



BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL

# Mikroskopische Analyse

von experimentell ermittelten Trajektorien  
in Personenströmen

---

## Bachelor-Thesis

LuFG Computersimulation für Brandschutz und Fußgängerverkehr  
FB D – Abteilung Bauingenieurwesen  
Bergische Universität Wuppertal

Betreuer:  
Prof. Dr. Armin Seyfried  
Dipl.-Ing. Stefan Holl

von  
Hannah Bodendorf, Matrikelnummer 1120694



# Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die Bachelor-Thesis selbstständig angefertigt und mich dabei nicht anderer als der von mir angegebenen Quellen bedient habe.

Solingen, den 16.03.2015

*Hannah Bodendorf*



# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen Betreuern Prof. Dr. Armin Seyfried und Dipl.-Ing. Stefan Holl für ihre Unterstützung, besonders aber für die immer wieder anregenden Gespräche danken. Weiterhin gilt mein Dank meiner Familie, die mir auch in sehr stressreichen Phasen zur Seite stand. Ich danke David Bodenstein für seine Erklärungen bezüglich PeTrack und JuPedSim sowie für seine zahlreichen Erläuterungen zu Pythonskripten. Natürlich gilt mein Dank auch Dr.-Ing. Jun Zhang für seine Bemühungen JuPedSim so zu programmieren, dass die von mir gewünschten Messbereiche anwendbar sind, sowie für die Beantwortung all meiner Fragen betrefflich der Analyse mit JuPedSim.



# Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	i
Danksagung	iii
Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xiii
Variablenverzeichnis	xv
<b>I Einführung</b>	<b>1</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1 Problemstellung und Ziel der Arbeit . . . . .	3
1.2 Vorgehen . . . . .	3
1.3 Gliederung . . . . .	4
<b>2 Stand der Wissenschaft</b>	<b>5</b>
2.1 Allgemeines . . . . .	5
2.2 Verwendete Programme . . . . .	11
2.2.1 PeTrack . . . . .	11
2.2.2 JuPedSim . . . . .	11
2.3 Methodik zur Analyse . . . . .	12
<b>II BaSiGo</b>	<b>15</b>
<b>3 CROSSING 120</b>	<b>17</b>
3.1 Allgemeines . . . . .	17
3.2 Experimentaufbau . . . . .	18
3.3 Durchführung . . . . .	19
3.3.1 Allgemeines . . . . .	19
3.3.2 Crossing 120 a . . . . .	20
3.3.3 Crossing 120 b . . . . .	21

3.3.4	Crossing 120 c . . . . .	21
<b>III</b>	<b>Ergebnisse und Analyse</b>	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>Analyse der Trajektorien</b>	<b>25</b>
4.1	Vorbemerkung . . . . .	25
4.2	Erstellung mit PeTrack . . . . .	25
4.3	Graphische Darstellung . . . . .	26
4.4	Einhaltung der Vorgaben . . . . .	30
<b>5</b>	<b>Analyse mit JuPedSim</b>	<b>37</b>
5.1	Wahl der Methode . . . . .	37
5.2	Arbeitsschritte mit JuPedSim . . . . .	37
5.2.1	Geometrie . . . . .	37
5.2.2	Interpretationsdatei . . . . .	38
5.2.3	Anpassung der Trajektorien . . . . .	38
5.2.4	Gebrauch von JPSreport . . . . .	39
5.3	Ermittlung der spezifischen Flüsse . . . . .	39
5.4	Profile für Geschwindigkeit, Dichte und Fluss . . . . .	40
5.4.1	Allgemeines . . . . .	40
5.4.2	Geschwindigkeit . . . . .	41
5.4.3	Dichte . . . . .	44
5.4.4	Fluss . . . . .	47
5.4.5	Auffälligkeiten innerhalb der Durchgänge . . . . .	49
5.4.6	Einfluss erhöhter Motivation, Lauf c 7 . . . . .	50
5.5	Fundamentaldiagramme . . . . .	51
<b>IV</b>	<b>Schlussbetrachtungen</b>	<b>55</b>
<b>6</b>	<b>Schlussbetrachtung</b>	<b>57</b>
6.1	Zusammenfassung und Fazit . . . . .	57
6.2	Ausblick . . . . .	58
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>59</b>
<b>V</b>	<b>Anhang</b>	<b>61</b>
<b>A</b>	<b>Trajektorien</b>	<b>63</b>
<b>B</b>	<b>Geschwindigkeitsprofile</b>	<b>72</b>
<b>C</b>	<b>Profile der Dichte</b>	<b>79</b>

**D Profile der Dichte**



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Dichte und Fluss in der Literatur . . . . .	10
3.1	Vogelperspektive des Aufbaus von Crossing 120 . . . . .	18
4.1	Koordinatensystem in PeTrack . . . . .	26
4.2	Trajektorien der Läufe a 3 und c 2 . . . . .	27
4.3	Trajektorien des Laufs a 7 . . . . .	29
4.4	Trajektorien des Durchgangs b, Lauf 1 . . . . .	30
4.5	Zeitlicher Verlauf der Abbiegevorgänge im Lauf c 6 . . . . .	34
5.1	Ergebnis einer Flussanalyse . . . . .	39
5.2	Blickwinkel der verwendeten Kamera . . . . .	41
5.3	Geschwindigkeitsprofil Lauf a 7 . . . . .	42
5.4	Geschwindigkeitsprofil Lauf b 1 . . . . .	43
5.5	Geschwindigkeitsprofil Lauf c 6 . . . . .	43
5.6	Profil der Dichte, Lauf a 7 . . . . .	45
5.7	Profil der Dichte, Lauf b 1 . . . . .	46
5.8	Profil der Dichte, Lauf c 6 . . . . .	46
5.9	Profil des Flusses, Lauf a 7 . . . . .	47
5.10	Profil des Flusses, Lauf b 1 . . . . .	48
5.11	Profil des Flusses, Lauf c 6 . . . . .	48
5.12	Eine Momentaufnahme: Lauf c 7, Frame 2740 . . . . .	50
5.13	Fundamentaldiagramm des Durchgangs a . . . . .	51
5.14	Fundamentaldiagramm des Durchgangs b . . . . .	52
5.15	Fundamentaldiagramm des Durchgangs c . . . . .	53
A.1	Trajektorien des Laufs a 1 . . . . .	63
A.2	Trajektorien des Laufs a 2 . . . . .	64
A.3	Trajektorien des Laufs a 3 . . . . .	64
A.4	Trajektorien des Laufs a 4 . . . . .	65
A.5	Trajektorien des Laufs a 5 . . . . .	65
A.6	Trajektorien des Laufs a 6 . . . . .	66
A.7	Trajektorien des Laufs a 7 . . . . .	66
A.8	Trajektorien des Laufs b 1 . . . . .	67
A.9	Trajektorien des Laufs b 2 . . . . .	67

A.10	Trajektorien des Laufs c 1	68
A.11	Trajektorien des Laufs c 2	68
A.12	Trajektorien des Laufs c 3	69
A.13	Trajektorien des Laufs c 4	69
A.14	Trajektorien des Laufs c 5	70
A.15	Trajektorien des Laufs c 6	70
A.16	Trajektorien des Laufs c 7	71
B.1	Geschwindigkeitsprofil Lauf a 1	72
B.2	Geschwindigkeitsprofil Lauf a 2	73
B.3	Geschwindigkeitsprofil Lauf a 3	73
B.4	Geschwindigkeitsprofil Lauf a 4	74
B.5	Geschwindigkeitsprofil Lauf a 5	74
B.6	Geschwindigkeitsprofil Lauf a 6	75
B.7	Geschwindigkeitsprofil Lauf b 2	75
B.8	Geschwindigkeitsprofil Lauf c 1	76
B.9	Geschwindigkeitsprofil Lauf c 2	76
B.10	Geschwindigkeitsprofil Lauf c 3	77
B.11	Geschwindigkeitsprofil Lauf c 4	77
B.12	Geschwindigkeitsprofil Lauf c 5	78
B.13	Geschwindigkeitsprofil Lauf c 7	78
C.1	Profil der Dichte Lauf a 1	79
C.2	Profil der Dichte Lauf a 2	80
C.3	Profil der Dichte Lauf a 3	80
C.4	Profil der Dichte Lauf a 4	81
C.5	Profil der Dichte Lauf a 5	81
C.6	Profil der Dichte Lauf a 6	82
C.7	Profil der Dichte Lauf b 2	82
C.8	Profil der Dichte Lauf c 1	83
C.9	Profil der Dichte Lauf c 2	83
C.10	Profil der Dichte Lauf c 3	84
C.11	Profil der Dichte Lauf c 4	84
C.12	Profil der Dichte Lauf c 5	85
C.13	Profil der Dichte Lauf c 7	85
D.1	Profil des Flusses Lauf a 1	86
D.2	Profil des Flusses Lauf a 2	87
D.3	Profil des Flusses Lauf a 3	87
D.4	Profil des Flusses Lauf a 4	88
D.5	Profil des Flusses Lauf a 5	88
D.6	Profil des Flusses Lauf a 6	89
D.7	Profil des Flusses Lauf b 2	89
D.8	Profil des Flusses Lauf c 1	90
D.9	Profil des Flusses Lauf c 2	90

---

D.10 Profil des Flusses Lauf c 3 . . . . .	91
D.11 Profil des Flusses Lauf c 4 . . . . .	91
D.12 Profil des Flusses Lauf c 5 . . . . .	92
D.13 Profil des Flusses Lauf c 7 . . . . .	92



# Tabellenverzeichnis

2.1	Stufensystem nach OEDING [1963] . . . . .	6
2.2	Abstände zu Objekten anhand der Literatur. Zusammengestellt nach BUCHMUELLER, S. UND WEIDMANN, U. [2007] . . . . .	7
2.3	Geschwindigkeiten in nicht überfüllten Gängen nach DAAMEN [2004] . . . . .	9
3.1	Übersicht der Durchgänge . . . . .	19
3.2	Übersicht der Läufe des Durchgangs a . . . . .	20
3.3	Übersicht der Läufe des Durchgangs b . . . . .	21
3.4	Übersicht der Läufe des Durchgangs c . . . . .	22
4.1	Einhaltung der Vorgaben Durchgang a . . . . .	32
4.2	Einhaltung der Vorgaben Durchgang b . . . . .	33
4.3	Einhaltung der Vorgaben Durchgang c . . . . .	33
5.1	Plateaus der Versuchsläufe . . . . .	40



# Variablenverzeichnis

Variable	Bedeutung
a	Erster Versuchsdurchgang
b	Zweiter Versuchsdurchgang
c	Dritter Versuchsdurchgang
Gang 1	Linker Gang
Gang 2	Rechter Gang
Gang 3	Unterer Gang
E1	Start in Gang 1
E2	Start in Gang 2
E3	Start in Gang 3
A1	Gang 1 als Ausgang genutzt
A2	Gang 2 als Ausgang genutzt
A3	Gang 3 als Ausgang genutzt
RA-Ströme	Rechtsabbiegerströme
P	Personen
m	Meter
s	Sekunde



**Teil I**

**Einführung**



# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung und Ziel der Arbeit

Das aktuelle Zeitalter ist unter anderem geprägt von hohen Bevölkerungszahlen und dem Wunsch nach Unterhaltung. Um diesen Wunsch zu erfüllen, gibt es zahlreiche Großereignisse wie Sportveranstaltungen (insbesondere Fußball), Konzerte oder aber Paraden wie Karnevalszüge. Nicht nur innerhalb dieser Veranstaltungen liegt ein hohes Personenaufkommen vor, sondern auch in Orten und Gebäuden des täglichen Bedarfs. Hier sind Bahnhöfe, Schulen und Universitäten als Beispiele zu nennen. Immer wieder treten Kapazitätüberschreitungen der Geometrien auf. Dann entstehen Staus, welche sich schnell zu Gedränge entwickeln können. Entscheidend ist daher, dass die Vorgänge sowie Muster innerhalb der Fortbewegung von Fußgängern erkannt werden, damit reibungslose Abläufe garantiert und Tragödien wie die der Loveparade 2010 ausgeschlossen werden. Zudem ist es von Bedeutung, Kenntnis über den Prozess der Staubildung in Anbetracht von Dichte, Geschwindigkeit und den daraus resultierenden Verkehrsfluss zu erlangen. Kristallisiert sich eine Grenzdicke heraus, ab welcher keine Fortbewegung mehr möglich ist?

Für das Erreichen dieses Ziels ist es notwendig, das Verhalten von Fußgängern in gebräuchlichen Geometrien zu erforschen. Damit ist gemeint, dass beispielsweise typische Knotenpunkte von Korridoren in Schulen oder ähnlichem nachgestellt und untersucht werden. Zu diesem Zweck fanden im Sommer 2013 Laborexperimente zur Fußgängerdynamik im Rahmen des Forschungsprojektes „Bausteine für die Sicherheit von Großveranstaltungen“ (kurz BaSiGo) statt. Eins dieser Experimente ist das Experiment Crossing 120, in welchem sich drei Gänge identischer Art jeweils unter einem Winkel von  $120^\circ$  in einer dreieckigen Kreuzung treffen. Ziel dieser Arbeit ist, die Daten von Crossing 120 in Hinblick auf die Verbindungen zwischen Dichte, Geschwindigkeit und Fluss zu analysieren.

## 1.2 Vorgehen

Zur Analyse wird in dieser Arbeit auf die am Forschungszentrum Jülich entwickelten Programme PeTrack und JuPedSim zurückgegriffen. PeTrack dient der Extra-

hierung von Trajektorien aus dem Videomaterial des Experiments. Eine Trajektorie beschreibt jeweils den Pfad einer Person innerhalb des Experiments. Zudem sind in ihr Daten über die Geschwindigkeit und natürlich auch die Position einer jeden Person zu jedem Zeitpunkt zwischen dem Betreten des Versuchsaufbaus und dem Verlassen abgelegt.

Die so erstellten Daten werden dann mit Komponenten des Programms JuPedSim untersucht, um Profile der Dichte, Geschwindigkeit und des Flusses sowie Fundamentaldiagramme anfertigen zu können. Fundamentaldiagramme stellen den Zusammenhang zwischen Dichte und Verkehrsfluss in einem bestimmten Messbereich dar.

### 1.3 Gliederung

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in drei Teile. Zunächst wird ein kurzer Überblick über den Stand der Wissenschaft gegeben (Kap. 2). In diesem Teil werden zusätzliche Informationen über die verwendeten Programme sowie Methoden der Analyse zusammengefasst. Von besonderer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die Dissertation von Jun Zhang „Pedestrian fundamental diagrams: Comparative analysis of experiments in different geometries“, da die Datenanalyse anhand seiner Methodik durchgeführt wird.

Der zweite Teil (Kap. 3) beschreibt den Versuchsaufbau sowie die Versuchsdurchführung. Anhand des Videomaterials werden Besonderheiten beschrieben und Unterschiede zwischen den Versuchsdurchgängen aufgeführt.

Anschließend werden im dritten Teil (Kap. 4 und 5) die mit PeTrack und JuPedSim erstellten Daten analysiert. In diesem Teil wird nicht nur über die Vorgehensweise während der Analyse informiert, sondern auch die Ergebnisse der Analyse präsentiert.

## 2 Stand der Wissenschaft

### 2.1 Allgemeines

Seit dem 20. Jahrhundert haben sich immer mehr Wissenschaftler mit der Thematik des Fußgängers beschäftigt und verschiedene Aspekte im Detail analysiert sowie aufbereitet. Hierdurch entstand ein besseres Verständnis des Verkehrsteilnehmers Fußgänger. Dabei ist von Bedeutung, dass eine differenzierte Betrachtung der einzelnen Verkehrsaspekte eines Fußgängers stattgefunden hat. Es wurden Richtlinien entwickelt wie die des „Handbuchs zur Bemessung von Straßenverkehrsanlagen“ [FGSV, 2001] oder das „Handbook of Fire Protection Engineering“ [DINENNO, 2002]. Dabei wird unterschieden zwischen dem Fußgängerverkehr innerhalb sowie außerhalb von Gebäuden.

DINENNO [2002] definiert drei fundamentale Charakteristika in Bezug auf den Fußgängerverkehr: Dichte, Geschwindigkeit und Fluss.

- Dichte lässt sich definieren als die Anzahl der Personen, pro Flächeneinheit eines Gehwegs. Oft wird sich umgekehrt auf diese bezogen: Fläche, die pro Person zur Verfügung steht.
- Geschwindigkeit ist der zurückgelegte Weg eines Fußgängers in einer bestimmten Zeiteinheit.
- Fluss ist die Anzahl an Personen, die einen Referenzpunkt in einer bestimmten Zeiteinheit passieren.

Diese Charakteristika bestimmen zusammen mit der Breite des Gehwegs die Grundgleichung des Verkehrs:  $Fluss = Geschwindigkeit \cdot Dichte \cdot Breite$ .

Die Geschwindigkeit ist ihrerseits abhängig von der Dichte. Menschen können sich rasch, mit einem normalen Gang bewegen, wenn ihnen viel Platz zur Verfügung steht. Je näher sich Menschen zueinander befinden, desto langsamer/steifer wird ihre Bewegung. Bei 4,00-5,00 P/m<sup>2</sup> wird ein Fortbewegen unmöglich. Es kommt zum Stillstand [DINENNO, 2002].

Ein Vorreiter in Bezug auf Fußgängerdynamik ist Detlef Oeding. Bereits 1963 beschäftigte er sich intensiv mit der Thematik des Fußgängers in seinem Forschungsbericht „Verkehrsbelastung und Dimensionierung von Gehwegen und

anderen Anlagen des Fußgängerverkehrs“. Eine zentrale Aussage ist die Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Dichte. Mit ansteigender Dichte verringert sich die Geschwindigkeit. Die Motivation spielt eine entscheidende Rolle im Zusammenhang der Geschehnisse innerhalb eines Verkehrsstroms. Unter diesem Aspekt hat OEDING [1963] eine Aufteilung der verschiedenen Verkehrsarten unternommen. Dabei handelt es sich um den gemischten Berufsverkehr, Werkverkehr, Einkaufsverkehr und den Veranstaltungsverkehr. In Hinblick auf den Grund für das in Kapitel 3 beschriebene Experiment ist die Definition des Veranstaltungsverkehrs von Bedeutung.

Der Veranstaltungsverkehr wird definiert als ein stark ausgeprägter, richtungsabhängiger Verkehr. Ein solcher Zustand findet sich im Allgemeinen bei Sportveranstaltungen, Konzerten oder dergleichen wieder.

Die höchsten Geschwindigkeiten bei steigender Dichte wurden allerdings innerhalb des Berufsverkehrs beobachtet [OEDING, 1963]. Der Veranstaltungsverkehr liegt zwischen Berufs- und Einkaufsverkehr.

Desweiteren hat OEDING [1963] ein Stufensystem entwickelt, mit dem die Verkehrsdichte greifbar gemacht wird. Dieses System ist in Tab. 2.1 zusammengefasst.

**Tabelle 2.1:** Stufensystem nach OEDING [1963]

Stufe	Dichte [P/m <sup>2</sup> ]	Geschwindigkeit	Anmerkung
1	0,3	0,5 - 1,8 m/sec Wunschgeschwindigkeit	Überholen ohne gegenseitige Behinderung ist möglich, auch mit Gegenverkehr
2	ca. 0,6	Wahl nicht mehr frei	Überholen wesentlich schwieriger
3	bis 1,0	Schrittmaß eingeschränkt	stark eingeengt, dichter Verkehrsfluss, Wunsch des „Entkommens“ der Fußgänger
4	bis 1,5		sehr dichter Verkehr, nur kurzzeitig zumutbar
Gedränge	>1,5		
Pressung	ab 5,0-6,0	keine Bewegung möglich	

Es gibt wenig Auskunft über konkrete Werte, dafür viel mehr über mögliche Motivationen der Fußgänger in der einen oder anderen Situation beispielsweise schneller zu laufen oder geringere Abstände zur voraus gehenden Person einzuhalten als unter Zuständen geringerer Dichte.

Zwischen Stufe 4 und der Stufe des Gedränges entstehen mit Sicherheit Staus. Ein Stau tritt nach BITZER [2010] (S. 41) dann vermehrt auf, wenn „eine Engstelle eine geringere Kapazität aufweist als der vorhergehende Wegabschnitt und die aktuelle spezifische Verkehrsstärke größer ist als die Kapazität der Einengung“.

**Tabelle 2.2:** Abstände zu Objekten anhand der Literatur. Zusammengestellt nach BUCHMUELLER, S. UND WEIDMANN, U. [2007]

Gegenstand	Abstand [cm]	Quelle
Betonwände	30 - 45	CROW (1998)
	45	De Neufville & Grillot (1982)
	50	HBS (2001)
	15	Pauls (1987)
	40	Van Soeren (1996)
	25	Weidmann (1993)
Metallwände	20	Weidmann (1993)
Schaufenster	100	HBS (2001)
Zäune, Pflanzen	60	HBS (2001)
Einzelne Objekte	40	Van Soeren (1996)
	10	Weidmann (1993)
Bahnsteigkanten	80	Van Soeren (1996)
Treppengeländer	0	HBS (2001)
	30	Weidmann (1993)
Abstand zur Fahrbahn	35	Weidmann (1993)

Ein die Kapazität beeinflussender Faktor ist die Breite eines Weges oder Korridors. Diese kann jedoch nicht immer zur Gänze ausgeschöpft werden, da Fußgänger zu Gegenständen wie Wänden Abstände einhalten. Tab. 2.2 informiert über die von Fußgängern eingehaltenen Abstände zu festen Objekten in Abhängigkeit der Art des Objektes. Auffällig ist, dass zu massiven Objekten wie Betonwänden ein geringerer Abstand eingehalten wird als beispielsweise zu Zäunen oder Schaufenstern. Die Werte der Tabelle sind nach BUCHMUELLER, S. UND WEIDMANN, U. [2007] zusammengestellt.

In Anbetracht dieser zumeist unbewusst eingehaltenen Abstände zu Objekten muss darauf geachtet werden, dass je nach Beschaffenheit der vorhandenen Gänge bzw. Wege die Kapazität in Bezug auf die Breite eingeschränkt ist. Es kann folglich nicht davon ausgegangen werden, dass in einem Fußgängerverkehr die komplette Breite des Weges genutzt wird oder genutzt werden kann.

Auch HABICHT, A. T. UND BRAAKSMA, J. P. [1984] stellen fest, dass der Abstand von Fußgängern zu Wänden abhängig von dem verwendeten Material ist. Bei Hindernissen im Raum beobachten sie außerdem einen geringeren Abstand zu runden Gegenständen als zu eckigen.

BUCHMUELLER, S. UND WEIDMANN, U. [2007] beschreiben die durchschnittliche Ellipse eines Erwachsenen mit minimalem Ellbogenplatz für verschiedene Körperhaltungen mit einer Breite von etwa 60 cm und einer Tiefe von etwa 50 cm. In ihrer Arbeit „Parameters of pedestrians, pedestrian traffic and walking facilities“

überprüfen sie diese Annahme an Menschen verschiedener Nationalität, woraus ein minimaler Platzbedarf eines Menschen von  $0,10 \text{ m}^2$  hergeleitet ist. In diesem Platz sind weder Gepäck noch massige Kleidung berücksichtigt. Die durchschnittlichen Maße der Ellipse sind dann 45,58 cm Breite und 28,20 cm Tiefe.

SCHOPF [1985] belegt, dass der Platzbedarf eines sich bewegenden Fußgängers größer ist als der eines Stehenden. Durch die Amplitude des schwankenden Bewegungsablaufs wird eine dynamische Breite des Fußgängers von etwa 74 cm erreicht. Das Schwanken ist ein unterbewusster Prozess, welcher durch verschiedene Faktoren wie beispielsweise Schrittrhythmus, Gepäck, persönliche Disposition, etc. beeinflusst wird. Des Weiteren nennt auch er das subjektive Empfinden von Komfort eines jeden Fußgängers als wichtigen Faktor zur Limitierung der Kapazität in Folge der, durch das Abstandhalten zu Gegenständen sowie anderen Menschen, entstehenden Platzansprüche.

Bezüglich der Geschwindigkeit von sich frei bewegenden Fußgängern wurden bereits zahlreiche Untersuchungen getätigt. Eine Übersicht der Ergebnisse hat DAAMEN [2004] zusammengestellt. Tab. 2.3 beinhaltet eben diese Übersicht. Als Gesamtdurchschnittswerte werden in nicht überfüllten Gängen für die Geschwindigkeit 1,34 m/s und für die Standardabweichung etwa 0,37 m/s festgestellt.

Einflussfaktoren auf die Geschwindigkeit eines Fußgängers sind nach BUCHMUELLER, S. UND WEIDMANN, U. [2007] in vier Rubriken zu unterteilen. Rubrik 1 „Der physische Zustand des Fußgängers“ umfasst kulturelle und nationale Unterschiede, Alter, Geschlecht, Körpergröße und dadurch Schrittlänge, körperliche Einschränkungen sowie Gepäck.

Rubrik 2 besteht aus dem „Reiseanlass“, wohingegen in Rubrik 3 Umwelteinflüsse wie Temperatur, Wetter und Tageszeit zusammengefasst werden. Die letzte Rubrik beschreibt schließlich die Attribute des Gehwegs. Dazu gehören Neigung, Treppen und gegebenenfalls der Einfluss von Fahrtreppen.

Untersucht man zunächst die Einflüsse der Rubrik 1 so kristallisiert sich heraus, dass das Gehverhalten in Nordamerika und Europa nahezu identischer Natur ist. Dagegen differenziert sich das Verhalten deutlich in Asien. Dies lässt darauf schließen, dass die Ergebnisse des BaSiGo-Experiments wohl möglich nur für Nordamerika und Europa zutreffen [BUCHMUELLER, S. UND WEIDMANN, U., 2007]. Die erreichbare durchschnittliche Geschwindigkeit liegt in Europa bei 1,41 m/s, in Asien wird lediglich ein Wert von etwa 1,24 m/s erreicht, wie Tab. 2.3 zeigt.

Die Abnahme der Geschwindigkeit mit zunehmendem Alter weist WEIDMANN [1993] in seiner Arbeit „Transporttechnik der Fußgänger“ auf. Außerdem belegt er, dass Männer etwa 10,8% schneller sind als Frauen. Folglich spielt auch der Anteil eines jeden Geschlechts in einer Menschenmenge eine große Rolle.

Der Reiseanlass und die damit verbundene Motivation der Fußgänger ist für diese Arbeit nicht von maßgebender Bedeutung, da die Motivation innerhalb des Experiments durch den Versuchsleiter vorgegeben wurde.

Für die Umwelteinflüsse gilt nach WEIDMANN [1993], dass bei einer Temperatur von  $25^\circ\text{C}$  nur noch 90% der durchschnittlichen Geschwindigkeit gemessen wird. Ebenso markant beschreibt er den Einfluss der Tageszeit auf die Fußgänger. Um 7:30 Uhr ist

**Tabelle 2.3:** Beobachtete Geschwindigkeiten von Fußgängern in nicht überfüllten Gängen [DAAMEN, 2004]. ITE = Institute of Transportation Engineers

Quelle	Durchschnitts- geschwindigkeit [m/s]	Standard- abweichung [m/s]	Ort
CROW (1998)	1,4		Niederlande
Daly et al. (1991)	1,47		United Kingdom
FHWA (1988)	1,2		USA
Fruin (1971b)	1,4	0,15	USA
Hanking & Wright (1958)	1,6		United Kingdom
Henderson (1971)	1,44	0,23	USA
ITE (1969)	1,2		USA
Knoflacher (1995)	1,45		Österreich
Koushki (1988)	1,08		Saudi-Arabien
Lam et al. (1995)	1,19	1,26	Hong Kong
Morrall et al. (1991)	1,25 1,4		Sri Lanka Kanada
Navin & Wheeler (1969)	1,32		USA
O'Flaherty & Parkinson (1972)	1,32	1,0	United Kingdom
Older (1968)	1,3	0,3	United Kingdom
Pauls (1987)	1,25		USA
Roddin (1981)	1,6		USA
Sarkar & Janardhan (1997)	1,46	0,63	Indien
Sleight (1972)	1,37		USA
Tanariboon et al. (1986)	1,23		Singapur
Tanariboon & Guyano (1991)	1,22		Thailand
Tregenza (1976)	1,31	0,3	United Kingdom
Virkler & Elayadath (1994)	1,22		USA
Young (1999)	1,38	0,27	USA
<b>Geschätzter Gesamtdurchschnitt</b>	<b>1,34</b>	<b>0,37</b>	

die Geschwindigkeit am höchsten, für den restlichen Tag gilt eine abfallende Tendenz mit einem kleinen Hoch gegen 12 Uhr. Am langsamsten sind Fußgänger zwischen 14 und 15 Uhr.

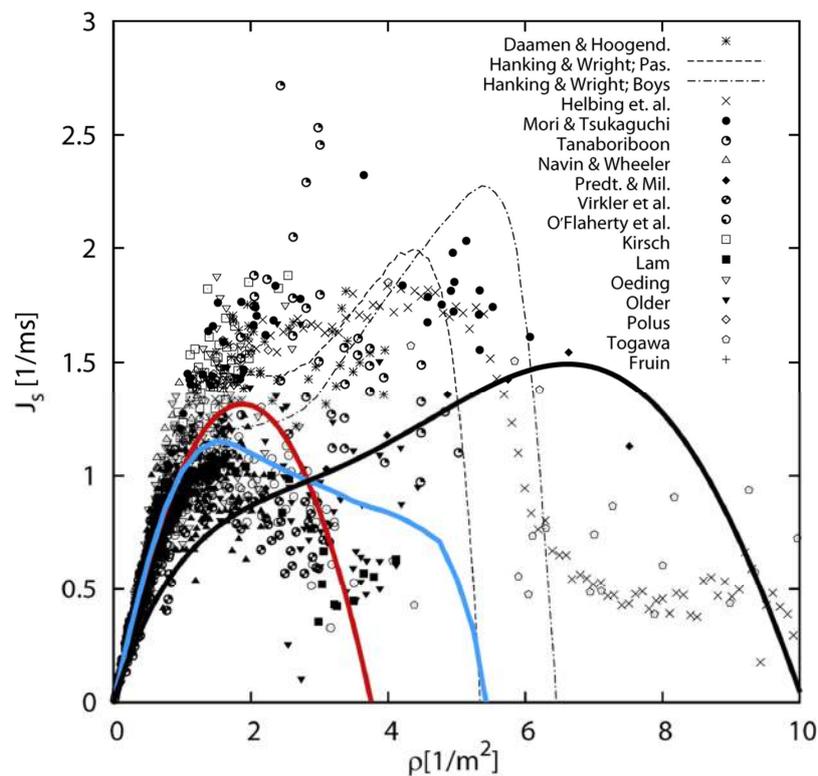
Maßgebender Einflussfaktor im Rahmen des Untergrundes ist dessen Neigung. Für das untersuchte Experiment gilt hier, dass keine Neigung vorhanden war.

