi passen, lässt den Schluss zu, dass sich die beobachteten Personen auch bei ihren Versuchen relativ ungehindert bewegen konnten.

Für diesen Umstand spricht, dass die Bewegungen bei den Beobachtungen der Autoren ausschließlich unidirektional waren, wie sie sagen. Auch könnte die relativ breite Auslegung der Wege (2,2 bis 4,5 m) einen stetigen Personenfluss begünstigt haben.

Ein kultureller Faktor könnte hier ebenfalls eine Rolle spielen. Da in Japan in den Großstädten oft eine sehr hohe Verkehrsdichte auftritt, bedingt durch die hohe Bevölkerungsdichte, kann man davon ausgehen, dass die Menschen etwas besser an diese hohe Dichte gewöhnt sind. Dies könnte einen optimierenden Einfluss auf den Personenfluss auch bei hohen Dichten haben, wodurch Staus nicht so schnell auftreten.

6.6 Weidmann

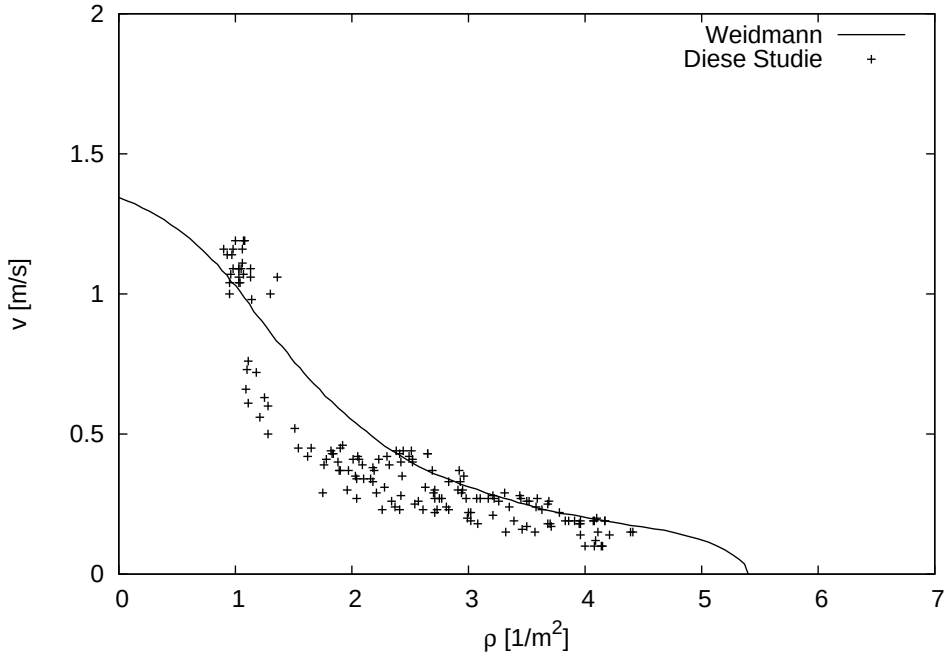


Abbildung 6.6: Geschwindigkeit über Zeit (Weidmann und diese Studie)

Das Fundamentaldiagramm von Weidmann (s. auch Kap.3.6) stimmt bei erster Betrachtung für Dichten oberhalb von ca. 2,5 $\frac{1}{m^2}$ relativ gut mit dem in dieser Studie ermittelten überein. Die Werte aus dieser Studie liegen nur geringfügig unterhalb der von Weidmann beschriebenen Kurve.

Jedoch ist bei Weidmann die maximale Dichte etwa 5,5 $\frac{1}{m^2}$, wohingegen bei meinen Untersuchungen breits bei 4,5 $\frac{1}{m^2}$ Stillstand des Personenstroms einsetzte.

Eine mögliche Erklärung ist die geringe Breite des Gangs bei den Versuchen dieser Studie, wodurch die Bewegungsmöglichkeit bei größeren Dichten stark eingeschränkt zu werden scheint.

