

Mikroskopische Fundamentaldiagramme der Fußgängerdynamik – Empirische Untersuchung von Experimenten eindimensionaler Bewegung sowie quantitative Beschreibung von Stau-Charakteristika

Verena Ziemer

IAS Series

Band / Volume 42

ISBN 978-3-95806-470-6

Forschungszentrum Jülich GmbH
Institute for Advanced Simulation (IAS)
Jülich Supercomputing Centre (JSC)

Mikroskopische Fundamentaldiagramme der Fußgängerdynamik – Empirische Unter- suchung von Experimenten eindimensionaler Bewegung sowie quantitative Beschreibung von Stau-Charakteristika

Verena Ziemer

Schriften des Forschungszentrums Jülich
IAS Series

Band / Volume 42

ISSN 1868-8489

ISBN 978-3-95806-470-6

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek.
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte Bibliografische Daten
sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Herausgeber
und Vertrieb: Forschungszentrum Jülich GmbH
 Zentralbibliothek, Verlag
 52425 Jülich
 Tel.: +49 2461 61-5368
 Fax: +49 2461 61-6103
 zb-publikation@fz-juelich.de
 www.fz-juelich.de/zb

Umschlaggestaltung: Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH

Druck: Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH

Copyright: Forschungszentrum Jülich 2020

Schriften des Forschungszentrums Jülich
IAS Series, Band / Volume 42

D 468 (Diss. Wuppertal, Univ., 2019)

ISSN 1868-8489

ISBN 978-3-95806-470-6

Persistent Identifier: [urn:nbn:de:0001-2020051000](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0001-2020051000)

Vollständig frei verfügbar über das Publikationsportal des Forschungszentrums Jülich (JuSER)
unter www.fz-juelich.de/zb/openaccess.



This is an Open Access publication distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/),
which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand größtenteils während meiner Zeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehr- und Forschungsgebiet Computersimulation für Brandschutz und Fußgängerverkehr der Bergischen Universität Wuppertal sowie am Institute for Advanced Simulation des Forschungszentrums Jülich.

Ein großer Dank gilt an erster Stelle meinem Doktorvater Herrn Prof. Armin Seyfried für die Möglichkeit der Promotion. Vielen Dank für die gute Betreuung der Dissertation und die hilfreichen Ratschläge. Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei Herrn Prof. Andreas Schadschneider für die zielführenden Gespräche über Stau und für die freundliche Übernahme des Zweitgutachtens.

Des Weiteren danke ich meinen Kollegen der Bergischen Universität Wuppertal sowie meinen Kollegen des Forschungszentrums Jülich. Insbesondere bedanke ich mich bei Herrn Antoine Tordeux für die interessanten Diskussionen über statistische Verfahren. Dankend hervorheben möchte ich zudem Herrn Stefan Holl und Herrn Maik Boltes, die mich bei Planung, Aufbau und Durchführung der Experimente sowie bei der Trajektorienextraktion unterstützt haben.

Ein herzliches Dankschön gilt den hilfsbereiten Lehrern und teilnehmenden Schülern des Gymnasiums Bayreuther Straße und des Wilhelm-Dörpfeld-Gymnasiums, bei denen ich jeweils ein Experiment durchgeführt habe. Diese Experimente haben die Datenbasis meiner Arbeit signifikant erhöht und umfangreiche Analysen ermöglicht.

Abschließend möchte ich mich zutiefst bei meiner Familie für ihren jederzeitigen Rückhalt bedanken. Ganz herzlich danke ich meiner Schwester Franziska für die stundenlangen Telefonate sowie kritischen und lieben Worte.

Kurzzusammenfassung

Die bisherige Forschung zur Fußgängerdynamik weist große Abweichungen in den Ergebnissen auf, insbesondere fehlt eine Untersuchung des Staus bei Fußgängern. Mit der vorliegenden Arbeit wird zum einen die Datengrundlage erweitert. Zum anderen wird aufgezeigt, dass das Fundamentaldiagramm für Fußgänger unterschiedlichen Einflüssen unterliegt und wie diese seine Form und Lage beeinflussen. Des Weiteren wird der Stau bei Fußgängerbewegung im Bereich des Stop-and-go quantitativ untersucht und charakterisiert. Zu diesem Zweck wurden vier Laborexperimente eindimensionaler Fußgängerbewegung mit insgesamt neun Versuchsreihen durchgeführt, wobei neben der Anzahl der Testpersonen die Parameter Motivation und Alter variiert wurden. Die Datenerhebung der Experimente ermöglichte eine Datenaufbereitung mit mikroskopischen Messungen. Für eine Reduktion von Einflüssen wurde ein eindimensionaler Parcours (in der Form eines Ovals) gewählt, sowie nur Daten des stationären Zustands verwendet. Es konnte gezeigt werden, dass die Motivation einen starken Einfluss auf das Fundamentaldiagramm ausübt, der Altersunterschied der jugendlichen Probanden hingegen nicht. Die Ergebnisse lassen einen Einfluss weiterer Randfaktoren auf die Fußgängerbewegung vermuten. Die Stau-Charakteristik „Zeitanteil in der Stopp-Phase“ wird als Funktion abhängig von der globalen Personendichte beschrieben und ist robust gegenüber der Wahl der Grenzgeschwindigkeit. Anders als beim motorisierten Straßenverkehr, bei dem die Charakteristik „Ausbreitungsgeschwindigkeit des Staus“ konstant ist, sinkt sie beim Fußgängerverkehr mit steigender globaler Dichte.

Abstract

The previous research on pedestrian dynamics has large discrepancies. In particular the study of pedestrian congestion is missing. On the one hand this thesis enlarges the data basis of pedestrian dynamics. On the other hand it demonstrates that the fundamental diagram depends on various factors and how they influence its shape and position. Furthermore, the congestion of pedestrian movement in the state of stop-and-go is quantitatively analyzed and characterized. For this purpose, four controlled laboratory experiments were conducted with one-dimensional pedestrian movement. Beside the number of subjects the factors motivation and age were varied in nine series. The data gathering allowed a data preparation with microscopic measurements. To reduce influences a one-dimensional setting (in the form of an oval) was chosen. In addition, only data of the stationary state were used. The motivation has a strong influence on the fundamental diagram, however, the difference in age of the adolescent subjects not. The analysis results let assume effects of further side factors on the pedestrian movement. The congestion characteristic „portion of time in the stop stage“ is described as a function depending on the global pedestrian density. It is robust towards the selection of the threshold of speed. Differently to the motorized traffic, where the characteristic „propagation speed of congestion“ is constant, for pedestrian traffic it declines with growing global density.

Inhaltsübersicht

1	Einleitung	1
2	Theorie und Stand der Forschung	7
2.1	Vorbemerkung	7
2.2	Einordnung und Begriffserläuterungen	7
2.3	Vorstellung der Forschungsarbeiten	9
2.4	Darstellung der Messmethodik und Definitionen	26
3	Experimente und Datenverarbeitung	33
3.1	Vorbemerkung	33
3.2	Datenerhebung	34
3.3	Datenaufbereitung	43
3.4	Voranalysen	50
4	Analyse des Fundamentaldiagramms	55
4.1	Vorbemerkung	55
4.2	Freie Gehgeschwindigkeit	55
4.3	Zusammenhang zwischen Dichte, Geschwindigkeit und Fluss	59
4.4	Zusammenhang zwischen Abstand und Geschwindigkeit	69
5	Analyse des Stop-and-go	79
5.1	Vorbemerkung	79
5.2	Weg-Zeit-Diagramm	79
5.3	Stau-Charakteristika	83
6	Zusammenfassung	95
	Literaturverzeichnis	97
A	Anhang	105
A.1	Experimente	105
A.2	Fundamentaldiagramme	113
A.3	Stop-and-go	135

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XV
Symbolverzeichnis	XVII
Abkürzungsverzeichnis	XIX
1 Einleitung	1
2 Theorie und Stand der Forschung	7
2.1 Vorbemerkung	7
2.2 Einordnung und Begriffserläuterungen	7
2.3 Vorstellung der Forschungsarbeiten	9
2.3.1 Fundamentaldiagramm in der Ebene	9
2.3.2 Eindimensionale Bewegung	17
2.4 Darstellung der Messmethodik und Definitionen	26
2.4.1 Dokumentation der Messmethode	26
2.4.2 Definition von Stau und Stop-and-go	29
3 Experimente und Datenverarbeitung	33
3.1 Vorbemerkung	33
3.2 Datenerhebung	34
3.2.1 Aufbau der Experimente	34
3.2.2 Experiment 1	35
3.2.3 Experiment 2	36
3.2.4 Experiment 3	38
3.2.5 Experiment 4	42
3.3 Datenaufbereitung	43
3.3.1 Trajektorien	43
3.3.2 Projektion und Rektifizierung	46
3.3.3 Messung	49
3.3.4 Stationärer Zustand	49
3.4 Voranalysen	50
3.4.1 Geometrie	50
3.4.2 Parcours und Laufrichtung	52
4 Analyse des Fundamentaldiagramms	55
4.1 Vorbemerkung	55
4.2 Freie Gehgeschwindigkeit	55
4.3 Zusammenhang zwischen Dichte, Geschwindigkeit und Fluss	59
4.3.1 Allgemeiner Zusammenhang	59
4.3.2 Dichte-Geschwindigkeit-Zusammenhang	61
4.3.3 Geschwindigkeitsverteilung für hohe Dichten	65
4.3.4 Dichte-Fluss-Zusammenhang	66
4.4 Zusammenhang zwischen Abstand und Geschwindigkeit	69

4.4.1	Allgemeiner Zusammenhang	69
4.4.2	Modell Abstand-Geschwindigkeit	70
4.4.3	Geschwindigkeitsverteilung für den freien Fluss	74
5	Analyse des Stop-and-go	79
5.1	Vorbemerkung	79
5.2	Weg-Zeit-Diagramm	79
5.2.1	Geschwindigkeitseinfärbung	79
5.2.2	Analyse der Stopp-Phase	81
5.3	Stau-Charakteristika	83
5.3.1	Ausbreitungsgeschwindigkeit des Staus	83
5.3.2	Anteil an Personen in der Stopp-Phase	85
5.3.3	Zeitanteil in der Stopp-Phase	90
6	Zusammenfassung	95
	Literaturverzeichnis	97
A	Anhang	105
A.1	Experimente	105
A.2	Fundamentaldiagramme	113
A.3	Stop-and-go	135

Abbildungsverzeichnis

1.1	Übersicht der Besonderheiten der Methodik und der Analysen	3
1.2	Übersicht der Kapitel	6
2.1	Fundamentaldiagramme in der Literatur	16
2.2	Darstellung der Messmethode	28
2.3	Verkehrszustände im Fundamentaldiagramm	31
3.1	Parcours-Skizze	34
3.2	Kamerasicht, Experiment 1	35
3.3	Parcours mit 52 Probanden, Experiment 2	37
3.4	Körpergrößenverteilung, Experiment 3	38
3.5	Raumskizze, Experiment 3	39
3.6	Kamera und Kamerasicht, Experiment 3	40
3.7	Getragene Mützen, Experiment 3	40
3.8	Fotos von Experiment 3	42
3.9	Trajektorien des Durchlaufs normal_1, Experiment 1	43
3.10	Trajektorien des Durchlaufs 1D_PHAS_SEP_1, Experiment 2	44
3.11	Screenshot verwendeter Software bei Durchlauf 1_2_01, Experiment 3	45
3.12	Extrahierte Trajektorien zweier Durchläufe, Experimente 3 und 4	46
3.13	Abbildung von Oval auf Gerade	47
3.14	Abstandsmessung nach Projektion	48
3.15	Schematische Darstellung der Abbildung von Oval auf Gerade	48
3.16	Abbildung einer Trajektorie des Durchlaufs 1_1_01, Experiment 3	49
3.17	Geschwindigkeit im Zeitverlauf mit Kennzeichnung des stationären Zustands in Durchlaufs 1_3_5, Experiment 3	50
3.18	Fundamentaldiagramm $v(\rho)$ je Geometrie, Versuchsreihe Basigo-1D	51
3.19	Geometrieanalyse, Versuchsreihe Basigo-1D	51
3.20	Fundamentaldiagramm $v(\rho)$ je Parcours, Versuchsreihe GBS-5+11	53
3.21	Gefiltertes Fundamentaldiagramm $v(\rho)$ je Parcours, Versuchsreihe GBS-5+11	53
3.22	Parcoursanalyse, Versuchsreihe GBS-5+11	54
4.1	Freie Gehgeschwindigkeit im Zeitverlauf, Experiment 1	56
4.2	Fundamentaldiagramme von Durchschnittswerten	60
4.3	Fundamentaldiagramm $v(\rho)$, Versuchsreihe GBS-5	61
4.4	Fundamentaldiagramme $v(\rho)$: ρ -Binning	63
4.5	Fundamentaldiagramme $v(\rho)$ im Vergleich, Experiment 3	64
4.6	Geschwindigkeitsverteilung für hohe Dichten, Versuchsreihe GBS-5	65
4.7	Fundamentaldiagramm $J(\rho)$, Versuchsreihe GBS-5	67
4.8	Fundamentaldiagramm $J(\rho)$ mit ρ -Binning, Versuchsreihe GBS-5	68
4.9	Fundamentaldiagramm $J(\rho)$ mit Newell-Funktion, Versuchsreihe GBS-5	68
4.10	Fundamentaldiagramm $v(d)$, Versuchsreihe GBS-5	70
4.11	Funktion des Abstand-Geschwindigkeit-Modells	71
4.12	Nicht parametrisch geschätzte Parameter des Abstand-Geschwindigkeit-Modells	73

4.13	Fundamentaldiagramm $v(d)$ mit d - und v -Binning, Versuchsreihe GBS-5	75
4.14	Fundamentaldiagramm $v(d)$: d -Binning und Regressionsgeraden, Versuchsreihe GBS-5	75
4.15	Geschwindigkeitsverteilung im freien Fluss, Versuchsreihe GBS-5	76
4.16	Wahrscheinlichkeitsdichte der Geschwindigkeiten im freien Fluss	77
4.17	Wahrscheinlichkeitsdichte der Geschwindigkeiten im freien Fluss, Experiment 3	77
5.1	Auswahl von Weg-Zeit-Diagrammen, Versuchsreihe GBS-5	80
5.2	Auswahl von Weg-Zeit-Diagrammen mit Einfärbung der Stopp-Phase, Versuchsreihe GBS-5	82
5.3	Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Staus, Versuchsreihe GBS-5	84
5.4	Ausbreitungsgeschwindigkeit des Staus	85
5.5	Anteile an Personen in der Stopp-Phase im Zeitverlauf, Versuchsreihe GBS-5	86
5.6	Box-Whisker-Plots der Anteile an Personen in der Stopp-Phase, Versuchsreihe GBS-5	87
5.7	Box-Whisker-Plots der Anteile an Personen in der Stopp-Phase mit geschätzter Funktion, Versuchsreihe GBS-5	88
5.8	Anteile an Personen in der Stopp-Phase mit geschätzter Funktion je Versuchsreihe	88
5.9	Geschätzte Funktion des Anteils an Personen in der Stopp-Phase	89
5.10	Box-Whisker-Plots des Zeitanteils in der Stopp-Phase, Versuchsreihe GBS-5	91
5.11	Zeitanteil in der Stopp-Phase als Punktwolke	91
5.12	Zeitanteil in der Stopp-Phase mit geschätzter Funktion je Versuchsreihe	92
5.13	Geschätzte Funktion des Zeitanteils in der Stopp-Phase	94
A.1	Körpergrößenverteilung, Experiment 4	105
A.2	Messbereich der freien Gehgeschwindigkeit, Experimente 1, 3 und 4	113
A.3	Freie Gehgeschwindigkeit im Zeitverlauf, Experimente 3 und 4	114
A.4	Fundamentaldiagramme $v(\rho)$ und $J(\rho)$, Versuchsreihe BUW-n	115
A.5	Fundamentaldiagramme $v(\rho)$ und $J(\rho)$, Versuchsreihe BUW-m	116
A.6	Fundamentaldiagramme $v(\rho)$ und $J(\rho)$, Versuchsreihe Basigo-ID	117
A.7	Fundamentaldiagramme $v(\rho)$ und $J(\rho)$, Versuchsreihe GBS-11	118
A.8	Fundamentaldiagramme $v(\rho)$ und $J(\rho)$, Versuchsreihe GBS-5+11	119
A.9	Fundamentaldiagramme $v(\rho)$ und $J(\rho)$, Versuchsreihe WDG-6	120
A.10	Fundamentaldiagramme $v(\rho)$ und $J(\rho)$, Versuchsreihe WDG-11	121
A.11	Fundamentaldiagramme $v(\rho)$ und $J(\rho)$, Versuchsreihe WDG-6+11	122
A.12	Fundamentaldiagramme $v(\rho)$ mit ρ -Binning	123
A.13	Geschwindigkeitsverteilung für hohe Dichten	124
A.14	Wahrscheinlichkeitsdichte der Geschwindigkeiten für hohe Dichten	125
A.15	Fundamentaldiagramme $J(\rho)$ mit ρ -Binning	126
A.16	Fundamentaldiagramme $J(\rho)$ mit Newell-Funktion	127
A.17	Fundamentaldiagramme $v(d)$, Experimente 1 und 2	128
A.18	Fundamentaldiagramme $v(d)$, Experiment 3	129
A.19	Fundamentaldiagramme $v(d)$, Experiment 4	130
A.20	Fundamentaldiagramme $v(d)$ mit d - und v -Binning	131

A.21	Fundamentaldiagramme $v(d)$: d -Binning und Regressionsgeraden	132
A.22	Geschwindigkeitsverteilung im freien Fluss	133
A.23	Fundamentaldiagramme $v(d)$: d -Binning und Regressionsgeraden, Versuchsreihe GBS-5+11	134
A.24	Weg-Zeit-Diagramme, Versuchsreihe BUW-n	135
A.25	Weg-Zeit-Diagramme, Versuchsreihe BUW-m	136
A.26	Weg-Zeit-Diagramme, Versuchsreihe Basigo-1D	137
A.27	Weg-Zeit-Diagramme, Versuchsreihe GBS-5	138
A.28	Weg-Zeit-Diagramme, Versuchsreihe GBS-11	139
A.29	Weg-Zeit-Diagramme, Versuchsreihe GBS-5+11	140
A.30	Weg-Zeit-Diagramme, Versuchsreihe WDG-6	141
A.31	Weg-Zeit-Diagramme, Versuchsreihe WDG-11	142
A.32	Weg-Zeit-Diagramme, Versuchsreihe WDG-6+11	143
A.33	Weg-Zeit-Diagramme mit Staueinfärbung, Experiment 1	144
A.34	Weg-Zeit-Diagramme mit Staueinfärbung, Experiment 2	145
A.35	Weg-Zeit-Diagramme mit Staueinfärbung, Experiment 3	146
A.36	Weg-Zeit-Diagramme mit Staueinfärbung, Experiment 4	147
A.37	Anteile an Personen in der Stopp-Phase im Zeitverlauf, Experimente 2, 3 und 4	149
A.38	Box-Whisker-Plots der Anteile an Personen in der Stopp-Phase, Experimente 2, 3 und 4	150
A.39	Box-Whisker-Plots der Anteile an Personen in der Stopp-Phase, Versuchsreihe GBS-5, unterschiedliche Grenzggeschwindigkeiten	151
A.40	Anteile an Personen in der Stopp-Phase mit Funktion, Experimente 2, 3 und 4, unterschiedliche Grenzggeschwindigkeiten	152
A.41	Box-Whisker-Plots des Zeitanteils in der Stopp-Phase, Experimente 2, 3 und 4	153
A.42	Zeitanteil in der Stopp-Phase als Punktwolke, Experimente 2, 3 und 4, unter- schiedliche Grenzggeschwindigkeiten	154

Tabellenverzeichnis

2.1	Freie Gehgeschwindigkeit in unterschiedlichen Studien	16
2.2	Laborexperimente eindimensionaler Bewegung	18
3.1	Dimensionierung der Parcours	34
3.2	Zuordnung der Mützenfarbe und ihre Körpergröße, Experiment 3	41
4.1	Freie Gehgeschwindigkeiten	57
4.2	Kapazitäten	69
4.3	Geschätzte Parameter des Abstand-Geschwindigkeit-Modells	71
A.1	Zuordnung der Mützenfarbe und ihre Körpergröße, Experiment 4	107
A.2	Übersicht der Durchläufe, Experiment 1	108
A.3	Übersicht der Durchläufe, Experiment 2	108
A.4	Übersicht der Durchläufe, Experiment 3	108
A.5	Übersicht der Durchläufe, Experiment 4	109
A.6	Zeiträume der Durchläufe und des quasi stationären Zustands, Experiment 1 .	110
A.7	Zeiträume der Durchläufe und des quasi stationären Zustands, Experiment 2 .	110
A.8	Zeiträume der Durchläufe und des quasi stationären Zustands, Experiment 3 .	111
A.9	Zeiträume der Durchläufe und des quasi stationären Zustands, Experiment 4 .	112
A.10	Freie Gehgeschwindigkeiten im Vergleich	134
A.11	Ausbreitungsgeschwindigkeit des Staus	148
A.12	Geschätzte Parameter für den Zeitanteil in der Stopp-Phase	155

Symbolverzeichnis

α_i	Proband
Δt	Zeitdifferenz zur Berechnung der individuellen Geschwindigkeit
ε	beliebig kleine Zahl größer null
ρ	Personendichte
ρ_c	Personendichte mit maximalem Fluss
$\rho_i(t)$	individuelle Voronoi-Dichte von Proband α_i zum Zeitpunkt t
ρ_{gl}	globale Dichte
ρ_{max}	maximale Personendichte, bei der kein Gehen mehr möglich ist
ρ -Binning	Dichte-Binning, bei dem Daten in äquidistante Intervalle der Länge 0,1 Pers./m eingeteilt werden
Υ	Anteil an Personen im Stopp-Zustand
$\Upsilon_{0,05}$	kritische Dichte des Anteils an Personen im Stopp-Zustand
Φ	Zeitanteil im Stopp-Zustand
$\Phi_{0,05}$	kritische Dichte des Zeitanteils im Stopp-Zustand
λ	Abbildung von zweidimensionalen Datenpunkten zu eindimensionalen Wegstrecken
λ_2	Abbildung von zweidimensionalen Datenpunkten zu eindimensionaler gerichteter Entfernung
χ_{VG}	Stopp-Zustand-Indikatorfunktion
a_1, a_2, a_3	Parameter zur Beschreibung des Dichte-Geschwindigkeit-Zusammenhangs
C	Kapazität, beschreibt den maximalen Personenfluss
d	Abstand zur davor gehenden Person
$d_i(t)$	Abstand von Proband α_i zur davor gehenden Person zum Zeitpunkt t
d -Binning	Abstand-Binning, bei dem Daten in äquidistante Intervalle der Länge 0,1 m eingeteilt werden
f	Exponentialfunktion
H_0	Nullhypothese
J	Personenfluss
$J_i(t)$	individueller Personenfluss von Proband α_i zum Zeitpunkt t
J_s	spezifischer Personenfluss
ℓ	minimaler Abstand zur davor gehenden Person
l_g	Länge der Geraden im Parcours
l_k	Länge des Korridors im Parcours
M	Mittelpunkt des Halbkreises
M	Anzahl der für die Berechnung der Referenzgeschwindigkeit relevanten Probanden
N	Anzahl der Probanden
N_0, N_1	Parameter zur Beschreibung des Anteils an Personen im Stopp-Zustand
N_2, N_3	Parameter zur Beschreibung des Zeitanteils im Stopp-Zustand
p	Wert bei statistischen Test
P, P^I, P^{II}	Trajektorienpunkt, Lotfußpunkt des Trajektorienpunkts, abgebildeter Trajektorienpunkt von Oval auf Gerade

\mathbf{p}	Parameterpaarung bzw. -gruppierung
\mathbf{p}^*	geschätzte Parameterpaarung bzw. -gruppierung
r_0	Radius des Halbkreises im Parcours
R^2	Bestimmtheitsmaß
T	Zeitlücke
t	Zeitpunkt
$t_{in,i}$	Zeit beim Betreten des Messbereichs von Proband α_i
$t_{out,i}$	Zeit beim Verlassen des Messbereichs von Proband α_i
t_{\max}	maximaler Zeitpunkt im Untersuchungszeitraum
t_{\min}	minimaler Zeitpunkt im Untersuchungszeitraum
v	Geschwindigkeit
V	Menge der Geschwindigkeiten
v_0	freie Gehgeschwindigkeit
$v_i(t)$	individuelle Geschwindigkeit von Proband α_i zum Zeitpunkt t
v_{Grenze}	Grenzgeschwindigkeit
\bar{v}_N	durchschnittliche Gehgeschwindigkeit eines Durchlaufs mit N Probanden
v_{Stau}	Ausbreitungsgeschwindigkeit des Staus
$\bar{v}(t)$	durchschnittliche Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t
v -Binning	Geschwindigkeit-Binning, bei dem Daten in äquidistante Intervalle der Länge 0,05 m/s eingeteilt werden
VD_i	Verweildauer im Stopp-Zustand von Person α_i
VG	Menge aller Geschwindigkeiten kleiner gleich der Grenzgeschwindigkeit
w	Breite des Korridors im Parcours
x	x -Koordinate
x_i	x -Koordinate von Person α_i
\hat{x}	abgebildete x -Koordinate
y	y -Koordinate
\hat{y}	gerichtete Entfernung
z	z -Koordinate
$\#\text{Pers}(t)$	Anzahl der Personen im Stopp-Zustand zum Zeitpunkt t

Abkürzungsverzeichnis

BaSiGo	Bausteine für die Sicherheit von Großveranstaltungen
Basigo-1D	Einzige Versuchsreihe von Experiment 2
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
bpm	Schläge pro Minute (englisch: beats per minute)
BUW	Bergische Universität Wuppertal
BUW-m	Zweite Versuchsreihe von Experiment 1 mit Studierenden der BUW als Probanden, motiviert durch Zeitdruck
BUW-n	Erste Versuchsreihe von Experiment 1 mit Studierenden der BUW als Probanden, normal motiviert ohne Zeitdruck
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V.
GBS	Gymnasium Bayreuther Straße
GBS-5	Erste Versuchsreihe von Experiment 3 mit Schülern der 5. Klasse des GBS als Probanden
GBS-11	Zweite Versuchsreihe von Experiment 3 mit Schülern der 11. Klasse des GBS als Probanden
GBS-5+11	Dritte Versuchsreihe von Experiment 3 mit Schülern der 5. und 11. Klasse des GBS als Probanden, Vereinigung der Probanden von GBS-5 und GBS-11
GBS-5(+11)	Fünftklässler aus Versuchsreihe GBS-5+11
GBS-(5+)11	Elftklässler aus Versuchsreihe GBS-5+11
Pers.	Person
VR	Versuchsreihe
WDG	Wilhelm-Dörpfeld-Gymnasium
WDG-6	Erste Versuchsreihe von Experiment 4 mit Schülern der 6. Klasse des WDG als Probanden
WDG-11	Zweite Versuchsreihe von Experiment 4 mit Schülern der 10. und 11. Klasse des WDG als Probanden
WDG-6+11	Dritte Versuchsreihe von Experiment 4 mit Schülern der 6., 10. und 11. Klasse des WDG als Probanden, Vereinigung der Probanden von WDG-6 und WDG-11

1 Einleitung

Zuverlässige Vorhersagen über Fußgängerbewegung sind relevant für die bauliche Planung von Orten, an denen sich viele Personen begegnen. Dazu gehören zum einen Orte, die regelmäßig stark frequentiert werden, z. B. Schulen, Bahnhöfe, öffentliche Plätze und Veranstaltungsorte wie Theater und Fußballstadien sowie Events wie (Musik-)Festivals und Märkte. Zum anderen gehören Orte dazu, an denen nur in Ausnahmefällen, z. B. bei Evakuierungen, größere Menschenmengen aufeinander treffen und geleitet werden sollen. Diese bauliche Planung umfasst z. B. die Breite von Wegen zu optimieren, um einen effizienten Personenfluss zu gewährleisten und Stau zu vermeiden. Dies setzt ein grundiertes Wissen über Fußgängerdynamik voraus. Verglichen mit der Kfz-Bewegung ist das Gebiet der Fußgängerdynamik bisher wenig erforscht. Die Beschreibung der Bewegung von Fußgängern ist komplexer als die von Pkw, da Fußgänger nicht in Fahrspuren fahren, sondern sich in der Ebene relativ frei bewegen. Eine Möglichkeit, die Fußgängerdynamik zu beschreiben, sind Geschwindigkeit, Dichte und Fluss. Zu diesen physikalischen Größen gibt es bereits Forschung, deren Aussagen sich jedoch teils widersprechen [8, 16]. Neben den physikalischen Eigenschaften kann Fußgängerdynamik auch durch andere Kenngrößen beschrieben werden. Dazu gibt es erste Forschungsansätze von Ingenieuren, Sozialwissenschaftlern und Psychologen. Weiterhin gibt es auch (kommerzielle) Simulationssoftware der Fußgängerdynamik, deren quantitative Ergebnisse allerdings teils widersprüchlich sind. Insgesamt ist das Wissen über die Bewegung von Fußgängern noch ungenügend.

Seit Ende der 1960er Jahre werden Feldversuche zur Fußgängerdynamik durchgeführt, bei denen unter anderem die freie Gehgeschwindigkeit in verschiedenen Ländern untersucht wurde. Im Jahr 1971 beobachtete Henderson [37] in der Wahrscheinlichkeitsdichte der Geschwindigkeit eine Doppelpeak-Struktur und zeigte später, dass diese bimodale Verteilung mit der Überlagerung zweier Wahrscheinlichkeitsfunktionen für Frauen und Männer erklärt werden kann. Später wurden weitere Studien zum Einfluss soziopsychologischer Kenngrößen auf den Personenfluss bei Engstellen durchgeführt. Dabei wurden Faktoren wie das Stresslevel [19], die Motivation [30] oder Gruppen [113] untersucht.

Predtetschenski und Milinski [85] stellten als erste ein Modell für das Fundamentaldiagramm mit Einflussfaktoren vor. Um den Platzbedarf von Personen unterschiedlicher Größen zu berücksichtigen, wie beispielsweise von Kindern oder Erwachsenen, führten sie eine skalenfreie Dichte ein. Weiterhin boten sie je Bewegungsmodi (komfortable Bedingung, normale Bewegungsbedingung, Gefahrenbedingung) eine Funktion für die Modellierung des Dichte-Geschwindigkeit-Zusammenhangs an. Allerdings fehlen für die Modellvalidierung empirische Tests. Da die Größe einer Person auch einen Einfluss auf ihre Geschwindigkeit hat oder die Motivation einer Person ihren Abstand zu anderen Personen verändert und sich infolgedessen der Platzbedarf ändert, sind die Grenzen des Ansatzes schnell erreicht. Ein empirischer Test der

allgemeinen Nützlichkeit des Skalierungsprozesses wurde jedoch anhand eines Vergleichs der Fundamentaldiagramme eindimensionaler Bewegung von Pkw, Fahrrädern und Fußgängern demonstriert. Selbst für diese sehr unterschiedlichen selbstständig beweglichen Verkehrsteilnehmer konnten die Fundamentaldiagramme für eindimensionale Bewegung durch einfache Skalierung der Dichte mit der Größe des Objekts und der Geschwindigkeit mit der freien Gehgeschwindigkeit vereinigt werden [126].

Seit dem Jahr 2005 werden Experimente in quasi eindimensionalen Systemen von Fußgängern durchgeführt, d. h. dass die Personen hintereinander gehen und sich nicht überholen. So gibt es Daten für Studierende und Soldaten in Deutschland [94, 96] und China [62]. Es konnten Unterschiede zwischen offenen und geschlossenen Systemen bei eindimensionaler Bewegung gezeigt werden [125]. Des Weiteren wurde ein Vergleich des Fundamentaldiagramms von Studierenden in Indien und Studierenden in Deutschland durchgeführt [15]. Wie sich eine gleichmäßige Folge von Tönen mittels Metronom auf das Fundamentaldiagramm ausübt, wurde in Japan untersucht [121]. Der Einflussfaktor Alter wurde in einer Studie in China analysiert [13]. Des Weiteren wurden Einflüsse auf das Fundamentaldiagramm, wie die Homogenität einer Personengruppe oder die Fitness der Probanden, untersucht [129]. Schon 1993 nannte Weidmann als mögliche Einflussfaktoren auf die Gehgeschwindigkeit unter anderem das Alter, den Verkehrszweck und den Zeitdruck [118, Tab. 4].

Leider verwenden die genannten Studien unterschiedliche Definitionen und Messmethoden für Dichte, Geschwindigkeit und Fluss. Im Jahr 2010 konnte der Einfluss der Messmethode [93, 96] und in 2011 der Einfluss des Messbereichs [120] auf das Fundamentaldiagramm gezeigt werden. Darüber hinaus dokumentieren nicht alle Studien ihre Messmethoden und Ergebnisse der Messungen für die freie Gehgeschwindigkeit. Zusätzlich werden die Rohdaten in unterschiedlichen Maßeinheiten erfasst. In manchen Studien werden nur Übergangszeiten an Querschnitten erhoben, andere erfassen Trajektorien in einem Teil des Systems und wieder andere stellen gar keine Rohdaten bereit. Ein Test, ob die resultierenden Relationen vereinigt werden können, würde daher auf nicht vergleichbaren Daten für eine Dichte-Geschwindigkeit-Beziehung aufbauen.

In den genannten Forschungsarbeiten und Handbüchern ist die Form des Fundamentaldiagramms unterschiedlich. 2012 konnte bei einem durchgeführten Experiment eindimensionaler Bewegung gezeigt werden, dass neben dem freien Fluss und dem gestauten Bereich ein dritter Bereich, der sogenannte schwach eingezwängte Bereich, existiert [48]. Dieser wurde auch vier Jahre später bei empirischen Daten einer anderen Probandengruppe gefunden [13]. Für die Stopp-Dichte, bei der kein Gehen mehr möglich ist, gibt es unterschiedliche Angaben, die von 3,8 Pers./m² bis 10 Pers./m² reichen. Gründe dafür sind unter anderem zu wenige, ungenaue und stark widersprüchliche Beobachtungen und Experimente. Weitere zuverlässige empirische Daten von Fußgängerbewegung werden gebraucht.

Hohe Dichten im Modell wurden zum ersten Mal im Jahr 2010 beschrieben [82]. Dabei konnte das vorgestellte Modell Stop-and-go-Wellen wiedergeben, wie sie bei empirischen Daten beobachtet worden waren. Ein Jahr später wurde in hohen Dichten eine Koexistenz zweier Geschwindigkeitsphasen gefunden [83], welche allerdings nur auf Anfangsbedingungen beruht [23]. Auch Eilhardt [23] und Eilhardt und Schadschneider [24, 25] beschäftigten sich mit

der Phasenseparation und entwickelten ein Modell, welches die Geschwindigkeitsphasenseparation bei hohen Dichten von empirischen Geschwindigkeitsverteilungen reproduziert. Zudem wurden die Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Start- bzw. Stopp-Wellen untersucht [107]. Hohe Dichten fanden bisher kaum Berücksichtigung in den Analysen. Im Jahr 2016 konnten bei Fußgängern unterschiedliche Stau-Ausbreitungsgeschwindigkeiten gemessen werden [13]. Eine Definition des Staus bei Fußgängern wurde in keiner der genannten Studien gegeben. Auch fehlen bislang Kennzahlen, welche den Stau und insbesondere Stop-and-go-Wellen charakterisieren. Da in den bisherigen Veröffentlichungen hauptsächlich niedrige und mittlere Dichten untersucht werden, wird kaum das Fundamentaldiagramm bei hohen Dichten analysiert. Deswegen wurde bisher auch kein Stau von Personen untersucht.¹ Die Stau-Forschung bei Kfz besteht hingegen schon seit mehreren Jahrzehnten.

Ziele dieser Arbeit sind,

- das Fundamentaldiagramm in der Fußgängerbewegung zu beschreiben,
- die Skalierbarkeit bestimmter Einflussfaktoren auf die Fußgängerdynamik zu überprüfen
- und den Stau von Fußgängern im Teilbereich Stop-and-go zu charakterisieren.

Dazu werden vier Laborexperimente eindimensionaler Bewegung durchgeführt bzw. analysiert. Die Besonderheiten der Methodik sind im oberen Teil der Abb. 1.1 zusammengefasst. Laborexperimente haben gegenüber Feldversuchen den Vorteil, dass die Randbedingungen und Einflüsse besser kontrolliert werden können, dass eine genauere Datenerfassung möglich ist und dass auch selten auftretende Situationen künstlich herbeigeführt werden können. Das eindimensionale System ist das einfachste System mit den geringsten Freiheitsgraden, beispielsweise ohne den Einfluss von Überholung. Des Weiteren ist es geschlossen und somit eine einfache Alternative zu komplexen Systemen.

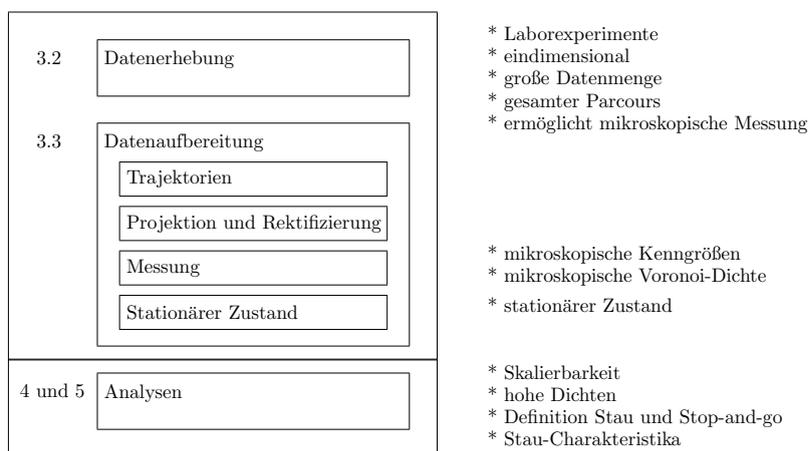


Abb. 1.1: Übersicht der Besonderheiten der Methodik und der Analysen.

¹ Portz und Seyfried [82, 83] hatten in Ansätzen hohe Dichten bei Fußgängerbewegung untersucht.

Um die Aussagekraft der Ergebnisse weiter zu erhöhen, werden im Vergleich zu bisher durchgeführten Studien größere Datenmengen mit verschiedenen Probanden und mehr Durchläufen verwendet. Variierende Probandenanzahlen je Versuchsreihe ermöglichen ein möglichst breites Spektrum an globalen Dichten. Während bei vielen Experimenten nur Abschnitte des Parcours analysiert werden, wird für diese Arbeit der gesamte Parcours berücksichtigt, um aussagekräftige Stau-Analysen durchführen zu können. Die Datenerhebung der für diese Arbeit verwendeten Experimente erlaubt mikroskopische Messungen. Im Gegensatz zu den bisherigen Studien, bei denen die Messmethoden überwiegend zu makroskopischen Kenngrößen führten, werden in dieser Arbeit mikroskopische Kenngrößen erhoben. Damit können nicht nur Aussagen über Mittelwerte getroffen werden, sondern auch Varianzen analysiert werden. In die Analyse einbezogen werden ausschließlich Daten des stationären Zustands, da eine Berücksichtigung der von Anfangs- und Endbedingungen gestörten Daten zu verzerrten und nicht unabhängigen Ergebnissen führen würde. In dieser Arbeit wird mit der hier neu definierten mikroskopischen Voronoi-Dichte gearbeitet, die zu einer gewissen Glättung der Daten und damit zu aussagekräftigen Ergebnissen führt.

Zwei der vier Experimente dieser Arbeit wurden bereits in anderen Studien durchgeführt. Das eine Experiment wurde im Rahmen eines Seminars des Studiengangs Sicherheitstechnik an der Bergischen Universität Wuppertal am 15.07.2008 in einem Vorraum mehrerer Hörsäle am Campus Freudenberg in Wuppertal durchgeführt. Die Koordination des Experiments lag beim Lehrstuhl für Baustofftechnologie und Brandschutz sowie beim Forschungszentrum Jülich. Die Probanden waren 43 Seminarteilnehmer. Es wurden zwei Versuchsreihen mit unterschiedlicher Motivation der Probanden durchgeführt. Das andere Experiment wurde im Rahmen des Verbundprojekts BaSiGo² mit einer Versuchsreihe und 138 Probanden realisiert. In diesem Projekt wurden insgesamt an vier Tagen 29 Experimente in einer Halle der Messe Düsseldorf mit 1986 Probanden vom 19.06.2013 bis 22.06.2013 durchgeführt.

Für eine Erweiterung der empirischen Datengrundlage werden im Rahmen dieser Arbeit zwei weitere Experimente geplant und durchgeführt. Die Hauptverantwortung der Experimentvorbereitung sowie -durchführung lag jeweils bei der Autorin. Das eine Experiment wurde am Gymnasium Bayreuther Straße (GBS) in Wuppertal am 12.11.2014 und 13.11.2014 im Rahmen eines DFG-Projekts durchgeführt.³ Das andere Experiment wurde am Wilhelm-Dörpfeld-Gymnasium (WDG) in Wuppertal am 30.04.2015 im Rahmen desselben DFG-Projekts durchgeführt. Jedes Experiment bestand aus drei Versuchsreihen. Zwei davon waren in Bezug auf die Altersstruktur homogen (am GBS: Fünftklässler bzw. Elftklässler, am WDG: Sechstklässler bzw. Zehnt- und Elftklässler), eine war heterogen (Mischung beider Probandengruppen).

Im Rahmen der Experimentdurchführung findet die Rohdatenerhebung statt. Dazu werden die vier Experimente mit Videokameras aufgezeichnet. Anschließend erfolgt die Datenaufbereitung. Hierfür werden aus den Videobildern mithilfe von Software Raum-Zeit-Kurven je Person und Durchlauf erstellt. Damit wird für jede Person ihr Ort zu jeder Zeit bestimmt. Bei Experiment 1 wurden die Raum-Zeit-Kurven bereits im Zuge einer anderen Studie erzeugt.

² Das Verbundprojekt BaSiGo, dessen Ziel die Erarbeitung modularer Bausteine für die Verbesserung der Sicherheit von Großveranstaltungen war, wurde vom BMBF gefördert.

³ Bei dem DFG-Projekt handelt es sich um „Quantitative Beschreibung der Staubildung in Fußgängerströmen“ mit der Projektnummer SCHA 636/9-1.

Für die weiteren drei Experimente werden die Raum-Zeit-Kurven im Rahmen dieser Arbeit erstellt. Als Parcours für die quasi-eindimensionale Bewegung wird das Oval verwendet. Um die zweidimensionale Bewegung im Oval in eine eindimensionale zu transformieren, werden im nächsten Schritt der Datenaufbereitung die Raum-Daten auf eine Gerade abgewickelt. An den eindimensionalen Weg-Zeit-Kurven findet eine mikroskopische Messung von Geschwindigkeit, Abstand und Dichte statt.

Für das erste Ziel wird je Versuchsreihe ein mikroskopisches Fundamentaldiagramm aufgestellt und untersucht. Es wird ein Modell entwickelt, welches das Fundamentaldiagramm in der Abstand-Geschwindigkeit-Beziehung mit den drei Parametern „freie Gehgeschwindigkeit“, „minimaler Abstand zum Vordermann“ und „Zeitlücke“ beschreibt. Diese Parameter sind stark mit persönlichen Eigenschaften der Personen verknüpft. Sie werden über die Methode der kleinsten Fehlerquadrate und schrittweiser Anpassung von Anfangswerten kalibriert.

Speziell sollen die Einflussfaktoren „Alter“ bei Schülern und „Motivation“ bei Studierenden analysiert werden. Des Weiteren wird der Einfluss der Heterogenität in Bezug auf das Alter der Probanden untersucht. Neben den Einflussfaktoren soll untersucht werden, ob Skalierungsverfahren verwendet werden können, um die Relation zwischen Dichte bzw. Abstand und Geschwindigkeit unterschiedlicher Probandengruppen vergleichen zu können. Somit ist ein zweites Ziel dieser Arbeit, die Skalierbarkeit des mikroskopischen Fundamentaldiagramms für Fußgänger eindimensionaler Bewegung empirisch zu untersuchen und Quellen ihrer Variabilität identifizieren zu können.

Für das dritte Ziel werden neben der Definition des Staus und Stop-and-gos von Fußgängern drei Stau-Charakteristika eindimensionaler Bewegung aufgeführt und untersucht. Zusätzlich zur Ausbreitungsgeschwindigkeit des Staus werden zwei weitere Charakteristika in dieser Arbeit neu kreiert, die den Anteil an Personen in der Stopp-Phase und den Zeitanteil in der Stopp-Phase beschreiben. Solche Charakteristika bestehen in der Literatur zur Fußgängerbewegung bisher noch nicht.

Die Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel, die in Abb. 1.2 dargestellt sind. Die Kapitel 2, 3, 4 und 5 haben zu Beginn eine Vorbemerkung, in der der jeweilige Aufbau beschrieben ist. In Kapitel 2, dem theoretischen Teil dieser Arbeit, werden der aktuelle Stand der Forschung zum speziellen Bereich der Fußgängerdynamik präsentiert und damit die Forschungsfragen dieser Arbeit begründet. Zudem werden die in dieser Arbeit verwendeten Methodiken und Definitionen beschrieben. Weiterhin werden der Stau von Fußgängern sowie Stop-and-go-Wellen bei der Fußgängerbewegung definiert. Die empirische Datengrundlage dieser Arbeit wird in Kapitel 3 vorgestellt. Einführend werden die vier verwendeten Laborexperimente beschrieben. Anschließend wird die Datenaufbereitung erläutert. Zwei Voruntersuchungen der Datensätze schließen das Kapitel ab. In Kapitel 4 wird die Analyse des Fundamentaldiagramms dargestellt. Zum Einstieg werden Mittelwerte der mikroskopischen Messungen betrachtet, um anschließend die individuellen Daten eingehend zu analysieren. Dafür werden zum einen im Dichte-Geschwindigkeit-Zusammenhang mittlere Geschwindigkeiten betrachtet. Zum anderen werden die Geschwindigkeitsverteilungen sowohl bei hohen Dichten als auch beim freien Fluss untersucht. Für den Zusammenhang zwischen Abstand und Geschwindigkeit wird ein Modell vorgestellt, mit dem die Daten unterschiedlicher Personengruppen verglichen werden.

Kapitel 5 befasst sich mit Stop-and-go bei der Bewegung von Fußgängern. Die Betrachtung von Weg-Zeit-Kurven bietet ein visuelles Erkennen der Stopp-Phasen. Anschließend wird der Stop-and-go anhand von drei Charakteristika beschrieben, von denen eine vom motorisierten Straßenverkehr bereits bekannt ist und die anderen beiden in dieser Arbeit neu definiert werden. In Kapitel 6 werden die Ergebnisse der Analysen zusammengefasst und ein Ausblick gegeben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit befinden sich viele der Abbildungen und Tabellen im Anhang.

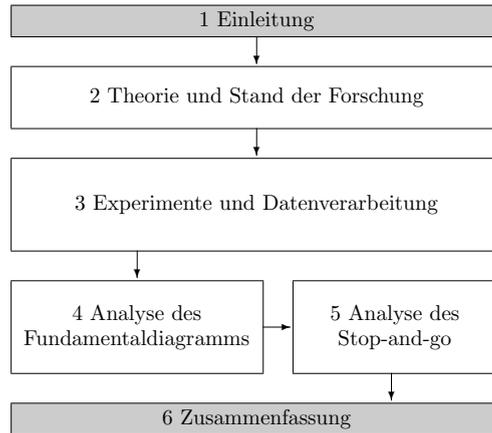


Abb. 1.2: Übersicht der Kapitel.

2 Theorie und Stand der Forschung

2.1 Vorbemerkung

Dieses Kapitel stellt den theoretischen Teil der Arbeit dar. Neben einer Einordnung der Fußgängerdynamik in dem Bereich Verkehrswesen wird ein Teil der Literatur dieses Forschungsgebiets vorgestellt. Damit werden zum einen der aktuelle Stand der Forschung präsentiert und zum anderen die Forschungsfragen dieser Arbeit motiviert. Des Weiteren werden die in dieser Arbeit verwendeten Methodiken und Definitionen beschrieben.

In Abschnitt 2.2 wird zuerst das Themengebiet Fußgängerdynamik abgegrenzt. Anschließend werden grundlegende Begriffe der Fußgängerdynamik erläutert.

In Abschnitt 2.3 werden Veröffentlichungen zur Fußgängerdynamik chronologisch vorgestellt und miteinander verglichen. Dabei werden insbesondere jene zum Fundamentaldiagramm behandelt, d. h. zum Zusammenhang von Personendichte, Geschwindigkeit und Personenfluss. Unterabschnitt 2.3.1 umfasst eine Auswahl der relevantesten Forschungsarbeiten bis zum Jahr 2005, die verschiedene Teilbereiche des Fundamentaldiagramms der Fußgängerbewegung in der Ebene analysieren. In Unterabschnitt 2.3.2 werden alle Veröffentlichungen behandelt, die Experimente eindimensionaler Bewegung analysieren. Solche Experimente sind eine sinnvolle Alternative zu Experimenten von Fußgängerbewegung in der Ebene, da sie das reduzierteste System sind und zusätzlich einfach durchzuführen sind. Zudem werden die methodischen Mängel dieser Experimente genannt und damit begründet, warum im Rahmen dieser Arbeit weitere Forschung durchgeführt wird.

In Abschnitt 2.4 werden die in dieser Arbeit angewandte Messmethode dokumentiert sowie Definitionen zum Stau angegeben. Zu Beginn wird in Unterabschnitt 2.4.1 erklärt, wie Geschwindigkeit, Personendichte, Personenfluss und Abstand gemessen werden. Anschließend werden in Unterabschnitt 2.4.2 der Stau von Personen, Stop-and-go bei Personen und die Grenzggeschwindigkeit zur Identifikation der Stopp-Phase definiert, wobei auch auf den Stau beim Pkw-Verkehr eingegangen wird.

2.2 Einordnung und Begriffserläuterungen

Die **Verkehrsplanung** ist ein Bereich des Verkehrswesens, der das Ziel hat, Verkehrssysteme optimal zu gestalten. Dabei werden Leistungsfähigkeit, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit berücksichtigt und optimiert. Andere Planungskriterien sind eine positive Umweltwirkung, beispielsweise Verminderung von Lärm und Schadstoffen, sowie Kostensenkung und Komfort. Wichtig ist dabei ein nachhaltiges Handeln. Die Verkehrssysteme beziehen sich auf Güter, Nachrichten und Personen. Personenverkehrssysteme lassen sich in öffentliche und individu-

elle Systeme sowie in motorisierte (z. B. Zug und Pkw) und nicht-motorisierte Systeme (z. B. Fahrradfahrer und Fußgänger) einteilen. Doch nicht nur hier, sondern auch in Bereichen der Physik, Psychologie und Sozialwissenschaft findet sich der Begriff der Fußgängerdynamik.

Im Verkehrswesen beschreibt die **Fußgängerdynamik** ein komplexes und facettenreiches System, das seine Anwendung in der Verkehrsinfrastruktur hat (z. B. Reisezeit- und Wegstreckenoptimierung bei der Planung von Bahnhöfen), in der Erstellung von Sicherheitskonzepten (z. B. Optimierung von Evakuierungszeiten und -wegen bei der Planung von Gebäuden mit großer Personenzahl oder Großveranstaltungen). Ziele sind unter anderem die Steigerung von Sicherheit und des Komforts. Die Werkzeuge und Methoden sind gesetzliche Regeln, Handbücher und Richtlinien sowie Computersimulationen.

In der Fußgängerdynamik werden die Geschwindigkeit v , die Personendichte ρ , der Personenfluss J und der spezifische Fluss J_s untersucht und beschrieben. Weitere Kenngrößen sind **Abstände** d zwischen Personen sowie die **Kapazität** C , die den maximalen Fluss beschreibt. Die **Geschwindigkeit** v mit der Einheit m/s berechnet sich als Quotient aus zurückgelegter Wegstrecke und verstrichener Zeit. Sie wird **freie Gehgeschwindigkeit** v_0 genannt, wenn die Bewegung ohne Behinderung durch Hindernisse oder Beeinflussung beispielsweise von anderen Personen erfolgt.⁴ Die **Personendichte** ρ , auch Dichte genannt, mit der Einheit Pers./m² bzw. Pers./m beschreibt die Anzahl der Personen pro Flächeneinheit bzw. pro Streckeneinheit. Der **Personenfluss** J , auch Fluss genannt, mit der Einheit Pers./m/s beschreibt die Anzahl der Personen, die innerhalb eines Zeitabschnittes einen Querschnitt passieren. Der **spezifische Personenfluss** J_s mit der Einheit Pers./m/s beschreibt den Anteil an Personen, die pro Zeiteinheit einen Querschnitt pro Meter lichter Breite überqueren. Das **Fundamentaldiagramm** stellt die Zusammenhänge zwischen Personendichte, Personenfluss bzw. spezifischen Personenfluss und Geschwindigkeit dar. Messungen aus Feldstudien und Laborexperimenten bieten hierfür die empirische Datengrundlage.

Ein **Experiment** ist eine geplante Herbeiführung einer bestimmten Situation mit dem Ziel wissenschaftliche Erkenntnisse zu erlangen [131, S. 648]. Teilnehmende Personen, unabhängig ihres Geschlechts, werden im Folgenden Probanden genannt.⁵ Anders als bei einer einfachen Beobachtung werden bei einem Experiment potentielle Einflussgrößen verändert. Durch das spezifische Ändern einer Einflussgröße, beispielsweise der Probandenanzahl, wird eine neue Teiluntersuchung durchgeführt. Im Folgenden wird jede Teiluntersuchung **Durchlauf** genannt. Wird bei einem Experiment eine weitere Einflussgröße verändert, z. B. die Motivation oder die Probandengruppe, werden die Durchläufe mit identischer zweiter Einflussgröße innerhalb des Experiments in einer **Versuchsreihe** (VR) zusammengefasst.

Analog zur Einteilung der Verkehrsmodelle in mikroskopisch und makroskopisch wird zwischen zwei Datenerhebungen unterschieden.⁶ Bei ersterer wird der Fußgängerstrom als Ganzes betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass er eine homogene Dichte aufweist, wie z. B. in der Hydromechanik. Zur Datenerhebung unidirektionaler Personenströme können Stoppuhr, Maßband und Fotoapparat zum Einsatz gebracht werden. Mit den Werkzeugen können ma-

⁴ Die freie Gehgeschwindigkeit wird in der Literatur teilweise auch Wunschgeschwindigkeit genannt.

⁵ Gemeint sind stets beide Geschlechter. Auch aus Gründen der Lesbarkeit wird auf die Nennung beider Formen verzichtet.

⁶ Vgl. zu mikroskopischen und makroskopischen Verkehrsmodellen Helbing [36].

kroskopische Kenngrößen wie Fluss, Geschwindigkeit und Dichte gemessen werden. Bei der zweiten Datenerhebung werden die Fußgänger hingegen einzeln betrachtet. Jeder Fußgänger erhält seine eigene hinreichend exakte Raum-Zeit-Kurve, auch Trajektorie genannt. Dabei besteht in der Datenaufbereitung die Möglichkeit verschiedene Messmethoden anzuwenden, mit denen entweder makroskopische oder mikroskopische Kenngrößen gewonnen werden können.⁷ Bei der Gewinnung von **makroskopische Kenngrößen** unterscheidet man grundsätzlich zwischen drei Messmethoden: Messungen an einem Ort über ein Zeitintervall, Messungen zu einem Zeitpunkt über eine Messfläche bzw. Messstrecke, Messungen über Mittelung von Ort und Zeit. Um **mikroskopische Kenngrößen** zu erhalten, darf bei der Messmethode keine Mittelung erfolgen. D. h. für jede Person wird an jedem Ort zu jeder Zeit die Kenngröße gemessen. Gemessene mikroskopische Kenngrößen sind z. B. individuelle Dichte und individuelle Geschwindigkeit. Auch hier gibt es wiederum verschiedene Messmethoden.

Eine Übersicht der verwendeten Symbolzeichen findet sich auf Seite XIX. Die Standardabweichung wird mit dem Symbol \pm gekennzeichnet. Im Sinne einer einheitlichen Notation werden, soweit notwendig, die Angaben anderer Autoren in die oben genannten Begriffe und Einheiten überführt. Des Weiteren wird bei Personengruppen beider Geschlechter auch aus Gründen der Lesbarkeit auf die Nennung beider Formen verzichtet. Gemeint sind stets beide Geschlechter.

2.3 Vorstellung der Forschungsarbeiten

2.3.1 Fundamentaldiagramm in der Ebene

In diesem Unterabschnitt wird ein Überblick über die relevanten Veröffentlichungen bis zum Jahr 2005 gegeben, die sich mit dem Fundamentaldiagramm der Fußgängerbewegung in der Ebene beschäftigen. Das erste Fundamentaldiagramm für den motorisierten Straßenverkehr wurde im Jahr 1934 von Greenshields [32, 33] dargelegt.

1947: Reimer [87] veröffentlicht das erste Fundamentaldiagramm für Fußgänger als „wahrscheinliche[n] Verlauf“, siehe Abb. 2.1 auf S. 16, dessen Geschwindigkeitswerte er später nach unten korrigiert [88]. Als durchschnittliche Geschwindigkeit gibt er 1,40 m/s an, die neben Dichte, Geschlecht, Alter und Temperament auch von der Verkehrsanlage abhängt [87, S. 122].

1958: Hankin und Wright [35] veröffentlichen die Ergebnisse ihrer Analysen zu zwei durchgeführten Experimenten, deren Zusammenhänge zwischen Dichte und Geschwindigkeit unidirektionaler Personenströme in Form einer Doppelkurve in Abb. 2.1 auf S. 16 gezeigt werden. Beim ersten Laborexperiment wurde ein Parcours aus zwei konzentrischen Kreisen aufgebaut. Mit ansteigender Probandenanzahl im Parcours wurden erst niedrige und am Ende hohe Dichten erzeugt. Zu jeder Dichte wurden Geschwindigkeiten gemessen. Mit der Feldstudie in Londoner U-Bahn-Stationen mit Fahrgästen als Probanden wurde der genaue Verlauf des Fundamentaldiagramms untersucht. Geschwindigkeiten und Personenfluss wurden durch Mitgehen, Zeit messen mit Stoppuhren und Fahrgastzählungen erfasst und berechnet.

⁷ In den bisherigen Studien werden überwiegend makroskopische Kenngrößen erhoben. In dieser Arbeit werden mikroskopische Kenngrößen gemessen.

1963: Oeding [74] untersucht zum ersten Mal den Einfluss der Verkehrsart auf das Fundamentaldiagramm. Dafür führte er in Deutschland Feldstudien für unterschiedliche Verkehrsarten durch und ergänzte sie für hohe Dichten mit einem Laborexperiment mit über 250 Studierenden als Probanden. Seine händische Auswertung beruht auf Mitschnitten von Foto- und Filmkameras. Die resultierenden Fundamentaldiagramme uni- und bidirektionaler Personenströme werden in Abb. 2.1 auf S. 16 gezeigt und lassen Unterschiede zwischen den einzelnen Verkehrsarten erkennen. Für den Stadtverkehr sind die Grenzen des „natürlichen Gehens“, welches bei Dichten bis $0,3 \text{ Pers./m}^2$ auftritt, bei Geschwindigkeiten von $0,5 \text{ m/s}$ bis $1,8 \text{ m/s}$, wobei er zusätzlich auf Scholz [90] verweist.

1964: Kirsch [51] führte unter anderem Feldversuche an signalisierten Fußgängeranlagen in Trier und Wuppertal durch. Die bidirektionalen Ströme nahm er mit Filmkameras auf und führte anschließend eine fotografische Auswertung durch, deren makroskopische Werte für Dichte und Geschwindigkeit er in ein Fundamentaldiagramm eintrug [51, Abb. 54]. Kirsch gibt einen exponentiellen Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Dichte an [51, S. 44].

1968: Older [76] untersucht drei Feldstudien bidirektionaler Verkehre auf Einkaufsstraßen in England, die er mit Foto- und Filmkameras aufgezeichnet hatte, siehe Abb. 2.1 auf S. 16. Er beschreibt einen linearen Zusammenhang zwischen Dichte und Geschwindigkeit und sieht wie Hankin und Wright [35] und Oeding [74] keine Unterschiede für verschiedene Wegbreiten. Neben der Dichte nennt er das Gefälle und die Oberflächenstruktur als weitere Einflussfaktoren auf die Geschwindigkeit.

1969: Navin und Wheeler [71] veröffentlichen ihre Analysen von vier Feldstudien bidirektionaler Verkehre auf Bürgersteigen in Columbia (Missouri, Amerika), die sie mit Fotokameras und vier Bildern pro Sekunde aufgezeichnet hatten. Die Probanden waren 18 – 25 Jahre alt. Die Autoren sehen bei der Dichte-Geschwindigkeit-Beziehung eine Übereinstimmung des Verlaufs mit Hankin und Wright [35], die bei unidirektionalen Personenströmen etwas höhere Geschwindigkeiten gemessen hatten, siehe Abb. 2.1 auf S. 16. Die Versuchsreihe mit ausschließlich weiblichen Probanden unterscheidet sich mit Dichten von $0,5 \text{ Pers./m}^2$ bis $2,0 \text{ Pers./m}^2$ und Geschwindigkeiten von $0,3 \text{ m/s}$ bis $0,9 \text{ m/s}$ deutlich von den restlichen Versuchsreihen, deren Dichten bei $0 - 1 \text{ Pers./m}^2$ und Geschwindigkeiten bei $0,9 - 1,8 \text{ m/s}$ liegen.

1969: Predtetschenski und Milinski veröffentlichen im Jahr 1969 ein russischsprachiges Lehr- und Praxisbuch mit Berechnungsmethoden für Personenströme. Zwei Jahre später erscheint die deutsche Übersetzung [85], weitere sechs Jahre später die englische [84]. Die Auswertungen beruhen auf knapp 800 visuellen und mit Filmkameras aufgezeichneten Beobachtungen bidirektionaler Personenströme über zwei Jahrzehnte in der damaligen UdSSR. Nach Predtetschenski und Milinski [85] hängt die Größe eines Personenstroms und seine Dichte von der Personenanzahl und ihren Abmessungen ab. Hierfür geben sie, abhängig von dem Alter und der Bekleidung, den Flächenbedarf in Tabellenform an [85, Tab. 2]. Die Autoren führen drei Berechnungsarten der Dichte auf. Die dritte, einheitenlose Dichte, die mit dem Flächenbedarf skaliert wird, sei bei beliebiger, heterogener Gruppe möglich.

Die Autoren unterteilen in die vier Anwendungstypen horizontaler Weg, Wegeinengung und Durchgang, Treppe aufwärts sowie Treppe abwärts und unterscheiden dann jeweils drei verschiedene Bewegungsformen: „normale Bewegung, Bewegung unter Komfort-Bedingung und

Gefahrenfall-Bewegung“ [85, S. 37 ff.]. In Abb. 2.1 auf S. 16 wird das aufgestellte Fundamentaldiagramm für jede der drei Bewegungsformen horizontaler Wege gezeigt, unter Verwendung des durchschnittlichen Platzbedarfs von $0,113 \text{ Pers./m}^2$. Mittels Koeffizienten ergeben sich für verschiedene Wegarten und Personengruppen unterschiedliche Fundamentaldiagramme. Predtetschenski und Milinski sind die ersten, die das Fundamentaldiagramm skalieren. Für die freie Gehgeschwindigkeit und die maximale Dichte geben sie $0,95 \text{ m/s}$ und $0,92 \text{ m}^2/\text{m}^2$ an, was bei Annahme einer durchschnittlichen Abmessung von $0,113 \text{ Pers./m}^2$ einer maximalen Dichte von $8,14 \text{ Pers./m}^2$ entspricht.

1970: Carstens und Ring [14] veröffentlichen ihre Analysen von Feldstudien an einer Brücke, fünf Gehwegen und 15 Eingangstüren in Iowa (Amerika). Drei Durchläufe wurden mit einer Fotokamera mit vier Bildern pro Sekunde aufgenommen. Die restlichen Durchläufe wurden manuell gemessen und mit Audioaufnahmen festgehalten. Für die gemessenen Geschwindigkeiten bei $0,5 - 1,5 \text{ m/s}$ und Dichten bei $0 - 2 \text{ Pers./m}^2$ finden die Autoren keinen mathematischen Zusammenhang.

1971: In der Doktorarbeit „Untersuchungen von Fußgängerbewegungen auf Bahnhöfen mit starkem Nahverkehr“ beschreibt Westphal [119] seine Analysen von Feldstudien an verschiedenen Bahnhöfen in Deutschland, bei denen hauptsächlich uni- und kaum bidirektionale Personenströme auftraten. Für Querschnittmessungen wurde ein Tonbandverfahren angewandt und für Messungen von Dichte und Geschwindigkeit Fotos aufgenommen. Auf Bahnsteigen gibt er für die mittlere Geschwindigkeit für freies Gehen $1,29 \text{ m/s} \pm 0,03 \text{ m/s}$ an [119, S. 10], jedoch keinen Dichte-Geschwindigkeit-Zusammenhang. Diesen benennt er für das Gehen in Tunneln mit einer Gleichung für Dichten unter $0,9 \text{ Pers./m}^2$ [119, S. 60].

1971: Fruin [28] veröffentlicht im Jahr 1971 die erste Auflage des Buchs „Pedestrian Planning and Design“, bei dem viele Abschnitte auf seiner Dissertation [27] beruhen. Im Jahr 1987 erscheint die überarbeitete, zweite Auflage des umfassenden Handbuchs [29]. Sie befasst sich mit verschiedenen Aspekten des Fußgängerverkehrs. Für seine Analysen nutzt Fruin eigene Feldstudien. Anstelle der Dichte mit der Einheit Pers./m^2 verwendet Fruin die verfügbare Fläche pro Person mit der Einheit Quadratmeter pro Person [29, S. 38]. Dabei stehen Personendichte und verfügbare Fläche in einem reziproken Verhältnis [29, S. 38]. Fruin bestimmt die freie Gehgeschwindigkeit mit unterschiedlichen Werten für Männer $1,37 \text{ m/s}$, Frauen $1,29 \text{ m/s}$ und ihre Mischung $1,34 \text{ m/s}$ [29, S. 39]. Laut Fruin nimmt die freie Gehgeschwindigkeit mit dem Alter ab [29, S. 40]. Neben dem Einflussfaktor Alter spielt die Intention des Gehens eine Rolle. So haben Restaurantbesucher eine höhere freie Gehgeschwindigkeit als Fußgänger auf dem Weg zum Einkaufen [29, S. 40]. Eine Neigung des Wegs bis zu 5% oder das Mitführen von Gepäck nimmt keinen nennenswerten Einfluss auf die Geschwindigkeit, wohingegen der größte Einfluss die Dichte ist [29, S. 41]. Das von Fruin aufgestellte Fundamentaldiagramm für den unidirektionalen Verkehr für Dichten über $0,27 \text{ Pers./m}^2$ wird in Abb. 2.1 auf S. 16 gezeigt. „Ähnliche Studien für bi- und multidirektionale Verkehre für Pendler und Einkäufer liefen auf nur kleine Variationen von dieser Kurve hinaus, das eine allgemeine Anwendbarkeit bestätigt“ [29, S. 42]. Für Werte bis 2 Pers./m^2 besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Dichte und Geschwindigkeit. Ab einer Dichte von $3,59 \text{ Pers./m}^2$ kommt der Personenstrom zum Stehen [29, S. 42 f.]. Fruin gibt als Untergrenze für das natürliche Gehen die Geschwindigkeiten $0,71 \text{ m/s}$ bis $0,76 \text{ m/s}$ an.

1971: Henderson [37] führte 1965 – 1966 drei Feldversuche mit jeweils über 600 Probanden durch. Seine Analysen ergeben für beide Probandengruppen (Studierende und Fußgänger) eine Doppelppeak-Struktur in der Wahrscheinlichkeitsdichte der Geschwindigkeit mit durchschnittlichen Geschwindigkeiten von 1,53 m/s für Studierende und 1,44 m/s für Fußgänger.

Im Jahr 1972 zeigen Henderson und Lyons [38], dass die zuvor gefundene Doppelppeak-Struktur von zwei Verteilungen, eine für Frauen und eine für Männer, kommen kann. Dafür analysieren sie weitere in 1970 durchgeführte Feldversuche mit über 1000 Frauen und über 1000 Männern. Ihre Untersuchungen zeigen, dass im Schnitt Frauen langsamer gehen als Männer. Während Frauen im Durchschnitt mit einer Geschwindigkeit von 1,38 m/s gehen, weisen Männer eine Geschwindigkeit von 1,62 m/s auf. Speziell bei Studierenden liegt der gemessene Durchschnittswert für Frauen bei 1,49 m/s und für Männer bei 1,59 m/s.

1972: O’Flaherty und Parkinson [75] veröffentlichen ihre Analysen von Feldstudien, die in der Innenstadt von Leeds (England) durchgeführt wurden. Ziel war die Untersuchung des Einflusses von Einengungen auf Personenströme in Einkaufsstraßen. Mit einer Fotokamera wurden bidirektionale Personenströme mit vier bzw. acht Bildern pro Sekunde aufgezeichnet, von denen anschließend Dichten bis 1,5 Pers./m² und Geschwindigkeiten von 0,6 m/s bis 1,8 m/s ermittelt wurden. Die Autoren beschreiben einen linearen Zusammenhang zwischen beiden Größen, siehe Abb. 2.1 auf S. 16. Die durchschnittliche Geschwindigkeit berechnen sie bei Dichten bis 0,3 Pers./m² und geben die Werte für unterschiedliche Personengruppen in Tabellenform an [75, S. 437]. Unterschiede der Geschwindigkeit erkennen sie bei Frauen, die langsamer gehen als Männer und bei einzelnen Personen, die schneller gehen als in Begleitung.

1975: Pushkarev und Zupan [86] führten keine eigenen Experimente durch, sondern stützen ihre Aussagen allein auf die empirischen Daten von Fruin [28] und Oeding [74]. Die freie Gehgeschwindigkeit liegt bei 0,7–2,0 m/s und ist nur selten und unter bestimmten Umständen geringer [86, S. 5]. Anstelle der Dichte verwenden sie wie Fruin die verfügbare Fläche. Das Fundamentaldiagramm unterscheidet sich für uni- und multidirektionale Verkehre [86, S. 6].

1983: Polus et al. [81] analysieren Feldstudien bidirektionaler Personenströme im Einkaufsviertel von Haifa (Israel). Jeder der sechs Versuche dauerte circa 90 Minuten und wurde mit einer Videokamera aufgenommen und mit einer digitalen Stoppuhr gemessen. Die Autoren erkennen einen Unterschied zwischen den Geschwindigkeiten von Frauen und Männern. Für den Dichte-Geschwindigkeit-Zusammenhang werden zwei Gleichungsmodelle, mit einem bzw. drei linearen Teilen, vorgestellt [81, S. 51 ff.].

1986: Tanaboriboon et al. [104] veröffentlichen im Jahr 1986 ihre Analysen von Feldstudien in Singapur, bei denen sie einen linearen Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Dichte erkennen. Die freie Gehgeschwindigkeit geben sie mit 1,23 m/s an. Singapurianer sind langsamer als Amerikaner, jedoch ist der maximale Fluss höher als in westlichen Ländern.

Drei bzw. fünf Jahre später veröffentlichen Tanaboriboon und Guyano [102, 103] ihre Analysen einer weiteren Feldstudie in Bangkok (Thailand), in der Asiaten mit einer Geschwindigkeit von 1,21 m/s langsamer gehen als Personen aus westlichen Ländern. Auch hier erkennen die Autoren einen linearen Zusammenhang zwischen Dichte und Geschwindigkeit.

1987: Mori und Tsukaguchi [64] analysieren Feldstudien unidirektionaler Personenströme von Pendlern in der Innenstadt von Osaka (Japan). Eine Fotokamera nahm die Durchläufe mit

mehreren Bildern pro Sekunde auf. Aus ihren empirischen Daten erkennen die Autoren einen linearen Zusammenhang der Dichte-Geschwindigkeit-Beziehung, siehe Abb. 2.1 auf S. 16.

1988: Ando et al. [1] untersuchen Feldstudien unidirektionaler Personenströme in Bahnhöfen in Japan. Im Jahr 1988 veröffentlichen sie die Ergebnisse ihrer Videoanalysen, in denen sie eine Dichte-Geschwindigkeit-Beziehung mit freier Gehgeschwindigkeit bis Dichten von $0,8 \text{ Pers./m}^2$ beschreiben. Außerdem zeigen sie einen Verlauf der freien Gehgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht [1, Abb. 1].

1991: Morrall et al. [68] analysieren eine im Juli 1988 an drei verschiedenen Orten in Colombo (Sri Lanka) durchgeführte Feldstudie. Manuell wurden Zeiten gestoppt und Flüsse bestimmt. In der Analyse geben die Autoren nicht an, ob uni- oder bidirektionale Personenströme untersucht wurden. Des Weiteren präsentieren sie Diagramme für den Fluss-Geschwindigkeit- und Dichte-Geschwindigkeit-Zusammenhang, deren Messwerte jedoch nicht zueinander passen.

1991: Daly et al. [20] untersuchen Feldstudien an verschiedenen Analgentypen Londoner U-Bahn-Stationen, bei denen manuell Fluss, Reisezeiten und physikalische Dimensionierung der Anlagen gemessen wurden. Sie geben jeweils die freie Gehgeschwindigkeit, Kapazität und die Geschwindigkeit bei der Kapazität an.

1993: In seiner Literaturstudie schafft Weidmann [118] im Jahr 1993 einen Überblick über den Stand der Wissenschaft zu transporttechnischen Eigenschaften des Fußgängerverkehrs. Weidmann wertet dafür circa 200 verschiedene Literaturquellen aus. 2007 erscheint eine aktualisierte Version der Literaturstudie von Buchmüller und Weidmann [11], die sich mit weiteren Literaturquellen, welche eine größere Datengrundlage liefern, befasst. Dabei werden „keine [gravierenden] Diskrepanzen festgestellt“ [11, S. 1].