Die Durchflussmenge, bzw. Fließgeschwindigkeit ist als empirischer Wert anzusehen. Eine Definition für die Fließgeschwindigkeit lautet wie folgt: Eine gewisse Anzahl von Personen passiert einen festgelegten Bereich innerhalb einer zu messenden Zeit [BUCHMUELLER, S. UND WEIDMANN, U., 2007]. Die Einheit hierfür ist dann P/ms. Der Fluss ist abhängig von dem jeweiligen Geschwindigkeit-Dichte-Zustand. Der Fluss ist als ungehemmt zu bezeichnen, wenn Dichten von  $0,5 \text{ P/m}^2$  vorliegen. Bei Dichten über  $5,0 \text{ P/m}^2$  können sich Fußgänger nur noch sehr eingeschränkt bewegen.

Geht man von einem minimalen Platzbedarf von  $0,15 \text{ m}^2$  pro Fußgänger aus, so ist die maximale Dichte  $6,7 \text{ P/m}^2$ , womit den Angaben des DINENNO [2002] widersprochen wird.

Zusätzlich zu den Dichte bezogenen Effekten tritt bei mindestens bi-direktionalem Fluss der Effekt der passierenden Fußgänger ein [SCHOPF, 1985]. Hiermit ist gemeint, dass Platz benötigt wird um entgegenkommenden Fußgängern auszuweichen. Diese Aktion führt dementsprechend zu Kapazitätsverlusten. Das Maß des Verlusts ist abhängig von dem Verhältnis der Personenanzahl der jeweiligen Fußgängerströme [WEIDMANN, 1993].

Eine Übersicht bezüglich der verschiedenen in der Literatur angegebenen Grenzwerte für Dichte und Fluss zeigt Abb. 2.1. Es wird deutlich, dass teilweise sehr verschiedene Vorstellungen vorliegen. Die Stoppdichten (entsprechen den Dichten, ab welcher keine Fortbewegung mehr stattfindet) variieren von Werten zwischen  $3,8 \text{ P/m}^2$  und  $10 \text{ P/m}^2$ . Ebenso sind die Kurvenverläufe sehr verschiedener Natur. Folglich kann kein Werk zu Rate gezogen werden, ohne dass dabei einem anderen widersprochen wird.



**Abbildung 2.1:** Zusammenhang zwischen Dichte und Fluss in der Literatur. Auszug aus HOLL, S. UND SEYFRIED, A. [2013]

## 2.2 Verwendete Programme

### 2.2.1 PeTrack

PeTrack ist ein von BOLTES [2014], am Forschungszentrum Jülich entwickeltes Werkzeug, welches automatisch Fußgänger-Trajektorien aus Video-Aufnahmen extrahiert. Zur Zeit ist noch keine endgültige Version erhältlich, dennoch kann bereits mit der vorläufigen, kostenfrei verfügbaren Version gearbeitet werden.

Die erstellten Trajektorien beinhalten Daten über jeden Fußgänger wie Geschwindigkeit, Fluss, Dichte und individuelle Entfernungen sowie Positionen zu jedem Zeitpunkt. Hierdurch ist es möglich eine große Anzahl von Fußgängern zu analysieren. Das Programm muss mit Weitwinkelobjektiven und hohen Fußgängerdichten zu-rechtkommen. Verzerrungen durch Linsen sowie der perspektivische Winkel werden berücksichtigt. Daher umfasst die Analyse mittels PeTrack die Schritte, Kalibrierung, Erkennung, Verfolgung und die Erfassung der Körpergröße.

Momentan ist PeTrack nur in der Lage Personen zu erkennen, wenn diese einen Marker auf der Mitte des Oberkopfes tragen. Dies geschieht am besten über Mützen von heller Farbe mit einer entsprechenden dunklen/schwarzen Markierung auf der Oberseite.

Mehr Informationen über das Programm und dessen Nutzung können über die Website [www.fz-juelich.de](http://www.fz-juelich.de) abgerufen werden.

### 2.2.2 JuPedSim

Bei Jülich Pedestrian Simulator, kurz JuPedSim, handelt es sich ebenfalls um ein am Forschungszentrum Jülich entwickeltes Programm. Entwickler sind A. Ulrich Kemloh Wagoum und Jun Zhang.

Die Hauptnutzung dieses Programms besteht in der Simulation von Fußgängerdynamik.

Hierzu wurden verschiedene sehr bekannte Modelle aus der Literatur eingebettet. Womit es Wissenschaftlern und Studenten befähigt ihren Projekten eine angemessene Umgebung zum Modellieren und Simulieren von Fußgängerdynamik zu schaffen. JuPedSim setzt sich aus vier Komponenten zusammen [KEMLOH, A. U. UND ZHANG, J., 2014]:

- JPScore: Kernmodul zum Berechnen der Trajektorien
- JPSvis: Visualisierung der Trajektorien
- JPSreport: Analyse der Trajektorien sowie Verifizierung des Modells
- JPSed: Editieren der Geometrie und der Modellparameter

Momentan verfügt JuPedSim über kein grafisches Nutzerinterface (GUI) und kann daher nur im Shell-Modus genutzt werden.

Veröffentlicht ist JuPedSim unter einer so genannten GNU Lesser General Public License.

## 2.3 Methodik zur Analyse

ZHANG [2012] beschreibt in seiner Dissertation „Pedestrian fundamental diagrams: Comparative analysis of experiments in different geometries“ vier verschiedene Messmethoden zu der Bestimmung von Dichte, Geschwindigkeit und Fluss sowie den Effekt einer jeden Methode. Diese Methoden samt ihrer Effekte werden hier kurz zusammengefasst:

### Methode A

Ein Referenzbereich  $x$  innerhalb eines Korridors wird ausgewählt und über eine festgelegte Zeitspanne  $\Delta t$  studiert.

Durchschnittliche Werte der Geschwindigkeit und des Flusses werden in dieser Zeit berechnet. Es wird sich auf diesen Durchschnitt mit  $\langle \rangle_{\Delta t}$  bezogen.

Mit dieser Methode erhält man die Zeit  $t_i$  und Geschwindigkeit  $v_i$  eines jeden Fußgänger  $i$ , der  $x$  passiert. Daher kann sowohl der Fluss  $\langle J \rangle_{\Delta t}$  als auch die mittlere Geschwindigkeit  $\langle v \rangle_{\Delta t}$  über die Zeit berechnet werden aus:

$$\langle J \rangle_{\Delta t} = \frac{N_{\Delta t}}{t_{N_{\Delta t}} - t_{1_{\Delta t}}} \quad (2.1)$$

$$\langle v \rangle_{\Delta t} = \frac{1}{N_{\Delta t}} \sum_{i=1}^{N_{\Delta t}} v_i(t) \quad (2.2)$$

$N_{\Delta t}$ : Anzahl der Personen, die  $x$  innerhalb des Zeitintervalls  $\Delta t$  passieren.

$t_{1_{\Delta t}}$ : Zeit, wenn die erste Person  $x$  passiert.

$t_{N_{\Delta t}}$ : Zeit, wenn die letzte Person  $x$  passiert.

$t_{1_{\Delta t}}$  und  $t_{N_{\Delta t}}$  können von  $\Delta t$  variieren.

$\langle v \rangle_{\Delta t}$  ist definiert als der mittlere Wert der momentanen Geschwindigkeiten  $v_i(t)$  der  $N_{\Delta t}$  Personen gemäß obiger Gleichung.

$v_i(t)$  wird mit Hilfe der Verdrängung eines Fußgängers  $i$  in einem kleinen Zeitintervall  $\Delta t'$  um  $t$  berechnet:

$$v_i(t) = \frac{\| \vec{x}_i(t + \Delta t'/2) - \vec{x}_i(t - \Delta t'/2) \|}{\Delta t'} \quad (2.3)$$

## Methoden B

Diese Methode misst die mittlere Geschwindigkeit und mittlere Dichte in Abhängigkeit von Raum und Zeit.

Räumliche Durchschnittsgeschwindigkeit sowie Dichte werden berechnet indem ein Segment der Länge  $\Delta x$  innerhalb des Korridors als Messbereich definiert wird.

Die Geschwindigkeit  $\langle v \rangle_i$  einer Person  $i$  wird festgelegt als die Division der Länge  $\Delta x$  durch die Zeit, welche diese Person benötigt um den Messbereich zu überqueren.

$$\langle v \rangle_i = \frac{\Delta x}{t_{i,out} - t_{i,in}} \quad (2.4)$$

$t_{i,out}$ : Zeitpunkt, zu dem Person  $i$  den Bereich verlässt.

$t_{i,in}$ : Zeitpunkt, zu dem Person  $i$  den Bereich betritt.

Die Dichte wird für jede Person wie folgt berechnet:

$$\langle \rho \rangle_i = \frac{1}{t_{i,out} - t_{i,in}} \cdot \int_{t_{i,out}}^{t_{i,in}} \frac{N'(t)}{\Delta x \Delta y} dt \quad (2.5)$$

$\Delta y$ : Breite des Messbereichs

$N'(t)$ : Anzahl der Personen im Messbereich zum Zeitpunkt  $t$

## Methoden C

Diese Methode wird auch klassische Methode genannt.

Die Dichte  $\langle \rho \rangle_{\Delta x}$  wird definiert als die Division der Anzahl der Fußgänger durch die Fläche des Messbereichs:

$$\langle \rho \rangle_{\Delta x} = \frac{N}{\Delta x \Delta y} \quad (2.6)$$

Die räumliche, mittlere Geschwindigkeit ist der Durchschnitt der momentanen Geschwindigkeiten aller Fußgänger innerhalb des Messbereichs zum Zeitpunkt  $t$ .

$$\langle v \rangle_{\Delta x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i(t) \quad (2.7)$$

## Methoden D

Methoden D basiert auf Voronoi Diagrammen, welche eine besondere Art der Zerlegung eines Raumes in Regionen, festgelegt durch Objekte in diesem Raum, darstellt.

Zu jedem Zeitpunkt kann die Position eines Fußgängers durch einen Satz Punkte ausgedrückt werden. Mit diesen Punkten werden die Voronoi Diagramme generiert. So kann der Voronoi-Zellbereich  $A_i$  für jede Person  $i$  bestimmt werden.

Hiernach sind Dichte und Geschwindigkeit verteilt auf die Bereiche  $\rho_{xy}$  und  $v_{xy}$ . Falls  $(x, y) \in A_i$ , gilt:

$$\rho_{xy} = \frac{1}{A_i} \quad (2.8)$$

$$v_{xy} = v_i(t) \quad (2.9)$$

$v_i(t)$ : Momentane Geschwindigkeit jeder Person  $i$

Voronoi Dichte:

$$\langle \rho \rangle_v = \frac{\int \int \rho_{xy} dx dy}{\Delta x \Delta y} \quad (2.10)$$

Voronoi Geschwindigkeit:

$$\langle v \rangle_v = \frac{\int \int v_{xy} dx dy}{\Delta x \Delta y} \quad (2.11)$$

## Effekte der Messmethoden

Methode B und C haben größere Standardabweichungen in den Geschwindigkeiten als Methode A und D.

Die Dichte der Methode C ist stark von der Größe des gewählten Messbereichs abhängig, daher sollte dieser nicht zu klein gewählt werden. Dabei begrenzen große Messbereiche die räumliche Auflösung.

Methode D kann die Streuung der Dichte und Geschwindigkeit reduzieren, wobei dennoch eine gute zeit- und räumliche Auflösung stattfindet. Diese Eigenschaft weisen weder Methode A noch C auf.

Je größer die Dichte desto größer werden die Schwankungen der Methoden.

Der bedeutendste Unterschied zwischen den Ergebnissen der Methoden ist der glatte Verlauf der Fundamentaldiagramme von Methode A und C zu der Diskontinuität der Ergebnisse von Methode B und D bei einer Dichte von ca. 2 P/m<sup>2</sup>.

Es ist möglich, dass sich beispielsweise durch Stillstand oder durch nicht-laminaren Fußgängerfluss die Abweichungen unter den einzelnen Methoden verstärken.

**Teil II**

**BaSiGo**



## 3 CROSSING 120

### 3.1 Allgemeines

Das Forschungsprojekt „Bausteine für die Sicherheit von Großveranstaltungen“, kurz BaSiGo, hat zum Ziel eine Art Baukastensystem zu entwickeln, mit dessen Hilfe Lösungen bestehend aus Sicherheitsbausteinen für Großveranstaltungen zusammengestellt werden können [FRIEDRICH]. Hierfür gilt es vorab Möglichkeiten zu einer positiven Veränderung abzuklären und beispielsweise Schwachstellen in Planungen zu eliminieren.

Für dieses Ziel sind acht verschiedene Rubriken zu einem harmonischen Ganzen zusammenzufügen. Diese Rubriken setzen sich zusammen aus:

- Polizeiliche Sicherheitsaspekte
- Nichtpolizeiliche Sicherheitsaspekte
- Veranstalterbezogene Sicherheitsaspekte
- Rechtliche Analyse
- Simulation
- Teilnehmerkommunikation
- Ausbildung
- Interorganisatorische Zusammenarbeit

Die Vielfältigkeit der zu beachtenden Rubriken ist für den Charakter von Großveranstaltungen kennzeichnend. So handelt es sich um hoch komplexe Systeme, wobei niemals eine Großveranstaltung mit einer anderen wirklich verglichen werden kann. Zwar können an ein und dem selben Ort mehrmals Großveranstaltungen stattfinden, so werden diese im Ablauf aber niemals identischer Natur sein. Ein wesentlicher Parameter ist in diesem Zusammenhang der Mensch. Hält sich eine jede Person an vorgegebene Abläufe? Die Antwort auf diese Frage wird von mal zu mal anders ausfallen. Situationsbedingt werden Entscheidungen wie das Einbiegen in einen Gang

getroffen. Durch diese Entscheidungen im Zusammenhang mit einem erhöhten Personenaufkommen können Staus entstehen. Wann ist der Übergang von einem „normalen“ Stau zu einem kritischen Gedränge?

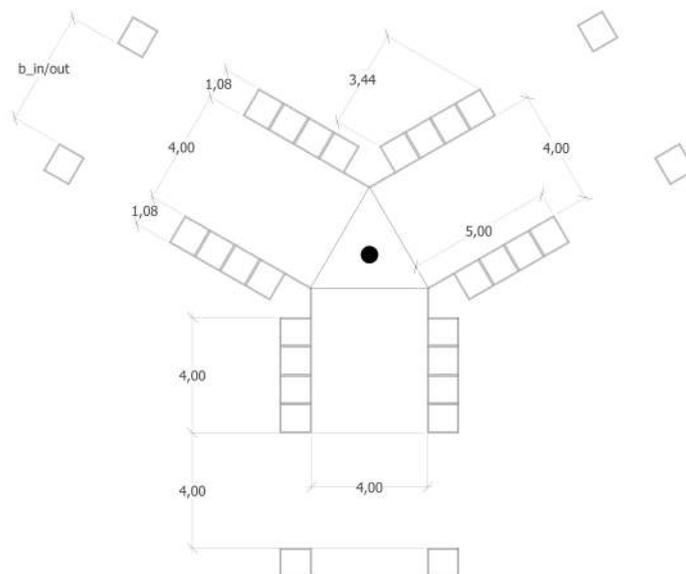
Unter anderem um diese Frage zu erörtern hat das Forschungszentrum Jülich im Sommer 2013 Experimente zur Dynamik in Menschenmengen durchgeführt [JÜLICH SUPERCOMPUTING CENTRE, 2013]. Eines dieser Experimente ist Crossing 120. Die zugehörigen Versuchsläufe werden im Folgenden analysiert. Vorab aber eine Beschreibung des Experiments Crossing 120.

## 3.2 Experimentaufbau

Abb. 3.1 veranschaulicht den Versuchsaufbau von Crossing 120. Das Experiment Crossing 120 besteht aus drei jeweils 4,00 m breiten Gängen, welche sich unter einem Winkel von  $120^\circ$  kreuzen. Die zu jedem Gang zugehörige Aufstellfläche befindet sich in 4,00 m Entfernung zum Eingang des jeweiligen Ganges. Durch eine Länge von 12,86 m und eine Breite von 8,00 m wird eine Fläche von  $102,88 \text{ m}^2$  für die wartenden Fußgänger zur Verfügung gestellt. Mit Hilfe von zwei Boxen unmittelbar vor der Aufstellfläche wird die Eingangsbreite reguliert.

Vor Beginn eines jeden Laufes wird eine Dichte innerhalb der Aufstellfläche von etwa  $3,00 \text{ P/m}^2$  angestrebt.

Fußgänger, welche die Gänge samt Kreuzung passiert haben, verlassen den Versuchsaufbau durch die seitlichen Öffnungen zwischen Eingang und Beginn der Gänge.



**Abbildung 3.1:** Vogelperspektive des Aufbaus von Crossing 120

Jeder Gang verfügt über eine Länge von 5,00 m. Auf dieser Länge ist die Breite des Ganges durch Wände begrenzt. Die Gänge münden in einer dreiecksförmigen Kreuzung. Hierbei handelt es sich, entsprechend der Geometrie der Gänge, um ein gleichseitiges Dreieck mit Seitenlängen von 4,00 m.

Der in Abb. 3.1 ersichtliche Kreis innerhalb der Kreuzung symbolisiert eine Säule mit einem Durchmesser von 0,60 m. Diese fand während einigen Durchläufen Verwendung. Sie befand sich dann im Mittelpunkt der Kreuzung.

Für eine spätere Analyse des Experiments wurden sechs Kameras in unterschiedlichen Positionen angebracht, um so eine 360° Aufnahme des Experiments während der Durchführung machen zu können.

## 3.3 Durchführung

### 3.3.1 Allgemeines

Mit dem in Kapitel 3.2 beschriebenen Versuchsaufbau wurden drei Durchgänge am Samstag, dem 22.06.2013, zwischen 10:53 Uhr und 12:04 Uhr in Halle 14 der Messe Düsseldorf durchgeführt. Die Durchgänge wurden der Reihe nach a, b und c benannt. Der Unterschied zwischen den Durchgängen besteht in den jeweils zu Beginn mitgeteilten Vorgaben durch die Versuchsleitung. Mit diesen Vorgaben wurden innerhalb der einzelnen Durchgänge verschieden viele Durchläufe durchgeführt.

Die Probanden weisen eine Körpergröße zwischen 1,50 m und 2,00 m auf. Zudem sind alle Teilnehmer volljährig. Die Teilnahme an den Experimenten war nur erlaubt, wenn keine eingeschränkte Mobilität und auch keine Platzangst vorliegen. Die Teilnahmebedingungen sind auf der Website des Forschungszentrums Jülich einsehbar. Um einzelne Personen später in der Auswertung wiedererkennen zu können wurden vor Versuchsbeginn auf jede Person abgestimmte Hüte ausgeteilt. Diese Hüte sind von weißer Farbe. Zentral auf der Oberseite eines jeden Huts befindet sich ein QR-Code. In diesem sind Daten, wie beispielsweise Größe oder Geschlecht hinterlegt. Außerdem erhielt jede Person ein Armband in gelber oder roter Farbe sowie eine Nummer. Mit den Bändern und Nummern wurden während der Läufe Vorgaben gemacht, welche Ausgänge die einzelnen Personen nutzen sollen.

**Tabelle 3.1:** Übersicht der Durchgänge

Durchgang	Anzahl der Läufe	Säule	Vorgabe	Beschilderung
a	7	nein	ja	nein
b	2	nein	ja	ja
c	6 (7)	ja	ja	ja

### 3.3.2 Crossing 120 a

Lauf 1 des Durchgangs a wurde mit der Vorgabe durchgeführt, dass Personen mit einem gelben Band nach links abbiegen sollten und Personen mit einem roten Band nach rechts. Die Eingangsbreite betrug 0,80 m. Insgesamt wurden 240 Trajektorien in diesem Lauf erfasst.

Der Zufluss fand über eine Zeitspanne von 1:05 Minuten statt. Nach dieser Zeit durften keine weiteren Personen den Versuchsaufbau betreten. Lediglich die Personen, welche sich bereits innerhalb des Aufbaus befanden, durften diesen noch verlassen. Der Abfluss dauerte 0:15 Minuten. Um eine bessere Verteilung der Personen über die gesamte Breite des Ganges hervorzurufen, wurden bei geringen Eingangsbreiten Einweiser eingesetzt. Ihre Aufgabe bestand darin einen möglichst gleichmäßigen Zufluss hervorzurufen. Dafür positionierten sie sich vor der Mitte des Eingangs.

Diese Informationen sowie die zugehörigen Informationen der anderen Läufe sind in Tab. 3.2 zusammengefasst.

Mathematisch sind bei einer fortlaufenden Nummerierung der Personen etwa 50% Links- und 50% Rechtsabbieger. Ab Lauf 2 wurde daher für die Aufteilung auf die Nummerierung zurückgegriffen. Nun gilt es, dass gerade Nummern nach rechts abbiegen sollen und ungerade nach links.

**Tabelle 3.2:** Übersicht der Läufe des Durchgangs a

Lauf	erfasste Trajektorien	Eingang [m]	Zufluss [Min.]	Abfluss [Min.]	Vorgaben	Einweiser
1	240	0,80	1:05	0:15	gelbe nach links rote nach rechts	ja
2	286	0,80	1:31	0:16	gerade nach rechts ungerade nach links	ja
3	364	1,20	1:08	0:26	wie bei 2	ja
4	724	1,60	1:58	0:34	wie bei 2	ja
5	822	2,40	2:07	0:56	wie bei 2	nein
6	793	3,20	2:01	1:04	wie bei 2	nein
7	896	4,00	2:28	1:01	wie bei 2	nein

In den Läufen 1 bis einschließlich 4 wurden Einweiser eingesetzt. Während der Durchführung des Laufs 5 standen zu Beginn der Aufzeichnungen noch zwei Einweiser vor jeweils einem Eingang. Ein Einweiser reagierte schnell und verschwand bereits nach 6 Sekunden aus dem Eingang. Der andere hingegen blieb für 25 Sekunden stehen.

Bei den ersten beiden Läufen ist die Breite des Eingangs gleich (0,80 m). Danach wurde die Eingangsbreite in jedem Lauf erhöht. Nach Lauf 2 und Lauf 3 fand eine Verbreiterung um 0,40 m statt. Ab Lauf 4 wurde das Maß der Verbreiterung verdoppelt, bis schließlich in Lauf 7 eine Eingangsbreite von 4,00 m erreicht wurde.

Die Zuflussdauer schwankt beliebig zwischen 1:05 Minuten und 2:28 Minuten. Auch die Abflussdauer variiert von 0:15 Minuten bis 1:04 Minuten.

Die meisten Trajektorien wurden in Lauf 7 erfasst. In diesem Fall ist 896 Mal eine

Person erfasst worden.

Es ist anzumerken, dass während Lauf 3 ein Missverständnis aufgetreten ist, dessen Folge ein kurzzeitiges Stillstehen der Personen innerhalb des Versuchsaufbaus war. Die Versuchsleitung hatte „Stop!“ gerufen, womit das Beenden des Zuflusses gemeint war, von den Probanden aber als eine Aufforderung zum Stillstand verstanden wurde.

### 3.3.3 Crossing 120 b

Der Durchgang b des Experiments differenziert sich in zwei Punkten von Durchgang a. In diesem zweiten Durchgang gibt es in keinem Lauf Einweiser. Zudem kommt eine zusätzliche Vorgabe zu der des Abbiegens (ungerade Zahlen nach links, gerade Zahlen nach rechts), und zwar die Vorgabe der Beschilderung zu folgen, hinzu. Die Beschilderung gibt ihrerseits das Einhalten der Regeln des Kreisverkehrs vor. Sie wurde direkt über dem Beginn eines jeden Ganges über Monitore eingeblendet. Auch im Durchgang b ist keine Säule vorhanden.

Eine Übersicht der in Durchgang b festgehaltenen Daten gibt Tabelle 3.3.

**Tabelle 3.3:** Übersicht der Läufe des Durchgangs b. Die Vorgaben sind identisch mit Lauf Crossing 120 a 2. Zusätzlich: Beschilderung folgen

Lauf	erfasste Trajektorien	Eingang [m]	Zufluss [Min.]	Abfluss [Min.]	Einweiser
1	779	4,00	2:09	1:28	nein
2	715	2,40	1:44	1:24	nein

Die Zahl der erfassten Trajektorien liegt dicht beieinander, obwohl die Eingangsbreite sowie Zuflusszeit unterschiedlich sind. Im Lauf 1 wurden bei einer Eingangsbreite von 4,00 m 779 Trajektorien verzeichnet. Während Lauf 2 hingegen 715 Trajektorien, allerdings bei einer deutlich geringeren Eingangsbreite von 2,40 m, aufweist. Lauf 1 hat eine um 25 Sekunden längere Zuflusszeit als Lauf 2. Für eine Räumung des Versuchsbereichs wurde eine Zeit von etwa 1:30 Minuten benötigt.

### 3.3.4 Crossing 120 c

Durchgang c ist derjenige, in dem die Säule zum Einsatz kommt. Es wurden insgesamt sieben Läufe in diesem Durchgang getätigt. Für den letzten Lauf wurde die Motivation der Probanden erhöht. Dies geschah durch die Vorgabe, dass die Probanden sich vorstellen sollten einen Zug erreichen zu müssen. Um dies zu schaffen, war Eile geboten, das Rennen aber verboten. Folglich wird Lauf 7 in Tab. 3.4 (beinhaltet die Übersicht der Läufe des Durchgangs c) nur zwecks Vollständigkeit aufgeführt. Für den Vergleich der einzelnen Läufe der drei Durchgänge muss dieser Lauf ausgeschlossen werden.

**Tabelle 3.4:** Übersicht der Läufe des Durchgangs c. Die Vorgaben bezüglich der Abbiegevorgänge sind identisch mit Lauf Crossing 120 a 2. Zusätzlich: Beschilderung folgen sowie Säule

Lauf	erfasste Trajektorien	Eingang [m]	Zufluss [Min.]	Abfluss [Min.]	Einweiser
1	262	0,80	1:12	0:15	ja
2	382	1,20	0:50	0:29	ja
3	583	1,60	1:29	1:09	ja
4	706	2,40	1:51	1:25	nein
5	630	3,20	1:34	1:46	nein
6	823	4,00	2:06	2:29	nein
7	854	4,00	1:13	1:54	nein

Wie bei Durchgang a findet eine Erhöhung der Eingangsbreite nach jedem Lauf statt. Nach Lauf 1 und Lauf 2 beträgt die Erhöhung 0,40 m. Ab Lauf 3 ist diese auf 0,80 m je Lauf heraufgesetzt. Die geringste Breite liegt bei 0,80 m in Lauf 1, die größte mit 4,00 m bei Lauf 6.

Auffällig ist die im Lauf 4 erreichte Anzahl an Trajektorien. Mit 706 liegt diese trotz geringerer Eingangsbreite deutlich höher als in Lauf 5. Ausschlaggebend könnte hierfür die längere Zuflusszeit in Lauf 4 sein. Dort strömen 27 Sekunden länger Personen in den Versuchsaufbau.

Die meisten Trajektorien dieses Durchganges werden in Lauf 6 erfasst. Die zugehörigen Zufluss- bzw. Abflusszeiten belaufen sich auf 2:06 Minuten bzw. 2:29 Minuten. Diese Abflusszeit ist, auch auf das gesamte Experiment bezogen, die längste.

Einweiser wurden in den Läufen 1 bis 3 eingesetzt.

## **Teil III**

# **Ergebnisse und Analyse**



## 4 Analyse der Trajektorien

### 4.1 Vorbemerkung

In den folgenden Abschnitten werden die im Abkürzungsverzeichnis erläuterten Kürzel zur Beschreibung der Trajektorienverläufe genutzt.

Zur Erinnerung:

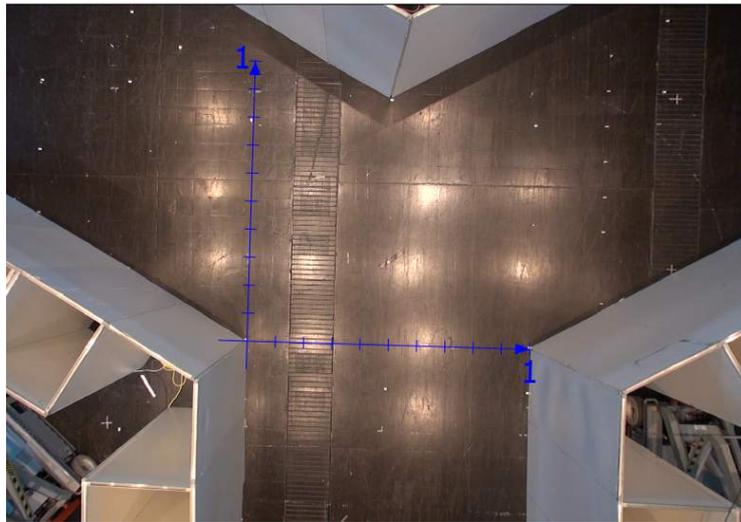
- 1 entspricht dem linken Gang (siehe Abb. 3.1).
- 2 dem rechten Gang.
- 3 dem unteren Gang.
- *ENummer* steht für die Nutzung des jeweiligen Ganges als Eingang zum Versuchsaufbau.
- *ANummer* steht für die Nutzung des jeweiligen Ganges als Ausgang.

Die Kombination E1 A2 bedeutet folglich, dass der Fußgänger in Gang 1 gestartet ist und den Versuchsaufbau über Gang 2 verlassen hat.

### 4.2 Erstellung mit PeTrack

Für die Erstellung der Trajektorien wurden zunächst die Videoaufnahmen des Experiments in Einzelbilder zerschnitten um diese mit PeTrack analysieren zu können. Es wurden 25 Frames pro Sekunde angelegt. Diese Einzelbilder werden im Anschluss als Sequenz in PeTrack geladen und somit zur Analyse verfügbar.

Bevor die eigentliche Analyse beginnen kann, müssen Einstellungen zur Erkennung der einzelnen Personen vorgenommen werden. Damit möglichst viele Personen auf einmal erkannt werden, ist eine ausbalancierte Einstellung des Farbspektrums des *Markers* unter dem Punkt *Recognition* (Erkennung) notwendig. Hier wurde der *ColorMarker* verwendet. Als Körperform wurde annähernd eine Ellipse und für die durchschnittliche Körpergröße 1,76 m angenommen.



**Abbildung 4.1:** Festgelegtes Koordinatensystem in PeTrack. Dieses Koordinatensystem wurde für die Erstellung der Trajektorien sämtlicher Läufe verwendet.