Für den Dichtebereich unterhalb von 2,5 $\frac{1}{m^2}$ liegen die Werte der Geschwinigkeiten bei den Versuchen dieser Studie (außer $N = 20$) deutlich unterhalb des Grafen von Weidmann.

Wiederum könnte hier der oben bereits genannte Effekt herangezogen werden, bei dem sich bei meinen Versuchen Staus bereits bei relativ geringen Dichten gebildet haben. Dies führt zu

geringen Gerschwindigkeiten.

Die Geschwindigkeiten beim Versuch mit $N = 20$, bei dem keine Staus aufgetreten sind, und die Personen sich fast ungehindert bewegen konnten, liegen geringfügig oberhalb des Grafen Weidmanns.

6.7 Seyfried et al.

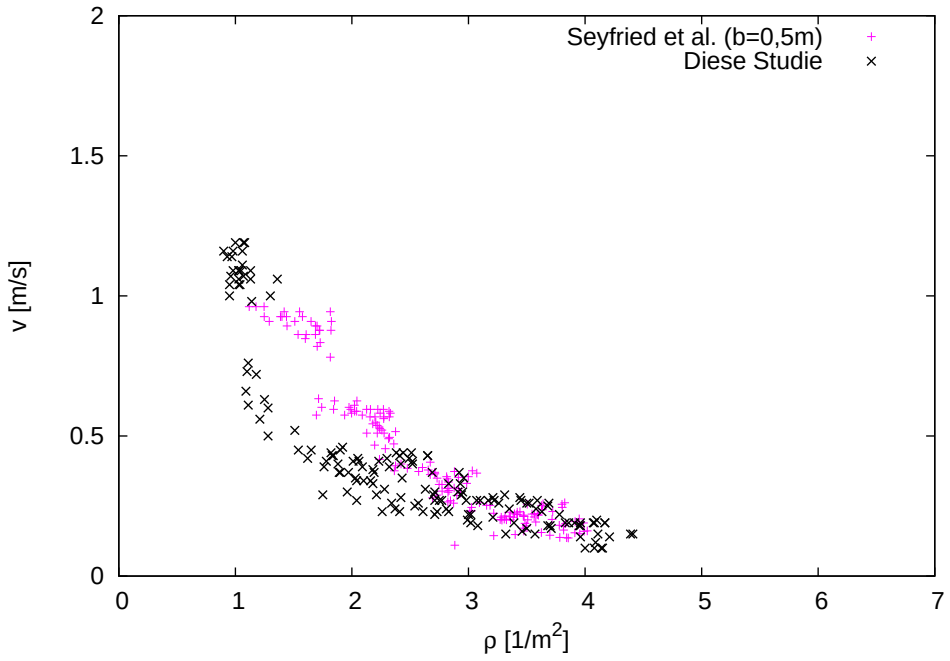


Abbildung 6.7: Geschwindigkeit über Zeit (Seyfried at al. und diese Studie)

Es ist, zugegeben, nicht ganz ligitim, die Daten von Seyfried (s. auch Kap.3.7) mit denen aus dieser Studie zu vergleichen. Die Untersuchungen von Seyfried hatten Beobachtungen von Personenbewegungen in einer Reihe, also in einem 1-dimensionalen System, zur Grundlage. Eine Umrechnung in ein 2-dimensionales System ist nicht ganz eindeutig, denn man muss eine mehr oder weniger willkürliche Annahme über die Breite des verwendeten Weges machen,

