

Abschlussarbeit der Bergischen Universität Wuppertal - Master of Science Sicherheitstechnik
Studienschwerpunkt Brand- und Bevölkerungsschutz

Methodik zur Messung multidirektionaler Personenströme

David Bodenstein

07.04.2015



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

Betreuung

Erstprüfer: Prof. Dr. Armin Seyfried

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Stefan Holl

In Zusammenarbeit mit dem JSC - Jülich Supercomputing Centre
Forschungszentrum Jülich GmbH

Erklärung der Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie die Zitate deutlich kenntlich gemacht zu haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Zielsetzung und Aufgabenstellung	1
1.2	Das Projekt BaSiGo	2
2	Grundlagen und Stand der Wissenschaft	5
2.1	Grundlagen der Fußgängerdynamik	5
2.1.1	Die Dichte ρ und das Modul A	5
2.1.2	Die Geschwindigkeit v	7
2.1.3	Der Fluss J und der spezifische Fluss J_s	8
2.1.4	Messmethoden	9
2.2	Fundamentaldiagramme	10
2.3	<i>BaSiGo</i> Experimente	12
2.3.1	Unidirektionale Experimente	12
2.3.2	Bidirektionale Experimente	12
2.3.3	Multidirektionale Experimente	14
2.4	Methodik	16
2.4.1	Videoanalyse	16
2.4.2	Trajektorienexport	18
2.4.3	Fehlerabschätzung	20
2.4.4	Berechnung	25
3	Analyse der Experimente	27
3.1	Unidirektionale Experimente	27
3.1.1	Trajektorien	27
3.1.2	Profildarstellung	29
3.1.3	Methodik zur Flussmessung	31
3.2	Bidirektionale Experimente	36
3.2.1	Trajektorien	36
3.2.2	Profildarstellung	38
3.2.3	Methodik zur Flussmessung	38
3.3	Multidirektionale Experimente	43
3.3.1	Trajektorien	43

Inhaltsverzeichnis

3.3.2	Profildarstellung	46
3.3.3	Methodik zur Flussmessung	49
3.3.4	Vergleich der Kreuzungsexperimente	54
4	Auswertung und Vergleich	57
4.1	Definieren des Freiflussastes	57
4.1.1	Beschreibung des Freiflussastes	57
4.1.2	Bestimmen der stationären Zustände	58
4.1.3	Reduziertes Fundamentaldiagramm	60
4.2	Modellierung des Freiflussastes	63
4.2.1	Auswahl der Modellierungsfunktion	63
4.2.2	Modellierung	64
4.3	Ablezen der Kapazität	68
4.3.1	Sicherheitstechnische Bewertung	70
5	Zusammenfassung und Ausblick	73
	Literaturverzeichnis	77
A	Digitaler Anhang	79

Abbildungsverzeichnis

1.1	Sicherheitsbausteine im Projekt <i>BaSiGo</i>	3
2.1	Graphische Erstellung eines Voronoi-Diagramms	6
2.2	Schematisches Fundamentaldiagramm in vier Darstellungsvarianten	10
2.3	Freiflussast und gestauter Ast eines empirischen Fundamentaldiagramms	11
2.4	Aufbau des Experiments <i>uni corr 500</i>	13
2.5	Aufbau des Experiments <i>bi corr 400</i>	14
2.6	Aufbau des Experiments <i>cross 90 a</i>	15
2.7	Arbeitsschritte zur Auswertung von Fußgängerexperimenten	17
2.8	Übersichtsvideo eines Kreuzungsexperiments	18
2.9	Workflow für die Anwendung der Software <i>PeTrack</i>	19
2.10	Messfehler durch Schrägpositionierung der Kamera	21
2.11	Einfluss der Körpergröße auf den maximalen Fehler e	22
2.12	Systematischer Positionsfehler des <i>Colormarkers</i>	23
2.13	Profildarstellung der Geschwindigkeit zur Fehlererkennung	24
3.1	Trajektorien von drei Läufen des Experiments <i>uni corr 500</i>	28
3.2	Profildarstellung ausgewählter Läufe des unidirektionalen Experiments	30
3.3	Stationäre Zustände des Experiments <i>uni corr 500</i>	32
3.4	Spezifischer Fluss des Experiments <i>uni corr 500</i>	33
3.5	Messung nach Methode A des unidirektionalen Experiments	33
3.6	Spezifischer Fluss des Experimentlaufs <i>uni corr 500 09</i>	34
3.7	Fundamentaldiagramme des Experiments <i>uni corr 500</i>	35
3.8	Trajektorien verschiedener Läufe des Experiments <i>bi corr 400</i>	37
3.9	Profildarstellung der Experimentläufe <i>bi corr 400 03</i> und <i>bi corr 400 04</i>	39
3.10	Fundamentaldiagramm <i>bi corr 400</i> ermittelt nach Methode D	40
3.11	Fundamentaldiagramm <i>bi corr 400</i> ermittelt nach Methode A	41
3.12	Fundamentaldiagramm <i>bi corr 400</i> gemessen an zwei Messlinien	42
3.13	Trajektorien des Experimentlaufs <i>cross 90 a 01</i>	44
3.14	Trajektorien der Experimentläufe <i>cross 90 a 02</i> und <i>cross 90 a 03</i>	45
3.15	Profildarstellung ausgewählter Läufe des Experiments <i>cross 90 a</i>	47
3.16	Profildarstellung des Experimentlaufs <i>cross 90 a 06</i>	48

Abbildungsverzeichnis

3.17	Stationärer Zustand <i>cross 90 a</i>	51
3.18	Fundamentaldiagramm <i>cross 90 a</i> ermittelt nach Methode D	52
3.19	Fundamentaldiagramm <i>cross 90 a</i> ermittelt nach Methode A	53
3.20	Vergleich der Fundamentaldiagramme der drei Kreuzungsexperimente	55
3.21	Vereintes Fundamentaldiagramm aus den drei Kreuzungsexperimenten	55
4.1	Neudefiniertes stationärer Zustand	59
4.2	Reduziertes Fundamentaldiagramm der Dichte ρ	61
4.3	Reduziertes Fundamentaldiagramm des Moduls A	62
4.4	Iteratives Regressionsverfahren zur Ermittlung der optimalen Dichte	65
4.5	Summe der kleinsten Quadrate R	66
4.6	Darstellung der Modellfunktionen	67
4.7	Vergleich der Freiflussmodelle	68

Tabellenverzeichnis

2.1	Messmethoden nach Zhang	9
2.2	Laufparameter des Experiments <i>uni corr 500</i>	13
2.3	Laufparameter des Experiments <i>bi corr 400 b</i>	14
2.4	Laufparameter der Experimente <i>cross 90 a,b,c</i>	15
2.5	Parameter zur Berechnung des maximalen Fehlers <i>e</i>	22
3.1	Parameter und Randbedingungen zur Flussmessung des Experiments <i>uni corr 500</i>	31
3.2	Parameter und Randbedingungen zur Flussmessung des Experiments <i>bi corr 400</i>	40
3.3	Parameter und Randbedingungen zur Flussmessung des Experiments <i>cross 90 a</i>	50
3.4	Methodik zur Flussmessung von Kreuzungsexperimenten	50
4.1	Auswahl der Modellierungsfunktionen	64
4.2	Modellkennwerte für den Freiflussast der verschiedenen Experimente	67
4.3	Kapazität und weitere Kennwerte der Experimente	69

1. Einleitung

Die Forschung der Bewegung und des Verhaltens von Personenströmen, bezeichnet als Fußgängerdynamik, hat in den letzten Jahrzehnten große Fortschritte gemacht. So können heute einfache Szenarien mittels Simulationsmodellen zuverlässig vorhergesagt werden. Das Verstehen von komplexen Personenströmen ist die nächste große Aufgabe in den kommenden Jahren. Insbesondere die Planung von Großveranstaltungen und von Menschenmassenversammlungen spricht der Fußgängerdynamik eine wachsende Bedeutung zu. Dabei sollte eine ausreichende Bemessung und Dimensionierung von Verkehrswegen, unter gewöhnlichen Bedingungen, immer vor der Frage nach der Evakuierung und Entfluchtung aus Gefahrensituation stehen.

Gerade innerhalb dieses präventiven Ansatzes sind Kennzahlen zur Dimensionierung von Verkehrswegen unerlässlich. Nur wenn die Charakteristika verschiedener Verkehrssituationen bekannt sind, können die Verkehrswege in ausreichender Abmessung gewählt werden. Als ausreichend kann in diesem Zusammenhang ein Verkehrsweg verstanden werden, in welchem die Personen frei über ihre Gehrichtung und Geschwindigkeit verfügen können.

Es müssen Anhaltspunkte bestimmt werden, bei denen die Entscheidungsfreiheit der einzelnen Personen erhalten bleibt. Nur so lassen sich Verkehrswege auf langfristige Sicht sicher planen und gestalten. Dabei ist zu unterscheiden, ob sich Personenströme nur in eine Richtung oder multidirektional bewegen.

1.1. Zielsetzung und Aufgabenstellung

Diese Arbeit verfolgt das Ziel Charakteristika unterschiedlicher Personenströme miteinander zu vergleichen. Von besonderem Interesse ist dabei der höchste zu beobachtende Personenfluss, die sogenannte Kapazität.

Zum Vergleich werden Experimente mit unidirektionalen, bidirektionalen und multidirektionalen Gehrichtungen in Fluren und Kreuzungen herangezogen. Die in dieser Arbeit analysierten Experimente wurden von der *Forschungszentrum Jülich GmbH* im Rahmen des Projektes *BaSiGo* durchgeführt. Die Vergleiche erfolgen mit Hilfe von Kennwerten, wie Dichte, Geschwindigkeit, Fluss, Kapazität und deren graphischer Darstellung.

Für die Berechnung dieser Kennwerte werden vom Forschungszentrum Jülich entwickelte Softwarepakete benutzt. Diese Software ermöglicht es, verschiedene Methoden und Randbedingungen

1. Einleitung

für die Berechnung der Kennwerte zu verwenden. Ziel ist deshalb nicht nur die Kennwertberechnung, sondern ebenfalls die am besten geeignete Methode zu finden, um die Kapazität eines Personenstroms in unterschiedlichen Stromtypen zu messen.

In einem letzten Abschnitt dieser Arbeit sollen einfache Modelle beschrieben werden, mit denen sich Aussagen über wichtige Eigenschaften der Stromtypen treffen lassen. Mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse können schließlich Hypothesen bewertet oder aufgestellt werden, um Verkehrswege für Fußgänger zukünftig sicherer dimensionieren zu können.

1.2. Das Projekt BaSiGo

Die Abkürzung *BaSiGo* steht für „Bausteine für die Sicherheit von Großveranstaltungen“ und ist ein Großprojekt verschiedener Verbundpartner. Das gemeinsame Ziel ist es, praktikable und zukunftsfähige Ideen im Zusammenhang mit der Sicherheit von Großveranstaltungen zu entwickeln. Die Forschungen und die Erfahrungen der einzelnen Verbundpartner sollen zusammengetragen werden, um sicherheitstechnische Fragen gemeinsam zu beantworten. Das Projekt richtet sich insbesondere an die Vielzahl von Akteuren, die bei einer Großveranstaltung tätig sind. Für diese Akteure sollen durch *BaSiGo* modular aufgebaute Hilfestellungen entwickelt werden. Dieser modulare Aufbau wird im Projekt *BaSiGo* „Sicherheitsbausteine“ genannt. [7, S. 5,8,11]

In der Abbildung 1.1 sind die vier Module dargestellt, welche durch die Zusammenarbeit der Verbundpartner gestaltet werden sollen. Eines dieser Module wird als „BaSiGo-Simulation“ bezeichnet. Dieses Modul soll eine Hilfestellung bei der Simulation von Personen- und Verkehrsflüssen bieten. [8]

Das Forschungszentrum Jülich ist, als Experte im Forschungsbereich Fußgängerdynamik, dem Verbund beigetreten und befasst sich mit der Entwicklung von Fußgängersimulationen. Hierzu wurden im Sommer des Jahres 2013, unter Aufsicht und Berücksichtigung der Erfahrung des Forschungszentrums Jülich, Experimente mit über 2000 Probanden durchgeführt.

In einer Messehalle des Messegeländes Düsseldorf fanden ca. 32 Versuche mit über 200 Einzelläufen statt. Jeder Proband erhielt eine Kopfbedeckung mit einem aufgedruckten persönlichen *BaSiGo*-Code. Mit diesem lassen sich die Personen während der Experimente zuordnen. Zusätzlich wurden die Probanden gebeten einen Fragebogen zu Beginn jedes Versuchstages auszufüllen, aus welchem weitere Erkenntnisse geschlossen werden konnten. Die Probanden erhielten eine Aufwandsentschädigung von 50 € je Versuchstag.

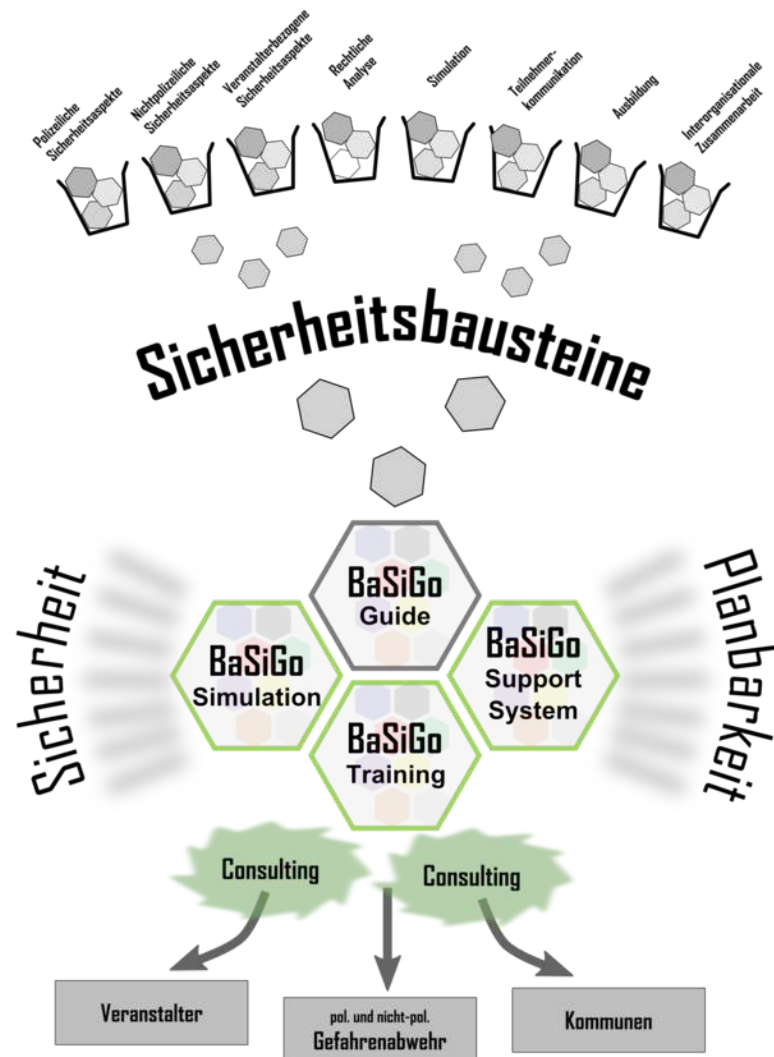


Abbildung 1.1.: Sicherheitsbausteine im Projekt BaSiGo [8]

2. Grundlagen und Stand der Wissenschaft

In diesem Kapitel werden zum einen die mathematischen und physikalischen Grundlagen der Fußgängerdynamik beschrieben. Dies erfolgt anhand des aktuellen Stands der Wissenschaft und bildet die Wissensgrundlage für diese Arbeit. Zum anderen wird der Leser in die zu analysierenden Experimente eingeführt. Schließlich folgt eine Erläuterung der Methodik zur Auswertung von Fußgängerexperimenten.

2.1. Grundlagen der Fußgängerdynamik

In Analogie zu der Strömungsdynamik werden in der Fußgängerdynamik sich bewegende Personenmengen als Personenströme bezeichnet. In der Fußgängerdynamik werden, dieser Analogie folgend, Kennwerte für den Personenstrom abgeleitet. Die wichtigsten Kennwerte sind die Dichte ρ , die Geschwindigkeit v und der spezifische Fluss J_s . Genau diese Größen sind auch für diese Arbeit von elementarer Bedeutung und sollen folgend, nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik, beschrieben werden.

Ebenso sind die nachstehenden Formeln als mathematische Grundlage für die Kennwertberechnung in den folgenden Kapiteln zu verstehen. Es wird eine Einordnung der Formeln in die Messmethoden A-D, entsprechend einer Methodenklassifizierung von Zhang [17] vorgenommen. Mit Hilfe der Klassifizierung lassen sich die Messmethoden übersichtlich miteinander vergleichen.

2.1.1. Die Dichte ρ und das Modul A

Grundlegend wird die Dichte eines Personenstroms immer über eine definierte Fläche betrachtet. Die Dichte gibt Auskunft darüber, wie viele Personen sich diese Fläche teilen müssen. Die Grundformel der Dichteberechnung lautet deshalb wie folgt:

$$\rho = \frac{N}{A_m} \quad (2.1)$$

Für die Berechnung der Dichte nach der Formel 2.1 werden alle Personen innerhalb der Messfläche A_m gezählt. Nach der Methodenklassifizierung von Zhang [17, S.49] wird diese Dichteberechnung als klassische Methode oder Methode C bezeichnet (s. Tabelle 2.1).

2. Grundlagen und Stand der Wissenschaft

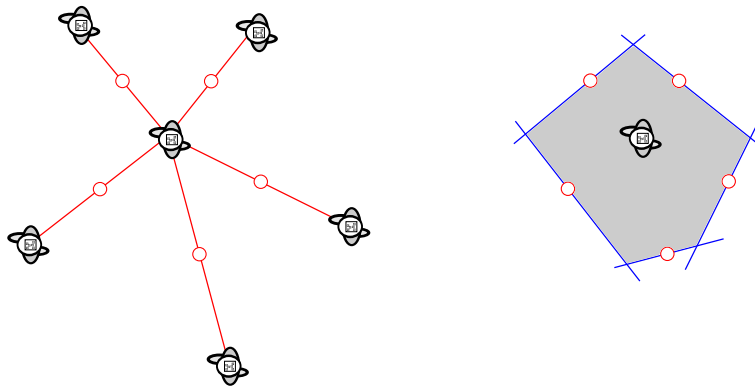


Abbildung 2.1.: Graphische Erstellung eines Voronoi-Diagramms

In der Arbeit von Zhang [17, S.53] wurde gezeigt, dass die Dichte eines Personenflusses auch durch die Verwendung eines Voronoi-Diagramms, auch Dirichlet-Zerlegung genannt, berechnet werden kann.

Die Erstellung eines Voronoi-Diagramms wird in Abbildung 2.1 graphisch erläutert. In einem Experiment stellt jede Person einen Punkt im Raum dar. Einer dieser Punkte wird nun betrachtet, und zwischen allen Personen in dessen unmittelbarer Nähe eine Verbindungslinie gezogen. Genau auf den Mittelpunkten der Verbindungslinien werden nun orthogonale Linien angelegt. Die zwischen den Orthogonalen liegende Fläche wird als Voronoi-Zelle bezeichnet. Jeder Punkt in der Voronoi-Zelle ist näher an der Ausgangsperson, als an jeder anderen Person im betrachteten Raum.

Die Voronoi-Zelle wird als die Fläche betrachtet, welche der Person im Experiment zur Verfügung steht. Die Voronoi-Dichte berechnet sich aus der Formel 2.1 wie folgt: [17, S.51]

$$\rho_v = \frac{1}{A_v} \quad (2.2)$$

Die Formel 2.2 beschreibt die Voronoi-Dichte einer einzelnen Person. Soll die Dichte innerhalb einer Messfläche bestimmt werden, so ist die Voronoi-Dichte der einzelnen Zellen über die Messfläche zu integrieren und zu mitteln: [17, S. 51]

$$\rho = \frac{\iint \rho_v dx dy}{\Delta x \cdot \Delta y} \quad (2.3)$$

Die Voronoi-Dichte zeigt bei der Erstellung der Fundamentaldiagramme (s. Kapitel 2.2) eine hohe Auflösung und geringere Standardabweichungen als andere Methoden zur Dichteberechnung. [17, S. 54] Aus diesem Grund wird die Voronoi-Dichte für die Dichteberechnung in dieser Arbeit herangezogen. Der Terminologie von Zhang [17, S.51] entsprechend, wird die Voronoi-Methode als Methode D bezeichnet.

Das Modul A ist nach Fruin [9, S.38] der Kehrwert der Dichte ρ . Dieser Kennwert stellt den durchschnittlichen verfügbaren Platz der Personen im Experiment dar und kann aus der Dichte mit folgender Formel berechnet werden:

$$A = \frac{1}{\rho} \quad (2.4)$$

2.1.2. Die Geschwindigkeit v

Wie für die Dichte, gibt es für die Geschwindigkeit verschiedene Berechnungsmethoden. Bekannterweise ist die Geschwindigkeit wie folgt definiert, wenn x der Weg und t die Zeit ist:

$$v = \frac{x}{t} \quad (2.5)$$

Eine übliche Methode ist es, die Geschwindigkeit für eine Person zwischen zwei Messlinien, zum Beispiel M_{in} und M_{out} , zu messen. Die Messmethode an zwei Linien wird von Zhang als Methode B bezeichnet [17, S.49]. Die Formel zur Berechnung der Geschwindigkeit lautet dann:

$$v_{i,B} = \frac{M_{out} - M_{in}}{t_{M_{out}} - t_{M_{in}}} \quad (2.6)$$

Für die Ermittlung der Geschwindigkeit stellt sich die Frage, welcher Weg x für die Berechnung betrachtet wird. Die Definition von zwei Messlinien hat den Nachteil, dass die Geschwindigkeitsmessung von der Lage dieser Messlinien abhängig ist. Eine gute Möglichkeit, um die Geschwindigkeit zu jedem Zeitpunkt zu messen, wurde in der Arbeit von Steffen und Seyfried [15, S.7] beschrieben:

$$\vec{v}_{\Delta x, i}(t) = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2.7)$$

$$\Delta x = \vec{x}_i\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) - \vec{x}_i\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right) \quad (2.8)$$

In der Formel 2.7 wird die Geschwindigkeit \vec{v} zu einem bestimmten Zeitpunkt t ermittelt. An der Stelle von festgelegten Messlinien, wird die Position x_i einer Person kurz vor und kurz nach t bestimmt. Schließlich wird der euklidische Abstand Δx durch den Zeitabstand Δt geteilt. Auf diese Weise verschieben sich die Messlinien gemeinsam mit der Bewegung der Person. Das Messergebnis hängt hierbei vom gewählten Δt ab.

Die Geschwindigkeit \vec{v} ist in der Fußgängerdynamik, zumindest in den meisten Fällen, als zweidimensionaler Vektor (x, y) zu betrachten. Je nach Experiment kann es sinnvoll sein nur die x

2. Grundlagen und Stand der Wissenschaft

oder y Komponente, oder beide Komponenten des Vektors für die Geschwindigkeitsbestimmung zu nutzen. In dieser Arbeit ist nur die Verwendung beider Vektorkomponenten von Bedeutung.

Soll die Geschwindigkeit eines Personenstroms innerhalb einer bestimmten Messfläche ermittelt werden, so ist es üblich die Geschwindigkeiten der einzelnen Personen in dieser Messfläche zu mitteln. Die Messfläche der Geschwindigkeit sollte hierbei mit der Messfläche der Dichte übereinstimmen. Nur so kann der spezifische Fluss (s. Formel 2.12) zuverlässig berechnet werden. Es ergeben sich, je nach Dichteberechnungsmethode, unterschiedliche Geschwindigkeitsformeln.

Wird die Dichte nach Methode C berechnet, wird lediglich das arithmetische Mittel aller Personengeschwindigkeiten im Messbereich gebildet. Bei einer Dichteberechnung nach Methode D, werden die Voronoi-Zellen der Einzelpersonen betrachtet. Damit alle Personen erfasst werden, deren Voronoi-Zelle in die Messfläche ragen [15, S. 5], werden die Geschwindigkeiten der einzelnen Personen mit Hilfe eines Integrals gemittelt: [17, S. 51]

$$v = \frac{\iint \vec{v}_{\Delta x, i} dx dy}{\Delta x \cdot \Delta y} \quad (2.9)$$

2.1.3. Der Fluss J und der spezifische Fluss J_s

Der Fluss eines Personenstroms ist die Anzahl der Personen, die in einem gewissen Zeitintervall einen betrachteten Querschnitt passieren:

$$J = \frac{N}{\Delta t} \quad (2.10)$$

Die Betrachtung des Personenstroms an einer Messlinie wird von Zhang als Methode A bezeichnet.

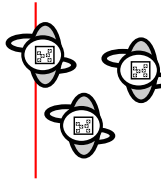
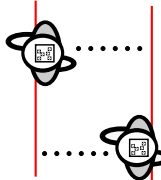
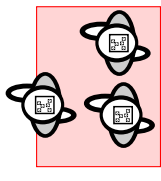
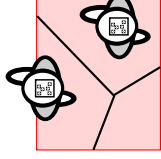
Wie auch in der Strömungsdynamik wird davon ausgegangen, dass der Fluss über ρ , v und der Breite des betrachteten Querschnittes b berechnet werden kann: [12, S.9]

$$J = \rho \cdot v \cdot b \quad (2.11)$$

Da sich viele Experimente zur Fußgängerdynamik in der Querschnittsbreite unterscheiden, ist der spezifische Fluss J_s eine geeignetere Aussage über den Personendurchsatz in einer bestimmten Situation. Der spezifische Fluss gibt den Fluss je Meter Durchgangsbreite an:

$$J_s = \frac{J}{b} = \frac{\rho \cdot v \cdot b}{b} \Rightarrow$$
$$J_s = \rho \cdot v \quad (2.12)$$

Tabelle 2.1.: Messmethoden nach Zhang [17]

Methode	Grafik	v	ρ	J_s
A		$v = \frac{1}{N} \sum \vec{v}_{\Delta x, i}(t)$	$\rho = \frac{J}{v}$	$J_s = \frac{N}{\Delta t}$
B		$v = \frac{1}{N} \sum v_{i,B}$	$\rho = \frac{1}{N} \sum \frac{1}{\Delta t} \int \frac{N'(t)}{A_m} dt$	$J_s = \rho \cdot v$
C		$v = \frac{1}{N} \sum \vec{v}_{\Delta x, i}(t)$	$\rho = \frac{N}{A_m}$	$J_s = \rho \cdot v$
D		$v = \frac{\iint \vec{v}_{\Delta x, i} dx dy}{\Delta x \cdot \Delta y}$	$\rho = \frac{\iint \rho_v dx dy}{\Delta x \cdot \Delta y}$	$J_s = \rho \cdot v$

Die Formel 2.12 leitet den spezifischen Fluss mit Hilfe der ermittelten Dichte und der Geschwindigkeit innerhalb einer bestimmten Messfläche her. Es ist zu vermuten, dass die Formeln 2.10 und 2.11 zu unterschiedlichen Ergebnissen des Flusses J führen. Inwieweit sich die Ergebnisse unterscheiden, und mit welcher Methode sich geeignete Aussagen über die Kapazität eines Experiments treffen lassen, wird sich in Kapitel 3 klären.

2.1.4. Messmethoden

In den vorherigen Abschnitten wurden verschiedene Formeln zur Berechnung der Dichte, der Geschwindigkeit und des Flusses beschrieben. In der Tabelle 2.1 werden diese Formeln entsprechend der Terminologie von Zhang [17, S. 49] als Messmethoden klassifiziert.

In der Tabelle ist verdeutlicht, dass für jede Messmethode zwei von drei Parametern direkt bestimmt werden können. Der dritte Kennwert ist über die Flussgleichung zu berechnen. Methode A ist die einzige der vier Methoden, mit welcher der Fluss direkt ermittelt werden kann. Für die Fragestellung nach der Kapazität ist dies zu berücksichtigen. Allerdings ist es ebenso wichtig herauszufinden, bei welcher Dichte und Geschwindigkeit dieser maximale Fluss auftritt. Für die Berechnung der letztgenannten Kennwerte eignet sich insbesondere die Methode D.

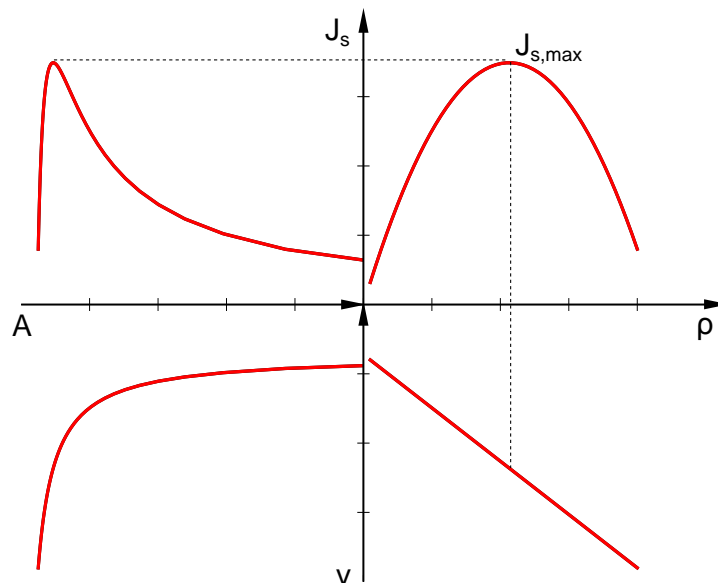


Abbildung 2.2.: Schematisches Fundamentaldiagramm in vier Darstellungsvarianten

2.2. Fundamentaldiagramme

Fundamentaldiagramme stellen den Zusammenhang zwischen Dichte, Fluss und Geschwindigkeit eines Personenstroms dar. In der einfachsten Form, zeigt das Fundamentaldiagramm einen direkten funktionalen Zusammenhang. Wie in der Abbildung 2.2 dargestellt, lassen sich die Kennwerte in beliebiger Kombination gegeneinander auftragen.