Das Koordinatensystem wurde auf die Ecke zwischen Gang 1 und Gang 3 gelegt (siehe Abb. 4.1).

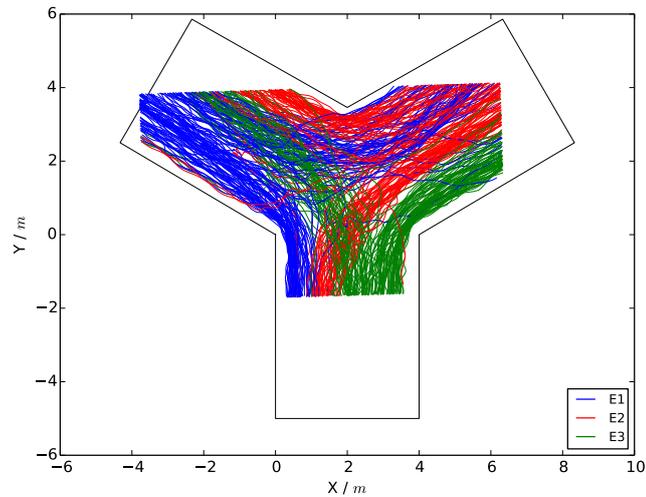
Es wurde einmal für jeden Lauf eine automatische Analyse mit PeTrack durchgeführt. Hierfür wurde zunächst der Hintergrund festgelegt, damit dieser während des Erkennungs-/Markierungsprozesses ausgeblendet werden kann. Die Erkennung des Hintergrundes und das anschließende Filtern von eben diesem kann dazu führen, dass manche Personen nicht erfasst werden, da sie farblich dem Hintergrund zu ähnlich sind und folglich von PeTrack ebenfalls gefiltert werden. Daher wurde nach dem automatischen Durchlauf das Filtern des Hintergrundes wieder deaktiviert und eine manuelle Korrektur während des Abspielens der Sequenz vollzogen.

Die Kenndaten der verwendeten Version von PeTrack lauten:

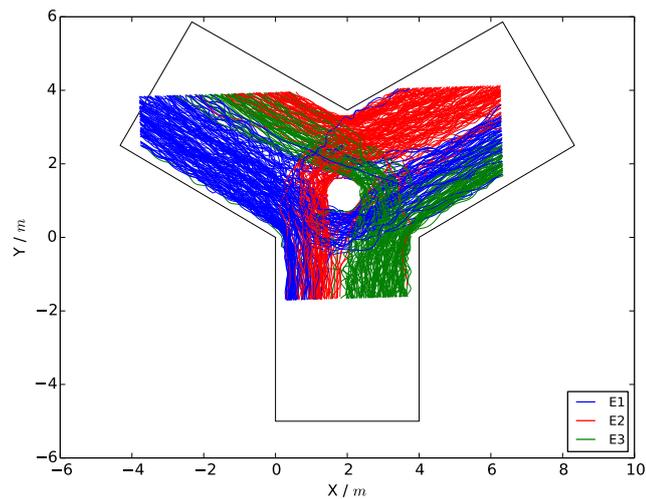
```
Petrack - Pedestrian tracking  
Version 0.8  
(Build Sep 16 2014 15:55:59)
```

### 4.3 Graphische Darstellung

Für jeden Lauf eines jeden Durchgangs wurde mit Hilfe des Python Skripts `150113_PlotTraj_v01.py` (geschrieben von Stefan Holl) eine Darstellung der nach Eingängen sortierten Trajektorien angefertigt. Bei Abb. 4.2(a) handelt es sich um eine solche Unterteilung. Die Vorgabe war hier, wie in Tab 3.2 aufgeführt, dass gerade Nummern nach rechts und ungerade nach links abbiegen sollten, zudem war keine Säule vorhanden.



(a) Darstellung der Trajektorien des Laufs a 3.



(b) Darstellung der Trajektorien des Laufs c 2.

**Abbildung 4.2:** Aus Gang 1 kommende Personen sind in blauer, aus Gang 2 in roter und aus Gang 3 in grüner Farbe dargestellt. Es entwickeln sich Ströme von Trajektorien mit selben Zielen.

Generell gilt für Abbildungen dieser Art, dass alle Wege von Fußgängern, die Gang 1 als Eingang nutzen, in blauer Farbe abgebildet sind, Wege mit Ursprung in Gang 2 in rot sowie aus Gang 3 Kommende in grün. Es ist deutlich zu erkennen, dass in Teilbereichen des Graphen einzelne Farben dominieren. Dies ist eine Folge davon, dass Fußgänger eine Art Strom bilden, der sich im Graphen in Form von dicken Linienbildungen zeigt. D. h. viele nutzen den Weg, den eine vorausgehende Person bereits gewählt hat. Ähnlich wie bei dem Windschatten im Autoverkehr profitieren

einzelne Fußgänger durch die bereits geleistete Arbeit ihrer Vorgänger (markanter Punkt beispielsweise bei  $(0,5/0)$  in Abb. 4.2(a)). Es ist angenehmer einen bereits bestehenden Weg zu nutzen, anstatt einen neuen Weg durch entgegenkommende Fußgänger zu finden und dabei möglicherweise abgedrängt zu werden.

Zudem scheinen die Fußgänger unterbewusst die direkten Wege mit der kürzesten Strecke zu bevorzugen. Wo dies nicht möglich ist, findet keine so starke Linienbildung statt. Hierfür kann der Scheitelpunkt von Gang 1 und Gang 2 in Abb. 4.2(a) betrachtet werden.

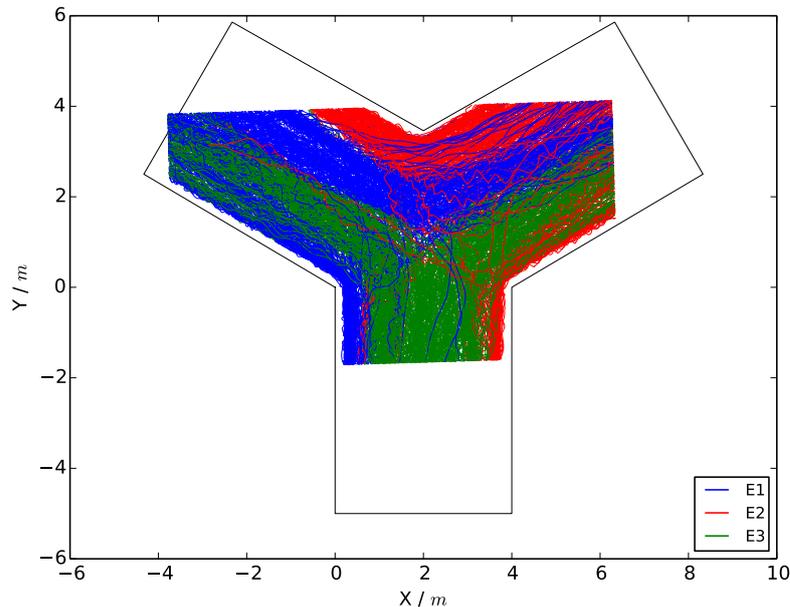
Fußgänger mit Ursprung in Gang 1 und gleichzeitig ungeraden Nummern sind aufgefordert nach links abzubiegen. Dementsprechend sehen sie sich mit Fußgängern der Bestimmungen E2 A1 sowie E3 A1 konfrontiert. Ähnliche Behinderungen gibt es in den Mündungsbereichen zu Gang 2 und Gang 3. Bei Gang 2 durchmischen sich besonders Fußgänger mit den Richtungsbestimmungen E1 A2 sowie E2 A1, wohingegen Trajektorien der Art E3 A2 nur mit einzelnen Personen im Gegenverkehr zurecht kommen müssen.

Zum Vergleich zeigt Abb. 4.2(b) den Lauf c 2. Es handelt sich dabei um einen Lauf mit identischer Eingangsbreite. Durch leicht andere Vorgaben sowie den Einsatz der Säule unterscheidet sich Lauf c 2 von dem zuvor besprochenem Lauf. Auffällig ist, dass der Bereich, in dem sich die Konflikte häufen, bei Lauf a 3 deutlich größer ist als dies in Lauf c 2 der Fall ist. In Abb. 4.2(a) finden Konflikte über den Bereich der dreiecksförmigen Kreuzung hinaus statt. Hingegen beschränken sich die Konflikte in Abb. 4.2(b) weitestgehend auf den Bereich unmittelbar um die Säule. In diesem Bereich gilt es mit den anderen Fußgängern zu interagieren und einen möglichst angenehmen Weg zu dem jeweiligen Zielort zu finden.

Die Vorgaben für c 2 lauteten wie bei a 3 mit dem Zusatz, dass ein Kreisverkehr zu bilden ist. Als Mittelinsel des Kreisverkehrs diente den Fußgängern die Säule. Es gilt zu bemerken, dass durch die Versuchsleitung nicht explizit darauf hingewiesen wurde die Säule als Zentrum des Kreisverkehrs zu nutzen. Sie wurde aber als solches durch die Fußgänger angenommen. Erneut bilden mehrere Trajektorien dicke Linien, wobei diese den kürzesten Wegen unter Einhaltung der Vorgaben entsprechen.

Innerhalb der einzelnen Gänge treten bei c 2 kaum Konflikte auf. Die Fußgängerströme prägen sich nebeneinander aus. Es gibt wenige Überschneidungen dieser Ströme.

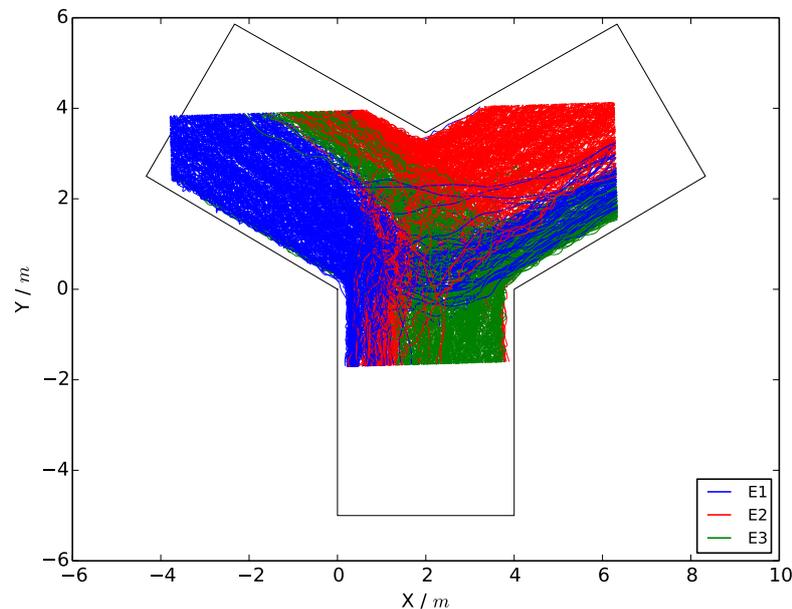
Interessant ist, dass sich in allen Läufen des Durchgangs a mit Ausnahme von Lauf a 1 und Lauf a 5 ähnliche Linien bilden. Dies kann unter anderem durch den in Deutschland herrschenden Rechtsverkehr hervorgerufen werden. Ähnlich wie bei dem Autoverkehr scheinen in dem Durchgang a die Fußgänger voreinander links abzubiegen wie es auf Kreuzungen üblich ist. Hierdurch entsteht die starke, durch die verschiedenen Farben erkenntliche, Durchmischung innerhalb der Gänge. Nach dem Abbiegevorgang entwickeln sich ein bis zwei Ströme der Abbieger selben Ursprungs in dem jeweiligen Zielgang. Eine weitere Auffälligkeit ist, dass mit steigender Dichte die Ströme der in den Versuchsaufbau hineingehenden Fußgänger immer stärker durch die hinausgehenden Fußgänger aufgeteilt werden. Die Fußgänger orientieren sich sehr schnell nach ihrer Richtungsvorgabe rechts oder links im Gang ein. Am ausgeprägtesten zeigt Lauf 7 diese Charakteristik (in Abb. 4.3 dargestellt). An dieser



**Abbildung 4.3:** Trajektorien des Laufs a 7. Es ist eine deutliche Linienbildung durch die einzelnen Fußgänger mit derselben Richtungsvorgabe zu erkennen. Durch voreinander links Abbiegen findet eine Durchmischung statt.

Stelle ist anzumerken, dass die Trajektorien gangweise geplottet wurden. Hierdurch überlagern bei großer Trajektoriendichte die zuletzt abgebildeten Trajektorien die vorherigen, was zu einem falschen Eindruck führen kann. Dementsprechend wirkt es so in Bezug auf Gang 2, als ob fast ausschließlich E2 A1 Fußgänger vorhanden waren.

Durchgang b stellt das Bindeglied zwischen Durchgang a und c dar. Hier gilt bereits eine Kreisverkehrsregelung, wobei auf den Einsatz der Säule verzichtet wurde. In den zwei Läufen dieses Durchgangs kristallisiert sich bereits die Linienbildung der Läufe des Durchgangs c heraus. Der Pfad E1 A2 verlagert sich im Vergleich zu den Läufen des Durchgangs a in Richtung Gang 3, was einer Verschiebung auf der y-Achse um etwa -1,0 m gleichkommt (siehe Abb. 4.4). Anders als in Durchgang a bleiben die Fußgänger mit selben Ursprung innerhalb des jeweils zu ihrem Ursprung gehörigen Gangs gruppiert und lassen sich nicht durch den Versuchsaufbau verlassende Personen aufteilen. Diese Beobachtung stellt den markanten Unterschied zwischen der Vorgabe eines Kreisverkehrs und der alleinigen Richtungsvorgabe dar. Statt des oben beschriebenen Verhaltens auf einer Kreuzung lässt sich nun eher die Struktur der Vorfahrtsbeachtung in dem Sinne „rechts vor links“ erkennen. Dabei entsteht eine starke Durchmischung der Ströme um den Mittelpunkt der Kreuzung. In diesem Zusammenhang lassen sich vereinzelt Trajektorien ausfindig machen, welche die Anweisung des Kreisverkehrs missachten und sich eigene, wieder dem Prinzip des kürzesten Wegs folgend, Strecken durch den Versuchsaufbau gesucht haben.



**Abbildung 4.4:** Darstellung der Trajektorien des Laufs b 1. Verlagerung der Ströme E1 A2, E2 A3, E3 A1 im Vergleich zu Abb. 4.2 und Abb. 4.3

Der Wunsch eines möglichst idealen Weges führt vermutlich zu der Bildung des Kreisverkehrs in dem Mittelpunkt der Kreuzung.

Vergleicht man die Durchgänge b und c miteinander, so stellt man eine starke Ähnlichkeit der Linienbildung fest. Durch die in Durchgang c eingesetzte Säule verlaufen die Trajektorien in noch geordneteren Bahnen. Der Grad der Durchmischung sinkt. Für alle Durchgänge gilt, dass sobald sich ein Strom am Rand des Versuchsaufbaus durchgesetzt hat, lässt sich dieser nicht mehr durch andere Ströme stören. Bei zahlreichen Läufen dominieren die Ströme der rechtsabbiegenden Trajektorien die Flächen in unmittelbarer Nähe zu den Wänden. Dadurch, dass sie nicht direkt den Kreisverkehr passieren müssen, um ihrer Zielbestimmung zu folgen, verlieren sie keine Zeit innerhalb des Kreisverkehrs. Folglich können sich derartige Ströme schnell vor anderen etablieren.

Um die verschiedenen Einflüsse der Vorgaben und des Versuchsaufbaus (mit oder ohne Säule) besser erkennen zu können, wurden die Läufe a 3 sowie c 2 mit mittlerer Eingangsbreite zu demonstrativen Zwecken genauer betrachtet, da sich zudem an ihnen bereits die Auffälligkeiten der Läufe mit höherer Dichte zeigen.

## 4.4 Einhaltung der Vorgaben

Die bereits erwähnte Möglichkeit des Falsch Abbiegens wurde ebenfalls untersucht. Die Ergebnisse der Zählungen sind in den Tabellen 4.1, 4.2 und 4.3 jeweils für einen

Durchgang zusammengestellt. Lauf a 1 ist wegen abweichender Vorgaben von den anderen Läufen nicht aufgeführt. Lauf c 7 sollte gesondert betrachtet werden, da eine erhöhte Motivation implementiert wurde.

Die Tabellen lassen sich der Art lesen, dass zunächst Gang 1 betrachtet wird, dann Gang 2 und schließlich Gang 3. Innerhalb der Betrachtung eines jeden Ganges werden zuerst die Anzahlen der Trajektorien gelistet, welche den entsprechenden Gang als Zugang nutzen. Anschließend wird unterteilt, je nachdem welcher Gang als Ausgang Gebrauch fand. Rein theoretisch, sollten immer etwa 50 % eines Eingangs den selben Ausgang nehmen.

Die vorletzte Zeile dieser Tabellen informiert über die Anzahl an Trajektorien, welche einem Eingang sowie einem Ausgang zuzuordnen sind. Hierzu wurden jeweils die Koordinaten des ersten Eintrags (First X, First Y) einer Trajektorie sowie die Koordinaten des zugehörigen letzten Eintrags (Last X, Last Y) mit folgenden Kriterien abgeglichen:

- First X < 2,00 und First Y > 0,00 → Die Trajektorie beginnt in Gang 1. Trifft dieses für Last X/Last Y zu, so endet die Trajektorie in Gang 1.
- First X > 2,00 und First Y > 0,00 → Anfang in Gang 2 (umgekehrt Ende in Gang 2, falls zutreffend für den letzten Eintrag).
- First Y < 0,00 → Die Trajektorie beginnt in Gang 3 bzw. endet dort, falls die Bedingung für den letzten Eintrag zutrifft.

Dabei beziehen sich die Koordinaten immer auf das bereits bei PeTrack verwendete Koordinatensystem.

Der Vorteil dieser Variante ist, dass Schwankungen bedingt durch das Bewegungsmuster eines Menschen nicht dafür sorgen, dass Trajektorien doppelt gezählt werden, da nicht eine beliebige Position der Trajektorie mit der direkt anschließenden verglichen wird.

Wie bereits in Kap. 4.2 ist anzumerken, dass teilweise bereits erkannte Personen von PeTrack im Verlauf der Trajektorienerstellung plötzlich nicht mehr erkannt wurden, da diese dem Hintergrund (wie zum Beispiel durch veränderten Lichteinfall) farblich zu ähnlich sind. Dementsprechend laufen manche Trajektorien einfach innerhalb des Versuchsaufbaus aus oder aber beginnen erst innerhalb der Kreuzung. Zwar wurden die Trajektorien manuell überarbeitet, aber dennoch kann es sein, dass nicht alle Fehler gefunden wurden und folglich nicht behoben sind. Hieraus ergeben sich die Differenzen zwischen den beiden letzten Zeilen der Tabellen.

Durch eine optische Begutachtung der Trajektorien lassen sich Fußgänger, die den selben Gang als Ein- und Ausgang verwenden ausschließen bzw. ist dort die Anzahl der Fußgänger sehr gering. Womit ein Nachteil dieser Aufteilung zu nennen ist: Wenn die erste Position einer Trajektorie erfasst wurde, sie aber verloren geht, bevor sie eine der festgelegten Linien überschritten hat, würde sie von dem verwendeten Auswertungsskript als eine zurückgehende Person identifiziert werden, was nicht zwingend der Wahrheit entspricht.

**Tabelle 4.1:** Einhalten der Vorgaben durch die Fußgänger. Es sind die Läufe 2 bis 7 des Durchgangs a aufgeführt. Lauf 1 ist nicht enthalten, da hier andere Vorgaben gemacht wurden. Die Zeile „erkannte Personen“ nennt die Anzahl der Personen, die sowohl Eingängen als auch Ausgängen zuzuordnen sind. In „nach Eingängen“ steht die Anzahl der Personen, die einem Eingang zugehörig sind.

	<b>Lauf 2</b>	<b>Lauf 3</b>	<b>Lauf 4</b>	<b>Lauf 5</b>	<b>Lauf 6</b>	<b>Lauf 7</b>
<b>E1</b>	98	128	257	304	237	306
<b>E1 A2</b>	40	62	100	160	106	144
<b>E1 A3</b>	58	65	124	135	124	155
<b>E2</b>	95	113	227	278	273	304
<b>E2 A1</b>	41	58	110	131	134	165
<b>E2 A3</b>	54	50	80	137	133	132
<b>E3</b>	93	123	240	240	283	286
<b>E3 A1</b>	40	52	120	105	134	141
<b>E3 A2</b>	53	67	115	133	146	144
<b>erkannte Personen</b>	286	354	649	801	777	881
<b>nach Eingängen</b>	286	364	724	822	793	896

Der in Tab. 4.1 aufgeführte Lauf a 4 ist der Lauf mit der größten Differenz zwischen Personen, die sowohl einem Ein- und Ausgang zuzuordnen sind, und der Anzahl an Personen, welche den Versuchsaufbau betreten haben. Hier lassen sich nur 89,6 % ebenfalls einem Ausgang zuordnen. Bei einem Trajektorienverlust von 10,4 % verwundert es nicht, dass in diesem Lauf für den Durchgang a ebenfalls die größten Ungleichheiten im Verhältnis der Abbieger auftauchen. 35,2% der Fußgänger aus Gang 2 biegen links ab, 48,5% der 227 eingehenden Personen nutzen dagegen den von ihnen aus rechts gelegenen Gang. Allein in diesem Gang sind bereits 37 Personen keinem Ausgang mehr zu zuordnen. In Gang 1 gehen 33 Personen „verloren“, 5 Personen in Gang 3.

In allen anderen Läufen konnten mindestens 97,3 % der Personen Ein- und Ausgängen zugeordnet werden.

Für Durchgang a ergeben sich weiterhin recht ausgeglichene Verhältnisse zwischen links und rechts Abbiegenden. Auch hier gibt es Ausnahmen, wie beispielsweise Lauf a 2. Hier biegen pro Gang zwischen 7 und 9 Personen falsch ab. Dies kann darin begründet sein, dass es sich um den ersten Lauf mit der durch Nummern sortierten Vorgabe handelt.

Für Durchgang b sind die Ergebnisse der Analyse in Tab. 4.2 zusammengefasst. Hier fällt ein signifikanter Unterschied zwischen den prozentualen Abbieger-Anteilen von Lauf 1 und Lauf 2 auf. Für Lauf 1 hat das unausgeglichene Ergebnis Gang 1 mit einem Verhältnis von 44,4 % zu 54,4 %. 98,8 % der Personen aus diesem Gang sind

**Tabelle 4.2:** Einhalten der Vorgaben durch die Fußgänger. Es sind sämtliche Läufe des Durchgangs b aufgeführt.

	<b>Lauf 1</b>	<b>Lauf 2</b>
<b>E1</b>	250	234
<b>E1 A2</b>	111	104
<b>E1 A3</b>	136	124
<b>E2</b>	271	243
<b>E2 A1</b>	142	146
<b>E2 A3</b>	128	90
<b>E3</b>	258	238
<b>E3 A1</b>	128	90
<b>E3 A2</b>	128	141
<b>erkannte Personen</b>	773	695
<b>nach Eingängen</b>	779	715

dementsprechend einem Ausgang zuordbar. Im direkten Vergleich zu Lauf 2 wird ein deutlicher Unterschied sichtbar: In allen Gängen herrscht eine Unausgeglichenheit zwischen den Abbiegern, diese liegt bei zwei Gängen sogar über 50 Personen. Ein möglicher Grund hierfür ist, dass die Fußgänger von den bisherigen Versuchsläufen erschöpft sind und eine größere Pause benötigen. Eine derartige Pause fand im Anschluss an Lauf b 2 statt.

In beiden Läufen sind sehr wenige (6 bzw. 10) Trajektorien keinem Ausgang zuzuordnen.

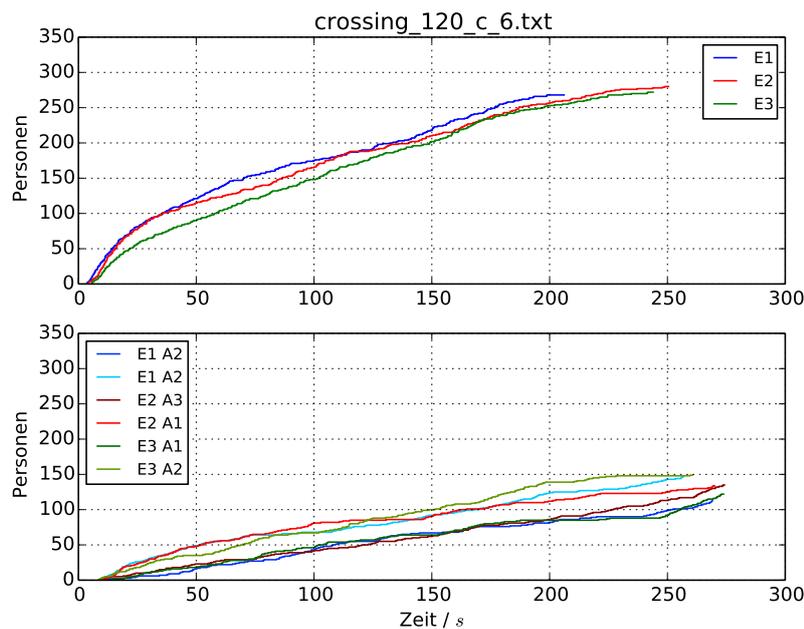
**Tabelle 4.3:** Einhalten der Vorgaben durch die Fußgänger. Es sind sämtliche Läufe des Durchgangs c aufgeführt.

	<b>Lauf 1</b>	<b>Lauf 2</b>	<b>Lauf 3</b>	<b>Lauf 4</b>	<b>Lauf 5</b>	<b>Lauf 6</b>	<b>Lauf 7</b>
<b>E1</b>	90	134	199	237	214	269	312
<b>E1 A2</b>	47	65	105	111	100	114	124
<b>E1 A3</b>	42	69	93	124	113	148	185
<b>E2</b>	83	126	193	228	223	281	255
<b>E2 A1</b>	34	62	102	122	112	135	149
<b>E2 A3</b>	49	64	84	100	106	136	98
<b>E3</b>	89	122	191	241	193	273	287
<b>E3 A1</b>	45	62	80	106	94	123	124
<b>E3 A2</b>	44	60	104	134	99	150	163
<b>erkannte Personen</b>	261	382	571	697	624	806	843
<b>nach Eingängen</b>	262	382	583	706	630	823	854

Etwa 17 Personen halten, Abb. 4.2(b) nach zu urteilen, die Vorgabe des Kreisverkehrs für Lauf c 2 nicht ein, sondern laufen entgegen der vorgegebenen Laufrichtung. Diesen Sachverhalt spiegelt Tab. 4.3 nicht wider. Folglich wird noch einmal verdeutlicht, dass diese Tabellen lediglich die Start-Ziel-Beziehungen der einzelnen Personen prüfen, nicht aber wie sie an ihr Ziel gelangen.

Unter Berücksichtigung der nicht zum Ziel verfolgbaren Trajektorien erscheinen die Unterschiede zwischen der Anzahl der Personen, welche korrekt abbiegen, und jenen, die falsch abbiegen, nicht durch den Einsatz der Säule oder die Vorgabe eines Kreisverkehrs signifikant beeinflusst zu werden. Zwar erscheinen auf den ersten Blick die Ergebnisse des Durchgangs c ausgeglichener als in den Durchgängen a und b, allerdings ist nicht außer Acht zu lassen, dass bei diesem bereits eine gewisse Übung der Probanden vorliegt sowie eine für die Konzentration erfrischende Pause vor Start des Durchgangs c veranlasst wurde.

Generell scheinen die Fußgänger bemüht den Vorgaben zu entsprechen. Eine Studie über die Ursache für das Befolgen oder Ignorieren von Anweisungen wäre in diesem Zusammenhang von Interesse.



**Abbildung 4.5:** Zeitlicher Verlauf der Abbiegevorgänge im Lauf c 6. Es handelt sich um den Lauf mit der längsten Versuchszeit. Die obere Grafik zeigt die wachsende Anzahl der den Versuchsaufbau betretenden Personen differenziert nach dem jeweiligen Eingang. Der jeweilige Zeitpunkt entspricht hier dem ersten Auftreten der Person. Die untere Grafik teilt diese Graphen nach der Wahl der Ausgänge auf. Der jeweilige Zeitpunkt entspricht hier dem letzten Auftreten der Person.

Abb. 4.5 besteht aus zwei Grafiken. Beide Grafiken beschreiben zum Abbiegeprozess gehörige Vorgänge des Laufs c 6.

Die obere Abbildung zeigt die mit der Zeit wachsende Anzahl der Personen, die den Versuchsaufbau über die drei verschiedenen Gänge betreten. Auf der x-Achse ist hier der Zeitpunkt des jeweilig ersten Auftretens aufgetragen. Der blaue Graph beschreibt Gang 1, der rote Gang 2 und der grüne Gang 3.

Die untere Abbildung zeigt differenziert nach Eingängen die Anzahl der Personen, welche über einen bestimmten Ausgang den Versuchsaufbau verlassen. Die verschiedenen Farbnuancen sind dem jeweiligen Eingang angepasst. In diesem Fall sind auf der x-Achse die Zeitpunkte des jeweils letzten Auftretens der Trajektorien aufgetragen. Mit Hilfe dieser Darstellungsart ist es ein leichtes zu erkennen, dass nicht wie erwartet immer 50 % rechts und 50 % links abbiegen, sondern teilweise große Differenzen auftreten.



## 5 Analyse mit JuPedSim

### 5.1 Wahl der Methode

Um Aussagen über Geschwindigkeiten, Dichten und Flüsse machen zu können, wurden die mit PeTrack erstellten Trajektorien einer Analyse mit JuPedSim unterzogen. Infolge der geringeren Standardabweichung in Bezug auf die Geschwindigkeit sowie eine mögliche Reduzierung der Streuung der Dichte bei zugleich guter zeit- und räumlicher Auflösung wurde zu Analysezwecken die in Kap. 2.3 beschriebene Methode D gewählt.

### 5.2 Arbeitsschritte mit JuPedSim

#### 5.2.1 Geometrie

Infolge der noch andauernden Entwicklung von JuPedSim, wie in Kap. 2.2.2 beschrieben, und dem Fehlen eines GUI müssen einige Dateien angelegt werden, um mit JuPedSim arbeiten zu können.

