

# **Methoden für die Bemessung der Leistungsfähigkeit multidirektional genutzter Fußverkehrsanlagen**

Dissertation zur Erlangung  
eines Doktorgrades in der Fakultät  
„Architektur und Bauingenieurwesen“  
der Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Stefan Holl  
aus Fulda

Wuppertal, 2016

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20161222-092719-9

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3A468-20161222-092719-9>]



## Kurzfassung

Alle maßgeblichen nationalen und internationalen Regelwerke zur Dimensionierung von Fußverkehrsanlagen stützen sich auf das bereits in der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts durch Oeding und Fruin begründete Level-of-Service-Konzept. Es definiert Qualitätsstufen, die den Zusammenhang zwischen Personendichte und Bewegungskomfort beschreiben. Die wissenschaftliche Grundlage hierfür liefert das Fundamentaldiagramm. Es stellt die Beziehung zwischen Dichte und Geschwindigkeit bzw. der Dichte und dem Verkehrsfluss dar. Für bi- und multidirektionale Verkehre, wie sie z. B. in Bahnhöfen oder bei Großveranstaltungen regelmäßig vorkommen, fehlt jedoch die zuverlässige, empirische Datenbasis. Für den multidirektionalen Verkehr an Kreuzungen stehen zudem bis heute keine Methoden zur Verfügung, den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit, Dichte und Personenfluss zutreffend zu beschreiben.

Die vorliegende Arbeit stellt neue Methoden für die Bemessung der Leistungsfähigkeit multidirektional genutzter Fußverkehrsanlagen vor. Empirische Grundlage sind die in den Forschungsprojekten BaSiGo und Hermes durchgeführten Laborexperimente, an denen bis zu etwa 1000 Probanden gleichzeitig teilgenommen haben. Es wird ein Konzept beschrieben, das es ermöglicht, den Personenfluss, die Dichte und die Geschwindigkeit auf multidirektional genutzten Fußverkehrsanlagen konsistent zu bestimmen. Das neue Konzept überträgt die Raum-Zeit-Mittelwerte, die Edie in den 1960er Jahren für den spurgebundenen Fahrzeugverkehr eingeführt hat, auf beliebig gerichtete Fußverkehre. Ergänzend wird ein Skalierungsfaktor begründet, der es erlaubt, die Ergebnisse auch auf solche Verkehrsanlagen zu übertragen, die nicht unmittelbar untersucht wurden. Hierfür wird das „Konzept des spezifischen Flusses“, welches sich bei uni- und bidirektionalen Verkehren bewährt hat, verallgemeinert, so dass es auch für den multidirektionalen Verkehr auf Kreuzungen angewendet werden kann. Darüber hinaus wird ein methodischer Ansatz entwickelt, die „Konfliktichte“ innerhalb eines Personenstroms zu quantifizieren, um die Unterschiede in der Leistungsfähigkeit derselben Verkehrsanlage bei unterschiedlichen Nutzungsarten – bspw. unidirektionaler vs. bidirektionaler Verkehr – beschreiben zu können.

Die ermittelten Kenngrößen der Leistungsfähigkeit werden in das Level-of-Safety-Konzept integriert. Dieses wurde innerhalb des Forschungsprojektes BaSiGo erarbeitet. Das neue Konzept orientiert sich am etablierten Level-of-Service-Konzept, fokussiert jedoch auf den Aspekt der Sicherheit bei Großveranstaltungen. An Stelle der feinskaligen Unterteilung in Qualitätsstufen, wie sie das Level-of-Service-Konzept vorsieht, erfolgt die Klassifizierung mit dem Level-of-Safety-Konzept anhand eines praktikablen Ampelsystems.

## Abstract

All relevant national and international regulations for dimensioning the pedestrian traffic facilities are based on Oedings's and Fruin's level of service concept from the second half of the last century. It defines quality levels that describe the correlation between density and comfort in pedestrian flows. The scientific background for this is provided by the fundamental diagram. It shows the relationship between density and velocity or density and traffic flow respectively. However, for bi- and multi-directional traffic as in stations or at major events no reliable empirical data exist. Furthermore, for multidirectional traffic at intersections there are no methods available to describe the relationship between speed, density and flow in a consistent way.

This work introduces new methods for assessing the capacity of pedestrian traffic facilities which are used multidirectionally. It is empirically based on laboratory experiments with approximately up to 1000 volunteers which are conducted as part of the research projects BaSiGo and Hermes. The concept allows to determine consistently the flow of people, the density and the speed on multidirectional used traffic facilities. It generalises the space-time averages for the vehicular traffic, that Edie described in the 1960s, on pedestrian traffic in any order. In addition, a scaling factor is established that enables to transfer the results to such pedestrian traffic facilities, which have not been directly investigated. For this purpose, the "specific flow concept", which has proven itself in uni- and bidirectional traffic, has been generalised, so that it can be applied to the multi-directional pedestrian traffic on intersections. Furthermore, a methodological approach is developed to quantify the "conflict density" within a people flow to describe the differences in the performance of the same traffic facility for different types of use - for example unidirectional vs. bidirectional traffic.

The established parameters of performance are integrated into the level of *safety* concept. This concept has been developed within the research project BaSiGo. It is based on the established level of service concept, however, it focuses on the aspect of safety at major events. Instead of a fine-scaled subdivision of quality levels, as prescribed in the level of service concept, the new classification with the level of safety concept is based on a practicable traffic light system.

# Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Motivation . . . . .   | 1         |
| 1.2      | Ziele der Arbeit . . . . .   | 1         |
| 1.3      | Aufbau der Arbeit . . . . .  | 2         |
| 1.4      | Begriffe und Einheiten . . . . .                                     | 3         |
| <b>2</b> | <b>Stand der Wissenschaft und Technik</b>                            | <b>5</b>  |
| 2.1      | Regeln der Technik . . . . .   | 5         |
| 2.1.1    | Forschungsarbeiten seit Beginn des 20. Jahrhunderts . . . . .        | 5         |
| 2.1.2    | Regeln der Technik im Vergleich . . . . .                            | 22        |
| 2.1.3    | Grenzen und Probleme . . . . .                                       | 23        |
| 2.2      | Messmethoden . . . . .   | 25        |
| 2.2.1    | Grafische Darstellung . . . . .                                      | 25        |
| 2.2.2    | Etablierte Messmethoden . . . . .                                    | 28        |
| 2.3      | Aktuelle Forschung . . . . .   | 37        |
| 2.3.1    | Erfassung von Trajektorien . . . . .                                 | 37        |
| 2.3.2    | Voronoi-Verfahren . . . . .  | 38        |
| 2.3.3    | Mittelwerte der Geschwindigkeit . . . . .                            | 40        |
| 2.3.4    | Konzept des spezifischen Flusses . . . . .                           | 41        |
| <b>3</b> | <b>Laborexperimente</b>  | <b>43</b> |
| 3.1      | Laborexperimente und Feldstudien seit der Jahrtausendwende . . . . . | 43        |
| 3.2      | Experimente im Projekt BaSiGo . . . . .                              | 44        |
| 3.2.1    | Projektrahmen . . . . .  | 44        |
| 3.2.2    | Vorbereitung und Durchführung der Experimente . . . . .              | 45        |
| 3.2.3    | Konfiguration der Experimente . . . . .                              | 48        |
| 3.3      | Experimente im Projekt Hermes . . . . .                              | 57        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 3.3.1    | Projektrahmen . . . . .  | 57         |
| 3.3.2    | Beschreibung und Auswahl der Experimente . . . . .             | 58         |
| <b>4</b> | <b>Neue Konzepte der Datenanalyse</b>                          | <b>61</b>  |
| 4.1      | Messung und Skalierung multidirektionaler Verkehre . . . . .   | 61         |
| 4.1.1    | Einführung in die neue Messmethode . . . . .                   | 61         |
| 4.1.2    | Beschreibung und Notationen . . . . .                          | 62         |
| 4.1.3    | Berechnung von Fluss, Dichte und Geschwindigkeit . . . . .     | 64         |
| 4.1.4    | Skalierung zwischen Fluss und spezifischem Fluss . . . . .     | 66         |
| 4.1.5    | Grenzwertbetrachtung für den Skalierungsfaktor . . . . .       | 67         |
| 4.2      | Indikatoren der Konfliktdichte . . . . .                       | 70         |
| 4.2.1    | Streuung der Geschwindigkeiten . . . . .                       | 70         |
| 4.2.2    | Beständigkeit der Nachbarschaften . . . . .                    | 71         |
| 4.2.3    | Zeiten bis zur Kollision . . . . .                             | 75         |
| <b>5</b> | <b>Datenanalyse</b>  | <b>79</b>  |
| 5.1      | Intendierte Messgrößen . . . . .                               | 79         |
| 5.2      | Stationarität . . . . .  | 80         |
| 5.3      | Referenzgeschwindigkeiten . . . . .                            | 81         |
| 5.4      | Leistungsfähigkeit der Verkehrsanlagen . . . . .               | 83         |
| 5.4.1    | Unidirektional genutzte Korridore . . . . .                    | 83         |
| 5.4.2    | Bidirektional genutzte Korridore . . . . .                     | 84         |
| 5.4.3    | T-Kreuzung mit zusammenfließenden Personenströmen . . . . .    | 85         |
| 5.4.4    | Multidirektional genutzte Kreuzung mit vier Zugängen . . . . . | 92         |
| 5.4.5    | Multidirektional genutzte Kreuzung mit drei Zugängen . . . . . | 96         |
| 5.5      | Indikatoren der Konfliktdichte . . . . .                       | 100        |
| 5.5.1    | Streuung der Geschwindigkeiten . . . . .                       | 100        |
| 5.5.2    | Beständigkeit der Nachbarschaften . . . . .                    | 101        |
| 5.5.3    | Zeiten bis zur Kollision . . . . .                             | 108        |
| <b>6</b> | <b>Kennwerte für die Bemessung</b>                             | <b>111</b> |
| <b>7</b> | <b>Fazit und Ausblick</b>                                      | <b>115</b> |
|          | <b>Literatur</b>   | <b>117</b> |
| <b>A</b> | <b>Rahmenbedingungen der BaSiGo-Experimente</b>                | <b>129</b> |

---

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>B</b> | <b>Dokumentation der Rohdaten</b>                              | <b>135</b> |
| <b>C</b> | <b>Fundamentaldiagramme der analysierten Einzelexperimente</b> | <b>139</b> |
| C.1      | BaSiGo: UNI_CORR_500 . . . . .                                 | 140        |
| C.2      | Hermes: UO_180 . . . . .                                       | 141        |
| C.3      | Hermes: UO_240 . . . . .                                       | 142        |
| C.4      | Hermes: UO_300 . . . . .                                       | 143        |
| C.5      | BaSiGo: BI_CORR_400_A . . . . .                                | 144        |
| C.6      | BaSiGo: BI_CORR_400_B . . . . .                                | 145        |
| C.7      | Hermes: BO_360 . . . . .                                       | 146        |
| C.8      | Hermes: BOA_300 . . . . .                                      | 147        |
| C.9      | Hermes: BOT_300 . . . . .                                      | 148        |
| C.10     | Hermes: BOT_360 . . . . .                                      | 149        |
| C.11     | Hermes: KO_240 . . . . .                                       | 150        |
| C.12     | Hermes: KO_300 . . . . .                                       | 151        |
| C.13     | BaSiGo: CROSSING_90_A . . . . .                                | 152        |
| C.14     | BaSiGo: CROSSING_90_B . . . . .                                | 153        |
| C.15     | BaSiGo: CROSSING_90_C . . . . .                                | 154        |
| C.16     | BaSiGo: CROSSING_90_D . . . . .                                | 155        |
| C.17     | BaSiGo: CROSSING_90_E . . . . .                                | 156        |
| C.18     | BaSiGo: CROSSING_90_F . . . . .                                | 157        |
| C.19     | BaSiGo: CROSSING_90_G . . . . .                                | 158        |
| C.20     | BaSiGo: CROSSING_120_A . . . . .                               | 159        |
| C.21     | BaSiGo: CROSSING_120_B . . . . .                               | 160        |
| C.22     | BaSiGo: CROSSING_120_C . . . . .                               | 161        |
| <b>D</b> | <b>Ergänzende Diagramme</b>                                    | <b>163</b> |
| D.1      | Skalierungsfaktoren für den unidirektionalen Verkehr . . . . . | 164        |
| D.2      | Skalierungsfaktoren für den bidirektionalen Verkehr . . . . .  | 165        |
| D.3      | Skalierungsfaktoren für die T-Kreuzung . . . . .               | 166        |
| <b>E</b> | <b>Nomenklatur</b>   | <b>167</b> |
| E.1      | Formelzeichen und Indizes . . . . .                            | 167        |
| E.2      | Schriftschnitt und Konventionen . . . . .                      | 169        |



# Abbildungsverzeichnis

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | Fundamentaldiagramm nach Greenshields . . . . .                                     | 6  |
| 2.2  | Fundamentaldiagramm nach Hankin/Wright . . . . .                                    | 7  |
| 2.3  | Fundamentaldiagramme nach Oeding . . . . .  | 9  |
| 2.4  | Fundamentaldiagramme nach Older . . . . .   | 11 |
| 2.5  | Fundamentaldiagramme nach Predtetschenski/Milinski . . . . .                        | 12 |
| 2.6  | Häufigkeit von Konflikten bei kreuzendem Verkehr nach Fruin . . . . .               | 14 |
| 2.7  | Fundamentaldiagramme nach Fruin . . . . .   | 15 |
| 2.8  | Vergleich häufig zitierter Fundamentaldiagramme . . . . .                           | 24 |
| 2.9  | Ort-Zeit-Diagramm für das eindimensionale System . . . . .                          | 26 |
| 2.10 | Ort-Zeit-Diagramm für den unidirektionalen Verkehr . . . . .                        | 27 |
| 2.11 | Ort-Zeit-Diagramm für den bidirektionalen Verkehr . . . . .                         | 27 |
| 2.12 | Dreidimensionale Darstellung des Ort-Zeit-Diagramms . . . . .                       | 28 |
| 2.13 | Schnittebenen in der dreidimensionalen Darstellung des Ort-Zeit-Diagramms . . . . . | 29 |
| 2.14 | Darstellung der Messmethode 1 . . . . .   | 30 |
| 2.15 | Darstellung der Messmethode 2 . . . . .   | 31 |
| 2.16 | Darstellung der Messmethode 3 . . . . .   | 33 |
| 2.17 | Darstellung der Messmethode 4 . . . . .   | 34 |
| 2.18 | Bestimmung der Momentangeschwindigkeit in Messmethode 5 . . . . .                   | 36 |
| 2.19 | Darstellung der Messmethode 5 . . . . .   | 37 |
| 2.20 | Trajektorien im Bereich des Mundlochs eines Stadions . . . . .                      | 38 |
| 2.21 | Delaunay-Triangulation und Voronoi-Diagramm . . . . .                               | 39 |
| 3.1  | Teilnehmer der BaSiGo-Experimente . . . . .   | 46 |
| 3.2  | Marker für das individuelle Tracking . . . . .                                      | 48 |
| 3.3  | Aufbauskizze und Durchführung des Experiments UNI_CORR_500 . . . . .                | 51 |
| 3.4  | Aufbauskizze und Durchführung des Experiments BI_CORR_400 . . . . .                 | 52 |
| 3.5  | Aufbauskizze und Durchführung des Experiments CROSSING_90 . . . . .                 | 54 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 3.6  | Aufbauskizze und Durchführung des Experiments CROSSING_120 . . . . .                | 56  |
| 3.7  | Aufbau- und Verkehrsskizzen der Hermes-Experimente . . . . .                        | 59  |
| 4.1  | Notation für die Berechnungen bei multidirektionalen Verkehrsanlagen . . . . .      | 64  |
| 4.2  | Skizzen zur Fallunterscheidung in den Gleichungen 4.1 und 4.2 . . . . .             | 65  |
| 4.3  | Grenzwerte für die in Luftlinie gemessenen Wege über die Messfläche . . . . .       | 68  |
| 4.4  | These zum Grenzwert der Standardabweichung . . . . .                                | 71  |
| 4.5  | Mittlere Anzahl an Delaunay-Nachbarschaften . . . . .                               | 72  |
| 4.6  | Nachbarschaftsbeziehungen auf Basis der Delaunay-Triangulation . . . . .            | 73  |
| 4.7  | Anzahl der Nachbarn am Beispiel des Experiments CROSSING_90_D . . . . .             | 74  |
| 4.8  | These zur Änderung der Nachbarschaften beim uni, bi- und multidirektionalen Verkehr | 75  |
| 4.9  | Zeitpunkte für die Kollision zweier Personen . . . . .                              | 76  |
| 4.10 | Darstellung der These zu den Kollisionszeiten . . . . .                             | 78  |
| 5.1  | Schematische Darstellung des Fundamentaldiagramms . . . . .                         | 80  |
| 5.2  | Strukturtypen für den uni-, bi- und multidirektionalen Verkehr . . . . .            | 81  |
| 5.3  | Begrenzung der Daten auf den Zustand der Stationarität . . . . .                    | 82  |
| 5.4  | Trajektorien und Momentaufnahme des Experiments SOLO_REF_A . . . . .                | 83  |
| 5.5  | Freie Gehgeschwindigkeiten in den Experimenten SOLO_REF_A, B und H . . . . .        | 84  |
| 5.6  | Trajektorien des unidirektionalen Verkehrs im Korridor . . . . .                    | 85  |
| 5.7  | Fundamentaldiagramme für den unidirektionalen Verkehr im Korridor . . . . .         | 86  |
| 5.8  | Mittelwerte und Standardabweichung zu Abbildung 5.7 . . . . .                       | 87  |
| 5.9  | Skalierungsfaktoren für den unidirektionalen Verkehr im Korridor . . . . .          | 88  |
| 5.10 | Trajektorien des bidirektionalen Verkehrs im Korridor . . . . .                     | 89  |
| 5.11 | Fundamentaldiagramme für den bidirektionalen Verkehr im Korridor . . . . .          | 90  |
| 5.12 | Mittelwerte und Standardabweichung zu Abbildung 5.11 . . . . .                      | 91  |
| 5.13 | Skalierungsfaktoren für den bidirektionalen Verkehr im Korridor . . . . .           | 92  |
| 5.14 | Trajektorien der T-Kreuzung mit zusammenfließenden Personenströmen . . . . .        | 93  |
| 5.15 | Fundamentaldiagramme für die T-Kreuzung . . . . .                                   | 94  |
| 5.16 | Mittelwerte und Standardabweichung zu Abbildung 5.15 . . . . .                      | 95  |
| 5.17 | Skalierungsfaktoren für die T-Kreuzung mit zusammenfließenden Personenströmen .     | 96  |
| 5.18 | Trajektorien des multidirektionalen Verkehrs in der Kreuzung mit vier Zugängen . .  | 97  |
| 5.19 | Fundamentaldiagramme für die multidirektional genutzte Kreuzung mit vier Zugängen   | 98  |
| 5.20 | Mittelwerte und Standardabweichung zu Abbildung 5.19 . . . . .                      | 99  |
| 5.21 | Skalierungsfaktoren für die multidirektional genutzte Kreuzung mit vier Zugängen .  | 100 |
| 5.22 | Trajektorien des multidirektionalen Verkehrs in der Kreuzung mit drei Zugängen . .  | 101 |



|      |   |     |
|------|---|-----|
| 5.23 | Fundamentaldiagramme für die multidirektional genutzte Kreuzung mit drei Zugängen | 102 |
| 5.24 | Mittelwerte und Standardabweichung zu Abbildung 5.23                              | 103 |
| 5.25 | Skalierungsfaktoren für die multidirektional genutzte Kreuzung mit drei Zugängen  | 104 |
| 5.26 | Standardabweichungen $\sigma_v$ unterschiedlicher Strukturtypen                   | 105 |
| 5.27 | Änderung der Nachbarschaften beim uni- und bidirektionalen Verkehr                | 106 |
| 5.28 | Änderung der Nachbarschaften beim uni- und bidirektionalen Verkehr                | 107 |
| 5.29 | Time-to-collision-Werte für den uni- und bidirektionalen Verkehr                  | 109 |
| 5.30 | Time-to-collision-Werte für den Kreuzungsverkehr                                  | 110 |
| 6.1  | Fundamentaldiagramm mit den Qualitätsstufen Grün, Gelb und Rot                    | 112 |
| A.1  | Plakat für die Akquisition der Probanden  | 130 |
| A.2  | Webseite für die Akquisition der Probanden  | 131 |
| A.3  | Teilnahmebedingungen für die BaSiGo-Experimente                                   | 132 |
| A.4  | Probandenkarte  | 133 |
| C.1  | UNI_CORR_500: Fundamentaldiagramme  | 140 |
| C.2  | UO_180: Fundamentaldiagramme  | 141 |
| C.3  | UO_240: Fundamentaldiagramme  | 142 |
| C.4  | UO_300: Fundamentaldiagramme  | 143 |
| C.5  | BI_CORR_400_A: Fundamentaldiagramme   | 144 |
| C.6  | BI_CORR_400_B: Fundamentaldiagramme   | 145 |
| C.7  | BO_360: Fundamentaldiagramme  | 146 |
| C.8  | BOA_300: Fundamentaldiagramme   | 147 |
| C.9  | BOT_300: Fundamentaldiagramme   | 148 |
| C.10 | BOT_360: Fundamentaldiagramme   | 149 |
| C.11 | KO_240: Fundamentaldiagramme  | 150 |
| C.12 | KO_300: Fundamentaldiagramme  | 151 |
| C.13 | CROSSING_90_A: Fundamentaldiagramme   | 152 |
| C.14 | CROSSING_90_B: Fundamentaldiagramme   | 153 |
| C.15 | CROSSING_90_C: Fundamentaldiagramme   | 154 |
| C.16 | CROSSING_90_D: Fundamentaldiagramme   | 155 |
| C.17 | CROSSING_90_E: Fundamentaldiagramme   | 156 |
| C.18 | CROSSING_90_F: Fundamentaldiagramme   | 157 |
| C.19 | CROSSING_90_G: Fundamentaldiagramme   | 158 |
| C.20 | CROSSING_120_A: Fundamentaldiagramme  | 159 |

|  |     |
|--|-----|
| C.21 CROSSING_120_B: Fundamentaldiagramme . . . . .                                      | 160 |
| C.22 CROSSING_120_C: Fundamentaldiagramme . . . . .                                      | 161 |
| D.1 Vergleich der Skalierungsfaktoren für den unidirektionalen Verkehr im Korridor . . . | 164 |
| D.2 Vergleich der Skalierungsfaktoren für den bidirektionalen Verkehr im Korridor . . .  | 165 |
| D.3 Vergleich der Skalierungsfaktoren für die T-Kreuzung . . . . .                       | 166 |

# Tabellenverzeichnis

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 2.1 | Qualitätsstufen nach Oeding . . . . .                                  | 9   |
| 2.2 | Qualitätsstufen nach Predtetschenski/Milinski . . . . .                | 13  |
| 2.3 | Level of Service für Gehwege nach Fruin . . . . .                      | 15  |
| 2.4 | Level of Service für Wartebereiche nach Fruin . . . . .                | 16  |
| 2.5 | Level of Service nach Pushkarev/Zupan . . . . .                        | 18  |
| 2.6 | Level-of-Service-Kategorien nach Weidmann und Knoflacher . . . . .     | 20  |
| 2.7 | Pedestrian Comfort Levels . . . . .                                    | 23  |
| 2.8 | Vergleich der LOS-Grenzwerte verschiedener Autoren . . . . .           | 23  |
| 3.1 | Empirische Studien seit dem Jahr 2002 . . . . .                        | 44  |
| 3.2 | Anzahl der Probanden und Helfer bei den Experimenten . . . . .         | 46  |
| 3.3 | Übersicht der Laborexperimente in BaSiGo . . . . .                     | 49  |
| 3.4 | Konfiguration des Experiments UNI_CORR_500 . . . . .                   | 50  |
| 3.5 | Konfiguration des Experiments BI_CORR_400 . . . . .                    | 53  |
| 3.6 | Konfiguration des Experiments CROSSING_90 . . . . .                    | 55  |
| 3.7 | Konfiguration des Experiments CROSSING_120 . . . . .                   | 57  |
| 4.1 | Generalisierung der Messmethode nach Edie . . . . .                    | 66  |
| 6.1 | Zusammenfassung der ermittelten Kennwerte . . . . .                    | 113 |
| 6.2 | Grenzwerte des Level-of-Safety-Konzeptes . . . . .                     | 114 |
| B.1 | Zeiträume mit stationärem Zustand für die BaSiGo-Experimente . . . . . | 135 |
| B.2 | Zeiträume mit stationärem Zustand für die Hermes-Experimente . . . . . | 137 |



# Abkürzungsverzeichnis

|               |  |
|---------------|--|
| <b>BaSiGo</b> | BMBF-Projekt „BaSiGo – Bausteine für die Sicherheit von Großveranstaltungen“                                 |
| <b>BMBF</b>   | Bundesministerium für Bildung und Forschung  |
| <b>EFA</b>    | Empfehlungen für Fußgängerverkehrsanlagen  |
| <b>HBS</b>    | Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen  |
| <b>Hermes</b> | BMBF-Projekt „Hermes – Erforschung eines Evakuierungsassistenten für den Krisenfall bei Großveranstaltungen“ |
| <b>LOS</b>    | Level of Service   |
| <b>PM</b>     | Predtetschenski und Milinski   |
| <b>QST</b>    | Qualitätsstufe   |



# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Motivation

Bereits im Jahr 1963 formulierte Oeding [78] Qualitätsstufen für den Fußverkehr, in denen er die Abhängigkeit zwischen Bewegungskomfort und Personendichte beschreibt. Dieser Ansatz zur Klassifizierung der Verkehrsqualität wurde durch Fruin [28] Anfang der 1970er Jahre weiterentwickelt und als Level-of-Service-Konzept für den Fußverkehr eingeführt. Bis heute stellt dieses Konzept die wesentliche Grundlage für die nationalen und internationalen Regelwerke zur Dimensionierung von Fußverkehrsanlagen, wie beispielsweise das deutsche „Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen“ [25] oder das US-amerikanische „Highway Capacity Manual“ [116], dar. Die Systematik der Definition von Qualitätsstufen findet sich aber auch in alternativen Ansätzen, wie beispielsweise dem in London verwendeten Pedestrian-Comfort-Level-Konzept [114]. Hier wird die Verkehrsqualität über den in einem Zeitintervall gemessenen Personenfluss pro Meter Durchgangsbreite definiert.

Basis all dieser Bemessungskonzepte ist das Fundamentaldiagramm. Es beschreibt den Zusammenhang zwischen Dichte und Geschwindigkeit bzw. der Dichte und dem Verkehrsfluss. Ein Vergleich der in Fachveröffentlichungen präsentierten Fundamentaldiagramme für die Fußgängerbewegung in der Ebene zeigt jedoch deutliche Widersprüche im Verlauf der Kurven (vgl. Abbildung 2.8). Insbesondere für Personenströme hoher Dichte sowie für bi- und multidirektionale Verkehre, wie sie z. B. in Bahnhöfen oder bei Großveranstaltungen regelmäßig vorkommen, fehlt die zuverlässige empirische Datenbasis. Für den multidirektionalen Verkehr an Kreuzungen stehen zudem bis heute nicht die Methoden zur Verfügung, den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit, Dichte und Personenfluss zutreffend zu beschreiben. Die vorhandenen Regelwerke, aber auch die makroskopischen und mikroskopischen Simulationsmodelle, welche bei der Planung zunehmend Verwendung finden, stoßen deshalb bei der Bemessung solcher komplexen Verkehrsanlagen an ihre Grenzen.

### 1.2 Ziele der Arbeit

Mit der vorliegenden Arbeit sollen Methoden für die Beurteilung und Bemessung der Leistungsfähigkeit multidirektional genutzter Fußverkehrsanlagen vorgestellt werden. Dabei soll zum einen ein Konzept erarbeitet werden, das es erlaubt, den Personenfluss, die Dichte und die Geschwindigkeit auf multidirektional genutzten Anlagen konsistent, d. h. für den selben Ort und dieselbe Zeit zu bestimmen. Zum anderen soll ein methodischer Ansatz der Skalierung entwickelt werden, der es ermöglicht,

die Ergebnisse auch für solche Verkehrsanlagen zu verwenden, die nicht unmittelbar untersucht wurden. Ziel ist es, Kenngrößen für die Leistungsfähigkeit und Sicherheit der Fußverkehrsanlagen zu ermitteln, auf deren Grundlage die bestehenden Regelwerke ergänzt und die Modelle für die Simulation des Fußverkehrs verifiziert und validiert werden können. Mit verschiedenen Ansätzen zur Quantifizierung der „Konfliktdichte“ soll ein Beitrag zur Beschreibung der gegenseitigen Behinderungen innerhalb eines Personenstroms geliefert werden.

Der Fokus der Untersuchungen richtet sich auf den Fußverkehr in der Ebene und hier insbesondere auf Anlagentypen, wie sie bei Großveranstaltungen vorzufinden sind. Es werden Dichten bis etwa acht Personen pro Quadratmeter berücksichtigt. Ecken, Treppen, Fahrtreppen und Rampen sind nicht Gegenstand der Untersuchungen.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 wird zunächst der Stand der Wissenschaft und Technik dargestellt. Dies sind zum einen solche Erkenntnisse, die bereits Eingang in die bestehenden Regelwerke gefunden haben. Im Wesentlichen gründen diese auf Forschungsarbeiten, welche vor der Jahrtausendwende durchgeführt wurden. Zum anderen werden aber auch im Kontext dieser Arbeit relevante wissenschaftliche Erkenntnisse der vergangenen Jahre benannt, die auf Grund der erweiterten Möglichkeiten der Datenerfassung und -analyse einen verbesserten Einblick in die Strukturen der Personenstromdynamik erlauben. Aufbauend auf den Stand der Wissenschaft und Technik werden die Grenzen und Probleme für die Bemessung multidirektional genutzter Verkehrsanlagen aufgezeigt.

Empirische Grundlage der vorliegenden Arbeit sind die in den Forschungsprojekten BaSiGo und Hermes durchgeführten Laborexperimente. In Kapitel 3 werden die Rahmenbedingungen der Projekte, insbesondere aber die Vorbereitung, Konfiguration und Durchführung der Experimente selbst beschrieben.

Die neu erarbeiteten Messmethoden werden in Kapitel 4 eingeführt. Aufbauend auf einer von Edie [20] im Jahr 1965 vorgestellten Messmethode für den spurgebundenen Fahrzeugverkehr wird diese generalisiert, so dass die Personendichte, der Personenfluss und die Geschwindigkeit des Personenstroms einer multidirektional genutzten Verkehrsanlage als Mittelwerte über denselben Ort und dieselbe Zeit ermittelt werden können. Entscheidend für die praktische Anwendung ist aber die Skalierbarkeit, so dass die Ergebnisse auf ähnlich strukturierte/genutzte Verkehrsanlagen übertragen werden können. Hierfür wird das „Konzept des spezifischen Flusses“, welches sich bei uni- und bidirektionalen Verkehren bewährt hat, ebenfalls generalisiert, so dass es auch für den multidirektionalen Verkehr angewendet werden kann. Darüber hinaus wird ein methodischer Ansatz entwickelt, die „Konfliktdichte“ innerhalb eines Personenstroms zu quantifizieren, um die Unterschiede in der Leistungsfähigkeit *derselben* Verkehrsanlage bei unterschiedlichen Nutzungsarten – bspw. unidirektionaler vs. bidirektionaler Verkehr – beschreiben zu können.

In Kapitel 5 werden die zuvor beschriebenen Messmethoden für die Analyse der Laborexperimente eingesetzt. Es werden uni- und bidirektional genutzte Korridore sowie Kreuzungen mit multidirektionalem Verkehr untersucht und verglichen. Wesentlich für die Interpretation der Ergebnisse sind die Fundamentaldiagramme, in denen der Zusammenhang zwischen Personenfluss bzw. spezifischem Personenfluss und Personendichte dargestellt wird. Die in Kapitel 4 eingeführten Konzepte eines allgemeingültigen Skalierungsfaktors sowie der Konfliktdichte werden hinsichtlich ihrer Aussagekraft überprüft.



In Kapitel 6 werden die Ergebnisse der Auswertungen als Kenngrößen in das „Level-of-Safety-Konzept“ integriert. Dieses Konzept wurde innerhalb des Forschungsprojektes BaSiGo erarbeitet, Kenngrößen für multidirektional genutzte Verkehrsanlagen lagen aber bislang noch nicht vor.

Die vorliegende Arbeit versteht sich als Baustein in einem relativ neuen, sehr dynamischen Forschungsfeld. Das Fazit in Kapitel 7 fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen. Die Ergebnisse werfen aber zugleich zahlreiche ergänzende Fragen auf und die rasante Entwicklung insbesondere bei der Datenerfassung, aber auch bei der Modellierung des Fußverkehrs lässt erahnen, dass die inneren Strukturen von Verkehrsströmen in Zukunft sehr viel detaillierter analysiert und simuliert werden können. Der Ausblick in Kapitel 7 adressiert einige dieser Fragen, die Gegenstand weiterer Forschung sein sollten.

## 1.4 Begriffe und Einheiten

In der vorliegenden Arbeit werden als grundlegende Begriffe der Fußgängerdynamik verwendet:

Die *Geschwindigkeit*  $v$  in der Einheit m/s berechnet sich als Quotient aus der zurückgelegten Wegstrecke und der verstrichenen Zeit. Die *Personen- oder Verkehrsdichte*  $\rho$  in der Einheit  $\text{m}^{-2}$  beschreibt die Anzahl der Personen pro Flächeneinheit. Der *Personenfluss*  $J$  in der Einheit  $\text{s}^{-1}$  gibt an, wie viele Personen einen Querschnitt innerhalb eines Zeitabschnittes passieren. Der *spezifische Personenfluss*  $J_s$  wird in der Einheit  $(\text{ms})^{-1}$  angegeben.

Eine Liste der verwendeten Formelzeichen und Indizes findet sich in Anhang E.1. Im Sinne einer einheitlichen Notation werden – soweit notwendig – die Angaben anderer Autoren in die oben genannten Begriffe und SI-Einheiten überführt. Nur wenn das Verständnis der Originalquelle hierdurch erschwert würde, werden die ursprünglichen Begriffe und Einheiten übernommen.



## Kapitel 2

# Stand der Wissenschaft und Technik

### 2.1 Regeln der Technik

In diesem Kapitel soll ein Überblick über die maßgeblichen Forschungsarbeiten im Bereich der Fußverkehrsplanung gegeben werden. Als „maßgeblich“ werden solche Arbeiten verstanden, welche bereits in die aktuell geltenden, technischen Regelwerke eingeflossen sind. Im nationalen Geltungsbereich sind hier insbesondere die von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen herausgegebenen Regelwerke „Empfehlungen für Fußgängerverkehrsanlagen“ (EFA) aus dem Jahr 2002 [26] sowie das 2015 in einer überarbeiteten Auflage erschienene „Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen“ (HBS) [25] relevant. International ist hier beispielhaft das US-amerikanische „Highway Capacity Manual“ aus dem Jahr 2000 [116] zu nennen.

Zusätzlich zu den Forschungsarbeiten, deren Einfluss auf die Regelwerke erkennbar ist, werden auch die grundlegenden Arbeiten aus der ersten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts erwähnt sowie solche, die ein eigenes Konzept der Kategorisierung von Qualitätsmerkmalen für die Planung von Fußverkehrsanlagen vorstellen. Auf neuere Forschungsarbeiten, welche bislang noch nicht in den Regelwerken berücksichtigt werden, wird in Kapitel 2.3 eingegangen.

#### 2.1.1 Forschungsarbeiten seit Beginn des 20. Jahrhunderts

##### Dieckmann (1911) und Fischer (1933)

Aufbauend auf den von Dieckmann veröffentlichten Empfehlungen zur „Feuersicherheit in Theatern“ [17] untersuchte Fischer [23] Anfang der 1930er Jahre die Leistungsfähigkeit von Türen, Gängen und Treppen. Auf Grundlage empirischer Untersuchungen ermittelte er für diese „Verkehrsraumarten“ Leistungskurven, indem er den Personendurchsatz pro Zeiteinheit in Abhängigkeit von der Breite des Weges erfasste. Dabei beschränkte er seine Untersuchungen auf die „Normalleistung“, basierend auf einem „Normalverkehr“, bei welchem die Personen „eine bestimmte, ihr angenehme Geschwindigkeit“ [23, S. 10] einhalten. Eine Variation der Dichte versuchte er zu vermeiden, da hierdurch die „rechnerische Untersuchung [...] erschwert“ [23, S. 13] werde. Unvermeidliche Dichteschwankungen wurden durch mehrere Messungen mit anschließender Mittelwertbildung eliminiert. Die wesentliche Erkenntnis aus seinen Untersuchungen ist die, dass bei „jeder Verkehrsraumart [...] die Normalleistung der Verkehrswegbreite nicht genau, wohl aber im Durchschnitt proportional“ [23, S. 23] ist: mit

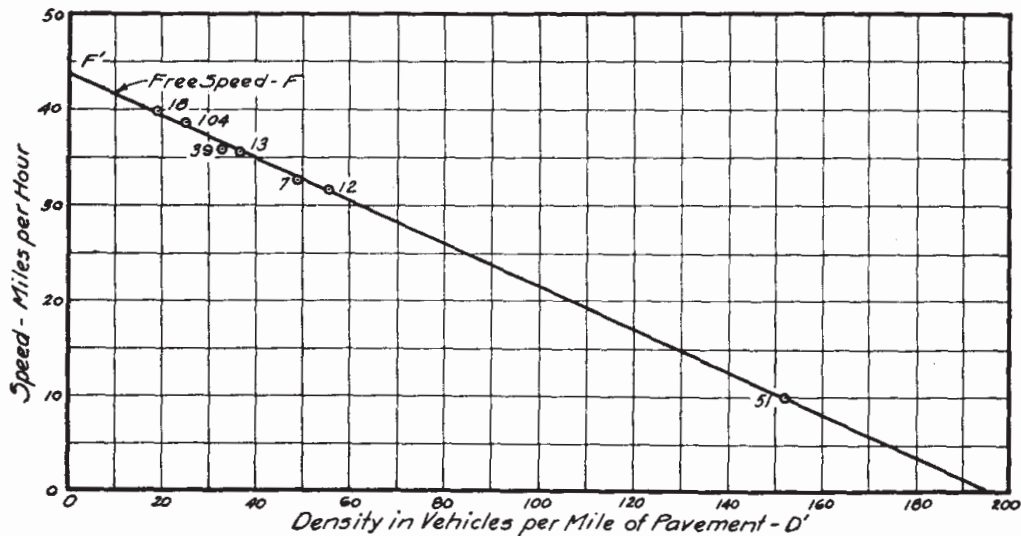


Abb. 2.1 – Fundamentaldiagramm für den Fahrzeugverkehr nach Greenshields (Bild: [31, S. 468])

einer Verdopplung der Breite verdoppelt sich (annähernd) auch der Personendurchsatz. Eine ähnliche Formulierung findet sich bereits bei Dieckmann, der die Proportionalität zwischen Personendurchsatz und Durchgangsbreite „innerhalb gewisser Grenzen“ [17, S. 70] beschreibt. Aus der nicht idealen Proportionalität leitet Fischer die Empfehlung ab, „günstige Verkehrswegbreiten“ mit „verhältnismäßig hohen Normalleistungen“, für „Türen die Breiten von etwa 170, 240 und 305 cm“, für „Gänge und Treppen die Breiten von etwa 190, 260 und 320 cm“, zu verwenden [23, S. 24]. Die heute noch in einigen Bauordnungen formulierte Anforderung nach einer stufenweisen Vergrößerung der Ausgangsbreiten (vgl. Erläuterungen in Abschnitt 2.3.4) kann auf die Forschungsergebnisse von Dieckmann und Fischer zurückgeführt werden.

### Greenshields (1933) und Reimer (1947)

Im Jahr 1933 präsentierte Greenshields [30, 31] das erste Fundamentaldiagramm als Ergebnis seiner Untersuchungen zum motorisierten Straßenverkehr (vgl. Abbildung 2.1). Das erste Fundamentaldiagramm für den Fußverkehr folgte dann 14 Jahre später. Reimer [90] führte es im Jahr 1947 zurückhaltend als „wahrscheinliche[n] Verlauf der Abhängigkeit“ zwischen „Strömungsgeschwindigkeit“ und „Dichte der Masse“ ein. Abbildung 2.8 zeigt, dass er mit seinem Kurvenverlauf deutlich oberhalb aller in den nachfolgenden Jahren veröffentlichten Fundamentaldiagramme liegt. Auch er selbst korrigierte im Jahr 1953 [91] die Werte nach unten. Für die Bemessung von Verkehrsanlagen empfiehlt Reimer jedoch schon 1947 den Ansatz einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 1,4 m/s – ein Wert, der den Ergebnissen späterer Forschungsarbeiten sehr nahe kommt.

### Scholz (1952)

Nur wenige Jahre später, im Jahr 1952, veröffentlichte Scholz seine Dissertation „Geschwindigkeit und Energieaufwand beim Gehen“ [98]. In dieser Arbeit werden die Grundlagen der Bewegung, aber auch die Anforderungen an die Gestaltung von Fußverkehrsanlagen untersucht. Bei Einhaltung der

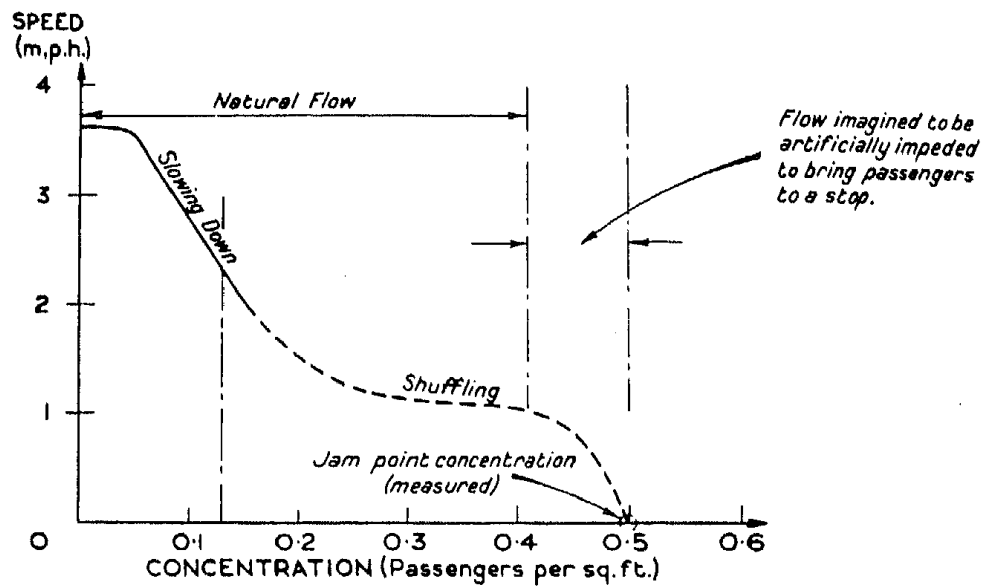


Abb. 2.2 – Fundamentaldiagramm für Fußgänger nach Hankin/Wright (Bild: [34, S. 84])

Grenzen  $0,5 \text{ m/s} \leq v \leq 2,0 \text{ m/s}$  erkennt Scholz einen „natürlichen Gang“. Unterhalb der Geschwindigkeit  $v_{\min} = 0,5 \text{ m/s}$  erhöht sich der Aufwand für das Halten des Gleichgewichts, die obere Grenze wird durch die maximale Schrittlänge bestimmt [98, S. 15 ff.].

### Hankin/Wright (1958)

Einer Anfrage der Londoner Verkehrsgesellschaft folgend, führten Hankin und Wright [34] Experimente und Feldstudien mit dem Ziel durch, eine theoretische Grundlage für die Gestaltung der Verkehrsanlagen zu schaffen. Die Ergebnisse ihrer „Fallstudien“, welche beim Ausbau der Londoner U-Bahn berücksichtigt werden sollten, veröffentlichten sie im Jahr 1958. In einem vorbereitendem Experiment arbeiteten sie mit bis zu 200 Schülern, um den qualitativen Zusammenhang zwischen Verkehrsdichte und Geschwindigkeit bzw. Personenfluss zu verstehen. Im Rahmen einer anschließenden Feldstudie wurde dann der Verlauf des Fundamentaldiagramms für den unidirektionalen Fahrgastverkehr in der Londoner U-Bahn ermittelt. Hierbei wurden die Geschwindigkeiten und Personenflüsse durch Mitlaufen und Personenzählungen sowie zugleich durchgeführte Zeitmessungen mit Hilfe von Stoppuhren erfasst. Abbildung 2.2 zeigt das von Hankin/Wright präsentierte Geschwindigkeits-Dichte-Diagramm.

### Oeding (1963)

Einen Meilenstein in der Erforschung der Fußgängerdynamik setzte Oeding [78] im Jahr 1963. Er untersuchte erstmals systematisch den Zusammenhang zwischen der Verkehrsdichte und der Gehgeschwindigkeit in Personenströmen. Für unterschiedliche Verkehrsarten (gemischter Berufsverkehr, Veranstaltungsverkehr, Einkaufsverkehr und Werkverkehr) führte er Feldstudien durch. Um auch höhere Personendichten, wie sie im städtischen Verkehr normalerweise nicht auftreten, analysieren zu können, wurden ergänzende Experimente mit mehr als 250 Studenten durchgeführt. Für die Erfassung

der Daten nutzte er Foto- und Filmkameras, mit denen er Serienaufnahmen erstellte. Die Personen in jeder Bildsequenz wurden anschließend händisch ausgezählt. Ergebnis seiner Untersuchungen sind die in Abbildung 2.3 dargestellten Fundamentaldiagramme. Die Kurven repräsentieren die Höchstwerte der von Oeding gemessenen Leistungsfähigkeiten. Die zugehörigen Geschwindigkeiten wurden in Form eines Nomogramms als Geraden in das Diagramm eingefügt.

Die von Oeding aufgetragenen Kurven der Leistungsfähigkeiten können durch die folgenden Ausgleichspolynome hinreichend genau abgebildet werden. Darin steht  $J_s$  für den spezifischen Fluss in der Einheit  $(\text{ms})^{-1}$  und  $\tilde{\rho} = \rho \cdot \text{m}^2$  für die normierte, einheitenlose Personendichte:

– Gemischter Berufsverkehr:

$$J_s = (0,07591 \cdot \tilde{\rho}^4 - 0,5129 \cdot \tilde{\rho}^3 + 0,6494 \cdot \tilde{\rho}^2 + 0,9913 \cdot \tilde{\rho} + 0,1895)/(\text{ms})$$

$$\text{für } 0,51 \text{ m}^{-2} \leq \rho \leq 2,84 \text{ m}^{-2} \quad (2.1)$$

– Veranstaltungsverkehr:

$$J_s = (0,004659 \cdot \tilde{\rho}^3 - 0,5412 \cdot \tilde{\rho}^2 + 1,777 \cdot \tilde{\rho} - 0,004414)/(\text{ms})$$

$$\text{für } 0,20 \text{ m}^{-2} \leq \rho \leq 2,48 \text{ m}^{-2} \quad (2.2)$$

– Einkaufsverkehr:

$$J_s = (0,06883 \cdot \tilde{\rho}^3 - 0,6981 \cdot \tilde{\rho}^2 + 1,634 \cdot \tilde{\rho} - 0,02642)/(\text{ms})$$

$$\text{für } 0,35 \text{ m}^{-2} \leq \rho \leq 2,09 \text{ m}^{-2} \quad (2.3)$$

– Werkverkehr:

$$J_s = (-0,6721 \cdot \tilde{\rho}^2 + 2,219 \cdot \tilde{\rho} - 0,08314)/(\text{ms})$$

$$\text{für } 0,50 \text{ m}^{-2} \leq \rho \leq 1,26 \text{ m}^{-2} \quad (2.4)$$

Mit Verweis auf Scholz [98] definiert Oeding die minimale und maximale Grenzgeschwindigkeiten für den „natürlichen Gang“ als  $v_{\min} = 0,5 \text{ m/s}$  und  $v_{\max} = 1,8 \text{ m/s}$ , Scholz selbst nennt als obere Grenze  $v_{\max} = 2,0 \text{ m/s}$ . Für die „Beurteilung der Verkehrszustände“ in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte  $\rho$  führt Oeding die fünf in Tabelle 2.1 genannten Qualitätsstufen ein.

Für den „Normalverkehr“ bei Veranstaltungen mit einer Dichte  $\rho \leq 0,3 \text{ m}^{-2}$  empfiehlt Oeding, die Leistungsfähigkeit mit  $0,25 (\text{ms})^{-1}$  zu bemessen. Für den „kurzzeitigen Stoßverkehr“ mit einer Dichte  $\rho \leq 0,6 \text{ m}^{-2}$  wird eine erhöhte Leistungsfähigkeit von  $0,67 (\text{ms})^{-1}$  angegeben. Dieser Wert soll jedoch nur für kurze Strecken und nur wenige Minuten angewendet werden. Als „wünschenswertes Höchstmaß der Belastung“ mit einer Dichte  $\rho \leq 1,0 \text{ m}^{-2}$  nennt er eine Verkehrsnachfrage von  $1,17 (\text{ms})^{-1}$ . Die „praktisch mögliche Höchstleistung“ wird mit  $1,50 (\text{ms})^{-1}$  angegeben. Dies entspricht annähernd dem Scheitelwert des in Abbildung 2.3 gezeigten Fundamentaldiagramms für den Veranstaltungsverkehr.

### Older (1968)

Older [80] stellte im Jahr 1968 die Ergebnisse seiner Feldstudien zum bidirektionalen Verkehr auf Gehwegen an Einkaufsstraßen vor. Die von ihm beobachteten Personenströme, welche mit Foto- und

Tab. 2.1 – Qualitätsstufen (QST) nach Oeding [78, S. 5 ff.]

| QST | Verkehrsdichte<br>$\rho / \text{m}^{-2}$ | Beschreibung (gekürzt)  |
|-----|--|---|
| 1   | $\leq 0,3$                               | Freizügiger Verkehr: Jeder Fußgänger kann seine Geschwindigkeit frei wählen. Überholvorgänge sind ohne Behinderung möglich.   |
| 2   | $]0,3; 0,6]$                             | Verträglicher Verkehr: Es entstehen bereits erhebliche Verdichtungen. In deren Folge wird die freie Wahl der Geschwindigkeit eingeschränkt und Überholvorgänge werden behindert.  |
| 3   | $]0,6; 1,0]$                             | Dichter Verkehr: Es entsteht ein unangenehmes Gefühl der Enge. Die Menschen versuchen, dem Zustand zu entkommen.  |
| 4   | $]1,0; 1,5]$                             | Sehr dichter Verkehr: Hier sind zwar die größten Durchflussleistungen möglich, aber diese Dichte ist nur kurzzeitig zumutbar.   |
| 5   | $> 1,5$                                  | Gedränge: Die Durchflussleistung wird deutlich reduziert. Ab etwa fünf bis sechs Personen pro Quadratmeter kommt es zu Pressungen, bei denen keine Fortbewegung mehr möglich ist. |

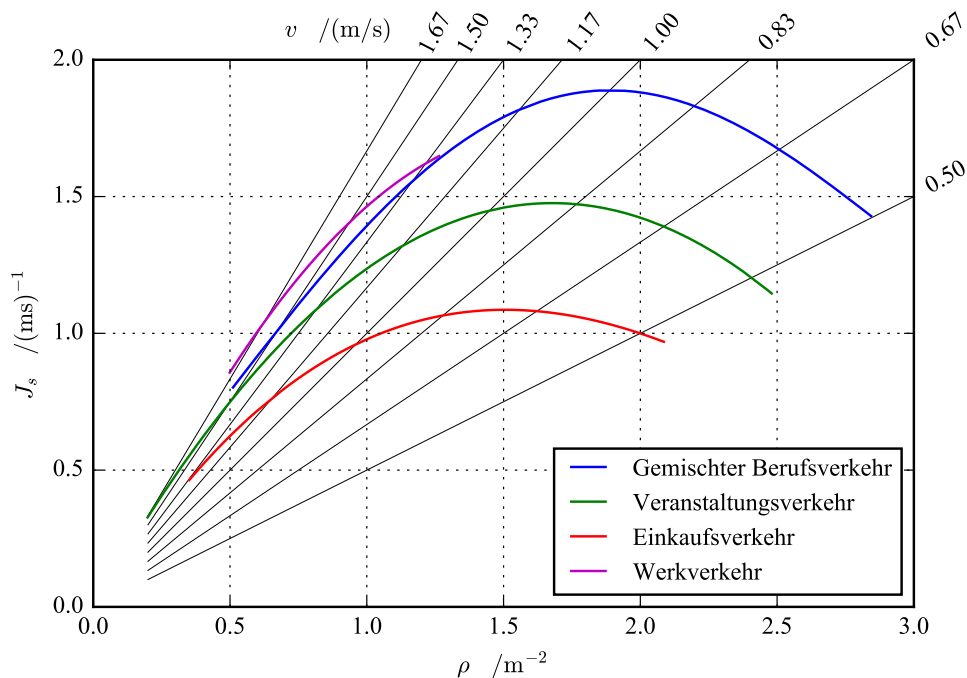


Abb. 2.3 – Fundamentaldiagramme nach Oeding [78, S. 4]

Filmkameras dokumentiert wurden, setzen sich aus einkaufenden Personen sowie einem geringen Anteil an heimkehrenden Büroangestellten zusammen. Bei einem Teil seiner Messungen wurden auch Personen berücksichtigt, welche vor Schaufenstern stehen. Zwischen der Geschwindigkeit  $v$  in der Einheit m/s und der Dichte  $\rho$  in der Einheit  $\text{m}^{-2}$  erkennt er einen linearen Zusammenhang. In der nachfolgenden Gleichung steht  $\tilde{\rho} = \rho \cdot \text{m}^2$  für die normierte, einheitenlose Personendichte:

$$v = (1,311 - 0,337 \cdot \tilde{\rho}) \cdot \text{m/s} \quad (2.5)$$

In seinen Ergebnissen (vgl. Abbildung 2.4) sieht er eine hohe Übereinstimmung mit Hankin/Wright [34] und Oeding [78]. Hinsichtlich des bidirektionalen Verkehrs folgert er, dass das Verhältnis der entgegenkommenden Personenströme – dieses variierte in seinen Untersuchungen zwischen 50/50 und 80/20 – keinen eindeutigen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Zusätzlich stellt er fest, dass schmalere Gehwege effizienter ausgenutzt werden als breitere. Das bereits von Fischer [23] begründete Konzept des spezifischen Flusses, d. h. die Annahme, dass sich die Leistungsfähigkeit des Verkehrsweges proportional zu seiner Breite verhält, wird damit in Frage gestellt. Auch wenn durch Older selbst keine Qualitätsstufen für die Bemessung der Fußverkehrsanlagen definiert werden, stellt er doch fest, dass bereits vor Erreichen der maximalen Kapazität mit Stauungen zu rechnen ist.

### Predtetschenski/Milinski (1969)

Im Jahr 1969 veröffentlichten Predtetschenski und Milinski (PM) ein umfassendes Lehr- und Praxishandbuch mit Berechnungsmethoden für Personenströme. Die deutsche Übersetzung [87] erschien 1971. Die Berechnungsmethoden basieren auf den Ergebnissen aus etwa 800 Beobachtungen, bei deren Dokumentation und Auswertung ebenfalls Filmkameras eingesetzt wurden. Als Bewegungsbedingungen wird zwischen „normaler Bewegung“, „Komfort-Bedingungen“ und der „Gefahrenfall-Bewegung“ unterschieden [87, S. 37 ff.]. Für unterschiedliche Personengruppen definieren Predtetschenski/Milinski den individuellen Platzbedarf  $f$  in der Einheit  $\text{m}^2$  [87, Tab. 2]. Die Personendichte wird nicht als Personen pro Fläche, sondern als Belegungsgrad

$$D = \frac{\sum f}{b \cdot l_{\text{Strom}}} \quad (2.6)$$

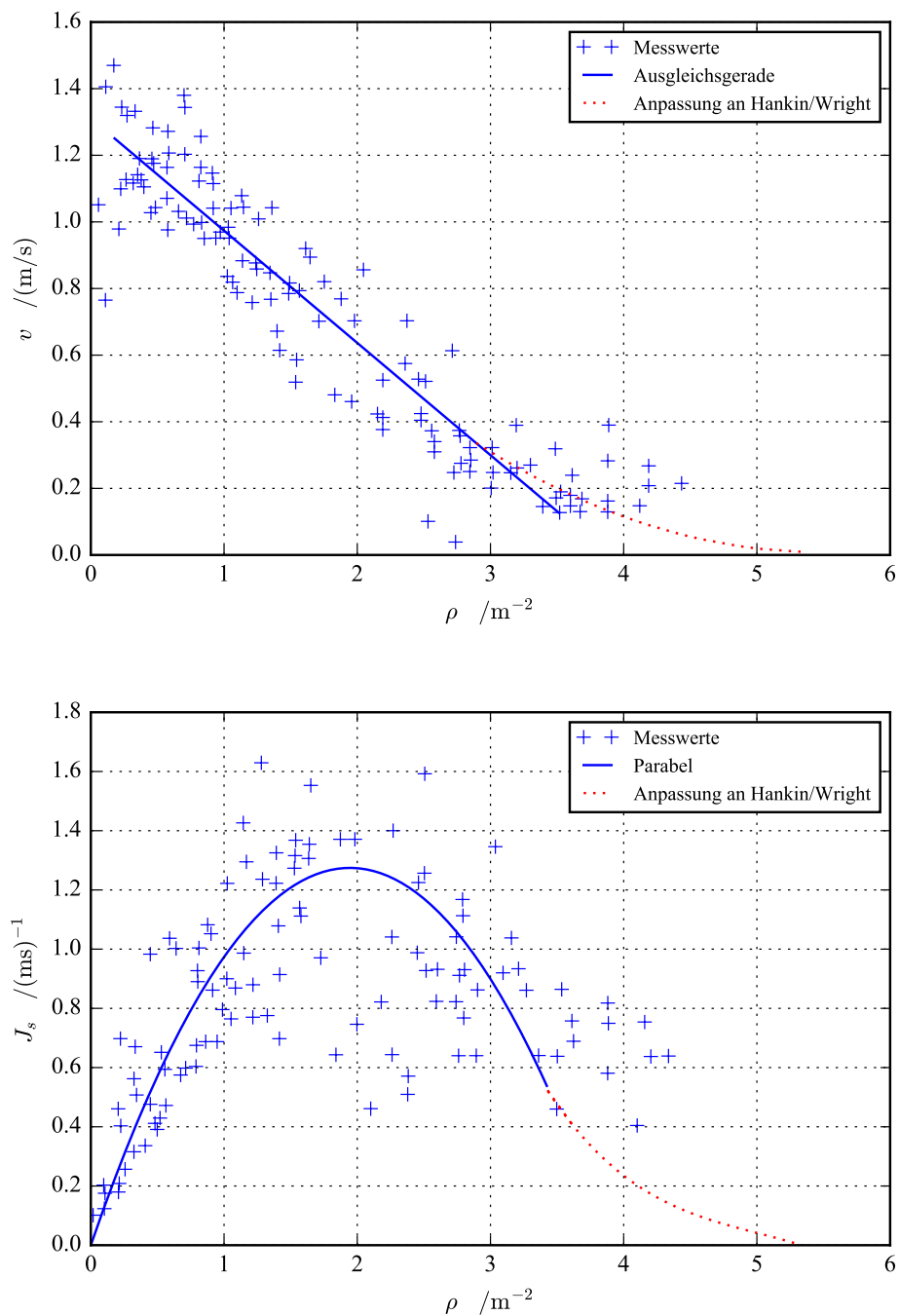
in der Einheit  $\text{m}^2/\text{m}^2$  ausgedrückt. Darin steht  $\sum f$  für die Summe der von den Einzelpersonen beanspruchten Flächen. Die Grundfläche, die der Personenstrom als Ganzes einnimmt, wird durch  $b \cdot l_{\text{Strom}}$  beschrieben. Als maximal zu beobachtende Dichte wird im Berechnungsmodell  $D = 0,92$  angenommen. In diesem Fall ist die Grundfläche zu 92 % belegt, die verbleibenden Freiräume zwischen den Personen machen 8 % der Gesamtfläche aus. Nur bei sehr hohen Drücken kann es aufgrund der elastischen Verformungen der Körper zu einer Überschreitung dieses Grenzwertes kommen [87, S. 48]. Die Bewegungsgeschwindigkeit  $v$  in der Einheit m/min kann für horizontale Wege bei normaler Bewegung mit

$$v = (112 \cdot D^4 - 380 \cdot D^3 + 434 \cdot D^2 - 217 \cdot D + 57) \cdot \text{m/min} \quad (2.7)$$

für  $D \leq 0,92$

berechnet werden. Mittels Umrechnungskoeffizienten können aus dieser Grundgleichung die Geschwindigkeiten für andere Wegarten und Bewegungsbedingungen abgeleitet werden [87, S. 56 ff.]. In Abbildung 2.5 sind die von Predtetschenski/Milinski aufgestellten Fundamentaldiagramme für horizontale Wege und Engstellen dargestellt, jeweils für Normal-, Komfort- und Gefahren-Bedingungen.





**Abb. 2.4** – Fundamentaldiagramme nach Older [80]. Die blauen Kreuze geben die von Older in seinen Diagrammen eingezeichneten Messwerte wieder. Die Datenpunkte wurden mit der Software „GraphClick“ aus den Originaldiagrammen abgegriffen. Die durchgezogenen, blauen Linien entsprechen der von Older genannten Geraden- bzw. Parabelgleichung. Die gepunkteten, roten Linien zeigen die von Older vorgenommenen Fortsetzungen seiner Linien, welche er mit der Ähnlichkeit seiner Ergebnisse zu den Angaben von Hankin/Wright begründet. In den Originaldiagrammen von Older gibt es allerdings Inkonsistenzen: Die von ihm eingezeichneten Messwerte sowie die mit den Ergebnissen von Hankin/Wright begründeten Fortsetzungen der Linien weichen in den beiden Diagrammen voneinander ab. In der obigen Darstellung wurden die originalen Angaben übernommen.

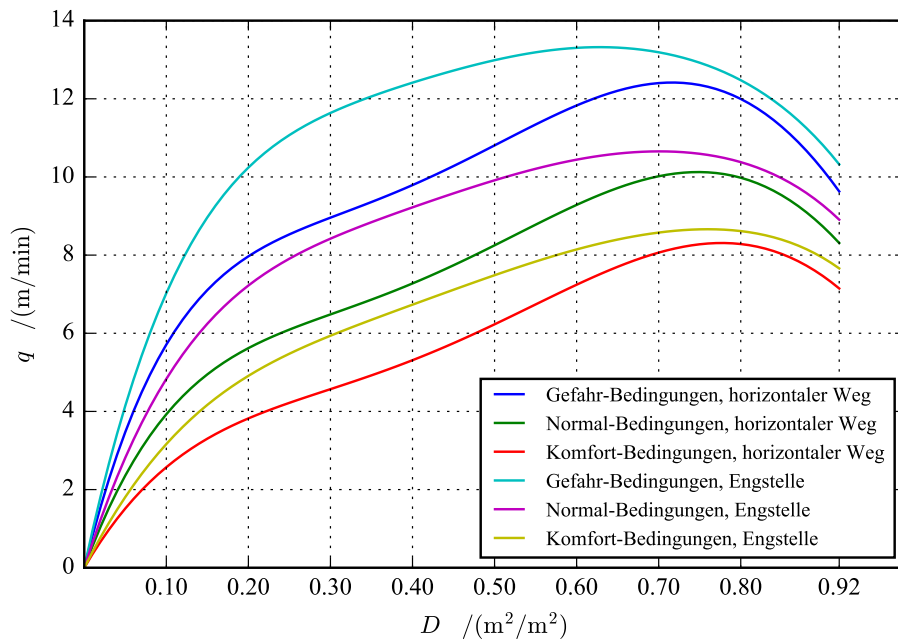


Abb. 2.5 – Fundamentaldiagramme nach Predtetschenski/Milinski [87]

Auf der Abszisse wird die Dichte in der Notation gemäß Gleichung 2.6 aufgetragen, auf der Ordinate die Bewegungsintensität, welche sich als  $q = D \cdot v$  berechnet.