Weidmann [118] stellt fest, dass die Leistungsfähigkeit des Menschen Einflüssen wie Geschlecht, Alter, Jahres- und Tageszeit, Umgebungsklima und Höhenlage unterliegt, die wiederum Einfluss auf die Geschwindigkeit ausübt. Die Einflüsse unterteilt er in Fußgängereigenschaften, Bewegungsbegleitumstände und Charakteristika der Anlagen. Laut Weidmann haben Männer eine freie Gehgeschwindigkeit von $1,41 \text{ m/s}$ und Frauen von $1,27 \text{ m/s}$, die sich im Alter von 20 Jahren auf dem Höhepunkt befindet. Morgens läuft man schneller als abends und die Geschwindigkeit nimmt bei steigender Temperatur ab. Die Geschwindigkeit hängt linear von der Schrittgröße ab [118, S. 18]. Die Dichte übt einen starken Einfluss auf die Geschwindigkeit aus. Eine Einteilung nach Verkehrszweck in Pendlerverkehr, Einkaufsverkehr, Nutzverkehr und Freizeitverkehr bezeichnet er als „heikel“, da es einerseits Verhalten gibt, die eindeutig dem Zweck zugeschrieben werden können, die Personengruppen je nach Verkehrszweck sich aber in Parametern wie Alter, Geschlecht oder Gesundheitszustand unterscheiden [118, S. 45 f.].

Als durchschnittliche Geschwindigkeit aller Literaturangaben gibt er $1,34 \text{ m/s}$ an. Die maximale Dichte liegt bei $5,4 \text{ Pers./m}^2$. Die Daten für die maximale Dichte stammen von 25 Literaturquellen, bei denen die meisten Daten für Dichten ab $1,8 \text{ Pers./m}^2$ bei multidirektionalen Personenströmen gemessen wurden. Laut Weidmann bestehen jedoch keine Differenzen zwischen uni- und multidirektionalen Personenströmen. In Abb. 2.1 auf S. 16 wird die von Weidmann aufgestellte exponentielle Funktion für das Fundamentaldiagramm gezeigt [118, Gleichung (16)].

1994: Virkler und Elayadath [112] vergleichen sieben Modelle des Dichte-Geschwindigkeit-Zusammenhangs mit empirischen Daten einer Feldstudie unidirektionaler Personenströme von Zuschauern nach einem Sportevent im Eingangsbereich eines Tunnels in Columbia (Missouri, Amerika). Dichte und Geschwindigkeit wurden manuell aus Videomitschnitten und gestoppten Zeiten ermittelt, der Fluss indirekt aus Dichte und Geschwindigkeit berechnet. Anhand verschiedener Tests kommen die Autoren zu dem Schluss, dass das Modell von Edie [22] mit zwei Bereichen im Fundamentaldiagramm exponentiell für niedrige Dichten, sonst logarithmisch die empirischen Daten am besten beschreibt.

1995: Knoflacher [53] veröffentlicht Planungsprinzipien zu „Fussgeher- und Fahrradverkehr“, in denen er viele Stellen von Weidmann [118] und Grafiken von Oeding [74], Fruin [28] und Pushkarev und Zupan [86] übernimmt [53, S. 85 ff.]. Er führt keine eigenen Experimente durch. Den geometrisch minimalen Platzbedarf gibt er bei einer Dichte von $6,6 \text{ Pers./m}^2$ an [53, S. 35].

1995: Smith [98] veröffentlicht seine Untersuchung bereits durchgeführter Studien von Hankin und Wright [35] sowie Ando et al. [1] und folgert, dass Dichte und Anlagentyp einen Einfluss auf die Geschwindigkeit ausüben. Er übernimmt die Grafiken von Ando et al. [1] für den Geschwindigkeitsverlauf mit wachsendem Alter und den Dichte-Geschwindigkeit-Zusammenhang unidirektionaler Bewegung. Smith berechnet daraus den Fluss, dessen Maximum bei Dichten von 3 Pers./m^2 bis 6 Pers./m^2 um $1,7 \text{ Pers./m/s}$ liegt und damit höher als bei Daly et al. [20], Hankin und Wright [35] und Turner [110] mit $1,4 - 1,5 \text{ Pers./m/s}$ ist.

1995: Lam et al. [57] untersuchen Personenströme von Feldstudien, welche im Jahr 1991 in Hongkong (China) durchgeführt, mit Videokameras aufgenommen und durch Personen vor Ort gezählt wurden. Aus ihren aufgestellten Fundamentaldiagrammen für verschiedene Verkehrsanlagen erkennen die Autoren einen Unterschied beim Geschwindigkeit-Fluss-Zusammenhang zwischen Personenströmen innerhalb und außerhalb von Gebäuden. Für innerhalb von Gebäuden geben sie einen linearen und für außerhalb von Gebäuden einen exponentiellen Geschwindigkeit-Dichte-Zusammenhang an. Für die maximale Dichte innerhalb von Gebäuden ergibt sich $3,6 \text{ Pers./m}^2$.

Den Unterschied zwischen Gehen innerhalb und außerhalb von Gebäuden untersuchen Lam und Cheung [56] im Jahr 2000 bei weiteren im Jahr 1997 durchgeführten Feldstudien in Hongkong (China), die mit Videokameras mit 25 Bildern pro Sekunde aufgezeichnet wurden. Personen außerhalb von Gebäuden gehen schneller als Personen innerhalb, wie auch Einkäufer gegenüber Personen auf öffentlichen Plätzen. Ausnahme bilden Personen auf öffentlichen Plätzen, die innerhalb von Gebäuden bei der Kapazitätsgrenze schneller gehen als außerhalb.

Weitere drei Jahre später veröffentlichen Lam et al. [58] Analysen einer Feldstudie von bidirektionalen Personenströmen innerhalb von Gebäuden. Dafür wurden an zwei Orten Videoaufzeichnungen durchgeführt, Geschwindigkeiten gemessen und Flüsse bestimmt. Ein Ergebnis ihrer Analysen ist, dass die Inhomogenität von bidirektionalen Personenströmen einen Einfluss auf das Fundamentaldiagramm ausübt, der mit steigender Dichte wächst. Dabei bezieht sich die Inhomogenität auf den Anteil an Personen je bidirektionalen Strom.

2002: Nelson und Mowrer [72] veröffentlichen im Jahr 2002 im SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, der dritten Auflage des 1988 erschienen Handbuchs, ihre Empfehlungen zur Berechnung von Evakuierungsvorgängen. 2016 wird die fünfte Ausgabe des Handbuchs

veröffentlicht. Für ihre Angaben verweisen die Autoren auf Predtetschenski und Milinski [85], Fruin [29] und Pauls [77, 78]. Nelson und Mowrer nehmen für kleine Dichten eine konstante Geschwindigkeit an, die ab einer bestimmten Dichte linear bis Null fällt, siehe Abb. 2.1 auf S. 16. Für den linearen Zusammenhang zwischen Dichte und Geschwindigkeit geben sie eine Berechnungsgleichung mit Skalierungskoeffizient nach Anwendungstyp (eben oder stufenförmig mit verschiedenen Ausprägungen) an [72, Gleichung (3), S. 3-370]. Für Korridore ergeben sich für die maximale Dichte 3,76 Pers./m² und die freie Gehgeschwindigkeit 1,20 m/s. Die Autoren geben die Berechnungsgleichung im angloamerikanischen Maßsystem als auch für das metrische Einheitensystem an. Bei ihrer Umrechnung zum metrischen System verwenden sie gerundete Koeffizientenwerte, sodass bestimmte metrische Grenzwerte nicht denen aus dem angloamerikanischen ins metrische System umgewandelten Werten entsprechen.

2004: Hoskin [43] sowie Hoskin und Spearpoint [44] veröffentlichen ihre Analysen von Feldstudien in Neuseeland und Australien, bei denen mit Videokameras 23 Ausgänge von Stadien mit Treppen und Gehwegen nach Sportevents gefilmt und manuell Geschwindigkeiten und Dichten gemessen wurden. Die Autoren zeigen die Dichte-Geschwindigkeit-Beziehung von unidirektionalen Personenströmen und nehmen einen linearen Ansatz an, wie er auch schon von Fruin [28] formuliert wurde. Des Weiteren verwenden sie die Gleichung von Nelson und Mowrer [72] für diese Beziehung.

2004: Isobe et al. [47] veröffentlichen Untersuchungen von Gegenströmen im Laborexperiment und in Simulationen. Beim Experiment wurden die Probanden zufällig in einem Korridor verteilt und wurden angewiesen ihn anschließend am entfernteren Ausgang zu verlassen. Mit unterschiedlicher Probandenanzahl je Durchlauf werden verschiedene Dichten untersucht. Gemessen wurden anhand von Videoaufzeichnungen die Räumungszeiten aus denen indirekt Geschwindigkeiten berechnet werden, deren Durchschnittswerte mit steigender Dichte sinken.

Vergleich der Fundamentaldiagramme und Grenzwerte: In Abb. 2.1 werden aus den in diesem Unterabschnitt vorgestellten Studien die unterschiedlichen Fundamentaldiagramme im Zusammenhang zwischen Dichte und Geschwindigkeit für Personenströme in der Ebene gezeigt.⁸ Die Datenerhebung ermöglichte überwiegend nur makroskopische Messungen von Kenngrößen. Grundsätzlich ähneln sich die angegebenen Zusammenhänge insbesondere darin, dass mit Zunahme der Dichte die Geschwindigkeit sinkt. Es fällt auf, dass die Kurve von Reimer [87] bei Dichten kleiner als 3 Pers./m² mit einer sehr hohen Geschwindigkeit deutlich über den anderen Fundamentaldiagrammen liegt.

Die funktionalen Angaben der Relation zwischen Dichte und Geschwindigkeit und die Datenwolken unterscheiden sich in ihrer Form. Während die Geschwindigkeit bei einigen Beziehungen bei Dichten bis circa 0,6 Pers./m² konstant ist, fällt sie bei anderen Beziehungen schon für geringere Dichten. Des Weiteren unterscheiden sich die Kurven in ihrer Lage. Die Kenngröße maximale Dichte für Fußgängerbewegung horizontaler Wege weicht stark voneinander ab. In Abb. 2.1 ist sie als Schnittpunkt der Kurve mit der Abszissenachse abzulesen. Sie reicht von 3,59 Pers./m² bis 8,14 Pers./m², dem 2,27-fachen. Auch die freie Gehgeschwindigkeit, in Abb. 2.1 der Schnittpunkt von Kurve und Ordinatenachse, weist deutliche Unterschiede auf.

⁸ Für die Fundamentaldiagramme von Predtetschenski und Milinski [85] in dieser Abbildung wurde für die Berechnung der Kurven eine beanspruchte Fläche von 0,113 Pers./m² gewählt.

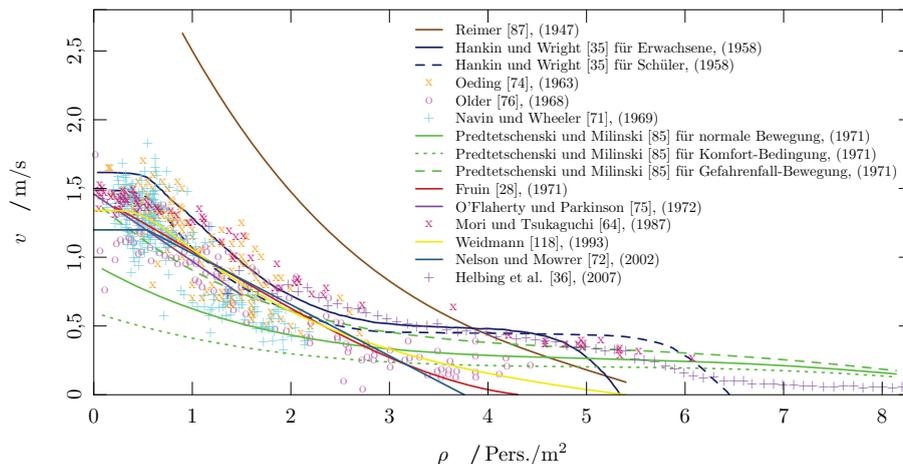


Abb. 2.1: Fundamentaldiagramme in der Literatur. Darstellung des Zusammenhangs von Dichte ρ und Geschwindigkeit v für Personenströme in der Ebene.

Außerdem wurden in Studien, bei denen kein Zusammenhang zwischen Dichte und Geschwindigkeit angegeben wurde und die deshalb nicht in diesem Unterabschnitt aufgeführt wurden, unterschiedliche freie Gehgeschwindigkeiten von 0,86 m/s bis 1,56 m/s gemessen. Angegeben sind diese in Tab. 2.1, die nach dem Land des Experiments sortiert ist. In Indien, Bangladesch, China, Indonesien, aber auch Thailand, Saudi Arabien und Philippinen liegen die freien Gehgeschwindigkeiten unter denen von den westlichen Ländern.

Die Diskrepanzen in den Fundamentaldiagrammen in Abb. 2.1 können durch drei Aspekte erklärt werden. Unterschiedliche Messmethoden von Dichte, Geschwindigkeit und Fluss führen zu abweichenden Fundamentaldiagrammen. Personenbezogene Faktoren, wie z. B. Alter oder Zweck der Bewegung, können ebenfalls Einflüsse auf die Bewegung der Fußgänger ausüben. Beispielsweise geben Predtetschenski und Milinski [85] drei unterschiedliche Fundamentaldiagramme für normale Bewegung, Komfort-Bewegung und Gefahrenfall-Bewegung an. Ein dritter Aspekt sind äußere Faktoren, wie z. B. die räumliche Struktur des Parcours, die Witterung oder die Beschaffenheit des Bodens.

Tab. 2.1: Freie Gehgeschwindigkeit in unterschiedlichen Studien.

Ort des Experiments	v_0 in m/s	Jahr der Veröffentlichung	Studie
Khulana (Bangladesch)	0,86	2012	Nazir et al. [65]
Hongkong (China)	1,19	1995	Lam et al. [57]
Hongkong (China)	1,23	2000	Lam und Cheung [56]
Shanghai (China)	1,26	1993	Yu [123] nach Teknomo [106]
London (England)	1,31	1968	Older [76]
Bastia (Frankreich)	1,49	1976	Bornstein und Bornstein [10]
Paris (Frankreich)	1,46	1980	Kamino [50] nach Laxman et al. [59]
Dehli (Indien)	1,20	1986	Gupta [34] nach Laxman et al. [59]
Madras (Indien)	1,20	1989	Victor [111] nach Laxman et al. [59]
Roorkee (Indien)	1,33	2010	Laxman et al. [59]

Ort des Experiments	v_0 in m/s	Jahr der Veröffentlichung	Studie
Tiruchirapalli (Indien)	1,08	1994	Arasan et al. [4]
Yogjakarta (Indonesien)	0,87	1995	Poei et al. [80] nach Nazir et al. [65]
Limerick (Irland)	1,27	1979	Bornstein [9]
Haifa (Israel)	1,31	1983	Polus et al. [81]
Fukuoka (Japan)	1,35	1980	Kamino [50] nach Laxman et al. [59]
Koori-cho (Japan)	1,17	1980	Kamino [50] nach Laxman et al. [59]
Osaka (Japan)	1,50	1980	Kamino [50] nach Laxman et al. [59]
Tokyo (Japan)	1,56	1980	Kamino [50] nach Laxman et al. [59]
Amman (Jordanien)	1,34	2001	Tarawneh [105]
Calgary (Kanada)	1,40	1991	Morrall et al. [68]
Kolumbien	1,31	1969	Navin und Wheeler [71]
Kuwait City (Kuwait)	1,18	1993	Koushki und Ali [55] nach Laxman et al. [59]
Neuseeland	1,47	2008	Finnis und Walton [26]
Metro Manila (Philippinen)	1,18	1995	Gerilla et al. [31] nach Laxman et al. [59]
Riyadh (Saudi Arabien)	1,08	1988	Koushki [54]
Colombo (Sri Lanka)	1,35	1991	Morrall et al. [68]
Singapur	1,23	1986	Tanaboriboon et al. [104]
Bangkok (Thailand)	1,22	1991	Tanaboriboon und Guyano [103]
USA	1,51	1996	Knoblauch et al. [52]
New York (USA)	1,34	1971	Fruin [29]
Pittsburgh (USA)	1,46	1968	Hoel [40]
Flughäfen San Francisco und Cleveland Hopkins (USA)	1,34	1999	Young [122]

2.3.2 Eindimensionale Bewegung

Im Folgenden werden Veröffentlichungen zu Experimenten eindimensionaler Fußgängerbewegung vorgestellt, d. h. von Experimenten, bei denen Personen hintereinander in einer Reihe gehen. Eingeschränkt sind diese Veröffentlichungen auf alle, die einen Bezug zum Fundamentaldiagramm oder zu hohen Dichten vorweisen.⁹ Experimente eindimensionaler Bewegung und Literaturangaben, die auf diese Experimente zurückgreifen, sind in Tab. 2.2 aufgeführt. Wenn aus der Veröffentlichung nicht hervorgeht, in welchem Jahr das Experiment durchgeführt wurde, wird das Jahr der ersten Veröffentlichung aufgelistet.

2005: Seyfried et al. [94] führen das erste Experiment eindimensionaler Bewegung im Jahr 2005 durch. Es fand in Deutschland mit Studierenden und Angestellten des Forschungszentrums Jülich als Probanden statt und es wurde ein ähnlicher Aufbau wie bei Hankin und Wright [35] verwendet. Der 17,30 m lange, ovale Parcours besaß einen 0,80 m breiten Korridor in den geraden Bereichen und einen bis zu 1,20 m breiten Korridor in den Kurven. Die Versuchsreihe bestand aus sechs Durchläufen mit steigender Probandenanzahl ($N = 1, 15, 20, 25, 30$ und 34), wobei jeder Proband beim Durchlauf $N = 1$ einmal teilnahm und den Parcours allein

⁹ Hierbei handelt es sich um eine Totalerhebung, d. h. um alle Veröffentlichungen, die der Autorin dieser Arbeit bekannt sind.

Tab. 2.2: Laborexperimente eindimensionaler Bewegung.

Jahr des Experiments	Land des Experiments	Studie
2005	Deutschland	Seyfried et al. [94], Seyfried et al. [95], Portz und Seyfried [82, 83]
2006	Deutschland	Seyfried et al. [96], Seyfried et al. [97], Seyfried und Schadschneider [93], Portz und Seyfried [82, 83], Winkens et al. [120], Zhang et al. [126], Zhang et al. [127], Zhang et al. [128], Eilhardt und Schadschneider [24]
2008	Indien	Chattaraj et al. [15]
2008	China	Liu et al. [62], Song et al. [99]
2008	Japan	Tomoeda et al. [107]
2008	Deutschland	Rogsch [89]
2010	Frankreich	Jelić et al. [48, 49], Lemerrier et al. [60], Appert-Rolland et al. [3]
2010	China	Song et al. [99]
2012	Japan	Tomoeda et al. [108]
2012	Japan	Yanagisawa et al. [121]
2013	Deutschland	Holl [41] ¹⁰
2015	China	Cao et al. [13], Zhang et al. [129]

durchlief. Bei den anderen Durchläufen sollten die entsprechenden N Probanden im Parcours diesen mehrmals passieren ohne sich zu überholen, bevor dieser an einer Stelle geöffnet wurde und sie ihn verlassen konnten. Die Probanden wurden angewiesen entspannt und ohne Eile im Uhrzeigersinn zu gehen. Eine Videokamera filmte mit 25 Bildern pro Sekunde einen zwei Meter langen geraden Bereich von der Seite.

Manuell wurden aus den Videobildern die Eintritts- und Austrittszeiten der Probanden im Messbereich erfasst. Um die Bewegung der Probanden durch die Ortsänderung eines Punktes zu beschreiben wurde die Bewegung des Ohrs verfolgt. So entspricht die Distanz nicht dem tatsächlichen Abstand zweier Probanden, sondern der Distanz zwischen den beiden getrackten Ohren.¹¹ Durch Division der Messstreckenlänge mit der Zeitspanne zum Überqueren ebendieser berechnen die Autoren die individuellen Geschwindigkeiten. Für die Messung der Dichte nehmen die Autoren anstelle der Anzahl der Personen auf der Messstrecke, welche bei einer so kurzen Messstrecke stark zwischen diskreten Werten schwankt, die Summe der Kehrwerte des Anteils der Distanz zwei benachbarter Personen, die noch auf der Messstrecke liegt. Bei der Analyse des mikroskopischen Fundamentaldiagramms wird ein linearer Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und dem Abstand im Intervall $[0,2; 1,0]$ m/s bzw. $[0,5; 1,5]$ m gefunden, vgl. [94, Abb. 7].

Des Weiteren nehmen die Autoren eine Transformation der eindimensionalen Daten zu zweidimensionalen Daten, d. h. Gerade zu Ebene, mit einer nach Weidmann [118] angenommenen

¹⁰ Holl [41] nennt alle Experimente, die im Rahmen des Projekts Bausteine für die Sicherheit von Großveranstaltungen (BaSiGo) durchgeführt wurden, unter anderem ein Experiment eindimensionaler Bewegung. Dieses wird im Rahmen dieser Arbeit als Experiment 2 vorgestellt (vgl. Unterabschnitt 3.2.3) und analysiert (vgl. Kapitel 4 und 5).

¹¹ Das Wort tracken ist englischer Herkunft und bedeutet „den aktuellen Aufenthaltsort von jemanden, etwas verfolgen“ [21].

Körperbreite von 0,46 m vor. Diese berücksichtigt, dass mit steigender Geschwindigkeit die laterale erforderte Breite mit einem Faktor wächst. Für zwei verschiedenen gewählte Faktoren liegen die resultierenden Dichte-Geschwindigkeit-Werte im Bereich des durch Weidmann für die Ebene definierten Fundamentaldiagramms, vgl. [94, Abb. 8]. Daraus schließen sie für das betrachtete Dichteintervall $[1; 5]$ Pers./m², dass innere Reibung und laterale Beeinflussung, die es bei eindimensionaler Bewegung nicht gibt, keinen starken Einfluss auf das Fundamentaldiagramm der Ebene haben.

2006: Seyfried et al. [95] verwenden für die Analyse des Dichte-Geschwindigkeit-Zusammenhangs ein modifiziertes eindimensionales Soziale-Kräfte-Modell. Zwar erzeugt das Modell ein makroskopisches Fundamentaldiagramm in der typischen Form, bei der mit abnehmendem Platzangebot die Geschwindigkeit sinkt, jedoch unterscheidet sich der Parameter, der den Bedarf bestimmt, von dem von Seyfried et al. [94], bei dem die Autoren das Fundamentaldiagramm mikroskopisch bestimmt hatten. Somit kann ein Modell welches den makroskopischen Zusammenhang zwischen Dichte und Geschwindigkeit richtig beschreibt nicht zwingend den mikroskopischen Zusammenhang reproduzieren. Der Platzbedarf bei durchschnittlicher Geschwindigkeit entspricht nicht dem durchschnittlichen Platzbedarf.

2009: Chattaraj et al. [15] führten im Jahr 2008 in Kanapur (Indien) Experimente eindimensionaler Bewegung mit demselben Aufbau wie Seyfried et al. [94] durch. Unterschiede fanden sich in der Zusammensetzung der Probanden und der Laufrichtung. Während in Deutschland Frauen und Männer teilnahmen, bestand bei den in Indien durchgeführten Versuchen die Probandengruppe ausschließlich aus Männern. In ihrer Veröffentlichung vergleichen Chattaraj et al. ihr mikroskopisches Fundamentaldiagramm mit dem von Seyfried et al. [94]. Die Autoren zeigen, dass die Geschwindigkeit der in Indien durchgeführten Experimente von der in Deutschland durchgeführten Experimente abweicht. Insbesondere zeigt sich das bei den Versuchen in Indien sich bei hohen Dichten höhere Geschwindigkeiten einstellen als bei den Versuchen in Deutschland. Der minimale Abstand zwischen Personen ist bei den Probanden der indischen Gruppe geringer als bei den der deutschen Gruppe. Dies deutet darauf hin, dass die Probanden aus Deutschland tendenziell einen größeren Privatsphärenbereich besitzen. Für die Berechnung von Dichte und Geschwindigkeit verwenden die Autoren die gleichen Formeln wie Seyfried et al. [94].

Eine zweite Versuchsreihe wurde mit einem Parcours der doppelten Korridorlänge durchgeführt. Um dieselben globalen Dichten zu erhalten, nahm je Durchlauf die doppelte Anzahl der Probanden teil. Es wurden dieselben Geschwindigkeiten bei entsprechender Dichte gemessen. Die Autoren folgern aus ihren statistischen Tests, dass die Länge des Parcours keinen Einfluss auf den Zusammenhang zwischen Abstand und Geschwindigkeit habe. Hier ist kritisch anzumerken, dass lediglich zwei verschiedene Korridorlängen untersucht werden.

2009: Liu et al. [62] führten im Jahr 2008 in China Experimente eindimensionaler Bewegung mit demselben Aufbau wie Seyfried et al. [94] durch. Der Parcours wurde mit Stühlen und Tischen abgesteckt und die Probanden waren Studierende im Alter von 19 Jahren bis 25 Jahren und einer Körpergröße von 1,60 m bis 1,85 m. Die Versuchsreihe bestand aus sechs Durchläufen mit steigender Probandenanzahl ($N = 1, 15, 20, 25, 30$ und 34), wobei bei $N = 1$ jeder Proband den Parcours einmal allein durchlief und sich die teilnehmenden N Probanden

bei den restlichen Durchläufen gleichförmig im Parcours verteilt, bevor sie diesen dreimal durchlaufen sollten. Die Laufrichtung war im mathematisch positiven Sinn. Zur Erkennung der Probanden wurde für die überkopf gefilmten Videodaten eine neue Bearbeitungsmethode von Comaniciu et al. [17] verwendet. Diese beruht auf einem mean-shift-Algorithmus, der Probanden anhand getragener einfarbiger Mützen verfolgt und somit ihre Trajektorien, d. h. Weg-Zeit-Kurven extrahiert.

Die fundamentalen Zusammenhänge ähneln den Ergebnissen von Seyfried et al. [94]. Wie auch bei Chattaraj et al. [15] sind die gemessenen Durchschnittsgeschwindigkeiten je Durchlauf höher als die bei Seyfried et al. gemessenen Werte. Die Autoren vermuten als Ursache die geringere Körpergröße der Asiaten gegenüber den Menschen aus dem Westen, führen jedoch keine statistischen Vergleiche durch. Neben dem Fundamentaldiagramm untersuchen die Autoren laterale Oszillationen, die mit ansteigender Dichte wachsen, während ihre Frequenz sinkt. Die Autoren beschreiben nicht, wie sie die Geschwindigkeit bestimmen und verwenden für die Durchschnittsberechnung vermutlich keine Daten des stationären Zustands.

2010: Seyfried et al. [96] zeigen, dass die Messmethode einen starken Einfluss auf die Form des Fundamentaldiagramms ausübt. Hierfür untersuchen sie eine im Jahr 2006 an der Bergischen Kaserne Düsseldorf durchgeführte Versuchsreihe eindimensionaler Bewegung mit zwölf Durchläufen ($N = 14, 17, 20, 22, 25, 28, 34, 39, 45, 56, 62$ und 70) und Soldaten als Probanden.¹² Der Parcours bestand aus einem Oval mit einer Korridorlänge von circa 27 m und einer Korridorbreite von 0,80 m. Zwei vier Meter lange Messbereiche an den geraden Seiten wurden mit zwei Videokameras aus einer Höhe von 5,35 m mit 25 Bildern pro Sekunde gefilmt. Die Probanden trugen Markierungen auf ihrem Kopf, mit deren Hilfe sie anschließend in den Videoaufzeichnungen mit der Software PeTrack erkannt und getrackt werden konnten.¹³

Die Autoren wenden auf die empirischen Daten im stationären Zustand zwei unterschiedliche Messmethoden an, bei welcher entweder lokal an einer Stelle gemessen und über die Zeit gemittelt wird oder der Durchschnitt einer Messfläche zu einem Zeitpunkt berechnet wird. Dabei kann bei der einen nur die Dichte und die Geschwindigkeit und bei der anderen nur der Fluss und die Geschwindigkeit gemessen werden. Die resultierenden Fundamentaldiagramme unterscheiden sich und sind voneinander gerade bei hohen Dichten sehr abweichend. Den Grund hierfür sehen sie bei der Mittelung über verschiedene Freiheitsgrade in einem diskreten System mit großen Inhomogenitäten. Sie fordern, dass Untersuchungen potentieller Einflüsse wie Kultur, aber auch die Validierung von Modellen mittels empirischer Daten, nur mit denselben Messmethoden vorgenommen werden dürfen.

Im selben Jahr veröffentlichen Seyfried und Schadschneider [93] ihre Analyse empirischer Daten von Seyfried et al. [96] und stellen Einflüsse der Messmethode vor. Dabei unterscheiden sie zwischen der Messung zu einem bestimmten Zeitpunkt an einer Messstrecke und der Messung über eine Zeitspanne an einem bestimmten Ort. Des Weiteren zeigen sie anhand unterschiedlicher Engstellen-Experimente, dass es zu wenig empirische Daten für die Analyse und das Verstehen der Fußgängerdynamik gibt.

¹² Im Rahmen eines Projekts wurden an fünf Tagen Experimente mit insgesamt 99 Durchläufen und 250 Probanden durchgeführt. Die meisten Probanden waren männlich.

¹³ Die Software PeTrack wird von Boltes et al. [5, 6] vorgestellt. Mit ihr können auf Videobildern Personen anhand einer Markierung, z. B. in Form einer Mütze, automatisch erkannt und getrackt werden.

2010: Portz und Seyfried [82] untersuchen hohe Dichten in eindimensionalen Fußgängersystemen mit einem mikroskopischen Modell. Die Autoren stellen ein anpassungsfähiges Geschwindigkeitsmodell mit Reaktionszeit vor, welches Stop-and-go-Wellen qualitativ ähnlich empirischer Daten von Seyfried et al. [96] wiedergibt. Die Autoren beschreiben ihre Veröffentlichung als Fortsetzung und Erweiterung von Seyfried et al. [95]. Für die Validierung ihres Modells verwenden sie beim Fundamentaldiagramm die empirischen Daten von Seyfried et al. [94] und bei den Weg-Zeit-Kurven die empirischen Daten von Seyfried et al. [96], bei denen Stop-and-go-Wellen bei Dichten größer als 2 Pers./m beobachtet wurden.

Ein Jahr später stellen die Autoren die Koexistenz zweier Geschwindigkeitsphasen in hohen Dichten [83] dar. Zuerst zeigen Portz und Seyfried, dass die empirischen Daten beider Experimente von Seyfried et al. [94, 96] im mikroskopischen Fundamentaldiagramm auf derselben Kurve liegen und für ihre Analyse zusammengefasst werden können. Dann untersuchen sie die Geschwindigkeitsverteilung für bestimmte Dichtebereiche im mikroskopischen Voronoi-Dichte-Geschwindigkeit-Zusammenhang eindimensionaler Bewegung.¹⁴ Für vier Dichtebereiche in [1,8; 2,6] Pers./m existierten zwei Geschwindigkeitsphasen mit Peaks bei 0 m/s und 0,15 m/s. Außerdem stellen die Autoren ein Modell vor, welches diese Koexistenz reproduziert. Vier Jahre später wird gezeigt, dass der Effekt nur von Anfangsbedingungen abhängt und kein stabiler Zustand im Modell erreicht wurde, vgl. [24, S. 59].

2010: Die Reaktionszeit von Probanden zum Vorgänger in einer Schlange untersuchen Tomoda et al. [107]. Des Weiteren erstellen sie ein Modell, welches sie mit ihren empirischen Daten von zwei durchgeführten Experimenten verifizieren. Im ersten Experiment wurden Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Start- und Stopp-Wellen in einer Schlange untersucht. Hierfür stellten sich zehn Probanden hintereinander in eine Reihe auf. Der Vorderste ging los und die anderen sollten ihm folgen. Nach einer Weile hielt der Vorderste wieder an und die anderen Probanden taten es ihm gleich. Vor dem Durchlauf und danach wurden Abstände gemessen. Des Weiteren wurden verschiedene Zeiten gestoppt. Dieser Durchlauf wurde in der Ebene, auf einer abwärts führenden Straße sowie auf einer aufwärts führenden Straße durchgeführt. Nur in der Ebene ist die Geschwindigkeit der Stopp-Welle geringer als die der Start-Welle. Während die Ausbreitungsgeschwindigkeiten in der Ebene und abwärts zwischen 1,20 m/s und 1,35 m/s liegen, werden aufwärts Werte zwischen 0,90 m/s und 1,15 m/s erreicht.

Beim zweiten Experiment bestand der Parcours aus einem Kreis mit einem Innenradius von 1,80 m und einem Außenradius von 2,30 m und einer resultierenden Korridorlänge von 12,88 m. Bei acht Durchläufen nahmen $N = 4, 6, 8, 9, 11, 13, 15$ bzw. 20 Probanden teil. Es wurden Rundenzeiten gemessen. Die Autoren geben einen Dichte-Fluss-Zusammenhang an, bei dem sie globale Dichten verwenden. Sie geben nicht an, wie sie den Fluss bestimmen.

2010: Auf der vierten Fußgänger-Konferenz Pedestrian and Evacuation Dynamics wurde im Jahr 2008 in Wuppertal auf dem Parkplatz des Konferenzgebäudes ein Experiment mit sechs Durchläufen unterschiedlicher Probandenanzahl ($N = 51, 47, 25, 29, 19$ und 16) durchgeführt und mit einer Videokamera aufgenommen. Rogsch [89] beschreibt im Tagungsband der Konferenz dieses Experiment. Die Probanden waren Teilnehmer der Konferenz aus der ganzen Welt und kannten sich mit Themen der Fußgängerdynamik aus. Je Durchlauf stellten sich

¹⁴ Die Bestimmung der Voronoi-Dichte wird in Steffen und Seyfried [100] vorgestellt.

die Probanden hintereinander in einen 22,5 m langen Bereich entlang einer Parkplatzlinie auf und gingen nach einem Start-Kommando los. Nur bei den zwei höchsten globalen Dichten von 2,09 Pers./m und 2,27 Pers./m lässt sich eine Start-Welle erkennen. Diese bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 1,07 m/s entgegen der Laufrichtung. Die Geschwindigkeit berechnet der Autor über die Division der Weglänge durch die Zeitspanne vom Losgehen des ersten Probanden bis zum Losgehen des hintersten Probanden.

2011: Winkens et al. [120] untersuchen den Einfluss des Messbereichs auf das Fundamentaldiagramm. Dafür nehmen sie Daten der von Seyfried et al. [96] vorgestellten Versuchsreihe sowie Daten von weiteren Versuchsreihen des gleichen Experiments mit breiteren Korridoren, sodass Überholen im Parcours möglich war. Größere Messbereiche führen zu höheren maximalen Dichten und einer größeren Fluktuation der Geschwindigkeiten bei niedrigen Dichten.

2012: Jelić et al. [48] stellen die Analysen von einem selbst durchgeführten Experiment eindimensionaler Bewegung vor. Die Probanden sollten in einem kreisförmigen Parcours mit einem Innenradius von 2,0 m und einem Außenradius von 4,5 m hintereinander gehen. Sie wurden angewiesen sich vorzustellen, dass sie allein auf einer Straße seien, ohne sich zu überholen oder miteinander zu sprechen. Das Experiment bestand aus den zwei Versuchsreihen „Innenwand“ ($N = 16, 20, 21, 24$ und 28) und „Außenwand“ ($N = 8, 16, 24$ und 28), bei denen die Probanden an den entsprechenden Wänden entlang gehen sollten. Pro Durchlauf gab es 4–8 Wiederholungen. Bei ungefähr der Hälfte der Durchläufe war die Laufrichtung im mathematisch positiven Sinn, sonst negativ. Jeder Durchlauf dauerte mindestens 60 Sekunden, bei hohen Dichten etwas länger. Die Probanden trugen vier Markierungen, drei auf ihren Schultern und eine auf ihrem Kopf, über die sie mit zwölf Infrarotkameras außerhalb des Parcours zeitgleich mit 120 Bildern pro Sekunde getrackt wurden. Aus diesen dreidimensionalen Daten wurde ein Mittelpunkt berechnet, der die Position der Probanden als Punkt beschreibt. Für ihre Analysen filterten Jelić et al. die Schritt-Oszillation aus den Daten. Die Autoren verwenden drei unterschiedliche Messmethoden, die jeweils ein Dichte-Bin角度 enthalten. Die resultierenden Fundamentaldiagramme weichen erst ab Dichten von 1,2 Pers./m gering voneinander ab. Im direkten Vergleich liegen die Geschwindigkeiten von Seyfried et al. [94] etwas niedriger. Neben dem freien Fluss und dem gestauten Bereich finden Jelić et al. einen dritten, den sogenannten schwach eingezwängten Bereich. Dieser liegt bei einem Abstand zum Vordermann von 1,1 m bis 3,0 m.

2012: Tomoeda et al. [108] untersuchen die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Start-Wellen. Ihre empirischen Analysen stammen von neun durchgeführten Experimenten eindimensionaler Bewegung mit verschieden langen Korridoren, unterschiedlichen Probandengruppen sowie unterschiedlicher Probandenanzahl und mit globalen Dichten bis 4 Pers./m. Der Korridor war immer 0,50 m breit und wurde alle 0,50 m auf beiden Seiten mit Leitkegeln begrenzt. Die Probanden wurden gleichmäßig im Korridor verteilt. Die erste Person wurde angewiesen auf ein Zeichen hin loszugehen. Die anderen wurden angewiesen dem Vordermann zu folgen. Gemessen wurden zwei unterschiedliche Zeiten: Zum einen die Zeit, bis sich der letzte Proband im Korridor in Bewegung setzte und zum anderen die Zeit, bis der letzte Proband den Korridor verließ. Die Autoren zeigen, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Start-Welle von der Anfangsdichte ρ mit $2,90 \cdot \rho^{-1,36}$ abhängt. Die zweite Messung der Zeitdauer ist für die globale Dichte von 3 Pers./m am kleinsten.

2012: Yanagisawa et al. [121] zeigen ein Modell, welches die Geschwindigkeit durch Schrittlänge und Anzahl der Schritte pro Zeiteinheit beschreibt. Theoretische Analysen ließen sie darauf schließen, dass ein vorgegebenes Tempo, das langsamer als die Frequenz des natürlichen Gehens ist, z. B. durch den Klang eines elektronischen Metronoms, den Fluss in großen Dichten erhöht. Die Autoren untersuchten in einem selbst durchgeführten Experiment eindimensionaler Bewegung, wie das Tempo den Fluss beeinflusst und bestätigten ihre Annahme. Dabei ergeben ihre Analysen, dass der Fluss bei steigender Dichte ab der Kapazitätsgrenze konvex fällt, während er für die Durchläufe mit langsamen Tempo von 70 bpm linear abfällt.

Der Parcours bestand aus einem aus Stühlen aufgebauten Kreis mit einem Innenradius von 1,8 m und einem Außenradius von 2,3 m. Die Probanden waren männliche Studenten im Alter von 18 Jahren bis 39 Jahren. Die Laufrichtung war im mathematisch positiven Sinn. Zwei Versuchsreihen „Normal“ und „Tempo“ wurden durchgeführt mit jeweils $N = 1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27$ bzw. 30, wobei $N = 1$ und $N = 3$ jeweils dreimal mit unterschiedlichen Probanden wiederholt wurde. Jeder Durchlauf dauerte mindestens 60 Sekunden, bei $N = 1$ kürzer. Bei der Versuchsreihe „Tempo“ wurde ein elektronisches Metronom, welches mit 70 bpm einen Klang erzeugt, angestellt. Manuell wurden Zeiten und die Anzahl der Personen an einer Messstelle gestoppt und gezählt. Daraus wird der Fluss berechnet. Die globale Dichte bestimmen die Autoren über den Quotienten von Anzahl der Probanden und Korridorlänge.

Die Autoren weisen darauf hin, dass ihre Ergebnisse nur für die untersuchte Personengruppe gelten und Personen mit anderen Körpergrößen andere Resultate, in Bezug auf den Schnitt der Flusskurven mit und ohne Tempovorgabe, liefern. Des Weiteren kann ein anderer Parcours zu abweichenden Ergebnissen führen. Der Klang eines elektronischen Metronoms, welches ein Tempo vorgibt, das langsamer als die Frequenz des Gehens im freien Fluss ist, verringert in Dichten unter 1 Pers./m den Fluss, während er in höheren Dichten den Fluss erhöht.

2013: Zhang et al. [126, 127] vergleichen die Fundamentaldiagramme eindimensionaler Bewegung von Pkw-Fahrern [70, 101], Fahrradfahrern [2] und Fußgängern [96]. Die Geschwindigkeit und die Dichte werden mit derselben Methode gemessen. Die gemessenen Werte liegen für alle drei Verkehrsarten in unterschiedlichen Dichte- und Geschwindigkeitsregionen. Nach einer Skalierung von Geschwindigkeit und Dichte mit der jeweiligen Wunschgeschwindigkeit bzw. der entsprechenden Länge des Objekts liegen die Fundamentaldiagramme jedoch übereinander. Ein Durchlauf mit Fahrradfahrern wurde zweimal durchgeführt, jeweils mit unterschiedlicher Fahrtrichtung. Bei mathematisch negativer Richtung kommt es zu Stauwellen. Die Autoren sehen als Grund allerdings nicht die Richtung, sondern wohl eher die Gewöhnung. Die vorangegangenen Durchläufe fanden alle in positiver Richtung statt.

2013: Song et al. [99] stellen ein eindimensionales Modell vor, welches auf empirischen Daten beruht. Hierfür untersuchen die Autoren zwei durchgeführte Experimente eindimensionaler Bewegung an chinesischen Universitäten mit 34 bzw. 60 Studierenden als Probanden und unterschiedlicher Probandenanzahl ($N = 1, 15, 20, 25, 30$ und 34 bzw. $N = 1, 10, 20, 30, 40, 50$ und 60). In beiden Experimenten war der Parcours aufgebaut wie bei Seyfried et al. [94], ein Oval mit der Korridorlänge 17,3 m. Für $N = 1$ durchquerte jeder Proband einmal allein den Parcours. Bei den übrigen Durchläufen verteilten sich die Probanden gleichförmig im Oval und sollten es nach einem Start-Kommando dreimal durchlaufen. Der 2,0 m bzw. 3,2 m lange

gerade Messbereich wurde überkopf gefilmt. Mittels Bildverarbeitung konnten die Autoren aus den Videoaufzeichnungen die Probanden am Kopf anhand der getragenen, einfarbigen Mützen erkennen und ihre Trajektorien bestimmen.

Die freie Gehgeschwindigkeit geben die Autoren mit 1,72 m/s für das erste Experiment mit mehr männlichen Probanden und mit 1,41 m/s für das zweite an. Bei den restlichen Dichten erzielt das erste Experiment niedrigere Geschwindigkeiten, die insgesamt aber höher als bei Seyfried et al. [94] sind. Die Autoren führen dies auf physikalische und psychologische Faktoren wie Körpergröße und eigenen Platzbedarf zurück. Des Weiteren untersuchen sie laterale Schwingungen, die mit steigender Dichte wachsen, die Schrittfrequenz, sowie die Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Abstand zum Vordermann, welche laut den Autoren besser von einer Tangens-Hyperbolicus Funktion beschrieben werden kann als durch einen linearen Fit. Die Autoren geben nicht an, wie sie die Geschwindigkeit bestimmen und ermitteln keinen stationären Zustand.

2014: Der Unterschied zwischen offenen und geschlossenen System eindimensionaler Bewegung wird von Zhang et al. [128] beschrieben. Hierfür untersuchen sie das von Seyfried et al. [96] vorgestellte Experiment mit ovalem Parcours, bei dem zwei gerade Bereiche je von einer Kamera sowohl bei geschlossenem als auch offenem System gefilmt wurden. Für individuelle Dichten wird die Voronoi-Dichte verwendet. Individuelle Geschwindigkeiten berechnen die Autoren über die zurückgelegte Strecke im Zeitraum von 0,8 s. Für ihre Analysen im Fundamentaldiagramm verwenden die Autoren Durchschnittswerte mittels gewichteter Dichte und ähnlich gewichteter Geschwindigkeit im drei Meter langen Messbereich. Außerdem bestimmen sie manuell den stationären Bereich. Die Autoren zeigen im Weg-Zeit-Diagramm die Unterschiede zwischen geschlossenem und offenem System. Beim offenen System treten höhere Geschwindigkeiten auf und es können höhere Flüsse erreicht werden. Höhere Dichten treten hingegen bei geschlossenen Systemen auf, in denen auch Stauwellen erzeugt werden.

2014: Eilhardt [24] stellt in seiner Dissertation ein eindimensionales, stochastisches, abstand-abhängiges Geschwindigkeitsmodell mit kontinuierlichen Raum und diskreter Zeit vor, welches die Geschwindigkeitsphasenseparation bei hohen Dichten und empirischen Geschwindigkeitsverteilungen von Seyfried et al. [96] reproduziert. Des Weiteren stellt Eilhardt einen Order-Parameter, wie er von Ikura et al. [45] definiert wurde, für die Phasenseparation vor.

2016: Cao et al. [13] analysieren ein im Jahr 2015 in China durchgeführtes Experiment eindimensionaler Bewegung mit unterschiedlichen Altersgruppen als Probanden. Der ovale Parcours mit einem 2,50 m langen Innenradius, zwei 5,00 m langen Geraden, einer Korridorbreite von 0,80 m und der resultierenden Korridorlänge von 25,71 m wurde durch Tische begrenzt. Des Weiteren standen im Inneren des Ovals zwei Trennwände als Sichtschutz. Die betrachteten drei Versuchsreihen „Junge“ ($N = 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 51, 56, 61, 66$ und 71), „Ältere“ ($N = 6, 11, 16, 21, 26$ und 30) und „Gemischt“ ($N = 6, 10, 16, 20, 26, 30, 36, 46$ und 60) wurden mit unterschiedlichen Probandengruppen, Studierende der Tianshui Health School im Alter von 16 Jahren bis 18 Jahren, Erwachsene im Alter von 45 Jahren bis 73 Jahren sowie einer Mischung beider Gruppen im Verhältnis eins zu eins, durchgeführt. Der gesamte Parcours wurde mit zwei Kameras gefilmt, von dessen Videobildern Trajektorien im kompletten Oval mit der Software PeTrack erstellt wurden.

Für den makroskopischen Vergleich der Fundamentaldiagramme zwischen den Versuchsreihen nehmen die Autoren einen vier Meter langen geraden Messbereich und verwenden die Voronoi-Methode zur Berechnung von Dichte und Geschwindigkeit. Die Autoren zeigen, dass bei gleicher Dichte die Gruppe mit jungen Probanden immer mit einer höheren Geschwindigkeit geht als die Gruppe mit älteren Probanden bzw. die gemischte Probandengruppe. Bei allen drei Versuchsreihen scheint 0,9 Pers./m die Dichte zu sein, bei der der höchste Fluss erreicht wird. Nach Skalierung mit der freien Gehgeschwindigkeit und der Körperbreite je Versuchsreihe sind die Datenpunkte für „Junge“ und „Ältere“ ähnlich, für „Gemischt“ jedoch verschieden. Die Autoren folgern, dass es für die Beschreibung des Fundamentaldiagramms nicht ausreicht, die Skalierung anzupassen, vielmehr, dass weitere Einflüsse neben freier Gehgeschwindigkeit und Körperbreite auf das Fundamentaldiagramm einwirken. Die Autoren fordern für weitere Analysen mehr Daten von älteren Probanden.

Die zweidimensionalen Trajektorien im Oval projizieren die Autoren auf die Oval-Mittellinie und rektifizieren diese auf eine Gerade der Länge des Korridors. Die einzelnen Schritte werden in Unterabschnitt 3.3.2 genauer beschrieben. Hieraus können die Autoren Weg-Zeit-Diagramme des kompletten Wegs erstellen und mikroskopische Messungen im gesamten Parcours anfertigen. Im Weg-Zeit-Diagramm wird die Stau-Geschwindigkeit berechnet. Sie beträgt 0,4 m/s bei einer globalen Dichte von 1,75 Pers./m und 0,3 m/s bei globalen Dichten größer als 2,30 Pers./m. In der mikroskopischen Abstand-Geschwindigkeit-Beziehung mit zusammengefassten Daten erkennen die Autoren für die gemischte Gruppe drei Bereiche, wie sie schon von Jelić et al. [48] gefunden wurden. Des Weiteren nehmen die Probanden der gemischten Gruppe erst ab einem Abstand von 2,8 m ihre freie Gehgeschwindigkeit an. Diese ist für jede Versuchsreihe unterschiedlich groß.

2016: Zhang et al. [129] veröffentlichen ihre Analysen, bei denen eindimensionale mikroskopische als auch makroskopische Fundamentaldiagramme zweier Versuchsreihen von Probanden mittleren und älteren Alters mit unterschiedlichem Einkommen verglichen werden. Bei dem Experiment eindimensionaler Bewegung handelt es sich um das gleiche wie bei Cao et al. [13], nur werden dieses Mal die Versuchsreihen „Ältere“ ($N = 6, 11, 16, 21, 26$ und 30) und „Ältere 2“ ($N = 5, 10, 15$ und 23) untersucht. Die Probanden von „Ältere“ kamen aus sozial schwachen Familien während die Probanden von „Ältere 2“ über höhere Einkommen verfügten. Da die Probanden der Versuchsreihe „Ältere 2“ aus 80 % Frauen bestanden und 74 % im Alter von 46 Jahren bis 55 Jahren waren, bezeichnen die Autoren diese Versuchsreihe als homogen. Die andere Versuchsreihe nennen sie heterogen.

Fernerhin bezeichnen die Autoren die homogene Gruppe als inaktiv, da diese eine niedrigere freie Gehgeschwindigkeit als die heterogene aufweist, welche bei gleichen Dichten immer schneller geht. Bei der Analyse von „Ältere 2“ ist das Tempo gleichbleibend. Außerdem erzeugt diese Versuchsreihe Stauwellen bei Dichten, bei denen die andere mit unterschiedlichen Geschwindigkeitsbereichen noch fließend gehen kann. Die Autoren folgern, dass Geschwindigkeit und Stop-and-go-Wellen nicht nur durch die Dichte beeinflusst werden, sondern auch durch die Zusammensetzung der Probandengruppe.

Vergleich der Fundamentaldiagramme und Grenzwerte: Die in diesem Unterabschnitt vorgestellten Veröffentlichungen befassen sich mit eindimensionaler Bewegung unter Laborbedin-

gungen. Die Fundamentaldiagramme der vorgestellten Studien ähneln sich grundsätzlich insbesondere darin, dass mit Zunahme der Dichte die Geschwindigkeit sinkt. Dennoch sind leichte Unterschiede zwischen den einzelnen Kurven in Form und Lage vorhanden. Die Unterschiede können mit denselben Aspekten begründet werden, die im vorangegangenen Unterabschnitt beschrieben wurden. Zum einen wirkt sich die Messmethode und der Messbereich auf die Lage des Fundamentaldiagramms aus. Dazu gibt es schon Studien, z. B. von Seyfried et al. [96] und Winkens et al. [120]. Zum anderen spielen Faktoren wie beispielsweise die Kultur, das Alter und die Motivation der Probanden eine Rolle. Dass es sich dabei um relevante Einflussfaktoren handelt, wurde in den hier vorgestellten Studien bereits erforscht. Hingegen haben auch Randbedingungen wie das Öffnen des geschlossenen Parcours einen signifikanten Effekt auf das Fundamentaldiagramm [128]. Um diesen Effekt zu umgehen, sind Daten des geschlossenen Parcours und im stationären Zustand zu verwenden. Dies wurde nicht bei allen Studien berücksichtigt. Weitere Daten helfen die Zusammenhänge zwischen Dichte und Geschwindigkeit zu analysieren.

Aufgrund fortgeschrittener Technologie ermöglicht die Datenerhebung aller in diesem Unterabschnitt vorgestellten Studien, im Gegensatz zu den Studien des vorangegangenen Abschnitts, mikroskopische Messungen. Dennoch führten die Messmethoden überwiegend zu makroskopischen Kenngrößen. Um nicht nur Aussagen über Mittelwerte zu treffen, sondern um auch die Varianzen analysieren zu können, werden in dieser Arbeit mikroskopische Kenngrößen erhoben.

Da in den bisherigen Veröffentlichungen hauptsächlich niedrige und mittlere Dichten untersucht werden, wird kaum das Fundamentaldiagramm bei hohen Dichten analysiert und bisher auch kein Stop-and-go von Personen untersucht.¹⁵ Aus diesem Grund widmet sich diese Arbeit auch dem Fundamentaldiagramm bei hohen Dichten und nimmt eine eingehende Analyse der Stau-Charakteristika von Personen insbesondere in der Stopp-Phase vor.

2.4 Darstellung der Messmethodik und Definitionen

2.4.1 Dokumentation der Messmethode

In dieser Arbeit werden Daten von Experimenten eindimensionaler Bewegung, d. h. von Probanden, die sich nur in einer Richtung hintereinander her bewegen, erhoben, welche sowohl makroskopische als auch mikroskopische Messungen ermöglichen.¹⁶ Bei der Datenaufbereitung eines Experiments existieren verschiedene Messmethoden. Diese können zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Nur wenn die Messmethode dokumentiert ist, können die Ergebnisse sinnvoll interpretiert und miteinander verglichen werden.

Im Folgenden wird die in dieser Arbeit angewandte Messmethode aufgezeigt. Für die Messung werden Trajektorien, d. h. Weg-Zeit-Kurven verwendet, die aus Videobildern extrahiert wurden. Die Bildaufnehmrate der verwendeten Kamera bestimmt die Zeitpunkte der Messung.¹⁷

¹⁵ Portz und Seyfried [82, 83] haben Stop-and-go-Wellen bei Fußgängern bereits in Ansätzen untersucht.

¹⁶ Zwei unterschiedliche Arten der Datenerhebung werden auf S. 9 in Abschnitt 2.2 erklärt.

¹⁷ Die Bildaufnehmrate der verwendeten Kameras betragen 16 Bilder pro Sekunde oder 25 Bilder pro Sekunde.

Zu jedem Zeitpunkt im Untersuchungszeitraum $[t_{\min}; t_{\max}]$, d. h. zu jedem Videobild, wird die Messung des Ortes und die Berechnung von Geschwindigkeit, Dichte, Fluss und Abstand für jeden Probanden durchgeführt.

In Abb. 2.2 werden die Messmethoden für verschiedene Kenngrößen grafisch dargestellt, die im Folgenden erläutert werden. Die blauen Kurven stellen Trajektorien von Personen dar.

Die **Geschwindigkeit** $v_i(t)$ einer Person α_i zum Zeitpunkt $t \in [t_{\min}; t_{\max}]$ berechnet sich als Differenzenquotient von zurückgelegtem Weg und benötigter Zeit, siehe Abb. 2.2 (a):

$$v_i(t) := \frac{x_i(t + \Delta t) - x_i(t - \Delta t)}{2\Delta t}, \quad (2.1)$$

mit $\Delta t \approx 0,25$ s.¹⁸ Die durchschnittliche Geschwindigkeit $\bar{v}(t)$ zum Zeitpunkt $t \in [t_{\min}; t_{\max}]$ entspricht dem arithmetischen Mittelwert der Geschwindigkeiten aller N Personen:

$$\bar{v}(t) := \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N v_i(t). \quad (2.2)$$

Die durchschnittliche Geschwindigkeit \bar{v}_N eines Durchlaufs mit N Probanden berechnet sich über den arithmetischen Mittelwert der Geschwindigkeiten aller Personen zu jedem Zeitpunkt $t \in [t_{\min}; t_{\max}]$:

$$\bar{v}_N := \frac{1}{t_{\max} - t_{\min}} \cdot \sum_{t=t_{\min}}^{t_{\max}} \bar{v}(t). \quad (2.3)$$

Die Dichte einer Messfläche, bestimmt über die Anzahl der Personen pro Messfläche, schwankt bzw. besitzt nur diskrete Werte. Voronoi-Zellen¹⁹ und Anteile glätten die diskreten Werte.²⁰ Bei der eindimensionalen Bewegung werden individuelle Dichten in der Literatur meistens über den Kehrwert des Abstands zum Vordermann bestimmt. Für geglättete Daten wird die individuelle Voronoi-Dichte verwendet. Sie wird in dieser Arbeit analog zur Voronoi-Dichte einer Fläche definiert. Die individuelle **Voronoi-Dichte** $\rho_i(t)$ einer Person α_i zum Zeitpunkt $t \in [t_{\min}; t_{\max}]$ berechnet sich über den Kehrwert des halben Abstands zwischen Vorder- und Hintermann, siehe Abb. 2.2 (b):

$$\rho_i(t) := \frac{2}{x_{i-1}(t) - x_{i+1}(t)}. \quad (2.4)$$

Im Folgenden wird, wenn nicht abweichend beschrieben, die Voronoi-Dichte verwendet. Bei der maximalen Dichte ρ_{\max} gilt für die Geschwindigkeit $v(\rho_{\max}) = 0$ m/s.

Die **globale Dichte** ρ_{gl} eines Durchlaufs berechnet sich über den Quotienten von Personenanzahl N und Korridorlänge l_k des Parcours:

$$\rho_{\text{gl}} := \frac{N}{l_k}. \quad (2.5)$$

¹⁸ In dieser Arbeit werden vier Experimente analysiert, die in Kapitel 3 vorgestellt werden. Für Experiment 2 gilt $\Delta t = 0,25$ Sekunden. Für die Experimente 1, 3 und 4 gilt $\Delta t = 0,28$ Sekunden.

¹⁹ Der Name stammt von Voronoi [116, 117], der das Voronoi-Diagramm im n-dimensionalen Fall behandelte.

²⁰ Die Methode der Dichtebestimmung mit Voronoi-Zellen wurde von Steffen und Seyfried [100] vorgestellt.

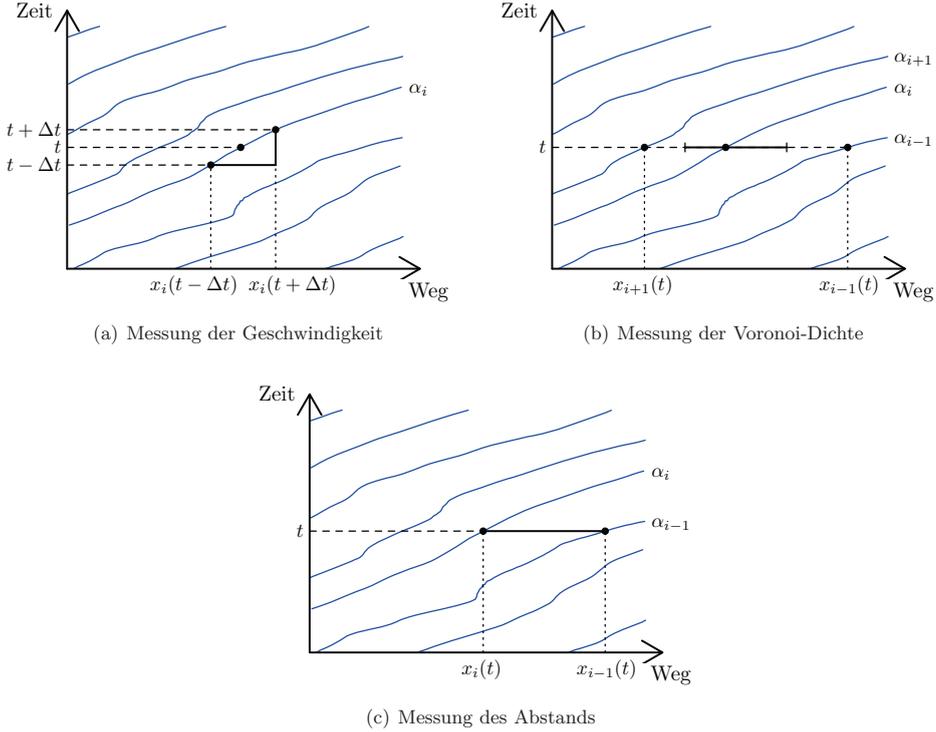


Abb. 2.2: Darstellung der Messmethode. Für Person α_i zum Zeitpunkt $t \in [t_{\min}; t_{\max}]$.

Der **Personenfluss** $J_i(t)$ zum Zeitpunkt $t \in [t_{\min}; t_{\max}]$, auch Fluss genannt, wird für jede Person α_i durch das Produkt seiner Geschwindigkeit und Dichte bestimmt:

$$J_i(t) := v_i(t) \cdot \rho_i(t). \quad (2.6)$$

Das Fundamentaldiagramm ist die empirische Relation zwischen Geschwindigkeit und Dichte $v(\rho)$, Fluss und Geschwindigkeit $J(v)$ bzw. Fluss und Dichte $J(\rho)$. Die **Kapazität** C beschreibt den maximalen Fluss, welcher im Rahmen dieser Arbeit als Maximum des Dichte-Fluss-Zusammenhangs definiert ist. Für die korrespondierende Dichte ρ_c gilt $J(\rho_c) = C$. Sie wird als **maximale Leistungsfähigkeit** bezeichnet. Bei der maximalen Dichte ρ_{\max} , bei der kein gehen mehr möglich ist, gilt für den Fluss $J(\rho_{\max}) = 0$ Pers./s.

Neben der Dichte-Geschwindigkeit-Beziehung kann auch der Zusammenhang zwischen Abstand und Geschwindigkeit untersucht werden. Der **Abstand** $d_i(t)$ einer Person α_i zum Zeitpunkt $t \in [t_{\min}; t_{\max}]$ bezeichnet die Entfernung zwischen ihr und ihrem Vordermann α_{i-1} . Der Abstand spiegelt nicht den physikalischen Abstand wider, sondern ergibt sich aus der Entfernung der Mittelpunkte beider Personen, in diesem Fall der Differenz beider x -Koordinaten, siehe Abb. 2.2 (c):

$$d_i(t) := x_{i-1}(t) - x_i(t). \quad (2.7)$$

Für die Analysen in Kapitel 4 werden unterschiedliche Binning-Methoden angewandt. Bei der **Dichte-Binning-Methode** (ρ -Binning) werden die Daten in äquidistante Intervalle der Dichte eingeteilt. Ihre Länge beträgt dabei 0,1 Pers./m. Innerhalb eines jeden Intervalls wird ein arithmetischer Mittelwert der Geschwindigkeiten bzw. der Flüsse gebildet. Dieser Durchschnittswert wird dem Intervall zugeordnet. Neben dem arithmetischen Mittel wird auch die Standardabweichung berechnet. Die Methode des **Geschwindigkeit-Binnings** (v -Binning) bildet Mittelwerte von Teilabschnitten. Dafür werden die Daten in äquidistante Intervalle der Geschwindigkeit eingeteilt. Die Intervalllänge beträgt 0,05 m/s. Für jedes Intervall werden Mittelwert und Standardfehler des Abstands bestimmt und dem Intervall zugeordnet. Beim **Abstand-Binning** (d -Binning) werden äquivalent zum v -Binning die Daten in äquidistante Intervalle des Abstands unterteilt und ihre Mittelwerte und Standardfehler der Geschwindigkeiten berechnet. Die Intervalllänge beträgt 0,1 m.

2.4.2 Definition von Stau und Stop-and-go

In der Literatur findet sich keine einheitliche Definition des Personenstaus oder wann ein Fußgänger im Stau steht. Neben dem Personenstau gibt es nicht nur im Straßenverkehr Staus. Auch in der Meteorologie, in Netzwerken, bei der Post oder bei der Bewegung von Flüssigkeiten kann ein Stau auftreten. Während er bei einem Staudamm gezielt herbeigeführt wird, kann ein Datenstau im Netzwerk zu ungewollten Ausfällen führen. In den unterschiedlichen Systemen bedeutet ein Stau überall, dass eine Ansammlung oder Behinderung des normalen Bewegungsflusses stattfindet.

Auch beim motorisierten Straßenverkehr steht der Stau für eine Ansammlung von Verkehrsteilnehmern und einer Geschwindigkeitsreduktion. Auf deutschen Autobahnen bewegt sich der Stau konstant mit circa 15 km/h [109, S. 85]. Eine eindeutige Definition des Staus existiert nicht. So gibt es Verkehrswissenschaftler, die von einem Stau ausgehen, sobald kein Fahren mit gewünschter Geschwindigkeit mehr möglich ist, vgl. Abb. 2.3. Das Amt für Verkehrsmanagement in Köln verwendet einen 3-Stufen-Algorithmus, der auf der Impulslänge der Detektoren, also den gemessenen Geschwindigkeiten der Verkehrsteilnehmer beruht und streckentypabhängig ist.²¹ Bei INRIX Research wird von einem Stau gesprochen, sobald 65 % der Geschwindigkeit bei freier Fahrt unterschritten wird.²² Anbieter von Navigationsgeräten teilen ihren Nutzern die Kenngrößen nicht mit, mit denen sie den Stau festlegen. Schwietering [91] nennt unter anderem unterschiedliche Ansätze zur Bestimmung des Zusammenbruchs des Verkehrsablaufs und des Beginns von Stau, bei denen Geschwindigkeitsdifferenzen von bis zu 20 km/h und Grenzgesehwindigkeiten zwischen 40 km/h und 90 km/h über bestimmte Zeitdauern auftreten bzw. unterschritten werden [91, Tab. 2.2, S. 41]. Treiber und Kesting [109] nennen drei Einflussfaktoren, die zum Stau beim Pkw-Verkehr beitragen: Hinreichend hohes Verkehrsaufkommen, Streckeninhomogenität, die als verallgemeinerte Engstelle wirkt und den Verkehrsfluss stört, sowie lokale Störungen, z. B. abrupte Bremsmanöver oder „Jumborennen“, bei dem sich Lkw gegenseitig überholen [109, S. 161].

²¹ Nach Telefongespräch mit Herrn Hartmut Sorich vom Amt für Verkehrsmanagement der Stadt Köln im Juli 2018.

²² Vgl. hierzu die umfangreiche Staustudie von Cookson [18].

Die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV) verweist bei Definitionen rund um Verkehr auf das mehrsprachige Wörterbuch zum Straßen- und Verkehrswesen [79], welches vom Welt-Straßenverband online zur Verfügung gestellt wird. Im deutschen steht Stau für einen „Verkehrszustand auf freier Strecke infolge Überlastung oder besonderer Ereignisse mit zeitweiligem Stillstand von Fahrzeugen“ [79, Stau]. Im englischen bedeutet congestion „slow-moving or stationary traffic due to the traffic situation“ [79, congestion], was ins Deutsche übersetzt wiederum „langsamer oder ruhender Verkehr aufgrund der Verkehrssituation“ bedeutet. Die Bundesanstalt für Straßenwesen verwendet die Begriffsbestimmung der FGSV.²³

Das Bundesamt für Strassen der Schweiz gibt auf seiner Internetseite eine Definition des Staus beim motorisierten Straßenverkehr „im Sinne der Verkehrsinformation“ an.²⁴ So herrscht auf Straßen außerorts ein Stau, wenn mindestens eine Minute lang die Geschwindigkeit von 10 km/h nicht überschritten wird. In der Schweiz darf außerorts auf keiner Straße schneller als 120 km/h gefahren werden. Bei Annahme einer Grenzgeschwindigkeit von 10 km/h und einer Wunschgeschwindigkeit von 120 km/h ergibt sich zwischen beiden Geschwindigkeiten ein Verhältnis von 1 : 12. Technisch bedingt liegt eine Grenzgeschwindigkeit, bei deren Unterschreitung die motorisierten Verkehrsteilnehmer im Stau stehen, bei 20 km/h. Dies liegt daran, dass Zählschleifen niedrigere Geschwindigkeiten nicht erfassen können.²⁵ Auf deutschen Autobahnen liegt die Richtgeschwindigkeit bei 130 km/h, sofern nicht anders vorgegeben. Bei Annahme einer Grenzgeschwindigkeit von 20 km/h und einer Wunschgeschwindigkeit von 130 km/h ergibt sich ein Verhältnis von 2 : 13.

In dieser Arbeit werden folgende zwei Definitionen benutzt, vgl. Abb.2.3. Ein **Stau** entsteht, wenn in dem betrachteten Streckenabschnitt der eingehende Fluss größer ist als der ausgehende Fluss. Beim **Stop-and-go** können in dem betrachteten Streckenabschnitt zur gleichen Zeit Bereiche mit stehenden und gehenden Fußgängern beobachtet werden. Die Grenzen zwischen den Bereichen bewegen sich entgegen der Bewegungsrichtung.

Somit existieren beim Stop-and-go Phasen mit niedrigen und hohen Geschwindigkeiten. Mit diesen Definitionen gehören Stop-and-go-Wellen zum Stau aber nicht jeder Stau ist Stop-and-go. Stop-and-go-Wellen sind sowohl im Kfz-Verkehr als auch bei Fußgängern zu beobachten. Bei Fußgängern ist die Dichte, bei der Stop-and-go auftritt, größer als die Dichte, bei der die Kapazität erreicht ist [83]. Beim Autoverkehr ist dies unklar.

Um dieses Phänomen zu untersuchen, wird eine Grenzgeschwindigkeit eingeführt, bei der angenommen wird, dass eine Person steht und sich somit in der Stopp-Phase befindet. Da die Kenngrößen an Trajektorien gemessen werden, welche den Kopf einer Person verfolgen, lässt sich nicht die Geschwindigkeit von 0 m/s messen. Dies liegt daran, dass sich der Kopf bewegt, auch wenn die Person steht und nicht mehr vorwärts geht. Der Grenzwert für die Festlegung der Grenzgeschwindigkeit entspricht aber nicht dem Grenzwert bei dem es zu einem Stau kommt.

²³ Nach E-Mail-Auskunft von Herrn Dieter Ridder von der Bundesanstalt für Straßenwesen im Juli 2018.

²⁴ Vgl. Internetbeitrag der Bundesbehörden der Schweizerischen Eidgenossenschaft [12].

²⁵ Eine neue Methode der Verkehrsüberwachung und -zählung ist die Videoanalyse. Mit ihr können auch niedrigere Geschwindigkeiten gemessen werden.

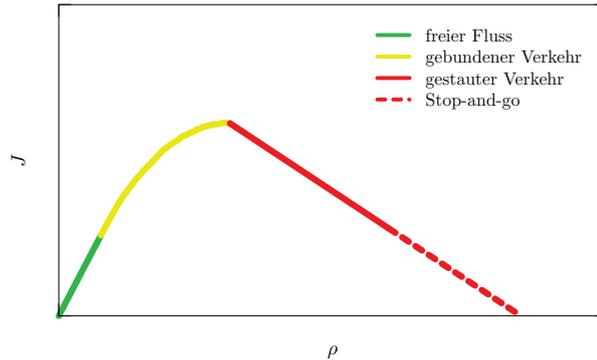


Abb. 2.3: Verkehrszustände im Fundamentaldiagramm.

Die Bewegung von Fußgängern und motorisierten Fahrzeugen ist nicht identisch. Während motorisierte Fahrzeuge eine Trägheit besitzen, ist diese bei Fußgängern vernachlässigbar gering. Fußgänger können mit einem Schritt schon ihre freie Gehgeschwindigkeit erreichen oder mit einem Stemmsschritt stehen bleiben, mit Nachpendeln des Oberkörpers. Trotzdem wird analog zum Stau bei motorisierten Fahrzeugen die Stopp-Phase von Fußgängern über die Geschwindigkeit definiert. Zur Bestimmung der Grenzgeschwindigkeit von Fußgängern wird das Verhältnis vom motorisierten Straßenverkehr übernommen. Es wird eine freie Gehgeschwindigkeit für Fußgänger von 1,34 m/s angenommen. Unter Verwendung beider Verhältnisse liegt die Grenzgeschwindigkeit bei 0,1 m/s oder 0,2 m/s.²⁶

In den Analysen in Kapitel 5 gilt für die **Grenzgeschwindigkeit** zur Identifikation einer Stopp-Phase (in Stop-and-go-Wellen) $v_{\text{Grenze}} := 0,1 \text{ m/s}$. Probanden mit einer Gehgeschwindigkeit kleiner gleich v_{Grenze} sind Personen in der Stopp-Phase. Trotzdem wird bei der Analyse auch der Fall mit einer Grenzgeschwindigkeit von 0,2 m/s untersucht. Im Folgenden werden weitere Größen zur Beschreibung der Dynamik von Stop-and-go-Wellen definiert.

Sei V die Menge aller Geschwindigkeiten und VG die Menge aller Geschwindigkeiten kleiner gleich der Grenzgeschwindigkeit mit $VG := \{v \in V \mid v \leq v_{\text{Grenze}}\} \subset V$. Die Indikatorfunktion $\chi_{VG} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit $V \mapsto \{0, 1\}$ beschreibt für eine Person α_i zum Zeitpunkt t mit der Geschwindigkeit $v_i(t) \in V$ deren Zustand im Stau. Bei einem Funktionswert von 1 steht die Person (Stopp-Phase), bei 0 nicht. Für alle Geschwindigkeiten $v \in V$ gilt:

$$\chi_{VG}(v) = \begin{cases} 1 & v \in VG, \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (2.8)$$

Die **Anzahl der Personen in der Stopp-Phase** $\#\text{Pers}(t)$ zum Zeitpunkt $t \in [t_{\min}; t_{\max}]$ wird über folgende Gleichung ermittelt:

$$\#\text{Pers}(t) = \sum_{i=1}^N \chi_{VG}(v_i(t)). \quad (2.9)$$

²⁶ Bei der Verwendung des Verhältnisses 2 : 13 (bzw. 1 : 12) zwischen Grenz- und freier Gehgeschwindigkeit ergibt sich $1,34 \text{ m/s} \cdot 2/13 = 0,2062 \text{ m/s}$ (bzw. $1,34 \text{ m/s} \cdot 1/12 = 0,1117 \text{ m/s}$).