Wichtig ist eine Datei zu erstellen, welche die Geometrie des Experiments genau beschreibt. Da die aktuellste Version von JuPedSim bedingt durch neu programmierte Parameter verwendet werden muss, entspricht die Geometrie-Datei folgender Version:

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8" standalone="yes"?> <geometry
version="0.5" caption="second life" unit="m"
xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xsi:noNamespaceSchemaLocation="../../../xsd/jps_geometry.xsd">
```

Wichtig ist, dass die einzelnen Dateien später der selben Maßeinheit zu Grunde gelegt sind. Deshalb sind sämtliche Angaben über Wände, Hindernisse oder Ähnlichem in Meter anzugeben, da nur diese Einheit noch von JuPedSim unterstützt wird.

Die Geometrie kann mit JPSvis (früher Travisto) überprüft und die zugehörigen Trajektorien angezeigt werden. So lässt sich schnell feststellen, ob die Geometrie

stimmig ist oder Personen Wände durchqueren. In diesem Fall muss die Geometrie auf Fehler untersucht werden.

Zudem ist von Bedeutung, dass die angegebenen Koordinaten zu dem bereits bei PeTrack verwendeten Koordinatensystem passen.

Diesen Punkten folgend wurde der Versuchsaufbau in der Geometrie eingebettet. Der Bereich, in dem die Personen den Versuchsaufbau wieder verlassen können, zählt hier nicht zur Geometrie.

Insgesamt wurden zwei Geometrie-Dateien erstellt: Eine mit sowie eine ohne Säule. Die Säule gilt für JPSreport als Hindernis und wird daher während der Berechnung von Dichten und dergleichen berücksichtigt.

## 5.2.2 Interpretationsdatei

Als Vorgabe zur Interpretation dient eine sogenannte Ini-Datei. In dieser werden Randbedingungen festgelegt wie:

- zu benutzende Geometrie-Datei
- Trajektorien zur Auswertung
- Festlegen von Messbereichen entsprechend der verschiedenen Methoden
- Auswahl der Methoden, mit denen die Trajektorien analysiert werden sollen

Als Messbereich für Methode D wurde die dreieckige Kreuzung gewählt. Da diese Form in früheren Versionen von JPSreport noch nicht unterstützt wird, muss mindestens die Version vom 15. Januar 2015 verwendet werden. Ansonsten ist eine Analyse mit derartigen Messbereichen (inklusive Polygonen) nicht möglich. Die vorherigen Versionen unterstützen lediglich Vierecke.

Es wurde folgende Version der Ini-Datei verwendet:

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?> <JPSreport  
project="JPS-Project" version="0.5">
```

## 5.2.3 Anpassung der Trajektorien

Die verwendete Version von PeTrack berechnet die Trajektorien in Zentimeter statt in Meter. Folglich müssen die Trajektorien zur Analyse mit JPSreport zuvor skaliert werden.

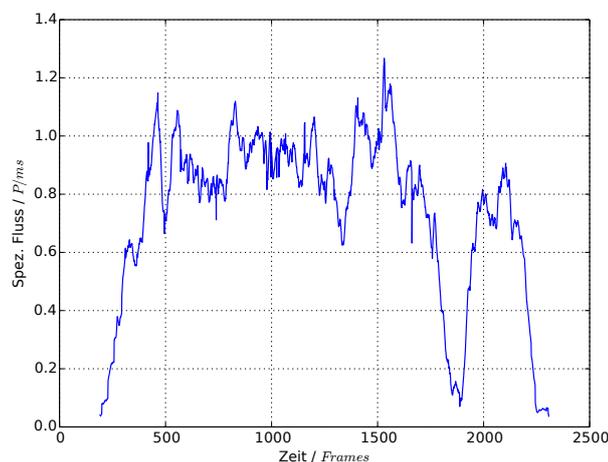
### 5.2.4 Gebrauch von JPSreport

JPSreport wird über die Konsole benutzt und legt für die erstellten Daten eigenständig Verzeichnisse sortiert nach den ausgewählten Methoden an. Mit den Daten, resultierend aus der Anwendung von Methode D, können stetige Flüsse bestimmt sowie Voronoi-Diagramme, Profile der Dichte, der Geschwindigkeit und daraus folgend auch des Flusses, aber auch Fundamentaldiagramme berechnet werden.

Die Daten für die Profile und Voronoi-Diagramme werden für jedes Frame angelegt. Daher ist zunächst die Analyse der Daten für die Ermittlung der spezifischen Flüsse zu empfehlen. Mit diesen lassen sich dann die Frames, über welche die Profile und Fundamentaldiagramme ermittelt werden, reduzieren, wodurch eine Bereinigung der Daten stattfindet. Situationen zu Beginn und Ende der Läufe, in welchen die Anzahl der Personen noch gering ist oder bereits wieder abnimmt und bedingt hierdurch die Dichte sinkt sowie die Geschwindigkeit der einzelnen Personen steigt, verfälschen nicht mehr das durchschnittliche Bild des Versuches.

## 5.3 Ermittlung der spezifischen Flüsse

Die spezifischen Flüsse ermittelt das Python Skript `_Plot_steady_state.py`<sup>1</sup>. Das Skript erstellt durch Analyse der Voronoi Dichte und Geschwindigkeit den spezifischen Fluss in Abhängigkeit zu dem jeweiligen Frame.



**Abbildung 5.1:** Ergebnis der Flussanalyse des Laufs a 3. In diesem Ergebnis zeigt sich deutlich der während des Versuchs entstandene Stillstand der Probanden. Für diesen Lauf wurde das Plateau für Frame 500 bis 2100 festgelegt.

<sup>1</sup>geschrieben von David Bodenstern, Bergische Universität Wuppertal

Der spezifische Fluss ist immer abhängig von dem gewählten Messbereich. Abb. 5.1 zeigt exemplarisch ein solches Ergebnis. Die Festlegung der auszuwertenden Frames wurde derart vorgenommen, dass Beginn und Ende des Versuchs nicht mit eingerechnet werden. Die Schwankungen innerhalb des auf Frame 500 bis Frame 2100 festgelegten Plateaus resultieren aus der Wahl des Messbereichs. Als solcher wurde die dreieckige Kreuzung angenommen. Die Besonderheit in diesem Lauf liegt in dem in etwa bei Frame 1850 liegenden Stillstand. Dieser liegt in dem bereits in Kap. 3.3.2 geschilderten Missverständnis begründet.

Eine Übersicht der für die Analyse verwendeten Frames findet sich in Tab. 5.1. Hier sind der Reihe nach alle Läufe mit den jeweiligen Frames gelistet.

**Tabelle 5.1:** Plateaus der Versuchsläufe/in der Analyse verwendete Frames

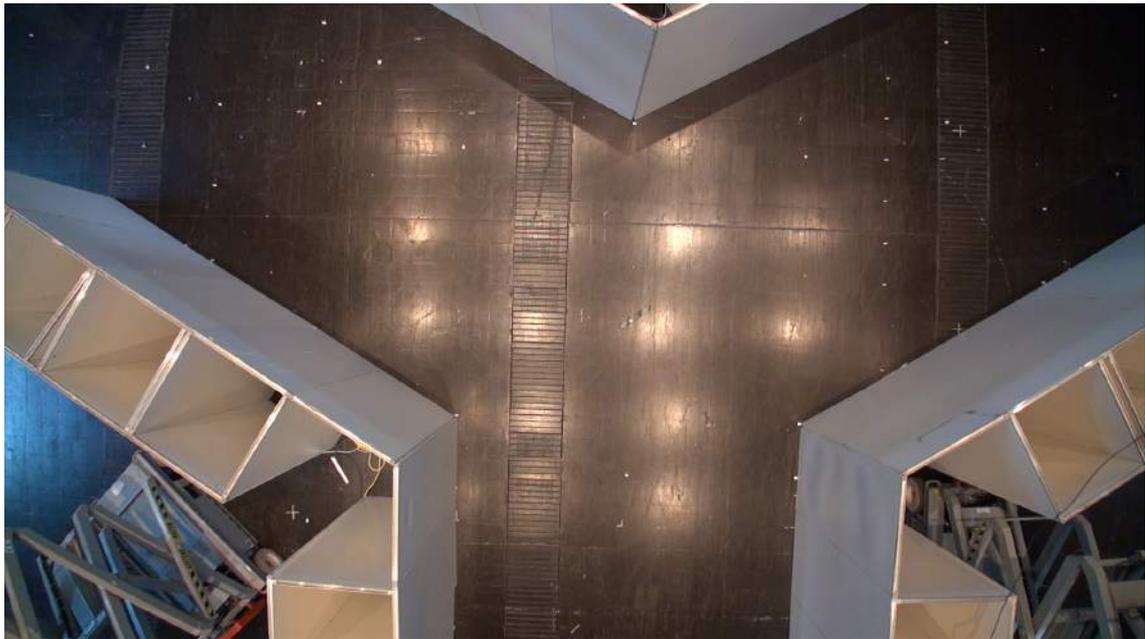
Lauf	Frame von	Frame bis
a 1	300	1700
a 2	500	2250
a 3	500	2100
a 4	500	3500
a 5	500	4100
a 6	300	4300
a 7	1000	4800
b 1	300	5000
b 2	400	4500
c 1	500	2000
c 2	450	2200
c 3	500	3700
c 4	400	4600
c 5	500	4600
c 6	500	6600
c 7	300	4200

## 5.4 Profile für Geschwindigkeit, Dichte und Fluss

### 5.4.1 Allgemeines

Die Profile über Geschwindigkeit, Dichte und aus diesen beiden resultierend das Profil des Flusses erstellen die von ZHANG [2012] verfassten Python Skripte. Die Grenzen der Geometrie sind hier wieder die selben wie während der Analyse mit JPSreport. Dementsprechend wird der komplette Versuchsaufbau als Geometrie angenommen. Diese Geometrie stimmt allerdings nicht mit dem Kameraausschnitt, welchem die Trajektorien-Dateien entspringen, überein. Den Kameraausschnitt zeigt Abb. 5.2. Daher sollten die erstellten Profile nur für diesen Ausschnitt des Versuchsaufbaus ausgewertet werden. Die Kamera ermöglicht eine Auswertung über die gesamte Breite bis etwa 2 m in die Gänge hinein.

Dargestellt werden die Profile anhand von ISO-Karten, deren Vorteil ist die in einer



**Abbildung 5.2:** Blickwinkel der verwendeten Kamera

Abbildung zusammengefasste, farblich differenzierte Form. Mit dieser ist schnell eine Übersicht der durchschnittlichen Gegebenheiten während des Plateaus möglich.

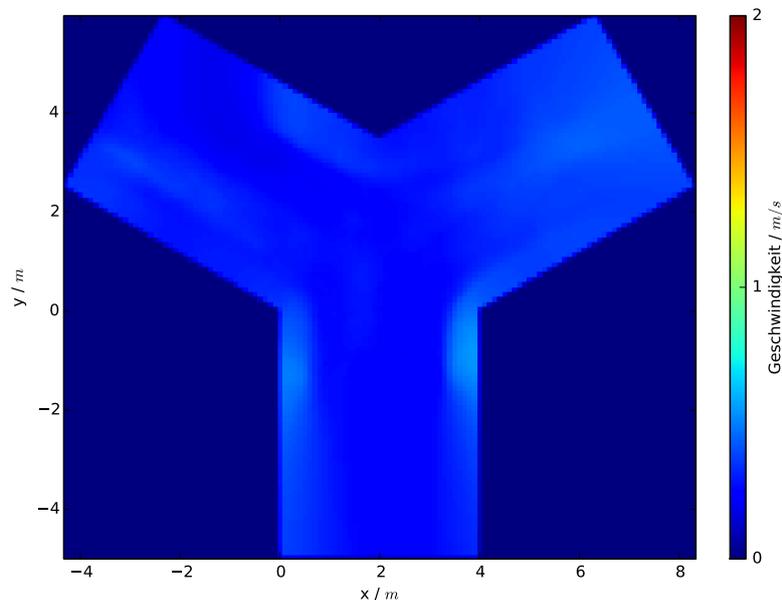
Im Folgenden sollen die Profile der Läufe a 7, b 1 sowie c 6 verglichen werden. Dafür werden in drei verschiedenen Abbildungen jeweils der Reihe nach Geschwindigkeit, Dichte und schließlich der Fluss gegenübergestellt.

Für die Erstellung der Profile wurde jedes Frame innerhalb der in Tab. 5.1 genannten Grenzen betrachtet, dabei der jeweilige Zustand ausgewertet und gespeichert. Aus diesen Daten wurde anschließend der mittlere Zustand berechnet, welcher in dem jeweiligen Profil visualisiert wird.

Aus den gespeicherten Daten der Geschwindigkeiten und Dichten wurde dann der durchschnittliche Fluss ermittelt.

### 5.4.2 Geschwindigkeit

Abb. 5.3, Abb. 5.4 sowie Abb. 5.5 stellen die Geschwindigkeitsprofile der Läufe mit einer Eingangsbreite von 4,00 m zusammen. Die x- und y-Achse dienen zur Beschreibung geometrischer Punkte in der Einheit Meter. Der Ursprung ist an selber Stelle wie zuvor. Rechts neben dem Graphen befindet sich eine Farbleiste. Diese zeigt an, welche Farbe zu welcher Geschwindigkeit gehört. Die Geschwindigkeit ist hierbei in m/s angegeben. Generell steht Dunkelblau für die geringste Geschwindigkeit bzw. den Stillstand 0,00 m/s und Dunkelrot für den schnellsten Zustand von 2,00 m/s. Bereits auf den ersten Blick sind markante Unterschiede zwischen den Profilen der drei Läufe ersichtlich. Abb. 5.3 enthält den durchschnittlichen Zustand der Ge-



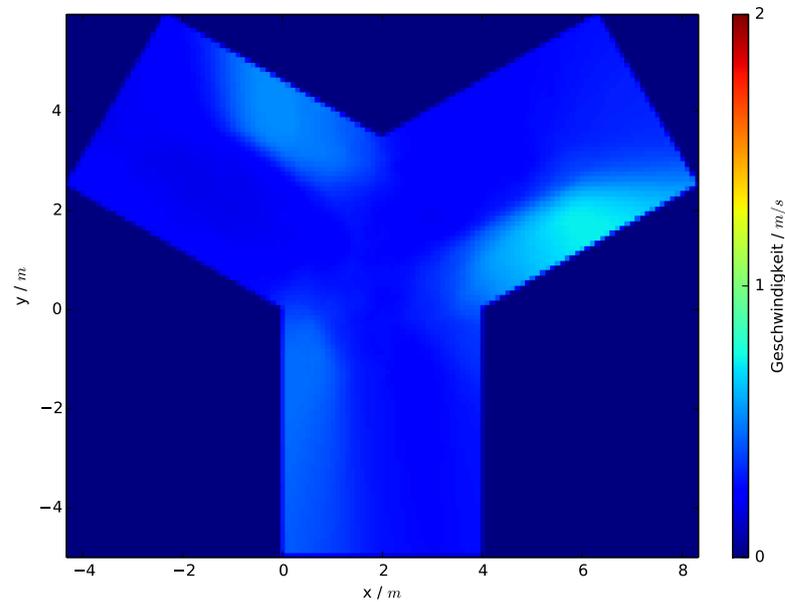
**Abbildung 5.3:** Geschwindigkeitsprofil Lauf a 7. Eingangsbreite: 4,00 m. Ausbildung zweier schneller Ströme an den Seiten des Gangs 3.

schwindigkeit in Lauf a 7. Hier bilden sich im Verhältnis zum restlichen Versuchsaufbau zwei recht schnelle Ströme mit ca. 0,80 m/s an den Seiten von Gang 3 aus. Dazwischen herrschen deutlich langsamere Geschwindigkeiten von etwa 0,40 m/s vor. Auf die gesamte Breite von Gang 2 hingegen ist eine eher gleichmäßige Geschwindigkeit sichtbar. Gang 1 weist eine über die Breite wechselnde Geschwindigkeit auf. Das Gesamtbild ist durchwachsener Natur mit verminderten Geschwindigkeiten besonders im Zentrum der Kreuzung.

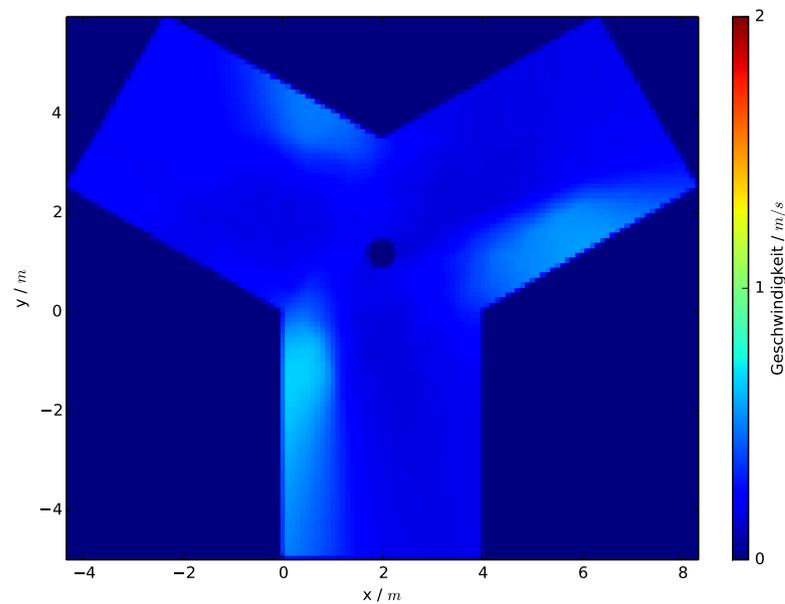
In Abb. 5.4 kristallisieren sich allmählich Bereiche mit verhältnismäßig hohen Geschwindigkeiten klarer heraus als dies bei Abb.5.3 der Fall ist.

Bereits in Kap. 4.3 wurde auf die Linienbildung, besonders auf jene der sich rasch etablierenden Ströme der nach rechts Abbiegenden, hingewiesen. Diese Ströme sind die Ursache für die jeweils auf der linken Seite, von der Position des Eingangs aus betrachtet, erhöhten Geschwindigkeiten unmittelbar nach den Scheitelpunkten der Gänge. An diese Ströme können sich nun Linksabbieger aus anderen Gängen anschließen. Allerdings müssen diese dafür Wartezeiten in Kauf nehmen, da sie eine Lücke zwischen den Rechtsabbiegern benötigen, um dem Strom selbst beiwohnen zu können. Dementsprechend werden Ströme an derartigen Stellen im Folgenden immer Rechtsabbieger-Ströme bzw. RA-Ströme genannt.

In allen anderen Bereichen liegt die Geschwindigkeit daher, bedingt durch Konflikte zwischen den verschiedenen Strömen, bei etwa 0,50 m/s. Folglich führt die Vorgabe der Beachtung des Kreisverkehrsystems zu geordneteren Strukturen innerhalb des Versuchsaufbaus. Diese Beobachtung stimmt mit den Ergebnissen aus Kap. 4.3



**Abbildung 5.4:** Geschwindigkeitsprofil Lauf b 1. Eingangsbreite: 4,00 m. Ausprägung von klaren Bereichen mit erhöhter Geschwindigkeit.



**Abbildung 5.5:** Geschwindigkeitsprofil Lauf c 6. Eingangsbreite: 4,00 m. Besonders innerhalb der Kreuzung verminderte Geschwindigkeiten.

überein.

Vergleicht man die Ergebnisse von Lauf c 6, abgebildet in Abb. 5.5, mit den beiden vorangegangenen Profilen, fällt die besonders innerhalb der Kreuzung verminderte Geschwindigkeit auf. Verhältnismäßig höhere Geschwindigkeiten von maximal 0,90 m/s treten nur noch in den RA-Strömen auf. Besonders ist hier der entsprechende Strom in Gang 3 hervorzuheben. Dieser ist deutlich stärker ausgeprägt als die RA-Ströme in Gang 1 oder Gang 2. Anhand der prozentualen Abbiegeranteile lässt sich die Ursache hierfür nicht genau benennen. Die selbe Beobachtung gilt für Gang 2 in Abb. 5.4.

Vergleicht man die RA-Ströme aller Abbildungen miteinander, so fällt der grundsätzlich eher schwach ausgeprägte RA-Strom in Gang 1 auf. Da die Kamera diesen Bereich nicht so weitreichend erfasst wie die Bereiche der RA-Ströme in den anderen Gängen, ist es möglich, dass die Profile in diesem Bereich nur hinreichend genau sind. Viele Trajektorien werden in diesem Bereich erst erfasst oder aber verschwinden an dieser Stelle aus dem Versuchsaufbau. Durch diesen Umstand kann eine Beeinflussung aller Profile (auch Dichte und Fluss) an dieser Stelle stattfinden. Durch die Verwendung der Säule wird die Geschwindigkeit besonders innerhalb der Kreuzung vermindert. Es entstehen klare Grenzen zwischen Bereichen mit erhöhter Geschwindigkeit und solchen mit geringer.

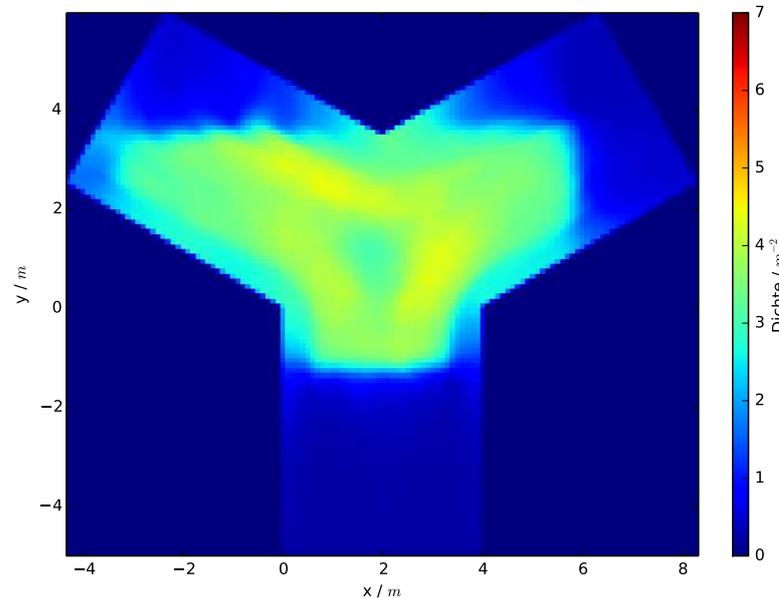
### 5.4.3 Dichte

Die Graphen der Profile der Dichten gleichen strukturell den Graphen der Geschwindigkeitsprofile. Der einzige Unterschied liegt in der veränderten Farbleiste. In diesem Fall zeigt die Farbe die durchschnittliche Dichte an der jeweiligen Position an. Erneut gilt Dunkelblau als Farbe des Minimalwerts von  $0,00 \text{ P/m}^2$  und Dunkelrot für den Maximalwert. Hier liegt dieser bei  $7,00 \text{ P/m}^2$ . Zwischenwerte lassen sich dementsprechend von der Leiste ablesen.

Anhand der in Abb. 5.6 bis Abb. 5.8 dargestellten Profile der Dichten lässt sich sehr gut erkennen, in welchen Bereichen die Trajektorien schnell erfasst wurden. An den Rändern des Kameraausschnitts wird die Dichte durch weniger erfasste Trajektorien ausgedünnt. Es ist nicht davon auszugehen, dass die Dichte bereichsweise unter  $1,90 \text{ P/m}^2$  sinkt.

Eine dreieckige Struktur mit Zonen erhöhter Dichte von etwa  $4,50 \text{ P/m}^2$  weist Abb. 5.6 auf. Diese Zonen entwickeln sich in 1,00 m Entfernung zu den Scheitelpunkten der Gänge. Dabei ist zu bemerken, dass am Scheitelpunkt von Gang 1 und Gang 3 lediglich eine Dichte von  $4,00 \text{ P/m}^2$  vorliegt. Im Zentrum der Kreuzung herrscht im Gegensatz hierzu eine Dichte von  $3,00 \text{ P/m}^2$ . Die verminderte Dichte entlang der Wände resultiert aus dem unterbewussten Mindestabstand der Fußgänger zu festen Objekten entlang des Weges.

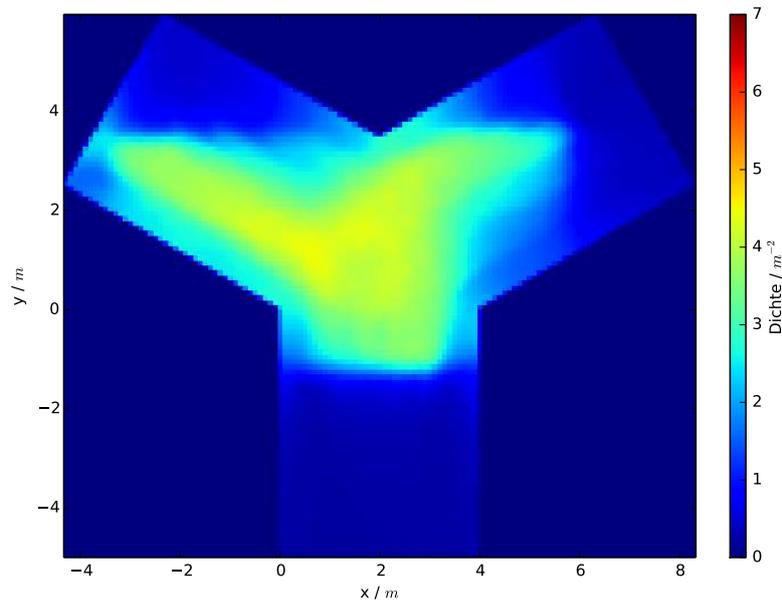
In den Mitten der Gänge ist die Dichte ähnlich und liegt zwischen  $3,50 \text{ P/m}^2$  und  $3,90 \text{ P/m}^2$ .



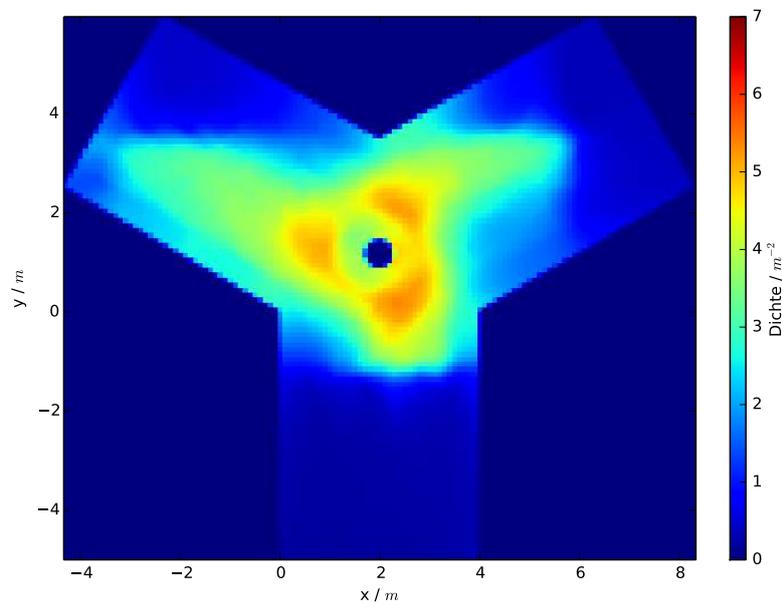
**Abbildung 5.6:** Profil der Dichte, Lauf a 7. Eingangsbreite: 4,00 m. Die Entwicklung einer dreieckigen Struktur mit Dichten von  $4,50 \text{ P/m}^2$  ist sichtbar.

Die unterschiedlichen Vorgaben der Versuche spiegeln sich auch in den Profilen der Dichte wider. So bildet sich in Abb. 5.7 eine Struktur der Dichteverteilung aus, die einem Sturm ähnelt. Die Dichte beginnt sich in der Kreuzungsmitte zu konzentrieren. Hier werden Werte von  $4,50 \text{ P/m}^2$  erreicht. Die Ströme von Dichten um  $3,90 \text{ P/m}^2$  verlagern sich von der Gangmitte zu den RA-Strömen entgegengesetzten Seiten. Der Grund liegt im vorgegebenen Kreisverkehr: Fußgänger, welche die Kreuzung überqueren wollen, müssen sich rechts einordnen, egal ob diese in den von ihnen aus linken oder rechten Gang abbiegen wollen. Folglich verteilen sich die Fußgänger weniger, wodurch punktuell höhere Dichten entstehen. Außerhalb dieser Ballungs- oder Wartebereiche werden durchschnittlich Dichten von  $2,60 \text{ P/m}^2$  verzeichnet. Gleich Abb. 5.7 einem Sturm, so wirkt Abb. 5.8 optisch wie das Auge eines Wirbelsturms. Durch die Säule ist es den Fußgängern noch weniger möglich alternative Wege zu finden, um damit bereits überfüllten Bereichen auszuweichen. Resultierend ergeben sich sehr hohe Dichten von bis zu  $5,60 \text{ P/m}^2$  orbital um die Säule. Nach Tab. 2.1 liegt hier der Zustand der Pressung vor. Fortkommen ist nicht mehr möglich. Für die Fußgänger herrscht eine unzumutbare Enge. Die Kreuzung verstopft, was in einem Ernstfall zu katastrophalen Folgen führen kann. Der gute physische Zustand sowie die Freiheit von Platzangst der Probanden begünstigen einen guten Ablauf des Versuchs.

Innerhalb der Gänge liegen die Dichten erneut zwischen  $2,90 \text{ P/m}^2$  und  $4,00 \text{ P/m}^2$ .



**Abbildung 5.7:** Profil der Dichte, Lauf b 1. Eingangsbreite: 4,00 m. Konzentrierte Dichten in „Sturm“-ähnlicher Form.



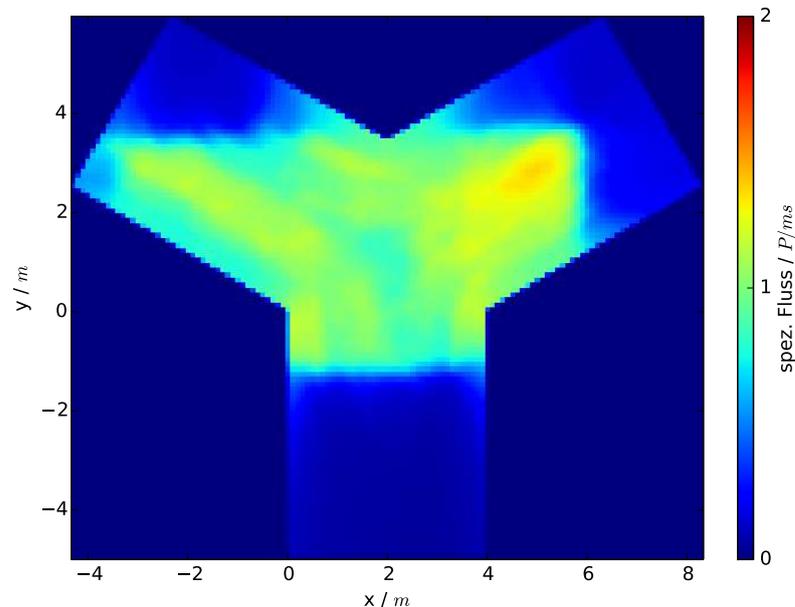
**Abbildung 5.8:** Profil der Dichte, Lauf c 6. Eingangsbreite: 4,00 m. Deutliche Eindrehung konzentrierter Dichten um die Säule.