Auch Predtetschenski/Milinski unterteilen das Spektrum der auftretenden Dichten in Bereiche, für welche sie die Verkehrsqualitäten näher beschreiben. In Tabelle 2.2 sind diese „Bereiche für die Bewegungsformen“ aufgeführt. Um den Vergleich mit den Qualitätsstufen anderer Autoren zu erleichtern, wurde eine zusätzliche Spalte eingefügt, in welcher die Dichte als Personen pro Quadratmeter angegeben wird. Grundlage dieser Umrechnung ist die Annahme eines mittleren Flächenbedarfs der Personen von  $\bar{f} = 0,113 \text{ m}^2$ . Dies entspricht nach Predtetschenski/Milinski der horizontalen Projektionsfläche eines Erwachsenen in Übergangstraßenkleidung [87, Tab. 2].

### Fruin (1970)

Im Jahr 1970 veröffentlichte Fruin [27] seine Dissertation mit dem Titel „Designing for Pedestrians: A Level of Service Concept“. 1971 erschien dann die erste Auflage des Buchs „pedestrian planing and design“ [28]. Die überarbeitete, zweite Auflage folgte im Jahr 1987. In diesem umfassenden und häufig zitierten Handbuch beschreibt Fruin die Grundlagen des Gehens, gibt aber auch sehr konkrete Empfehlungen für die Planung der Verkehrsanlagen für Fußgänger.

Als Ergebnis seiner eigenen Studien nennt Fruin für die freie Gehgeschwindigkeit einen Durchschnittswert von 1,37 m/s (270 ft/min) für Männer und 1,29 m/s (254 ft/min) für Frauen. Er stellt fest, dass eine Neigung des Weges bis zu 5 % und das Mitführen von Gepäck keinen nennenswerten Einfluss auf die freie Gehgeschwindigkeit haben [28, S. 41]. Mit Verweis auf Hall [33] führt Fruin ein „personal body buffer zone concept“ ein und definiert vier Kategorien für den räumlichen Abstand zwischen Menschen: intime Distanz, persönliche Distanz, soziale Distanz und öffentliche Di-

Tab. 2.2 – Qualitätsstufen nach Predtetschenski/Milinski (PM) [87, S. 64 f.]

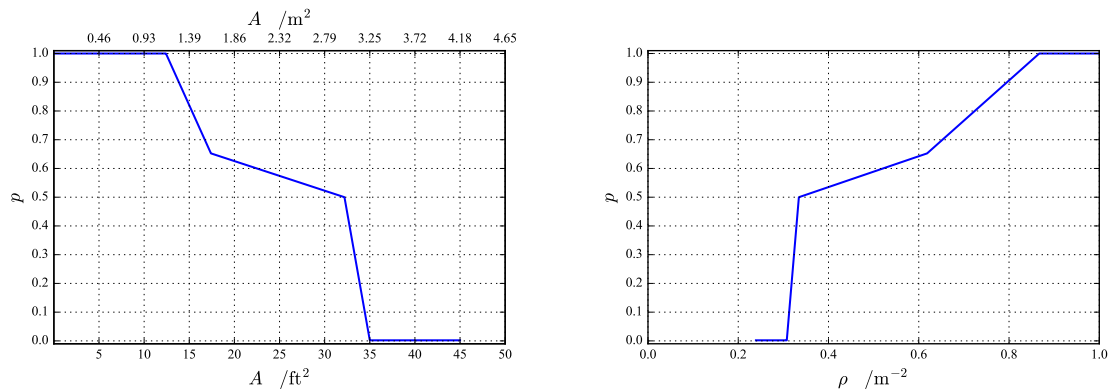
| QST | Dichte (PM)<br>$D / \text{m}^2/\text{m}^2$ | Dichte<br>$\rho / \text{m}^{-2}$ | Beschreibung (gekürzt)  |
|-----|--|----------------------------------|---|
| 1   | $\leq 0,05$                                | $\leq 0,44$                      | Freier Verkehr. Auch kreuzende Ströme sind möglich.   |
| 2   | $]0,05; 0,15]$                             | $]0,44; 1,33]$                   | Frei strömender Verkehr nur noch bei Bewegung in einer Richtung. Es kommt noch nicht zu gegenseitigen Störungen.  |
| 3   | $]0,15; 0,40]$                             | $]1,33, 3,54]$                   | Ohne gegenseitige Berührungen. Es kommt aber zu ersten Einschränkungen durch Wechselwirkungen mit den Nachbarn im Personenstrom.  |
| 4   | $]0,40; 0,75]$                             | $]3,54; 6,64]$                   | Mit gegenseitigem Kontakt. Die Einschränkungen nehmen aufgrund der Berührungsstörungen zu. An der Obergrenze dieses Bereichs wird die maximale Bewegungsintensität $q_{\max}$ erreicht.   |
| 5   | $]0,75; 0,92]$                             | $]6,64; 8,14]$                   | Zusammenhängender Personenstrom. Aufgrund der Störungen in der Bewegung „verschmilzt“ die Menschenmenge. Es kommt zu einer Reduzierung der Bewegungsintensität. Bei $D = 0,92$ ist die im Modell als maximal angenommene Dichte erreicht. |
| 6   | $]0,92; 1,04]$                             | $]8,14; 9,20]$                   | Mit Formänderungen. Die freien Abstände zwischen den Menschen verschwinden und es verändert sich die Form ihrer senkrechten Projektion.   |
| 7   | $]1,04; 1,15]$                             | $]9,20; 10,18]$                  | Mit Zusammendrückungen. In Folge der Verdichtung kommt es nicht nur zur Formänderung der senkrechten Projektion, sondern auch zu einer Verringerung ihrer Fläche.   |

stanz [28, S. 20 ff.]. Als wesentliche Kriterien für die Bemessung von Verkehrsanlagen benennt er die Möglichkeit des Fußgängers, sich im Rahmen seiner normalen Geschwindigkeit zu bewegen, langsamere Personen zu überholen und entgegenkommenden oder kreuzenden Personen auszuweichen [28, S. 47]. Das Unterbrechen der normalen Gangart, das Stoppen und zu nahe Konfrontationen mit anderen Personen werden als Konflikte definiert [28, S. 48]. Abbildung 2.6 zeigt die von Fruin ermittelte Wahrscheinlichkeit für das Auftreten solcher Konflikte zwischen benachbarten Fußgängern in Abhängigkeit von der verfügbaren Fläche des Einzelnen. Um einen Vergleich mit den in den Kapiteln 4.2 und 5.5 beschriebenen, eigenen Methoden und Ergebnissen zu erleichtern, werden in Abbildung 2.6 die Originalwerte nach Fruin auch als Funktion der Dichte  $\rho$  ausgegeben.

Fruin empfiehlt, die Geschwindigkeit bzw. den Fluss nicht in Abhängigkeit von der Personendichte, sondern als Funktion der verfügbaren Fläche auszudrücken. Personendichte und verfügbare Fläche stehen in einem reziproken Verhältnis. Abbildung 2.7 zeigt den von Fruin für den uni-direktionalen Verkehr dargelegten Zusammenhang zwischen verfügbarer Fläche  $A$  und Geschwindigkeit  $v$  (blaue Kurve/Datenpunkte) bzw. spezifischem Fluss  $J_s$  (rote Kurve/Datenpunkte). In der Originaldarstellung verwendet Fruin das angloamerikanische Maßsystem. Zur Erleichterung des Vergleichs mit anderen Autoren wurde das Diagramm in ein metrisches Maßsystem umgerechnet und zusätzlich eine zweite Abszissenachse eingeführt, auf der die Dichte  $\rho = 1/A$  aufgetragen ist. Für die Geschwindigkeit auf Gehwegen mit Ein-Richtungs-Verkehr zeigt Fruin Messwerte sowie eine aus diesen Werten abgeleitete Ausgleichskurve [28, Fig. 3.2], welche durch das Polynom

$$v = (0,01128 \cdot \tilde{\rho}^3 - 0,03913 \cdot \tilde{\rho}^2 - 0,3767 \cdot \tilde{\rho} + 1,448) \cdot \text{m/s} \quad (2.8)$$

abgebildet werden kann und der blauen Kurve in Abbildung 2.7 entspricht.  $\tilde{\rho} = \rho \cdot \text{m}^2$  steht darin für



**Abb. 2.6** – Häufigkeit von Konflikten bei kreuzendem Verkehr nach Fruin [28, S. 49]. Linke Darstellung: Auf der unteren Abszissenachse ist die verfügbare Fläche  $A$  pro Person mit den Originalwerten im angloamerikanischen Maßsystem, auf der oberen in der Einheit  $\text{m}^2$  aufgetragen. Die Ordinatenachse zeigt die Häufigkeit  $p$  für das Auftreten von Konflikten. Rechte Darstellung: Häufigkeit  $p$  von Konflikten als Funktion der Dichte  $\rho$ .

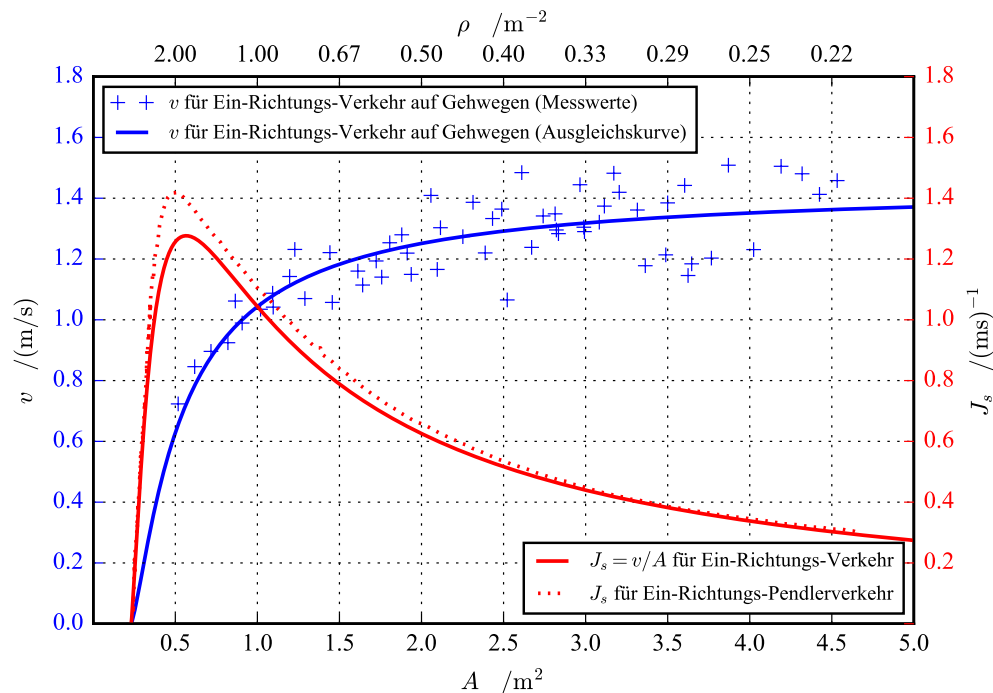
die normierte, einheitenlose Personendichte. Der spezifische Fluss  $J_s$  kann als

$$J_s = v/A \quad (2.9)$$

berechnet werden. Die durchgezogene rote Linie in Abbildung 2.7 zeigt den spezifischen Fluss unter Annahme einer Ausgleichskurve entsprechend Gleichung 2.8, die gepunktete rote Linie den von Fruin dargestellten Funktionsverlauf für den Ein-Richtungs-Pendlerverkehr [28, Fig. 3.3]. Die Kurven für  $J_s$  verlaufen ähnlich, zeigen aber insbesondere im Bereich des maximalen Flusses (Kapazität) bei  $A \approx 0,5 \text{ m}^2$  Unterschiede. Für die mathematisch konsistente Darstellung müssten sich die durchgezogenen Kurven bei  $A/\text{m}^2 = \rho/\text{m}^{-2} = v/(\text{m/s}) = J_s/(\text{ms})^{-1} = 1$  schneiden. Dies wird zwar annähernd, nicht jedoch exakt eingehalten.

Bei bi- und multidirektionalen Verkehren werden die Geschwindigkeit und der Personenfluss laut Fruin „nicht drastisch reduziert“ [28, S. 43]. Eine Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der verfügbaren Fläche pro Person erkennt Fruin für Werte kleiner als  $3,72 \text{ m}^2$ . Dieser Grenzwert entspricht einer Personendichte von etwa  $0,27 \text{ m}^{-2}$ . Ab einer Personendichte von  $0,43 \text{ m}^{-2}$  ( $2,32 \text{ m}^2$  pro Person) kommt es zu einer deutlichen Reduzierung der Geschwindigkeit. Bei einer Dichte von  $1,54 \text{ m}^{-2}$  ( $0,65 \text{ m}^2$  pro Person) ist dann die Untergrenze der Geschwindigkeit für das natürliche Gehen erreicht. Gemäß Fruin liegt diese Untergrenze bei etwa  $0,71 \text{ m/s}$  bis  $0,76 \text{ m/s}$ . Bei einer Dichte von etwa  $3,59 \text{ m}^{-2}$  ( $0,28 \text{ m}^2$  pro Person) kommt der Personenstrom zum Stillstand.

Aus seinen Untersuchungen leitet Fruin „*Level of Service Design Standards*“ [28, S. 37] ab. Für Gehwege und Wartebereiche definiert er die in den Tabellen 2.3 und 2.4 zusammengefassten Qualitätsstufen. Die in den Tabellen genannten Flächen  $A$  entsprechen den Grenzwerten der von Fruin genannten Intervalle, die Dichten berechnen sich als  $\rho = 1/A$ .



**Abb. 2.7** – Fundamentaldiagramme nach Fruin für den Ein-Richtungs-Verkehr [28, S. 42 ff.]. Die Datenpunkte wurden mit der Software „GraphClick“ aus den Originaldiagrammen abgegriffen. Auf der unteren Abszissenachse ist die verfügbare Fläche  $A$  pro Person, auf der oberen die zugehörige Dichte  $\rho = 1/A$  aufgetragen. Die linke Ordinatenachse zeigt die Geschwindigkeit  $v$ , die rechte den spezifischen Fluss  $J_s$ .

**Tab. 2.3** – Level of Service (LOS) für Gehwege nach Fruin [28, S. 74 ff.]

| LOS | Fläche<br>$A / \text{m}^2$ | Dichte<br>$\rho / \text{m}^{-2}$ | Beschreibung (gekürzt)  |
|-----|----------------------------|----------------------------------|---|
| A   | $\geq 3,25$                | $\leq 0,31$                      | Der spezifische Fluss $J_s$ beträgt maximal $0,38 (\text{ms})^{-1}$ . Den Fußgängern steht genügend Fläche zur Verfügung, so dass sie ihre eigene Geschwindigkeit wählen und langsamere Personen überholen können. Konflikte mit kreuzenden Fußgängern können vermieden werden.   |
| B   | $[3,25; 2,32]$             | $[0,31; 0,43]$                   | Der spezifische Fluss $J_s$ beträgt $0,38 (\text{ms})^{-1}$ bis $0,55 (\text{ms})^{-1}$ . Den Fußgängern steht noch ausreichend Fläche zur Verfügung, um eine normale Gehgeschwindigkeit einzunehmen. Bei hauptsächlich unidirektionalem Verkehr ist auch ein Überholen möglich. Bei Gegenverkehr oder kreuzenden Personen kommt es zu geringfügigen Störungen, welche die Geschwindigkeit und den Fluss leicht reduzieren. |
| C   | $[2,32; 1,39]$             | $[0,43; 0,72]$                   | Der spezifische Fluss $J_s$ beträgt $0,55 (\text{ms})^{-1}$ bis $0,82 (\text{ms})^{-1}$ . Die individuellen Geschwindigkeiten und das Überholen werden eingeschränkt. Bei entgegenkommenden und kreuzenden Personen ist mit Konflikten zu rechnen.  |
| D   | $[1,39; 0,93]$             | $[0,72; 1,08]$                   | Der spezifische Fluss $J_s$ beträgt $0,82 (\text{ms})^{-1}$ bis $1,09 (\text{ms})^{-1}$ . Die Gehgeschwindigkeit der meisten Personen wird eingeschränkt. Beim Überholen, bei Gegenverkehr und kreuzenden Personenströmen kommt es zu Konflikten.   |

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Fortsetzung der Tabelle

| LOS | Fläche<br>$A / m^2$ | Dichte<br>$\rho / m^{-2}$ | Beschreibung (gekürzt)  |
|-----|---------------------|---------------------------|---|
| E   | [0,93; 0,46]        | [1,08; 2,15]              | Der spezifische Fluss $J_s$ beträgt $1,09 (ms)^{-1}$ bis $1,37 (ms)^{-1}$ . Für nahezu alle Personen wird die normale Gehgeschwindigkeit eingeschränkt, die Gangart muss häufig angepasst werden. Für das Überholen steht nicht mehr genügend Platz zur Verfügung. Bei Gegenverkehr und kreuzenden Personenströmen kommt es zu erheblichen Schwierigkeiten. |
| F   | $\leq 0,46$         | $\geq 2,15$               | Der spezifische Fluss $J_s$ beträgt 0 bis $1,37 (ms)^{-1}$ . Für alle Personen wird die normale Gehgeschwindigkeit extrem eingeschränkt. Ein Vorwärtskommen ist nur noch verschachtelt möglich. Häufiger Körperkontakt ist unvermeidbar. Gegenverkehr und kreuzender Verkehr ist praktisch unmöglich.   |

Tab. 2.4 – Level of Service für Wartebereiche nach Fruin [28, S. 84 ff.]

| LOS | Fläche<br>$A / m^2$ | Dichte<br>$\rho / m^{-2}$ | Beschreibung (gekürzt)  |
|-----|---------------------|---------------------------|---|
| A   | $\geq 1,21$         | $\leq 0,83$               | Die Personen können innerhalb des Wartebereichs stehen und sich frei bewegen, ohne andere zu stören.  |
| B   | [1,21; 0,93]        | [0,83; 1,08]              | Die Personen können innerhalb des Wartebereichs stehen und sich eingeschränkt bewegen, ohne andere zu stören.   |
| C   | [0,93; 0,65]        | [1,08; 1,54]              | Die Personen können innerhalb des Wartebereichs stehen und sich eingeschränkt bewegen. Es kommt dabei aber zu Störungen der anderen Personen.                       |
| D   | [0,65; 0,28]        | [1,54; 3,59]              | Das Stehen ist noch ohne Körperkontakt zu anderen Personen möglich, die Bewegung ist jedoch stark eingeschränkt. Vorwärtsbewegungen sind nur als Gruppe möglich.    |
| E   | [0,28; 0,19]        | [3,59; 5,38]              | Auch beim Stehen ist der Körperkontakt zu anderen Personen unvermeidlich. Bewegungen innerhalb des Wartebereichs sind nicht mehr möglich.                           |
| F   | $\leq 0,19$         | $\geq 5,38$               | Die verfügbaren Flächen entsprechen etwa den Grundflächen der Körper. Zwischen benachbarten Personen ist Körperkontakt unvermeidbar. Bewegungen sind nicht möglich. |

### Westphal (1971)

Westphal [121] veröffentlichte 1971 seine Forschungsergebnisse zum Fußgängerverkehr an Bahnhöfen. Er führte für seine Untersuchungen Messungen während der täglichen Spitzenstunden durch. Für die Erfassung der Verkehrsströme wurden neben Strichlisten auch fotografische Verfahren und ein in der Veröffentlichung näher beschriebenes „Tonband-Zählverfahren“ [121, S. 70 ff.] eingesetzt, so dass das Verkehrsaufkommen auch zeitlich diskretisiert werden konnte.

Bei den Messungen auf den Bahnsteigen ermittelte er für „nach Augenschein [...] freizügiges Gehen“ eine mittlere Gehgeschwindigkeit von  $1,29 \text{ m/s} \pm 0,03 \text{ m/s}$  [121, S. 10]. Die Beziehung zwischen Verkehrsdichte und Bewegungsgeschwindigkeit wurde jedoch nicht auf den Bahnsteigen, sondern ledig-

lich in den Staubereichen vor Treppen, auf den Treppen selbst und in Tunneln untersucht. Aber auch für die Tunnel schränkt Westphal ein, dass seine Messverfahren nur für Dichten bis etwa  $\rho = 0,9 \text{ m}^{-2}$  „zu brauchbaren Ergebnissen“ [121, S. 57] führen. Für die Bewegungsgeschwindigkeit  $v$  (in m/s) als Funktion der Dichte  $\rho$  (in  $\text{m}^{-2}$ ) gilt nach Westphal [121, S. 60]:

$$v = (71,11 \cdot \rho^{-0,10} / 60) \cdot \text{m}^3/\text{s} \quad (2.10)$$

für  $\rho \leq 0,90 \text{ m}^{-2}$

### Pushkarev/Zupan (1975)

Pushkarev und Zupan [88] stützen sich bei ihrer Veröffentlichung im Jahr 1975 auf die Ergebnisse von Fruin [27] und Oeding [78]. Eigene Feldstudien oder Experimente wurden nicht durchgeführt. Hinsichtlich der natürlichen Gehgeschwindigkeit erkennen sie einen Konsens in früheren Forschungsarbeiten: für die freiwillig gewählte Geschwindigkeit nehmen sie als Grenzwerte  $v_{\max} = 2,0 \text{ m/s}$  und  $v_{\min} = 0,7 \text{ m/s}$  an [88, S. 5]. Geschwindigkeiten unterhalb von  $v_{\min}$  erfordern nach Pushkarev/Zupan einen erhöhten Balance-Aufwand und sind nur bei beengtem, verschachteltem Gehen zu beobachten. Da die für die Bemessung von Verkehrsanlagen relevanten Qualitätsstufen innerhalb eines nur kleinen Spektrums der Personendichte variieren, schlagen Pushkarev/Zupan – wie bereits Fruin – vor, das Fundamentaldiagramm nicht als Funktion der Dichte, sondern der verfügbaren Fläche aufzutragen [88, S. 2]. Als Ergebnis ihrer Arbeit führen sie die von Fruin und Oeding formulierten Qualitätsstufen in einer eigenen Übersicht zusammen und definieren sechs Kriterien für die Kategorisierung der Qualitäten:

- a) Fluss
- b) mittlere Geschwindigkeit
- c) Geschwindigkeitswahl
- d) Gegen- bzw. kreuzender Verkehr
- e) Konflikte
- f) Überholen

In Tabelle 2.5 sind die von Pushkarev und Zupan genannten Qualitätsstufen zusammengefasst. Die ergänzend angegebene Dichte berechnet sich als  $\rho = 1/A$ .

### Schnabel/Lohse (1980)

In ihrem 1980 erschienenen Lehrbuch „Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Straßenverkehrsplanung“ widmen Schnabel und Lohse [97] dem Fußgängerverkehr ein Unterkapitel. Die von Oeding ermittelten Fundamentaldiagramme (vgl. Abbildung 2.3) und Qualitätsstufen (vgl. Tabelle 2.1) werden hierin unverändert übernommen. Eigene Experimente oder Feldstudien werden nicht durchgeführt. Unter Verweis auf eine Analogie zur Hydromechanik werden dennoch Empfehlungen für die bauliche Gestaltung bzw. Führung der Personenströme an Querschnittsverengungen und Kreuzungen gegeben [97, S. 373 ff.]: so sollen bereits „vor nicht vermeidbaren Engstellen eine trichterförmige Verengung vorgesehen“ und rechtwinklige Kreuzungen vermieden werden [97, Bilder 3-9 und 3-10].

Tab. 2.5 – Level of Service nach Pushkarev/Zupan [88, Tab. 4]

| LOS | Fläche<br>A /m <sup>2</sup> | Dichte<br>$\rho$ /m <sup>-2</sup> | Beschreibung (gekürzt)   |
|-----|-----------------------------|-----------------------------------|--|
| 1   | $\geq 3,72$                 | $\leq 0,27$                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Fluss: höchstens 20 % der Kapazität</li> <li>b) mittlere Geschwindigkeit: wie gewählt</li> <li>c) Geschwindigkeitswahl: ohne Einschränkung</li> <li>d) Gegen-/kreuzender Verkehr: ohne Einschränkung</li> <li>e) Konflikte: durch Ausweichen vermeidbar</li> <li>f) Überholen: ohne Einschränkung</li> </ul>   |
| 2   | [3,72; 2,32]                | [0,27; 0,43]                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Fluss: ungefähr 33 % der Kapazität</li> <li>b) mittlere Geschwindigkeit: annähernd frei</li> <li>c) Geschwindigkeitswahl: zeitweise eingeschränkt</li> <li>d) Gegen-/kreuzender Verkehr: mit zeitweisen Konflikten möglich</li> <li>e) Konflikte: etwa 50 % der Zeit</li> <li>f) Überholen: mit Beeinträchtigungen möglich</li> </ul>  |
| 3   | [2,32; 1,67]                | [0,43; 0,60]                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Fluss: ungefähr 50 % der Kapazität</li> <li>b) mittlere Geschwindigkeit: über 80 % der freien Geschwindigkeit</li> <li>c) Geschwindigkeitswahl: deutlich eingeschränkt</li> <li>d) Gegen-/kreuzender Verkehr: mit Konflikten möglich</li> <li>e) Konflikte: hohe Wahrscheinlichkeit</li> <li>f) Überholen: schwierig ohne abruptes Ausweichen</li> </ul>                                 |
| 4   | [1,67; 1,39]                | [0,60; 0,72]                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Fluss: 56 bis 70 % der Kapazität</li> <li>b) mittlere Geschwindigkeit: etwa 80 % der freien Geschwindigkeit</li> <li>c) Geschwindigkeitswahl: nur bei langsamen Fußgängern nicht eingeschränkt</li> <li>d) Gegen-/kreuzender Verkehr: eingeschränkt, mit Konflikten</li> <li>e) Konflikte: hohe Wahrscheinlichkeit</li> <li>f) Überholen: kaum ohne Berührungen möglich</li> </ul>       |
| 5   | [1,39; 1,02]                | [0,72; 0,98]                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Fluss: 65 bis 80 % der Kapazität</li> <li>b) mittlere Geschwindigkeit: etwa 75 % der freien Geschwindigkeit</li> <li>c) Geschwindigkeitswahl: eingeschränkt, Gangart muss ständig angepasst werden</li> <li>d) Gegen-/kreuzender Verkehr: stark eingeschränkt, mit Konflikten</li> <li>e) Konflikte: unvermeidbar</li> <li>f) Überholen: kaum ohne Berührungen möglich</li> </ul>        |
| 6   | [1,02; 0,65]                | [0,98; 1,54]                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Fluss: erreicht in entspannten Personenströmen ein Maximum</li> <li>b) mittlere Geschwindigkeit: etwa 67 % der freien Geschwindigkeit</li> <li>c) Geschwindigkeitswahl: praktisch unmöglich</li> <li>d) Gegen-/kreuzender Verkehr: stark eingeschränkt, mit Konflikten</li> <li>e) Konflikte: unvermeidbar, Körperkontakt ist wahrscheinlich</li> <li>f) Überholen: unmöglich</li> </ul> |
| 7   | [0,65; 0,46]                | [1,54; 2,15]                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Fluss: erreicht in drängenden Personenströmen ein Maximum</li> <li>b) mittlere Geschwindigkeit: zumeist verschachteltes Gehen</li> <li>c) Geschwindigkeitswahl: keine, Bewegung nur als Menge möglich</li> <li>d) Gegen-/kreuzender Verkehr: äußerst schwierig</li> <li>e) Konflikte: unvermeidbar, Körperkontakt ist wahrscheinlich</li> <li>f) Überholen: unmöglich</li> </ul>         |
| 8   | $\leq 0,46$                 | $\geq 2,15$                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Fluss: ungleichmäßig, am Rande des völligen Stillstands</li> <li>b) mittlere Geschwindigkeit: nur verschachteltes Gehen</li> <li>c) Geschwindigkeitswahl: keine</li> <li>d) Gegen-/kreuzender Verkehr: unmöglich</li> <li>e) Konflikte: Körperkontakt unvermeidbar</li> <li>f) Überholen: unmöglich</li> </ul>   |



**Weidmann (1993) und Knoflacher (1995)**

Ein wesentlicher Beitrag zur Entwicklung des Forschungsfeldes ist Weidmann [120] zuzuschreiben. Im Jahr 1993 veröffentlichte er eine Literaturstudie, in welcher er „gegen 200 Veröffentlichungen zum Fussgängerverkehr“ [120, S. 6] auswertete. Neben den grundlegenden Eigenschaften der Fußgänger werden darin auch ihr Geschwindigkeitsverhalten und ihre Wechselwirkungen mit der Verkehrsanlage sowie den umgebenden Personen behandelt. Im Jahr 2007 wurden die genannten Parameter durch Buchmüller und Weidmann weitgehend unverändert bestätigt [9]. Als Mittelwert der ausgewerteten Literaturangaben gibt er die freie Durchschnittsgeschwindigkeit als  $\bar{v} = 1,34 \text{ m/s}$  an. Diese wird jedoch durch den Fußgänger selbst, die Umgebungsbedingungen und die Charakteristik der Verkehrsanlage beeinflusst [120, S. 43]. Bei einer Dichte von  $\rho = 5,4 \text{ m}^{-2}$  ist nach Weidmann die Stoppdichte erreicht. Die von Weidmann für den Einrichtungsverkehr gezeigten Fundamentaldiagramme sind in der vergleichenden Abbildung 2.8 dargestellt. Als zugrunde liegenden Zusammenhang zwischen der Dichte  $\rho$  und der Geschwindigkeit  $v$  nennt er die Funktion:

$$v = 1,34 \text{ m/s} \cdot \left( 1 - e^{-1,913 \cdot \frac{1}{\rho \cdot \text{m}^2} - \frac{1}{5,4}} \right) \quad (2.11)$$

Der spezifische Fluss berechnet sich als  $J_s = \rho \cdot v$ , somit gilt:

$$J_s = \rho \cdot 1,34 \text{ m/s} \cdot \left( 1 - e^{-1,913 \cdot \frac{1}{\rho \cdot \text{m}^2} - \frac{1}{5,4}} \right) \quad (2.12)$$

Für den Gegenverkehr nimmt Weidmann, in Abhängigkeit vom Verhältnis der entgegenkommenden Verkehrsströme, eine Reduzierung der Leistungsfähigkeit von maximal 14,5 % an, stellt jedoch gleichzeitig fest, dass hier noch erheblicher Forschungsbedarf besteht [120, S. 64 f.].

Für die Bewertung der Verkehrsqualität werden die folgenden Kriterien [120, S. 75] verwendet:

- K1: Möglichkeit zur freien Geschwindigkeitswahl
- K2: Häufigkeit eines erzwungenen Geschwindigkeitswechsels
- K3: Zwang zur Beachtung anderer Fussgänger
- K4: Häufigkeit eines erzwungenen Richtungswechsels
- K5: Behinderung bei Querung eines Fußgängerstromes
- K6: Behinderung bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung
- K7: Behinderung beim Überholen
- K8: Häufigkeit unbeabsichtigter Berührungen

Tabelle 2.6 zeigt die von Weidmann gewählte und durch Knoflacher [56, S. 91 f.] übernommene, sehr kompakte Darstellungsform für die „Levels of Service beim Gehen in der Ebene“. Für die Kriterien werden die Erfüllungsgrade „gut“ (+), „mittelmäßig“ (=) und „schlecht“ (-) gewählt. Es fällt auf, dass die Kriterien K1 bis K8 nicht mehr herangezogen werden, um die Qualitätsstufen H und I zu unterscheiden.

**Nelson/Mowrer (2002)**

In der dritten Auflage des SFPE Handbook of Fire Protection [18] veröffentlichten Nelson und Mowrer im Jahr 2002 ihre Empfehlungen zur Berechnung von Evakuierungsvorgängen [77]. In der 2008

Tab. 2.6 – Level-of-Service-Kategorien nach Weidmann [120] und Knoflacher [56]

| LOS | Dichte<br>$\rho / \text{m}^{-2}$ | Kriterium |    |    |    |    |    |    |    | Gesamtcharakterisierung |
|-----|----------------------------------|-----------|----|----|----|----|----|----|----|-------------------------|
|     |                                  | K1        | K2 | K3 | K4 | K5 | K6 | K7 | K8 |                         |
| A   | [0,00; 0,10]                     | +         | +  | +  | +  | +  | +  | +  | +  | absolut freie Bewegung  |
| B   | [0,10; 0,30]                     | +         | +  | =  | +  | +  | +  | +  | +  | freie Bewegung          |
| C   | [0,30; 0,45]                     | =         | +  | =  | =  | =  | =  | =  | +  | schwache Behinderung    |
| D   | [0,45; 0,60]                     | =         | =  | =  | =  | -  | -  | -  | +  | mäßige Behinderung      |
| E   | [0,60; 0,75]                     | -         | -  | -  | =  | -  | -  | -  | +  | starke Behinderung      |
| F   | [0,75; 1,00]                     | -         | -  | -  | -  | -  | -  | -  | +  | dichter Verkehr         |
| G   | [1,00; 1,50]                     | -         | -  | -  | -  | -  | -  | -  | =  | mäßiges Gedränge        |
| H   | [1,50; 2,00]                     | -         | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | starkes Gedränge        |
| I   | [2,00; 5,40]                     | -         | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | massives Gedränge       |

erschienenen vierten Auflage des Handbuchs wurde der Beitrag weitgehend unverändert übernommen [32]. Für Korridore, Gänge, Rampen und Türöffnungen wird – mit Verweis auf die Arbeiten von Predtetschenski/Milinski [86], Fruin [28] und Pauls [81, 82] – angenommen, dass die Personen bis zu einer Dichte von  $\rho = 0,54 \text{ m}^{-2}$  ihre freie Gehgeschwindigkeit von  $v_0 = 1,2 \text{ m/s}$  wählen können. Für  $0,54 \text{ m}^{-2} \leq \rho \leq 3,76 \text{ m}^{-2}$  gilt der lineare Zusammenhang

$$v = (1,40 - 0,3724 \cdot \tilde{\rho}) \cdot \text{m/s} \quad (2.13)$$

Darin steht  $\tilde{\rho} = \rho \cdot \text{m}^2$  für die normierte, einheitenlose Personendichte. Ab einer Dichte von  $\rho = 3,76 \text{ m}^{-2}$  ist keine Bewegung mehr möglich. Abbildung 2.8 zeigt das von Nelson/Mowrer angegebene Fundamentaldiagramm im Vergleich zu denen anderer Autoren.

### Alrutz et al. (2003)

Für das im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr-, Bau- und Wohnungswesen durchgeführte Forschungsvorhaben „Bemessungsgrundlagen für Fußgängerverkehrsanlagen“ (FE 77.452/2000, Laufzeit: 08/2000 - 03/2003) führten Alrutz et al. [3, 4] Literaturstudien, eigene Untersuchungen und Simulationen durch. Zielsetzung des Forschungsprojektes war es, einen Beitrag zur Fortschreibung des „Handbuchs für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen“ (HBS) [24] zu liefern. Hierbei sollte der „Ablauf der Fortbewegung insbesondere bei höheren empirisch beobachtbaren Verkehrsdichten“ untersucht werden sowie bauliche und betriebliche Einflüsse Berücksichtigung finden [3, S. 2].

In Hannover und Köln wurden hierfür an 16 Abschnitten auf Fußgängerverkehrsanlagen Feldstudien durchgeführt, 13 dieser Abschnitte mit 78 zweiminütigen Beobachtungsintervallen – insgesamt 7049 Fußgänger – [3, S. 25] wurden in die Auswertungen einbezogen. Die Länge der Untersuchungsabschnitte betrug 20 Meter, die nutzbaren Breiten lagen zwischen 2,0 m und 6,5 m. Als Verkehrszwecke wurden der Ausbildungs-, Berufs-, Einkaufs-, Schüler-, Veranstaltungs- und Werkverkehr berücksichtigt [3, S. 17 f.]. Bei den Untersuchungen wurden Videokameras eingesetzt, für die visuelle Auswertungen wurde die Software „VIVATraffic 2.0“ verwendet [3, S. 19 f.]. Alrutz et al. stellen fest, dass diese Werkzeuge nur bei spezifischen Personenflüssen von maximal  $0,65 \text{ (ms)}^{-1}$  für den Einrichtungsverkehr und maximal  $0,40 \text{ (ms)}^{-1}$  für den Zweirichtungsverkehr verwendbar sind [3, S. 26]. Die größte in den Untersuchungen beobachtete Verkehrsstärke lag bei  $J_s = 0,66 \text{ (ms)}^{-1}$  und damit noch

unterhalb der Kapazitätsgrenze [3, S. 25]. Die größte Verkehrsdichte lag bei  $\rho = 0,63 \text{ m}^{-2}$  [3, S. 26], die „hohen, empirisch nicht beobachtbaren Dichtebereiche“ [3, S. 3] wurden mit Hilfe eines mikroskopischen Modells simuliert. Anschließend wurden die Ergebnisse der Feldbeobachtungen und Simulationen zusammengeführt und als Empfehlung für die Überarbeitung des HBS formuliert.

Da nur geringe Verkehrsdichten beobachtet wurden, beschränkt sich das Fundamentaldiagramm als Ergebnis der empirischen Untersuchungen auf den „Freiflussast“, in dem die Personen ihre Geschwindigkeit weitgehend frei wählen können. Den Zusammenhang zwischen Verkehrsdichte  $\rho$  und spezifischem Personenfluss  $J_s$  beschreiben Alrutz et al. über die folgende Geradengleichung, darin steht  $\tilde{\rho} = \rho \cdot \text{m}^2$  für die normierte, einheitenlose Personendichte:

$$J_s = (1,0923 \cdot \tilde{\rho} + 0,0173) \cdot (\text{ms})^{-1} \quad (2.14)$$

für  $\rho \leq 0,63 \text{ m}^{-2}$

Die Standardabweichung wird von Alrutz et al. genutzt, um den Übergang von der freien Geschwindigkeitswahl zum gebundenen Verkehr zu beschreiben. Für den gebundenen Verkehr geben sie die Obergrenze der Standardabweichung mit  $\sigma_v = 0,40 \text{ m/s}$  an [3, S. 30].

Die durchschnittliche Gehgeschwindigkeit berechnet sich als  $v = J_s/\rho$ , somit gilt für den Zusammenhang zwischen Verkehrsdichte  $\rho$  und Gehgeschwindigkeit  $v$ , darin steht  $\tilde{\rho} = \rho \cdot \text{m}^2$  wieder für die normierte, einheitenlose Personendichte:

$$v = \left(1,0923 + \frac{0,0173}{\tilde{\rho}}\right) \cdot (\text{m/s}) \quad (2.15)$$

für  $0 < \rho \leq 0,63 \text{ m}^{-2}$

Für die Wunschgeschwindigkeiten  $v_0$ , hier wurden 2872 Fußgänger beobachtet, nennen Alrutz et al. Werte zwischen  $0,25 \text{ m/s}$  und  $2,85 \text{ m/s}$  mit einem Mittelwert von  $\bar{v}_0 = 1,44 \text{ m/s}$  [3, S. 27]. Abbildung 2.8 zeigt die Fundamentaldiagramme nach Alrutz et al. im Vergleich zu denen anderer Autoren.

Mit Verweis auf den bereits im Jahr 1999 veröffentlichten Forschungsbericht „Flächenansprüche von Fußgängern“ [2] führen Alrutz et al. den Begriff „Leichtigkeit der Fortbewegung“ ein. Dieser wird durch die „Anzahl von Störungen, die eine Person auf einem bestimmten Abschnitt erfährt“ [3, S. 15] bestimmt. Für die Beschreibung von Störungen wurden in Voruntersuchungen folgende mögliche Messgrößen ausgewählt [3, S. 20 ff.]:

- a) Anzahl der Reaktionen auf andere Personen
- b) Maß der seitlichen Abweichung von der Gehlinie (Raster:  $0,5 \text{ m}$ )
- c) Längsabstand zum Anlass des Ausweichmanövers (Raster:  $2,5 \text{ m}$ )
- d) Geschwindigkeitsänderung
- e) Körperdrehung
- f) Änderung der Haltung beim Tragen von Gepäck
- g) Berührung zwischen Körper bzw. Gepäck und „Hindernis“
- h) Trennung von Paaren bzw. Gruppen
- i) Betreten anderer Flächen oder der Distanzzonen
- j) Anlass für das Ausweichmanöver

Die Messgrößen  $b$ ,  $c$ ,  $f$ ,  $h$  und  $i$  werden von Alrutz et al. als geeignet angesehen und bei den weiteren Auswertungen berücksichtigt. Für 7049 Personen wurde anhand dieser Messgrößen die Störungshäufigkeit ermittelt und in der Regel zwischen einer und fünf Reaktionen pro Person pro 100 Meter festgestellt [3, S. 33]. Der Einfluss des Gegenverkehrs wird in der Untersuchung zwar berücksichtigt, wegen der geringen Verkehrsdichten und der geringen Anzahl an Untersuchungsintervallen mit aussagekräftigen Gegenverkehrsanteilen wird dessen Auswirkung auf den Verkehrsablauf jedoch nicht quantifiziert [3, S. 43 ff.].

Oberhalb einer Verkehrsdichte von  $\rho = 0,63 \text{ m}^{-2}$  wurden keine empirischen Untersuchungen durchgeführt, sondern die Ergebnisse durch Simulationsrechnungen ergänzt. Hier ist kritisch anzumerken, dass derzeit für hohe Personendichten die empirische Datenbasis fehlt, um die Modelle, welche diesen Simulationsrechnungen zugrunde liegen, zu validieren. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen Beitrag zum Schließen ebendieser Lücke zu liefern. Aus diesem Grund werden die von Alrutz et al. genannten Ergebnisse für höhere Dichtebereiche im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.

### Transport for London (2010)

Mit dem *Pedestrian Comfort Guidance* aus dem Jahr 2010 [114] stellt die Londoner Verkehrsbehörde ein Konzept für die Bemessung neuer und bestehender Fußwege zur Verfügung. Ziel ist es, durch eine verbesserte Qualität der Fußwege Anreize für deren Nutzung zu schaffen und damit den öffentlichen Nahverkehr zu entlasten.

Das Konzept findet sowohl für Gehwege als auch für Fußgängerüberwege Anwendung. Es basiert auf 75 Feldstudien, die im Londoner Stadtgebiet durchgeführt wurden [114, S. 24]. In diesen Studien wurden die Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Anzahl und Bewegungsrichtung der Personen auf einem Wegeabschnitt gemessen. Zusätzlich wurden die Bewegungseinschränkungen, definiert als Änderung der Geschwindigkeit oder Richtung, Schulterkontakt oder Zusammenstoß, registriert. Die Abgrenzung der Qualitätsstufen, *Pedestrian Comfort Levels* (PCL), erfolgt nicht – wie beim Level-of-Service-Konzept – über die Dichte, sondern über den als „*crowding*“ [114, S. 6] bezeichneten Personenfluss. Dieser wird als Personen pro Meter lichter Breite pro Minute (ppmm) gemessen.

Tabelle 2.7 fasst die *Pedestrian Comfort Levels* für Gehwege zusammen. Die Auswahl der bei einer Bemessung einzuhaltenden Qualitätsstufe erfolgt in Abhängigkeit von der vorrangigen Nutzung des Verkehrsraums [114, Fig. 9]. Dabei wird die Qualitätsstufe B+ für alle Nutzungen als noch komfortabel, die Qualitätsstufe B als mindestens akzeptabel bewertet.

### 2.1.2 Regeln der Technik im Vergleich

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass unter den genannten Autoren ein weitgehender Konsens hinsichtlich des Prinzips der Klassifizierung besteht. Kriterium für die Einteilung der Verkehrszustände in Qualitätsstufen ist meist die Personendichte, lediglich Transport for London [114] nutzt den spezifischen Personenfluss als Qualitätskriterium. Die Aussagen der Autoren stützen sich nur zum Teil auf Feldstudien und wenige Experimente, welche mit einfachen Hilfsmitteln – oft händisch – ausgewertet wurden.

Eine Analyse der dynamischen Interaktionen zwischen den Einzelpersonen konnte deshalb nicht durchgeführt werden, so dass eine systematische Differenzierung von uni-, bi- und multidirektionalen Verkehren nicht möglich ist. Die Konflikte zwischen den Fußgängern werden zwar häufig als we-

Tab. 2.7 – Pedestrian Comfort Levels für Gehwege (Transport for London [114])

| PCL | crowding<br>(ppmm) | spez. Fluss<br>(ms) <sup>-1</sup> | Beschreibung                   |
|-----|--------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| A+  | < 3                | < 0,05                            | < 3 % Bewegungseinschränkungen |
| A   | [3; 5]             | [0,05; 0,08]                      | 13 % Bewegungseinschränkungen  |
| A-  | [6; 8]             | [0,10; 0,13]                      | 22 % Bewegungseinschränkungen  |
| B+  | [9; 11]            | [0,15; 0,18]                      | 31 % Bewegungseinschränkungen  |
| B   | [12; 14]           | [0,20; 0,23]                      | 41 % Bewegungseinschränkungen  |
| B-  | [15; 17]           | [0,25; 0,28]                      | 50 % Bewegungseinschränkungen  |
| C+  | [18; 20]           | [0,30; 0,33]                      | 59 % Bewegungseinschränkungen  |
| C   | [21; 23]           | [0,35; 0,38]                      | 69 % Bewegungseinschränkungen  |
| C-  | [24; 26]           | [0,40; 0,43]                      | 78 % Bewegungseinschränkungen  |
| D   | [27; 35]           | [0,45; 0,58]                      | 100 % Bewegungseinschränkungen |
| E   | >35                | > 0,58                            | 100 % Bewegungseinschränkungen |

Tab. 2.8 – Vergleich der LOS-Grenzwerte verschiedener Autoren

| Grenzwert des LOS<br>in m <sup>-2</sup>    | A      | B      | C      | D      | E      | F      | G       | H      | I      |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|
| Oeding [78]                                | ≤ 0,30 | ≤ 0,60 | ≤ 1,00 | ≤ 1,50 | > 1,50 |        |         |        |        |
| Fruin [28]                                 | ≤ 0,31 | ≤ 0,43 | ≤ 0,72 | ≤ 1,08 | ≤ 2,15 | ≥ 2,15 |         |        |        |
| Predtetschenski/Milinski <sup>1</sup> [87] | ≤ 0,44 | ≤ 1,33 | ≤ 3,54 | ≤ 6,64 | ≤ 8,14 | ≤ 9,20 | ≤ 10,18 |        |        |
| Pushkarev/Zupan [88]                       | ≤ 0,27 | ≤ 0,43 | ≤ 0,60 | ≤ 0,72 | ≤ 0,98 | ≤ 1,54 | ≤ 2,15  | ≤ 5,38 | > 5,38 |
| Transp. Research Board [116]               | ≤ 0,18 | ≤ 0,27 | ≤ 0,45 | ≤ 0,72 | ≤ 1,35 | ≥ 1,35 |         |        |        |
| Weidmann [120]                             | ≤ 0,10 | ≤ 0,30 | ≤ 0,45 | ≤ 0,60 | ≤ 0,75 | ≤ 1,00 | ≤ 1,50  | ≤ 2,00 | ≤ 5,00 |
| Knoflacher [56]                            | ≤ 0,10 | ≤ 0,30 | ≤ 0,45 | ≤ 0,60 | ≤ 0,75 | ≤ 1,00 | ≤ 1,50  | ≤ 2,00 | ≤ 5,40 |
| FGSV [25]                                  | ≤ 0,10 | ≤ 0,25 | ≤ 0,60 | ≤ 1,30 | ≤ 1,90 | > 1,90 |         |        |        |

<sup>1</sup> für Erwachsene in Übergangstraßenkleidung ( $f = 0,113 \text{ m}^2$ )

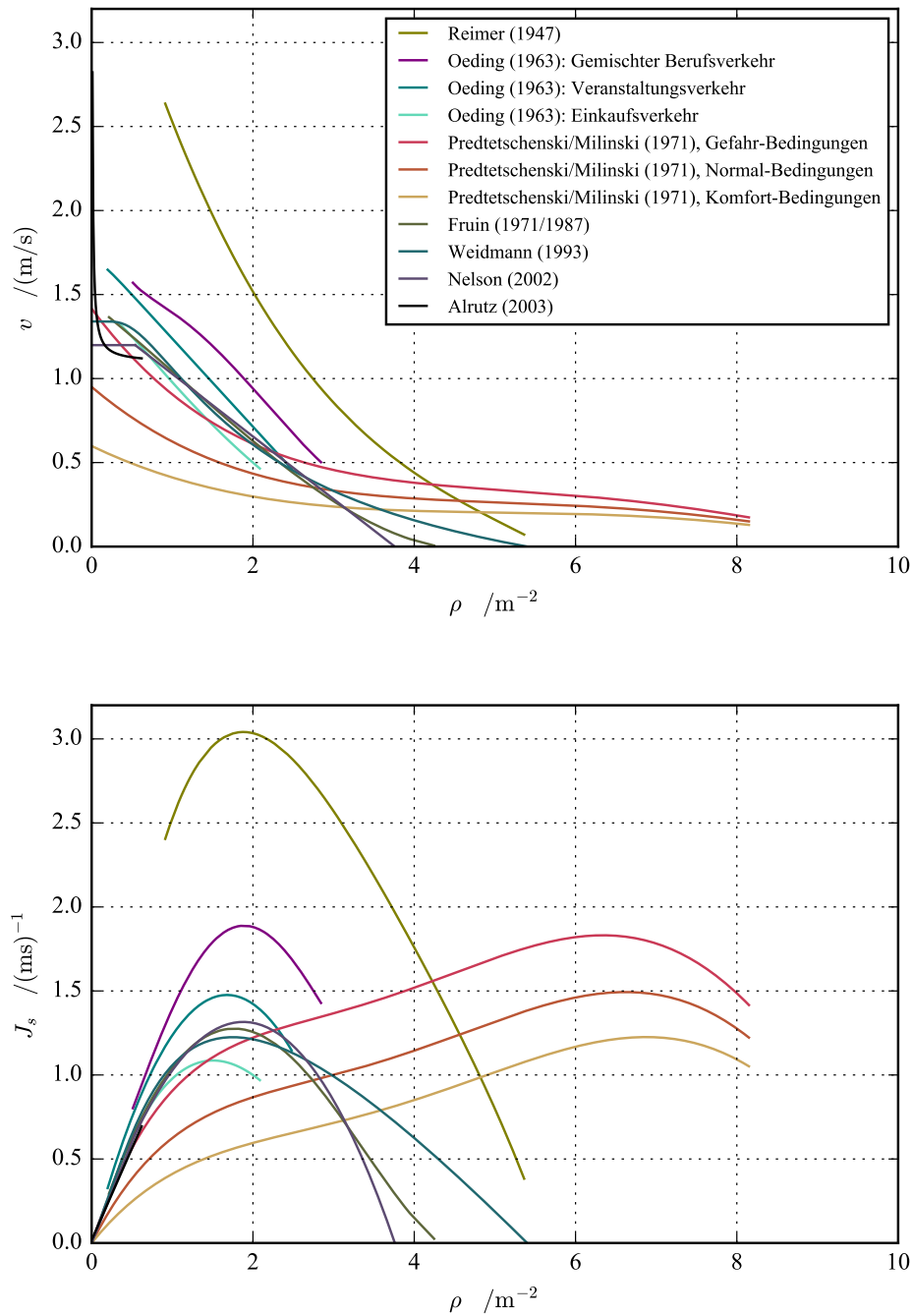
sentlich für die Einschränkung der Bewegungsfreiheit erkannt, jedoch i. Allg. nicht anhand messbarer Kriterien quantifiziert.

Bei der Definition der Grenzwerte für die Qualitätsstufen, aber auch bei deren Beschreibungen, bestehen deutliche Unterschiede. Tabelle 2.8 gibt eine Übersicht über die für die Level-of-Service-Kategorien genannten Grenzwerte der Personendichte  $\rho$ . Vereinfachend wird hier der Begriff „Level-of-Service“ (LOS) auch für solche Veröffentlichungen verwendet, in welchen bspw. von „Stufen“ [78] oder „Bereichen für die Bewegungsform von Personenströmen“ [87] gesprochen wird.

### 2.1.3 Grenzen und Probleme

Die oben beschriebenen Regeln der Technik lassen zahlreiche Fragen unbeantwortet.

Die Definitionen der dichteabhängigen Verkehrsqualitäten erfolgen in der Regel verbal, die teils umfangreichen Beschreibungen täuschen leicht darüber hinweg, dass die dynamischen Wechselwirkungen innerhalb eines Personenstromes bis heute nicht hinreichend erforscht sind. Tabelle 2.8 zeigt,



**Abb. 2.8** – Vergleich häufig zitierter Fundamentaldiagramme für Personenströme in der Ebene: Reimer [90], Oeding [78] für verschiedene Verkehrsarten, Predtetschenski/Milinski [87] für horizontale Wege mit  $f = 0, 113 \text{ m}^2$  und verschiedene Bewegungsbedingungen, Fruin [28], Weidmann [120], Nelson [77] und Alrutz [3]. Die obere Abbildung zeigt den Zusammenhang zwischen der Dichte  $\rho$  und der Geschwindigkeit  $v$ . In der unteren Abbildung wird der Zusammenhang zwischen der Dichte  $\rho$  und dem spezifischen Fluss  $J_s = \rho \cdot v$  dargestellt.

dass schon bei niedrigen Dichten die Qualität der Fortbewegung sehr unterschiedlich bewertet wird, für Personenströme hoher Dichte erscheint die Wahl der Grenzwerte beinahe beliebig. Es fehlen einheitliche Maße und Begriffe für die Quantifizierung der Verkehrsqualität. Bi- und multidirektionale Verkehre werden in den bestehenden Konzepten für die Kategorisierung der Verkehrsqualitäten zu meist gar nicht berücksichtigt. Das bestehende „Level-of-Service-Konzept“ fokussiert zudem auf den Aspekt des Komforts. Die Sicherheit der Verkehrsanlage wird damit zwar implizit berücksichtigt, für deren praktikable Bewertung, bspw. im Kontext einer Großveranstaltung, ist das Konzept jedoch nicht geeignet.

Für den multidirektionalen Fußgängerverkehr fehlen valide Mess- und Analysemethoden. Die Güte der empirischen Datenbasis für die Überarbeitung und Ergänzung der Regelwerke kann jedoch nicht besser als die Mess- und Analysemethoden selbst sein. Dieser Mangel ist keinesfalls dadurch zu „heilen“, dass fehlende Daten durch nicht validierte Simulationen ergänzt werden. Es bedarf vielmehr empirischer Studien, die unter reproduzierbaren Randbedingungen durchgeführt, hinreichend dokumentiert und mit geeigneten Methoden analysiert werden. Der in Abschnitt 2.3 beschriebene Stand der Wissenschaft bietet hierfür Werkzeuge, welche für die besonderen Anforderungen bei der Analyse multidirektionaler Fußverkehre angepasst werden können.

## 2.2 Messmethoden

Die Bemessung der Leistungsfähigkeit von (Fuß-)Verkehrsanlagen basiert i. Allg. auf dem Fundamentaldiagramm  $J(\rho)$ ,  $J_s(\rho)$  oder  $v(\rho)$ , in welchem der Fluss, der spezifische Fluss oder die Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Personendichte dargestellt werden. Die hierfür erforderliche, empirische Datenbasis kann durch Messungen in Feldbeobachtungen oder Laborexperimenten gewonnen werden. Dabei können die Messgrößen „Geschwindigkeit“, „Personendichte“ und „Fluss“ nicht immer unmittelbar erfasst werden, zum Teil stehen sie auch nur als abgeleitete Größen zur Verfügung. Neben den Messgrößen selbst ist aber auch deren örtliche und zeitliche Veränderung von Bedeutung.

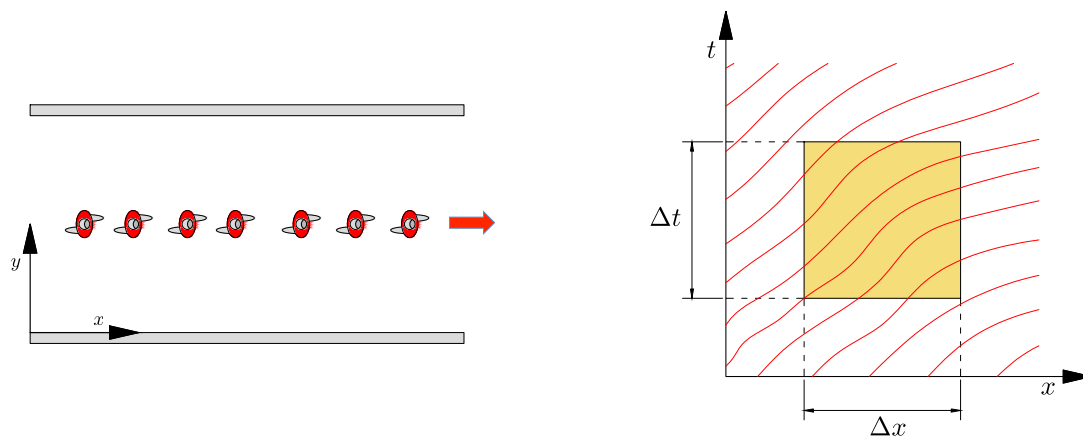
Hieraus folgen drei grundsätzliche Herangehensweisen [20, 68]:

- Messungen, die an einem Ort, z. B. einer Messlinie bei  $x_0$ , über ein Zeitintervall  $\Delta t$  durchgeführt werden
- Messungen, bei denen zu einem Zeitpunkt  $t_0$  ein Streckenabschnitt  $\Delta x$  bzw. eine Messfläche  $A = \Delta x \cdot \Delta y$  beobachtet wird
- Messungen, bei denen Mittelwerte über denselben Ort und dieselbe Zeit gebildet werden

Im Folgenden wird eine Auswahl der gebräuchlichen Messmethoden vorgestellt und grafisch veranschaulicht. Neue Ansätze für die Datenanalyse werden in Kapitel 4 eingeführt.

### 2.2.1 Grafische Darstellung

Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen können nur dann sinnvoll miteinander verglichen, interpretiert und in Bemessungsrichtlinien überführt werden, wenn die Messmethode selbst sowie deren praktische Umsetzung nachvollziehbar dokumentiert wurde. Ergänzend zur (mathematischen) Beschreibung bietet sich eine Visualisierung in Form von Ort-Zeit-Diagrammen, in denen die Zeit  $t$  über



**Abb. 2.9** – Eindimensionaler Verkehr: Das linke Bild zeigt eine Skizze des Verkehrsszenarios, die Personen gehen in einer Reihe hintereinander. Das rechte Bild zeigt das Ort-Zeit-Diagramm. Da es keine Überholvorgänge gibt, kreuzen sich die roten Linien (Trajektorien) nicht.

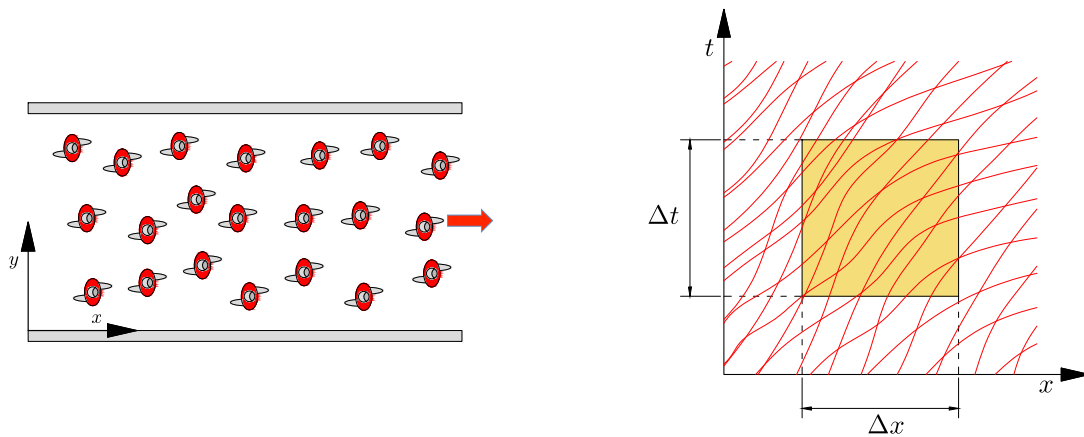
die Ortskoordinate  $x$  im eindimensionalen System (vgl. Abbildung 2.9) bzw. den Ortskoordinaten  $x$  und  $y$  im zweidimensionalen System (vgl. Abbildung 2.12) aufgetragen wird, an. An dieser Stelle werden die Darstellungsformen zunächst nur eingeführt, die mit ihnen zu visualisierenden Berechnungen von Dichte, Fluss und Geschwindigkeit werden nachfolgend in Abschnitt 2.2.2 beschrieben.

Für den eindimensionalen Verkehr hat sich die in Abbildung 2.9 gezeigte Darstellungsform etabliert [21, 22, 62, 63, 89, 94, 110, 113]. Auf der Ordinate ist die Ortskoordinate  $x$ , auf der Abszisse die Zeitkoordinate  $t$  aufgetragen. Jede rote Linie repräsentiert die Trajektorie einer Person. Die gelbe Fläche zeigt den Ort-Zeit-Messbereich mit den Kantenlängen  $\Delta x$  und  $\Delta t$ .

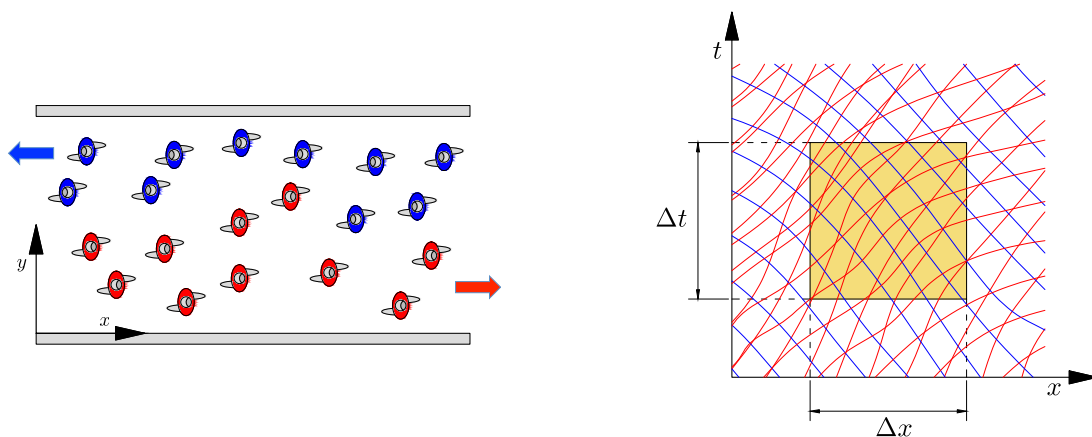
Die in Abbildung 2.9 gezeigte Form der Darstellung kann auch für den gerichteten, zweidimensionalen Verkehr übernommen werden. Ein solcher liegt vor, wenn die Personen nicht mehr in einer Reihe hintereinander, sondern in einem Korridor auch nebeneinander gehen, die Analysen sich aber auf die Bewegung in Richtung der  $x$ -Koordinate beschränken. Für diesen „quasi-eindimensionalen“ Verkehr kann auf die Darstellung der Bewegung in  $y$ -Richtung verzichtet werden. Dies gilt sowohl für den unidirektionalen, als auch für den bidirektionalen Verkehr. Abbildung 2.10 zeigt das Ort-Zeit-Diagramm für den unidirektionalen, Abbildung 2.11 für den bidirektionalen Verkehr im Korridor.