um die verwendete Fläche zu berechnen.
Allerdings waren die Versuche von Seyfried in ihrem Aufbau, der Durchführung und der verwendeten Aufnahme- und Auswertungstechnik den Versuchen, die in dieser Studie durchgeführt wurden so ähnlich, dass ich trotzdem einen Vergleich wagen möchte.
Zur Umrechnung der Daten von Sefried in eine Flächenmäßige Dichte habe ich die Breite von 0,5 m zugrunde gelegt. Laut Weidmann ([11]) ist dies der 97,5-Perzentil-Wert der Körperbreite des Menschen. Bei der Bewegung in einer Reihe geht man davon aus, dass die Personen hintereinander gehen, die Breite des Weges also keine Rolle spielt, da sich die Personen nicht seitlich versetzt voneinander anordnen können. Also nehme ich die tatsächlich verwendete Breite der Schultern als Maß der Wegbreite.
Der Vergleich der Ergebnisse dieser Studie mit Seyfried fällt ähnlich aus, wie der Vergleich mit Older (s. Kap6.3). Die Geschwindigkeiten liegen für Dichten oberhalb von von 2,5 $\frac{1}{m^2}$ bei beiden Studien im gleichen Bereich. Sie haben dort mit etwa 0,1 bis 0,5 $\frac{m}{s}$ sehr geringe Werte. Dies lässt auch bei Seyfried auf gelegentliche Staubildung oder Bewegungen im 'Trippelschritt' schließen.
Die Dichten aus dem Versuch mit $N = 20$ in meinen Untersuchungen liegen etwas unterhalb der geringsten Dichten aus dem Versuch von Seyfried, weshalb hierfür kein direkter Vergleich angestellt werden kann. Jedoch kann man aus dem Verlauf des Grafen von Seyfried darauf schließen, dass diese Daten eine gute Abschätzung von Werten für ähnliche Dichten bei Seyfried sein könnten.
Die Geschwindigkeiten meiner Daten im Dichtebereich zwischen 1 und 2,5 $\frac{1}{m^2}$ liegen auch hier unterhalb der Daten des gleichen Dichtebereichs von Seyfried. Die Bewegungen scheinen bei Seyfried hier harmonischer verlaufen zu sein. Ein grund könnte sein, dass die Probanden in den Versuchen von Seyfried den Versuchsparkour besser einsehen konnten, und sich so besser auf Stauungen einstellen konnten.
Auch beschreibt Seyfried das Auftreten von Gleichschritt bei höheren Dichten, was in meinen Versuchen nur sehr selten vorkam, da sich die Personen meist leicht versetzt voneinander be-

wegten.

6.8 Helbing et al.

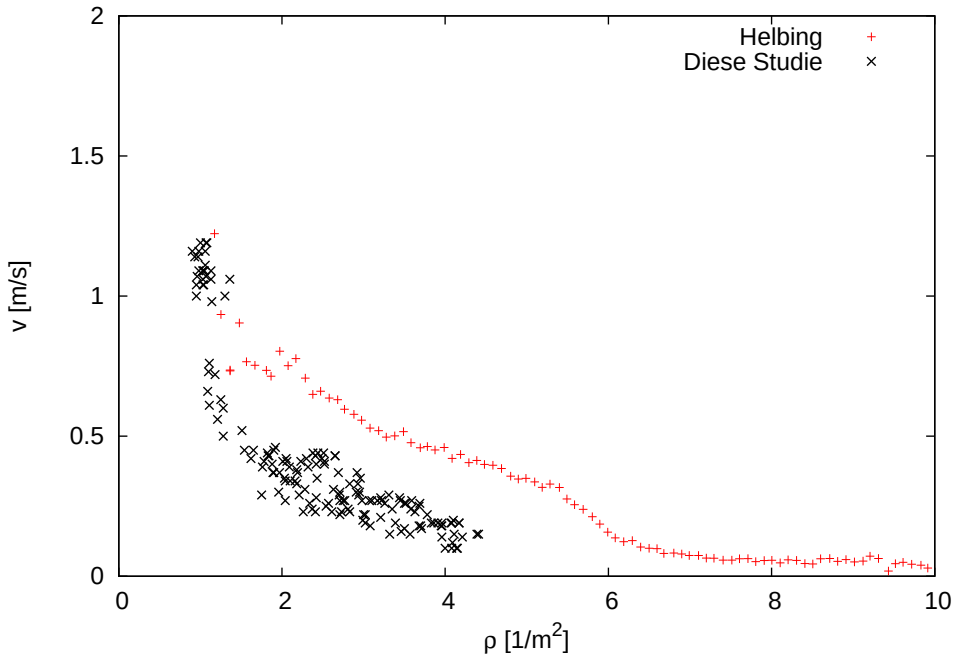


Abbildung 6.8: Geschwindigkeit über Zeit (Helbing et al. und diese Studie)