Die **Verweildauer in der Stopp-Phase** VD_i einer Person α_i beschreibt die summierten Zeitdauern der Person, während denen sie sich in der Stopp-Phase befindet. Sie wird über folgende Gleichung bestimmt:

$$VD_i = \sum_{t=t_{\min}}^{t_{\max}} \chi_{VG}(v_i(t)). \quad (2.10)$$

3 Experimente und Datenverarbeitung

3.1 Vorbemerkung

Dieses Kapitel stellt den praktischen Teil der Arbeit dar. Es werden vier Laborexperimente vorgestellt, deren Daten als empirische Grundlage dienen. Während zwei dieser Experimente bereits im Rahmen früherer Studien durchgeführt wurden, erfolgte die Planung und Durchführung der weiteren beiden Experimente im Rahmen dieser Arbeit. Neben der Darstellung des Aufbaus und Ablaufs der Experimente (Datengrundlage) wird weiterhin die Datenerhebung und -aufbereitung beschrieben. Das Kapitel schließt mit zwei Voranalysen, die für die Analysen in Kapitel 4 und 5 notwendig sind.

In Abschnitt 3.2 wird die Datengrundlage vorgestellt. Dazu wird zuerst in Unterabschnitt 3.2.1 der Aufbau des Parcours beschrieben, der bei allen durchgeführten Experimenten die gleiche Form aufweist, ein Oval mit unterschiedlichen Abmaßen. Danach wird jedes Experiment einzeln in den Unterabschnitten 3.2.2 bis 3.2.5 vorgestellt. Dabei wird unter anderem auf die Auswahl der Probanden, den Aufbau des Experiments, die Positionierung der Kamera zur Videoaufzeichnung sowie den Ablauf des Experiments selbst eingegangen.

Zu Beginn des Abschnitts 3.3 wird die Erstellung der Datenbasis dieser Arbeit aus den Videoaufzeichnungen der vier Experimente beschrieben. Hierfür werden mittels spezieller Software Trajektorien für den gesamten Parcours aus den Videos extrahiert. Zur Analyse der Stop-and-go-Wellen werden die Trajektorien im Oval auf eine Gerade abgebildet. Dafür werden die Trajektorien zuerst auf eine Linie im Oval projiziert und anschließend auf eine Gerade rektifiziert. Ein weiterer Schritt der Datenaufbereitung ist die Ermittlung des stationären Zustands. Die ersten Sekunden nach dem Start und die letzten Sekunden vor dem Ende eines Durchlaufs werden nicht berücksichtigt, sodass nur Daten eines quasi stationären Zustands verwendet werden.

In Abschnitt 3.4 werden zwei Voranalysen durchgeführt, auf denen die anschließenden Analysen in Kapitel 4 und 5 aufbauen. In Unterabschnitt 3.4.1 wird gezeigt, dass die Daten aus den beiden Bereichen Gerade und Halbkreis des ovalen Parcours zusammengefasst werden dürfen, da keine Unterschiede in den Dichte-Geschwindigkeit-Relationen zu erkennen sind. In Unterabschnitt 3.4.2 kann gezeigt werden, dass die Laufrichtung keinen Einfluss auf das Fundamentaldiagramm ausübt und die Daten beider Parcours somit zusammengefasst werden dürfen.

3.2 Datenerhebung

3.2.1 Aufbau der Experimente

Die vier in dieser Arbeit behandelten Laborexperimente ähneln sich bezüglich ihres Parcoursaufbaus. Differenzen der einzelnen Parcours bestehen lediglich in ihrer Abmessung. Jeder Parcours besteht aus einem geschlossenen Korridor in Form eines Ovals mit zwei Geraden der Länge l_g und zwei Kurven in Form von Halbkreisen mit Radius r_0 , siehe schematische Darstellung in Abb. 3.1 und Tab. 3.1. Über die Länge der Geraden und den Radius lässt sich die Länge des Korridors $l_k = 2l_g + 2\pi \cdot r_0$ berechnen. Die Breite des Korridors w beträgt bei allen Parcours 0,80 m.

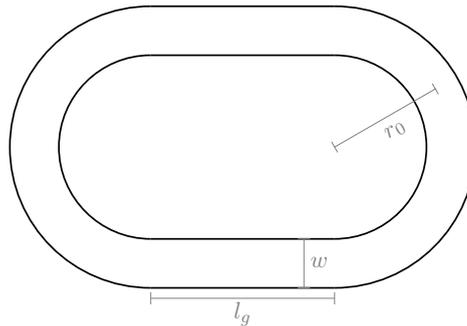


Abb. 3.1: Parcours-Skizze. Mit Kennzeichnung der Breite des Korridors w , der Länge des geraden Bereichs l_g und des Radius für den kurvigen Bereich r_0 .

Die Bewegung der Probanden wird quasi-eindimensional genannt, da die Probanden im Parcours hintereinander gehen ohne sich zu überholen. Die begehbbare Fläche sowie die Anzahl der Probanden bleiben während eines Durchlaufs konstant. Es liegt ein geschlossenes System vor. Im Zentrum des Ovals war parallel zu den Geraden ein Sichtschutz aufgebaut. Dieser sollte die visuelle Beeinflussung der Probanden von Personen auf der gegenüberliegenden Seite des Parcours, beispielsweise Synchronisierung und Geschwindigkeitsanpassung, während eines Durchlaufs verringern. Alle Durchläufe wurden mit Videokameras aufgezeichnet.

Tab. 3.1: Dimensionierung der Parcours.

Experiment	l_g in m	r_0 in m	w in m	l_k in m	Sichtschutz
1	3,00	1,85	0,80	17,62	1 Stellwand
2	4,00	3,00	0,80	26,85	6 Trennblöcke
3	2,50	1,85	0,80	16,62	3 Stellwände
4	2,50	1,85	0,80	16,62	3 Stellwände

Die Experimente unterscheiden sich sowohl in der Anzahl der Durchläufe als auch in der Anzahl der Probanden je Durchlauf. Außerdem sind den Abmessungen des Parcours, die Probanden, der Ort, die Zeit und das Sichtfeld der Videoaufzeichnungen von Experiment zu Experiment unterschiedlich.

3.2.2 Experiment 1

Probanden und Bedingungen: Im Rahmen eines Seminars des Studiengangs Sicherheitstechnik an der Bergischen Universität Wuppertal (BUW) wurde am 15.07.2008 im Foyer des Hörsaalgebäudes am Campus Freudenberg in Wuppertal ein Laborexperiment eindimensionaler Bewegung durchgeführt. Die Koordination des Experiments lag beim Lehrstuhl für Baustofftechnologie und Brandschutz der BUW sowie beim Jülich Supercomputing Center des Forschungszentrums Jülich. Die Probanden waren 43 Seminarteilnehmer (Studierende, davon eine weibliche Person) mit einer durchschnittlichen Körpergröße von $1,84\text{ m} \pm 0,06\text{ m}$.

Aufbau: Der Parcours wurde mit Stühlen und einem Absperrband abgesteckt.²⁷ Diese Absperrung sollte die zu begehende Fläche markieren, nicht aber die komplette Sicht einschränken.

Kamera: Die einzelnen Durchläufe wurden mit einer digitalen Videokamera aufgenommen. Diese stand in Höhe von 1,50 m und mit einem Abstand von 3,00 m zu einer der geraden Parcoursseiten und zeichnete den auf der Geraden festgelegten 2,00 m langen Messbereich mit der Stellwand im Hintergrund auf. Zur späteren Identifizierung einzelner Probanden trug jeder Studierende einen weißen Zettel mit einer Identifikationsnummer in der Hand und hielt diesen in Richtung Kamera.

Mithilfe der am Forschungszentrum Jülich erstellten Software PeTrack konnten anschließend aus den aufgezeichneten Videos pro Durchlauf eindimensionale Ort-Zeit-Daten für jeden Probanden im Messbereich erzeugt werden. Die Begrenzung des Messbereichs wird in Abb. 3.2 durch zwei rote Linien dargestellt.

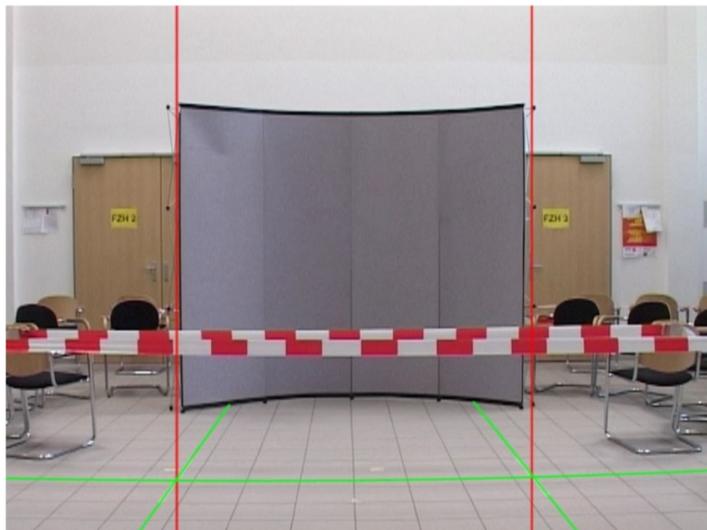


Abb. 3.2: Kameravisualisierung, Experiment 1. Zusätzlich eingefügt ist der Messbereich (rote Linien) mit einer Länge von zwei Metern und ein Koordinatensystem auf dem Boden (grüne Linien). Das Bild wurde übernommen von Lukowski [63, Abb. 4.2].

²⁷ Die Maße des Parcours werden in Unterabschnitt 3.2.1 genannt.

Ablauf: Im Rahmen des Experiments gab es zwei Versuchsreihen mit insgesamt sechzehn Durchläufen. Mit dem ersten Durchlauf jeder Versuchsreihe wurde die freie Gehgeschwindigkeit der Probanden gemessen. Hierfür ging jeder Proband einzeln durch den Parcours. Zu Beginn eines jeden Durchlaufs, außer bei den beiden zur Messung der freien Gehgeschwindigkeit, wurden die Probanden in das Oval eingelassen. Sie sollten sich gleichmäßig im Parcours verteilen. Ein mündliches Kommando forderte die Probanden auf loszugehen. Um den Durchlauf zu beenden, wurde das geschlossene System geöffnet, indem einer der den Parcours begrenzenden Stühle zur Seite geschoben wurde. Die Probanden konnten durch diesen Ausgang nacheinander das Oval verlassen.

Beide Versuchsreihen (VR) bestanden jeweils aus acht Durchläufen mit ansteigender Probandenanzahl ($N = 1, 15, 20, 25, 30, 34, 37$ und 40). In Tab. A.2 in Anhang A.1 sind die Namen der Durchläufe und die globalen Dichten ρ_{gl} der Durchläufe angegeben. Im Folgenden werden diese zwei Versuchsreihen BUW-n und BUW-m genannt. Bei beiden Versuchsreihen nahmen dieselben Personen teil. Die Reihenfolge der Probanden im Parcours wurde für das ganze Experiment beibehalten und entsprach der persönlichen Identifikationsnummer.

Die erste Versuchsreihe BUW-n sollte durchschnittlich motivierte Fußgänger ohne Zeitdruck widerspiegeln. Den Probanden wurde gesagt, sie sollten sich folgende Situation vorstellen: Zur Mittagszeit sei die Vorlesung vorbei und sie wollten zur Mensa gehen, um sich dort ein Mittagessen zu holen. Für jeden sei eine Portion vorrätig. Kein Studierender würde ohne Mahlzeit ausgehen. Entsprechend dieser Situation sollten die Probanden durch den Parcours gehen. Nach der ersten Versuchsreihe wurde die Motivation der Probanden geändert. Dazu wurde den Probanden vorgegeben, sich vorzustellen, dass sie nach Vorlesungsende auf dem Weg zum Bahnhof seien. Um den Zug noch zu erreichen, müssten sie sich beeilen. Sonst müssten sie eine Stunde auf den nächsten Zug warten.

3.2.3 Experiment 2

Probanden und Bedingungen: Im Rahmen des Projekts BaSiGo²⁸ wurden an vier Tagen 29 Experimente in einer Halle der Messe Düsseldorf mit insgesamt 1986 Probanden und 43 Helfern vom 19.06.2013 bis 22.06.2013 durchgeführt. Die Teilnehmer hatten ein Alter von 18 Jahren bis 72 Jahren, im Durchschnitt $24,8$ Jahre $\pm 4,4$ Jahre. Ihre durchschnittliche Größe betrug $1,72$ m $\pm 0,08$ m. 55 % der Probanden waren männlich. Der größte Teil bestand aus Studierenden, unter ihnen auch viele Personen unterschiedlicher Nationalitäten, weswegen viele Ansagen neben Deutsch auch auf Englisch erfolgten.

Jeder Proband bekam bei seiner Registrierung am Anfang des Tags eine Mütze und eine eindeutige Identifikationsnummer zugewiesen. Diese war mittels Reed-Solomon-Code²⁹ zur automatischen Erfassung auf der Mütze eingetragen. Zudem füllten die Probanden einen anonymen Fragebogen mit Identifikationsnummer aus, welcher die Körpergröße, das Alter, das Geschlecht, den Lebensraum und die Erfahrung bei Großveranstaltungen erfragte.

²⁸ Vgl. Fußnote 10 auf S. 18. Der Schlussbericht des Projekts BaSiGo findet sich in Holl et al. [42].

²⁹ Der Reed-Solomon-Code ist ein Blockcode, der zu den fehlerkorrigierenden Codes gehört und von Maschinen lesbar ist.



Abb. 3.3: Parcours mit 52 Probanden, Experiment 2. Foto: Ralf Eisenbach.

Das in dieser Arbeit untersuchte Experiment fand am 21.06.2013 als sechstes und damit vorletztes Experiment des Tags mit sechs Durchläufen und deutschsprachiger Ansprache statt. An diesem Tag waren 138 Probanden anwesend. Im Folgenden wird diese Versuchsreihe Basigo-1D genannt.

Aufbau: Der Parcours wurde mit Kreide auf den Boden markiert.³⁰ In der Mitte des Ovals parallel zu beiden Geraden wurde aus Messebauwänden eine 6,00 m lange und 1,02 m breite Stellwand mit einer Höhe von 2,50 m aufgebaut, siehe Abb. 3.3.

Kamera: Insgesamt 30 überkopf montierte Digitalkameras zeichneten das Experiment in der Messehalle mit Videos auf. Die individualisierten Daten kamen von einem Kameragrid von Industrikameras. Mit den zusammengesetzten Videoaufzeichnungen und der von Mehner [66] entwickelten Analysesoftware konnten anschließend die Probanden anhand ihrer Mütze erkannt und ihre Laufwege getrackt werden, um Trajektorien zu erhalten.

Ablauf: Bei diesem Experiment gab es eine Versuchsreihe namens Basigo-1D mit sechs Durchläufen mit unterschiedlicher Probandenanzahl ($N = 15, 30, 47, 55, 52$ und 59). In Tab. A.3 in Anhang A.1 sind die Randbedingungen der einzelnen Durchläufe genannt. Alle 138 Probanden nahmen anfangs auf der ersten Wartefläche Platz. Die vordersten fünfzehn Probanden wurden in den Parcours gebeten, die restlichen sollten nach vorne aufrücken. Nachdem alle teilnehmenden Probanden möglichst gleichverteilt im Parcours standen, wurden sie aufgefordert loszugehen. Die Bewegung erfolgte entgegen den Uhrzeigersinn. Ein weiteres Kommando beendete den ersten Durchlauf. Die Probanden dieses Durchlaufs gingen zur zweiten Wartefläche und die Vordersten der ersten Wartefläche betraten den Parcours. Bei einer zu geringen Anzahl der Probanden auf der ersten Wartefläche für den nächsten Durchlauf wurden noch während des aktuellen Durchlaufs entsprechend viele Probanden von der zweiten Wartefläche zur ersten gebeten. Insgesamt nahm fast jeder Proband zweimal bei diesem Experiment teil.

³⁰ Die Maße des Parcours werden in Unterabschnitt 3.2.1 genannt.

3.2.4 Experiment 3

Probanden und Bedingungen: Am Gymnasium Bayreuther Straße (GBS) in Wuppertal wurden am 12.11.2014 und 13.11.2014 im Rahmen eines Projekts Experimente durchgeführt.³¹ Das am zweiten Tag durchgeführte Experiment bildete eine Engstellen-Situation ab und wird in dieser Arbeit nicht weiter behandelt.³² Das Experiment am ersten Tag wurde im Rahmen dieser Arbeit geplant und durchgeführt.³³ Es bestand aus den drei Versuchsreihen GBS-5, GBS-11 und GBS-5+11. Schüler zweier Klassenverbände der Jahrgangsstufe fünf nahmen bei den Versuchsreihen GBS-5 und GBS-5+11 teil und drei Physikkurse der Jahrgangsstufe elf bei den Versuchsreihen GBS-11 und GBS-5+11. Die Probanden der Versuchsreihen GBS-5 und GBS-11 sind somit jeweils in Bezug auf ihr Alter homogen, wohingegen die Probanden der Versuchsreihe GBS-5+11 unterschiedlich alt und daher heterogen sind. Im Folgenden bezeichnet GBS-5(+11) die Probanden der Fünftklässler in Versuchsreihe GBS-5+11 und GBS-(5+)11 die Probanden der Elftklässler in Versuchsreihe GBS-5+11. Bei den Elftklässlern nahmen gezielt Physikkurse am Experiment teil, da die physikalischen Eigenschaften des Gehens in großen Menschenmengen im Unterricht besprochen wurden. Die durchschnittliche Körpergröße von Versuchsreihe GBS-5 lag bei $1,48\text{ m} \pm 0,04\text{ m}$ und von GBS-11 bei $1,76\text{ m} \pm 0,07\text{ m}$. Abb. 3.4 zeigt die Größenverteilung für beide Versuchsreihen, die sich nicht überschneiden.

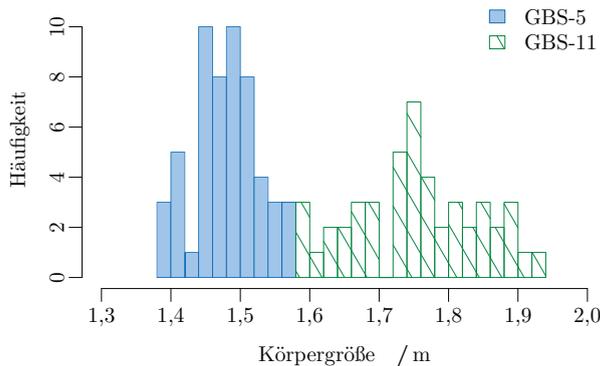


Abb. 3.4: Körpergrößenverteilung, Experiment 3.

Für die teilnehmenden Schüler entfiel der reguläre Unterricht für die Dauer des Experiments. Zudem wurden sie in Unterrichtsstunden im Klassenverband vor sowie nach den Experimenttagen von den Durchführenden besucht. Dabei wurde das Projekt vorgestellt, Videos

³¹ Die Experimente wurden im Rahmen des DFG-Projekts „Quantitative Beschreibung der Staubildung in Fußgängerströmen“ mit der Projektnummer SCHA 636/9-1 durchgeführt. Die Videos und Trajektorien der Experimente des Projekts finden sich in Seyfried und Boltes [92].

³² Das Engstellen-Experiment wird von Von Krüchten und Schadschneider [113] vorgestellt.

³³ Die Erstsprache der Schule erfolgte durch Professor Armin Seyfried vom Forschungszentrum Jülich. Die Kommunikation in Richtung der teilnehmenden Schüler und ihren Eltern erfolgte durch die Autorin dieser Arbeit. Die Hauptverantwortung der Experimentvorbereitung lag bei der Autorin. Dazu gehörte insbesondere den Parcours und die einzelnen Versuchsreihen mit ihren Durchläufen zu planen, spezielle Unterrichtseinheiten vorzubereiten und durchzuführen, die Körpergröße der Probanden zu messen und die Helfer für die Experimentdurchführung einzuteilen. Planung und Durchführung hinsichtlich der Kamera lag bei zwei Mitarbeitern des Forschungszentrums Jülich. Beim Aufbauen des Experiments wurde die Autorin von Helfern der Universität Wuppertal und des Forschungszentrums Jülich unterstützt. Die Verantwortung für die Durchführung des Experiments lag ebenfalls bei der Autorin.

von bereits durchgeführten Experimenten gezeigt und die Körpergröße der Schüler gemessen. Auch erfolgten Unterrichtseinheiten zu den Themen Menschenmenge und Verhalten bei hohen Personendichten. Hierbei wurden in Gruppenarbeit Zeiten gestoppt und das Experiment von Mintz [67] durchgeführt, bei dem an Schnüre gebundene Keile aus einer Flasche gezogen werden sollten. Den Schülern wurde mitgeteilt, dass die ermittelten Daten unter anderem den Forschungszwecken dienen werden. In dem nachbereitenden Unterricht durften die Schüler anhand von Videoaufzeichnungen ihrer Durchläufe ihre Zeiten stoppen und auswerten. Dabei kamen alle Klassen unter anderem zu dem Ergebnis, dass die Geschwindigkeit bei ansteigender Personendichte sinkt.

Aufbau: Das Experiment fand in der Aula der Schule statt. Der Raum war groß genug, um zwei identische Parcours zu errichten und einen Wartebereich für wartende Probanden zu markieren, siehe Abb. 3.5.³⁴ Neben der Datenverdoppelung haben zwei Parcours den praktischen Nebeneffekt, dass mehr Probanden gleichzeitig bei zwei Durchläufen teilnehmen können und sich damit die Wartezeiten verkürzen. Der Parcours neben der Bühne mit Laufrichtung im mathematisch positiven Sinn wird Hauptoval genannt, der andere mit negativer Laufrichtung Nebenoval.

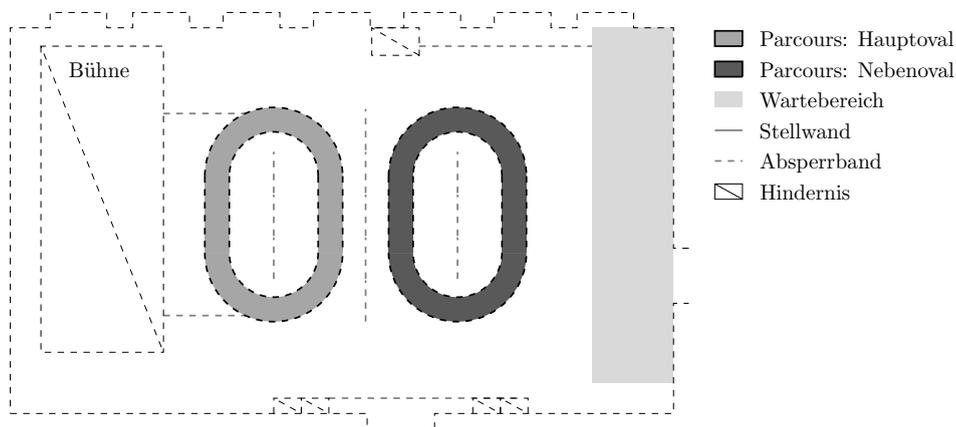


Abb. 3.5: Raumskizze, Experiment 3.

Die Parcours wurden mit einem schwarzen Klebeband auf dem Boden markiert. Zusätzlich wurden umgedrehte schwarze Kunststoffeimer entlang der Markierung auf beiden Seiten außerhalb der zu begehenden Korridore im Abstand von 0,66 m im Inneren bzw. 0,67 m außerhalb platziert.

In der Mitte der beiden Parcours wurden drei Stellwände mit je einer Breite von 1,40 m nebeneinander aufgestellt. Um den Sichtkontakt zwischen beiden Parcours zu verhindern, wurden außerdem zwischen diesen weitere fünf Stellwände aufgereiht. Ein gelb-schwarz gestreiftes Klebeband auf dem Boden markierte den Wartebereich. Die Fenster der Aula wurden mit ihren Vorhängen verdunkelt und das Deckenlicht eingeschaltet, sodass die Lichtverhältnisse während des ganzen Experiments gleich blieben.

³⁴ Die Maße des Parcours werden in Unterabschnitt 3.2.1 genannt.



(a) Verwendete Kamera



(b) Kamerasicht auf das Hauptoval, GBS-11

Abb. 3.6: Kamera und Kamerasicht, Experiment 3.

Kamera: An der Decke der Aula wurde über jeden Parcours eine Digitalkamera angebracht. Beide Kameras filmten während des ganzen Projekttags jeweils den entsprechenden Parcours. Abb. 3.6 zeigt in (a) die verwendete Kamera und in (b) die Kamerasicht des Hauptovals während eines Durchlaufs von Versuchsreihe GBS-11. Aus den Videoaufzeichnungen und der Software PeTrack konnten anschließend die Probanden einzeln erkannt und individuelle Ort-Zeit-Kurven erstellt werden.

Um die Probanden im Videobild mit der Software erkennen zu können, trugen diese als Signalgeber einfarbige Mützen mit einem schwarzen Punkt (Durchmesser circa 4 cm) in der Mitte der Mützenoberseite. So konnte immer die gleiche Stelle des Kopfs eines Probanden erkannt werden. PeTrack benötigt für die Berechnung des Orts eines Probanden aus dem Videobild dessen Körpergröße. Hierfür wurden bereits im Vorfeld die Körpergrößen der Probanden inklusive der getragenen Schuhe gemessen.

Da in PeTrack keine Probanden individuell erkannt werden können, wurden für eine genauere Berechnung des Orts aus den gemessenen Körpergrößen der Probanden je Versuchsreihe fünf gleich große Größenintervalle gebildet, denen aufsteigend die Farben pink, orange, gelb, grün und blau zugeordnet wurden, siehe Tab. 3.2. So zog ein Proband der Körpergröße 1,58 m in der ersten Versuchsreihe eine pinke Mütze an, während er in der dritten eine orange Mütze trug. In Abb. 3.7 wird zur Illustration eine Situation mit fünf verschiedenen Mützen gezeigt.



Abb. 3.7: Getragene Mützen, Experiment 3.

Tab. 3.2: Zuordnung der Mützenfarbe und ihre Körpergröße, Experiment 3.

Körpergrößenintervall in m			Farbe	Mittelwert der Körpergrößen in m		
GBS-5	GBS-11	GBS-5+11		GBS-5	GBS-11	GBS-5+11
]1,39; 1,43]	]1,57; 1,64]	]1,39; 1,49]	pink	1,419	1,616	1,463
]1,43; 1,47]	]1,64; 1,71]	]1,49; 1,60]	orange	1,466	1,686	1,550
]1,47; 1,51]	]1,71; 1,78]	]1,60; 1,71]	gelb	1,505	1,765	1,674
]1,51; 1,55]	]1,78; 1,85]	]1,71; 1,82]	grün	1,541	1,832	1,777
]1,55; 1,59]	]1,85; 1,93]	]1,82; 1,93]	blau	1,588	1,899	1,885

Die Größe, auf die PeTrack bei der Ortsberechnung einer Person zurückgreift, ist in Tab. 3.2 in den letzten drei Spalten eingetragen. Dieser Wert entspricht dem Mittelwert aller gemessenen Körpergrößen aus dem entsprechenden Größenintervall, weswegen die Werte nicht äquidistant sind, und wurde um 0,01 m erhöht, um auch die Höhe der Mütze selbst zu berücksichtigen.

Ablauf: Am Projekttag wurden die drei Versuchsreihen GBS-5, GBS-11 und GBS-5+11 mit jeweils unterschiedlichen Probandengruppen durchgeführt. Jede Versuchsreihe dauerte etwa 50 Minuten. Für jeden Durchlauf ist die Startuhrzeit, die Probandenanzahl und die globale Dichte in Tab. A.4 in Anhang A.1 aufgeführt. Bei den Durchläufen von Versuchsreihe GBS-5+11 nahmen die beiden Probandengruppen GBS-5(+11) und GBS-(5+)11 im Verhältnis 1:1 teil.

Zu Beginn der ersten beiden Versuchsreihen wurden im Vorraum der Schulaula die Mützen verteilt und von den Probanden so angezogen, dass der schwarze Punkt nach oben zeigte. Nach dem Betreten der Aula durchquerten die Schüler das Hauptoval einmal einzeln, bevor sie sich auf der Wartefläche sammeln sollten. Zum Schluss der ersten Versuchsreihe gingen die Fünftklässler ein zweites Mal einzeln durch den Parcours. Dabei teilten sich die Schüler entsprechend ihres Klassenverbands a und b auf das Haupt- und Nebenoval auf. Vor der dritten Versuchsreihe wurden im Raum vor der Aula die Mützen gegebenenfalls wieder ausgetauscht. Am Ende dieser Versuchsreihe gingen die Probanden aus der elften Klasse einzeln durch das Hauptoval während die Probanden der fünften Klasse einzeln das Nebenoval passierten. Diese Durchläufe werden zu den Versuchsreihen GBS-11 bzw. GBS-5 gezählt. Die einzeln durchquerten Durchläufe dienen der Bestimmung der freien Gehgeschwindigkeit, welche in Abschnitt 4.2 untersucht wird.

Während einer Versuchsreihe gab es für jeden Probanden drei verschiedene Aktivitätsmöglichkeiten: im Hauptoval mitgehen, im Nebenoval mitgehen oder auf der Wartefläche stehen. Vor dem Experiment wurden für jeden Durchlauf entsprechend der Probandenanzahl Schüler zufällig ausgewählt. Die entsprechenden Namen wurden für jeden Durchlauf auf einer Liste je Aktivität festgehalten. Zu Beginn eines Durchlaufs wurden die beiden kürzesten Listen über die örtliche Lautsprecheranlage vorgelesen, woraufhin sich die Probanden zum entsprechenden Ort begaben. Es wurde darauf geachtet, dass die Probanden in jedem Oval möglichst gleichverteilt aufgestellt waren. Über ein Kommando wurden die Schüler zum Loszugeschoben aufgefordert. Nach einem zweiten Kommando wurde das Oval geöffnet, indem die Kunststoffeimer an einer bestimmten Stelle zur Seite geschoben wurden. Die Probanden konnten in Laufrichtung den Parcours verlassen und wieder zum Wartebereich gehen.



(a) Sicht von der Bühne, Versuchsreihe GBS-5+11

(b) Blick in Laufrichtung, Versuchsreihe GBS-11

Abb. 3.8: Fotos von Experiment 3.

In Abb. 3.8 werden Fotos des Experiments von zwei Durchläufen gezeigt. Die Sicht auf den Parcours von der Bühne aus wird in (a) wiedergegeben, während in (b) der Blick in Laufrichtung jeweils einen geraden Bereich beider Parcours zeigt.

Die Durchläufe um 9:56 Uhr und 9:59 Uhr von Versuchsreihe GBS-5 und die um 11:15 Uhr von Versuchsreihe GBS-11 sind sogenannte Schüleridee-Durchläufe. Nach Befragung der Probanden, wie sie wohl schneller trotz hoher Dichte den Parcours durchqueren könnten, setzten diese ihre Ideen, wie im Gleichschritt gehen oder sich an der Schulter festhalten, direkt um. Diese Durchläufe finden in dieser Arbeit keine Beachtung.

Viele Lehrer und weitere Zuschauer interessierten sich für die Experimente und waren bei der Durchführung anwesend. Auch wurden Fotos von den Probanden gemacht. Um Störungen oder Einflüsse von außen möglichst gering zu halten und um Ablenkungen zu reduzieren, wurde nach der ersten Versuchsreihe der Aufenthalt anderer Nichtteilnehmenden in der gesamten Aula untersagt. Ausnahme bildeten zwei Bereiche am Rand der Aula bei den Fenstern und im Eingangsbereich. Diese wurden auf dem Boden mit einem gelb-schwarz gestreiften Klebeband abgesteckt, siehe Abb. 3.5. Im letzten Viertel der zweiten Versuchsreihe beklagten sich einige Probanden über stickige Luft. Daraufhin wurden zwischen der zweiten und dritten Versuchsreihe die Vorhänge zur Seite geschoben, die Fenster geöffnet und die Aula gelüftet. Im Anschluss wurden die Fenster wieder geschlossen und die Vorhänge zugezogen.

3.2.5 Experiment 4

Am 30.04.2015 nahmen in Wuppertal Schüler des Wilhelm-Dörpfeld-Gymnasiums (WDG) im Rahmen eines Projekttags als Probanden am Experiment mit 49 für diese Arbeit relevanten Durchläufen teil. Das Experiment wurde im Rahmen dieser Arbeit geplant und durchgeführt.³⁵ Da es dem Experiment 3 sehr stark ähnelt, wird es hier nur kurz beschrieben und dafür in Anhang A.1 ausführlich erläutert.

In der Aula wurden zwei Parcours mit identischen Abmaßen wie bei Experiment 3 aufgebaut. Die Probanden trugen einfarbige Mützen in fünf verschiedenen Farben zur verbesserten an-

³⁵ Die Verantwortlichkeiten und Aufgabenverteilungen entsprachen dem Experiment 3, vgl. Fußnote 33 auf S. 38.

schließenden Ortsbestimmung, entsprechend ihrer Körpergröße. Die Durchläufe wurden mit an der Decke befestigten Digitalkameras, die bereits bei Experiment 3 eingesetzt worden waren, aufgenommen. Das Experiment bestand aus den drei Versuchsreihen WDG-6, WDG-11 und WDG-6+11, wobei die erste Probandengruppe aus Schülern der Jahrgangsstufe sechs bestand, die zweite aus Schülern der Jahrgangsstufen zehn und elf und die dritte eine Vereinigung der beiden Gruppen darstellte. Eine Übersicht der Durchläufe zur Probandenanzahl und globaler Dichte findet sich in Tab. A.5 in Anhang A.1. Die Datensätze zur anschließenden Analyse wurden ähnlich den Datensätzen des Experiments 3 erzeugt.

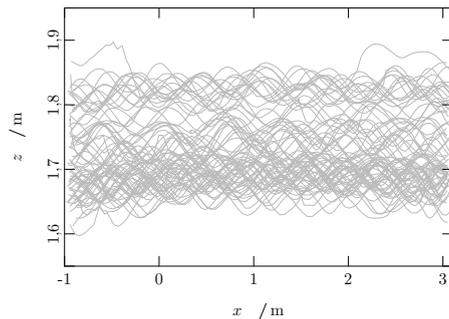
3.3 Datenaufbereitung

3.3.1 Trajektorien

Experiment 1: Die Trajektorien des Experiments 1 lagen bereits vor.³⁶ Diese wurden mithilfe der Software PeTrack erstellt, wofür die seitlichen Videoaufzeichnungen mit 25 Bildern pro Sekunde verwendet wurden. Zuerst fand eine Kalibrierung in PeTrack statt, bei der ein zweidimensionales Koordinatensystem in der Ebene benutzt wurde. Danach wurden für jeden Durchlauf die Videos aus einzelnen Bildern in die Software eingefügt und alle Probanden manuell erkannt sowie an ihrem Ohr markiert. Das anschließende Tracken erfolgte automatisch mit der Software.



(a) Screenshot des Videobilds in PeTrack mit Pfad der letzten Sekunde (rote Kurve)



(b) Extrahierte Trajektorien

Abb. 3.9: Trajektorien des Durchlaufs normal_1, Experiment 1. Der Screenshot in (a) wurde übernommen von Lukowski [63, Abb. 5.2].

In Abb. 3.9 (a) wird ein Screenshot vom Tracken mit der Software PeTrack des Durchlaufs normal_1 von Versuchsreihe BUW-n mit 15 Probanden gezeigt. Die roten Kreise zeigen die Orte der Probanden in den Bildern der letzten Sekunde. In Abb. 3.9 (b) werden alle extrahierten Trajektorien des Durchlaufs gezeigt. Nach dem Tracken wurden sie in einer ASCII-Datei mit den Spalten ID, Frame, x und z gespeichert, die für die Nummer des Probanden, die Bildnummer und den Ort des Ohrs in horizontaler bzw. vertikaler Richtung stehen. Im Folgenden werden nur die Daten des zwei Meter langen Bereichs $[0; 2]$ m für die Analyse verwendet.

³⁶ Lukowski [63] stellte das Experiment im Rahmen einer Masterarbeit vor und bereitete die Daten auf.

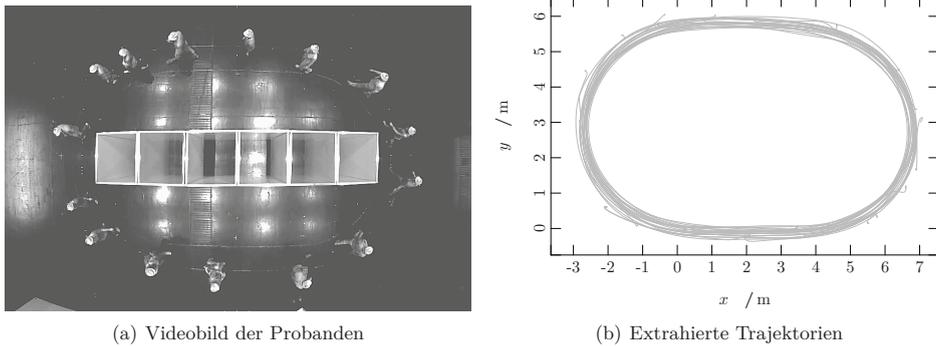


Abb. 3.10: Trajektorien des Durchlaufs 1D_PHAS_SEP_1, Experiment 2.

Experiment 2: Für diese Arbeit wurden aus den Videoaufzeichnungen des Experiments 2 mit 16 Bildern pro Sekunde einzelne Bilder in die Software von Mehner [66] geladen und in Trajektorien umgewandelt.³⁷ Dazu wurden die Probanden manuell erkannt und am Kopf in der Mitte der Mütze markiert, siehe Abb. 3.10 (a). Die Wege der Probanden wurden automatisch in der Software getrackt und manuell korrigiert.

Weiterhin wurden in einem einzelnen Bild bestimmte Ortspunkte des Parcours markiert und anschließend als ASCII-Datei herausgelesen. Anhand dieser Daten wurde die Lage des Ovals zu der des Koordinatensystems der Software berechnet. Die Lagedaten dienen der späteren Koordinatenrotation und -translation der Trajektorien.

Zum Zeitpunkt der Analyse bestand noch nicht die Möglichkeit, die Informationen zu Geschlecht, Körpergröße etc. aus dem Reed-Solomon-Code, welcher auf der Mützenoberseite aufgedruckt war, auszulesen. Daher wurde eine mittlere Körpergröße der Probanden von 1,75 m angenommen. Diese Größe sowie der Ort einer Person auf dem Videobild ergaben nach einigen Rechenschritten mit der Software den Ort der Person im Parcours. Die mit der Software berechneten Daten der Orte wurden in einer ASCII-Datei mit den Spalten ID, Frame, x , y , z gespeichert. Dabei steht ID für die Identifikationsnummer eines Probanden, Frame für die Bildnummer, x bzw. y für den Wert in horizontaler bzw. vertikaler Richtung und z für die angenommene Körpergröße.

Die getrackten Ort-Zeit-Koordinaten aller Probanden wurden anschließend entsprechend der vorher ermittelten Lagedaten rotiert und verschoben, sodass der neue Ursprung des Koordinatensystems auf der Mittellinie des Korridors liegt, genau am Schnittpunkt von Halbkreis und Gerade des Parcours. Die x -Achse zeigt in Laufrichtung und liegt parallel zu den Geraden des Parcours. Die y -Achse zeigt orthogonal in Richtung des Inneren des Ovals. Die aufbereiteten Trajektorien wurden in einer ASCII-Datei mit den Spalten ID, Frame, x , y , z gespeichert und werden in Abb. 3.10 (b) für den Durchlauf 1D_PHAS_SEP_1 mit 15 Probanden gezeigt.

³⁷ Diese Bilder wurden im Rahmen des Projekts BaSiGo gewonnen und in einer Datenbank des Forschungszentrums Jülich abgelegt. Somit lagen sie der Autorin für die weitere Verwendung vor. Da die Experimente in dieser Arbeit erstmalig analysiert werden, lagen noch keine Trajektorien vor, sondern wurden durch die Autorin erstellt.

Experimente 3 und 4: Die Trajektorien der Experimente 3 und 4 wurden im Rahmen dieser Arbeit mithilfe der Software PeTrack erstellt, wofür Videoaufzeichnungen mit 25 Bildern pro Sekunde verwendet wurden. Zuerst wurde jedes Oval-Kamera-System kalibriert. Die Kalibrierung bestand aus zwei Schritten, der intrinsischen und der extrinsischen Kalibrierung. Bei ersterer fand eine optische Entzerrung des Objektivs statt. Der zweite Schritt war eine 3D-Kalibrierung durch Zuordnung von einigen Pixeln zu realen 3D-Koordinaten.

Für jeden Durchlauf wurden die Videos aus einzelnen Bildern in die Software eingefügt. Die fünf Mützenfarben sowie deren jeweils entsprechende Körpergröße wurden in der Software definiert. Für jede Versuchsreihe gab es eine eigene Größentabelle, siehe Tab. 3.2 auf S. 41 und Tab. A.1 in Anhang A.1. Anschließend wurden die Probanden automatisch anhand ihrer Mütze im ersten Bild erkannt und an ihrem Kopf markiert. Dabei wurden im Experiment 3 die schwarzen Punkte auf der Mütze ermittelt. Bei Experiment 4 wurde der wahrscheinliche Mittelpunkt der Mütze anhand der Position im Raum berechnet.³⁸

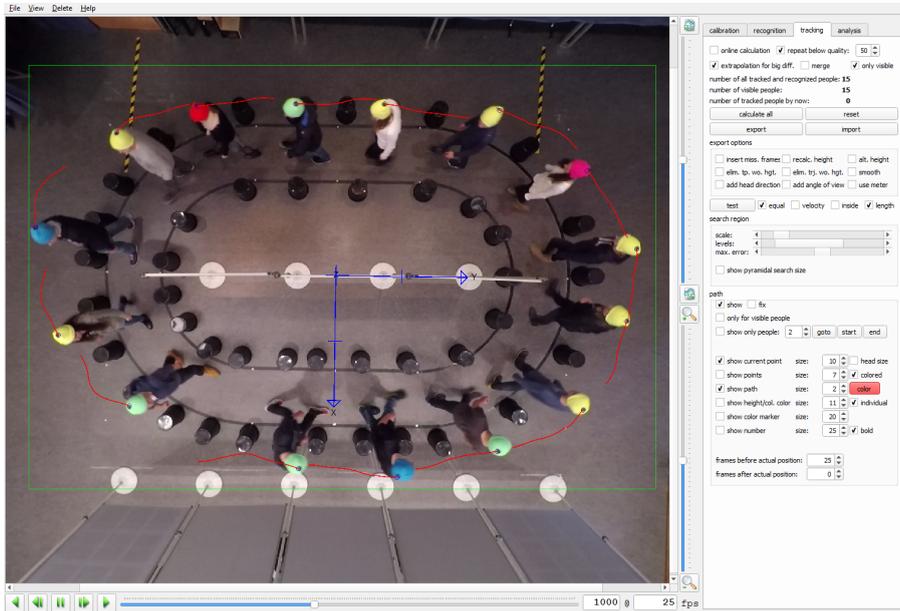


Abb. 3.11: Screenshot verwendeter Software bei Durchlauf 1_2_01, Experiment 3.

Nach dem Erkennen erfolgte das Tracken der Probanden mit PeTrack automatisch. Bei jedem Bildwechsel wurden im ersten Schritt Personen getrackt und im zweiten Schritt Personen im Bild erkannt. Lag dabei die Position der neu erkannten Person an ähnlicher Stelle wie die Position einer getrackten Person, wurde zur Positionverbesserung die Position der getrackten Person durch die der neu erkannten Person ersetzt. Exemplarisch für das Tracken in der Software wird in Abb. 3.11 der Durchlauf 1_2_01 mit 15 Probanden bei Bild 1000 in der Software PeTrack gezeigt. Rote Linien entsprechen den getrackten Orten der letzten Sekunde.

³⁸ Boltes [5, S. 68] benennt in seiner Dissertation das Problem der optischen Verdeckung des ganzen Kopfs. In Boltes [7] wird die Berechnung des Mittelpunkts und die dadurch gegebene Fehlerreduktion der Ortsbestimmung beschrieben.

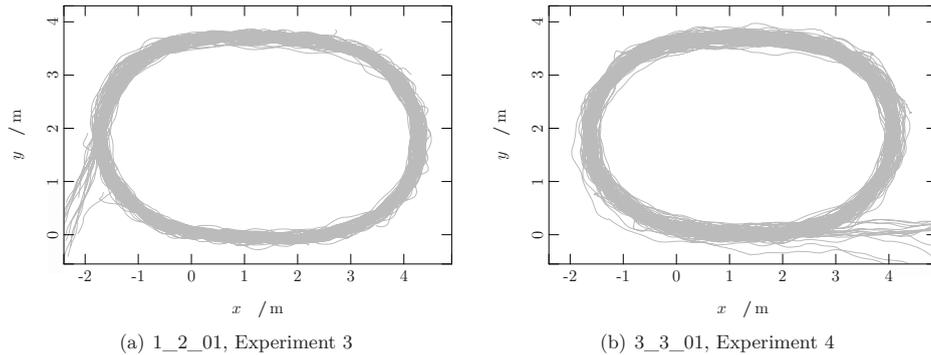


Abb. 3.12: Extrahierte Trajektorien zweier Durchläufe, Experimente 3 und 4.

Nach dem gesamten Tracken und Erkennen in allen Bildern mussten manuell einige ID-Zuordnungen entfernt und weitere Trajektorienabschnitte miteinander verbunden werden. Zudem gab es wenige Situationen bei Durchläufen mit hoher Personendichte, in denen ein Proband beispielsweise seinem Vordermann über die Schulter schaute und dabei kurzfristig mit seinem Kopf vor dem Kopf seines Vordermanns war. Bei einer Analyse der Ort-Zeit-Daten entspricht dies einem Überholen, das den Probanden untersagt war. Diese Ort-Zeit-Punkte wurden manuell bereinigt. Um einen Vergleich zwischen homogenen und heterogenen Personengruppen von Experiment 3 zu ermöglichen, wurden die Probanden der 5. bzw. 11. Klasse bei Versuchsreihe GBS-5+11 in PeTrack manuell identifiziert und der Teilgruppe GBS-5(+11) bzw. GBS-(5+)11 zugeordnet.

Die Trajektorien wurden aus PeTrack extrahiert und analog zu Experiment 2 in einer ASCII-Datei mit den Spalten ID, Frame, x , y , z gespeichert. Bei wenigen Durchläufen war bei der Erstellung der Einzelbilder aus dem Video je Sekunde das 25. Bild verloren gegangen. Die fehlenden Ort-Daten dieser Bilder wurden über eine Mittelwertbildung beider zeitlich benachbarter Ort-Daten berechnet und anschließend ergänzt.

Die Ort-Zeit-Koordinaten aller Probanden wurden so verschoben, dass der neue Ursprung des Koordinatensystems auf der Mittellinie des Korridors genau am Schnittpunkt von Halbkreis und Gerade des Parcours liegt. Die x -Achse zeigt in Laufrichtung und liegt parallel zu den geraden Stellen des Parcours, die y -Achse zeigt orthogonal in Richtung des Inneren des Ovals. Die Trajektorien wurden in einer ASCII-Datei mit den Spalten ID, Frame, x , y , z gespeichert und werden für einen Durchlauf mit 15 Probanden in Abb. 3.12 (a) für Experiment 3 und in (b) für Experiment 4 gezeigt.

3.3.2 Projektion und Rektifizierung

Experiment 1: Bei diesem Experiment wurde nur ein gerader Teilbereich des Parcours gefilmt. Somit liegen bereits eindimensionale Daten in der Ebene vor.

Experimente 2, 3 und 4: Zur Betrachtung von Stauwellen im gesamten Parcours wurden für die Experimente 2, 3 und 4 die zweidimensionalen Daten des Ovals auf eine eindimensionale Gerade abgebildet. Diese Abbildung λ besteht aus zwei Teilschritten.

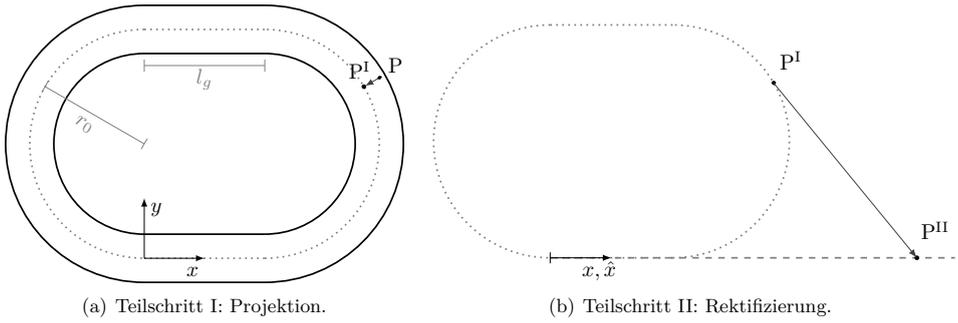


Abb. 3.13: Abbildung von Oval auf Gerade.

In Teilschritt I wurden alle Datenpunkte der in Unterabschnitt 3.3.1 beschriebenen Trajektorien auf die Oval-Mittelpunktlinie projiziert, siehe Abb. 3.13 (a). In Teilschritt II wurde die Oval-Mittelpunktlinie mit den auf sie projizierten Punkte rektifiziert, siehe Abb. 3.13 (b). Dafür wurde die Mittelpunktlinie am Koordinatenursprung getrennt und auf eine Gerade abgewickelt. Bei der Rektifizierung bleiben alle Datenpunkte des ersten geraden Abschnitts vom Oval auf der Mittelpunktlinie unverändert.

Die Abbildung $\lambda : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$, $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \mapsto \hat{x}$ wird beschrieben durch

$$\hat{x} = \begin{cases} 2l_g + r_0\pi + r_0 \arccos\left(\frac{r_0-y}{\sqrt{(x-l_g)^2+(y-r_0)^2}}\right) & x < 0, \\ x & 0 \leq x \leq l_g, y < r_0, \\ 2l_g + r_0\pi - x & 0 \leq x \leq l_g, y \geq r_0, \\ l_g + r_0 \arccos\left(\frac{r_0-y}{\sqrt{x^2+(y-r_0)^2}}\right) & x > l_g. \end{cases} \quad (3.1)$$

Der abgebildete Wert \hat{x} eines Datenpunkts entspricht der Weglänge vom Koordinatenursprung zum Lotfußpunkt des Datenpunkts entlang der Laufrichtung auf der Oval-Mittelpunktlinie und somit der vom Koordinatenursprung zurückgelegten Strecke einer Person, die immer auf der Oval-Mittelpunktlinie geht. Sie liegt im Intervall von $[0 \text{ m}; l_k]$.

Teilschritt I stellt eine Vereinfachung der Projektion von Datenpunkten auf unterschiedliche Linien im Oval dar. Es ist grundlegend zwischen zwei Varianten zu unterscheiden. Je Durchlauf wird entweder für jeden Probanden eine eigene oder für alle Probanden zusammen eine Linie bestimmt, auf die projiziert wird. Bei einer Berechnung des durchschnittlichen Abstands je Proband, entstünden unterschiedlich lange Wege, welche zu unübersichtlichen Weg-Zeit-Diagrammen führen würden. Außerdem könnten sich die Weg-Zeit-Kurven von nicht überholenden Probanden kreuzen. Zur Reduktion der Komplexität sollte die erste Variante vermieden werden. Die Annahme, dass der durchschnittliche Abstand der Trajektorienpunkte zur Oval-Innenlinie die Oval-Mittelpunktlinie beschreibt, führt zu einer Vereinfachung der Projektion ohne wesentliche Abweichung zur exakteren, zweiten Variante. Bei der vereinfachten Variante entstehen für alle Probanden und Durchläufe einer Versuchsreihe bei Oval-Umrandung gleich lange projizierte Linien. Unterschiedliche Durchläufe mit derselben Korridorlänge können hierdurch besser verglichen werden.

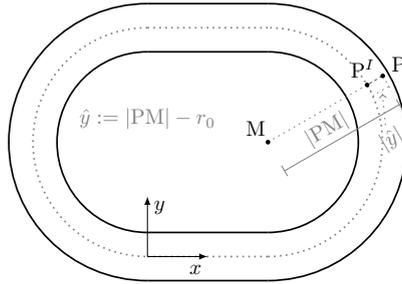


Abb. 3.14: Abstandsmessung nach Projektion.

In Teilschritt I lässt sich der Abstand vom Datenpunkt zu seinem Lotfußpunkt messen, siehe Abb. 3.14. Dabei entspricht M dem Mittelpunkt des Halbkreises.³⁹ Die gerichtete Entfernung \hat{y} zum Lotfußpunkt beschreibt nicht nur den Abstand, sondern auch die Lage mittels Vorzeichen. Die Abbildung $\lambda_2 : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$, $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \mapsto \hat{y}$ mit

$$\hat{y} = \begin{cases} r_0 - \sqrt{x^2 + (y - r_0)^2} & x < 0, \\ r_0 - \sqrt{(y - r_0)^2} & 0 \leq x \leq l_g, \\ r_0 - \sqrt{(x - l_g)^2 + (y - r_0)^2} & x > l_g \end{cases} \quad (3.2)$$

beschreibt die Berechnung der gerichteten Entfernung. Für die Analysen dieser Arbeit wird die gerichtete Entfernung nicht benötigt.

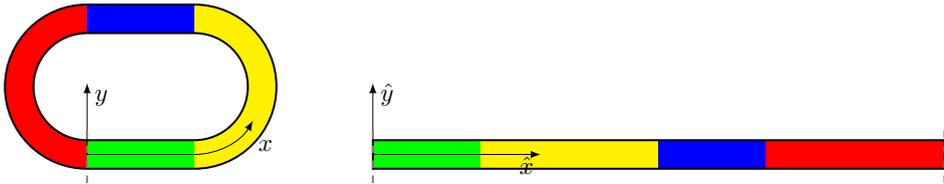


Abb. 3.15: Schematische Darstellung der Abbildung von Oval auf Gerade.

Die Abb. 3.15 und 3.16 zeigen die Rektifizierung des Ovals auf eine Gerade unter Hinzunahme der gerichteten Entfernung. Zur Verdeutlichung wurde das Oval in vier Bereiche aufgeteilt und farblich markiert. \hat{x} beschreibt den Abstand zum Koordinatenursprung entlang der Mittellinie des Ovals und wurde nach Gleichung (3.1) berechnet. \hat{y} beschreibt die gerichtete Entfernung zwischen dem ursprünglichen Datenpunkt und seinem Lotfußpunkt auf der Mittellinie und wurde nach Gleichung (3.2) berechnet. Während Abb. 3.15 eine schematische Darstellung zeigt, wird in Abb. 3.16 die tatsächliche Trajektorie eines Probanden des Durchlaufs 1_1_01 gezeigt. Abb. 3.15 zeigt links den Parcours mit seinen vier Bereichen sowie das Koordinatensystem der Rektifizierung bei einer positiven Laufrichtung. Die vier abgebildeten Bereiche werden rechts gezeigt. In Abb. 3.16 wird links für Experiment 3 mit $N = 17$ die extrahierte Trajektorie eines Probanden im Parcours gezeigt und rechts die Abbildung dieser Trajektorie gemäß den Gleichungen (3.1) und (3.2).

³⁹ In Abb. 3.14 steht $|PM|$ für den Abstand zwischen dem Trajektorienpunkt P und dem Mittelpunkt M.

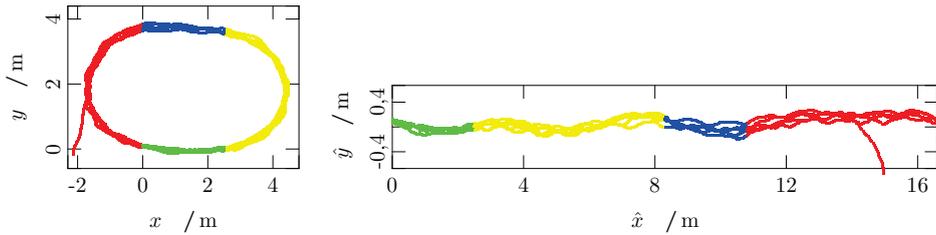


Abb. 3.16: Abbildung einer Trajektorie des Durchlaufs 1_1_01, Experiment 3.

Der Parcours besteht aus zwei geraden und zwei kurvigen Bereichen. Da bei der Analyse das ganze System betrachtet wird, müssen die beiden verschiedenen Formen, Halbkreis und Gerade, kombiniert werden. In Unterabschnitt 3.4.1 wird gezeigt, dass die „Krümmungseffekte“ auf das Fundamentaldiagramm vernachlässigbar gering sind und die Fundamentaldiagramme beider Geometrien daher zusammengefasst werden dürfen.

3.3.3 Messung

Anhand der eindimensionalen Daten findet für jeden Durchlauf der vier Experimente eine mikroskopische Messung von den Geschwindigkeiten, Voronoi-Dichten, Flüssen und Abständen nach den Gleichungen (2.1), (2.4), (2.6) und (2.7) statt. Mikroskopisch bedeutet hierbei, dass für jede Person zu jedem Zeitpunkt ein Messwert je Kenngröße erhoben wird.

3.3.4 Stationärer Zustand

Die gemessenen Größen, wie Geschwindigkeit und Dichte, sind während der Versuchsdurchführung nicht konstant, sondern ändern sich in der Zeit. Initialbedingungen, beispielsweise die Aufstellung der Probanden vor dem Start des Experiments, beeinflussen die Größen. Neben den Initialbedingungen nehmen Endbedingungen auch Einfluss auf die gemessenen Daten. Bei den untersuchten Schul-Experimenten ist das Öffnen des Ovals und somit der Übergang vom geschlossenen zum offenen System eine Endbedingung. Erst wenn die Anfangsbedingungen „vergessen“ und die Endbedingung noch nicht eingetreten sind, kann ein stationärer Zustand eintreten. Im Fundamentaldiagramm sollen nur Daten aus diesem stationären Zustand wiedergegeben werden.

Der von Liao et al. [61] entwickelte Algorithmus zur automatischen Erkennung des stationären Zustands bei Engstellen konnte bei diesen Daten nicht verwendet werden, da keine Engstelle vorlag, sondern eindimensionale Bewegung. Deswegen wurde der Untersuchungszeitraum manuell begrenzt.

Die untersuchten Experimente dauerten zwischen 40 Sekunden und 160 Sekunden. In dieser kurzen Zeitdauer lässt sich unter Umständen keine Stationarität nachweisen. Gerade bei hohen Dichten mit Stauwellen ist der Begriff Stationarität mit Bedacht zu verwenden. Deshalb wird im Folgenden vom „quasi stationären Zustand“ gesprochen. In Abb. 3.17 wird der Zeitverlauf der durchschnittlichen Geschwindigkeit, berechnet gemäß Gleichung (2.2), des Durchlaufs 1_3_5 gezeigt. Der erste Anstieg entsteht durch das Losgehen vom stehenden

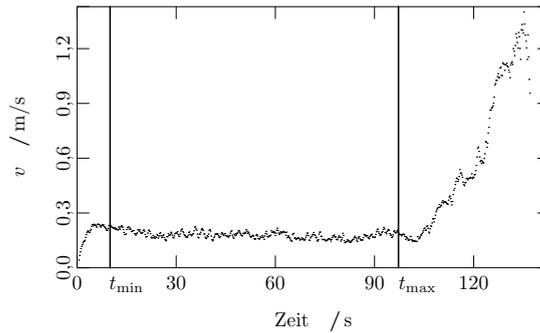


Abb. 3.17: Geschwindigkeit im Zeitverlauf mit Kennzeichnung des stationären Zustands in Durchlauf 1_3_5, Experiment 3.

Zustand. Der zweite Anstieg bei 100 s erfolgt durch das Öffnen des Systems. Zwischen den zwei Trennlinien bei t_{\min} und t_{\max} liegt der quasi stationäre Zustand. Für jeden Durchlauf wird dieser manuell und individuell bestimmt. Für die Analysen werden nur Daten dieses Zustands verwendet. In Anhang A.1 wird in den Tab. A.6 bis A.9 ein Überblick über die Dauer der Versuche sowie des jeweiligen quasi stationären Zustands gegeben. Die Intervalle werden durch die Bildnummer des jeweils ersten und letzten Bilds vom Video bzw. vom quasi stationären Zustand beschrieben.

3.4 Voranalysen

3.4.1 Geometrie

Bei den Parcours aller vier Experimente treten im Oval die Geometrien Gerade und Kurve auf.⁴⁰ Sofern die Fundamentaldiagramme sich für diese beiden Geometrien unterscheiden, müsste bei den Analysen des Fundamentaldiagramms in Kapitel 4 danach differenziert werden. In diesem Unterabschnitt wird gezeigt, dass sie sich nicht unterscheiden und daher in den Untersuchungen in Kapitel 4 keine Differenzierung nach den beiden Geometrien erfolgen muss.

Zuerst wird eine grafische Analyse durchgeführt. Abb. 3.18 zeigt für beide Geometrien die mikroskopischen Fundamentaldiagramme von Versuchsreihe Basigo-1D, Experiment 2, in der Dichte-Geschwindigkeit-Beziehung. Jeder Datenpunkt steht für eine mikroskopische Messung im zeitlichen Abstand von einer Sekunde. Um zwischen den sechs Durchläufen unterscheiden zu können, hat jeder Durchlauf eine eigene Farbe und ein eigenes Symbol. Die Formen beider Fundamentaldiagramme ähneln sich und zeigen keine systematischen Unterschiede. Selbst bei Betrachtung einzelner Durchläufe lassen sich kaum Unterschiede erkennen. Dass die Anzahl der Datenpunkte des geraden Bereichs in (a) geringer ist als die des kurvigen Bereichs in (b), kann damit erklärt werden, dass die Wegstrecken der geraden Bereiche kürzer sind als die der kurvigen Bereiche.

⁴⁰ Die Form des Parcours wird in Abb. 3.1 auf S. 34 dargestellt.

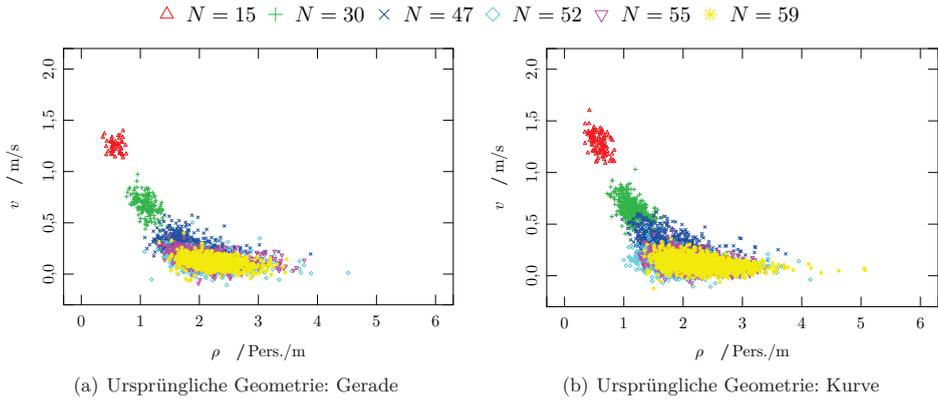


Abb. 3.18: Fundamentaldiagramm $v(\rho)$ je Geometrie, Versuchsreihe Basigo-1D. Mikroskopische Messwerte von Dichte und Geschwindigkeit.

Neben der grafischen Betrachtung wird statistisch getestet, ob es signifikante Unterschiede gibt. Dazu wird im ersten Schritt eine Funktion für das Fundamentaldiagramm aus der Zusammenfassung von je 3000 Datenpunkten für den geraden und den kurvigen Bereich ermittelt. Es wird angenommen, dass das Fundamentaldiagramm der Exponentialfunktion $f(\rho) = a_1 e^{a_2(\rho - a_3)}$ folgt. Die Parameter $\mathbf{p} = (a_1, a_2, a_3)$ werden durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate anhand beobachteter Dichten und Geschwindigkeiten im Parameterraum $\mathbf{p} \in [(0,5, -10, -2); (2, 0, 2)]$ geschätzt.⁴¹

$$\mathbf{p}^* = \arg \min_{\mathbf{p}} \sum_{j=1}^{6000} (f(\rho_j) - v_j)^2. \quad (3.3)$$

Die 6000 Datenpunkte beider Geometrien sowie die Funktion mit den geschätzten Parameterwerten $\mathbf{p}^* = (1,5192, -1,4894, 0,4143)$ wird in Abb. 3.19 (a) gezeigt. In Abb. 3.19 (b) sind die Verteilungen der Residuen beider Geometrien dargestellt.

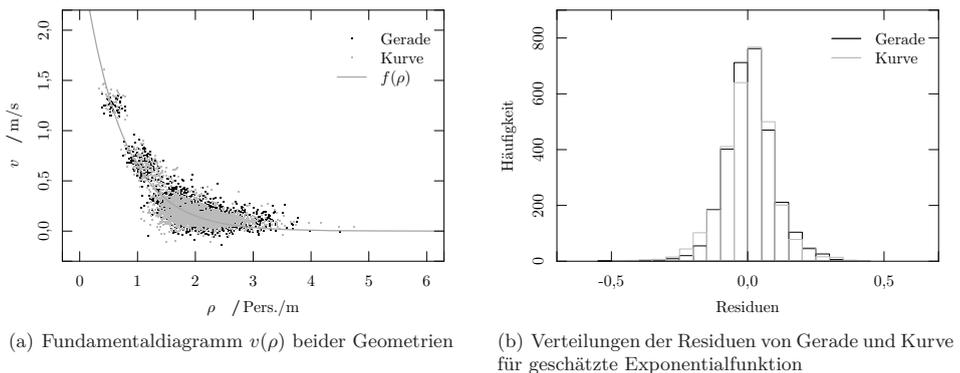


Abb. 3.19: Geometrieanalyse, Versuchsreihe Basigo-1D.

⁴¹ Die Gaußsche Methode der kleinsten Fehlerquadrate kann bei Hirn und Weiß [39, S. 270] nachgeschlagen werden.

Im zweiten Schritt wird getestet, ob die Residuen beider Punktwolken derselben Verteilung entstammen. Dazu wird der Kolmogorov-Smirnov-Test herangezogen.⁴² Die Nullhypothese des Tests lautet H_0 : „Die Residuen beider Geometrien besitzen dieselbe Wahrscheinlichkeitsverteilung“. Der Kolmogorov-Smirnov-Test ergibt $p = 0,791$. Mit diesem Wert kann die Nullhypothese nicht abgelehnt werden, sodass mit der Vermutung, dass die Verteilungen der Residuen von der gleichen stetigen Verteilung kommen, weiter gearbeitet werden kann.

Mit diesen zwei Schritten wurde gezeigt, dass die Dichte-Geschwindigkeit-Beziehung der geraden Bereiche nicht systematisch von der Dichte-Geschwindigkeit-Beziehung der kurvigen Bereiche abweicht. D. h., ein möglicher „Krümmungseffekt“ auf das Fundamentaldiagramm ist vernachlässigbar gering. Die folgenden Analysen beziehen sich daher auf die zusammengeführten Daten beider Teile des Parcours.

3.4.2 Parcours und Laufrichtung

Bei den Experimenten 3 und 4 wurden gleichzeitig verschiedene Durchläufe in zwei identischen Parcours, Hauptoval und Nebenoval, durchgeführt. Die Laufrichtungen der Parcours waren entgegengesetzt. Falls die Laufrichtung einen Einfluss auf das Fundamentaldiagramm hat, müsste bei den folgenden Analysen danach differenziert werden. In diesem Unterabschnitt wird gezeigt, dass die Wahl des Parcours und die damit einhergehende Laufrichtung keinen signifikanten Einfluss auf das Fundamentaldiagramm ausüben und daher in den folgenden Analysen keine Differenzierung nach den Parcours unterschiedlicher Laufrichtung erfolgen muss.

Für diese Untersuchung wird die Versuchsreihe von den Experimenten 3 und 4 ausgewählt, welche bei der Probandenanzahl je Durchlauf die größte Übereinstimmung beider Parcours aufweist. Dies ist mit vier Durchläufen Versuchsreihe GBS-5+11, während die anderen fünf Versuchsreihen null, zwei bzw. drei Durchläufe mit vergleichbarer Probandenanzahl vorweisen.

Analog zur Voruntersuchung der Geometrie im vorherigen Unterabschnitt wird zuerst eine grafische Analyse durchgeführt. Abb. 3.20 zeigt für beide Parcours das mikroskopische Fundamentaldiagramm von Versuchsreihe GBS-5+11 in der Dichte-Geschwindigkeit-Beziehung. Jeder Datenpunkt steht für eine mikroskopische Messung, die jede fünf Sekunden durchgeführt wurde. Beide Fundamentaldiagramme bestehen aus Datenpunkten von sieben Durchläufen mit jeweils ähnlicher Probandenanzahl und daraus resultierenden vergleichbaren globalen Dichten. Um zwischen der Probandenanzahl unterscheiden zu können, hat jede ein eigenes Symbol.

Die Formen beider Fundamentaldiagramme ähneln sich und zeigen keine systematischen Unterschiede. Sie erinnern an die Form eines Bumerangs mit schmaler werdenden Breiten zu beiden Enden hin. Es werden Dichten von 0,3 Pers./m bis 5,9 Pers./m gemessen und die Geschwindigkeiten reichen bis 1,8 m/s. Selbst bei Betrachtung einzelner Durchläufe mit derselben Anzahl der Probanden lassen sich kaum Unterschiede zwischen den beiden Parcours erkennen.

⁴² Zum Kolmogorov-Smirnov-Test vgl. Müller [69, S. 185 f.]. Die Vorbedingung des Tests der Unabhängigkeit innerhalb der Stichproben kann angenommen werden.

$\triangle N = 6$ $+ N = 12$ $\times N = 16$ $\diamond N = 24$ $\nabla N = 26$ $\boxtimes N = 34$ $\oplus N = 37$ $* N = 43$ $\boxtimes N = 48$

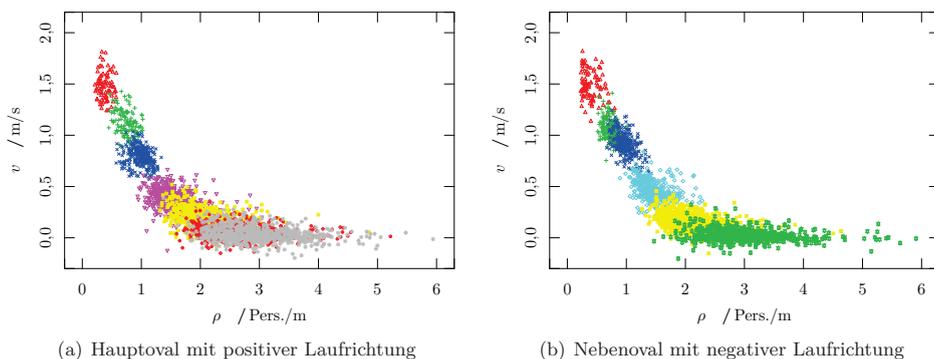


Abb. 3.20: Fundamentaldiagramm $v(\rho)$ je Parcours, Versuchsreihe GBS-5+11. Mikroskopische Messwerte von Dichte und Geschwindigkeit.

Neben der grafischen Analyse wird statistisch getestet, ob signifikante Unterschiede bestehen. Dazu werden im ersten Schritt Datenpunkte des Fundamentaldiagramms gefiltert. Im Zeitverlauf werden nur die ersten 50 Sekunden jedes Durchlaufs betrachtet. Die Datenpunkte, die während eines Durchlaufs nach einer Zeitspanne von 50 Sekunden entstanden sind, werden entfernt. Des weiteren werden nur Datenpunkte von Durchläufen mit gleicher Personenanzahl in beiden Parcours, d. h. gleicher globaler Dichte, berücksichtigt. Das sind die Durchläufe mit den Probandenanzahlen $N = 6, 12, 16$ und 34 . Beide gefilterte Fundamentaldiagramme bestehen aus Daten von Durchläufen gleicher globaler Dichten mit derselben Versuchslänge. Sie besitzen jeweils 680 Datenpunkte. In Abb. 3.21 werden die gefilterten Fundamentaldiagramme gezeigt.

$\triangle N = 6$ $+ N = 12$ $\times N = 16$ $\boxtimes N = 34$

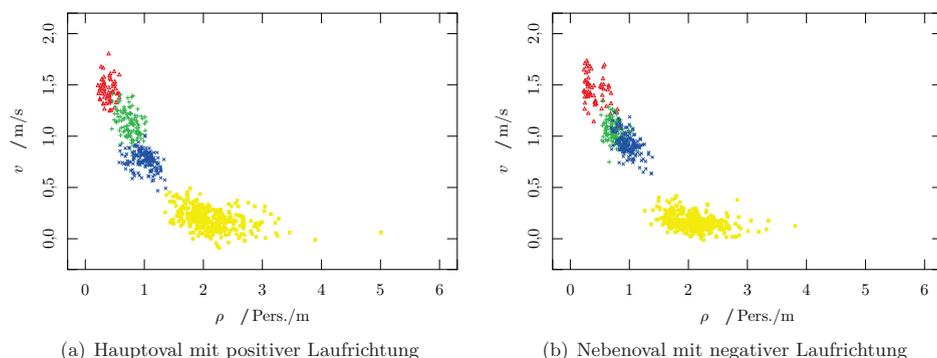


Abb. 3.21: Gefiltertes Fundamentaldiagramm $v(\rho)$ je Parcours, Versuchsreihe GBS-5+11. Mikroskopische Messwerte von Dichte und Geschwindigkeit, reduziert auf die ersten 50 Sekunden je Durchlauf.