Für sich kreuzende Verkehre muss das Diagramm um die  $y$ -Achse erweitert werden, so dass eine kubische Darstellung entsteht [94,95]. Abbildung 2.12 zeigt das dreidimensionale Ort-Zeit-Diagramm für eines der Kreuzungsexperimente im Projekt BaSiGo (CROSSING\_90\_E, vgl. Seite 53). Auch hier repräsentiert jede der Linien die Trajektorie einer Person. Die Strukturen des gesamten Verkehrsstromes sowie deren Teilströme können so örtlich und zeitlich veranschaulicht werden. Dies gelingt insbesondere, wenn die kubische Darstellung interaktiv gedreht werden kann. Bei der Ausgabe in Papierform – und einer damit verbundenen Reduktion der 3D-Darstellung auf eine 2D-Abbildung – verliert das Diagramm jedoch an Übersichtlichkeit: obgleich in Abbildung 2.12 die Trajektorien in unterschiedlichen Farben gezeigt werden, ist es bei hohen Personendichten kaum möglich, den Laufweg einzelner Personen im Detail zu verfolgen. Für die qualitative Auswertung müssen deshalb

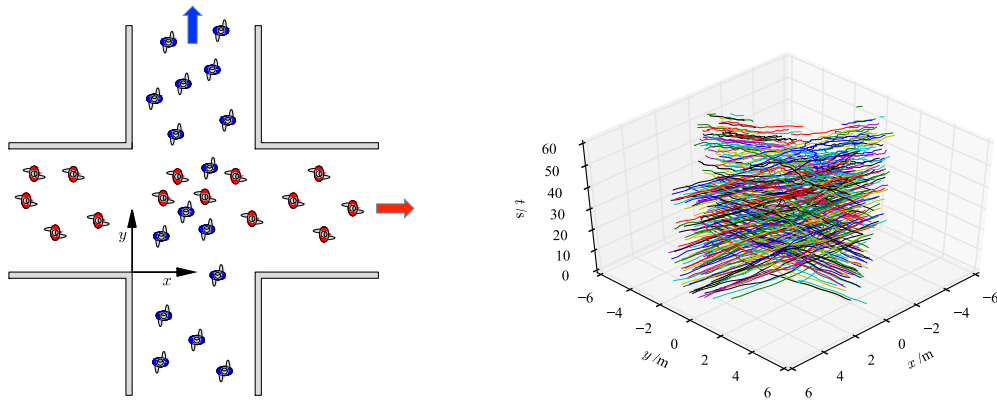




**Abb. 2.10** – Unidirektionaler Verkehr in einem Korridor: Das linke Bild zeigt eine Skizze des Verkehrsszenarios, Die Personen verteilen sich in der Breite des Korridors, gehen aber alle in dieselbe Richtung. Das rechte Bild zeigt das Ort-Zeit-Diagramm. In Folge von unterschiedlichen Geschwindigkeiten kreuzen sich bei Überholvorgängen die roten Linien (Trajektorien).



**Abb. 2.11** – Bidirektionaler Verkehr in einem Korridor: Das linke Bild zeigt eine Skizze des Verkehrsszenarios. Die Personen kommen aus beiden Richtungen und verteilen sich in der Breite des Korridors. Sie bewegen sich alle parallel zur  $x$ -Achse. Das rechte Bild zeigt das Ort-Zeit-Diagramm. Die roten Linien repräsentieren die Trajektorien der von links kommenden, die blauen Linien die Trajektorien der von rechts kommenden Personen. Kreuzungspunkte zwischen Linien derselben Farbe zeigen Überholvorgänge in Folge unterschiedlicher Geschwindigkeiten. Kreuzungspunkte zwischen Linien unterschiedlicher Farbe zeigen Passiervorgänge sich entgegengerichteter Personen.



**Abb. 2.12** – Bidirektionaler Verkehr in einer Kreuzung: Das linke Bild zeigt die Skizze des Verkehrsszenarios. Die blauen Personen kommen von unten, die roten Personen von links. Alle Personen gehen gerade durch die Kreuzung und verlassen sie auf der ihrem Eingang gegenüber liegenden Seite. Das rechte Bild zeigt das dreidimensionale Ort-Zeit-Diagramm. Die Schnittebenen zur  $x$ -,  $y$ - und  $t$ -Achse sind in Abbildung 2.13 dargestellt.

Schnittebenen eingefügt werden. In Abbildung 2.13 sind dies die grüne Schnittebene bei  $x_0 = -2$  m, die gelbe Schnittebene bei  $y_0 = -2$  m und die rote Schnittebene bei  $t_0 = 20$  s.

## 2.2.2 Etablierte Messmethoden

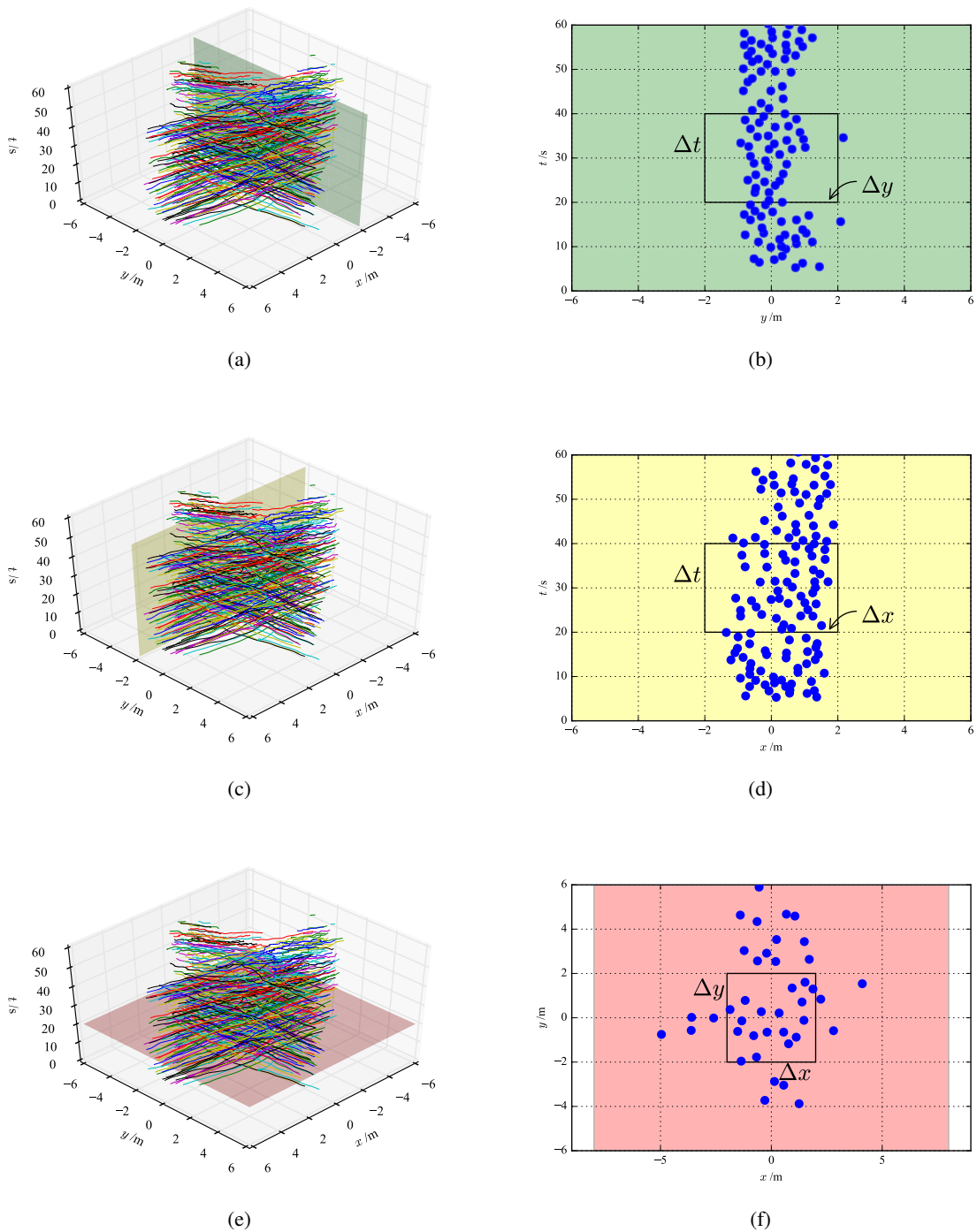
**Messmethode 1** Für Fragestellungen, bei denen der Verkehr in einer Anlage betrachtet wird, die örtliche und zeitliche Auflösung innerhalb des Verkehrsstromes aber nicht relevant ist, können die Messungen mit einfachen Werkzeugen (Stoppuhr, Handzähler, Fotoapparat) durchgeführt werden. Zur Bestimmung des Personenflusses  $J$  kann die Anzahl  $N(x_0, \Delta t)$  der Personen, die die Messlinie  $x_0$  während der Zeitdauer  $\Delta t$  überschreiten, gezählt werden. Für die Berechnung der Personendichte  $\rho$  wird die Anzahl  $N(t_0, \Delta x)$  der Personen, die sich zum Zeitpunkt  $t_0$  auf der Messstrecke  $\Delta x$  befinden, fotografiert und nachträglich ausgezählt (vgl. Abbildung 2.14). Alternativ kann die Anzahl  $N(t_0, \Delta x)$  der Personen auf der Messstrecke auch über die Differenz der beiden „absoluten Summenlinien“ [121, S. 56] bestimmt werden, welche am Anfang und Ende der Messstrecke erhoben wurden. Somit gilt für das eindimensionale System:

$$J(x_0, \Delta t) = \frac{N(x_0, \Delta t)}{\Delta t} \quad (2.16)$$

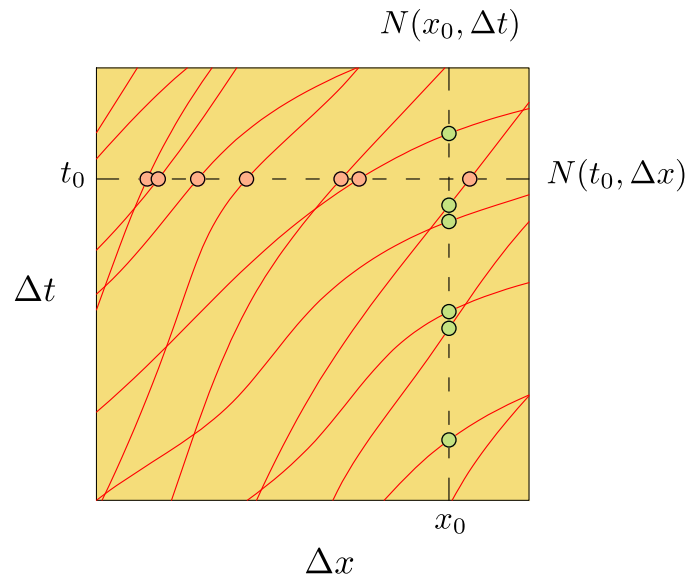
$$\rho(t_0, \Delta x) = \frac{N(t_0, \Delta x)}{\Delta x} \quad (2.17)$$

Für das quasi-eindimensionale System (die  $y$ -Komponente ist vorhanden, aber nur die Bewegung in  $x$ -Richtung wird berücksichtigt) mit der Breite  $b = \Delta y$  kann, „unter Annahme der Gleichverteilung“ [121, S. 56] auch die Dichte  $\rho$  auf der Messfläche  $\Delta x \cdot \Delta y$  berechnet werden:

$$\rho(t_0, \Delta x, \Delta y) = \frac{N(t_0, \Delta x)}{\Delta x \cdot \Delta y} \quad (2.18)$$



**Abb. 2.13** – Schnittebenen in der dreidimensionalen Darstellung des Ort-Zeit-Diagramms. Die Abbildungen in der linken Spalte zeigen die Lage der Schnittebenen bei  $x_0 = -2$  m (grüne Schnittebene),  $y_0 = -2$  m (gelbe Schnittebene) und  $t_0 = 20$  s (rote Schnittebene). Die Abbildungen in der rechten Spalte zeigen die Punkte, an denen die Trajektorien die Schnittebenen durchdringen sowie exemplarisch die Messbereiche  $\Delta y \cdot \Delta t$  (grüne Schnittebene),  $\Delta x \cdot \Delta t$  (gelbe Schnittebene) und  $\Delta x \cdot \Delta y$  (rote Schnittebene).



**Abb. 2.14** – Darstellung der Messmethode 1 am Beispiel des in Abbildung 2.10 gezeigten Szenarios „unidirektionaler Verkehr“. Für das gezeigte Beispiel werden an der Messlinie  $x_0$  im Zeitintervall  $\Delta t$  sechs Personen gezählt (grüne Punkte). Zum Zeitpunkt  $t_0$  befinden sich sieben Personen auf der Messstrecke  $\Delta x$  (rote Punkte).

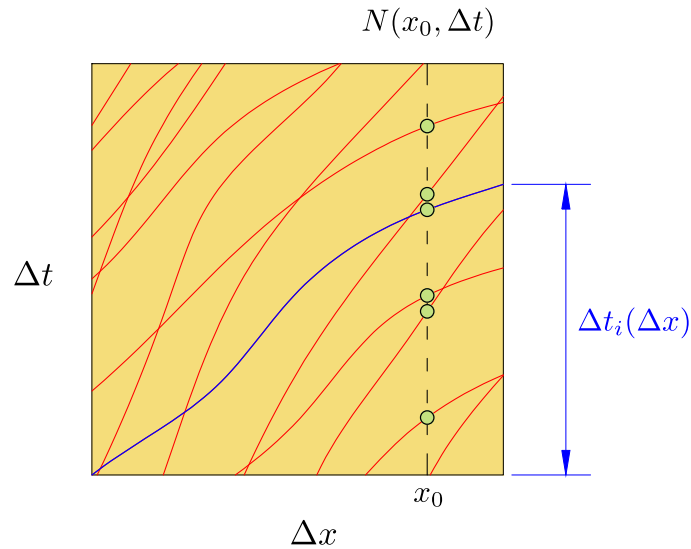
Mit der Breite  $b = \Delta y$  kann auch der spezifische Fluss  $J_s$  berechnet werden als:

$$\begin{aligned} J_s(x_0, \Delta t, \Delta y) &= \frac{J(x_0, \Delta t)}{\Delta y} \\ &= \frac{N(x_0, \Delta t)}{\Delta t \cdot \Delta y} \end{aligned} \quad (2.19)$$

Für die mittlere Geschwindigkeit  $\bar{v}_x$  in Richtung der  $x$ -Achse gilt dann:

$$\begin{aligned} \bar{v}_x(x_0, t_0, \Delta t, \Delta x) &= \frac{J_s(x_0, \Delta t, \Delta y)}{\rho(t_0, \Delta x, \Delta y)} \\ &= \frac{N(x_0, \Delta t)}{\Delta t \cdot \Delta y} \cdot \frac{\Delta x \cdot \Delta y}{N(t_0, \Delta x)} \\ &= \frac{N(x_0, \Delta t) \cdot \Delta x}{N(t_0, \Delta x) \cdot \Delta t} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Der große Vorteil der Messmethode liegt in ihrer nur mit geringem technischem Aufwand verbundenen Umsetzung. Feldstudien können mit einfachen Werkzeugen durchgeführt werden. Da der Fluss  $J$  jedoch nur an *einem* Ort  $x_0$  innerhalb der Messstrecke  $\Delta x$ , die Dichte  $\rho$  nur zu *einem* Zeitpunkt  $t_0$  innerhalb des Zeitintervalls  $\Delta t$  ermittelt wurde, sind die Ergebnisse nicht geeignet, fluktuierende Verkehrsströme abzubilden.



**Abb. 2.15** – Darstellung der Messmethode 2 am Beispiel des in Abbildung 2.10 gezeigten Szenarios „unidirektionaler Verkehr“. Für das gezeigte Beispiel werden an der Messlinie  $x_0$  im Zeitintervall  $\Delta t$  sechs Personen gezählt (grüne Punkte). Die Referenzperson  $i$  (blaue Trajektorie) benötigt die Zeitdauer  $\Delta t_i$ , um die Messstrecke  $\Delta x$  zurückzulegen.

**Messmethode 2** Analog der Messmethode 1 wird der Personenfluss  $J$  über die Anzahl  $N(x_0, \Delta t)$  der Personen, die die Messlinie  $x_0$  während der Zeitdauer  $\Delta t$  überschreiten, ermittelt (vgl. Abbildung 2.14 und Gleichung 2.16). Für eine Person  $i$  aus dem Personenstrom – in der Regel ist dies ein mit dem Messverfahren vertrauter Helfer, die Beobachtung kann jedoch auch von außen erfolgen – wird die Zeitdauer  $\Delta t_i$  bestimmt, die benötigt wird, die Messstrecke  $\Delta x$  zurückzulegen. Dabei wird angenommen, dass die durchschnittliche Geschwindigkeit  $\bar{v}_{i,x}$  der Person  $i$  in Richtung der  $x$ -Achse ähnlich der des gesamten Personenstroms ist. Für die durchschnittliche Geschwindigkeit  $\bar{v}_x$  des Personenstroms in Richtung der  $x$ -Achse gilt somit (vgl. Abbildung 2.15):

$$\begin{aligned} \bar{v}_x(\Delta x) &\approx \bar{v}_{i,x}(\Delta x) \\ &= \frac{\Delta x}{\Delta t_i(\Delta x)} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Für eine Breite  $b = \Delta y$  kann der Personenfluss  $J_s$  nach Gleichung 2.19 berechnet werden, so dass für die Dichte  $\rho$  innerhalb des Personenstroms gilt:

$$\begin{aligned} \rho(x_0, \Delta x, \Delta y, \Delta t) &= \frac{J_s(x_0, \Delta t, \Delta y)}{\bar{v}_x(\Delta x)} \\ &= \frac{N(x_0, \Delta t)}{\Delta t \cdot \Delta y} \cdot \frac{\Delta t_i(\Delta x)}{\Delta x} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Die in der Beschreibung der Messmethode 1 genannten Vorteile gelten auch hier: die Messungen können mit geringem Aufwand und einfachen Werkzeugen durchgeführt werden. Jedoch wird der Fluss

ebenfalls nur an einem Ort  $x_0$  innerhalb der Messstrecke  $\Delta x$  ermittelt. Die Zuverlässigkeit der Berechnung von Geschwindigkeit und Dichte hängt sehr stark davon ab, wie genau die Geschwindigkeit der Referenzperson bestimmt wird und wie repräsentativ deren Geschwindigkeit für die des gesamten Personenstroms ist.

**Messmethode 3** Mit Verweis auf die Vorarbeiten von Wardrop [119] und Lighthill/Whitham [68] fasst Edie [20] deren Messmethoden für den Straßenverkehr, die sehr stark der oben als Messmethode 1 bezeichneten ähneln, zusammen. Dabei wird zwischen Messungen am festen Ort und Messungen zu einem festen Zeitpunkt unterschieden. Am Ort  $x_0$  wird der schmale Streifen bzw. das Differential  $dx$  eingeführt, am Zeitpunkt  $t_0$  der schmale Streifen  $dt$  (vgl. Abbildungen 2.14 und 2.16).

In der praktischen Umsetzung werden diese Streifen z. B. durch zwei benachbarte Messlinien für  $dx$  oder zwei mit kurzen zeitlichen Abstand erstellte Fotos für  $dt$  realisiert. Für jeden Verkehrsteilnehmer  $i$  wird die Zeit  $dt_i$  gemessen, die zum Überqueren des Streifens mit der Breite  $dx$  benötigt wird. Ebenso wird für jeden Verkehrsteilnehmer  $i$  gemessen, welche Wegstrecke  $dx_i$  er im Zeitintervall  $dt$  zurückgelegt hat. Dort wo die Trajektorien die Messstreifen  $dx$  oder  $dt$  kreuzen, kann damit die Momentangeschwindigkeit  $v_i$  der Person als Steigung  $dx/dt_i$  bzw.  $dx_i/dt$  der Trajektorie ermittelt werden.

Die Gleichungen 2.23 und 2.24 beziehen sich auf *Messungen am festen Ort*  $x_0$ . Darin ist  $n = N(x_0, \Delta t)$  die Anzahl der Verkehrsteilnehmer, die die Messlinie  $x_0$  (bzw. den Messstreifen  $dx$ ) während der Zeitdauer  $\Delta t$  überschreiten. So kann der Fluss entsprechend Gleichung 2.16 berechnet werden [20, Gl. 1]. Für die Dichte gilt [20, Gl. 2]:

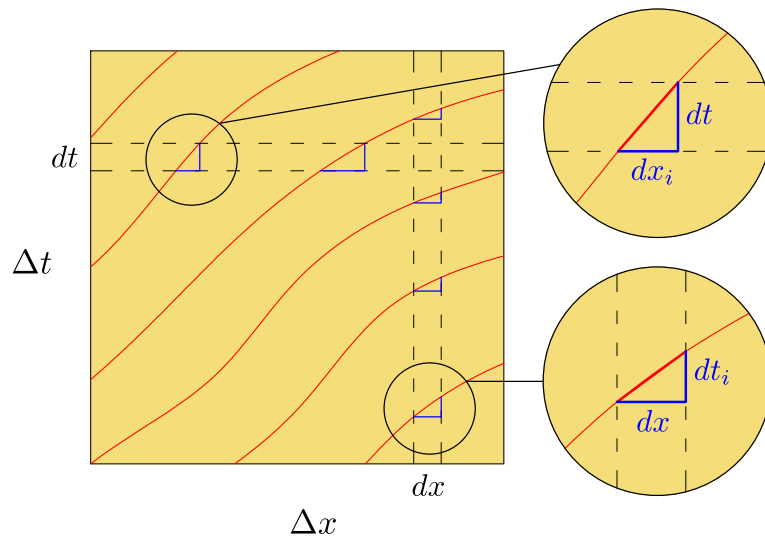
$$\rho(dx, \Delta t) = \frac{\sum_{i=1}^n dt_i}{\Delta t \cdot dx} \quad (2.23)$$

Die mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsstroms kann nun berechnet werden als [20, Gl. 3]:

$$\begin{aligned} \bar{v}(x_0, dx, \Delta t) &= \frac{J(x_0, \Delta t)}{\rho(dx, \Delta t)} \\ &= \frac{n \cdot dx}{\sum_{i=1}^n dt_i} \\ &= \frac{dx}{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n dt_i} \end{aligned} \quad (2.24)$$

Dies entspricht dem *harmonischen Mittelwert* der Geschwindigkeiten. Dieser wird in Abschnitt 2.3.3 noch einmal ausführlich beschrieben und in Beziehung zu weiteren Formen der Mittelwertbildung gesetzt.

Die Gleichungen 2.25 bis 2.27 beziehen sich auf *Messungen zu einem festen Zeitpunkt*  $t_0$ . Die Methode ist analog der, die auch von Zhang [127, S. 49 f.] als Methode C beschrieben wird. Hier steht  $n = N(t_0, \Delta x)$  nun für die Anzahl der Verkehrsteilnehmer, die sich zum Zeitpunkt  $t_0$  auf der Messstrecke  $\Delta x$  befinden. Die mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsstroms kann berechnet werden als [20, Gl. 4]:



**Abb. 2.16** – Darstellung der Messmethode 3 am Beispiel des in Abbildung 2.10 gezeigten Szenarios „unidirektionaler Verkehr“. Die Detailvergrößerungen zeigen die Steigungsdreiecke aus  $dx$  und  $dt$  im Bereich der örtlichen und zeitlichen Messstreifen.

$$\bar{v}(t_0, \Delta t) = \frac{\sum_{i=1}^n dx_i}{n \cdot dt} \quad (2.25)$$

Dies entspricht dem *arithmetischen Mittelwert* der Geschwindigkeiten, auf welchen ebenfalls in Abschnitt 2.3.3 noch einmal ausführlich eingegangen wird.

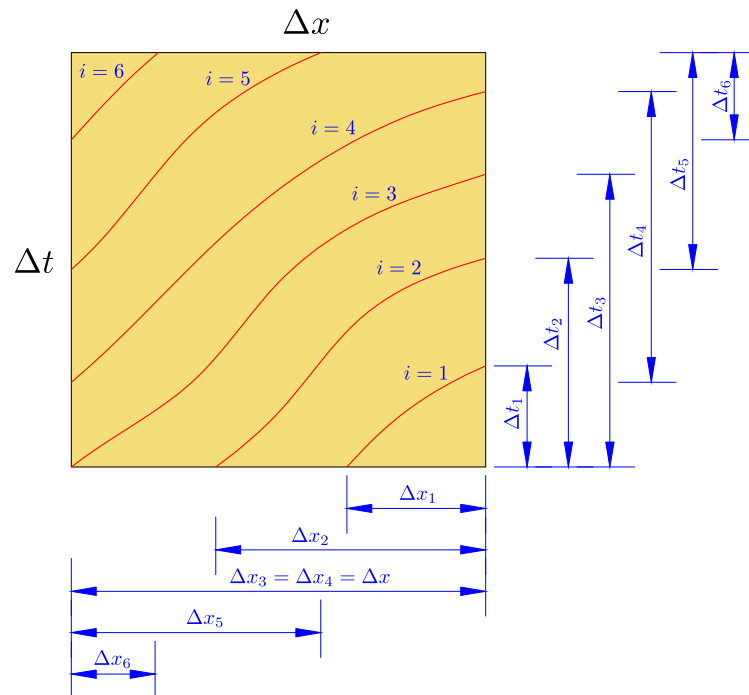
Für die Dichte gilt [20, Gl. 5]:

$$\rho(t_0, \Delta x) = \frac{n}{\Delta x} \quad (2.26)$$

So kann der Fluss als Produkt aus mittlerer Geschwindigkeit und Dichte berechnet werden [20, Gl. 6]:

$$\begin{aligned} J(t_0, \Delta x) &= \bar{v}(t_0, \Delta t) \cdot \rho(t_0, \Delta x) \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n dx_i}{dt \cdot \Delta x} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Auf die Vor- und Nachteile der in Messmethode 3 zugrunde liegenden Mittelwertbildungen für die Geschwindigkeit wird in Abschnitt 2.3.3 eingegangen.



**Abb. 2.17** – Darstellung der Messmethode 4 am Beispiel des in Abbildung 2.9 gezeigten Szenarios „eindimensionaler Verkehr“. Für jede Trajektorie  $i \in \{1, \dots, n\}$  werden  $\Delta t_i$  und  $\Delta x_i$  bestimmt.

**Messmethode 4** Die beiden als Messmethode 3 vorgestellten Konzepte (Messung am festen Ort bzw. zu einem festen Zeitpunkt) werden durch Edie [20] zusammengeführt, indem er Ort-Zeit-Mittelwerte bildet. Für jede Person  $i$ , die sich während des Zeitintervalls  $\Delta t$  auf der Messstrecke  $\Delta x$  befindet, wird die in  $\Delta t$  zurückgelegte Strecke  $\Delta x_i(\Delta t)$  sowie die auf der Messstrecke  $\Delta x$  verbrachte Zeitdauer  $\Delta t_i(\Delta x)$  erfasst (vgl. Abbildung 2.17).

Für den spurgebundenen Fahrzeugverkehr kann die Erfassung von  $\Delta x_i(\Delta t)$  und  $\Delta t_i(\Delta x)$  noch mit einfachen Werkzeugen durchgeführt werden. Bei der Beobachtung und Analyse von Personenströmen werden jedoch mit zunehmender Dichte deren Anwendungsgrenzen erreicht, so dass sich die Verwendung der in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen Verfahren zur Erfassung individueller Trajektorien empfiehlt.

Fluss, Dichte und mittlere Geschwindigkeit können nun unmittelbar aus den Ort-Zeit-Mittelwerten berechnet werden. Dabei ist  $n$  die Summe aller Personen, die sich während des Zeitintervalls  $\Delta t$  auf der Messstrecke  $\Delta x$  bewegt haben. Der mittlere Fluss  $\bar{J}$  berechnet sich als Summe aller zurückgelegten Distanzen  $\Delta x_i(\Delta t)$  dividiert durch die „Größe“ des Ort-Zeit-Messbereichs  $\Delta x \cdot \Delta t$  [20, Gl. 20]:

$$\bar{J}(\Delta x, \Delta t) = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta x_i(\Delta t)}{\Delta x} \cdot \frac{1}{\Delta t} \quad (2.28)$$

Die mittlere Dichte  $\bar{\rho}$  berechnet sich als Summe aller aufgewendeten Zeiten  $\Delta t_i(\Delta x)$  dividiert durch die oben definierte „Größe“ des Messbereichs [20, Gl. 21]:



$$\bar{\rho}(\Delta x, \Delta t) = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta t_i(\Delta x)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{\Delta x} \quad (2.29)$$

Damit kann auch die mittlere Geschwindigkeit  $\bar{v}$  berechnet werden als der Quotient aus Fluss und Dichte [20, Gl. 21].

$$\bar{v}(\Delta x, \Delta t) = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i(\Delta t)}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i(\Delta x)} \quad (2.30)$$

Die von Edie gewählte Mittelwertbildung für die Geschwindigkeit wird in Abschnitt 2.3.3 noch einmal aufgegriffen und in Beziehung zu den häufiger gebräuchlichen Formen der Mittelwertbildung (arithmetisches und harmonisches Mittel) gesetzt.

**Messmethode 5** In der Methode A nach Zhang [127, S. 48 f.] wird, ähnlich der Messmethode 1, der Personenfluss  $J$  über die Anzahl  $n = N(x_0, \Delta t)$  der Personen, die die Messlinie  $x_0$  während der Zeitdauer  $\Delta t$  überschreiten, ermittelt (vgl. Abbildung 2.14 und Gleichung 2.16). Abweichend von Gleichung 2.16 steht im Nenner aber nicht die Dauer  $\Delta t$  des gesamten Messintervalls, sondern der Abstand der Zeitpunkte  $t_1$  und  $t_n$ , zu denen die erste und letzte Person die Messlinie passieren:

$$J(x_0, \Delta t) = \frac{N(x_0, \Delta t)}{t_n - t_1} \quad (2.31)$$

Da  $t_n - t_1$  kleiner als  $\Delta t$  ist, wird der nach Gleichung 2.31 ermittelte Fluss stets größer sein, als der mit Gleichung 2.16 berechnete. Relevant wird dieser Unterschied jedoch nur, wenn die Intervallgrenzen von  $\Delta t$  entfernt von  $t_1$  und  $t_n$  liegen.

Auch die Geschwindigkeit wird beim Überschreiten der Messlinie  $x_0$  ermittelt. Hierfür wird ein kleines Zeitintervall  $dt$  definiert. Bei der Nutzung von Trajektorien, die aus Videodaten extrahiert wurden, kann das Zeitintervall anhand der Einzelbilder, die kurz vor und kurz nach dem Überschreiten der Messlinie aufgezeichnet wurden, definiert werden (vgl. Abbildung 2.18). Zhang wählt hier  $dt = 0,625$  s, bei einer Bildwiederholrate von 16 fps entspricht dies 10 Einzelbildern.

Mit

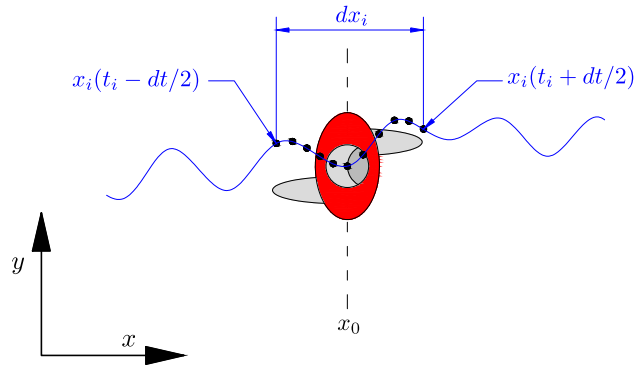
$$dx_i(t_i, dt) = x_i(t_i + dt/2) - x_i(t_i - dt/2) \quad (2.32)$$

kann die Momentangeschwindigkeit der Person  $i$  beim Überschreiten der Messlinie berechnet werden als:

$$v_i(t_i, dt) = \frac{dx_i(t_i, dt)}{dt} \quad (2.33)$$

Die mittlere Geschwindigkeit  $\bar{v}$  des gesamten Personenstroms berechnet sich dann als arithmetisches Mittel der individuellen Geschwindigkeiten:

$$\bar{v}(x_0, t_i, \Delta t, dt) = \frac{\sum_{i=1}^n v_i(t_i, dt)}{N(x_0, \Delta t)} \quad (2.34)$$



**Abb. 2.18** – Bestimmung der Momentangeschwindigkeit in Messmethode 5. Die Person bewegt sich in positiver  $x$ -Richtung. Für die aus Videoaufnahmen extrahierte Trajektorie markieren die schwarzen Punkte die Positionen des Kopfmittelpunktes, auf denen sich die Person in den Einzelbildern (*frames*) kurz vor, zum Zeitpunkt und kurz nach dem Überschreiten der Messlinie  $x_0$  befunden hat. Im Beispiel beginnt  $dt$  fünf Einzelbilder vor dem Überschreiten der Messlinie und endet fünf Einzelbilder nach dem Überschreiten. Bei einer Bildwiederholrate von 25 fps ergibt sich das Zeitintervall  $dt$  als  $10 \text{ frames} / 25 \text{ frames/s} = 0,4 \text{ s}$ . Die Wegstrecke, die von der Person im Zeitintervall  $dt$  zurückgelegt wurde, wird als  $dx_i$  bezeichnet.

Mit einer gegebenen Breite  $b$  des Durchgangs an der Messstelle  $x_0$  kann nun die Dichte  $\rho$  – ohne diese einer realen, geometrischen Fläche zuzuordnen – berechnet werden als:

$$\rho(x_0, t_i, \Delta t, dt) \approx \frac{J(x_0, \Delta t)}{\bar{v}(x_0, t_i, \Delta t, dt) \cdot b} \quad (2.35)$$

**Messmethode 6** In der Methode D nach Zhang [127, S. 51] kommt das in Abschnitt 2.3.2 beschriebene Voronoi-Verfahren zum Einsatz. Mit den auf einzelne Flächenpunkte bezogenen Dichten  $\rho(x, y, t)$  und Geschwindigkeiten  $v(x, y, t)$  (vgl. Gleichungen 2.40 und 2.42) ergeben sich zum Zeitpunkt  $t$  die Voronoi-Dichte  $\rho_V$  und Voronoi-Geschwindigkeit  $v_V$  auf der beliebig klein wählbaren Messfläche  $\Delta x \cdot \Delta y$  als:

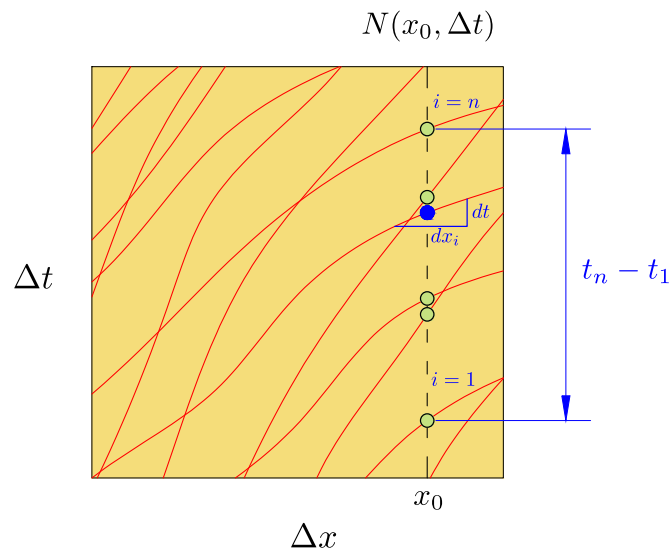
$$\rho_V(x, y, t, \Delta x, \Delta y) = \frac{\iint \rho(x, y, t) \, dx \, dy}{\Delta x \cdot \Delta y} \quad (2.36)$$

$$v_V(x, y, t, \Delta x, \Delta y) = \frac{\iint v(x, y, t) \, dx \, dy}{\Delta x \cdot \Delta y} \quad (2.37)$$

Mit einer gegebenen Breite  $b = \Delta y$  der Messfläche kann nun der Personenfluss  $J_V$  ermittelt werden als:

$$J_V \approx \rho_V \cdot v_V \cdot b \quad (2.38)$$

Diese Messmethode liefert auch dann aussagekräftige Ergebnisse, wenn kleine Messflächen untersucht werden (vgl. Abschnitt 2.3.2).



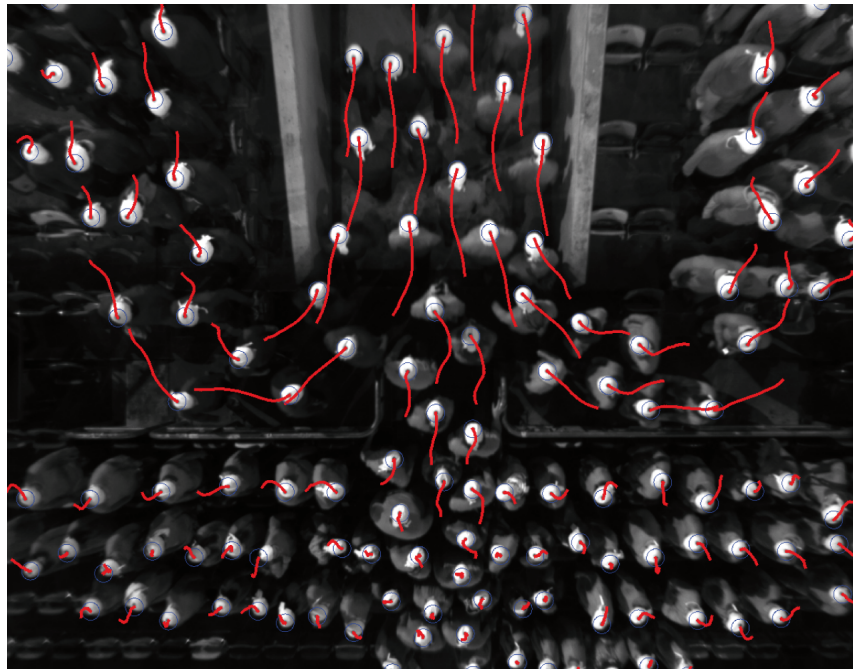
**Abb. 2.19** – Darstellung der Messmethode 5 am Beispiel des in Abbildung 2.10 gezeigten Szenarios „unidirektionaler Verkehr“. Für die Berechnung des Flusses nach Gleichung 2.31 wird der Abstand der Zeitpunkte  $t_1$  und  $t_n$ , zu denen die erste und letzte Person die Messlinie passieren, bestimmt. An der Messlinie  $x_0$  werden im Zeitintervall  $\Delta t$  sechs Personen gezählt. Für die blau markierte Person wird exemplarisch die Berechnung der individuellen Momentangeschwindigkeit veranschaulicht: innerhalb des definierten Zeitintervalls  $dt$  legt die Person  $i$  die Strecke  $dx_i$  zurück.

## 2.3 Aktuelle Forschung

### 2.3.1 Erfassung von Trajektorien

Die in Abschnitt 2.1 genannten Forschungsarbeiten, welche die Basis der heute geltenden Regelwerke bilden, sind bereits einige Jahre, z. T. auch mehrere Jahrzehnte alt. Für die Untersuchungen, die diesen Veröffentlichungen zugrunde liegen, wurden Messverfahren verwendet, welche – bei einem vertretbaren Aufwand der manuellen/visuellen Nachbearbeitung – nur die Betrachtung des Personenstromes als Ganzes erlauben.

Erst seit etwa zehn Jahren stehen Verfahren zur Verfügung, für große Personenströme hoher Dichte präzise, individuelle Laufwege als Ort-Zeit-Kurven (Trajektorien) zu erfassen [6,46]. Die verschiedenen Verfahren sollen an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt werden, für einen umfassenden Vergleich, eine Gegenüberstellung ihrer Vor- und Nachteile sowie ihrer Anwendungsgrenzen wird auf die Veröffentlichung von Boltes aus dem Jahr 2015 [6] verwiesen. Gleichwohl gilt für alle derzeit verfügbaren Verfahren, dass ihre Genauigkeit von den Umgebungsbedingungen abhängt: hohe Genauigkeiten sind nur unter Laborbedingungen erzielbar. Die Ergebnisse der eigenen Laborexperimente basieren auf einer videobasierten Erfassung der Trajektorien, bei welcher die Position der Markerpunkte auf den Köpfen der Personen erfasst wurde. Die Bildwiederholrate (*framerate*) der in dieser Arbeit ausgewerteten Trajektoriensätze beträgt 16 fps bzw. 25 fps (*frames per second*). Innerhalb des Messintervalls  $M = [\text{frame}_{\min}; \text{frame}_{\max}]$  stehen für jeden Zeitpunkt  $t_k$  mit  $k \in M$  die Ortskoordinaten  $\vec{x}_i(t_k)$  jeder Person  $i$  bis auf wenige Zentimeter genau zur Verfügung (vgl. Abbildung 2.20). Eine ausführliche Betrachtung hinsichtlich der Genauigkeit der ermittelten Trajektorien findet sich ebenfalls bei Boltes.



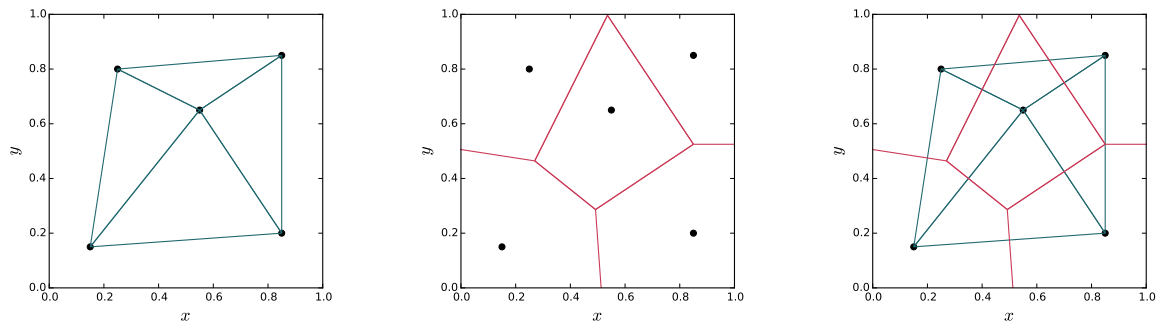
**Abb. 2.20** – Trajektorien im Bereich des Mundlochs eines Stadions. Die Auswertung stammt aus den Laborexperimenten im Forschungsprojekt Hermes. Die roten Linien veranschaulichen den Pfad der letzten Sekunde (Bild: M. Boltes)

Im Rahmen dieser Arbeit werden die so gewonnenen Trajektoriensätze als hinreichend genau angenommen. Obwohl die Ortskoordinaten nur framewise, d. h. diskret vorliegen, wird im Folgenden die Notation  $\vec{x}_i(t)$  verwendet.

Für die meisten Fragestellungen im Kontext der Fußverkehrsplanung reicht es aus, die von der Zeit abhängigen Positionen der einzelnen Personen auf der euklidische Ebene ( $x(t)$ - und  $y(t)$ -Koordinaten) zu kennen, die Höhe ( $z(t)$ -Koordinate) wird nur dann relevant, wenn die Neigung des Untergrundes, z. B. bei Treppen oder Rampen, berücksichtigt [11] oder die Größe der Personen in die Untersuchungen einbezogen wird. Für spezielle Fragestellungen in der Grundlagenforschung werden auch „eindimensionale“ Systeme betrachtet [21, 84, 133], in denen sich die Personen auf einer Linie bewegen, so dass ihre Positionen über die Zeit alleine durch die  $x(t)$ -Koordinaten beschrieben werden können.

### 2.3.2 Voronoi-Verfahren

Ergänzend zu den in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen Verfahren für die Erfassung der Trajektorien wurden in den vergangenen Jahren auch die Analysemethoden verbessert. Beim Voronoi-Verfahren [67, 79, 109, 117] wird jeder Person  $i$  eine persönliche Fläche  $A_i(t)$ , die Voronoi-Region oder Voronoi-Zelle, zugewiesen, der alle Punkte der euklidische Ebene angehören, die näher an der Person  $i$  als an allen anderen Personen liegen. Zusätzlich wird die Voronoi-Zelle durch Wände, Hindernisse sowie i. Allg. auch durch einen *cutoff*-Radius, der den maximalen Einflussbereich der Person repräsentiert, begrenzt. Die Grenzlinien zwischen den Voronoi-Regionen werden als Voronoi-Diagramm bezeichnet, ein dualer Graph des Voronoi-Diagramms ist die Delaunay-Triangulation (vgl. Abbildung 2.21). Bei der Erzeugung der Delaunay-Triangulation wird der kleinste Innenwinkel über alle Dreiecke im Dreiecksnetz maximiert. Die Kanten der Delaunay-Triangulation stehen senkrecht auf denen



**Abb. 2.21** – Zusammenhang zwischen Delaunay-Triangulation und Voronoi-Diagramm am Beispiel einer Menge von fünf Punkten in der Ebene. Links: Delaunay-Triangulation. Mitte: Voronoi-Diagramm. Rechts: Überlagerung beider Darstellungen

des Voronoi-Diagramms.

Die Dichte innerhalb der Voronoi-Zelle einer Person berechnet sich als Kehrwert ihres Flächeninhalts. Mit dem Voronoi-Verfahren ist es möglich, auch auf kleinen Messflächen die Personendichte mit nur geringer Fluktuation zu bestimmen. Als „klein“ sind hier solche Messflächen – bspw. im Bereich unmittelbar vor einer Engstelle – zu verstehen, deren Personendichte  $\rho = N/A$  einen im Sinne der Fragestellung relevanten Sprung erfährt, sobald eine Person die Messfläche betritt oder verlässt. Das Voronoi-Verfahren erlaubt es, bei Dichte- und Flussmessungen den Einfluss einer Person entsprechend des Anteils ihrer Voronoi-Zelle an der Messfläche zu gewichten (siehe Abschnitt 2.2.2, Messmethode 6). Für die Punkte  $(x, y)$  auf der Messfläche berechnen sich zum Zeitpunkt  $t$  die Dichteverteilung  $\rho$  und die Geschwindigkeitsverteilung  $v$  wie folgt [6, S. 204] [127, S. 51]:

$$\rho_i(x, y, t) = \begin{cases} 1/A_i(t) & : \forall (x, y) \in A_i(t) \\ 0 & : \text{sonst} \end{cases} \quad (2.39)$$

$$\rho(x, y, t) = \sum_i \rho_i(x, y, t) \quad (2.40)$$

$$v_i(x, y, t) = \begin{cases} v_i(t) & : \forall (x, y) \in A_i(t) \\ 0 & : \text{sonst} \end{cases} \quad (2.41)$$

$$v(x, y, t) = \sum_i v_i(x, y, t) \quad (2.42)$$

Der Index  $i$  bezeichnet darin die Personen,  $v_i(t)$  die Momentangeschwindigkeit der Person  $i$  zum Zeitpunkt  $t$  gemäß der auf Seite 35 eingeführten Gleichungen 2.32 und 2.33). Das Voronoi-Verfahren fließt in die von Zhang [127] beschriebenen Messmethoden ein (vgl. Abschnitt 2.2.2, Messmethode 6). Die Delaunay-Triangulation ist aber zugleich Grundlage für die in Abschnitt 4.2 beschriebenen, neuen Konzepte der Datenanalyse und wird dort noch einmal aufgegriffen.

### 2.3.3 Mittelwerte der Geschwindigkeit

Bei einer Beobachtung von  $n$  Elementen, bei denen für jedes Element  $i \in \{1, \dots, n\}$  die in der Zeitdauer  $dt_i$  zurückgelegte Wegstrecke  $dx_i$  gemessen wird, berechnen sich die individuellen Geschwindigkeiten als  $v_i = dx_i/dt_i$ . Für die Berechnung der mittleren Geschwindigkeit werden in den Verkehrswissenschaften in der Regel zwei Methoden der Mittelwertbildung eingesetzt, die ggf. unterschiedliche Ergebnisse liefern. Dies sind der arithmetische Mittelwert

$$\overline{v_A} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n v_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{dx_i}{dt_i} \quad (2.43)$$

und der harmonische Mittelwert

$$\overline{v_H} = \frac{1}{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{v_i}} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{dt_i}{dx_i}} \quad (2.44)$$

Eine dritte, seltener gebräuchliche Methode der Mittelwertbildung ist auf Edie [20] zurückzuführen (vgl. auch Messmethode 4 in Abschnitt 2.2):

$$\overline{v_E} = \frac{\sum_{i=1}^n dx_i}{\sum_{i=1}^n dt_i} \quad (2.45)$$

Nachfolgend soll auf den Zusammenhang zwischen diesen drei Verfahren eingegangen werden, da er für die in Abschnitt 2.2 beschriebenen Messmethoden relevant ist. Bei den Messungen ist zu unterscheiden zwischen solchen, die am festen Ort und solchen, die zu einem festen Zeitpunkt durchgeführt werden. Die beiden Varianten sollen am Beispiel einer Verkehrsbeobachtung im Straßenverkehr veranschaulicht werden.

Messungen am festen Ort  $x_0$  können bspw. auf einer Brücke stehend durchgeführt werden, indem der unter der Brücke vorbeifahrende Verkehr über ein Zeitintervall  $\Delta t$  beobachtet wird. Die Momentangeschwindigkeit  $v_i = dx_i/dt_i$  der einzelnen Verkehrsteilnehmer kann dabei durch zwei in kleinem Abstand  $dx$  verlegten Kontaktschleifen erfasst werden. Dabei bleibt der Abstand der Kontaktschleifen fest, d. h.  $dx_i = dx$  konstant. Die individuelle Zeitdauer  $dt_i$ , die zum Überfahren der beiden Kontaktschleifen benötigt wird, hängt von der individuellen Geschwindigkeit  $v_i$  ab.

Für Messungen zu einem festen Zeitpunkt  $t_0$  können in einem kurzen zeitlichen Abstand  $dt$  zwei Fotos der Messstrecke  $\Delta x$  aufgenommen werden. Auch hier kann die Momentangeschwindigkeit  $v_i = dx_i/dt_i$  der einzelnen Verkehrsteilnehmer ermittelt werden. Es bleibt der zeitliche Abstand zwischen den beiden Fotos fest, d. h.  $dt_i = dt$  konstant. Die individuelle Wegstrecke  $dx_i$ , die zwischen den Zeitpunkten der beiden Fotos zurückgelegt wurde, hängt von der individuellen Geschwindigkeit  $v_i$  ab.

Sofern sich alle Verkehrsteilnehmer konstant und mit derselben Geschwindigkeit bewegen, werden beide Messungen dasselbe Ergebnis für die mittlere Geschwindigkeit liefern. Falls sich aber die Verkehrsteilnehmer nicht homogen bewegen, wird das arithmetische Mittel der Einzelgeschwindigkeiten, die am festen Ort erhoben wurden, höher sein, als das arithmetische Mittel der zu einem festen Zeitpunkt erhobenen Einzelgeschwindigkeiten: am festen Ort werden häufiger die Verkehrsteilnehmer mit hoher Geschwindigkeit beobachtet.

Für die Verkehrsplanung ist in der Regel die globale Geschwindigkeit auf der Verkehrsanlage, die mittlere Raum-Geschwindigkeit (*space mean*), relevant. Dies entspricht dem arithmetischen Mittel  $\bar{v}_A$  der Einzelgeschwindigkeiten, die zu einem festen Zeitpunkt erhoben wurden. Unter Anwendung des harmonischen Mittelwertes  $\bar{v}_H$  kann jedoch auch aus den Einzelgeschwindigkeiten, die am festen Ort erhoben wurden, näherungsweise die mittlere Raum-Geschwindigkeit berechnet werden. Es gilt generell:

$$\bar{v}_H \leq \bar{v}_A \quad (2.46)$$

Für die Messung am festen Ort mit  $dx_i = dx$  konstant gilt:

$$\bar{v}_H = \frac{1}{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{v_i}} = \frac{n \cdot dx}{\sum_{i=1}^n \frac{dx}{v_i}} = \frac{n \cdot dx}{\sum_{i=1}^n dt_i} = \frac{\sum_{i=1}^n dx_i}{\sum_{i=1}^n dt_i} = \bar{v}_E \quad (2.47)$$

$$\Rightarrow \bar{v}_E = \bar{v}_H \leq \bar{v}_A \quad (2.48)$$

Für die Messung zu einem festen Zeitpunkt mit  $dt_i = dt$  konstant gilt:

$$\bar{v}_A = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{dx_i}{dt} = \frac{1}{n \cdot dt} \cdot \sum_{i=1}^n dx_i = \frac{\sum_{i=1}^n dx_i}{n \cdot dt} = \frac{\sum_{i=1}^n dx_i}{\sum_{i=1}^n dt_i} = \bar{v}_E \quad (2.49)$$

$$\Rightarrow \bar{v}_E = \bar{v}_A \geq \bar{v}_H \quad (2.50)$$

So ist festzustellen, dass in beiden Fällen die Mittelwertbildung nach Edie sowohl das harmonische Mittel  $\bar{v}_H$  (Messung am festen Ort), als auch das arithmetische Mittel  $\bar{v}_A$  (Messung zu einem festen Zeitpunkt) ersetzen kann. Gleichzeitig ist die Berechnung nach Edie besonders einfach: es wird lediglich die Summe der individuellen Wegstrecken  $dx_i$  durch die Summe der individuell für diese Wege benötigten Zeiten  $dt_i$  dividiert.

### 2.3.4 Konzept des spezifischen Flusses

Spätestens seit Beginn des 20. Jahrhundert wird die Frage, wie die Leistungsfähigkeit eines Weges von seiner Breite beeinflusst wird, in Forschungsarbeiten adressiert. Frühe Studien zu diesem Thema werden bereits in Abschnitt 2.1.1 angesprochen. Zu nennen sind hier die Arbeiten von Dieckmann [17] und Fischer [23]. Beide erkennen eine Proportionalität zwischen Personendurchsatz und Durchgangsbreite, empfehlen jedoch zugleich „günstige Verkehrswegbreiten“ [23, S. 24], die einem Vielfachen typischer Körperbreiten entsprechen. Diese Empfehlung findet sich bis heute in einigen Bauordnungen, dort wird eine stufenweise Vergrößerung der Ausgangsbreite im 0,60-m-Raster verlangt (vgl. Sonderbauverordnung des Landes Nordrhein-Westfalen vom 17.11.2009 [61, § 7]). Die These des stufenweisen Anstiegs der Leistungsfähigkeit findet sich aber auch in neueren Forschungsarbeiten, wie bspw. bei Hoogendorn et al. in den Jahren 2003 und 2005 [47, 49]. Aufgrund ihrer Beobachtungen kommen die Autoren zu dem Schluss, dass der Personendurchsatz nicht linear mit der Engstellenbreite, sondern infolge der Linienbildung erst ab einer zusätzlichen Breite von 0,45 m zunimmt.

Zahlreiche andere Autoren leiten aus ihren empirischen Untersuchungen jedoch ein proportionales Verhältnis zwischen dem Personenfluss und der Breite des Weges ab, so z. B. Hankin und Wright bereits im Jahr 1958 [34]. Kretz [59] schließt den stufenweisen Anstieg zumindest für kurze Engstellen aus, die Untersuchungen von Seyfried et al. [101, 106] sowie Zhang [127] bestätigen ebenfalls den linearen Zusammenhang zwischen dem Personenfluss  $J$  und der Breite  $b$ . Der auf die Breite  $b = 1$  m bezogene spezifische Fluss berechnet sich als

$$J_s = \frac{J}{b} \quad (2.51)$$

und wird in der Einheit  $(\text{ms})^{-1}$  angegeben. Für Korridore und Engstellen steht damit die Breite  $b$  als Skalierungsfaktor zur Verfügung: bei einer Verbreiterung des Weges erhöht sich die Leistungsfähigkeit proportional.

Auf komplexe Verkehrsanlagen, z. B. Kreuzungen mit unterschiedlicher Anzahl, Anordnung und Nutzung von Zu- und Ausgängen, kann das bestehende „Konzept des spezifischen Flusses“ jedoch nicht ohne Weiteres übertragen werden, da der Personendurchsatz nicht nur durch *eine* bestimmte Breite beeinflusst wird. Hier muss der Skalierungsfaktor in eine allgemeine Form überführt werden.



## Kapitel 3

# Laborexperimente

In den vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekten „BaSiGo – Bausteine für die Sicherheit von Großveranstaltungen“ und „Hermes – Erforschung eines Evakuierungsassistenten für den Krisenfall bei Großveranstaltungen“ konnte das Forschungszentrum Jülich Laborexperimente mit bis zu 1000 Probanden durchführen. Diese bilden die empirische Grundlage der vorliegenden Arbeit.

Durch die Verwendung videobasierter Trackingverfahren, mit denen die Trajektorie jeder einzelnen Person innerhalb eines Personenstroms in hoher Genauigkeit erfasst werden kann, besteht die Möglichkeit, dessen Dynamik feinskalig zu analysieren. Damit eröffnen sich neue Perspektiven für das Verständnis des Fußverkehrs, die weit über die Möglichkeiten älterer Forschungsarbeiten, welche bis heute die Basis der geltenden Regelwerke bilden, hinausgehen.

Die Laborexperimente in den Projekten BaSiGo und Hermes knüpfen an eine Reihe früher durchgeführter Untersuchungen zur Fußgängerdynamik an, welche dazu beitragen, die Lücken in der Datenbasis zu schließen sowie die vorhandenen Widersprüche aufzulösen. In Abschnitt 3.1 folgt eine Übersicht der im Kontext dieser Arbeit relevanten Laborexperimente und Feldstudien, die etwa seit der Jahrtausendwende unter Beteiligung des Forschungszentrums Jülich, aber auch durch andere Forschungseinrichtungen durchgeführt wurden. Anschließend werden in den Abschnitten 3.2 und 3.3 die Laborexperimente in den Projekten BaSiGo und Hermes eingeführt.

### 3.1 Laborexperimente und Feldstudien seit der Jahrtausendwende

In Abschnitt 2.1 wurden solche Untersuchungen beschrieben, welche bereits unmittelbar oder mittelbar in die aktuell geltenden, technischen Regelwerke eingeflossen sind. Da die Regelwerke einem mehrjährigen Überarbeitungszyklus unterliegen, stammt der überwiegende Teil der dort genannten Forschungsarbeiten aus dem vergangenen Jahrtausend – und basiert auf Daten, die mit „einfachen“ Werkzeugen erhoben wurden. In den vergangenen Jahren wurden jedoch zahlreiche empirische Studien durchgeführt, welche die inzwischen verfeinerten Methoden der Datenerfassung und -analyse (vgl. Abschnitte 2.3.1 und 2.3.2) nutzen.

Tabelle 3.1 zeigt eine im Rahmen der vorliegenden Arbeit relevante Auswahl empirischer Studien zur Fußgängerdynamik, die seit dem Jahr 2002 durchgeführt wurden. Das in der Spalte „Jahr“ genannte Datum bezieht sich auf den Zeitpunkt, zu dem die Studie durchgeführt wurde, sofern dieser Zeitpunkt

nicht bekannt ist, auf das Jahr, in welchem die erste Publikation erschienen ist. Der relativ junge Forschungsbereich weist derzeit eine hohe Agilität auf, die Übersicht hat deshalb nur exemplarischen Charakter ohne Anspruch auf Vollständigkeit.

Tab. 3.1 – Empirische Studien seit dem Jahr 2002

| Jahr | Name/Projekt      | Gegenstand der Forschung                              | Quellen                                   |
|------|-------------------|---|---|
| 2002 | Daamen/Hoogendorn | Uni- und bidirektionaler Verkehr, Kreuzung, Engstelle | [13–16, 45, 48, 49]                       |
| 2004 | Isobe             | Bidirektionaler Verkehr                               | [51]                                      |
| 2005 | Seyfried          | Eindimensionaler Verkehr                              | [99, 102–105]                             |
| 2006 | Kretz             | Bidirektionaler Verkehr und Engstelle                 | [57–60]                                   |
| 2007 | Hostikka          | Räumung eines Gebäudes                                | [50]                                      |
| 2007 | Seyfried          | Unidirektionaler Verkehr, Engstelle                   | [66, 93, 96, 99, 100, 106, 122, 123, 132] |
| 2009 | Liu               | Eindimensionaler Verkehr                              | [69]                                      |
| 2009 | Moussaïd          | Interaktionen, Selbstorganisation                     | [72–75]                                   |
| 2009 | Hermes            | Vgl. Abschnitt 3.3                                    | [8, 126–131]                              |
| 2010 | Daamen            | Engstelle   | [16]                                      |
| 2010 | Wong              | Bidirektionaler Verkehr, Kreuzung                     | [124]                                     |
| 2010 | Song              | Engstelle, eindimensionaler Verkehr                   | [107, 108, 112]                           |
| 2010 | Plaue             | Kreuzung  | [83]                                      |
| 2012 | Lian              | Kreuzung  | [64]                                      |
| 2013 | BaSiGo            | Vgl. Abschnitt 3.2                                    | [38, 42]                                  |
| 2014 | Bukáček           | Engstelle   | [10]                                      |

## 3.2 Experimente im Projekt BaSiGo

### 3.2.1 Projektrahmen

Das Projekt „BaSiGo – Bausteine für die Sicherheit von Großveranstaltungen“ wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Programms „Forschung für die zivile Sicherheit“ im Themenfeld „Schutz und Rettung von Menschen“ gefördert (Förderkennzeichen: 13N12043 bis 13N12052). Das Projekt startete im März 2012 und endete im Juni 2015.

Als Projektpartner waren beteiligt:

- Bergische Universität Wuppertal (Koordinator)
- Forschungszentrum Jülich GmbH
- Universität Siegen
- Deutsche Hochschule der Polizei
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe
- Feuerwehren der Städte Berlin, München und Düren
- Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes e.V.

- PTV Planung Transport Verkehr AG
- IST GmbH

Ziel des Projektes war es, modulare Sicherheitsbausteine zu erarbeiten, mit denen Großveranstaltungen von der Planung über die Durchführung bis hin zur Nachbereitung begleitet und im Sinne der Sicherheit optimiert werden können. Aus den Ergebnissen der Forschung sollten zusätzlich neue Lösungsansätze für die Simulation von Großveranstaltungen sowie Trainings- und Ausbildungskonzepte abgeleitet werden.