Die Abbildung zeigt den schematischen Verlauf eines Fundamentaldiagramms. Der reale Verlauf des Fundamentaldiagramms ist bis heute umstritten. Verschiedene Forschungen haben unterschiedliche empirische Fundamentaldiagramme herausgebracht. Noch ist unklar, warum die Ergebnisse variieren. [12, S.12]

Die meisten Forschungen gehen heute davon aus, dass das Fundamentaldiagramm in mindestens zwei verschiedene Bereiche, sogenannte Äste, eingeteilt werden muss. Am einfachsten ist dies am Dichte-Fluss-Diagramm zu beschreiben, welches in Abbildung 2.3 dargestellt ist.

Als Freiflussast wird der Bereich des Fundamentaldiagramms verstanden, bei dem sich die Personen im Wesentlichen frei bewegen können. Im gestauten Ast dagegen, beeinflussen sich die Personen in ihren Bewegungen gegenseitig. Diese beiden Äste werden vor allem in empirischen Fundamentaldiagrammen wahrgenommen. Während der Freiflussast sehr gut durch eine Funktion $J_s(\rho)$ beschrieben werden kann, ist dies für den gestauten Ast kaum möglich. [14, S.15]

Ungefähr am Schnittpunkt dieser beiden Äste befindet sich der maximale Fluss, auch bezeichnet als Kapazität. Für diese Arbeit wird die Kapazität C als die Situation definiert, in der der Zustand des Personenstroms von dem Freiflussast in den gestauten Ast wechselt. Ziel dieser Arbeit wird es deshalb sein, die Fundamentaldiagramme der einzelnen Experimente abzubilden und die

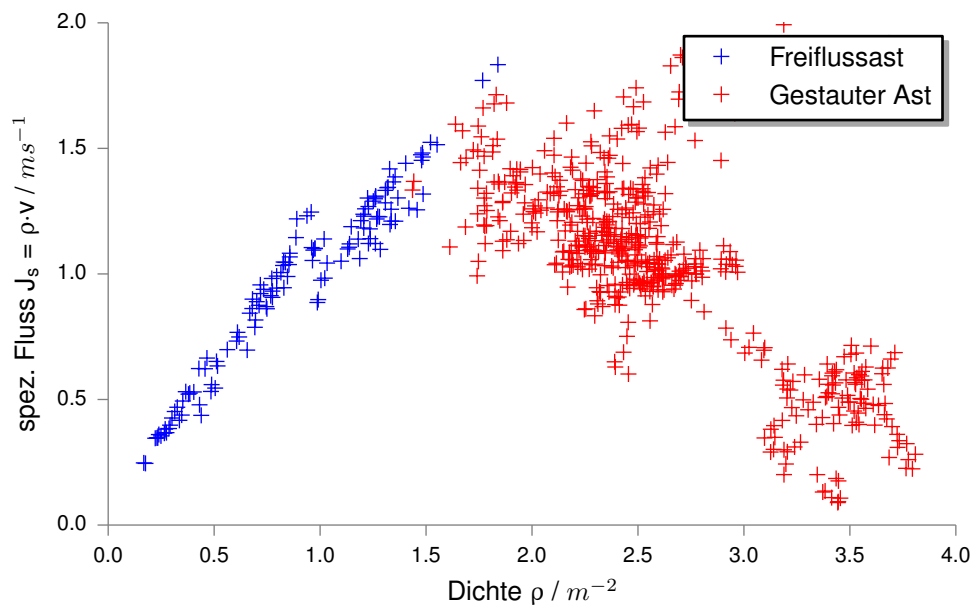


Abbildung 2.3.: Freiflussast und gestauter Ast eines empirischen Fundamentaldiagramms

Kapazität C aus diesen Diagrammen abzuleiten. Ebenso werden die kritische Dichte ρ_{krit} , die kritische Geschwindigkeit v_{krit} und das kritische Modul A_{krit} bei der Kapazität ermittelt.

Für das Ablesen der Kapazität stellt sich die Frage, in welcher Hinsicht dieser Kennwert für die Wissenschaft und Technik von Bedeutung ist. Eine beispielhafte Verwendung der Kapazität besteht in der Validierung von Evakuierungssimulationen. [11] Sie ist außerdem eine wichtige Kennzahl zur Modellierung von Personenflussmodellen.

Das Beschreiben der Personenströme mit Kennwerten aus der Strömungsdynamik wird im Allgemeinen als makroskopisches Modell bezeichnet, da nicht jede Person einzeln beschrieben wird, sondern der Personenstrom als Ganzes. Das Fundamentaldiagramm bildet diesen makroskopischen Zusammenhang zwischen den einzelnen Kennwerten ab. Damit zeigt das Fundamentaldiagramm die physikalischen Grenzen eines Szenarios auf und kann dazu genutzt werden, mikroskopische Modelle¹ auf Plausibilität zu überprüfen.

Wie in Abbildung 2.3 zu erkennen, kann die Kapazität kaum eindeutig abgelesen werden. Je nachdem, ob der Betrachter die Kapazität C als Sicherheitskennzahl, als Bemessungswert oder für eine Plausibilitätsprüfung verwenden will, sollte die Kapazität näher am Freiflussast oder näher am gestauten Ast abgelesen werden. Somit ist Kapazität als alleinstehender Wert nur bedingt aussagekräftig.

¹Modelle in denen das Verhalten der einzelnen Personen beschrieben wird

2.3. BaSiGo Experimente

Alle in dieser Arbeit ausgewerteten Versuche fanden im Juni 2013 während der *BaSiGo* Experimente statt. Die Experimente wurden in der Messehalle Düsseldorf durchgeführt und durch Wissenschaftler des Forschungszentrums Jülich geleitet.

An den vier Versuchstagen fanden über 30 Experimente mit jeweils mehreren Läufen statt. Alle Experimente wurden mit einer Vielzahl von Videokameras dokumentiert. Ein spezielles Netz aus Kameras wurde installiert, um die Experimente im Anschluss auswerten zu können. Leider war die Software für die Auswertung zum Zeitpunkt dieser Arbeit noch nicht einsatzbereit, weshalb auf andere Kameraaufnahmen zurückgegriffen werden musste.

Insgesamt nahmen an den einzelnen Experimenten bis zu 1000 Teilnehmer gleichzeitig teil. Die Probanden wurden gebeten während der Experimente eine Kopfbedeckung mit persönlichem *BaSiGo*-Code zu tragen. Zusätzlich erhielten die Teilnehmer farbige Armbänder mit aufgedrucktem Code.

Von der Vielzahl an Experimenten wurden drei Experimentreihen ausgewählt, um die Methodik zur Messung von multidirektionalen Personenströmen zu untersuchen.

2.3.1. Unidirektionale Experimente

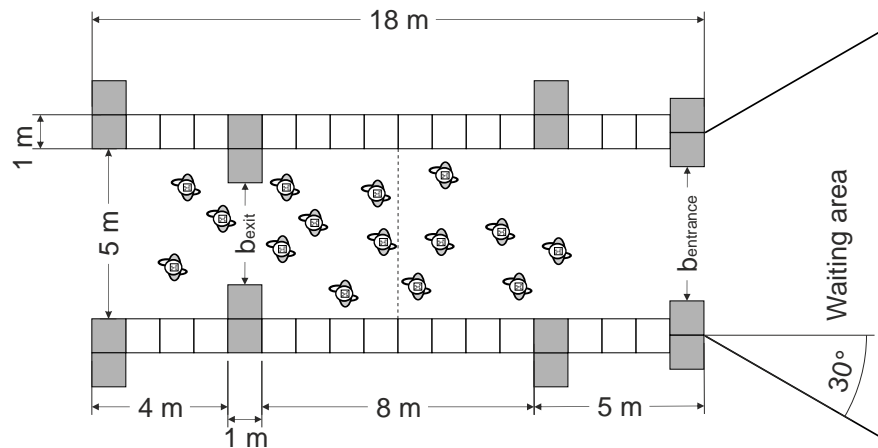
Bei dem unidirektionalen Experiment *uni corr 500* handelt es sich um ein Experiment zur Untersuchung von Personenströmen in einem einfachen Korridor. Alle Probanden gehen in diesem Experiment in die selbe Zielrichtung. Ziel des Experiments ist es herauszufinden, welche Dichte sich in Abhängigkeit zum Personenfluss einstellt.

Um den Personenfluss zu regulieren, werden der Eingang und der Ausgang des Korridors in ihrer Breite variiert. In den ersten Läufen wird die Breite des Eingangs zum Korridor schrittweise vergrößert, um den Zufluss von Personen zu erhöhen. In den späteren Läufen wird die Breite des Ausgangs variiert, um den Abfluss der Personen zu verringern. Die Abbildung 2.4 zeigt den Aufbau der Experimentreihe.

Das unidirektionale Experiment wurde für diese Arbeit gewählt, um die Grundlagen für die Methodik von multidirektionalen Experimenten zu schaffen. Zusätzlich können die Fundamentaldiagramme der multidirektionalen Experimente mit den Fundamentaldiagrammen aus diesem Versuch verglichen werden.

2.3.2. Bidirektionale Experimente

Insgesamt wurden zwei bidirektionale Experimente an den Versuchstagen durchgeführt, *bi corr 400 a* und *bi corr 400 b*. Für die Erstellung des Fundamentaldiagramms ist jedoch nur das letztgenannte Experiment von Bedeutung. Zur Vereinfachung wird das Experiment folgend *bi corr 400*

Abbildung 2.4.: Aufbau des Experiments *uni corr 500*Tabelle 2.2.: Laufparameter des Experiments *uni corr 500*

Lauf	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
Eing. / m	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Ausg. / m	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	4,0	3,0	2,0	1,0	0,6
N / Pers.	148	760	916	909	905	913	914	477	310	273

genannt. Auch in diesem Experiment wird untersucht, welche Dichte sich bei welchem Personenfluss einstellt. Zusätzlich soll herausgefunden werden, ob gewisse Muster bei den Laufwegen der Probanden zu erkennen sind.

Der Zufluss zum Personenstrom wird durch ein Zuflusstor vor dem Eingang des Korridors reguliert. Das Tor wird in einem Abstand von 6 m zum Korridor aufgestellt, damit entgegenkommende Probanden seitlich ausweichen können. Die Probanden werden vor jedem Lauf angewiesen, in welche Richtung sie den Korridor zu verlassen haben. Dies geschieht anhand der Personennummer oder der Armbandfarbe. In den letzten zwei Läufen des Experiments wurde zusätzlich der Einfluss eines Hinweisschildes auf den Personenfluss untersucht. Der Aufbau des Experiments ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

Das Experiment *bi corr 400* ist für diese Arbeit wichtig, da es erste wichtige Eigenschaften von multidirektionalen Personenströmen aufweist. Die Probanden werden nicht mehr durch ein starres Hindernis in ihrer Bewegungsfreiheit eingeschränkt, sondern durch einen entgegenkommenden Personenstrom. Hierdurch sind die Probanden gezwungen stärker miteinander zu interagieren.

Durch die Interaktion der Probanden untereinander können sich verschiedene Formen von Laufmustern bilden, wie Zhang bereits in seiner Arbeit gezeigt hat. [17, S.43] Für die vorliegende Arbeit wird es von Interesse sein, welche Muster sich bilden und in welcher Form diese Einfluss auf die Kapazität ausüben.

2. Grundlagen und Stand der Wissenschaft

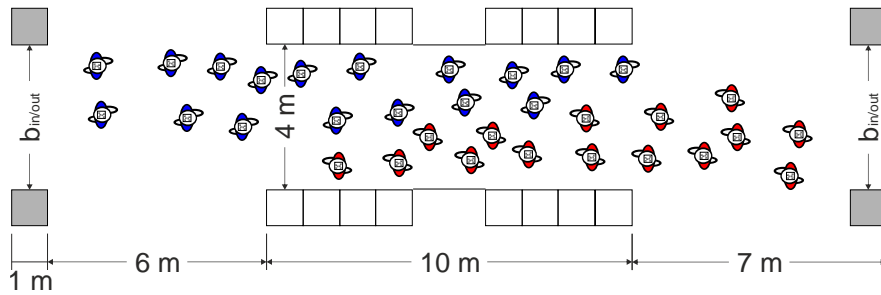


Abbildung 2.5.: Aufbau des Experiments *bi corr 400*

Tabelle 2.3.: Laufparameter des Experiments *bi corr 400 b*

Lauf	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
Eing. / <i>m</i>	0,6	0,9	1,2	1,8	2,4	3,0	4,0	4,0*	2,4	4,0
Ausg. li.	~	~	~	~	●	●	●	●	●	●
Ausg. re.	-	-	-	-	●	●	●	●	●	●
N / Pers	141	259	480	743	643	830	606	703	483	736
Schild	x	x	x	x	x	x	x	x	o	o

- gerade; ~ ungerade; ● rot; ● gelb; * ohne 6 m Abstand

2.3.3. Multidirektionale Experimente

Mit multidirektionalen Personenströmen sind insbesondere solche gemeint, die mehr als zwei Flussrichtungen aufweisen. Während der *BaSiGo* Experimente wurde eine Vielzahl von multidirektionalen Experimenten durchgeführt. Drei Kreuzungsexperimente vom 1. Versuchstag mit der Bezeichnung *cross 90 a*, *cross 90 b* und *cross 90 c* wurden zur Analyse ausgewählt. Ziel der Experimente ist es, Kreuzungen mit unterschiedlichen Verkehrsaufkommen zu generieren, um erste Erfahrungswerte mit multidirektionalen Personenströmen zu sammeln.

Die Personenströme werden von vier Richtungen in die Kreuzung eingeleitet, während der Strom über die Eingänge reguliert wird. Die Probanden erhalten die Anweisung die Kreuzung auf geradem Weg zu passieren und hinter der Kreuzung links oder rechts abzubiegen. Der Experimentaufbau wird in Abbildung 2.6 deutlich.

Die Variante *cross 90 a* kann als Basisexperiment betrachtet werden, in dem das Flussverhalten einer Kreuzung untersucht wird. In der Variante *cross 90 b* wird ein zusätzlicher Einfluss durch eine Beschilderung an den Kreuzungseingängen untersucht. Das Schild zeigt ein Kreisverkehrsymbol und wird kommentarlos angezeigt. Bei der Variante *cross 90 c* soll durch eine zusätzlich aufgestellte Säule der Personenkreisverkehr unterstützt werden.

In dieser Ausarbeitung sollen, besonders durch die Untersuchung des Experiments *cross 90 a*, Probleme und Fragestellungen bei der Messmethodik von multidirektionalen Personenströmen verdeutlicht werden. Ebenso wird versucht eine Aussage über die Kapazität der Kreuzung zu treffen.

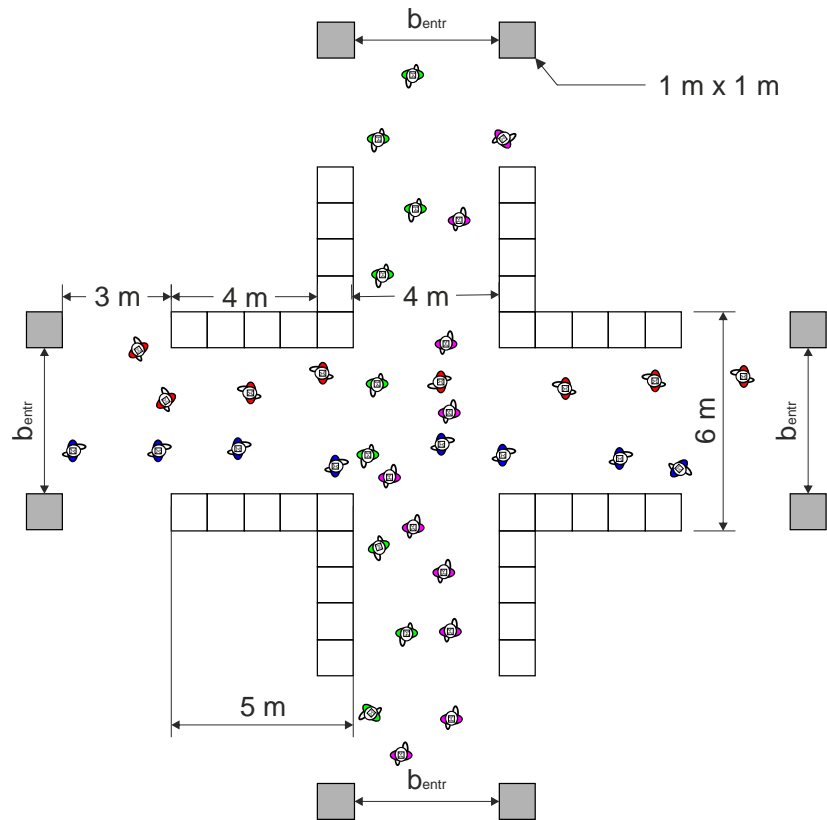


Abbildung 2.6.: Aufbau des Experiments *cross 90 a*

Tabelle 2.4.: Laufparameter der Experimente *cross 90 a,b,c*

Lauf	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
<i>cross 90 a</i>										
Eing. / m	0,6	0,6	0,9	1,2	1,5	2,0	0,6	1,2	4,0	4,0
Fluss / N/s	0,5	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	0,5	1,0
N / Pers	247	439	323	352	337	269	323	298	299	324
<i>cross 90 b</i> (Hinweisschild)										
Eing. / m	0,6	0,6	0,6	0,9	1,2	1,5	0,6			
Fluss / N/s	1,0	0,5	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	1,0			
N / Pers	222	326	322	321	326	323	231			
<i>cross 90 c</i> (Säule + Hinweisschild)										
Eing. / m	0,6	0,6	0,9	1,2	1,5	1,5	1,5*	1,2*		
Fluss / N/s	0,5	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.		
N / Pers	321	322	327	328	326	339	324	322		

n.r. nicht reguliert; *Anweisung die Säule zu beachten

2.4. Methodik

Die in diesem Kapitel beschriebene Methodik dient dazu die *BaSiGo* Experimente auszuwerten und in aussagekräftige Diagramme zu überführen. Insbesondere wurden hierzu Werkzeuge in Form von Software vom Forschungszentrum Jülich verwendet. Es wurde ein Workflow entwickelt, um alle Experimente unter der gleichen Arbeitsqualität auswerten zu können.

Die Abbildung 2.7 zeigt die Arbeitsschritte des Workflows. Die Auswertung erfolgt mit den Videodateien, welche während der Experimente aufgenommen wurden. Diese werden zunächst betrachtet, um sich einen Überblick über das Experiment zu verschaffen. Anschließend werden die benötigten Sequenzen als Einzelbilddateien (engl. frames) extrahiert. Mit den Frames werden die Laufwege der einzelnen Personen digitalisiert. Die digitalisierten Daten der Laufwege werden physikalisch als Trajektorien bezeichnet. Die Trajektorien werden schließlich dazu verwendet die Kennwerte für den Personenstrom zu berechnen.

2.4.1. Videoanalyse

Bei der Videoanalyse werden die während der Experimenten aufgenommen Videodateien analysiert, vor allem um den Verlauf der Experimente nachvollziehen zu können. Die Experimente wurden durch mehrere Kameras aus verschiedenen Blickrichtungen aufgezeichnet. Durch ein Videobearbeitungsprogramm werden die Videos synchronisiert und zu Übersichtsvideodateien zusammengeschnitten. Auf Abbildung 2.8 ist ein solches Übersichtsvideo zu sehen. Auf diese Weise lässt sich feststellen, ob die Experimente problemlos abgelaufen sind oder ob es Komplikationen gab. Auch der Experimentaufbau und -ablauf kann genau nachvollzogen werden.

Ebenso wichtig wie das Bildmaterial, ist die von der Kamera aufgenommene Audiospur. So kann beim Ansehen der Videodateien überprüft werden, welche Anweisungen durch die Experimentleitung gegeben wurden und ob die Probanden sich daran hielten.

Die Videodateien werden nicht nur zur Übersicht, sondern auch für die Auswertung der Personenströme benutzt. Aus diesem Grund können die ersten Fehlerquellen für die Auswertung bereits in den Videodateien zu finden sein. Folgende Eigenschaften können einen Einfluss auf die Auswertung oder das Messergebnis haben: [2, S. 51]

- Kamerapositionierung
- Kamerawinkel
- Höhe der Kameraaufhängung
- Bildrate der Kamera
- Kameraauflösung
- Lichtverhältnisse
- Radiale- und tangentielle Verzerrung der Kameralinse
- Brennweite der Kameralinse

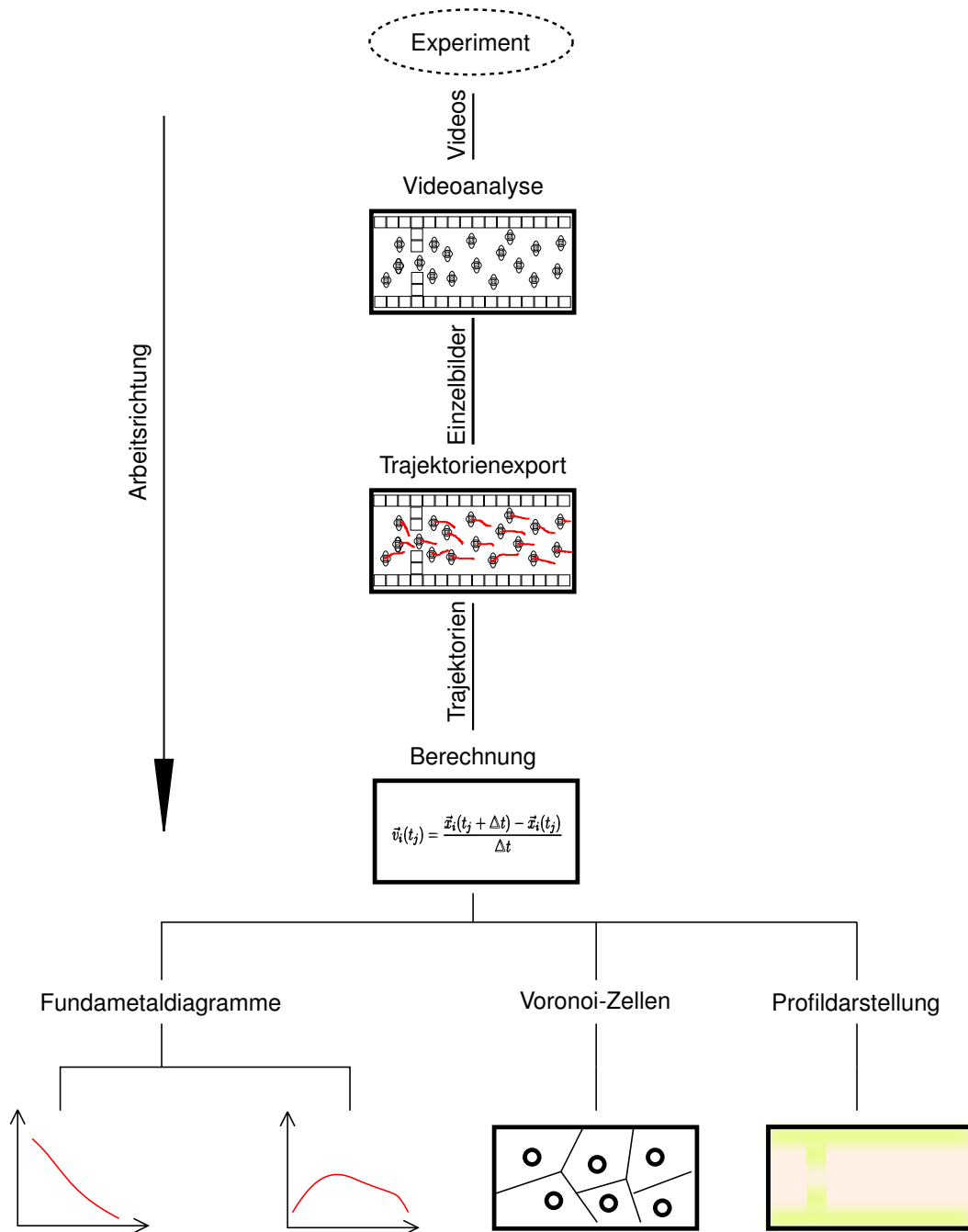


Abbildung 2.7.: Arbeitsschritte zur Auswertung von Fußgängerexperimenten

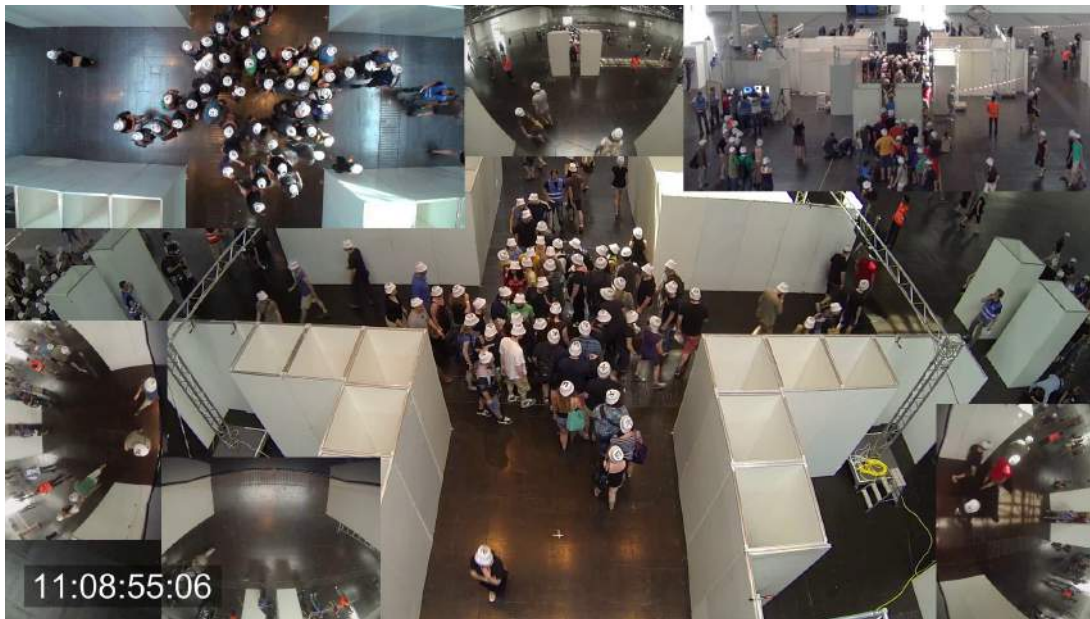


Abbildung 2.8.: Übersichtsvideo eines Kreuzungsexperiments

Für die Auswertung der Personenströme wurde schließlich die Überkopfkamera auf Abbildung 2.8 oben links ausgewählt. Die Kamera war ursprünglich nicht dafür bestimmt für den Trajektorienexport herangezogen zu werden. Zur Auswertung der Experimente sollte ein Netz aus mehreren Industriekameras dienen. Die Software, für die Auswertung des Kameranetzes, lag zum Zeitpunkt dieser Ausarbeitung nur im frühen Entwicklungsstadium vor. Unter Berücksichtigung der oben genannten Fehlerquellen liefert die Überkopfkamera jedoch eine ausreichende Genauigkeit, um Messungen an den Personenströmen durchzuführen.

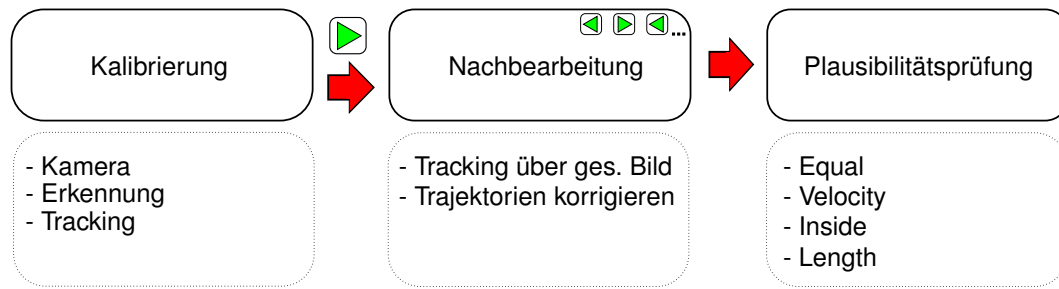
Die Videodateien wurden für das Exportieren der Trajektorien in Einzelbilddateien überführt.

2.4.2. Trajektorienexport

Bevor die Kennwerte des Personenstroms berechnet werden können, müssen die Laufwege der Personen erfasst und quantifiziert werden.

Die Digitalisierung der Laufwege der Probanden erfolgt mit Hilfe der vom *Jülich Supercomputing Centre* entwickelten Software *PeTrack*. Die Software wurde speziell für das automatische Exportieren von Trajektorien aus Videodateien entwickelt. Mit Hilfe dieses Werkzeugs ist die Auswertung von Personenströmen in einem hohem Detailgrad erst möglich. [2, S. 4] In dieser Arbeit wurde für den Trajektorienexport die Version 0.7 von *PeTrack* verwendet.

Obwohl *PeTrack* das vollautomatische Exportieren von Trajektorien ermöglicht, bleiben gewisse Arbeitsschritte für den Anwender nicht aus, um die Trajektorien in einer möglichst guten Qualität zu erhalten. Die Anwenderschritte bestehen aus dem Kalibrieren der Software, der Nachbearbei-

Abbildung 2.9.: Workflow für die Anwendung der Software *PeTrack*

tion und der Plausibilitätsprüfung. Um die Qualität der Trajektorien zu sichern, wurde ein Workflow über diese Arbeitsschritte ausgearbeitet, welcher in Abbildung 2.9 dargestellt ist.

Kalibrieren

Das Kalibrieren der Software verfligt im Wesentlichen drei Ziele und somit drei Arbeitsschritte. In einem ersten Schritt müssen die intrinsischen und extrinsischen Parameter der Kamera angepasst werden. Dies sind im Wesentlichen die auf der Seite 16 beschriebenen Einflussparameter der Kamera. [2, S. 60] Die Kalibrierung dient dazu das Kamerabild zu entzerren und zu korrigieren, damit die Koordinaten der Probanden genau erfasst werden können.

Im zweiten Schritt muss die Erkennung der Personen kalibriert werden. Die Erkennung der Personen erfolgt über die Marker, also die Kopfbedeckung der Probanden. Für die *BaSiGo* Experimente wird in *PeTrack* ein sogenannter *Colormarker* verwendet. Hierzu ist der Farbbereich, die Sättigung und die Helligkeit der Marker anzugeben. Im Idealfall und bei guter Kalibrierung wird jede Person genau einmal erkannt. Dies ist entscheidend für einen geringen Nachbearbeitungsaufwand.