Im zweiten Schritt wird analog dem vorherigen Unterabschnitt eine Funktion für das Fundamentaldiagramm, das die gefilterten Fundamentaldiagramme beider Parcours zusammenfasst, ermittelt. Es wird angenommen, dass der Dichte-Geschwindigkeit-Zusammenhang der Expo-

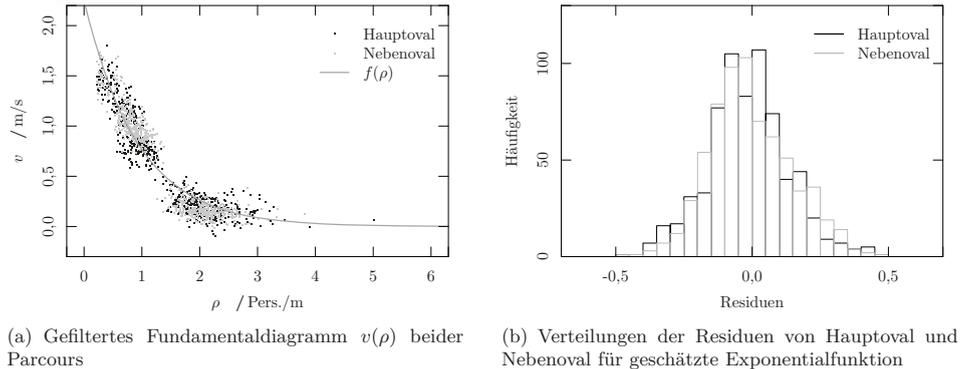


Abb. 3.22: Parcoursanalyse, Versuchsreihe GBS-5+11.

nentialfunktion $f(\rho) = a_1 e^{a_2(\rho - a_3)}$ folgt. Die Parameter $\mathbf{p} = (a_1, a_2, a_3)$ werden durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate anhand der beobachteten Dichten und Geschwindigkeiten im Parameterraum $[(0,5, -10, -2); (2, 0, 2)]$ geschätzt:

$$\mathbf{p}^* = \arg \min_{\mathbf{p}} \sum_{j=1}^{1360} (f(\rho_j) - v_j)^2. \quad (3.4)$$

Die 1360 Datenpunkte beider Parcours sowie die Funktion mit den geschätzten Parameterwerten $\mathbf{p}^* = (1,4512, -1,0781, 0,4068)$ wird in Abb. 3.22 (a) gezeigt. Die Verteilungen der Residuen beider Parcours werden in Abb. 3.22 (b) dargestellt.

Im dritten Schritt wird analog dem vorherigen Unterabschnitt getestet, ob die Residuen beider Punktwolken derselben Verteilung entstammen. Dazu wird erneut der Kolmogorov-Smirnov-Test herangezogen. Die Nullhypothese des Tests lautet H_0 : „Die Residuen beider Laufrichtungen besitzen dieselbe Wahrscheinlichkeitsverteilung“. Der Kolmogorov-Smirnov-Test ergibt $p = 0,329$. Mit diesem Wert kann die Nullhypothese nicht abgelehnt werden, sodass mit der Vermutung, dass die Verteilungen der Residuen von der gleichen stetigen Verteilung kommen, weiter gearbeitet werden kann.

Mit diesen drei Schritten wurde gezeigt, dass die Dichte-Geschwindigkeit-Beziehung des Hauptovals nicht systematisch von der Dichte-Geschwindigkeit-Beziehung des Nebenovals abweicht. D.h., dass mögliche Effekte der Wahl des Parcours und der Laufrichtung auf das Fundamentaldiagramm vernachlässigbar gering sind. In den folgenden Analysen werden daher je Versuchsreihe die Daten beider Parcours zusammengefasst.

4 Analyse des Fundamentaldiagramms

4.1 Vorbemerkung

Dieses Kapitel umfasst die Analyse der mikroskopischen Fundamentaldiagramme der in Kapitel 3 vorgestellten vier Experimente und ist in drei Abschnitte aufgeteilt.

Während die Messmethode bereits in Unterabschnitt 2.4.1 beschrieben wurde, wird in Abschnitt 4.2 die freie Gehgeschwindigkeit gemessen und untersucht.

In Abschnitt 4.3 wird der fundamentale Zusammenhang zwischen Dichte und Geschwindigkeit sowie Dichte und Fluss für jede Versuchsreihe untersucht. Dabei wird zuerst in Unterabschnitt 4.3.1 das Fundamentaldiagramm von Durchschnittswerten der Experimente vorgestellt. Anschließend wird in Unterabschnitt 4.3.2 die Beziehung von individueller Dichte und Geschwindigkeit analysiert. Ferner werden in Unterabschnitt 4.3.3 die Geschwindigkeitsverteilungen verschiedener Dichteintervalle visualisiert. In Unterabschnitt 4.3.4 wird der Dichte-Fluss-Zusammenhang untersucht.

Der Zusammenhang zwischen Abstand und Geschwindigkeit wird in Abschnitt 4.4 je Versuchsreihe analysiert. Einführend wird in Unterabschnitt 4.4.1 diese Beziehung allgemein beschrieben und visuell auf Unterschiede zwischen den Versuchsreihen geprüft. Anschließend wird in Unterabschnitt 4.4.2 ein Modell entwickelt, welches das Fundamentaldiagramm von Abstand und Geschwindigkeit durch eine Funktion mit drei Parametern beschreibt. Die Parameter der unterschiedlichen Versuchsreihen werden gegenübergestellt. In Unterabschnitt 4.4.3 werden Mittelwerte von Abständen und Geschwindigkeiten verschiedener Versuchsreihen verglichen und eine Geschwindigkeitsverteilung für den freien Fluss aufgestellt.

4.2 Freie Gehgeschwindigkeit

In diesem Unterabschnitt werden nur Durchläufe mit einem Probanden ($N = 1$) untersucht. Für einen Referenzwert der freien Gehgeschwindigkeit ohne Beeinflussung anderer Probanden wurde zu Beginn vieler Versuchsreihen, bei den Experimenten 3 und 4 auch am Ende der Versuchsreihe, ein besonderer Durchlauf ausgeführt. Der erste Durchlauf bei den Experimenten 3 und 4 fand direkt nach dem Betreten der Aula statt. Die Probanden wurden gebeten, den Parcours einmal einzeln zu passieren und sich anschließend zur Wartefläche zu begeben. Der zweite Durchlauf mit $N = 1$ wurde am Ende der Versuchsreihe direkt vor dem Verlassen der Aula durchgeführt. Da bei der Versuchsreihe Basigo-1D kein Durchlauf mit $N = 1$ durchgeführt wurde, wird sie in diesem Unterabschnitt nicht betrachtet.⁴³

⁴³ Basigo-1D ist die einzige Versuchsreihe von Experiment 2. Die Aufzählung der einzelnen Durchläufe findet sich in Tab. A.3 in Anhang A.1.

Für die Messung wird je Durchlauf ein bestimmter Bereich im Oval definiert, den alle Probanden betreten haben. Diese Bereiche werden in Abb. A.2 in Anhang A.2 gezeigt. Jede Grafik steht für einen Durchlauf, bei dem die Probanden den Parcours einzeln durchgingen. Der Parcours ist in schwarz eingezeichnet und der Messbereich in grau eingefärbt. Jede Kurve steht für die Trajektorie eines Probanden im Rohdatenformat. Für Experiment 1 sind die y -Werte auf 0 gesetzt. Zur besseren Visualisierung sind bei den Experimenten 3 und 4 die Trajektorien von nur 10 Probanden eingezeichnet. Situationen, bei denen zwei aufeinanderfolgende Personen sich zu stark beeinflussen, spiegeln nicht den freien Gang ohne Beeinflussung anderer Probanden wider.⁴⁴ Solche Situationen traten bei Experiment 3 auf und sollen nicht zur Messung der freien Gehgeschwindigkeit herangezogen werden. Entsprechende Daten mit Beeinflussung bleiben bei der folgenden Analyse unberücksichtigt. Da eine solche Art der Beeinflussung im Durchlauf 1_1_00 sehr oft eintrat, wird dieser nicht weiter untersucht.

Die freie Gehgeschwindigkeit von Proband α_i bestimmt sich über den Quotienten der Weglänge $x_i(t_{out,i}) - x_i(t_{in,i})$ und der Zeitdauer zum Überqueren der Messfläche $t_{out,i} - t_{in,i}$, wobei $t_{in,i}$ und $t_{out,i}$ die Zeiten sind, in denen sich der Proband zum ersten und letzten Mal innerhalb des Messbereichs befindet:

$$v_{0,i} = \frac{x_i(t_{out,i}) - x_i(t_{in,i})}{t_{out,i} - t_{in,i}}. \quad (4.1)$$

In Abb. 4.1 wird für Experiment 1 je Versuchsreihe die so berechnete freie Gehgeschwindigkeit jedes Probanden gezeigt.⁴⁵ Auf der Ordinatenachse ist der Zeitverlauf und auf der Abszissenachse die Geschwindigkeit dargestellt. Es lässt sich ein Unterschied zwischen beiden Versuchsreihen des Experiments feststellen. Während bei der Versuchsreihe BUW-n in Abb. 4.1 (a) die Geschwindigkeiten bei 1,0 – 1,7 m/s liegen, sind sie bei der Versuchsreihe BUW-m in (b) mit 1,4 – 2,2 m/s höher. Auch die Durchführung des Durchlaufs bei Versuchsreihe BUW-m mit knapp 200 Sekunden erfolgte mit einer Zeitdauerdifferenz von über 60 Sekunden schneller als bei Versuchsreihe BUW-n. Beide Beobachtungen lassen darauf schließen, dass die Motivation einen Einfluss auf das Gehverhalten ausübt.

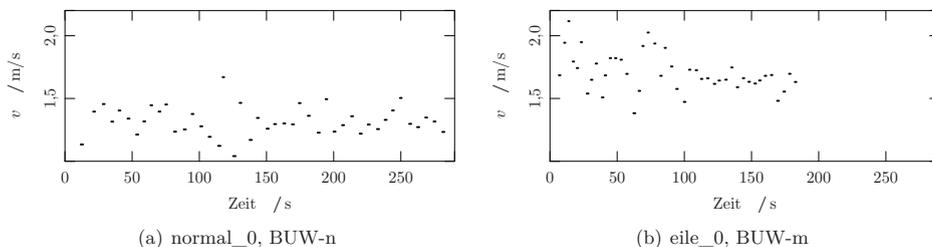


Abb. 4.1: Freie Gehgeschwindigkeit im Zeitverlauf, Experiment 1.

Die entsprechenden Grafiken für die Experimente 3 und 4 finden sich in Abb. A.3 in Anhang A.3.⁴⁶ Die hier gemessenen freien Gehgeschwindigkeiten liegen bei 1,1 – 2,0 m/s. Bei

⁴⁴ Beispielsweise werden Personen, die ihren Vordermann einholen, vom Vordermann stark beeinflusst.

⁴⁵ Experiment 1 bestand aus den zwei Versuchsreihen BUW-n und BUW-m. Die Aufzählung der einzelnen Durchläufe findet sich in Tab. A.2 in Anhang A.1.

⁴⁶ Experiment 3 bestand aus den drei Versuchsreihen GBS-5, GBS-11 und GBS-5+11. Die Aufzählung der

den Probanden der Versuchsreihe GBS-5 gibt es in Abb. A.3 (a) und (c) mit einer freien Gehgeschwindigkeit von 2,34 m/s und 0,92 m/s zwei Ausreißer. Visuell scheint die Streuung der freien Gehgeschwindigkeiten von den Versuchsreihen GBS-5 und WDG-6 mit jüngeren Probanden größer als die von den Versuchsreihen GBS-11 und WDG-11 mit älteren Probanden zu sein. Weitere Unterschiede zwischen den einzelnen Klassenstufen lassen sich nicht erkennen.

Die freie Gehgeschwindigkeit v_0 einer Messung berechnet sich über den Mittelwert der freien Gehgeschwindigkeiten aller M Probanden:⁴⁷

$$v_0 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M v_{0,i} \quad (4.2)$$

und wird in Tab. 4.1 mit entsprechender Standardabweichung aufgeführt. Sie unterscheidet sich in Experiment 1 für Probanden der Versuchsreihen BUW-n und BUW-m mit 1,32 m/s und 1,71 m/s deutlich voneinander. Bei Experiment 3 sind beide Messungen der freien Gehgeschwindigkeit von Probanden der Versuchsreihe GBS-5 fast identisch, wohingegen sie sich bei den Probanden von Versuchsreihe GBS-11 unterscheiden. Bei Experiment 4 haben beide Messungen der freien Gehgeschwindigkeit von Probanden der Versuchsreihen WDG-6 und WDG-11 jeweils fast dieselben Werte mit ähnlicher Standardabweichung.

Tab. 4.1: Freie Gehgeschwindigkeiten.

Versuchsreihe	v_0 in m/s	
	am Anfang	am Ende
BUW-n	$1,32 \pm 0,11$	–
BUW-m	$1,71 \pm 0,15$	–
GBS-5	$1,50 \pm 0,23$	$1,47 \pm 0,26$
GBS-11	$1,37 \pm 0,14$	$1,46 \pm 0,12$
WDG-6	$1,50 \pm 0,16$	$1,53 \pm 0,14$
WDG-11	$1,47 \pm 0,15$	$1,48 \pm 0,14$

Die freien Gehgeschwindigkeiten der Versuchsreihen GBS-5 und WDG-6 scheinen minimal höher als die von GBS-11 und WDG-11 zu sein, die wiederum höher als bei den Studierenden von BUW-n sind. Nur in der Versuchsreihe GBS-5 ist die Standardabweichung mit 0,23 m/s bzw. 0,26 m/s deutlich höher als in anderen Versuchsreihen, bei denen sie zwischen 0,11 m/s und 0,16 m/s liegt.

Als nächstes werden die Daten beider Erhebungen je Versuchsreihe statistisch analysiert. Bei der Versuchsreihe GBS-5 liegt zwischen den freien Gehgeschwindigkeiten beider Klassenverbände mit den Durchläufen 1_1_09 und 2_1_09 Varianzheterogenität vor.⁴⁸ Für die statistische Analyse kann der t-Test verwendet werden, bei dem mit $p = 0,206$ die Nullhypothese,

einzelnen Durchläufe findet sich in Tab. A.4 in Anhang A.1. Experiment 4 bestand aus den drei Versuchsreihen WDG-6, WDG-11 und WDG-6+11. Die Aufzählung der einzelnen Durchläufe findet sich in Tab. A.5 in Anhang A.1.

⁴⁷ Für die Experimente 1 und 4 gilt, dass M der jeweiligen Anzahl der Probanden entspricht. In Experiment 3 ist M kleiner gleich der Anzahl der Probanden, da manuell Daten von zu dicht hintereinander gehenden Probanden bei der Analyse nicht berücksichtigt werden.

⁴⁸ Der entsprechende F-Test, vgl. Zeidler [124, S. 87] und Irle [46, S. 357 ff.], hat einen p -Wert von 0,001.

die Daten entstammen derselben Verteilung, nicht abgelehnt werden kann.⁴⁹ Untersucht man die erste und zweite Messung, gilt je Versuchsreihe GBS-5, WDG-6 und WDG-11, dass die Nullhypothese H_0 : „Die Daten entstammen derselben Verteilung“ nicht abgelehnt werden kann. Nur bei Versuchsreihe GBS-11 wird diese Nullhypothese abgelehnt. Für die folgenden Analysen wird daher für Versuchsreihe GBS-11 nur die zweite Messung herangezogen.

Das soziale Umfeld aller Probanden der Experimente 3 und 4 ist vergleichbar. Auch haben die Probanden der Versuchsreihen GBS-11 und WDG-11 bzw. der Versuchsreihen GBS-5 und WDG-6 jeweils ungefähr dasselbe Alter. Um die Vermutung zu untersuchen, dass die freien Gehgeschwindigkeiten der Probanden jeweils einer Altersstufe gleich sind, wird statistisch getestet, ob zwischen den freien Gehgeschwindigkeiten der Probanden beider Schulen einer Altersklasse signifikante Unterschiede bestehen. Mit $p = 0,447$ bzw. $p = 0,372$ kann beim t-Test die Nullhypothese, dass die freien Gehgeschwindigkeiten von den Versuchsreihen GBS-11 und WDG-11 bzw. den Versuchsreihen GBS-5 und WDG-6 derselben Verteilung entstammen, nicht verworfen werden, sodass die Vermutung nicht widerlegt ist.⁵⁰

Nun wird das Alter als potenzieller Einfluss auf die freie Gehgeschwindigkeit statistisch untersucht. Hierfür werden Messdaten der freien Gehgeschwindigkeit der Experimente 3 und 4 verwendet. Es wird unterstellt, dass jeder Schüler einer Jahrgangsstufe gleich alt ist. Somit besitzen nur die Probanden der Versuchsreihen GBS-11 und WDG-11 das gleiche Alter. Mit dem t-Test wird statistisch getestet, ob signifikante Unterschiede zwischen den freien Gehgeschwindigkeiten von den Probanden der Versuchsreihen GBS-5 und GBS-11 bzw. der Versuchsreihen WDG-6 und WDG-11 bestehen.⁵¹ Mit $p = 0,733$ kann die Nullhypothese, dass die freien Gehgeschwindigkeiten von den Probanden der Versuchsreihen GBS-5 und GBS-11 derselben Verteilung entstammen, nicht verworfen werden. Auch bei der Schule von Experiment 4 mit den Versuchsreihen WDG-6 und WDG-11 kann bei dem t-Test mit $p = 0,097$ die Nullhypothese nicht abgelehnt werden.

Des Weiteren soll untersucht werden, ob unterschiedliche Motivationen der Probanden einen Einfluss auf die freie Gehgeschwindigkeit haben. Hierfür wird statistisch getestet, ob signifikante Unterschiede zwischen den freien Gehgeschwindigkeiten der Versuchsreihen BUW-n und BUW-m bestehen. Beim Zweistichproben-t-Test lautet die Nullhypothese H_0 : „Beide Stichproben entstammen derselben Verteilung.“⁵² Mit $p = 0,000$ wird die Nullhypothese verworfen. D. h., dass die Daten beider Versuchsreihen unterschiedlichen Verteilungen entstammen. In diesem Fall hat die gesteigerte Motivation, ausgelöst durch Zeitdruck, einen positiven Einfluss auf die freie Gehgeschwindigkeit. Wie erwartet ist mit erhöhtem Zeitdruck die freie Gehgeschwindigkeit höher.

Zusammenfassend wird festgehalten, dass bei den untersuchten Daten erwartungsgemäß kein signifikanter Einfluss der Schule auf die freie Gehgeschwindigkeit festgestellt werden kann.

⁴⁹ Vgl. zum t-Test Irle [46, S. 346 ff.] und Zeidler [124, S. 86].

⁵⁰ Für den t-Test wurden die Daten auf Varianzhomogenität mit dem F-Test für die Versuchsreihen GBS-11 und WDG-11 positiv mit $p = 0,157$ und für die Versuchsreihen GBS-5 und WDG-6 negativ mit $p = 0,000$ geprüft.

⁵¹ Für den t-Test wurden jeweils die Daten beider Versuchsreihen auf Varianzhomogenität mit dem F-Test positiv mit $p = 0,647$ bzw. $p = 0,681$ geprüft.

⁵² Für den t-Test wurden die Daten beider Versuchsreihen auf Varianzhomogenität mit dem F-Test positiv mit $p = 0,085$ geprüft.

Ebenso wenig wird zwischen den Altersklassen ein signifikanter Unterschied festgestellt. Zwischen den beiden Motivationen, die durch ausreichende Zeit bzw. Zeitdruck erzeugt wurden, wird hingegen wie erwartet ein signifikanter Unterschied der freien Gehgeschwindigkeit nachgewiesen.

4.3 Zusammenhang zwischen Dichte, Geschwindigkeit und Fluss

4.3.1 Allgemeiner Zusammenhang

Der Zusammenhang zwischen Dichte, Geschwindigkeit und Fluss wird in den Grafiken in Abb. 4.2 für alle Versuchsreihen der vier Experimente gezeigt. Die Größen liegen als Durchschnittswerte von mikroskopischen Messwerten vor. Je Grafik gibt es für jede Versuchsreihe und jeden Durchlauf mit unterschiedlicher Probandenanzahl einen Datenpunkt. Dabei wird die globale Dichte gemäß Gleichung (2.5), die durchschnittliche Geschwindigkeit gemäß Gleichung (2.3) und der Fluss über das Produkt beider Werte berechnet. Datenpunkte auf den Nomogrammlinien weisen entsprechende Geschwindigkeit oder Dichte auf. Es wird mittels Farbe und Symbol zwischen den Versuchsreihen unterschieden. Für die Durchläufe zur Messung der freien Gehgeschwindigkeit wird die globale Dichte auf 0 Pers./m gesetzt.

Abb. 4.2 (a) zeigt den Zusammenhang zwischen Dichte und Geschwindigkeit, vgl. Abb. 2.1 auf S. 16. Die Werte der Geschwindigkeit reichen von 0,1 m/s bis 1,7 m/s und die der Dichte von 0,0 Pers./m bis 3,1 Pers./m. Mit steigender Dichte sinkt die Geschwindigkeit. Im Bereich von circa 0,7 Pers./m bis 2,0 Pers./m ist die negative Steigung besonders groß. Zwischen den Versuchsreihen lassen sich keine Unterschiede erkennen. Nur die Geschwindigkeiten von Versuchsreihe BUW-m liegen etwas über den Geschwindigkeiten der anderen Versuchsreihen. In Abb. 4.2 (b) wird der Zusammenhang zwischen Dichte und Fluss gezeigt. Es werden Flüsse von 0,0 Pers./s bis 1,0 Pers./s gemessen, außer für Versuchsreihe BUW-m, bei der Flüsse bis zu 1,3 Pers./s gemessen wurden. Die Form des Fundamentaldiagramms erinnert an eine ansteigende Gerade und ab circa 0,9 Pers./m bzw. 1,9 Pers./m an zwei fallende Geraden. Abb. 4.2 (c) zeigt den Geschwindigkeit-Fluss-Zusammenhang. Bis Geschwindigkeiten von 1,0 m/s steigen die Flüsse an und fallen für höhere Geschwindigkeiten auf 0 Pers./s zurück. Für Geschwindigkeiten unter 0,5 m/s liegen die Datenpunkte aller Versuchsreihen dicht beieinander. Bei höheren Geschwindigkeiten weist die Versuchsreihe BUW-m erneut die höchsten Flüsse vor.

Der Verlauf der Datenpunkte ist wie erwartet. Insgesamt liegen die Geschwindigkeiten und Flüsse von der Versuchsreihe BUW-m etwas über den Werten der anderen Versuchsreihen. Es können keine weiteren eindeutigen Unterschiede erkannt werden. Um spezifischere Aussagen zu treffen, werden im Folgenden keine Fundamentaldiagramme von Durchschnittswerten, sondern von individuellen Werten betrachtet.

In diesem Kapitel werden die Grafiken exemplarisch für die Versuchsreihe GBS-5 von Experiment 3 gezeigt. Die entsprechenden Grafiken der anderen acht Versuchsreihen befinden sich jeweils im Anhang.

- BUW-n △ BUW-m + Basigo-1D × GBS-5 ◇ GBS-11 ▽ GBS-5+11
 □ WDG-6 * WDG-11 ◆ WDG-6+11

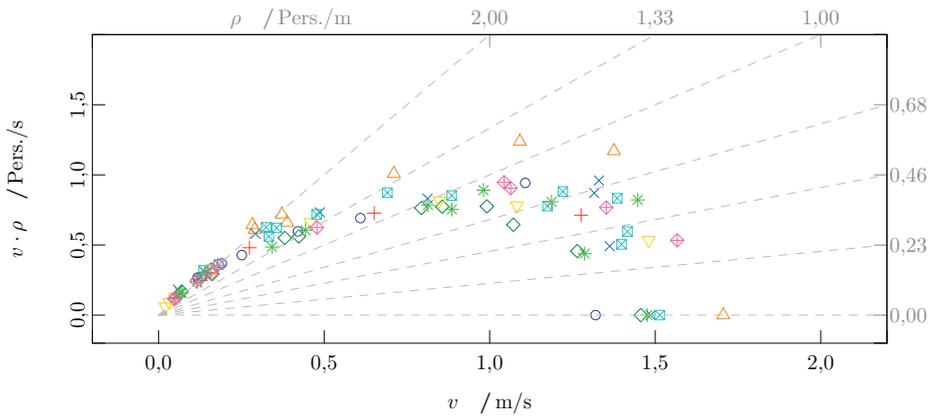
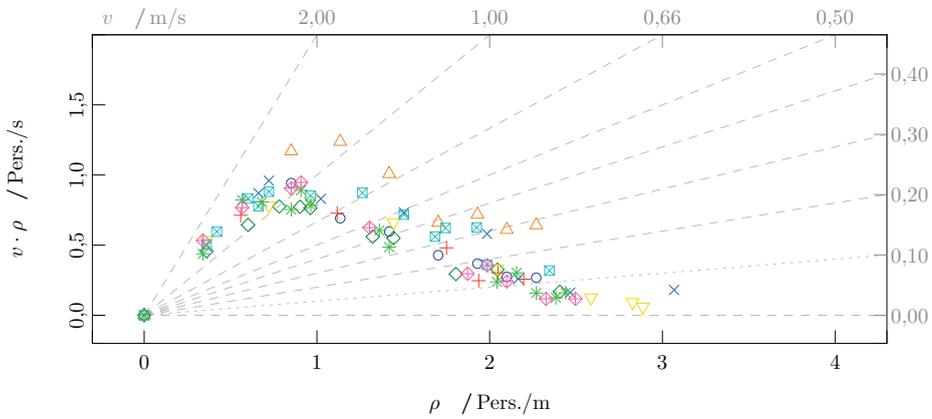
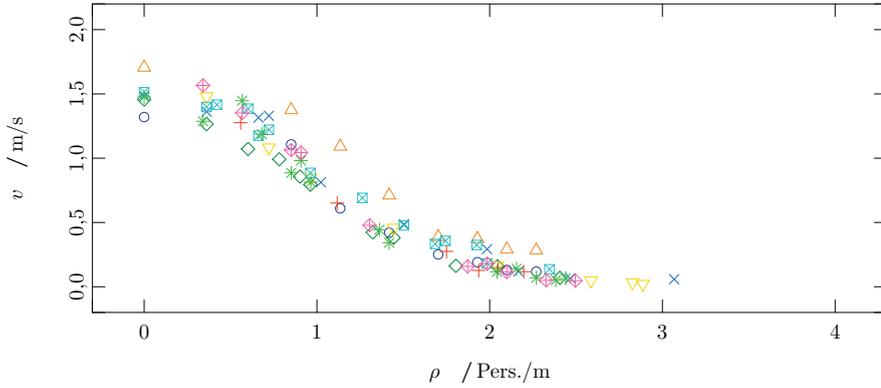


Abb. 4.2: Fundamentaldiagramme von Durchschnittswerten.

4.3.2 Dichte-Geschwindigkeit-Zusammenhang

In Abb. 4.3 wird vom Fundamentaldiagramm der Versuchsreihe GBS-5 der mikroskopische Dichte-Geschwindigkeit-Zusammenhang gezeigt. Auf der Ordinatenachse ist die Dichte und auf der Abszissenachse die Geschwindigkeit eingetragen. Bei den Durchläufen, in denen die Probanden einzeln den Parcours betreten, wurde jedem Probanden ein Wert für die freie Gehgeschwindigkeit nach Gleichung (4.1) berechnet, dessen Dichte auf 0 Pers./m gesetzt ist. Das Zeitintervall für die restlichen Datenpunkte, die gemäß den Gleichungen (2.1) und (2.4) berechnet wurden, beträgt fünf Sekunden. Jeder Durchlauf mit gleicher Probandenanzahl und damit gleicher globaler Dichte hat ein eigenes Symbol.

○ $N = 1$ △ $N = 6$ + $N = 11$ × $N = 12$ ◇ $N = 17$ ▽ $N = 25$ ◻ $N = 33$ * $N = 36$
 ● $N = 41$ ☆ $N = 51$

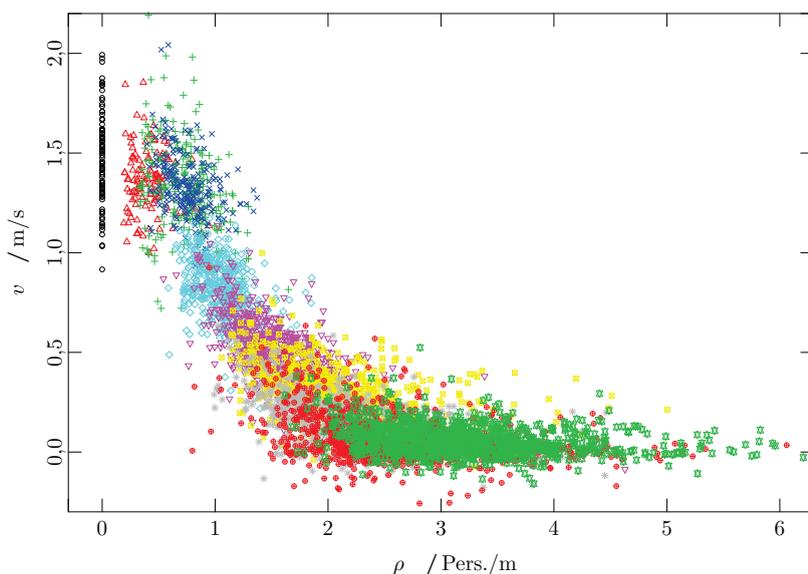


Abb. 4.3: Fundamentaldiagramm $v(\rho)$, Versuchsreihe GBS-5. Mikroskopische Messwerte von Dichte und Geschwindigkeit.

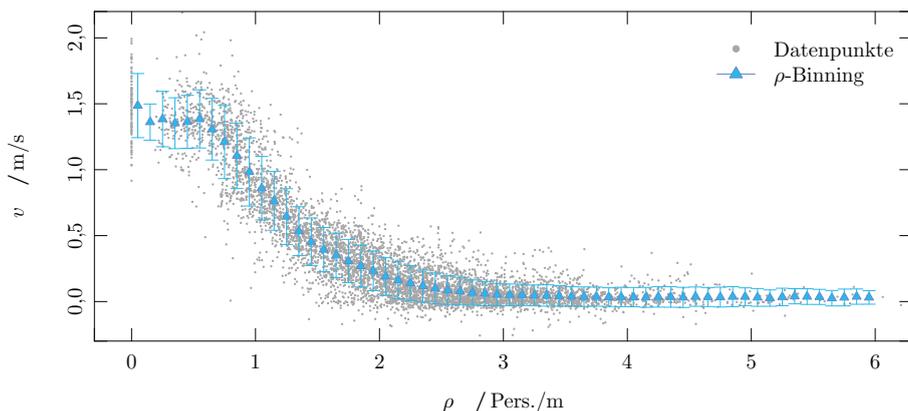
Keine der „Symbolwolken“ hat eine außergewöhnliche Lage. Dies bedeutet, dass kein Durchlauf als Ausreißer gewertet werden muss. In der weiteren Analyse wird die Gesamtheit der Durchläufe betrachtet. Es werden Dichten von 0,19 Pers./m bis 8,13 Pers./m gemessen. Höhere Dichten führen zu kleineren Geschwindigkeiten, während hohe Geschwindigkeiten bei kleinen Dichten bis circa 0,9 Pers./m zu erkennen sind. Die Geschwindigkeit der gesamten Punktwolke ist mit wachsender Dichte erst konstant, dann fallend und anschließend wieder konstant. Negative Geschwindigkeiten tauchen ab Dichten von 1,43 Pers./m auf und können entstehen, wenn eine Person steht, dabei nach vorne und/oder rückwärts schwankt oder den Kopf entgegen der Laufrichtung bewegt. Je höher die globale Dichte desto breiter ist die Streuung bei den gemessenen Dichten. Während die Messdaten bei einer globalen Dichte von 1,02 Pers./m in $[0,6; 1,9]$ Pers./m auftreten, liegen sie bei einer globalen Dichte von 3,07 Pers./m in $[1,6; 6,3]$ Pers./m.

Die entsprechenden Fundamentaldiagramme mit Markierung der globalen Dichte der anderen acht Versuchsreihen finden sich in Anhang A.2 in den Abb. A.4 bis A.11 jeweils in (a). Alle neun Fundamentaldiagramme ähneln sich. Mit steigender Dichte sinkt die Geschwindigkeit. Einzig im Fundamentaldiagramm der Versuchsreihe BUW-m existieren ausschließlich positive Geschwindigkeiten. Die Datenwolke der Versuchsreihe BUW-n erscheint viel kompakter als die Datenwolke der Versuchsreihe BUW-m, bei der höhere Geschwindigkeiten auftreten und höhere Dichten gemessen werden, vgl. Abb. A.4 (a) und A.5 (a) in Anhang A.2. Bei diesen beiden Versuchsreihen besteht eine Lücke für Geschwindigkeiten von 0,8 m/s bis 1,0 m/s. Bei Versuchsreihe Basigo-1D befindet sich zudem eine Lücke bei Geschwindigkeiten von 0,9 m/s bis 1,1 m/s. Bei den drei Versuchsreihen BUW-n, BUW-m und Basigo-1D wurden für niedrige Dichten zu wenige Durchläufe ausgeführt. Solch eine Lücke existiert auch bei Daten von Seyfried et al. [96] und Zhang und Seyfried [125]. Beim Vergleich der Versuchsreihen innerhalb jeder Schule sind jeweils die Punktwolken der ersten Versuchsreihe am weitesten gestreut. Das sind die Versuchsreihen mit den jüngsten Probanden. Die Datenpunkte scheinen hier nicht so dicht beieinander zu liegen, wie bei den restlichen Versuchsreihen. Die einzige Versuchsreihe, bei der einzelne Geschwindigkeiten über 2,0 m/s gemessen wurden, ist GBS-5.

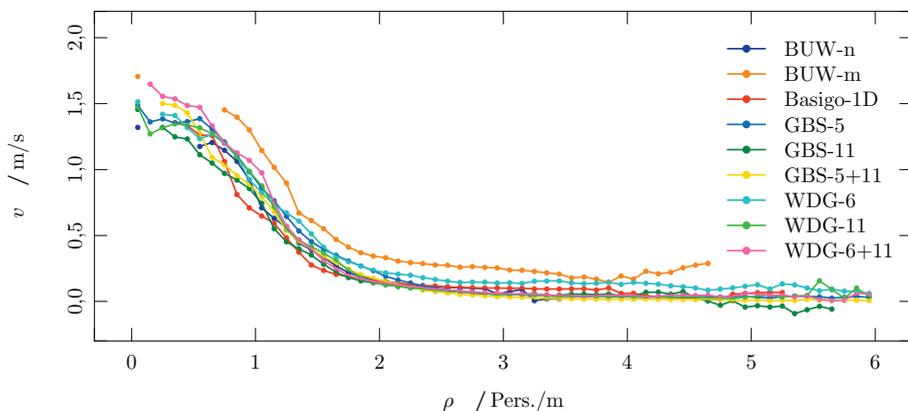
Um Form und Lage genauer analysieren zu können, werden im nächsten Schritt Durchschnittswerte der Geschwindigkeiten mit der ρ -Binning-Methode berechnet.⁵³ Hierfür werden alle Geschwindigkeitswerte in einem Dichteintervall von 0,1 Pers./m gemittelt und dem entsprechenden Intervall zugeordnet. Die Mittelwerte mit ihren Standardabweichungen sind für Versuchsreihe GBS-5 in Abb. 4.4 (a) in das Fundamentaldiagramm eingetragen. Form und Lage des Fundamentaldiagramms lassen sich sehr deutlich erkennen. Bei einer Dichte von 0,0 Pers./m bis 0,8 Pers./m ist die gemittelte Geschwindigkeit annähernd konstant. Mit steigender Dichte bis 3,0 Pers./m fallen die Mittelwerte von 1,48 m/s bis 0,04 m/s. Ab 3,0 Pers./m schwanken sie um 0,04 m/s. Bei Dichten in [0,3; 1,4] Pers./m liegen die Standardabweichungen zwischen 0,18 m/s und 0,29 m/s und nehmen mit steigender Dichte ab.

Für einen direkten Vergleich der Mittelwerte unter den Versuchsreihen werden diese in einer gemeinsamen Grafik in Abb. 4.4 (b) gezeigt. Die zugrundeliegenden Fundamentaldiagramme mit Kennzeichnung der Mittelwerte und Standardabweichungen von Geschwindigkeiten befinden sich in Abb. A.12 in Anhang A.2. Die Mittelwerte von den Geschwindigkeiten der Versuchsreihe BUW-m liegen höher als bei BUW-n und den anderen Versuchsreihen, wie es schon bei der Betrachtung von Durchschnittswerten der Fall war. Auch sind bei der Versuchsreihe BUW-m die Standardabweichungen größer. Die Lage der Mittelwerte von Versuchsreihe Basigo-1D ist mit der von Versuchsreihe BUW-n vergleichbar. Bei der Versuchsreihe Basigo-1D sind neben der großen Standardabweichung bei 0,7 Pers./m, die wegen weniger Daten in diesem Bereich besteht, die größten zwei Standardabweichungen bei Dichten von 1,2 Pers./m bis 1,4 Pers./m mit 0,18 m/s und 0,19 m/s. Bei beiden Schulen liegen nur die Mittelwerte der Versuchsreihen mit Vereinigung der vorangegangenen Probandengruppen, d. h. GBS-5+11 und WDG-6+11, für Dichten bis 0,5 Pers./m über 1,5 m/s. Sowohl bei der Versuchsreihe GBS-5 als auch bei WDG-6 sind die Standardabweichungen sehr groß. Insgesamt ähneln sich die Mittelwerte außer für Versuchsreihe BUW-m, bei der sie deutlich größer sind.

⁵³ Vgl. zur ρ -Binning-Methode S. 29 in Unterabschnitt 2.4.1.



(a) Versuchsreihe GBS-5 mit Kennzeichnung der Standardabweichung



(b) Alle Versuchsreihen

Abb. 4.4: Fundamentaldiagramme $v(\rho)$: ρ -Binning.

Für eine Untersuchung des Einflusses der Heterogenität werden als nächstes die Daten der Versuchsreihen GBS-5 und GBS-11 sowie die Daten der Probanden der 5. und 11. Klasse von Versuchsreihe GBS-5+11 separat betrachtet.⁵⁴ Die Probanden der beiden Teilgruppen sind heterogen und werden GBS-5(+11) und GBS-(5+)11 genannt. Die Probanden der Versuchsreihen GBS-5 und GBS-11 sind hingegen homogen.

In Abb. 4.5 werden vier visuelle Vergleiche des Zusammenhangs zwischen Dichte und Geschwindigkeit gegeben. Während sich die Datenpunkte von den Fünft- und Elftklässlern in Abb. 4.5 (a) jeweils im homogenen Zustand unterscheiden, sind sie in Abb. 4.5 (b) im heterogenen Zustand nahezu identisch. Bei Vereinigung beider homogenen Probandengruppen verändert sich der Dichte-Geschwindigkeit-Zusammenhang, eine Anpassung findet statt. Beim visuellen Vergleich von den Fünftklässlern im homogenen und heterogenen Zustand, siehe Abb. 4.5 (c), wird deutlich, dass die Daten bei Heterogenität weniger gestreut und kompakter beieinander liegen und, dass nicht so hohe Geschwindigkeiten erreicht werden. Bei den

⁵⁴ Heterogenität bezieht sich auf das Alter der Probanden.

Elftklässlern verhält es sich ähnlich, nur nicht so stark ausgeprägt, siehe Abb. 4.5 (d). Im homogenen Zustand werden bei Dichten bis 2 Pers./m niedrigere Geschwindigkeiten erreicht, während die Obergrenze gleich bleibt. Auf die stark gestreute Datenwolke von den Elftklässlern im homogenen Zustand hat die Vereinigung mit der anderen homogenen Gruppe einen stärkeren Effekt.

Insgesamt lässt sich sagen, dass die Streuung bei den jüngeren Probanden im heterogenen Zustand abnimmt. Während sich die Geschwindigkeiten bei Dichten bis 2 Pers./m für die älteren Probanden vom homogenen in heterogenen Zustand erhöhen, verringern sie sich für die jüngere Probandengruppe.

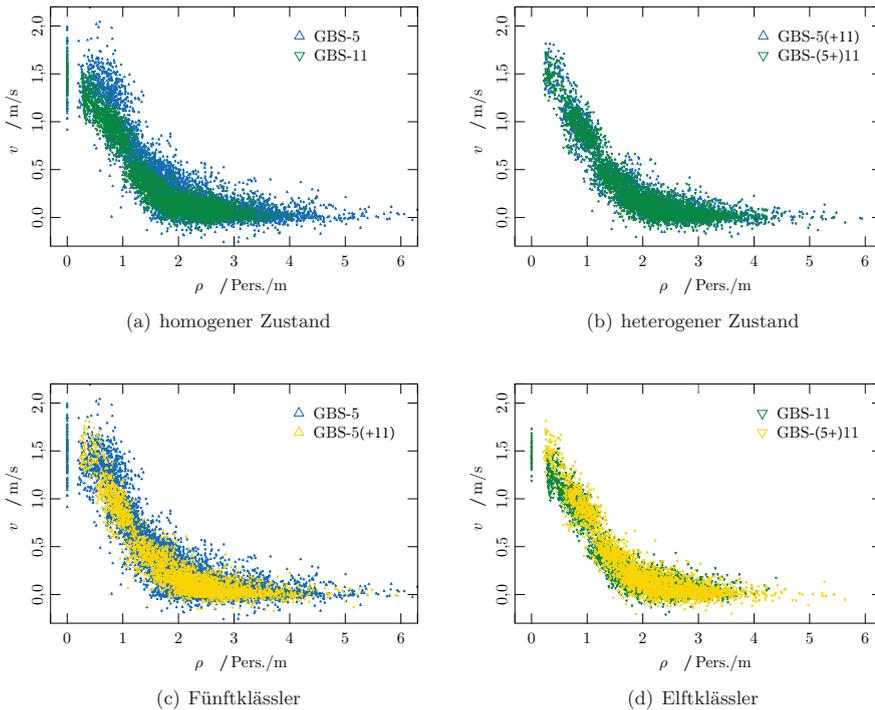


Abb. 4.5: Fundamentaldiagramme $v(\rho)$ im Vergleich, Experiment 3. Mikroskopische Messwerte von Dichte und Geschwindigkeit.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass basierend auf den mikroskopisch erhobenen Daten ein Zusammenhang zwischen Dichte und Geschwindigkeit nachgewiesen werden kann, der durch das Fundamentaldiagramm beschrieben werden kann. Dieses ähnelt sich für die neun untersuchten Versuchsreihen grundsätzlich sowohl in der Form als auch bei der Lage. Klare Unterschiede zwischen den Schulen, den Altersgruppen oder Homogenität versus Heterogenität konnten nicht gefunden werden. Deutlich hervor tritt die Versuchsreihe der Probandengruppe mit erhöhter Motivation, bei welcher höhere Geschwindigkeiten gemessen werden. Für die jüngste Probandengruppe sind die Standardabweichungen der Geschwindigkeiten am größten. Die Streuung der Datenpunkte nimmt für diese Probanden im heterogenen Zustand ab.

4.3.3 Geschwindigkeitsverteilung für hohe Dichten

Es werden die Geschwindigkeiten hoher Dichten untersucht. Analog zu Portz und Seyfried [83] wird dazu der Dichtebereich $[1,8; 3,4[$ Pers./m in verschiedene Dichteintervalle mit je einer Länge von $0,2$ Pers./m unterteilt, siehe Abb 4.6 (c). Für jedes dieser Dichteintervalle wird eine Geschwindigkeitsverteilung erstellt. In Abb. 4.6 (a) ist für die Versuchsreihe GBS-5 die relative Häufigkeit der Geschwindigkeiten im Dichtebereich $[1,8; 2,6[$ Pers./m gezeigt, da dieser Dichtebereich auch von Portz und Seyfried untersucht wurde. Zur besseren Vergleichbarkeit mit Portz und Seyfried werden dieselben Farben verwendet. In Abb. 4.6 (b) wird für die Versuchsreihe GBS-5 die relative Häufigkeit der Geschwindigkeit im Dichtebereich $[2,6; 3,4[$ Pers./m dargestellt. Zur vergleichenden Visualisierung wird in Abb. 4.6 (d) die Wahrscheinlichkeitsdichte der Geschwindigkeiten unterschiedlicher Dichtebereiche von Versuchsreihe GBS-5 gezeigt.

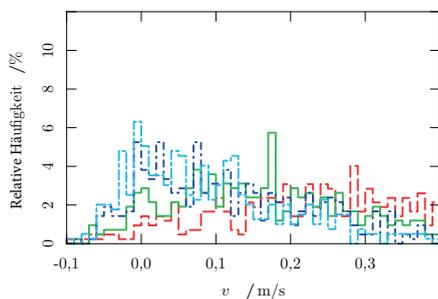
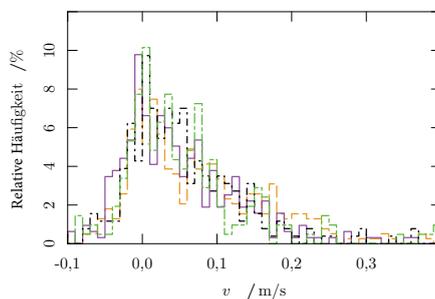
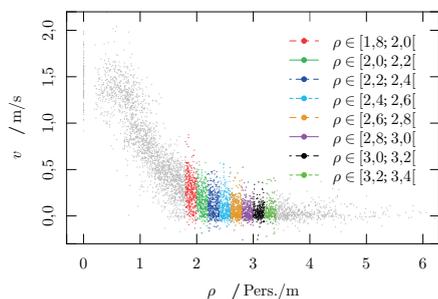
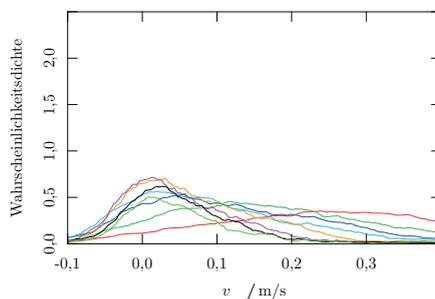
(a) $[1,8; 2,6[$ Pers./m(b) $[2,6; 3,4[$ Pers./m(c) Fundamentaldiagramm $v(\rho)$ mit Kennzeichnung untersuchter Dichteintervalle(d) Wahrscheinlichkeitsdichte der Geschwindigkeiten je Dichteintervall in $[1,8; 3,4[$ Pers./m

Abb. 4.6: Geschwindigkeitsverteilung für hohe Dichten, Versuchsreihe GBS-5.

In Abb. 4.6 (a) sind für die beiden niedrigen Dichten keine eindeutigen Peaks zu erkennen, wohingegen sie für höhere Dichten und auch in (b) bei der Geschwindigkeit um 0 m/s liegen. Eine eindeutige Doppelpack-Struktur, wie sie von Portz und Seyfried [83] gezeigt wurde, kann für Versuchsreihe GBS-5 nicht gefunden werden. Für $\rho \in [2,0; 2,2[$ Pers./m könnte ein Peak bei $0,0$ m/s und ein zweites bei $0,1$ m/s liegen. Bei der Wahrscheinlichkeitsdichte der Geschwindigkeiten gibt es jeweils nur ein Peak, welches sich mit steigender globaler Dichte zu einer geringeren Geschwindigkeit verschiebt.

Die Geschwindigkeitsverteilungen der restlichen acht Versuchsreihen werden in Abb. A.13 in Anhang A.2 gezeigt. Auch hier lassen sich keine Doppelpeak-Strukturen finden. Wenn nicht die individuelle Voronoi-Dichte, sondern der Kehrwert des Abstands zum Vordermann als individuelle Dichte verwendet wird, sehen die Kurven der relativen Häufigkeit ähnlich aus.

Die Wahrscheinlichkeitsdichten der restlichen acht Versuchsreihen werden in Abb. A.14 in Anhang A.2 gezeigt. Mit steigender Dichte sinken die Peaks zu geringeren Geschwindigkeiten. Die Spitzen bei Versuchsreihe BUW-n liegen zwischen 0,08 m/s und 0,18 m/s und bei BUW-m im Geschwindigkeitsintervall $[0,25; 0,35]$ m/s. Der Unterschied zwischen beiden Versuchsreihen ist deutlich zu erkennen. Zwischen den Experimenten 3 und 4 liegen je Versuchsreihe mit Probanden ungefähr gleichen Alters leichte Unterschiede vor. Diese können aber durch die unterschiedlichen Probandenanzahlen der Durchläufe beider Experimente entstanden sein. Bei den Versuchsreihen GBS-5 und WDG-6 liegen die Peaks im Geschwindigkeitsintervall von $[0,00; 0,26]$ m/s bzw. $[0,08; 0,21]$ m/s, während die Peaks bei den Versuchsreihen GBS-11 und WDG-11 mit älteren Probanden in einem kleineren Geschwindigkeitsintervall von $[0,04; 0,16]$ m/s bzw. $[0,03; 0,12]$ m/s dichter beieinander liegen. Für die Versuchsreihen GBS-5+11 und WDG-6+11 liegen die Peaks im Geschwindigkeitsintervall von $[0,00; 0,17]$ m/s. Insgesamt lässt sich im Gegensatz zu Portz und Seyfried für keine Versuchsreihe eine Doppelpeak-Struktur finden. Nach Eilhardt [23] hing die Doppelpeak-Struktur von Anfangsbedingungen der Experimente ab. Somit kann angenommen werden, dass die Daten, der in dieser Arbeit untersuchten Experimente, im stationären Zustand sind.

4.3.4 Dichte-Fluss-Zusammenhang

In Abb. 4.7 wird der Fluss abhängig von der mikroskopisch gemessenen Dichte für Versuchsreihe GBS-5 gezeigt. Er berechnet sich über die Multiplikation von Dichte und Geschwindigkeit gemäß Gleichung (2.6). Die Dichte ist für $N = 1$ auf 0 Pers./m gesetzt. Die Daten werden gefiltert dargestellt.⁵⁵ Jeder Durchlauf mit gleicher Probandenanzahl hat ein eigenes Symbol. Außerdem sind in der Grafik Nomogrammlinien für verschiedene Geschwindigkeiten eingetragen. Datenpunkte entlang dieser Linien besitzen dieselben Geschwindigkeiten. Die Nomogrammlinie für 0,10 m/s ist hervorgehoben und beschreibt einen Grenzwert im Stau, welcher in Unterabschnitt 2.4.2 definiert wurde. Alle Datenpunkte unterhalb dieser Linie werden Personen in der Stopp-Phase zugeordnet.

Die Datenpunkte beschreiben einen erst an-, dann absteigenden und schließlich konstanten Bereich mit einem Maximum des Flusses bei einer Dichte von ungefähr 1 Pers./m. Die entsprechenden Grafiken der anderen acht Versuchsreihen befinden sich in Anhang A.2 in den Abb. A.4 bis A.11 jeweils in (b). Ihre Formen ähneln der von Versuchsreihe GBS-5.

Um Form und Lage klarer erkennen zu können, wird im nächsten Schritt ein ρ -Binning durchgeführt. In Abb. 4.8 werden für die Versuchsreihe GBS-5 zusätzlich die Mittelwerte und die Standardabweichungen gezeigt, die sich für alle Datenpunkte bei einem ρ -Binning mit einer Länge von 0,1 Pers./m ergeben. Die drei Bereiche, die in Abb. 4.7 vermutet werden konnten, werden in Abb. 4.8 bestätigt und klar erkannt. Bis zu einer Dichte von 0,85 Pers./m steigen

⁵⁵ Bei der Filterung wird jede fünfte Sekunde ein Datenpunkt je Proband verwendet.

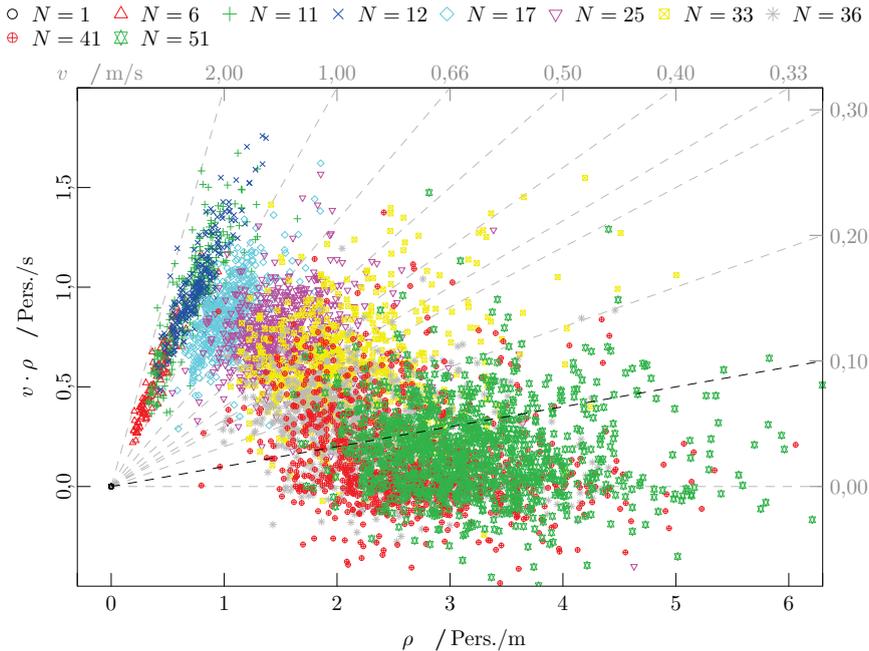


Abb. 4.7: Fundamentaldiagramm $J(\rho)$, Versuchsreihe GBS-5. Mikroskopische Messwerte von Dichte und Fluss sowie Kennzeichnung von Nomogrammlinien für Geschwindigkeiten.

die Mittelwerte kontinuierlich an und sinken anschließend. Ab einer Dichte von 3,95 Pers./m schwanken die Werte um 0,25 Pers./s. Die Varianz steigt bis zu einer Dichte von circa 1 Pers./m und bleibt dann relativ konstant. Für Dichten über 4 Pers./m liegen nur wenige Datenpunkte vor und deren Standardabweichung ist groß. Die Kapazität dieser Versuchsreihe liegt bei einer Dichte von $\rho_c = 0,85$ Pers./m und beträgt $0,95$ Pers./s \pm $0,21$ Pers./s.⁵⁶

Die Grafiken der anderen acht Versuchsreihen mit Kennzeichnung der Mittelwerte und Standardabweichungen befinden sich in Abb. A.15 in Anhang A.2. Bis zu einer Dichte von circa 1 Pers./m steigen die Mittelwerte an. Für Dichten über 1 Pers./m fallen die Mittelwerte. Die Kapazität und die entsprechende Dichte jeder Versuchsreihe werden in Tab. 4.2 aufgelistet.⁵⁷ Bei der Versuchsreihe mit erhöht motivierter Probandengruppe herrscht mit 1,24 Pers./s die höchste Kapazität, die bei den anderen Versuchsreihen ungefähr bei 0,9 Pers./s liegt.

Eine andere Bestimmung der Kapazität kann nach der Methode von Newell [73] erfolgen, der für den Zusammenhang zwischen Dichte und Fluss eine bilineare Funktion annimmt. In Abb. 4.9 wird der Dichte-Fluss-Zusammenhang von Versuchsreihe GBS-5 mit Einzeichnung der entsprechenden Newell-Funktion gezeigt, deren Parameter aus den Daten geschätzt wurden. Die Kapazität liegt mit 0,96 Pers./s nah an der Kapazität mit der Binning-Methode.⁵⁸

⁵⁶ Die Kapazität ist in dieser Arbeit als erstes lokales Maximum im Fundamentaldiagramm definiert und wurde zusammen mit der entsprechenden Dichte manuell aus den Grafiken in Abb. 4.8 entnommen.

⁵⁷ Die Kapazitäten und entsprechenden Dichten bei der ρ -Binning-Methode wurden manuell aus den Grafiken in Abb. A.15 in Anhang A.2 entnommen. Die Kapazitäten und entsprechenden Dichten bei der Newell-Methode wurden manuell über die Newell-Funktion berechnet.

⁵⁸ Auch bei der Newell-Funktion entspricht die Kapazität dem ersten lokalen Maximum.

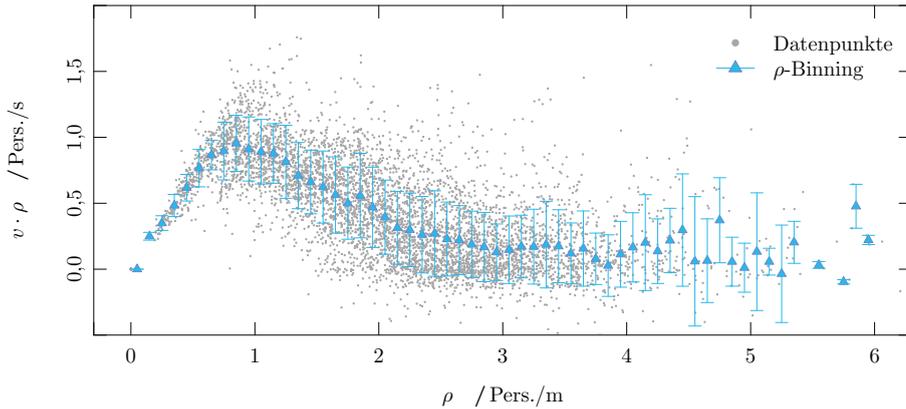


Abb. 4.8: Fundamentaldiagramm $J(\rho)$ mit ρ -Binining, Versuchsreihe GBS-5.

Die Fundamentaldiagramme der anderen Versuchsreihen mit Einzeichnung der entsprechenden Newell-Funktion befinden sich in Abb. A.16 in Anhang A.2. Die Kapazitäten und entsprechenden Dichten sind in Tab. 4.2 eingetragen. Für einige Versuchsreihen haben die Kapazitäten der unterschiedlichen Methoden nahezu denselben Wert. Die entsprechenden Dichten liegen allerdings an unterschiedlichen Stellen und weisen für die Newell-Methode niedrigere Werte auf.

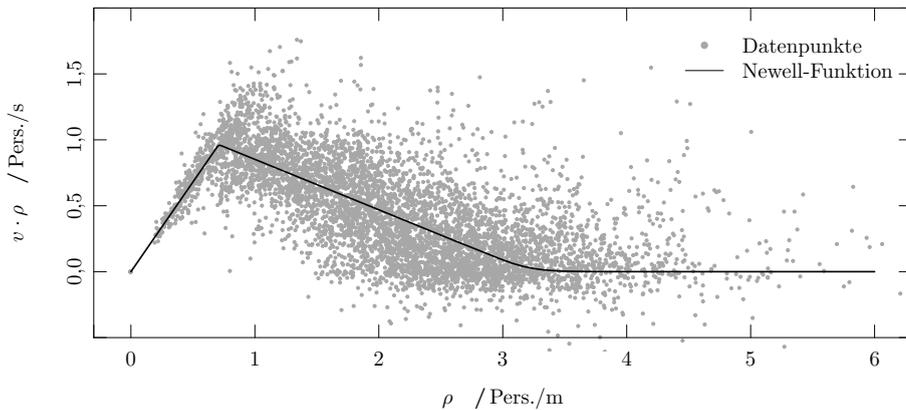


Abb. 4.9: Fundamentaldiagramm $J(\rho)$ mit Newell-Funktion, Versuchsreihe GBS-5.

In diesem Unterabschnitt wurden die Fundamentaldiagramme im mikroskopischen Dichte-Fluss-Zusammenhang unter anderem einem ρ -Binining unterzogen. Damit wurde ein gemeinsamer Verlauf nachgewiesen, der sich in drei Bereiche einteilen lässt, welche jeweils durch eine Gerade beschrieben werden können. Der Übergang vom ersten zum zweiten Bereich entspricht der Kapazität. Diese weist für alle Versuchsreihen ähnliche Werte auf. Nur bei der Versuchsreihe mit der höher motivierten Probandengruppe ist sie wie erwartet deutlich größer.

Tab. 4.2: Kapazitäten.

Versuchsreihe	ρ -Binning		Newell-Methode	
	C in Pers./s	ρ_c in Pers./m	C in Pers./s	ρ_c in Pers./m
BUW-n	$0,93 \pm 0,14$	0,85	0,81	0,68
BUW-m	$1,24 \pm 0,10$	0,95	1,05	0,76
Basigo-1D	$0,82 \pm 0,05$	0,65	0,59	0,43
GBS-5	$0,95 \pm 0,21$	0,85	0,96	0,71
GBS-11	$0,82 \pm 0,09$	0,95	0,76	0,66
GBS-5+11	$0,85 \pm 0,17$	1,05	0,86	0,73
GBS-5(+11)	$0,84 \pm 0,12$	0,95	–	–
GBS-(5+)11	$0,88 \pm 0,13$	1,05	–	–
WDG-6	$0,92 \pm 0,18$	0,85	0,89	0,69
WDG-11	$0,93 \pm 0,16$	0,95	0,94	0,80
WDG-6+11	$1,03 \pm 0,20$	1,05	0,98	0,67

4.4 Zusammenhang zwischen Abstand und Geschwindigkeit

4.4.1 Allgemeiner Zusammenhang

Der mikroskopische Abstand-Geschwindigkeit-Zusammenhang von Versuchsreihe GBS-5 wird in Abb. 4.10 gezeigt. Abstand und Geschwindigkeit wurden nach den Gleichungen (2.1) und (2.7) berechnet. Der Abstand beschreibt die Entfernung zum Vordermann, bezieht dabei aber nicht das Körpervolumen bzw. die Tiefe einer Person ein, sondern beruht auf dem Abstand beider auf den Boden projizierten Kopfmittelpunkte. Bei den Durchläufen mit $N = 1$, bei denen jeder Proband einzeln den Parcours betrat, wurde für jeden Probanden eine freie Gehgeschwindigkeit nach Gleichung (4.1) berechnet, und der Abstand auf fünf Meter gesetzt. Die übrigen Daten werden gefiltert dargestellt.⁵⁹ Jede globale Dichte wird durch ein eigenes Symbol gekennzeichnet.

Keine der „Symbolwolken“ hat eine außergewöhnliche Lage. Vielmehr lässt sich eine gemeinsame Form vermuten. Dies bedeutet, dass kein Durchlauf als Ausreißer gewertet werden muss. In der weiteren Analyse wird die Gesamtheit der Durchläufe betrachtet. Je größer die globale Dichte ist, desto kleiner ist der gemessene Abstand. Die Punktwolke scheint eine stückweise lineare Form zu haben. Die Geschwindigkeit nimmt für Abstände kleiner als 1,5 m linear zu, während sie für höhere Abstandswerte konstant scheint. Bei Abständen größer als zwei Meter liegen die Geschwindigkeiten in $[1,0; 2,2]$ m/s.

Die entsprechenden Grafiken der anderen acht Versuchsreihen mit Kennzeichnung der Probandenanzahl befinden sich in den Abb. A.17 bis A.19 in Anhang A.2. Die Datenpunkte von den Versuchsreihen BUW-n und BUW-m liegen entlang einer Geraden, wobei diese bei BUW-m steiler steigt. Bis auf den Durchlauf mit niedrigster Probandenanzahl liegen auch bei Versuchsreihe Basigo-1D die Daten auf einer stetig steigenden Gerade. Für Abstände ab 1,5 m ist die Geschwindigkeit größer als 1,07 m/s. Bei den Versuchsreihen von den Experimenten 3 und 4 ist die stückweise lineare Form auch zu erkennen.

⁵⁹ Bei der Filterung wird jede fünfte Sekunde ein Datenpunkt je Proband verwendet.

○ $N = 1$ △ $N = 6$ + $N = 11$ × $N = 12$ ◇ $N = 17$ ▽ $N = 25$ ◻ $N = 33$ * $N = 36$
 ⊕ $N = 41$ ⊗ $N = 51$

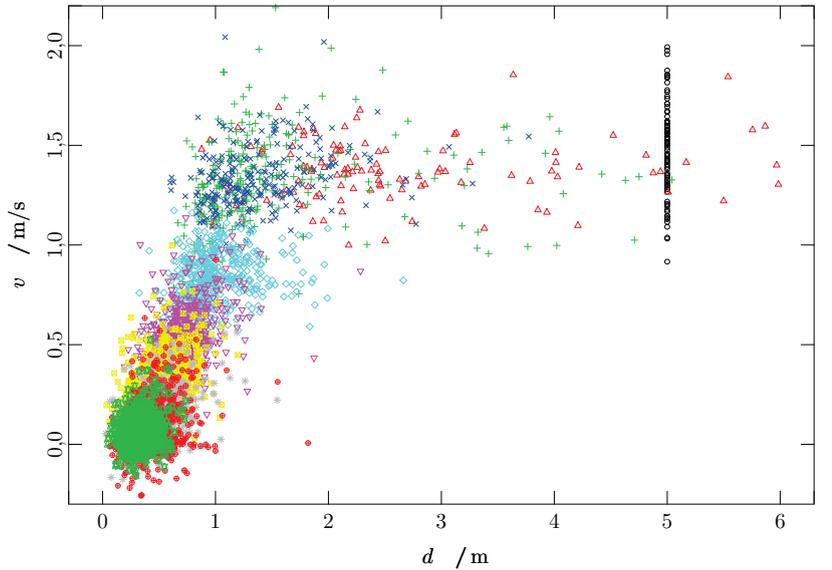


Abb. 4.10: Fundamentaldiagramm $v(d)$, Versuchsreihe GBS-5. Mikroskopische Messwerte von Abstand und Geschwindigkeit.

4.4.2 Modell Abstand-Geschwindigkeit

In diesem Unterabschnitt wird ein Modell angewandt, welches das Fundamentaldiagramm in der Abstand-Geschwindigkeit-Beziehung mit einer Funktion und drei Parametern beschreibt. Für das Zeitintervall der Datenpunkte von fünf Sekunden sind die Autokorrelationen für die Sequenzen Zeit und Abstand im Durchschnitt geringer als 0,2. Zusätzlich ist der p -Wert eines 10-Bin Chi-Quadrat-Tests für Unabhängigkeit größer als 0,1, d. h. die Unabhängigkeitsbehauptung kann nicht zurückgewiesen werden. Somit können die Beobachtungen als unabhängig betrachtet werden.

Die Geschwindigkeit nimmt für Abstände kleiner als 1,5 m linear zu, während sie für höhere Abstandswerte konstant scheint, wie oben beschrieben. Es wird angenommen, dass der Abstand-Geschwindigkeit-Zusammenhang eine stückweise lineare Form hat, welche durch zwei Geraden ohne Steigung und eine Gerade mit positiver Steigung beschrieben werden kann. Diese Form kann mit drei Parametern modelliert werden: Freie Gehgeschwindigkeit v_0 für große Abstände, minimaler Abstand ℓ , bei dem die Geschwindigkeit null ist und der mit der Personengröße korrespondiert, und die Zeitlücke T . Das folgende Modell soll die Daten fitten:

$$V_{\mathbf{p}}^{\varepsilon}(d) = \frac{\varepsilon}{T} \ln \left(1 + e^{\frac{v_0 T}{\varepsilon} - \ln \left(1 + e^{\frac{\ell + v_0 T - d}{\varepsilon}} \right)} \right). \quad (4.3)$$

Es entspricht der Kurve in Abb. 4.11 (a). Diese Funktion ist eine geglättete Version von der stückweise linearen Relation $V_{\mathbf{p}}(d) = \min \left\{ v_0, \max \left\{ 0, \frac{d - \ell}{T} \right\} \right\}$ mit $V_{\mathbf{p}}^{\varepsilon}(d) \rightarrow V_{\mathbf{p}}(d)$ für $\varepsilon \rightarrow 0$ für alle d und Parameter $\mathbf{p} = (v_0, T, \ell)$. Im Folgenden wird $\varepsilon = 0,01$ gesetzt.

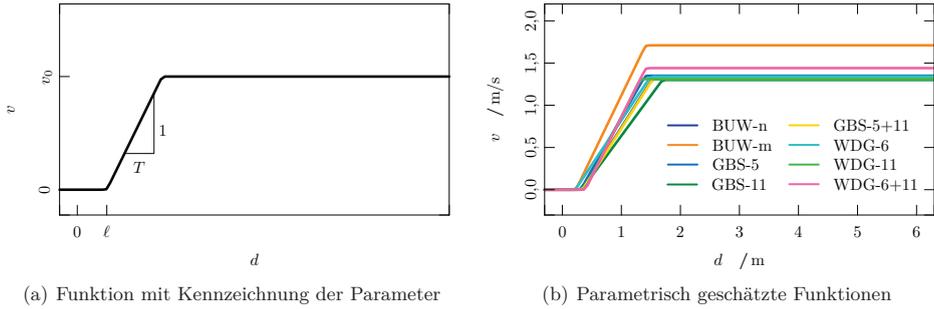


Abb. 4.11: Funktion des Abstand-Geschwindigkeit-Modells.

Die Parameter \mathbf{p} werden durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate anhand aller pseudo-unabhängigen Beobachtungen geschätzt:

$$\mathbf{p}^* = \arg \min_{\mathbf{p}} \sum_j (V_{\mathbf{p}}^{\varepsilon}(d_j) - v_j)^2. \quad (4.4)$$

Die geschätzten Parameter v_0^* , T^* und ℓ^* sind mit ihrem 99%-Konfidenzintervall in Tab. 4.3 für alle Versuchsreihen aufgeführt. Des Weiteren beinhaltet die Tabelle die berechnete Kapazität $C^* = \text{Pers.}/(T^* + \ell^*/v_0^*)$ sowie das Bestimmtheitsmaß R^2 der Schätzungen, welches für alle bis auf eine Schätzung größer gleich 0,79 ist. Somit sind die Schätzungen aussagekräftig. Nur bei der Versuchsreihe Basigo-1D wurde kein Durchlauf zur Messung der freien Gehgeschwindigkeit durchgeführt und wird daher hier nicht weiter berücksichtigt.

Tab. 4.3: Geschätzte Parameter des Abstand-Geschwindigkeit-Modells.

Versuchsreihe	v_0^* in m/s	T^* in s	ℓ^* in m	C^* in Pers./s	R^2
BUW-n	1,31 [1,26; 1,35]	0,91 [0,82; 0,99]	0,33 [0,30; 0,35]	0,87	0,92
BUW-m	1,71 [1,64; 1,78]	0,69 [0,63; 0,77]	0,23 [0,19; 0,27]	1,21	0,89
Basigo-1D	1,32 [1,25; 1,39]	1,33 [1,28; 1,39]	0,27 [0,26; 0,29]	0,65	0,66
GBS-5	1,35 [1,32; 1,38]	0,81 [0,79; 0,84]	0,31 [0,30; 0,32]	0,96	0,79
GBS-11	1,30 [1,28; 1,33]	1,05 [1,02; 1,08]	0,33 [0,32; 0,35]	0,77	0,86
GBS-5+11	1,32 [1,28; 1,35]	0,91 [0,89; 0,94]	0,34 [0,33; 0,35]	0,86	0,85
GBS-5(+11)	1,29 [1,25; 1,34]	0,88 [0,85; 0,92]	0,37 [0,35; 0,38]	0,86	0,83
GBS-(5+11)	1,38 [1,31; 1,42]	0,96 [0,91; 0,98]	0,30 [0,29; 0,32]	0,85	0,87
WDG-6	1,34 [1,31; 1,38]	0,95 [0,90; 1,01]	0,22 [0,19; 0,24]	0,90	0,79
WDG-11	1,31 [1,28; 1,33]	0,72 [0,70; 0,74]	0,38 [0,37; 0,39]	1,02	0,84
WDG-6+11	1,44 [1,41; 1,47]	0,71 [0,69; 0,73]	0,39 [0,38; 0,40]	0,99	0,87

Die parametrisch geschätzten Funktionen der acht Versuchsreihen werden in Abb. 4.11 (b) gezeigt. Die Funktion von Versuchsreihe BUW-m sticht hervor, da sie ab einem Abstand von 0,3m deutlich über den anderen Funktionen liegt. Dies kann damit plausibilisiert werden, dass die Probanden dieser Versuchsreihe einen höheren Zeitdruck hatten und deswegen tendenziell schneller gegangen sind. Sonst gibt es keine quantitativen Unterschiede zwischen den Versuchsreihen.

Die geschätzte freie Gehgeschwindigkeit entspricht bei den Versuchsreihen von Experiment 1 der gemessenen freien Gehgeschwindigkeit aus Abschnitt 4.2. Bei den Versuchsreihen von den Experimenten 3 und 4 fällt sie mit Werten zwischen 1,3 m/s und 1,5 m/s deutlich niedriger aus. Bei Experiment 2 wurde kein Versuch zur Messung der freien Gehgeschwindigkeit durchgeführt. Die Übereinstimmung bei Experiment 1 lässt sich dadurch begründen, dass keine Durchläufe mit niedrigen globalen Dichten durchgeführt wurden. Im Gegensatz dazu wurden bei den Experimenten 2, 3 und 4 Durchläufe mit globalen Dichten unter 0,8 Pers./m durchgeführt. Bei diesen Versuchsreihen liegt die Geschwindigkeit im Durchschnitt unter den gemessenen Werten aus Abschnitt 4.2. Bei ihren geschätzten freien Gehgeschwindigkeiten lassen sich keine eindeutigen oder systematischen Trends bezüglich des Alters der Probanden erkennen. Die geschätzten Werte sind bei den Versuchsreihen GBS-5 und WDG-6 sowie den beiden Versuchsreihen mit heterogener Probandengruppe GBS-5+11 und WDG-6+11 größer als bei den Versuchsreihen GBS-11 und WDG-11. Die Versuchsreihen WDG-6+11 und BUW-m haben die höchsten freien Gehgeschwindigkeiten.