Das Forschungszentrum Jülich bearbeitete innerhalb des Gesamtvorhabens das Teilprojekt „Experimentelle Untersuchung und Simulation von Fußgängerbewegungen in großen Menschenmengen“ (Förderkennzeichen: 13N12045) [38]. Ziel dieses Teilvorhabens war es, die vorhandenen Werkzeuge für die Bemessung der im Kontext von Großveranstaltungen genutzten Fußgängerverkehrsanlagen zu verbessern. Der Projektbeitrag des Forschungszentrums Jülich konzentrierte sich auf drei Schwerpunkte:

- Durchführung von Laborexperimenten zur Untersuchung der Dynamik in Menschenmengen hoher Dichte. Die Experimente sollten dazu beitragen, die Entstehung kritischer Zustände besser zu verstehen. Auch individuelle Merkmale der Probanden, z. B. Alter, Geschlecht, Konstitution oder Gruppenzugehörigkeit, wurden berücksichtigt.
- Weiterentwicklung der Modelle für die Simulation des Fußverkehrs, insbesondere hinsichtlich der realistischen Abbildung von Stauphänomenen.
- Erstellung einer Open-Access-Datenbank als Basis für die Dokumentation sicherheitsrelevanter Veranstaltungsdaten.

Die vorliegende Arbeit nimmt Bezug auf den erstgenannten Projektbeitrag. Im Juni 2013 konnten in der Messe Düsseldorf Laborexperimente mit etwa 2000 Teilnehmern realisiert werden. An vier Tagen wurden 29 Experimente mit insgesamt 187 Durchläufen durchgeführt (vgl. Tabelle 3.3). Verantwortlich für die Umsetzung der Experimente war das Jülich Supercomputing Centre am Forschungszentrum Jülich in Kooperation mit dem Institut für Medienforschung der Universität Siegen, welches sich der Forschungsfrage „Sicherheitskommunikation“ zuwandte. Ein Mitarbeiter der IBIT GmbH stand als Berater für Sicherheitsfragen zur Verfügung. Die Messe Düsseldorf GmbH unterstützte das Forschungsprojekt, indem sie eine ihrer Hallen zur Verfügung stellte. Zusätzlich trugen die University of Essex (Durchführung von Experimenten zum Gruppenverhalten) und die Stadtverwaltung Düsseldorf (Unterstützung bei der Organisation) zum Gelingen der Experimente bei.

### 3.2.2 Vorbereitung und Durchführung der Experimente

#### Akquisition und Registrierung der Probanden

An den Experimenten nahmen insgesamt 1986 Probanden und 43 Helfer teil (vgl. Tabelle 3.2). Die Probanden wirkten in der Rolle der „Fußgänger“ mit, die Helfer unterstützten die Organisatoren der Experimente, z. B. bei der Verteilung der Probanden auf die für die einzelnen Durchläufe vorab definierten Startpositionen. Das Honorar für jeden der Probanden und Helfer betrug 50 Euro pro Tag.

Die Aufrufe für die Teilnahme an den Experimenten erfolgten über die lokale und regionale Presse, die Lokalsender des Westdeutschen Rundfunks und über die Facebook-Seite des Forschungszentrum



Abb. 3.1 – Teilnehmer der BaSiGo-Experimente am Samstag, den 22.06.2013 (Foto: R. Eisenbach)

Jülich. Zusätzlich wurden an den Hochschulen in Aachen, Düsseldorf, Wuppertal, Siegen und Mönchengladbach Plakate ausgehängt (vgl. Abbildung A.1). Die Anmeldung der Teilnehmer erfolgte über eine eigens eingerichtete Internetseite. Unter der Annahme, dass ein Teil der angemeldeten Personen am Tag der Experimente nicht erscheinen werde, wurden insgesamt 2 671 Anmeldungen akzeptiert. Mit 2 029 Teilnehmern wurde die Zielgröße von 2 000 Probanden plus 80 Helfer recht genau erreicht.

Tabelle 3.2 zeigt die Anzahl der Probanden und Helfer an den einzelnen Tagen, einen visuellen Eindruck von der Anzahl der Teilnehmer am Samstag, den 22.06.2013 vermittelt Abbildung 3.1.

Tab. 3.2 – Anzahl der Probanden und Helfer bei den Experimenten [38]

| Tag | Datum                      | Probanden | Helfer |
|-----|----------------------------|-----------|--------|
| 1   | Mittwoch, den 19.06.2013   | 319       | 13     |
| 2   | Donnerstag, den 20.06.2013 | 603       | 13     |
| 3   | Freitag, den 21.06.2013    | 138       | -      |
| 4   | Samstag, den 22.06.2013    | 926       | 17     |
|     | $\Sigma$                   | 1986      | 43     |

Bedingung für die Teilnahme war die Volljährigkeit, eine obere Altersbegrenzung gab es nicht. Das Alter der Teilnehmenden variierte zwischen 18 und 72 Jahren. Das arithmetische Mittel lag bei 24,8 Jahren  $\pm$  4,4 Jahre. Der Anteil der Männer betrug etwa 55 %. Aus technischen Gründen wurden nur Probanden zugelassen, die zwischen 150 cm und 200 cm groß waren. Die mittlere Größe der Probanden betrug 1,72 m  $\pm$  0,08 m. Der überwiegende Teil der Probanden waren Studenten. Im Verlauf der Experimente stellte sich heraus, dass ein nicht quantifizierter Anteil der Probanden nur über geringe Deutschkenntnisse verfügte, so dass die Kommunikation in Englisch erforderlich war. Deshalb wurden die Ansagen bei erkennbarem Bedarf zweisprachig, deutsch und englisch, vorgenommen.

Bei der Registrierung am Tag der Experimente erhielt jeder der Probanden eine eindeutige „Kappenummer“ sowie ein gelbes oder rotes Armband. Über diese beiden zufällig verteilten Merkmale (gerade/ungerade Kappenummer bzw. gelbes/rotes Armband) war es möglich, die Probanden im Ver-

lauf der Experimente in Teilgruppen zu sortieren. Zusätzlich musste jeder Teilnehmer einen von der Universität Siegen entworfenen Fragebogen ausfüllen. Die Fragen bezogen sich u. a. auf das Alter, das Geschlecht, die Zusammengehörigkeit mit anderen Versuchsteilnehmern, den Lebensraum, das Kommunikationsverhalten sowie die Erfahrung mit Großveranstaltungen. Der Fragebogen enthielt zudem die Kappennummer, so dass eine Zuordnung der im Bild erkannten Nummer zu dem entsprechenden Fragebogen möglich ist.

### Aufbau und Technik der Datenerfassung

Für die Laborexperimente wurden typische Strukturen des Verkehrsraums, wie sie bei Großveranstaltungen, aber auch bei Veranstaltungen in Gebäuden sowie in Bahnhöfen oder Flughäfen vorkommen, z. B. Korridore, Kreuzungen und Engstellen, aus Messebauwänden und Absperrgittern nachgebildet. Die Messebauwände hatten die Grundmaße 2,50 m x 1,00 m x 0,04 m, die Oberflächen der Wände waren glatt und weiß lackiert. Um die Umbauzeiten zwischen den Experimenten möglichst kurz zu halten, wurden jeweils vier Messebauwände zu Quadern (2,50 m x 1,00 m x 1,08 m) vormontiert. Bei einem Teil der Experimente kamen zusätzlich eine Säule sowie Portalgerüste mit Monitoren, auf denen Verhaltensregeln in Form von Verkehrsschildern gezeigt wurden, zum Einsatz. Die anthrazitfarbene Oberfläche des Fußbodens bestand aus einer rutschfesten Beschichtung geringer Rauigkeit mit in regelmäßigen Abständen eingelassenen Installationskanälen, auf denen eine Metallabdeckung lag. Die Temperaturen außerhalb der Halle waren sommerlich warm, so dass der Großteil der Probanden in Sommerkleidung erschien. Die Halle selbst war klimatisiert. Ein kleiner Anteil der Probanden trug einen Tagesrucksack oder eine Handtasche mit sich.

Die lichten Durchgangsbreiten der experimentellen Aufbauten betrugen bis zu fünf Meter. Durch die Variation der Ein- und Ausgangsbreiten sowie der Anzahl der teilnehmenden Probanden wurde die Personendichte innerhalb der Geometrien schrittweise auf bis zu etwa acht Personen pro Quadratmeter erhöht. In einzelnen Durchläufen wurden auch Dichten von über acht Personen pro Quadratmeter erreicht. In den Abbildungen 3.3 und 3.4 sind die bei den Experimenten fest stehenden Quader aus Messebauwänden hellgrau und die zwischen den einzelnen Läufen zur Variation der Ein- und Ausgangsbreiten verschobenen Quader in einem dunkleren Grau dargestellt.

Innerhalb eines etwa 10 m x 10 m großen Messbereichs wurde die Bewegung jeder einzelnen Person durch ein Grid aus 28 überkopf montierten Industriekameras sowie zusätzliche HD-Kameras dokumentiert. Jeder Proband trug eine weiße Kappe mit einem individuellen, aus schwarzen und weißen Quadraten zusammengesetzten Marker (vgl. Abb. 3.2).

Dieser maschinenlesbare Code entsprach der Kappennummer, die bei der Registrierung vergeben wurde. Mit dem von Mehner [70] im Rahmen des Projektes entwickelten Verfahren war es möglich, für jede Bildsequenz der Videoaufnahme (16 Bilder pro Sekunde) die Identität, Position und Kopfausrichtung der im Messbereich anwesenden Probanden zu bestimmen. Aus der Verknüpfung der Positionen ergeben sich die individuellen Laufwege (Trajektorien) der Probanden. Die besonderen Herausforderungen bei der Extraktion der Trajektorien lagen zum einen darin, dass einige der Probanden ihre Kappen sehr schräg trugen, so dass ihre Marker für die Kameras nur verzerrt zu sehen waren, zum anderen in der Synchronisation und Kalibrierung der Industriekameras im Grid.



Abb. 3.2 – Marker für das individuelle Tracking der Probanden (Foto: M. Strunz)

### 3.2.3 Konfiguration der Experimente

Tabelle 3.3 gibt einen Überblick über die durchgeführten Experimente. Der Schwerpunkt der Experimente am ersten, zweiten und vierten Tag (Mittwoch, Donnerstag, Samstag) lag auf der Untersuchung von Personenströmen hoher Dichte. Am dritten Tag (Freitag) wurden ergänzende Experimente durchgeführt, in denen bspw. der Zusammenhalt sozialer Gruppen oder die Routenwahl untersucht wurden. Die Experimente des dritten Tages werden in der Übersicht aus Gründen der Vollständigkeit genannt, im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch nicht weiter berücksichtigt.

Aufgrund der oben beschriebenen technischen Probleme konnten mit den im Projekt entwickelten Verfahren [70] nicht für alle Versuchsdurchläufe die Trajektorien in der erforderlichen Qualität extrahiert werden. In diesen Fällen wurde die in früheren Forschungsprojekten bewährte Software „Pe-Track“ [6, 7] verwendet. Mit dieser Software werden die Trajektorien ebenfalls in hoher Genauigkeit ermittelt, die individuelle Zuordnung zu bestimmten Probanden ist jedoch nicht möglich. Im Rahmen dieser Arbeit werden Experimente zu den folgenden Verkehrsszenarien ausgewertet:

|              |  |
|--------------|--|
| SOLO_REF     | Experimente zur Bestimmung der Referenzgeschwindigkeiten       |
| UNI_CORR_500 | Unidirektionaler Verkehr im fünf Meter breiten Korridor        |
| BI_CORR_400  | Bidirektionaler Verkehr im vier Meter breiten Korridor         |
| CROSSING_90  | Multidirektionaler Verkehr in einer Kreuzung mit vier Zugängen |
| CROSSING_120 | Multidirektionaler Verkehr in einer Kreuzung mit drei Zugängen |

#### SOLO\_REF

Am ersten, zweiten und vierten Tag wurde wiederholt das Experiment SOLO\_REF durchgeführt. In diesem Experiment wurden die freien Gehgeschwindigkeiten der Probanden, ohne Beeinflussung

Tab. 3.3 – Übersicht der Laborexperimente in BaSiGo [38]

| Tag           | Datum                     | Experiment/<br>Variante                  | # Läufe | Fragestellung (Kurzfassung)  |
|---------------|---------------------------|--|---------|--|
| 1             | Mittwoch,<br>19.06.2013   | SOLO_REF_A                               | 1       | Bestimmung der freien Gehgeschwindigkeit   |
|               |                           | CROSSING_90_A                            | 11      | Kapazität einer Kreuzung mit vier rechtwinklig angeordneten, vier Meter breiten Zugängen. Die Probanden betreten den Kreuzungsbereich aus allen vier Richtungen.     |
|               |                           | CROSSING_90_B                            | 7       | wie CROSSING_90_A, jedoch mit Hinweis auf Kreisverkehr   |
|               |                           | CROSSING_90_C                            | 8       | wie CROSSING_90_B, jedoch mit Säule ( $\varnothing$ 0,60 m) im Zentrum der Kreuzung  |
|               |                           | UNI_CORNER_300                           | 6       | Kapazität einer 90°-Ecke in einem drei Meter breiten Korridor mit unidirektionalem Personenstrom   |
|               |                           | ENTRANCE<br>SOLO_REF_B                   | 3<br>1  | Optimierung der Eingangssituation bei Veranstaltungen<br>Bestimmung der freien Gehgeschwindigkeit  |
| 2             | Donnerstag,<br>20.06.2013 | SOLO_REF_C                               | 1       | Bestimmung der freien Gehgeschwindigkeit   |
|               |                           | BARRIER                                  | 12      | individuelle Bewegungsmöglichkeiten auf Flächen mit hoher Personendichte   |
|               |                           | CROSSING_90_D                            | 8       | wie CROSSING_90_A, jedoch betreten die Probanden den Kreuzungsbereich aus zwei orthogonalen Richtungen   |
|               |                           | CROSSING_90_E                            | 6       | wie CROSSING_90_D, jedoch mit Hinweis auf Kreisverkehr   |
|               |                           | CROSSING_90_F                            | 3       | wie CROSSING_90_E, jedoch im Zentrum mit Säule ( $\varnothing$ 0,60 m) und die Probanden betreten den Kreuzungsbereich über alle vier Zugänge                        |
| CROSSING_90_G | 3                         | wie CROSSING_90_F, jedoch ohne Säule     |         |  |
| 3             | Freitag,<br>21.06.2013    | SOZ_GRP_A-B                              | 10      | Zusammenhalt sozialer Gruppen  |
|               |                           | DOOR_SELECT_A-C                          | 21      | Routenwahl   |
|               |                           | INFLOW                                   | 12      | Positionierung beim Betreten eines Raumes  |
|               |                           | CROSSWALK                                | 12      | Kapazität von Fußgängerüberwegen   |
|               |                           | PED_ZONE                                 | 3       | Detektion zusammenhängender Gruppen in Fußgängerzonen  |
|               |                           | ID_PHAS_SEP<br>QUEUEING                  | 6<br>8  | Stauphänomene im eindimensionalen System<br>Reaktionszeiten  |
| 4             | Samstag,<br>22.06.2013    | SOLO_REF_G                               | 1       | Bestimmung der freien Gehgeschwindigkeit   |
|               |                           | CROSSING_120_A                           | 7       | Kapazität einer Kreuzung mit drei, im Winkel von 120° angeordneten, vier Meter breiten Zugängen. Die Probanden betreten den Kreuzungsbereich über alle drei Zugänge. |
|               |                           | CROSSING_120_B                           | 2       | wie CROSSING_120_A, jedoch mit Hinweis auf Kreisverkehr  |
|               |                           | CROSSING_120_C                           | 7       | wie CROSSING_120_B, jedoch mit Säule ( $\varnothing$ 0,60 m) im Zentrum der Kreuzung   |
|               |                           | BI_CORR_400_A                            | 5       | Kapazität eines vier Meter breiten Korridors mit bidirektionalem Personenstrom. Die Personenströme kreuzen sich nicht.   |
|               |                           | BI_CORR_400_B                            | 10      | wie BI_CORR_400_A, jedoch mit kreuzenden Personenströmen   |
|               |                           | UNI_CORR_500                             | 9       | Kapazität eines fünf Meter breiten Korridors bei einem unidirektionalen Personenstrom  |
|               |                           | CONE                                     | 3       | Verdichtung des Personenstroms an trichterförmigen Engstellen  |
| SOLO_REF_H    | 1                         | Bestimmung der freien Gehgeschwindigkeit |         |  |



durch andere, gemessen. Zu diesem Zweck sind die Probanden einzeln, mit einem Abstand von mehr als fünf Meter durch den Versuchsaufbau gegangen. Sie wurden angewiesen, sich normal, ohne besondere Eile zu bewegen. Ziel war es, Referenzwerte für die übrigen Experimente zu erhalten. Mit den Messungen sollte zudem überprüft werden, ob Gewöhnungs- oder Ermüdungseffekte eintreten, welche die Ergebnisse der Experimente signifikant beeinflussen. Als räumliche Struktur wurde jeweils der Aufbau des nachfolgenden bzw. vorherigen Experiments genutzt, so dass keine zusätzlichen Umbaumaßnahmen erforderlich wurden. Für die Auswertung stehen die Trajektoriensätze SOLO\_REF\_A, SOLO\_REF\_B und SOLO\_REF\_H zur Verfügung. Die Auswertung zu diesem Experiment findet sich in Abschnitt 5.3.

### UNI\_CORR\_500

Für das Experiment UNI\_CORR\_500 wurde aus Messebauwänden ein fünf Meter breiter und 18 Meter langer Korridor erstellt (vgl. Abbildung 3.3).

Das Experiment wurde in neun Durchläufen durchgeführt, in denen die Personendichte innerhalb des Korridors – durch Veränderung der Ein- und Ausgangsbreiten  $b_{in}$  und  $b_{out}$  – variiert wurde (vgl. Tabelle 3.4). Um die Vorbereitungszeiten zwischen den einzelnen Durchläufen zu verkürzen, wurden die Probanden wechselweise von beiden Seiten durch die symmetrisch aufgebaute Geometrie geschickt. Die Auswertung zu diesem Experiment findet sich in Abschnitt 5.4.1.

Tab. 3.4 – Konfiguration des Experiments UNI\_CORR\_500

|                  | Durchlauf |      |      |      |      |      |      |                   |                   |
|------------------|-----------|------|------|------|------|------|------|-------------------|-------------------|
|                  | 01        | 02   | 03   | 04   | 05   | 06   | 07   | 08                | 09                |
| $b_{in}$ (in m)  | 1,00      | 2,00 | 3,00 | 4,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00              | 5,00              |
| $b_{out}$ (in m) | 5,00      | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 4,00 | 3,00 | 2,00 <sup>1</sup> | 1,00 <sup>2</sup> |

<sup>1</sup> Der Ausgang wurde während des Durchlaufs auf 5,00 m vergrößert.

<sup>2</sup> Der Ausgang wurde während des Durchlaufs auf 0,60 m verkleinert.

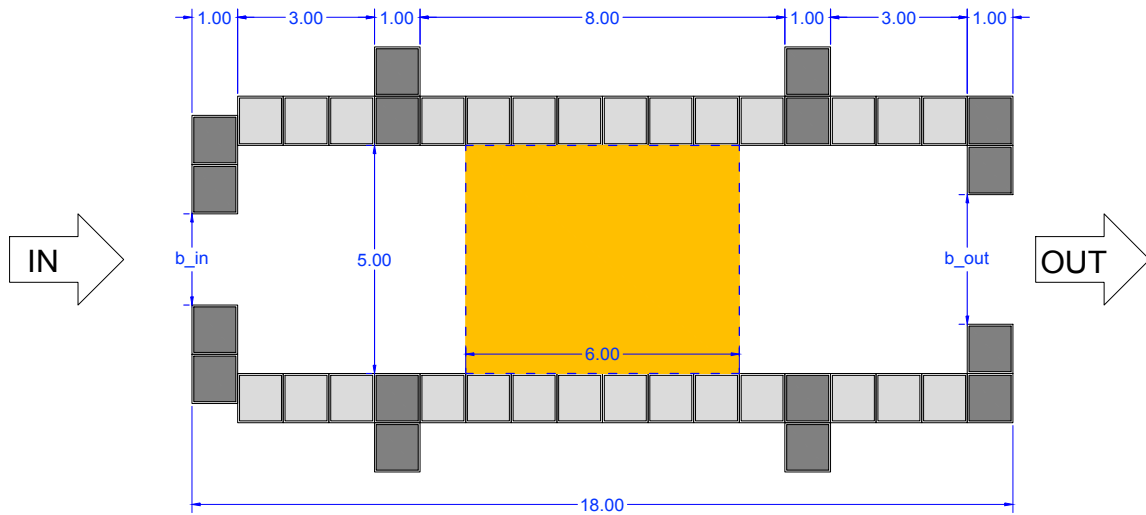
### BI\_CORR\_400

Für das Experiment BI\_CORR\_400 wurde ein Korridor mit einer lichten Breite von vier Metern aufgebaut (vgl. Abbildung 3.4). Die Länge des Kernbereichs betrug zehn Meter, die Gesamtlänge des Aufbaus 24 Meter.

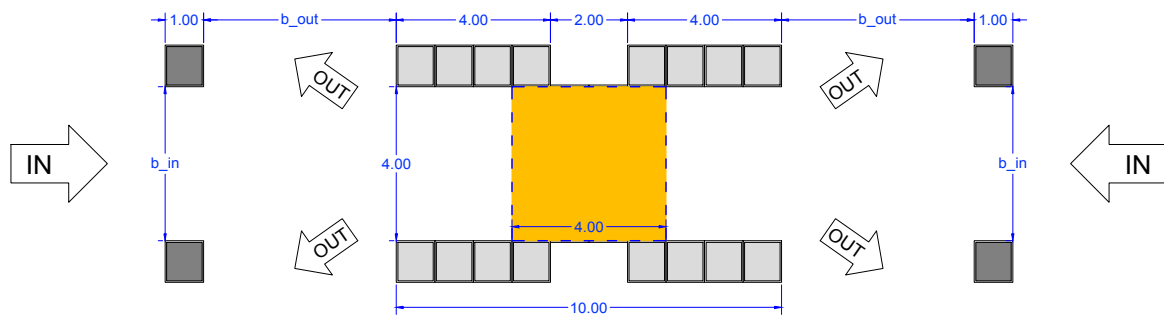
Um den bidirektionalen Verkehr zu ermöglichen, erhielten die Personen, die den Messbereich bereits passiert hatten, die Möglichkeit, den Korridor seitlich zu verlassen. Hierfür wurden am Anfang und Ende des Kernbereiches beidseitig fünf Meter breite Ausgänge (in Abbildung 3.4 mit „OUT“ gekennzeichnet) geschaffen. So konnte sichergestellt werden, dass diese Personen nicht die Wartebereiche, welche sich unmittelbar vor den Eingängen befanden, durchqueren und dort einen Rückstau verursachen.

Das Experiment wurde mit 926 Probanden in den Varianten A und B durchgeführt. In der Variante A erhielten die Probanden keine Anweisung, welchen der seitlichen Ausgänge sie nutzen sollen. In Variante B wurden die Probanden aufgefordert, den ihrem Merkmal (gerade/ungerade Kappenummer





**Abb. 3.3** – Aufbauskizze und Durchführung des Experiments UNI\_CORR\_500 (Foto: M. Strunz). Die für die Datenanalyse in Kapitel 5 definierte Messfläche ist gelb markiert.



**Abb. 3.4** – Aufbauskizze und Durchführung des Experiments BI\_CORR\_400 (Foto: M. Strunz). Die für die Datenanalyse in Kapitel 5 definierte Messfläche ist gelb markiert.

bzw. gelbes/rotes Armband) zugewiesenen Ausgang zu verwenden. Für die Variante A wurden fünf, für die Variante B zehn Durchläufe durchgeführt, in denen die Personendichte innerhalb des Korridors durch Veränderung der Ein- und Ausgangsbreiten  $b_{in}$  und  $b_{out}$  variiert wurde (vgl. Tabelle 3.5). Die Auswertung zu diesem Experiment findet sich in Abschnitt 5.4.2.

Tab. 3.5 – Konfiguration des Experiments BI\_CORR\_400

|                   | Durchlauf |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                   | 01        | 02   | 03   | 04   | 05   | 06   | 07   | 08   | 09   | 10   |
| <b>Variante A</b> |           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| $b_{in}$ (in m)   | 1,80      | 3,00 | 4,00 | 4,00 | 4,00 |      |      |      |      |      |
| $b_{out}$ (in m)  | 5,00      | 5,00 | 5,00 | 2,50 | 0,00 |      |      |      |      |      |
| <b>Variante B</b> |           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| $b_{in}$ (in m)   | 0,60      | 0,90 | 1,20 | 1,80 | 2,40 | 3,00 | 4,00 | 4,00 | 2,40 | 4,00 |
| $b_{out}$ (in m)  | 5,00      | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 0,00 | 5,00 | 5,00 |

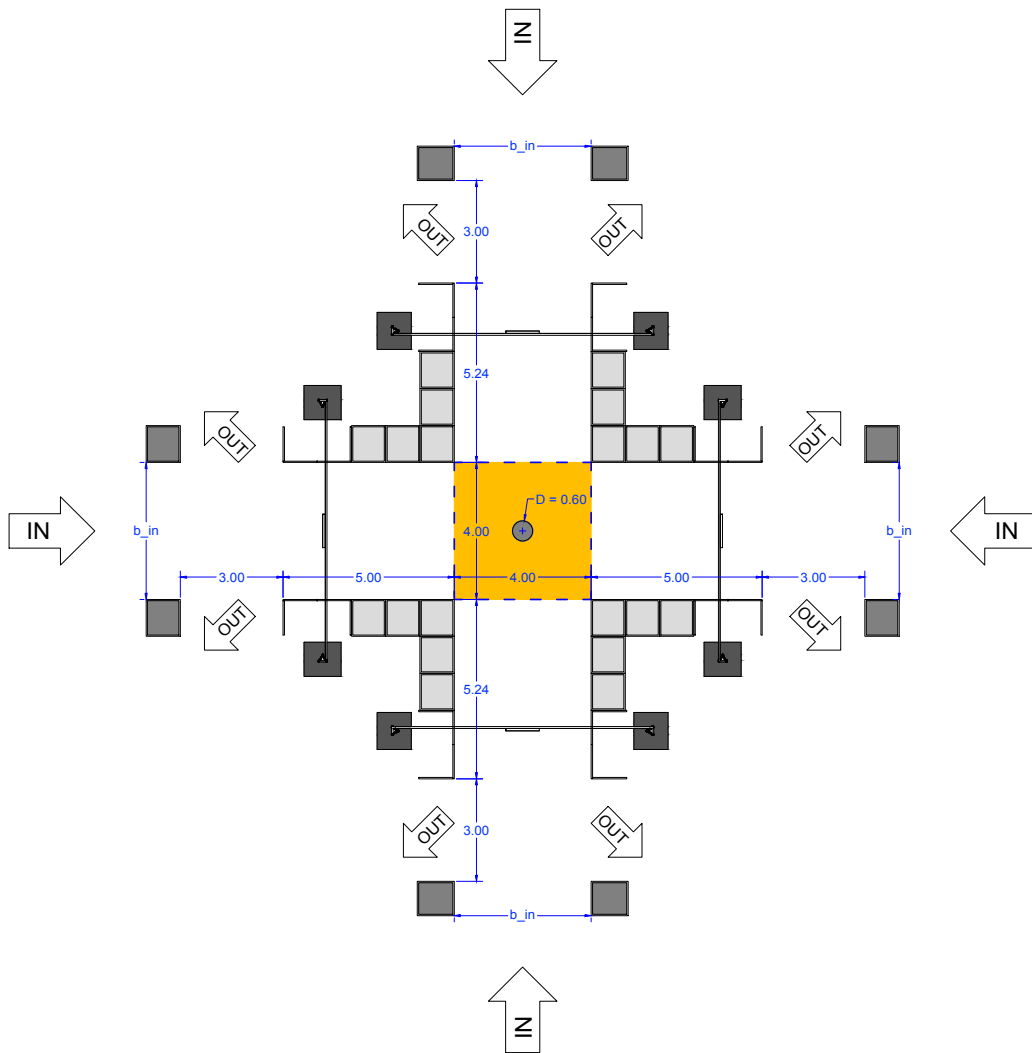
### CROSSING\_90

Für das Experiment CROSSING\_90 wurde eine Kreuzung mit vier, im Winkel von 90 Grad angeordneten Zugängen aufgebaut (vgl. Abbildung 3.5). Jeder Zugang hatte eine lichte Breite von vier Metern, so dass im Zentrum der Geometrie ein 16 m<sup>2</sup> großer Kernbereich entstand. Über jedem der Zugänge war ein Monitor montiert. Auf diesen konnte das aus dem Straßenverkehr bekannte Kreisverkehr-Zeichen (Zeichen 215 der Straßenverkehrsordnung) angezeigt werden. Die Länge der Zugänge betrug 5,00 m bzw. 5,24 m, davor schloss sich jeweils links und rechts ein drei Meter breiter Ausgang (in Abbildung 3.5 mit „OUT“ gekennzeichnet) an. Im Zentrum des Kernbereichs konnte eine Säule ( $\varnothing$  0,60 m) aufgebaut werden.

Das Experiment wurde an zwei Tagen in den Varianten A bis G durchgeführt (vgl. Tabelle 3.6). Am ersten Tag (Varianten A, B, C) nahmen 319 Probanden, am zweiten Tag (Varianten D, E, F, G) 603 Probanden an dem Experiment teil.

In den Varianten A, B und C wurden die Probanden gleichmäßig auf die vier Zugänge verteilt, so dass von jeder Seite etwa 80 Personen in die Kreuzung einströmten. Um die Zuströme nicht zu behindern, erhielten die Personen, die den Messbereich bereits passiert hatten, die Möglichkeit, den Korridor seitlich zu verlassen. Die Probanden wurden aufgefordert, den ihrem Merkmal (gerade/ungerade Kappennummer bzw. gelbes/rotes Armband) zugewiesenen Ausgang zu verwenden. In Variante A gab es keine Säule, die Monitore waren abgeschaltet. In Variante B gab es ebenfalls keine Säule, die Monitore zeigten jedoch das Kreisverkehr-Zeichen und die Probanden wurden ohne weitergehende Erklärung angewiesen, die Hinweise auf den Monitoren zu beachten. In Variante C wurde zusätzlich die Säule im Zentrum der Kreuzung aufgebaut, die Anzeige des Kreisverkehr-Zeichens sowie die Anweisung entsprachen Variante B.

In den Varianten D und E wurden die Probanden nur durch zwei, rechtwinkelig zueinander angeordnete Zugänge in die Kreuzung eingelassen, so dass über jeden dieser Zugänge etwa 300 Personen einströmten. In Variante D gab es keine Säule, die Monitore waren abgeschaltet. In Variante E gab es ebenfalls keine Säule, die Monitore zeigten jedoch das Kreisverkehr-Zeichen und die Probanden wurden wieder gebeten, den Hinweis auf den Monitoren zu beachten.



**Abb. 3.5** – Aufbauskizze und Durchführung des Experiments CROSSING\_90 (Foto: R. Eisenbach). Die für die Datenanalyse in Kapitel 5 definierte Messfläche ist gelb markiert.

In den Varianten F und G wurden die Probanden wieder gleichmäßig auf die vier Zugänge verteilt, so dass von jeder Seite etwa 150 Personen in die Kreuzung einströmten. Sie wurden aufgefordert, auf der ihrem Zugang gegenüber liegenden Seite den rechten Ausgang zu nutzen. In Variante F stand die Säule im Zentrum der Kreuzung, das Kreisverkehr-Zeichen wurde angezeigt und die Probanden wurden gebeten, den Hinweis auf den Monitoren zu beachten. Für die Variante G wurde die Säule wieder entfernt, das Kreisverkehr-Zeichen und der Hinweis entsprachen Variante F. Die Auswertung zu diesem Experiment findet sich in Abschnitt 5.4.4.

Tab. 3.6 – Konfiguration des Experiments CROSSING\_90

|                   | Durchlauf  |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------|--|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                   | 01   | 02    | 03   | 04   | 05   | 06   | 07   | 08   | 09   | 10   | 11   |
| <b>Variante A</b> | (vier Zugänge, ohne Säule, ohne Hinweisschilder) |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| $b_{in}$ (in m)   | 0,60   | 0,60  | 0,90 | 1,20 | 1,50 | 2,00 | 0,60 | 1,50 | 4,00 | 4,00 | 4,00 |
| <b>Variante B</b> | (vier Zugänge, ohne Säule, mit Hinweisschildern) |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| $b_{in}$ (in m)   | 0,60*  | 0,60* | 0,60 | 0,90 | 1,20 | 1,50 | 0,60 |      |      |      |      |
| <b>Variante C</b> | (vier Zugänge, mit Säule, mit Hinweisschildern)  |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| $b_{in}$ (in m)   | 0,60*  | 0,60  | 0,90 | 1,20 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,20 |      |      |      |
| <b>Variante D</b> | (zwei Zugänge, ohne Säule, ohne Hinweisschilder) |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| $b_{in}$ (in m)   | 0,60   | 0,90  | 1,20 | 1,80 | 1,80 | 2,40 | 3,00 | 4,00 |      |      |      |
| <b>Variante E</b> | (zwei Zugänge, ohne Säule, mit Hinweisschildern) |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| $b_{in}$ (in m)   | 0,60   | 0,90  | 1,20 | 1,80 | 2,40 | 4,00 |      |      |      |      |      |
| <b>Variante F</b> | (vier Zugänge, mit Säule, mit Hinweisschildern)  |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| $b_{in}$ (in m)   | 1,20   | 2,00  | 4,00 |      |      |      |      |      |      |      |      |
| <b>Variante G</b> | (vier Zugänge, ohne Säule, mit Hinweisschildern) |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| $b_{in}$ (in m)   | 4,00   | 2,00  | 1,20 |      |      |      |      |      |      |      |      |

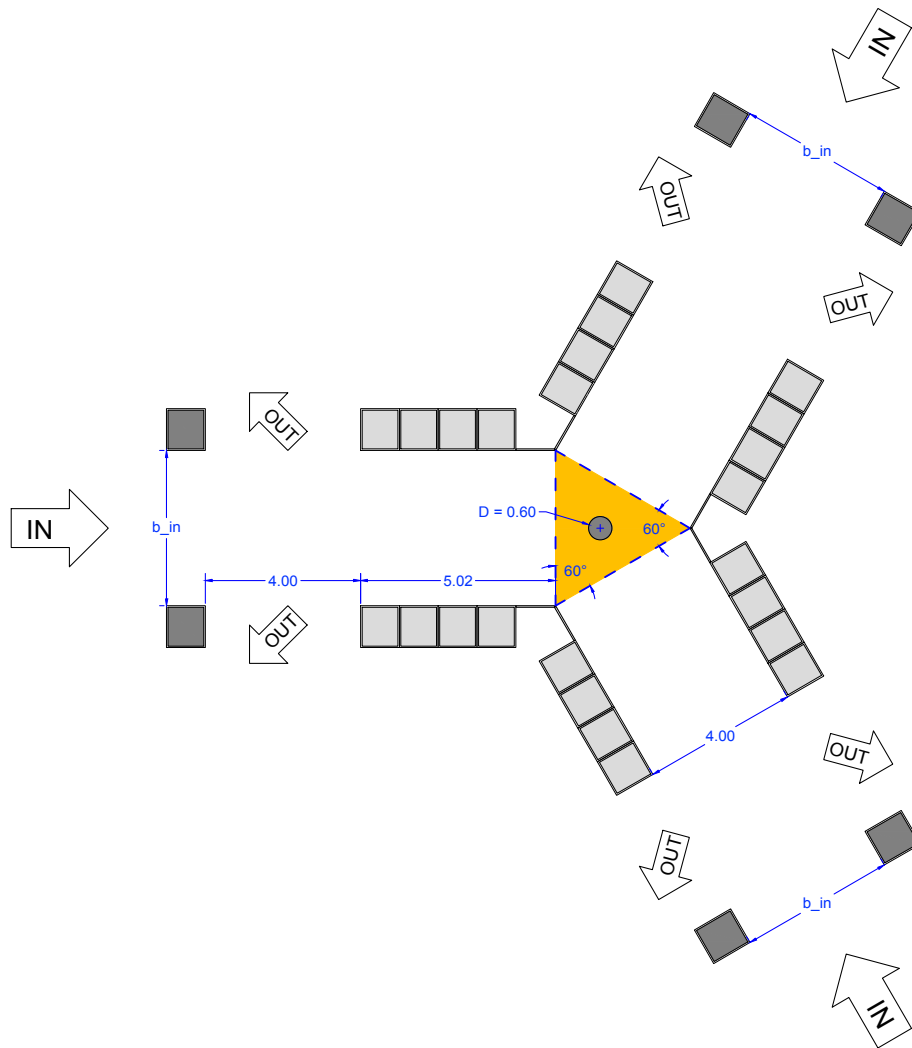
\* Der Einlass wurde durch Handzeichen auf etwa eine Person pro zwei Sekunden begrenzt.

### CROSSING\_120

Für das Experiment CROSSING\_120 wurde eine Kreuzung mit drei, im Winkel von 120 Grad angeordneten Zugängen aufgebaut (vgl. Abbildung 3.6). Jeder Zugang hatte eine lichte Breite von vier Metern, so dass im Zentrum der Geometrie ein gleichseitiges Dreieck mit vier Meter langen Seiten entstand. Die Fläche dieses Kernbereichs war  $6,93 \text{ m}^2$  groß. Über jedem der Zugänge war ein Monitor montiert, auf welchem das Kreisverkehr-Zeichen angezeigt werden konnte (vgl. Beschreibung zu CROSSING\_90). Die Länge der Zugänge betrug 5,02 m, davor schloss sich jeweils links und rechts ein vier Meter breiter Ausgang (in Abbildung 3.6 mit „OUT“ gekennzeichnet) an. Im Zentrum des dreieckigen Kernbereichs konnte eine Säule ( $\varnothing$  0,60 m) aufgebaut werden.

Das Experiment wurde mit 926 Probanden in den Varianten A, B und C durchgeführt (vgl. Tabelle





**Abb. 3.6** – Aufbauskizze und Durchführung des Experiments CROSSING\_120 (Foto: R. Eisenbach). Die für die Datenanalyse in Kapitel 5 definierte Messfläche ist gelb markiert.

3.7). In allen Varianten wurden die Probanden gleichmäßig auf die drei Zugänge verteilt, so dass von jeder Seite etwa 309 Personen in die Kreuzung einströmten. Die Probanden wurden aufgefordert, die ihrem Merkmal (gerade/ungerade Kappennummer bzw. gelbes/rotes Armband) zugewiesene Richtung zu wählen, so dass die Probanden, die über einen der Zugänge kamen, sich in der Mitte der Kreuzung etwa zur Hälfte nach links und zur Hälfte nach rechts orientiert haben. Eine Ausnahme von dieser Regel bildet der Durchlauf CROSSING\_120\_A\_01 (vgl. Abbildung 5.22). Um die Zuströme nicht zu behindern, wurden die Probanden angewiesen, nach dem Passieren der Kreuzung die seitlichen Ausgänge zu nutzen.

In Variante A gab es keine Säule, die Monitore waren abgeschaltet. In Variante B gab es ebenfalls keine Säule, die Monitore zeigten jedoch das Kreisverkehr-Zeichen und die Probanden wurde ohne weitergehende Erklärung angewiesen, die Hinweise auf den Monitoren zu beachten. In Variante C wurde zusätzlich die Säule im Zentrum der Kreuzung aufgebaut. Die Anzeige des Kreisverkehr-Zeichens sowie die Anweisung entsprachen Variante B. In Variante C, Durchlauf 07 wurden die Probanden angewiesen, schnell und sicher, aber ohne zu rennen, durch den Aufbau zu gehen. Die Auswertung zu diesem Experiment findet sich in Abschnitt 5.4.5.

Tab. 3.7 – Konfiguration des Experiments CROSSING\_120

|                   | Durchlauf  |      |      |      |      |      |      |
|-------------------|--|------|------|------|------|------|------|
|                   | 01   | 02   | 03   | 04   | 05   | 06   | 07   |
| <b>Variante A</b> | (drei Zugänge, ohne Säule, ohne Hinweisschilder) |      |      |      |      |      |      |
| $b_{in}$ (in m)   | 0,80   | 0,80 | 1,20 | 1,60 | 2,40 | 3,20 | 4,00 |
| <b>Variante B</b> | (drei Zugänge, ohne Säule, mit Hinweisschildern) |      |      |      |      |      |      |
| $b_{in}$ (in m)   | 4,00   | 2,40 |      |      |      |      |      |
| <b>Variante C</b> | (drei Zugänge, mit Säule, mit Hinweisschildern)  |      |      |      |      |      |      |
| $b_{in}$ (in m)   | 0,80   | 1,20 | 1,60 | 2,40 | 3,20 | 4,00 | 4,00 |

### 3.3 Experimente im Projekt Hermes

#### 3.3.1 Projektrahmen

Das Projekt „Hermes – Erforschung eines Evakuierungsassistenten für den Krisenfall bei Großveranstaltungen“ [37, 41] wurde ebenso wie das Projekt BaSiGo durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Programms „Forschung für die zivile Sicherheit“ gefördert (Förderkennzeichen: 13N9952 bis 13N9960). Das Projekt startete im November 2008 und endete im Dezember 2011.

Als Projektpartner waren beteiligt:

- Forschungszentrum Jülich GmbH (Koordinator)
- Bergische Universität Wuppertal

- Universität zu Köln
- Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
- ESPRIT arena Düsseldorf
- Imtech Deutschland GmbH & Co. KG
- PTV Planung Transport Verkehr AG
- TraffGo HT GmbH
- Vitracom AG

Ziel des Projektes war die Entwicklung eines Evakuierungsassistenten für Großveranstaltungen, der es den Einsatzleitern von Polizei, Feuerwehr, Betreiber und Sicherheitsdienst ermöglicht, die Lage frühzeitig einzuschätzen und ihre Ressourcen optimal einzusetzen. Das Forschungszentrum Jülich bearbeitete das Teilprojekt „Grundlegende Untersuchungen zur Modellierung der Fußgängerdynamik und Echtzeitsimulation“ (Förderkennzeichen: 13N9952) [38]. In Zusammenarbeit mit der Bergischen Universität Wuppertal und der Universität zu Köln konnten im April 2009 Laborexperimente mit bis zu 400 Teilnehmern durchgeführt werden.

### 3.3.2 Beschreibung und Auswahl der Experimente

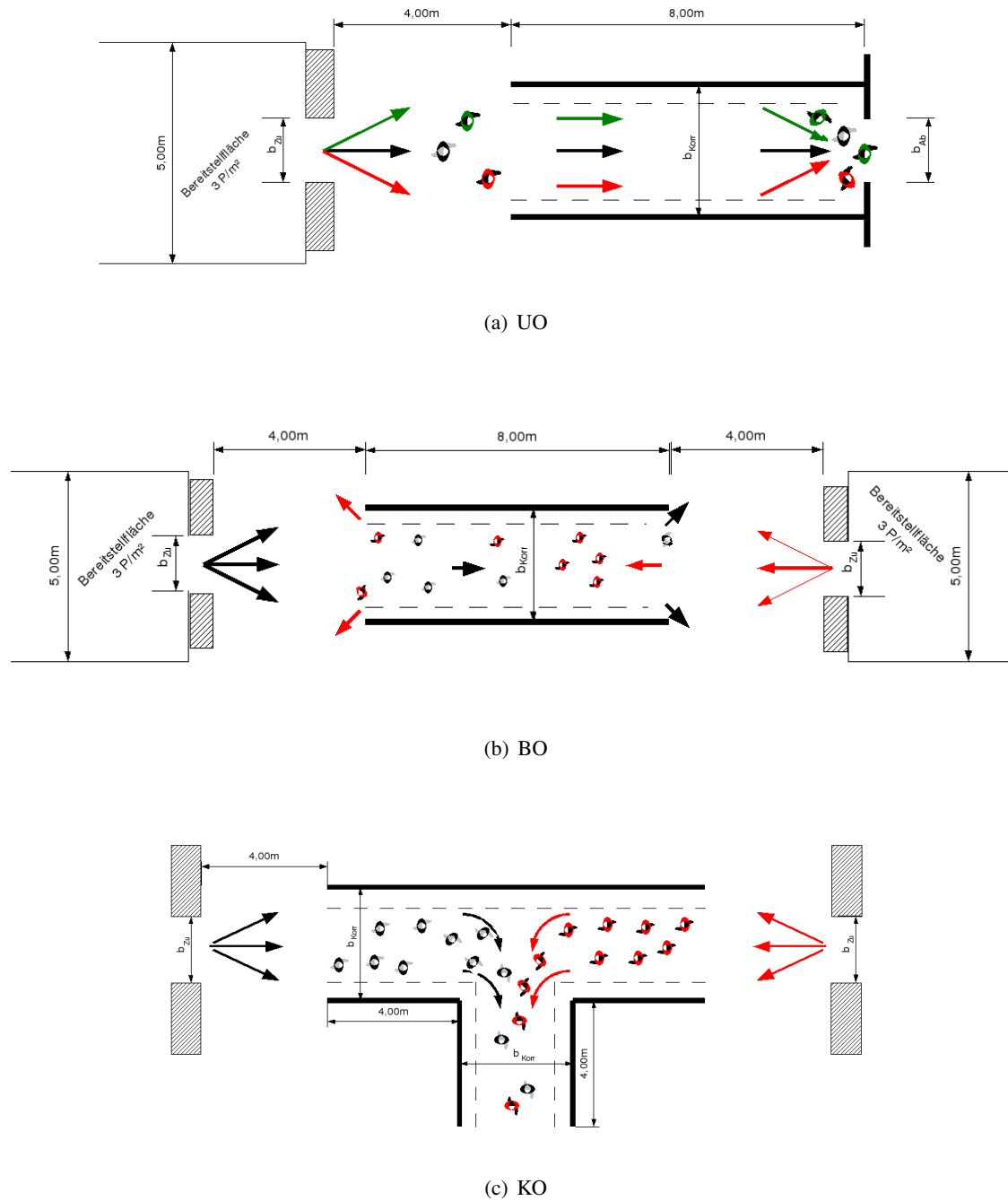
Die Laborexperimente im Projekt Hermes wurden an zwei Orten durchgeführt. Am 29. und 30.04.2009 fanden die Experimente in der „ESPRIT arena“ in Düsseldorf statt. Der Fokus richtete sich hier auf die Untersuchung der Bewegung an Treppen und Mundlöchern. Im Kontext der vorliegenden Arbeit wird jedoch ausschließlich auf die ebenerdigen Experimente eingegangen, die am 12. und 15.05.2009 in der Messe Düsseldorf durchgeführt wurden. In einer der Messehallen wurden aus denselben Messebauwänden, die vier Jahre später auch bei den BaSiGo-Experimenten zum Einsatz kamen (vgl. Abschnitt 3.2.2), die raumbildenden Geometrien aufgebaut. Die Laufwege der einzelnen Personen wurden durch überkopf montierte Videokameras erfasst. Die Trajektorien wurden anschließend mit der Software PeTrack, auf welche bereits in Abschnitt 2.3.1 eingegangen wird, extrahiert.

Die Teilnehmer der Experimente erhielten 50 Euro pro Tag. Der überwiegende Anteil der Probanden bestand aus Studenten. So waren die Rahmenbedingungen ähnlich denen, die vier Jahre später auch bei den BaSiGo-Experimenten galten. Für die ausführliche Beschreibung der Experimente wird auf die an der Bergischen Universität Wuppertal erstellte „Dokumentation von Versuchen zur Personenstromdynamik, Projekt 'HERMES'“ [55] verwiesen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Experimente zu den folgenden Verkehrsszenarien ausgewertet:

|    |   |
|----|---|
| UO | Unidirektionaler Verkehr im Korridor              |
| BO | Bidirektionaler Verkehr im Korridor               |
| KO | T-Kreuzung mit zusammenfließenden Personenströmen |





**Abb. 3.7** – Aufbau- und Verkehrsskizzen der Hermes-Experimente (Grafiken: Keip/Ries [55]). (a) unidirektionaler Verkehr im Korridor (UO), (b) bidirektionaler Verkehr im Korridor (BO), (c) Zusammenfluss zweier Personenströme in einer T-förmigen Kreuzung (KO)



## Kapitel 4

# Neue Konzepte der Datenanalyse

Aufbauend auf dem in Kapitel 2 dargestellten Stand der Wissenschaft und Technik werden an dieser Stelle neue Ansätze für die Datenanalyse vorgestellt, auf deren Grundlage die Leistungsfähigkeit multidirektionaler Verkehrsanlagen quantifiziert werden kann. In Kapitel 5 fließen diese neuen Ansätze dann in die Datenanalyse ein. Als empirische Eingangsgrößen dienen die Datensätze der in Kapitel 3 beschriebenen Laborexperimente.

Die neuen Konzepte der Datenanalyse gliedern sich in zwei einander ergänzende Ebenen:

- a) In Abschnitt 4.1 wird eine neue Messmethode beschrieben, mit der die Personendichte, der Personenfluss und die Geschwindigkeit des Personenstroms einer multidirektional genutzten Verkehrsanlage als Mittelwerte über denselben Ort *und* dieselbe Zeit ermittelt werden können. Die Messmethode wird ergänzt um einen Skalierungsansatz, der es erlaubt die Ergebnisse der Messungen auf ähnlich strukturierte und genutzte Verkehrsanlagen mit abweichender Größe zu übertragen.
- b) In Abschnitt 4.2 wird ein Ansatz vorgestellt, die Beeinträchtigungen innerhalb des Personenstroms anhand messbarer Indikatoren zu quantifizieren. Diese Indikatoren werden unter dem Begriff der „Konflikt-dichte“ zusammengefasst. Damit soll ein erster Schritt gegangen werden, die Unterschiede in der Leistungsfähigkeit *derselben* Verkehrsanlage bei unterschiedlichen Nutzungsbedingungen – bspw. unidirektionaler vs. bidirektionaler Verkehr im Korridor – zu quantifizieren. Zusätzlich soll überprüft werden, ob sich die Dichte, bei welcher eine Verkehrsanlage den maximalen Personenfluss aufweist (Kapazität der Anlage), durch einen Grenzwert oder aber eine signifikante Änderung der Konflikt-dichte quantifiziert werden kann.

### 4.1 Messung und Skalierung multidirektionaler Verkehre

#### 4.1.1 Einführung in die neue Messmethode

Nachfolgend wird eine Messmethode vorgestellt, mit der die Personendichte, der Personenfluss und die Geschwindigkeit des Personenstroms in einer uni-, bi- oder multidirektional genutzten Verkehrsanlage ermittelt werden können. Entscheidend ist, dass die Mittelwerte für Fluss, Dichte und Geschwindigkeit für denselben Ort und dieselbe Zeit berechnet werden. So können die Berechnungen genau für

den Ort und die Zeit durchgeführt werden, an denen der Personenstrom maßgeblich begrenzt wird. Hierfür wird die in Abschnitt 2.2.2 vorgestellte Messmethode 4 nach Edie [20], die für den spur- und richtungsgebundenen Fahrzeugverkehr entwickelt wurde, in eine generelle Form überführt, so dass sie für den multidirektionalen Fußverkehr auf beliebig geformten, ebenen Fußverkehrsflächen angewendet werden kann. Die Richtung, in der die Personen die Verkehrsanlage queren, soll dabei nicht an ein orthogonales Raster gebunden sein. Vielmehr soll es möglich sein, die tatsächlich gewählte Richtung jedes einzelnen Fußgängers zu berücksichtigen.

Ziel ist es, Fluss-Dichte-Diagramme zu erstellen und damit die Leistungsfähigkeit der untersuchten Verkehrsanlage als Ganzes beschreiben zu können. Diese Sichtweise entspricht der des Verkehrsplaners bzw. der genehmigenden Behörde. Entscheidend für die praktische Anwendung bei der Bemessung und Beurteilung von Fußverkehrsanlagen ist aber die Skalierbarkeit der Ergebnisse. Dabei kann der für einfache Geometrien, z. B. uni- oder bidirektional genutzte Korridore, geltende, proportionale Zusammenhang zwischen Durchlassfähigkeit und geometrischer Durchgangsbreite nicht ohne weiteres auf komplexe Verkehrsanlagen, z. B. Kreuzungen, übertragen werden, da der Personendurchsatz hier von mehreren Faktoren und nicht nur *einer* bestimmten, geometrischen Breite abhängt. So soll auch der Skalierungsfaktor – für einfache Geometrien die Durchgangsbreite  $b$  (vgl. Abschnitt 2.3.4) – in eine generelle Form überführt werden.

#### 4.1.2 Beschreibung und Notationen

Die Messmethode wird im Folgenden am Beispiel des im Projekt BaSiGo durchgeführten Experiments CROSSING\_120 erläutert. Abbildung 3.6 zeigt den Aufbau des Experiments, dessen Kernbereich aus einem gleichseitigen Dreieck besteht, die Länge der Seiten beträgt vier Meter. In Abbildung 4.1 werden am Beispiel dieses Kernbereichs die im Zusammenhang mit der Messmethode verwendeten Formelzeichen und Notationen bezeichnet. Diese sind:

- |            |   |
|------------|---|
| $A$        | Messfläche, auf der der mittlere Personenfluss $\bar{J}$ , die mittlere Personendichte $\bar{\rho}$ und die mittlere Geschwindigkeit $\bar{v}$ des Personenstroms berechnet werden. Bedingung für die generelle Gültigkeit der Messmethode ist die konvexe Form der Messfläche. Sie muss zumindest die konvexe Hülle der tatsächlichen Ein- und Ausgangspunkte umfassen. Unter Beachtung dieser Anforderung kann die Messfläche frei definiert werden. Sie kann unmittelbar aus der Geometrie der Verkehrsanlage oder alternativ aus der Hülle ausgewählter Trajektorienpunkte abgeleitet werden. Zu untersuchende Flächen, die die Bedingung der Konvexität nicht erfüllen, können in konvexe Teil-Messflächen separiert werden. |
| $t_0, t_1$ | Untere und obere Grenze des Zeitintervalls $[t_0, t_1]$ . Als Standardwert für die Länge des Zeitintervalls wird $\Delta t = t_1 - t_0 = 2\text{ s}$ eingesetzt. Der Wert kann jedoch variiert werden. Um den Einfluss der natürlichen Schwankbewegungen innerhalb der Trajektorie sowie von Messungenauigkeiten bei der Ermittlung der Trajektorie zu begrenzen, sollte das Zeitintervall nicht kleiner als die Periodendauer für zwei Schritte sein. Als erste Näherung kann die Periodendauer eines Schrittes mit einer Sekunde angenommen werden [52]. Die maximale Länge des Zeitintervalls ist so zu wählen, dass während des gesamten Intervalls die Stationarität (vgl. Abschnitt 5.2) des Personenflusses gegeben ist.   |

$t_{i,in}, t_{i,out}$  Zeitpunkte, zu denen die Person  $i$  erstmals die Messfläche  $A$  betritt und zuletzt wieder verlässt. Bei diskret vorliegenden Trajektorien – die Trajektorien aus den Experimenten in BaSiGo und Hermes liegen mit einer Bildwiederholrate von 16 fps bzw. 25 fps vor – wird für die Berechnung von  $t_{i,in}$  der erste Trajektorienpunkt innerhalb der Messfläche und für  $t_{i,out}$  der erste Trajektorienpunkt, der beim letzten Verlassen der Messfläche außerhalb der Messfläche liegt, herangezogen.

$\vec{x}_i(t)$  Trajektorie der Person  $i$  auf der Ebene:  $\vec{x}_i(t) = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} (t)$

$\vec{x}_i(t_0), \vec{x}_i(t_1)$  Punkte, an denen sich die Person  $i$  bei Beginn und Ende des Zeitintervalls  $[t_0, t_1]$  aufhält

$\vec{x}_i(t_{i,in}), \vec{x}_i(t_{i,out})$  Punkte, an denen die Person  $i$  erstmals die Messfläche  $A$  betritt und zuletzt wieder verlässt. Bei diskret vorliegenden Trajektorien gelten Hinweise zu  $t_{i,in}$  und  $t_{i,out}$  entsprechend.

$\vec{a}_i, a_i$  Die Richtung des Vektors  $\vec{a}_i$  beschreibt die Hauptrichtung der Person  $i$  beim Passieren der Messfläche  $A$ , sein Betrag  $|\vec{a}_i| = a_i$  die Distanz, die beim Überqueren der Messfläche zurückgelegt werden muss. Als Standard wird  $\vec{a}_i$  als Verbindungsvektor zwischen den beiden Punkten  $P_{i,in}$  und  $P_{i,out}$  angenommen. Es kann jedoch auch jede andere Wunsch- oder Soll-Richtung eingesetzt werden. Bei orthogonal strukturierten Verkehrsanlagen kann es sinnvoll sein, die Richtung der Hauptachsen zu übernehmen.

$b_i$  Länge der in Luftlinie gemessenen Strecke, die von Person  $i$  innerhalb des Zeitintervalls  $[t_0, t_1]$  und innerhalb der Messfläche  $A$  zurückgelegt wurde. Für die Berechnungen sind fünf Fälle relevant (vgl. Abbildung 4.2):

$$b_i = \begin{cases} |\vec{x}_i(t_{i,in}) - \vec{x}_i(t_1)| & \text{Fall 1: } t_0 \leq t_{i,in} \wedge t_1 > t_{i,in} \wedge t_1 < t_{i,out} \\ |\vec{x}_i(t_0) - \vec{x}_i(t_1)| & \text{Fall 2: } t_0 > t_{i,in} \wedge t_1 < t_{i,out} \\ |\vec{x}_i(t_0) - \vec{x}_i(t_{i,out})| & \text{Fall 3: } t_0 > t_{i,in} \wedge t_0 < t_{i,out} \wedge t_1 \geq t_{i,out} \\ |\vec{x}_i(t_{i,in}) - \vec{x}_i(t_{i,out})| & \text{Fall 4: } t_0 \leq t_{i,in} \wedge t_1 \geq t_{i,out} \\ 0 & \text{Fall 5: } t_1 \leq t_{i,in} \vee t_0 \geq t_{i,out} \end{cases} \quad (4.1)$$

$c_i$  Länge der in Luftlinie gemessenen Strecke, die von Person  $i$  innerhalb der Messfläche  $A$  zum Zeitpunkt  $t_0$  bereits zurückgelegt und/oder zum Zeitpunkt  $t_1$  noch nicht zurückgelegt wurde. Für die fünf in Gleichung 4.1 genannten Fälle gilt:

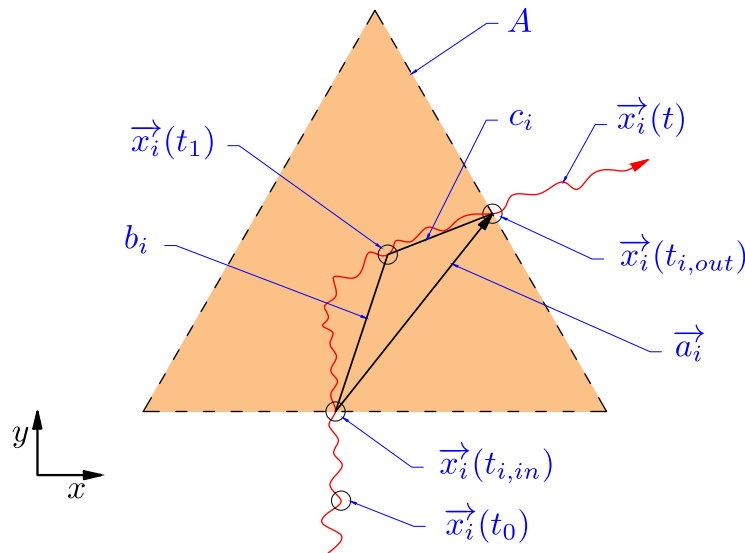
$$c_i = \begin{cases} |\vec{x}_i(t_1) - \vec{x}_i(t_{i,out})| & \text{Fall 1} \\ |\vec{x}_i(t_{i,in}) - \vec{x}_i(t_0)| + |\vec{x}_i(t_1) - \vec{x}_i(t_{i,out})| & \text{Fall 2} \\ |\vec{x}_i(t_{i,in}) - \vec{x}_i(t_0)| & \text{Fall 3} \\ 0 & \text{Fall 4} \\ |\vec{x}_i(t_{i,in}) - \vec{x}_i(t_{i,out})| & \text{Fall 5} \end{cases} \quad (4.2)$$

$d_i$  Dimensionsloses Verhältnis zwischen der bereits zurückgelegten Strecke  $b_i$  und der Summe aus  $b_i$  und  $c_i$ . In Folge der Abweichungen der Trajektorie von der durch den Vektor  $\vec{a}_i$  repräsentierten, kürzesten Verbindung zwischen  $P_{i,in}$  und  $P_{i,out}$  ist die Summe  $b_i + c_i$  im Allgemeinen größer als  $a_i$ :

$$d_i = \frac{b_i}{b_i + c_i} \in [0, 1] \quad (4.3)$$

$e_i$  Länge der tatsächlich innerhalb des Zeitintervalls  $[t_0, t_1]$  und innerhalb der Messfläche  $A$  in Richtung des Vektors  $\vec{a}_i$  zurückgelegten Strecke:

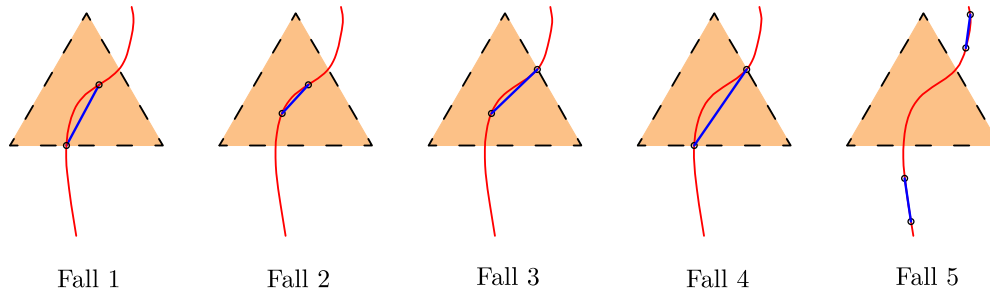
$$e_i = d_i \cdot a_i \quad (4.4)$$



**Abb. 4.1** – Notation für die Berechnungen bei multidirektionalen Verkehrsanlagen. Die beispielhaft dargestellte Trajektorie ist die einer Person  $i$ , die die Messfläche erst während Zeitintervalls  $[t_0, t_1]$  betreten und innerhalb des Zeitintervalls nicht vollständig durchquert hat. In den Gleichungen 4.1 und 4.2 wird dies als „Fall 1“ klassifiziert (vgl. auch Abbildung 4.2). Eine ausführliche Beschreibung der bezeichneten Elemente findet sich auch Seite 62 f.