Zuletzt ist die Nachverfolgung der Personen zu kalibrieren. Beim sogenannten *Tracking* werden die identifizierten Personen über den kompletten Bildbereich verfolgt. Das *Tracking* erlaubt sowohl das Verfolgen von automatisch erkannten Personen, als auch die Verfolgung von händisch markierten Personen. [2, S. 69] Das Kalibrieren des *Tracking* erfolgt größtenteils über das Einstellen des Suchbereiches.

Nachbearbeitung

Dem Kalibrieren folgt ein vollautomatischer Vorwärtslauf der Software *PeTrack*, der vor allem zur automatischen Erkennung der Personen dient. Erst beim daran anschließenden Rückwärtsdurchlauf erfolgt die Nachbearbeitung. Mit dem Rückwärtsdurchlauf wird sichergestellt, dass Personen, die im automatischen Vorwärtslauf erst sehr spät oder gar nicht erkannt wurden, mit Hilfe des *Tracking* über das ganze Videobild verfolgt werden.

2. Grundlagen und Stand der Wissenschaft

Während der Nachbearbeitung können falsch oder nicht erkannte Personen händisch hinzugefügt, korrigiert oder gelöscht werden. Die automatische Erfassung wird bei der Nachbearbeitung nicht mehr benötigt und sollte abgeschaltet sein. Die Nachbearbeitung wird solange wiederholt, bis alle Personen im kompletten Bildlauf genau einmal erfasst worden sind.

Die größten Probleme, und somit auch Fehlerquellen, bei der Nachbearbeitung treten bei einer schlechten Kalibrierung und durch ungünstige Lichtverhältnisse auf. Insbesondere ein Wechsel der räumlichen Farbtemperatur, Lichtreflektionen und Schatten wirken sich negativ auf den Nachbearbeitungsaufwand und somit auf die Qualität der Trajektorien aus.

Plausibilitätsprüfung

PeTrack bietet die Möglichkeit verschiedene Plausibilitätsprüfungen für die Trajektorien automatisch durchführen zu lassen:

Equal Prüft, ob Trajektorien direkt nebeneinander oder übereinander liegen.

Velocity Prüft die Plausibilität der Geschwindigkeit zwischen zwei Frames.

Inside Prüft, ob die Trajektorien von Bildrand zu Bildrand komplett erfasst sind.

Length Prüft, ob die Länge der Trajektorien plausibel ist.

Für alle in dieser Arbeit verwendeten Trajektorien werden, bis auf die Plausibilitätsprüfung *Velocity*, alle Prüfungen durchgeführt. Die Geschwindigkeitsprüfung muss entfallen, da es durch Lichtreflektionen sehr häufig zu „Sprüngen“ zwischen zwei Frames kommt, welche durch die Prüfung als Fehler angezeigt werden. In der späteren Berechnung wird die Geschwindigkeit nicht über jedes Frame, sondern immer über insgesamt 20 Frames ermittelt, unter anderem um diese „Sprünge“ zu relativieren.

2.4.3. Fehlerabschätzung

Es wurden bereits einige Fehler genannt, welche zur Beeinflussung der Messergebnisse führen können. An dieser Stelle ist ein guter Zeitpunkt die bisher aufgezählten Fehler genauer zu analysieren. Nur wenn die Trajektorien möglichst fehlerfrei sind, können auch die Berechnungen genau sein. Außerdem sind viele Fehler nach der Berechnung nicht mehr oder nur noch schwer zu identifizieren.

Im Allgemeinen lassen sich in Trajektorien drei Fehlerarten nennen: Erkennungsfehler, systematische Positionsfehler und lokale Positionsfehler. [1, S. 26]

Erkennungsfehler

Erkennungsfehler sind Probanden, die nicht erkannt werden oder Pixel, die fälschlicher Weise als Probanden erkannt werden. Diese Fehler können durch die manuelle Nachbearbeitung der Tra-

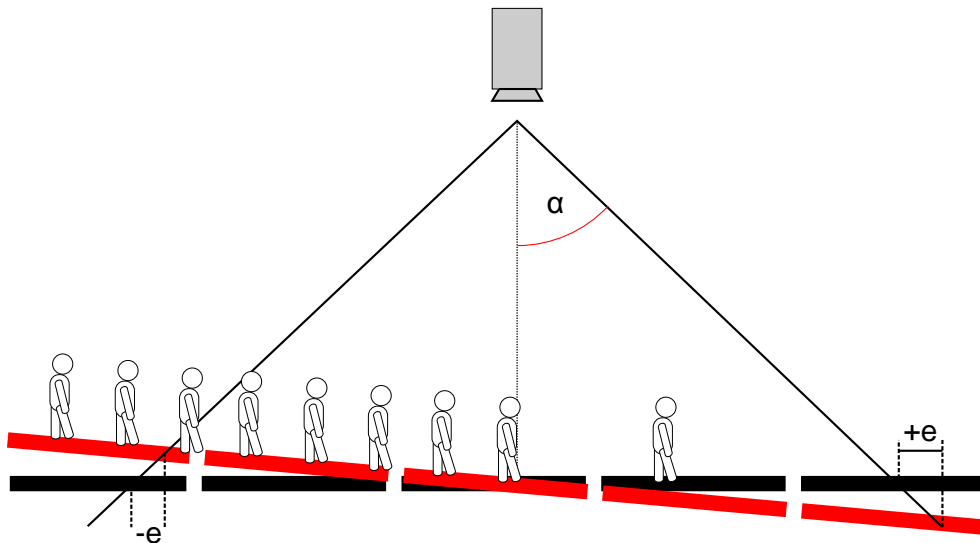


Abbildung 2.10.: Messfehler durch Schrägpositionierung der Kamera

jektorien größtenteils ausgeschlossen werden. Für die in dieser Arbeit vorliegenden Trajektorien können Erkennungsfehler $< 1\%$ angenommen werden.

Systematische Positionsfehler

Die systematischen Positionsfehler sind Fehler, die in Abhängigkeit zur Bildmitte stehen. Beispielsweise verbleibt auch nach der Entzerrung des Bildes an den Rändern eine gewisse Ungenauigkeit, welche nur schwer quantifizierbar ist.

Ein weiterer systematischer Positionsfehler ist die Schrägposition der Kamera. Die Abbildung 2.10 zeigt, wie die Position der Probanden durch eine Kameraschräglage unter- oder überschätzt wird. Bei der Kalibrierung von *PeTrack* traten Probleme auf, welche eine leichte Kameraschräglage bei den Experimenten vermuten lassen.

Auch die Körpergröße der Probanden hat einen entscheidenden Einfluss auf die Messung. In Abbildung 2.11 ist der Einfluss des Kamerawinkels und der Körpergröße auf einen maximalen Fehler e dargestellt. Dieser Fehler lässt sich mit folgender Formel berechnen: [3]

$$e = |d \cdot \tan \alpha| \quad (2.13)$$

Mit den in der Tabelle 2.5 angenommen Parametern ergibt sich schließlich ein maximaler Fehler e von ~ 12 cm. Indem für die Probanden eine durchschnittliche Körpergröße von 1,76 m und eine Normalverteilung derer angenommen wird, soll dieser Fehler möglichst minimiert werden.

Ein für die Messung einflussreicher Fehler entsteht durch den systematischen Positionsfehler des *Colormarkers*. [3] Sobald die Probanden in das Bild eintreten wird die Position der Personen an der Stirn erfasst. Aufgrund des Kamerawinkels rückt die Positionserfassung bis zur Bildmitte in die

2. Grundlagen und Stand der Wissenschaft

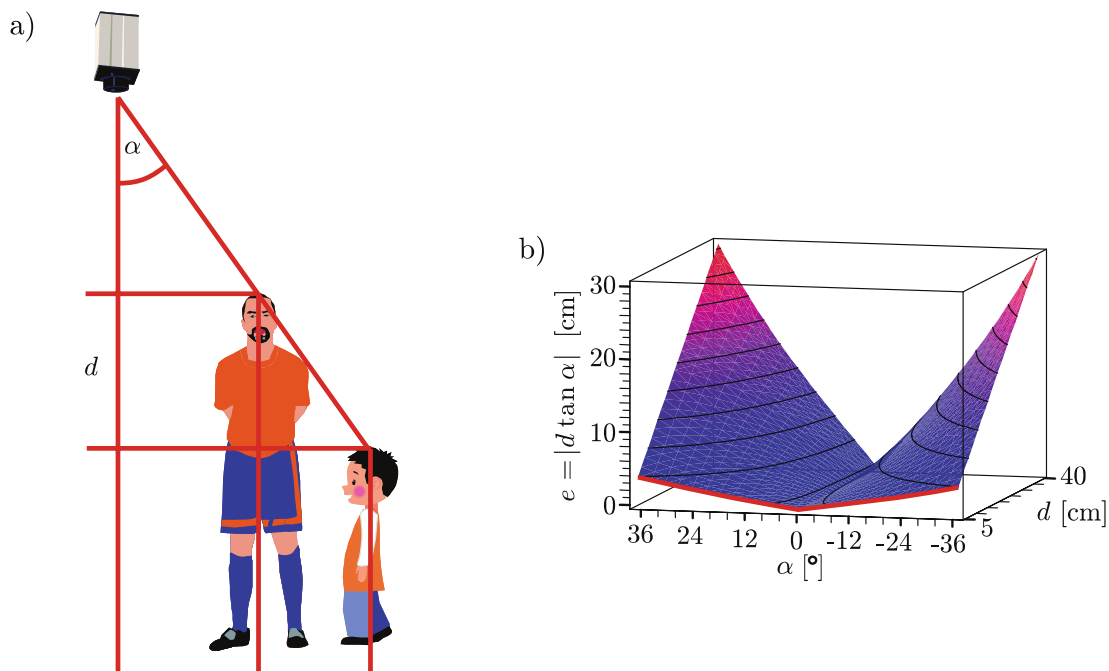


Abbildung 2.11.: Einfluss des Kamerawinkels und Körpergröße auf den maximalen Fehler e [3, S. 53]

Tabelle 2.5.: Parameter zur Berechnung des maximalen Fehlers e

Parameter	α	d
Wert	25°	25 cm
Grundlage	Winkel bei einer Kamerahöhe von 7,5 m und einem Abstand von $>2,5$ m vom Kameramittelpunkt.	5 % bis 95 % Perzentil bei einer durchschnittlichen Körpergröße von 1,76 m.*

* Datengrundlage sind Umfragen des Experiments „Hermes“ aus dem Jahr 2009



Abbildung 2.12.: Systematischer Positionsfehler des *Colormarkers*

Nähe der Kopfmitte. Dort allerdings verbleibt die Positionserfassung, bis die Probanden das Bild wieder verlassen, aufgrund des erfassten BaSiGo-Codes. Abbildung 2.12 veranschaulicht dieses Phänomen.

Lokale Positionsfehler

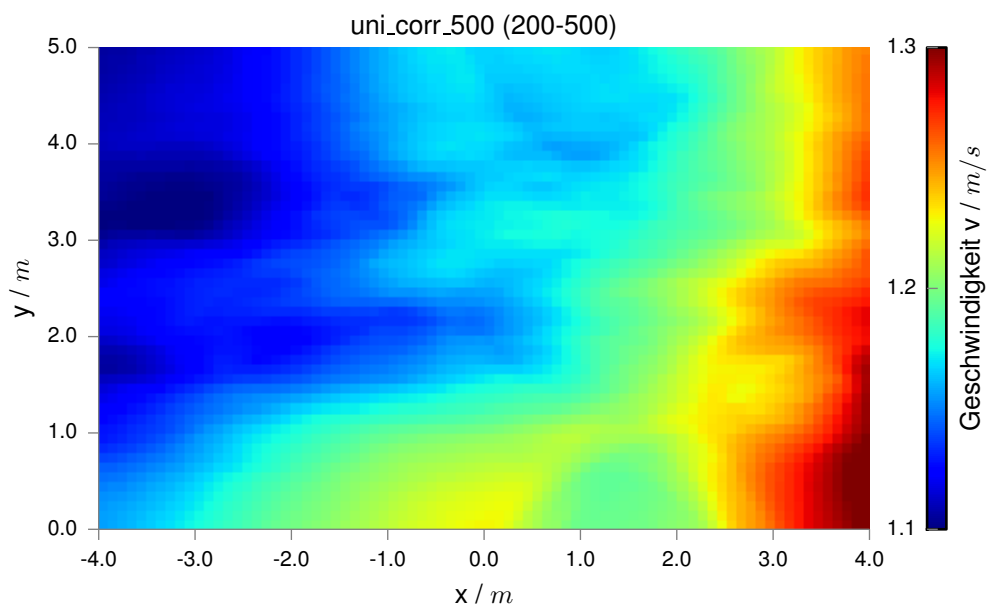
Ein lokaler Positionsfehler kommt durch eine variierende Position des Markers auf dem Kopfe zustande, wenn die Probanden die Kopfbedeckung nicht den Anweisungen entsprechend getragen haben.

Zusammenfassend lassen sich die vielen Fehlerquellen nur schwer quantifizieren. Es muss davon ausgegangen werden, dass einige der genannten Fehler Einfluss auf die Messungen und die folgenden Berechnungen genommen haben. Es stellt sich die Frage, inwieweit sich dies auf die in dieser Arbeit beobachtete Fragestellung nach der Kapazität auswirkt.

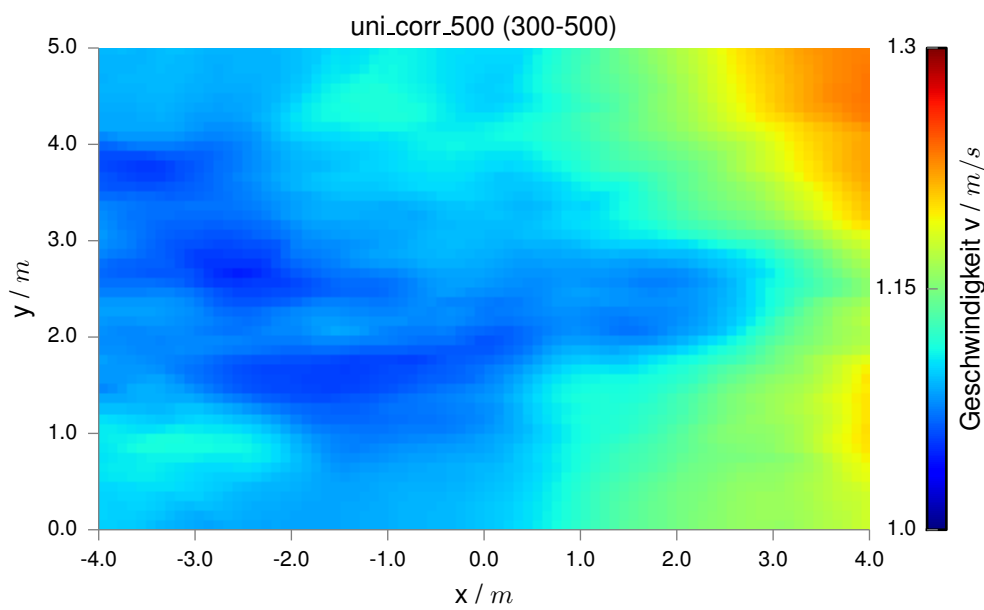
Die meisten erkannten Fehler sind systematische Positionsfehler. Da die Position zu den Bildrändern hin falsch eingeschätzt wird, werden auch die Dichte und die Geschwindigkeit falsch eingeschätzt. Um zu analysieren, ob große Geschwindigkeitsschwankungen an den Bildrändern zu beobachten sind, wurden Geschwindigkeitsprofile über einen sehr sensiblen Geschwindigkeitsbereich erstellt. Eine Erläuterung zur Profildarstellung folgt in Kapitel 3.1.2.

In Abbildung 2.13 sind deutliche Unterschiede in den Geschwindigkeiten zwischen der linken und rechten Bildseite zu erkennen. Um auszuschließen, dass dieser Effekt nur durch die Gehrichtung der Probanden zustande kommt, wurden die Plots für beide Gehrichtungen erstellt. Sowohl in Abbildung 2.13 a als auch in Abbildung 2.13 b verbleibt ein Geschwindigkeitszuwachs auf der

2. Grundlagen und Stand der Wissenschaft



a) Geschwindigkeitsprofil mit der Gehrichtung von rechts nach links



b) Geschwindigkeitsprofil mit der Gehrichtung von links nach rechts

Abbildung 2.13.: Profildarstellung der Geschwindigkeit zur Fehlererkennung

rechten Seite. Der Geschwindigkeitsgradient ist auch in weiteren Experimenten zu beobachten. Dies könnte vor allem auf eine Schrägpositionierung der Kamera hinweisen.

Durch die Verwendung des für die *BaSiGo* Experimente aufgestellten Kameranetzes könnten viele der oben aufgezeigten Fehler minimiert werden. Trajektorien aus der zukünftigen Ausarbeitung mit der neuen Software könnten mit den vorliegenden Ergebnissen verglichen werden.

Oben wurden Fehler beschrieben, die für die Ausarbeitung als wichtig erachtet wurden. Weitere Fehlerquellen bei der Ermittlung von Trajektorien finden sich in der Literatur [2].

2.4.4. Berechnung

Für die Berechnung der Personenstromkennwerte und zur Diagrammdarstellung wurden Werkzeuge vom *Jülich Supercomputing Centre (JSC)* verwendet. Im Laufe der Forschungsarbeiten an Personenströmen wurde das Softwarepaket *JuPedSim* entwickelt. In der vorliegenden Arbeit kam besonders der Softwarebaustein *JPSreport* zur Trajektorienanalyse zum Einsatz.

JPSreport wurde entwickelt, um in einem standardisierten Verfahrenen Personenstromkennwerte zu ermitteln. Die Arbeit von Zhang [17] beschreibt die mathematischen Grundlagen der Software. Auch alle in Kapitel 2.1 genannten Kennwerte können mit *JPSreport* ermittelt werden. Das Programm nutzt die Trajektorien im *XML*-Dateiformat um die Berechnungen durchzuführen. Des Weiteren muss der Anwender eine *XML*-Datei mit den geometrischen Daten des Experiments bereitstellen. In einer dritten *XML*-Datei zur Initialisierung müssen Messmethode (Tabelle 2.1) und Randbedingungen für die Berechnung angegeben werden.

Der Anwender erhält die geforderten Kenndaten im *ASCII*-Dateiformat. Diese kann er nach belieben weiterverarbeiten. Die hier verwendete Version von *JPSreport* ist auf einem Entwicklungsstand vom 01.09.2014.

Für Berechnungen die außerhalb von *JPSreport* stattfinden mussten, wurde die Programmiersprache *Python* verwendet. Die Open-Source Software *Python (x,y)* liefert viele wichtige Module, die zur Berechnung großer Datenmengen hilfreich sind. Die verwendete Version von *Python (x,y)* trägt die Laufnummer 2.7.6.1. Alle Skripte, mit denen Berechnungen durchgeführt wurden sowie die Plausibilitätsprüfungen der Skripte, sind im digitalen Anhang dieser Arbeit zu finden. (A.1)

Die Berechnung der Personenstromkennwerte ist ein wesentlicher Teil des nächsten Kapitels. Es werden verschiedene Mess- und Berechnungsmethoden verwendet und geeignete Parameter für die Berechnung gesucht. Die berechneten Kennwerte werden schließlich in verschiedenen Diagrammen dargestellt.

3. Analyse der Experimente

3.1. Unidirektionale Experimente

Als Erstes soll das unidirektionale Experiment *uni corr 500* ausgewertet werden. In vielen Veröffentlichungen wurden bereits Kennwerte für unidirektionale Personenströme gemessen und bestimmt. [17, 4, 16, 9] Die in dieser Arbeit stattfindende Auswertung dient vor allem dazu, die eigene Methodik zu überprüfen und zu festigen. Außerdem können auf diese Weise aussagekräftige Vergleichswerte für die spätere Analyse der multidirektionalen Personenströme geschaffen werden.

3.1.1. Trajektorien

Die Trajektorien stellen die Laufwege der Probanden dar, anhand derer Verhaltensmuster für die Bewegungen der Experimentteilnehmer abgeleitet werden können.

In Abbildung 3.1 sind die Trajektorien von drei Experimentläufen dargestellt. Im oberen Bild wurde der Eingang des Korridors mit einer Durchgangsbreite von 3 m begrenzt, dennoch breiten sich die Trajektorien gleichmäßig über fast die gesamte Breite des Korridors aus. Lediglich an den Rändern ist ein Laufabstand zu den Wänden zu beobachten.

Der Abstand zu den Außenwänden lässt sich auch im mittleren Bild beobachten. In diesem Lauf ist die Ausgangsbreite des Korridors auf 3 m begrenzt. Die Probanden wechseln vor der Engstelle von den Außenrändern in die Mitte des Korridors. Dies führt dazu, dass die Ecken vor der Engstelle wenig genutzt werden. Ansonsten sind die Trajektorien homogen über den gesamten Korridor verteilt und eine Bildung von Pfaden kann nicht beobachtet werden.

In der unteren Grafik in Abbildung 3.1, in der der Lauf abgebildet ist, bei dem die Ausgangsbreite auf 1 m reduziert wird, sind kleine knotenartige Gebilde zu sehen. Die Knoten sind ein Hinweis auf Stausituationen, in welchen die Probanden stehen bleiben müssen.

In der Engstelle der unteren Abbildung ist außerdem zu beobachten, dass Trajektorien durch die feststehenden Hindernisse führen. Dies ist auf die systematischen Positionsfehler der Trajektorien zurückzuführen, die in Kapitel 2.4.3 angesprochen wurden. Da die Engstelle an den Rändern des Auswertungsvideos liegt, weisen die Trajektorien hier eine gewisse Ungenauigkeit auf.

Die Trajektorien geben wichtige Hinweise darauf, an welchen Stellen die Messfläche angesetzt werden kann, um Geschwindigkeit und Dichte des Personenstroms zu messen. So lässt sich

3. Analyse der Experimente

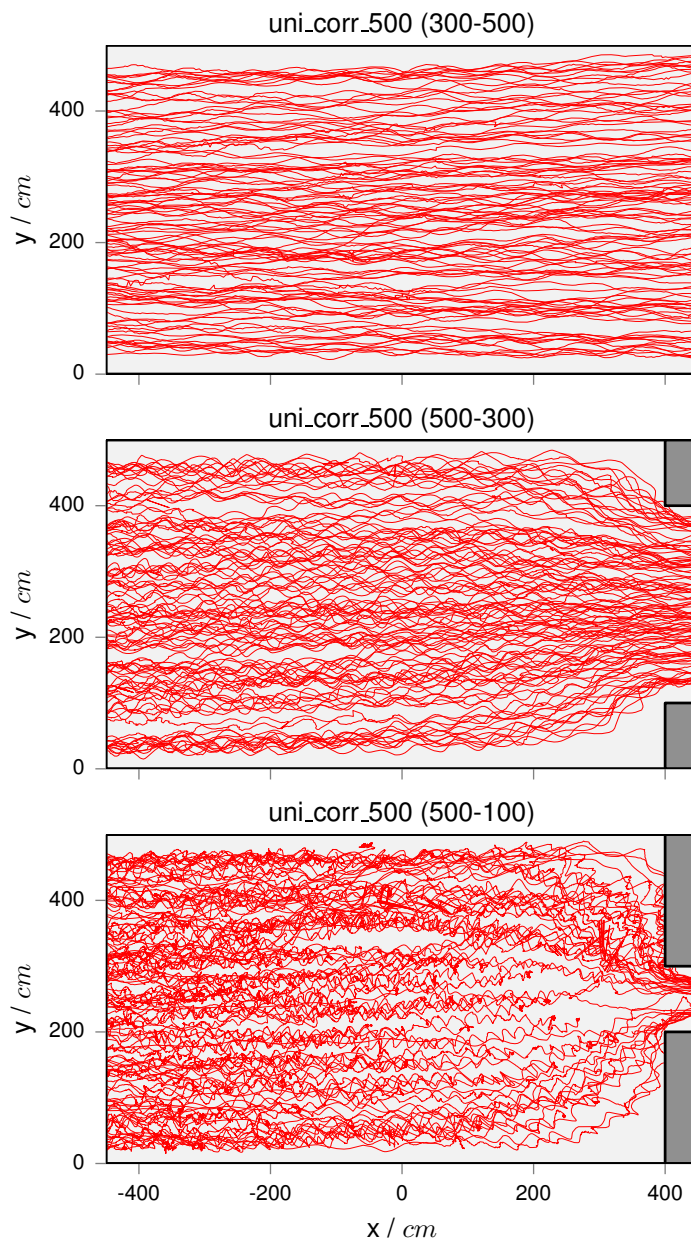


Abbildung 3.1.: Trajektorien von drei Läufen des Experiments *uni corr 500*

darauf schließen, dass die Messfläche nicht zu nah an der Engstelle liegen darf. Die Engstelle soll dazu dienen den Fluss im Korridor gezielt zu verlangsamen, um zu beobachten welche Dichte sich im Korridor bei geringeren Geschwindigkeiten einstellt. Da die Ecken vor der Engstelle nicht von den Probanden genutzt werden, ist die Personendichte vor der Engstelle nicht repräsentativ für den Korridor. Zu der selben Erkenntnis kam bereits Zhang [17, S. 60].

3.1.2. Profildarstellung

Die Profildarstellung der Kennwerte Dichte, Geschwindigkeit und spezifischer Fluss ist durch die Voronoi-Methode möglich. Eine Profildarstellung stellt den Verlauf der Kennwerte in x-,y-Richtung als Mittelwert über die Zeit dar. Hierzu wird der experimentelle Raum in ein 10 cm² Raster eingeteilt. Für jedes Einzelbild kann nun die durchschnittliche Voronoidichte oder -geschwindigkeit auf dem Raster mit Hilfe eines Integrals ermittelt werden. [17, S. 58] Schließlich werden diese Werte über den stationären Zustand des Experiments gemittelt.

Die Abbildung 3.2 zeigt das Profil verschiedener Läufe im Experiment *uni corr 500*. Auf der linken Seite a ist ein Lauf mit geringer Eingangsbreite zu sehen. Die Dichte in dem Korridor ist dementsprechend niedrig. Am Rand des Korridors treten niedrigere Dichten als in der Mitte auf. Auch der Randeffekt ist in der Profildarstellung des spezifischen Flusses zu sehen. Die Geschwindigkeit der Personen scheint über den Korridor homogen verteilt zu sein.

Auf der rechten Seite b ist die Profildarstellung eines Experimentalaufs mit hoher Dichte zu sehen. Kurz vor der Engstelle mit der Durchgangsbreite von 2 m ist die Dichte am höchsten. Die Dichte ist an dieser Stelle inhomogen über den Querschnitt des Korridors verteilt. Allgemein lässt sich sagen, dass der Randeffekt zur Engstelle hin größer wird. Die Geschwindigkeit ist ebenfalls nicht gleichmäßig über den Querschnitt verteilt, an den Rändern haben die Probanden eine höhere Durchschnittsgeschwindigkeit. Der spezifische Fluss weist kurz vor der Engstelle sehr hohe Werte auf. Mit zunehmendem Abstand zur Engstelle scheint sich der Fluss homogen über den Querschnitt des Korridors zu verteilen. Ein fast gleichmäßig verteilter Fluss ist zu beobachten, wenn der Abstand zur Engstelle mindestens 4 m beträgt.

Die Profildarstellung gibt weitere wichtige Hinweise für die Auswahl einer geeigneten Messstelle. Der Randeffekt ist in beiden dargestellten Läufen des Experiments, und auch in weiteren zu beobachten. Da in dieser Arbeit verschiedene Experimente miteinander verglichen werden sollen, ist der Rand gleichermaßen in die Messung mit einzubeziehen oder auszuschließen. Außerdem scheint der Randeffekt zur Engstelle hin einen immer größer werdenden Einfluss zu haben. Wenn die Kennwerte des Korridors interessieren, und nicht die Kennwerte der Engstelle, ist für die Messung ein Mindestabstand von 4 m zu wählen. Aufgrund der geringen Größe des Videoausschnittes, musste allerdings auf einen Abstand von bis zu 2,4 m zurückgegriffen werden.