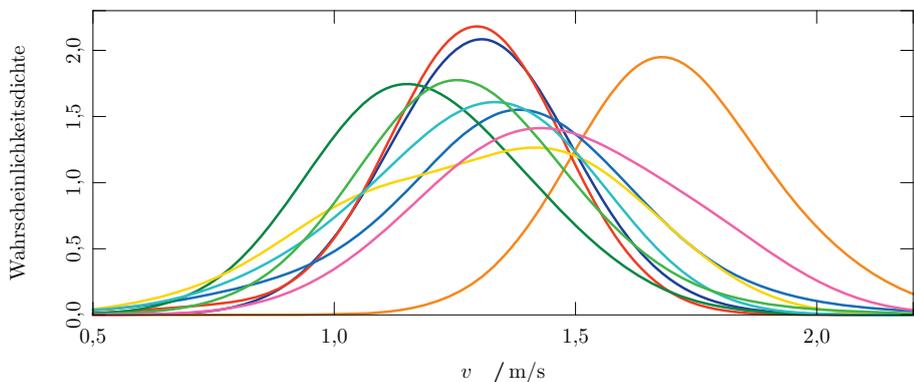
Die Zeitlücke bei GBS ist für die Versuchsreihe mit älteren Probanden größer während es bei WDG genau umgekehrt ist. Der Wert des minimalen Abstands ist circa 0,34 m, der jedoch bei Versuchsreihe WDG-6 mit 0,22 m deutlich niedriger liegt. Dies hängt von wenigen besonderen Datensätzen mit geringen Geschwindigkeiten bei großen Abständen ab. Bei der später beschriebenen nicht-parametrischen Schätzung, siehe Abb. 4.12 (c), ist dies nicht zu beobachten. Deswegen handelt es sich um keine signifikante Besonderheit. Bei Versuchsreihe BUW-n ist die geschätzte Zeitlücke und der geschätzte minimale Abstand größer als bei BUW-m. Außerdem liegen alle drei Konfidenzintervalle für beide Versuchsreihen von Experiment 1 nebeneinander und überschneiden sich nicht.

Die Kapazität berechnet sich aus den drei Parametern v_0^* , T^* und ℓ^* und ist für Versuchsreihe BUW-m am größten. Für die Versuchsreihe GBS-11 mit dem größten Wert der Zeitlücke ist die Kapazität am kleinsten. Die Werte entsprechen den Kapazitäten in Unterabschnitt 4.3.4.

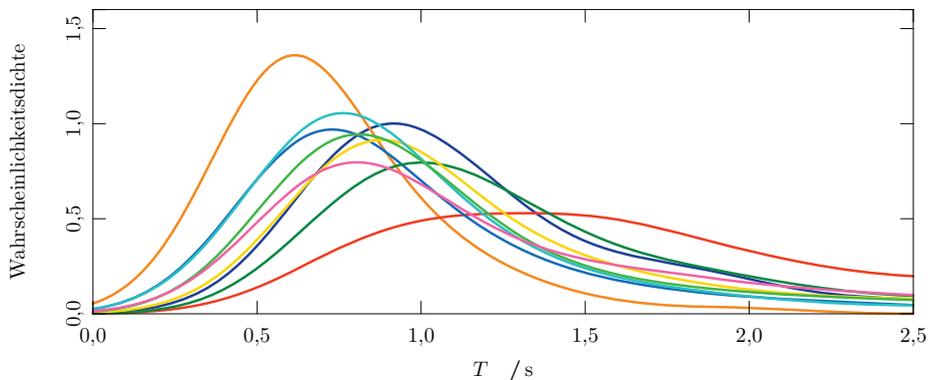
Für die Teilgruppen GBS-5(+11) und GBS-(5+)11 der Versuchsreihe GBS-5+11 wurden die Parameter v_0^* , T^* und ℓ^* separat geschätzt. Während die freie Gehgeschwindigkeit und die Zeitlücke von den Fünftklässlern im homogenen zum heterogenen Zustand sinken (GBS-5 zu GBS-5(+11)), steigen sie für die Elftklässler vom homogenen zum heterogenen Zustand (GBS-11 zu GBS-(5+)11). Beim minimalen Abstand verhält es sich umgekehrt. Hier halten die Fünftklässler im homogenen Zustand einen geringeren Abstand zum Vordermann ein als im heterogenen Zustand. Die geschätzten Parameter für GBS-5+11 sind eine Mischung aus den beiden getrennten heterogenen Gruppen GBS-5(+11) und GBS-(5+)11. Die Kapazität ist für beide Teilgruppen mit 0,85 Pers./s und 0,86 Pers./s nicht signifikant verschieden.

Neben den parametrischen Schätzungen werden zur Validierung nicht-parametrische Schätzungen durchgeführt, siehe Abb. 4.12. Die freie Gehgeschwindigkeit wird mit den Geschwindigkeiten für Abstände größer als 1,5 m geschätzt. Die Zeitlücke entspricht der Zeitspanne zum Vordermann und wird für Abstände zwischen 0,5 m und 1,5 m über die Division von Abstand und Geschwindigkeit berechnet. Der Abstand für Geschwindigkeiten kleiner als 0,05 m/s beschreibt den minimalen Abstand. Kerndichten mit entsprechenden Bandbreiten 0,15 m/s, 0,2 s und 0,05 m werden benutzt um die Verteilungen der Parameter zu beschreiben.

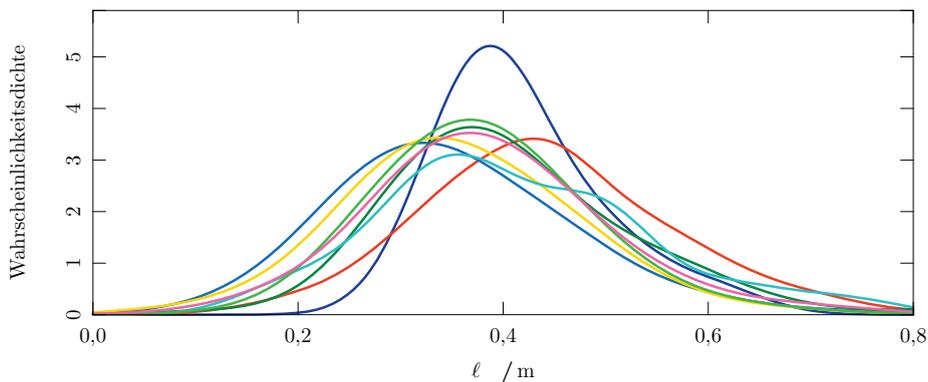
— BUW-n — BUW-m — Basigo-1D — GBS-5 — GBS-11
 — GBS-5+11 — WDG-6 — WDG-11 — WDG-6+11



(a) Freie Gehgeschwindigkeit bei Abständen größer als 1,5 m



(b) Zeitlücke bei Abständen in $[0,5; 1,5]$ m



(c) Minimaler Abstand bei Geschwindigkeiten kleiner als 0,05 m/s

Abb. 4.12: Nicht parametrisch geschätzte Parameter des Abstand-Geschwindigkeit-Modells.

Bei der freien Gehgeschwindigkeit in Abb. 4.12 (a) lassen sich Unterschiede zwischen den Versuchsreihen erkennen. Wie bereits bei der Bestimmung der freien Gehgeschwindigkeit, hat die Versuchsreihe BUW-m eine deutlich höhere freie Gehgeschwindigkeit. Die Spitzen von den Versuchsreihen BUW-n und Basigo-1D liegen ungefähr bei derselben Geschwindigkeit. Auch bei allen Versuchsreihen der Experimente 3 und 4 bis auf Versuchsreihe GBS-11 liegen die Spitzen bei ähnlichen Geschwindigkeiten. Die Spitzenwerte der nicht-parametrischen Schätzung entsprechen den parametrisch geschätzten Geschwindigkeiten. Die Wahrscheinlichkeitsdichten der Zeitlücke werden in Abb. 4.12 (b) gezeigt. Auch hier entsprechen die Tendenzen der nicht-parametrischen Schätzung den parametrisch geschätzten Zeitlücken. Der minimale Abstand zum Vordermann wird in Abb. 4.12 (c) gezeigt. Er liegt für alle Versuchsreihen an ähnlicher Stelle. Bei Versuchsreihe Basigo-1D liegt die Spitze über 0,4m. Für Versuchsreihe BUW-m konnte keine Dichtefunktion bestimmt werden, da es zu wenige Daten für diese Schätzung gibt. Insgesamt entsprechen die parametrisch geschätzten Werte des minimalen Abstands nicht den Tendenzen der nicht-parametrischen Schätzung.

Mit dem vorgestellten Abstand-Geschwindigkeit-Modell konnte basierend auf den untersuchten Versuchsreihen nicht gezeigt werden, dass bei Vereinigung zweier Probandengruppen auch die Parameter entsprechend der Zusammensetzung skaliert werden können. Der Einfluss der Motivation der Probanden lässt sich hingegen mit dem Modell abbilden. Während sich bei Erhöhung der Motivation die Parameterwerte Zeitlücke und Abstand zum Vordermann verringern, vergrößert sich der Wert der freien Gehgeschwindigkeit.

4.4.3 Geschwindigkeitsverteilung für den freien Fluss

Als nächstes werden im Abstand-Geschwindigkeit-Zusammenhang analog zu Jelić et al. [48] die Mittelwerte der Abstände und der Geschwindigkeiten untersucht. Dazu werden die Daten in äquidistante Intervalle eingeteilt. Jedem Intervall wird der Durchschnitt seiner Werte zugeordnet. Das v -Binning der Geschwindigkeit hat eine Intervalllänge von 0,05 m/s. Die Mittelwerte der Abstände werden ohne Einbeziehung der Daten für $N = 1$ berechnet. Die Intervalllänge beim d -Binning der Abstände beträgt 0,1 m. Für jedes Intervall werden die Mittelwerte der entsprechenden Geschwindigkeiten berechnet. Die Binnings beziehen sich auf alle Datenpunkte der Versuchsreihe.

In Abb. 4.13 wird das Fundamentaldiagramm im mikroskopischen Abstand-Geschwindigkeit-Zusammenhang von Versuchsreihe GBS-5 gezeigt. Weiterhin sind die Mittelwerte und Standardfehler der Abstände und Geschwindigkeiten in dunkelblau (v -Binning) bzw. hellblau (d -Binning) eingetragen. Die in grau eingezeichneten Datenpunkte wurden gefiltert und nur alle fünf Sekunden erhoben. Mit steigendem Abstand bis 1,8 m steigen beim d -Binning die Mittelwerte der Geschwindigkeiten bis 1,35 m/s. Danach schwanken sie um eine Geschwindigkeit von 1,37 m/s. Der Standardfehler wird für Mittelwerte über fünf Meter geringfügig größer. Beim v -Binning steigen die Mittelwerte bis zu Geschwindigkeiten von 1,5 m/s an und schwanken dann um einen Abstand von 1,9 m. Mit steigender Geschwindigkeit erhöht sich ab 1,5 m/s der Standardfehler. Bei Abständen von 0,4 m bis 1,0 m und bei Geschwindigkeiten von 0,1 m/s bis 0,9 m/s sind bei beiden Binning-Methoden die Werte nahezu identisch, wie auch bei den Daten von Jelić et al. [48].

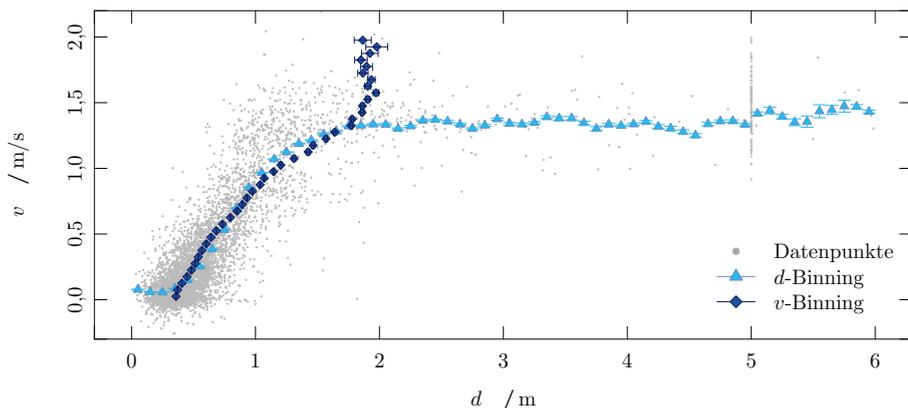


Abb. 4.13: Fundamentaldiagramm $v(d)$ mit d - und v -Bin视角, Versuchsreihe GBS-5.

Die entsprechenden Fundamentaldiagramme mit Markierung von Mittelwerten und Standardfehlern beim v - und d -Bin视角 der anderen Versuchsreihen werden in Abb. A.20 in Anhang A.2 gezeigt. Die Datenpunkte beider Bin视角-Methoden liegen auch hier wieder an ähnlichen Stellen für Abstände unter zwei Metern. Anders als in Unterabschnitt 4.4.2, bei dem ein Modell vorgestellt wurde, welches den Zusammenhang zwischen Abstand und Geschwindigkeit ab Abständen von 0,4 m mit zwei Geraden beschreibt, erinnern die Mittelwerte der Geschwindigkeiten ab einem Mindestabstand von circa 0,4 m an drei Geraden.

In Abb. 4.14 sind für Versuchsreihe GBS-5 neben den Mittelwerten der Geschwindigkeiten mit Standardfehler drei Regressionsgeraden eingezeichnet, welche für Mittelwerte ab einem Abstand von 0,4 m, unter der Annahme, dass die dritte Gerade keine Steigung besitzt und mit der Bedingung, dass die Geraden sich berühren, ermittelt wurden. Außerdem unterteilen zwei vertikale Linien die Daten in drei Bereiche. Jelić et al. [48] nennen die drei Bereiche gestauter Bereich, schwach eingezwängter Bereich und freier Fluss. Der schwach eingezwängte Bereich liegt für die Versuchsreihe GBS-5 bei Abständen zwischen 1,14 m. und 1,8 m.

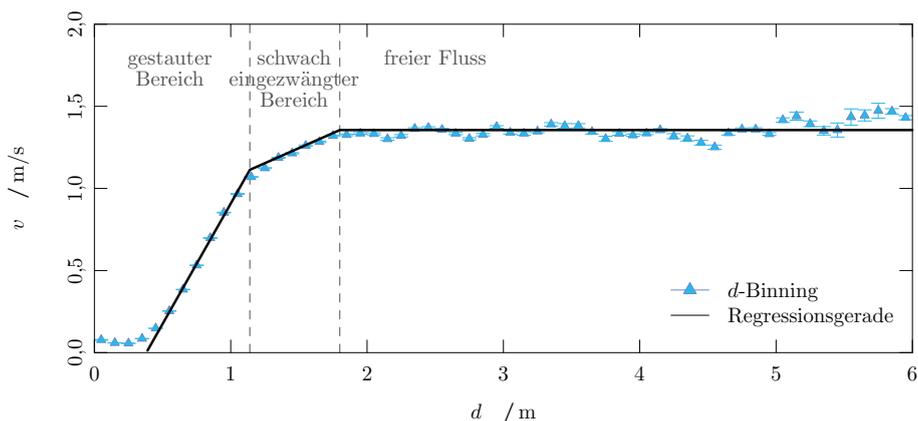


Abb. 4.14: Fundamentaldiagramm $v(d)$: d -Bin视角 und Regressionsgeraden, Versuchsreihe GBS-5.

Die entsprechenden Grafiken der anderen Versuchsreihen befinden sich in Abb. A.21 in Anhang A.2. Für die Versuchsreihen wird die erste Grenze bei einem Abstand von 1,14 m festgelegt. Die zweite Grenze befindet sich an unterschiedlichen Stellen um die zwei Meter. Bei den Versuchsreihen BUW-m und Basigo-1D lassen sich die ersten beiden Bereiche nicht trennen.

Als nächstes wird die Geschwindigkeitsverteilung für den Bereich des freien Flusses bestimmt. Hierfür werden je Versuchsreihe alle Geschwindigkeitswerte des freien Flusses verwendet. In Abb. 4.15 wird das Histogramm exemplarisch von Versuchsreihe GBS-5 für Abstände größer als 1,8 m gezeigt. Die durchschnittliche Geschwindigkeit und Standardabweichung von Versuchsreihe GBS-5 beträgt $1,34 \text{ m/s} \pm 0,23 \text{ m/s}$.

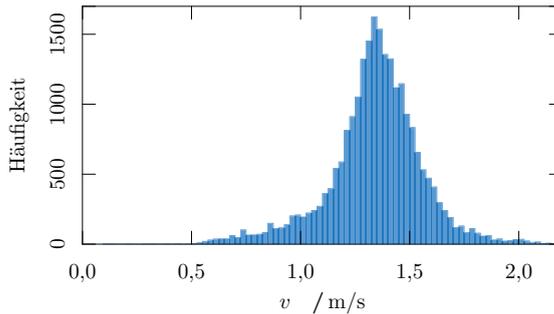


Abb. 4.15: Geschwindigkeitsverteilung im freien Fluss, Versuchsreihe GBS-5.

In Anhang A.2 befinden sich in Abb. A.22 die Histogramme der anderen Versuchsreihen. Die Geschwindigkeiten scheinen normalverteilt zu sein. Ein Vergleich mit der gemessenen freien Gehgeschwindigkeit in Abschnitt 4.2 zeigt dort einen höheren Wert, während die geschätzte freie Gehgeschwindigkeit in Unterabschnitt 4.4.2 mit $1,35 \text{ m/s}$ fast gleich groß ist. Bei den Versuchsreihen BUW-n, BUW-m und Basigo-1D gibt es relativ wenig empirische Daten im Vergleich zu den anderen Versuchsreihen. In Tab. A.10 in Anhang A.2 wird je Versuchsreihe ein Überblick der unterschiedlich ermittelten freien Gehgeschwindigkeit gegeben.

Zum Vergleich der Verteilungen untereinander werden in Abb. 4.16 die Wahrscheinlichkeitsdichten der Geschwindigkeiten im freien Fluss je Versuchsreihe aufgetragen. Die Kurven von den Versuchsreihen GBS-5 und WDG-6, von GBS-11 und WDG-11 und von GBS-5+11 und WDG-6+11 haben jeweils einen ähnlichen Verlauf. Somit scheint der Ort, also die äußeren Gegebenheiten keinen Einfluss auszuüben. Die Werte von Versuchsreihe BUW-m liegen bei hohen Geschwindigkeiten. Wie schon in Abschnitt 4.2 übt die Motivation, gesteigert durch den Zeitdruck, einen Einfluss auf die freie Gehgeschwindigkeit aus.

Als nächstes wird der Unterschied zwischen Personengruppen im homogenen und heterogenen Zustand untersucht. Für eine Untersuchung des Einflusses der Heterogenität werden im folgenden Schritt die Daten der Probanden der 5. und 11. Klasse von Versuchsreihe GBS-5+11 separat betrachtet. Heterogenität bezieht sich auf das Alter der Probanden. In Abb. A.23 in Anhang A.2 wird je Klassenstufe (Teilgruppe GBS-5(+11) und GBS-(5+11)) das v -Binning im Abstand-Geschwindigkeit-Zusammenhang mit Einzeichnung der drei Bereiche und Regressionsgeraden gezeigt. Die Grafiken ähneln sich.

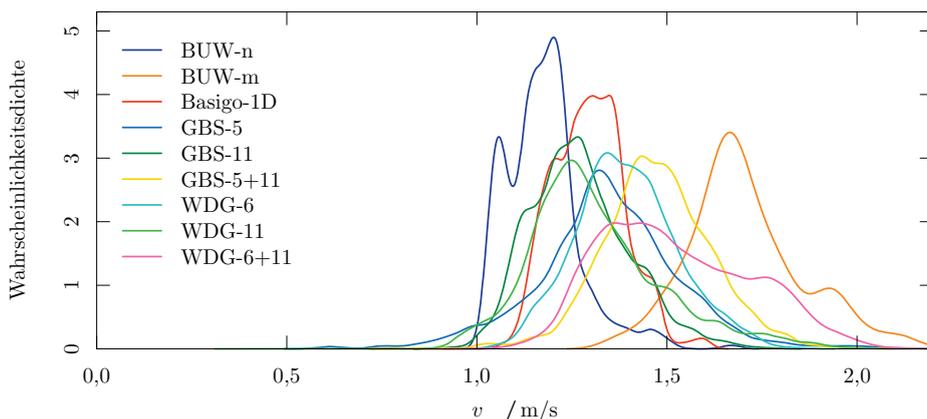


Abb. 4.16: Wahrscheinlichkeitsdichte der Geschwindigkeiten im freien Fluss.

In Abb. 4.17 sind die Wahrscheinlichkeitsdichten der homogenen Probandengruppen aus Versuchsreihe GBS-5 und GBS-11 und heterogenen Probandengruppen GBS-5(+11) und GBS-(5+)11 von Versuchsreihe GBS-5+11 aufgeführt. Im heterogenen Zustand haben die Funktionen einen ähnlichen Verlauf. Die Geschwindigkeit im freien Fluss ist im heterogenen Zustand höher als im homogenen Zustand.

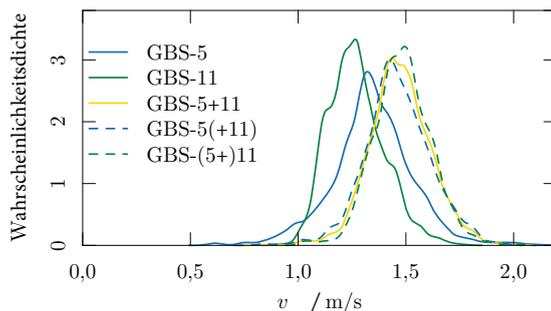


Abb. 4.17: Wahrscheinlichkeitsdichte der Geschwindigkeiten im freien Fluss, Experiment 3.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass beim mikroskopischen Zusammenhang zwischen Abstand und Geschwindigkeit das Fundamentaldiagramm wie bei Jelić et al. [48] in drei Bereiche eingeteilt werden kann. Diese werden hier gestauter Bereich, schwach eingezwängter Bereich und freier Fluss genannt. Die Abschnitte des Fundamentaldiagramms können je Bereich durch eine Gerade beschrieben werden. Während der gestaute Bereich bei den untersuchten Versuchsreihen gleich groß ist, variiert die Größe des schwach eingezwängten Bereichs. Die Lage der Geraden unterscheidet sich für die untersuchten Versuchsreihen kaum. D. h. ein Einfluss der Schule, des Alters bei Schülern und der Heterogenität in Bezug auf das Alter konnte nicht nachgewiesen werden. Der Einfluss der erhöhten Motivation hingegen führt nachweislich zu einer höheren Geschwindigkeit im freien Fluss.

5 Analyse des Stop-and-go

5.1 Vorbemerkung

In diesem Kapitel wird ein Teilbereich des Staus von Fußgängern eindimensionaler Bewegung, der Stop-and-go, untersucht.⁶⁰ Hierfür werden die Daten der in Kapitel 3 vorgestellten vier Experimente verwendet. Für die Stau-Visualisierung werden Weg-Zeit-Diagramme erzeugt. Für die Analyse werden drei charakteristische Größen verwendet, welche den Stop-and-go durch Ausbreitungsgeschwindigkeit des Staus, Anzahl der Personen in der Stopp-Phase und deren Verweildauer in der Stopp-Phase beschreiben.

In Abschnitt 5.2 wird das Weg-Zeit-Diagramm betrachtet, welches den zurückgelegten Weg einer Person zum jeweiligen Zeitpunkt wiedergibt. Durch Einfärbung der Kurven über die momentane Geschwindigkeit in Unterabschnitt 5.2.1 lassen sich Farbverläufe, abhängig von der globalen Dichte, erkennen. In Unterabschnitt 5.2.2 werden Weg-Zeit-Kurven von Personen in der Stopp-Phase farblich gekennzeichnet.

Der Abschnitt 5.3 befasst sich mit drei charakteristischen Größen der Stop-and-go-Wellen, von denen eine aus dem motorisierten Straßenverkehr bereits bekannt ist und zwei neu definiert werden. So wird in Unterabschnitt 5.3.1 die Ausbreitungsgeschwindigkeit, mit der sich der Stau entgegen der Bewegungsrichtung ausbreitet, für unterschiedliche Versuchsreihen und globale Dichten gemessen. Die Anzahl der Personen in der Stopp-Phase wird in Unterabschnitt 5.3.2 untersucht. Für die Analyse wird der relative Anteil an Personen in der Stopp-Phase für jeden Durchlauf verwendet. Zur weiteren Charakterisierung wird in Unterabschnitt 5.3.3 die Verweildauer einer Person in der Stopp-Phase untersucht.

5.2 Weg-Zeit-Diagramm

5.2.1 Geschwindigkeitseinfärbung

Das Weg-Zeit-Diagramm bietet die Möglichkeit, Stauwellen zu identifizieren. In diesem Diagramm steht jede Kurve für die Bewegung eines Probanden. Auf der Abszissenachse ist der Weg und auf der Ordinatenachse die Zeit aufgetragen.⁶¹ Damit werden Abstände zwischen Personen visualisiert und Geschwindigkeiten können berechnet werden. Der Kehrwert der Steigung einer Kurve entspricht der momentanen Geschwindigkeit, mit der sich der Proband bewegt. Somit deutet eine Vertikale auf eine stehende Person hin.

⁶⁰ Die in dieser Arbeit verwendeten Definitionen des Staus und Stop-and-gos von Fußgängern wurden in Unterabschnitt 2.4.2 gegeben.

⁶¹ In der Literatur werden die Achsen auch umgekehrt dargestellt.

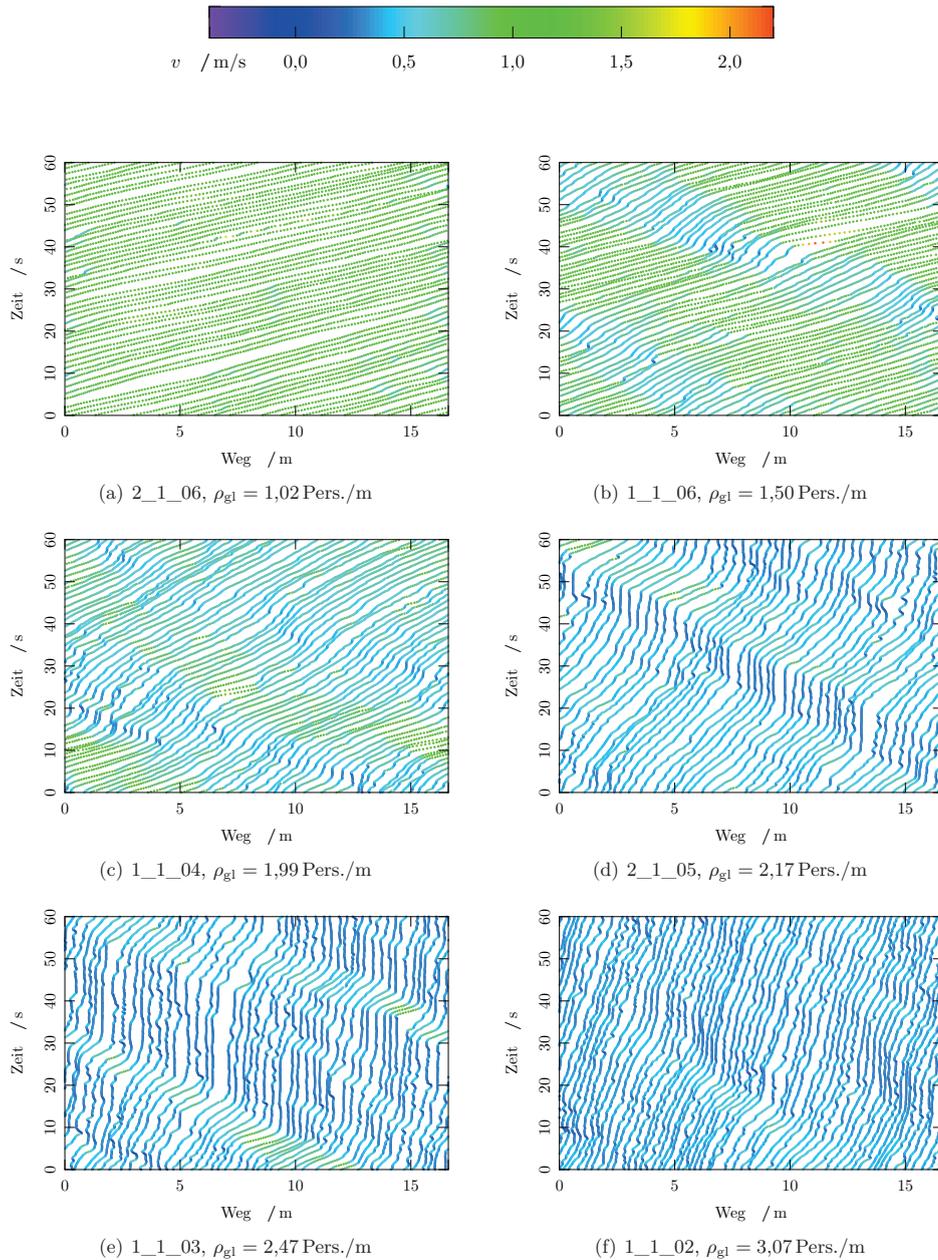


Abb. 5.1: Auswahl von Weg-Zeit-Diagrammen, Versuchsreihe GBS-5. Für die Durchläufe mit $N = 17, 25, 33, 36, 41$ und 51 .

In Abb. 5.1 werden sechs Weg-Zeit-Diagramme von Durchläufen mit $\rho_{gl} \in [1,02; 3,07]$ Pers./m der Versuchsreihe GBS-5 gezeigt. Die Kurven sind entsprechend der individuellen Geschwindigkeit eingefärbt, wobei blau für Stehen, grün für Gehen und gelb für schnelles Gehen steht. Je flacher die Kurve ist, desto schneller geht die Person. Mit steigender globaler Dichte ändert sich wie erwartet die vorherrschende Farbe von hellgrün über türkis zu blau, was einer

Geschwindigkeitsreduktion entspricht und die Weg-Zeit-Kurven werden unruhiger. Während bei einer niedrigen globalen Dichte von 1,02 Pers./m eine homogene Geschwindigkeit vorgefunden werden kann, d. h. alle Personen gehen mit der gleichen Geschwindigkeit, variieren die Geschwindigkeiten bei höheren globalen Dichten, d. h. es treten zur selben Zeit unterschiedliche Geschwindigkeiten auf. Weiterhin gibt es ab der globalen Dichte von 1,50 Pers./m Zitterbewegungen in den Weg-Zeit-Kurven, die durch Kopfbewegungen bei langsamen Gehen entstehen. In (b), bei der Dichte von 1,50 Pers./m, lassen sich türkisfarbene und blaue Bereiche erkennen. Im Zeitverlauf bewegen sie sich entgegen der Laufrichtung und können für eine Stauwelle stehen oder zumindest für einen Bereich mit verminderter Geschwindigkeit. In (d) kann eine Stauwelle identifiziert werden. In (e) und (f), bei Dichten über 2,40 Pers./m, sind fast alle Datenpunkte blau eingefärbt. Insgesamt lässt sich ein Zusammenhang zwischen Personendichte und Geschwindigkeit feststellen.

Die Weg-Zeit-Diagramme von allen Durchläufen der vier Experimente befinden sich in den Abb. A.24 bis A.32 in Anhang A.3. Für Experiment 1 wird nur der untersuchte zwei Meter lange Messbereich gezeigt, bei den anderen drei Experimenten die gesamte Korridorlänge von 26,62 m bzw. 16,62 m. Allgemein lässt sich sagen, dass bei niedrigen globalen Dichten annähernd konstante Geschwindigkeiten auftreten, sichtbar durch fast gerade parallel verlaufende Weg-Zeit-Kurven.⁶² Mit steigender Probandenanzahl und dadurch steigender globaler Dichte sinken insgesamt die Geschwindigkeiten und Geschwindigkeitsunterschiede während eines Durchlaufs können beobachtet werden.⁶³ Abschnitte mit stehenden Personen entstehen und häufen sich und die gesamten Diagramme besitzen mehr Fluktuationen. Bei globalen Dichten ab 2,50 Pers./m entsprechen die Weg-Zeit-Kurven fast Vertikalen, was ein Stehen widerspiegelt. Gerade bei langsam gehenden Personen treten durch Kopfbewegungen Zitterbewegungen in den Weg-Zeit-Kurven auf.

Zwischen den einzelnen Durchläufen unterschiedlicher Versuchsreihen lassen sich bis auf die Durchläufe von den Versuchsreihen BUW-n und BUW-m keine systematischen Unterschiede erkennen. Demnach kann visuell kein Einfluss der Schule, des Alters oder der Heterogenität von Probandengruppen auf das Weg-Zeit-Diagramm erkannt werden.

5.2.2 Analyse der Stopp-Phase

In Abb. 5.2 werden die sechs Weg-Zeit-Diagramme von Abb. 5.1 mit diskreter Geschwindigkeitseinfärbung dargestellt. Dafür sind Weg-Zeit-Punkte von Personen in der Stopp-Phase, d. h. wenn die Person mit einer Geschwindigkeit kleiner gleich der Grenzgeschwindigkeit v_{Grenze} geht, blau markiert.⁶⁴ Dies erleichtert die Identifizierung von Stop-and-go-Wellen.

⁶² Bei der Betrachtung von Weg-Zeit-Kurven mit niedrigen globalen Dichten lassen sich bei den Experimenten 3 und 4 Geschwindigkeitsunterschiede für einzelne Wegbereiche feststellen. Um die Stellen bei 1 m und 10 m sind die Geschwindigkeiten geringer als beim restlichen Weg. Diese Stellen entsprechen den ursprünglich geraden Bereichen des Ovals. Bei hohen globalen Dichten lassen sich diese Geschwindigkeitsunterschiede nicht mehr identifizieren. Wie bereits in Unterabschnitt 3.4.1 untersucht, können die Daten beider Bereiche, ursprünglich gekrümmt und gerade, zusammengefasst werden.

⁶³ Bei mittleren globalen Dichten ab 1,50 Pers./m lassen sich Wellen der Geschwindigkeitsänderung dank des Farbwechsels erkennen. Diese bewegen sich entgegen der Laufrichtung mit nahezu konstanter Geschwindigkeit.

⁶⁴ Ob sich eine Person in der Stopp-Phase befindet, wird gemäß Gleichung (2.8) mit $v_{\text{Grenze}} = 0,1 \text{ m/s}$ gerechnet.

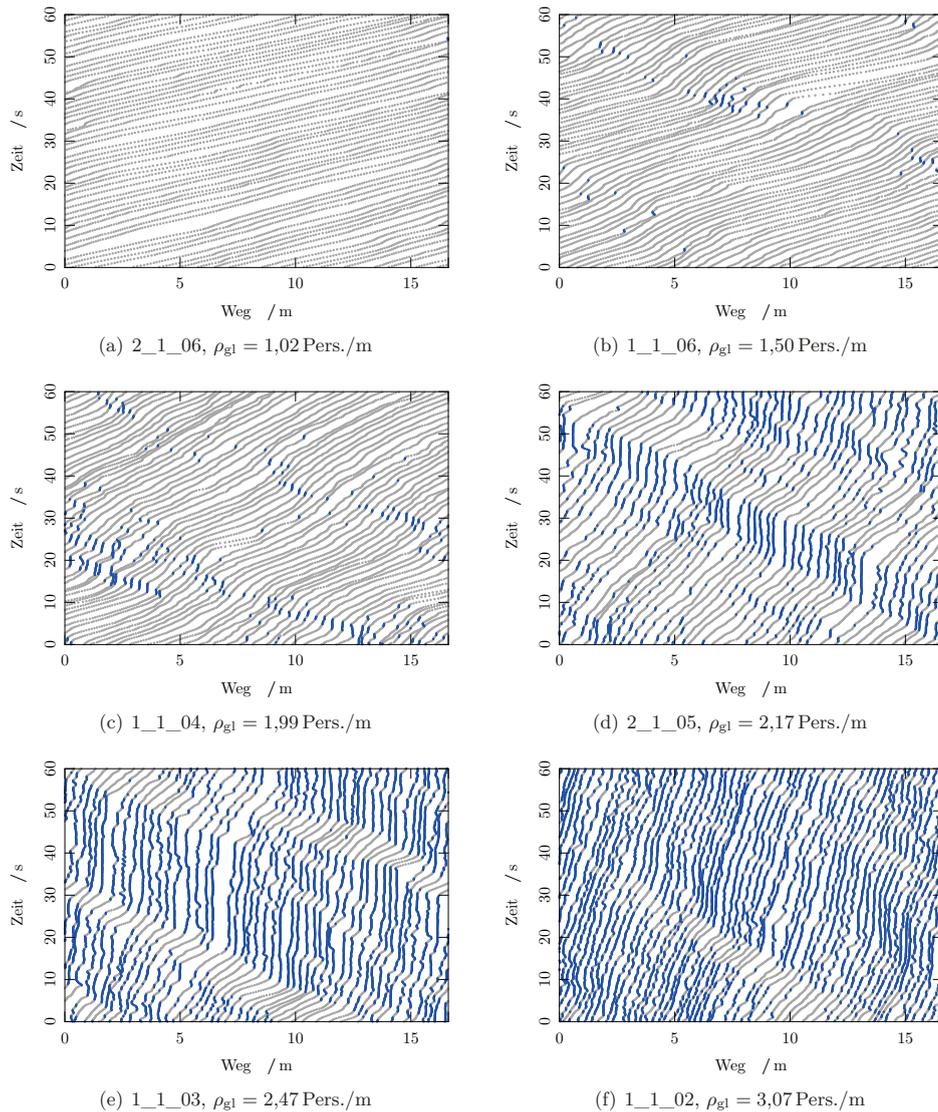


Abb. 5.2: Auswahl von Weg-Zeit-Diagrammen mit Einfärbung der Stopp-Phase, Versuchsreihe GBS-5. Für die Durchläufe mit $N = 17, 25, 33, 36, 41$ und 51 .

In Abb. 5.2 (a), bei einer globalen Dichte von $1,02$ Pers./m, ist die Gehgeschwindigkeit aller Probanden höher als die Grenzgeschwindigkeit. In (b) bis (f), ab einer globalen Dichte von $1,50$ Pers./m, sind Personen in der Stopp-Phase erkennbar. Mit steigender Dichte erhöht sich deren Anzahl sowie die Verweildauer in der Stopp-Phase. Bei der Wahl von $0,2$ m/s für die Grenzgeschwindigkeit gibt es merkbar mehr Personen in der Stopp-Phase. Die blauen Bereiche sind größer als bei $0,1$ m/s und bei mittleren Dichten zwischen $1,5$ Pers./m und $2,0$ Pers./m verbinden sich zuvor einzelne Personen in der Stopp-Phase zu großen Clustern.

In Abb. A.33 bis A.36 in Anhang A.3 werden von allen Durchläufen die Weg-Zeit-Diagramme mit blau eingefärbten Weg-Zeit-Kurven von Personen in der Stopp-Phase gezeigt. Oft befinden sich neben stehenden Personen weitere Personen in der Stopp-Phase, sodass ein Cluster stehender Personen entsteht. Dies ist bei Durchlauf 1_3_5 in Abb. A.35 (a) deutlich zu sehen. Klare Trennlinien zwischen den stehenden und gehenden Personen existieren jedoch nicht überall. Cluster von Personen in der Stopp-Phase scheinen ohne Ordnung oder erkennbare Muster zu sein. Es gibt Probanden, die ihren Zustand alle drei bis zehn Sekunden wechseln, wie beispielsweise in Durchlauf 1D_PHAS_SEP_6 mit $N = 59$ der Proband, welcher zum Zeitpunkt null Sekunden bei circa 13,5 m startet, siehe Abb. A.34 (d). Bei großen globalen Dichten um 2,40 Pers./m scheint es je Zeitschritt mehr Personen in als außerhalb der Stopp-Phase zu geben. Auffällig ist, dass bei Experiment 4 keine eindeutige Stopp-Welle aus den einzelnen Clustern gebildet werden kann. Zwischen den einzelnen Versuchsreihen lassen sich visuell keine Unterschiede erkennen. Nur bei der Versuchsreihe BUW-m mit erhöht motivierten Probanden treten weniger Cluster stehender Personen auf.

Wird die Grenzgeschwindigkeit für die Einfärbungen der Diagramme auf 0,05 m/s reduziert, verkleinern sich die Cluster minimal und die Verläufe ähneln denen bei einer Grenzgeschwindigkeit von 0,1 m/s. Bei einer Erhöhung der Grenzgeschwindigkeit auf 0,2 m/s, 0,3 m/s oder 0,5 m/s gibt es in den Weg-Zeit-Diagrammen aller Versuchsreihen merkbar mehr Personen mit Einfärbung. Die Cluster stehender Personen werden mit jedem Schritt der Erhöhung größer. Zwischen den einzelnen Versuchsreihen außer für Versuchsreihe BUW-m lassen sich visuell auch hier keine Unterschiede der Stopp-Phasen erkennen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der Einfluss der Dichte auf die Weg-Zeit-Kurven und damit auf die Bewegung der Personen sichtbar ist. Des Weiteren zeigt sich auch der Einfluss der erhöhten Motivation auf die Weg-Zeit-Kurven. Andere Einflüsse können visuell nicht erkannt werden. Durch die Einfärbung von Stopp-Phasen lassen sich Cluster stehender Personen identifizieren, welche jedoch größtenteils punktuell und unzusammenhängend auftreten.

5.3 Stau-Charakteristika

5.3.1 Ausbreitungsgeschwindigkeit des Staus

Ein Stau beim motorisierten Straßenverkehr besitzt zwei Staufronten: stromabwärtiger Übergang vom gestauten zum freien Verkehr und stromaufwärtiger Übergang vom freien zum gestauten Verkehr. Die stromabwärtige Staufront, der sogenannte Staukopf, bleibt dabei an einer Engstelle fixiert oder bewegt sich entgegen der Bewegungsrichtung stromaufwärts. Diese Bewegung wird Ausbreitungsgeschwindigkeit des Staus genannt. Beim motorisierten Straßenverkehr ist sie konstant.⁶⁵ Sie kann über die Reaktionszeit des Fahrenden und die Fahrzeuglänge berechnet werden.⁶⁶ In dieser Arbeit wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit des

⁶⁵ Allgemeine Oszillationen wurden von Zielke et al. [130] untersucht. Die Autoren kommen auf Ausbreitungsgeschwindigkeiten des Staus von circa 14 – 16 km/h in Europa und 19 – 20 km/h in den USA. Treiber und Kesting [109] vermuten, dass die Fahrzeug-Zusammensetzung für die Unterschiede zwischen den Ländern die ausschlaggebende Rolle spielt [109, S. 265]. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Ländern wurde bisher nicht gefunden.

⁶⁶ Vgl. Treiber und Kesting [109, Gl. 17.1, S. 265].

Staus bei Fußgängern v_{Stau} anhand der Steigung der stromabwärtigen Staufront im Weg-Zeit-Diagramm manuell bestimmt. Nur wenn eine Staufront identifiziert wird, kann die Stau-Ausbreitungsgeschwindigkeit berechnet werden.

In Abb. 5.3 sind neben Personen in der Stopp-Phase die Staufronten mit schwarzen Geraden in die Weg-Zeit-Diagramme von Durchläufen der Versuchsreihe GBS-5 gekennzeichnet. Bei einer globalen Dichte von 1,99 Pers./m wird im Schnitt eine Ausbreitungsgeschwindigkeit des Staus von 0,42 m/s gemessen. Bei der globalen Dichte von 2,17 Pers./m liegt sie bei 0,40 m/s und bei 2,47 Pers./m ist die Stau-Ausbreitungsgeschwindigkeit mit 0,28 m/s deutlich geringer. Die Ergebnisse ähneln den Aussagen von Cao et al. [13], die für Fußgänger bei $\rho_{\text{gl}} = 1,75$ Pers./m Ausbreitungsgeschwindigkeiten des Staus von 0,4 m/s und für globale Dichten größer 2,3 Pers./m Ausbreitungsgeschwindigkeiten des Staus von 0,3 m/s maßen.

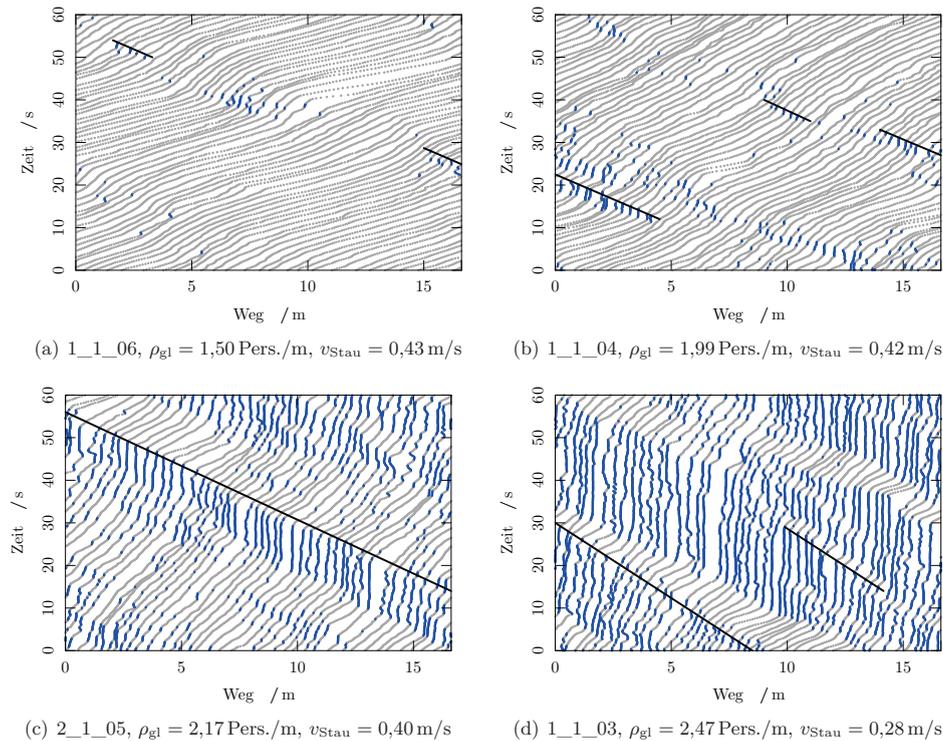


Abb. 5.3: Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Staus, Versuchsreihe GBS-5.

Die gemessenen Stau-Ausbreitungsgeschwindigkeiten aller Versuchsreihen sind in Tab. A.11 in Anhang A.3 aufgeführt und werden in Abb. 5.4 unabhängig von der Versuchsreihe gezeigt. Außerdem ist eine Ausgleichsgerade eingezeichnet, die andeutet, dass mit zunehmender globaler Dichte die Stau-Ausbreitungsgeschwindigkeit sinkt. Zusätzlich sind Messungen mit anderen Werten für die Grenzggeschwindigkeiten in das Diagramm mit je einer eigenen Farbe dargestellt.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeiten des Staus bei den Grenzggeschwindigkeiten 0,1 m/s und 0,2 m/s sind fast identisch. Eine Verringerung der Grenzggeschwindigkeit auf 0,05 m/s wirkt

sich nur minimal erhöhend auf die Stau-Ausbreitungsgeschwindigkeiten aus. Bei Erhöhung der Grenzgeschwindigkeit sinken die gemessenen Ausbreitungsgeschwindigkeiten des Staus. Für $v_{\text{Grenze}} = 1,0 \text{ m/s}$ kann bei den Durchläufen mit globaler Dichte über $1,0 \text{ Pers./m}$ keine Staufront identifiziert werden und bei den Durchläufen mit niedrigeren Dichten tritt keine Stopp-Phase auf.

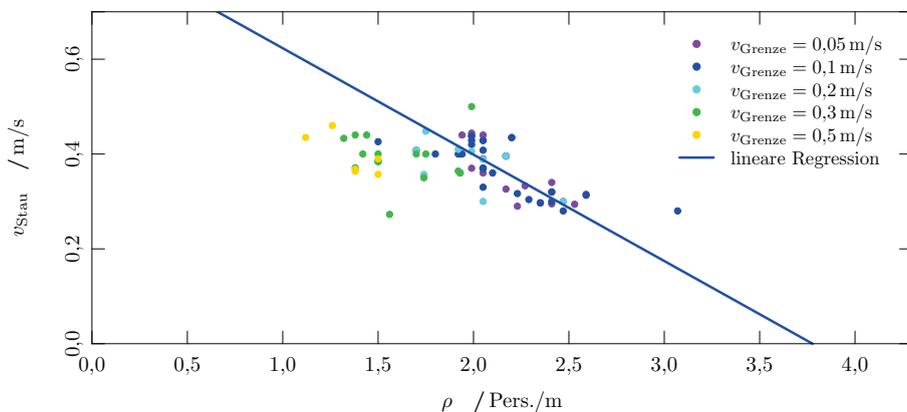


Abb. 5.4: Ausbreitungsgeschwindigkeit des Staus.

Anders als beim motorisierten Straßenverkehr gibt es bei den Fußgängern keine konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit des Staus. Vielmehr hängt sie bei Fußgängern von der globalen Dichte ab. Ob es noch weitere Einflüsse auf die Stau-Ausbreitungsgeschwindigkeit gibt, wird in dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

5.3.2 Anteil an Personen in der Stopp-Phase

In Unterabschnitt 2.4.2 wurde definiert, dass eine Person mit einer Geschwindigkeit kleiner gleich der Grenzgeschwindigkeit von $v_{\text{Grenze}} = 0,1 \text{ m/s}$ stoppt. Nun wird die Anzahl dieser Personen in der Stopp-Phase untersucht. Hierfür werden vier bzw. fünf Mal pro Sekunde alle Personen in der Stopp-Phase gemäß Gleichung (2.9) ermittelt. Um einen Vergleich zwischen den verschiedenen Durchläufen mit unterschiedlicher Probandenanzahl zu ermöglichen, wird die Anzahl der Personen in der Stopp-Phase durch die Anzahl der Probanden N des Durchlaufs dividiert und der resultierende Anteil an Personen in der Stopp-Phase untersucht. Dieser liegt zwischen Null und Eins und kann je Durchlauf $N + 1$ diskrete Werte annehmen.

Der Anteil an Personen in der Stopp-Phase wird in Abb. 5.5 für die Versuchsreihe GBS-5 dargestellt. Auf der Ordinatennachse wird die Zeit und auf der Abszissenachse der Anteil an Personen in der Stopp-Phase dargestellt. In der Grafik werden nur Zeitreihen von Durchläufen gezeigt, bei denen der Wert mindestens einmal größer als Null ist. Jeder Durchlauf besitzt eine eigene Farbe. Die Zeitreihen zeigen, dass die Anzahl der Personen in der Stopp-Phase nicht konstant ist. Mit steigender globaler Dichte nimmt der Anteil an Personen in der Stopp-Phase zu und ist ab $2,17 \text{ Pers./m}$ immer über $0,2$. Die Verläufe bei den globalen Dichten $2,47 \text{ Pers./m}$ und $3,07 \text{ Pers./m}$ ähneln sich.

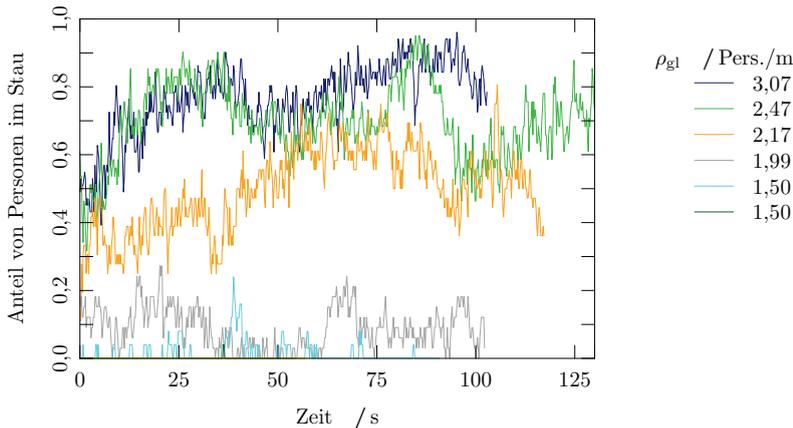


Abb. 5.5: Anteile an Personen in der Stopp-Phase im Zeitverlauf, Versuchsreihe GBS-5.

Die entsprechenden Grafiken der restlichen Versuchsreihen von den Experimenten 2, 3 und 4 werden in Abb. A.37 in Anhang A.3 gezeigt.⁶⁷ Dabei wurde für Experiment 2 alle 0,25 Sekunden und für die Experimente 3 und 4 alle 0,20 Sekunden gemessen. Für alle Zeitreihen gilt, dass bei großen globalen Dichten die Werte höher als bei niedrigen globalen Dichten liegen. Bei gleicher globaler Dichte haben die Zeitreihen derselben Versuchsreihe einen ähnlichen Verlauf. Zwischen den verschiedenen Versuchsreihen lassen sich visuell keine Unterschiede erkennen.

Als nächstes wird die Verteilung der Anteile an Personen in der Stopp-Phase je Durchlauf grafisch dargestellt. Dies geschieht mithilfe des sogenannten Box-Whisker-Plots.⁶⁸ Für jeden Durchlauf wird aus den Anteilen an Personen in der Stopp-Phase ein Box-Whisker-Plot erstellt. In Abb. 5.6 werden die Box-Whisker-Plots von Versuchsreihe GBS-5 an der Stelle der globalen Dichte gezeigt. Bei globalen Dichten unter 1,00 Pers./m liegen alle Werte bei Null, d. h. keine Person steht zu irgendeinem Zeitpunkt des Durchlaufs. Ab 1,02 Pers./m steigt mit wachsender Dichte der Anteil an Personen in der Stopp-Phase an und liegt ab globalen Dichten von 2,17 Pers./m (bis auf einen Ausreißer) immer über 20 %. Der Median liegt bei globalen Dichten bis 1,50 Pers./m bei Null und steigt mit wachsender Dichte an. Er liegt mittig im Kasten, woraus auf eine symmetrische Verteilung geschlossen werden kann. Ab 2,17 Pers./m sind mindestens 20 % Personen, meistens sogar über 40 % Personen in der Stopp-Phase. Ab dieser Dichte liegen die Ausreißer unter dem Median und unter dieser Dichte über dem Median.

In Anhang A.3 finden sich die Box-Whisker-Plots der restlichen Versuchsreihen von den Experimenten 2, 3 und 4 in Abb. A.38. Bei niedrigen globalen Dichten liegt der Wert des Anteils an Personen in der Stopp-Phase bei Null und steigt mit wachsender Dichte an. Ab einer globalen Dichte von 1,68 Pers./m liegen die Werte nicht mehr nur bei Null, mit Ausnahme von

⁶⁷ Bei Experiment 1 existieren keine Daten des gesamten Parcours, sondern nur eines Teilschnitts, weswegen die Stau-Charakteristik „Anteil an Personen in der Stopp-Phase“ für die Versuchsreihen dieses Experiments nicht untersucht wird.

⁶⁸ Der Kasten im Box-Whisker-Plot enthält die mittleren 50 % der Daten. Seine Länge wird oft als Streuungsmaß verwendet. Des Weiteren wird im Box-Whisker-Plot der Median markiert. Die restlichen Daten werden als Antennen, den sogenannten Whiskers, dargestellt. Ihre maximale Länge beträgt 1,5 mal der Kastenlänge. Ausreißer werden als Kreise abgebildet.

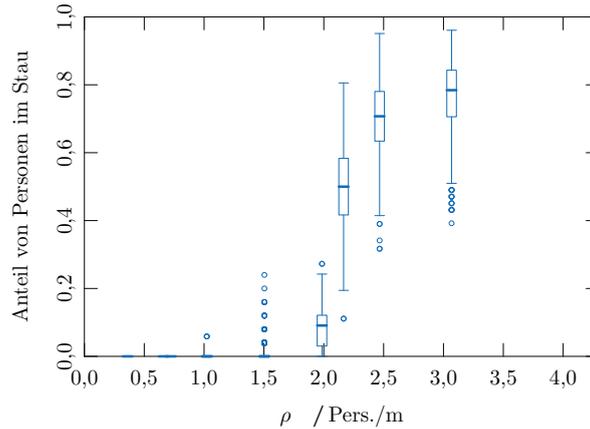


Abb. 5.6: Box-Whisker-Plots der Anteile an Personen in der Stopp-Phase, Versuchsreihe GBS-5.

Ausreißern, sondern steigen mit wachsender Dichte. Bereits bei einer globalen Dichte von 2,41 Pers./m übersteigt mindestens ein Wert einmal die 0,9. Ab einer globalen Dichte von 2,17 Pers./m sind alle Werte größer Null. Der Median ist bereits ab 1,80 Pers./m größer als Null und für Durchläufe mit globalen Dichten ab 2,4 Pers./m größer als 0,5.

Direkte Unterschiede zwischen den Versuchsreihen oder Gemeinsamkeiten unter ihnen lassen sich nicht zeigen. Selbst bei derselben Versuchsreihe gibt es für drei Durchläufe mit gleicher globaler Dichte unterschiedliche Mediane, vgl. Versuchsreihe GBS-5+11. Für exaktere Analysen zwischen verschiedenen Versuchsreihen fehlen weitere Daten anderer globaler Dichten. Verschiedene Grenzgeschwindigkeiten führen zu quantitativen, nicht aber zu qualitativen Unterschieden. Bei einer Verringerung der Grenzgeschwindigkeit sinken die Werte und bei einer Erhöhung steigen sie an, siehe für Versuchsreihe GBS-5 Abb. A.39 in Anhang A.3.

Ergänzend zur qualitativen Analyse werden die Daten analytisch ausgewertet. Die Datenpunkte in Abb. 5.6 erinnern an einen s-förmigen Zusammenhang zwischen Dichte und Anteil an Personen in der Stopp-Phase, deren Verlauf Υ mit der Weibull-Funktion für $\rho \geq 0$ Pers./m beschrieben werden kann:

$$\Upsilon(\rho) = 1 - e^{-(N_0 \rho)^{N_1}}, \quad (5.1)$$

mit $N_0, N_1 \in \mathbb{R}^+$. Die Parameter $\mathbf{p} = (N_0, N_1)$ werden durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate geschätzt:

$$\mathbf{p}^* = \arg \min_{\mathbf{p}} \sum_j (\Upsilon_{\mathbf{p}}(\rho_j) - \Upsilon_j)^2. \quad (5.2)$$

Für die Regression werden alle Messwerte verwendet. Die Funktion nach Gleichung (5.1) mit den geschätzten Werten $\mathbf{p}^* = (0,42, 7,87)$ für Versuchsreihe GBS-5 wird in Abb. 5.7 in die Grafik mit den Box-Whisker-Plots eingezeichnet. Sie liegt bis zur globalen Dichte von 1 Pers./m bei Null und steigt s-förmig an, indem ihre Steigung bis 2,3 Pers./m wächst und anschließend wieder sinkt. Bei 3 Pers./m erreicht der Funktionswert die Eins.

Auch für die anderen Versuchsreihen werden mithilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate die Parameter der Weibull-Funktion geschätzt. In Abb. 5.8 werden neben den geschätzten

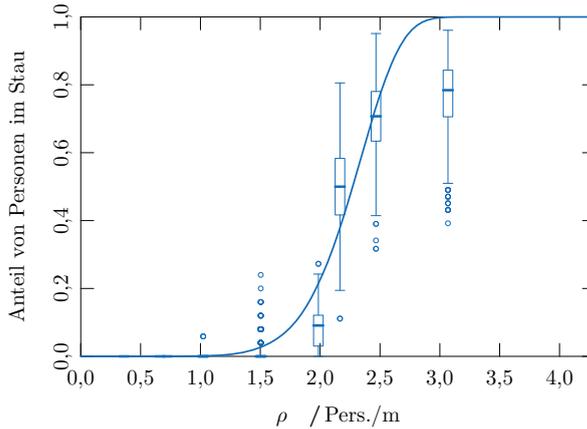


Abb. 5.7: Box-Whisker-Plots der Anteile an Personen in der Stopp-Phase mit geschätzter Funktion, Versuchsreihe GBS-5.

Funktionen die Messwerte je Durchlauf an der Stelle der jeweiligen globalen Dichte dargestellt. Jede Versuchsreihe hat eine eigene Farbe. Die Punkte und Funktionen wurden in der Reihenfolge, wie sie in der Legende steht, eingezeichnet. Somit können Datenpunkte von Versuchsreihen im unteren Teil der Legende andere Datenpunkte überdecken. Die Funktionen ähneln sich, obwohl sie im oberen Bereich ab dem Wert 0,6 breiter gefächert sind. Die Funktion von der Versuchsreihe WDG-6 sticht etwas hervor, da sie bei Dichten von 1,5 Pers./m bis 2,7 Pers./m niedrigere Werte aufweist.

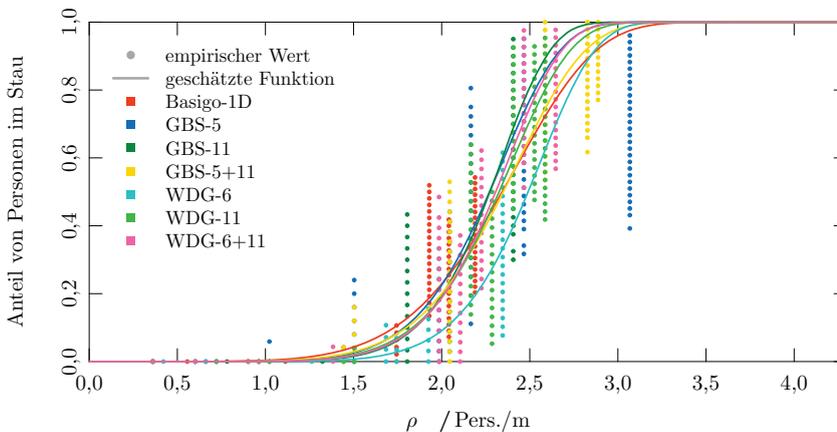


Abb. 5.8: Anteile an Personen in der Stopp-Phase mit geschätzter Funktion je Versuchsreihe.

Da bei den Anteilen an Personen in der Stopp-Phase keine systematischen Unterschiede zwischen den Versuchsreihen gezeigt werden können und auch die geschätzten Funktionen fast gleich sind, wird im nächsten Schritt nicht mehr nach der Versuchsreihe differenziert.

Es werden die Anteile an Personen in der Stopp-Phase aller untersuchter Versuchsreihen zusammengefasst und ihre gemeinsame Weibull-Funktion ermittelt. Die geschätzten Parameter für die Daten ohne Differenzierung nach der Versuchsreihe lauten $\mathbf{p}^* = (0,41, 7,67)$. Die

Anteile an Personen in der Stopp-Phase aller untersuchter Versuchsreihen und ihre Weibull-Funktion werden in Abb. 5.9 (a) gezeigt. Die geschätzte Funktion ist fast punktsymmetrisch. Sie liegt bis zu einer globalen Dichte von 1,2 Pers./m bei Null, steigt erst langsam, dann immer stärker an. Bei circa 2,3 Pers./m hat sie einen Wendepunkt, ihre Steigung nimmt wieder ab und bei der globalen Dichte von circa 3,0 Pers./m erreicht sie die Eins. Es kann ein kritischer Wert der globalen Dichte bestimmt werden, bei dem die Funktion den Anteil an Personen in der Stopp-Phase von 5% erreicht. Dieser Wert liegt bei $\Upsilon_{0,05} = 1,65$ Pers./m.

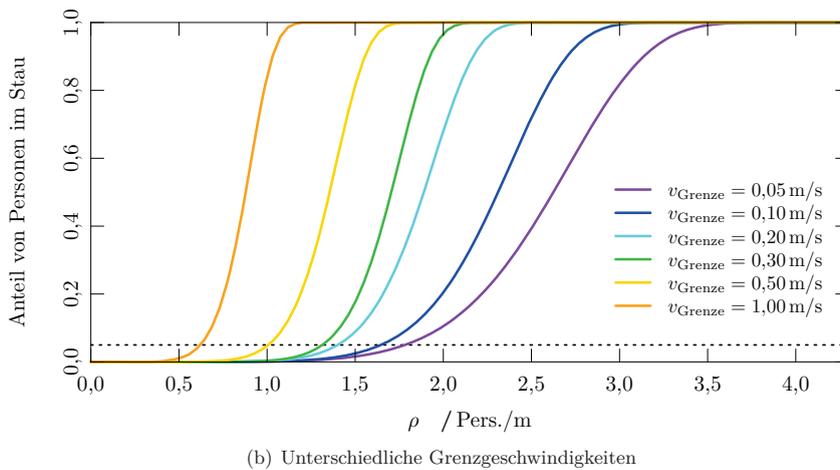
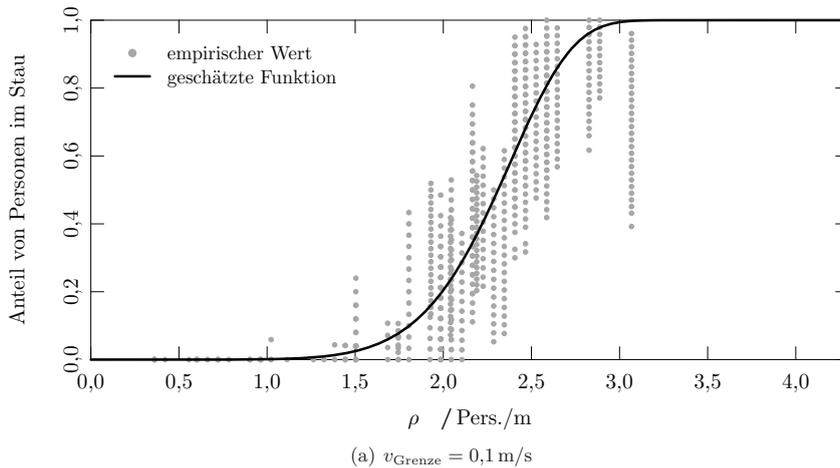


Abb. 5.9: Geschätzte Funktion des Anteils an Personen in der Stopp-Phase.

Bei der Schätzung der Funktion wurden alle Datenpunkte verwendet. Auch bei der Wahl einer anderen stochastischen Kenngröße lassen sich keine qualitativen Unterschiede der Funktion zeigen.⁶⁹ Es gibt nur quantitativ minimale Unterschiede.

⁶⁹ Untersucht wurden als Datenquelle je Durchlauf der Median, die mittleren 50% der Datenpunkte, alle Datenpunkte ohne sowie alle Datenpunkte mit Ausreißer.

Die Datenpunkte und die geschätzte Funktion ändern sich mit Erhöhung bzw. Verringerung der Grenzgeschwindigkeit ($v_{\text{Grenze}} = 0,05, 0,1, 0,2, 0,3, 0,5$ und $1,0$ m/s). In Anhang A.3 werden in Abb. A.40 die Grafiken für die verschiedenen Grenzgeschwindigkeiten gezeigt. Der Unterschied zwischen $0,1$ m/s und $0,05$ m/s ist klein. Für die Grenzgeschwindigkeit $0,2$ m/s sind ab einer globalen Dichte von $2,0$ Pers./m alle Werte über $0,2$ und ab $2,5$ Pers./m über $0,8$. Für $0,3$ m/s sind ab einer globalen Dichte von $2,0$ Pers./m alle Werte über $0,6$ und ab $2,5$ Pers./m sogar über $0,9$.

In Abb. 5.9 (b) werden die Weibull-Funktionen für die verschiedenen Grenzgeschwindigkeiten in einer Grafik gezeigt. Die Schnittpunkte der gestrichelten Linie mit den Funktionen entsprechen den kritischen Dichten. Mit sinkender Grenzgeschwindigkeit verschieben sich die Funktionen nach rechts, und im oberen Wertebereich sogar stärker. Die Steigungsänderung an den Rändern wird schwächer. Die kritische Dichte steigt mit Verringerung der Grenzgeschwindigkeit.

Unabhängig von der Wahl der Grenzgeschwindigkeit ist die Aussage, dass die charakteristische Größe „Anteil an Personen in der Stopp-Phase“ als Weibull-Funktion abhängig von der globalen Dichte beschrieben werden kann, robust. Für eine weitergehende Analyse des Anteils an Personen in der Stopp-Phase fehlen hier noch weitere Daten von noch nicht untersuchten globalen Dichten.

5.3.3 Zeitanteil in der Stopp-Phase

Neben der Anzahl der Personen in der Stopp-Phase wird als nächstes die Verweildauer in der Stopp-Phase untersucht. Diese ist für jede Person unterschiedlich lang und ergibt sich gemäß Gleichung (2.10) aus der Summe aller individuellen Zeitspannen, in denen die Person steht. Um einen Vergleich zwischen den verschiedenen Durchläufen mit unterschiedlicher Dauer zu ermöglichen, wird die Verweildauer einer Person durch die Gesamtdauer des Durchlaufs dividiert und der resultierende persönliche Zeitanteil in der Stopp-Phase untersucht. Dieser liegt zwischen Null und Eins und kann entsprechend der Zeitdauer des Durchlaufs und der Bildaufnahmerate unterschiedlich viele diskrete Werte annehmen.

In Abb. 5.10 ist der Zeitanteil in der Stopp-Phase für jeden Durchlauf von Versuchsreihe GBS-5 als Box-Whisker-Plot an der Stelle seiner globalen Dichte dargestellt.⁷⁰ Die Box-Whisker-Plots unterscheiden sich und ihre Werte steigen mit Erhöhung der globalen Dichte an. Während sie bis $1,5$ Pers./m unter $0,1$ liegen, sind bei höheren Dichten alle Werte über Null und bei einer Dichte von $2,5$ Pers./m bei circa $0,5$. Für jeden Durchlauf liegt ihre Spannweite unter 20% . Der Median steigt mit wachsender globaler Dichte an und liegt nicht immer symmetrisch im Kasten. Die Antennen sind relativ kurz und meist nicht länger als der Kasten. Es gibt wenige Ausreißer.

Die entsprechenden Grafiken der Versuchsreihen von den Experimenten 2, 3 und 4 befinden sich in Abb. A.41 in Anhang A.3.⁷¹ Der Datensatz von Versuchsreihe GBS-5 scheint etwas

⁷⁰ Für die Erstellung eines Box-Whisker-Plots wurde je Person ihr Zeitanteil in der Stopp-Phase verwendet.

⁷¹ Bei Experiment 1 existieren keine Daten des gesamten Parcours, sondern nur eines Teilschnitts, weswegen auch diese Stau-Charakteristik für die Versuchsreihen dieses Experiments nicht untersucht wird.

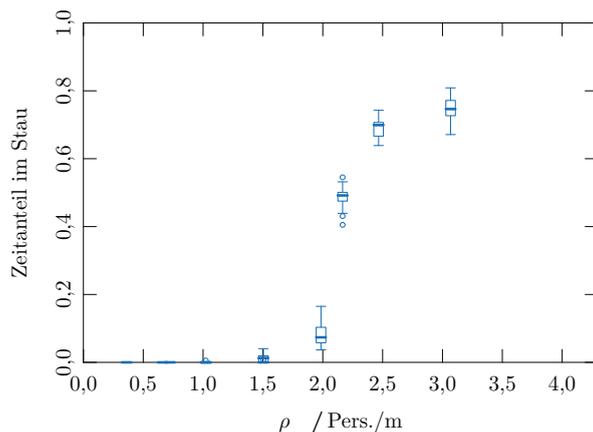


Abb. 5.10: Box-Whisker-Plots des Zeitanteils in der Stopp-Phase, Versuchsreihe GBS-5.

langsamer zu wachsen als von den anderen, bzw. überschreitet den Wert von 0,8 nicht. Diese Versuchsreihe hatte den Durchlauf mit maximaler globaler Dichte. Es gibt insgesamt sehr wenige Ausreißer. Der Median steigt nicht monoton an.

Zum direkten Vergleich der einzelnen Versuchsreihen wird in Abb. 5.11 der Zeitanteil in der Stopp-Phase für alle Versuchsreihen abhängig der globalen Dichte dargestellt. Jeder Datenpunkt steht für einen Probanden je Durchlauf und seinen Zeitanteil in der Stopp-Phase. Jede Versuchsreihe hat ihre eigene Farbe. Die Punkte wurden in der Reihenfolge eingezeichnet, wie sie bei der Legende eingetragen ist. Somit können Datenpunkte von Versuchsreihen im unteren Teil der Legende andere Datenpunkte überdecken. Ab einer Dichte von ungefähr 1,5 Pers./m liegen die Werte nicht mehr nur bei Null. Für Dichten über 2,0 Pers./m sind die Werte immer größer als Null und steigen mit wachsender Dichte. Bei 2,9 Pers./m wird einmal der Wert Eins erreicht.

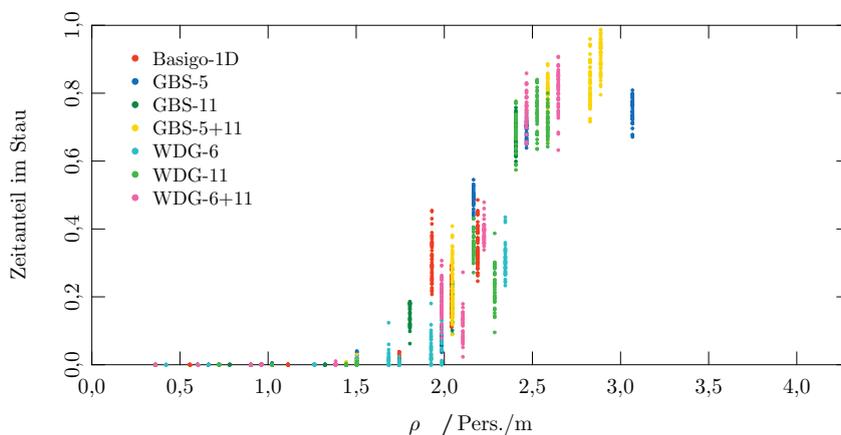


Abb. 5.11: Zeitanteil in der Stopp-Phase als Punktwolke.