### 5.4.4 Fluss

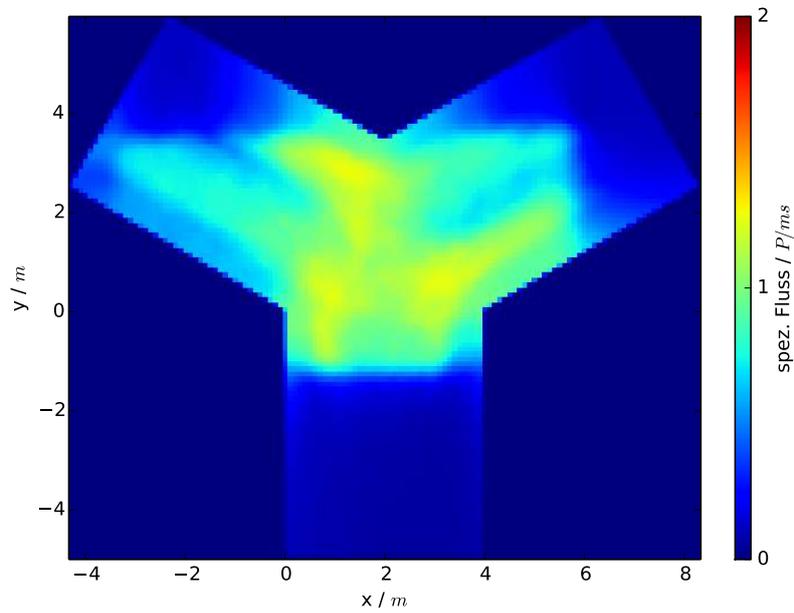
Die Farbleiste bei den Profilen der Flüsse hat ihr Maximum bei 2,00 P/ms. Die zugehörige Farbe ist erneut Dunkelrot. Ein Fluss von 0 P/ms wird in Dunkelblau markiert.

Bei allen drei Läufen liegt der maximale Fluss durchschnittlich bei 1,20 P/ms. Abb. 5.9 zeigt, dass bei der alleinigen Vorgabe des Abbiegeverhaltens der Fluss innerhalb des Versuchsaufbaus in allen Bereichen nahezu gleich ist. Nur in Gang 2 ergibt sich ein höherer Fluss von etwa 1,50 P/ms. Generell gilt, je geringer die Dichte, desto höher ist der durchschnittliche Fluss sowie die Geschwindigkeit an dieser Stelle.

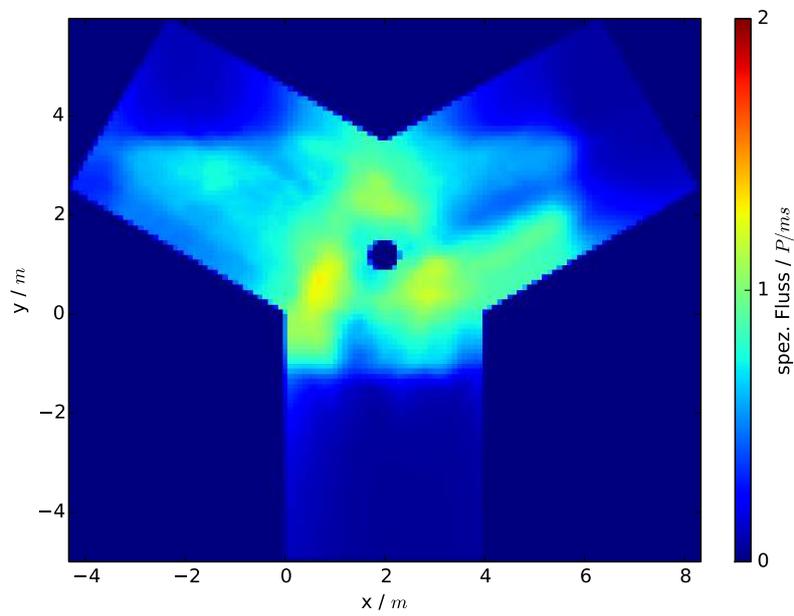
Diese Aussage unterstützen auch Abb. 5.10 und Abb. 5.11. Immer versetzt zu den Bereichen größter Dichte treten die höchsten Flüsse auf. Außerdem nimmt die Fläche mit hohen Flüssen ab, je mehr Vorgaben den Fußgängern gemacht werden. Durch die Vorgaben und insbesondere die Säule verlieren die Fußgänger die Möglichkeit kreative, alternative Routen durch überfüllte Bereiche zu finden. Vorteile genießen hier wieder die Teilnehmer an den RA-Strömen, so ist auch der Fluss an diesen Stellen höher als im restlichen Versuchsaufbau. Dies trifft vor allem für Lauf b 1 und Lauf c 6 zu.



**Abbildung 5.9:** Profil des Flusses, Lauf 7. Eingangsbreite: 4,00 m. Gleichmäßige Entwicklung eines Flusses von 1,20 P/ms.



**Abbildung 5.10:** Profil des Flusses, Lauf b 1. Eingangsbreite: 4,00 m. Abnehmende Fläche von Bereichen mit höheren Flüssen.



**Abbildung 5.11:** Profil des Flusses, Lauf c 6. Eingangsbreite: 4,00 m. Nur noch geringe Flächen mit erhöhten Flüssen. Durch die Säule findet eine Einschränkung der Fußgänger statt.

### 5.4.5 Auffälligkeiten innerhalb der Durchgänge

Erneut wird auf den Anhang verwiesen. In diesem sind die Iso-Karten der übrigen Läufe einzusehen. Dennoch darf eine kurze, vergleichende Schilderung an dieser Stelle nicht fehlen.

Für die Geschwindigkeitsprofile des Durchgangs a gelten, dass mehrere Läufe mit verschiedener Eingangsbreite äußerst ähnliche Profile ausbilden. So ähneln sich die Läufe a 5, a 6 und a 7 in der Ausprägung der vorhandenen Muster. Die Läufe a 3 und a 4 sind gewissermaßen die Übergänge von den Zuständen der Läufe a 1 und a 2 zu denen der Läufe mit größeren Eingangsbreiten.

Lauf a 1 ist wieder einmal besonderer Natur: In diesem Lauf finden in allen Profilen Ausprägungen zu Gang 1 gerichtet statt. In Anbetracht der Trajektorien ist dies durchaus passend, da die Hauptkonzentration der Trajektorien in Gang 1 vorliegt. Die Profile der Dichte verdeutlichen eine stufenweise Erhöhung der Personen je Quadratmeter mit steigender Eingangsbreite. Dies führt zu der Ausbildung von Zentren mit besonders hoher Dichte in den Läufen a 6 und a 7. Handelt es sich in Lauf a 6 um ein Zentrum mit einer Dichte von  $4,50 \text{ P/m}^2$ , erhöht sich die Anzahl der Zentren in Lauf a 7 wie zuvor bereits schildert.

Die Flüsse der einzelnen Läufe des Durchgangs a liegen ab Lauf a 3 im Durchschnitt bei  $1,20 \text{ P/ms}$ , dabei treten immer wieder Stellen mit höheren Flüssen von bis zu  $1,50 \text{ P/ms}$  auf. In Lauf a 1 und a 2 ist der Fluss deutlich geringer.

Die Profile des Durchgangs b weisen andere Merkmale auf als jene des Durchgangs a. Generell gilt, dass in Lauf b 2 höhere Geschwindigkeiten möglich waren als in Lauf b 1. Dennoch sind die Bereiche in denen die erhöhten Geschwindigkeiten auftreten identisch.

Bei der Dichte werden Werte von bis zu  $4,80 \text{ P/m}^2$  in Lauf b 2 verzeichnet. Diese konzentrieren sich in der unteren Hälfte des Übergangs von Gang 1 in die Kreuzung. Insgesamt ist die Dichte jedoch geringer als in Lauf b 1.

Der Fluss liegt in beiden Läufen zwischen  $1,00 \text{ P/ms}$  und  $1,50 \text{ P/ms}$  bei einer Ausbildung des selben Musters erhöhter Flüsse.

Die Beeinflussung der Profile durch die Säule zeigt sich in Durchgang c. In Lauf c 1 ist die Geschwindigkeit lediglich um die Säule vermindert ( $0,80 \text{ m/s} - 1,00 \text{ m/s}$ ), in den Gängen herrschen Geschwindigkeiten bis  $1,20 \text{ m/s}$  vor. Ab dem zweiten Lauf dieser Reihe sind erhöhte Geschwindigkeiten in den Bereichen der RA-Ströme festzustellen. Generell nimmt die Geschwindigkeit mit steigender Eingangsbreite und dadurch bedingt steigender Dichte ab. In den nachfolgenden Läufen entwickelt sich eine immer klarere Abgrenzung von verschiedenen Geschwindigkeitszonen. Die schnellste Bewegung ist hier innerhalb der RA-Ströme verzeichnet, welche mit zunehmender Dichte schmaler werden.

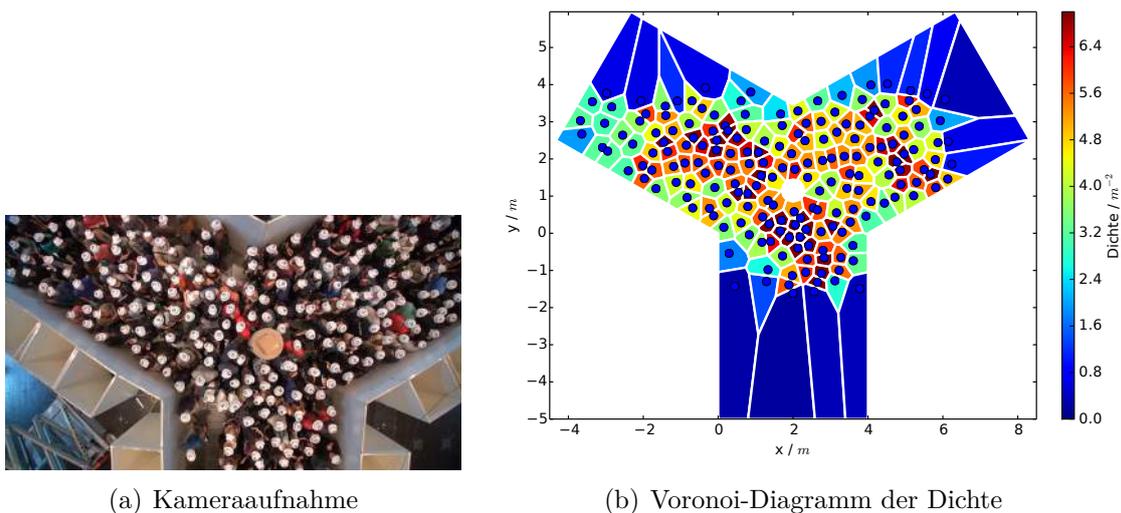
In Bezug auf die Dichte bilden sich nach und nach aus punktförmigen Bereichen mit höheren Dichten (Lauf a 1) mit vergrößerter Eingangsbreite Ringe mit extremen Dichten um die Säule aus. Bereits in Lauf c 3 steigt die Dichte auf  $4,50 \text{ P/m}^2$  an. In den anschließenden Läufen sind Dichten größer  $5,00 \text{ P/m}^2$  auffallend. Aber nicht nur innerhalb der Kreuzung sinkt der Platz pro Person. Ab Lauf c 3 sind hohe Dichten

in den Bereichen der Gänge zu beobachten, in welchen Fußgänger warten um den Kreisverkehr passieren zu können.

### 5.4.6 Einfluss erhöhter Motivation, Lauf c 7

Die Vorgabe einen Zug erreichen zu müssen führt in Lauf c 7 zu einer erhöhten Motivation. Diese hat einen markanten Einfluss auf Geschwindigkeit, Dichte und Fluss. In allen drei Profilen zeigen die Ergebnisse von Lauf c 7 im Vergleich zu Lauf c 6 (identische Vorgaben bis auf gesteigerte Motivation) erhöhte Werte. Besonders ausgeprägt sind diese im Profil der Dichte. Dort werden Werte von  $7,00 \text{ P/m}^2$  erreicht. Im gesamten Kreuzungsbereich sowie in den Einmündungen zu dem Kreisverkehr herrschen Dichten  $\geq 5,50 \text{ P/m}^2$ . Dementsprechend ist der Zustand der Pressung erreicht.

Abb. 5.12 zeigt eine Momentaufnahme des Laufs c 7. Frame 2740 ist einmal als Kameraaufnahme und einmal als Voronoi-Diagramm der Dichte abgebildet. In der Kameraaufnahme lässt sich gut erkennen, dass die Fußgänger lediglich leichte Kleidung und kaum bis gar kein Gepäck bei sich tragen. Umso offensichtlicher ist, wie eng die Personen zusammengedrückt werden, wenn sie versuchen möglichst schnell den Kreisverkehr zu betreten und wieder zu verlassen. Dabei bilden sich die dichtesten Stellen etwa in der Mitte der Gänge, so bleibt Platz für die schnelleren RA-Ströme (siehe Abb. 5.12 (b)). Derart beengte Zustände wurden zuvor nicht erreicht.



**Abbildung 5.12:** Eine Momentaufnahme: Lauf c 7, Frame 2740. Es entstehen Zustände der Pressung direkt neben Bereichen, in denen schnelleres Vorankommen möglich ist.

Die Struktur des Voronoi-Diagramms, Abb. 5.12 (b), gleicht jener der Profile der Dichte. Auch hier wird die Dichte über Farbnuancen dargestellt. Dunkelblau steht erneut für  $0,00 \text{ P/m}^2$ , dunkelrot für  $7,00 \text{ P/m}^2$ . Die x- und y-Achse geben jeweils Auskunft über die Koordinaten der jeweiligen Bereiche. Die Einheit ist hier wieder Meter.

Wenn von erhöhten Werten in Bezug auf die Geschwindigkeit gesprochen wird, ist dies nur in direktem Vergleich zu Lauf c 6 der Fall. Bei c 7 liegt die Geschwindigkeit zwischen  $0,20 \text{ m/s}$  und  $0,60 \text{ m/s}$ .

## 5.5 Fundamentaldiagramme

Eine weitere Möglichkeit die Zusammenhänge zwischen Dichte und Fluss zu erkennen sind Fundamentaldiagramme. Sämtliche nachfolgend aufgeführten Fundamentaldiagramme entsprechen der selben Struktur. Auf der x-Achse ist die Dichte bis zu einem Maximum von  $7,00 \text{ P/m}^2$  aufgetragen. Der Messbereich ist gleich der dreieckigen Kreuzung. Die y-Achse spiegelt den Fluss in Abhängigkeit von der Dichte wider. Die Einheit des Flusses ist  $\text{P/ms}$ . In der Legende ist wiederzufinden, welche Farbe welchen Lauf repräsentiert. Auch hier gelten die Grenzen aus Tab. 5.1.

Abb. 5.13 stellt die spezifischen Flüsse der Läufe des Durchgangs a zusammen. Das Sinken des Flusses gegen  $0,00 \text{ P/ms}$  in Lauf a 3 bei  $1 \text{ P/m}^2$  beruht auf dem Missverständnis in diesem Versuchslauf. Daher sollte über diesen Zustand hinweg gesehen werden.

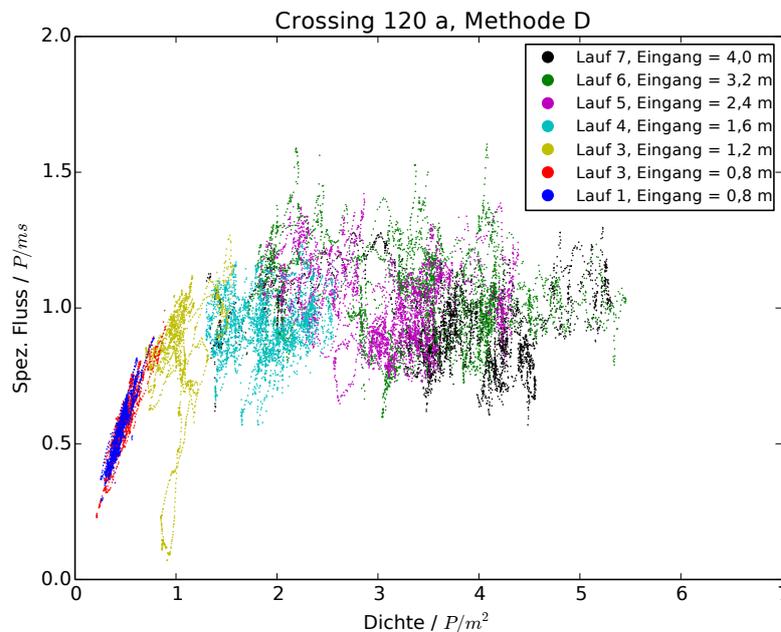
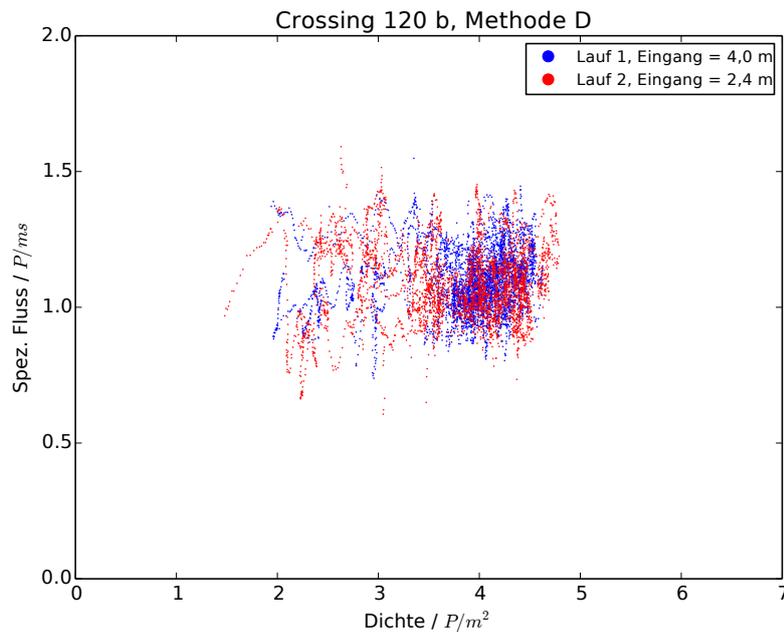


Abbildung 5.13: Fundamentaldiagramm des Durchgangs a



**Abbildung 5.14:** Fundamentaldiagramm des Durchgangs b. Das Kreisverkehrssystem hat keine markanten Auswirkungen auf die Ergebnisse. Lediglich die unteren Grenzen des Flusses liegen höher als bei Durchgang a.

Die höchsten Spitzen des Flusses weist Lauf a 6 auf. Dreimal liegt hier der Fluss über  $1,50 \text{ P/ms}$ . Generell pendelt der Fluss ab einer Dichte von  $1,00 \text{ P/m}^2$  zwischen  $0,75 \text{ P/ms}$  und  $1,20 \text{ P/ms}$ . Ab  $3,00 \text{ P/m}^2$  beginnt eine leicht abfallende Tendenz des Flusses, dabei wird  $0,50 \text{ P/ms}$  nicht unterschritten.

In den beiden Läufen mit Eingangsbreiten von  $3,20 \text{ m}$  und  $4,00 \text{ m}$  werden die höchsten Dichten erreicht. Maximal sind  $5,50 \text{ P/m}^2$  bei einem Fluss von etwa  $1,00 \text{ P/ms}$  zu verzeichnen. Die Fundamentaldiagramme der beiden Läufe des Durchgangs b sind ähnlicher Natur. In Abb 5.14 ist Lauf b 1 in rot, Lauf b 2 in blau abgebildet. Es fällt auf, dass in dem ersten Lauf der Fluss bei Dichten zwischen  $3,50 \text{ P/m}^2$  und  $4,70 \text{ P/m}^2$  um bis zu  $0,30 \text{ P/ms}$  höher ist als in dem zweiten Lauf. Dies resultiert aus der höheren Eingangsbreite in Lauf b 1. Es können schneller Personen den Versuchsaufbau betreten, wodurch der Fluss erhöht wird.

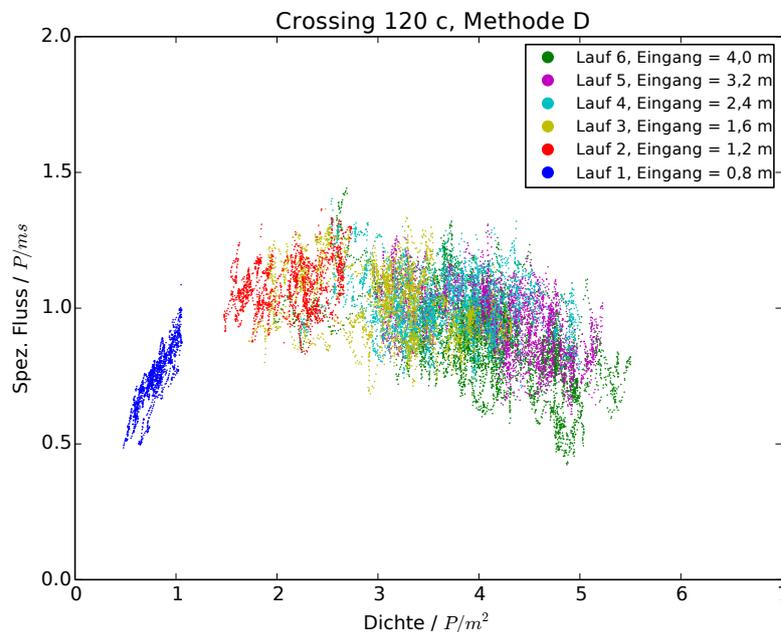
Die interessantesten Verläufe, besonders in Vergleich zu den anderen Durchgängen, zeigt Abb. 5.15. Anders als bei Durchgang a oder b bilden die Fundamentaldiagramme eine Kurve, deren Maximum bei etwa  $2,60 \text{ P/m}^2$  mit  $1,30 \text{ P/ms}$  liegt. Insgesamt ist der Anteil von Streuungen sehr gering. Die einzelnen Werte liegen dicht beisammen. Ab  $3,00 \text{ P/m}^2$  sinkt der Fluss stark. Bei  $5,00 \text{ P/m}^2$  wird nur noch ein Wert von  $0,50 \text{ P/ms}$  gemessen.

Die Ergebnisse der einzelnen Läufe gehen ineinander über. Bei geringer Eingangsbreite ist die Kapazität des Versuchsaufbaus noch nicht erreicht. Hierfür sprechen Flüsse zwischen  $0,60 \text{ P/ms}$  und  $1,25 \text{ P/ms}$ . Der Vergleich von Abb. 5.13, 5.14 und 5.15 erlaubt folgende Beobachtungen:

Bis  $1,00 \text{ P/m}^2$  steigt der Fluss mit zunehmender Dichte an. Bei einem Fluss von  $1,00 \text{ P/ms}$  sowie der Dichte von  $1,00 \text{ P/m}^2$  beginnt die Steigung abzunehmen. Zwischen  $2,00 \text{ P/m}^2$  und  $5,00 \text{ P/m}^2$  spielt sich der Fluss zwischen  $0,70 \text{ P/ms}$  und  $1,40 \text{ P/ms}$  ein. Bei einer Eingangsbreite von  $3,20 \text{ m}$  beginnt ab  $3,50 \text{ P/m}^2$  der Fluss zu sinken.

Die Ergebnisse der Durchgänge a und b unterscheiden sich nur insofern, dass die untere Grenze des Flusses in Durchgang b höher ist als in Durchgang a. Die oberen Grenzen der Flüsse sind gleich. Die Vorgabe einer Kreisverkehrsregelung hat folglich keinen großen Einfluss auf die Kapazität des Versuchsaufbaus. Anders ist Durchgang c. Durch den Einsatz der Säule findet ein Kapazitätsverlust statt. Die drastische Abnahme des Flusses ab  $4,50 \text{ P/m}^2$  spricht dafür, dass die Kapazität früher als bei den anderen Durchgängen erreicht wird. Dementsprechend stellen sich Kapazitätsüberschreitungen ein, welche zu einer Abnahme des Flusses führen.

Anders als in der Literatur stellen sich folglich, abhängig vom Einsatz der Säule, maximal Spitzen von  $1,50 \text{ P/ms}$  bei Dichten zwischen  $0,50 \text{ P/m}^2$  und  $5,50 \text{ P/m}^2$  ein. Natürlich steht die vorliegende Geometrie nicht stellvertretend für sämtliche Möglichkeiten. Auch die durch die Teilnahmebedingungen selektierten Probanden nehmen einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse. Durch den Einsatz von gesunden Menschen, frei von Platzangst, ist es möglich höhere Dichten hervorzurufen, als es unter normalen Umständen der Fall ist. Auch eine positive Beeinflussung des Flusses ist nicht auszuschließen, daher scheinen Flüsse über  $1,5 \text{ P/ms}$ , wie in Kap. 2 aufgeführt, äußerst unwahrscheinlich und sind folglich nicht zu bestätigen.



**Abbildung 5.15:** Fundamentaldiagramm des Durchgangs c. Sinken des Flusses ab einer Dichte von  $3,00 \text{ P/m}^2$  sowie weniger Streuung als bei den Durchgängen a und b.



## **Teil IV**

# **Schlussbetrachtungen**



## 6 Schlussbetrachtung

### 6.1 Zusammenfassung und Fazit

Die Auswertung des Experiments Crossing 120 der BaSiGo Experiment-Reihe führt zu dem Schluss, dass der Übergang von Staus zu kritischem Gedränge oftmals fließend ist. Liegt ein Stau vor und es strömen weitere Personen in die Geometrie, führt dies schnell zu der Entwicklung von sehr hohen Dichten. Eine Regulierung des Zuflusses durch verminderte Eingangsbreiten verringert die aufkommenden Dichten innerhalb der Geometrie und schafft gleichzeitig ein angenehmes Vorwärtskommen für die Fußgänger.

Die Trajektorien zeigen, dass viele Personen bevorzugt die Wege vorausgehender Personen nutzen. Dabei werden tendenziell jene Wege beschritten, welche der kürzesten Verbindung zwischen Start und Ziel entsprechen.

Immer wieder lassen sich bei selben Vorgaben bezüglich der Richtungen und des Verhaltens innerhalb des Kreuzungsbereichs Muster in den Trajektorien auffinden. Mit alleiniger Abbiegevorschrift weisen diese Muster Ähnlichkeit zu dem Verhalten von Abbiegern im Pkw-Verkehr auf Kreuzungen auf. Wird diese Vorgabe durch ein Kreisverkehrssystem erweitert, so findet nicht nur früh eine Gruppierung innerhalb der Ströme in Richtung Kreuzung, sondern auch eine Vorfahrtbeachtung innerhalb der Kreuzung im Sinne von „rechts vor links“ statt.

Generell sind die Probanden bemüht die Vorgaben des Versuchsleiters einzuhalten, dennoch treten immer wieder vereinzelt Fälle auf, in denen diese ignoriert werden. Allgemein entstehen geordnetere Strukturen innerhalb der Geometrie, je mehr Vorgaben gemacht wurden. Auch der Einsatz der Säule hat einen ordnenden Einfluss auf die Zustände während der Versuchsläufe. Gleichzeitig geht jedoch der Verlust der Möglichkeit kreative, alternative Routen durch überfüllte Bereiche zu finden insbesondere mit dem Einsatz der Säule einher.

Nicht zuletzt durch den beobachteten Abstand der Probanden zu der eingesetzten Säule werden in diesem Versuchsaufbau höhere Dichten erreicht. Generell entsteht ein Kapazitätsverlust der Kreuzung unter Verwendung der Säule.

In konfliktreichen Bereichen ist ein starkes Absinken der Geschwindigkeit zu verzeichnen. Höhere Geschwindigkeiten sind in der Regel nur in den sich zu Beginn des Versuchslaufs bereits etablierenden Fußgängerströmen zu notieren.

Es ist zu prüfen inwiefern die Ergebnisse dieses Experiments auf andere Situatio-

nen anzuwenden sind, da durch die Teilnahmebedingungen nur ein eingeschränktes Spektrum an Probanden zur Verfügung steht. Hierdurch können höhere Dichten sowie Geschwindigkeiten hervorgerufen werden. Dennoch sind entgegen der Literatur keine Spitzen der Flüsse über 1,50 P/ms zu verzeichnen. Auch die erreichten Dichten stimmen nur bedingt mit der Literatur überein.

## 6.2 Ausblick

Durch die spezielle Geometrie bleibt abzuwarten, ob andere Experimente der BaSiGo-Reihe mit anderen Geometrien ähnliche Werte wie Crossing 120 aufweisen.

In Anbetracht der Entwicklungen bei erhöhter Motivation ist zu untersuchen, welche Korrelation zwischen Motivation und Risikobereitschaft sowie Toleranz in Bezug auf Körperkontakt besteht. So führte ein Versuchslauf dieser Art von Crossing 120 zu deutlich höheren Dichten als zuvor.

Zudem ist es bedeutend herauszufinden, in welchen Situationen Personen Vorgaben ignorieren oder aber sich dazu entschließen diesen Folge zu leisten. Hier lässt sich erneut erkennen, wie wichtig die Zusammenarbeit der verschiedenen Disziplinen ist, handelt es sich dabei doch eher um eine Studie im Bereich der Soziologie.

# Literaturverzeichnis

- T. F. Bitzer. *Mikroskopische Modellierung und Simulation des Fussgängerverkehrs*. PhD thesis, Universität Stuttgart, August 2010.
- M. Boltes. PeTrack - Automatic Extraction of Pedestrian Trajectories from Video Recordings, Juli 2014. URL [HTTP://WWW.FZ-JUELICH.DE/IAS/JSC/EN/RESEARCH/MODELLINGSIMULATION/CIVILSECURITYTRAFFIC/PEDESTRIANDYNAMICS/ACTIVITIES/PETRACK/PETRACKNODE.HTML](http://www.fz-juelich.de/ias/jsc/en/research/modellingSimulation/civilSecurityTraffic/pedestrianDynamics/activities/petrack/petrackNode.html). Zugriff: 29. Januar 2015.
- Buchmueller, S. und Weidmann, U. Parameters of pedestrians, pedestrian traffic and walking facilities. Technical Report Schriftenreihe 132, ETH, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Juli 2007.
- W. Daamen. Modelling Passenger Flows in Public Transport Facilities. Trail thesis series, The Netherlands TRAIL Research School, 2004.
- P. J. DiNunno. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. National Fire Protection Association, Quincy MA, third edition, 2002.
- FGSV. *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen*. Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, 2001. Fassung 2009.
- F. Friedrich. Bausteine für die Sicherheit von Großveranstaltungen. URL [HTTP://WWW.BASIGO.DE](http://www.basigo.de). Zugriff: 15. Januar 2015.
- Habicht, A. T. und Braaksma, J. P. Effective width of pedestrian corridors. *Journal of Transportation Engineering*, 110/1:80–93, 1984.
- Holl, S. und Seyfried, A. Rettungswege und Evakuierung - Teil 1. In *Planerischer und konstruktiver Brandschutz, Evakuierung*, 2013. Vorlesung.
- Jülich Supercomputing Centre. BaSiGo-Experimente - Teilnahmebedingungen, Juni 2013. URL [HTTP://WWW.FZ-JUELICH.DE/IAS/JSC/EN/RESEARCH/MODELLINGSIMULATION/CIVILSECURITYTRAFFIC/PROJECTS/BASIGO/EXPERIMENTE\\_NODE.HTML](http://www.fz-juelich.de/ias/jsc/en/research/modellingSimulation/civilSecurityTraffic/projects/basigo/experimente_node.html). Zugriff: 15. Januar 2015.