### 4.1.3 Berechnung von Fluss, Dichte und Geschwindigkeit

Die Bestimmung des mittleren Personenflusses  $\bar{J}(\Delta x, \Delta t)$  kann für den gerichteten Verkehr nach Gleichung 2.28 berechnet werden. Dieser von Edie [20] gewählte Ansatz des Ort-Zeit-Mittelwertes wird nachfolgend auf den zweidimensionalen Verkehr mit beliebiger Messfläche  $A$  übertragen. Der individuelle Anteil einer Person  $i$  am Personenfluss der Anlage wird über das Verhältnis zwischen ihrer tatsächlich innerhalb des Zeitintervalls  $[t_0, t_1]$  auf der Messfläche  $A$  zurückgelegten Strecke  $e_i$  und  $a_i$  als Länge des Vektors  $\vec{a}_i$  berechnet. Als Standard wird hierbei der Vektor  $\vec{a}_i$  über die kürzeste Distanz zwischen den Punkten, an denen die Person  $i$  die Messfläche zuerst betreten und zuletzt verlassen



**Abb. 4.2** – Skizzen zur Fallunterscheidung in den Gleichungen 4.1 und 4.2. Die rote Linie zeigt die Trajektorie der (in der Darstellung von unten nach oben gehenden) Person  $i$ , die blaue Linie den innerhalb der Zeitintervalls  $[t_0, t_1]$  zurückgelegten Weg mit der in Luftlinie gemessenen Länge  $b_i$ . Fall 1: Die Person betritt während des Zeitintervalls die Messfläche, kann sie aber bis zum Ende des Zeitintervalls nicht vollständig überqueren. Fall 2: Die Person befindet sich bei Beginn des Zeitintervalls bereits auf der Messfläche und hat diese am Ende des Zeitintervalls noch nicht verlassen. Fall 3: Die Person befindet sich bei Beginn des Zeitintervalls bereits auf der Messfläche und kann sie bis zum Ende des Zeitintervalls wieder verlassen. Fall 4: Die Person überquert die gesamte Messfläche während des Zeitintervalls. Fall 5: Die Person ist während des Zeitintervalls nicht auf der Messfläche, sie befindet sich noch davor oder schon dahinter.

hat, definiert. Für die Berechnung des gesamten Personenflusses werden diese individuellen Anteile summiert. Die neue Gleichung für die Berechnung des mittleren Personenflusses  $\bar{J}(A, \Delta t)$  lautet:

$$\bar{J}(A, \Delta t) = \sum_{i=1}^n \frac{e_i(\Delta t)}{a_i(A)} \cdot \frac{1}{\Delta t} \quad (4.5)$$

Ebenso kann die für den gerichteten Verkehr geltende Gleichung 2.29, nach der die mittlere Personendichte  $\bar{\rho}(\Delta x, \Delta t)$  berechnet wird, auf das zweidimensionale System übertragen werden. Dabei wird der individuelle Anteil der Person  $i$  an der Personendichte über das Verhältnis zwischen ihrer tatsächlich innerhalb des Zeitintervalls  $[t_0, t_1]$  auf der Messfläche  $A$  verbrachten Zeit  $\Delta t_i(A)$  und der Dauer des Zeitintervalls berechnet. Für die Berechnung der Personendichte auf der Messfläche  $A$  werden auch hier wieder die individuellen Anteile summiert. Die neue Gleichung für die Berechnung der mittleren Personendichte  $\bar{\rho}(A, \Delta t)$  lautet:

$$\bar{\rho}(A, \Delta t) = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta t_i(A)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{A} \quad (4.6)$$

Nach Edie (vgl. Gleichung 2.30) wird die mittlere Geschwindigkeit für den gerichteten Verkehr über das Verhältnis der Summe aller innerhalb des Zeitintervalls  $[t_0, t_1]$  auf der Messstrecke  $\Delta x$  zurückgelegten Strecken  $\Delta x_i(\Delta t)$  zur Summe der innerhalb des Zeitintervalls auf der Messstrecke  $\Delta x$  verbrachten Zeiten  $\Delta t_i(\Delta x)$  berechnet. Für das zweidimensionale System erfolgt die Berechnung analog: an Stelle von  $\Delta x_i(\Delta t)$  wird  $e_i(\Delta t)$ , an Stelle von  $\Delta t_i(\Delta x)$  wird  $\Delta t_i(A)$  eingesetzt. So lautet die neue Gleichung für die Berechnung der mittleren Geschwindigkeit  $\bar{v}$  der Einzelgeschwindigkeiten:

Tab. 4.1 – Generalisierung der Messmethode nach Edie

| Größe           | Gerichteter Verkehr<br>(Messmethode nach Edie)   | Beliebige Richtungen<br>(neue, generalisierte Form)  |
|-----------------|--|--|
| Fluss           | $\bar{J}(\Delta x, \Delta t) = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta x_i(\Delta t)}{\Delta x} \cdot \frac{1}{\Delta t}$<br>(Gleichung 2.28)    | $\bar{J}(A, \Delta t) = \sum_{i=1}^n \frac{e_i(\Delta t)}{a_i(A)} \cdot \frac{1}{\Delta t}$<br>(Gleichung 4.5) |
| Dichte          | $\bar{\rho}(\Delta x, \Delta t) = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta t_i(\Delta x)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{\Delta x}$<br>(Gleichung 2.29) | $\bar{\rho}(A, \Delta t) = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta t_i(A)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{A}$<br>(Gleichung 4.6)   |
| Geschwindigkeit | $\bar{v}(\Delta x, \Delta t) = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i(\Delta t)}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i(\Delta x)}$<br>(Gleichung 2.30)    | $\bar{v}(A, \Delta t) = \frac{\sum_{i=1}^n e_i(\Delta t)}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i(A)}$<br>(Gleichung 4.7)      |

$$\bar{v}(A, \Delta t) = \frac{\sum_{i=1}^n e_i(\Delta t)}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i(A)} \quad (4.7)$$

Die neuen Gleichungen 4.5, 4.6 und 4.7 beschreiben eine generalisierte Form der Berechnungsmethoden nach Edie (vgl. Tabelle 4.1). Sie erlauben es, die Mittelwerte für Personenfluss, Personendichte und Geschwindigkeit an zweidimensionalen Anlagen mit multidirektionalem Verkehr durchzuführen. Sie können jedoch ebenso für gerichtete und eindimensionale Verkehre angewendet werden.

Unter der Annahme, dass der spezifische Fluss  $J_s$  als Produkt aus Dichte  $\rho$  und Geschwindigkeit  $v$  berechnet werden kann, gilt:

$$\begin{aligned} \bar{J}_s(A, \Delta t) &= \bar{\rho}(A, \Delta t) \cdot \bar{v}(A, \Delta t) \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{\Delta t_i(A)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{A} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n e_i(\Delta t)}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i(A)} \\ &= \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{1}{A} \cdot \sum_{i=1}^n e_i(\Delta t) \end{aligned} \quad (4.8)$$

#### 4.1.4 Skalierung zwischen Fluss und spezifischem Fluss

Für uni- und bidirektionale Personenströme im Korridor und an Engstellen kann der Skalierungsfaktor  $F$  zwischen Fluss  $J$  und spezifischem Fluss  $J_s$  entsprechend dem in Abschnitt 2.3.4 beschriebenen



nen Konzept des spezifischen Flusses berechnet werden. Bei Anwendung auf die zuvor beschriebene Messmethode für multidirektionale Verkehrsanlagen ergibt sich:

$$F = \frac{\bar{J}(A, \Delta t)}{\bar{J}_s(A, \Delta t)} = \frac{\bar{J}(A, \Delta t)}{\bar{\rho}(A, \Delta t) \cdot \bar{v}(A, \Delta t)} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{e_i(\Delta t)}{a_i(A)} \cdot \frac{1}{\Delta t}}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta t_i(A)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{A} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n e_i(\Delta t)}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i(A)}} = A \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{e_i(\Delta t)}{a_i(A)}}{\sum_{i=1}^n e_i(\Delta t)} \quad (4.9)$$

Für sehr große Zeitintervalle mit  $\Delta t \rightarrow \infty$  haben alle Personen ausreichend Zeit, die Messfläche vollständig zu überqueren. Somit gilt:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{e_i(\Delta t)}{a_i(A)} = 1 \quad \text{und damit:} \quad \sum_{i=1}^n \frac{e_i(\Delta t)}{a_i(A)} \rightarrow \sum_{i=1}^n 1 = n \quad (4.10)$$

In diesem Fall kann Gleichung 4.9 wie folgt vereinfacht werden:

$$\tilde{F} = A \cdot \frac{n}{\sum_{i=1}^n a_i(A)} = \frac{A}{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n a_i(A)} = \frac{A}{\bar{a}_i(A)} \quad (4.11)$$

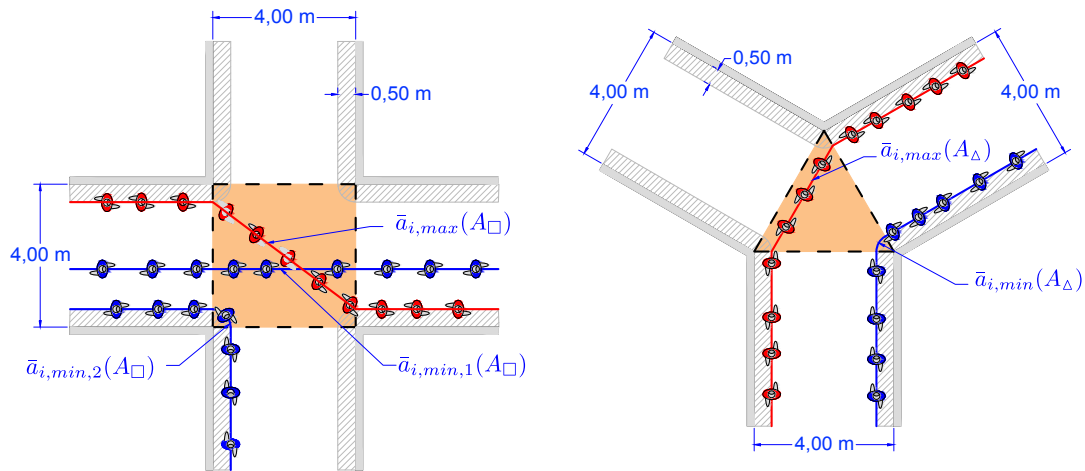
$\bar{a}_i(A)$  ist der Mittelwert der  $a_i$ -Werte aller Personen. Für rechteckige Messflächen  $A = a \cdot b$ , die von den Personen annähernd parallel zur Kante mit der Länge  $a$  überquert werden, gilt  $a_i(A) \rightarrow a$ . Dies gilt ebenso für den Idealfall der annähernd linienförmigen Messfläche mit  $a \rightarrow 0$  und  $a_i(A) \rightarrow 0$ . In beiden Fällen ergibt sich die aus dem Konzept des spezifischen Flusses bekannte Grundannahme, dass sich die Durchlassfähigkeit proportional zur Breite  $b$  verhält:

$$\tilde{F} = \frac{A}{\bar{a}_i(A)} = \frac{a \cdot b}{a} = b \quad (4.12)$$

#### 4.1.5 Grenzwertbetrachtung für den Skalierungsfaktor

Nach Gleichung 4.11 kann der Skalierungsfaktor  $\tilde{F}$  als das Verhältnis zwischen der Messfläche  $A$  und der mittleren, in Luftlinie gemessenen Länge der Wege über diese Fläche  $\bar{a}_i(A)$  berechnet werden. Die Messfläche  $A$  ist für eine Geometrie konstant. Für den Mittelwert  $\bar{a}_i(A)$  können jedoch Grenzwerte definiert werden, so dass auch der Skalierungsfaktor  $\tilde{F} = A/\bar{a}_i(A)$  Grenzwerten unterliegt. Im Folgenden werden die Grenzwerte des Skalierungsfaktors  $\tilde{F}$  exemplarisch für zwei Geometrien, die in den BaSiGo-Experimenten untersucht wurden, hergeleitet (vgl. Abbildung 4.3).

Der kürzeste Weg  $\bar{a}_{i,\min}(A)$  über eine quadratische Messfläche  $A$  im Korridor kann nicht kürzer als die Kantenlänge der Messfläche sein. Dasselbe gilt für Kreuzungen, die ohne Abbiegen durchquert werden. Für die Experimente CROSSING\_90 (vgl. Abbildung 3.5 und linke Darstellung in Abbildung 4.3) wurde eine  $16\text{ m}^2$  große, quadratische Messfläche im Kernbereich der Kreuzung definiert. Sofern es kein Abbiegen gibt, gilt für  $A_{\square} = 16\text{ m}^2$ :



**Abb. 4.3** – Grenzwerte für die in Luftlinie gemessenen Wege über die Messfläche. Die linke Abbildung zeigt den Aufbau für das BaSiGo-Experiment CROSSING\_90. Der schraffierte Bereich markiert den von den Personen eingehaltenen Abstand zu den Wänden. Er wird mit einer Breite von 0,50 m – gemessen von der Mitte des Kopfes bis zur Wand – angenommen. Die blauen Personen nehmen den kürzest möglichen Weg über die Messfläche. Entsprechend Gleichung 4.14 gilt  $\bar{a}_{i,min,2}(A_{\square})$  für den Fall, dass die Personen in der Kreuzung abbiegen. Die roten Personen nehmen den längsten, in Luftlinie gemessenen Weg über die Messfläche. Die rechte Abbildung zeigt die Wege für eine dreieckige Messfläche, wie sie für das BaSiGo-Experiment CROSSING\_120 definiert wurde.

$$\bar{a}_{i,min,1}(A_{\square}) \geq 4,00\text{m} \quad (4.13)$$

Für den Fall, dass auch Abbiegevorgänge berücksichtigt werden und unter der Annahme, dass die Personen einen Randabstand von 0,50 m einhalten – gemessen von der Mitte des Kopfes bis zur Wand (vgl. Abbildung 4.3) – beträgt der kürzeste, in Luftlinie gemessene Weg über die Messfläche  $A_{\square}$ :

$$\bar{a}_{i,min,2}(A_{\square}) \geq \sqrt{2} \cdot 0,50\text{m} \approx 0,71\text{m} \quad (4.14)$$

Der längste, in Luftlinie gemessene Weg über die Messfläche  $A_{\square}$  beträgt:

$$\bar{a}_{i,max}(A_{\square}) \leq \sqrt{(4,00\text{m})^2 + (4,00\text{m} - 2 \cdot 0,50\text{m})^2} = 5,00\text{m} \quad (4.15)$$

Damit können die Grenzwerte für den Skalierungsfaktor  $\tilde{F}$  berechnet werden als:

$$\begin{aligned}
\tilde{F}_{\max,1}(A_{\square}) &= \frac{A_{\square}}{\bar{a}_{i,\min,1}(A_{\square})} \\
&\leq \frac{16\text{m}^2}{4\text{m}} = 4,00\text{m} \\
\tilde{F}_{\max,2}(A_{\square}) &= \frac{A_{\square}}{\bar{a}_{i,\min,2}(A_{\square})} \\
&\leq \frac{16\text{m}^2}{0,71\text{m}} = 22,63\text{m} \\
\tilde{F}_{\min}(A_{\square}) &= \frac{A_{\square}}{\bar{a}_{i,\max}(A_{\square})} \\
&\geq \frac{16\text{m}^2}{5\text{m}} = 3,20\text{m}
\end{aligned} \tag{4.16}$$

Die Berechnung der Grenzwerte für den Skalierungsfaktor bei einer dreieckigen Messfläche, wie sie für die Experimente CROSSING\_120 (vgl. Abbildung 3.6) definiert wurde, erfolgt analog. Für das gleichseitige Dreieck mit vier Meter langen Seiten gilt  $A_{\Delta} = 6,93\text{m}^2$ . Bei einem Randabstand von 0,50 m ergibt sich für den kürzesten, in Luftlinie gemessenen Weg  $\bar{a}_{i,\min}(A_{\Delta})$ :

$$\bar{a}_{i,\min}(A_{\Delta}) \geq 0,50\text{m} \tag{4.17}$$

Der längste, in Luftlinie gemessene Weg über die Messfläche  $A_{\Delta}$  beträgt:

$$\bar{a}_{i,\max}(A_{\Delta}) \leq 3,50\text{m} \tag{4.18}$$

Damit können auch hier die Grenzwerte für den Skalierungsfaktor  $\tilde{F}$  berechnet werden als:

$$\begin{aligned}
\tilde{F}_{\max}(A_{\Delta}) &= \frac{A_{\Delta}}{\bar{a}_{i,\min}(A_{\Delta})} \\
&\leq \frac{6,93\text{m}^2}{0,50\text{m}} = 13,86\text{m} \\
\tilde{F}_{\min}(A_{\Delta}) &= \frac{A_{\Delta}}{\bar{a}_{i,\max}(A_{\Delta})} \\
&\geq \frac{6,93\text{m}^2}{3,50\text{m}} = 2,17\text{m}
\end{aligned} \tag{4.19}$$

Die in den Gleichungen 4.16 und 4.19 genannten, theoretischen Grenzwerte können in der Praxis nur bei sehr geringen Dichten erreicht werden. Mit zunehmender Dichte sind die Personen gezwungen, sich in der Breite des Weges zu verteilen, so dass der Mittelwert  $\bar{a}_i(A)$  und damit auch der Skalierungsfaktor  $\tilde{F}$  die theoretischen Grenzwerte nicht mehr erreichen kann. Die Betrachtung der empirisch ermittelten Skalierungsfaktoren erfolgt in Kapitel 5.

## 4.2 Indikatoren der Konfliktdichte

In Abschnitt 4.1 wurde eine neue Messmethode vorgestellt, die es erlaubt, die Personendichte, den Personenfluss und die Geschwindigkeit des Personenstroms in einer uni-, bi- oder multidirektional genutzten Verkehrsanlage als Mittelwerte für denselben Ort und dieselbe Zeit zu berechnen. Der ebenfalls in Abschnitt 4.1 vorgestellte Skalierungsansatz erlaubt es, das für Korridore und Engstellen bewährte Konzept des spezifischen Flusses auch auf andere Verkehrsanlagen mit abweichender Größe, jedoch identischer multidirektionaler Nutzung zu übertragen.

Bislang fehlt jedoch eine Methode, die Unterschiede in der Leistungsfähigkeit *derselben* Verkehrsanlage bei unterschiedlichen Nutzungsbedingungen – bspw. unidirektionaler vs. bidirektionaler Verkehr im selben Korridor – zu quantifizieren. Auch gibt es bislang keinen generellen Ansatz, der es erlaubt, die Dichte, bei der die gegenseitigen Behinderungen innerhalb des Personenstromes so groß werden, dass ein Stau entsteht, anhand des Umfangs ebendieser Behinderungen zu definieren.

Im Folgenden wird ein Modell der „Konfliktdichte“ eingeführt. Mit dieser sollen die gegenseitigen Behinderungen und damit die Einschränkung der freien Bewegungsmöglichkeiten innerhalb eines Personenstromes beschrieben werden.

Es werden als Indikatoren betrachtet:

- a) Streuung der Geschwindigkeiten
- b) Beständigkeit der Nachbarschaften
- c) Zeiten bis zur Kollision

Die drei Ansätze werden nachfolgend beschrieben. In Kapitel 5.5 werden sie dann für die Analyse der empirischen Daten herangezogen und hinsichtlich ihrer Aussagekraft überprüft.

### 4.2.1 Streuung der Geschwindigkeiten

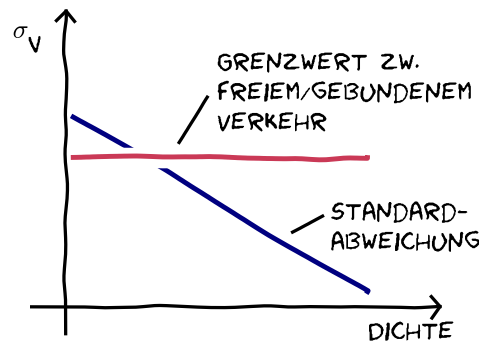
Alrutz et al. [4] (vgl. Beschreibung in Kapitel 2.1, S. 20 ff.) leiten aus ihren Untersuchungen ab, dass die Standardabweichung der Geschwindigkeit ein geeignetes Maß liefert, den Übergang von der freien Geschwindigkeitswahl zum gebundenen Verkehr zu beschreiben. Für den gebundenen Verkehr geben sie die Obergrenze der Standardabweichung mit  $\sigma_v = 0,40$  m/s an. Größere Werte „für die Standardabweichung könnten angeben, dass Fußgänger (recht) frei in ihrer Geschwindigkeitswahl sind“ [4, S. 30]. Falls dies zutrifft, kann die Konfliktdichte als Maß der gegenseitigen Behinderungen unmittelbar aus der Standardabweichung abgeleitet werden.

Die These wird in Abbildung 4.4 schematisch dargestellt. In Abschnitt 5.5.1 wird diese anhand der in den Laborexperimenten gewonnenen Daten überprüft.

Die Standardabweichung  $\sigma$  von  $n$  Messgrößen wird dabei definiert als

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (4.20)$$

Darin steht  $x_i$  für den  $i$ -ten Messwert und  $\mu$  für den Erwartungswert. Die Berechnung des Erwartungswertes und der Standardabweichung erfolgt für Dichteintervalle der Länge  $\Delta\rho = 0,1 \text{ m}^{-2}$ .



**Abb. 4.4** – Schematische Darstellung der These zum Grenzwert der Standardabweichung  $\sigma_v$ . Der von Alrutz et al. [4] genannte Grenzwert von  $\sigma_v = 0,40\text{m/s}$  ist als rote Linie eingetragen. Der Verlauf der Standardabweichung selbst ist vereinfachend als Gerade dargestellt.

#### 4.2.2 Beständigkeit der Nachbarschaften

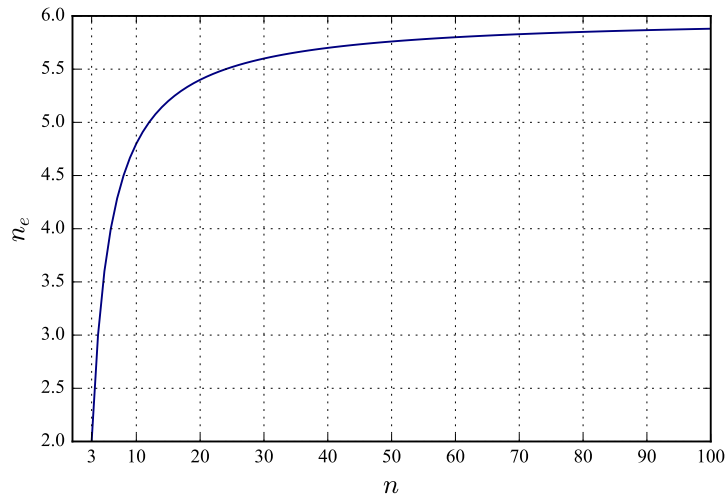
Bei der Modellbildung im Bereich der Verkehrssimulation, und hier insbesondere bei der Entwicklung effizienter Algorithmen, spielt die Bestimmung der (nächsten) Nachbarn eine wesentliche Rolle [1, 111, 118, 125]. Für die Analyse empirischer Daten wurden die Nachbarschaftsbeziehungen bislang kaum herangezogen. Mit der Verfügbarkeit fein aufgelöster, individueller Trajektoriensätze ergeben sich jedoch neue Möglichkeiten, welche sowohl bei der Beschreibung von Tierschwärmen [5, 35], aber zunehmend auch bei der Analyse von Personenströmen angewendet werden [19, 85, 92].

Basis der nachfolgend vorgestellten Messmethoden ist die bereits in Abschnitt 2.3.2 eingeführte Delaunay-Triangulation. Es werden die Beziehungen der Personen zu ihren Delaunay-Nachbarn analysiert. Um auch Randeffekte, d. h. Wechselwirkungen mit den umgebenden Bauteilen berücksichtigen zu können, werden zusätzlich virtuelle Wandpunkte definiert, welche ebenfalls als „Nachbarn“ betrachtet werden. Diese Wandpunkte werden auf den Wänden im Abstand von einem Meter festgelegt. Der gewählte Abstand soll gewährleisten, dass die Randeffekte zwar berücksichtigt, jedoch im Vergleich zu den Wechselwirkungen mit realen Nachbarn nicht überbewertet werden: in dem für die Bemessung relevanten Bereich von etwa einer bis zwei Personen pro Quadratmeter beträgt der mittlere Anstand der Personen etwa 0,7 m bis 1,0 m. Als maximale Reichweite der Beziehung zwischen zwei Nachbarn, abgebildet durch eine Verbindungslinie der Delaunay-Triangulation, wird eine Distanz von zwei Metern angesetzt. Abbildung 4.6 zeigt die Nachbarschaftsbeziehungen für das BaSiGo-Experiment CROSSING\_90\_D\_07.

Die durchschnittliche Anzahl der Nachbarn wird dabei bereits durch das Verfahren der Delaunay-Triangulation limitiert. Mit  $n$  als die Anzahl der Flächenpunkte (*generators*) und  $n_e$  als die durchschnittliche Anzahl der Verbindungslinien der Delaunay-Triangulation (*voronoi edges*) gilt nach Okabe et al. [79, S. 84 f.] für  $3 \leq n < \infty$ :

$$n_e \leq 2(3n - 6)/n \leq 6 \quad (4.21)$$

In Abbildung 4.5 ist der gegen  $n_e = 6$  konvergierende Verlauf der Anzahl an Nachbarschaften als Funktion der  $n$  beteiligten Einzelpunkte (Personen und Wände) dargestellt. Für die in den Laborex-



**Abb. 4.5** – Mittlere Anzahl an Delaunay-Nachbarschaften als Funktion der  $n$  beteiligten Personen bzw. Wandpunkte (vgl. Gleichung 4.21). Die mittlere Anzahl der Nachbarschaften beträgt stets weniger als sechs. Ab 12 Einzelpunkten (Personen und Wände) ist mit fünf bis sechs Nachbarschaften zu rechnen.

perimenten untersuchten Szenarien beträgt die Anzahl der Personen auf der Messfläche in der Regel mehr als 12, sodass mit fünf bis sechs Nachbarschaften zu rechnen ist.

Abbildung 4.7 zeigt die mittlere Anzahl der Nachbarn  $\bar{K}$  am Beispiel des Experiments CROSSING\_90. In der oberen Darstellung ist die Anzahl aller Nachbarn (Personen und Wandpunkte) als Summe aufgetragen. Für alle Durchläufe des Experiments zeigt sich – trotz abweichender Dichten – eine annähernd identische Anzahl an Nachbarn, welche sich über den gesamten Zeitraum des stationären Zustandes (vgl. Abschnitt 5.2) kaum verändert. In der unteren Darstellung werden die Nachbarschaften zu Personen und Wänden differenziert. Für Durchläufe mit hohen Personendichten ist der Anteil der Wandpunkte an den Nachbarschaften gering, bei geringen Personendichten höher. Im Mittel ist festzustellen, dass der Anteil der Wandpunkte etwa 20 % der Nachbarschaften ausmacht.

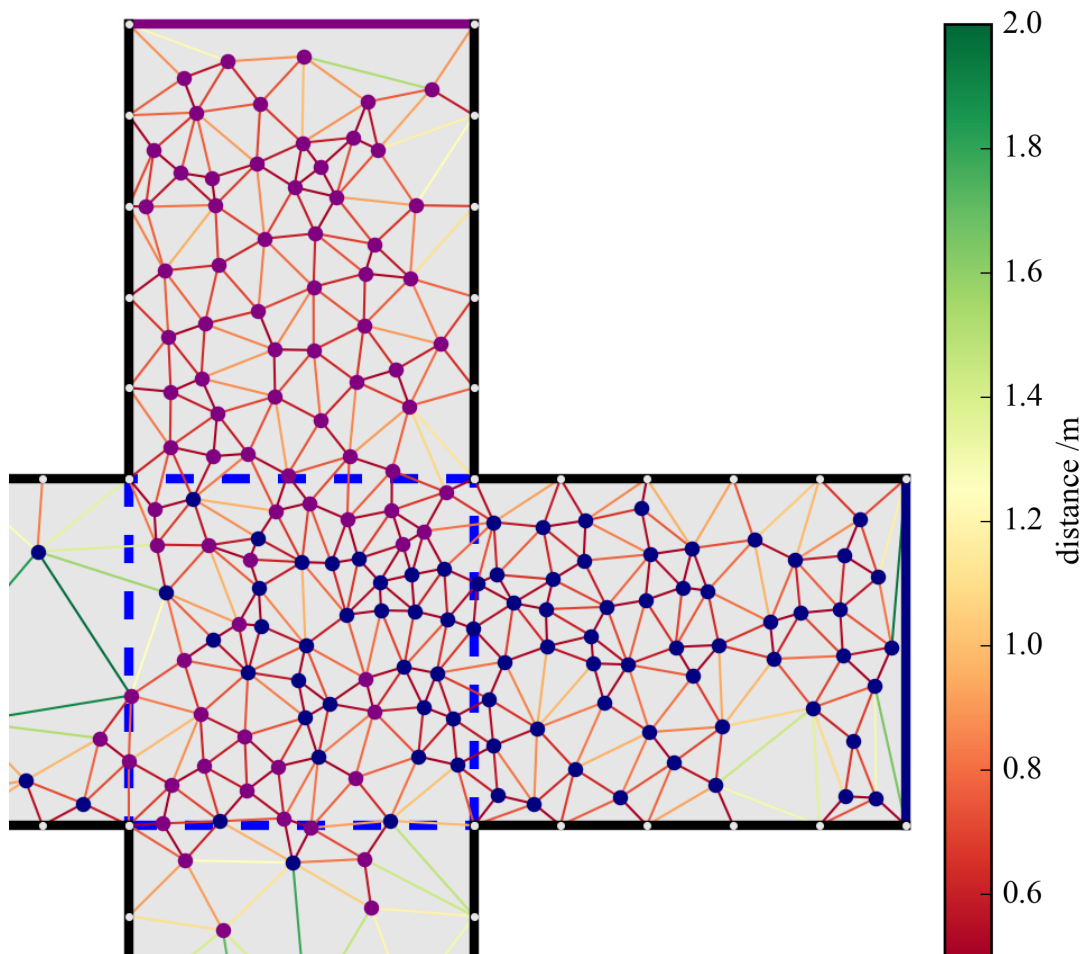
Für  $K_{i,t_0}$  als die Menge der Nachbarn der Person  $i$  zum Zeitpunkt  $t_0$  und  $K_{i,t_1}$  als Menge ihrer Nachbarn zum Zeitpunkt  $t_1$  berechnet sich die Summe der Änderungen der Nachbarschaftsverhältnisse  $\Delta K_i$  als symmetrische Differenz beider Mengen:

$$\Delta K_i(t_0, t_1) = \{x \mid (x \in K_{i,t_0} \wedge x \notin K_{i,t_1}) \vee (x \in K_{i,t_1} \wedge x \notin K_{i,t_0})\} \quad (4.22)$$

Als Maß für die Beständigkeit der Nachbarschaften wird das arithmetische Mittel  $\overline{\Delta K}$  der Nachbarschaftsänderungen  $\Delta K_i$  pro Meter Wegstrecke definiert. Entsprechend Gleichung 4.22 wird die Summe der neu hinzukommenden plus der beendeten Nachbarschaften als Änderung der Nachbarschaft gewählt. Da die Summe aller Nachbarschaften weitgehend konstant bleibt, kann geschlossen werden, dass für die Anzahl der neu entstehenden Nachbarschaften gilt:

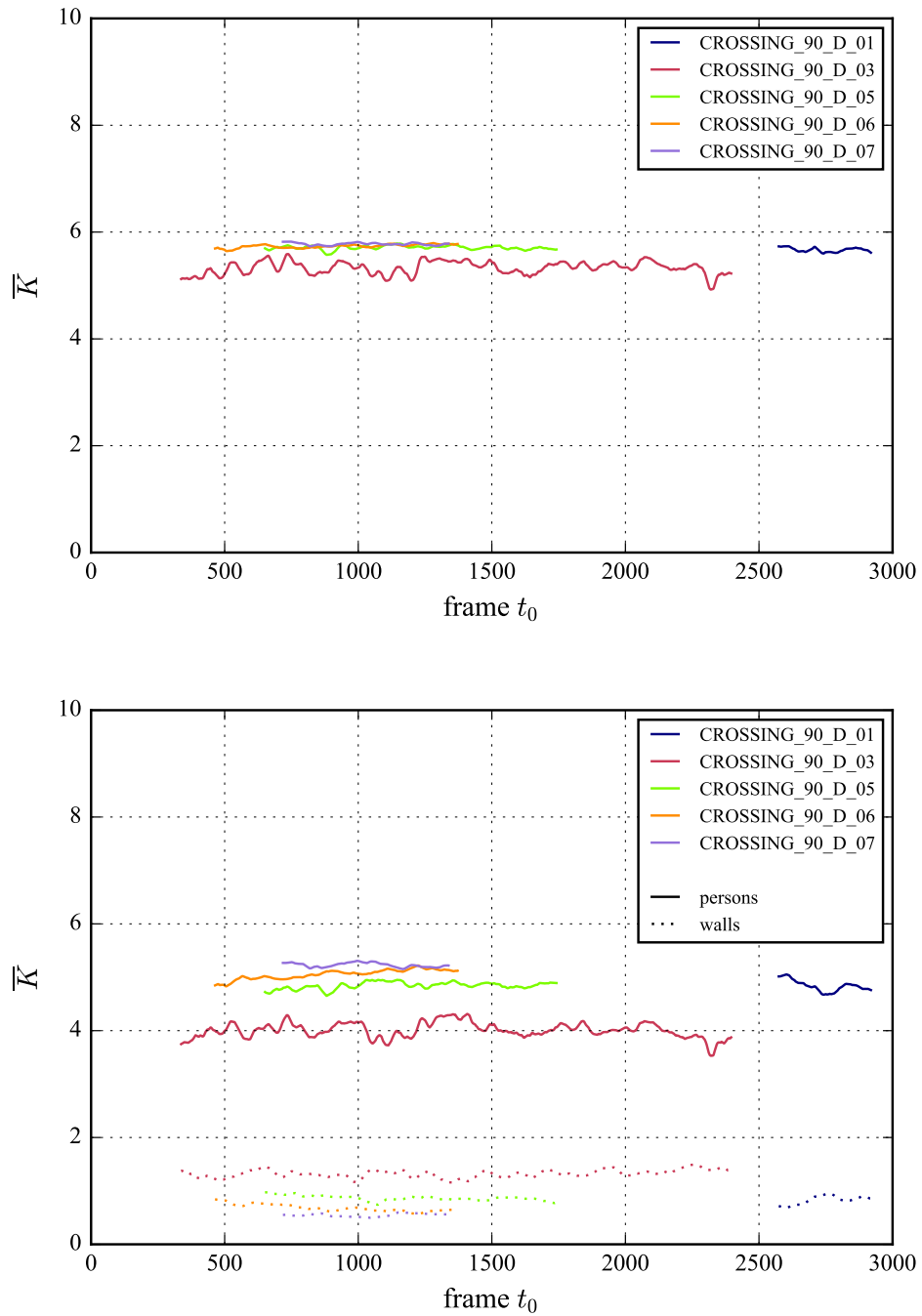
$$\overline{\Delta K}_{\text{neu}} \approx \overline{\Delta K}/2 \quad (4.23)$$

These: Die Anzahl der Nachbarschaftsänderungen pro Meter Wegstrecke korreliert mit der Richtung der beteiligten Verkehrsströme sowie der Personendichte. Für den unidirektionalen Verkehr ist eine geringe Anzahl an Nachbarschaftsänderungen zu erwarten. Die Personen bewegen sich mit ihren



**Abb. 4.6** – Nachbarschaftsbeziehungen auf Basis der Delaunay-Triangulation, dargestellt an einem Ausschnitt des BaSiGo-Experiments CROSSING\_90\_D\_07 (Einzelbild 1000). Die farbigen Punkte zeigen die Positionen der Personen. Die Farbe jedes Punktes (blau bzw. lila) entspricht der des Eingangs, über welchen die Person die Kreuzung betreten hat. Die weißen Punkte zeigen die virtuellen Wandpunkte. Die Farben der Verbindungslinien repräsentieren den Abstand entsprechend der Farbskala.

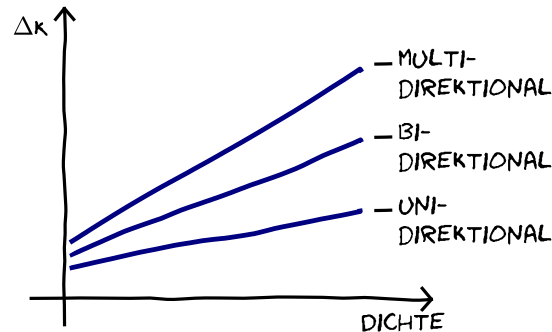
Partnern in dieselbe Richtung. Dennoch ist infolge von Geschwindigkeitsdifferenzen und den daraus resultierenden Überholvorgängen mit Änderungen der Nachbarn zu rechnen. Für die an den Rändern gehenden Personen ändern sich zusätzlich die virtuellen Bezugspunkte auf den Wänden. Diese wurden im Abstand von etwa einem Meter definiert, so dass deren Einfluss auf  $\Delta K$  maximal 2 (ein hinzukommender plus ein wegfallender Wandpunkt pro Meter) beträgt. Bei steigender Personendichte bleiben die Nachbarschaften zwar länger bestehen – im gestauten Zustand stehen die Personen zusammen mit ihren Nachbarn im Stau –, pro Meter Wegstrecke ist jedoch infolge der Verschiebungen innerhalb der Personengruppe eine stetige Zunahme der Anzahl an Nachbarschaftsänderungen zu erwarten. Für den bi- und multidirektionalen Verkehr muss von einer größeren Anzahl an Nachbarschaftsänderungen ausgegangen werden. Infolge der sich entgegenkommenden bzw. kreuzenden Personenströme entstehen immer neue Nachbarschaften, im gleichen Maß werden Nachbarschaften beendet. Die Bedeutung des Mehrrichtungsverkehrs auf die Nachbarschaftsänderungen wird jedoch durch den Grad der Ausbildung zusammenhängender Personenströme beeinflusst. Abbildung 4.8 stellt die hier formulierte



**Abb. 4.7** – Durchschnittliche Anzahl der Nachbarn am Beispiel des Experimentes CROSSING\_90\_D. Oben: Summe aller Nachbarn (Personen und Wandpunkte). Unten: Summe der Nachbarn, differenziert nach Personen und Wandpunkten.



These schematisch dar.



**Abb. 4.8** – Schematische Darstellung der These zur Änderung der Nachbarschaften beim uni-, bi- und multidirektionalen Verkehr. Die Anzahl der Nachbarschaftsänderungen  $\Delta K$  steigt mit zunehmender Dichte an und erreicht ihren Scheitelpunkt beim Übergang in den gestauten Ast des Fundamentaldiagramms.

### 4.2.3 Zeiten bis zur Kollision

Als dritter Ansatz wird untersucht, ob die Zeit bis zur Kollision mit benachbarten Personen oder Hindernissen ein geeignetes Maß für die Quantifizierung der gegenseitigen Behinderungen liefert. Für die Berechnung der Zeitdauer, in der zwei Elemente bei unveränderter Richtung und Geschwindigkeit zusammenstoßen werden (*time to collision*), wird der Algorithmus von Karamouzas et al. [53] verwendet. Der Algorithmus ist ursprünglich für die Kollisions-Vermeidung bei der Programmierung virtueller Welten gedacht. Er wird im Folgenden für die Analyse empirischer Daten adaptiert.

Die Trajektorienpunkte für den Zeitpunkt  $t$  liegen als Ortsvektoren  $\vec{x}(t)$  vor, die stationären Wandpunkte in der Form  $\vec{x}$ . Die aktuelle, gerichtete Geschwindigkeit einer Person wird analog zu Messmethode 5 (vgl. Abbildung 2.18) berechnet und als  $\vec{v}(t)$  bezeichnet. Dabei wird der Weg innerhalb des Zeitintervalls  $dt = 1$  s gemäß Gleichung 2.32 berücksichtigt. Die Person, für welche die Zeiten bis zur Kollision mit ihren Nachbarn berechnet werden, erhält im Folgenden den Index  $i$ , der aktuell betrachtete Nachbar den Index  $j$ . Der Platzbedarf der Personen wird durch Kreise mit dem Radius  $r_i = r_j = 0,2$  m angenommen, damit entspricht die Projektionsfläche etwa dem mittleren Flächenbedarf  $\bar{f} = 0,125$  m<sup>2</sup>, den Predtetschenski/Milinski für einen Erwachsenen in Winterstraßenkleidung angeben. [87, S. 42] Für die Wandpunkte wird dieselbe Ausdehnung angesetzt und damit ein minimal akzeptierter Wandabstand definiert. Eine Kollision findet genau dann statt, wenn der Abstand zwischen zwei benachbarten Punkten  $d_{i,j} = r_i + r_j = 0,4$  m beträgt:

$$\|(\vec{x}_i + \vec{v}_i \cdot t) - (\vec{x}_j + \vec{v}_j \cdot t)\| = d_{i,j} \quad (4.24)$$

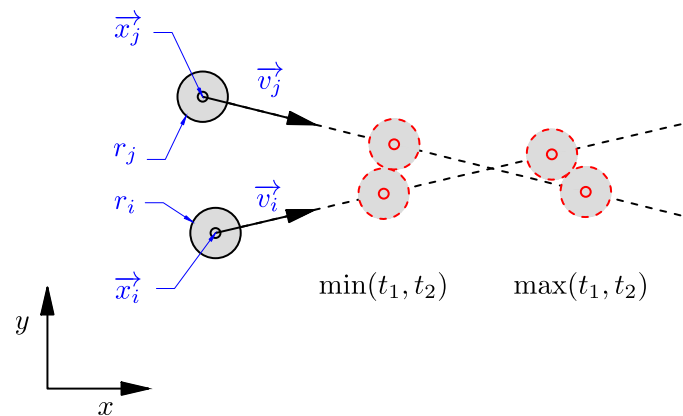
Mit  $\vec{\Delta x} = \vec{x}_i - \vec{x}_j$  und  $\vec{\Delta v} = \vec{v}_i - \vec{v}_j$  gilt:

$$\begin{aligned}
 \|\vec{\Delta x} + \vec{\Delta v} \cdot t\| - d_{i,j} &= 0 \\
 (\vec{\Delta x} + \vec{\Delta v} \cdot t)^2 - d_{i,j}^2 &= 0 \\
 \vec{\Delta v}^2 \cdot t^2 + 2 \cdot \vec{\Delta x} \cdot \vec{\Delta v} \cdot t + \vec{\Delta x}^2 - d_{i,j}^2 &= 0
 \end{aligned} \tag{4.25}$$

Durch Einsetzen von

$$\begin{aligned}
 a &= \vec{\Delta v}^2 \\
 b &= 2 \cdot \vec{\Delta x} \cdot \vec{\Delta v} \\
 c &= \vec{\Delta x}^2 - d_{i,j}^2
 \end{aligned} \tag{4.26}$$

kann Gleichung 4.25 auf die Form  $at^2 + bt + c = 0$  mit den beiden möglichen Lösungen  $t_1$  und  $t_2$  zurückgeführt werden. Abbildung 4.9 veranschaulicht die beiden rechnerisch ermittelten Zeitpunkte  $t_1$  und  $t_2$  für die Kollision der Personen  $i$  und  $j$ .



**Abb. 4.9** – Zeitpunkte für die Kollision der Personen  $i$  und  $j$ . Die schwarzen Kreise zeigen die aktuelle Position der beiden Personen. Der Radius ihrer Projektion auf die horizontale Ebene beträgt  $r_i = r_j = 0,2$  m. Die rot schraffierten Kreise markieren die zukünftigen Positionen, an denen es (rechnerisch) bei gleichbleibender Richtung und Geschwindigkeit zur Kollision kommt. Relevant für die weitere Betrachtung ist die Kollision zum Zeitpunkt  $\min(t_1, t_2)$ .

Falls es zwei Lösungen gibt, werden durch Karamouzas et al. drei Fälle charakterisiert [53, S. 45]:

- $t_1, t_2 \leq 0$ : die Kollision liegt in der Vergangenheit und kann deshalb ignoriert werden
- $t_1 < 0 < t_2 \vee t_2 < 0 < t_1$ : die Kollision steht unmittelbar bevor
- $t_1, t_2 \geq 0$ : die Kollision wird zum Zeitpunkt  $t_{c_{i,j}} = \min(t_1, t_2)$  stattfinden

In ihrem eigenen Code für die Berechnung der Kollisionszeiten definieren Karamouzas et al. die maximale Dauer bis zu einer Kollision mit  $t_{c_{\max}} = 999$  s [54, Zeile 140]. Bei der Adaption des Algorithmus für die vorliegende Arbeit wird die maximale Zeitdauer bis zur Kollision mit 100 s angesetzt. Größere

Dauern erscheinen für die Berechnung nicht relevant. In der Erläuterung zu Gleichung 4.28 wird jedoch dargelegt, dass die Einschränkung der maximale angenommenen Zeitdauer bis zur Kollision für die weitere Berechnung nur eine untergeordnete Rolle spielt. Als minimale Dauer bis zu einer – dann unmittelbar bevorstehenden – Kollision wird 0,1 s verwendet. Somit gilt:

$$0,1 \text{ s} \leq tc_{i,j} \leq 100 \text{ s} \quad (4.27)$$

Für jede Person  $i$  innerhalb der Messfläche kann nun die Kollisionszeit  $tc_{i,j}$  zu all ihren Nachbarn  $j \in N_i$  berechnet werden. Die Häufigkeit, in der mit Kollisionen zu rechnen ist, kann über die kumulierte Kollisionsfrequenz beschrieben werden. Für die Kollisionen der Person  $i$  mit ihren Nachbarn  $j \in N_i$  ist dies:

$$f_i = \sum_{j \in N_i} \frac{1}{tc_{i,j}} \quad (4.28)$$

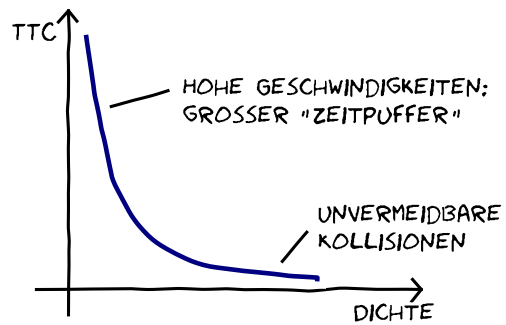
Damit werden kleine  $tc_{i,j}$ -Werte stark, große  $tc_{i,j}$ -Werte nur schwach gewichtet. Für die vorliegende Arbeit wird der individuelle Time-to-collision-Faktor  $TTC_i$  der Person  $i$  als Inverse der kumulierten Kollisionsfrequenz definiert:

$$TTC_i = \frac{1}{f_i} \quad (4.29)$$

Für die  $n$  Personen auf der Messfläche ergibt sich damit der mittlere Time-to-collision-Wert als:

$$TTC = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n TTC_i \quad (4.30)$$

These: Die Time-to-collision-Werte hängen von der Personendichte ab. So wie beim Fahrzeugverkehr werden bei niedrigen Dichten, bei denen gleichzeitig hohe Geschwindigkeiten erreicht werden, nur große Zeitdauern bis zu einer möglichen Kollision akzeptiert. Dieser „Zeitpuffer“ ist erforderlich, da bei hohen Geschwindigkeiten auch mit einem hohen Schaden im Falle des Zusammenstoßes zu rechnen ist. Mit steigender Dichte, geht die Möglichkeit, aber infolge geringerer Geschwindigkeiten auch die Notwendigkeit einen großen Zeitpuffer einzuhalten zunehmend verloren. Bei großen Dichten kommt es bei Fußgängern zum Körperkontakt, Kollisionen sind unvermeidbar. Abbildung 4.10 stellt die hier formulierte These schematisch dar.



**Abb. 4.10** – Schematische Darstellung der These zu den Kollisionszeiten. Bei geringen Dichten und den damit verbundenen, hohen Geschwindigkeiten werden nur große Kollisionszeiten akzeptiert. Bei zunehmender Dichte und geringeren Geschwindigkeiten werden auch kleinere Kollisionszeiten hingenommen. Bei einer weiteren Zunahme der Dichte sind Kollisionen nicht mehr zu vermeiden.

# Kapitel 5

## Datenanalyse

### 5.1 Intendierte Messgrößen

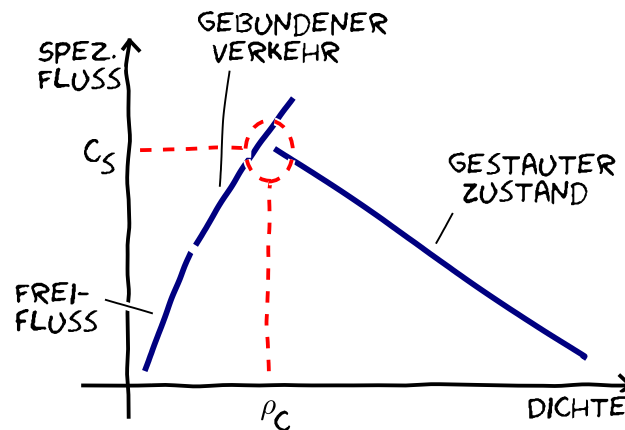
Mit den in Kapitel 4 vorgestellten Methoden sollen gemäß der Zielsetzung dieser Arbeit Kenngrößen für die Beurteilung und Bemessung multidirektional genutzter Fußverkehrsanlagen entwickelt werden (vgl. Abschnitt 1.2). Diese Kenngrößen sollen anschließend in Kapitel 6 als Bemessungsregeln in das „Level-of-Safety-Konzept“ integriert werden.

Die Datenanalyse fokussiert auf diese Fragestellungen:

- a) Wie hoch ist die maximale Leistungsfähigkeit (Kapazität) der untersuchten Verkehrsanlagen? Bei welcher Dichte wird diese erreicht? Hier wird die Methode aus Abschnitt 4.1.3 angewendet. Welcher Skalierungsfaktor muss angesetzt werden, um die Ergebnisse auf ähnlich strukturierte und genutzte Verkehrsanlagen mit abweichender Größe übertragen zu können? Für die Fragestellung werden die Methoden der Abschnitte 4.1.4 und 4.1.5 eingesetzt.
- b) Liefert das Modell der Konfliktdichte signifikante Werte, um die Unterschiede in der Leistungsfähigkeit der Strukturtypen (vgl. Abbildung 5.2) zu quantifizieren? Kann die Konfliktdichte herangezogen werden, um die Dichte, bei der die maximale Leistungsfähigkeit einer Anlage erreicht wird, zu beschreiben?

Abbildung 5.1 zeigt den schematischen Verlauf des Fundamentaldiagramms. Der Übergang vom gebundenen Verkehr zum gestauten Zustand wird im Rahmen dieser Arbeit an der Stelle des Fundamentaldiagramms definiert, an welcher der Fluss bei steigender Dichte erstmals nicht weiter zunimmt. Der Personenfluss an dieser Stelle des Fundamentaldiagramms wird als „Kapazität“ bezeichnet. In der unter (a) formulierten Fragestellung soll die spezifische Kapazität  $C_s$  der Verkehrsanlage, die mit der Kapazität korrespondierende Dichte  $\rho_c$  sowie der Skalierungsfaktor  $F$  bzw.  $\bar{F}$  ermittelt werden, der das Verhältnis zwischen spezifischer Kapazität  $C_s$  und tatsächlicher Kapazität  $C$  beschreibt. Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit werden in Abschnitt 5.4 dargestellt.

Die Konfliktdichte, vgl. Fragestellung (b), soll über den Verlauf der Standardabweichung  $\sigma_v$ , die mittlere Änderung der Nachbarschaften  $\Delta K$  und den *TTC*-Faktor als mittlere Zeit bis zur Kollision beschrieben werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Quantifizierung der Konfliktdichte finden sich in Abschnitt 5.5.



**Abb. 5.1** – Schematische Darstellung des Fundamentaldiagramms. Darin werden vereinfachend drei Verkehrszustände unterschieden: der *Freifluss*, in dem es nur wenige Wechselwirkungen gibt, so dass die Personen ihre Geschwindigkeit frei wählen können, der *gebundene Verkehr* mit einer zunehmenden Anzahl von Wechselwirkungen, aber weiterhin stabilem Fluss und der *gestaute Zustand*. Im Kontext der vorliegenden Arbeit interessiert die spezifische Kapazität  $C_s$  und die mit dieser korrespondierende Dichte  $\rho_c$ .

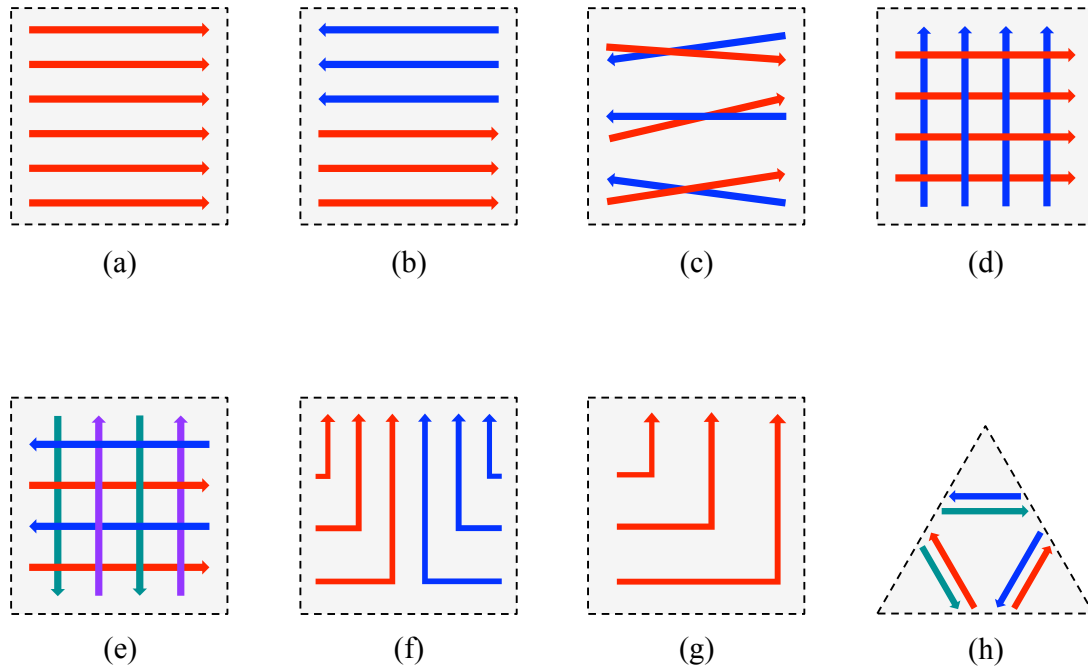
Die Messflächen, auf denen die Auswertungen durchgeführt wurden, sind für die BaSiGo-Experimente bereits in den Aufbauskißzen (vgl. Abschnitt 3.2) eingetragen. Für das Hermes-Experiment „KO“, die T-Kreuzung, ist die Messfläche in Abbildung 5.14 dargestellt. Für die Hermes-Experimente mit unidirektionalem Verkehr wurde eine vier Meter lange, für die Hermes-Experimente mit bidirektionalem Verkehr eine fünf Meter lange Messfläche, jeweils in der gesamten Breite des Korridors, definiert. Die Messflächen wurden so festgelegt, dass augenscheinliche Beeinflussungen durch die verengten Zu- und Ausgänge zur Geometrie nicht zu erkennen waren.

In Abbildung 5.2 werden charakteristische Verkehrssituationen, wie sie in den BaSiGo- und Hermes-Experimenten untersucht wurden, schematisch dargestellt. Diese Verkehrssituationen werden nachfolgend als „Strukturtypen“ bezeichnet.

## 5.2 Stationarität

Die in den Projekten BaSiGo und Hermes durchgeführten Experimente wurden unter Laborbedingungen durchgeführt. Die einzelnen Durchläufe dieser Experimente dauerten etwa eine bis vier Minuten. Dies bedingt, dass ein nicht zu vernachlässigender Anteil der erhobenen Daten von den Start- und End-Bedingungen beeinflusst wurde. Bei der Analyse der Daten wird deshalb in einem ersten Schritt der stationäre Zustand (*steady state*) bestimmt und im weiteren nur die Daten berücksichtigt, für welche dieser Zustand gegeben ist. In der Vergangenheit wurde die Überprüfung meist visuell auf Grundlage der Zeitreihen  $\rho(t)$  und  $v(t)$  durchgeführt [127, Fig. 3.10]. Um bei der Auswahl der Daten reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, wird im Rahmen dieser Arbeit der von Liao et al. [65] derzeit nur als Vorabzug veröffentlichte Algorithmus zur Bestimmung stationärer Zustände verwendet.

Der Algorithmus – *Cumulative Sum Control Chart* – erlaubt eine automatische Detektion der stationären Zustände in Zeitreihen der Dichte und Gehgeschwindigkeit. Für die vorliegende Arbeit wurde



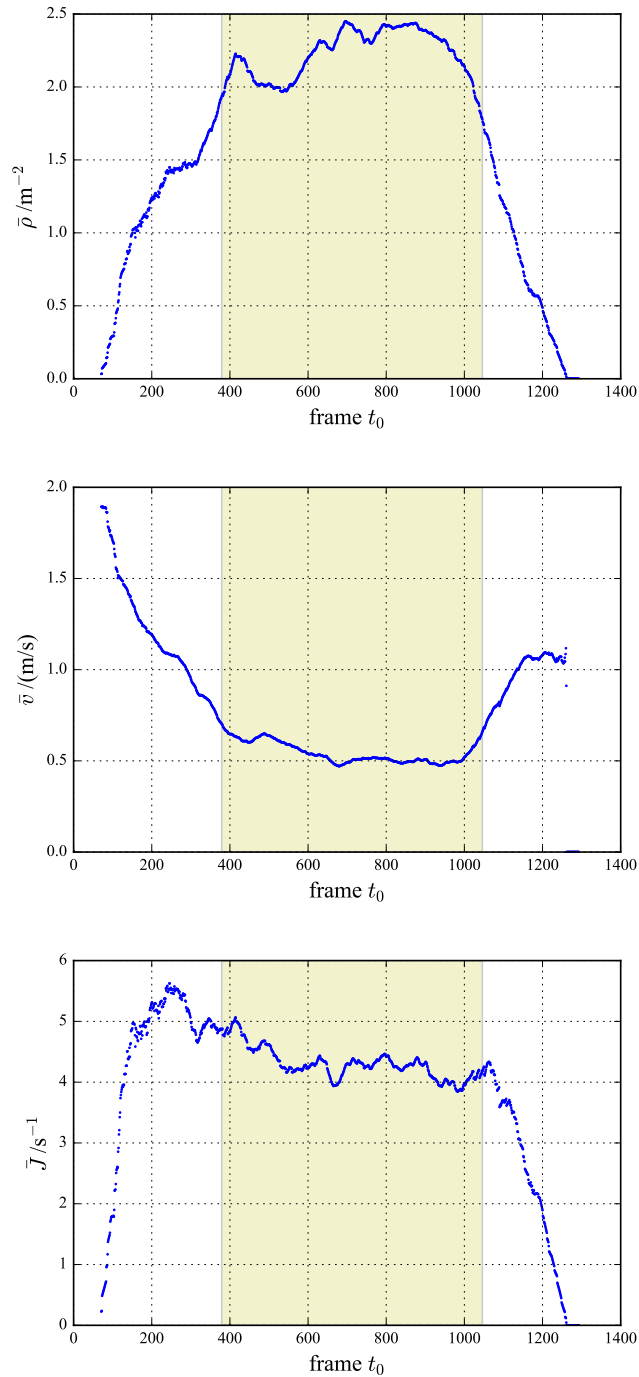
**Abb. 5.2** – In den Projekten Hermes und BaSiGo untersuchte Strukturtypen für den uni-, bi- und multidirektionalen Verkehr: (a) unidirektionaler Verkehr, (b) bidirektionaler Verkehr mit getrennten Richtungsspuren, (c) bidirektionaler Verkehr mit Durchmischung der Spuren, (d) kreuzender Verkehr mit zwei orthogonalen Richtungen, (e) kreuzender Verkehr mit vier orthogonalen Richtungen, (f) Zusammenfluss zweier Personenströme an der T-Kreuzung, (g) unidirektionaler Verkehr an einer Ecke, (h) Verkehr an dreiecksförmiger Kreuzung.

zusätzlich die Zeitreihe des Flusses einbezogen. Als stationärer Zustand wurde abschließend solch ein Bereich definiert, für den die Bedingung der Stationarität in allen drei Zeitreihen erfüllt wird. Abbildung 5.3 zeigt die Auswahl des stationären Zustandes exemplarisch für das Hermes-Experiment bot-360-160-160. Eine tabellarische Übersicht, in der die Zeiträume, die dem stationären Zustand zugeordnet werden, für alle Versuchsdurchläufe dokumentiert sind, findet sich in Anhang B.

### 5.3 Referenzgeschwindigkeiten

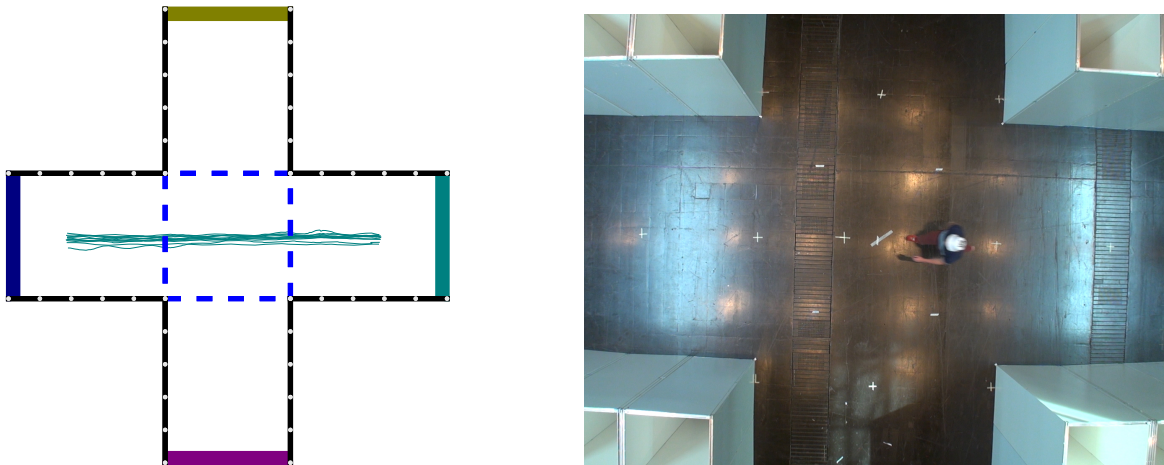
In den Experimenten SOLO\_REF (vgl. Beschreibung auf Seite 48) wurde die freie Gehgeschwindigkeit der Probanden, ohne Beeinflussung durch andere, gemessen. Aufgrund technischer Probleme konnten nur die Durchläufe A, B und H mit 12, 7 und 43 Probanden ausgewertet werden.

Abbildung 5.4 zeigt exemplarisch die Trajektorien des Experiments SOLO\_REF\_A. Als Aufbau wurde der des Experiments CROSSING\_90 verwendet. Für jede Person stand die gesamte Wegbreite zur Verfügung, so dass eine signifikante Beeinflussung durch den Aufbau ausgeschlossen werden kann. Die in Abbildung 5.5 dargestellten Geschwindigkeiten wurden innerhalb der in Abbildung 5.4 (links) blau gestrichelten, vier mal vier Meter großen Messfläche als Mittelwerte für jede Person berechnet.



**Abb. 5.3** – Begrenzung der Daten auf den Zustand der Stationarität am Beispiel des Hermes-Experiments bot-360-160-160. Die farbig hinterlegten Bereiche zeigen das Zeitintervall, für das ein stationärer Zustand in allen drei Zeitreihen ermittelt wurde. Von oben nach unten:  $\rho(t)$ ,  $v(t)$  und  $J(t)$ .