Die Grafik ändert sich bei Änderung der Grenzgeschwindigkeit. Die Zeitanteile in der Stopp-Phase für die Grenzgeschwindigkeiten $v_{\text{Grenze}} = 0,05, 0,1, 0,2, 0,3, 0,5$ und $1,0$ m/s werden

in Abb. A.42 in Anhang A.3 gezeigt. Bei Verringerung der Grenzgeschwindigkeit verschieben sich alle Datenpunkte um circa 0,2 nach unten. Bei Erhöhung der Grenzgeschwindigkeit verschieben sich die Datenpunkte nach oben. Hier wird auch schon bei niedrigeren Dichten der Wert Eins erreicht. Bei 1,0 m/s wird die Eins ab 0,9 Pers./m erreicht und ab 1,2 Pers./m ist der Wert fast nur noch bei Eins. Die Veränderung für unterschiedliche Grenzgeschwindigkeiten war erwartet. Auch die kritische Dichte verschiebt sich in Richtung einer niedrigeren globalen Dichte. Der Übergang von Null zu Eins erfolgt bei höherer Grenzgeschwindigkeit schneller. Zwischen den Versuchsreihen lassen sich keine signifikanten Unterschiede identifizieren.

Ergänzend zur grafischen Untersuchung werden die Daten analytisch ausgewertet. Die Datenpunkte in Abb. 5.11 erinnern an einen s-förmigen Zusammenhang zwischen Dichte und Zeitanteil in der Stopp-Phase, deren Verlauf Φ mit der Weibull-Funktion für $\rho \geq 0$ Pers./m beschrieben werden kann:

$$\Phi(\rho) = 1 - e^{-(N_2 \cdot \rho)^{N_3}}, \quad (5.3)$$

mit $N_2, N_3 \in \mathbb{R}^+$. Die Parameter $\mathbf{p} = (N_2, N_3)$ werden durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate anhand aller Messwerte geschätzt:

$$\mathbf{p}^* = \arg \min_{\mathbf{p}} \sum_j (\Phi_{\mathbf{p}}(\rho_j) - \Phi_j)^2. \quad (5.4)$$

Je Versuchsreihe wird die Funktion nach Gleichung (5.3) mit den geschätzten Werten in Abb. 5.12 in der Grafik mit den Datenpunkten dargestellt.⁷² Die Punkte und Funktionen wurden in der Reihenfolge, wie sie in der Legende steht, geplottet. Somit können Datenpunkte von Versuchsreihen im unteren Teil der Legende andere Datenpunkte überdecken. Alle s-förmigen Funktionskurven, bis auf die von Versuchsreihe WDG-6, schneiden sich fast in einem Punkt und sind sich im Verlauf ähnlich. Auch die geschätzte Funktion von Versuchsreihe GBS-5 verläuft etwas anders als die der übrigen. Insgesamt ist der Verlauf aber ähnlich.

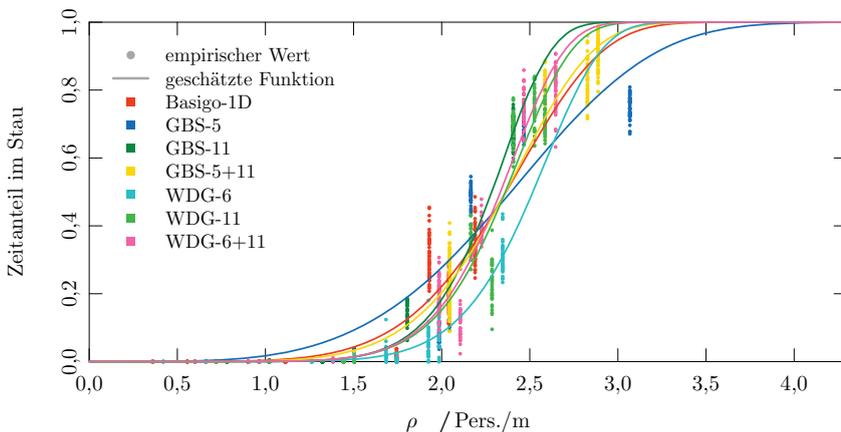


Abb. 5.12: Zeitanteil in der Stopp-Phase mit geschätzter Funktion je Versuchsreihe.

⁷² Die geschätzten Parameter werden in Tab. A.12 in Anhang A.3 gezeigt.

Da die Zeitanteile in der Stopp-Phase keine systematischen Unterschiede zwischen den Versuchsreihen zeigen, und auch die geschätzten Funktionen sich ähneln, wird im nächsten Schritt nicht mehr nach der Versuchsreihe differenziert. In Abb. 5.13 (a) sind die Zeitanteile in der Stopp-Phase aller untersuchter Versuchsreihen in einer Grafik zusammengefasst. Des Weiteren ist die Weibull-Funktion nach Gleichung (5.3) mit den geschätzten Parametern $\mathbf{p}^* = (0,41, 7,81)$ für die Daten, ohne Differenzierung nach der Versuchsreihe, eingezeichnet. Die s-förmige Funktionskurve ist nicht punktsymmetrisch, liegt bis 1,3 Pers./m bei Null und steigt mit zunehmender Steigung an. Beim Wert von 0,6 nimmt die Steigung ab. Die Funktionskurve erreicht ab einer Dichte von 3,0 Pers./m ihr Maximum. Auch hier kann eine kritische Dichte $\Phi_{0,05}$, bei welcher der Zeitanteil in der Stopp-Phase über 5 % liegt, definiert werden. Sie liegt bei 1,68 Pers./m.

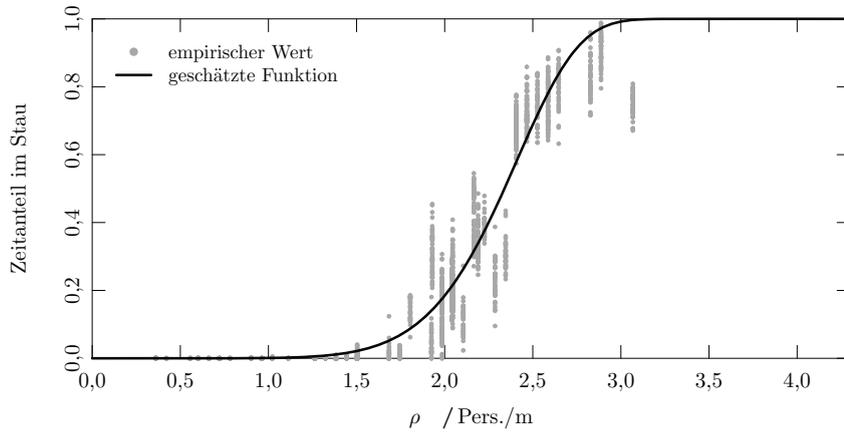
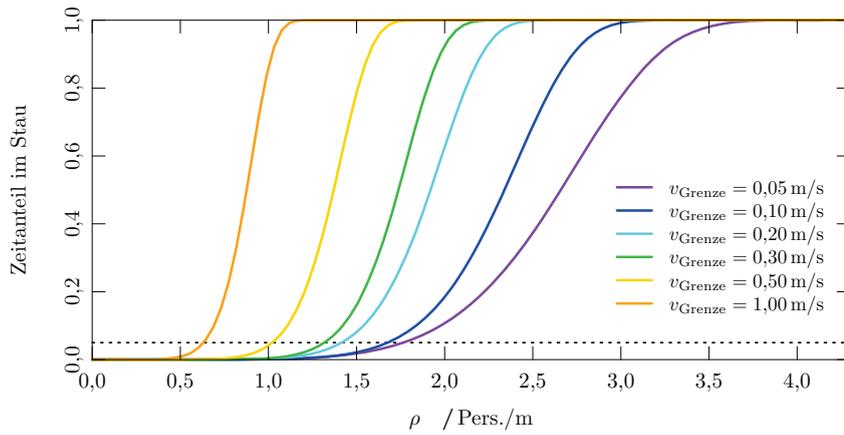
Zur Schätzung der Funktion werden alle Datenpunkte verwendet. Auch bei der Wahl einer anderen Datenquelle wie den Median, die mittleren 50 % der Datenpunkte oder alle Datenpunkte ohne Ausreißer je Durchlauf, lassen sich keine qualitativen Unterschiede der Funktion zeigen. Quantitativ gibt es kleine Unterschiede.

In Abb. 5.13 (b) werden die Funktionen für alle Grenzgeschwindigkeiten ($v_{\text{Grenze}} = 0,05, 0,1, 0,2, 0,3, 0,5$ und $1,0$ m/s) gezeigt. Mit steigender Grenzgeschwindigkeit verschiebt sich die s-förmige Funktionskurve nach links. Im unteren Wertebereich geschieht dies weniger stark als im oberen. Des Weiteren nimmt die Steigungsänderung an den Rändern zu. Die kritische Dichte sinkt, siehe Tab. A.12 in Anhang A.3. Keine Funktion ist punktsymmetrisch.

Unabhängig von der Wahl der Grenzgeschwindigkeit ist die Aussage, dass die charakteristische Größe „Zeitanteil in der Stopp-Phase“ als Weibull-Funktion abhängig von der globalen Dichte beschrieben werden kann, robust. Für eine tiefergehende Analyse des Zeitanteils in der Stopp-Phase fehlen hier noch weitere Daten von noch nicht untersuchten globalen Dichten. Dafür müssen in Zukunft weitere Experimente durchgeführt werden.

Da zwischen den Stau-Daten der verschiedenen Versuchsreihen keine signifikanten Unterschiede bestehen, konnten alle Daten zusammengefasst werden, um die Stop-and-go-Wellen anhand der drei Charakteristika allgemein zu beschreiben.⁷³ In der zeitlichen Gesamtbeurteilung können die beiden Charakteristika „Anteil an Personen in der Stopp-Phase“ und „Zeitanteil in der Stopp-Phase“ ineinander überführt werden. Daher sind sowohl die Funktion als auch die kritische Dichte je Grenzgeschwindigkeit für beide Charakteristika nahezu identisch, siehe Abb. 5.9 (b) und Abb. 5.13 (b).

⁷³ Die Weg-Zeit-Diagramme von Versuchsreihe BUW-m weisen einen Unterschied zu den übrigen Versuchsreihen auf. Zur Bestimmung der Stau-Charakteristika wurden keine Daten der Versuchsreihen BUW-n und BUW-m verwendet.

(a) $v_{\text{Grenze}} = 0,1 \text{ m/s}$ 

(b) Unterschiedliche Grenzggeschwindigkeiten

Abb. 5.13: Geschätzte Funktion des Zeitanteils in der Stopp-Phase.

6 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit dient der Grundlagenforschung im Themengebiet Fußgängerdynamik. Dank umfangreicher Laborexperimente wurde die Datengrundlage für Fundamentaldiagramme eindimensionaler Bewegung erweitert. Die Auswertung dieser mikroskopischen Messwerte zeigt zum einen die Auswirkung bestimmter Einflussfaktoren auf das Fundamentaldiagramm. Zum anderen wurde Stop-and-go erstmalig quantitativ untersucht und mit drei Charakteristika beschrieben.

Ziele dieser Arbeit waren, das Fundamentaldiagramm in der Fußgängerbewegung zu beschreiben, die Skalierbarkeit bestimmter Einflussfaktoren auf das Fundamentaldiagramm zu überprüfen und Stop-and-go im Stau zu charakterisieren. Dazu wurden Experimente eindimensionaler Bewegung analysiert, welche unter Laborbedingungen stattfanden. Die Datenerhebung ermöglichte eine mikroskopische Messung. Zur Untersuchung der Skalierbarkeit des Fundamentaldiagramms wurden neben der Änderung der Probandenanzahl zwei weitere Parameter variiert. Bei einem Experiment war dies die Motivation der Probanden und bei zwei anderen Experimenten ihr Alter. In Hinblick auf das Alter wurden für die Durchführung der Experimente sowohl homogene als auch heterogene Probandengruppen ausgewählt.

Während zwei der Experimente bereits in früheren Studien durchgeführt wurden, erfolgte die Planung und Durchführung zwei weiterer Experimente im Rahmen dieser Arbeit. Bei allen Experimenten gingen die Probanden in einem geschlossenen Parcours in Form eines Ovals hintereinander ohne sich zu überholen. In den einzelnen Durchläufen variierte die Probandenanzahl, um unterschiedliche globale Dichten zu erzeugen. Die Probanden der neu durchgeführten Experimente waren Schüler. Dabei wurden mehr Durchläufe als in bisherigen Studien durchgeführt, um eine größere Datenbasis zu erhalten. Insgesamt konnten Daten aus 114 Durchläufen untersucht werden. Alle Durchläufe wurden mit Videokameras aufgezeichnet, aus deren Videobildern für jeden Probanden Trajektorien erstellt wurden. Für die Experimente, bei denen der komplette Parcours gefilmt wurde, erfolgte eine Abbildung der Bewegung in dem ovalen Parcours auf eine Gerade. Anhand dieser eindimensionalen Weg-Zeit-Kurven wurden Abstände, Geschwindigkeiten, Personendichten und Personenflüsse mikroskopisch gemessen und berechnet. Durch dieses Verfahren war es möglich, neben den Mittelwerten auch die Varianzen zu untersuchen. Hierfür wurde die mikroskopische Voronoi-Dichte verwendet, die im Vergleich zur klassischen Definition der mikroskopischen Dichte zu Zeitreihen mit geringeren Schwankungen führt. Für die Analysen wurden nur Daten eines quasi stationären Zustands herangezogen, um eine Unabhängigkeit von den Anfangs- und Endbedingungen zu erhalten. Da eine Voranalyse gezeigt hat, dass das Fundamentaldiagramm im geraden und im gekrümmten Bereich des Parcours keine Unterschiede aufweist, musste in den Untersuchungen keine Differenzierung nach den Parcoursbereichen vorgenommen werden.

In dieser Arbeit konnte bestätigt werden, dass ein Zusammenhang zwischen Personendichte und Geschwindigkeit besteht. Die Form der Fundamentaldiagramme ist für die untersuchten Probandengruppen qualitativ gleich, jedoch gibt es Unterschiede in der Lage. Die Lage des Fundamentaldiagramms für die Probanden mit erhöhter Motivation unterscheidet sich deutlich von der Lage des Fundamentaldiagramms der normal motivierten Probanden. Dies ist plausibel, da eine erhöhte Motivation durch Zeitdruck bei gleichen Abständen zu höheren Geschwindigkeiten führt. Zwischen den Probandengruppen unterschiedlichen Alters (Fünftklässler, Elftklässler) konnten in den Experimenten keine systematischen Unterschiede festgestellt werden. Bei den jüngeren Probanden sind jedoch die Varianzen der individuellen Geschwindigkeiten größer als bei den älteren Probanden. Zwischen homogenen Probandengruppen und ihrer Vereinigung (heterogen) gibt es ebenfalls keinen signifikanten quantitativen Unterschied. Die Datenpunkte der Fünftklässler sind in der heterogenen Probandengruppe weniger stark gestreut als bei den gleichen Personen in der homogenen Versuchsreihe. Dies ist bei den Elftklässlern analog. Auch mit dem in dieser Arbeit entwickelten Abstand-Geschwindigkeit-Modell zur Untersuchung der Skalierbarkeit lassen sich keine signifikanten Unterschiede der betrachteten Altersgruppen feststellen. Daher sind hier keine Aussagen über die Skalierbarkeit möglich. Dementgegen grenzen sich die erhöht motivierten Personen auch im Abstand-Geschwindigkeit-Modell mit ihren Parameterwerten von den normal motivierten Personen ab. Dabei ist die Motivation gut zu skalieren.

Stop-and-go von Fußgängern wurde in dieser Arbeit erstmalig quantitativ untersucht. Zur Abgrenzung von Personen in der Stopp-Phase zu den übrigen Personen wurde eine Grenzgeschwindigkeit eingeführt, eine Sensibilitätsstudie durchgeführt und auf diesen Weg ihr Wert definiert. Anders als beim motorisierten Straßenverkehr, bei dem die Charakteristik „Ausbreitungsgeschwindigkeit des Staus“ konstant ist, sinkt sie beim Fußgängerverkehr mit steigender globaler Dichte. Dabei gibt es beim Zusammenhang zwischen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Staus und globaler Dichte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Probandengruppen unterschiedlichen Alters. Die beiden Charakteristika „Anteil an Personen in der Stopp-Phase“ und „Zeitanteil in der Stopp-Phase“ wurden relativ zur Probandenanzahl und Zeitdauer je Durchlauf definiert. Für beide konnte ein funktionaler Zusammenhang zur globalen Dichte nachgewiesen werden, welcher bei Variation der Grenzgeschwindigkeit robust ist. Dass sich fünf Prozent der Personen in der Stopp-Phase befinden, ist bei einer Dichte von circa 1,7 Pers./m der Fall. Mithilfe dieser drei Stau-Charakteristika kann Stop-and-go bei der Fußgängerbewegung untersucht und beschrieben werden. Dies schließt nicht aus, dass es noch weitere Merkmale des Stop-and-go von Fußgängern im Stau gibt.

Die empirische Datenbasis dieser Arbeit wurde aus Experimenten eindimensionaler Bewegung unter Laborbedingungen gewonnen. Obwohl sie sich auf kontrollierte Durchführungen von Situationen bezieht, die nicht der Realität entsprechen, kann mithilfe dieser Daten Grundlagenforschung betrieben werden. Im Themengebiet der Fußgängerdynamik bedarf es weiterer Forschung, die über die Analysen dieser Arbeit hinaus geht. Dazu kann auch die im Rahmen dieser Arbeit erhobene Datenbasis der Experimente genutzt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] K. Ando, H. Ota und T. Oki. Forecasting the Flow of People (in Japanisch). *Railway Research Review*, 45(8):8–14, 1988.
- [2] Erik Andresen, Mohcine Chraïbi, Armin Seyfried und Felix Huber. Basic Driving Dynamics of Cyclists. In Michael Behrisch, Daniel Krajzewicz und Melanie Weber (Hrsg.): *Simulation of Urban Mobility*, Nummer 8594 in *Lecture Notes in Computer Science*, 18–32. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [3] Cécile Appert-Rolland, Asja Jelić, Pierre Degond, Jérôme Fehrenbach, Jiale Hua, A. Cretual, R. Kulpa, A. Marin, A.-H. Olivier, S. Lemerrier und J. Pettre. Experimental Study of the Following Dynamics of Pedestrians. In Ulrich Weidmann, Uwe Kirsch und Michael Schreckenberg (Hrsg.): *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012*, 305–315. Springer, Berlin, Cham, 2014.
- [4] V. Thamizh Arasan, V. R. Rengaraju und K. V. Krishna Rao. Characteristics of Trips by Foot and Bicycle Modes in Indian City. *Journal of Transportation Engineering*, 120(2):283–294, 1994.
- [5] Maik Boltes. *Automatische Erfassung präziser Trajektorien in Personenströmen hoher Dichte*, Nummer 27 in *Schriften des Forschungszentrums Jülich, IAS Series*. Forschungszentrum Jülich Zentralbibliothek, Jülich, 2015.
- [6] Maik Boltes, Armin Seyfried, Bernhard Steffen und Andreas Schadschneider. Automatic Extraction of Pedestrian Trajectories from Video Recordings. In Wolfram W. F. Klingsch, Christian Rogsch, Andreas Schadschneider und Michael Schreckenberg (Hrsg.): *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, 43–54. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [7] Maik Boltes, Stefan Holl, Antoine Tordeux, Armin Seyfried, Andreas Schadschneider und Ulrich Lang. Influences of Extraction Techniques on the Quality of Measured Quantities of Pedestrian Characteristics. In Weiguo Song, Jian Ma und Libi Fu (Hrsg.): *Proceedings of Pedestrian and Evacuation Dynamics 2016*, Nummer 1 in *Collective Dynamics*, 540–547, 2016.
- [8] Maik Boltes, Jun Zhang, Antoine Tordeux, Andreas Schadschneider und Armin Seyfried. Empirical Results of Pedestrian and Evacuation Dynamics. In Robert A. Meyers (Hrsg.): *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, 706-1. Springer, Berlin, Heidelberg, 2018.
- [9] Marc H. Bornstein. The Pace of Life: Revisited. *International Journal of Psychology*, 14(1-4):83–90, 1979.
- [10] Marc H. Bornstein und Helen G. Bornstein. The pace of life. *Nature*, 259(5544):557–559, 1976.
- [11] Stefan Buchmüller und Ulrich Weidmann. *Parameters of pedestrians, pedestrian traffic and walking facilities*, Nummer 132 in *IVT Schriftenreihe*. Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), ETH Zürich, 2007.
- [12] Bundesbehörden der Schweizerischen Eidgenossenschaft. Verkehrsfluss und Stauaufkommen: Definitionen. Aufgerufen am 08.09.2019, www.astra.admin.ch/astra/de/home/themen/nationalstrassen/verkehrsfluss-stauaufkommen/definitionen.html.
- [13] Shuchao Cao, Jun Zhang, Daniel Salden, Jian Ma, Chang'an Shi und Ruifang Zhang. Pedestrian dynamics in single-file movement of crowd with different age compositions. *Physical Review E*, 94(1):012312, 2016.
- [14] R. L. Carstens und S. L. Ring. Pedestrian capacities of shelter entrances. *Traffic Engineering*, 41:38–43, 1970.
- [15] Ujjal Chattaraj, Armin Seyfried und Partha Chakroborty. Comparison of Pedestrian Fundamental Diagram across Cultures. *Advances in Complex Systems*, 12(3):393–405, 2009.
- [16] Mohcine Chraïbi, Antoine Tordeux, Andreas Schadschneider und Armin Seyfried. Modelling of Pedestrian and Evacuation Dynamics. In Robert A. Meyers (Hrsg.): *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, 705-1. Springer, Berlin, Heidelberg, 2018.
- [17] D. Comaniciu, V. Ramesh und P. Meer. Kernel-based object tracking. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 25(5):564–577, 2003.
- [18] Graham Cookson. INRIX 2017 Global Traffic Scorecard, 2018.
- [19] Winnie Daamen und Serge P. Hoogendoorn. Capacity of doors during evacuation conditions. *Procedia Engineering*, 3:53–66, 2010.

- [20] P. N. Daly, F. McGrath und T. J. Annesley. Pedestrian speed/flow relationships for underground stations. *Traffic Engineering and Control*, 32(2):75–78, 1991.
- [21] Dudenredaktion. *Duden: Die deutsche Rechtschreibung*, Nummer 1 in *Der Duden in zwölf Bänden*. Dudenverlag, Berlin, 27. Auflage, 2017.
- [22] Leslie C. Edie. Car-Following and Steady-State Theory for Noncongested Traffic. *Operations Research*, 9(1):66–76, 1961.
- [23] Christian Eilhardt. *Computer simulation of pedestrian dynamics at high densities*. Dissertation, Universität zu Köln, Köln, 2014.
- [24] Christian Eilhardt und Andreas Schadschneider. Stochastic Headway Dependent Velocity Model for 1d Pedestrian Dynamics at High Densities. *Transportation Research Procedia*, 2:400–405, 2014.
- [25] Christian Eilhardt und Andreas Schadschneider. Stochastic Headway Dependent Velocity Model and Phase Separation in Pedestrian Dynamics. In Mohcine Chraïbi, Maik Boltes, Andreas Schadschneider und Armin Seyfried (Hrsg.): *Traffic and Granular Flow '13*, 281–289. Springer, Cham, 2015.
- [26] K. K. Finnis und D. Walton. Field observations to determine the influence of population size, location and individual factors on pedestrian walking speeds. *Ergonomics*, 51(6):827–842, 2008.
- [27] John J. Fruin. *Designing for Pedestrians: A Level of Service Concept*. Dissertation, Polytechnic University of Brooklyn, Brooklyn, 1970.
- [28] John J. Fruin. *Pedestrian: Planning and Design*. Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, New York, 1971.
- [29] John J. Fruin. *Pedestrian Planning and Design*. Elevator World, überarbeitete Auflage, 1987.
- [30] Angel Garcimartín, Daniel R. Parisi, José M. Pastor, César Martín-Gómez und Iker Zuriguel. Flow of pedestrians through narrow doors with different competitiveness. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2016(4):043402, 2016.
- [31] Gloria P. Gerilla, Kazunori Hokao und Yasushi Takeyama. Proposed level of service standards for walkways in Metro Manila. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 1(3):1041–1060, 1995.
- [32] Bruce Douglas Greenshields. The photographic method of studying traffic behavior. In R. W. Crum (Hrsg.): *Proceedings of the Thirteenth Annual Meeting of the Highway Research Board*, Highway Research Board Proceedings, 382–399. Highway Research Board, Washington, D.C., 1934.
- [33] Bruce Douglas Greenshields. A study of traffic capacity. In R. W. Crum (Hrsg.): *Proceedings of the Fourteenth Annual Meeting of the Highway Research Board*, Highway Research Board Proceedings, 448–477. Highway Research Board, Washington, D.C., 1935.
- [34] R. G. Gupta. Delhi 2010 AD: Cycle—An important mode even after the 20th century. In IIT Dehli (Hrsg.): *Proceedings Int. Conf. on Transportation System Studies*, 625–632, Dehli, Indien, 1986.
- [35] B. D. Hankin und R. A. Wright. Passenger Flow in Subways. *OR*, 9(2):81–88, 1958.
- [36] Dirk Helbing. *Verkehrsdynamik: Neue physikalische Modellierungskonzepte*. Springer, Berlin, 1997.
- [37] L. F. Henderson. The Statistics of Crowd Fluids. *Nature*, 229(5284):381–383, 1971.
- [38] L. F. Henderson und D. J. Lyons. Sexual Differences in Human Crowd Motion. *Nature*, 240(5380):353–355, 1972.
- [39] Adrian Hirn und Christian Weiß. *Analysis - Grundlagen und Exkurse: Grundprinzipien der Differential- und Integralrechnung*. Springer, Berlin, 2017.
- [40] Lester A. Hoel. Pedestrian Travel Rates in Central Business Districts. *Traffic Engineering*, 38:10–13, 1968.
- [41] Stefan Holl. *Methoden für die Bemessung der Leistungsfähigkeit multidirektional genutzter Fußverkehrsanlagen*, Nummer 32 in *Schriften des Forschungszentrums Jülich, IAS Series*. Forschungszentrum Jülich Zentralbibliothek, Jülich, 2016.

- [42] Stefan Holl, Maik Boltes, Mohcine Chraïbi, Daniel Salden und Armin Seyfried. *Verbundprojekt: Bausteine für die Sicherheit von Großveranstaltungen (BaSiGo): Teilvorhaben: Experimentelle Untersuchung und Simulation von Fußgängerbewegungen in großen Menschenmengen: Schlussbericht: Teile 1 und 2*. Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, 2015.
- [43] Kristin J. Hoskin. *Fire Protection and Evacuation Procedures of Stadia Venues in New Zealand*, Nummer 04/4 in *Fire Engineering Research Report*. Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2004.
- [44] Krisitn J. Hoskin und Michael Spearpoint. Crowd characteristics and egress at stadia. In T. J. Shields (Hrsg.): *Proceedings of the 3rd International Symposium on Human Behaviour in Fire*, 367–376. Interscience Communications, London, 2004.
- [45] Yumihiko S. Ikura, Eric Heisler, Akinori Awazu, Hiraku Nishimori und Satoshi Nakata. Collective motion of symmetric camphor papers in an annular water channel. *Physical Review E*, 88(1):012911, 2013.
- [46] Albrecht Irlle. *Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik: Grundlagen - Resultate - Anwendungen*. Teubner, Stuttgart, 2001.
- [47] Motoshige Isobe, Taku Adachi und Takashi Nagatani. Experiment and simulation of pedestrian counter flow. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 336(3-4):638–650, 2004.
- [48] Asja Jelić, Cécile Appert-Rolland, Samuel Lemerrier und Julien Pettré. Properties of pedestrians walking in line: Fundamental diagrams. *Physical Review E*, 85(3):036111, 2012.
- [49] Asja Jelić, Cécile Appert-Rolland, Samuel Lemerrier und Julien Pettré. Properties of pedestrians walking in line. II. Stepping behavior. *Physical Review E*, 86(4):046111, 2012.
- [50] Keijin Kamino. *People's Movement and Town Design*, Shōkokusha, Japan, 1980.
- [51] Helmut Kirsch. *Leistungsfähigkeit und Dimensionierung von Fußgängerüberwegen*, Nummer 33 in *Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*. Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau, Bonn, 1964.
- [52] Richard Knoblauch, Martin Pietrucha und Marsha Nitzburg. Field Studies of Pedestrian Walking Speed and Start-Up Time. *Transportation Research Record*, 1538:27–38, 1996.
- [53] Hermann Knoflacher. *Fussgeher- und Fahrradverkehr: Planungsprinzipien*. Böhlau, Wien, 1995.
- [54] Parviz Amir Koushki. Walking Characteristics in Central Riyadh, Saudi Arabia. *Journal of Transportation Engineering*, 114(6):735–744, 1988.
- [55] Parviz Amir Koushki und Syed Ashik Ali. Pedestrian characteristics and the promotion of walking in Kuwait City Center. *Transportation Research Record*, 1396:30–33, 1993.
- [56] William H. K. Lam und Chung-yu Cheung. Pedestrian Speed/Flow Relationships for Walking Facilities in Hong Kong. *Journal of Transportation Engineering*, 126(4):343–349, 2000.
- [57] William H. K. Lam, John F. Morrall und Herbert Ho. Pedestrian flow characteristics in Hong Kong. *Transportation Research Record*, 1487:56–62, 1995.
- [58] William H. K. Lam, Jodie Y. S. Lee, Kevin S. Chan und P. K. Goh. A generalised function for modeling bi-directional flow effects on indoor walkways in Hong Kong. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 37(9):789–810, 2003.
- [59] Kotkar Kishor Laxman, Rajat Rastogi und Satish Chandra. Pedestrian Flow Characteristics in Mixed Traffic Conditions. *Journal of Urban Planning and Development*, 136(1):23–33, 2010.
- [60] Samuel Lemerrier, Asja Jelić, R. Kulpa, Jiale Hua, Jérôme Fehrenbach, Pierre Degond, Cécile Appert-Rolland, Stéphane Donikian, und Julien Pettré. Realistic following behaviors for crowd simulation. *Computer Graphics Forum*, 31(2pt2):489–498, 2012.
- [61] Weichen Liao, Antoine Tordeux, Armin Seyfried, Mohcine Chraïbi, Kevin Drzycimski, Xiaoping Zheng und Ying Zhao. Measuring the steady state of pedestrian flow in bottleneck experiments. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 461:248–261, 2016.
- [62] Xuan Liu, Weiguo Song und Jun Zhang. Extraction and quantitative analysis of microscopic evacuation characteristics based on digital image processing. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 388(13):2717–2726, 2009.

- [63] Janine Lukowski. *Einfluss der Motivation auf das Fundamentaldiagramm der Fußgängerbewegung entlang einer Linie*. Masterarbeit, Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, 2009.
- [64] Masamitsu Mōri und Hiroshi Tsukaguchi. A new method for evaluation of level of service in pedestrian facilities. *Transportation Research Part A: General*, 21(3):223–234, 1987.
- [65] Imran Md. Nazir, Sajal Kumar Adhikary, Quazi Sazzad Hossain und Syed Ashik Ali. Pedestrian Flow Characteristics in Khulna Metropolitan City, Bangladesh. *Journal of Engineering Science*, 03(1):25–31, 2012.
- [66] Wolfgang Mehner, Maik Boltz, Markus Mathias und Bastian Leibe. Robust Marker-Based Tracking for Measuring Crowd Dynamics. In Lazaros Nalpantidis, Volker Krüger, Jan-Olof Eklundh und Antonios Gasteratos (Hrsg.): *Computer Vision Systems*, Nummer 9163 in *Lecture Notes in Computer Science*, 445–455. Springer, Cham, 2015.
- [67] Alexander Mintz. Non-adaptive group behavior. *The Journal of Abnormal and Social Psychology*, 46(2):150–159, 1951.
- [68] John F. Morrall, L. L. Ratnayake und P. N. Seneviratne. Comparison of Central Business District Pedestrian Characteristics in Canada and Sri Lanka. *Transportation Research Record*, 1294:57–61, 1991.
- [69] Paul Heinz Müller (Hrsg.). *Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathematische Statistik: Lexikon der Stochastik*. Akademie Verlag, Berlin, 5. Auflage, 1991.
- [70] Akihiro Nakayama, Minoru Fukui, Macoto Kikuchi, Katsuya Hasebe, Katsuhiro Nishinari, Yuki Sugiyama, Shin-ichi Tadaki und Satoshi Yukawa. Metastability in the formation of an experimental traffic jam. *New Journal of Physics*, 11(8):083025, 2009.
- [71] Francis P. D. Navin und Robert J. Wheeler. Pedestrian Flow Characteristics. *Traffic Engineering*, 39:30–33, 36, 1969.
- [72] Harold Edward Hughes Nelson und Frederick W. Mowrer. Emergency Movement. In Philip J. Di-
Nenno (Hrsg.): *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3-367–3-380. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 3. Auflage, 2002.
- [73] Gordon Frank Newell. A simplified car-following theory: a lower order model. *Transportation Research Part B: Methodological*, 36(3):195–205, 2002.
- [74] Detlef Oeding. *Verkehrsbelastung und Dimensionierung von Gehwegen und anderen Anlagen des Fußgängerverkehrs*, Nummer 22 in *Forschung Strassenbau und Strassenwerkertechnik*. Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau, Bonn, 1963.
- [75] C. A. O’Flaherty und M. H. Parkinson. Movement on a city centre footway. *Traffic Engineering and Control*, 13:434–438, 1972.
- [76] S. J. Older. Movement of pedestrians on footways in shopping streets. *Traffic Engineering and Control*, 10:160–163, 1968.
- [77] Jake L. Pauls. Effective-width model for evacuation flow in buildings. In *Proceedings, Engineering Applications Workshop*, 215–232. Society of Fire Protection Engineers, Boston, 1980.
- [78] Jake L. Pauls. Calculating evacuation times for tall buildings. *Fire Safety Journal*, 12(3):213–236, 1987.
- [79] PIARC. PIARC Road Dictionary. Aufgerufen am 08.09.2019, www.piarc.org.
- [80] E. P. Poesi, Y. Hanzawa und S. Koyama. Pedestrian flow analysis at Yogyakarta, Indonesia. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, 18(1):131–134, 1995.
- [81] Abishai Polus, Joseph L. Schofer und Ariela Ushpiz. Pedestrian Flow and Level of Service. *Journal of Transportation Engineering*, 109(1):46–56, 1983.
- [82] Andrea Portz und Armin Seyfried. Modeling Stop-and-Go Waves in Pedestrian Dynamics. In Roman Wyrzykowski, Jack Dongarra, Konrad Karczewski und Jerzy Wasniewski (Hrsg.): *Parallel Processing and Applied Mathematics*, Nummer 6068 in *Lecture Notes in Computer Science*, 561–568. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [83] Andrea Portz und Armin Seyfried. Analyzing Stop-and-Go Waves by Experiment and Modeling. In Richard D. Peacock, Erica D. Kuligowski und Jason D. Averill (Hrsg.): *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, 577–586. Springer, Boston, MA, 2011.

- [84] Wsewolod Michailowitsch Predtechenski und Anatoli Iwanowitsch Milinski. *Planning for foot traffic flow in buildings*. Aus dem russischen übersetzt von M. M. Sivaramakrishnan. Amerind Publishing, New Dehli, 1978.
- [85] Wsewolod Michailowitsch Predtetschenski und Anatoli Iwanowitsch Milinski. *Personenströme in Gebäuden: Berechnungsmethoden für die Projektierung: (PROEKTIROVANIE EDANII S UTSETOM ORGANIEATSII DVIZHENIYA LYUDSKIKH PROTOKOV, DT.)*. Aus dem russischen übersetzt von Frieder Werner u.a. Köln-Braunsfeld, Rudolf Müller 1971. 317 S. ILL. Staatsverlag der DDR, Berlin, 1971.
- [86] Boris Pushkarev und Jeffrey M. Zupan. Capacity of walkways. *Transportation Research Record*, 538: 1–15, 1975.
- [87] Kurt Reimer. Die Bewegung der Menschenmassen in Verkehrsräumen. *Glaser's Annalen*, 71(7):121–131, 1947.
- [88] Kurt Reimer. Bewegungsvorgänge auf Bahnsteigen des großstädtischen Schnellverkehrs, 1953. *Glaser's Annalen*, 77(11):338–341, 1953.
- [89] Christian Rogsch. Start Waves and Pedestrian Movement– An Experimental Study. In Wolfram W. F. Klingsch, Christian Rogsch, Andreas Schadschneider und Michael Schreckenberg (Hrsg.): *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, 247–248. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [90] Gerhard Scholz. *Geschwindigkeit und Energieaufwand beim Gehen: Ein Beitrag zur Untersuchung der Grundlagen für die zweckmäßige Gestaltung von Fußgängerverkehrsanlagen*. Dissertation, Technische Hochschule Hannover, Hannover, 1952.
- [91] Christoph Schwietering. *Verfahren zur Bestimmung der Einbruchswahrscheinlichkeit des Verkehrsablaufs auf Autobahnen und Anwendung in der Verkehrssteuerung*, Nummer 54 in *Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau*. ISAC, Aachen, 2010.
- [92] Armin Seyfried und Maik Boltes. Pedestrian Dynamics Data Archive. Aufgerufen am 08.09.2019, ped.fz-juelich.de/database.
- [93] Armin Seyfried und Andreas Schadschneider. Empirical Results for Pedestrian Dynamics at Bottlenecks. In Roman Wyrzykowski, Jack Dongarra, Konrad Karczewski und Jerzy Wasniewski (Hrsg.): *Parallel Processing and Applied Mathematics*, Nummer 6068 in *Lecture Notes in Computer Science*, 575–584. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [94] Armin Seyfried, Bernhard Steffen, Wolfram W. F. Klingsch und Maik Boltes. The fundamental diagram of pedestrian movement revisited. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2005(10): P10002, 2005.
- [95] Armin Seyfried, Bernhard Steffen und Thomas Lippert. Basics of modelling the pedestrian flow. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 368(1):232–238, 2006.
- [96] Armin Seyfried, Maik Boltes, Jens Kähler, Wolfram W. F. Klingsch, Andrea Portz, Tobias Rupprecht, Andreas Schadschneider, Bernhard Steffen und Andreas Winkens. Enhanced Empirical Data for the Fundamental Diagram and the Flow Through Bottlenecks. In Wolfram W. F. Klingsch, Christian Rogsch, Andreas Schadschneider und Michael Schreckenberg (Hrsg.): *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, 145–156. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [97] Armin Seyfried, Andrea Portz und Andreas Schadschneider. Phase Coexistence in Congested States of Pedestrian Dynamics. In Stefania Bandini, Sara Manzoni, Hiroshi Umeo und Giuseppe Vizzari (Hrsg.): *Cellular Automata*, Nummer 6350 in *Lecture Notes in Computer Science*, 496–505. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [98] R. A. Smith. Density, velocity and flow relationships for closely packed crowds. *Safety Science*, 18(4): 321–327, 1995.
- [99] Weiguo Song, Wei Lv und Zhiming Fang. Experiment and Modeling of Microscopic Movement Characteristic of Pedestrians. *Procedia Engineering*, 62:56–70, 2013.
- [100] Bernhard Steffen und Armin Seyfried. Methods for measuring pedestrian density, flow, speed and direction with minimal scatter. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 389(9):1902–1910, 2010.
- [101] Yuki Sugiyama, Minoru Fukui, Macoto Kikuchi, Katsuya Hasebe, Akihiro Nakayama, Katsuhiko Nishinari, Shin-ichi Tadaki und Satoshi Yukawa. Traffic jams without bottlenecks—experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam. *New Journal of Physics*, 10(3):033001, 2008.

- [102] Yordphol Tanaboriboon und Jocelyn A. Guyano. Level of service standards for pedestrian facilities in Bangkok: A case study. *ITE Journal*, 59(11):39–41, 1989.
- [103] Yordphol Tanaboriboon und Jocelyn A. Guyano. Analysis of Pedestrian Movements in Bangkok. *Transportation Research Record*, 1294:52–56, 1991.
- [104] Yordphol Tanaboriboon, Sim Siang Hwa und Chin Hoong Chor. Pedestrian Characteristics Study in Singapore. *Journal of Transportation Engineering*, 112(3):229–235, 1986.
- [105] Mohammed S. Tarawneh. Evaluation of pedestrian speed in Jordan with investigation of some contributing factors. *Journal of Safety Research*, 32(2):229–236, 2001.
- [106] Kardi Teknomo. *Microscopic Pedestrian Flow Characteristics: Development of an Image Processing Data Collection and Simulation Model*. Dissertation, Tohoku University, Japan, 2002.
- [107] Akiyasu Tomoeda, Daichi Yanagisawa und Katsuhiro Nishinari. Analysis on the Propagation Speed of Pedestrian Reaction: Velocity of Starting Wave and Stopping Wave. In Wolfram W. F. Klingsch, Christian Rogsch, Andreas Schadschneider und Michael Schreckenberg (Hrsg.): *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, 285–290. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [108] Akiyasu Tomoeda, Daichi Yanagisawa, Takashi Imamura und Katsuhiro Nishinari. Propagation speed of a starting wave in a queue of pedestrians. *Physical Review E*, 86(3):036113, 2012.
- [109] Martin Treiber und Arne Kesting. *Verkehrsdynamik und -simulation: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik*. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [110] Frank Stephen Powell Turner. Preliminary planning for a new tube railway across London. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 12(1):19–38, 1959.
- [111] D. J. Victor. Pedestrian traffic management in Indian cities: Presented at 5th World Conf. on Transportation Research, 1989.
- [112] Mark R. Virkler und Sathish Elayadath. Pedestrian Speed-Flow-Density Relationships. *Transportation Research Record*, 1438:51–58, 1994.
- [113] Cornelia von Krüchten und Andreas Schadschneider. Empirical study on social groups in pedestrian evacuation dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 475:129–141, 2017.
- [114] Cornelia von Krüchten, Frank Müller und Andreas Schadschneider. Influence of Social Groups in Evacuation Scenarios: Model Predictions and Empirical Studies. In Weiguo Song, Jian Ma und Libi Fu (Hrsg.): *Proceedings of Pedestrian and Evacuation Dynamics 2016*, Nummer 1 in *Collective Dynamics*, 113–118, 2016.
- [115] Cornelia von Krüchten, Frank Müller, Anton Svachiy, Oliver Wohak und Andreas Schadschneider. Empirical Study of the Influence of Social Groups in Evacuation Scenarios. In Victor L. Knoop und Winnie Daamen (Hrsg.): *Traffic and Granular Flow '15*, 65–72. Springer, Cham, 2016.
- [116] Georges Voronoi. Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques. Premier mémoire. Sur quelques propriétés des formes quadratiques positives parfaites. *Journal für die reine und angewandte Mathematik (Crelle's Journal)*, 1908(133):97–178, 1908.
- [117] Georges Voronoi. Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques. Deuxième mémoire. Recherches sur les paralléloèdres primitifs. *Journal für die reine und angewandte Mathematik (Crelle's Journal)*, 1908(134):198–287, 1908.
- [118] Ulrich Weidmann. *Transporttechnik der Fussgänger: Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs (Literaturauswertung)*, Nummer 90 in *Schriftreihe des IVT*. ETH Zürich, IVT, Zürich, 2. Auflage, 1993.
- [119] Joachim Westphal. *Untersuchung von Fussgänerbewegungen auf Bahnhöfen mit starkem Nahverkehr*. Dissertation, Technische Universität Hannover, Hannover, 1971.
- [120] Andreas Winkens, Wolfram W. F. Klingsch und Armin Seyfried. New Data for Human Performance in Planar Corridors. In Richard D. Peacock, Erica D. Kuligowski und Jason D. Averill (Hrsg.): *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, 61–70. Springer, Boston, MA, 2011.
- [121] Daichi Yanagisawa, Akiyasu Tomoeda und Katsuhiro Nishinari. Improvement of pedestrian flow by slow rhythm. *Physical Review E*, 85(1):016111, 2012.

- [122] Seth Young. Evaluation of Pedestrian Walking Speeds in Airport Terminals. *Transportation Research Record*, 1674:20–26, 1999.
- [123] Min Fang Yu. *Level of service design standards for non-motorized transport in Shanghai, China*. Masterarbeit, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1993.
- [124] Eberhard Zeidler. *Springer-Taschenbuch der Mathematik: Begründet von I.N. Bronstein und K.A. Semendjaew Weitergeführt von G. Grosche, V. Ziegler und D. Ziegler Herausgegeben von E. Zeidler*. Springer Spektrum, Wiesbaden, 3. Auflage, 2013.
- [125] Jun Zhang und Armin Seyfried. Comparison of intersecting pedestrian flows based on experiments. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 405:316–325, 2014.
- [126] Jun Zhang, Wolfgang Mehner, Erik Andresen, Stefan Holl, Maik Boltes, Andreas Schadschneider und Armin Seyfried. Comparative Analysis of Pedestrian, Bicycle and Car Traffic Moving in Circuits. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104:1130–1138, 2013.
- [127] Jun Zhang, Wolfgang Mehner, Stefan Holl, Maik Boltes, Erik Andresen, Andreas Schadschneider und Armin Seyfried. Universal flow-density relation of single-file bicycle, pedestrian and car motion. *Physics Letters A*, 378(44):3274–3277, 2014.
- [128] Jun Zhang, Antoine Tordeux und Armin Seyfried. Effects of Boundary Conditions on Single-File Pedestrian Flow. In Jarosław Waś, Georgios Ch Sirakoulis und Stefania Bandini (Hrsg.): *Cellular Automata*, Nummer 8751 in *Lecture Notes in Computer Science*, 462–469. Springer, Cham, 2014.
- [129] Jun Zhang, Shuchao Cao, Daniel Salden und Jian Ma. Homogeneity and Activeness of Crowd on Aged Pedestrian Dynamics. *Procedia Computer Science*, 83:361–368, 2016.
- [130] Benjamin Zielke, Robert Bertini und Martin Treiber. Empirical Measurement of Freeway Oscillation Characteristics: An International Comparison. *Transportation Research Record*, 2088:57–67, 2008.
- [131] Annette Zwahr. *Emas - Fasy*, Nummer 8 in *Brockhaus: Enzyklopädie in 30 Bänden*. F.A. Brockhaus GmbH, Leipzig, 21. Auflage, 2006.

A Anhang

A.1 Experimente

Experiment 4

Probanden und Bedingungen: Im Rahmen eines Schul-Projekttags wurden am 30.04.2015 am Wilhelm-Dörpfeld-Gymnasium (WDG) in Wuppertal zwei Laborexperimente durchgeführt.⁷⁴ Der Projekttag begann um 7:40 Uhr und endete um 14:00 Uhr. Nach dem ersten Experiment, welches im Rahmen dieser Arbeit geplant und durchgeführt wurde, gab es von 12:10 Uhr bis 13:00 Uhr eine Pause, in welcher die ersten beiden Parcours abgebaut und ein dritter für das zweite Experiment aufgebaut wurde, das in dieser Arbeit nicht weiter behandelt wird.⁷⁵

Im untersuchten Experiment gab es drei Versuchsreihen (WDG-6, WDG-11 und WDG-6+11) mit drei Kombinationen von zwei unterschiedlichen Probandengruppen. Während bei der ersten Versuchsreihe nur Schüler der Jahrgangsstufe sechs und bei der zweiten nur Schüler der Jahrgangsstufen zehn und elf teilnahmen, stellte die Vereinigung beider Gruppen die Probandengruppe der dritten Versuchsreihe dar. Die Schüler von den Versuchsreihen WDG-6 und WDG-11 besaßen eine durchschnittliche Körpergröße von $1,59 \text{ m} \pm 0,07 \text{ m}$ und $1,76 \text{ m} \pm 0,07 \text{ m}$. Abb. A.1 zeigt die Größenverteilung für beide Versuchsreihen.

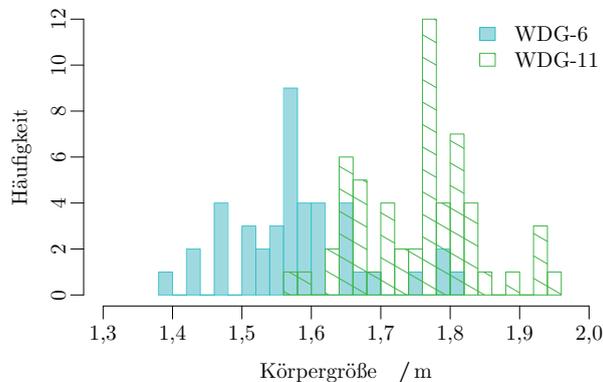


Abb. A.1: Körpergrößenverteilung, Experiment 4.

Die Experimentteilnahme fand im Klassenverband statt und der reguläre Schulunterricht entfiel. In einem vorbereitenden Unterricht wurden die Schüler für das richtige Verhalten in

⁷⁴ Der Projekttag fand im Rahmen des DFG-Projekts „Quantitative Beschreibung der Staubbildung in Fußgängerströmen“ mit der Projektnummer SCHA 636/9-1 durchgeführt. Die Videos und Trajektorien der Experimente des Projekts sind auf der Internetseite von Seyfried und Boltes [92] verfügbar.

⁷⁵ Für eine Analyse des zweiten Experiments wird auf Von Krüchten und Schadschneider [113] verwiesen.

Menschenansammlungen sensibilisiert. In Gruppenarbeiten befasste sich die sechste Klasse mit Personenfluss und Gedränge. Sie stoppten Zeiten und führten das Experiment von Mintz⁷⁶ und Dichteexperimente mit einem Rahmen der Größe eines Quadratmeters durch. Die zehnte und elfte Klasse arbeiteten im Computerraum mit einer Fußgängersimulationssoftware. Den Schülern wurde mitgeteilt, dass die ermittelten Daten unter anderem den Forschungszwecken dienen werden.

Aufbau: Das Experiment fand in der Aula der Schule statt. Wie bei Experiment 3 wurden zwei ovale Parcours mit identischen Abmaßen aufgestellt sowie ein Wartebereich für momentan nicht aktive Probanden am Rand der Aula definiert.⁷⁷ Der Wartebereich und die beiden Parcours wurden mit einem schwarzen Klebeband auf dem Boden markiert. Zusätzlich wurden umgedrehte schwarze Kunststoffmülleimer im Abstand von 0,66 m neben der Markierung im Inneren des Ovals entlang des zu begehenden Korridors gestellt. In der Mitte des Ovals wurden drei 1,40 m breite Trennwände in einem Zickzack aufgestellt. Außerdem standen als Sichtschutz zwischen beiden Parcours fünf weitere Trennwände, die eine Beeinflussung der Probanden untereinander verhindern sollten. Das Deckenlicht der Aula und die mit Vorhängen verdunkelten Fenster sorgten für gleich bleibende Lichtverhältnisse während des gesamten Experiments. Der Parcours, der näher zur Bühne in der Aula aufgebaut war, wird im Folgenden Hauptoval genannt. In ihm liefen die Probanden im mathematisch positiven Sinn. Der zweite Parcours, das Nebenoval, hatte eine negative Umlaufrichtung.

Kamera: Analog zu Experiment 3 wurde über jeden Parcours an der Decke der Schulaula eine Digitalkamera befestigt. Jeder dieser Kameras filmte während des ganzen Projekttags jeweils den entsprechenden Parcours. Mithilfe der Software PeTrack konnten anschließend aus den Videoaufzeichnungen die Probanden einzeln erkannt und individuelle Ort-Zeit-Kurven erstellt werden. Hierbei wird der Kopf einer Person erkannt. Die entstehenden Daten beziehen sich somit immer auf den Ort des Kopfes.

Für die Erkennung einer Person mit der Software trugen die Probanden analog zu Experiment 3 einfarbige Mützen mit einem schwarzen Punkt (Durchmesser circa 4 cm) in der Mitte der Mützenoberseite. PeTrack erkennt die einfarbige Mütze und berechnet mithilfe des Winkels zur Bildmitte den am Kopf höchsten befindlichen Bildpunkt. Neben der Erkennung des Kopfs auf dem Videobild benötigt PeTrack für die Berechnung des Orts einer Person deren Körpergröße, die im Vorfeld gemessen wurde.

Analog zu Experiment 3 wurden für eine exaktere Ortsberechnung je Versuchsreihe aus den gemessenen Körpergrößen fünf gleich große Intervalle gebildet, denen je in aufsteigender Weise die Farben pink, orange, gelb, grün und blau zugeordnet wurden, siehe Tab. A.1. So zieht ein Proband der Körpergröße 1,72 m in Versuchsreihe WDG-6 eine pinke Mütze an, während er in WDG-6+11 eine gelbe Mütze trägt. Bei einem Mützenwechsel wurde eine neue, noch ungetragene Mütze ausgeteilt. Die Größe, auf die PeTrack bei der Ortsberechnung einer Person zurückgreift, ist in Tab. A.1 in den letzten drei Spalten eingetragen. Dieser Wert entspricht dem Mittelwert aller Körpergrößen aus der entsprechenden Größengruppe. Deswegen sind die Werte nicht äquidistant.

⁷⁶ Zum Experiment von Mintz wird auf Mintz [67] verwiesen.

⁷⁷ Die Maße des Parcours werden in Abschnitt 3.2.1 genannt.

Tab. A.1: Zuordnung der Mützenfarbe und ihre Körpergröße, Experiment 4.

Körpergrößenintervall in m			Farbe	Mittelwerte der Körpergrößen in m		
WDG-6	WDG-11	WDG-6+11		WDG-6	WDG-11	WDG-6+11
[1,38; 1,46]	[1,56; 1,64]	[1,38; 1,49]	pink	1,420	1,608	1,451
[1,46; 1,55]	[1,64; 1,72]	[1,49; 1,61]	orange	1,501	1,679	1,566
[1,55; 1,63]	[1,72; 1,80]	[1,61; 1,72]	gelb	1,587	1,775	1,664
[1,63; 1,72]	[1,80; 1,88]	[1,72; 1,84]	grün	1,663	1,824	1,793
[1,72; 1,81]	[1,88; 1,96]	[1,84; 1,96]	blau	1,805	1,930	1,917

Neben den Kameras an der Decke wurden mit einer weiteren Digitalkamera Videoaufnahmen von der Seite gemacht. Diese Aufzeichnungen dienen z. B. der Erkennung des Geschlechts, wurden bei der Datenerhebung für diese Arbeit jedoch nicht verwendet.

Ablauf: In Tab. A.5 ist die Anzahl der Probanden und die globale Dichte je Durchlauf aufgelistet. Jede Versuchsreihe dauerte ungefähr 60 Minuten und entsprach damit einer Schulstunde an dieser Schule.

Zu Beginn der Schulstunde wurden im Vorraum der Aula die fehlenden Körpergrößen von Probanden gemessen, die Mützen ausgeteilt bzw. getauscht und jedem Probanden eine eindeutige Teilnehmernummer zugewiesen. Für die Bestimmung der freien Gehgeschwindigkeit wurde im Hauptoval bei den ersten beiden Versuchsreihen jeweils der erste und letzte Durchlauf gewählt. Zu Beginn der Unterrichtsstunde, d. h. nach dem Betreten der Aula wurden die Probanden gebeten, einzeln das Hauptoval zu durchgehen. Am Ende der Versuchsreihe gingen sie wieder einzeln durch den Parcours.

Pro Durchlauf gibt es für jeden Probanden wie bei Experiment 3 drei verschiedene Aktivitätsmöglichkeiten: im Hauptoval mitgehen, im Nebenoval mitgehen oder auf der Wartefläche stehen. Vor dem Experiment wurden für jeden Durchlauf entsprechend der Probandenanzahl in Tab. A.5 viele Teilnehmer-Nummern zufällig ausgewählt. Die entsprechenden Nummern wurden für jeden Durchlauf auf drei Listen festgehalten. Bei Versuchsreihe WDG-6+11 nahmen die unterschiedlichen Probandengruppen im Verhältnis 1:1 teil. Analog zu Experiment 3 wurden zu Beginn eines Durchlaufs die beiden kürzesten Zufallslisten des Durchlaufs über die örtliche Lautsprecheranlage vorgelesen, woraufhin sich die Probanden mit entsprechender Teilnehmer-Nummer zum jeweiligen Ort begaben. Es wurde darauf geachtet, dass sie in jedem Oval möglichst gleichverteilt aufgestellt waren. Über ein Kommando wurden die Schüler zum Losgehen aufgefordert. Nach einem zweiten Kommando wurde das Oval geöffnet, indem die Kunststoffeimer an einer bestimmten Stelle zur Seite geschoben wurden. Die Probanden konnten in Laufrichtung den Parcours verlassen und zum Wartebereich gehen.

Vor allen Versuchsreihen wurde der Raum gelüftet. Anschließend wurden die Vorhänge wieder zugezogen. Die Durchläufe 3_1_07 und 3_1_08 von Versuchsreihe WDG-6 und 3_2_08, 3_2_09 und 3_2_09b von Versuchsreihe WDG-11 sind sogenannte Schüleridee-Durchläufe. Nach Befragung der Schüler, wie sie trotz hoher Dichte schneller den Parcours durchlaufen könnten, setzten diese ihre Ideen, wie im Gleichschritt laufen oder sich an der Schulter des Vordermanns festhalten, direkt um. Sie werden in dieser Arbeit nicht analysiert.

Tabellen

Tab. A.2: Übersicht der Durchläufe, Experiment 1. Die globale Dichte, für $N = 1$ auf 0 gesetzt, hat die Einheit Pers./m. In Klammern gesetzt ist die Anzahl der Wiederholungen mit unterschiedlichen Probanden.

VR	Durchlauf	N	ρ_{gl}
BUW-n	normal_0	1 (43)	0,00
	normal_1	15	0,85
	normal_2	20	1,13
	normal_3	25	1,42
	normal_4	30	1,70
	normal_5	34	1,93
	normal_6	37	2,10
	normal_7	40	2,27
BUW-m	eile_0	1 (43)	0,00
	eile_1	15	0,85
	eile_2	20	1,13
	eile_3	25	1,42
	eile_4	30	1,70
	eile_5	34	1,93
	eile_6	37	2,10
	eile_7	40	2,27

Tab. A.3: Übersicht der Durchläufe, Experiment 2. Die globale Dichte hat die Einheit Pers./m.

VR	Startuhrzeit	Durchlauf	N	ρ_{gl}
Basigo-ID	15:20:53	1D_PHAS_SEP_1	15	0,56
	15:22:01	1D_PHAS_SEP_2	30	1,12
	15:23:40	1D_PHAS_SEP_3	47	1,75
	15:26:08	1D_PHAS_SEP_4	55	2,05
	15:29:45	1D_PHAS_SEP_5	52	1,94
	15:32:26	1D_PHAS_SEP_6	59	2,20

Tab. A.4: Übersicht der Durchläufe, Experiment 3. Die globale Dichte, für $N = 1$ auf 0 gesetzt, hat die Einheit Pers./m. In Klammern gesetzt ist die Anzahl der Wiederholungen mit unterschiedlichen Probanden. -: Oval leerstehend, grau: Schüleridee-Durchlauf, wird nicht ausgewertet, *: keine Daten wegen Kameraausfall.

VR	Start- uhrzeit	Hauptoval			Nebenoval		
		Durchlauf	N	ρ_{gl}	Durchlauf	N	ρ_{gl}
GBS-5	09:11	1_1_00	1 (58)	0,00	–	–	–
	09:24	1_1_01	17	1,02	2_1_01	25	1,50
	09:28	1_1_02	51	3,07	2_1_02	6	0,36
	09:34	1_1_03	41	2,47	–	–	–
	09:40	1_1_04	33	1,99	2_1_04	12	0,72
	09:45	1_1_05	11	0,66	2_1_05	36	2,17
	09:51	1_1_06	25	1,50	2_1_06	17	1,02
	09:56	1_1_07	28	1,68	2_1_07	29	1,74
	09:59	1_1_08	29	1,74	2_1_08	28	1,68
	10:04	1_1_09	1 (29)	0,00	2_1_09	1 (28)	0,00

VR	Start- uhrzeit	Hauptoval			Nebenoval		
		Durchlauf	N	ρ_{gl}	Durchlauf	N	ρ_{gl}
GBS-11	10:28	1_2_00	1 (36)	0,00	–	–	–
	10:44	1_2_01	15	0,90	2_2_01	22	1,32
	10:48	1_2_02	40	2,41	2_2_02	6	0,36
	10:52	1_2_03	6	0,36	2_2_03	40	2,41
	10:56	1_2_04	34	2,05	2_2_04	10	0,60
	11:01	1_2_05	13	0,78	2_2_05	30	1,80
	11:06	1_2_06	24	1,44	2_2_06*	16*	0,96*
	11:10	1_2_07	16	0,96	2_2_07*	22*	1,32*
	11:15	1_2_08	25	1,50	2_2_08*	21*	1,26*
GBS-5+11	11:58	1_3_01	16	0,96	2_3_01	34	2,05
	12:07	1_3_02	43	2,59	2_3_02	12	0,72
	12:13	1_3_03	47	2,83	2_3_03	6	0,36
	12:21	1_3_04	6	0,36	2_3_04	48	2,89
	12:27	1_3_05	34	2,05	2_3_05	16	0,96
	12:34	1_3_06	12	0,72	2_3_06	34	2,05
	12:39	1_3_07	26	1,56	2_3_07	24	1,44
	12:41	1_3_08 ⁷⁸	1 (40)	0,00	2_3_08 ⁷⁹	1 (47)	0,00

Tab. A.5: Übersicht der Durchläufe, Experiment 4. Die globale Dichte, für $N = 1$ auf 0 gesetzt, hat die Einheit Pers./m. In Klammern gesetzt ist die Anzahl der Wiederholungen mit unterschiedlichen Probanden. –: Oval leerstehend, grau: Schüleridee-Durchlauf, wird nicht ausgewertet.

VR	Hauptoval			Nebenoval		
	Durchlauf	N	ρ_{gl}	Durchlauf	N	ρ_{gl}
WDG-6	3_1_00	1 (39)	0,00	–	–	–
	3_1_01	16	0,96	4_1_01	21	1,26
	3_1_02	39	2,35	–	–	–
	3_1_03	29	1,74	4_1_03	10	0,60
	3_1_04	6	0,36	4_1_04	33	1,99
	3_1_05	25	1,50	4_1_05	12	0,72
	3_1_06	11	0,66	4_1_06	28	1,68
	3_1_07	39	2,35	–	–	–
	3_1_08	39	2,35	–	–	–
	3_1_09	32	1,92	4_1_09	7	0,42
	3_1_10	16	0,96	4_1_10	21	1,26
3_1_11	1 (39)	0,00	–	–	–	
WDG-11	3_2_00	1 (53)	0,00	–	–	–
	3_2_01	17	1,02	4_2_01	24	1,44
	3_2_02	43	2,59	4_2_02	10	0,60
	3_2_03	15	0,90	4_2_03	38	2,29
	3_2_04	6	0,36	4_2_04	42	2,53
	3_2_05	36	2,17	4_2_05	12	0,72
	3_2_06	12	0,72	4_2_06	40	2,41
	3_2_07	25	1,50	4_2_07	16	0,96
3_2_08	39	2,35	–	–	–	

⁷⁸ Dieser Durchlauf wird zu Versuchsreihe GBS-11 gezählt.

⁷⁹ Dieser Durchlauf wird zu Versuchsreihe GBS-5 gezählt.

VR	Hauptoval			Nebenoval		
	Durchlauf	N	ρ_{gl}	Durchlauf	N	ρ_{gl}
WDG-11	3_2_09	39	2,35	–	–	–
	3_2_09b	39	2,35	–	–	–
	3_2_10	16	0,96	4_2_10	24	1,44
	3_2_11	1 (53)	0,00	–	–	–
WDG-6+11	3_3_01	15	0,90	4_3_01	35	2,11
	3_3_02	37	2,23	4_3_02	10	0,60
	3_3_03	44	2,65	4_3_03	6	0,36
	3_3_04	6	0,36	4_3_04	41	2,47
	3_3_05	33	1,99	4_3_05	16	0,96
	3_3_06	15	0,90	4_3_06	33	1,99
	3_3_07	23	1,38	4_3_07	23	1,38

Tab. A.6: Zeiträume der Durchläufe und des quasi stationären Zustands, Experiment 1. Die Videos wurden mit einer Bildwiederholrate von 25 Bilder pro Sekunde aufgezeichnet.

Durchlauf	Original		quasi stationärer Zustand	
	erstes Bild	letztes Bild	erstes Bild	letztes Bild
normal_0	275	7078	–	–
normal_1	0	2246	500	1750
normal_2	0	3127	500	2000
normal_3	0	3854	500	2750
normal_4	0	4519	750	3000
normal_5	0	4264	500	3000
normal_6	0	4581	500	3000
normal_7	0	5369	750	3500
eile_0	157	4599	–	–
eile_1	0	1808	250	1500
eile_2	0	1736	250	1500
eile_3	0	2248	375	1625
eile_4	0	3276	250	2500
eile_5	0	3141	500	2250
eile_6	0	3090	250	2250
eile_7	0	3354	500	2000

Tab. A.7: Zeiträume der Durchläufe und des quasi stationären Zustands, Experiment 2. Die Videos wurden mit einer Bildwiederholrate von 16 Bilder pro Sekunde aufgezeichnet.

Durchlauf	Original		quasi stationärer Zustand	
	erstes Bild	letztes Bild	erstes Bild	letztes Bild
1D_PHAS_SEP_1	0	501	128	405
1D_PHAS_SEP_2	0	801	160	673
1D_PHAS_SEP_3	0	1401	240	1257
1D_PHAS_SEP_4	0	2501	1120	2229
1D_PHAS_SEP_5	0	1521	336	1377
1D_PHAS_SEP_6	0	1821	320	1741

Tab. A.8: Zeiträume der Durchläufe und des quasi stationären Zustands, Experiment 3. Die Videos wurden mit einer Bildwiederholrate von 25 Bilder pro Sekunde aufgezeichnet.

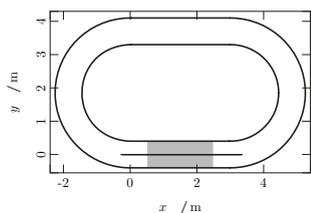
Durchlauf	Original		quasi stationärer Zustand	
	erstes Bild	letztes Bild	erstes Bild	letztes Bild
1_1_00	40	14750	–	–
1_1_01	0	2414	300	1739
1_1_02	0	3078	250	2828
1_1_03	0	4175	500	3850
1_1_04	0	3463	575	3138
1_1_05	0	3904	575	3579
1_1_06	0	2977	375	2652
1_1_09	30	3400	–	–
2_1_01	0	1941	375	1491
2_1_02	0	3078	450	2378
2_1_04	0	3432	875	2557
2_1_05	0	3885	750	3685
2_1_06	0	2966	625	1216
2_1_09	0	3890	–	–
1_2_00	0	12450	–	–
1_2_01	0	2330	375	1780
1_2_02	0	3450	250	2325
1_2_03	0	2050	275	1675
1_2_04	0	3550	250	2600
1_2_05	0	2769	500	2294
1_2_06	0	2940	375	1990
1_2_07	0	2380	400	1755
2_2_01	0	2520	375	1845
2_2_02	0	2712	250	2112
2_2_03	0	2796	125	1996
2_2_04	0	3053	300	2628
2_2_05	0	3109	375	2559
1_3_01	0	3410	500	2785
1_3_02	0	3640	275	2465
1_3_03	0	3610	275	2360
1_3_04	0	2420	325	2045
1_3_05	0	3430	250	2430
1_3_06	0	1990	250	1615
1_3_07	0	3250	250	2375
1_3_08	0	6320	–	–
2_3_01	0	3776	250	3201
2_3_02	0	2901	375	2401
2_3_03	0	2662	250	2162
2_3_04	0	3488	250	3238
2_3_05	0	2925	250	2425
2_3_06	0	2469	250	1969
2_3_07	0	3240	275	1469
2_3_08	0	6171	–	–

Tab. A.9: Zeiträume der Durchläufe und des quasi stationären Zustands, Experiment 4. Die Videos wurden mit einer Bildwiederholrate von 25 Bilder pro Sekunde aufgezeichnet.

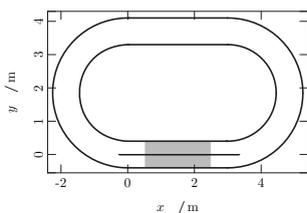
Durchlauf	Original		quasi stationärer Zustand	
	erstes Bild	letztes Bild	erstes Bild	letztes Bild
3_1_00	6	10828	–	–
3_1_01	0	1281	300	1231
3_1_02	0	2894	275	1869
3_1_03	0	2255	275	1530
3_1_04	0	1620	275	1295
3_1_05	0	2069	375	1219
3_1_06	0	1716	375	1316
3_1_09	0	2048	375	1173
3_1_10	0	1618	500	1168
3_1_11	0	13054	–	–
4_1_01	0	1280	375	1130
4_1_03	0	1779	500	1354
4_1_04	0	2050	275	1175
4_1_05	0	1553	375	1128
4_1_06	0	1917	400	1167
4_1_09	0	1488	375	1138
4_1_10	0	1660	375	1110
3_2_00	51	15542	–	–
3_2_01	0	1732	375	1232
3_2_02	0	3161	375	1986
3_2_03	0	2329	275	1729
3_2_04	0	2300	275	2025
3_2_05	0	3666	250	2541
3_2_06	0	2684	400	2284
3_2_07	0	2991	450	2541
3_2_10	0	2591	500	2041
3_2_11	10	10884	–	–
4_2_01	0	1876	300	1076
4_2_02	0	2262	200	1937
4_2_03	0	2705	200	1680
4_2_04	0	3137	200	1437
4_2_05	0	2881	200	2481
4_2_06	0	3473	100	2298
4_2_07	0	2566	175	2116
4_2_10	0	2705	175	1955
3_3_01	0	2415	375	1990
3_3_02	0	3738	275	2763
3_3_03	0	3422	250	2322
3_3_04	0	2747	250	2472
3_3_05	0	3652	400	2727
3_3_06	0	2991	500	2541
3_3_07	0	3091	625	2341
4_3_01	0	2901	450	1951
4_3_02	0	3113	175	2738
4_3_03	0	2545	150	2270

Durchlauf	Original		quasi stationärer Zustand	
	erstes Bild	letztes Bild	erstes Bild	letztes Bild
4_3_04	0	3400	150	3125
4_3_05	0	3144	450	2694
4_3_06	0	3286	375	2411
4_3_07	0	2942	300	2267

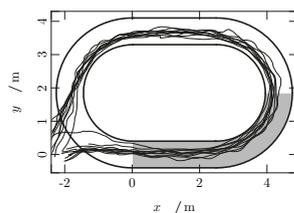
A.2 Fundamentaldiagramme



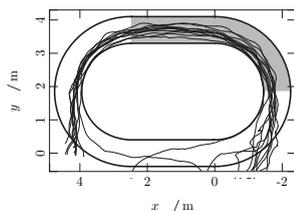
(a) normal_0, BUW-n



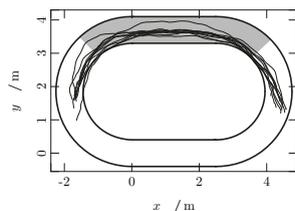
(b) eile_0, BUW-m



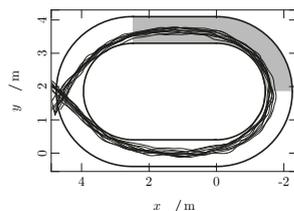
(c) 1_1_00, GBS-5



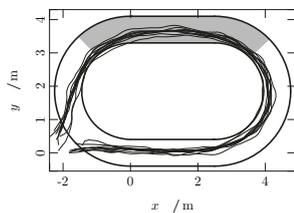
(d) 2_3_08, GBS-5



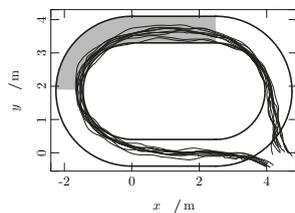
(e) 1_1_09, GBS-5 5a?



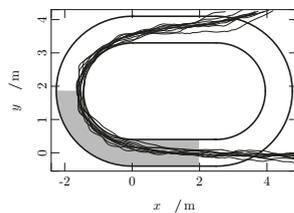
(f) 2_1_09, GBS-5 5b?



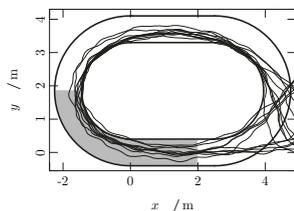
(g) 1_2_00, GBS-11



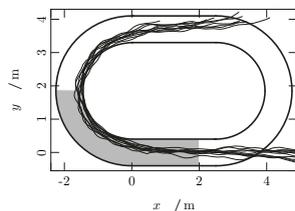
(h) 1_3_08, GBS-11



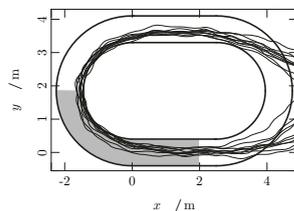
(i) 3_1_00, WDG-6



(j) 3_1_11, WDG-6



(k) 3_2_00, WDG-11



(l) 3_2_11, WDG-11

Abb. A.2: Messbereich der freien Gehgeschwindigkeit, Experimente 1, 3 und 4.