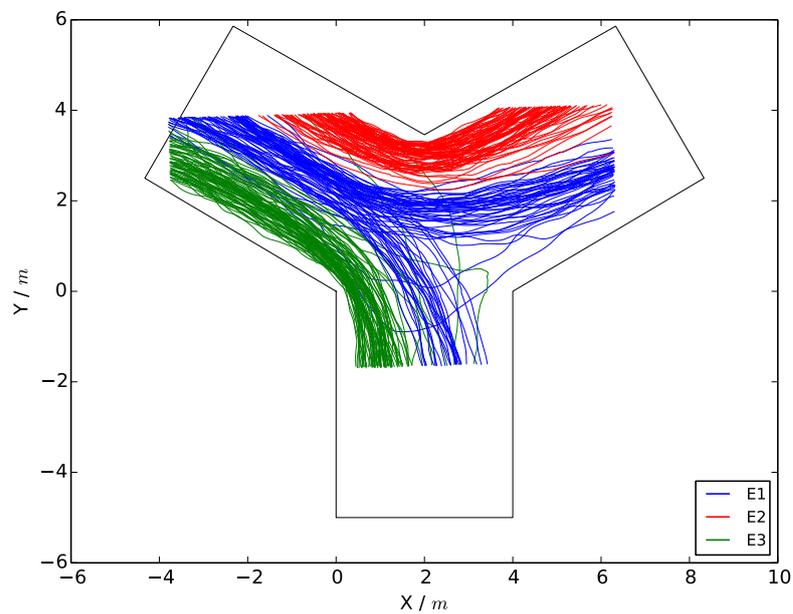
- Kemloh, A. U. und Zhang, J. JuPedSim - Framework for pedestrian dynamics simulations, August 2014. URL [HTTP://WWW.FZ-JUELICH.DE/IAS/JSC/EN/RESEARCH/MODELLINGSIMULATION/CIVILSECURITYTRAFFIC/PEDESTRIANDYNAMICS/ACTIVITIES/JUPEDSIM/JUPEDSIMNODE.HTML](http://www.fz-juelich.de/ias/jsc/en/research/modelling/simulation/civilsecuritytraffic/pedestriandynamics/activities/jupedsim/jupedsimnode.html). Zugriff: 29. Januar 2015.
- D. Oeding. Verkehrsbelastung und Dimensionierung von Gehwegen und anderen Anlagen des Fussgängerverkehrs. Forschungsbericht 22, Technische Hochschule Braunschweig, 1963.
- J. M. Schopf. *Bewegungsabläufe, Dimensionierung und Qualitätsstandards für Fussgänger, Radfahrer und Kraftfahrzeugverkehr*. PhD thesis, Technischen Universität Wien, Oktober 1985.
- U. Weidmann. Transporttechnik der Fussgänger. Technical Report Schriftenreihe des IVT Nr. 90, Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau, ETH Zürich, ETH Zürich, 1993. Zweite, ergänzte Auflage.
- J. Zhang. *Pedestrian fundamental diagrams: comparative analysis of experiments in different geometries*. PhD thesis, Bergische Universität Wuppertal Fachbereich D - Abt. Bauingenieurwesen, April 2012.

**Teil V**

**Anhang**

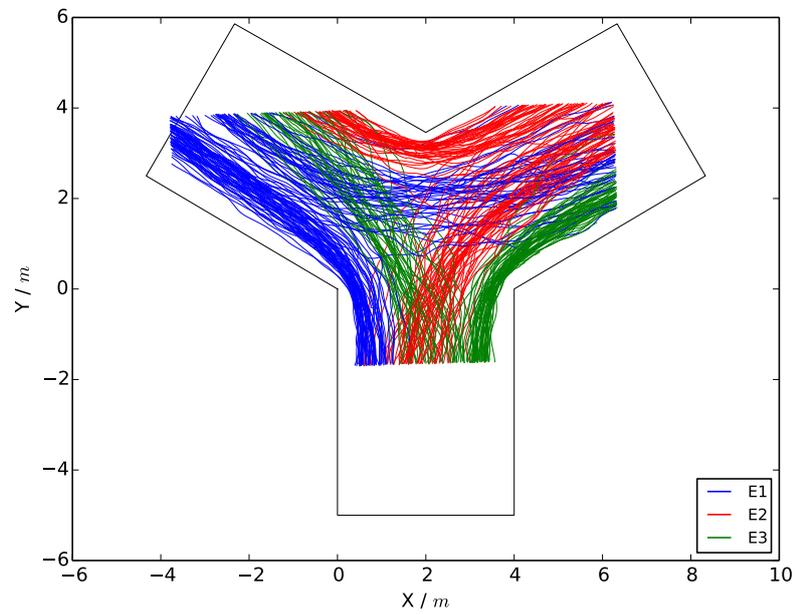


# A Trajektorien

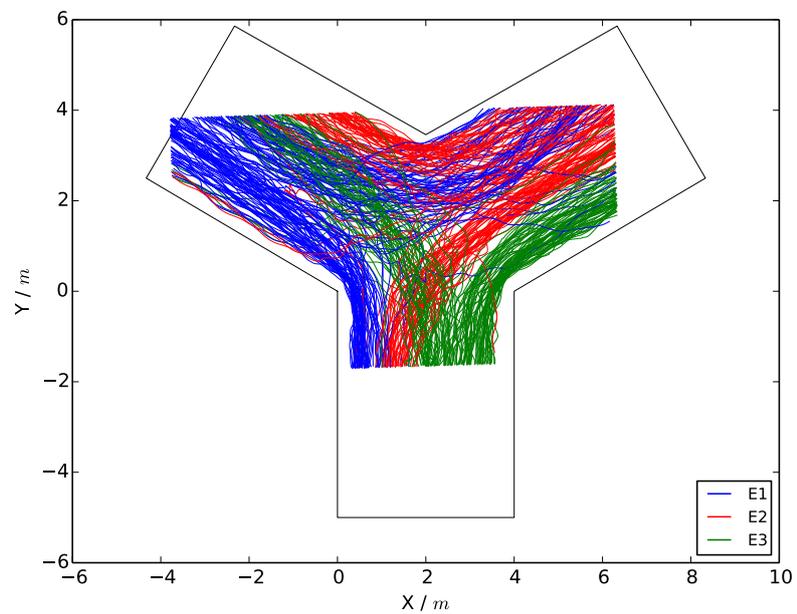


**Abbildung A.1:** Trajektorien des Laufs a 1

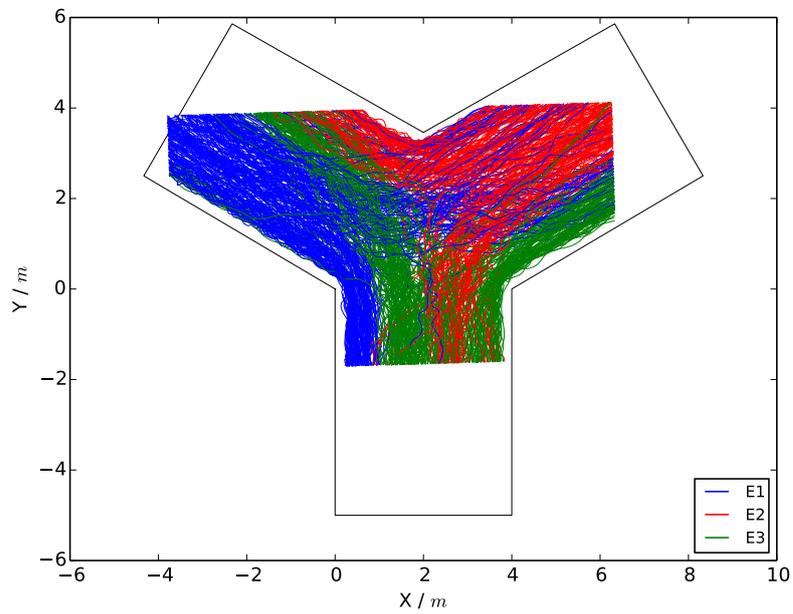
Die Linienbildung in den verschiedenen Läufen des Durchgangs a ähnelt sich sehr. Trotz verschiedener Eingangsbreiten und dadurch bedingt unterschiedlicher Anzahl von involvierten Personen bilden sich immer wieder sehr ähnliche Ströme aus. Eine Ausnahme bildet hierbei Lauf a 1 auf Grund der anderen Abbiegevorgaben.



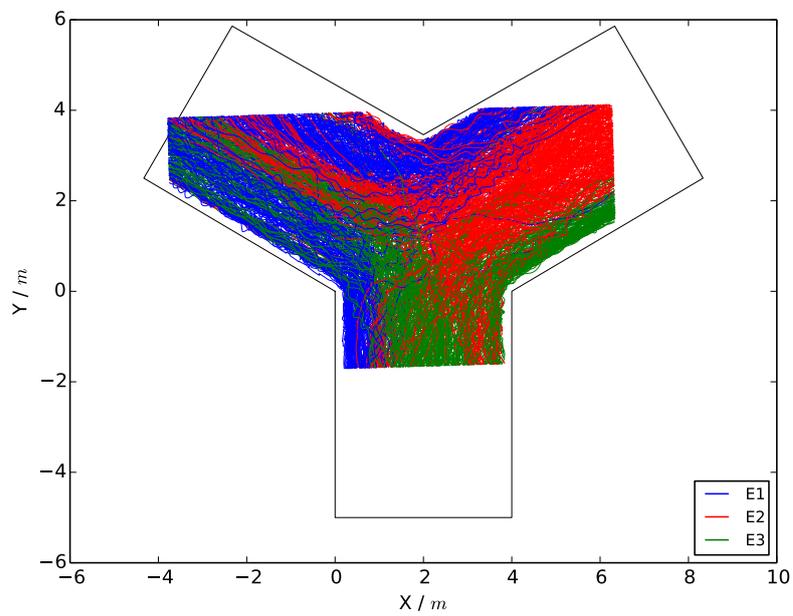
**Abbildung A.2:** Trajektorien des Laufs a 2



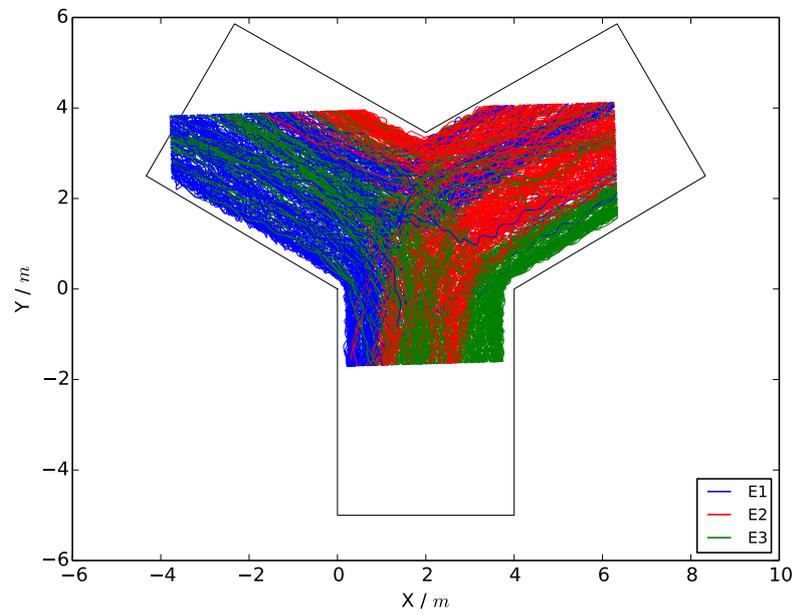
**Abbildung A.3:** Trajektorien des Laufs a 3. Diese Abb. wird in Kap. 4.4 genauer untersucht.



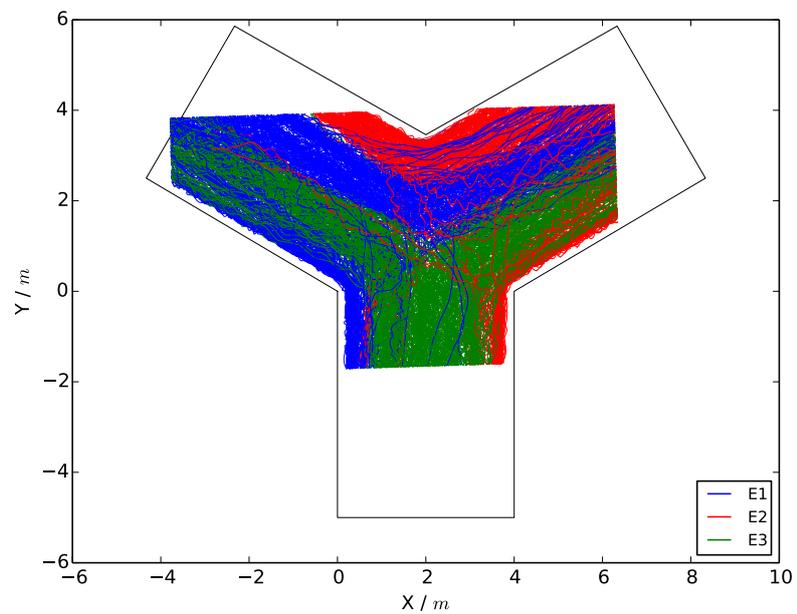
*Abbildung A.4: Trajektorien des Laufs a 4*



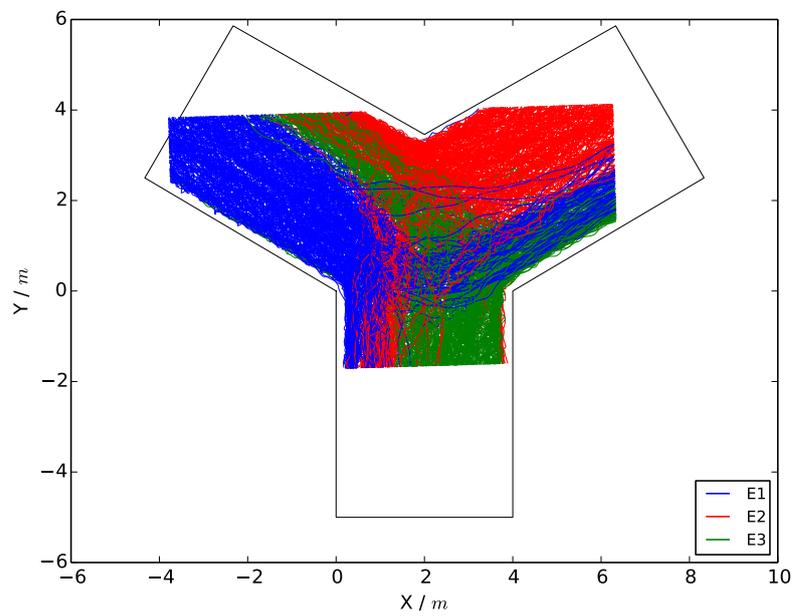
*Abbildung A.5: Trajektorien des Laufs a 5*



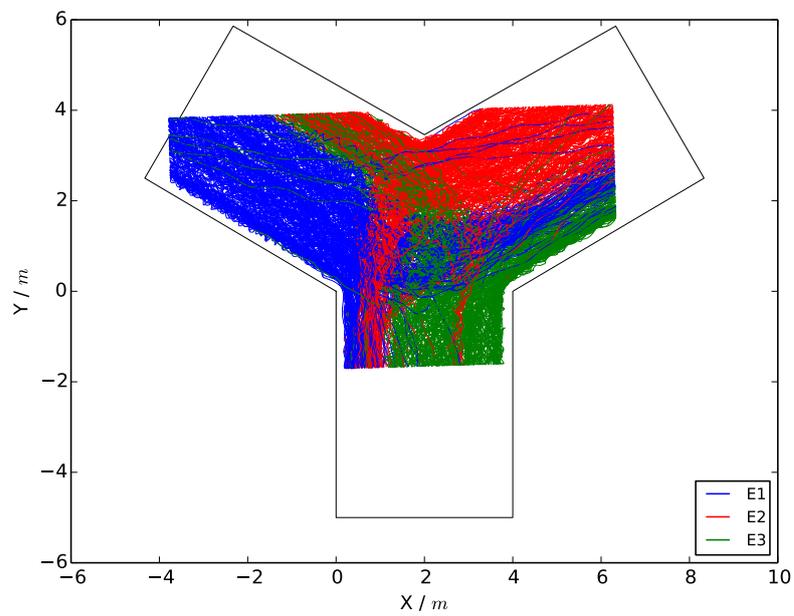
**Abbildung A.6:** Trajektorien des Laufs a 6



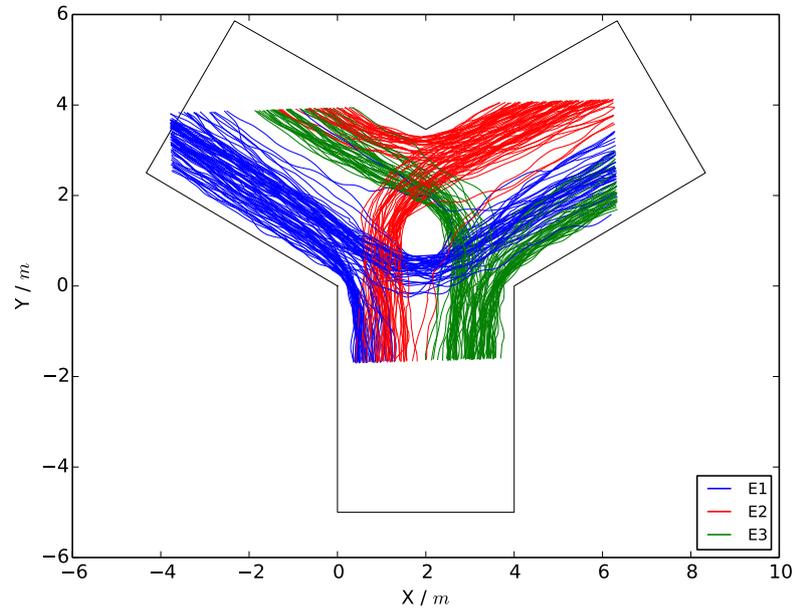
**Abbildung A.7:** Trajektorien des Laufs a 7



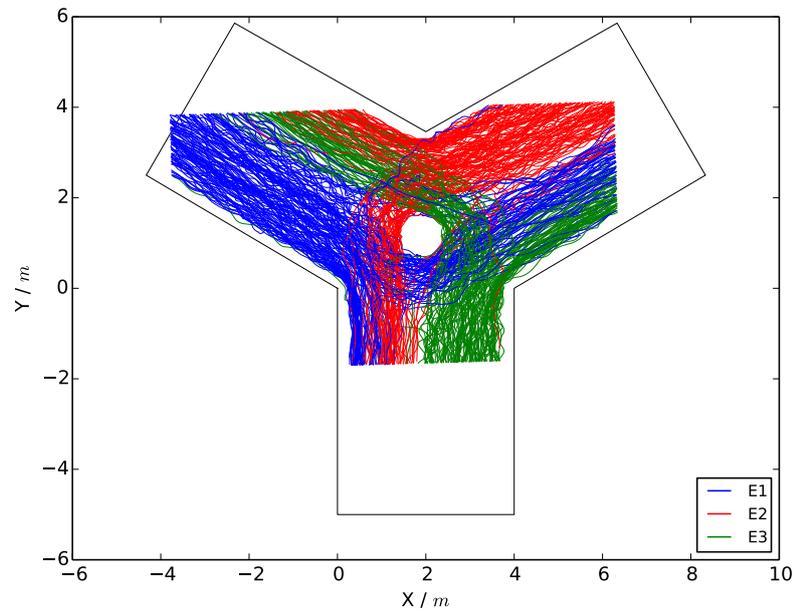
**Abbildung A.8:** Trajektorien des Laufs b 1



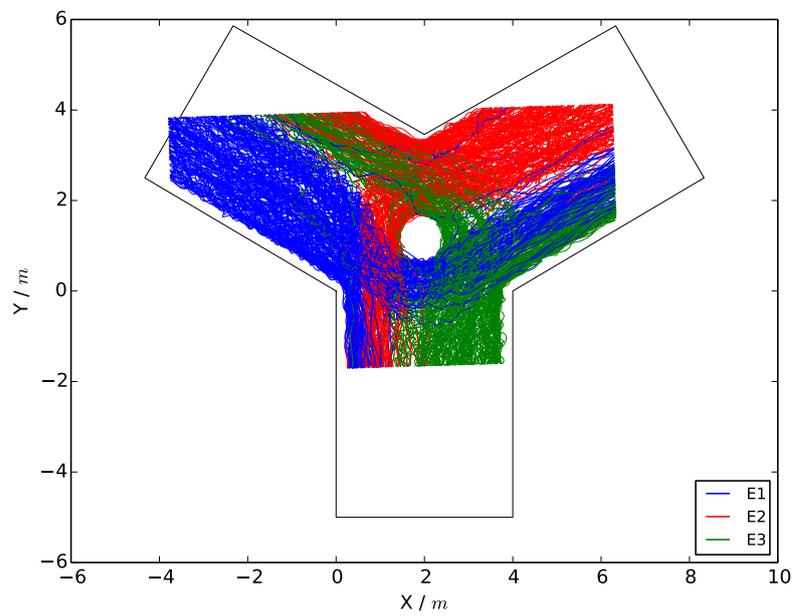
**Abbildung A.9:** Trajektorien des Laufs b 2



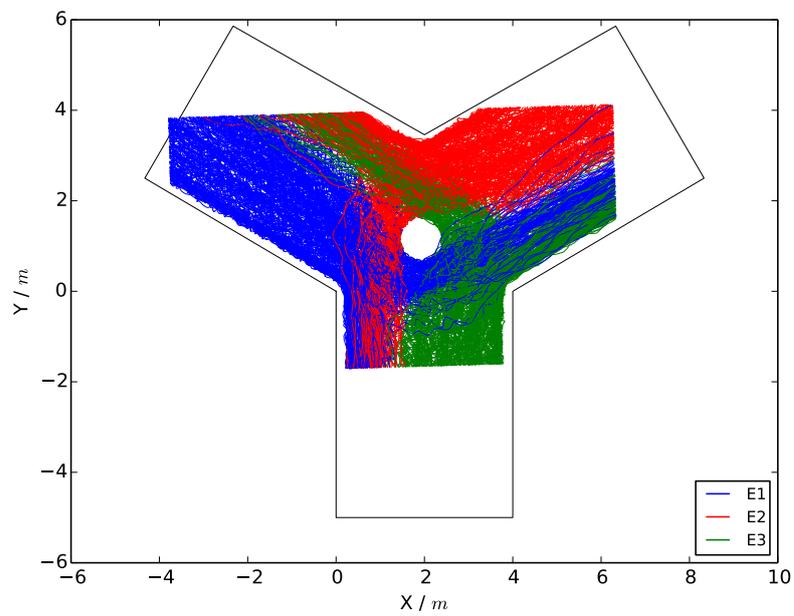
*Abbildung A.10: Trajektorien des Laufs c 1*



*Abbildung A.11: Trajektorien des Laufs c 2*



**Abbildung A.12:** Trajektorien des Laufs c 3



**Abbildung A.13:** Trajektorien des Laufs c 4

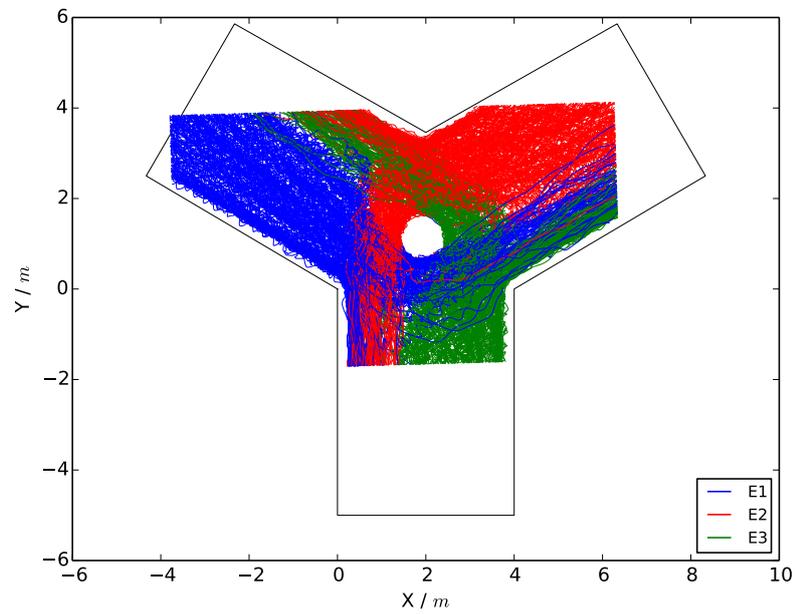


Abbildung A.14: Trajektorien des Laufs c 5

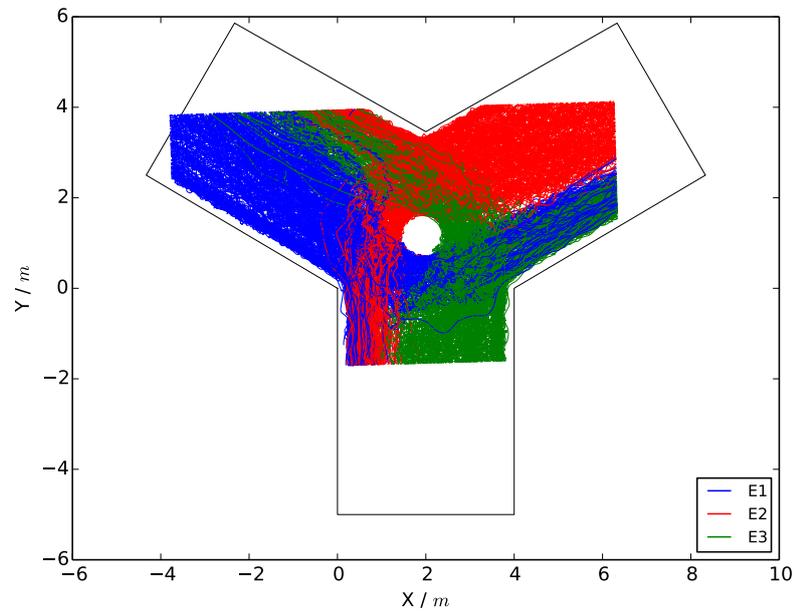
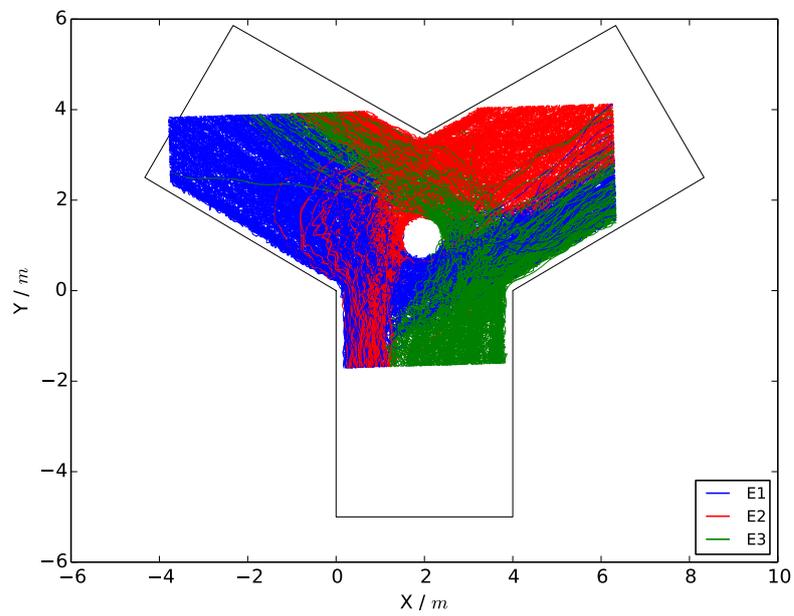


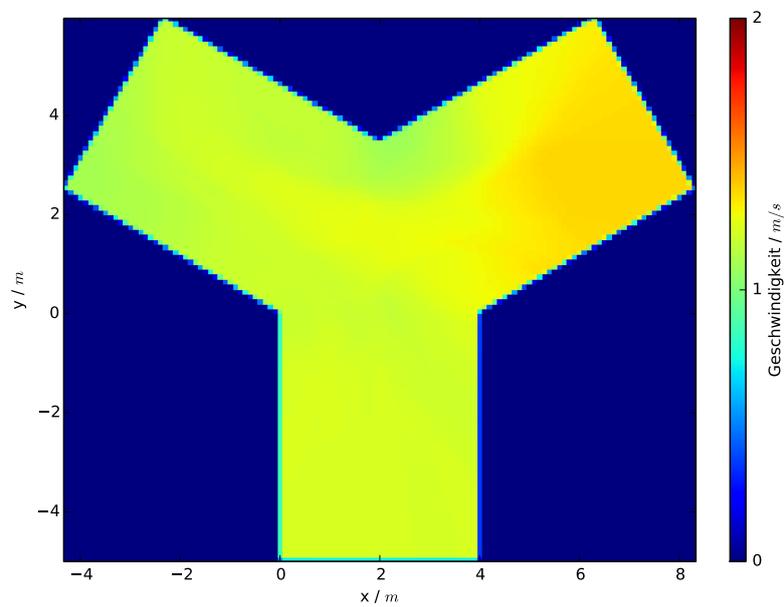
Abbildung A.15: Trajektorien des Laufs c 6



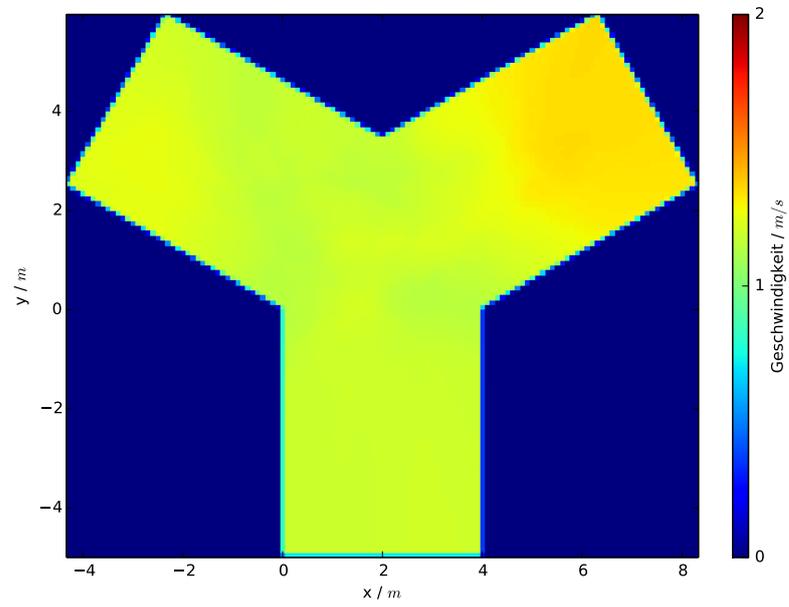
**Abbildung A.16:** Trajektorien des Laufs c 7

## B Geschwindigkeitsprofile

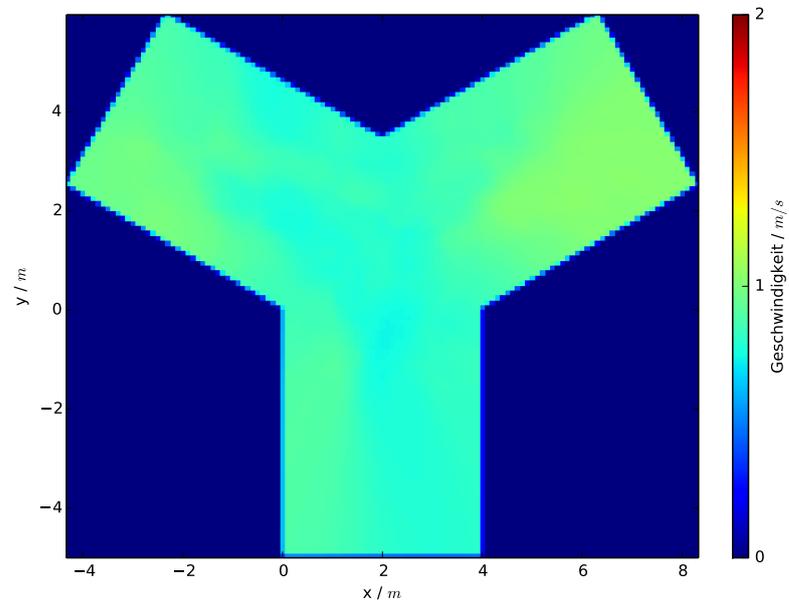
In diesem Teil des Anhangs befinden sich die Geschwindigkeitsprofile der Läufe a 1 bis a 6, b 2 sowie c 1 bis c 5 und c 7.