3. Analyse der Experimente

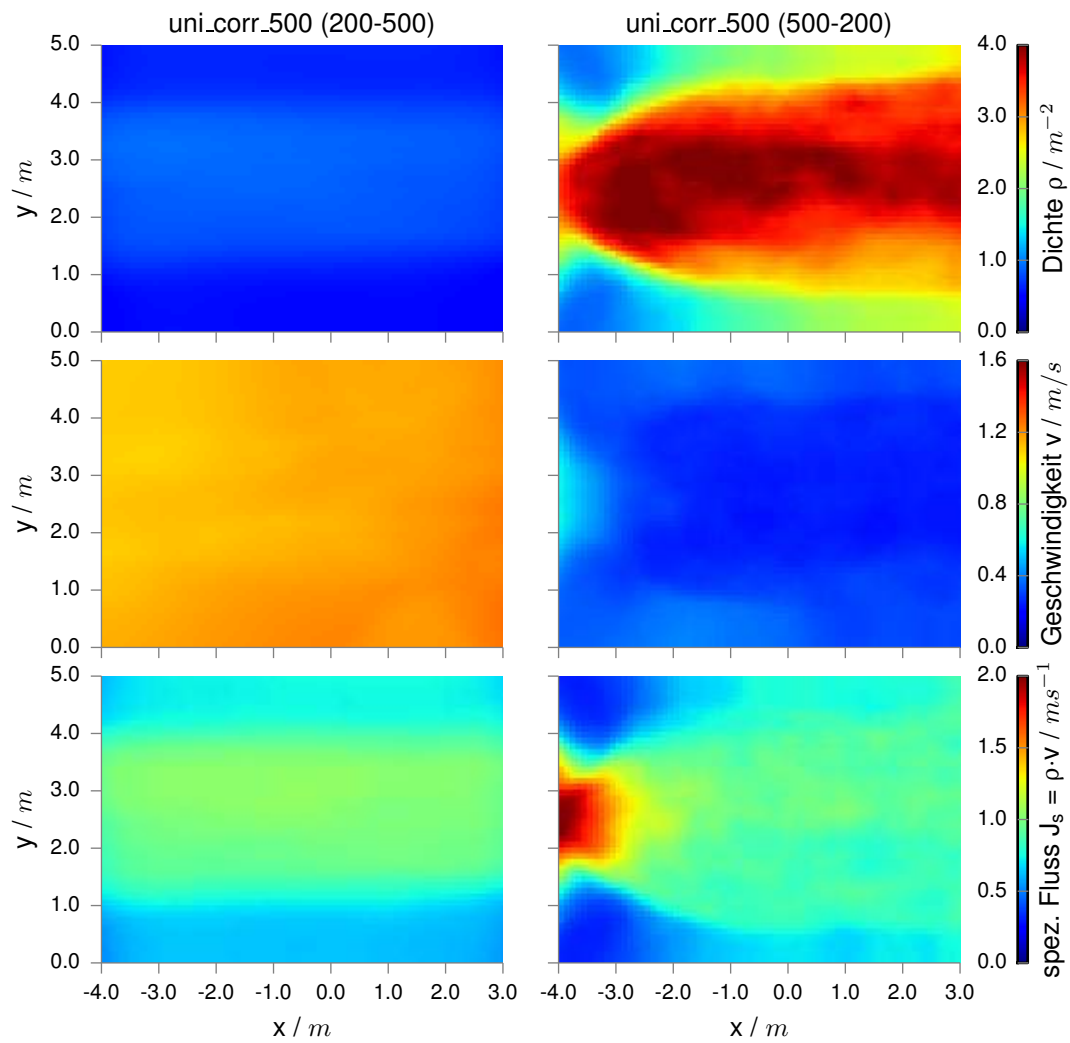


Abbildung 3.2.: Profildarstellung ausgewählter Läufe des unidirektionalen Experiments

Tabelle 3.1.: Parameter und Randbedingungen zur Flussmessung des Experiments *unicorr500*

Parameter	Wert	Erläuterung
Messfläche A	4 m x 3,2 m	Zentrum der Messfläche ist die Nulllinie
Messlinie L	Nulllinie	Mittelpunkt des Experimentaufbaus
Frameintervall ΔF	100 Frames	Mittelung der Flussmessung nach Methode A
Zeitintervall Δt	20 Frames	Intervall für die Berechnung der Geschwindigkeit
Geschwindigkeit \vec{v}	x; y	Anteile des genutzten Geschwindigkeitsvektors

3.1.3. Methodik zur Flussmessung

In diesem Kapitel soll der spezifische Fluss in dem unidirektionalen Experiment *unicorr500* bestimmt werden. Hierzu bietet sich zum einen die Voronoi-Methode an, da die mit dieser Methode erhaltenen Messwerte wenig Fluktuationen und geringe Standardabweichungen aufweisen. [17, S. 51] Zum anderen soll mittels direkter Flussmessung überprüft werden, ob Abweichungen zwischen den Messmethoden aufzufinden sind.

Für die Messungen ist eine geeignete Messfläche und eine geeignete Messlinie im Korridor auszuwählen. Mit Hilfe der Trajektorien und der Profildarstellung lässt sich gut abschätzen, an welcher Stelle die Kennwerte des Personenstroms aussagekräftig sind. Ebenso hängt die Qualität der Kennwerte vom Abstand zur Bildmitte ab, wie in Kapitel 2.4.3 erläutert wurde.

Zusätzlich muss beachtet werden, dass die Vergleichbarkeit zu den anderen Experimente gegeben bleibt. Wie Zhang gezeigt hat, hängen die Kennwerte stark von der Größe der Messfläche ab. [17, S. 62] Um sicherzustellen, dass uni-, bi- und multidirektionale Experimente mit einer gleich großen Messfläche ausgewertet werden, wird an dieser Stelle eine Messfläche von 16 m² festgelegt.

Die Messfläche soll von einem Rand bis zum anderen Rand des Korridors reichen, um die Kennwerte in der gesamten Breite zu erfassen. Der dabei mitgemessene Randeffect soll bei allen Experimenten gleichermaßen berücksichtigt werden. Als Zentrum der Messfläche wird die Achse am Mittelpunkt des Korridors gewählt. Die Mittelachse stimmt ungefähr mit der Bildmitte des Auswertungsvideos überein. Damit werden die Verzerrungen an den Bildrändern möglichst gemieden.

Die Parameter und Randbedingungen zur Flussberechnung werden in der Tabelle 3.1 zusammengefasst. Der Fluss wird sowohl mittels Methode A, als auch mittels Methode D gemessen. Der gemessene Fluss nach Methode A wird über 100 Frames gemittelt, dies entspricht einem Zeitintervall von 4 s. Die Parameter Δt und der Geschwindigkeitsvektor \vec{v} wurden in Kapitel 2.1 erläutert.

Mittels der Trajektorien und der Software *JPSreport* werden die Kennwerte schließlich berechnet. Ergebnisse der Berechnungen sind die Geschwindigkeit und die Dichte in der Messfläche sowie

3. Analyse der Experimente

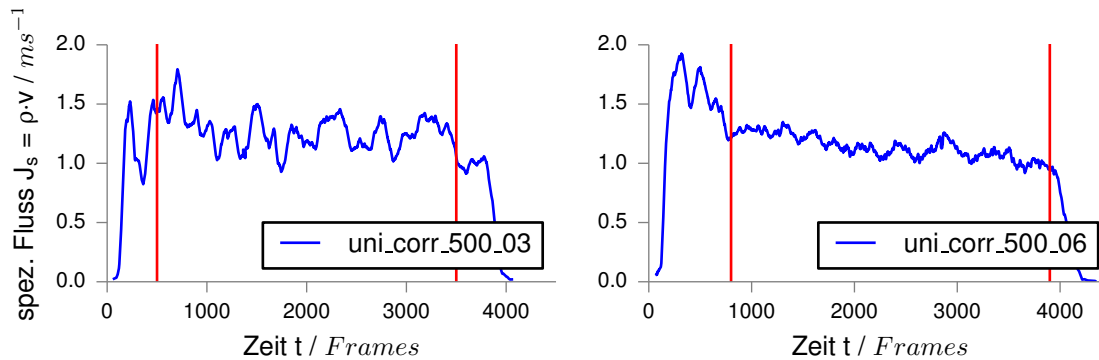


Abbildung 3.3.: Stationäre Zustände der Experimentläufe *uni corr 500 03* und *uni corr 500 06*

der Fluss und die Geschwindigkeit an der Messlinie. Der erste Schritt in der Auswertung besteht darin den stationären Zustand der Experimentläufe zu ermitteln.

Die Abbildung 3.3 zeigt den Flussverlauf zweier Experimentläufe. Wie zu erkennen, ist der Fluss nicht über das gesamte Experiment stationär. Für die Erstellung des Fundamentaldiagramms interessiert das Flussplateau zwischen den rot dargestellten Linien. Der stationäre Zustand ist für jeden Experimentlauf zu ermitteln.

Aus den Messdaten lässt sich der spezifische Fluss entweder durch die Flussgleichung $J_s = \rho \cdot v$ nach Methode D berechnen oder durch Methode A mittels $J_s = J/b$ ablesen, wenn b die Breite des Korridors ist. In einer ersten Analyse soll festgestellt werden, in welchem Ausmaß sich diese beiden Methoden zur Flussbestimmung unterscheiden. Hierzu wurde in Abbildung 3.4 der spezifische Fluss mit beiden Methoden ermittelt und über alle Experimentläufe dargestellt. In der Abbildung wird nicht nur der stationäre Zustand sondern immer der gesamte Experimentlauf abgebildet.

Es ist zu erkennen, dass die beiden Messmethoden in den ersten Experimentläufen gut übereinstimmen. Wie erwartet treten bei der Methode A größere Schwankungen in der Flussmessung auf. Ab Experimentlauf 07 sind erste Differenzen zwischen den beiden Messmethoden zu erkennen. Die Differenz wird bis zum Experimentlauf 10 immer deutlicher. Der Ausgangsfluss aus dem Experiment wurde mit steigender Laufnummer verringert und die Personendichte erhöht. In den Experimenten mit hoher Dichte scheinen die Messmethoden zu unterschiedlichen Messergebnissen zu führen.

Als nächstes soll überprüft werden, ob das Phänomen weiterhin auftritt, wenn die Messlinien relativ zur Messfläche verschoben werden. Abbildung 3.5 zeigt eine gelbe Messlinie, welche sich rechts von der Messfläche befindet, eine blaue Messlinie mittig der Messfläche und eine grüne Messlinie links von der Messfläche.

Um Unterschiede zwischen den Messungen an den verschiedenen Messlinien zu untersuchen, wurde der Experimentlauf 09 näher betrachtet. Die Abbildung 3.6 stellt die verschiedenen Flussmessungen dar. An allen Messlinien ist der Fluss niedriger, als in der mit Methode D gemessenen

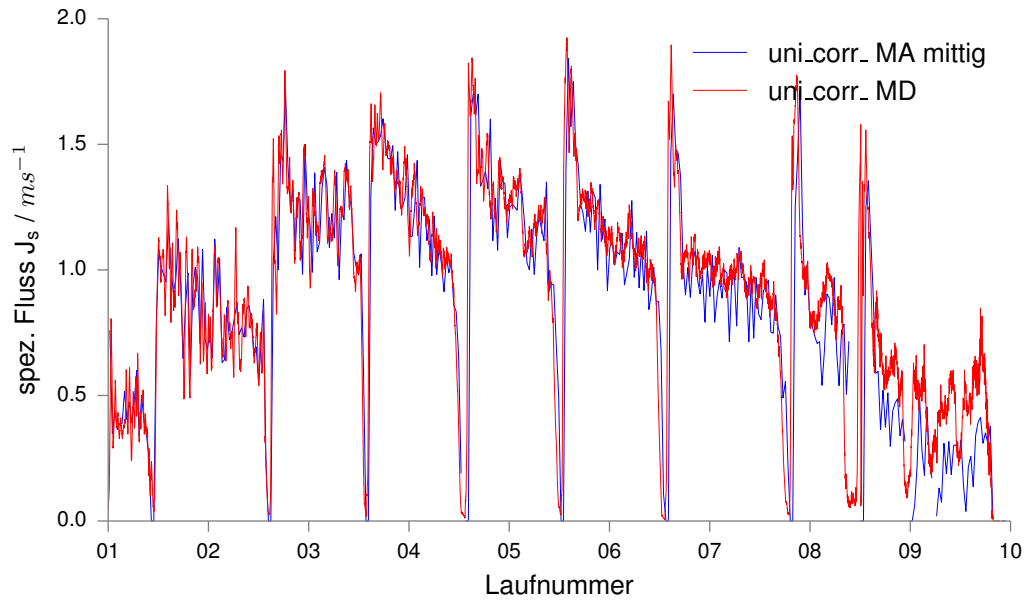


Abbildung 3.4.: Spezifischer Fluss des Experiments *uni corr 500* gemessen mit unterschiedlichen Messmethoden

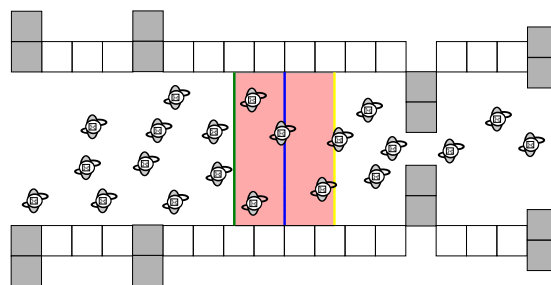


Abbildung 3.5.: Messfläche zur Messung nach Methode D und Messlinien zur Messung nach Methode A des unidirektionalen Experiments

3. Analyse der Experimente

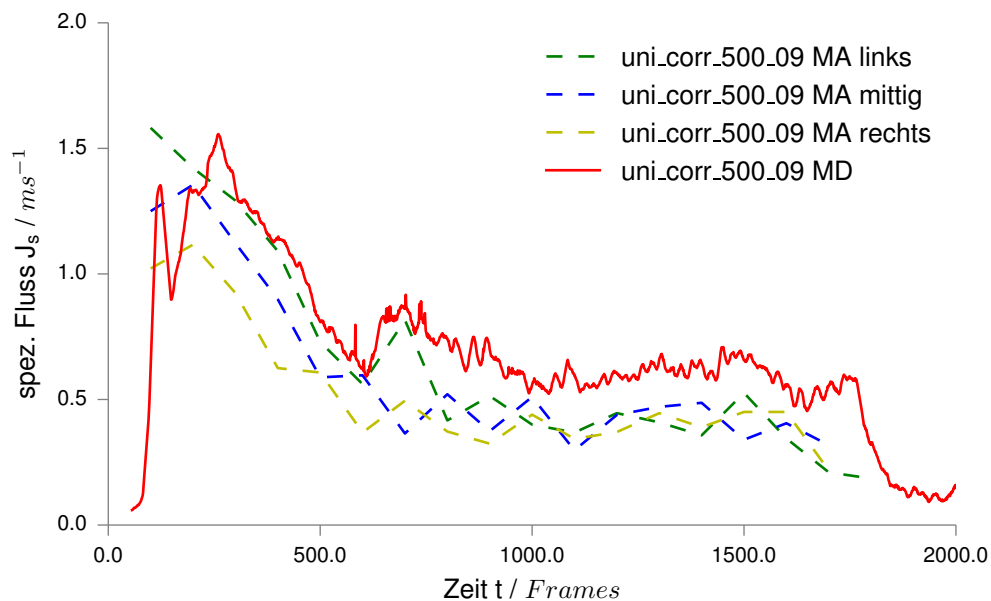


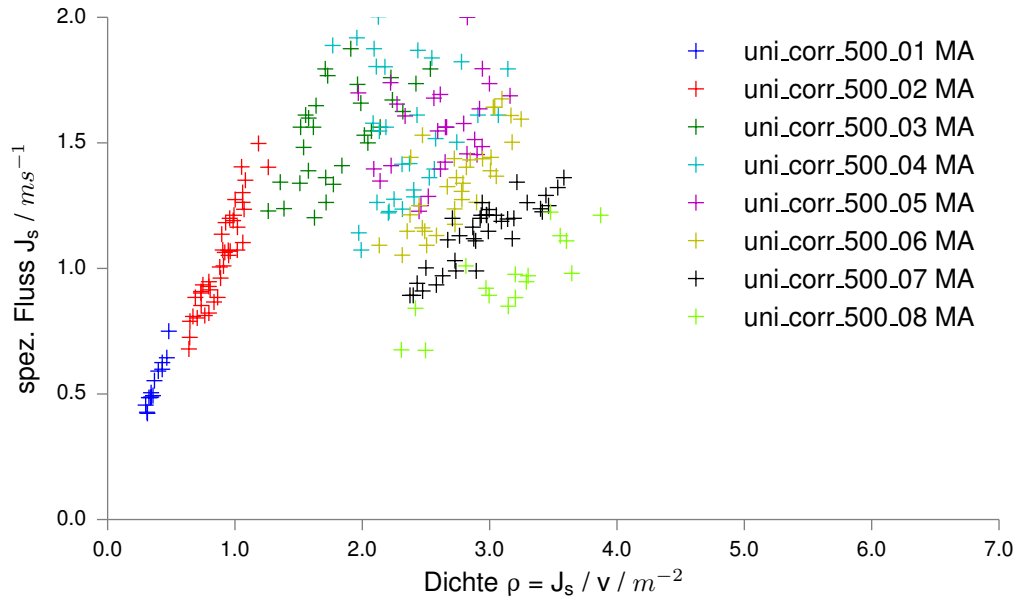
Abbildung 3.6.: Spezifischer Fluss des Experimentlaufs *unicorr50009* gemessen mit unterschiedlichen Messmethoden

Messfläche. Zusätzlich weisen die Daten der Methode A unterschiedliche Verläufe zu Beginn des Experimentlaufs auf. Im stationären Zustand dagegen sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Messlinien zu beobachten.

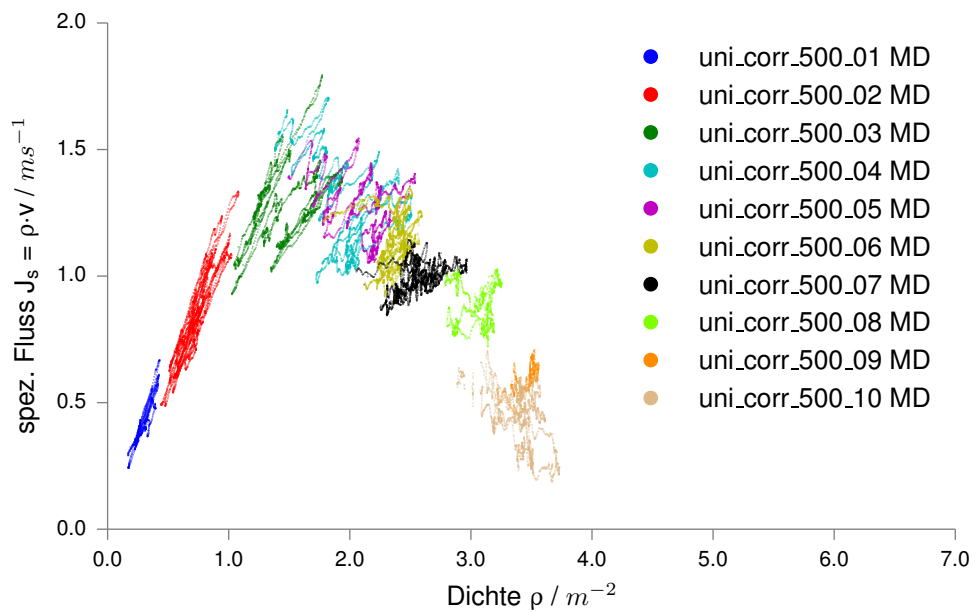
Obwohl die Messergebnisse in einigen Experimentläufen variieren, lässt sich nur schwer eine Aussage darüber treffen, welche Methode den tatsächlichen Personendurchsatz misst. Eine wichtige Erkenntnis ist allerdings, dass die ersten Läufe, unabhängig von der Messmethode, vergleichbare Messergebnisse aufweisen. Für die Messung der Kapazität sind vor allem die ersten Experimentläufe wichtig, da diese den Freiflussast im Fundamentaldiagramm darstellen.

Die Abbildung 3.7 zeigt die mit beiden Messmethoden erstellten Fundamentaldiagramme. Aufgrund der hohen Streuung wurde auf die Darstellung der letzten zwei Läufe im Fundamentaldiagramm der Methode A verzichtet.

Es ist erkennbar, dass die Experimentläufe 07 bis 10 im gestauten Ast des Fundamentaldiagramms liegen. Der Wechsel vom Freiflussast in den gestauten Ast findet ungefähr im vierten Experimentlauf statt. Besonders das Fundamentaldiagramm der Methode D zeigt, dass mit dem Experiment *unicorr500* ein vollständiges Fundamentaldiagramm abgebildet werden kann. Da der Freiflussast beider Diagramme vergleichbare Ausprägungen hat, sind vermutlich beide Methoden geeignet, um die Kapazität des Experimentes festzustellen.



a) Fundamentaldiagramm nach Methode A



b) Fundamentaldiagramm nach Methode D

Abbildung 3.7.: Fundamentaldiagramme *uni corr 500* berechnet mit Methode A und Methode D

3.2. Bidirektionale Experimente

In den bidirektionalen Experimenten treten Probleme auf, die bei unidirektionalen Personenströmen nicht zu beobachten sind. Von besonderem Interesse ist die Flussmessung der beiden entgegengesetzten Personenströme. Der Fluss wird nicht mehr durch eine statische Engstelle begrenzt, sondern durch dynamische Engstellen, nämlich dem entgegengesetzten Personenstrom. Die Problematik wird deutlicher, wenn die Trajektorien und die Profildarstellung des Experiments *bi corr 400* betrachtet werden.

3.2.1. Trajektorien

In den bidirektionalen Experimenten ist das Verhalten zwischen den zwei entgegengesetzten Personenströmen von Bedeutung. Der eine Strom ist jeweils vom anderen Strom abhängig und es stellt sich die Frage, wie und in welcher Form sich die beiden Personenströme den verfügbaren Raum aufteilen. Die Trajektorien veranschaulichen welche Pfade die Probanden nehmen und ob bestimmte Muster zu beobachten sind.

Um die beiden Eingangsströme voneinander unterscheiden zu können, wurde in Abbildung 3.8 eine zweifarbige Darstellung der Personenströme gewählt. Die roten Trajektorien bilden die Laufwege aller Probanden ab, die das Experiment von der linken Seite betreten haben. Die Trajektorien der von rechts eintretenden Probanden sind blau dargestellt. Auf diese Weise lässt sich die Separierung oder die Vermischung der Personenströme veranschaulichen. Die Trajektorien der ersten und der letzten 50 Probanden des jeweiligen Laufs wurden nicht dargestellt, um die Laufwege der Personen im stationären Zustand hervorzuheben.

Die obere Abbildung zeigt die Trajektorien des Experimentlaufs *bi corr 400 02*. Die Eingangsbreiten sind in diesem Lauf auf 0,9m begrenzt. Durch die geringe Anzahl von Personen im Korridor können sich beide Flüsse ungehindert bewegen. Somit zeichnen sich kaum Strukturen in den Laufwegen der Probanden ab.

In den Trajektorien des Laufs *bi corr 400 03* sind dagegen Linienbildungen in den Laufwegen zu beobachten. Beide Ströme orientieren sich in ihrer Laufrichtung rechts und bilden zwei entgegengesetzte nebeneinander herlaufende Ströme. Zhang bezeichnet dieses Phänomen als „Stable Separated Lanes“ (SSL) [17, S. 43], also stabile Linienbildung. Zwar wechseln die Probanden kurz vor dem Ausgang die Korridorseite, dies führt aber nicht dazu, dass die stabile Linienbildung unterbrochen wird.

Auch in den Trajektorien des Laufs *bi corr 400 04* ist eine bevorzugte Korridorseite der jeweiligen Eingangsflüsse zu beobachten. Allerdings kommt es zu einer Aufspaltung des blau dargestellten Personenstroms. Diese Linienbildung ist sehr instabil und nicht konsistent über die Zeit. In dieser Hinsicht kann von „Dynamical Multi Lanes“ (DML) [17, S. 43], also mehreren dynamischen Linien

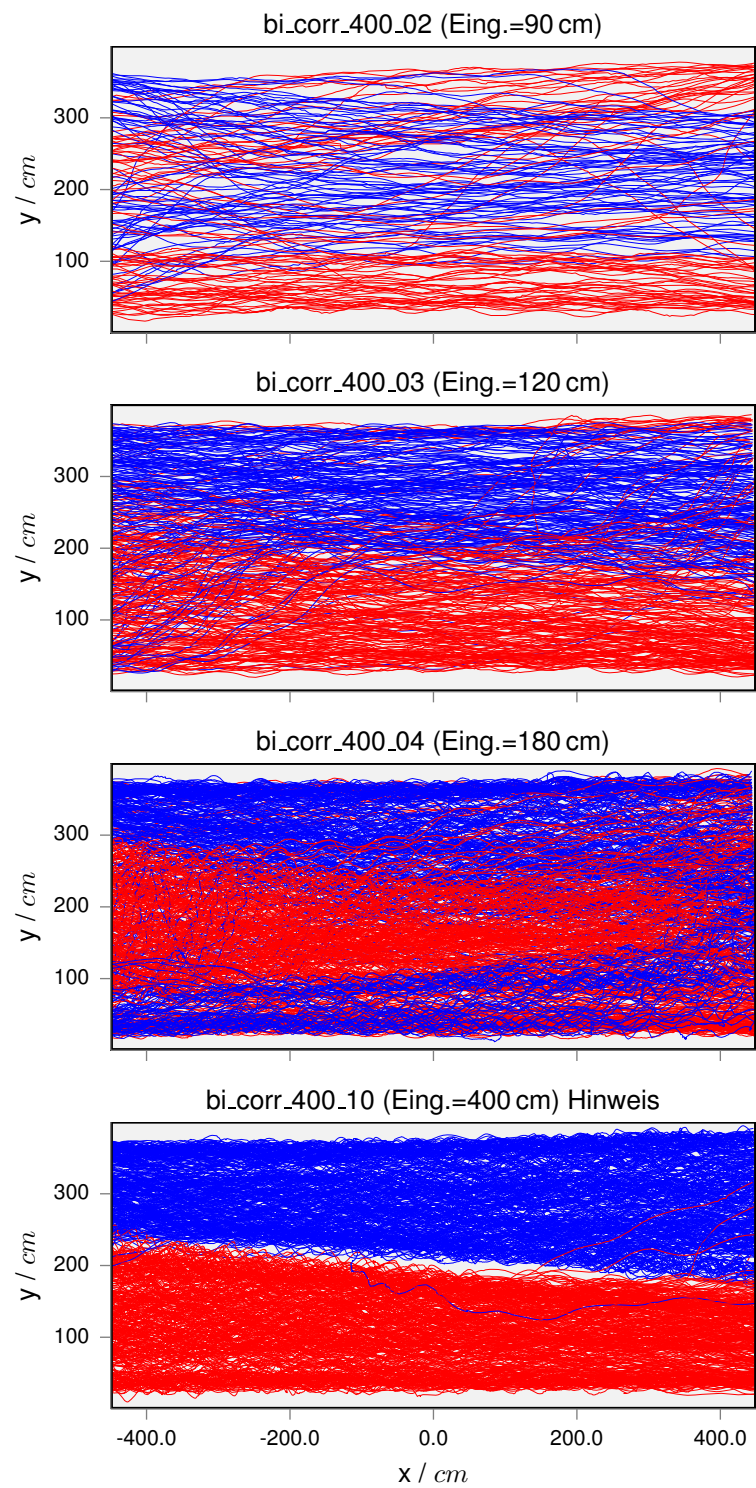


Abbildung 3.8.: Trajektorien verschiedener Läufe des Experiments *bi corr 400*

3. Analyse der Experimente

gesprachen werden. Durch den Wechsel der Gehlinien müssen die Probanden den Fluss regelmäßig unterbrechen. In den folgenden Experimentläufen mit höherer Personendichte, wird der Linienwechsel immer häufiger. Mittels des unten folgenden Fundamentaldiagramms ist zu analysieren, ob die Kapazität von dieser Verhaltensweise abhängig ist.

In den letzten beiden Läufen des Experiments werden die Probanden mit Hilfe eines Hinweisschildes gebeten, sich im Korridor in Laufrichtung rechts zu orientieren. Erst zum Ende des Korridors sollen die Probanden die Korridorseite wechseln. Dies führt zu einer stabilen Linienbildung, auch bei hoher Personendichte, wie die untere Grafik der Abbildung 3.8 zeigt. Mit Hilfe des Fundamentaldiagramms soll überprüft werden, inwiefern dieses Phänomen zu einer Veränderung des spezifischen Flusses J_s führt.

3.2.2. Profildarstellung

Die Profildarstellungen des Experiments *bi corr 400* sollen Unterschiede in der Nutzung des Korridors verdeutlichen. In Abbildung 3.9 sind die Experimentläufe *bi corr 400 03* und *bi corr 400 04* dargestellt, in denen bereits sich unterscheidende Muster in den Trajektorien festgestellt wurden. Auch in den Profildarstellungen gibt es nennenswerte Unterschiede.

Auf der linken Seite ist der Experimentlauf 03 mit einer Eingangsbreite von 1,2 m, geringer Personendichte und stabiler Linienbildung zu sehen. Die Dichte ist in der Mitte des Korridors nur geringfügig höher als an den Außenrändern. Ebenso ist die Geschwindigkeit der Probanden nahezu homogen über den Korridor verteilt. Dies äußert sich in einem leicht erhöhtem Fluss in der Korridormitte.

Der spezifische Fluss des Experimentlaufs 04 ist in der Mitte des Korridors hingegen deutlich erhöht. Dies ist vor allem auf die hohe Dichte in diesem Bereich zurückzuführen. Die Geschwindigkeit hingegen scheint an den Außenrändern höher als in der Korridormitte zu sein. Die Probanden wurden mit einer Eingangsbreite von 1,8 m in den Korridor eingelassen.

Zwischen den beiden gezeigten Experimentläufen gibt es die größten Unterschiede in den Profildarstellungen. Die hohe Dichte in der Korridormitte im Experimentlauf 04 könnte zu einer Einschränkung der Bewegungsfreiheit der Probanden führen. Somit ist zu analysieren, inwieweit dieses Phänomen mit der Kapazität des Experiments zusammenhängt. Hierzu wird folgend das Fundamentaldiagramm des Experiments *bi corr 400* bestimmt.