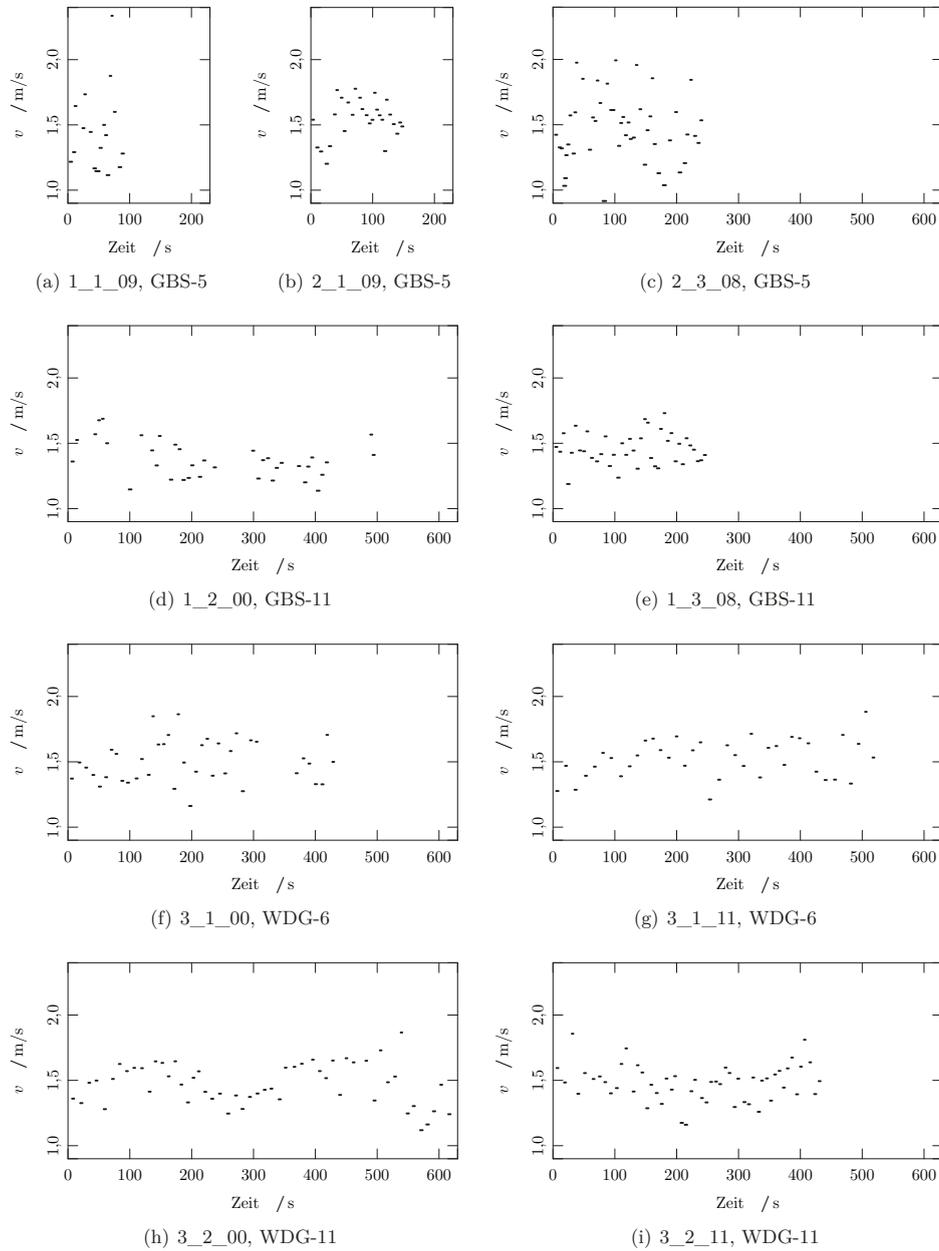
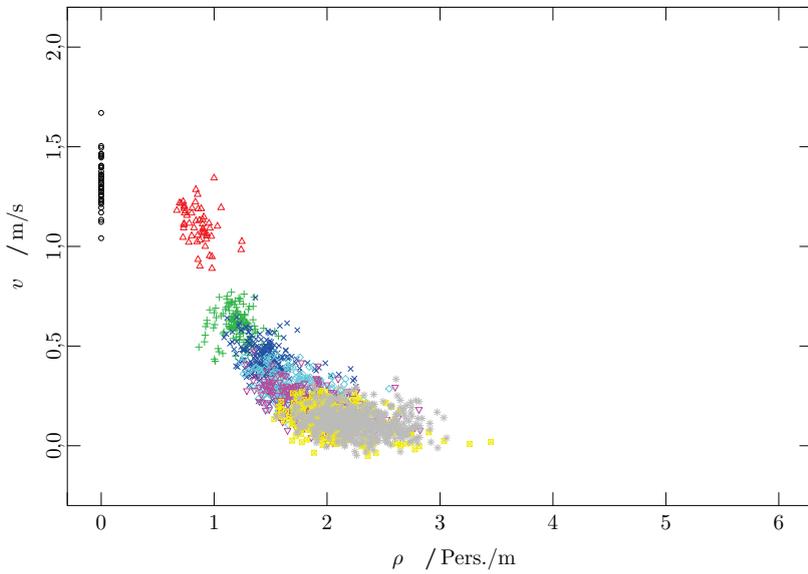
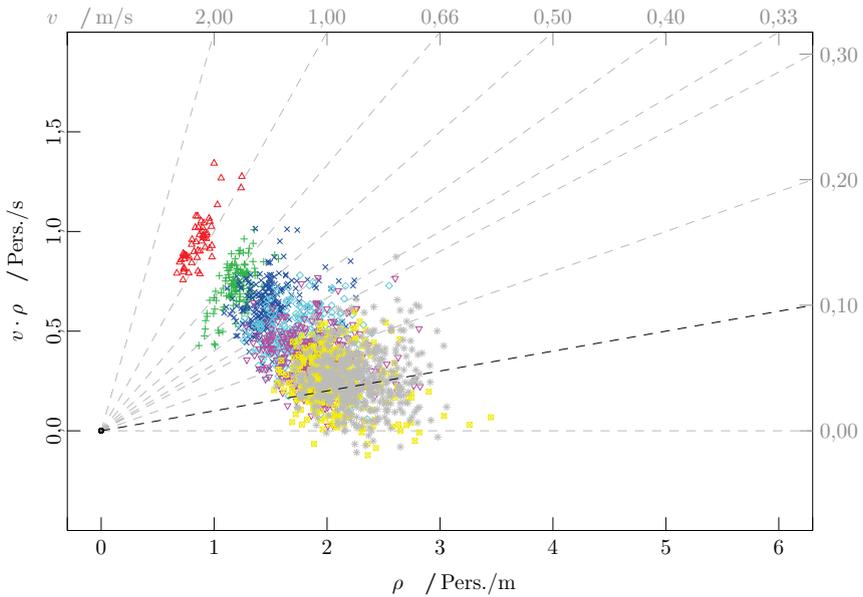


Abb. A.3: Freie Gehgeschwindigkeit im Zeitverlauf, Experimente 3 und 4.

○ $N = 1$ △ $N = 15$ + $N = 20$ × $N = 25$ ◇ $N = 30$ ▽ $N = 34$ ◻ $N = 37$ * $N = 40$



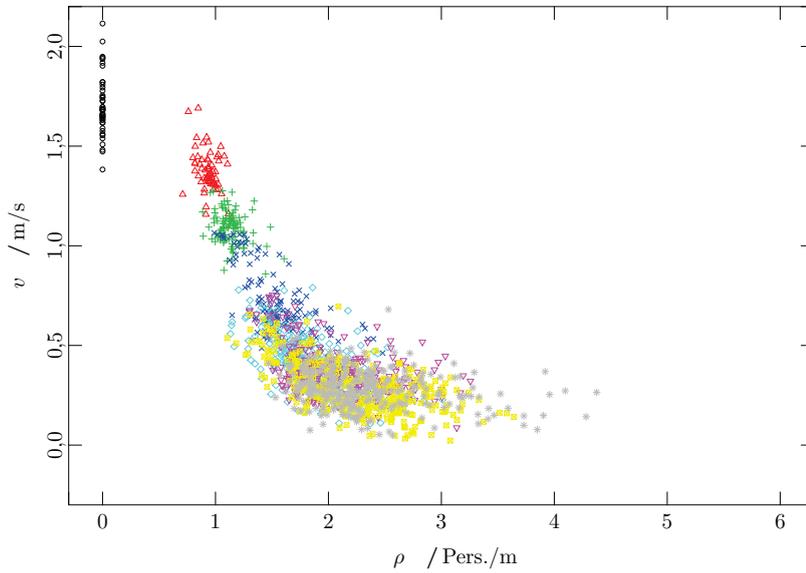
(a) Mikroskopische Messwerte von Dichte und Geschwindigkeit



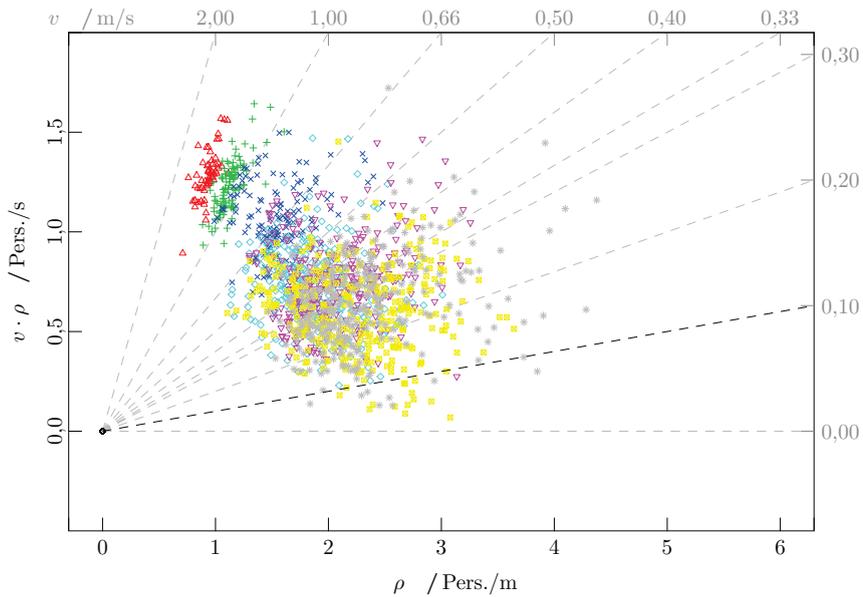
(b) Mikroskopische Messwerte von Dichte und Fluss mit Kennzeichnung von Nomogrammlinien für Geschwindigkeiten

Abb. A.4: Fundamentaldiagramme $v(\rho)$ und $J(\rho)$, Versuchsreihe BUW-n.

○ $N = 1$ △ $N = 15$ + $N = 20$ × $N = 25$ ◇ $N = 30$ ▽ $N = 34$ ⊠ $N = 37$ * $N = 40$



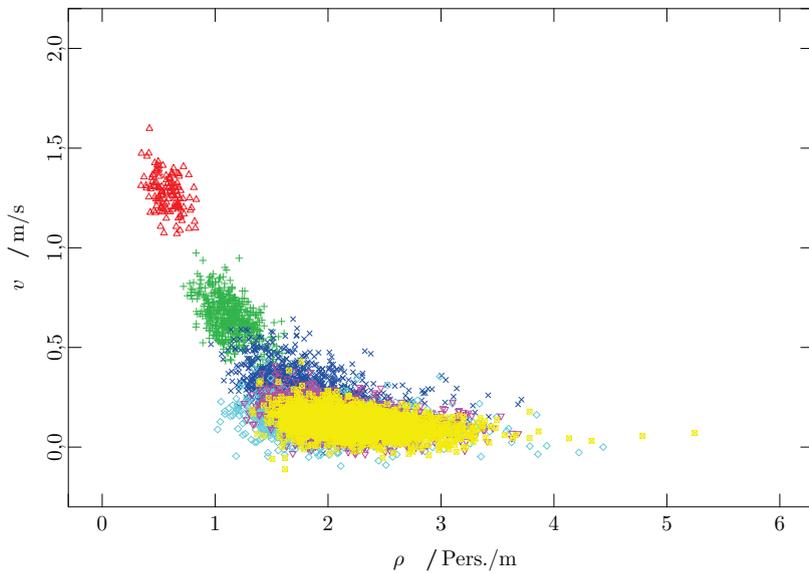
(a) Mikroskopische Messwerte von Dichte und Geschwindigkeit



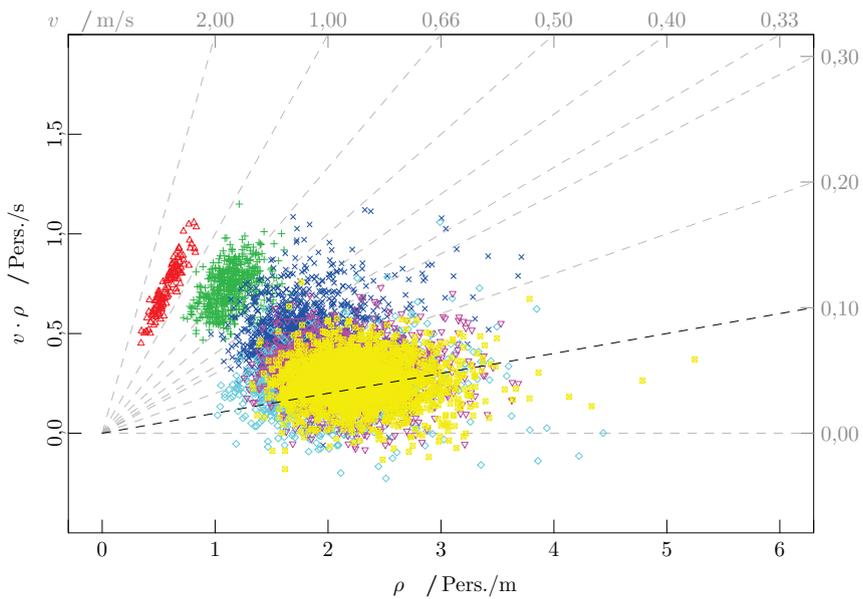
(b) Mikroskopische Messwerte von Dichte und Fluss mit Kennzeichnung von Nomogrammlinien für Geschwindigkeiten

Abb. A.5: Fundamentaldiagramme $v(\rho)$ und $J(\rho)$, Versuchsreihe BUW-m.

$\triangle N = 15$ $+$ $N = 30$ \times $N = 47$ \diamond $N = 52$ ∇ $N = 55$ $*$ $N = 59$



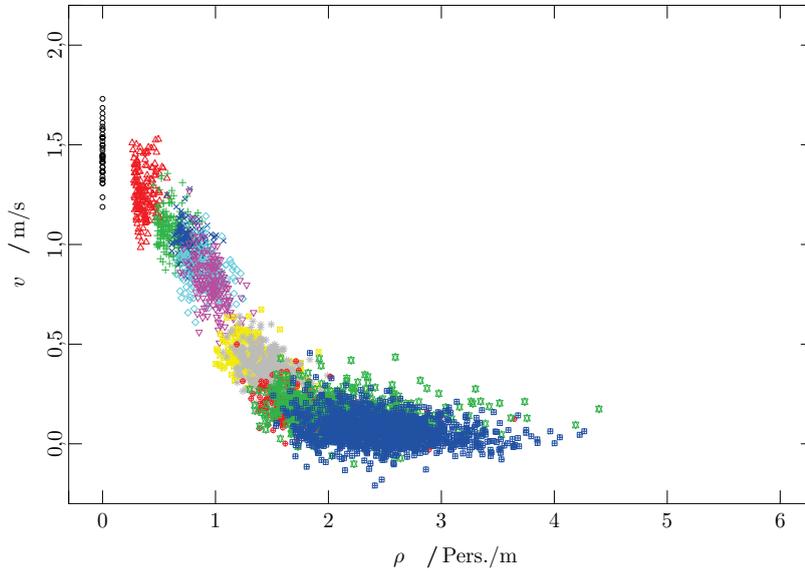
(a) Mikroskopische Messwerte von Dichte und Geschwindigkeit



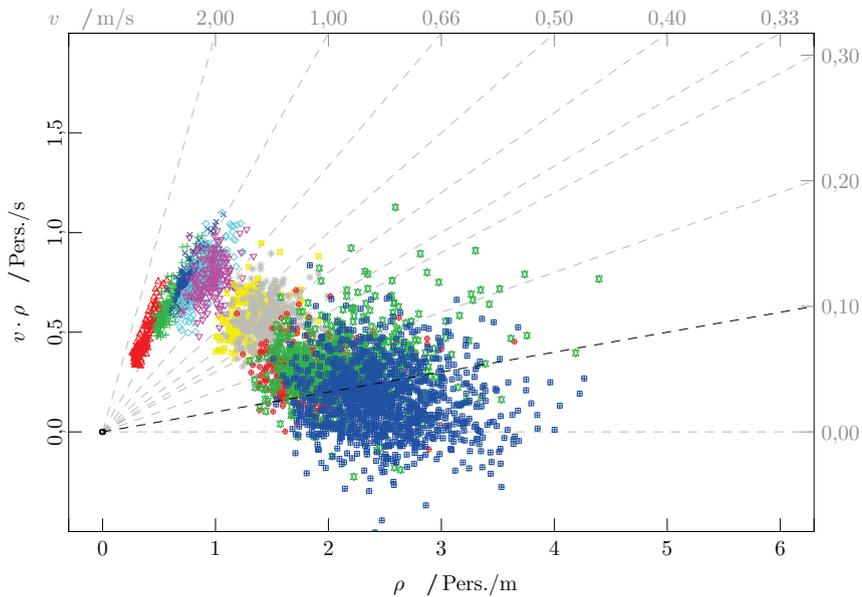
(b) Mikroskopische Messwerte von Dichte und Fluss mit Kennzeichnung von Nomogrammlinien für Geschwindigkeiten

Abb. A.6: Fundamentaldiagramme $v(\rho)$ und $J(\rho)$, Versuchsreihe Basigo-1D.

- \circ $N = 1$ \triangle $N = 6$ $+$ $N = 10$ \times $N = 13$ \diamond $N = 15$ ∇ $N = 16$ \boxtimes $N = 22$ $*$ $N = 24$
 \oplus $N = 30$ \boxtimes $N = 34$ \boxplus $N = 40$



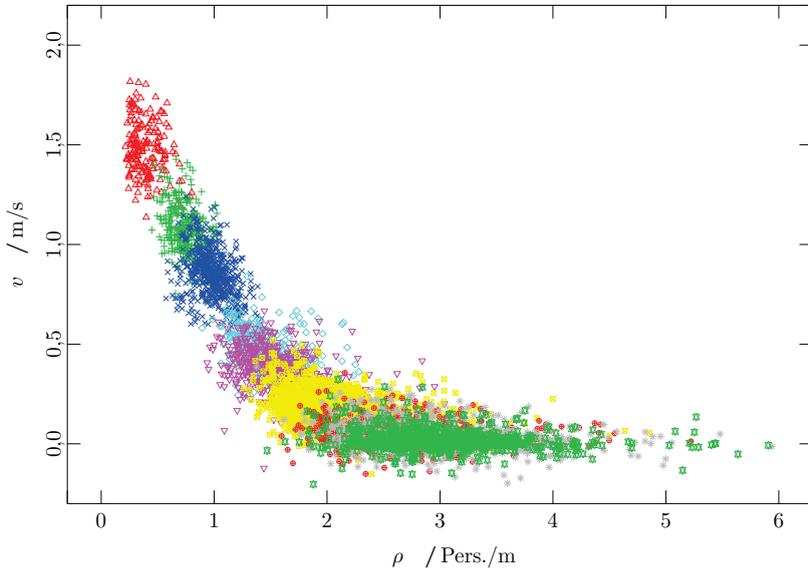
(a) Mikroskopische Messwerte von Dichte und Geschwindigkeit



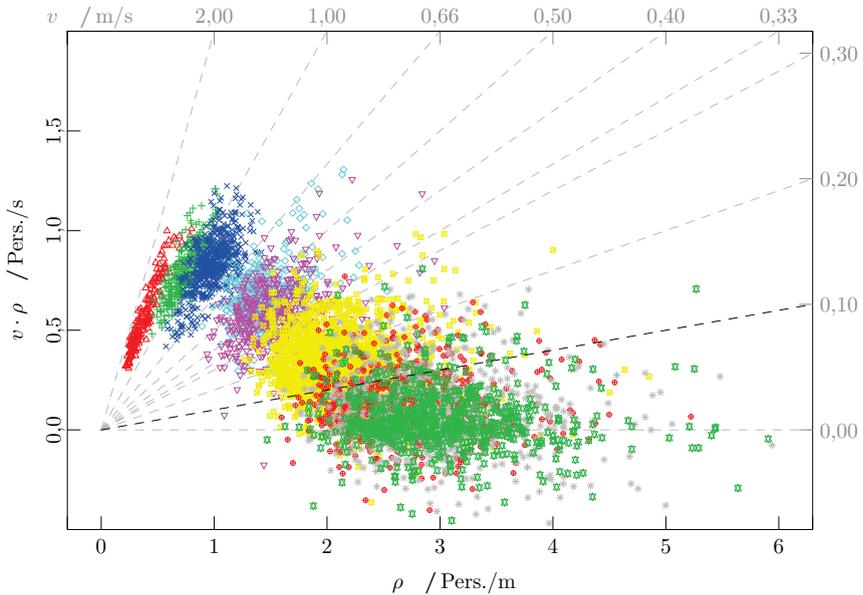
(b) Mikroskopische Messwerte von Dichte und Fluss mit Kennzeichnung von Nomogrammlinien für Geschwindigkeiten

Abb. A.7: Fundamentaldiagramme $v(\rho)$ und $J(\rho)$, Versuchsreihe GBS-11.

$\triangle N = 6$ $+ N = 12$ $\times N = 16$ $\diamond N = 24$ $\nabla N = 26$ $\boxtimes N = 34$ $\oplus N = 37$ $* N = 43$
 $\boxtimes N = 48$



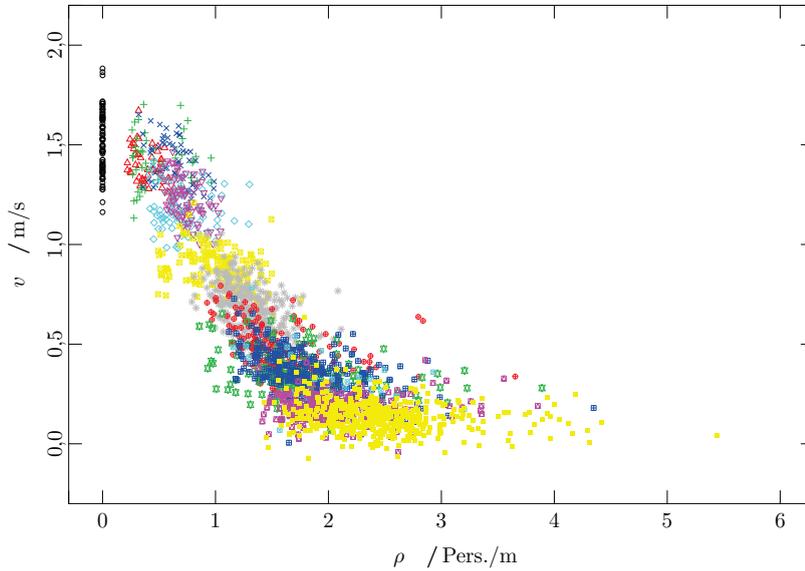
(a) Mikroskopische Messwerte von Dichte und Geschwindigkeit



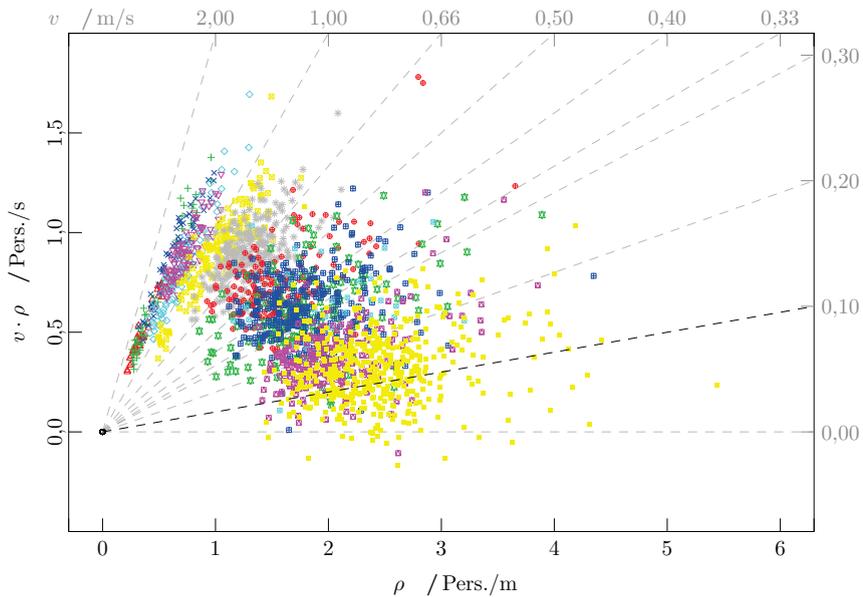
(b) Mikroskopische Messwerte von Dichte und Fluss mit Kennzeichnung von Nomogrammlinien für Geschwindigkeiten

Abb. A.8: Fundamentaldiagramme $v(\rho)$ und $J(\rho)$, Versuchsreihe GBS-5+11.

\circ $N = 1$ \triangle $N = 6$ $+$ $N = 7$ \times $N = 10$ \diamond $N = 11$ ∇ $N = 12$ \boxtimes $N = 16$ $*$ $N = 21$
 \oplus $N = 25$ \boxtimes $N = 28$ \boxplus $N = 29$ \boxtimes $N = 32$ \boxtimes $N = 33$ \blacksquare $N = 39$



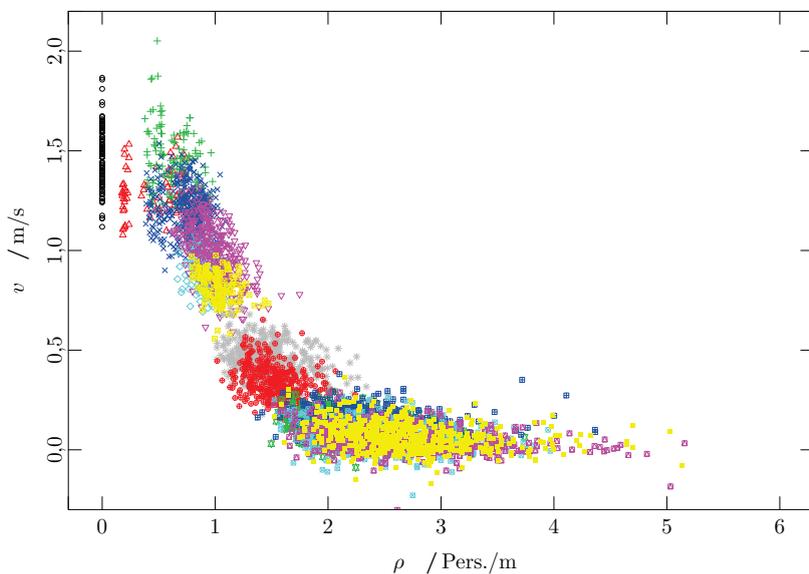
(a) Mikroskopische Messwerte von Dichte und Geschwindigkeit



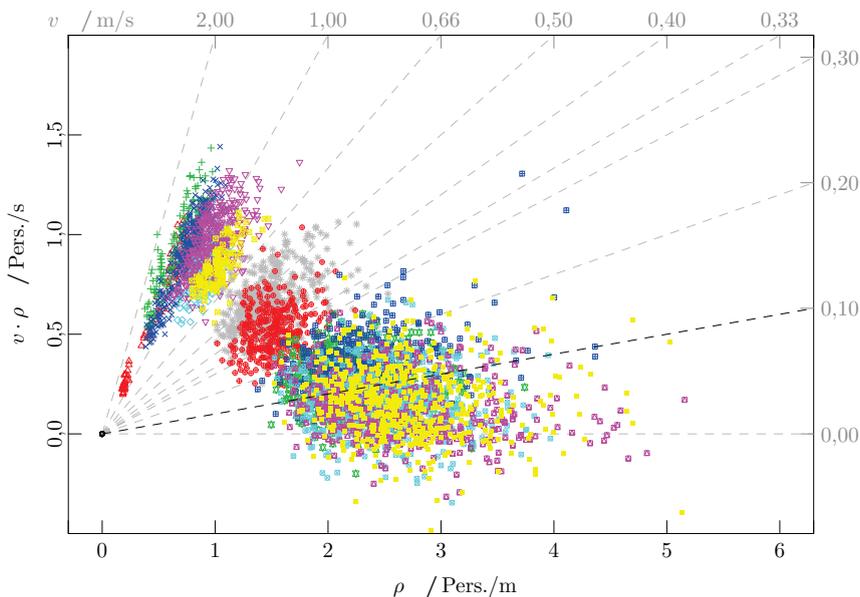
(b) Mikroskopische Messwerte von Dichte und Fluss mit Kennzeichnung von Nomogrammlinien für Geschwindigkeiten

Abb. A.9: Fundamentaldiagramme $v(\rho)$ und $J(\rho)$, Versuchsreihe WDG-6.

- \circ $N = 1$ \triangle $N = 6$ $+$ $N = 10$ \times $N = 12$ \diamond $N = 15$ ∇ $N = 16$ \boxtimes $N = 17$ $*$ $N = 24$
 \oplus $N = 25$ \boxtimes $N = 36$ \circ $N = 38$ \times $N = 40$ \diamond $N = 42$ ∇ $N = 43$



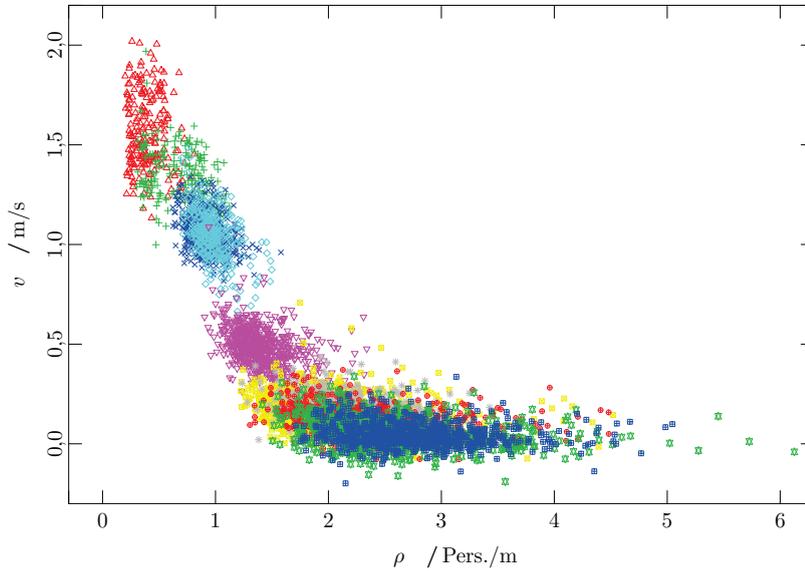
(a) Mikroskopische Messwerte von Dichte und Geschwindigkeit



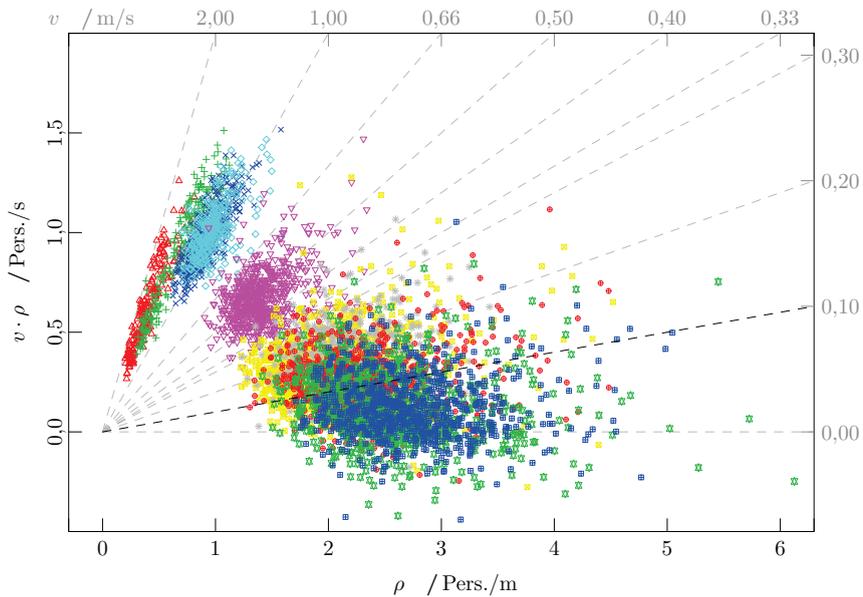
(b) Mikroskopische Messwerte von Dichte und Fluss mit Kennzeichnung von Nomogrammlinien für Geschwindigkeiten

Abb. A.10: Fundamentaldiagramme $v(\rho)$ und $J(\rho)$, WDG-11.

$\triangle N = 6$ $+ N = 10$ $\times N = 15$ $\diamond N = 16$ $\nabla N = 23$ $\boxtimes N = 33$ $* N = 35$ $\oplus N = 37$
 $\boxtimes N = 41$ $\boxplus N = 44$

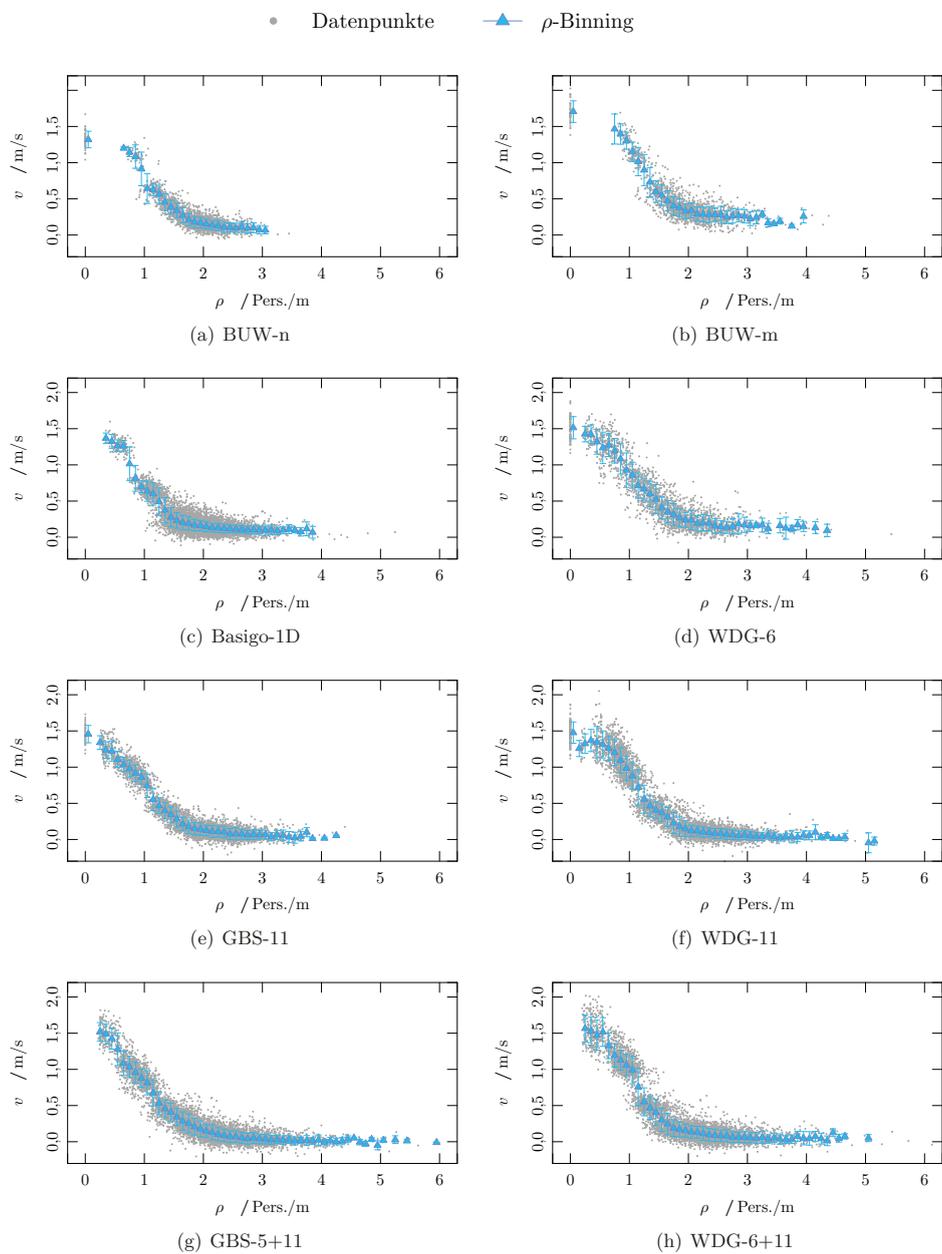


(a) Mikroskopische Messwerte von Dichte und Geschwindigkeit



(b) Mikroskopische Messwerte von Dichte und Fluss mit Kennzeichnung von Nomogrammlinien für Geschwindigkeiten

Abb. A.11: Fundamentaldiagramme $v(\rho)$ und $J(\rho)$, Versuchsreihe WDG-6+11.

Abb. A.12: Fundamentaldiagramme $v(\rho)$ mit ρ -Binning.

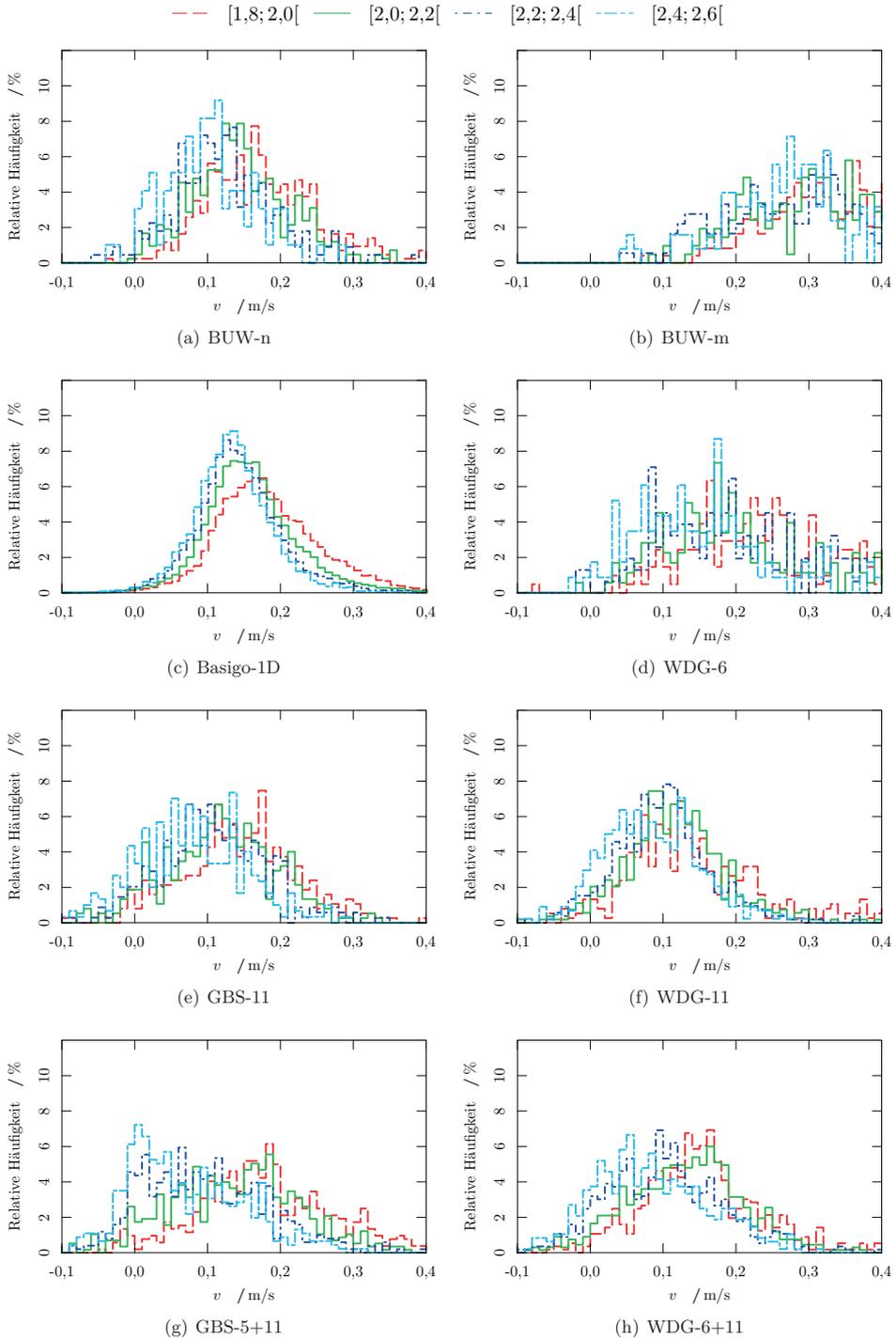
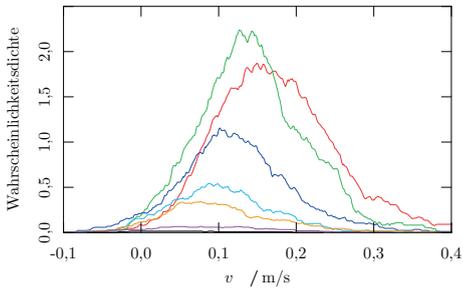
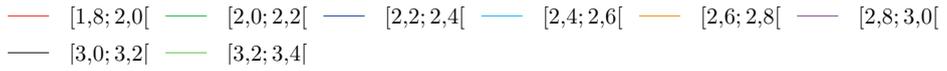
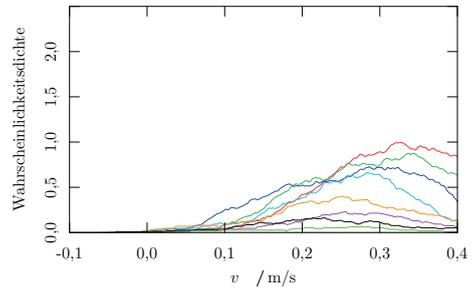


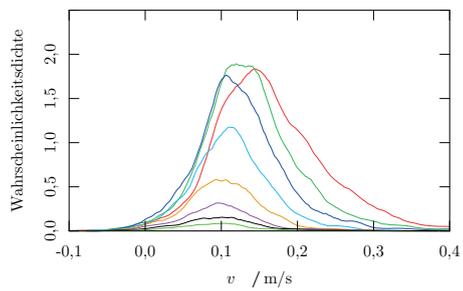
Abb. A.13: Geschwindigkeitsverteilung für hohe Dichten.



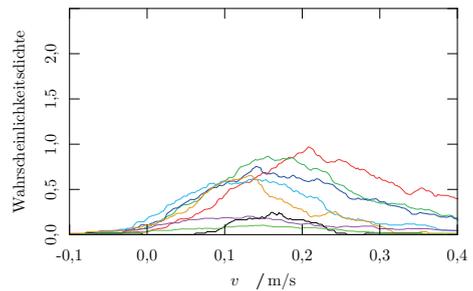
(a) BUW-n



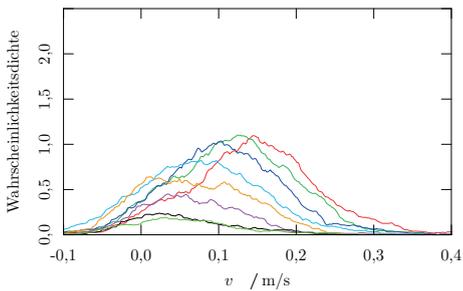
(b) BUW-m



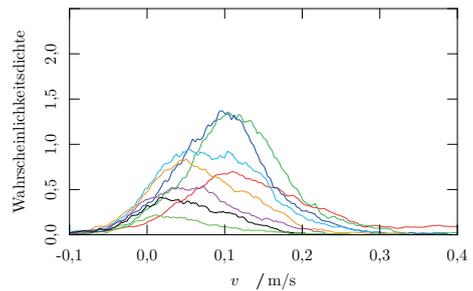
(c) Basigo-1D



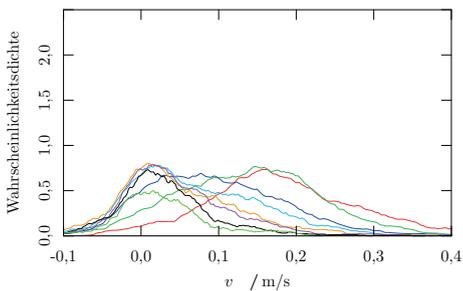
(d) WDG-6



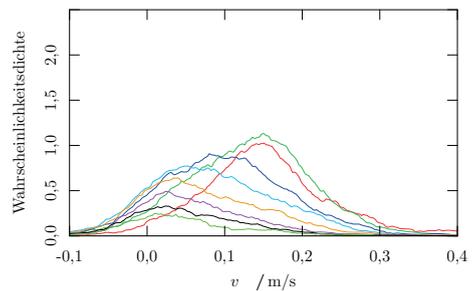
(e) GBS-11



(f) WDG-11

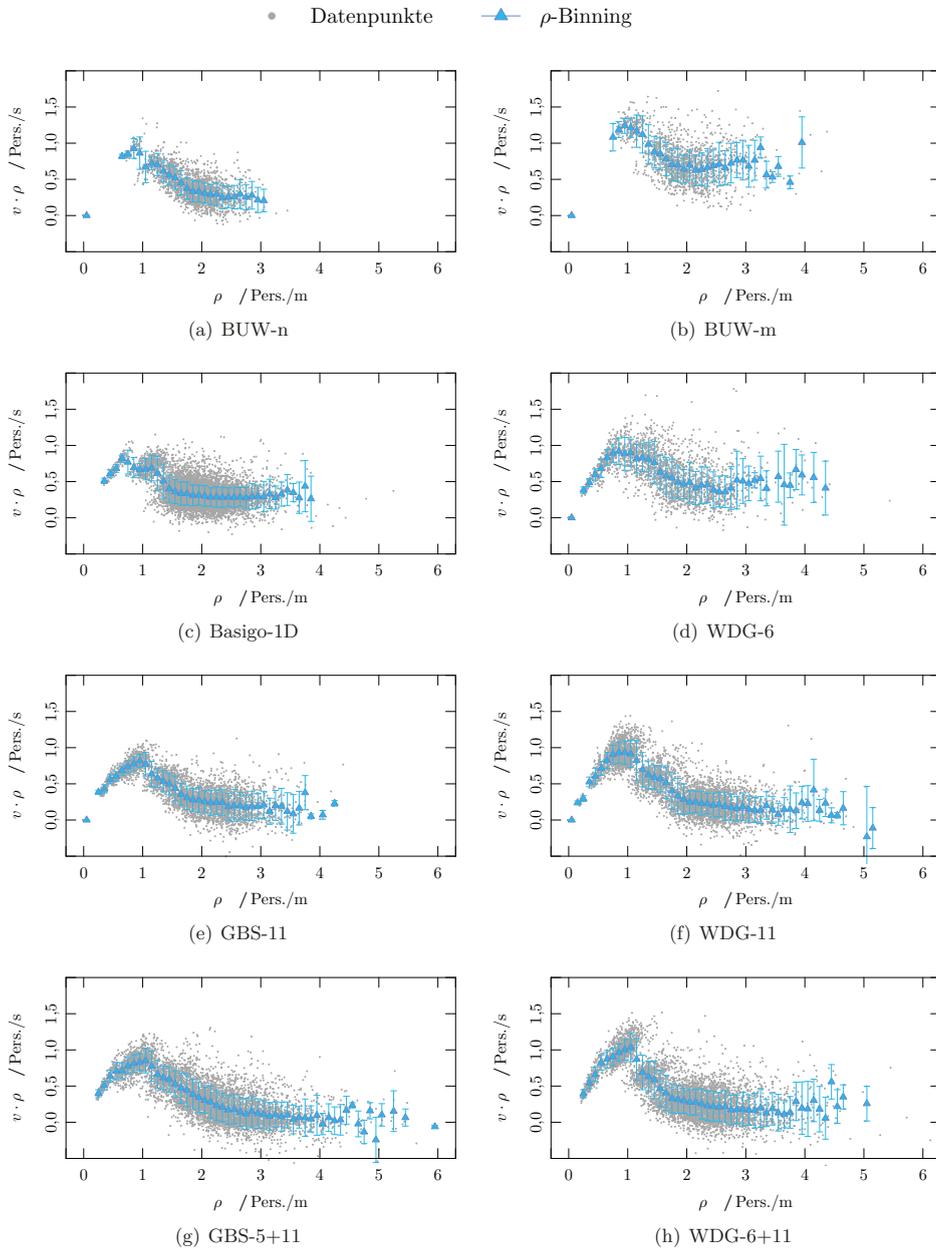


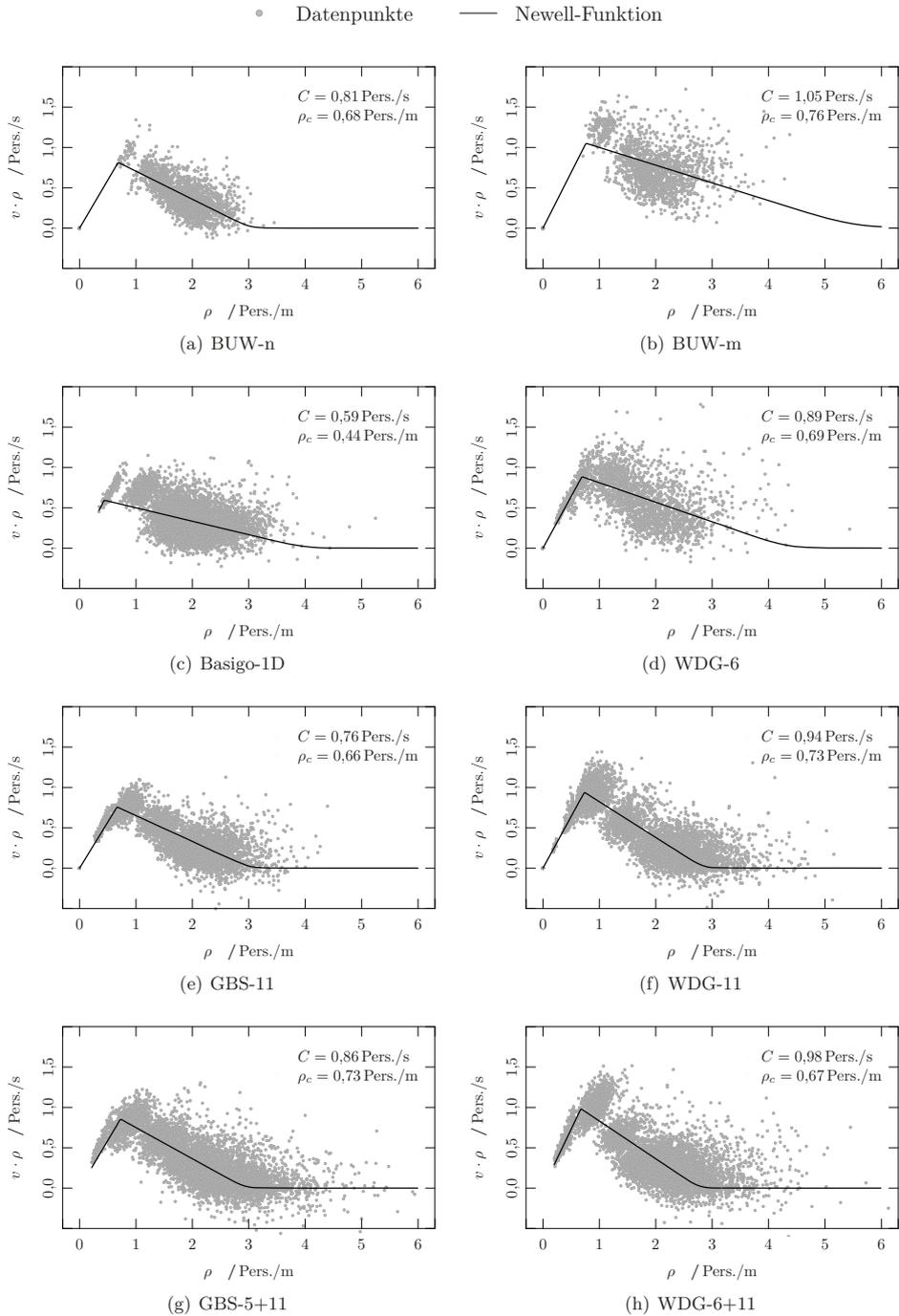
(g) GBS-5+11

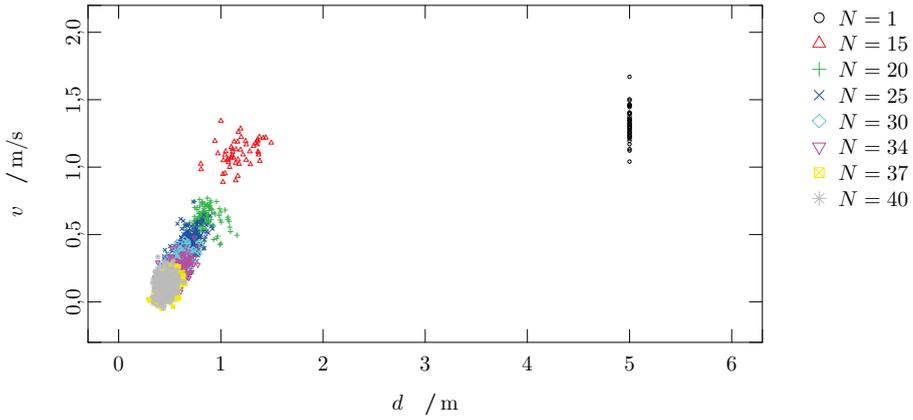


(h) WDG-6+11

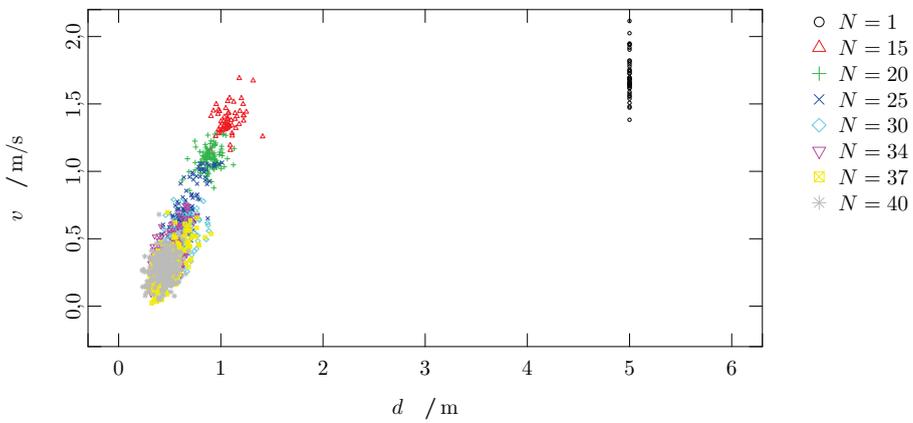
Abb. A.14: Wahrscheinlichkeitsdichte der Geschwindigkeiten für hohe Dichten.

Abb. A.15: Fundamentaldiagramme $J(\rho)$ mit ρ -Binning.

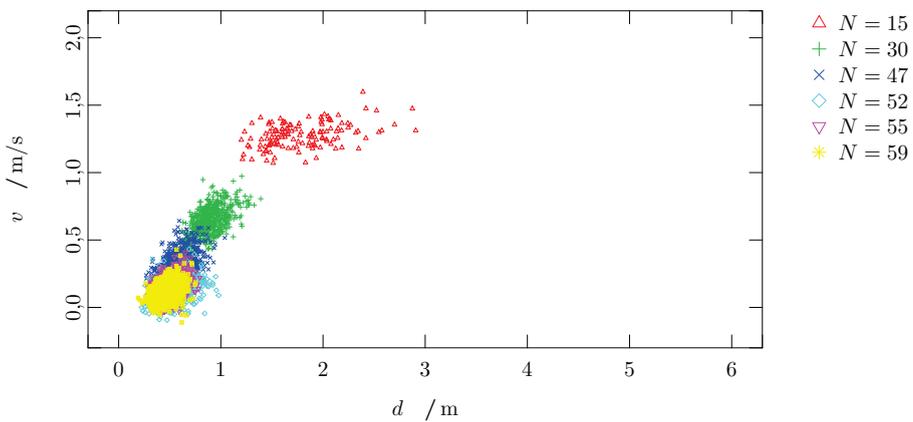
Abb. A.16: Fundamentaldiagramme $J(\rho)$ mit Newell-Funktion.



(a) BUW-n

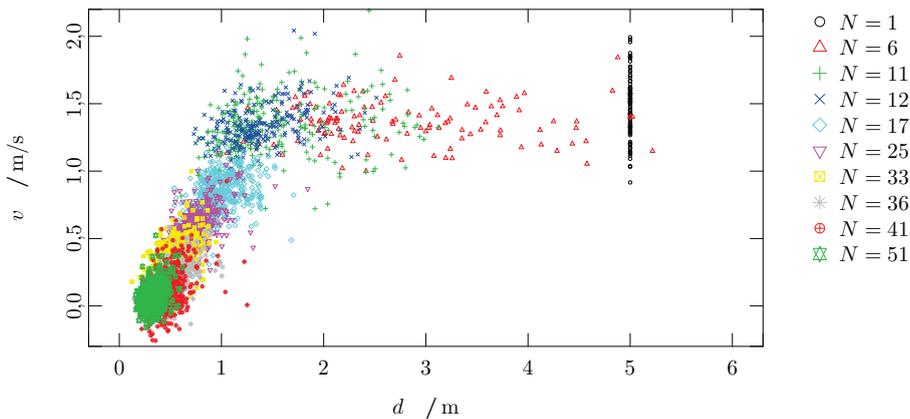


(b) BUW-m

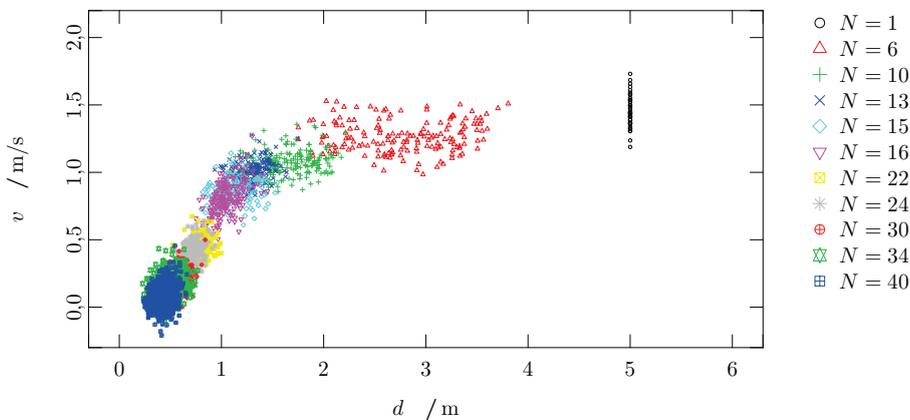


(c) Basigo-1D

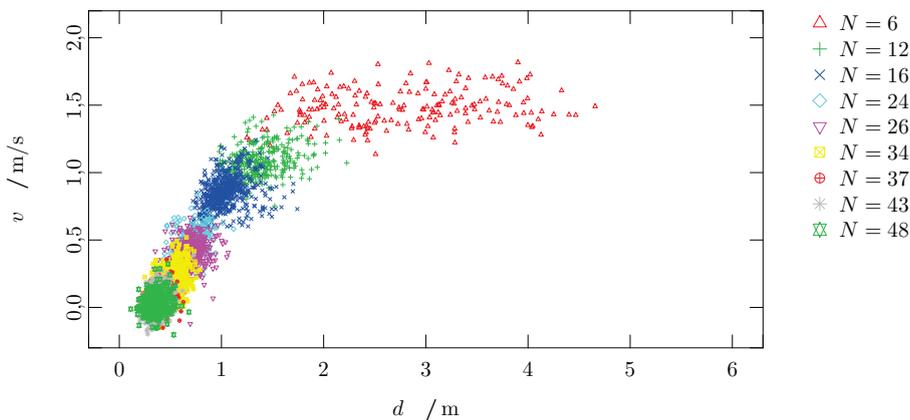
Abb. A.17: Fundamentaldiagramme $v(d)$, Experimente 1 und 2. Mikroskopische Messwerte von Abstand und Geschwindigkeit.



(a) GBS-5



(b) GBS-11



(c) GBS-5+11

Abb. A.18: Fundamentaldiagramme $v(d)$, Experiment 3. Mikroskopische Messwerte von Abstand und Geschwindigkeit.

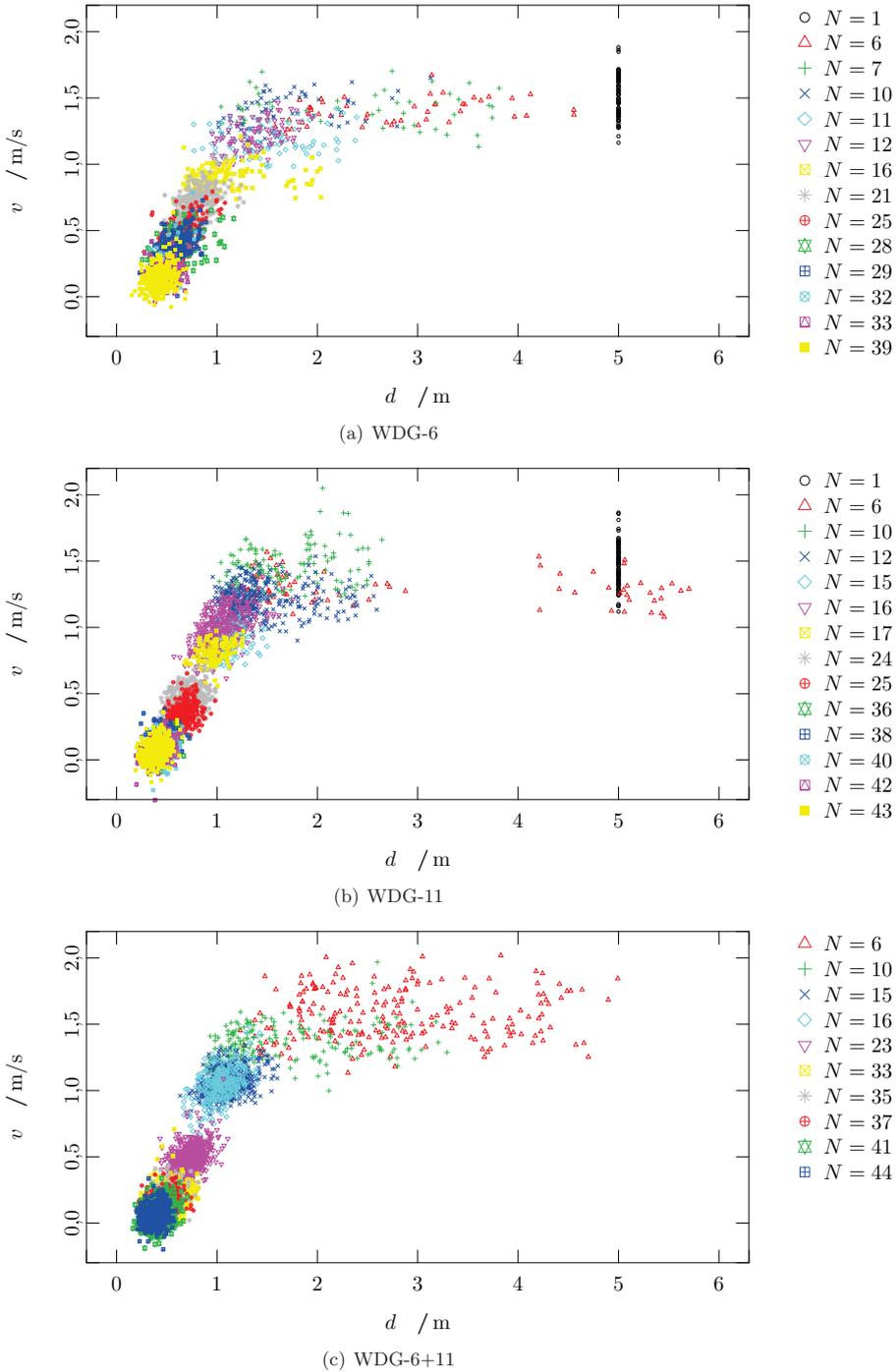
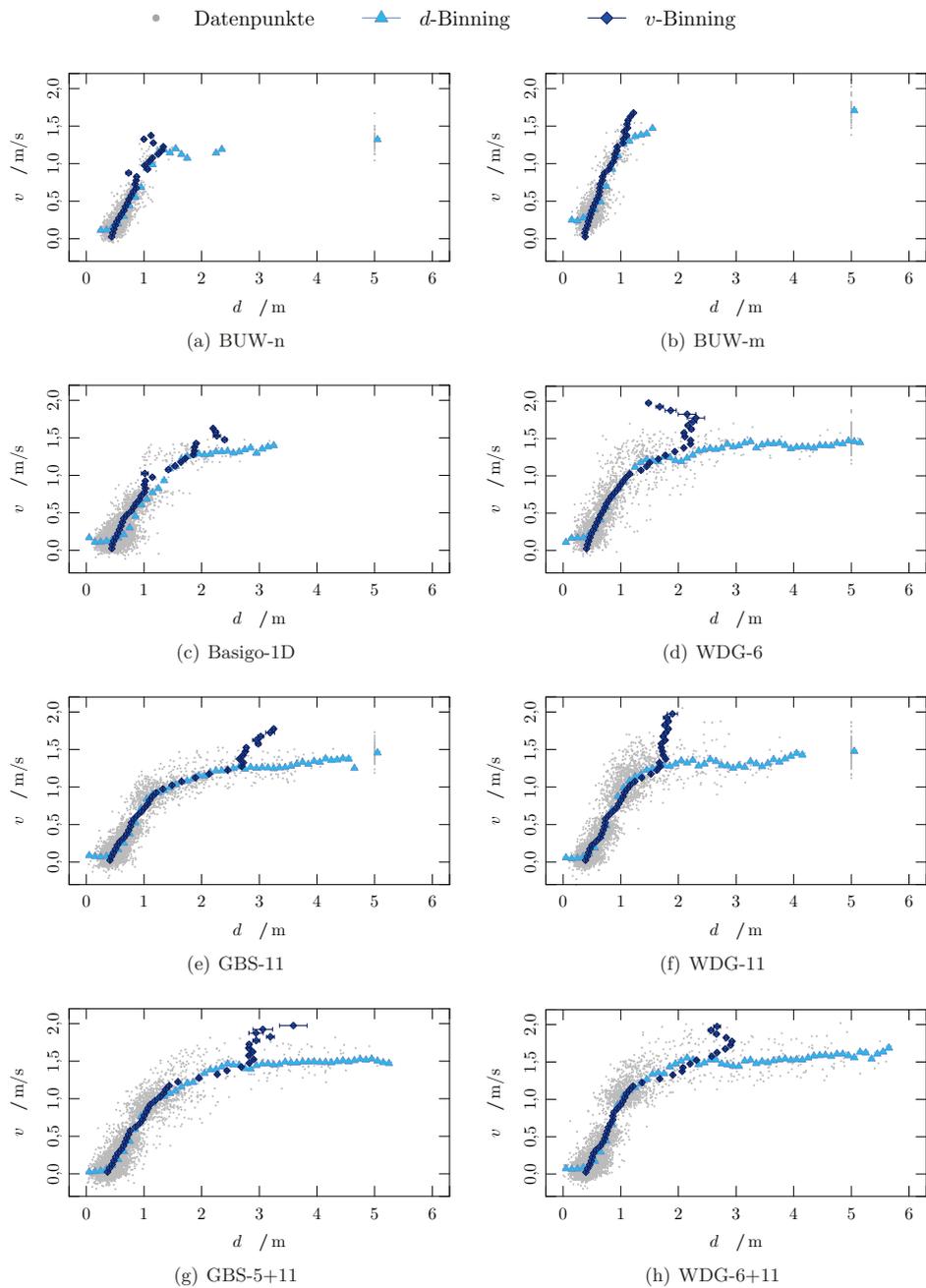
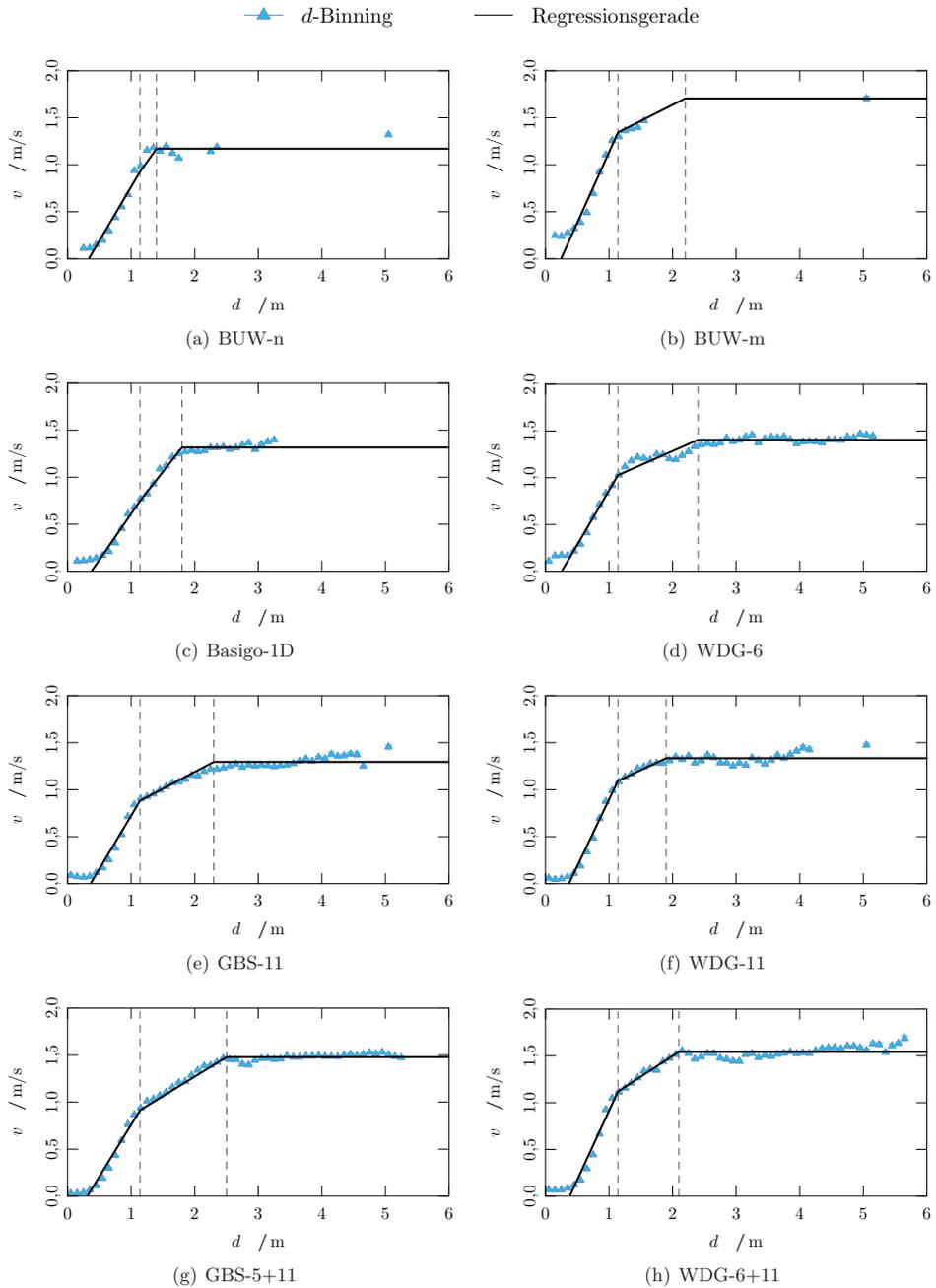


Abb. A.19: Fundamentaldiagramme $v(d)$, Experiment 4. Mikroskopische Messwerte von Abstand und Geschwindigkeit.

Abb. A.20: Fundamentaldiagramme $v(d)$ mit d - und v -Binning.


 Abb. A.21: Fundamentaldiagramme $v(d)$: d -Binning und Regressionsgeraden.