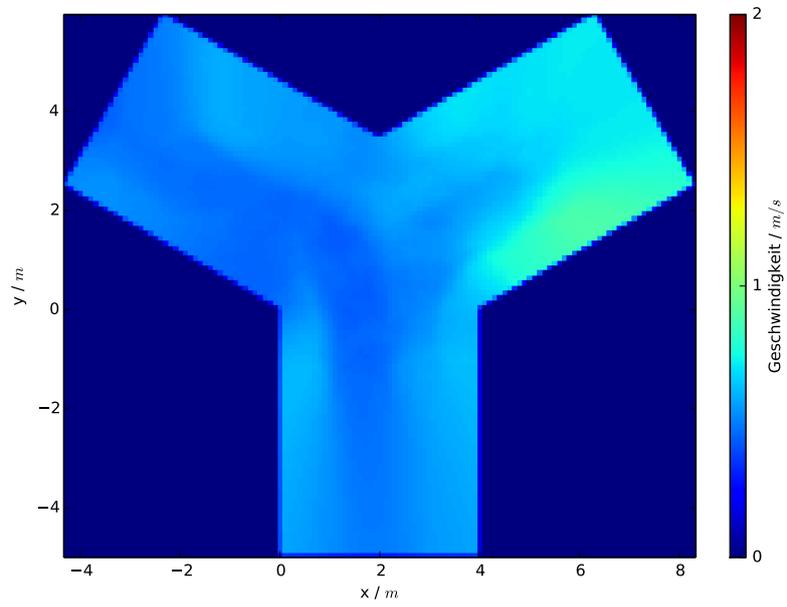
*Abbildung B.1: Geschwindigkeitsprofil Lauf a 1*



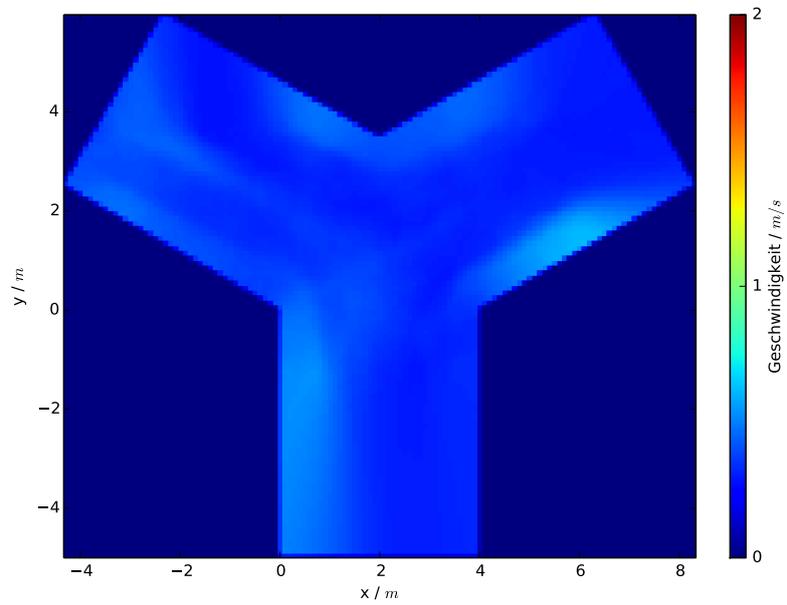
*Abbildung B.2: Geschwindigkeitsprofil Lauf a 2*



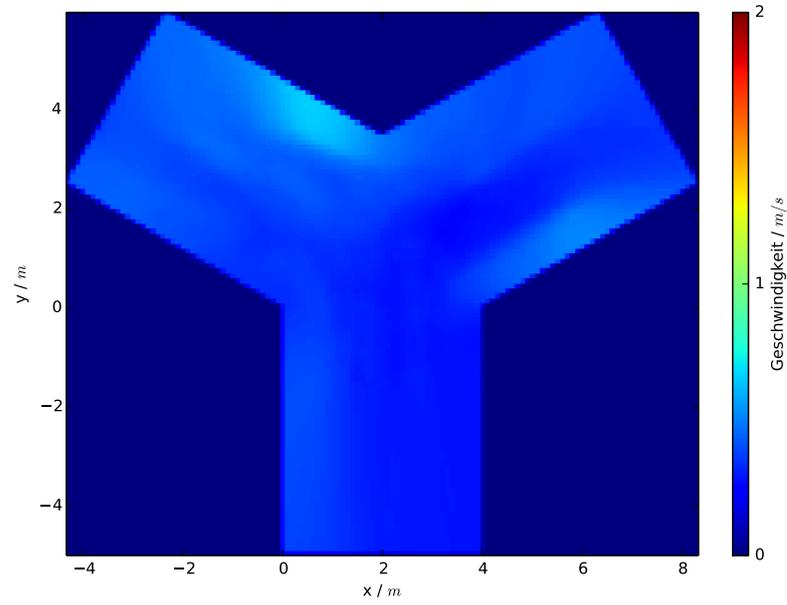
*Abbildung B.3: Geschwindigkeitsprofil Lauf a 3*



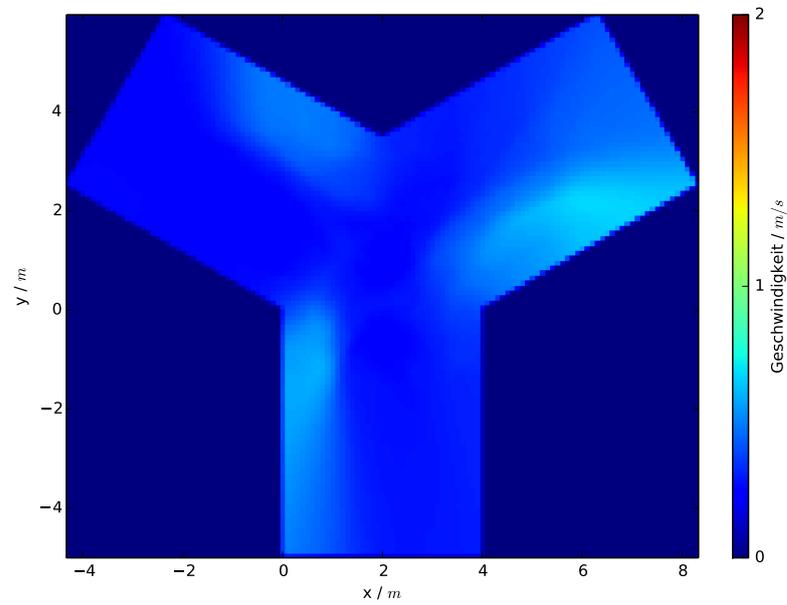
*Abbildung B.4: Geschwindigkeitsprofil Lauf a 4*



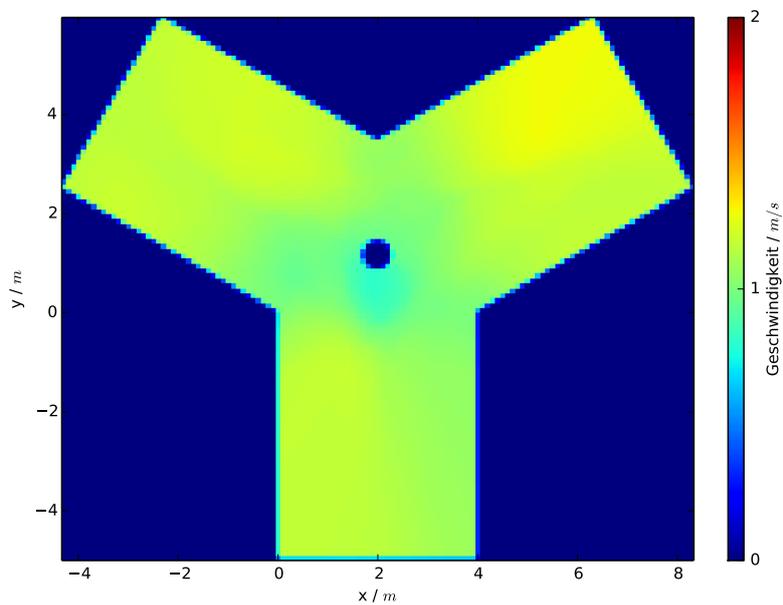
*Abbildung B.5: Geschwindigkeitsprofil Lauf a 5*



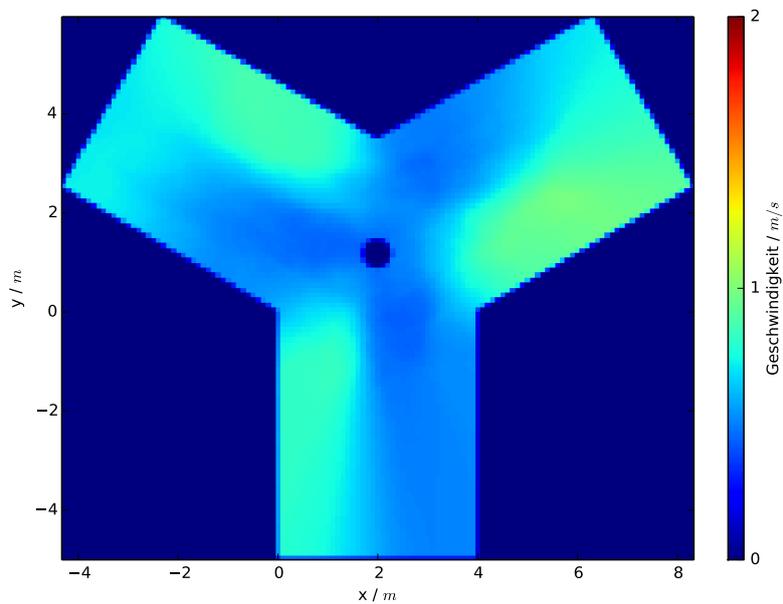
**Abbildung B.6:** Geschwindigkeitsprofil Lauf a 6



**Abbildung B.7:** Geschwindigkeitsprofil Lauf b 2



*Abbildung B.8: Geschwindigkeitsprofil Lauf c 1*



*Abbildung B.9: Geschwindigkeitsprofil Lauf c 2*

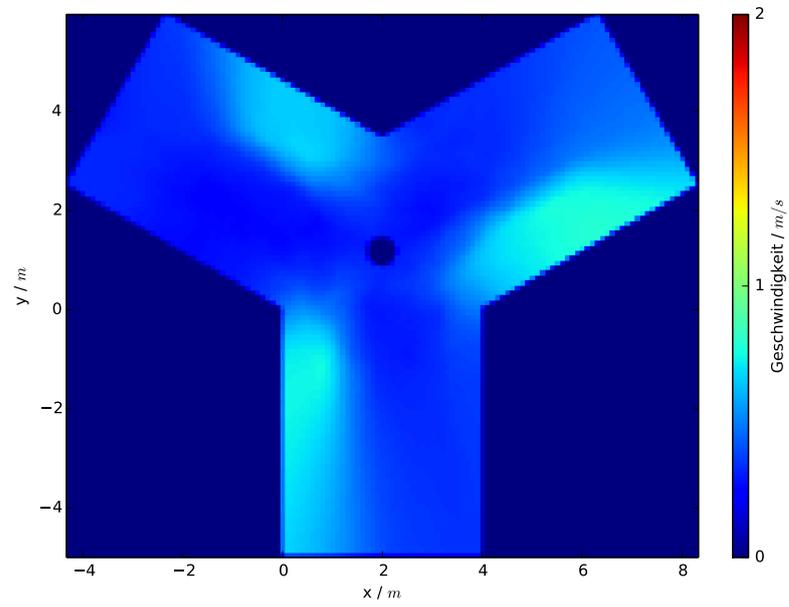


Abbildung B.10: Geschwindigkeitsprofil Lauf c 3

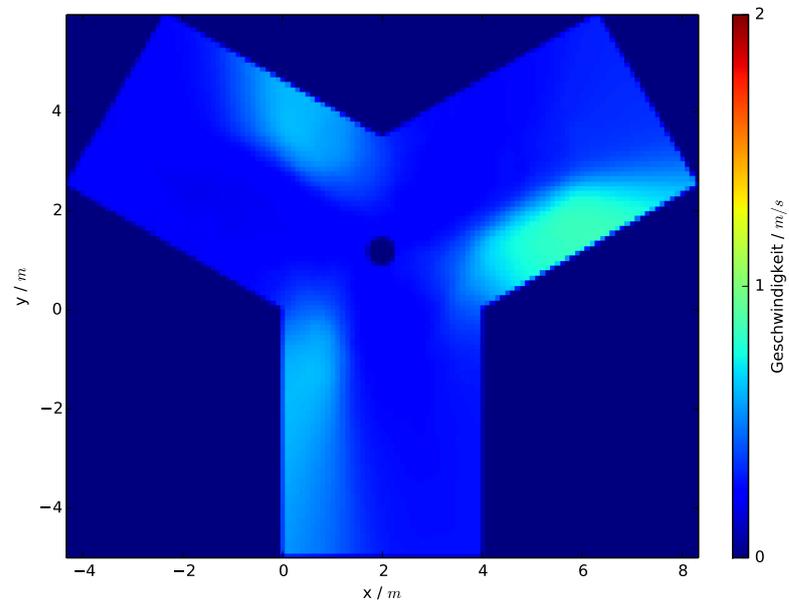
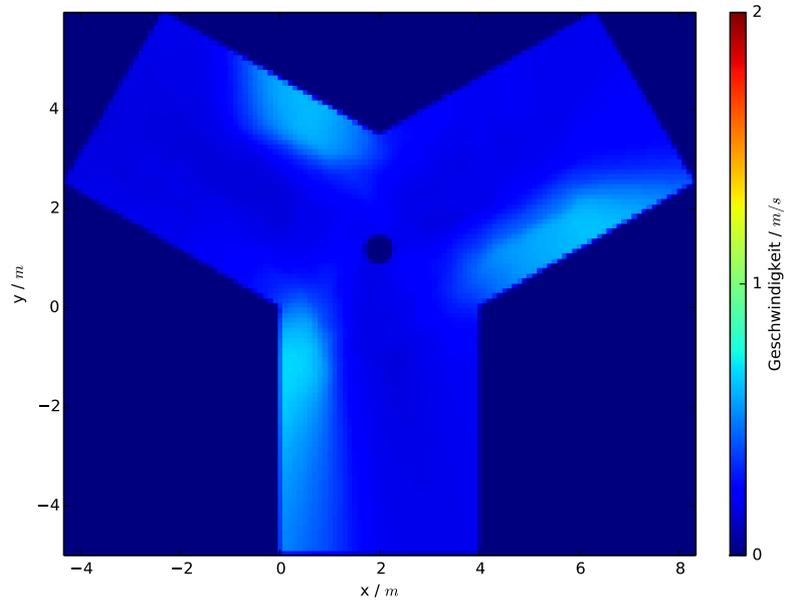
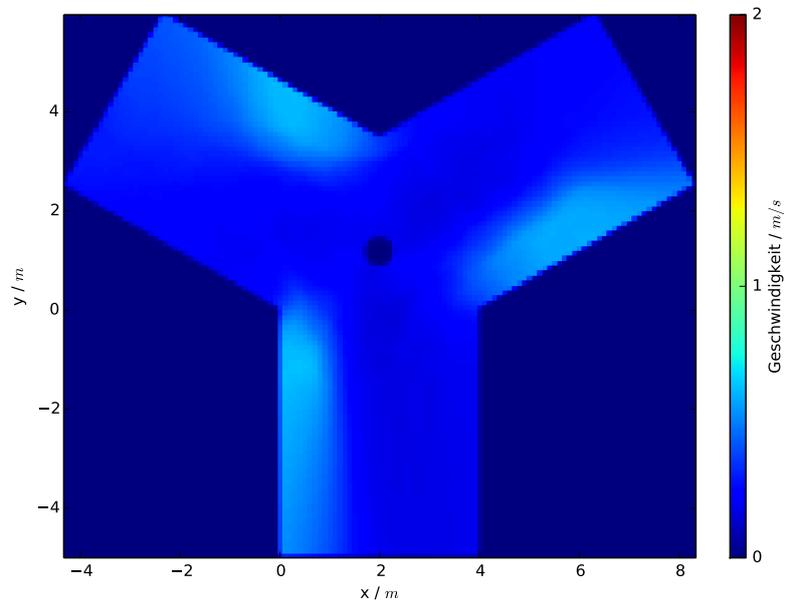


Abbildung B.11: Geschwindigkeitsprofil Lauf c 4



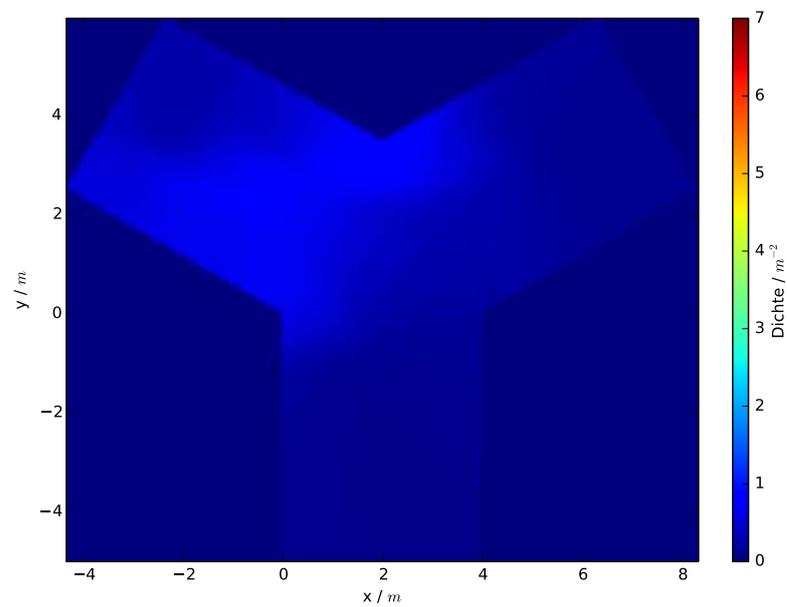
*Abbildung B.12: Geschwindigkeitsprofil Lauf c 5*



*Abbildung B.13: Geschwindigkeitsprofil Lauf c 7*

## C Profile der Dichte

Nachfolgend sind die Profile der Dichte der Läufe a 1 bis a 6, b 2 sowie c 1 bis c 5 und c 7 aufgeführt.