**Abb. 5.4** – Trajektorien und Momentaufnahme des Experiments SOLO\_REF\_A. Aufgrund technischer Probleme konnten nur die Trajektorien von 12 Personen ausgewertet werden. Der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Probanden beträgt etwa 10 s. Bei einer mittleren Geschwindigkeit von ca. 1,5 m/s entspricht dies einer Distanz von 15 m.

Die mittlere freie Gehgeschwindigkeit aller Personen beträgt  $1,45 \text{ m/s} \pm 0,23 \text{ m/s}$ .

## 5.4 Leistungsfähigkeit der Verkehrsanlagen

Nachfolgend werden die in den BaSiGo- und Hermes-Experimenten untersuchten Anlagen hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit analysiert. Dabei werden die in Abbildung 5.2 gezeigten Strukturtypen a bis g sowie h berücksichtigt. Ziel der Analysen ist es, Kenngrößen für die Bemessung von Fußverkehrsanlagen zu ermitteln. Aus diesem Grund wird versucht, Strukturtypen, die ähnliche Charakteristika aufweisen, soweit zusammenzufassen, dass die Anzahl der zu unterscheidenden Anlagen gering bleibt.

### 5.4.1 Unidirektional genutzte Korridore

Für den unidirektional genutzten Korridor (Strukturtyp a nach Abbildung 5.2) werden das BaSiGo-Experiment UNI\_CORR\_500 mit einer Korridorbreite von 5,0 m sowie das Hermes-Experiment UO mit Korridorbreiten von 3,0 m, 2,4 m und 1,8 m analysiert. Der Versuchsaufbau sowie die Konfigurationen des BaSiGo-Experiments werden auf Seite 50 ff. beschrieben. Für die Hermes-Experimente wird auf deren Dokumentation [55] sowie die aus dieser entnommenen Grafiken in Abbildung 3.7 verwiesen. Abbildung 5.6 zeigt beispielhaft die Trajektorien für das Experiment UNI\_CORR\_500\_01.

In Abbildung 5.7 sind die Fundamentaldiagramme für den Mittelwert der Geschwindigkeiten über die mittlere Dichte  $\bar{v}(\bar{\rho})$  sowie den spezifischen Fluss über die mittlere Dichte  $J_s(\bar{\rho})$  dargestellt. Der spezifische Fluss wird dabei als Produkt der mittleren Geschwindigkeit  $\bar{v}$  und der mittleren Dichte  $\bar{\rho}$  berechnet. Abbildung 5.8 zeigt zusätzlich die Mittelwerte und die Standardabweichungen. Die jeweils zusammengefassten Dichteintervalle haben gemäß Abschnitt 4.2.1 eine Länge von  $\Delta\rho = 0,1 \text{ m}^{-2}$ . Entsprechend den Bezeichnungen in Abbildung 5.1 liegt die spezifische Kapazität der Anlagen bei  $C_s = 1,46(\text{ms})^{-1} \pm 0,13(\text{ms})^{-1}$ . Diese wird entsprechend der Festlegung auf Seite 79 an der Stelle

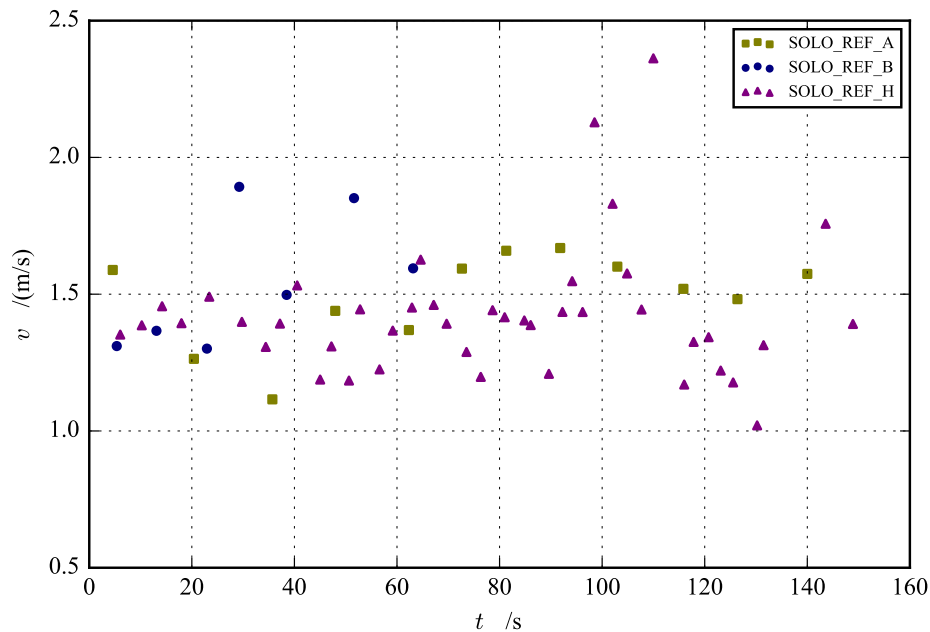


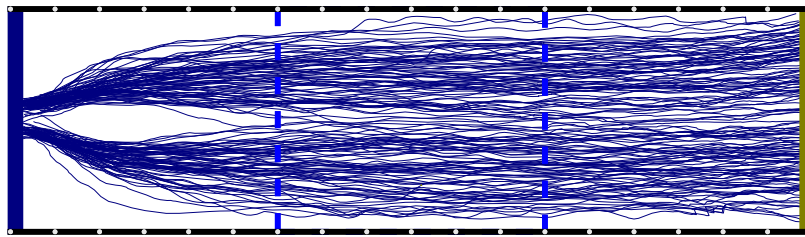
Abb. 5.5 – Freie Gehgeschwindigkeiten in den Experimenten SOLO\_REF\_A, B und H. Jeder Datenpunkt repräsentiert den Mittelwert der freien Gehgeschwindigkeit für einen Probanden.

des Fundamentaldiagramms definiert, an welcher der Fluss bei steigender Dichte erstmals nicht weiter zunimmt. Diese maximale Leistungsfähigkeit wird bei einer Dichte  $\rho_c = 1,64 \text{ m}^{-2}$  erreicht. Die hier genannten Werte für die Kapazität  $C_s$  sowie die Dichte  $\rho_c$  wurden manuell aus Diagramm 5.8 (unten) abgegriffen, für die in den nachfolgenden Abschnitten beschriebenen Verkehrsanlagen aus den entsprechenden Diagrammen. Die Fundamentaldiagramme der Einzelexperimente werden zum Zwecke der besseren Les- und Vergleichbarkeit in Anhang C.1 ff. gesammelt. Die Skalierung der Dichte-Achse ist so gewählt, dass alle im Kontext der Datenanalyse gezeigten Diagramme dieselbe Achsenskala erhalten.

Die in Abbildung 5.9 gezeigten Skalierungsfaktoren  $F$  bzw.  $\tilde{F}$  entsprechen der Breite der untersuchten Korridore – und damit dem Konzept des spezifischen Flusses (vgl. Abschnitt 2.3.4). Die Werte für  $F = \bar{J}/(\bar{v} \cdot \bar{\rho})$  werden im Diagramm ideal durch den Näherungsansatz  $\tilde{F} = A/\bar{a}_i$  abgebildet, so dass die olivgrüne Linie weitgehend durch die blaue Linie überdeckt wird.

## 5.4.2 Bidirektional genutzte Korridore

Bei den Strukturtypen gemäß Abbildung 5.2 wird zwischen dem bidirektionalen Verkehr mit getrennten Richtungsspuren (Strukturtyp b) und dem bidirektionalen Verkehr mit Durchmischung der Spuren (Strukturtyp c) unterschieden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden für den Strukturtyp b das BaSiGo-Experiment BI\_CORR\_400\_A mit einer Korridorbreite von 4,0 m sowie das Hermes-Experiment BO mit einer Korridorbreite von 3,6 m analysiert. Für den Strukturtyp c werden das BaSiGo-Experiment BI\_CORR\_400\_B mit einer Korridorbreite von 4,0 m sowie die Hermes-Experimente BOA und BOT mit Korridorbreiten von 3,0 m bzw. 3,0 m und 3,6 m in die Untersuchungen einbezogen. Die eindeutige Zuordnung zu den Strukturtypen ist jedoch für manche Durchläufe nicht möglich: auch bei



**Abb. 5.6** – Trajektorien des unidirektionalen Verkehrs im Korridor am Beispiel des BaSiGo-Experiments UNI\_CORR\_500\_01. Die blau gestrichelten Linien zeigen den Messbereich. Die Eingänge zum Versuchsaufbau sind farbig markiert, die Farbe der Trajektorien zeigt an, über welchen Eingang die Probanden den Versuchsaufbau betreten haben. In Durchlauf 01 wurden die Personen, deren Zustrom durch eine Verengung des Zugangs reguliert wurde, durch einen Helfer auf die gesamte Breite des Korridors verteilt (vgl. Abbildung 3.3).

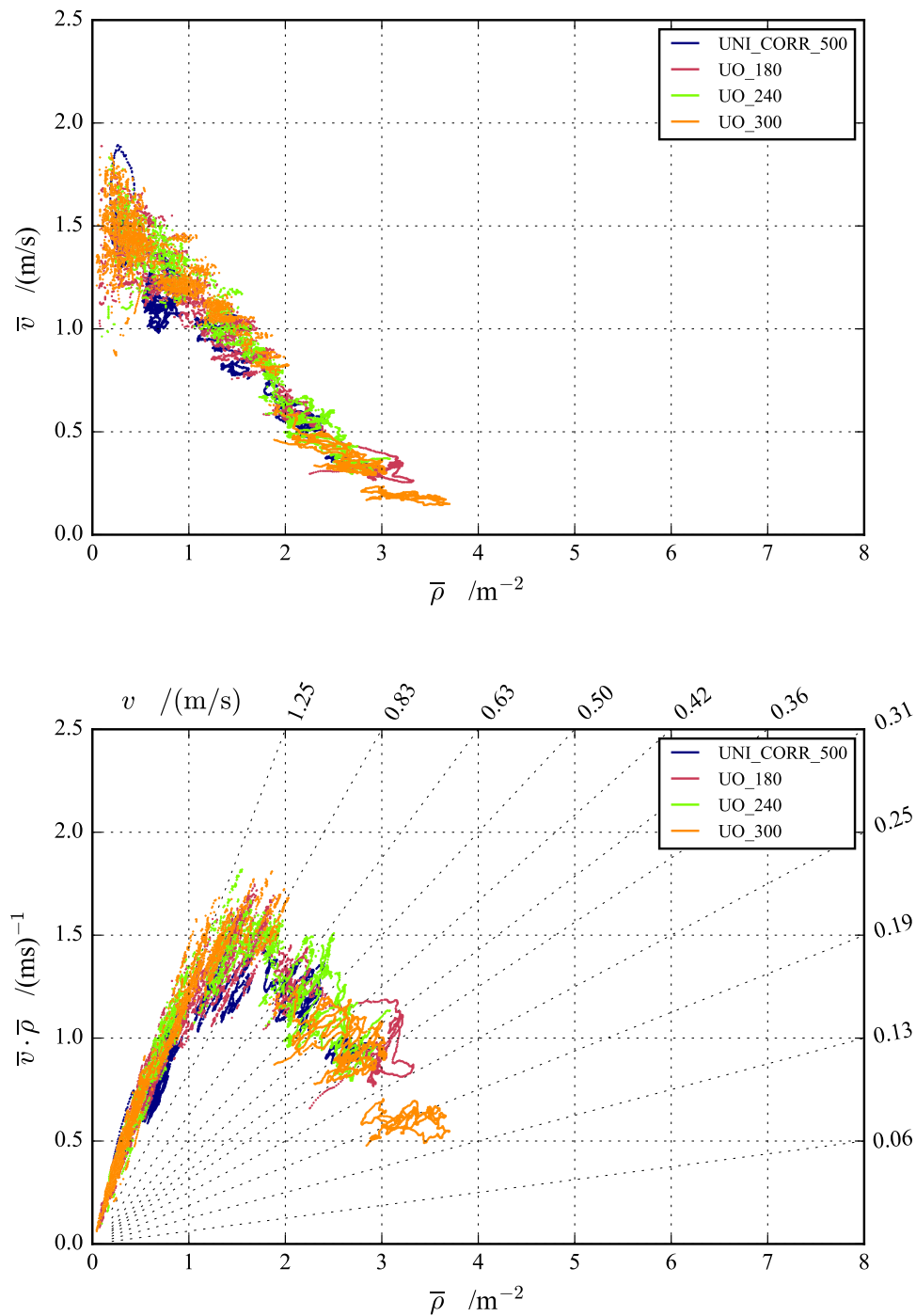
den Experimenten des Strukturtyps b gibt es einen Anteil an „Querläufern“, bei den Experimenten des Strukturtyps c kommt es in einzelnen Durchläufen zu einer deutlich erkennbaren Separation der Personenströme. Der Versuchsaufbau sowie die Konfigurationen der BaSiGo-Experimente werden auf Seite 50 ff. beschrieben. Für die Hermes-Experimente wird erneut auf deren Dokumentation [55] sowie Abbildung 3.7 verwiesen. Abbildung 5.10 zeigt beispielhaft die Trajektorien für das BaSiGo-Experiment BI\_CORR\_400 in den Durchläufen BI\_CORR\_400\_A\_03 und bi\_corr\_400\_b\_07.

In Abbildung 5.11 sind die Fundamentaldiagramme  $\bar{v}(\bar{\rho})$  sowie  $J_s(\bar{\rho})$  dargestellt. Der spezifische Fluss wird auch hier als Produkt der mittleren Geschwindigkeit  $\bar{v}$  und der mittleren Dichte  $\bar{\rho}$  berechnet. Es zeigt sich, dass – bei identischen Dichten – in Experiment BI\_CORR\_400\_B (Strukturtyp c) etwas niedrigere Geschwindigkeiten bzw. spezifische Flüsse erreicht werden, als in den anderen Experimenten. Das Experiment BO (ebenfalls Strukturtyp c) zeigt im Verlauf der Kurven keine erkennbaren Unterschiede zu denen der Experimente des Strukturtyps b. Für die Hermes-Experimente wird der identische Verlauf der Kurven auch durch die Untersuchungen von Zhang [127, S. 76 f.] bestätigt. In dieser Arbeit wird deshalb auf die weitere Unterscheidung der Strukturtypen b und c verzichtet. Abbildung 5.12 zeigt die Mittelwerte und die Standardabweichungen. In den Daten werden alle Experimente für den bidirektionalen Verkehr im Korridor zusammengefasst. Die spezifische Kapazität der Anlagen liegt bei  $C_s = 1,26(\text{ms})^{-1} \pm 0,10(\text{ms})^{-1}$ . Diese maximale Leistungsfähigkeit wird bei einer Dichte  $\rho_c = 1,35 \text{ m}^{-2}$  erreicht. Die Fundamentaldiagramme der Einzelexperimente finden sich in Anhang C.5 ff.

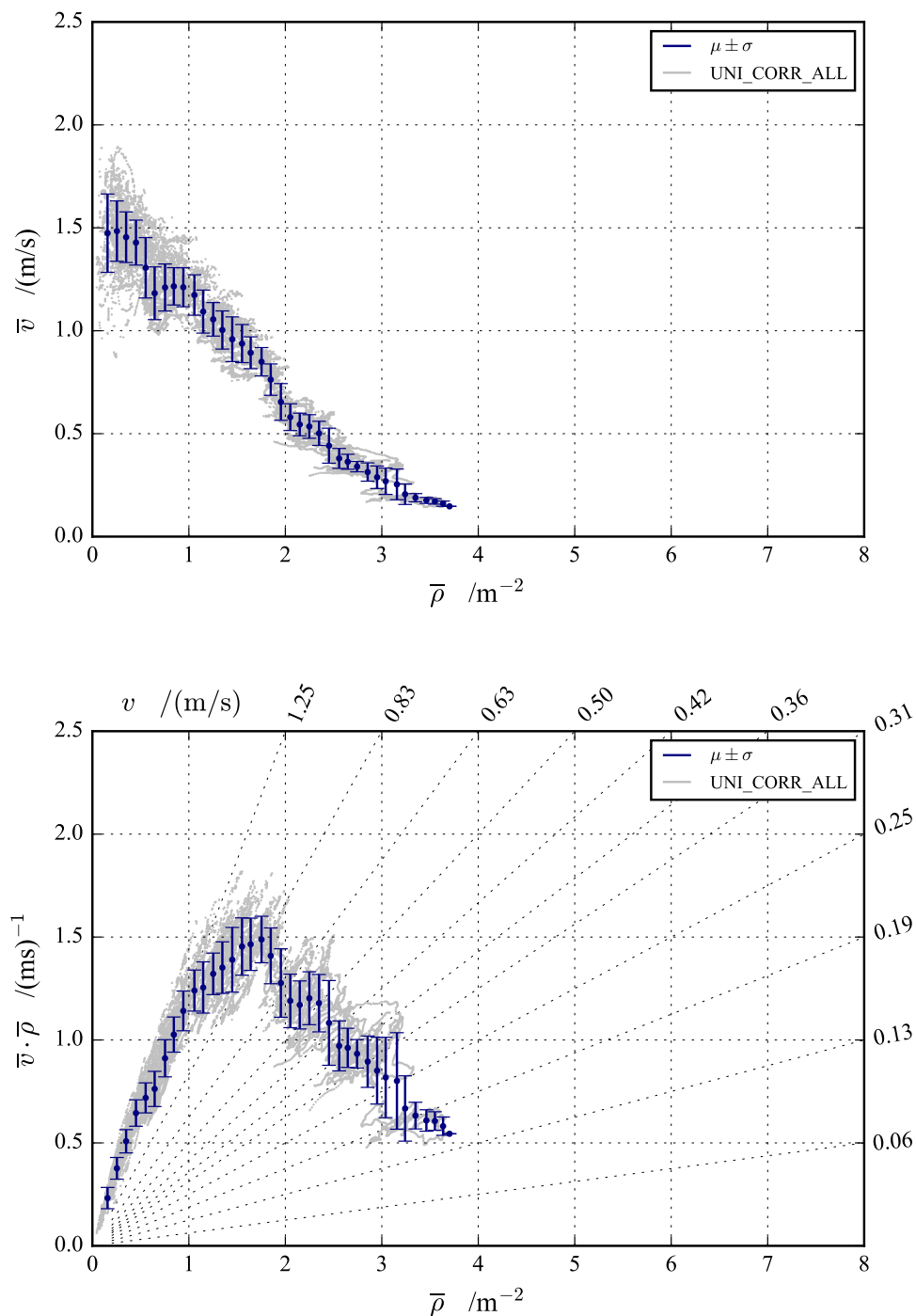
Wie bereits für den unidirektionalen Verkehr gezeigt, entsprechen die in Abbildung 5.13 dargestellten Skalierungsfaktoren  $F$  bzw.  $\tilde{F}$  der Breite der untersuchten Korridore. Das Konzept des spezifischen Flusses (vgl. Abschnitt 2.3.4) findet sich somit auch hier bestätigt. Die Werte für  $F = \bar{J}/(\bar{v} \cdot \bar{\rho})$  werden im Diagramm wieder ideal durch den Näherungsansatz  $\tilde{F} = A/\bar{a}_i$  abgebildet, so dass sich die Linien weitgehend überdecken.

### 5.4.3 T-Kreuzung mit zusammenfließenden Personenströmen

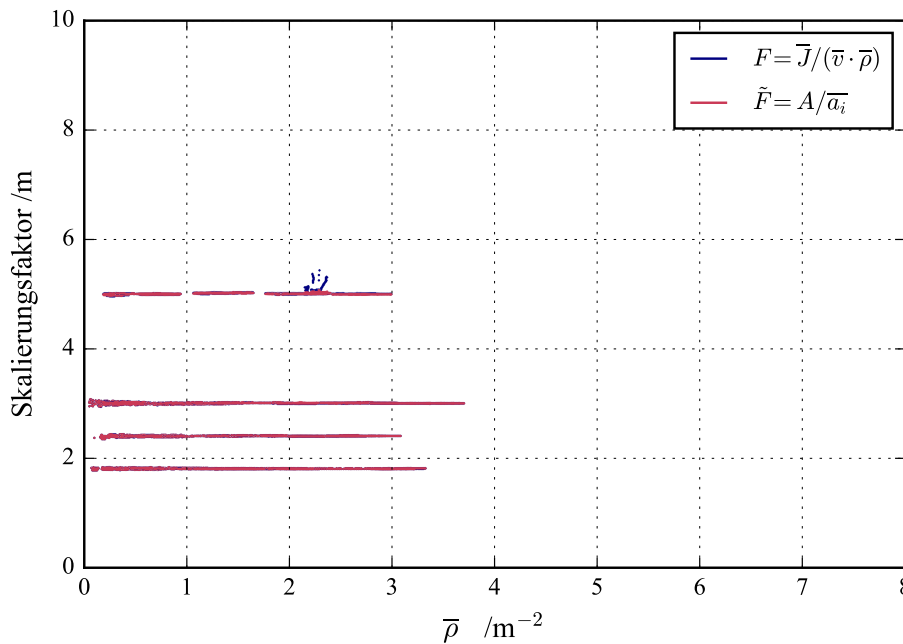
Für die Untersuchung der T-Kreuzung (Strukturtyp f gemäß Abbildung 5.2) werden die Daten des Hermes-Experiments KO mit Zugangsbreiten von 2,4 m und 3,0 m herangezogen. Der Versuchsaufbau wird in der Hermes-Dokumentation [55] beschrieben, eine Darstellung des Aufbaus findet sich in



**Abb. 5.7** – Fundamentaldiagramme für den unidirektionalen Verkehr im Korridor. Es wird das BaSiGo-Experiment UNI\_CORR\_500 sowie das Hermes-Experiment UO mit Korridorbreiten von 1,8 m, 2,4 m und 3,0 m berücksichtigt. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten der einzelnen Experimente. Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten der einzelnen Experimente sowie Nomogrammlinien für die zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$ . Die Diagramme der einzelnen Durchläufe finden sich in Anhang C.1 ff.



**Abb. 5.8** – Mittelwerte und Standardabweichung zu Abbildung 5.7 bei Längen der Dichteintervalle von  $\Delta\rho = 0,1\text{m}^{-2}$ . Als „UNI\_CORR\_ALL“ werden die Daten der in Abbildung 5.7 genannten BaSiGo- und Hermes-Experimente zusammengefasst. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten aller Experimente sowie dem Mittelwert  $\mu$  und der Standardabweichung  $\sigma_v$ . Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten aller Experimente sowie dem Mittelwert  $\mu$ , der Standardabweichung  $\sigma_{J_s}$  sowie Nomogrammlinien für die Geschwindigkeiten  $v$ .



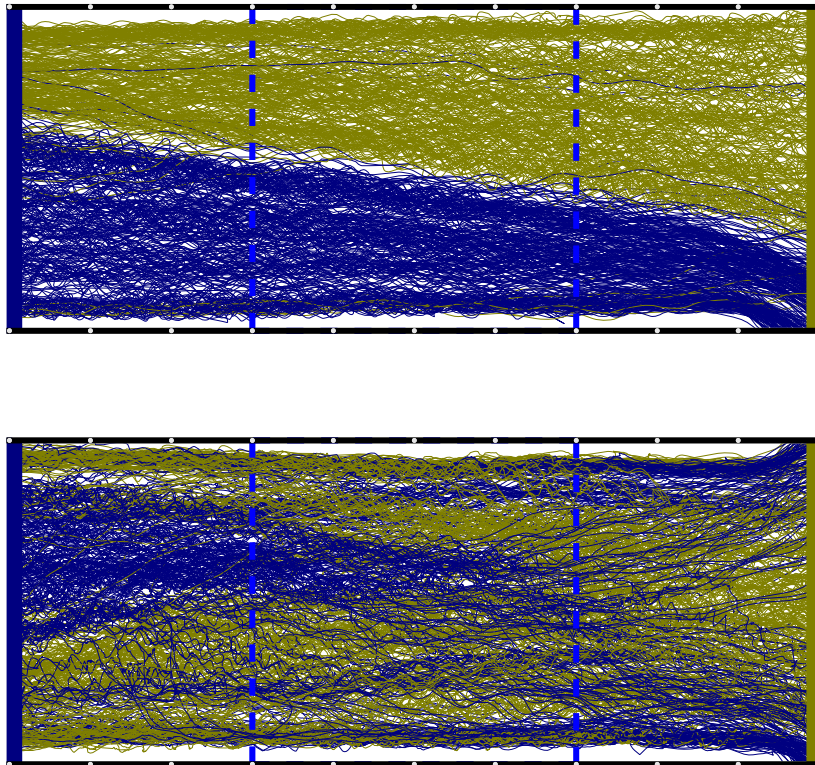
**Abb. 5.9** – Skalierungsfaktoren  $F$  bzw.  $\tilde{F}$  als Funktion der mittleren Dichte  $\bar{\rho}$  für den unidirektionalen Verkehr im Korridor. Deutlich zu erkennen sind die vier konstanten Linien, die den Breiten der Korridore (5,0 m, 3,0 m, 2,4 m und 1,8 m) entsprechen. Da sich die Daten der beiden Berechnungsformen weitgehend überlagern werden in Anhang D.1 auch die jeweiligen Daten separat gezeigt.

Abbildung 3.7. Abbildung 5.14 zeigt beispielhaft die Trajektorien für den Versuchsdurchlauf ko-300-150-300.

In Abbildung 5.15 sind die Fundamentaldiagramme  $\bar{v}(\bar{\rho})$  sowie  $J_s(\bar{\rho})$  dargestellt. Der spezifische Fluss wird auch hier als Produkt der mittleren Geschwindigkeit  $\bar{v}$  und der mittleren Dichte  $\bar{\rho}$  berechnet. Für das Experiment KO\_300 wurden Personendichten bis etwa  $\bar{\rho} = 2,0 \text{ m}^{-2}$  realisiert, für das Experiment KO\_240 wurden Personendichten bis etwa  $\bar{\rho} = 3,0 \text{ m}^{-2}$  erreicht. Für den Dichtebereich oberhalb von  $\bar{\rho} = 2,0 \text{ m}^{-2}$  scheint es bei Experiment KO\_240 einen leichten Anstieg des spezifischen Flusses zu geben. Dieser Effekt kann auf Grundlage der vorliegenden Daten nicht abschließend erklärt werden und bedarf einer ergänzenden Untersuchung. Bei der nachfolgenden Bestimmung der Kapazität wird dieser Anstieg des spezifischen Flusses deshalb nicht berücksichtigt. Abbildung 5.16 zeigt die Mittelwerte und die Standardabweichungen. Die spezifische Kapazität der Anlage liegt bei  $C_s = 0,86 (\text{ms})^{-1} \pm 0,10 (\text{ms})^{-1}$ . Diese maximale Leistungsfähigkeit wird bei einer Dichte  $\rho_c = 1,44 \text{ m}^{-2}$  erreicht. Die Fundamentaldiagramme der Einzelexperimente finden sich in Anhang C.11 f.

Während für den in den Abschnitten 5.4.1 und 5.4.2 untersuchten uni- und bidirektionalen Verkehr im Korridor die Skalierungsfaktoren  $F$  bzw.  $\tilde{F}$  der Breite der Korridore und damit dem etablierten Konzept des spezifischen Flusses entsprechen, zeigen die Ergebnisse des Experiments KO, dass dieses klassische Konzept nicht unmittelbar auf den multidirektionalen Verkehr an Kreuzungen übertragen werden darf. Wie auch bei den Verkehren im Korridor zeigt sich jedoch, dass auch für den multidirektionalen Verkehr die Werte für  $F = \bar{J}/(\bar{v} \cdot \bar{\rho})$  gut durch den Näherungsansatz  $\tilde{F} = A/\bar{a}_i$  repräsentiert werden (vgl. Abbildung 5.17).



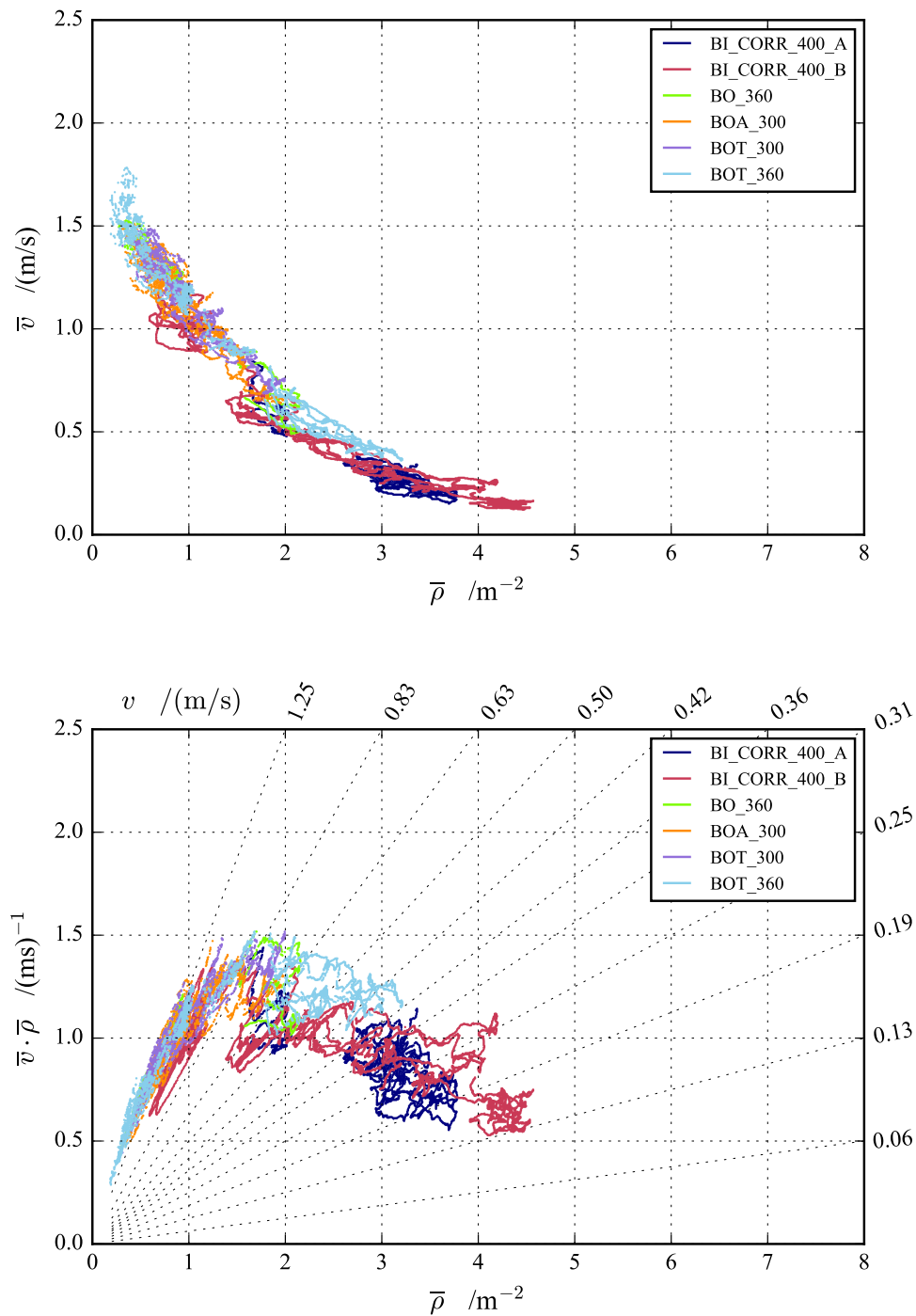


**Abb. 5.10** – Trajektorien des bidirektionalen Verkehrs im Korridor am Beispiel des BaSiGo-Experiments BI\_CORR\_400. Oben ist der Durchlauf BI\_CORR\_400\_A\_03 mit weitgehend separierten Personenströmen, unten der Durchlauf bi\_corr\_400\_b\_07 mit einem großen Maß an Durchmischung der Ströme dargestellt.

Bei geringen Dichten bis etwa  $\bar{\rho} \leq 0,50 \text{ m}^{-2}$  zeigen die Daten der Skalierungsfaktoren für beide Experimente (KO\_240 und KO\_300 werden zusammenfassend als KO\_ALL bezeichnet) einen weitgehend identischen Verlauf. Hier haben die Personen noch die Möglichkeit, den kürzesten Weg über die Messfläche zu wählen und aus den kleinen  $\bar{a}_i$ -Werten, den in Luftlinie gemessenen Abständen zwischen den Punkten, an denen die Personen die Messfläche betreten und wieder verlassen haben, resultieren hohe Skalierungsfaktoren. Sobald die Dichte den Wert von  $\bar{\rho} \approx 0,50 \text{ m}^{-2}$  überschreitet, können die Personen nicht mehr den kürzesten Weg wählen. Sie sind gezwungen, die ihnen zur Verfügung stehende Wegbreite auszunutzen. Damit separieren sich auch die Daten der beiden Experimente. Der Skalierungsfaktor für das Experiment KO\_240 scheint ab einer Dichte von  $\bar{\rho} \approx 2,0 \text{ m}^{-2}$  einen konstanten Wert von  $J/J_s \approx 4,0 \text{ m}$  anzunehmen. Das Mittel der  $\bar{a}_i$ -Werte beträgt etwa:

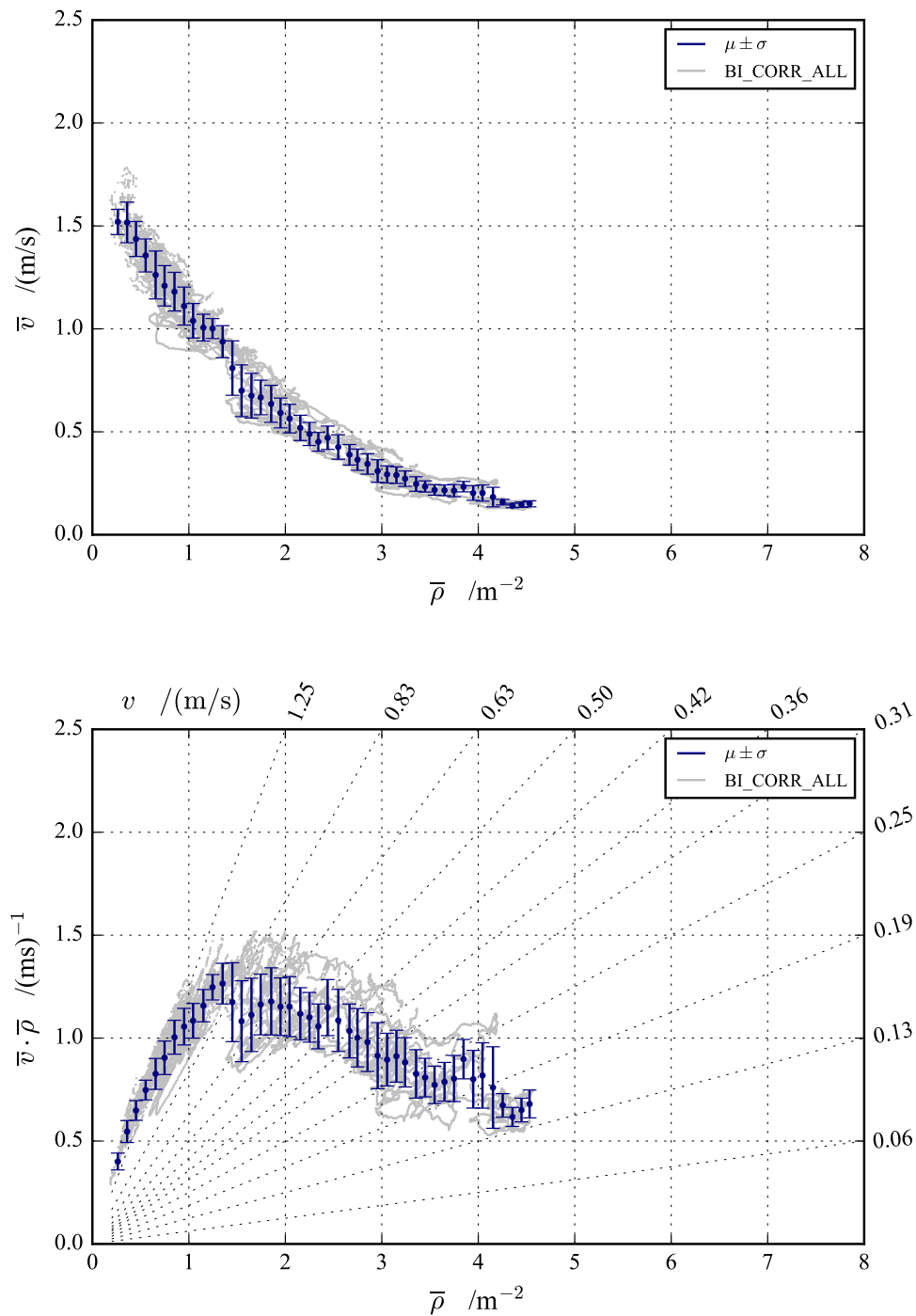
$$\begin{aligned} \tilde{F} &= \frac{A}{\bar{a}_i} \\ 4,0 \text{ m} &= \frac{2,4 \text{ m} \cdot 2,4 \text{ m}}{\bar{a}_i} \\ \bar{a}_i &= 1,44 \text{ m} \end{aligned} \quad (5.1)$$

Der Skalierungsfaktor für das Experiment KO\_300 nimmt etwas größere Werte an. Da für Dichten ab

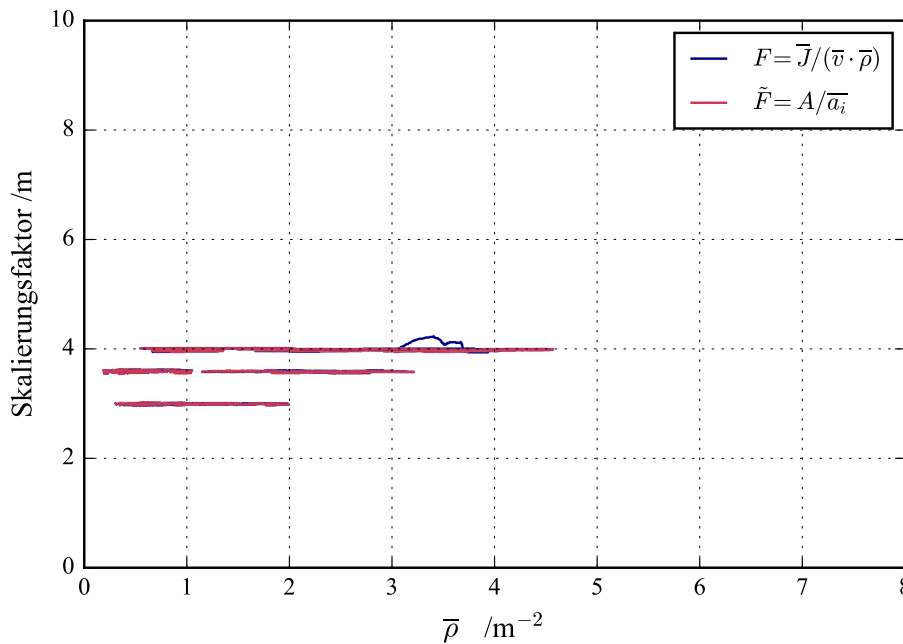


**Abb. 5.11** – Fundamentaldiagramme für den bidirektionalen Verkehr im Korridor. Es wird das BaSiGo-Experiment BI\_CORR\_400 sowie die Hermes-Experimente BO\_360, BOA\_300, BOT\_300 und BOT\_360 berücksichtigt. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten der einzelnen Experimente. Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten der einzelnen Experimente sowie Nomogrammlinien für die zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$ . Die Diagramme der einzelnen Durchläufe finden sich in Anhang C.5 ff.





**Abb. 5.12** – Mittelwerte und Standardabweichung zu Abbildung 5.11 bei Längen der Dichteintervalle von  $\Delta\rho = 0,1 \text{ m}^{-2}$ . Als „BI\_CORR\_ALL“ werden die Daten der in Abbildung 5.11 genannten BaSiGo- und Hermes-Experimente zusammengefasst. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten aller Experimente sowie dem Mittelwert  $\mu$  und der Standardabweichung  $\sigma_v$ . Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten aller Experimente sowie dem Mittelwert  $\mu$ , der Standardabweichung  $\sigma_{J_s}$  sowie Nomogrammlinien für die Geschwindigkeiten  $v$ .



**Abb. 5.13** – Skalierungsfaktoren  $F$  bzw.  $\tilde{F}$  als Funktion der mittleren Dichte  $\bar{\rho}$  für den bidirektionalen Verkehr im Korridor. Deutlich zu erkennen sind die drei konstanten Linien, die den Breiten der Korridore (4,0 m, 3,6 m und 3,0 m) entsprechen. Da sich die Daten der beiden Berechnungsformen weitgehend überlagern werden in Anhang D.2 auch die jeweiligen Daten separat gezeigt.

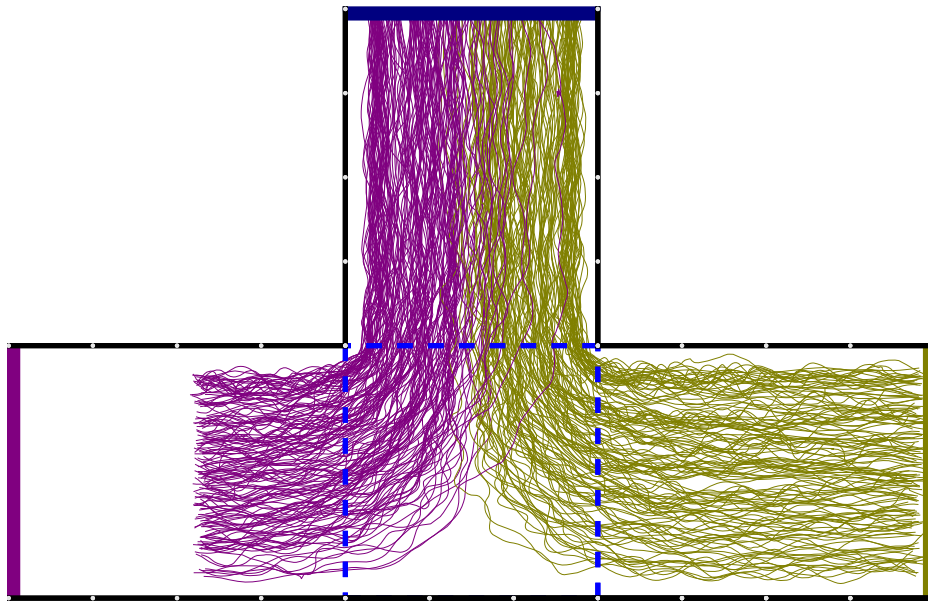
etwa  $\bar{\rho} = 2,2 \text{ m}^{-2}$  keine Messergebnisse mehr vorliegen, stellt sich jedoch noch kein konstanter Wert ein. Unter der Annahme, dass der konstante Wert bei etwa  $J/J_s \approx 5,0$  erreicht wird, ergibt sich mit  $A = 3,0 \text{ m} \cdot 3,0 \text{ m}$  das Mittel der  $\bar{a}_i$ -Werte von 1,80 m.

#### 5.4.4 Multidirektional genutzte Kreuzung mit vier Zugängen

An dieser Stelle soll zunächst die Kreuzung mit vier Zugängen (Strukturtypen d und e nach Abbildung 5.2) analysiert werden, in Abschnitt 5.4.5 schließt sich die Analyse der Kreuzung mit drei Zugängen (Strukturtyp h) an.

Für die multidirektional genutzte Kreuzung mit vier Zugängen wird das BaSiGo-Experiment CROSSING\_90 in den Varianten A bis G analysiert. Die Breite der Zugänge beträgt 4,0 m. Bei allen Varianten des Experiments CROSSING\_90 erhielten die Probanden die Anweisung, die Kreuzung auf über den Ihrem Zugang gegenüberliegenden Ausgang zu verlassen. Bei den Varianten B, E und G wurden sie durch das aus dem Straßenverkehr bekannte Verkehrszeichen aufgefordert, einen Kreisverkehr zu bilden. In den Varianten C und F wurde diese Aufforderung noch durch eine Säule ( $\varnothing$  0,60 m) im Zentrum der Kreuzung unterstützt. Der Versuchsaufbau sowie die Konfigurationen der einzelnen Durchläufe werden auf Seite 53 ff. ausführlich beschrieben. Abbildung 5.18 zeigt beispielhaft die Trajektorien für das Experiment CROSSING\_90 in den Durchläufen D\_06, F\_03 und G\_03.

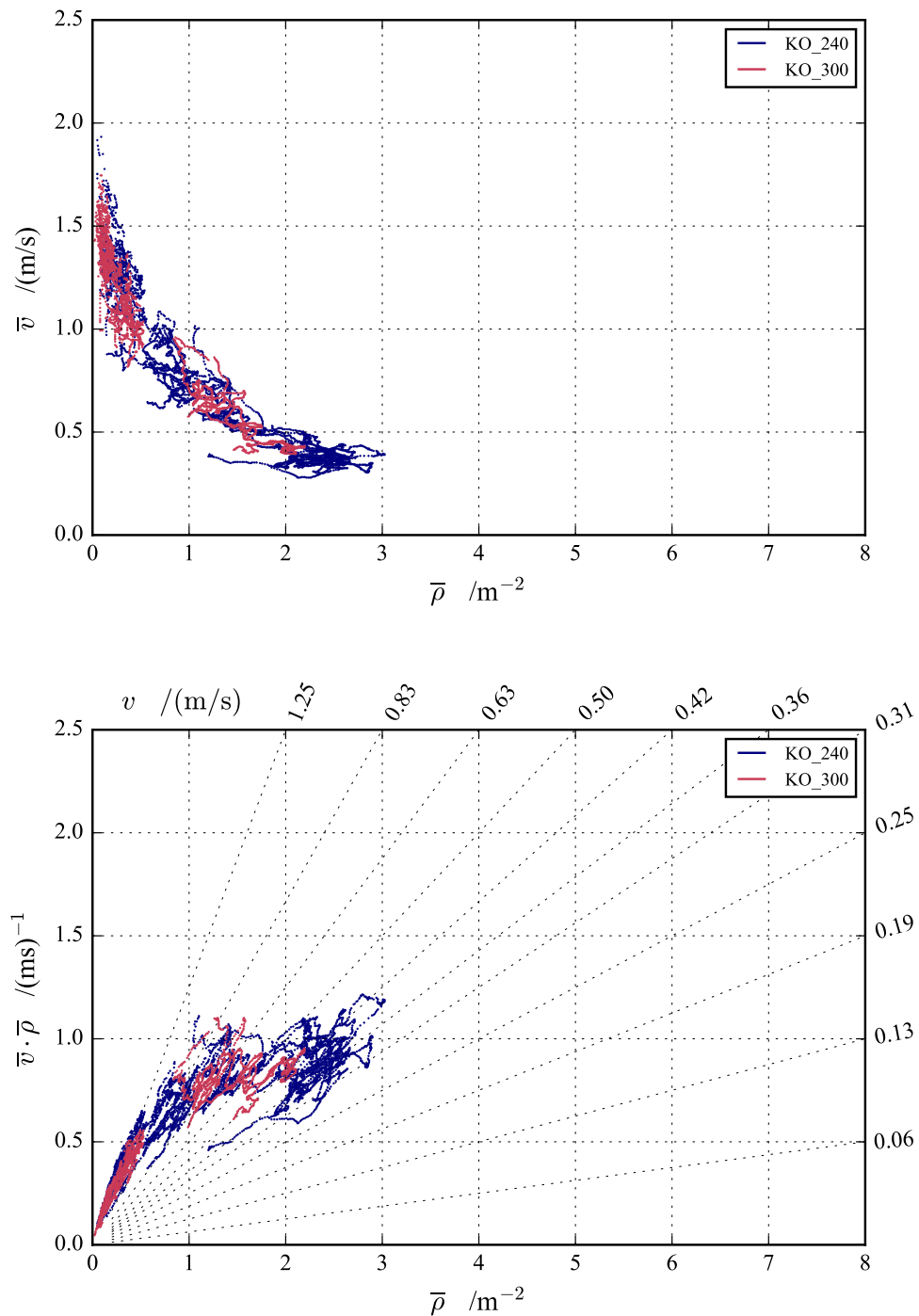
In Abbildung 5.19 sind die Fundamentaldiagramme  $\bar{v}(\bar{\rho})$  sowie  $J_s(\bar{\rho})$  dargestellt. Der spezifische Fluss wird auch hier als Produkt der mittleren Geschwindigkeit  $\bar{v}$  und der mittleren Dichte  $\bar{\rho}$  berechnet. Die Daten zeigen keine signifikanten Unterschiede bei den Varianten des Experiments. Sowohl



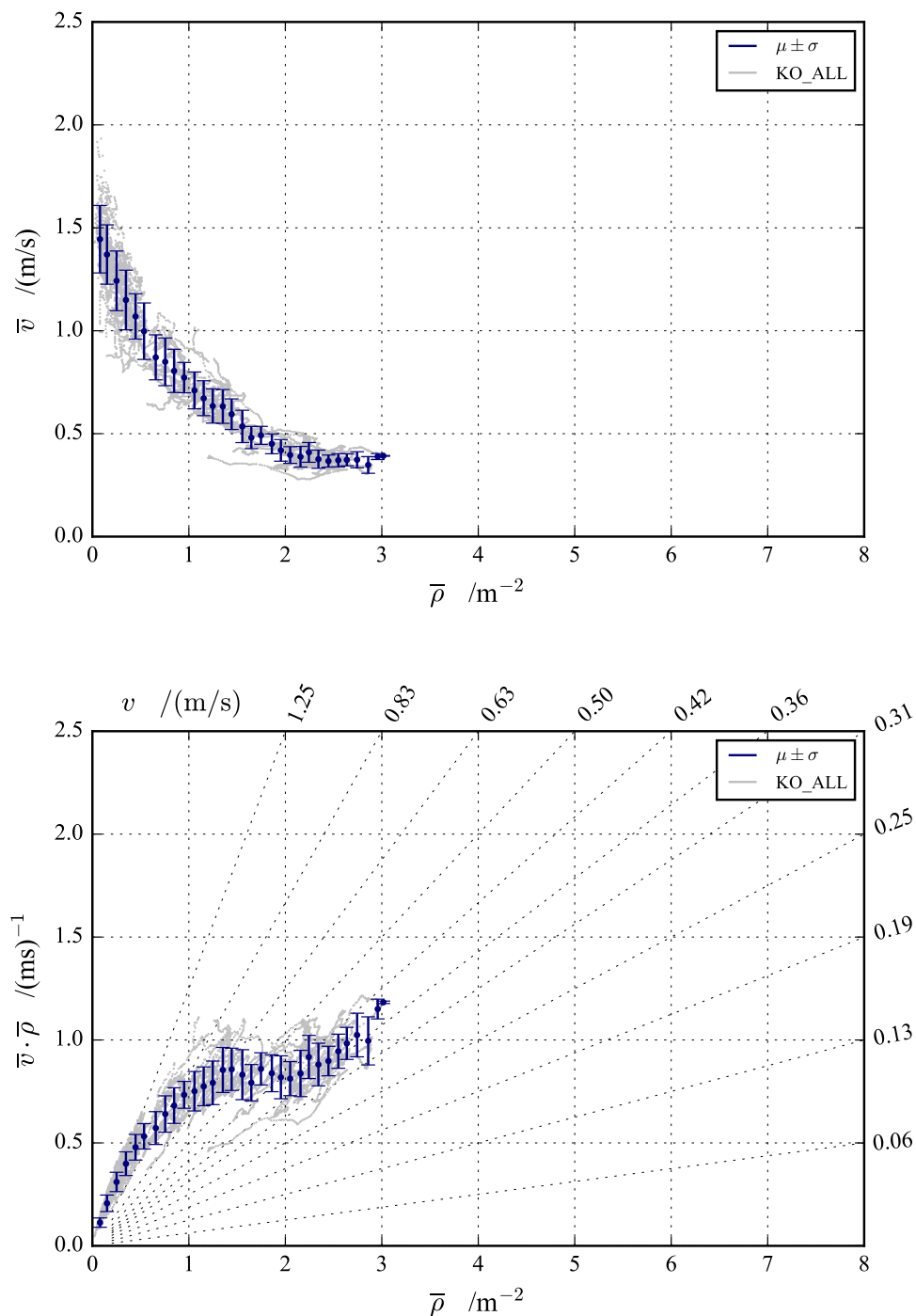
**Abb. 5.14** – Trajektorien der T-Kreuzung mit zusammenfließenden Personenströmen am Beispiel des Durchlaufs ko-300-150-300. Die blau gestrichelte Linie zeigt die Messfläche, auf der die Untersuchungen durchgeführt wurden.

für die Anzahl der genutzten Zugänge (zwei Zugänge in den Varianten D und E, vier Zugänge in allen anderen Varianten) als auch für die Säule im Zentrum der Kreuzung (Varianten C und F) ist in den Fundamentaldiagrammen kein entscheidender Einfluss auf das Fundamentaldiagramm und damit auch nicht auf die spezifische Kapazität der Anlage zu erkennen. Auffällig sind die hohen Personendichten von bis zu sieben Personen pro Quadratmeter. Abbildung 5.20 zeigt die Mittelwerte und die Standardabweichungen. Wie bereits bei der Analyse des Experiments KO\_240 festgestellt, deutet sich auch in den Daten des Experiments CROSSING\_90 ab einer Dichte von  $\bar{\rho} = 2,0 \text{ m}^{-2}$  ein leichter zweiter Anstieg des Personenflusses an. Die Ursache für diese „Optimierung innerhalb des Personenstroms“ bedarf einer ergänzenden Untersuchung. Im Rahmen dieser Arbeit wird die spezifische Kapazität der Anlage an der Stelle des Fundamentaldiagramms definiert, an welcher der Personenfluss erstmals in ein Plateau übergeht:  $C_s = 0,94 (\text{ms})^{-1} \pm 0,11 (\text{ms})^{-1}$ . Diese Leistungsfähigkeit wird bei einer Dichte  $\rho_c = 1,05 \text{ m}^{-2}$  erreicht. Die Fundamentaldiagramme der Einzelexperimente finden sich in Anhang C.13 ff.

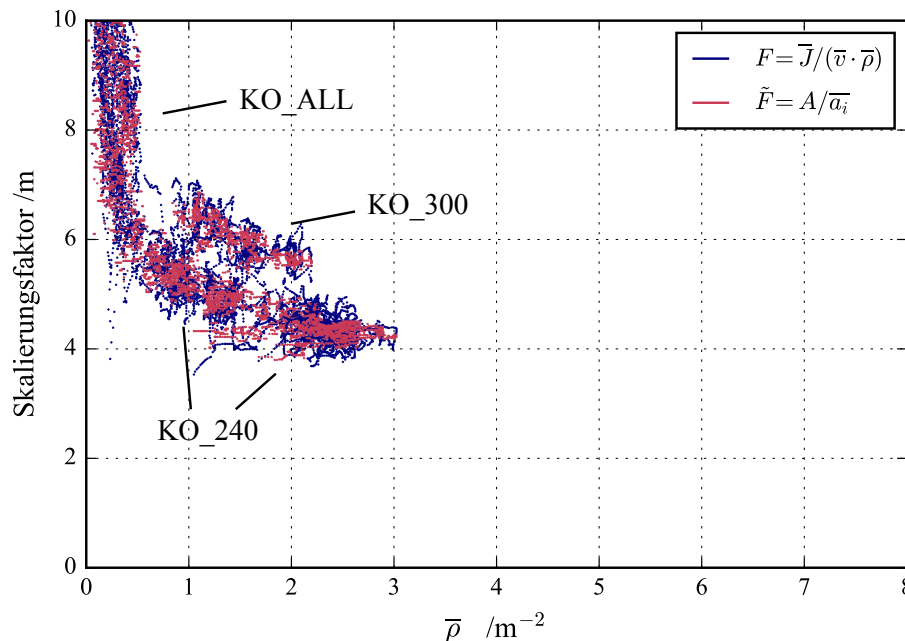
Der minimal mögliche Wert des Skalierungsfaktors ergibt sich gemäß der Grenzwertbetrachtung nach Gleichung 4.16 als  $\tilde{F}_{min}(A_{\square}) = 3,20 \text{ m}$ . Dieser Wert würde voraussetzen, dass alle Personen den längsten, fünf Meter langen, in Luftlinie gemessenen Weg über die Kreuzung nehmen (vgl. Abbildung 4.3). Das tatsächliche Mittel der  $\bar{a}_i$ -Werte ist jedoch deutlich kürzer. Infolge der Anweisung an die Probanden, die Kreuzung über den Ihrem Zugang gegenüberliegenden Ausgang zu verlassen, entsprechen die  $\bar{a}_i$ -Werte bei einem Großteil der Probanden etwa 4,0 m. Kleine Abweichungen von der Hauptrichtung haben dabei nur einen geringen Einfluss auf den  $\bar{a}_i$ -Wert: bei einer „Verschiebung“ von einem Meter zwischen den Punkten, an denen eine Person die Messfläche betritt und wieder verlässt, berechnet sich der  $\bar{a}_i$ -Wert als  $\bar{a}_i = \sqrt{4^2 + 1^2} \text{ m} = 4,12 \text{ m}$ . Für diesen Fall ergibt sich der Skalierungsfaktor  $\tilde{F}$  als



**Abb. 5.15** – Fundamentaldiagramme für die T-Kreuzung. Es werden die Hermes-Experimente KO\_240 und KO\_300 berücksichtigt. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten der einzelnen Experimente. Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten der einzelnen Experimente sowie Nomogrammlinien für die zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$ . Die Diagramme der einzelnen Durchläufe finden sich in Anhang C.11 f.



**Abb. 5.16** – Mittelwerte und Standardabweichung zu Abbildung 5.15 bei Längen der Dichteintervalle von  $\Delta\rho = 0,1\text{m}^{-2}$ . Als „KO\_ALL“ werden die Daten der Hermes-Experimente KO\_240 und KO\_300 zusammengefasst. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten aller Experimente sowie dem Mittelwert  $\mu$  und der Standardabweichung  $\sigma_v$ . Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten aller Experimente sowie dem Mittelwert  $\mu$ , der Standardabweichung  $\sigma_{J_s}$  sowie Nomogrammlinien für die Geschwindigkeiten  $v$ .



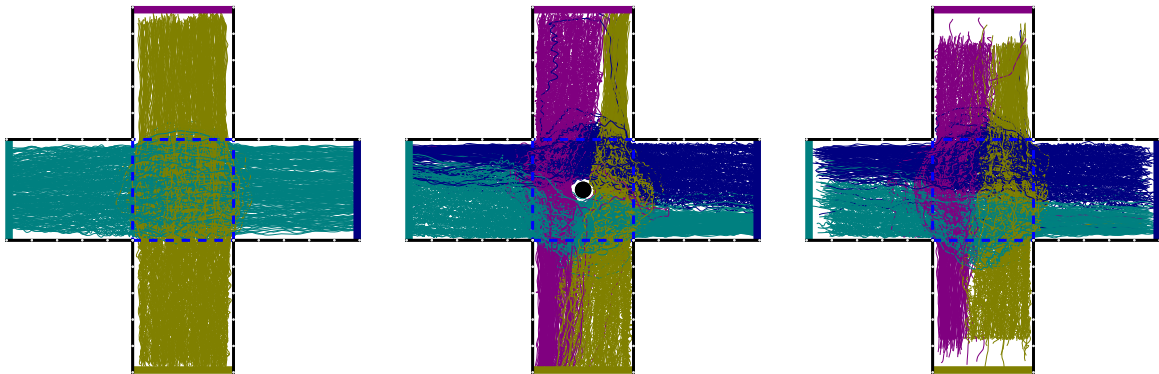
**Abb. 5.17** – Skalierungsfaktoren  $F$  bzw.  $\tilde{F}$  als Funktion der mittleren Dichte  $\bar{\rho}$  für die T-Kreuzung mit zusammenfließenden Personenströmen. Die Eintragungen (KO\_ALL, KO\_240 und KO\_300) veranschaulichen die Herkunft der Datenpunkte. Bei geringen Dichten zeigen die Daten beider Experimente (KO\_ALL = KO\_240 + KO\_300) einen identischen Verlauf. Ab einer Dichte von  $\bar{\rho} \approx 0,50 \text{ m}^{-2}$  separieren sich die Daten der beiden Experimente. Wie auch beim uni- und bidirektionalen Verkehr zeigt sich, dass der Skalierungsfaktor gut durch den Näherungsansatz  $\tilde{F} = A/\bar{a}_i$  repräsentiert wird. In Anhang D.3 werden die Diagramme der beiden Experimente separat dargestellt.

$$\tilde{F} = \frac{A}{\bar{a}_i} = \frac{4,0 \text{ m} \cdot 4,0 \text{ m}}{4,12 \text{ m}} = 3,88 \text{ m} \quad (5.2)$$

Abbildung 5.21 bestätigt diese Berechnung: die Skalierungsfaktoren zeigen eine untere Schranke bei etwa  $J/J_s = 4,0 \text{ m}$ . Auffällig sind die mit zunehmender Dichte anwachsenden Streuungen oberhalb dieses Wertes. Diese resultieren aus Personen, die sich nicht an die Anweisungen gehalten und die Kreuzung rechtwinklig zu ihrer Soll-Richtung verlassen haben. Auch wenn im Bereich dieser Streuungen Abweichungen zwischen  $F = \bar{J}/(\bar{v} \cdot \bar{\rho})$  und  $\tilde{F} = A/\bar{a}_i$  zu erkennen sind, zeigt sich der Näherungsansatz  $\tilde{F}$  auch für die multidirektional genutzte Kreuzung mit vier Zugängen geeignet, den Skalierungsfaktor zu repräsentieren.