Die Daten aus den Beobachtungen von Helbing (s. auch Kap.3.8) sind vergleichbar mit denen aus den Beobachtungen von Mori & Tsukaguchi (s. Abb.6.5).
Auch hier sind die einzigen Daten aus meinen Beobachtungen, die mit dem Grafen von Helbing vereinbar sind, die aus dem Versuch mit $N = 20$. Die Geschwindigkeiten aller übrigen Daten aus meinen Beobachtungen liegen im Mittel etwa 0,4 $\frac{m}{s}$ unterhalb der Geschwindigkeiten der Daten von Helbing.
Der Graf von Helbing nimmt, ebenso wie der von Mori & Tsukaguchi, bis zu einer Dichte von etwa 6 $\frac{1}{m^2}$ linear ab. Die Dichte nimmt allerdings bei Helbing weiter zu, bis zu dem extrem

hohen Wert von 10 $\frac{1}{m^2}$, wobei hier nur noch sehr geringe Geschwindigkeiten unterhalb von etwa 0,2 $\frac{m}{s}$ erreicht werden.

Dass bei dieser Dichte überhaupt noch eine Bewegung des Personenstroms stattfinden kann, ist wohl mit der Tatsache zu erklären, dass sich die gesamte Menschenmenge im Kollektiv voran bewegt. Die einzelnen Individuen verschmelzen dabei mit der Menge und lassen sich mit ihr mittreiben.

Dass die Geschwindigkeiten bei Dichten, die auch in meinen Beobachtungen noch eine Rolle Spielen (zwischen 1 und 4,5 $\frac{1}{m^2}$), bei Helbing höher ausfallen als in dieser Studie, könnte wiederum mit einer fehlenden Staubildung zu erklären sein. Den Fußgängern steht ein breiterer Bereich zur Verfügung, und es besteht bei eventuellen Stauungen die Möglichkeit nach außen auszuweichen.

Ein wieterer begünstigender Faktor für den ungehinderten Fluss könnte sein, dass die Personen, die an der Pilgerfahrt teilnehmen, nach einigen Tagen eine gewisse Routine in den Menschenmengen bekommen und sich schneller auf die hohe Dichte einstellen können.

7 Fazit

Ziel dieser Arbeit ist es, bei der Erlangung neuer Erkenntnisse über das Fundamentaldiagramm der Bewegung von Fußgängern in der Ebene einige Anhaltspunkte zu liefern. Wie in dieser Arbeit beschrieben, wurden dazu die Daten von 9 Gehversuchen in Form von Dichte und Geschwindigkeit in einem Diagramm aufgetragen (s. Abb. 5.11).
Eine besonderheit hierbei war die geringe Breite des verwendeten Weges von 0,85 m. In wie weit dieser Umstand einen Einfluss auf die Ergebnisse hat sollte eine zentrale Frage dieser Arbeit.
In Kapitel 6, wo ich meine Ergebnisse mit den Aussagen und Resultaten einiger früherer Autoren verglichen habe, erkannt man schon, dass zum Teil große Unterschiede zwischen meinen Daten und denen der Autoren auftreten.
Die Daten, die aus dem Versuch mit $N = 20$ Personen bei meinen Untersuchungen stammen nehmen hierbei eine Art Sonderstellung ein. Sie scheinen mit allen Veröffentlichungen recht gut in Einklang zu bringen zu sein.
Die Vermutung tut sich auf, dass dies mit der recht unbehinderten Art der Bewegung bei diesem Versuch zusammen hängt. Die Dichte ist hier noch so gering, dass keine Staus während des Versuchs auftreten, wodurch recht hohe Geschwindigkeiten im Bereich der freihen Gehgeschwindigkeit erreicht werden. Dies ist auch bei allen anderen von mir aufgeführten Literaturquellen zu erkennen.
Doch scheint es so zu sein, dass dieses System von Geschwindigkeit und Dichte bei solch geringer Breite des Weges schon bei einer geringen Erhöhung der Dichte stark verändert werden kann.