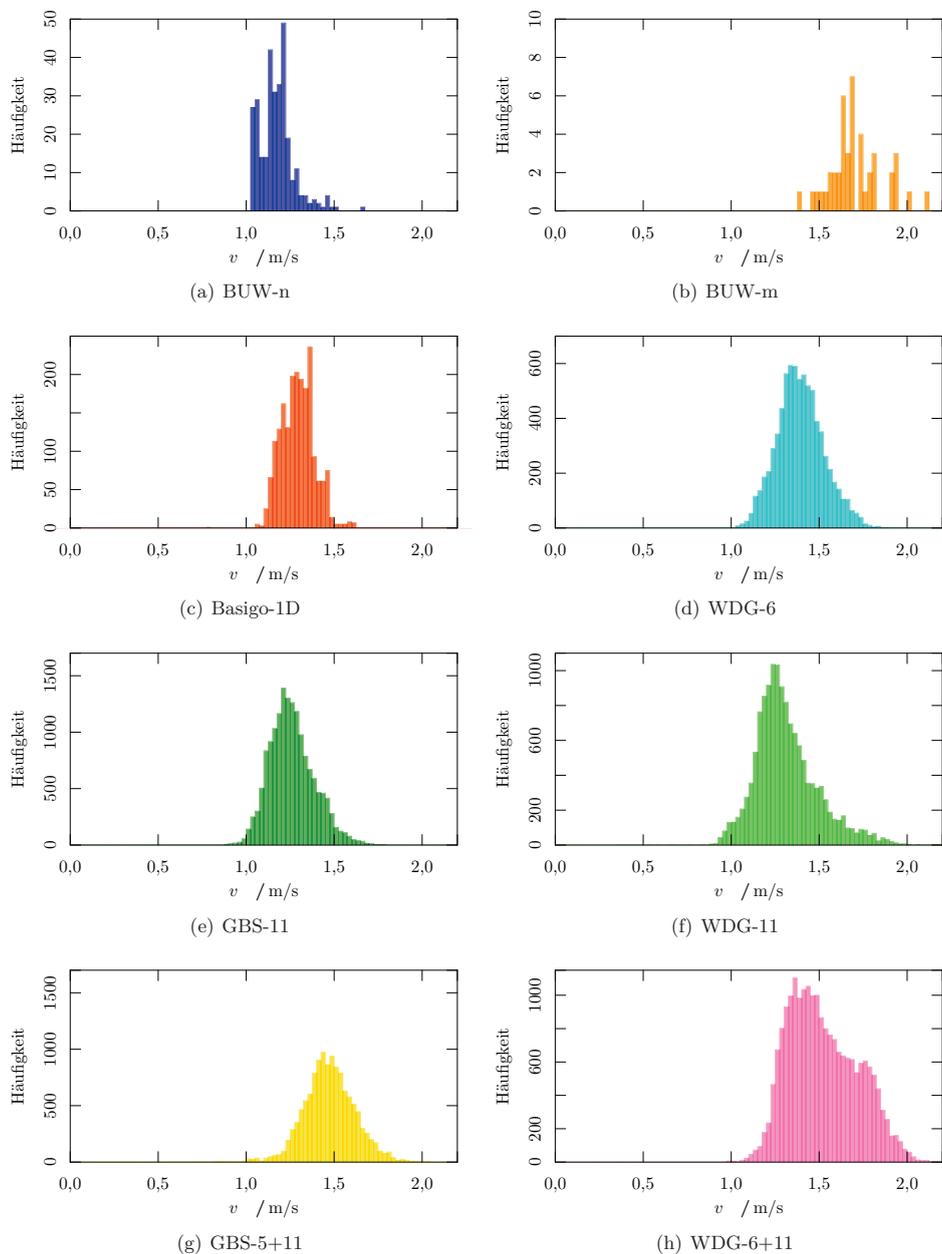
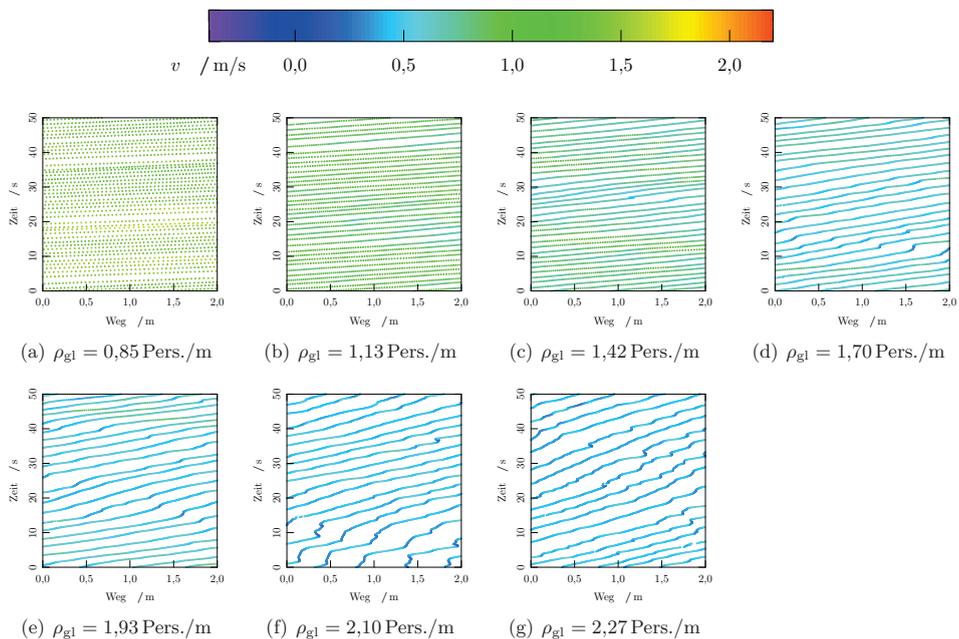


Abb. A.22: Geschwindigkeitsverteilung im freien Fluss.

A.3 Stop-and-go

Abb. A.24: Weg-Zeit-Diagramme, Versuchsreihe BUW-n. $N = 15, 20, 25, 30, 34, 37$ und 40 .

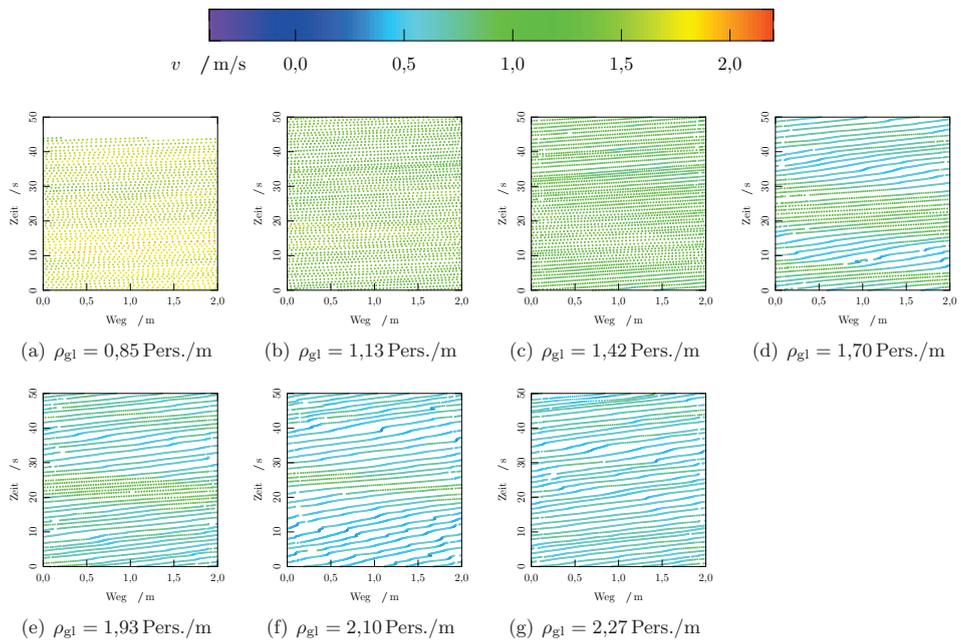
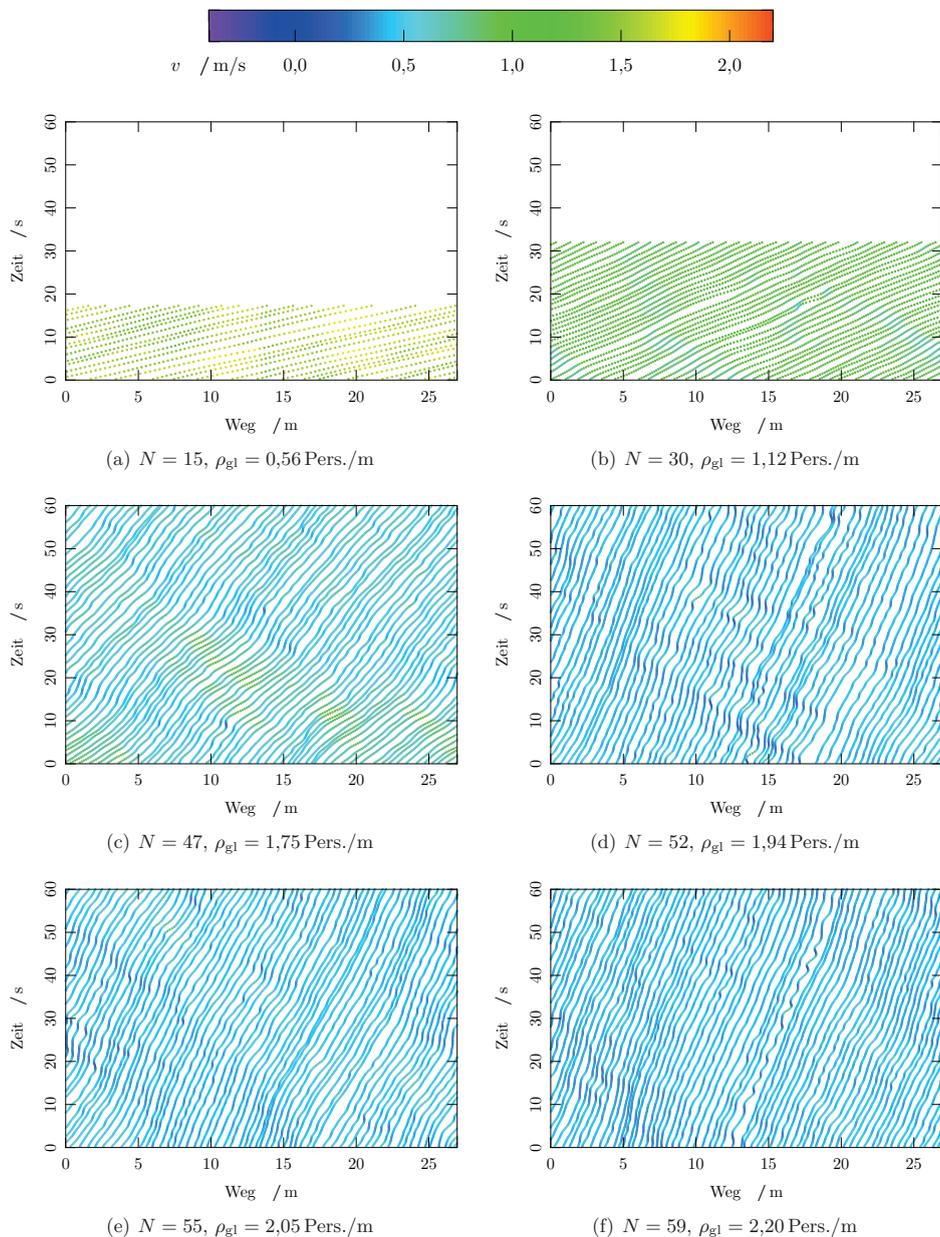


Abb. A.25: Weg-Zeit-Diagramme, Versuchsreihe BUW-m. $N = 15, 20, 25, 30, 34, 37$ und 40 .

Abb. A.26: Weg-Zeit-Diagramme, Versuchsreihe Basigo-1D. $N = 15, 30, 47, 52, 55$ und 59 .

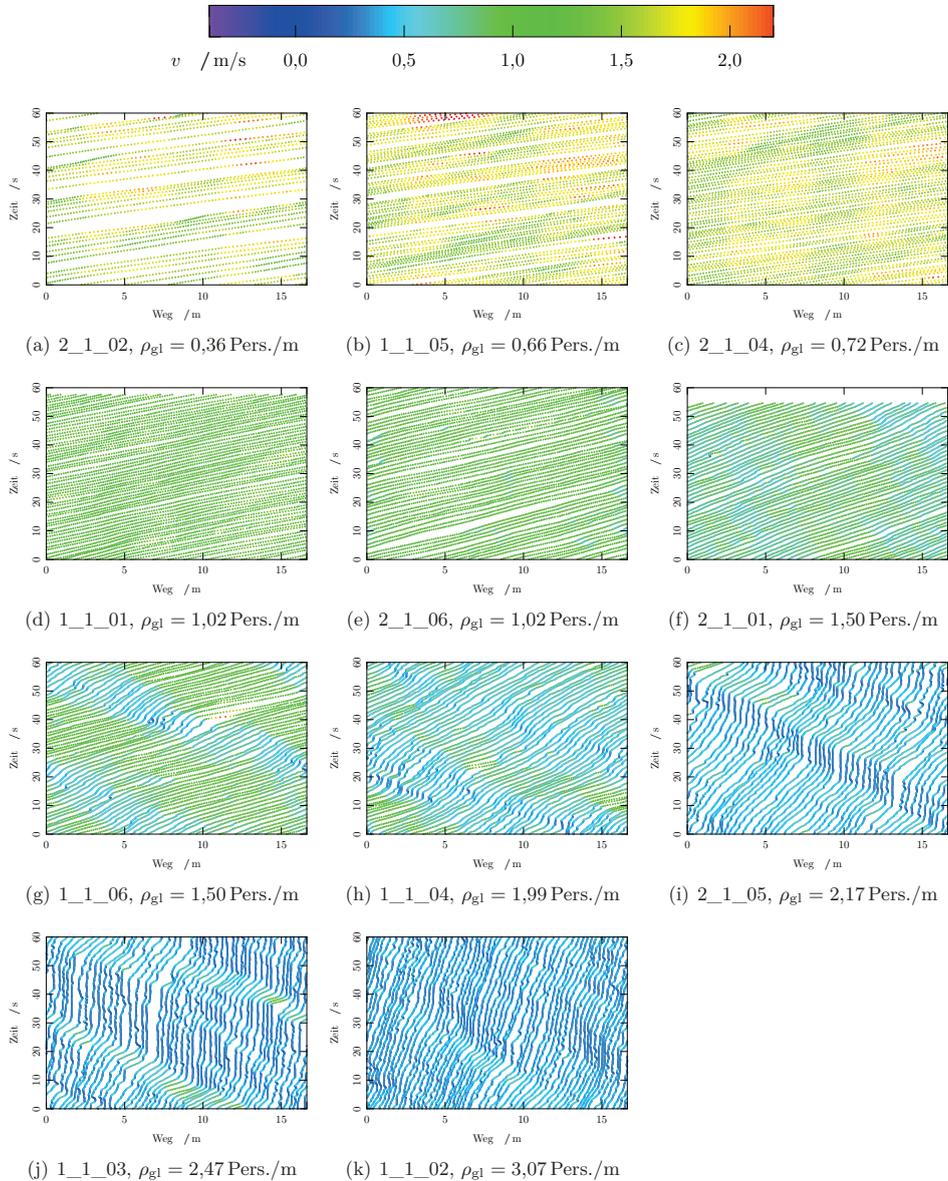


Abb. A.27: Weg-Zeit-Diagramme, Versuchsreihe GBS-5. $N = 6, 11, 12, 17, 17, 25, 25, 33, 36, 41$ und 51 .

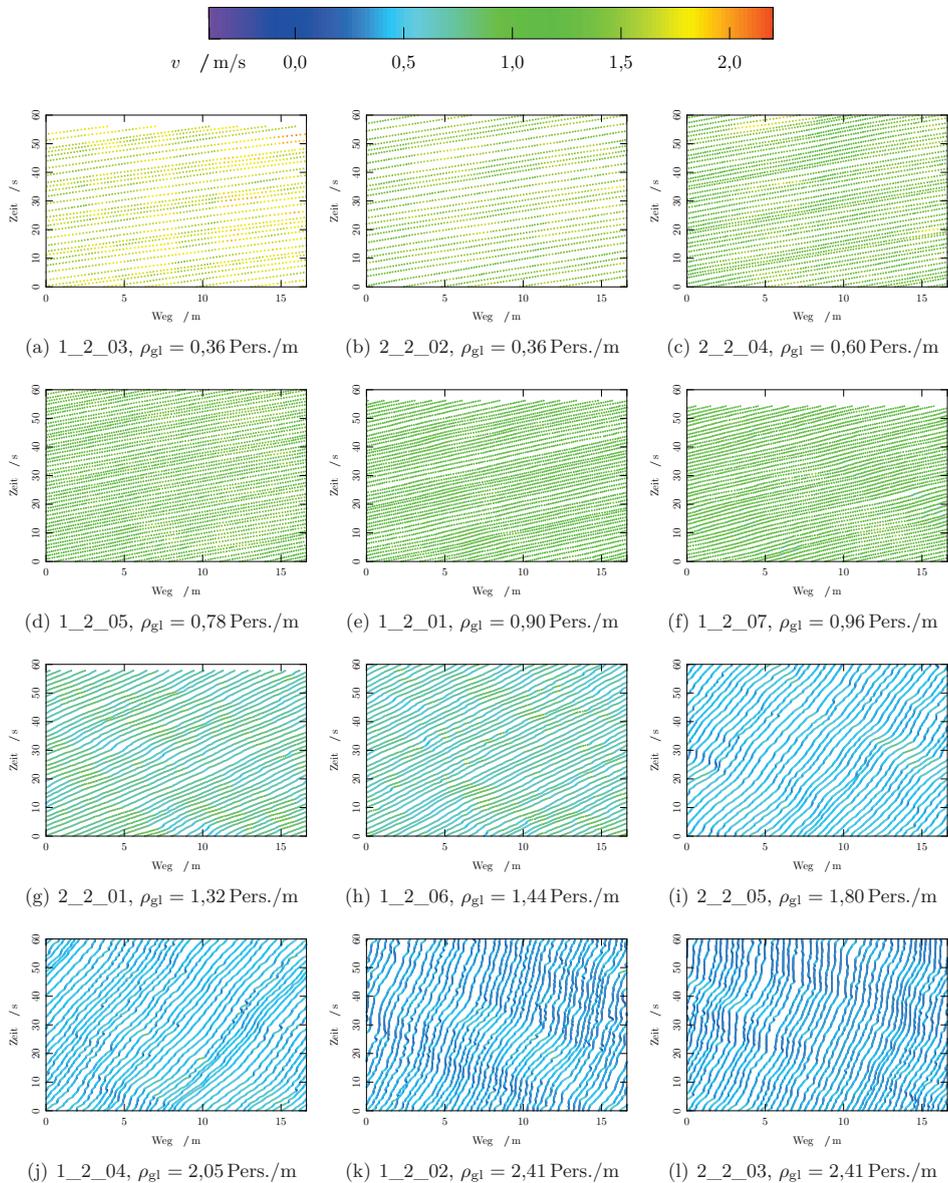


Abb. A.28: Weg-Zeit-Diagramme, Versuchsreihe GBS-11. $N = 6, 6, 10, 13, 15, 16, 22, 24, 30, 34, 40$ und 40 .

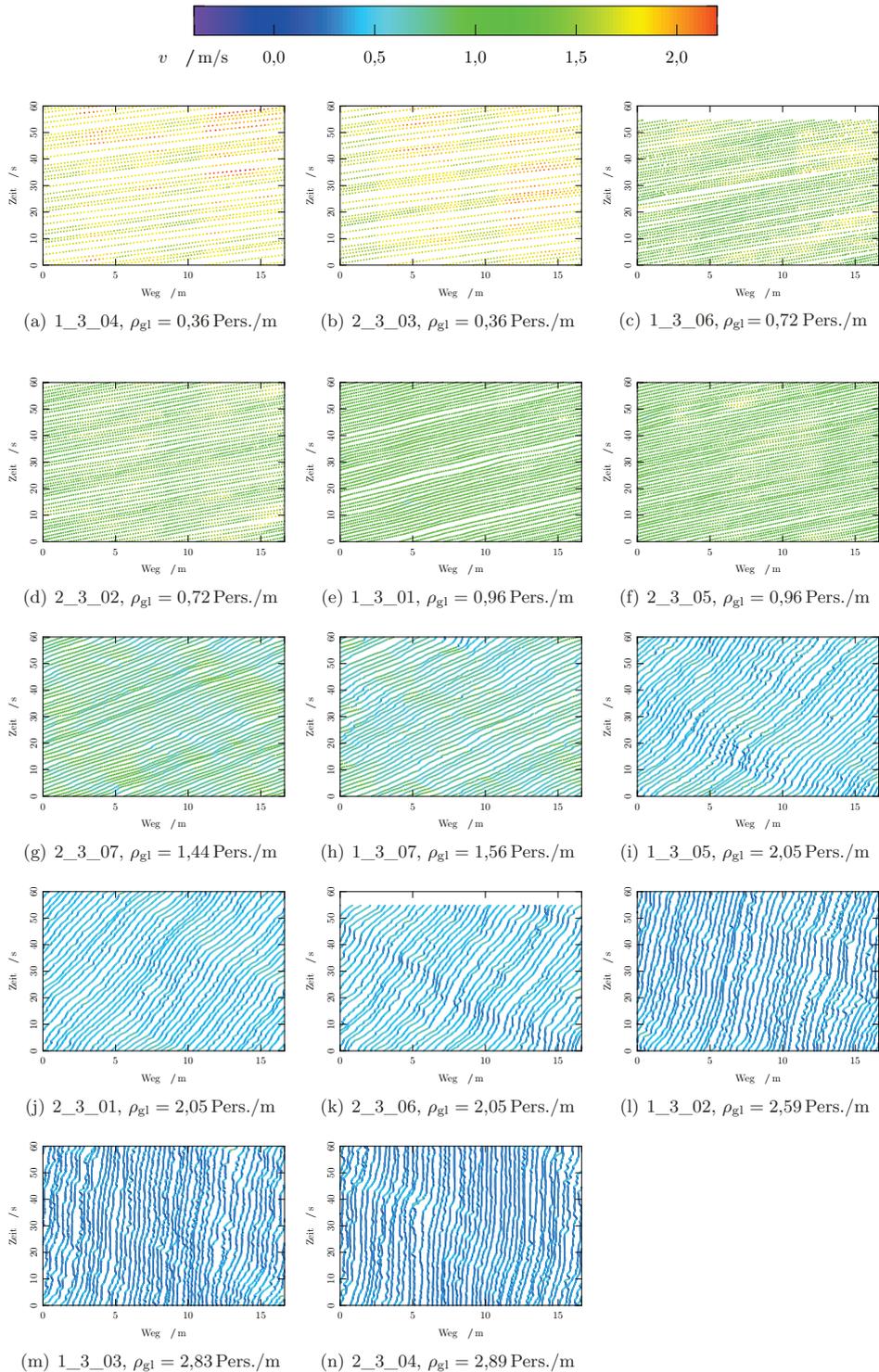


Abb. A.29: Weg-Zeit-Diagramme, Versuchsreihe GBS-5+11. $N = 6, 6, 12, 12, 16, 16, 24, 26, 34, 34, 34, 43, 47$ und 48.

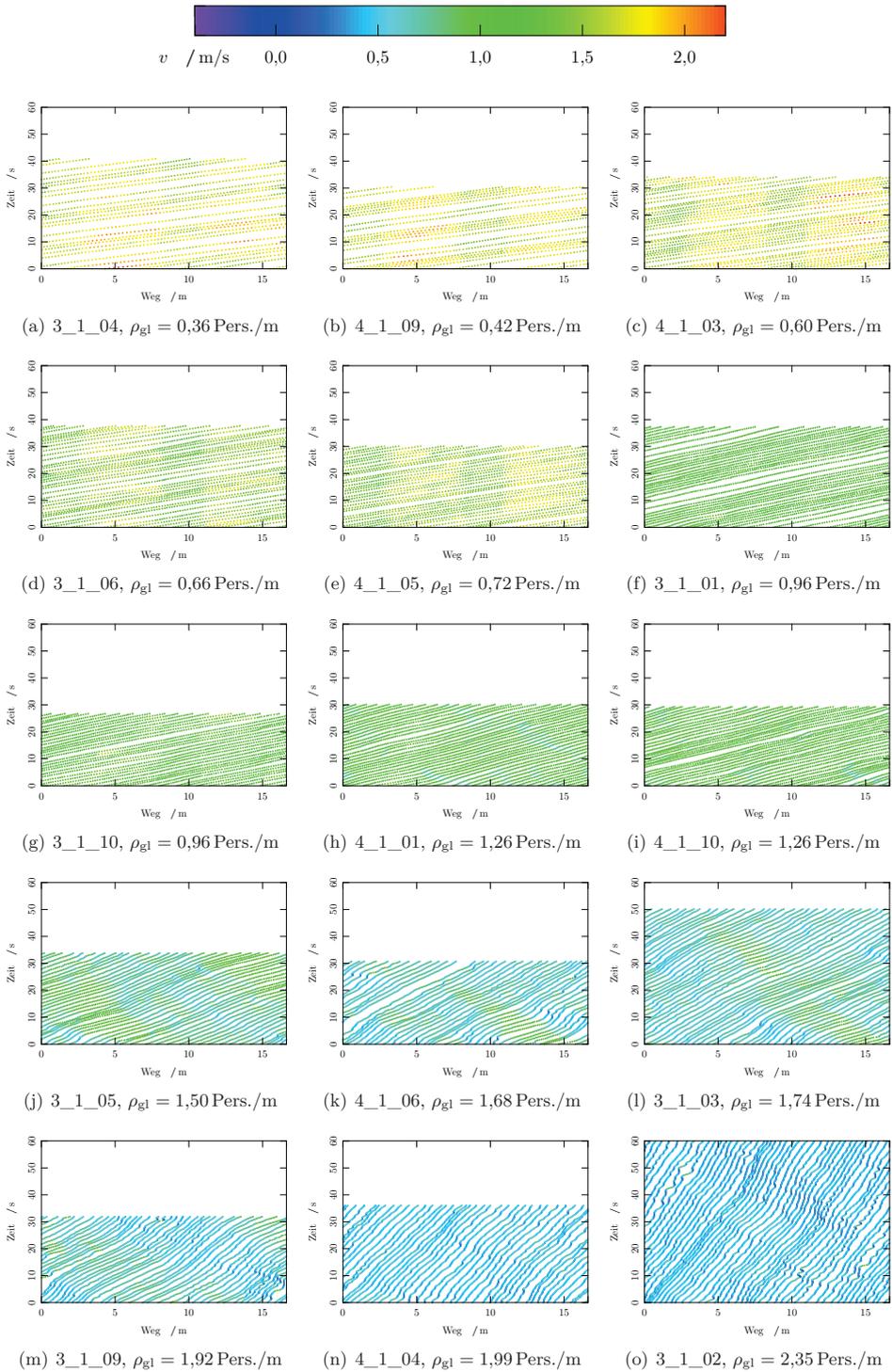


Abb. A.30: Weg-Zeit-Diagramme, Versuchsreihe WDG-6. $N = 6, 7, 10, 11, 12, 16, 21, 21, 25, 28, 29, 32, 33$ und 39.

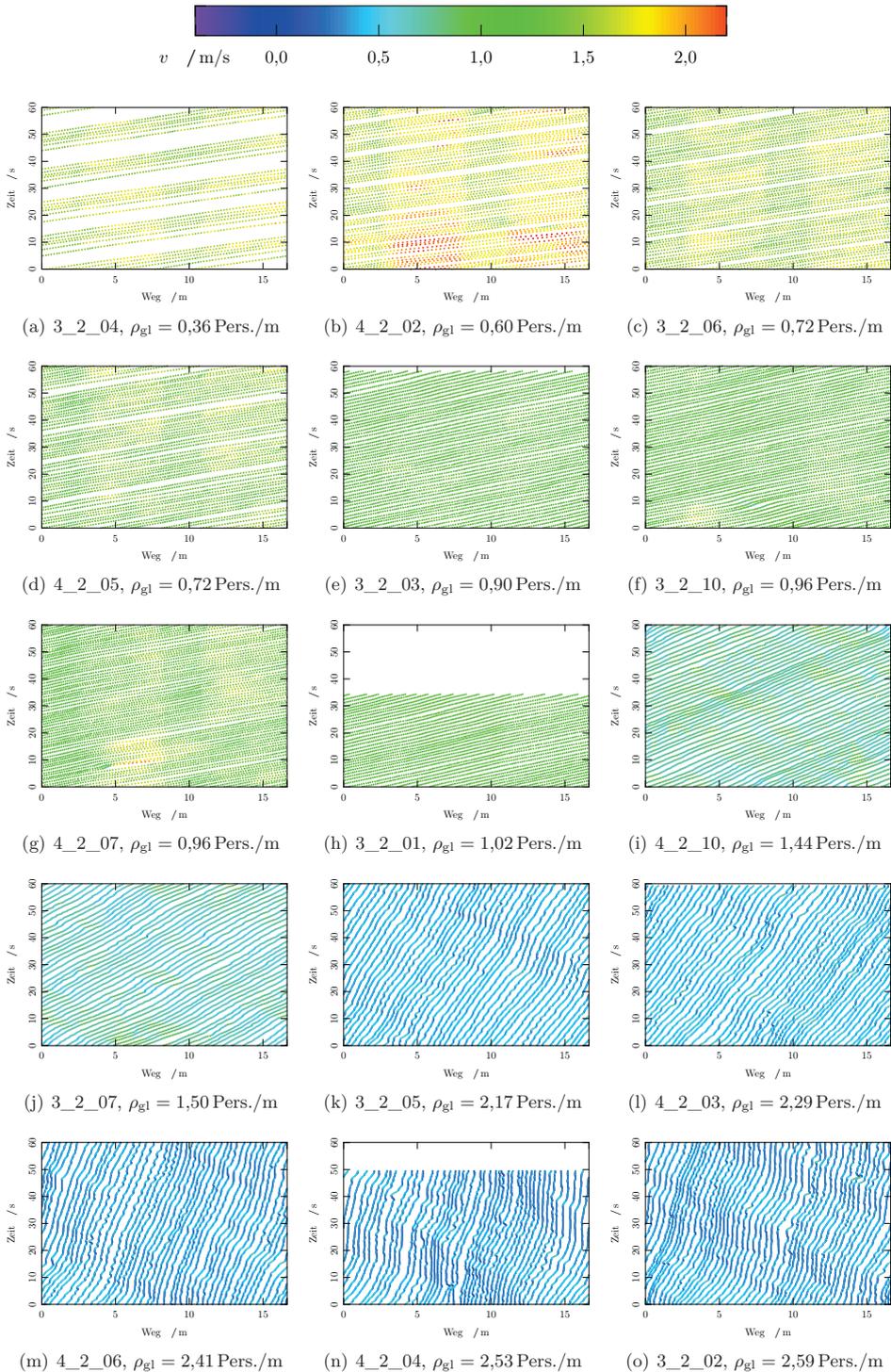


Abb. A.31: Weg-Zeit-Diagramme, Versuchsreihe WDG-11. $N = 6, 10, 12, 12, 15, 16, 17, 24, 25, 36, 38, 40, 42$ und 43.

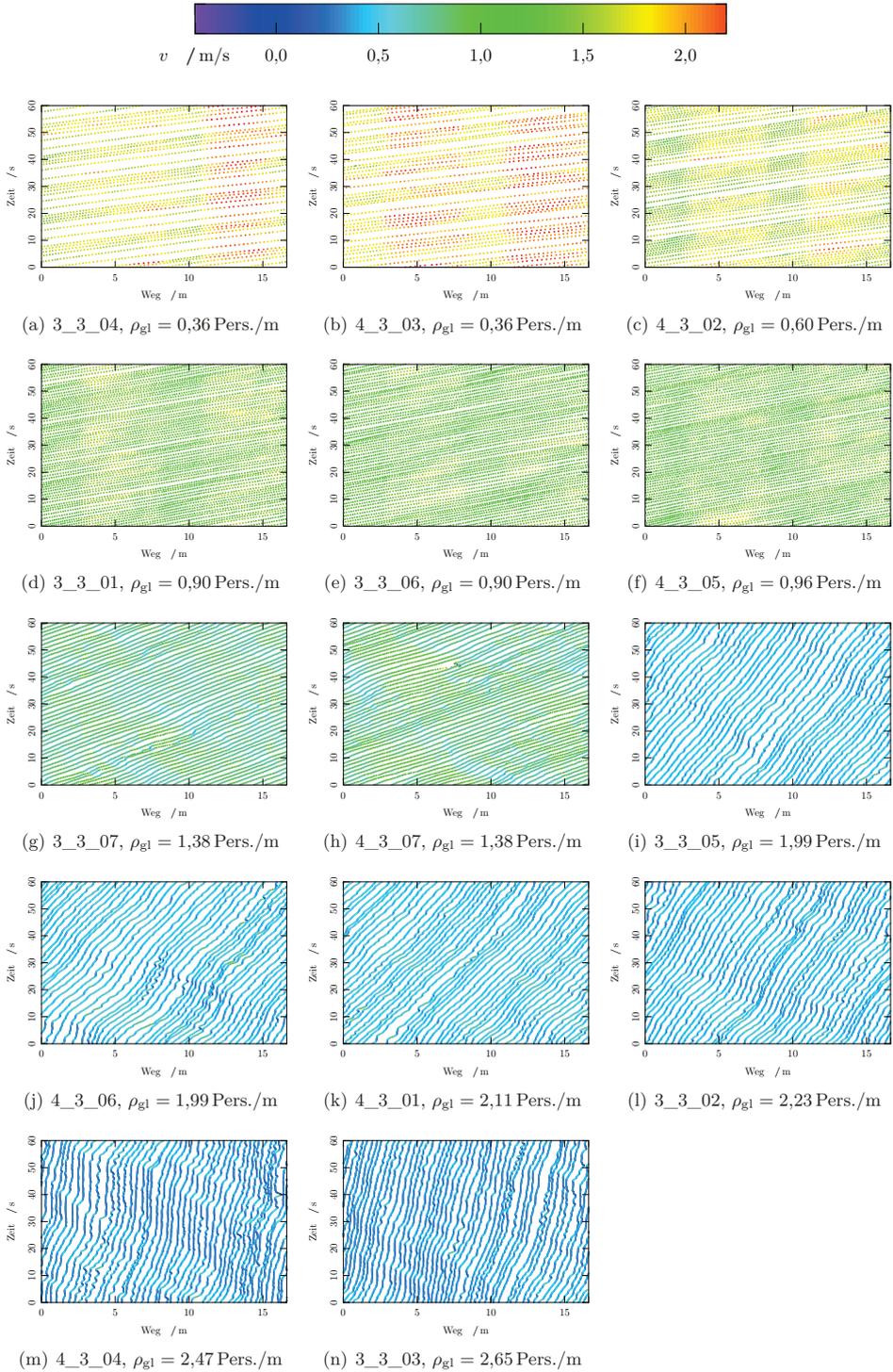


Abb. A.32: Weg-Zeit-Diagramme, Versuchsreihe WDG-6+11. $N = 6, 6, 10, 15, 15, 16, 23, 23, 33, 33, 35, 37, 41$ und 44.

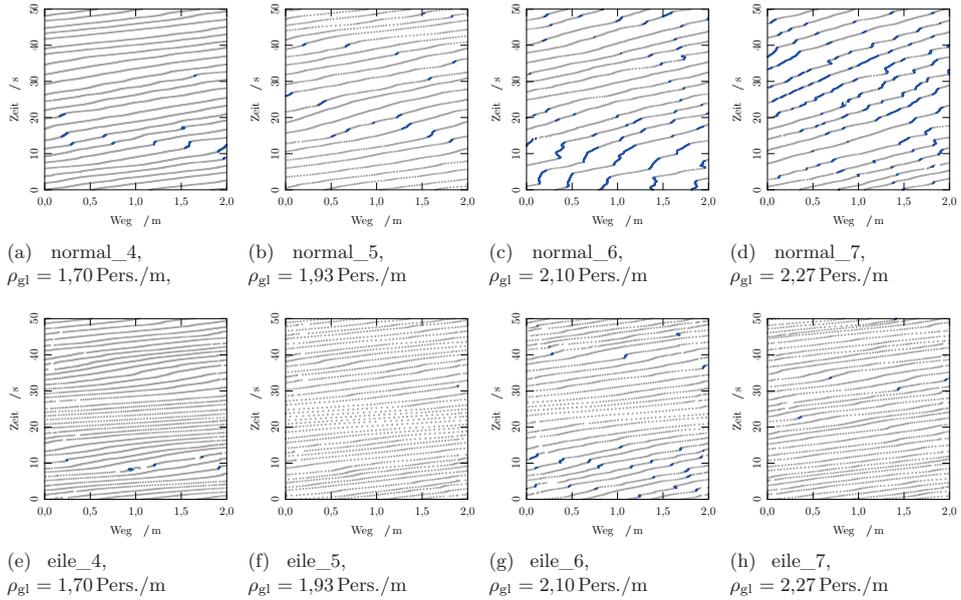


Abb. A.33: Weg-Zeit-Diagramme mit Staueinfärbung, Experiment 1. Es werden nur die Durchläufe von Versuchsreihe BUW-n mit $N = 30, 34, 37$ und 40 (a)-(d) und Versuchsreihe BUW-m mit $N = 30, 34, 37$ und 40 (e)-(h) gezeigt.

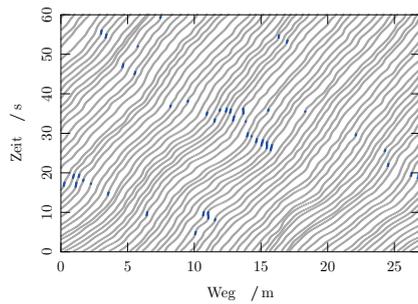
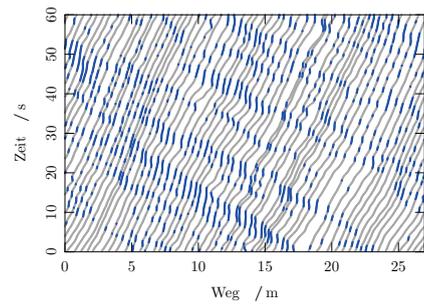
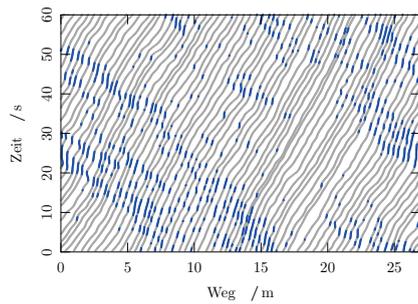
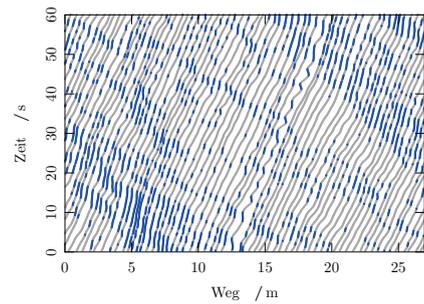
(a) 1D_PHAS_SEP_3, $\rho_{gl} = 1,75$ Pers./m(b) 1D_PHAS_SEP_5, $\rho_{gl} = 1,94$ Pers./m(c) 1D_PHAS_SEP_4, $\rho_{gl} = 2,05$ Pers./m(d) 1D_PHAS_SEP_6, $\rho_{gl} = 2,20$ Pers./m

Abb. A.34: Weg-Zeit-Diagramme mit Staueinfärbung, Experiment 2. Es werden nur die Durchläufe von Versuchsreihe Basigo-1D mit $N = 47, 52, 55$ und 59 gezeigt.

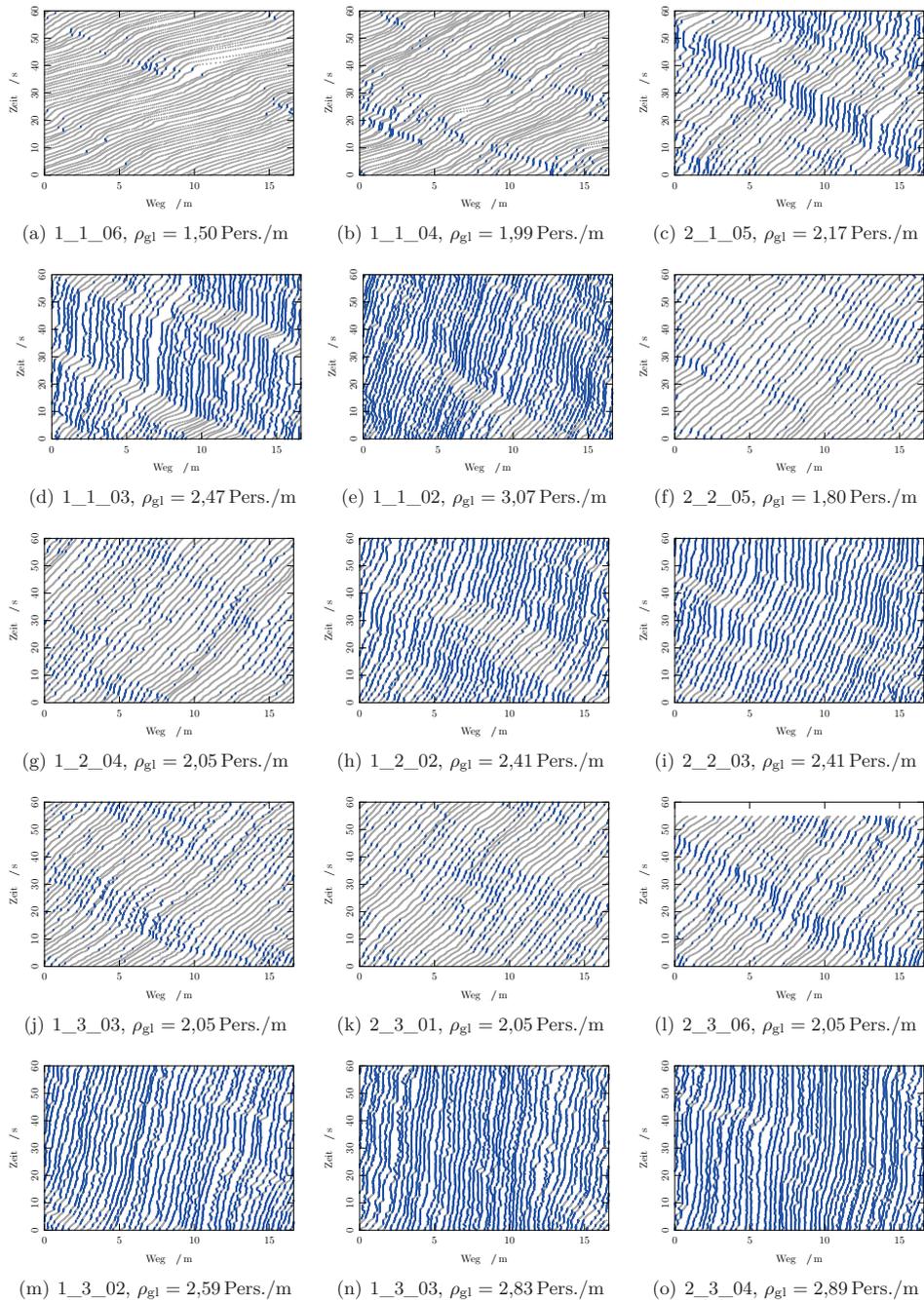


Abb. A.35: Weg-Zeit-Diagramme mit Staufärbung, Experiment 3. Es werden nur die Durchläufe von Versuchsreihe GBS-5 mit $N = 25, 33, 36, 41$ und 51 (a)-(e), Versuchsreihe GBS-11 mit $N = 30, 34, 40$ und 40 (f)-(i) und Versuchsreihe GBS-5+11 mit $N = 34, 34, 34, 43, 47$ und 48 (j)-(o) gezeigt.

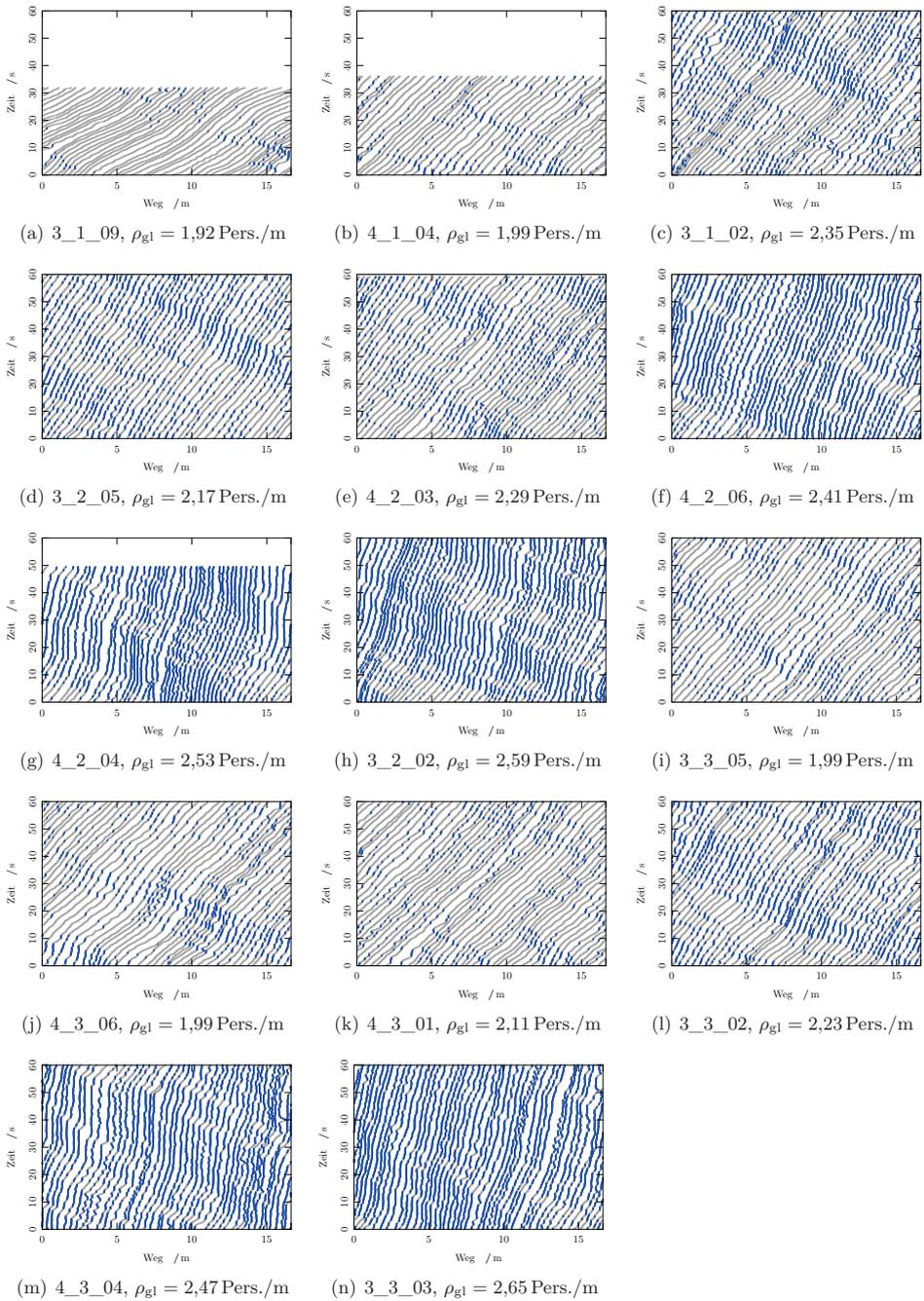


Abb. A.36: Weg-Zeit-Diagramme mit Staufärbung, Experiment 4. Es werden nur die Durchläufe von Versuchsreihe WDG-6 mit $N = 32, 33$ und 39 (a)-(c), Versuchsreihe WDG-11 mit $N = 36, 38, 40, 42$ und 43 (d)-(h) und Versuchsreihe WDG-6+11 mit $N = 33, 33, 35, 37, 41$ und 44 (i)-(n) gezeigt.

Tab. A.11: Ausbreitungsgeschwindigkeit des Staus je Durchlauf für unterschiedliche Grenzggeschwindigkeiten.

Versuchs- reihe	Durchlauf	ρ_{gl} in Pers./m	v_{Stau} in m/s	
			$v_{Grenze} = 0,1$ m/s	$v_{Grenze} = 0,2$ m/s
BUW-n	normal_4	1,70	0,36	–
BUW-n	normal_5	1,93	0,40	0,36
BUW-n	normal_6	2,10	0,41	0,41
BUW-m	eile_4	1,70	–	0,40
BUW-m	eile_5	1,93	–	0,40
BUW-m	eile_6	2,10	–	0,40
Basigo-1D	1D_PHAS_SEP_3	1,75	–	0,45
Basigo-1D	1D_PHAS_SEP_5	1,94	0,40	–
Basigo-1D	1D_PHAS_SEP_4	2,05	0,37	–
Basigo-1D	1D_PHAS_SEP_6	2,20	0,43	–
GBS-5	1_1_06	1,50	0,43	0,39
GBS-5	1_1_04	1,99	0,42	0,41
GBS-5	2_1_05	2,17	0,40	0,40
GBS-5	1_1_03	2,47	0,28	0,30
GBS-5	1_1_02	3,07	0,28	–
GBS-11	2_2_05	1,80	0,40	–
GBS-11	1_2_04	2,05	0,41	–
GBS-11	1_2_02	2,41	0,30	–
GBS-11	2_2_03	2,41	0,32	–
GBS-5+11	1_3_05	2,05	0,43	0,39
GBS-5+11	2_3_01	2,05	0,33	0,30
GBS-5+11	2_3_06	2,05	0,37	–
WDG-6	3_1_03	1,74	–	0,36
WDG-6	3_1_09	1,92	0,40	0,41
WDG-6	4_1_04	1,99	0,43	–
WDG-6	3_1_02	2,35	0,31	–
WDG-11	4_2_03	2,29	0,30	–
WDG-11	3_2_02	2,59	0,31	–
WDG-6+11	4_3_06	1,99	0,44	–

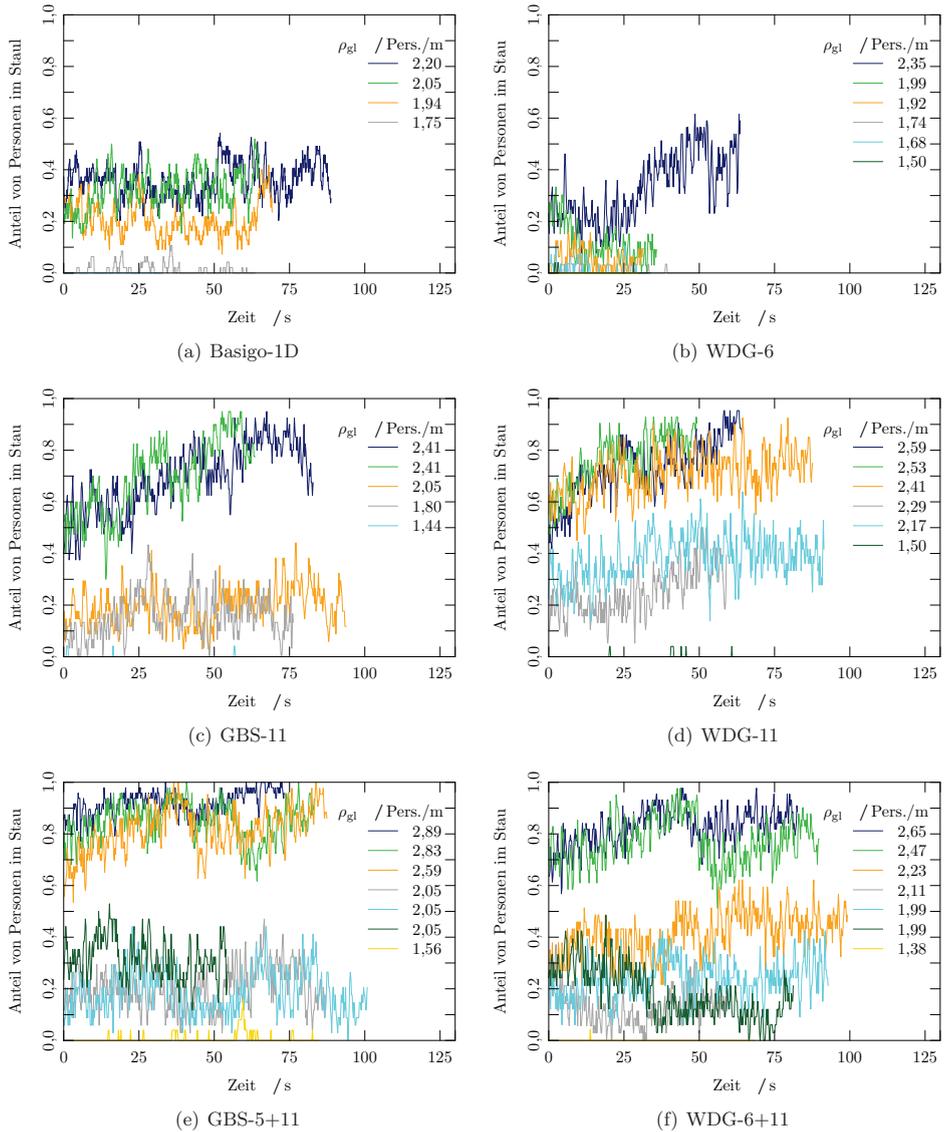


Abb. A.37: Anteile an Personen in der Stopp-Phase im Zeitverlauf, Experimente 2, 3 und 4.

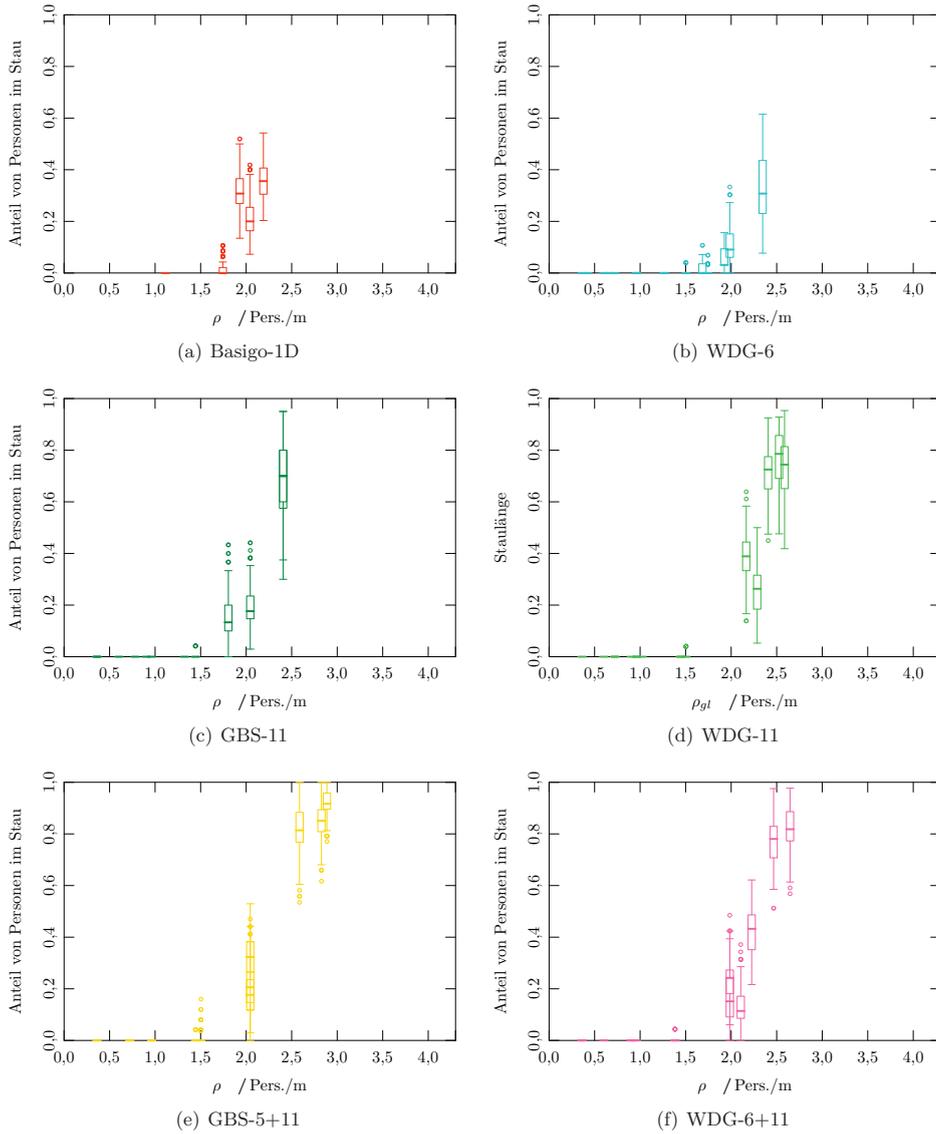


Abb. A.38: Box-Whisker-Plots der Anteile an Personen in der Stopp-Phase, Experimente 2, 3 und 4.

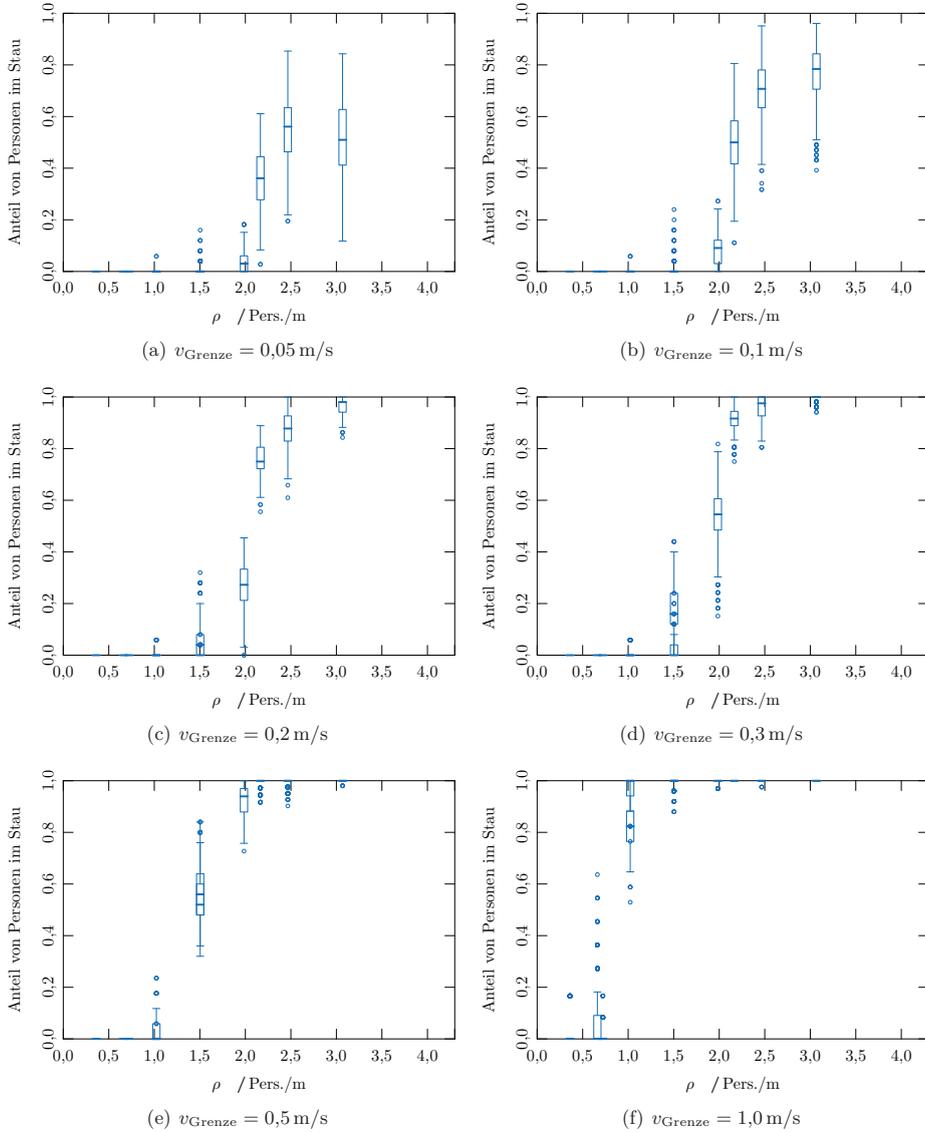


Abb. A.39: Box-Whisker-Plots der Anteile an Personen in der Stopp-Phase, Versuchsreihe GBS-5, unterschiedliche Grenzgeschwindigkeiten.

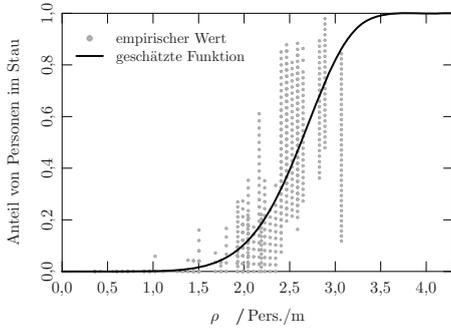
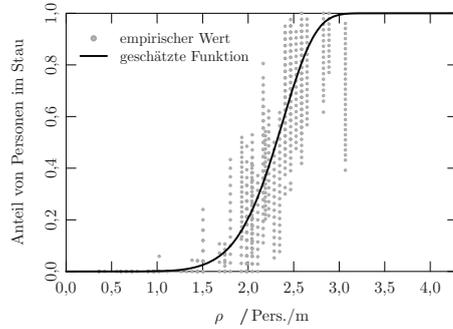
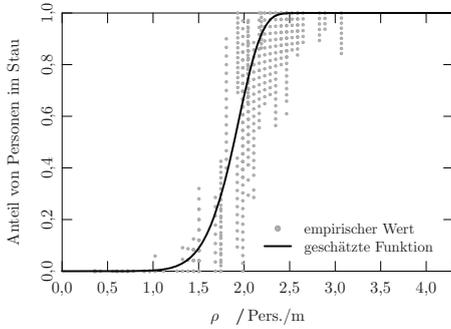
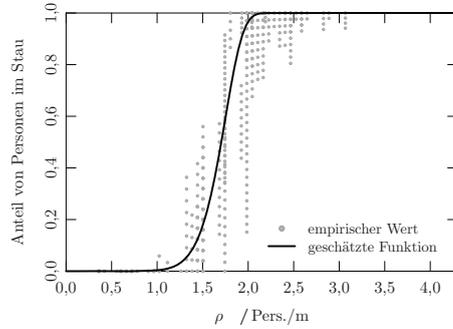
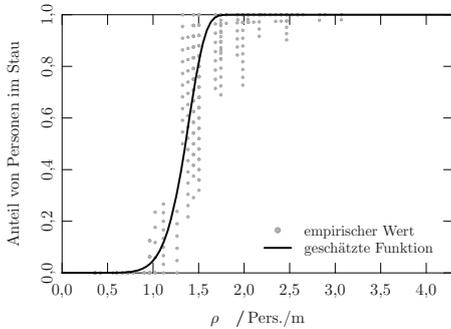
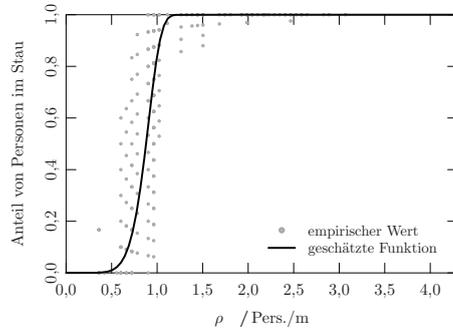
(a) $v_{\text{Grenze}} = 0,05 \text{ m/s}$ (b) $v_{\text{Grenze}} = 0,10 \text{ m/s}$ (c) $v_{\text{Grenze}} = 0,20 \text{ m/s}$ (d) $v_{\text{Grenze}} = 0,30 \text{ m/s}$ (e) $v_{\text{Grenze}} = 0,50 \text{ m/s}$ (f) $v_{\text{Grenze}} = 1,00 \text{ m/s}$

Abb. A.40: Anteile an Personen in der Stopp-Phase mit Funktion, Experimente 2, 3 und 4, unterschiedliche Grenzggeschwindigkeiten.

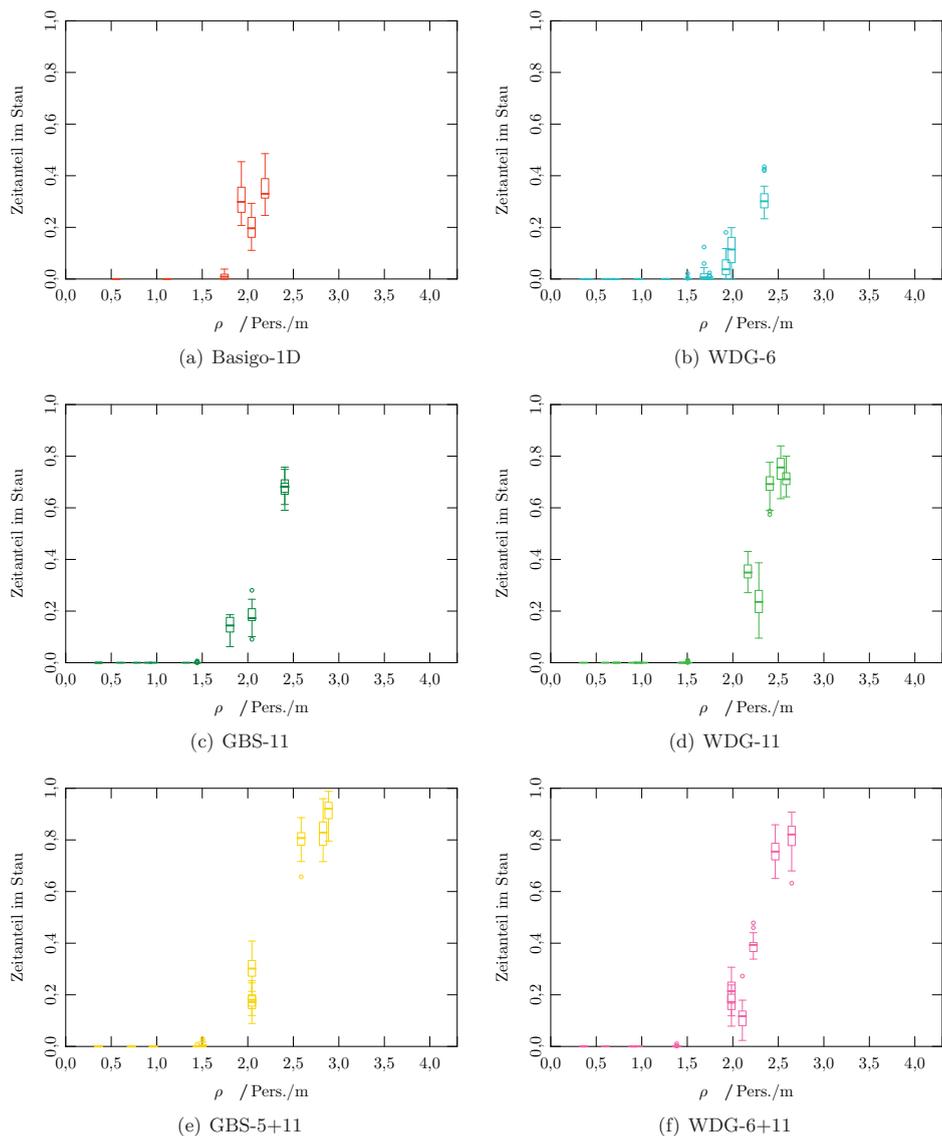


Abb. A.41: Box-Whisker-Plots des Zeitanteils in der Stopp-Phase, Experimente 2, 3 und 4.

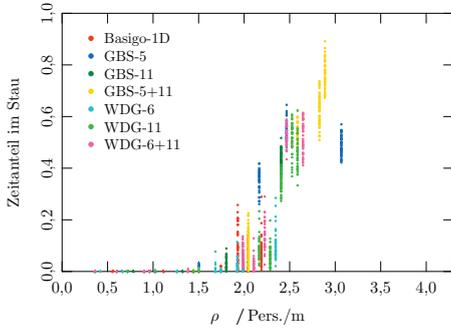
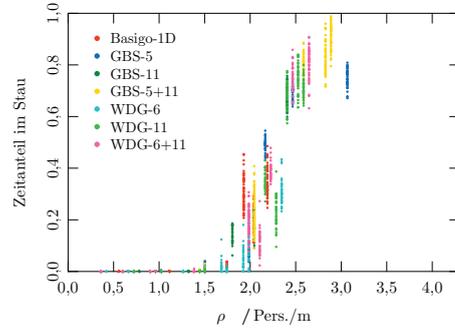
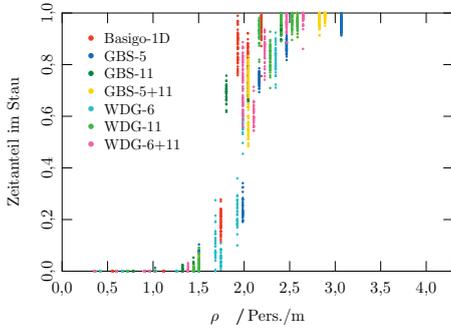
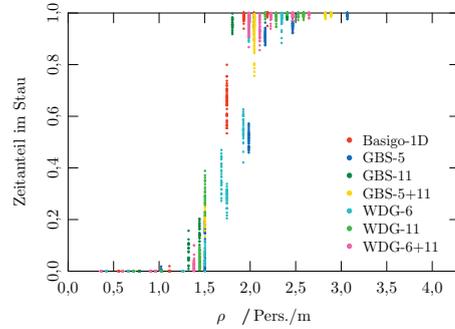
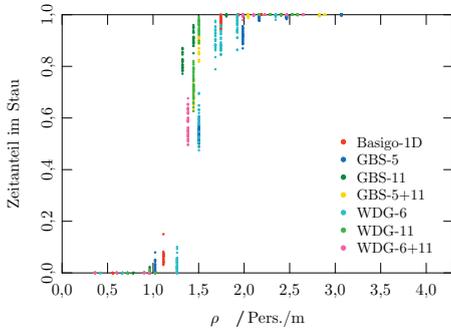
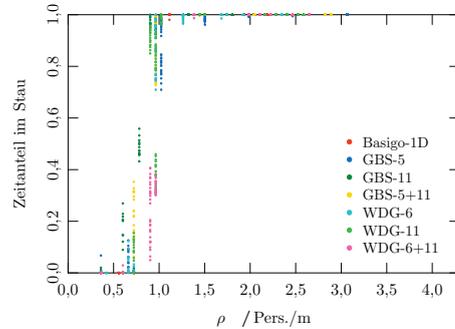
(a) $v_{\text{Grenze}} = 0,05 \text{ m/s}$ (b) $v_{\text{Grenze}} = 0,10 \text{ m/s}$ (c) $v_{\text{Grenze}} = 0,20 \text{ m/s}$ (d) $v_{\text{Grenze}} = 0,30 \text{ m/s}$ (e) $v_{\text{Grenze}} = 0,50 \text{ m/s}$ (f) $v_{\text{Grenze}} = 1,00 \text{ m/s}$

Abb. A.42: Zeitanteil in der Stopp-Phase als Punktwolke, Experimente 2, 3 und 4, unterschiedliche Grenzgeschwindigkeiten.

Tab. A.12: Geschätzte Parameter für den Zeitanteil in der Stopp-Phase. Mit Konfidenzintervall (Niveau 99%), Bestimmtheitsmaß sowie kritischer Dichte.

Versuchsreihe	v_{Grenze} in m/s	N_2^*	N_3^*	R^2	$\Phi_{0,05}$ in Pers./m
Basigo-1D	0,10	0,40 [0,40; 0,40]	6,19 [5,95; 6,44]	0,65	–
GBS-5	0,10	0,42 [0,42; 0,42]	7,98 [7,69; 8,26]	0,88	–
GBS-11	0,10	0,42 [0,42; 0,42]	9,05 [9,03; 9,54]	0,93	–
GBS-5+11	0,10	0,40 [0,40; 0,41]	7,12 [7,01; 7,24]	0,97	–
WDG-6	0,10	0,39 [0,38; 0,39]	9,21 [8,76; 9,69]	0,82	–
WDG-11	0,10	0,41 [0,41; 0,41]	7,91 [7,66; 8,17]	0,92	–
WDG-6+11	0,10	0,42 [0,41; 0,42]	8,52 [8,36; 8,68]	0,94	–
alle	0,05	0,36 [0,35; 0,36]	6,35 [6,09; 6,62]	0,88	1,77
alle	0,10	0,41 [0,41; 0,41]	7,81 [7,51; 8,13]	0,90	1,68
alle	0,20	0,50 [0,50; 0,50]	8,52 [8,04; 9,03]	0,83	1,41
alle	0,30	0,55 [0,55; 0,56]	9,38 [8,99; 9,81]	0,89	1,32
alle	0,50	0,70 [0,70; 0,70]	8,84 [8,33; 9,39]	0,91	1,02
alle	1,00	1,09 [1,08; 1,10]	7,94 [7,42; 8,53]	0,89	0,63

Band / Volume 30

Efficient Task-Local I/O Operations of Massively Parallel Applications

W. Frings (2016), xiv, 140 pp

ISBN: 978-3-95806-152-1

URN: urn:nbn:de:0001-2016062000

Band / Volume 31

A study on buoyancy-driven flows: Using particle image velocimetry for validating the Fire Dynamics Simulator

by A. Meunders (2016), xxi, 150 pp

ISBN: 978-3-95806-173-6

URN: urn:nbn:de:0001-2016091517

Band / Volume 32

Methoden für die Bemessung der Leistungsfähigkeit multidirektional genutzter Fußverkehrsanlagen

S. Holl (2016), xii, 170 pp

ISBN: 978-3-95806-191-0

URN: urn:nbn:de:0001-2016120103

Band / Volume 33

JSC Guest Student Programme Proceedings 2016

edited by I. Kabadshow (2017), iii, 191 pp

ISBN: 978-3-95806-225-2

URN: urn:nbn:de:0001-2017032106

Band / Volume 34

Multivariate Methods for Life Safety Analysis in Case of Fire

B. Schröder (2017), x, 222 pp

ISBN: 978-3-95806-254-2

URN: urn:nbn:de:0001-2017081810

Band / Volume 35

Understanding the formation of wait states in one-sided communication

M.-A. Hermanns (2018), xiv, 144 pp

ISBN: 978-3-95806-297-9

URN: urn:nbn:de:0001-2018012504

Band / Volume 36

A multigrid perspective on the parallel full approximation scheme in space and time

D. Moser (2018), vi, 131 pp

ISBN: 978-3-95806-315-0

URN: urn:nbn:de:0001-2018031401

Band / Volume 37

Analysis of I/O Requirements of Scientific Applications

S. El Sayed Mohamed (2018), XV, 199 pp

ISBN: 978-3-95806-344-0

URN: urn:nbn:de:0001-2018071801

Band / Volume 38

Wayfinding and Perception Abilities for Pedestrian Simulations

E. Andresen (2018), 4, x, 162 pp

ISBN: 978-3-95806-375-4

URN: urn:nbn:de:0001-2018121810

Band / Volume 39

**Real-Time Simulation and Prognosis of Smoke Propagation in
Compartments Using a GPU**

A. Küsters (2018), xvii, 162, LIX pp

ISBN: 978-3-95806-379-2

URN: urn:nbn:de:0001-2018121902

Band / Volume 40

Extreme Data Workshop 2018

Forschungszentrum Jülich, 18-19 September 2018

Proceedings

M. Schultz, D. Pleiter, P. Bauer (Eds.) (2019), 64 pp

ISBN: 978-3-95806-392-1

URN: urn:nbn:de:0001-2019032102

Band / Volume 41

A lattice QCD study of nucleon structure with physical quark masses

N. Hasan (2020), xiii, 157 pp

ISBN: 978-3-95806-456-0

URN: urn:nbn:de:0001-2020012307

Band / Volume 42

**Mikroskopische Fundamentaldiagramme der Fußgängerdynamik –
Empirische Untersuchung von Experimenten eindimensionaler Bewegung
sowie quantitative Beschreibung von Stau-Charakteristika**

V. Ziemer (2020), XVIII, 155 pp

ISBN: 978-3-95806-470-6

URN: urn:nbn:de:0001-2020051000

IAS Series
Band / Volume 42
ISBN 978-3-95806-470-6