3.2.3. Methodik zur Flussmessung

Wie bei dem unidirektionalen Experiment, soll das Fundamentaldiagramm für das bidirektionale Experiment erstellt werden. Für die Bestimmung der Messfläche und der Messlinien werden die selben Randbedingungen wie in Kapitel 3.1.3 angenommen. Auch die Messfläche behält eine

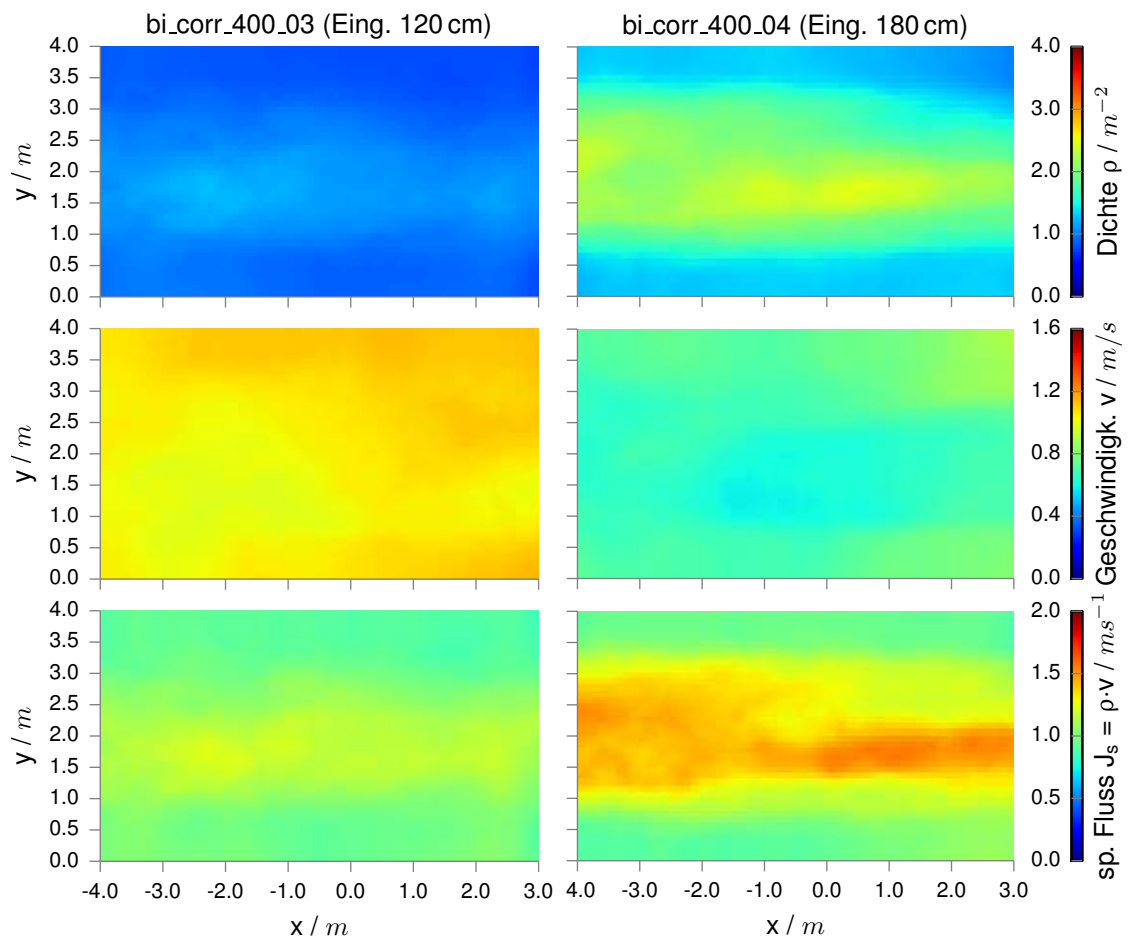


Abbildung 3.9.: Profildarstellung der Experimentläufe *bi corr 400 03* und *bi corr 400 04*

3. Analyse der Experimente

Tabelle 3.2.: Parameter und Randbedingungen zur Flussmessung des Experiments *bi corr 400*

Parameter	Wert	Erläuterung
Messfläche A	4 m x 4 m	Zentrum der Messfläche ist die Nulllinie
Messlinie L	Nulllinie	Mittelpunkt des Experimentaufbaus
Frameintervall ΔF	100 Frames	Mittelung der Flussmessung nach Methode A
Zeitintervall Δt	20 Frames	Intervall für die Berechnung der Geschwindigkeit
Geschwindigkeit \vec{v}	x; y	Anteile des genutzten Geschwindigkeitsvektors

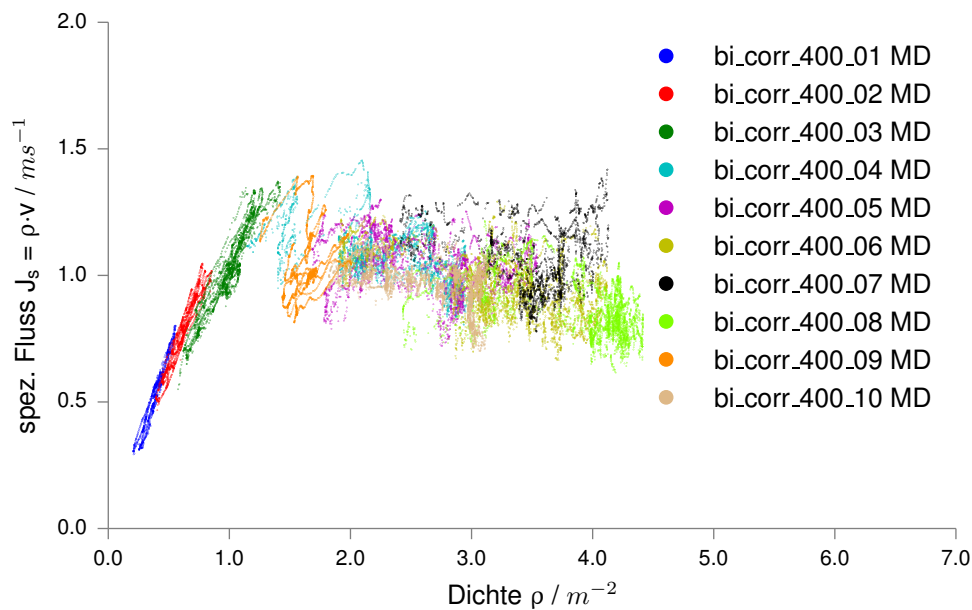
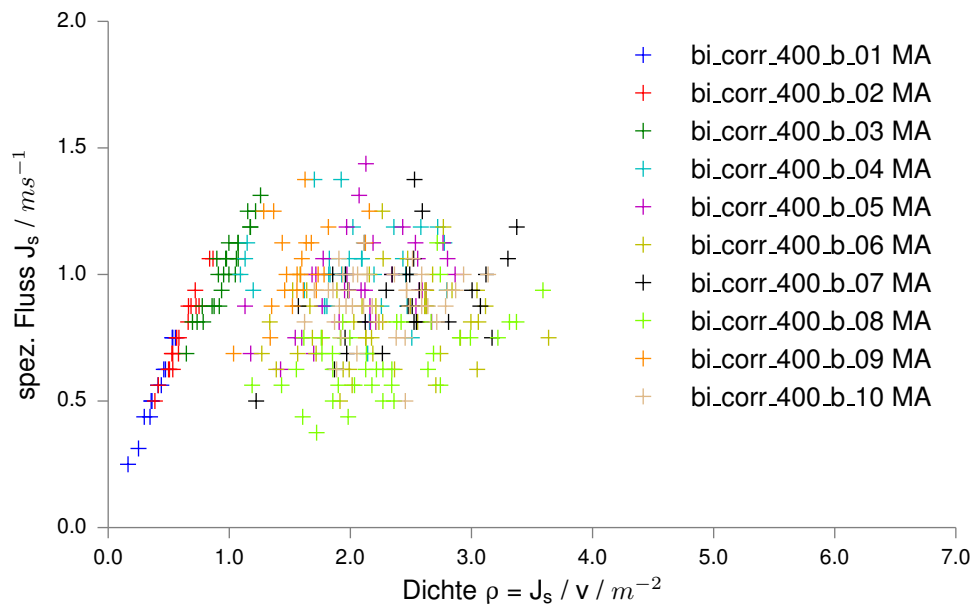


Abbildung 3.10.: Fundamentaldiagramm *bi corr 400* ermittelt nach Methode D

Größe von 16 m², allerdings muss diese wegen des schmalen Korridors auf 4 m x 4 m gestreckt werden. Die Tabelle 3.2 zeigt eine Übersicht der verwendeten Randbedingungen und Parameter.

Zunächst soll das Fundamentaldiagramm analysiert werden, welches mit der Methode D erstellt wurde. In der Abbildung 3.10 ist ein deutlich ausgeprägter Freiflussast zu sehen. Ab einer gewissen Dichte geht das Fundamentaldiagramm vom Freiflussast in den gestauten Ast über. Dies geschieht in dem Experimentlauf *bi corr 400 04*, in welchem oben schon eine Auswirkung auf das Fundamentaldiagramm vermutet wurde.

Die Experimentläufe 09 und 10 befinden sich trotz der Beschilderung mit im selben Fundamentaldiagramm. Der Experimentlauf 09 kann mit dem Experimentlauf 05 verglichen werden, da beide Experimente mit einer Eingangsbreite von 2,4 m durchgeführt wurden. Der Experimentlauf 09 befindet sich in einem niedrigeren Dichtebereich und somit näher am Freiflussast. Teile des Experimentlaufs 09 scheinen sogar auf dem Freiflussast zu liegen. Somit führt die Beschilderung scheinbar zu einer Verschiebung auf dem Fundamentaldiagramm.

Abbildung 3.11.: Fundamentaldiagramm *bi_corr_400* ermittelt nach Methode A

Unerwarteter Weise zeigt sich, dass der Fluss im gestauten Ast mit zunehmender Dichte nur geringfügig abnimmt. Ein Personendurchsatz unter $0,5 m/s$ findet auch bei hohen Dichten nicht mehr statt. Diese Erscheinung beobachtete bereits Zhang bei der Auswertung bidirektionaler Experimente. [17, S. 75] Zhang beschrieb Zweifel, dass der mit $\rho \cdot v$ berechnete spezifische Fluss J_s bei hohen Dichten den tatsächlichen Personendurchsatz darstellt.

Die Messung des spezifischen Flusses soll aus diesem Grund zusätzlich mittels der Methode A bestimmt werden. Sollten die Messergebnisse beider Methoden unvereinbare Unterschiede aufweisen, so ist zu überlegen welche Methode zur Bestimmung der Kapazität geeigneter ist. Die Messlinie der Methode A wird auf die Mittelachse der Messfläche gelegt.

Für die Messung eines bidirektionalen Personenstroms ist zu beachten, dass zwei entgegengesetzte Flüsse gemessen werden. Der Linienübertritt wird in beide Richtungen gemessen. Sollte eine Person mehrfach die Messlinie überschreiten, so wird nur der erste Linienübertritt gezählt. Diese Maßnahme verhindert eine Mehrfachmessung bei Kopfschwankungen in der Nähe der Messlinie.

Das Fundamentaldiagramm in Abbildung 3.11 wurde auf die gerade beschriebene Weise mittels Methode A erstellt. Der Freiflussast ist auch in diesem Diagramm deutlich sichtbar. Allerdings unterscheidet sich der gestaute Ast erheblich von dem, in dem mit Methode D erstellten Fundamentaldiagramm. Der Ast geht in eine Punktwolke über, welche einen breiten Fluss- und Dichtebereich abdeckt. Außerdem befindet sich der gestaute Ast näher an dem Freiflussast, was zu Schwierigkeiten beim Ablesen der Kapazität führt.

3. Analyse der Experimente

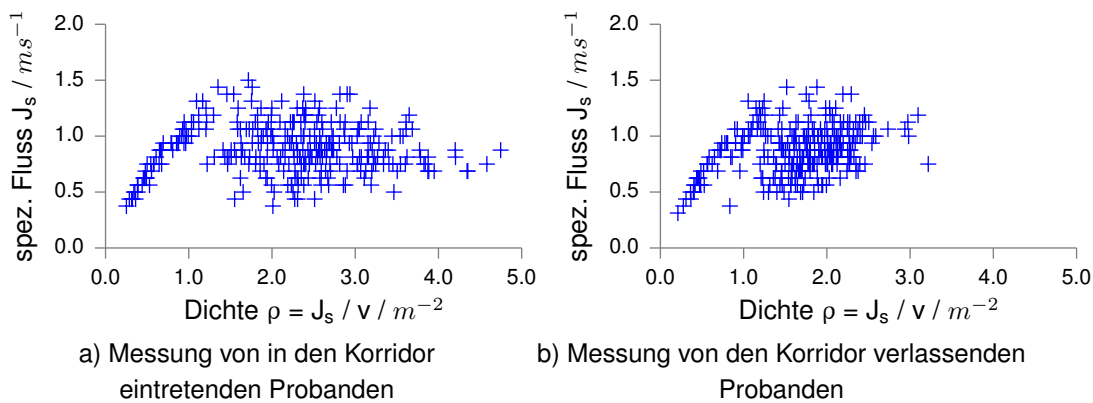


Abbildung 3.12.: Fundamentaldiagramm *bi corr 400* gemessen an zwei Messlinien

Das Überlagern der beiden Äste ist durchaus mit dem Konzept der zwei Äste vereinbar. Probanden, welche einmal vom Freiflussast in den gestauten Ast gewechselt haben, bilden nicht sofort wieder einen Freiflussast, sobald die Personendichte niedriger wird. Die Probanden bleiben im gestauten Ast und erreichen bei gleicher Dichte niedrigere Flüsse als im Freiflussast. Dieses als Hysterese bezeichnete Phänomen wird in Kapitel 4.1 aufgegriffen und genauer beschrieben. [14, S. 10]

Der Freiflussast scheint in beiden Fundamentaldiagrammen dieselbe Ausprägung zu haben. Somit ist auch die Methode D dazu geeignet, die Kapazität des Experiments abzulesen. Zusätzlich hebt sich der Freiflussast bei der Methode D wesentlich deutlicher vom gestauten Ast ab.

Als Vorbereitung für die Messung der Kreuzungsexperimente, soll an dieser Stelle eine weitere Messvariante der Methode A stattfinden. In den Kreuzungsexperimenten wird mehr als eine Messlinie nötig, da die Probanden zweidimensionale Zielrichtungen haben. Aus diesem Grund sollen folgend zwei Messlinien angelegt werden, welche zwischen den Zielrichtungen der Probanden unterscheiden.

Die beiden Messlinien werden in einem Abstand von 2 m westlich und östlich der Mittellinie angelegt. Ohne eine weitere Differenzierung würde dies dazu führen, dass der Fluss doppelt gemessen wird. An den Messlinien wird deshalb unterschieden, ob die Probanden den Korridor betreten oder, ob diese den Korridor über die Messlinie verlassen. Auf diese Weise lässt sich die Zielrichtung der Probanden identifizieren.

In einer ersten Messung werden die Probanden an beiden Messlinien nur gezählt, wenn diese in den Korridor eintreten. Die Messung wird in Abbildung 3.12 a in ein Fundamentaldiagramm überführt. Der Freiflussast des Fundamentaldiagramms wird deutlich sichtbar und zeigt ähnliche Ausprägungen wie die beiden vorherigen Fundamentaldiagramme. Der gestaute Ast ist deutlich gestreckter als in dem Diagramm in Abbildung 3.11. Der Freiflussast und die Kapazität werden in dieser Messvariante deutlicher.

Das Fundamentaldiagramm in Abbildung 3.12 b zeigt das Ergebnis der Messung von aus dem

Korridor austretenden Probanden. Der gestaute Ast vermischt sich mit dem Freiflussast, sodass eine Trennung der beiden Äste nur schwer möglich ist. Dabei ist der gestaute Ast wesentlich gestauchter, als in Abbildung 3.12 a. Eine Erklärung für diesen Effekt könnte das Verhalten von Probanden an den Ausgängen sein. Wenn die Probanden das Ende einer Engstelle wahrnehmen, beschleunigen diese und die Geschwindigkeit erhöht sich. [6, S. 9] Da die Dichte ρ nach Methode A über J_s/v berechnet wird, ergibt sich eine niedrigere Dichte.

Letztendlich zeigt die Messvariante mit zwei Messlinien Übereinstimmungen bei der Bestimmung des Freiflussastes. Dabei hebt die Messung der eingehenden Ströme den Freiflussast deutlicher hervor und ist damit eine gute Möglichkeit, die Kapazität über die Methode A zu bestimmen. Ebenso wird es folgend hilfreich sein, den Effekt der ausgehenden Personenströme auf das Fundamentaldiagramm zu kennen.

3.3. Multidirektionale Experimente

Als Nächstes sollen die multidirektionalen Kreuzungsexperimente analysiert werden, wobei die Analyse überwiegend für das Kreuzungsexperiment *cross 90 a* erfolgt. Wieder werden zunächst die Trajektorien und die Profildarstellungen der Experimentläufe betrachtet. Anschließend sollen die gesammelten Erfahrungen bei den Messungen der vorherigen Experimente dabei helfen, eine geeignete Messmethode für die multidirektionalen Personenströme zu finden.

3.3.1. Trajektorien

Die Trajektorien zeigten bei dem bidirektionalen Experiment Unterbrechungen von Lauflinien durch entgegenkommende Personenströme. Deshalb sollen die Trajektorien des Experiments *cross 90 a* genau analysiert werden.

Um die verschiedenen Eingangsströme in der Kreuzung hervorzuheben wurde in Abbildung 3.13 jeder Eingangsstrom durch ein eigenes Diagramm dargestellt. Zusätzlich wurden die anderen Stromrichtungen jeweils im Hintergrund abgebildet. Die Abbildung zeigt die Trajektorien des Experimentlaufs *cross 90 a 01*. In diesem Lauf ist jeder Eingang zur Kreuzung auf eine Eingangsbreite von 0,6 m begrenzt. Zusätzlich wird jeder Eingangsstrom durch einen Einweiser auf eine Person je zwei Sekunden reguliert.

Die Trajektorien zeigen eine stabile Linienbildung in alle Gehrichtungen. Die geraden Trajektorien zeigen, dass die Probanden kaum Umwege in der Kreuzung gehen müssen. Ebenso ist erkennbar, dass einige Probanden aus dem westlichen Eingangsstrom entgegen den Anweisungen rechts abgebogen sind, der überwiegende Anteil der Probanden ist jedoch den Anweisungen gefolgt.

3. Analyse der Experimente

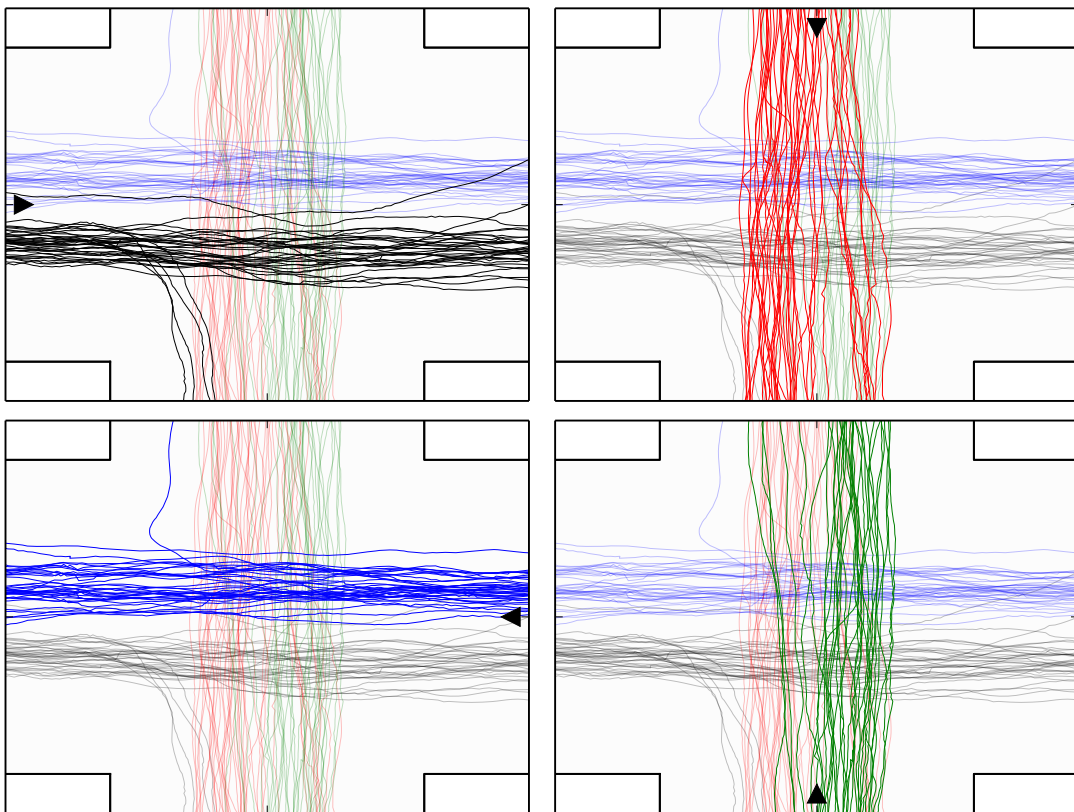
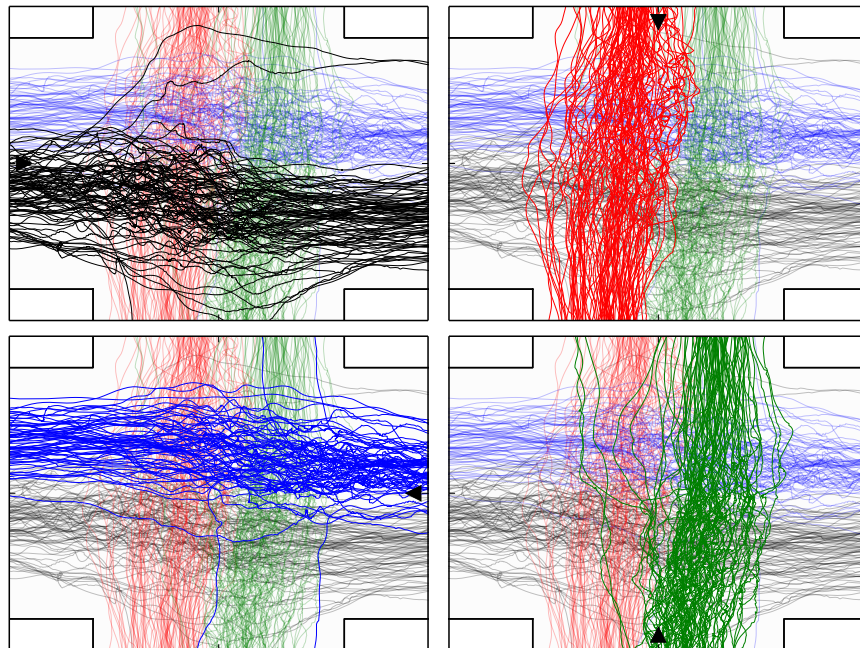
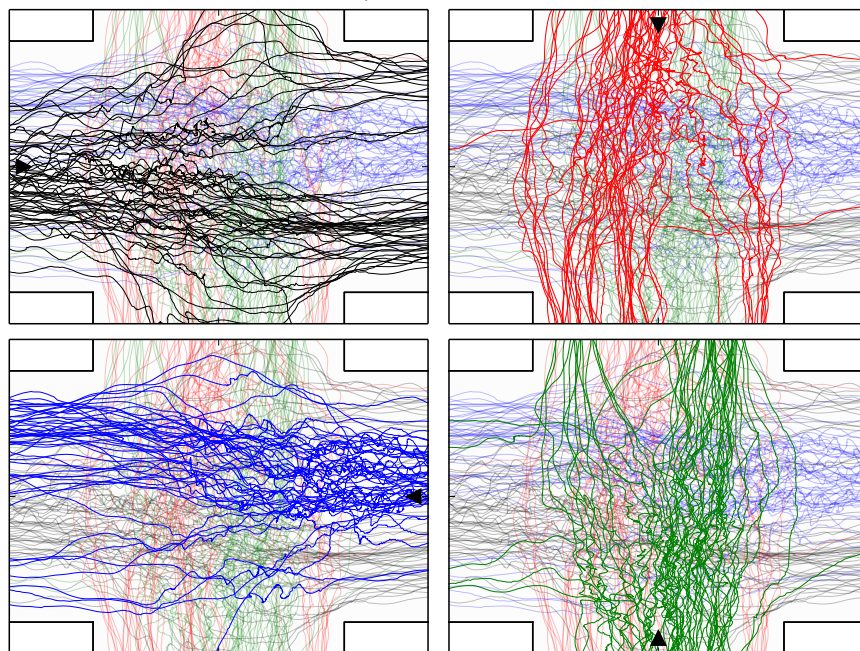


Abbildung 3.13.: Trajektorien des Experimentlaufs *cross 90 a 01* mit unterschiedlich dargestellten Eingangsströmen



a) *cross 90 a 02*



b) *cross 90 a 03*

Abbildung 3.14.: Trajektorien der Experimentläufe *cross 90 a 02* und *cross 90 a 03* mit unterschiedlich dargestellten Eingangsströmen

3. Analyse der Experimente

Auch in den Trajektorien des Experimentlaufs *cross 90 a 02*, die in Abbildung 3.14 a dargestellt sind, sind bevorzugte Gehlinien der Eingangsflüsse zu sehen. In diesem Experimentlauf ist ebenfalls eine Eingangsbreite von 0,6 m festgelegt, allerdings wurde der Zufluss nicht reguliert. Im Gegensatz zum ersten Experimentlauf sind die Trajektorien nicht mehr gerade, sondern gewellt und es gibt häufige Richtungswechsel. Dies bedeutet, dass bereits im zweiten Experimentlauf eine größere Wechselwirkung zwischen den Stromrichtungen zu beobachten ist.

Es lässt sich außerdem ein Unterschied zwischen Kreuzungseingang und Kreuzungsausgang feststellen. Gut erkennbar ist dies in den magenta dargestellten Trajektorien aus östlicher Eingangsrichtung. Im Eingangsbereich sind die Trajektorien durch die Richtungsänderungen und die verminderte Geschwindigkeit stark gekräuselt. Ab Mitte der Kreuzung, bis zum Kreuzungsausgang, werden die Trajektorien wesentlich glatter. Dieser Ausgangseffekt ist der Grund für die verschiedenen Ausprägungen der bidirektionalen Fundamentaldiagramme in Abbildung 3.12. Der Ausgangseffekt ist bei allen Stromrichtungen zu beobachten.

Die Abbildung 3.14 b zeigt die Trajektorien des dritten Experimentlaufs. Es ist keine stabile Linieneildung mehr ersichtlich und es herrscht große Unordnung. Dennoch scheinen die Probanden sich bei dem Gang durch die Kreuzung in ihrer Laufrichtung rechts zu halten. Dies trifft für alle vier Eingangsströme zu. In den Trajektorien sind häufige Richtungswechsel zu erkennen und knotenartige Strukturen lassen vermuten, dass die Probanden kurzzeitig stehen bleiben müssen. Die Probanden nehmen zur Durchquerung der Kreuzung große Umwege in Anspruch. Teilweise reichen die Umwege sogar bis in andere Kreuzungskorridore hinein, dies muss bei der Flussmessung berücksichtigt werden.

Die Trajektorien zeigen in allen drei dargestellten Experimentläufen starke Strukturunterschiede auf. Es ist zu überprüfen, inwieweit diese Strukturunterschiede einen Einfluss auf die Gestalt des Fundamentaldiagramms und auf die Kapazität nehmen.

3.3.2. Profildarstellung

Erneut soll die Profildarstellung dazu genutzt werden Unterschiede in der Raumnutzung des Experiments zu verdeutlichen. Die Abbildung 3.15 zeigt die Profildarstellung der Experimentläufe *cross 90 a 01* und *cross 90 a 02*. Die Geometrie der Kreuzung ist in allen Diagrammen deutlich erkennbar.

Im Experimentlauf 01 ist die Dichte in der gesamten Kreuzung gering, eine leichte Dichteerhöhung ist nur in der Kreuzungsmitte wahrzunehmen. Die Geschwindigkeit ist über die gesamte Kreuzung homogen verteilt. Die Probanden müssen während des Überquerens der Kreuzung die Geschwindigkeit nicht variieren, sie befinden sich in diesem Experimentlauf somit im freien Fluss. Ähnliches wurde auch im Experimentlauf 09 beobachtet. Beide Experimente haben die Regulierung der Zuflussströme auf eine Person je zwei Sekunden gemeinsam. Durch die leicht erhöhte

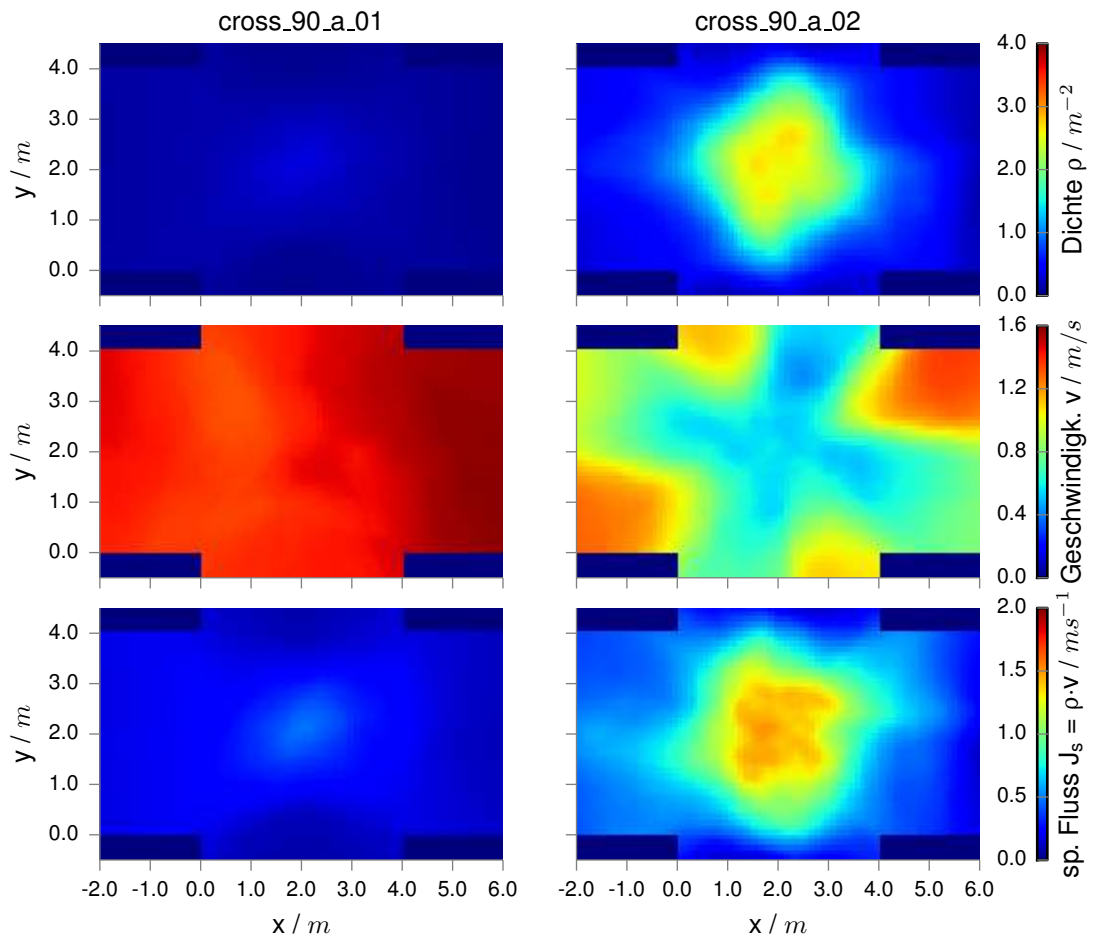


Abbildung 3.15.: Profildarstellung ausgewählter Läufe des Experiments *cross 90 a*

3. Analyse der Experimente

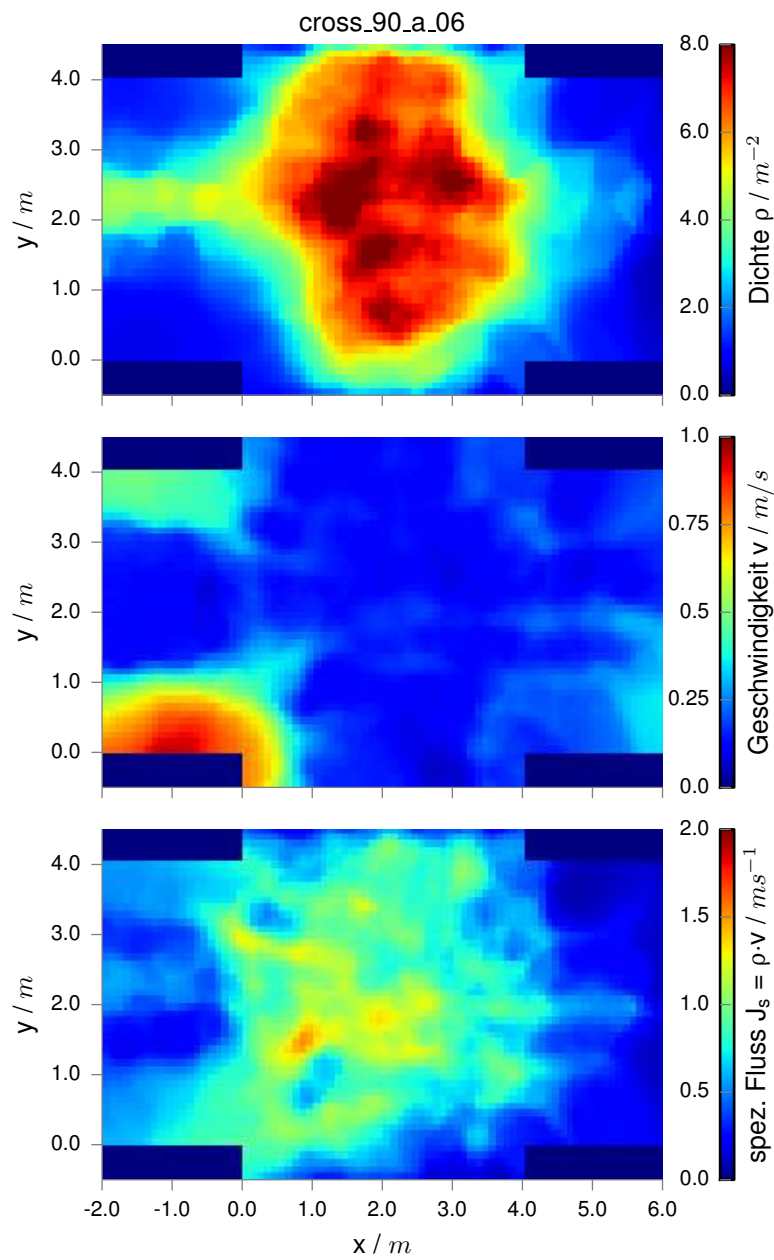


Abbildung 3.16.: Profilardstellung des Experimentlaufs *cross 90 a 06*

Dichte im Kreuzungsmittelpunkt ist auch der berechnete spezifische Fluss an dieser Stelle am höchsten.