*Abbildung C.1: Profil der Dichte Lauf a 1*

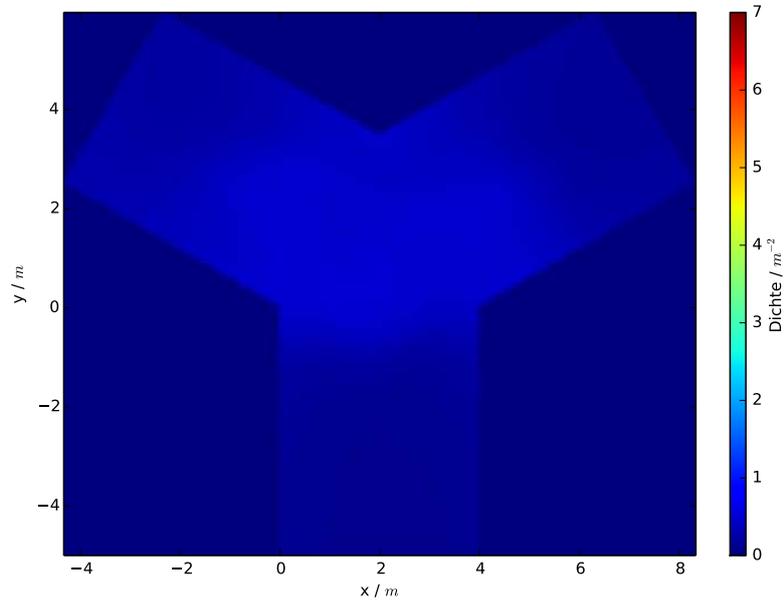


Abbildung C.2: Profil der Dichte Lauf a 2

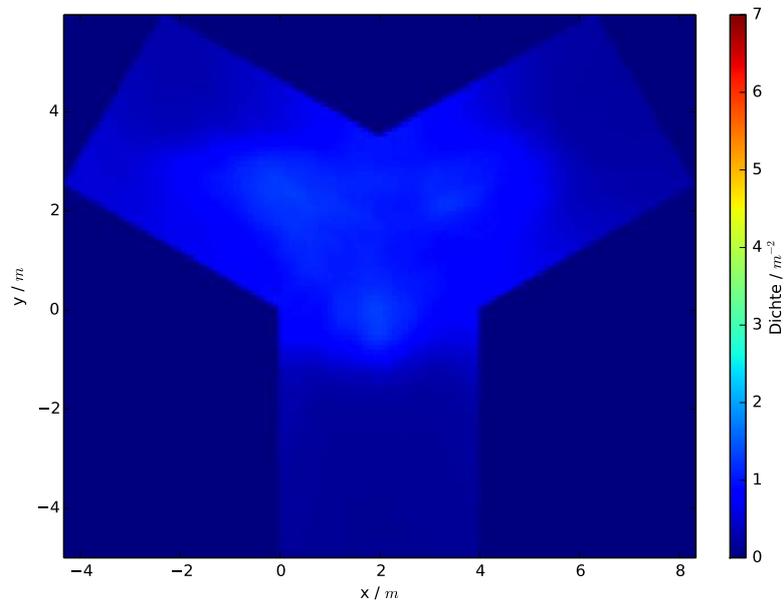


Abbildung C.3: Profil der Dichte Lauf a 3

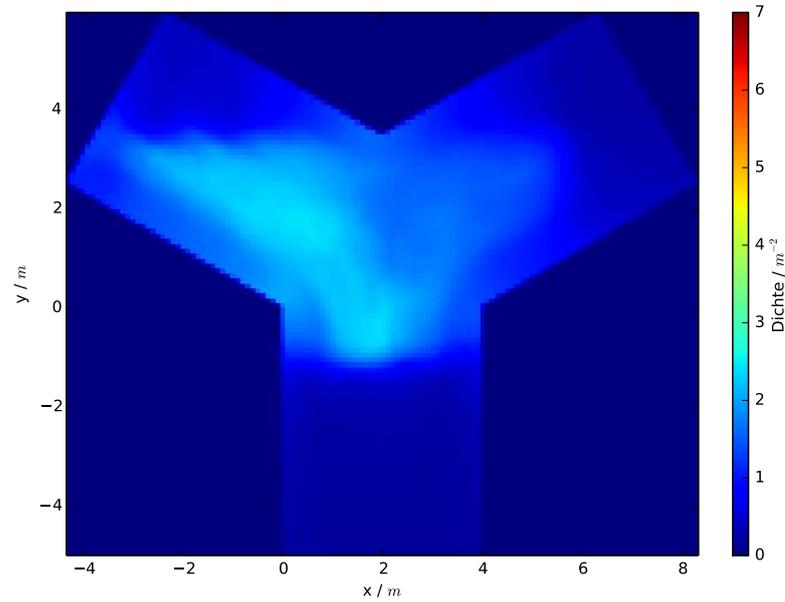


Abbildung C.4: Profil der Dichte Lauf a 4

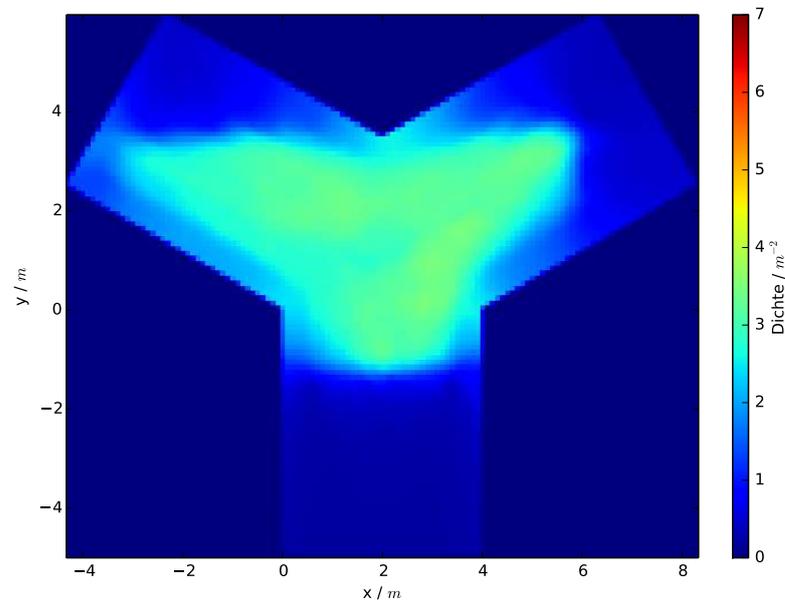


Abbildung C.5: Profil der Dichte Lauf a 5

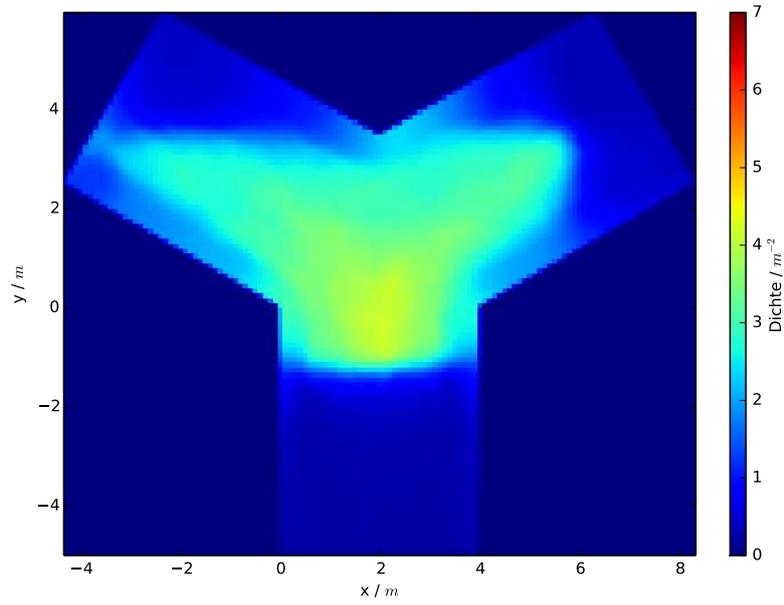


Abbildung C.6: Profil der Dichte Lauf a 6

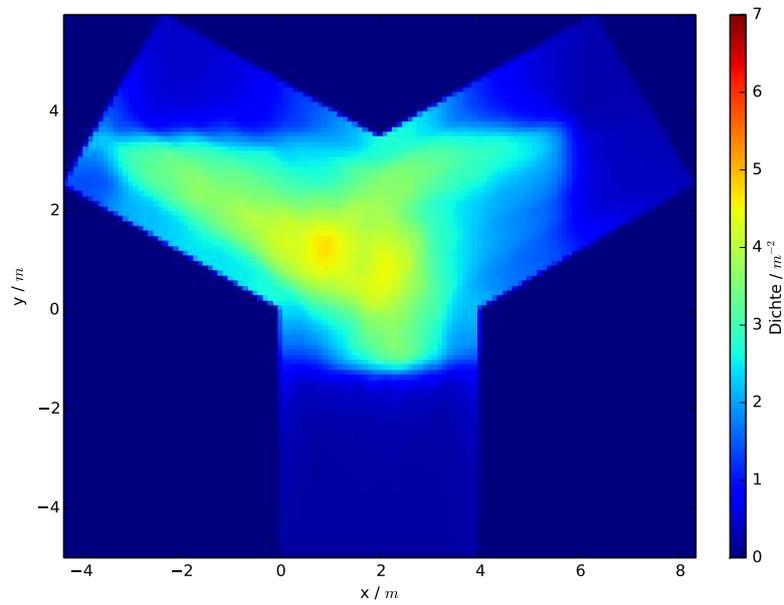


Abbildung C.7: Profil der Dichte Lauf b 2

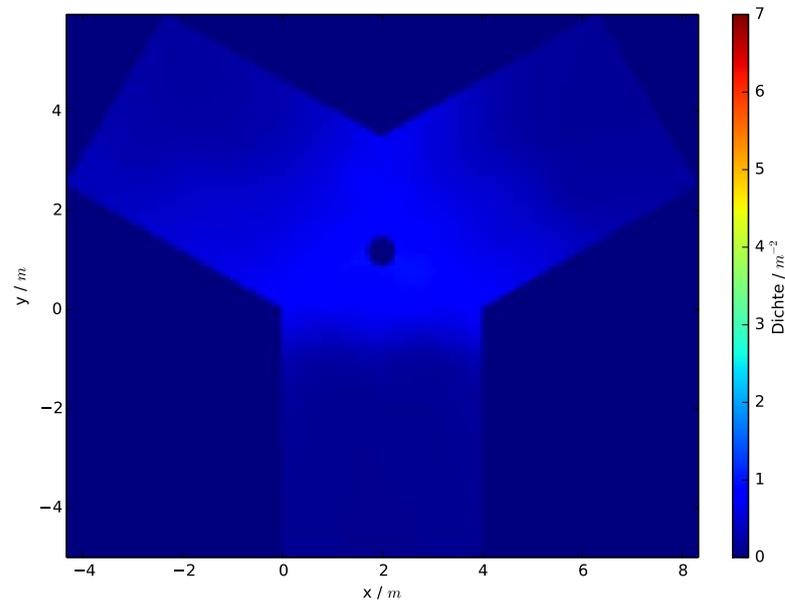


Abbildung C.8: Profil der Dichte Lauf c 1

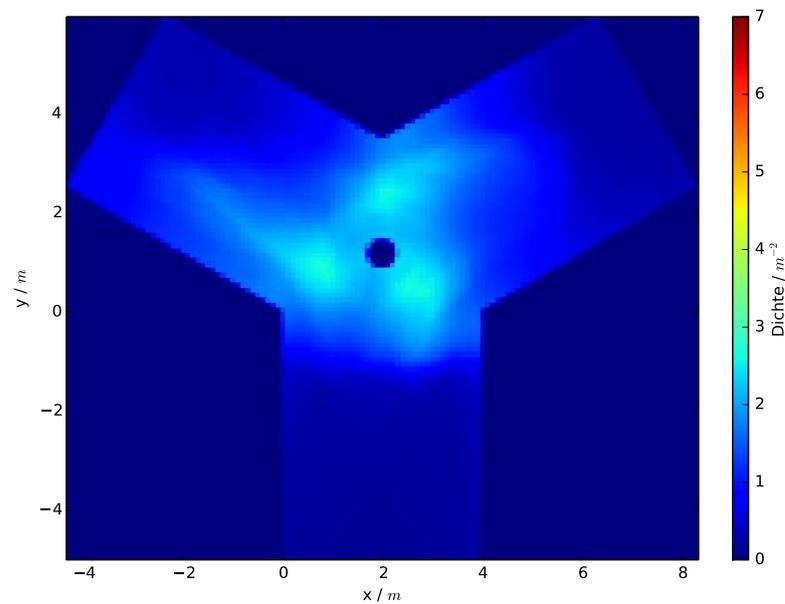


Abbildung C.9: Profil der Dichte Lauf c 2

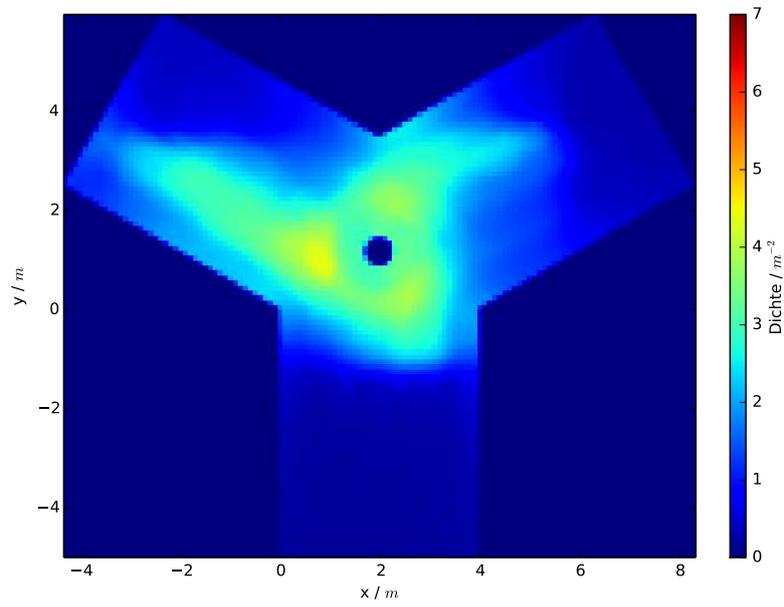


Abbildung C.10: Profil der Dichte Lauf c 3

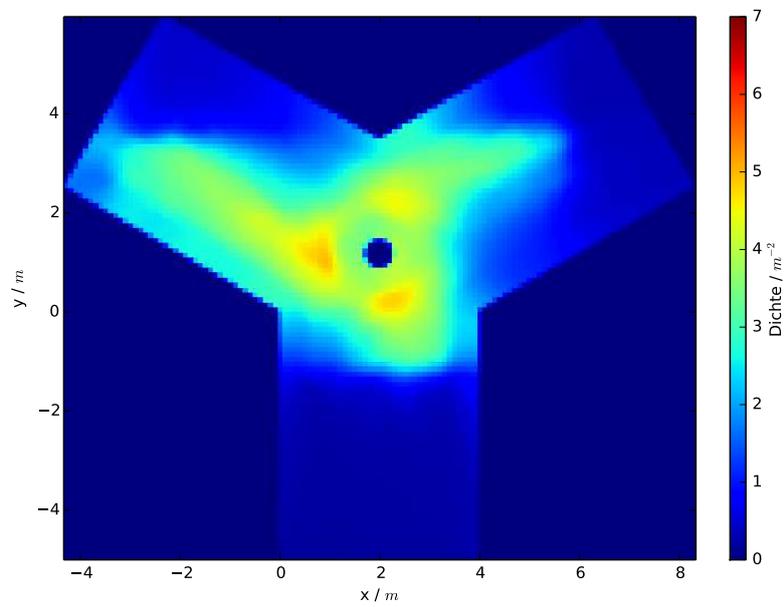


Abbildung C.11: Profil der Dichte Lauf c 4

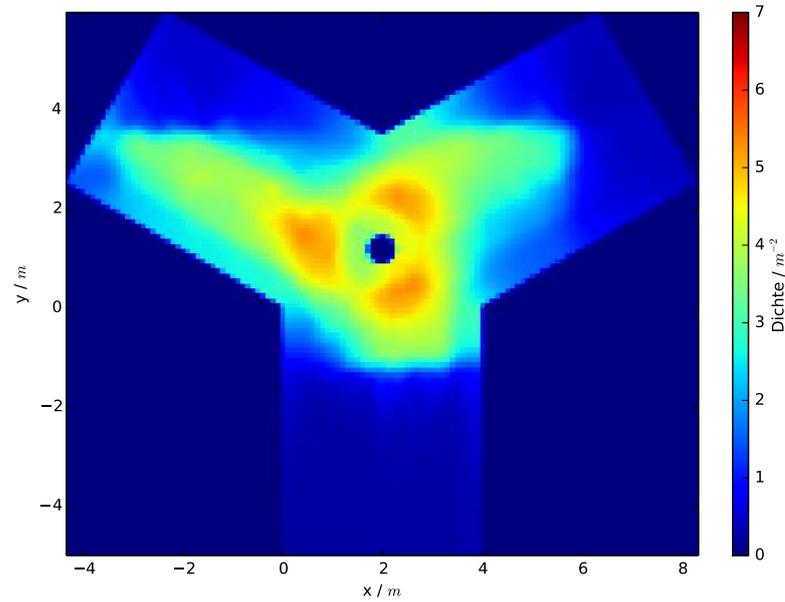


Abbildung C.12: Profil der Dichte Lauf c 5

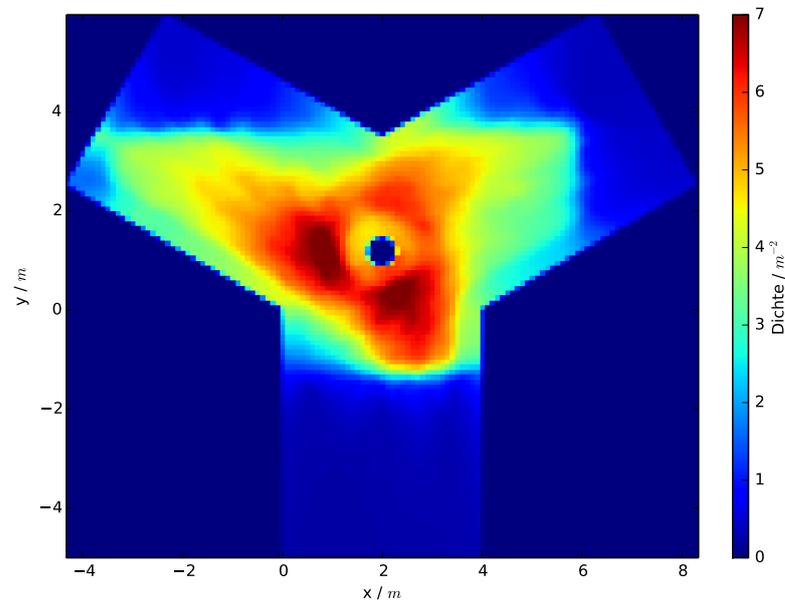
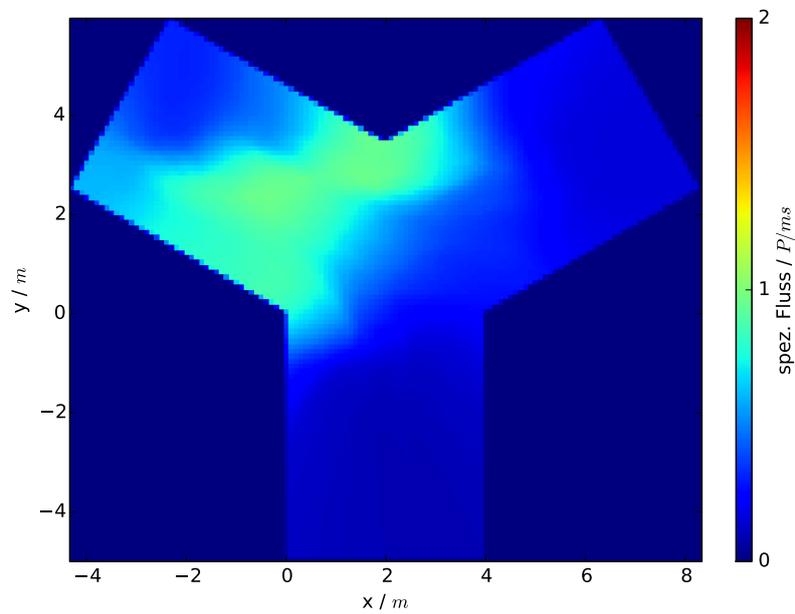


Abbildung C.13: Profil der Dichte Lauf c 7

## D Profile der Dichte

Schließlich die aus den Daten der Geschwindigkeit und der Dichte resultierenden Profile der Flüsse der Läufe a 1 bis a 6, b 2 sowie c 1 bis c 5 und c 7:



*Abbildung D.1: Profil des Flusses Lauf a 1*

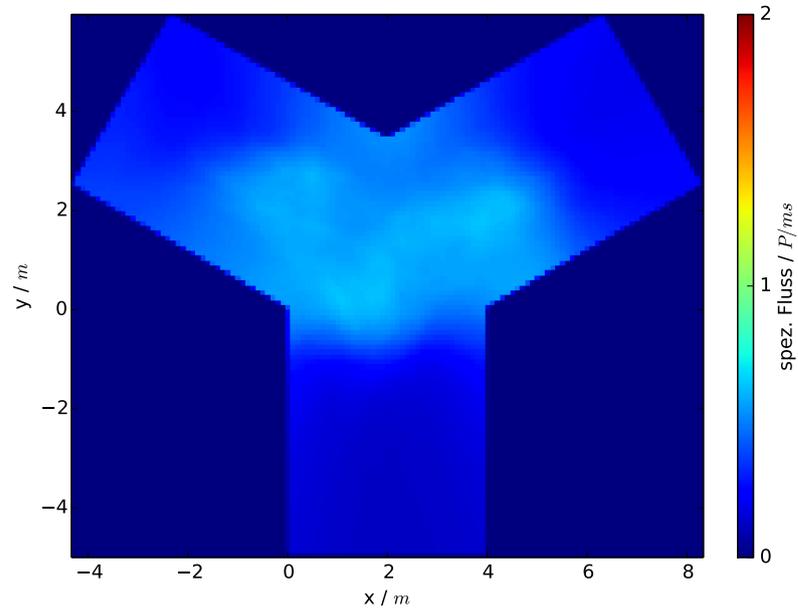


Abbildung D.2: Profil des Flusses Lauf a 2

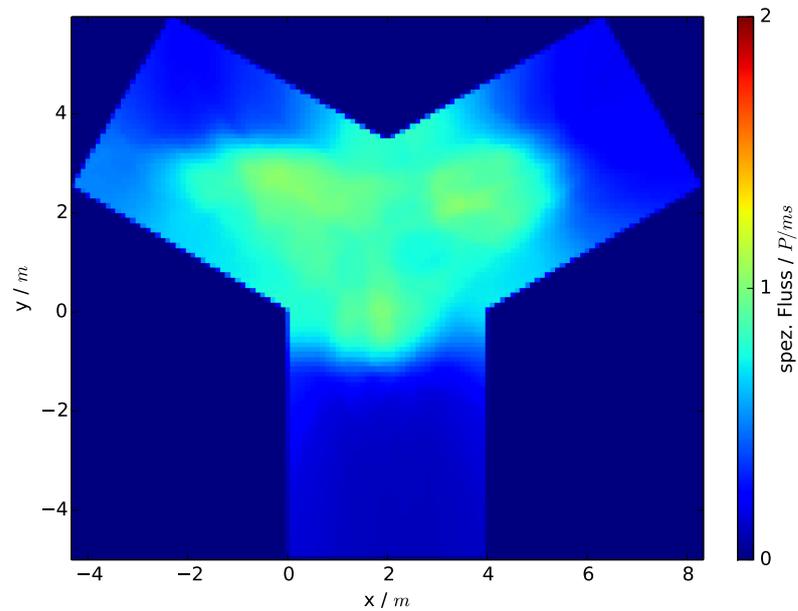
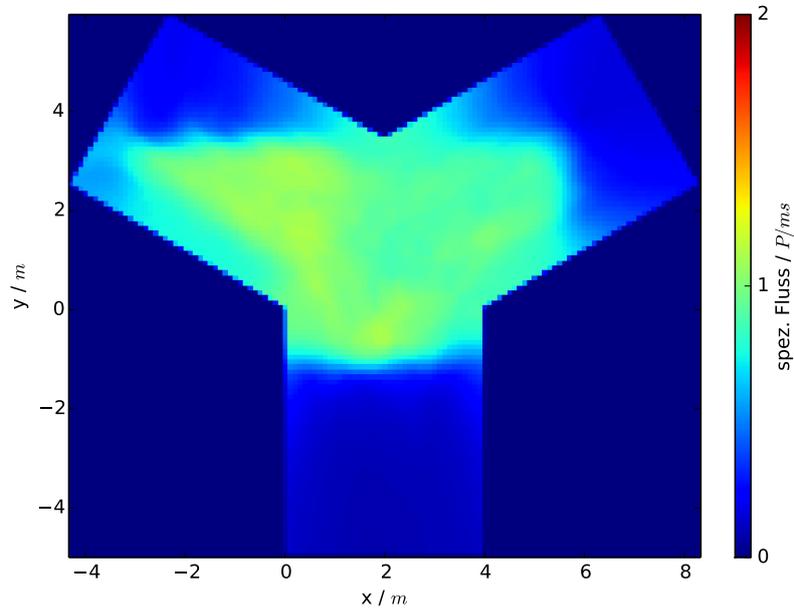
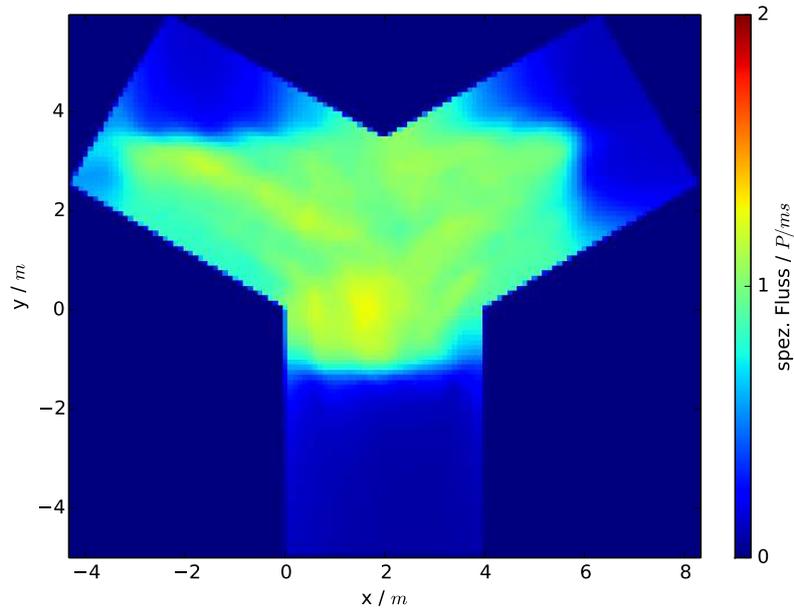


Abbildung D.3: Profil des Flusses Lauf a 3



*Abbildung D.4: Profil des Flusses Lauf a 4*



*Abbildung D.5: Profil des Flusses Lauf a 5*

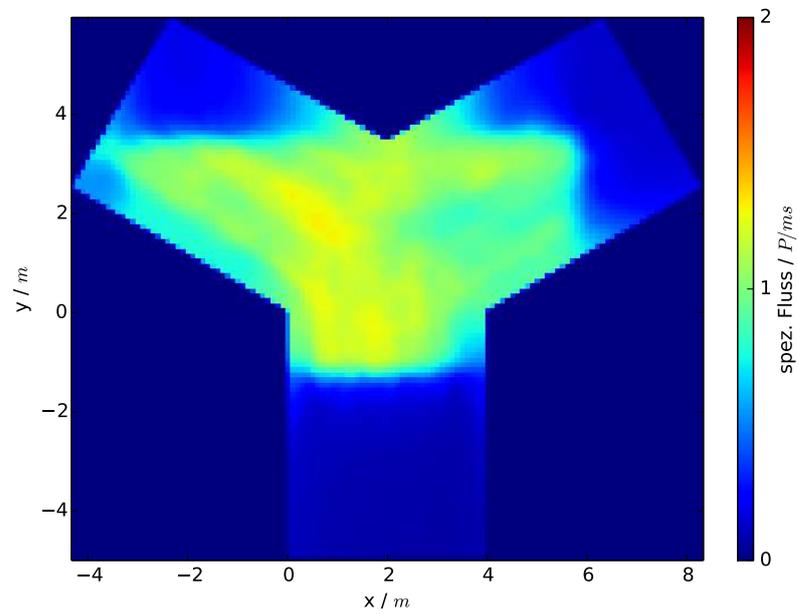


Abbildung D.6: Profil des Flusses Lauf a 6

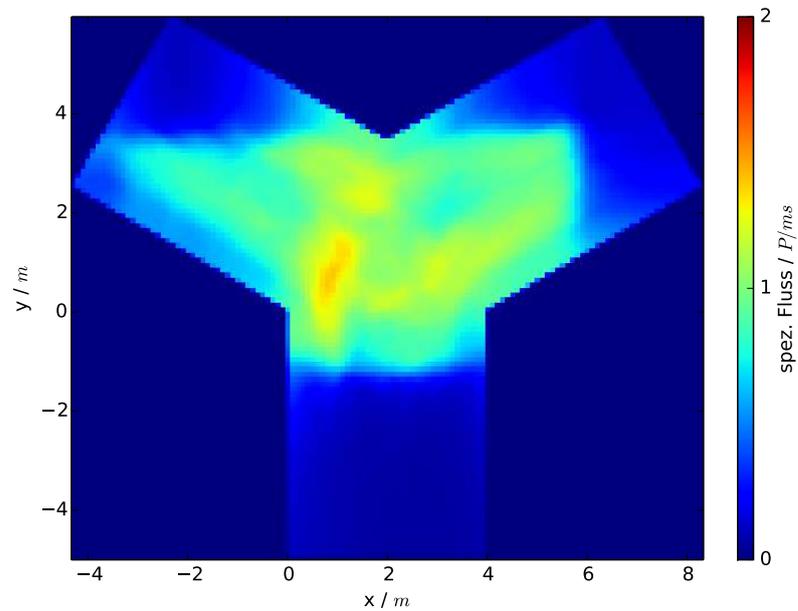
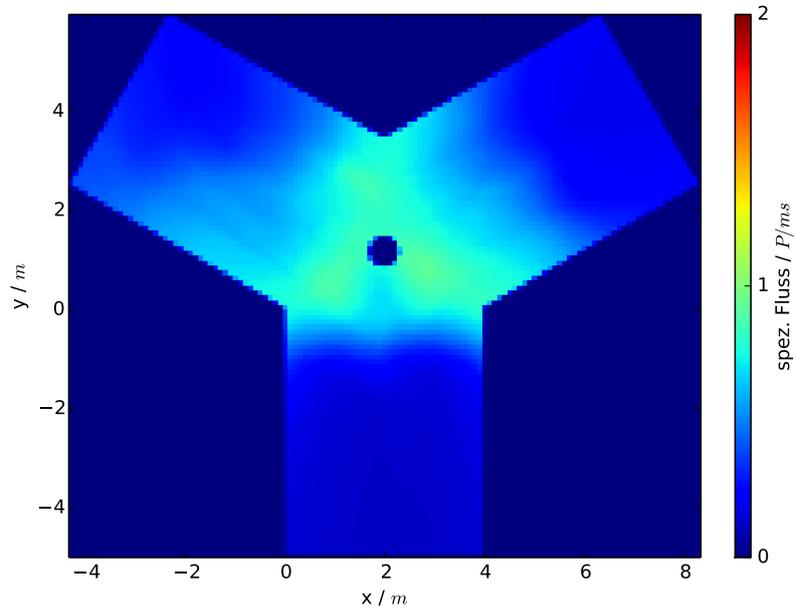
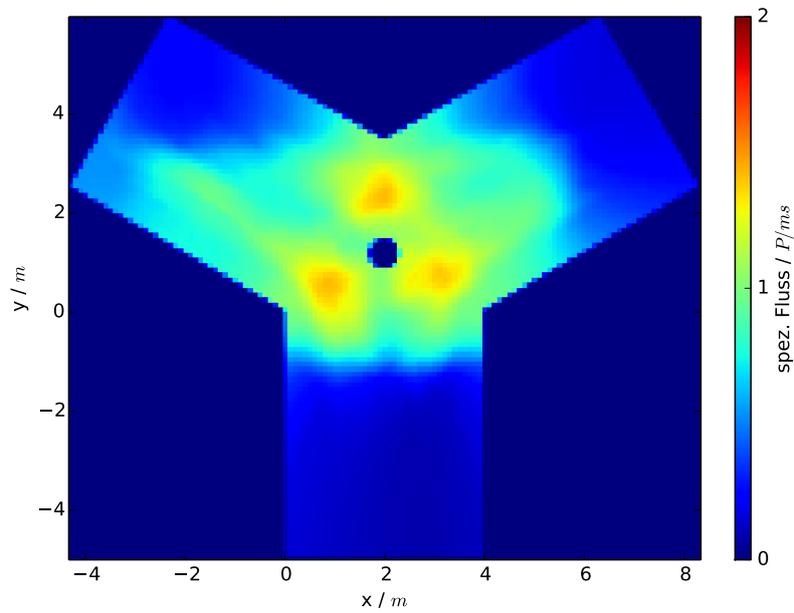


Abbildung D.7: Profil des Flusses Lauf b 2



*Abbildung D.8: Profil des Flusses Lauf c 1*



*Abbildung D.9: Profil des Flusses Lauf c 2*

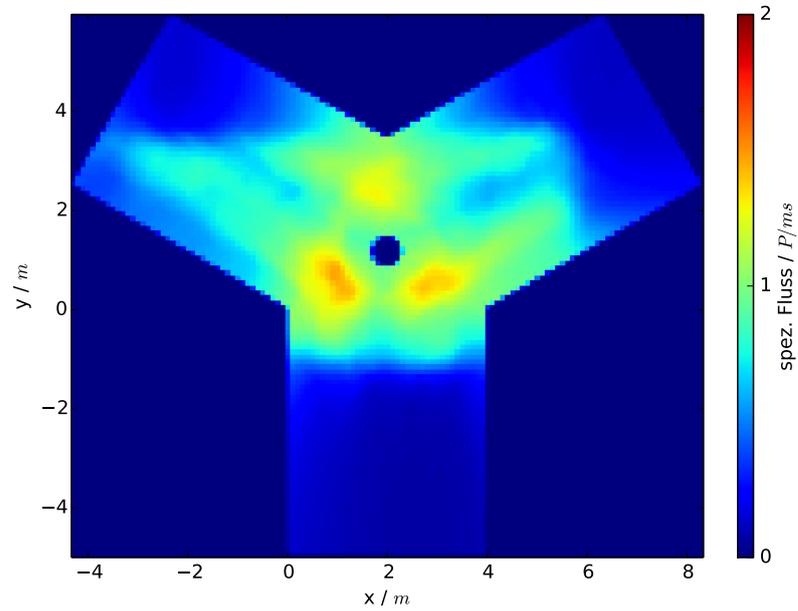


Abbildung D.10: Profil des Flusses Lauf c 3

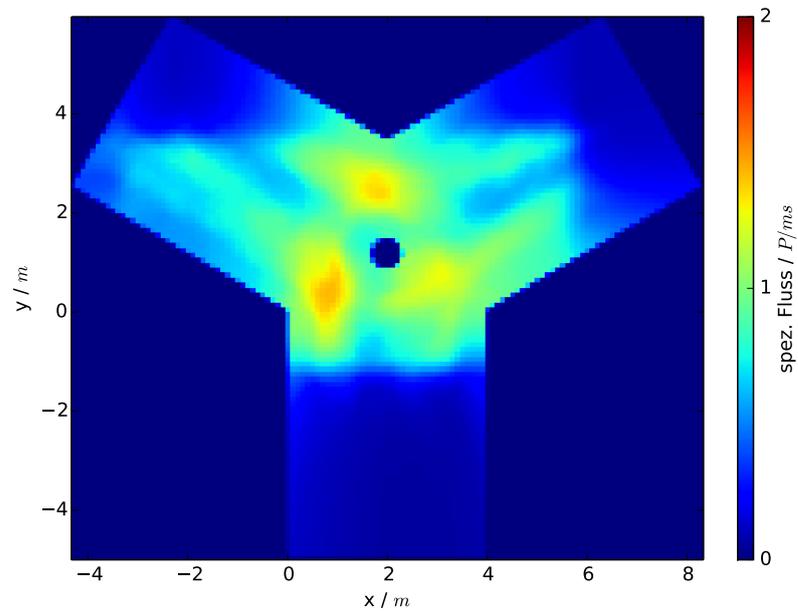


Abbildung D.11: Profil des Flusses Lauf c 4

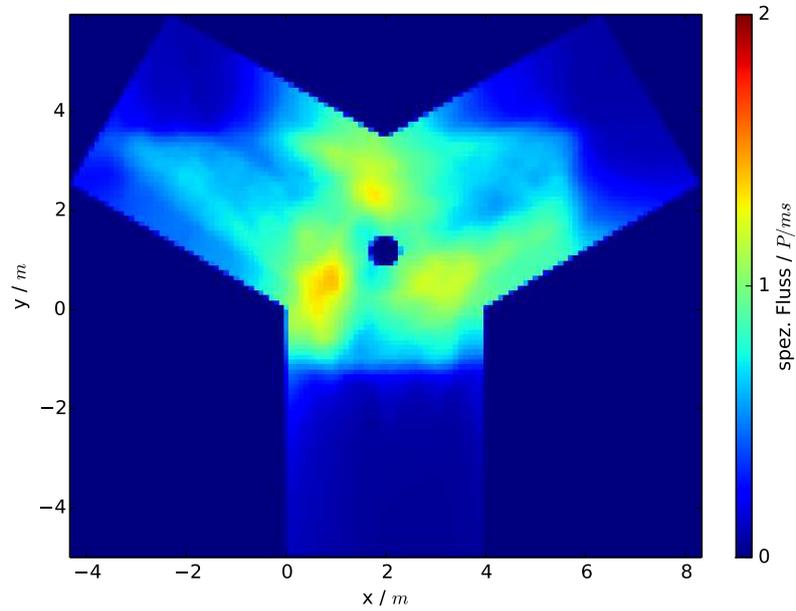


Abbildung D.12: Profil des Flusses Lauf c 5

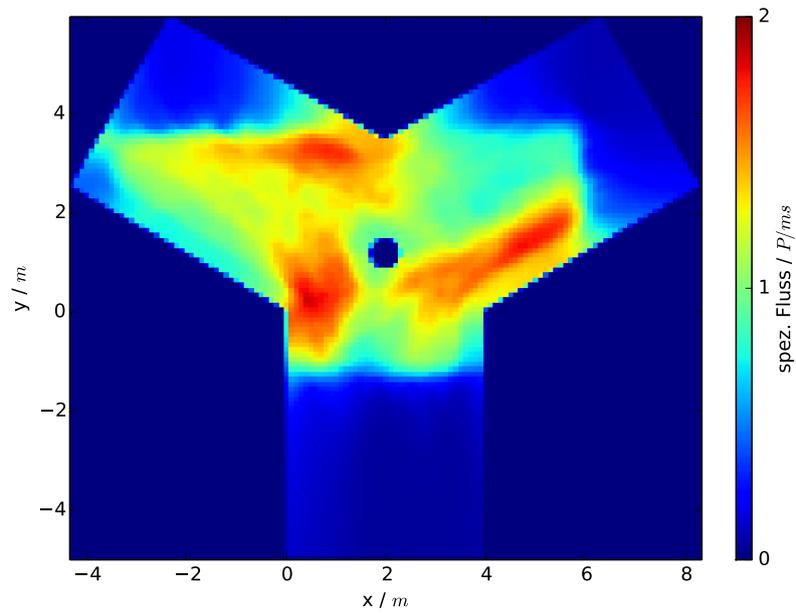


Abbildung D.13: Profil des Flusses Lauf c 7