#### 5.4.5 Multidirektional genutzte Kreuzung mit drei Zugängen

Für die multidirektional genutzte Kreuzung mit drei Zugängen wird das BaSiGo-Experiment CROSSING\_120 in den Varianten A, B und C analysiert. Die Breite der Zugänge beträgt 4,0 m, so dass die Messfläche im Zentrum der Kreuzung  $6,93 \text{ m}^2$  groß ist. Abbildung 5.22 zeigt beispielhaft die Trajektorien für das Experiment CROSSING\_120 in den Durchläufen A\_01, A\_03 und C\_02. Die Probanden wurden aufgefordert, die ihrem Merkmal (gerade/ungerade Kappenummer bzw. gelbes/rotes



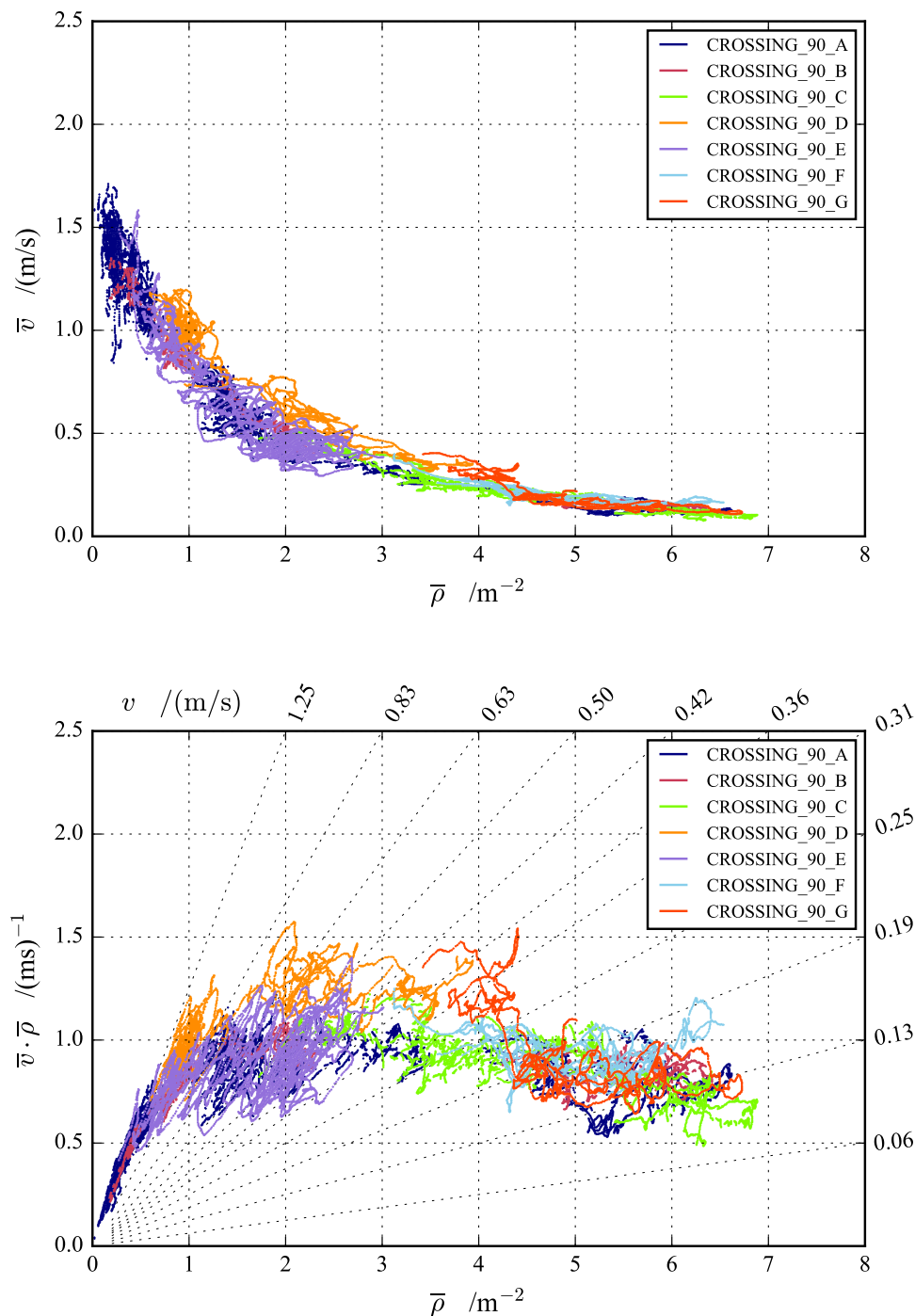
**Abb. 5.18** – Trajektorien des multidirektionalen Verkehrs in der Kreuzung mit vier Zugängen. Links: Durchlauf CROSSING\_90\_D\_06 mit zwei eingehenden Personenströmen. Mitte: Durchlauf CROSSING\_90\_F\_03 mit vier eingehenden Personenströmen und Säule im Zentrum der Kreuzung. Rechts: Durchlauf CROSSING\_90\_G\_03 mit vier eingehenden Personenströmen.

Armband) zugewiesene Richtung zu wählen, so dass sich die Personen eines Zugangs etwa zur Hälfte nach links und rechts orientiert haben. Ausnahme hiervon bildet der Durchlauf A\_01 (vgl. Abbildung 5.22). Bei der Variante B wurden die Probanden durch das aus dem Straßenverkehr bekannte Verkehrszeichen aufgefordert, einen Kreisverkehr zu bilden, in Variante C wurde diese Aufforderung zusätzlich durch eine Säule ( $\varnothing$  0,60 m) im Zentrum der Kreuzung unterstützt. Der Versuchsaufbau sowie die Konfigurationen der einzelnen Durchläufe werden auf Seite 55 ff. ausführlich beschrieben.

In Abbildung 5.23 sind die Fundamentaldiagramme  $\bar{v}(\bar{\rho})$  sowie  $J_s(\bar{\rho})$  dargestellt. Der spezifische Fluss wird auch hier als Produkt der mittleren Geschwindigkeit  $\bar{v}$  und der mittleren Dichte  $\bar{\rho}$  berechnet. Ebenso wie beim Experiment CROSSING\_90 zeigen die Daten keine signifikanten Unterschiede bei den Varianten des Experiments. In Durchlauf C werden Personendichten von mehr als acht Personen pro Quadratmeter erreicht. Abbildung 5.24 zeigt die Mittelwerte und die Standardabweichungen. Die Abnahme und der anschließende Wiederanstieg des Personenflusses bei einer Dichte von  $\bar{\rho} \approx 1,5 \text{ m}^{-2}$  kann auf den bereits bei den Experimenten KO\_240 und CROSSING\_90 festgestellten Effekt zurückzuführen sein. Für das Experiment CROSSING\_120 wurden in diesem Bereich aber nur sehr wenige Daten erhoben, so dass der scheinbare Abfall des Personenflusses auch hierauf zurückzuführen sein kann. Die spezifische Kapazität der Anlage liegt bei  $C_s = 1,01 (\text{ms})^{-1} \pm 0,07 (\text{ms})^{-1}$ . Diese maximale Leistungsfähigkeit wird bei einer Dichte  $\rho_c = 1,13 \text{ m}^{-2}$  erreicht. Die Fundamentaldiagramme der Einzelexperimente finden sich in Anhang C.20 ff.

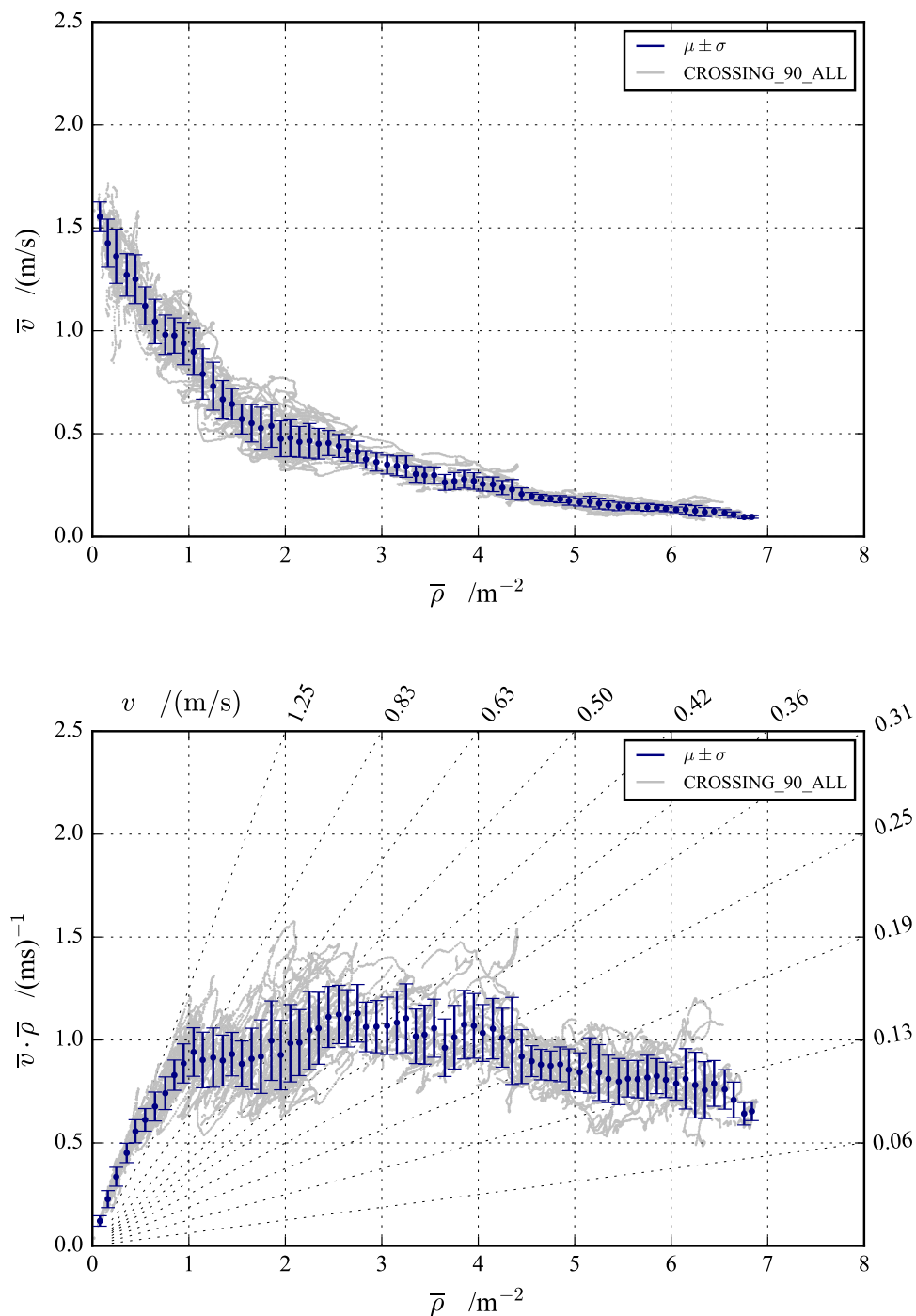
Abbildung 5.25 zeigt die Skalierungsfaktoren für die Kreuzung mit drei Zugängen. Zur Veranschaulichung der Unterschiede zwischen der Variante A und den Varianten B und C werden zwei separate Diagramme ausgegeben. Bei der Variante A erhielten die Personen die Möglichkeit, kurze Wege über die Messfläche zu nehmen. Aus diesen kurzen Wegen resultiert ein kleiner Mittelwert der  $a_i$ -Werte und damit ein entsprechend hoher Skalierungsfaktor. Ab einer Dichte von etwa  $\bar{\rho} = 1,0 \text{ m}^{-2}$  nimmt der Skalierungsfaktor  $\tilde{F}$  Werte zwischen etwa 4,3 m und 6,3 m an. Bei den Varianten B und C wurden die Probanden aufgefordert (Variante B) bzw. durch die Säule „gezwungen“ (Variante C) einen Kreisverkehr um das Zentrum der Kreuzung herum auszubilden. Die in Luftlinie gemessenen kürzesten Wege standen damit nicht bzw. nur mit einer zusätzlichen Verlängerung des Weges zur Verfügung. Aus den größeren  $a_i$ -Werten resultieren kleinere Skalierungsfaktoren als in Variante A. Unabhängig von der Dichte nimmt der Skalierungsfaktor  $\tilde{F}$  Werte zwischen etwa 3,0 m und 4,3 m an. Der Nähe-



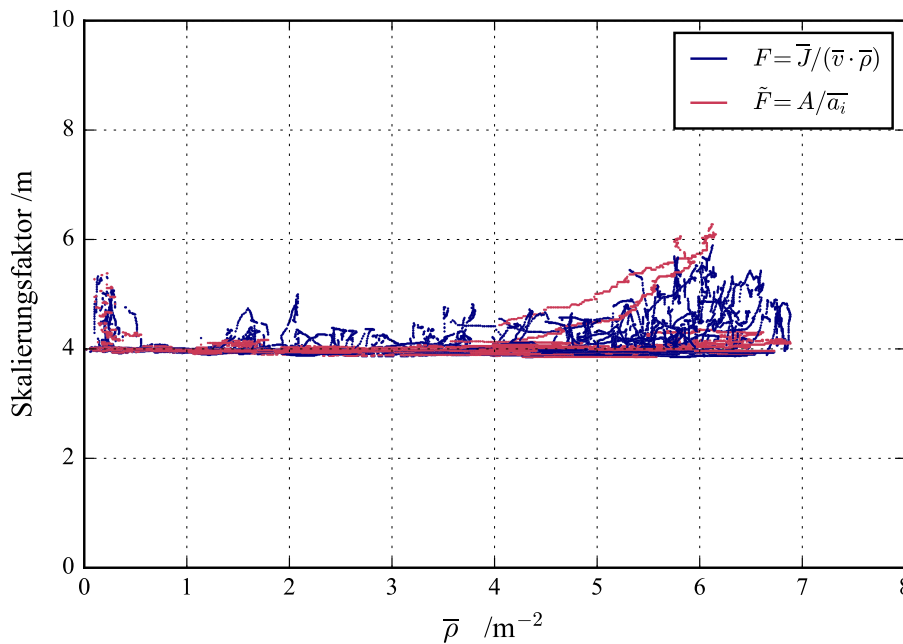


**Abb. 5.19** – Fundamentaldiagramme für die multidirektional genutzte Kreuzung mit vier Zugängen. Es wird das BaSiGo-Experiment CROSSING\_90 in den Varianten A bis G berücksichtigt. Bei den Varianten C und F stand eine Säule im Zentrum der Kreuzung. Bei den Varianten D und E betraten die Personen die Kreuzung nur über zwei, bei allen anderen Varianten über vier Zugänge. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten der einzelnen Experimente. Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten der einzelnen Experimente sowie Nomogrammlinien für die zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$ . Die Diagramme der einzelnen Durchläufe finden sich in Anhang C.13 ff.





**Abb. 5.20** – Mittelwerte und Standardabweichung zu Abbildung 5.19 bei Längen der Dichteintervalle von  $\Delta\rho = 0,1 \text{ m}^{-2}$ . Als „CROSSING\_90\_ALL“ werden die Daten der in Abbildung 5.19 genannten Experimente zusammengefasst. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten aller Experimente sowie dem Mittelwert  $\mu$  und der Standardabweichung  $\sigma_v$ . Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten aller Experimente sowie dem Mittelwert  $\mu$ , der Standardabweichung  $\sigma_{J_s}$  sowie Nomogrammlinien für die Geschwindigkeiten  $v$ .



**Abb. 5.21** – Skalierungsfaktoren  $F$  bzw.  $\tilde{F}$  als Funktion der mittleren Dichte  $\bar{\rho}$  für die multidirektional genutzte Kreuzung mit vier Zugängen. Die Skalierungsfaktoren zeigen eine untere Schranke bei etwa  $F = 4,0m$ . Die mit zunehmender Dichte anwachsenden Streuungen oberhalb dieses Wertes resultieren aus Personen, die sich nicht an die Anweisungen gehalten und die Kreuzung rechtwinklig zu ihrer Soll-Richtung verlassen haben. Der Näherungsansatz  $\tilde{F} = A/\bar{a}_i$  zeigt sich auch für die multidirektional genutzte Kreuzung mit vier Zugängen geeignet, den Skalierungsfaktor zu repräsentieren.

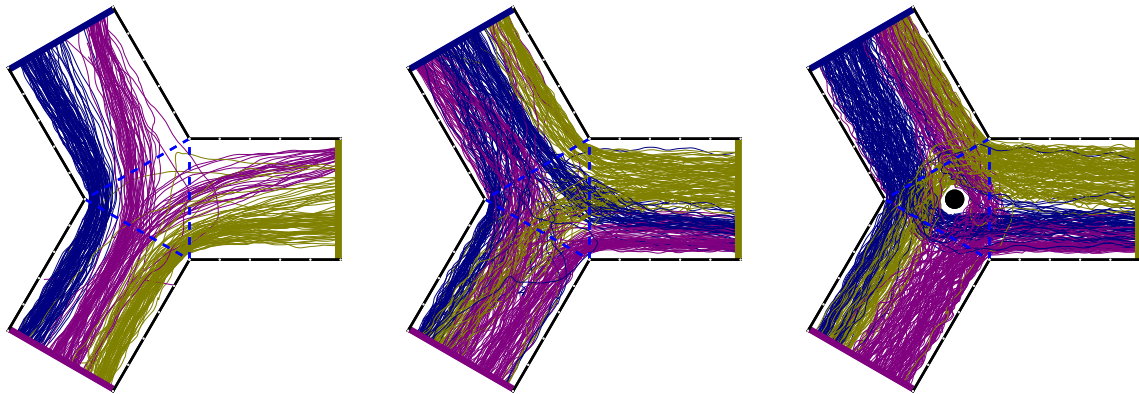
rungsansatz  $\tilde{F}$  zeigt für alle Varianten eine gegenüber  $F = \bar{J}/(\bar{v} \cdot \bar{\rho})$  reduzierte Streuung und scheint auch hier geeignet, den Skalierungsfaktor zu repräsentieren.

## 5.5 Indikatoren der Konfliktdichte

### 5.5.1 Streuung der Geschwindigkeiten

Zur Quantifizierung der Konfliktdichte wird zunächst die Standardabweichung  $\sigma_v$  der Funktion  $\bar{v}(\bar{\rho})$  betrachtet. Die methodische Beschreibung findet sich in Abschnitt 4.2.1. Für die in Abschnitt 5.4 untersuchten Experimente werden die Fundamentaldiagramme mit Eintrag der Standardabweichungen  $\sigma_v$  und  $\sigma_{J_s}$  bereits in den Abbildungen 5.8, 5.12, 5.16, 5.20 und 5.24 gezeigt. In Abbildung 5.26 werden die Standardabweichungen  $\sigma_v$  der verschiedenen Anlagen nun vergleichend nebeneinander gestellt.

Der von Alrutz et al. [3] genannte Wert von  $\sigma_v = 0,40$  m/s als Obergrenze für den gebundenen Verkehr (vgl. Abschnitt 4.2.1) wird in den Experimenten bei Weitem nicht erreicht: die maximale Standardabweichung in den Experimenten beträgt  $\sigma_v \approx 0,20$  m/s. Für die mit den spezifischen Kapazitäten korrespondierenden Dichten  $\rho_C$ , entsprechend den Auswertungen in Abschnitt 5.4 liegen diese zwischen  $\rho_C = 1,05$  m<sup>-2</sup> (CROSSING\_90\_ALL) und  $\rho_C = 1,64$  m<sup>-2</sup> (UNI\_CORR\_ALL), wird eine mittlere Standardabweichung von etwa  $\sigma_v = 0,08$  m/s gemessen. Ursache für die im Vergleich zu



**Abb. 5.22** – Trajektorien des multidirektionalen Verkehrs in der Kreuzung mit drei Zugängen. Links: Durchlauf CROSSING\_120\_A\_01, der einzige Durchlauf, in welchem sich nicht alle eingehenden Ströme auf die gegenüberliegenden Ausgänge verteilt haben. Mitte: Durchlauf CROSSING\_120\_A\_03. Rechts: Durchlauf CROSSING\_120\_C\_02 mit Säule.

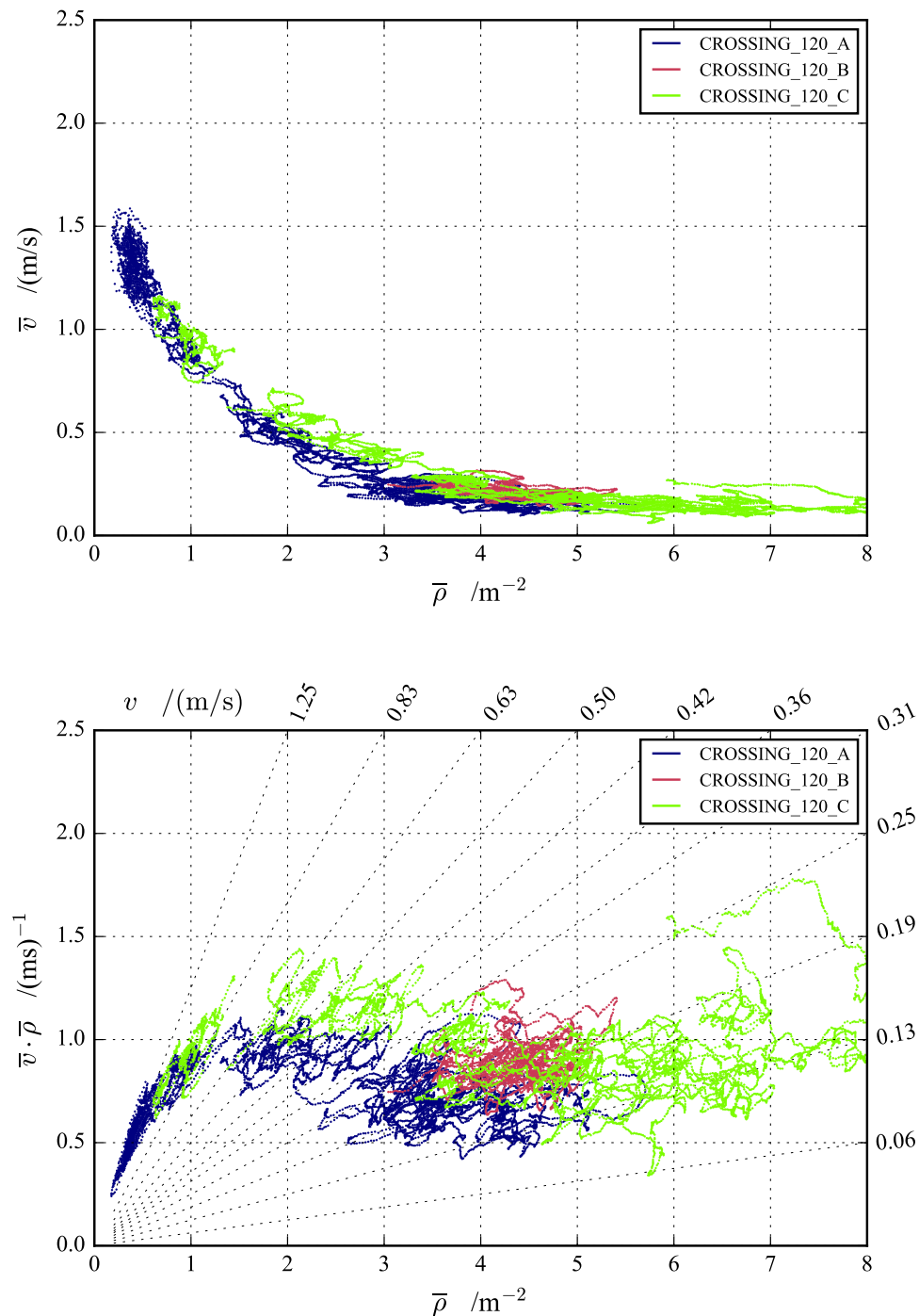
Alrutz et al. deutlich geringere Standardabweichung können die Laborbedingungen sein, unter denen die hier untersuchten Experimente durchgeführt wurden. Auch Oeding [78, S. 8] stellt bei seinen Laborexperimente mit homogenen Fußgängerströmen höhere Leistungen als in der Praxis fest. Die hieraus resultierenden Unsicherheiten sind bei der Interpretation der Ergebnisse in Kapitel 6 zu berücksichtigen. Alleine qualitativ kann die von Alrutz et al. formulierte These bestätigt werden: die Standardabweichung nimmt mit zunehmender Dichte ab, so dass – entsprechende weitere Untersuchungen vorausgesetzt – ggf. Grenzwerte für die Übergänge zwischen den Verkehrszuständen des Fundamentaldiagramms definiert werden können.

### 5.5.2 Beständigkeit der Nachbarschaften

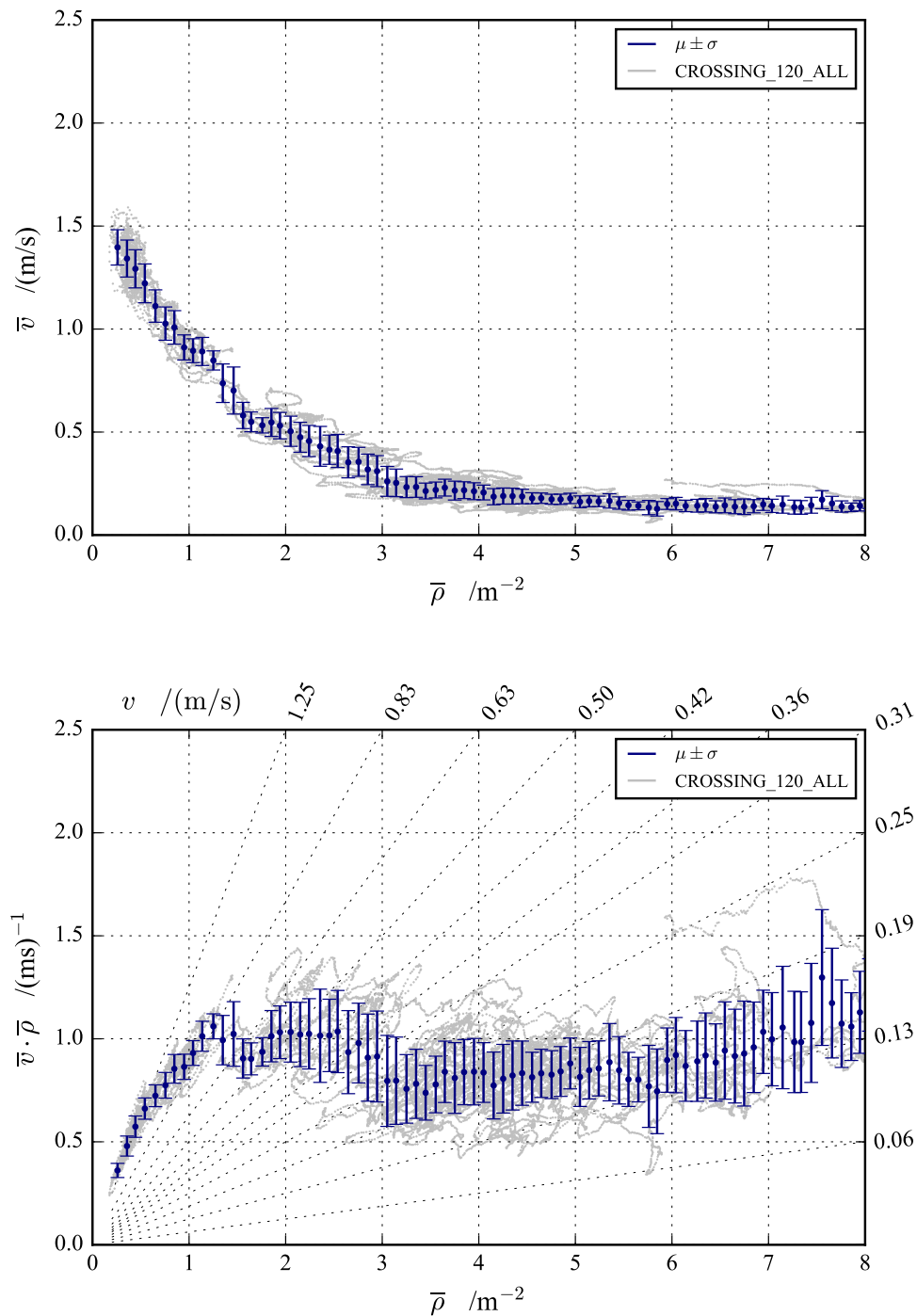
Zweiter Ansatz für die Quantifizierung der Konfliktdichte ist die Betrachtung der Nachbarschaftsänderungen. Die methodische Beschreibung findet sich in Abschnitt 4.2.2. Für den uni-, bi- und multidirektionalen Verkehr (vgl. These in Abschnitt 4.2.2 mit Abbildung 4.8) werden exemplarisch die Experimente UNI\_CORR\_ALL (vgl. Abschnitt 5.4.1), BI\_CORR\_ALL (vgl. Abschnitt 5.4.2), CROSSING\_90\_ALL (vgl. Abschnitt 5.4.4) und CROSSING\_120\_ALL (vgl. Abschnitt 5.4.5) untersucht.

Die Abbildungen 5.27 und 5.28 stellen für diese Experimente den Zusammenhang zwischen der mittleren Änderung der Nachbarschaften pro Meter Wegstrecke  $\overline{\Delta K}$  und der mittleren Dichte  $\bar{\rho}$  dar. Mit zunehmender Dichte zeigt sich ein Anstieg der Nachbarschaftsänderungen, die Steigung nimmt mit dem Grad der Durchmischung zu. Für den unidirektionalen Verkehr (Abbildung 5.27 (oben)) sind nur geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Experimenten zu erkennen. Mit zunehmender Dichte erhöht sich die Anzahl der Nachbarschaftsänderungen nur wenig.

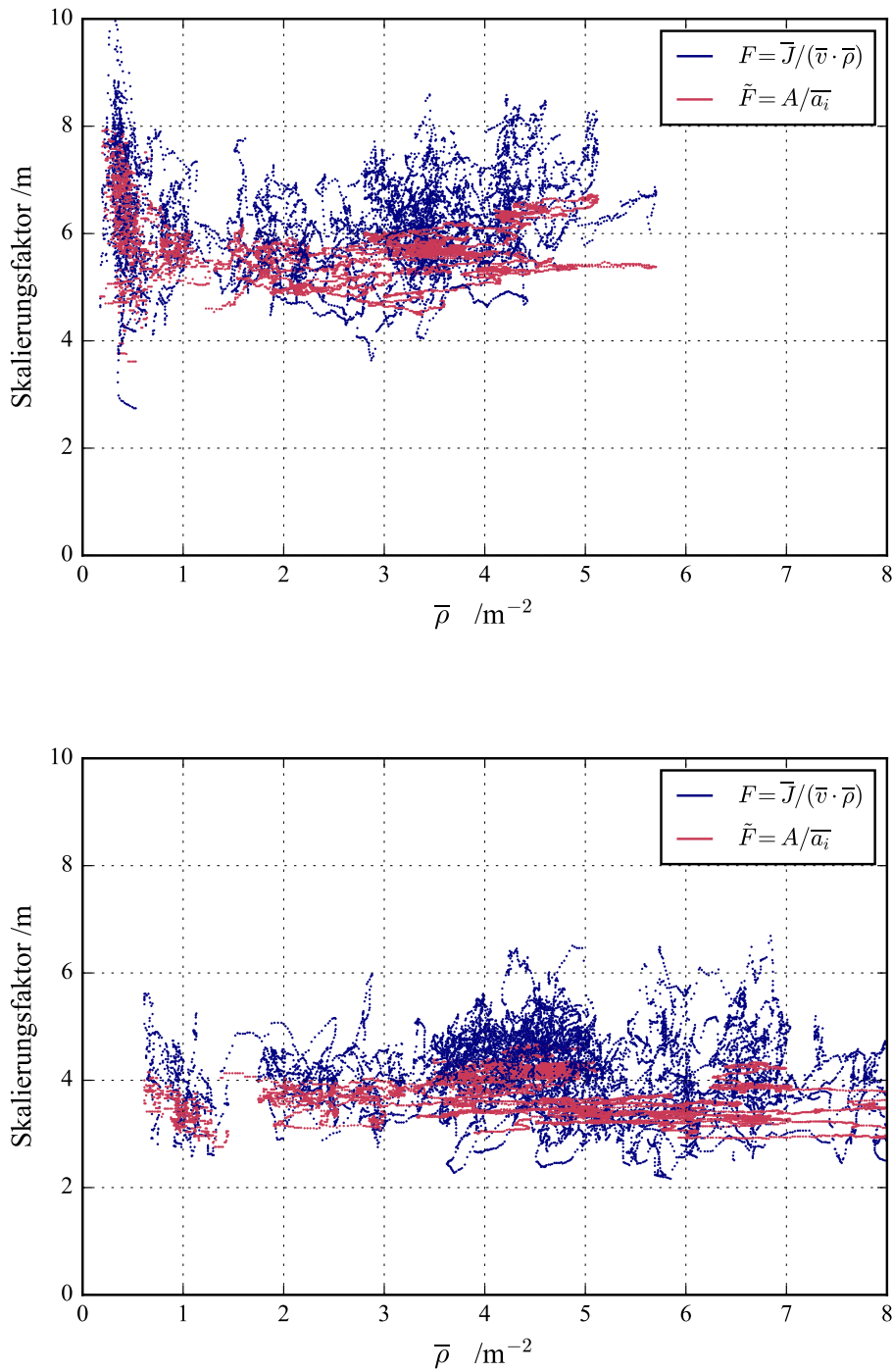
Beim bidirektionalen Verkehr (Abbildung 5.27 (unten)) zeigen sich bis zu einer Dichte von etwa  $\bar{\rho} = 2 \text{ m}^{-2}$  zwei Datenstränge: in den Experimenten BOA\_300, BOT\_300 und BOT\_360 durchmischen sich die entgegengerichteten Personenströme stark, bei den Experimenten BO\_360 und in diesem Dichtebereich auch für BI\_CORR\_400\_B gibt es eine weitgehende Separation der Ströme. Die Daten der separierten Personenströme zeigen eine ähnliche Steigung wie die des unidirektionalen Verkehrs. Mit zunehmender Durchmischung der Personenströme erhöht sich auch die Steigung: der Einfluss der Personendichte nimmt zu.



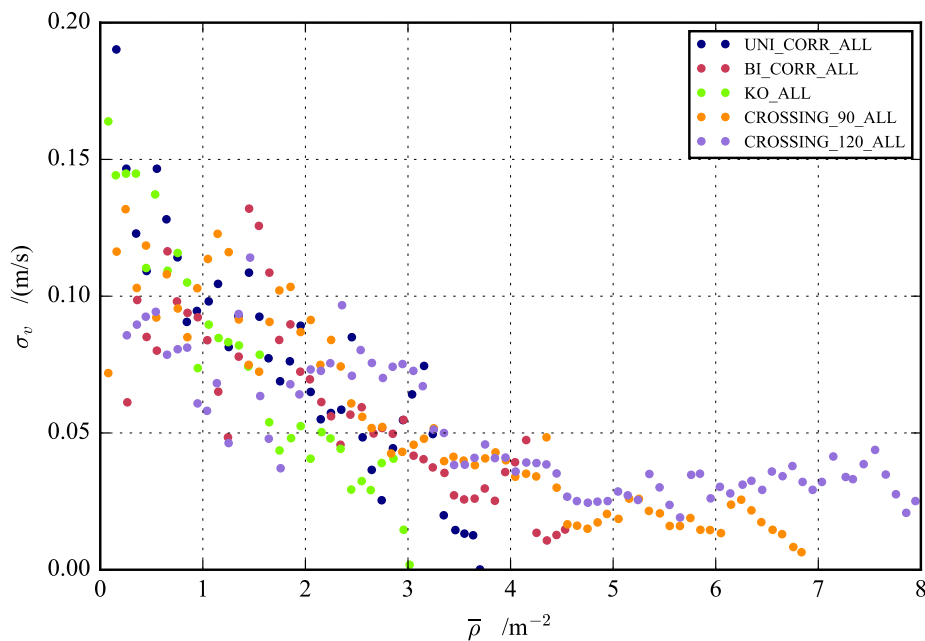
**Abb. 5.23** – Fundamentaldiagramme für die multidirektional genutzte Kreuzung mit drei Zugängen. Es wird das BaSiGo-Experiment CROSSING\_120 in den Varianten A, B (ohne Säule) sowie C (mit Säule) berücksichtigt. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten der einzelnen Experimente. Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten der einzelnen Experimente sowie Nomogrammlinien für die zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$ . Die Diagramme der einzelnen Durchläufe finden sich in Anhang C.20 ff.



**Abb. 5.24** – Mittelwerte und Standardabweichung zu Abbildung 5.23. Als „CROSSING\_120\_ALL“ werden die Daten der in Abbildung 5.23 genannten Experimente zusammengefasst. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten aller Experimente sowie dem Mittelwert  $\mu$  und der Standardabweichung  $\sigma_v$ . Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten aller Experimente sowie dem Mittelwert  $\mu$ , der Standardabweichung  $\sigma_{J_s}$  sowie Nomogrammlinien für die Geschwindigkeiten  $v$ .



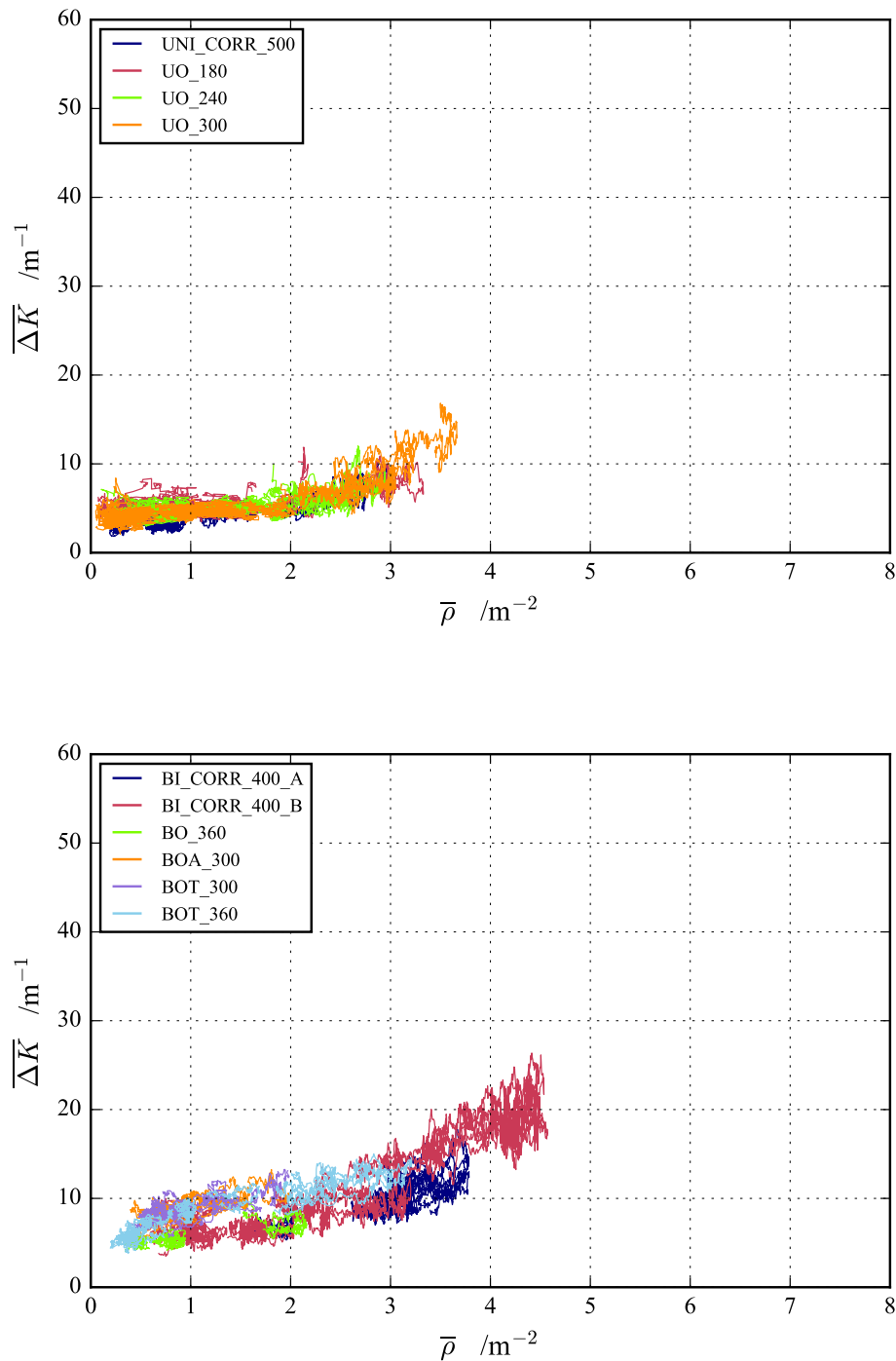
**Abb. 5.25** – Skalierungsfaktoren  $F$  bzw.  $\tilde{F}$  als Funktion der mittleren Dichte  $\bar{\rho}$  für die multidirektional genutzte Kreuzung mit drei Zugängen. Oben: Variante A, in der die Probanden die Möglichkeit hatten, kurze Wege über die Messfläche zu nehmen. Unten: Variante B und C, in denen die Probanden einen Kreisverkehr ausbildeten, so dass die in Luftlinie gemessenen kurzen Wege nur dann genommen werden konnten, wenn der tatsächliche Weg (um die Mitte/Säule der Kreuzung herum) zusätzlich verlängert wurde.



**Abb. 5.26** – Standardabweichungen  $\sigma_v$  unterschiedlicher Strukturtypen. Für alle in Abschnitt 5.4 untersuchten Anlagen gilt  $\sigma_v < 0,20\text{m/s}$ . Mit zunehmender Dichte nimmt die Standardabweichung in allen Experimenten ab. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Strukturtypen ist nicht zu erkennen.

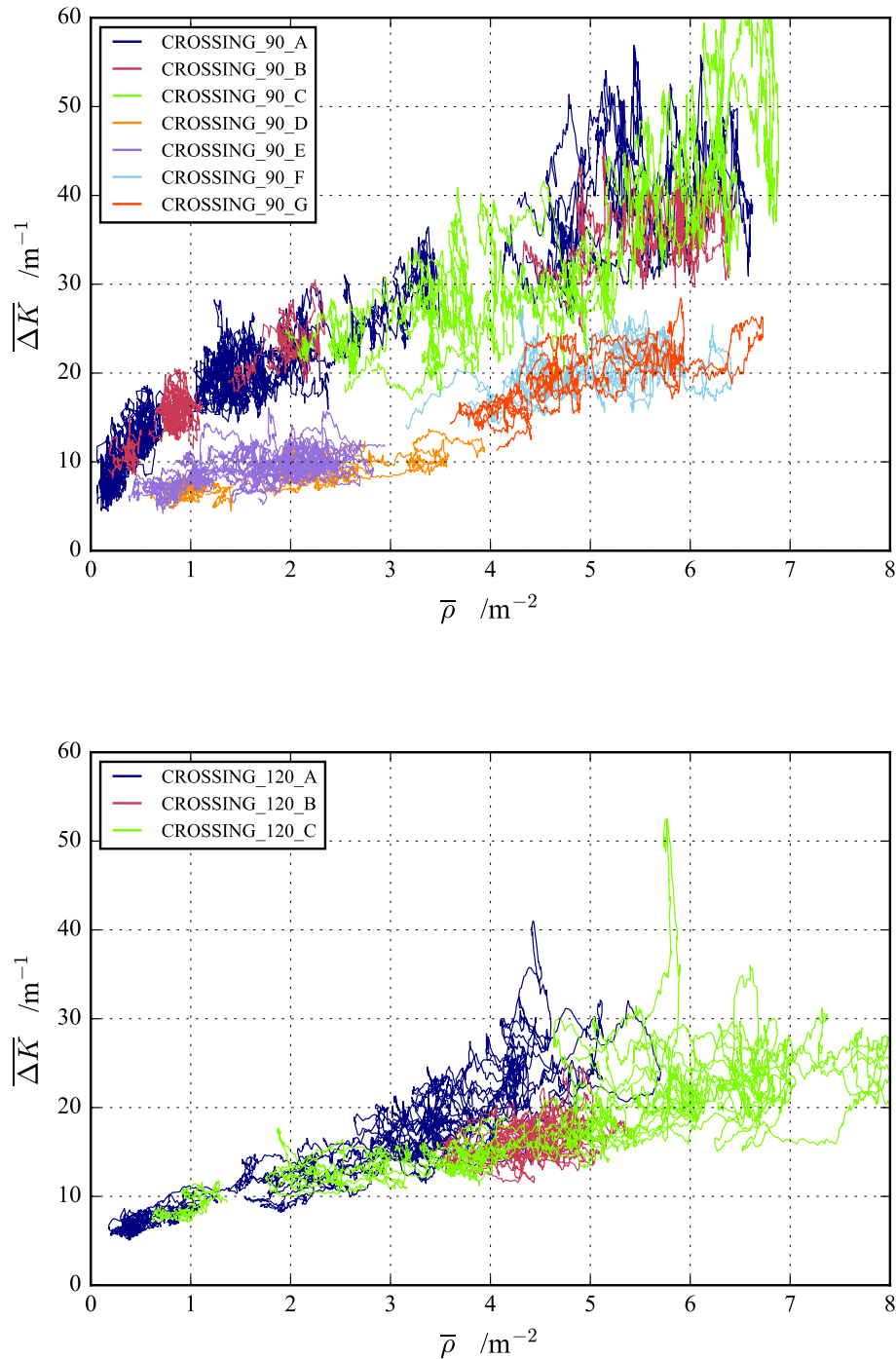
Für den multidirektionalen Verkehr (Abbildung 5.28) ist der Einfluss der richtungsbedingten Konflikte noch deutlicher zu erkennen. Die größte Steigung weisen die Daten der Experimente CROSSING\_90\_A, CROSSING\_90\_B und CROSSING\_90\_C auf. In diesen Experimenten betraten die Personen die Kreuzung über alle vier Zugänge, so dass die Anzahl der zu lösenden Konflikte im Zentrum der Kreuzung sehr hoch war. Eine deutlich geringere Steigung zeigen die Daten der Experimente CROSSING\_90\_D und CROSSING\_90\_E. Dies waren die einzigen Experimente, in denen Personen nur über zwei Zugänge in die Kreuzung kamen. Auffällig sind jedoch auch die Daten der Experimente CROSSING\_90\_F und CROSSING\_90\_G. Obwohl die Personen von vier Seiten in die Kreuzung kamen, ändern sich die Nachbarschaften weniger häufig als dies bei den anderen Experimenten mit vier Zugängen der Fall ist. Die Abweichung kann über eine deutliche Separation der Personenströme – zu erkennen in Abbildung 5.18 – erklärt werden. Bei der Kreuzung mit drei Zugängen (Abbildung 5.28 (unten)) steigen die Daten mit zunehmender Dichte etwas weniger an, als dies bei der Kreuzung mit vier Zugängen der Fall ist. Deutlich zu erkennen ist der Einfluss des Kreisverkehrs in den Varianten B und C: in Folge der „geregelter“ Personenströme nimmt die Anzahl der Nachbarschaftsänderungen ab.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Anzahl der Nachbarschaftsänderungen pro Meter Wegstrecke ein geeigneter Indikator ist, die Konfliktdichte zu beschreiben. Eine signifikante Änderung im Bereich der Dichte  $\rho_C$  ist jedoch nicht zu erkennen.



**Abb. 5.27** – Änderung der Nachbarschaften pro Meter Wegstrecke als Funktion der mittleren Dichte  $\bar{\rho}$  beim uni- und bidirektionalen Verkehr. Oben: Darstellung für die Experimente mit unidirektionalem Verkehr (UNI\_CORR\_ALL). Unten: Darstellung für die Experimente mit bidirektionalem Verkehr (BI\_CORR\_ALL).





**Abb. 5.28** – Änderung der Nachbarschaften pro Meter Wegstrecke als Funktion der mittleren Dichte  $\bar{\rho}$  für die Kreuzung mit drei und vier Zugängen. Oben: Darstellung für den multidirektionalen Verkehr in der Kreuzung mit vier Zugängen (CROSSING\_90\_ALL). Unten: Darstellung für den multidirektionalen Verkehr in der Kreuzung mit drei Zugängen (CROSSING\_120\_ALL).

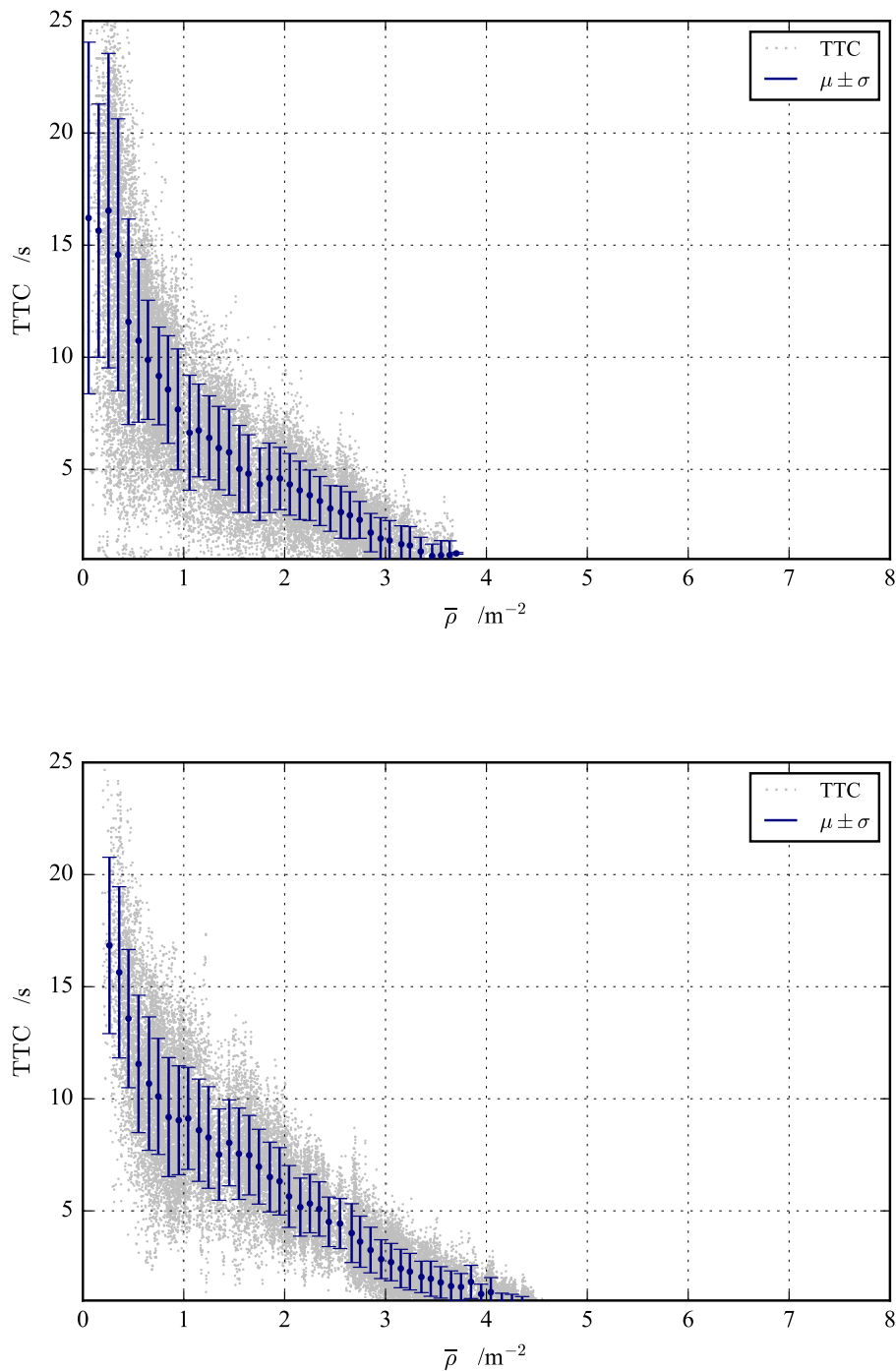
### 5.5.3 Zeiten bis zur Kollision

Abschließend soll die Konfliktdichte über die Zeiten bis zur Kollision quantifiziert werden. Die methodische Beschreibung findet sich in Abschnitt 4.2.3. Es werden dieselben Experimente, die bereits hinsichtlich der Beständigkeit der Nachbarschaften ausgewertet wurden, analysiert.

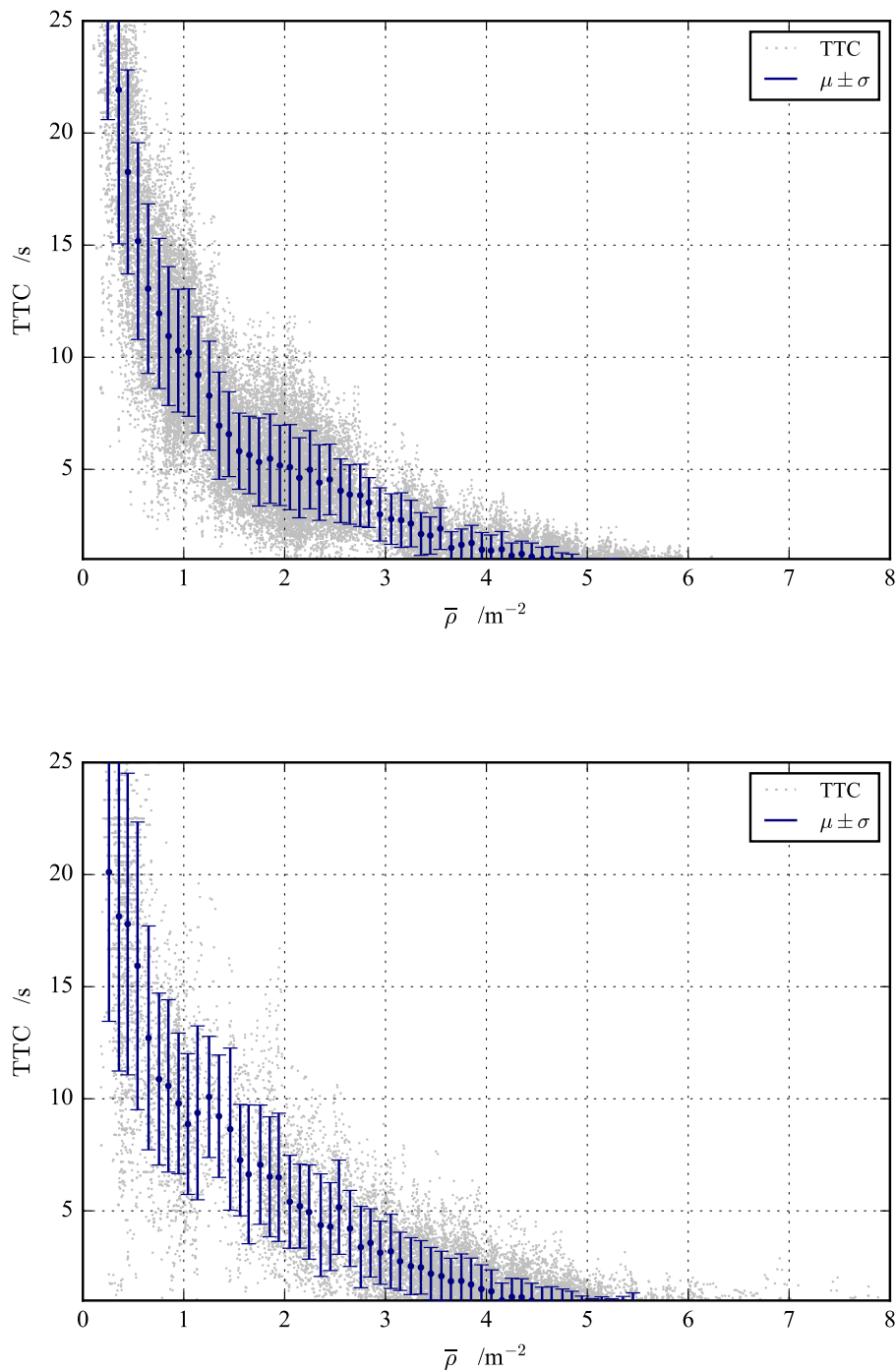
Die Abbildungen 5.29 und 5.30 zeigen die Time-to-collision-Werte (TTC) in Abhängigkeit von der mittleren Dichte  $\bar{\rho}$ . Die Daten für den uni-, bi- und multidirektionalen Verkehr zeigen eine weitgehende Übereinstimmung. Bei geringen Dichten sind die mittleren Zeiten bis zur Kollision, aber auch die mittleren Abweichungen um den Erwartungswert groß. Mit zunehmender Dichte nehmen die TTC-Werte sehr schnell ab, bis sie bei einer Dichte von etwa  $\bar{\rho} = 4 \text{ m}^{-2}$  annähernd Null betragen. Die Personen sind dann so dicht beieinander, dass sie sich bereits berühren oder aber Kollisionen unmittelbar bevorstehen.

Die Übereinstimmung der Daten für alle Strukturtypen kann so interpretiert werden, dass die Personen ihre Geschwindigkeit an die Konfliktdichte anpassen: durch eine Verminderung der eigenen Geschwindigkeit können die Zeiten bis zur Kollision mit den Nachbarn vergrößert werden. Diese Anpassung erfolgt für alle Strukturtypen in gleichem Maße. Mit zunehmender Dichte geht die Möglichkeit, die Kollisionen durch Anpassung der Geschwindigkeit zu vermeiden, weitgehend verloren. Infolge der bei zunehmender Dichte abnehmenden Geschwindigkeiten reduziert sich aber gleichzeitig der „Schaden“ bei einer Kollision, so dass kürzere Kollisionszeiten akzeptiert werden.

Für die mit den spezifischen Kapazitäten korrespondierenden Dichten zwischen  $\rho_C = 1,05 \text{ m}^{-2}$  (CROSSING\_90\_ALL) und  $\rho_C = 1,64 \text{ m}^{-2}$  (UNI\_CORR\_ALL) (vgl. Auswertungen in Abschnitt 5.4) werden mittlere Kollisionszeiten von etwa  $6 \text{ s} \leq TTC \leq 9 \text{ s}$  gemessen. Somit bietet sich der TTC-Wert an, als globaler Referenzwert für den Übergang vom Freifluss- zum gestauten Ast des Fundamentaldiagramms herangezogen zu werden.



**Abb. 5.29** – Time-to-collision-Werte als Funktion der mittleren Dichte  $\bar{\rho}$  für den uni- und bidirektionalen Verkehr. Die grauen Daten zeigen die TTC-Werte. Die Mittelwerte und die Standardabweichung für Dichteintervalle mit der Breite  $\Delta\rho = 0,1 \text{ m}^{-2}$  sind blau eingetragen. Oben: Darstellung für die Experimente mit unidirektionalem Verkehr (UNI\_CORR\_ALL). Unten: Darstellung für die Experimente mit bidirektionalem Verkehr (BI\_CORR\_ALL).



**Abb. 5.30** – Time-to-collision-Werte als Funktion der mittleren Dichte  $\bar{\rho}$  für den Kreuzungsverkehr. Die grauen Daten zeigen die TTC-Werte. Die Mittelwerte und die Standardabweichung für Dichteintervalle mit der Breite  $\Delta\rho = 0,1 \text{ m}^{-2}$  sind blau eingetragen. Oben: Darstellung für den multidirektionalen Verkehr in der Kreuzung mit vier Zugängen (CROSSING\_90\_ALL). Unten: Darstellung für den multidirektionalen Verkehr in der Kreuzung mit drei Zugängen (CROSSING\_120\_ALL).

## Kapitel 6

# Kennwerte für die Bemessung

Im Rahmen des Projektes BaSiGo wurde das Level-of-Safety-Konzept entwickelt [38]. Es baut auf dem etablierten Level-of-Service-Konzept auf, fokussiert jedoch auf die Belange der Sicherheit, welche bei der Planung und Durchführung von Großveranstaltungen eine besondere Rolle spielen. Bisher liegen jedoch nur Kennwerte für den uni- und bidirektionalen Verkehr vor. Mit der vorliegenden Arbeit sollen diese ergänzt werden, so dass es möglich wird, auch multidirektional genutzte Fußverkehrsanlagen zu bewerten. Das neue Konzept und seine Verfahrensschritte werden in der Beschreibung des Sicherheitsbausteins „Innere Erschließung des Veranstaltungsgeländes“ dokumentiert [39, 40, 43, 44] und sollen an dieser Stelle nur auszugsweise wiedergegeben werden.

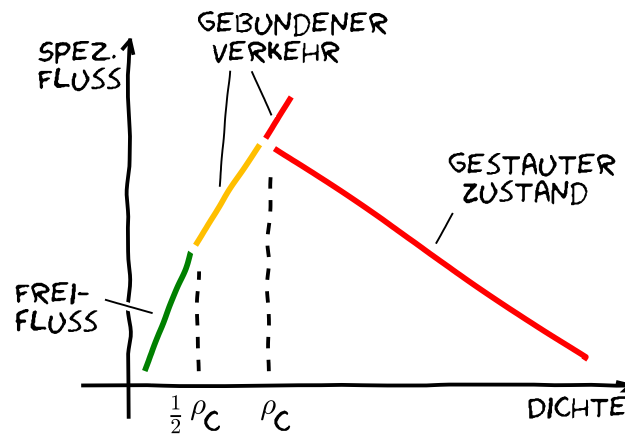
Vor einer Bewertung der Verkehrsqualität muss die Raumnutzung betrachtet werden. Dabei sind drei Typen von Verkehrsflächen zu unterscheiden:

- Flächen, die eine Verbindungsfunktion erfüllen und vorwiegend dem Vorwärtskommen dienen
- Aufenthaltsbereiche, z. B. Wartezonen oder Flächen vor Veranstaltungsbühnen
- Flächen mit gemischter Nutzung, z. B. bei Flohmärkten oder Kirmes-Veranstaltungen

Das Level-of-Safety-Konzept bezieht sich auf Flächen, die vorwiegend der Fortbewegung dienen. Einzelpersonen oder Personengruppen, die sich nicht bewegen *wollen*, können jedoch als „Hindernisse“ berücksichtigt werden, welche die effektiv für den Verkehrsfluss verfügbare Breite des Weges einschränken. Somit ist das Bemessungskonzept auch für Flächen mit gemischter Nutzung relevant.

Die Verfahrensschritte lehnen sich an die des Handbuchs für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) [25] an. An Stelle der nach HBS vorgesehenen Einteilung in die Qualitätsstufen A bis F wird jedoch ein einfach anzuwendendes Ampelsystem mit den Farben Grün, Gelb und Rot definiert. Entsprechend der Beschreibung des Level-of-Safety-Konzepts [38] sind die drei Qualitätsstufen wie folgt zu interpretieren:

- Grün: Es können gegenseitige Beeinflussungen zwischen den Fußgängern auftreten, die freie Wahl der Gehgeschwindigkeit wird aber nicht wesentlich beeinträchtigt.
- Gelb: Die Fußgänger werden häufig zu Änderungen ihrer Geschwindigkeit und Richtung gezwungen. Lokale Störungen können sich auf den Verkehrsfluss als Ganzes auswirken.
- Rot: In Folge des hohen Verkehrsaufkommens kommt es zu erheblichen Behinderungen und Staus. Es ist mit sicherheitskritischen Situationen zu rechnen.



**Abb. 6.1** – Schematische Darstellung des Fundamentaldiagramms mit Qualitätsstufen. Die bereits für Abbildung 5.1 beschriebenen Verkehrszustände „Freifluss“, „gebundener Verkehr“ und „gestauter Zustand“ werden den Qualitätsstufen Grün, Gelb und Rot zugeordnet. Der im Fundamentaldiagramm häufig zu erkennende „Überhang“ zwischen dem gebundenen Verkehr und dem gestauten Zustand wird als „Rot“ definiert. Der Übergang zwischen den Qualitätsstufen Gelb und Rot findet bei der Dichte  $\rho_C$  statt, der Übergang von der Qualitätsstufe Grün nach Gelb wird bei  $\rho = \frac{1}{2} \cdot \rho_C$  definiert.

Das Ampelsystem orientiert sich an der in Abbildung 5.1 eingeführten, schematischen Darstellung des Fundamentaldiagramms. Abbildung 6.1 stellt den Bezug der Verkehrszustände zu den im Level-of-Safety-Konzept definierten Qualitätsstufen her. Während der Übergang vom „gebundenen Verkehr“ (gelb) zum „gestauten Zustand“ (rot) über die Dichte  $\rho_C$  referenziert werden kann, wird für den Übergang vom „Freifluss“ (grün) zum „gebundenen Verkehr“ (gelb) vereinfachend die Annahme getroffen, dass dieser bei  $\rho = \frac{1}{2} \cdot \rho_C$  stattfindet. Die in den Abschnitten 4.2 und 5.5 beschriebenen Messmethoden und Untersuchungsergebnisse können einen Beitrag leisten, messbare Kriterien für die Quantifizierung der Konfliktdichte, bei welcher dieser Übergang stattfindet, zu bestimmen. Detaillierte Untersuchungen, welche die Annahme des Grenzwertes bei  $\rho = \frac{1}{2} \cdot \rho_C$  stützen, stehen noch aus, für die Definition einer praxistauglichen Bemessungsregel erscheint diese Annahme jedoch hinreichend genau.