Die Profildarstellung des Experimentlaufs 02 zeigt Inhomogenitäten, nicht nur in der Dichte sondern auch in der Geschwindigkeit. Die Probanden können die Kreuzung nicht mehr mit einer konstanten Geschwindigkeit überqueren und es kommt zu Konflikten zwischen den verschiedenen Personenströmen. Der spezifische Fluss ist in der Kreuzungsmitte am höchsten. In den Experimentläufen 07 und 10 kommt es zu ähnlichen Mustern in den Profildarstellungen.

Die Experimentläufe 04, 05, 06, und 08 zeigen eine dritte Struktur in den Profildarstellungen. In Abbildung 3.16 ist der sechste Experimentlauf dargestellt. Bei der Durchführung traten in diesem Lauf so hohe Dichten auf, dass dieser abgebrochen werden musste. Die Profildarstellung wurde deshalb nur bis zu der Ansage des Abbruchs generiert. In der Kreuzung sind sehr hohe Dichten von bis zu 8 m^{-2} zu erkennen. Die Geschwindigkeit ist nahezu in der gesamten Kreuzung verlangsamt. Die Darstellung des spezifischen Flusses unterscheidet sich von den bisher gezeigten Profildarstellungen. Der Fluss ist nicht mehr in der Kreuzungsmitte am höchsten, vielmehr verteilt sich dieser beinahe über die gesamte Kreuzung und schwankt zwischen den Werten von $0,7 \text{ m s}^{-1}$ bis $1,2 \text{ m s}^{-1}$.

Bemerkenswert ist außerdem, dass innerhalb der Kreuzung noch hohe Personenflüsse gemessen werden. Durch das Betrachten der Videodateien lässt sich vermuten, dass gerade beim letztgenannten Experimentlauf 06 der Personendurchsatz beinahe zum Erliegen kommt. Aus diesem Grund werden im nächsten Abschnitt verschiedene Messmethoden zur Messung des Personenstroms ausgewählt und analysiert.

3.3.3. Methodik zur Flussmessung

Der spezifische Fluss in der Kreuzung wird folgend mit mehreren Methoden gemessen und die Ergebnisse miteinander verglichen. In den bidirektionalen Experimenten wurde beobachtet, dass die Ergebnisse der Messmethoden bei hohen Dichten stark voneinander abweichen. Aus diesem Grund werden sowohl die Methode A als auch die Methode D zur Messung herangezogen. Die Messung des Flusses nach der Methode A bei Kreuzungsexperimenten beinhaltet eine zusätzliche Problematik. Da der Personenfluss nicht mehr eindimensional ist, also nicht mehr entlang einer Achse fließt, müssen mehrere Messlinien definiert werden.

Die Tabelle 3.3 zeigt die Randbedingungen, welche für die Messung der multidirektionalen Experimente eingehalten werden müssen, um die Vergleichbarkeit zu den anderen Experimenten zu gewährleisten. Die gewählte Messfläche und die Messlinien werden zusätzlich in Tabelle 3.4 erläutert.

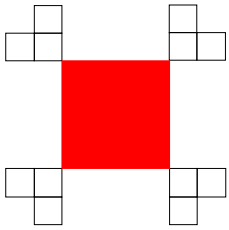
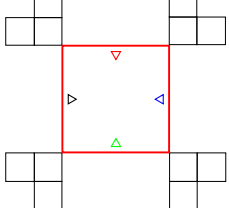
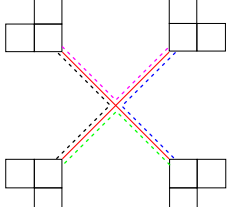
Insgesamt werden an dem Kreuzungsexperiment *cross 90 a* drei Flussmessungen durchgeführt. Mittels der Methode D wird die Geschwindigkeit und die Dichte innerhalb der Kreuzung ermittelt und mit Hilfe der Flussgleichung in den spezifischen Fluss überführt.

3. Analyse der Experimente

Tabelle 3.3.: Parameter und Randbedingungen zur Flussmessung des Experiments *cross 90 a*

Parameter	Wert	Erläuterung
Messfläche A	4 m x 4 m	Im Mittelpunkt der Kreuzung
Messlinie L	diverse	Es werden verschiedene Messlinien definiert
Frameintervall ΔF	100 Frames	Mittelung der Flussmessung nach Methode A
Zeitintervall Δt	20 Frames	Intervall für die Berechnung der Geschwindigkeit
Geschwindigkeit \vec{v}	x; y	Anteile des genutzten Geschwindigkeitsvektors

Tabelle 3.4.: Methodik zur Flussmessung von Kreuzungsexperimenten

Grafik	Beschreibung
	<p>Mittels Methode D wird die Dichte und die Geschwindigkeit innerhalb der gesamten Kreuzung gemessen. Über die Flussgleichung $J_s = \rho \cdot v$ wird anschließend der spezifische Fluss berechnet.</p>
	<p>Der Fluss wird mittels Methode A an vier Messlinien gemessen. Es werden immer nur die Personen gezählt, welche die Kreuzung über die Messlinien betreten. Es wird immer nur die zuerst übertretende Messlinie gewertet.</p>
	<p>In einer letzten Variante wird der Fluss an zwei Messlinien, jedoch in beide Richtungen gemessen. Personen werden nur beim ersten Messlinienübertritt gezählt. Es ergibt sich für jede Flussrichtung ein Messdreieck, im welchem der jeweilige Personenstrom erfasst wird.</p>

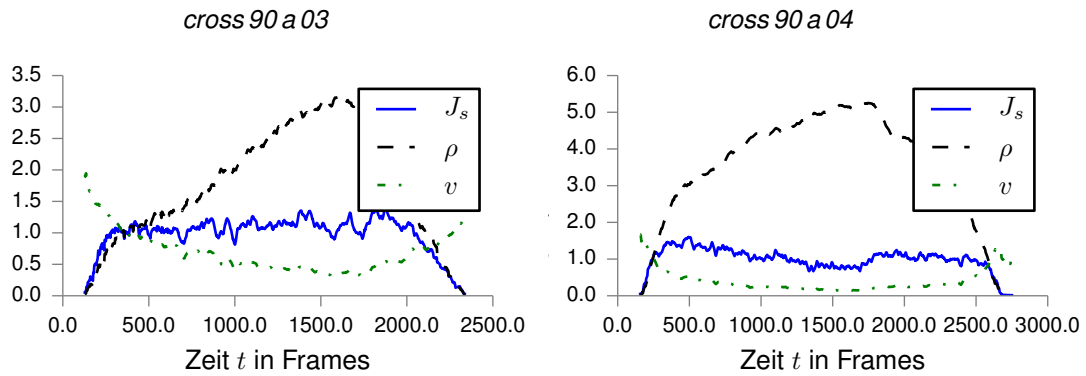


Abbildung 3.17.: Stationärer Zustand ausgewählter Experimentläufe des Experiments *cross 90 a*

Außerdem werden zwei Varianten nach der Methode A für die Flussmessung verwendet. Eine Messung mit vier Messlinien erfolgt am Eingang der Kreuzung. Es ist abhängig von der Flussrichtung, welche Messlinie als Eingang oder als Ausgang in die Kreuzung betrachtet wird. Beispielsweise passiert der aus westlicher Richtung eintretende Personenstrom zuerst die westliche Messlinie als Eingang und, wenn dieser die Kreuzung überquert hat, die östliche Messlinie als Ausgang. Da lediglich an der zuerst überschrittenen Messlinie gemessen wird, werden die Probanden nicht doppelt gezählt. Auch wenn die Probanden, wie in Abbildung 3.14 zu sehen, die Kreuzung zeitweise verlassen, kommt es hierdurch nicht zu einer Mehrfachzählung.

In der zweiten Variante der Messung nach Methode A wird der Fluss an zwei Messlinien gemessen, diese sind kreuzförmig über die Mitte der Kreuzung angeordnet. Auf diese Weise werden auch Flussraten in der Mitte der Kreuzung erfasst, in welcher hohe Personendichten wahrgenommen wurden. Die Personen werden beim Übertritt in beide Richtungen erfasst, allerdings wird wiederum nur der erste Linienübertritt gezählt. Hieraus resultiert ein Messdreieck in welchem die einzelnen Personenströme erfasst werden (s. Tabelle 3.4).

Bevor die Fundamentaldiagramme erstellt und analysiert werden, muss der stationäre Zustand der Experimente ermittelt werden. Dies geschieht, wie auch bei den vorherigen Experimenten, durch das Darstellen des Flussplateaus. In Abbildung 3.17 ist das Flussplateau des spezifischen Flusses gut zu erkennen. Allerdings ist die Dichte in den abgebildeten Experimentläufen nicht stationär. Die Dichte steigt parabelförmig an und sinkt nach einem Hochpunkt wieder ab.

Das Ansteigen und das Absinken der Dichte ist im Fundamentaldiagramm in Abbildung 3.18 als Linienbildung zu erkennen. Mittels Methode D wurde die Dichte und der spezifische Fluss für jedes Einzelbild berechnet. Die hohe Auflösung der Methode D führt dazu, dass nicht stationäre Zustände als Linien dargestellt werden.

Wie auch in den anderen Experimenten ist der Freiflussast deutlich zu erkennen. Ab einer Dichte von 1 m^{-2} scheint sich der spezifische Fluss einem Hochpunkt anzunähern. Der Hochpunkt ist bei einer Dichte von ungefähr 2 m^{-2} erreicht. Zwischen einer Dichte von 2 m^{-2} und 5 m^{-2} sind nur sehr wenige Daten verfügbar und es kommt zu der oben erwähnten Linienbildung.

3. Analyse der Experimente

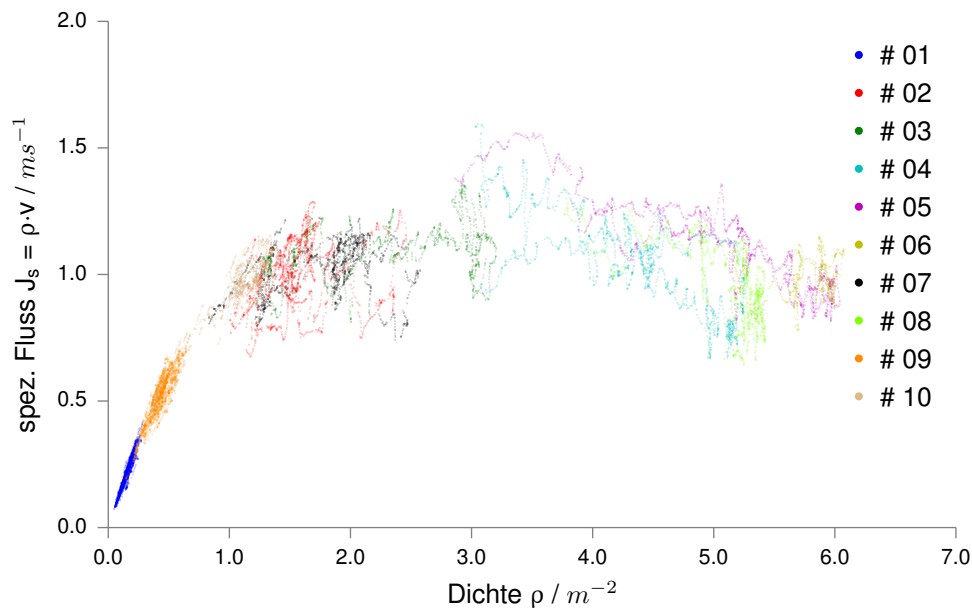


Abbildung 3.18.: Fundamentaldiagramm *cross 90 a* ermittelt nach Methode D

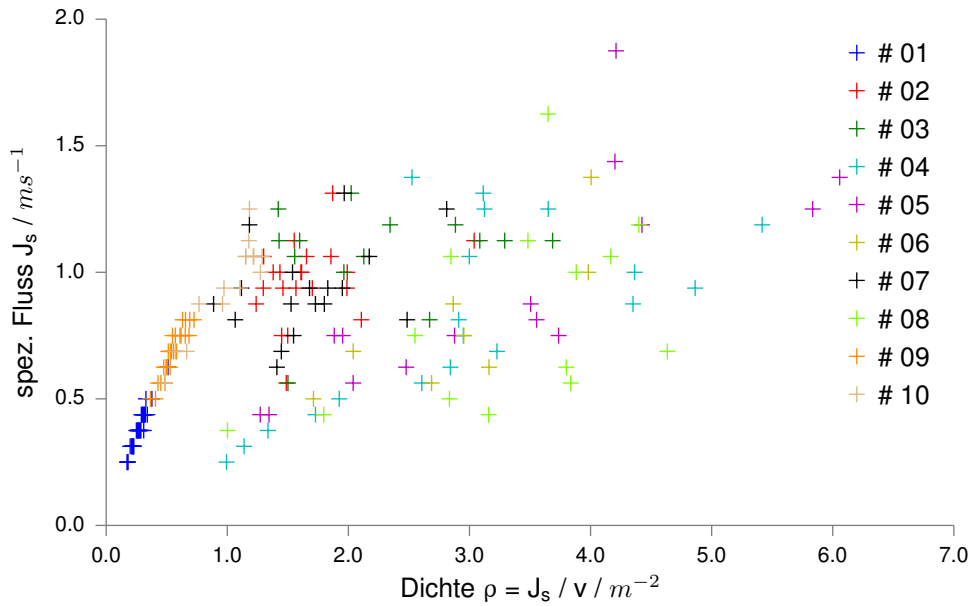
Der spezifische Fluss bleibt selbst bei einer Dichte von über $6 m^{-2}$ in einem erhöhten Bereich. Dieses Phänomen wurde bereits in der Profildarstellung des Experimentlaufs 06 beobachtet. Um zu überprüfen, ob dies mit dem tatsächlichen Personendurchsatz vereinbar ist, wurde der Fluss zusätzlich mittels Methode A gemessen.

In der Abbildung 3.19 sind die Fundamentaldiagramme beider Messvarianten der Methode A abgebildet. In dem Diagramm a ist die Messung mit den vier Messlinien dargestellt. Gut erkennbar ist in diesem Diagramm der Freiflussast und der Übergang in einen Flusshochpunkt. Ab einer Dichte von $2 m^{-2}$ streuen sich die Daten des Fundamentaldiagramms. Es werden sowohl hohe als auch niedrige Personenflüsse gemessen, jedoch ist kein funktionaler Zusammenhang zwischen Dichte und spezifischem Fluss zu erkennen.

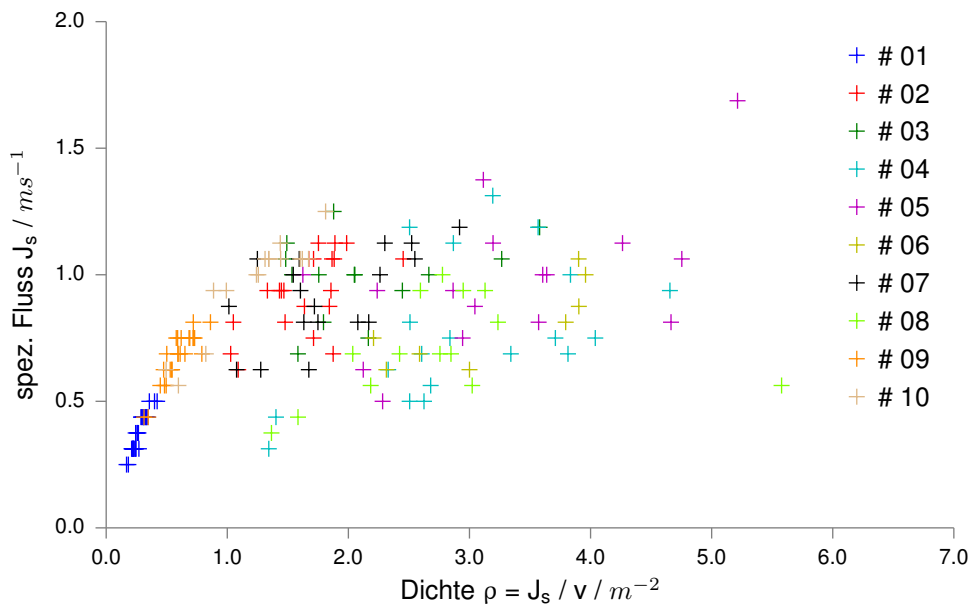
Die Variante mit den zwei Messlinien in Diagramm b bildet ein ähnliches Fundamentaldiagramm ab. Allerdings ist der Freiflussast gestaucht und nach rechts gekrümmt. Die Streuungen im hohen Dichtebereich sind geringer, als bei der Variante mit den vier Messlinien. Auch in der Variante mit zwei Messlinien ist bei hoher Dichte noch ein hoher Fluss messbar.

Wegen der Beschleunigung der Probanden an den Kreuzungsausgängen wurde auf eine Analyse der aus der Kreuzung austretenden Personenströme verzichtet.

Alle drei Messergebnisse ähneln sich im niedrigen Dichtebereich. Ab einer Dichte von $2 m^{-2}$ scheint es zu einer Veränderung der Dichte-Fluss-Beziehung zu kommen. Dies ist bei allen drei Diagrammen zu beobachten. Die Methode D überzeugt vor allem durch die hohe Auflösung und die geringe Streuung der Daten [17]. Eine Aussage darüber, welche Methode den tatsächlichen



a) Messung mit vier Messlinien am Kreuzungseingang



b) Messung mit zwei Messlinien über die Kreuzungsmitte

Abbildung 3.19.: Fundamentaldiagramm *cross 90a* ermittelt nach Methode A

3. Analyse der Experimente

Personendurchsatz misst, kann an dieser Stelle für keine der zwei Methoden getroffen werden. Um die Kapazität des Experiments zu ermitteln, scheint jedoch die Methode D eine geeignete Messmethode zu sein, da hier der Freiflussast am deutlichsten sichtbar wird.

3.3.4. Vergleich der Kreuzungsexperimente

Während der *BaSiGo* Experimente wurden weitere Varianten der Kreuzungsexperimente durchgeführt. In der Variante *cross90b* wurde ein Hinweisschild mit einem Kreisverkehrssymbol an den Eingängen der Kreuzung platziert, um den Effekt des Schildes auf den Personenstrom zu beobachten. In der Variante *cross90c* wurde schließlich eine Säule in der Mitte der Kreuzung aufgestellt, um die Bildung eines Kreisverkehrs zu unterstützen. Folgend sollen die Fundamentaldiagramme der Kreuzungsexperimente miteinander verglichen werden.

Anhand der Trajektorien (A.3.1.5) wird beobachtet, dass die Säule in Variante *cross90c* nicht zur Bildung eines Kreisverkehrs führt. Die Probanden gehen links und rechts an der Säule vorbei. Erst in den letzten beiden Experimentläufen, nach der Aufforderung die Säule zu beachten, wird die Säule für einen Kreisverkehr genutzt. Wie auch bei der Beschilderung im bidirektionalen Experiment, führt die gewonnene Ordnung im Raum zu niedrigeren Dichten und damit zu einer Verschiebung im Fundamentaldiagramm. Die Form des Fundamentaldiagramms bleibt jedoch gleich. Verschiedene Diagramme zu den Experimenten *cross90b* (A.3.1.4) und *cross90c* (A.3.1.5) sind im digitalen Anhang dieser Arbeit zu finden.

Die Fundamentaldiagramme der drei Kreuzungsexperimente werden in Abbildung 3.20 miteinander verglichen. Im Bereich des Freiflussastes haben die drei Fundamentaldiagramme einen fast identischen Verlauf. Erst bei hohen Dichten scheint die Experimentvariante mit Säule einen niedrigeren Fluss und eine geringere Datenstreuung, als die anderen beiden Experimente aufzuweisen.

Die Daten der drei Experimente, bis zu einer Dichte von 2 m^{-2} , lassen stark vermuten, dass sich alle drei Experimente im selben Fundamentaldiagramm befinden. Für diese Arbeit wird dieses Erkenntnis dazu genutzt, alle drei Experimente in ein Fundamentaldiagramm zu überführen. Dies erhöht die Datenbasis für den Freiflussast, um schließlich die Kapazität besser ablesen zu können.

Die Abbildung 3.21 zeigt das vereinte Fundamentaldiagramm der Kreuzungsexperimente. In dieser Darstellung wird ein Knick im Fundamentaldiagramm ab einer Dichte von ungefähr $0,6 \text{ m}^{-2}$ sichtbar. Danach nimmt der Flussanstieg bis zu einer Dichte von 2 m^{-2} stetig ab. Das Verhalten der Daten im hohen Dichtbereich ist für die Frage nach der Kapazität nicht weiter relevant und bleibt folgend unberücksichtigt. Im folgenden Kapitel wird eine Technik angewandt, um die Äste des Fundamentaldiagramms deutlicher hervorzuheben.

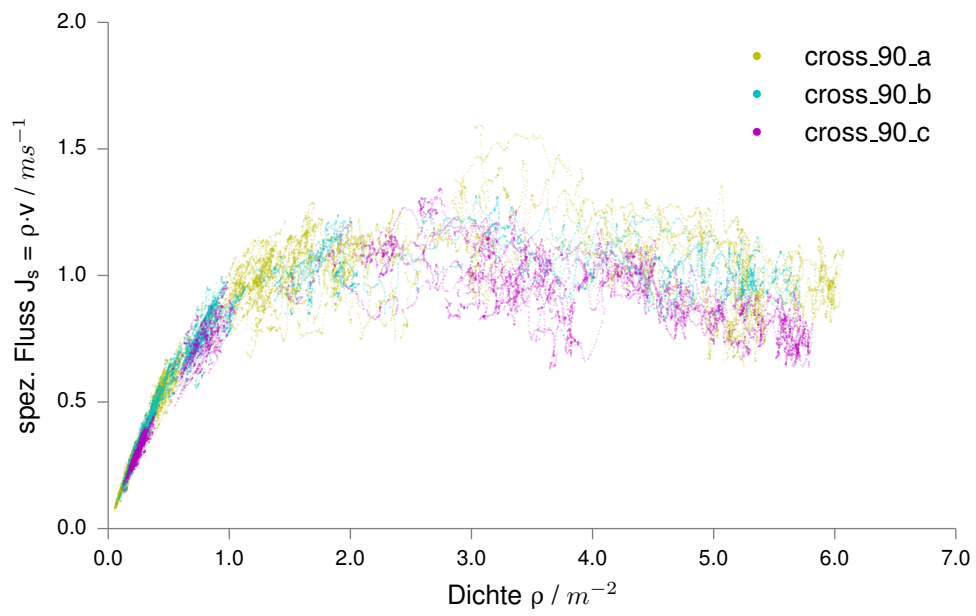


Abbildung 3.20.: Vergleich der Fundamentaldiagramme der drei Kreuzungsexperimente

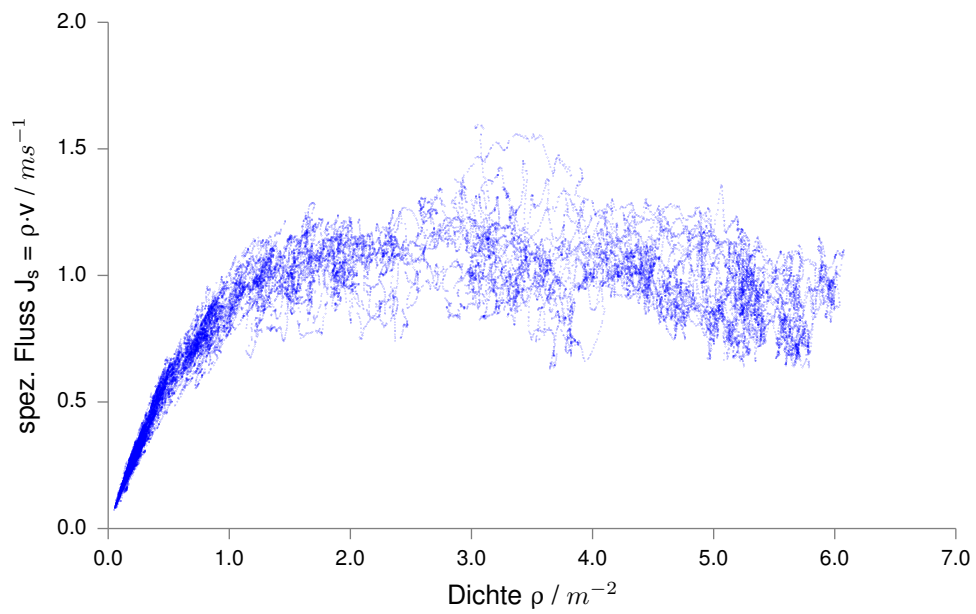


Abbildung 3.21.: Vereintes Fundamentaldiagramm aus den drei Kreuzungsexperimenten

4. Auswertung und Vergleich

Im vorherigen Kapitel wurden die Fundamentaldiagramme für die jeweiligen Experimente gefunden. Das Ablesen der Kapazität aus diesen Diagrammen gestaltet sich schwierig, da gerade im Bereich der Kapazität hohe Streuungen der Daten zu finden sind. Aus diesem Grund soll in diesem Kapitel der Verlauf des Freiflussastes gedeutet werden.

Die mit der Methode D erstellten Fundamentaldiagramme, weisen durch die hohe Auflösung und die geringe Standardabweichung, die deutlichsten Strukturen auf und sollen deshalb für die folgende Auseinandersetzung genutzt werden. Außerdem wurde anhand der mit Methode A erstellten Diagramme gezeigt, dass beide Methoden zu Ergebnissen im Bereich des Freiflussastes führen, die miteinander vereinbar sind.

In einem ersten Abschnitt soll der Freiflussast definiert und deutlicher hervorgehoben werden. Hierzu werden die Daten aus dem Fundamentaldiagramm reduziert, welche nicht dem Freiflussast zugesprochen werden.

Anschließend erfolgt eine Modellierung des Freiflussastes durch Trendlinien. Dabei findet die Erstellung der Trendlinien nicht mit dem Ziel statt, das Fundamentaldiagramm oder einen Teil des Fundamentaldiagramms in seiner ganzen Komplexität abzubilden. Die Trendlinien sollen vielmehr dazu dienen, die Kapazitäten der Experimente ablesen zu können.

Schließlich werden die Modelle, die Kapazitäten und weitere Kennwerte der Experimente miteinander verglichen. Zudem wird die sicherheitstechnische Bedeutung dieser Kennwerte diskutiert.

4.1. Definieren des Freiflussastes

4.1.1. Beschreibung des Freiflussastes

Im Bereich des Freiflussastes wird davon ausgegangen, dass sich die Probanden frei bewegen können. Nach Predtechenskii versteht sich unter freier Bewegung ein Zustand, in dem eine Person in einem beliebigen Moment die Geschwindigkeit und die Richtung der Bewegung ändern kann. [13, S. 36] Die Richtungs- und Geschwindigkeitsfreiheit ist wiederum von der Dichte des Personenstroms abhängig. Am Übergang zwischen freier und eingeschränkter Bewegung wird oftmals die Kapazität vermutet.

4. Auswertung und Vergleich

In den in Kapitel 3 erstellten Fundamentaldiagrammen ist teilweise nicht eindeutig, bei welcher Dichte der gestaute Ast anfängt, beziehungsweise wo der Freiflussast aufhört. Am deutlichsten sind die beiden Äste im Fundamentaldiagramm des bidirektionalen Experiments in Abbildung 3.10 zu erkennen. Bei einer Dichte von ungefähr $1,5 \text{ m}^{-2}$ scheint der Übergang zwischen den beiden Ästen stattzufinden. Dank der hohen Datenauflösung der Methode D, wird dieser Übergang in Form einer linienartigen Datenstruktur sichtbar.