Dies kann man daren erkennen, dass schon bei der Personenzahl von $N = 30$, wo die Dichte nur geringfügig höher ist als bei $N = 20$, mehrere Staus auftreten und so sie mittlere Geschwindigkeit stark sinkt.
Unterstützt wird dieser Eindruck durch den Vergleich mit einigen Literaturquellen, wo bei den Versuchen breitere Wege verwendet wurden. Hier sinkt der das Fundamentaldiagramm im Dichtebereich bis ca. 2,5 $\frac{1}{m^2}$ nicht so stark ab wie bei meinen Beobachtungen (vgl. 6.2; 6.3; 6.6; 6.7). Es scheint bei breiteren Wegen eine größere Toleranz der Dichte zu geben, die bewirkt, dass Staus nicht so schnel entstehen.
Im Bereich höherer Dichte jedoch stimmen diese Quellen wieder recht gut mit meinen Ergebnissen überein, was zeigt, dass auch dort irgendwann eine kritische Dichte erreicht wird, wo die Geschwindigkeit gegen Null geht.
Wie gesagt soll diese Arbeit einige Anhaltspunkte liefern, und keine verbindliche Aussage über den Einfluss geringer Wegbreiten auf das Fundamentaldiagramm darstellen. So sollen auch die von mir erbrachten Schlussfolgerungen, in denen ich versuche, die Charakteristika in dem von mir erstellten Fundamentaldiagramm zu erkläutern, lediglich als Thesen verstanden werden. Es bedarf noch weiterer Versuche und Auswertungen, um hierüber fundierte Aussagen treffen zu können.

Literaturverzeichnis

[1] DiNenno, Philip J. (Hrsg.): *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Third Edition. Society of Fire Protection Engineers, Bethesda, Maryland, 2002

[2] Hankin, B.D. ; Wright, R.A.: Passenger Flow In Subways. In: *Operational Research Society´s Open Conference at Horrogate* (1958), May

[3] Helbing, Dirk ; Johansson, Anders: Dynamik von Katastrofen in Menschenmassen: eine empirische Studie. In: *The American Physical Society, Physical Review E75, 046109* (2007)

[4] Mori, Masamitsu ; Tsukaguchi, Hiroshi: Civil Engineering Department, Osaka University, Japan

[5] Oeding, Detlef: Verkehrsbelastung und Dimensionierung von Gehwegen und anderen Anlagen des Fußgängerverkehrs. In: *Forschungsprogramm des Bundesverkehrsministeriums und der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen e.V.* (1963)

[6] Older, S.J.: *Movement of Pedestrians on Footways in Shopping Streets*. Road Research Laboratory, Ministry of Transport, 1963

[7] P.D.Navin ; R.J.Wheeler: Pedestrian Flow Charakteristics. In: *Traffic Engineering* (1969)

[8] PREDTETSCHENSKI, Wsewolod ; MILINSKI, Anatoli: *Personenströme in Gebäuden*. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller Köln-Braunsfeld, 1971

[9] SEYFRIED, Armin ; STEFFEN, Bernhard ; KLINGSCH, Wolfram ; BOLTES, Maik: *Neuauflage des Fundamentaldiagramms für Fußgängerbewegungen*. Zentrales Institut für angewandte Mathematik, Forschungszentrum Jülich; Institut für Baustofftechnologie und Brandschutz, Universität Wuppertal, 2005

[10] SEYFRIED, Dr. A.: Charakteristika von Personenströmen. In: *Vorlesung Evakuierung an der Bergischen Universität Wuppertal* (WS 2007/2008)

[11] WEIDMANN, Ulrich: Transporttechnik der Fußgänger, Transporttechnische Eigenschaften des Fußgängerverkehrs (Literaturauswertung). In: *Schriftenreihe des IVT, Institut für Verkehrsplanung* (1993), März

[12] `http://de.wikipedia.org/wiki/Hajj`