Diese Linien weisen auf Zustände hin, in welchen entweder die Dichte oder der spezifische Fluss nicht stabil ist. Genau genommen sind mit diesen Linien kontinuierliche Dichte- oder Flussänderungen verbunden. Bei genauem Hinsehen sind diese Linienstrukturen auch bei den Diagrammen des unidirektionalen Experiments in Abbildung 3.7 und bei den Kreuzungsexperimenten in Abbildung 3.20 zu sehen.

Um den Freiflussast von dem gestauten Ast zu trennen, sollen diese Übergangslinien aus dem Fundamentaldiagramm entfernt werden. Hierzu sind die stationären Zustände der Experimentläufe neu zu definieren. Dabei ist es wichtig, nicht nur den Verlauf des spezifischen Flusses, sondern auch den der Dichte und der Geschwindigkeit zu betrachten. Es sollen nur stabile Zustände aller drei Größen im Fundamentaldiagramm abgebildet werden.

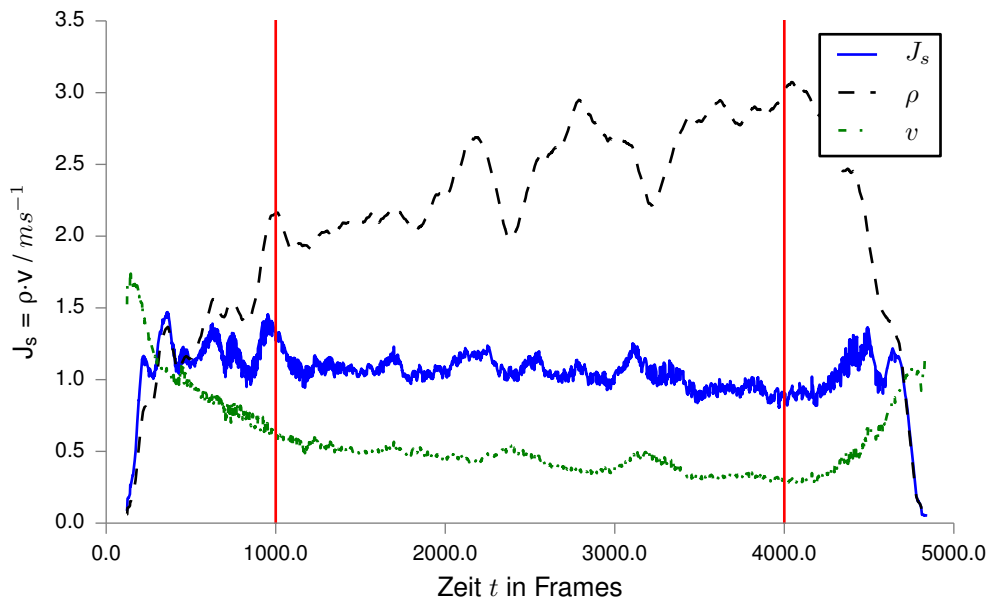
Zusätzlich sollen alle Daten ausgeschlossen werden, welche der Hysterese zuzusprechen sind. Das Phänomen der Hysterese wird von Schadschneider an einem Beispiel im Straßenverkehr beschrieben: [14, S. 12]

„Angenommen, man startet zu einer Zeit mit einem Fluß und einer Dichte, die einem Punkt auf dem metastabilen Hochflußast liegen. Erhöht man die Dichte weiter, so steigt zunächst der Fluß an. Irgendwann bricht er aber zusammen und man fällt auf den gestauten Ast. Erniedrigt man jetzt die Dichte wieder, so wird der Fluß wieder ansteigen. Da man sich aber auf dem gestauten Ast bewegt, wird der Ausgangsfluß nicht mehr erreicht, wenn man bei der Ausgangsdichte ankommt.“

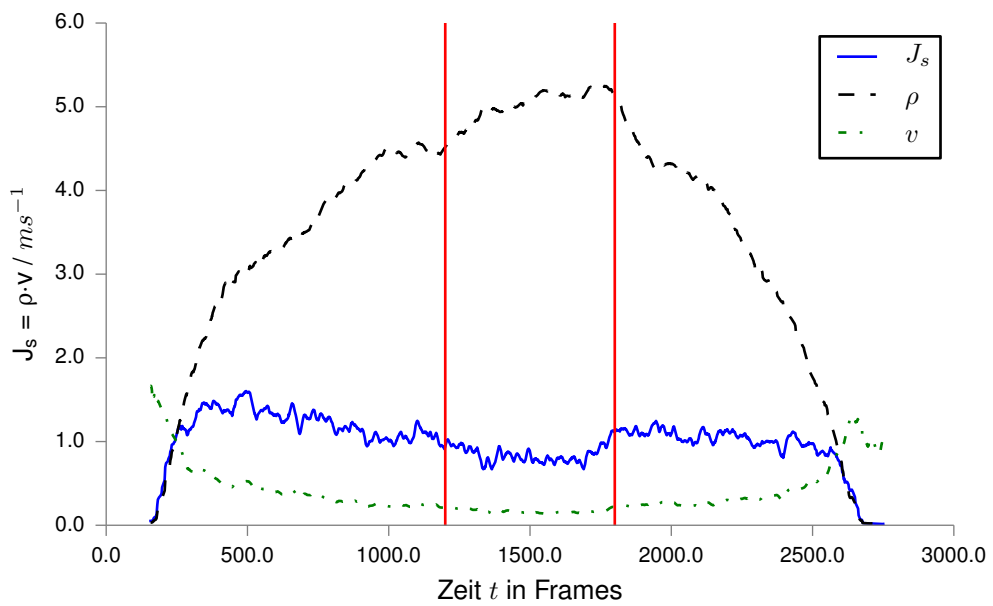
Die Hysterese führt zu einer Überschneidung von Freiflussast und gestautem Ast in der Nähe der Ausgangsdichte. Um dies zu vermeiden sollen alle Zustände, in denen die Personendichte abnimmt, nicht betrachtet werden. Anschaulicher wird das Bestimmen der stationären Zustände anhand eines Beispiels im nächsten Abschnitt.

4.1.2. Bestimmen der stationären Zustände

Für das Freilegen des Freiflussastes sollen nur Daten als stationärer Zustand angesehen werden, in denen die Dichte, die Geschwindigkeit und der spezifische Fluss stabil sind. Als stabiler Zustand werden Zeitbereiche angesehen, in denen die Kennwerte nicht mehr stark ansteigen oder absinken. Der zeitliche Verlauf der Kennwerte für zwei Experimentläufe ist in Abbildung 4.1 zu sehen.



a) Verlauf der Dichte, der Geschwindigkeit und des Flusses des Experiments *bi corr 400 04*



b) Verlauf der Dichte, der Geschwindigkeit und des Flusses des Experiments *cross 90 a 04*

Abbildung 4.1.: Neudefinierter stationärer Zustand der Experimente *bi corr 400 04* und *cross 90 a 04*

4. Auswertung und Vergleich

In dem oberen Diagramm ist der Verlauf des Experiments *bi corr 400 04* zu sehen. Zu Beginn des Experiments steigen Dichte und Fluss erwartungsgemäß an. Ab Frame 500 steigt der spezifische Fluss nicht weiter, allerdings lassen Dichte- und Geschwindigkeitsverlauf vermuten, dass sich erst ab Frame 1000 ein stabiler Zustand einstellt. Zwar verändern sich Dichte und Geschwindigkeit auch weiterhin im zeitlichen Verlauf, allerdings mit einer wesentlich geringeren Steigung.

Ab Frame 4000 ist eine plötzliche Abnahme der Personendichte zu beobachten. Spezifischer Fluss und Geschwindigkeit bleiben auch nach Frame 4000 eine Zeit lang stabil. Um den Effekt der Hysterese auszuschließen, werden die Daten nur bis zu dem Dichtehochpunkt betrachtet. Für dieses Experiment wird der stationäre Zustand somit zwischen Frame 1000 und Frame 4000 vermutet.

Das untere Diagramm in Abbildung 4.1 b zeigt den Verlauf des Experiments *cross 90 a 04*. Es ist deutlich zu sehen, dass kaum eine stationäre Dichte gefunden werden kann. Dem entgegengesetzt scheint der spezifische Fluss fast über das ganze Experiment stationär zu sein. Für den stationären Zustand wurde deshalb besonders der Geschwindigkeitsverlauf betrachtet. Die Daten nach dem Dichtehochpunkt wurden wiederum nicht als stationärer Zustand angesehen.

Der kontinuierlich steigende Dichteverlauf scheint eine wichtige Eigenschaft der multidirektionalen Personenströme zu sein. Schon bei geringen Dichten behindern sich die Personen gegenseitig. Dies führt dazu, dass die Probanden schneller in die Kreuzung eintreten als sie hinausgehen können. Da die Probanden versuchen jeden Raum dafür zu nutzen, um die andere Seite der Kreuzung zu erreichen, wird die Dichte in der Kreuzung immer höher. Erst ab Dichten von $6 m^{-2}$ werden wieder stationäre Dichten beobachtet. Dies hängt vermutlich davon ab, mit welcher Motivation die Probanden versuchen die Kreuzung zu passieren. Helbing beobachtete ähnliche Phänomene innerhalb einer Feldstudie bei einem Personenunfall in Mekka. [10, S. 3]

Die Auswahl der stationären Zustände wurde auf diese Weise für alle Experimente durchgeführt. Diagramme der stationären Zustände aller Experimentläufe sind im digitalen Anhang dieser Arbeit zu finden. (A.3.5.1)

4.1.3. Reduziertes Fundamentaldiagramm

Die neue Definition des stationären Zustands führt zu einem Fundamentaldiagramm, in welchem überwiegend stabile Zustände abgebildet werden. Das Fundamentaldiagramm ist für alle drei Experimente in Abbildung 4.2 zu sehen. Um den Freiflussast zu skalieren wurde das Fundamentaldiagramm in Abbildung 4.3 zusätzlich gegen das Modul A , den Kehrwert der Dichte ρ , aufgetragen. In dieser Darstellung befindet sich der Freiflussast auf der rechten Seite.

In den Abbildungen lassen sich Freiflussast und gestauter Ast nun gut voneinander unterscheiden. Die Übergangslinien zwischen den beiden Ästen sind bei beiden Diagrammen verschwunden. Dies sind günstige Eigenschaften, um die Modellierung des Freiflussastes durchführen zu können.

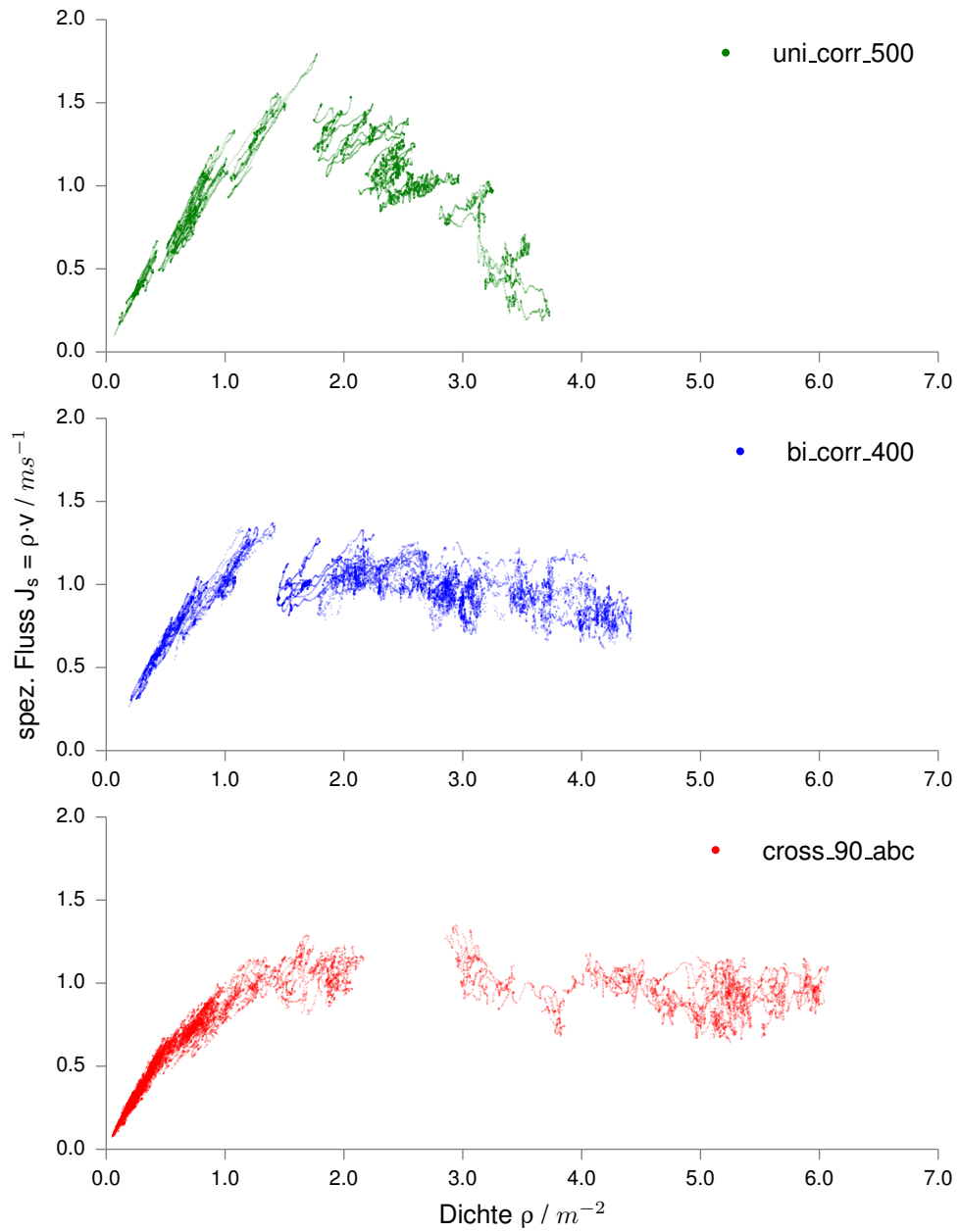


Abbildung 4.2.: Reduziertes Fundamentaldiagramm aller drei Experimenttypen aufgetragen nach der Dichte ρ

4. Auswertung und Vergleich

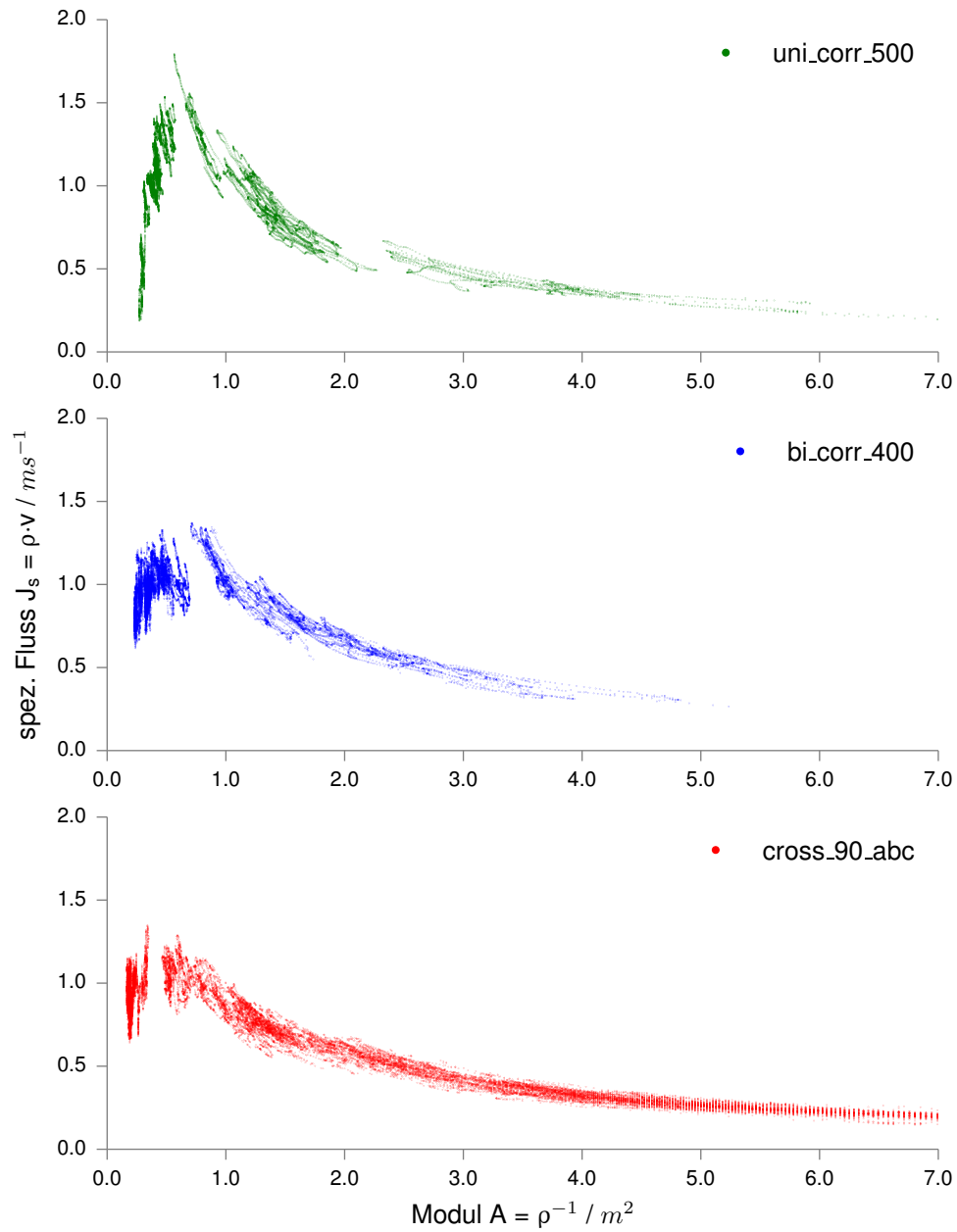


Abbildung 4.3.: Reduziertes Fundamentaldiagramm aller drei Experimenttypen aufgetragen nach dem Modul A

Der Freiflussast aller drei Experimente in Abbildung 4.3 zeigt einen deutlichen funktionalen Zusammenhang zwischen dem Modul A und dem spezifischen Fluss J_s . Bei den unidirektionalen Experimenten ist allerdings eine Datenlücke bei einem Modul von $2,3 m^2$ festzustellen. Für die folgende Analyse wird angenommen, dass die Datenlücke durch fehlende Experimente in diesem Dichtebereich zustande kommt.

Im Dichte-Fluss-Diagramm in Abbildung 4.2 scheint es auf den ersten Blick einen linearen Zusammenhang zwischen Dichte und spezifischen Fluss zu geben. Bei Betrachtung des bidirektionalen Experiments fällt allerdings auf, dass die lineare Funktion ab einer Dichte von ungefähr $1 m^{-2}$ abknickt. Nach dem Knick geht die Funktion linear weiter. Auch bei den anderen Experimenten ist dieser Knick ab einer gewissen Dichte zu beobachten.

Dies ist als Indiz dafür zu werten, dass der Freiflussast wiederum in zwei Bereiche unterteilt werden kann. Zu einer ähnlichen Erkenntnis kommt Chen während der Analyse und Modellierung von verschiedenen Gehwegen. [5, S. 35] Chen unterteilt in einen Freiflussast und in einen Interaktionsast. In dem Freiflussast können die Personen ihre Geschwindigkeit frei wählen. Der Fluss erhöht sich in diesem Bereich mit jeder zusätzlichen Person im Raum. Im Interaktionsast müssen die Personen miteinander interagieren und gegebenenfalls die Richtung oder die Geschwindigkeit ändern. Mit zunehmender Personendichte werden die Einschränkungen immer größer.

Für die Modellierung des Freiflussastes sollen beiden Zustände angenommen werden. Dies bedeutet, dass der Freiflussast in zwei Funktionen beschrieben wird, eine Freiflussfunktion und eine Interaktionsfunktion.

4.2. Modellierung des Freiflussastes

4.2.1. Auswahl der Modellierungsfunktion

Für die Modellierung der beiden Äste im Freiflussbereich stellt sich zunächst die Frage, welche mathematischen Funktionen für die Modellierung herangezogen werden. Die Funktionen sollen so ausgewählt werden, dass der Übergang zwischen Freiflussfunktion und Interaktionsfunktion sowie die Kapazität am besten abzulesen ist.

Für den Freiflussast wird ein linearer Zusammenhang zwischen Dichte und spezifischem Fluss angenommen. Dementsprechend wird dieser Bereich durch eine lineare Funktion beschrieben.

Der Interaktionsast scheint bei dem unidirektionalen und bei dem bidirektionalen Experiment ebenfalls linear zu verlaufen. Für den Interaktionsast der Kreuzungsexperimente scheint eine quadratische Funktion die geeignetere Annäherung zu sein. Die Auswahl der mathematischen Funktionen für Freiflussast und Interaktionsast ist in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Zusätzlich zu der mathematischen Funktion ist der Definitionsbereich der Funktionen zu beschreiben. Der Definitionsbereich wird über die Dichte des Fundamentaldiagramms angegeben. Die un-

4. Auswertung und Vergleich

Tabelle 4.1.: Auswahl der Modellierungsfunktionen

Experiment	Freiflussfunktion	Interaktionsfunktion
<i>uni corr 500</i>	$f(x) = ax + b$ $D = \{x \in \mathbb{R} \mid 0,01 \leq x \leq \rho_{opt}\}$	$f(x) = ax + b$ $D = \{x \in \mathbb{R} \mid \rho_{opt} \leq x \leq 1,6\}$
<i>bi corr 400</i>	$f(x) = ax + b$ $D = \{x \in \mathbb{R} \mid 0,01 \leq x \leq \rho_{opt}\}$	$f(x) = ax + b$ $D = \{x \in \mathbb{R} \mid \rho_{opt} \leq x \leq 1,4\}$
<i>cross 90 abc</i>	$f(x) = ax + b$ $D = \{x \in \mathbb{R} \mid 0,01 \leq x \leq \rho_{opt}\}$	$f(x) = ax^2 + bx + c$ $D = \{x \in \mathbb{R} \mid \rho_{opt} \leq x \leq 1,8\}$

tere Dichtegrenze wird mit $0,01 \text{ m}^{-2}$ für alle Freiflussfunktionen festgelegt, da bei einer Dichte von 0 m^{-2} das Modul A nicht berechnet werden könnte. Die obere Dichtegrenze des Interaktionsasts wird am Maximalwert, kurz vor dem Sprung zum gestauten Ast, abgelesen. Die Definitionsmengen sind ebenfalls in Tabelle 4.1 beschrieben.

Freiflussfunktion und Interaktionsfunktion werden an einer Stelle durch die optimale Dichte ρ_{opt} getrennt. Bei dieser Dichte ist ein hoher Fluss zu beobachten, die Bewegungsfreiheit der Personen ist jedoch weitestgehend uneingeschränkt. Durch ein Regressionsverfahren sollen sowohl die optimale Dichte, als auch die Parameter für die Modellierungsfunktionen gefunden werden.

4.2.2. Modellierung

Die Modellierung des Freiflussastes soll in einem iterativen Regressionsverfahren erfolgen. Hierzu wird der Wert für die optimale Dichte ρ_{opt} in kleinen Schritten variiert. Für jede angenommene optimale Dichte ρ_{opt} wird ein Regressionsverfahren nach dem Levenberg-Marquardt-Algorithmus durchgeführt. Der Algorithmus findet die beste Funktionsannäherung mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate.

Die Summe der kleinsten Quadrate wird als Regressionskennwert R betrachtet. Die Regressionswerte für den Freiflussast und für den Interaktionsast werden addiert und als R_{min} bezeichnet. Es wird davon ausgegangen, dass R_{min} umso größer wird, je weiter die getestete optimale Dichte von der tatsächlichen optimalen Dichte entfernt liegt.

In Abbildung 4.4 ist das Regressionsverfahren als Verfahrensbeschreibung abgebildet. Sowohl die Funktionen als auch die Definitionsbereiche der Funktionen werden vorgegeben. In einer übergeordneten Schleife wird in kleinen Schritten ρ_{opt} modifiziert. In der untergeordneten Schleife werden die besten Funktionsparameter mittels Levenberg-Marquardt-Algorithmus gefunden, indem die Summe der kleinsten Quadrate minimiert wird. Für jede Dichte ρ_{opt} liegt schließlich ein Regressionskennwert R_{min} vor.

In der Formel 4.1 wird das Regressionsverfahren mathematisch beschrieben. Die Funktionsparameter für die Freiflussfunktion müssen für jedes i neu gefunden werden und besitzen deshalb

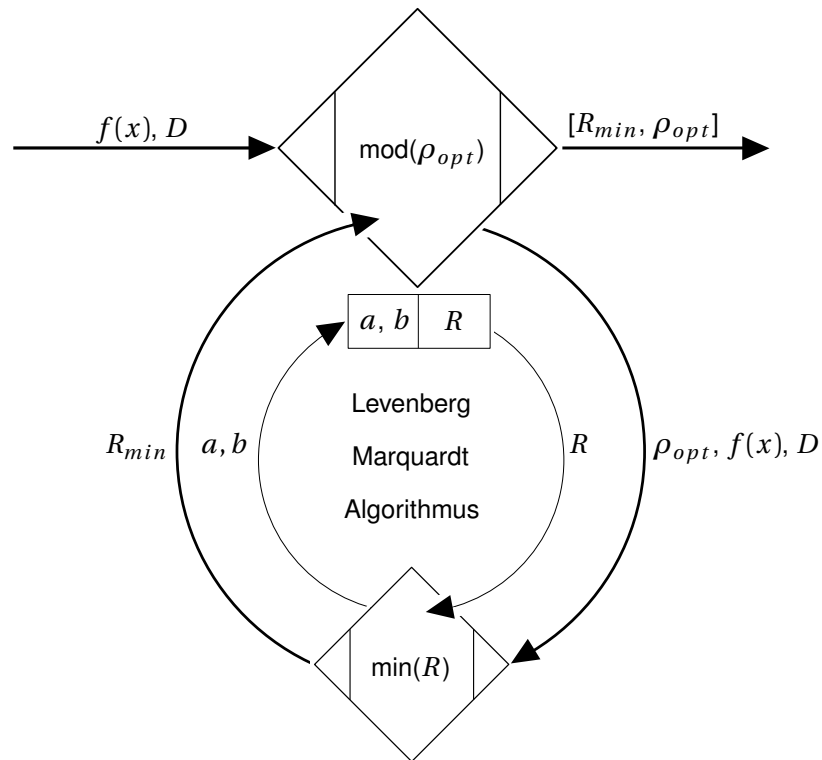


Abbildung 4.4.: Iteratives Regressionsverfahren zur Ermittlung der optimalen Dichte

ebenfalls einen Index i . In der Formel ist gut zu erkennen, wie die Werte für die einzelnen Quadrate gebildet werden.

$$R_{min} = \sqrt{\sum_{i=\rho_{F,min}}^{\rho_{opt}} (J_{s,i} - f_{F,i}(\rho_i))^2 + \sum_{i=\rho_{opt}}^{\rho_{I,max}} (J_{s,i} - f_{I,i}(\rho_i))^2} \quad (4.1)$$

Schließlich wird die optimale Dichte ρ_{opt} in einem Diagramm gegen den Regressionskennwert R_{min} aufgetragen. Die Diagramme für die Experimente *cross 90 abc* und *bicorr 400* sind in Abbildung 4.5 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Regressionskennwert ab einer bestimmten Dichte stark ansteigt. Der starke Anstieg des Regressionskennwertes R ist wiederum ein Indiz für eine ungenaue Modellierung.

Als optimale Dichte ρ_{opt} wird nun der Dichtewert angenommen, kurz bevor der Regressionskennwert R ansteigt. Für das Experiment *cross 90 abc* wird beispielsweise die optimale Dichte bei $0,55 \text{ m}^{-2}$ abgelesen. Für das Experiment *bicorr 400* befindet sich die optimale Dichte bei $0,85 \text{ m}^{-2}$ und für *unicorr 500* bei $1,05 \text{ m}^{-2}$.

Da nun die optimalen Dichten aller Experimente gefunden sind, können die Funktionsparameter für die Freiflussfunktion und die Interaktionsfunktion ermittelt werden. Wieder lassen sich diese mit Hilfe des Levenberg-Marquardt-Algorithmus bestimmt, allerdings mit vorgebender optimaler Dichte ρ_{opt} .

4. Auswertung und Vergleich

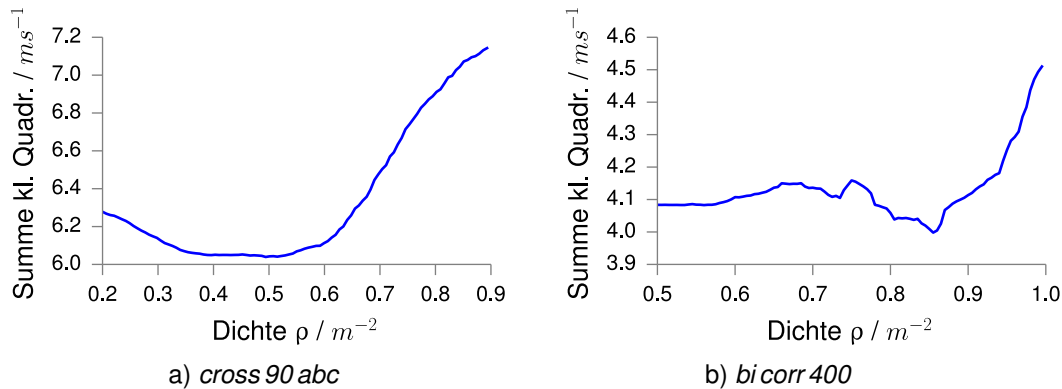


Abbildung 4.5.: Summe der kleinsten Quadrate R mit variabler Dichte ρ_{opt} für verschiedene Experimente

Die Annäherungsfunktionen für alle Experimente sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Die Parameter für die Modellierung der einzelnen Experimente sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst. Als Qualitätskennwert für die Modellierung wird in der Tabelle 4.2 die Standardabweichung zwischen Experimentdaten und Modellfunktion angegeben. Als zweiter Qualitätskennwert dient das Bestimmtheitsmaß r^2 , welches aus dem Quadrat des Korrelationskoeffizienten gebildet wird.

Alle Modellfunktionen scheinen die Experimentdaten gut zu beschreiben. Besonders die Funktionen für den Freiflussast scheinen gute Annäherungen zu sein. Der im letzten Abschnitt beobachtete Knick in den Datenreihen scheint mit der optimalen Dichte ρ_{opt} übereinzustimmen. Die Modellfunktionen für den Freiflussast und für den Interaktionsast besitzen günstige statistische Kennwerte σ und r^2 .

Mit Hilfe der Funktionen wurden wesentliche Eigenschaften des Fundamentaldiagramms bestimmt. Der Personenstrom bewegt sich bei niedrigen Dichten im Freiflussbereich. Jede zusätzliche Person bedeutet in diesem Bereich eine Erhöhung des Personenflusses. Bei der optimalen Dichte wechselt der Personenstrom in den Interaktionsast. Die Probanden müssen mit zunehmender Dichte zunehmend miteinander interagieren. Auch der Interaktionsast ist zunächst ein stabiler Zustand. Allerdings kann jederzeit ein Übergang vom Interaktionsast in den gestauten Ast erfolgen.

Wann dieser Übergang stattfindet hängt vermutlich von der Motivation der Probanden ab, entgegenkommenden oder langsameren Probanden unter Beibehaltung der eigenen Geschwindigkeit auszuweichen. Wenn einige Probanden sich entschließen ihre Geschwindigkeit stark zu reduzieren, wechselt der Zustand schließlich in den gestauten Ast. Bei den Kreuzungsexperimenten allerdings, scheint der Übergang zwischen Freiflussast und gestautem Ast kontinuierlich zu erfolgen, weshalb sich ein parabelförmiger Interaktionsast ergibt.

In Abbildung 4.7 werden die Modellfunktionen der verschiedenen Experimente miteinander verglichen. Der Freiflussbereich aller drei Experimente weist bemerkenswerte Gemeinsamkeiten auf. Es lässt sich vermuten, dass der Freiflussbereich durch eine einzige gemeinsame Funktion be-

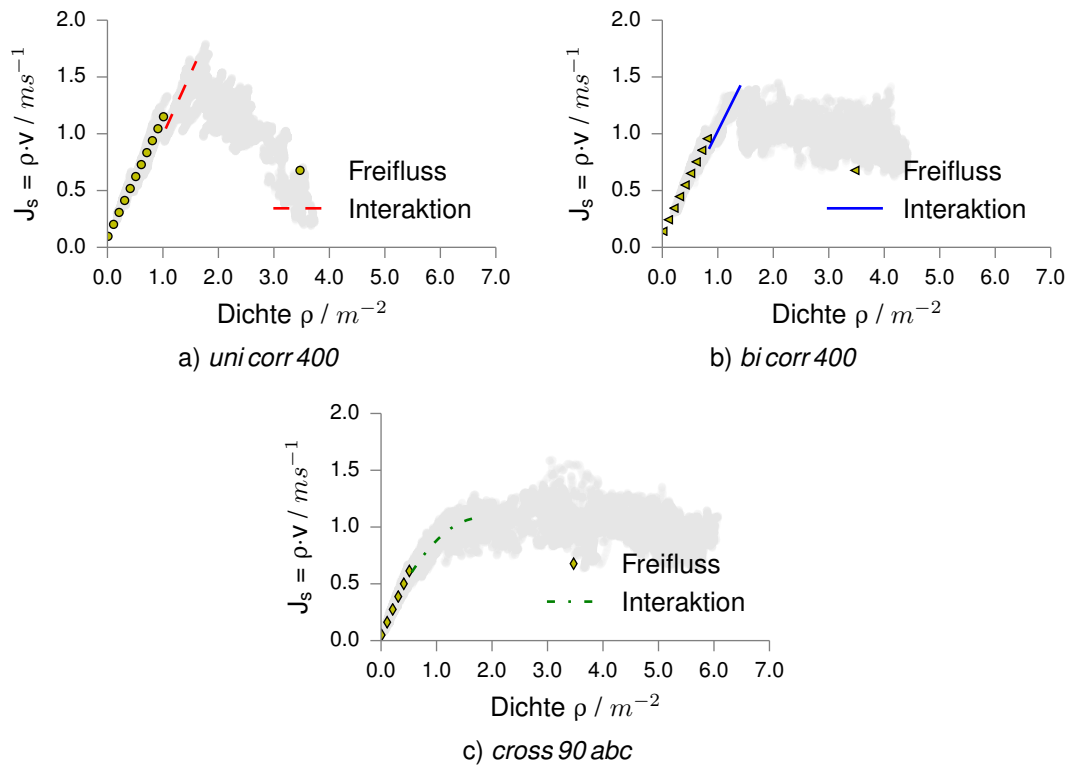
Abbildung 4.6.: Darstellung der Modellfunktionen für *uni corr 400*, *bi corr 400* und *cross 90 abc*

Tabelle 4.2.: Modellkennwerte für den Freiflussast der verschiedenen Experimente

uni corr 500	Freiflussast	Interaktionsast
Modellfunktion	$J_s(\rho) = 1,05\rho + 0,09$	$J_s(\rho) = 1,08\rho - 0,09$
Definitionsgrenzen D	$\{0,01 \leq \rho \leq 1,05\}$	$\{1,05 \leq \rho \leq 1,6\}$
Standardabw. σ	0,06	0,06
Bestimmtheitsmaß r^2	0,94	0,85
<i>bi corr 400</i>	Freiflussast	Interaktionsast
Modellfunktion	$J_s(\rho) = 1,02\rho + 0,13$	$J_s(\rho) = 1,02\rho + 0,04$
Definitionsgrenzen D	$\{0,01 \leq \rho \leq 0,85\}$	$\{0,85 \leq \rho \leq 1,4\}$
Standardabw. σ	0,05	0,05
Bestimmtheitsmaß r^2	0,91	0,81
<i>cross 90 abc</i>	Freiflussast	Interaktionsast
Modellfunktion	$J_s(\rho) = 1,13\rho + 0,04$	$J_s(\rho) = -0,3\rho^2 + 1,08\rho + 0,1$
Definitionsgrenzen D	$\{0,01 \leq \rho \leq 0,55\}$	$\{0,55 \leq \rho \leq 1,8\}$
Standardabw. σ	0,03	0,06
Bestimmtheitsmaß r^2	0,96	0,83

4. Auswertung und Vergleich

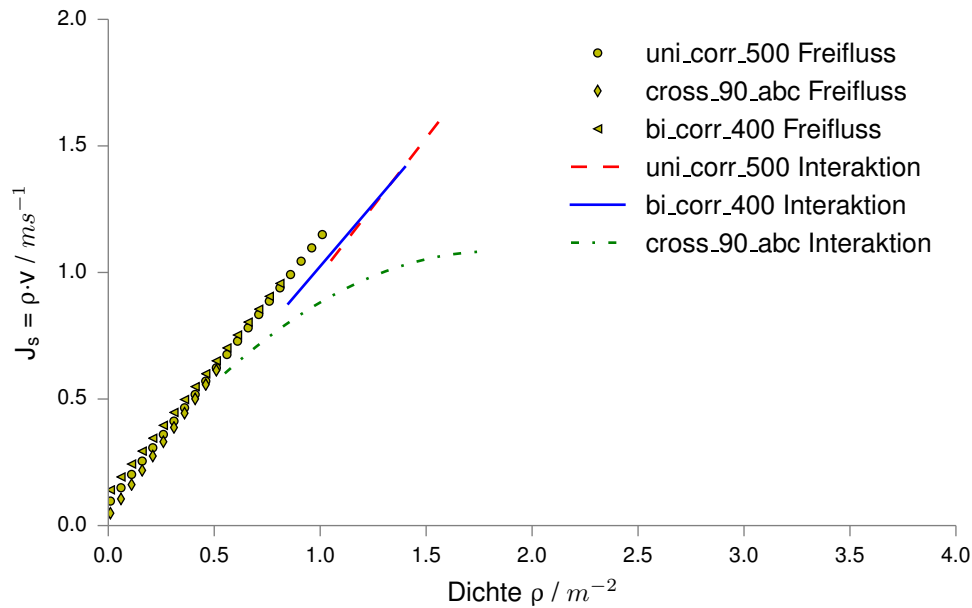


Abbildung 4.7.: Vergleich der Freiflussmodelle der verschiedenen Experimente

geschrieben werden kann. Es muss lediglich unterschieden werden, bis zu welcher Dichte der Freifluss aufrecht erhalten bleibt.

Starke Unterschiede sind allerdings in den Interaktionsfunktionen zu finden. Die Interaktion zwischen den Probanden bei den bidirektionalen Experimenten scheint schon bei einer geringeren Dichte zu beginnen, als bei den unidirektionalen Experimenten. Bei den Kreuzungsexperimenten beginnt die Interaktion schon bei einer Dichte von $0,55 \text{ m}^{-2}$. Umgerechnet in das Modul A entspricht dies einem persönlichen verfügbaren Platz von $1,8 \text{ m}^2$ je Person. Es ist zu beachten, dass immer die Durchschnittsdichte der Messfläche und nicht die lokale persönliche Dichte angegeben wird.

4.3. Ablesen der Kapazität

Durch die Modellierung wurde vor allem das Verständnis für den Freiflussast erweitert. Neben der Kapazität scheint die optimale Dichte ρ_{opt} ein wichtiger Kennwert für die Beschreibung der Personenstromzustände zu sein. Bei der optimalen Dichte befindet sich der Personenstrom im Freifluss und weist einen hohen spezifischen Fluss auf. Die Dichte ρ , das Modul A , die Geschwindigkeit v und der spezifische Fluss J_s werden deshalb im Folgenden nicht nur bei der Kapazität, sondern auch bei der optimalen Dichte ermittelt.

Alle Kennwerte lassen sich durch die modellierte Funktion des Interaktionsasts berechnen. Für die Berechnung der Geschwindigkeit wurde die Flussgleichung mit $v = \frac{J_s}{\rho}$ benutzt. Die Kapazität

Tabelle 4.3.: Kapazität und weitere Kennwerte der Experimente *unicorr500*, *bicorr400* und *cross90abc*

	<i>unicorr500</i>	<i>bicorr400</i>	<i>cross90abc</i>
ρ_{opt} / m^{-2}	1,05	0,85	0,55
ρ_{krit} / m^{-2}	1,40	1,20	1,8
A_{opt} / m^2	0,95	1,18	1,82
A_{krit} / m^2	0,71	0,83	0,56
$v_{opt} / m/s$	0,99	1,03	1,10
$v_{krit} / m/s$	1,02	1,01	0,60
J_{opt} / ms^{-1}	1,04	0,87	0,60
J_{krit} / ms^{-1}	1,42	1,22	1,10

der Kreuzungsexperimente wird am Hochpunkt der Parabel abgelesen. Für das unidirektionale und das bidirektionale Experiment sind jedoch weitere Überlegungen anzustellen, an welchem Punkt der Interaktionsfunktion sich die Kapazität befindet. Der Übergang vom Interaktionsast in den gestauten Ast findet scheinbar schon vor dem Maximum der Interaktionsfunktion statt.

Durch die Darstellungen der einzelnen Experimentläufe im Fundamentaldiagramm in Abbildung 3.7 und Abbildung 3.10 lassen sich die Experimentläufe ermitteln, in denen der Übergang zwischen dem gestauten Ast und dem Interaktionsast stattfindet. Die Kennwertverläufe dieser Experimente sind im digitalen Anhang zu finden. (A.3.5.4) Durch das Betrachten des Dichte- und des Geschwindigkeitsverlaufs lässt sich die Dichte abschätzen, bei welcher die Probanden die Geschwindigkeit reduzieren. Für das unidirektionale Experiment geschieht dies bei einer Dichte von etwa $1,4 m^{-2}$. Für das bidirektionale Experiment ist eine Änderung im Dichte- und Geschwindigkeitsverlauf ab Dichten über $1,2 m^{-2}$ zu beobachten.

In der Tabelle 4.3 sind die berechneten Kennwerte aller Experimente dargestellt. Die optimalen Dichten und die kritischen Dichten wurden in den letzten Abschnitten zusammengetragen und dienen als Berechnungsbasis.

Das Modul A_{opt} gibt die Fläche in m^2 an, welche einer Person im Experiment zur Verfügung stehen sollte. In der Kreuzung benötigen die Probanden fast die doppelte Fläche, im Vergleich zum einfachen Korridor, um Geschwindigkeit und Richtung frei wählen zu können.

Bei den unidirektionalen und bei den bidirektionalen Experimenten ist zu erkennen, dass die Probanden sich mit fast der gleichen Geschwindigkeit v_{opt} und v_{krit} im optimalen und im kritischen Bereich bewegen. Bei den Kreuzungsexperimenten ist die Geschwindigkeit v_{krit} bereits deutlich verlangsamt.

Die Kapazität C entspricht dem Kennwert J_{krit} . Die Kapazität ist beim unidirektionalen Korridor mit $1,42 ms^{-1}$ am höchsten. Das bidirektionale Experiment weist eine Kapazität von $1,22 ms^{-1}$ auf. In der Kreuzung wird ein maximaler Personenfluss von $1,10 ms^{-1}$ gemessen. Die Kapazität kann beispielsweise dazu genutzt werden, Simulationsergebnisse zu validieren.

4. Auswertung und Vergleich

Der optimale Fluss J_{opt} ist im unidirektionalen Korridor mit $1,04 \text{ m s}^{-1}$ ebenfalls am höchsten. Im bidirektionalen Experiment beträgt der optimale Fluss $0,87 \text{ m s}^{-1}$ und in den Kreuzungsexperimenten nur $0,6 \text{ m s}^{-1}$. Der optimalen Fluss ρ_{opt} könnte sich eignen, um Verkehrswege für Versammlungsstätten oder für Großveranstaltungen zu dimensionieren.

4.3.1. Sicherheitstechnische Bewertung

In diesem Abschnitt sollen die in dieser Arbeit gewonnenen Zahlen und Erkenntnisse kurz sicherheitstechnisch diskutiert und interpretiert werden. Zunächst ist festzuhalten, dass durch die Experimente nur grundlegende Verhaltensmuster der Personen unter geplanten Bedingungen zu beobachten sind. Das Verhalten von Personen im Gefahrenfall, wie beispielsweise bei einer Evakuierung, ist wesentlich komplexer. Dennoch soll folgend gezeigt werden, dass auch Experimente sicherheitstechnische Fragen klären können.

Das unidirektionale Experiment gibt Auskunft über das Verhalten von Personen in einem Korridor. Da die Personen nur wenig miteinander interagieren müssen, ist ein Freifluss selbst bei einer Dichte von über einer Person je Quadratmeter möglich. Bei höheren Dichten fangen die Personen an die eigene Geschwindigkeit an die Geschwindigkeit der vorangehenden Personen anzupassen. Diese Geschwindigkeit können die Probanden noch beibehalten, bis die Kapazität des Experiments erreicht ist. Danach sinkt die Geschwindigkeit plötzlich ab und der Zustand wechselt in den gestauten Ast.

Der Großteil eines Rettungsweges besteht aus unidirektionalen Gehwegen. Wenn es geschafft werden kann, den Personenfluss eines Rettungsweges auf ungefähr 1 m s^{-1} zu regulieren, könnten optimale Bedingungen für eine Rettung gegeben sein. Die Personen haben noch die freie Wahl der Richtung und der Geschwindigkeit. Befindet sich der Personenstrom bereits im Interaktionsast, so kann gerade bei hoher Motivation ein schneller Wechsel in den gestauten Ast erfolgen. Der optimale Fluss und die optimale Dichte scheinen deshalb wichtige Bemessungswerte zu sein. Diese Aussage ist allerdings nur als These zu verstehen und muss durch Feldstudien überprüft werden.

An den bidirektionalen Verkehrswegen konnte durch die Profildarstellungen gezeigt werden, dass der Fluss abnimmt, wenn die Dichte im Raum inhomogen wird. Im Freiflussbereich stören sich die Personen kaum und können Geschwindigkeit und Richtung frei wählen. Im Interaktionsast versuchen die Probanden sich wieder an den Personenstrom anzupassen, hierbei wurde sogar eine stabile Linienbildung beobachtet. Für den Wechsel in den gestauten Ast ist wahrscheinlich die Motivation der Personen von großer Bedeutung. Versuchen die Personen Lücken im Korridor für die Fortbewegung auszunutzen, führt dies zu einer höheren Dichte und letztendlich zu einem Zustandswechsel auf den gestauten Ast.

Gerade bei Großveranstaltungen ist die Gestaltung von bidirektionalen Verkehrswegen wichtig. Auch hier sollte der optimale Fluss als Bemessungswert dienen und nicht die Kapazität. Dies

beinhaltet jedoch die Problematik, wie der Fluss auf einen optimalen Wert eingestellt werden kann. In gewisser Weise konnte diese Einstellung des Personenflusses mit Hilfe der Beschilderung beobachtet werden. Zwar befinden sich die Probanden weiterhin in dem gestauten Zustand, mit der Beschilderung ist jedoch eine Verringerung der Dichte und somit eine Verschiebung in Richtung des Interaktionsasts gelungen.

Bei den Kreuzungsexperimenten ist ein freier Fluss nur bei sehr geringen Dichten zu beobachten. Bei höheren Dichten schaffen die Personen es nicht sich strukturell zu ordnen, sodass ein kontinuierlicher Übergang in den gestauten Ast erfolgt. Beträgt die Dichte in der Kreuzung mehr als $2 m^{-2}$ kommt es zu einem vermeintlich gefährlichen Phänomen. Der Abfluss aus der Kreuzung ist dann wesentlich geringer, als der Zufluss in die Kreuzung. Sind die Personen motiviert, die andere Seite der Kreuzung zu erreichen, nutzen diese kleinste Lücken aus und die Dichte in der Kreuzungsmittelpunkt wird immer höher. Auf diese Weise konnte eine Durchschnittsdichte von $6 m^{-2}$ gemessen werden. Werden lokale Kennwerte betrachtet, sind sogar Dichten von über $8 m^{-2}$ zu messen. Durch die Verwendung eines Kreisverkehrs konnte der Dichteanstieg auf ungefähr $4 m^{-2}$ reduziert werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit wurde mit dem Ziel begonnen, die Kapazität und weitere Personenstromkennwerte von verschiedenen Stromtypen zu messen. Als Grundlage hierzu dienten die durch die *Forschungszentrum Jülich GmbH* durchgeführten *BaSiGo Experimente*.

Nach einer kurzen Zusammenfassung, der für diese Arbeit notwendigen Grundlagen zur Fußgängerdynamik, erfolgte eine Vorstellung der zu analysierenden Experimente. Anschließend wurde die Methodik zum Trajektorienexport und zur Berechnung der Personenstromkennwerte vorgestellt.

Die folgende Analyse der Experimente fand hauptsächlich anhand der graphischen Darstellung der Personenstromkennwerte statt. Neben der Darstellung der Trajektorien und der Profildarstellung, spielte besonders das Fundamentaldiagramm eine zentrale Rolle. Insgesamt zeigte sich eine gute Eignung der Methode D für die Berechnung der Personenstromkennwerte. Mittels der Voronoi-Methode wurden Muster und Strukturen im Fundamentaldiagramm sichtbar, welche durch die geringe Auflösung der Methode A nicht erkennbar waren. Für den Freiflussast führten beide Methoden zu vergleichbaren Messwerten, im hohen Dichtebereich wichen diese allerdings voneinander ab.

Auch nach der Darstellung der Kennwerte im Fundamentaldiagramm gestaltete sich das Ablesen der Kapazität als schwierig. Um den Flusshochpunkt war eine hohe Datenstreuung vorzufinden, zudem waren die Hintergründe für den Verlauf des Fundamentaldiagramms noch nicht eindeutig geklärt. Aus diesem Grund wurde im nächsten Kapitel der Verlauf des Freiflussastes genauer analysiert und schließlich modelliert.

Es ergab sich die Erkenntnis, dass der Freiflussast in zwei verschiedene Zustände unterteilt werden kann. Der Freiflussast wechselt bei einer optimalen Dichte ρ_{opt} in einen Interaktionsast. Durch das Interagieren der Personen bilden sich Strukturen und Muster im Personenstrom, welche zu einer Erhaltung des Flusses führen. Steigt die Personendichte an, wechselt der Zustand des Personenstroms in den gestauten Ast. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Strukturen nicht mehr zeitlich konsistent sind und immer wieder unterbrochen werden. Die Bildung von Strukturen hängt nicht zuletzt mit der Motivation der einzelnen Personen im Personenstrom ab.

Die gefundenen Modelle für Freiflussast und Interaktionsast liefern gute statistische Kennwerte. Diese Arbeit kommt zu der Erkenntnis, dass der Freiflussast aller drei Experimente durch den selben funktionellen Verlauf abgebildet werden kann. Es unterscheidet sich lediglich die optimale

5. Zusammenfassung und Ausblick

Dichte ρ_{opt} , bei welcher der Freiflussast in den Interaktionsast übergeht. Der Interaktionsast der Experimente unterscheidet sich wiederum maßgeblich, da bei allen Experimenten andere Interaktionen zwischen den Probanden erforderlich sind.

Mit den neuen Erkenntnissen konnte schließlich die Kapazität $C = J_{s,krit}$ und ein optimaler Fluss $J_{s,opt}$ abgelesen werden. Für die Kreuzung wurde eine überraschend hohe Kapazität von $1,1 \text{ m s}^{-1}$ gefunden. Allerdings liegt der optimale Fluss mit $0,6 \text{ m s}^{-1}$ weit unterhalb dieses Wertes. Zudem wurde beobachtet, dass schon bei geringer Motivation hohe Dichten in der Kreuzungsmitte entstehen können. Dieses Phänomen scheint gerade aus sicherheitstechnischer Sicht bedeutsam zu sein.

Auch ein positiver Effekt der Beschilderung ließ sich beobachten. Die gewonnene Ordnung führte in dem Personenstrom zu niedrigeren Dichten und somit zu einer Verschiebung auf dem Fundamentaldiagramm. Dies ist allerdings in zukünftigen Experimenten oder Feldstudien genauer zu untersuchen. Allgemein ergaben sich durch diese Ausarbeitung wissenschaftliche Fragestellungen, die zukünftig untersucht werden können.

Es wurde gezeigt, dass es gerade in Kreuzungen schnell zu hohen Dichten kommen kann. Durch die Bildung eines Kreisverkehrs wurde eine Ordnung im Personenstrom beobachtet, welche zu niedrigeren Dichten führte. Im Rahmen der *BaSiGo* Experimente wurden weitere Versuche an den Kreuzungen durchgeführt. Es wäre interessant zu erfahren, durch welche Maßnahmen die Personendichte in der Kreuzung weiter reduziert werden kann.

Die Voronoi-Methode zeigt bei der Darstellung der Kennwerte im Fundamentaldiagramm die deutlichsten und stabilsten Strukturen an, mit denen das Verhalten der Personen im Experiment interpretiert werden kann. Allerdings bleibt die Vermutung, dass bei sehr hohen Personendichten der spezifische Fluss J_s nicht mit dem tatsächlichen Personendurchsatz des Experiments übereinstimmt. Die Berechnung des spezifischen Flusses über $\rho \cdot v$ hat die Eigenschaft, dass Probanden auch durch nicht zielgerichtete Bewegungen den Personenfluss erhöhen können. Eine nicht zielgerichtete Bewegung wäre beispielsweise eine Vor- und Rückwärtsbewegung der Person, ein im Kreis laufen oder das Verwenden großer Umwege. Es ist zu befürchten, dass gerade bei hohen Personendichten viele dieser nicht zielgerichteten Bewegung Einfluss auf den berechneten spezifischen Fluss genommen haben.

Aus diesem Grund könnte eine Kennzahl für die Unordnung eine Aussage über die Qualität des berechneten Flusses geben. Bei einer hohen Unordnung ist davon auszugehen, dass der berechnete Fluss nicht den tatsächlichen Personendurchsatz angibt.

Der über die Flussgleichung berechnete Fluss bleibt jedoch auch bei hohen Personendichten eine wichtige Kennzahl, auch wenn dieser nicht unbedingt den Personendurchsatz darstellt. Sowohl bei den Kreuzungen, als auch bei dem bidirektionalen Experiment stellte sich ein stabiler spezifischer Fluss bei hohen Dichten ein. Es ist noch zu klären, warum der Fluss selbst bei hohen

Dichten noch zu messen ist und was die Aussage des berechneten Flusses ist. Möglicherweise ist die Unordnung ein erster Ansatz hierfür.

In dieser Arbeit wurde der stationäre Zustand der Experimente insgesamt zweimal bestimmt, je nach Fragestellung. Dies geschah anhand der graphischen Verläufe der berechneten Personenstromkennwerte. Die Auswahl des stationären Zustands hängt schließlich stark von der Interpretation des Betrachters ab. Es sollten mathematische Methoden geschaffen werden, mit denen der stationäre Zustand genau bestimmt werden kann. Die Auswahl der stationären Zustände hat einen hohen Einfluss auf das Fundamentaldiagramm. Nur wenn dieser präzise genug definiert ist, lassen sich auch Fundamentaldiagramme aus verschiedenen Arbeiten miteinander vergleichen.

Literaturverzeichnis

- [1] Boltes, M.: *Automatische Erfassung präziser Trajektorien in Personenströmen hoher Dichte*. 2014. – Disputation
- [2] Boltes, M.: *Automatische Erfassung präziser Trajektorien in Personenströmen hoher Dichte*, Universität Köln, Diss., 2015
- [3] Boltes, M. ; Steffen, B. ; Seyfried, A. ; Schadschneider, A.: Automatic Extraction of Pedestrian Trajectories from Video Recordings. In: *Pedestrian and Evacuation Dynamics* (2009)
- [4] Burghardt, S.: *Dynamik von Personenströmen in Sportstadien*, Bergische Universität Wuppertal, Diss., 2012. <http://dnb.d-nb.de>
- [5] Chen, X. ; Ye, J. ; Jian, N.: Relationships and characteristics of pedestrian traffic flow in confined passageways. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2198 (2010), S. 32–40
- [6] Daamen, W ; Hoogendoorn, SP: Experimental Research of Pedestrian Walking Behavior. In: *Transportation Research Record* 1828 (2003)
- [7] Friedrich, F.: *BaSiGo - Bausteine für die Sicherheit von Großveranstaltungen*. http://www.bmbf.de/pubRD/B2-II_Friedrich_Frank_Praesentation_2012.pdf. Version: April 2012. – Projektvorstellung
- [8] Friedrich, F.: *Ziele und Lösungen*. <http://www.basigo.de/basigo-projekt/ziele-und-loesungen.html>. Version: 2013. – Webseite; BaSiGo.de
- [9] Fruin, J.J.: *Pedestrian planning and design*. Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, 1971 <https://books.google.de/books?id=AydSAAAAMAAJ>
- [10] Helbing, D. ; Johansson, A. ; Al-Abideen, H. Z.: Dynamics of crowd disasters: An empirical study. In: *Physical Review E* 75 (2007), S. 046109. <http://dx.doi.org/doi:10.1103/PhysRevE.75.046109>. – DOI doi:10.1103/PhysRevE.75.046109
- [11] Holl, S ; Seyfried, A.: Validität von Evakuierungssimulationen. In: *vfdb* (2100)
- [12] Muenders, A.: *Kilibrierung eines mikroskopischen Modells für Personenströme zur Anwendung im Projekt Jermes*, Bergische Universität Wuppertal, Diplomarbeit, Juli 2011

Literaturverzeichnis

- [13] Predtechenskii, W. M. ; Milinskii, A. I.: *Personenströme in Gebäuden - Berechnungsmethoden für die Projektierung*. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln-Braunsfeld, 1971. – Original in Russian, Stroiizdat Publishers, Moscow, 1969
- [14] Schadschneider, A.: *Physik des Straßenverkehrs*. Universität Köln. <http://www.thp.uni-koeln.de/~as/MyPage/PSfiles/verkehr.pdf>. Version:2004. – Vorlesungsskript
- [15] Steffen, B. ; Seyfried., A.: Methods for measuring pedestrian density, flow, speed and direction with minimal scatter. In: *Physica A*, (2010)
- [16] Weidmann, U. ; Ausgabe, Zweite (Hrsg.): *Transporttechnik der Fussgänger*. IVT, 1933
- [17] Zhang, J.: *Pedestrian fundamental diagrams: Comparative analysis of experiments in different geometries*, Bergische Universität Wuppertal, Diss., 2012

A. Digitaler Anhang

Auf der dieser Abschlussarbeit beiliegenden Daten-CD, ist der digitale Anhang dieser Arbeit zu finden. Der digitale Anhang umfasst alle in dieser Arbeit vorgestellten Diagramme, zusätzliche Diagramme, Daten und Programmcode:

A.1. Skripte

A.1.1. Methode A

A.1.2. Regressionsverfahren

A.1.3. Grafikplotter

A.2. Daten

A.2.1. Trajektorien

A.2.2. Methode A

A.2.3. Methode D

A.2.4. Modellierung

A.3. Diagramme

A.3.1. Trajektorien

A.3.1.1. *uni corr 500*

A.3.1.2. *bi corr 400*

A.3.1.3. *cross 90 a*

A.3.1.4. *cross 90 b*

A.3.1.5. *cross 90 c*

A.3.2. Profildarstellung

A.3.2.1. *uni corr 500*

A.3.2.2. *bi corr 400*

A.3.2.3. *cross 90 a*

A.3.3. Stationäre Zustände

A.3.3.1. *uni corr 500*

A.3.3.2. *bi corr 400*

A.3.3.3. *cross 90 a*

A.3.3.4. *cross 90 b*

A. Digitaler Anhang

A.3.3.5. *cross 90 c*

A.3.4. Fundamentaldiagramme

A.3.4.1. *uni corr 500*

A.3.4.2. *bi corr 400*

A.3.4.3. *cross 90 a*

A.3.4.4. *cross 90 b*

A.3.4.5. *cross 90 c*

A.3.4.6. Vergleich Kreuzungen

A.3.5. Modellierung

A.3.5.1. Stationäre Zustände

A.3.5.2. Reduziertes Fundamentaldiagramm

A.3.5.3. Regressionsverfahren

A.3.5.4. Modell