Die Anwendung des Level-of-Safety-Konzeptes erfordert sechs Verfahrensschritte [43]:

- 1) Visualisierung der Verkehre
- 2) Erfassung der Verkehrsbelastungen
- 3) Umrechnung der Verkehrsbelastungen auf 2-Minuten-Intervalle
- 4) Berechnung der nutzbaren Breite der Gehfläche
- 5) Berechnung des spezifischen Flusses
- 6) Bewertung der Verkehrsqualität

Tab. 6.1 – Zusammenfassung der in Abschnitt 5.4 ermittelten Kennwerte

| Verkehrs-/Anlagentyp                                 | $\rho_C$<br>$\text{m}^{-2}$ | $C_s$<br>$(\text{ms})^{-1}$ | $\sigma_{J_s}$<br>$(\text{ms})^{-1}$ | Abschnitt |
|--|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-----------|
| Unidirektional genutzter Korridor                    | 1,64                        | 1,46                        | $\pm 0,13$                           | 5.4.1     |
| Bidirektional genutzter Korridor                     | 1,35                        | 1,26                        | $\pm 0,10$                           | 5.4.2     |
| T-Kreuzung mit zusammenfließenden Personenströmen    | 1,44                        | 0,86                        | $\pm 0,10$                           | 5.4.3     |
| Multidirektional genutzte Kreuzung mit vier Zugängen | 1,05                        | 0,94                        | $\pm 0,11$                           | 5.4.4     |
| Multidirektional genutzte Kreuzung mit drei Zugängen | 1,13                        | 1,01                        | $\pm 0,07$                           | 5.4.5     |

Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag zu den Verfahrensschritten 4 bis 6. Bislang standen für das Level-of-Safety-Konzept nur Grenzwerte für den uni- und bidirektionalen Verkehr zur Verfügung. Da für diesen das klassische Konzept des spezifischen Flusses angewendet werden kann (vgl. Abschnitt 2.3.4), reichte es im vierten Verfahrensschritt aus, die nutzbare Breite  $b$  der Gehfläche zu berechnen. Für den multidirektionalen Verkehr bedarf es der Anwendung des in Abschnitt 4.1.4 vorgestellten, generalisierten Skalierungskonzeptes. Es muss die nutzbare Fläche  $A$  sowie der Mittelwert  $\bar{a}_i$ , die mittlere Länge der Verbindungslinien zwischen den Punkten, an denen die Personen die Messfläche zuerst betreten und zuletzt wieder verlassen haben, bestimmt werden. Während die Fläche  $A$  bekannt ist – es ist die Fläche anzusetzen, auf der mit einer Behinderung des Personenflusses zu rechnen ist –, muss der Mittelwert  $\bar{a}_i$  anhand der zu erwartenden Quell-Ziel-Beziehungen abgeschätzt werden.

Mit dem aus Verfahrensschritt 3 bekannten Personenfluss  $J$  und dem Skalierungsfaktor  $\tilde{F} = A/\bar{a}_i$  kann im fünften Verfahrensschritt der spezifische Fluss berechnet werden als:

$$J_s = J/\tilde{F} \quad (6.1)$$

Für den sechsten Verfahrensschritt, die abschließende Bewertung der Verkehrsqualität, werden nachfolgend Kenn- und Grenzwerte für den multidirektionalen Verkehr bereitgestellt. Auch die bestehenden Grenzwerte für den uni- und bidirektionalen Verkehr sollen anhand der nun vorliegenden Ergebnisse überprüft werden.

Tabelle 6.1 fasst die Kennwerte der in den Laborexperimenten der Projekte Hermes und BaSiGo untersuchten Anlagentypen zusammen. Die Grenzwerte der Qualitätsstufen für eine konkret zu bemessende Verkehrsanlage können aus diesen Ergebnissen jedoch nicht unmittelbar abgeleitet werden, denn bislang liegen keine validen Untersuchungen hinsichtlich der Skalierung zwischen Labor- und Realbedingungen vor. Der in Abschnitt 5.5.1 durchgeführte Vergleich zeigt, dass sich bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten und ausgewerteten Laborexperimenten deutlich geringere Streuungen der Geschwindigkeit ergeben, als sie Alrutz et al. [3] für ihre Feldstudien angeben.

Im Sinne einer vorsichtigen Abschätzung werden für die Übersetzung der in den Laborexperimenten ermittelten Kennwerte in Grenzwerte des Level-of-Safety-Konzeptes die nachfolgenden Ansätze empfohlen. Spezifische Personenflüsse und Personendichten oberhalb der Grenzwerte für die Qualitätsstufe Gelb werden der Qualitätsstufe Rot zugeordnet.

$$\text{Oberer Grenzwert der Qualitätsstufe Grün:} \quad \rho = \frac{1}{2} \cdot \rho_C \quad \text{und} \quad J_s = \frac{1}{2}(C_s - \sigma_{J_s})$$

$$\text{Oberer Grenzwert der Qualitätsstufe Gelb:} \quad \rho = \rho_C \quad \text{und} \quad J_s = C_s - \sigma_{J_s}$$

Damit können die Qualitätsstufen Grün, Gelb und Rot entsprechend Tabelle 6.2 festgelegt werden. Die Zahlenwerte werden auf eine Nachkommastelle gerundet. Für die T-Kreuzung wird die vorliegende Datenbasis nicht als ausreichend angesehen, zuverlässige Grenzwerte zu definieren. Für die Kreuzungen wird auf eine Unterscheidung zwischen der Anzahl der Zugänge verzichtet. Auf der sicheren Seite liegend werden hier die Kennwerte der Kreuzung mit vier Zugängen übernommen.

Ein Vergleich mit den bereits vorliegenden Grenzwerten (vgl. Sicherheitsbaustein [43]) zeigt Abweichungen insbesondere beim Grenzwert der Qualitätsstufe Grün des unidirektionalen Verkehrs. Diese Abweichung resultiert aus der nun getroffenen Quantifizierung der Grenzwert-Dichte mit  $\rho = 1/2 \cdot \rho_C$ . Der „Sicherheitsabschlag“  $\sigma_{J_s}$  für die Berücksichtigung der Laborbedingungen wirkt sich ebenfalls auf die Grenzwerte aus.

**Tab. 6.2** – Grenzwerte des Level-of-Safety-Konzeptes

| Verkehrs-/Anlagentyp               | GRÜN                      |                             | GELB                      |                             | ROT                       |                             |
|------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|
|                                    | $\rho$<br>m <sup>-2</sup> | $J_s$<br>(ms) <sup>-1</sup> | $\rho$<br>m <sup>-2</sup> | $J_s$<br>(ms) <sup>-1</sup> | $\rho$<br>m <sup>-2</sup> | $J_s$<br>(ms) <sup>-1</sup> |
| Unidirektional genutzter Korridor  | ≤ 0,8                     | ≤ 0,7                       | ≤ 1,6                     | ≤ 1,3                       | > 1,6                     | > 1,3                       |
| Bidirektional genutzter Korridor   | ≤ 0,7                     | ≤ 0,6                       | ≤ 1,3                     | ≤ 1,2                       | > 1,3                     | > 1,2                       |
| Multidirektional genutzte Kreuzung | ≤ 0,5                     | ≤ 0,4                       | ≤ 1,0                     | ≤ 0,8                       | > 1,0                     | > 0,8                       |



## Kapitel 7

# Fazit und Ausblick

Mit der vorliegenden Arbeit werden Methoden vorgestellt, die eine Abschätzung der Leistungsfähigkeit multidirektional genutzter Fußverkehrsanlagen erlauben. Die empirische Datenbasis liefern Laborexperimente, welche im Rahmen der BMBF-Forschungsprojekte BaSiGo und Hermes durchgeführt werden konnten. Bis zu etwa 1000 Probanden nahmen gleichzeitig an diesen Experimenten teil.

Grundlage für die Bemessung von Kreuzungen ist eine Quantifizierung des ungerichteten Verkehrs. Die Berechnungsmethoden für den uni- und bidirektionalen Verkehr können jedoch nicht ohne Weiteres auf den multidirektionalen Verkehr an Kreuzungen angewendet werden, denn der für den uni- und bidirektionalen Verkehr im Korridor bewährte Ansatz, dass die Leistungsfähigkeit der Anlage proportional mit ihrer Breite  $b$  zunimmt, gilt nicht für Kreuzungen. Hier wird der Personendurchsatz nicht durch *eine* bestimmte Breite, sondern vielmehr durch die gegenseitigen Behinderungen im Zentrum der Kreuzung beeinflusst. Während für Korridore der Personenfluss an einer Messlinie erfasst werden kann, ist es somit sinnvoll bei Kreuzungen die Messung auf der Fläche durchzuführen, also dort, wo die Personenströme mit ihren verschiedenen Richtungen aufeinander treffen.

Die Personendichte und die Geschwindigkeiten auf einer multidirektional genutzten Fläche kann mit den vorhandenen Methoden beschrieben und als Produkt aus diesen beiden Größen kann auch der spezifische Fluss berechnet werden. Bislang fehlte eine Methode, auch den Personenfluss auf der Fläche selbst zu bestimmen. Aufbauend auf den Raum-Zeit-Mittelwerten, die Edie [20] für den spurgebundenen Fahrzeugverkehr beschreibt, wird dessen Konzept generalisiert, so dass es auf uni-, bi- und multidirektionale Personenströme übertragen werden kann. Die neue Messmethode erlaubt es, den Fluss, die Dichte und die Geschwindigkeit zeitlich und örtlich konsistent zu bestimmen. Sie kann für konvexe Flächen in der Ebene mit beliebig gerichteten Teilströmen angewendet werden.

Ergänzend wird ein Skalierungsfaktor eingeführt, der es erlaubt, die Ergebnisse der Untersuchungen auf ähnlich strukturierte Verkehrsanlagen abweichender Größe zu übertragen. Mit der vorliegenden Arbeit kann gezeigt werden, dass an Stelle der Breite  $b$ , wie dies für den Korridor gilt, für den multidirektionalen Verkehr das Verhältnis aus der betrachteten Messfläche  $A$  und dem Mittelwert  $\bar{a}_i$ , der mittleren Länge der Verbindungslinien zwischen den Punkten, an denen die Personen die Messfläche zuerst betreten und zuletzt wieder verlassen haben, als Skalierungsfaktor angesetzt werden kann. Bei der Bemessung einer Verkehrsanlage kann so auf Grundlage der zu erwartenden Quelle-Ziel-Beziehungen der  $\bar{a}_i$ -Wert abgeschätzt und damit der Skalierungsfaktor einfach berechnet werden.

Die ermittelten Kenngrößen der Leistungsfähigkeit werden in das Level-of-Safety-Konzept, das im

Forschungsprojekt BaSiGo als Bestandteil des Sicherheitsbausteins „Innere Erschließung des Veranstaltungsgeländes“ [43] erarbeitet wurde, integriert.

Darüber hinaus wird ein methodischer Ansatz entwickelt, die gegenseitigen Behinderungen innerhalb eines Personenstroms zu quantifizieren. Das Maß dieser gegenseitigen Behinderungen wird als „Konfliktdichte“ interpretiert. Ziel ist es, die Unterschiede in der Leistungsfähigkeit derselben Verkehrsanlage bei unterschiedlichen Nutzungsarten zu erklären. Anhand dreier Indikatoren, der Streuung der Geschwindigkeiten, der Beständigkeit der Nachbarschaften und der Zeiten bis zur Kollision, wird untersucht, inwiefern diese geeignet sind, die Konfliktdichte zu beschreiben. Die Ergebnisse können jedoch nur als erster Schritt gesehen werden, die gegenseitigen Beeinflussungen zu quantifizieren.

Die vorliegende Arbeit versteht sich als Baustein im Forschungsfeld der Fußgängerdynamik. Sie liefert einen Beitrag zur Bemessung multidirektional genutzter Fußverkehrsanlagen, zugleich wirft sie jedoch Fragen auf, die in den kommenden Jahren als Forschungsthemen adressiert werden sollten:

Die empirische Datenbasis der vorliegenden Arbeit liefern Laborexperimente, welche unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt wurden. Große Vorteile dieser Form der Datengewinnung sind die Genauigkeit der Daten, die Möglichkeit Personendichten zu erzeugen, die unter Normalbedingungen nur selten auftreten, sowie die Begrenzung und Dokumentation des Parameterraums. Für Feldstudien sind – soweit diese überhaupt vorliegen – die Messungen weit weniger genau. Die aktuelle technische Entwicklung bei der Erfassung von Felddaten (Bluetooth, RFID etc.) wird es hoffentlich in naher Zukunft ermöglichen, die Ergebnisse der Laborexperimente anhand von Felddaten zu validieren.

Der Einfluss von Wänden und Hindernissen wurde in der Vergangenheit nur unzureichend untersucht. Mit dem bewährten Konzept des spezifischen Flusses (vgl. Abschnitt 2.3.4) wird dieser Einfluss ignoriert. In den Regelwerken werden dann zumeist Randabstände angesetzt und so die effektiv zur Verfügung stehende Breite des Weges reduziert [25, 38]. In der vorliegenden Arbeit werden nun virtuelle Nachbarn als Wandpunkte eingefügt (vgl. Abschnitt 4.2.2) und damit der Einfluss der Wände bei der Quantifizierung der gegenseitigen Behinderungen berücksichtigt. Als Abstand dieser Punkte wird ein Meter gewählt. Eine Validierung des „Modells der virtuellen Nachbarn“ sowie des darin gewählten Abstandes steht jedoch noch aus.

Die im Kontext bisheriger Studien ermittelten Kennwerte gelten für vorwiegend junge Menschen mit uneingeschränkter Mobilität. Für Kinder, Senioren oder Menschen mit Behinderung liegen derzeit kaum Daten vor. In dem durch das Forschungszentrum Jülich durchgeführten Teilvorhaben am BMBF-Forschungsprojekt „SiME – Sicherheit für Menschen mit körperlicher, geistiger oder altersbedingter Beeinträchtigung“ werden im Jahr 2017 Parameterstudien durchgeführt mit dem Ziel, „den Zeit- und Ressourcenbedarf von Evakuierungen heterogener Personengruppen in Zukunft besser verstehen und beschreiben zu können“ [36].

Neben den körperlichen Bedingungen für die Mobilität spielen auch die emotionalen Zustände der Personen sowie deren soziales Gefüge eine entscheidende Rolle bei der Bewegung von Menschengruppen. Erste Untersuchungen zum Einfluss der Motivation wurden schon in den 1950er Jahren durch Mintz [71] durchgeführt. Trotz zahlreicher weiterer Studien, in welchen die Motivation der Personen [29, 76] oder auch der kulturelle Einfluss [12] untersucht wird, kann der Einfluss der emotionalen und sozialen Aspekte auf die Bewegung bis heute nicht vollständig quantifiziert werden. Nur durch eine interdisziplinäre Forschung, an der Ingenieure, Naturwissenschaftler, Soziologen und Psychologen beteiligt sind, wird es möglich sein, die „inneren Zustände“ des Personenstroms zu verstehen.

# Literaturverzeichnis

- [1] AIZAWA, KUNIO und SHOJIRO TANAKA: *A constant-time algorithm for finding neighbors in quadtrees*. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 31(7):1178–1183, Juli 2009. (zitiert auf Seite 71)
- [2] ALRUTZ, DANKMAR und WOLFGANG BOHLE: *Flächenansprüche von Fußgängern: Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 77401/1996 des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen*. Wirtschaftsverl. NW, Verl. für Neue Wiss, Bremerhaven, 1999. (zitiert auf Seite 21)
- [3] ALRUTZ, DANKMAR, BERNHARD FRIEDRICH, CAROLA MENNICKEN, WOLFGANG BOHLE, KAY BUSCHE, MARCO IRZIK und MARTIN ROSE: *Bemessungsgrundlagen für Fußgängerverkehrsanlagen: 2. Entwurf des Schlussberichts zum FE 77.452/2000*. Planungsgemeinschaft Verkehr und Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau der Universität Hannover, Hannover, Januar 2003. (zitiert auf den Seiten 20, 21, 22, 24, 100 und 113)
- [4] ALRUTZ, DANKMAR, BERNHARD FRIEDRICH, CAROLA MENNICKEN, WOLFGANG BOHLE, KAY BUSCHE, MARCO IRZIK und MARTIN ROSE: *Bemessungsgrundlagen für Fußgängerverkehrsanlagen: Kurzbericht zum FE 77.452/2000*. Planungsgemeinschaft Verkehr and Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau der Universität Hannover, Hannover, März 2003. (zitiert auf den Seiten 20, 70 und 71)
- [5] BODE, NIKOLAI W. F., JOLYON J. FARIA, DANIEL W. FRANKS, JENS KRAUSE und A. JAMIE WOOD: *How perceived threat increases synchronization in collectively moving animal groups*. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 277(1697):3065–3070, Oktober 2010. (zitiert auf Seite 71)
- [6] BOLTES, MAIK: *Automatische Erfassung präziser Trajektorien in Personenströmen hoher Dichte*, Band 27 der Reihe *IAS Series*. Forschungszentrum Jülich, Jülich, Januar 2015. (zitiert auf den Seiten 37, 39, 48 und 169)
- [7] BOLTES, MAIK: *PeTrack. Automatic Extraction of Pedestrian Trajectories from Video Recordings*. <http://www.fz-juelich.de/ias/jsc/EN/Research/ModellingSimulation/CivilSecurityTraffic/PedestrianDynamics/Activities/petrack/petrackNode.html>, 2015. (zitiert auf den Seiten 48 und 169)
- [8] BOLTES, MAIK, JUN ZHANG, ARMIN SEYFRIED und BERNHARD STEFFEN: *T-junction: Experiments, trajectory collection, and analysis*. In: *IEEE International Conference on Computer Vision Workshop on Modeling, Simulation and Visual Analysis of Large Crowds*, 158 –165, November 2011. (zitiert auf Seite 44)

- [9] BUCHMUELLER, S. und U. WEIDMANN: *Parameters of pedestrians, pedestrian traffic and walking facilities*. Nummer Schriftenreihe 132 in *Schriftenreihe des IVT*. Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, 2007. (zitiert auf Seite 19)
- [10] BUKÁČEK, MAREK, PAVEL HRABÁK und MILAN KRBÁLEK: *Experimental analysis of two-dimensional pedestrian flow in front of the bottleneck*. In: CHRAIBI, MOHCINE, MAIK BOLTES, ANDREAS SCHADSCHNEIDER und ARMIN SEYFRIED (Hrsg.): *Traffic and Granular Flow '13*, 93–101. Springer International Publishing, 2015. (zitiert auf Seite 44)
- [11] BURGHARDT, SEBASTIAN: *Dynamik von Personenströmen in Sportstadien*, Band 18 der Reihe *IAS Series*. Forschungszentrum Jülich, Jülich, 2013. (zitiert auf Seite 38)
- [12] CHATTARAJ, UJJAL, A. SEYFRIED und PARTHA CHAKROBORTY: *Comparison of pedestrian fundamental diagram across cultures*. *Advances in Complex Systems*, 12(3):393–405, 2009. (zitiert auf Seite 116)
- [13] DAAMEN, WINNIE und SERGE P. HOOGENDOORN: *Experimental research of pedestrian walking behavior*. *Transportation Research Record*, 1828:20–30, 2003. (zitiert auf Seite 44)
- [14] DAAMEN, WINNIE und SERGE P. HOOGENDOORN: *Qualitative results from pedestrian laboratory experiments*. In: GALEA, E. R. (Herausgeber): *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2003*, 121–132, London, 2003. CMS Press. (zitiert auf Seite 44)
- [15] DAAMEN, WINNIE und SERGE P. HOOGENDOORN: *Flow-density relations for pedestrian traffic*. In: SCHADSCHNEIDER, ANDREAS, THORSTEN PÖSCHEL, REINHART KÜHNE, MICHAEL SCHRECKENBERG und DIETRICH E. WOLF (Hrsg.): *Traffic and Granular Flow 2005*, 315–322, Berlin, Heidelberg, 2007. Springer. (zitiert auf Seite 44)
- [16] DAAMEN, WINNIE und SERGE P. HOOGENDOORN: *Capacity of doors during evacuation conditions*. *Procedia Engineering*, 3(0):53–66, 2010. (zitiert auf Seite 44)
- [17] DIECKMANN, D.: *Die Feuersicherheit in Theatern*. Jung, München, 1911. (zitiert auf den Seiten 5, 6 und 41)
- [18] DINENNO, PHILIP J., DOUGAL DRYSDALE, CRAIG L. BEYLER, WALTON, W. DOUGLAS, CUSTER, RICHARD L. P., JOHN R. HALL und JOHN M. WATTS (Hrsg.): *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 3. Auflage, 2002. (zitiert auf Seite 19)
- [19] DUIVES, DORINE C., WINNIE DAAMEN und SERGE P. HOOGENDOORN: *Quantification of the level of crowdedness for pedestrian movements*. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 427:162–180, Juni 2015. (zitiert auf Seite 71)
- [20] EDIE, LESLIE C.: *Discussion of traffic stream measurements and definitions*. *Proceedings of the Second International Symposium on the Theory of Traffic Flow*, London 1963., 139–154, 1965. (zitiert auf den Seiten 2, 25, 32, 33, 34, 35, 40, 62, 64 und 115)
- [21] EILHARDT, CHRISTIAN: *Computer simulation of pedestrian dynamics at high densities*. Dissertation, Universität zu Köln, 2014. (zitiert auf den Seiten 26 und 38)

- [22] EILHARDT, CHRISTIAN und ANDREAS SCHADSCHNEIDER: *Stochastic Headway Dependent Velocity Model for 1d Pedestrian Dynamics at High Densities*. Transportation Research Procedia, 2(0):400–405, 2014. (zitiert auf Seite 26)
- [23] FISCHER, HERBERT: *Über die Leistungsfähigkeit von Türen, Gängen und Treppen bei ruhigem, dichtem Verkehr*. Dissertation, Technische Hochschule Dresden, 1933. (zitiert auf den Seiten 5, 6, 10 und 41)
- [24] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN E. V.: *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS)*. FGSV, Köln, 2005. (zitiert auf Seite 20)
- [25] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN E. V.: *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS). Teil S, Stadtstraßen*. FGSV, Köln, 2015. (zitiert auf den Seiten 1, 5, 23, 111 und 116)
- [26] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN E. V.: *Empfehlungen für Fußgängerverkehrsanlagen (EFA)*. FGSV, Köln, 2002. (zitiert auf Seite 5)
- [27] FRUIN, JOHN J.: *Designing for Pedestrians: A Level of Service Concept*. Dissertation, Polytechnic University of Brooklyn, 1970. (zitiert auf den Seiten 12 und 17)
- [28] FRUIN, JOHN J.: *pedestrian planning and design*. Elevator World, überarbeitete Auflage, 1987. (zitiert auf den Seiten 1, 12, 13, 14, 15, 16, 20, 23 und 24)
- [29] GRAAT, E., C. MIDDEN und P. BOCKHOLTS: *Complex evacuation; effects of motivation level and slope of stairs on emergency egress time in sports stadium*. Safety Science, 31:127–141, 1999. (zitiert auf Seite 116)
- [30] GREENSHIELDS, BRUCE DOUGLAS: *The photographic method of studying traffic behavior*. In: CRUM, R. W. (Herausgeber): *Proceedings of the Thirteenth Annual Meeting of the Highway Research Board, Part I*, Band 13, 382–399, 1934. (zitiert auf Seite 6)
- [31] GREENSHIELDS, BRUCE DOUGLAS: *A study of traffic capacity*. In: CRUM, R. W. (Herausgeber): *Proceedings of the Fourteenth Annual Meeting of the Highway Research Board, Part I*, Band 14, 448–477, 1935. (zitiert auf Seite 6)
- [32] GWYNNE, STEVEN M. V. und ERIC R. ROSENBAUM: *Employing the Hydraulic Model in Assessing Emergency Movement*. In: DINENNO, PHILIP J., DOUGAL DRYSDALE, CRAIG L. BEYLER, WALTON, W. DOUGLAS, CUSTER, RICHARD L. P., JOHN R. HALL und JOHN M. WATTS (Hrsg.): *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3–373 – 3–396. National Fire Protection Association and Society of Fire Protection Engineers, Quincy, Mass. and Bethesda, Md., 2008. (zitiert auf Seite 20)
- [33] HALL, EDWARD TWITCHELL: *The hidden dimension*. Doubleday and Company, New York, 1966. (zitiert auf Seite 12)
- [34] HANKIN, B. D. und WRIGHT, R. A.: *Passenger Flow in Subways*. In: *Operational Research Society's Open Conference*, Band 9, 81–88, Harrogate, 1958. (zitiert auf den Seiten 7, 10 und 42)
- [35] HEMELRIJK, CHARLOTTE K. und HANNO HILDENBRANDT: *Diffusion and Topological Neighbours in Flocks of Starlings: Relating a Model to Empirical Data*. PLOS ONE, 10(5):e0126913, Mai 2015. (zitiert auf Seite 71)

- [36] HOLL, STEFAN und MAIK BOLTES: *Parameterstudien für die sichere Evakuierung von Menschen mit Behinderung. Teilvorhabenbeschreibung des Forschungsprojekts „Sicherheit für Menschen mit körperlicher, geistiger oder altersbedingter Beeinträchtigung“ (SiME)*, (unveröffentlicht). (zitiert auf Seite 116)
- [37] HOLL, STEFAN, MAIK BOLTES, MOHCINE CHRAIBI, ULRICH KEMLOH, BERNHARD STEFFEN und ARMIN SEYFRIED: *Hermes – Erforschung eines Evakuierungsassistenten für den Evakuierungsfall bei Großveranstaltungen; Teilvorhaben: Grundlegende Untersuchungen zur Modellierung der Fußgängerdynamik und Echtzeitsimulation*. Schlussbericht, Forschungszentrum Jülich, Jülich, Juni 2012. (zitiert auf Seite 57)
- [38] HOLL, STEFAN, MAIK BOLTES, MOHCINE CHRAIBI, DANIEL SALDEN und ARMIN SEYFRIED: *Verbundprojekt: Bausteine für die Sicherheit von Großveranstaltungen (BaSiGo); Teilvorhaben: Experimentelle Untersuchung und Simulation von Fußgängerbewegungen in großen Menschenmengen*. Schlussbericht, Forschungszentrum Jülich, Jülich, Dezember 2015. (zitiert auf den Seiten 44, 45, 46, 49, 58, 111 und 116)
- [39] HOLL, STEFAN, MAIK BOLTES und ARMIN SEYFRIED: *Level of safety concept for major events*. In: *Traffic and Granular Flow '15*, Delft, (in Vorbereitung). (zitiert auf Seite 111)
- [40] HOLL, STEFAN, MAIK BOLTES und ARMIN SEYFRIED: *Level-of-Safety-Konzept für den Fußverkehr bei Großveranstaltungen*. In: GRONEBERG, CHRISTOPH (Herausgeber): *Veranstaltungskommunikation*. Springer Verlag für Sozialwissenschaften, (in Vorbereitung). (zitiert auf Seite 111)
- [41] HOLL, STEFAN, ANDREAS SCHADSCHNEIDER und ARMIN SEYFRIED: *Hermes: An evacuation assistant for large arenas*. In: WEIDMANN, ULRICH, UWE KIRSCH und MICHAEL SCHRECKENBERG (Hrsg.): *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012*, 345–349. Springer International Publishing, 2014. (zitiert auf Seite 57)
- [42] HOLL, STEFAN und ARMIN SEYFRIED: *Laboratory experiments on crowd dynamics*. inSiDE, 11, 2013. (zitiert auf Seite 44)
- [43] HOLL, STEFAN, ARMIN SEYFRIED und ANDREAS SCHOMBORG: *BaSiGo Guide: Innere Erschließung des Veranstaltungsgeländes*. [http://www.basigo.de/handbuch/Sicherheitsbausteine/Verkehrliche\\_Erschlie%C3%9Fung\\_der\\_Veranstaltung/Innere\\_Erschlie%C3%9Fung\\_des\\_Veranstaltungsgel%C3%A4ndes](http://www.basigo.de/handbuch/Sicherheitsbausteine/Verkehrliche_Erschlie%C3%9Fung_der_Veranstaltung/Innere_Erschlie%C3%9Fung_des_Veranstaltungsgel%C3%A4ndes), 2016. (zitiert auf den Seiten 111, 112, 114 und 116)
- [44] HOLL, STEFAN, ARMIN SEYFRIED und ANDREAS SCHOMBORG: *Innere Erschließung des Veranstaltungsgeländes*. In: *Bausteine für die Sicherheit von Großveranstaltungen*. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, (in Vorbereitung). (zitiert auf Seite 111)
- [45] HOOGENDOORN, S. P. und W. DAAMEN: *Pedestrian Behavior at Bottlenecks*. *Transportation Science*, 39(2):147–159, 2005. (zitiert auf Seite 44)
- [46] HOOGENDOORN, S. P., W. DAAMEN und P.H.L. BOVY: *Extracting microscopic pedestrian characteristics from video data*. In: *TRB2003 Annual Meeting*, 2003. (zitiert auf Seite 37)
- [47] HOOGENDOORN, SERGE P. und WINNIE DAAMEN: *Pedestrian behavior at bottlenecks*. *Transport. Sci.*, 39(2):147–159, 2005. (zitiert auf Seite 41)

- [48] HOOGENDOORN, SERGE P., WINNIE DAAMEN und P. H. L. BOVY: *Extracting microscopic pedestrian characteristics from video data*. In: *TRB 2003 Annual Meeting*. Washington DC: National Academy Press, 2003. (zitiert auf Seite 44)
- [49] HOOGENDOORN, SERGE P., WINNIE DAAMEN und P. H. L. BOVY: *Microscopic pedestrian traffic data collection and analysis by walking experiments: Behaviour at bottlenecks*. In: GALEA, E. R. (Herausgeber): *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2003*, 89–100, London, 2003. CMS Press. (zitiert auf den Seiten 41 und 44)
- [50] HOSTIKKA, SIMO, TUAMAS PALOPOSKI, TUOMO RINNE, JUHA-MATTI SAARI und TIMO KORHONEN: *Evacuation experiments in offices and public buildings*. Technical Report 85, VTT Technical Research Centre of Finland, 2007. (zitiert auf Seite 44)
- [51] ISOBE, M., T. ADACHI und T. NAGATANI: *Experiment and simulation of pedestrian counter flow*. *Physica A*, 336:638–650, 2004. (zitiert auf Seite 44)
- [52] JELIĆ, ASJA, CÉCILE APPERT-ROLLAND, SAMUEL LEMERCIER und JULIEN PETTRÉ: *Properties of pedestrians walking in line: Stepping behavior*. *Physical Review E*, 86:046111, 2012. (zitiert auf Seite 62)
- [53] KARAMOUZAS, IOANNIS, PETER HEIL, PASCAL VAN BEEK und MARK H. OVERMARS: *A predictive collision avoidance model for pedestrian simulation*. In: EGGES, ARJAN, ROLAND GERAERTS und MARK OVERMARS (Hrsg.): *Motion in Games*, Band 5884, 41–52. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. (zitiert auf den Seiten 75 und 76)
- [54] KARAMOUZAS, IOANNIS, BRIAN SKINNER und STEPHEN J. GUY: *Python implementation of the derived simulation model*. <http://motion.cs.umn.edu/PowerLaw/>, 2016. (zitiert auf Seite 76)
- [55] KEIP, CHRISTIAN und KEVIN RIES: *Dokumentation von Versuchen zur Personenstromdynamik, Projekt „HERMES“*. [http://ped.fz-juelich.de/experiments/2009.05.12\\_Duesseldorf\\_Messe\\_Hermes/docu/VersuchsdokumentationHERMES.pdf](http://ped.fz-juelich.de/experiments/2009.05.12_Duesseldorf_Messe_Hermes/docu/VersuchsdokumentationHERMES.pdf), Juni 2010. (zitiert auf den Seiten 58, 59, 83 und 85)
- [56] KNOFLACHER, HERMANN: *Fussgeher- und Fahrradverkehr: Planungsprinzipien*. Böhlau, Wien, 1995. (zitiert auf den Seiten 19, 20 und 23)
- [57] KRETZ, TOBIAS: *Pedestrian traffic - Simulation and experiments*. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2007. (zitiert auf Seite 44)
- [58] KRETZ, TOBIAS, ANNA GRÜNEBOHM, MAIKE KAUFMAN, FLORIAN MAZUR und MICHAEL SCHRECKENBERG: *Experimental study of pedestrian counterflow in a corridor*. *J. Stat. Mech.*, 10:P10001–P10001, 2006. (zitiert auf Seite 44)
- [59] KRETZ, TOBIAS, ANNA GRÜNEBOHM und MICHAEL SCHRECKENBERG: *Experimental study of pedestrian flow through a bottleneck*. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 10:10014–10014, 2006. (zitiert auf den Seiten 42 und 44)
- [60] KRETZ, TOBIAS, STEFAN HENGST und PETER VORTISCH: *Pedestrian Flow at Bottlenecks - Validation and Calibration of Vissim's Social Force Model of Pedestrian Traffic and its Empirical Foundations*. In: SARVI, M (Herausgeber): *International Symposium of Transport Simulation 2008*, Melbourne, Australia, 2008. Monash University. (zitiert auf Seite 44)

- [61] LAND NORDRHEIN-WESTFALEN: *Verordnung über Bau und Betrieb von Sonderbauten (Sonderbauverordnung – SBauVO)*, November 2009. (zitiert auf Seite 41)
- [62] LEONARD, JOHN D. und DAIHENG NI: *Direct Methods of Determining Traffic Stream Characteristics by Definition*. In: *The 85th TRB Annual Meeting*. Transportation Research Record, 2006. (zitiert auf Seite 26)
- [63] LI-YUN, DONG, XUE YU und DAI SHI-QIANG: *One-dimensional cellular automation model of traffic flow based on car-following idea*. Applied Mathematics and Mechanics, 23(4):363–370, April 2002. (zitiert auf Seite 26)
- [64] LIAN, LIPING, XU MAI, WEIGUO SONG, YUEN KWOK KIT RICHARD, XIAOGE WEI und JIAN MA: *An experimental study on four-directional intersecting pedestrian flows*. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2015(8):P08024, 2015. (zitiert auf Seite 44)
- [65] LIAO, WEICHEN, ANTOINE TORDEUX, ARMIN SEYFRIED, MOHCINE CHRAIBI, KEVIN DRZYCIMSKI, XIAOPING ZHENG und YING ZHAO: *Steady state of pedestrian flow in bottleneck experiments*. <http://arxiv.org/abs/1506.02433>, 2015. (zitiert auf Seite 80)
- [66] LIDDLE, JACK, ARMIN SEYFRIED, WOLFRAM KLINGSCH, TOBIAS RUPPRECHT, ANDREAS SCHADSCHNEIDER und ANDREAS WINKENS: *An experimental study of pedestrian congestions: Influence of bottleneck width and length*. In: *Traffic and Granular Flow '09*, 2009. (zitiert auf Seite 44)
- [67] LIEBLING, THOMAS M. und LIONEL POURNIN: *Voronoi Diagrams and Delaunay Triangulations: Ubiquitous Siamese Twins*. Documenta Mathematica, Extra Volume ISMP:419–431, 2012. (zitiert auf Seite 38)
- [68] LIGHTHILL, M. J. und G. B. WHITHAM: *On Kinematic Waves. II. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads*. Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 229(1178):317–345, Mai 1955. (zitiert auf den Seiten 25 und 32)
- [69] LIU, XUAN, 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, Juli 2009. (zitiert auf Seite 44)
- [70] MEHNER, WOLFGANG, MAIK BOLTES, MARKUS MATHIAS und BASTIAN LEIBE: *Robust Marker-Based Tracking for Measuring Crowd Dynamics*. In: NALPANTIDIS, LAZAROS, VOLKER KRÜGER, JAN-OLOF EKLUNDH und ANTONIOS GASTERATOS (Hrsg.): *Computer Vision Systems, from International Conference on Computer Vision Systems (ICVS)*, Band 9163 der Reihe *Lecture Notes in Computer Science*, 445–455. Springer International Publishing, 2015. (zitiert auf den Seiten 47, 48 und 169)
- [71] MINTZ, A.: *Non-adaptive group behaviour*. The Journal of Abnormal and Social Psychology, 46:150–159, 1951. (zitiert auf Seite 116)
- [72] MOUSSAÏD, M., D. HELBING, S. GARNIER, A. JOHANSSON, M. COMBE und G. THERAU-LAZ: *Experimental study of the behavioural mechanisms underlying self-organization in human crowds*. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 276(1668):2755–2762, 2009. (zitiert auf Seite 44)



- [73] MOUSSAÏD, MEHDI: *Étude expérimentale et modélisation des déplacements collectifs de piétons*. Dissertation, Université de Toulouse, Juni 2010. (zitiert auf Seite 44)
- [74] MOUSSAÏD, MEHDI, DIRK HELBING und GUY THERAULAZ: *How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters*. PNAS, 2011. (zitiert auf Seite 44)
- [75] MOUSSAÏD, MEHDI, NIRIASKA PEROZO, SIMON HARNIER, DIRK HELBING und GUY THERAULAZ: *The walking behaviour of pedestrian social groups and its impact on crowd dynamics*. PLoS ONE, 5(4):e10047–e10047, 2010. (zitiert auf Seite 44)
- [76] MUIR, H. C., D. M. BOTTOMLEY und C. MARRISON: *Effects of motivation and cabin configuration on emergency aircraft evacuation behavior and rates of egress*. The International Journal of Aviation Psychology, 6:57–77, 1996. (zitiert auf Seite 116)
- [77] NELSON, HAROLD E. und FREDERICK W. MOWRER: *Emergency Movement*. In: DINENNO, PHILIP J., DOUGAL DRYSDALE, CRAIG L. BEYLER, WALTON, W. DOUGLAS, CUSTER, RICHARD L. P., JOHN R. HALL und JOHN M. WATTS (Hrsg.): *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3–367 – 3–380. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 2002. (zitiert auf den Seiten 19 und 24)
- [78] OEDING, DETLEF: *Verkehrsbelastung und Dimensionierung von Gehwegen und anderen Anlagen des Fußgängerverkehrs*, Band 22 der Reihe *Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*. Bundesministerium für Verkehr, Abt. Straßenbau, Bonn, 1963. (zitiert auf den Seiten 1, 7, 9, 10, 17, 23, 24 und 101)
- [79] OKABE, ATSUYUKI, BARRY BOOTS und KOKICHI SUGIHARA: *Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 1992. (zitiert auf den Seiten 38 und 71)
- [80] OLDER, S. J.: *Movement of pedestrians on footways in shopping streets*. Traffic Engineering and Control, 10:160–163, 1968. (zitiert auf den Seiten 8 und 11)
- [81] PAULS, JAKE L.: *Effective-Width Model for Evacuation Flow in Buildings*. In: *Proceedings, Engineering Applications Workshop*, Boston, 1980. (zitiert auf Seite 20)
- [82] PAULS, JAKE L.: *Calculating evacuation times for tall buildings*. Fire Safety Journal, 12(3):213–236, Dezember 1987. (zitiert auf Seite 20)
- [83] PLAUE, MATTHIAS, MINJIE CHEN, GÜNTER BÄRWOLFF und HARTMUT SCHWANDT: *Trajectory Extraction and Density Analysis of Intersecting Pedestrian Flows from Video Recordings*. In: STILLA, UWE, FRANZ ROTTENSTEINER, HELMUT MAYER, BORIS JUTZI und MATTHIAS BUTENUTH (Hrsg.): *Photogrammetric Image Analysis: ISPRS Conference, PIA 2011, Munich, Germany, October 5-7, 2011. Proceedings*, 285–296. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. (zitiert auf Seite 44)
- [84] PORTZ, ANDREA und ARMIN SEYFRIED: *Analyzing stop-and-go waves by experiment and modeling*. In: PEACOCK, R.D., E.D. KULIGOWSKI und J.D. AVERILL (Hrsg.): *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2010*, 577–586, Berlin, Heidelberg, 2011. Springer. (zitiert auf Seite 38)

- [85] PORZYCKI, JAKUB, MARCIN MYCEK, ROBERT LUBAŚ und JAROSŁAW WAŚ: *Pedestrian Spatial Self-organization According to its Nearest Neighbor Position*. Transportation Research Procedia, 2:201–206, 2014. (zitiert auf Seite 71)
- [86] PREDTECHENSKII, WSEWOLOD MICHAILOWITSCH und ANATOLI IWANOWITSCH MILINSKII: *Planning for Foot Traffic Flow in Buildings*. Amerind Publishing, New Delhi, 1978. (zitiert auf Seite 20)
- [87] PREDTETSCHENSKI, WSEWOLOD MICHAILOWITSCH und ANATOLI IWANOWITSCH MILINSKI: *Personenströme in Gebäuden: Berechnungsmethoden für die Projektierung*. Staatsverlag der DDR, Leipzig, 1971. (zitiert auf den Seiten 10, 12, 13, 23, 24 und 75)
- [88] PUSHKAREV, BORIS und JEFFREY M. ZUPAN: *Capacity of walkways*. Transportation Research Record, 538:1–15, 1975. (zitiert auf den Seiten 17, 18 und 23)
- [89] QI, XIUZHEN: *One-dimensional Cellular Automaton Traffic Flow Model Based on Driving Rules*. Journal of Information and Computational Science, 12(5):1845–1853, März 2015. (zitiert auf Seite 26)
- [90] REIMER, KURT: *Die Bewegung der Menschenmassen in Verkehrsräumen*. Glasers Annalen, 71(7):121–131, 1947. (zitiert auf den Seiten 6 und 24)
- [91] REIMER, KURT: *Bewegungsvorgänge auf Bahnsteigen des großstädtischen Schnellverkehrs*. Glasers Annalen, 77(11):338–341, 1953. (zitiert auf Seite 6)
- [92] RIO, KEVIN W., CHRISTOPHER K. RHEA und WILLIAM H. WARREN: *Follow the leader: Visual control of speed in pedestrian following*. Journal of Vision, 14(2):4–4, Februar 2014. (zitiert auf Seite 71)
- [93] RUPPRECHT, TOBIAS, ARMIN SEYFRIED, WOLFRAM KLINGSCH und MAIK BOLTES: *Bottleneck capacity estimation for pedestrian traffic*. In: *Proceedings of the Interflam 2007*, 1423–1430. Interscience Communications, Oktober 2007. (zitiert auf Seite 44)
- [94] SABERI, MEEAD und HANI MAHMASSANI: *Exploring Areawide Dynamics of Pedestrian Crowds: Three-Dimensional Approach*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2421:31–40, Dezember 2014. (zitiert auf Seite 26)
- [95] SABERI, MEEAD, HANI MAHMASSANI, TIAN HOU und ALI ZOCCAIE: *Estimating Network Fundamental Diagram Using Three-Dimensional Vehicle Trajectories: Extending Edie's Definitions of Traffic Flow Variables to Networks*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2422:12–20, Dezember 2014. (zitiert auf Seite 26)
- [96] SCHADSCHNEIDER, ANDREAS und ARMIN SEYFRIED: *Empirical results for pedestrian dynamics and their implications for modeling*. Networks and Heterogeneous Media, 6(3):545–560, Oktober 2011. (zitiert auf Seite 44)
- [97] SCHNABEL, WERNER und DIETER LOHSE: *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Straßenverkehrsplanung*. Transpress, Verlag für Verkehrswesen, Berlin, 1980. (zitiert auf Seite 17)

- [98] SCHOLZ, GERHARD: *Geschwindigkeit und Energieaufwand beim Gehen: Ein Beitrag zur Untersuchung der Grundlagen für die zweckmäßige Gestaltung von Fußgängerverkehrsanlagen*. Dissertation, TH Hannover, Hannover, 1952. (zitiert auf den Seiten 6, 7 und 8)
- [99] SEYFRIED, A., M. BOLTES, J. KÄHLER, W. KLINGSCH, A. PORTZ, T. RUPPRECHT, A. SCHADSCHNEIDER, B. STEFFEN und A. WINKENS: *Enhanced empirical data for the fundamental diagram and the flow through bottlenecks*. 145–156. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. (zitiert auf Seite 44)
- [100] SEYFRIED, A., O. PASSON, B. STEFFEN, M. BOLTES, T. RUPPRECHT und W. KLINGSCH: *New insights into pedestrian flow through bottlenecks*. *Transportation Science*, 43(3):395–406, Mai 2009. (zitiert auf Seite 44)
- [101] SEYFRIED, ARMIN, OLIVER PASSON, BERNHARD STEFFEN, MAIK BOLTES, TOBIAS RUPPRECHT und WOLFRAM KLINGSCH: *New insights into pedestrian flow through bottlenecks*. *Transportation Science*, 43(3):395–406, Mai 2009. (zitiert auf Seite 42)
- [102] SEYFRIED, ARMIN und ANDREAS SCHADSCHNEIDER: *Fundamental Diagram and Validation of Crowd Models*. In: UMEO, HIROSHI, SHIN MORISHITA, KATSUHIRO NISHINARI, TOSHIHIKO KOMATSUZAKI und STEFANIA BANDINI (Hrsg.): *Cellular Automata: 8th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry, ACRI 2008, Yokohama, Japan, September 23-26, 2008. Proceedings*, 563–566. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. (zitiert auf Seite 44)
- [103] SEYFRIED, ARMIN, BERNHARD STEFFEN, WOLFRAM KLINGSCH und MAIK BOLTES: *The fundamental diagram of pedestrian movement revisited*. *J. Stat. Mech.*, P10002, 2005. (zitiert auf Seite 44)
- [104] SEYFRIED, ARMIN, BERNHARD STEFFEN, WOLFRAM KLINGSCH, THOMAS LIPPERT und MAIK BOLTES: *The fundamental diagram of pedestrian movement revisited - Empirical results and modelling*. In: SCHADSCHNEIDER, A., T PÖSCHEL, R. KÜHNE, M. SCHRECKENBERG und D. E. WOLF (Hrsg.): *Traffic and Granular Flow '05*, 739–739, Berlin, Heidelberg, 2007. Springer. (zitiert auf Seite 44)
- [105] SEYFRIED, ARMIN, BERNHARD STEFFEN, WOLFRAM KLINGSCH, THOMAS LIPPERT und MAIK BOLTES: *Steps toward the fundamental diagram - Empirical results and modelling*. In: WALDAU, N., P. GATTERMANN, H. KNOFLACHER und M. SCHRECKENBERG (Hrsg.): *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005*, 377–390, Berlin, Heidelberg, 2007. Springer. (zitiert auf Seite 44)
- [106] SEYFRIED, ARMIN, BERNHARD STEFFEN, ANDREAS WINKENS, TOBIAS RUPPRECHT, MAIK BOLTES und WOLFRAM KLINGSCH: *Empirical data for pedestrian flow through bottlenecks*. In: APPERT-ROLLAND, CÉCILE, FRANCOIS CHEVOIR, PHILIPPE GONDRET, SYLVAIN LASSARRE, JEAN-PATRICK LEBACQUE und MICHAEL SCHRECKENBERG (Hrsg.): *Traffic and Granular Flow '07*, 189–199, Berlin, Heidelberg, 2009. Springer. (zitiert auf den Seiten 42 und 44)
- [107] SONG, WEIGUO, WEI LV und ZHIMING FANG: *Experiment and modeling of microscopic movement characteristic of pedestrians*. *Procedia Engineering*, 62(0):56–70, 2013. (zitiert auf Seite 44)

- [108] SONG, WEIGUO, JUN ZHANG und ARMIN SEYFRIED: *Experimental Study of Pedestrian Flow in the Channel through Bottleneck*. In: PEACOCK, RICHARD D., ERICA D. KULIGOWSKI und JASON D. AVERILL (Hrsg.): *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2010*, 875–879, Berlin, Heidelberg, 2011. Springer. (zitiert auf Seite 44)
- [109] STEFFEN, BERNHARD und ARMIN SEYFRIED: *Methods for measuring pedestrian density, flow, speed and direction with minimal scatter*. *Physica A*, 389(9):1902–1910, Mai 2010. (zitiert auf Seite 38)
- [110] SUGIYAMA, YUKI, MINORU FUKUI, MACOTO KIKUCHI, KATSUYA HASEBE, AKIHIRO NAKAYAMA, KATSUHIRO 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*, 10:1–7, 2008. (zitiert auf Seite 26)
- [111] SUTMANN, G. und V. STEGAILOV: *Optimization of neighbor list techniques in liquid matter simulations*. *Journal of Molecular Liquids*, 125(2-3):197–203, 2006/125. (zitiert auf Seite 71)
- [112] TIAN, WEI, WEIGUO SONG, JIAN MA, ZHIMING FANG, ARMIN SEYFRIED und JACK LIDDLE: *Experimental study of pedestrian behaviors in a corridor based on digital image processing*. *Fire Safety Journal*, 47(0):8–15, 2012. (zitiert auf Seite 44)
- [113] TORDEUX, ANTOINE, MICHEL ROUSSIGNOL und SYLVAIN LASSARRE: *Macroscopic characteristics in stationary state of a zero-range process applied to traffic flow modelling*. 2014. (zitiert auf Seite 26)
- [114] TRANSPORT FOR LONDON: *Pedestrian Comfort Guidance for London. Guidance Document*. Mayor of London, London, 1. Auflage, 2010. (zitiert auf den Seiten 1, 22 und 23)
- [115] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (Herausgeber): *Highway capacity manual: Special Report 209*. National Research Council, Washington, D.C., 1985.
- [116] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (Herausgeber): *Highway capacity manual*. National Research Council, Washington, D.C., 2000. (zitiert auf den Seiten 1, 5 und 23)
- [117] VORONOI, M. GEORGES: *Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques*. *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, 133:198–287, 1908. (zitiert auf Seite 38)
- [118] WANG, QIANLING, YAO CHEN, HAIRONG DONG, MIN ZHOU und BIN NING: *A new collision avoidance model for pedestrian dynamics*. *Chinese Physics B*, 24(3):038901–038901, 2015. (zitiert auf Seite 71)
- [119] WARDROP, J. G.: *ROAD PAPER. SOME THEORETICAL ASPECTS OF ROAD TRAFFIC RESEARCH*. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1(3):325–362, Mai 1952. (zitiert auf Seite 32)
- [120] WEIDMANN, ULRICH: *Transporttechnik der Fussgänger: Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs (Literaturauswertung)*. Nummer 90 in *Schriftenreihe des IVT*. Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau, ITH Zürich, Zürich, Zweite, ergänzte Auflage, 1993. (zitiert auf den Seiten 19, 20, 23 und 24)

- [121] WESTPHAL, JOACHIM: *Untersuchung von Fußgängerbewegungen auf Bahnhöfen mit starkem Nahverkehr*. Dissertation, Technischen Universität Hannover, Hannover, 1971. (zitiert auf den Seiten 16, 17 und 28)
- [122] WINKENS, ANDREAS, WOLFRAM KLINGSCH und ARMIN SEYFRIED: *New data for human performance in planar corridors*. In: PEACOCK, R. D., E. D. KULIGOWSKI und J.D. AVERILL (Hrsg.): *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2010*, 61–70, Berlin, Heidelberg, 2011. Springer. (zitiert auf Seite 44)
- [123] WINKENS, ANDREAS, TOBIAS RUPPRECHT, ARMIN SEYFRIED und WOLFRAM KLINGSCH: *Empirical study of pedestrians' characteristics at bottlenecks*. In: KLINGSCH, WOLFRAM, CHRISTIAN ROGSCH, ANDREAS SCHADSCHNEIDER und MICHAEL SCHRECKENBERG (Hrsg.): *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, 263–268, Berlin, Heidelberg, 2010. Springer. (zitiert auf Seite 44)
- [124] WONG, S. C., W. L. LEUNG, S. H. CHAN, LAM, WILIAM H. K., YUNG, NELSON H. C., C. Y. LIU und PENG ZHANG: *Bidirectional Pedestrian Stream Model with Oblique Intersecting Angle*. *Journal of Transportation Engineering*, 136(3):234–242, 2010. (zitiert auf Seite 44)
- [125] YAO, ZHENHUA, JIANGSHENG WANG, GUIRONG LIU und CHENG MIN: *Improved neighbor list algorithm in molecular simulations using cell decomposition and data sorting method*. *Computer Physics Communications*, 161(1-2):27–35, August 2004. (zitiert auf Seite 71)
- [126] ZHANG, J., D. BRITTO, M. CHRAIBI, R. LÖHNER, E. HAUG und B. GAWENAT: *Quantitative validation of pedestrian flow for description of unidirectional pedestrian dynamics*. *Transportation Research Procedia*, 2(0):733–738, 2014. (zitiert auf Seite 44)
- [127] ZHANG, JUN: *Pedestrian fundamental diagrams: Comparative analysis of experiments in different geometries*, Band 14 der Reihe *Schriften des Forschungszentrums Jülich, IAS series*. Forschungszentrum Jülich, Jülich, 2012. (zitiert auf den Seiten 32, 35, 36, 39, 42, 44, 80 und 85)
- [128] ZHANG, JUN, W. KLINGSCH, A. SCHADSCHNEIDER und A. SEYFRIED: *Experimental Study of Pedestrian Flow Through a T-Junction*. In: KOZLOV, V. VALERY, P. ALEXANDER BUSLAEV, S. ALEXANDER BUGAEV, V. MARINA YASHINA, ANDREAS SCHADSCHNEIDER und MICHAEL SCHRECKENBERG (Hrsg.): *Traffic and Granular Flow '11*, 241–249, Berlin, Heidelberg, 2013. Springer. (zitiert auf Seite 44)
- [129] ZHANG, JUN, WOLFRAM KLINGSCH, ANDREAS SCHADSCHNEIDER und ARMIN SEYFRIED: *Transitions in pedestrian fundamental diagrams of straight corridors and T-junctions*. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 6:06004–06004, Juni 2011. (zitiert auf Seite 44)
- [130] ZHANG, JUN, WOLFRAM KLINGSCH, ANDREAS SCHADSCHNEIDER und ARMIN SEYFRIED: *Ordering in bidirectional pedestrian flows and its influence on the fundamental diagram*. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2012(02):P02002–P02002, 2012. (zitiert auf Seite 44)
- [131] ZHANG, JUN und ARMIN SEYFRIED: *Comparison of intersecting pedestrian flows based on experiments*. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 405:316–325–316–325, 2014. (zitiert auf Seite 44)

- [132] ZHANG, JUN, ANTOINE TORDEUX und ARMIN SEYFRIED: *Effects of Boundary Conditions on Single-File Pedestrian Flow*. In: WAS, JAROSLAW, GEORGIOS CH. SIRAKOULIS und STEFANIA BANDINI (Hrsg.): *Cellular Automata*, Band 8751, 462–469. Springer International Publishing, 2014. (zitiert auf Seite 44)
- [133] ZIEMER, VERENA, ANDREAS SCHADSCHNEIDER und ARMIN SEYFRIED: *Congestion Dynamics in Pedestrian Single-File Motion*. In: *Traffic an Granular Flow '15*, 2016. (zitiert auf Seite 38)

## Anhang A

# Rahmenbedingungen der BaSiGo-Experimente

Da das Verkehrsverhalten der an den Laborexperimenten beteiligten Personen durch die Rahmenbedingungen beeinflusst wurde, unter denen diese vorbereitet und durchgeführt wurden, sind nachfolgend die Dokumente dargestellt, welche bei der Akquisition und Einschreibung der Probanden verwendet wurden. Dies sind

- das Plakat, mit welchem für die Teilnahme an den Experimenten geworben wurde (siehe Abbildung A.1),
- die Internetseite des Forschungszentrum Jülich, über die sich die Probanden anmelden konnten (siehe Abbildung A.2),
- die Teilnahmebedingungen, auf welche bereits bei der Anmeldung hingewiesen wurde (siehe Abbildung A.3),
- die Probandenkarte zur Registrierung der Teilnehmer am Tag der Experimente (siehe Abbildung A.4).

**UNIVERSITÄT  
SIEGEN**

**JÜLICH**  
FORSCHUNGSZENTRUM

## Wir suchen Probanden und Helfer!

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projektes **„BaSiGo - Bausteine für die Sicherheit von Großveranstaltungen“** ([www.basigo.de](http://www.basigo.de)) führt das Forschungszentrum Jülich in Kooperation mit der Universität Siegen Experimente zur Dynamik in großen Menschenmengen durch. Ziel der Experimente ist es, die Wechselwirkungen zwischen Personen bei hohen Dichten zu untersuchen. Mit den Ergebnissen wollen wir dazu beitragen, die Sicherheit von Veranstaltungen mit großem Besucheraufkommen zu verbessern. Die Experimente werden die weltweit größten ihrer Art sein!

- Für die Durchführung suchen wir bis zu **2.400 Probanden** sowie zusätzliche Helfer.
- Das Honorar beträgt **50 € pro Tag**.

|                                   |  |  |
|-----------------------------------|--|--|
| <b>Datum:</b>                     | <b>Ort:</b>                                    |  |
| <b>Mittwoch, den 19.06.2013</b>   | <b>Messe Düsseldorf, Halle 14, Eingang Ost</b> | <small>Mit freundlicher Unterstützung<br/>der Messe Düsseldorf</small> <b>Messe<br/>Düsseldorf</b> |
| <b>Donnerstag, den 20.06.2013</b> | <b>Stockumer Kirchstraße</b>                   |  |
| <b>Samstag, den 22.06.2013</b>    | <b>40474 Düsseldorf</b>                        |  |

Informationen zur Teilnahme:

- Die Anmeldung zur Teilnahme kann für einen, zwei oder alle drei Tage erfolgen.
- Wer teilnehmen will, muss mindestens 18 Jahre alt sein.
- Die Teilnahme von Personen mit eingeschränkter Mobilität oder Platzangst ist nicht möglich.

Die vollständigen Teilnahmebedingungen finden Sie auf unserer Internetseite.

Die Anmeldung für Probanden und Helfer erfolgt ausschließlich über das Anmeldeformular auf unserer Internetseite <https://www.fz-juelich.de/basigo-experimente>.

Gäste und Medien können sich über [basigo-experimente@fz-juelich.de](mailto:basigo-experimente@fz-juelich.de) akkreditieren lassen.

**Weitere Informationen:**

**Internet:** <https://www.fz-juelich.de/basigo-experimente>  
**Facebook:** <https://www.facebook.com/events/561618907192507>

GEFÖRDERT VOM  
**Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung**

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

Abb. A.1 – Plakat für die Akquisition der Probanden (Grafik: N. Daivandy)



[Institutes](#)

DEUTSCH | ENGLISH

**Institute for Advanced Simulation (IAS)**  
**Jülich Supercomputing Centre (JSC)**



---

NEWS
RESEARCH
EXPERTISE
CAREER
ABOUT US

---

Home JSC
Research
Modelling and Simulation
Civil Security and Traffic
Projects
BaSiGo
Experimente

---

## RESEARCH

**Modelling and Simulation** >

- Computational Plasma Physics
- Protein Folding
- Quantum Information Processing

**Civil Security and Traffic** >

- Pedestrian Dynamics
- Fire Simulation
- Traffic

**Projects** >

- DFG project - jam
- BaSiGo
- DFG project - boundary effects
- Hermes

Algorithms and Methods

- HPC Technology
- Distributed Computing
- Projects

---

**SERVICE**

- Contacts 
- Staff 
- Publications 
- How to reach us 

## Wir suchen Probanden und Helfer!




Experiment im Projekt Hermes, Arena      Experiment im Projekt Hermes, T-Kreuzung

---

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsprojektes "BaSiGo - Bausteine für die Sicherheit von Großveranstaltungen" ([www.basigo.de](http://www.basigo.de)) führt das Forschungszentrum Jülich in Kooperation mit der Universität Siegen Experimente zur Dynamik in großen Menschenmengen durch. Mit den Ergebnissen wollen wir dazu beitragen, die Sicherheit von Veranstaltungen mit großem Besucheraufkommen zu verbessern.

Die Experimente werden die weltweit größten ihrer Art sein: Für die Durchführung suchen wir bis zu **2.500 Probanden** sowie zusätzliche Helfer. Die Aufwandsentschädigung beträgt **50 € pro Tag**.

**Datum:**

Mittwoch, den 19.06.2013  
 Donnerstag, den 20.06.2013  
 Freitag, den 21.06.2013 (Zusatztermin)  
 Samstag, den 22.06.2013

**Ort:**

Messe Düsseldorf, Halle 14, Fußgängereingang Ost  
 Stockumer Kirchstraße  
 40474 Düsseldorf  
[→ Anfahrtsbeschreibung](#)

Die Teilnahmebedingungen finden Sie [→ hier](#).

Die Anmeldung für Probanden und Helfer erfolgt ausschließlich über das [Anmeldeformular](#) (ebenfalls der Zusatztermin ist darüber buchbar). Bitte beachten Sie die Verbindlichkeit der Anmeldungen: Im Falle einer Verhinderung (z. B. durch Krankheit) benachrichtigen Sie uns bitte rechtzeitig per Mail an [basigo-experimente@fz-juelich.de](mailto:basigo-experimente@fz-juelich.de).

Gäste und Medien können sich über [basigo-experimente@fz-juelich.de](mailto:basigo-experimente@fz-juelich.de) akkreditieren lassen.

---

**Kontakt:**

Forschungszentrum Jülich GmbH  
 Jülich Supercomputing Centre  
 Abteilung "Civil Security and Traffic"  
 Prof. Dr. Armin Seyfried  
 Dipl.-Ing. Stefan Holl  
 E-Mail: [basigo-experimente@fz-juelich.de](mailto:basigo-experimente@fz-juelich.de)

**Facebook:**

<https://www.facebook.com/events/561618907192507/>       Poster

---

SPONSORED BY THE



Federal Ministry of Education and Research

Weitere Informationen

- [→ Teilnahmebedingungen](#)
- [Anmeldeformular](#)
- [→ Anfahrtsbeschreibung](#)
- [BaSiGo Project](#)
- [→ Drängeln für die Wissenschaft \(06.May.2013\)](#)

Last updated: 06.Jan.2016 [to the top](#)

LEGAL NOTICE    CONTACT    DEUTSCH    ENGLISH

Print    

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft



**HELMHOLTZ  
GEMEINSCHAFT**  
20 Jahre

Abb. A.2 – Webseite für die Akquisition der Probanden (Quelle: [www.fz-juelich.de](http://www.fz-juelich.de))



## Teilnahmebedingungen der BaSiGo-Experimente

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsprojektes "BaSiGo – Bausteine für die Sicherheit von Großveranstaltungen" führt das Forschungszentrum Jülich (FZJ) in Zusammenarbeit mit mehreren Partnern Experimente zur Fußgängerdynamik in großen Menschenmengen durch. Die Experimente finden am Mittwoch, den 19.06.2013, am Donnerstag, den 20.06.2013, und am Samstag, den 22.06.2013, in Halle 14 der Messe Düsseldorf statt. Für Freitag, den 21.06.2013, ist ein Zusatztermin eingerichtet worden.

Für die Teilnahme gelten folgende Bedingungen:

- Die Teilnahme ist nur für volljährige Personen nach bestätigter Anmeldung möglich.  
Die Einschreibung am Tag der Experimente erfolgt nur nach Vorlage eines amtlichen Lichtbildausweises.
- Entsprechend der Anmeldebestätigung findet die Teilnahme als Proband oder Helfer statt.
- Für die Probanden beginnen die Experimente täglich um 10:00 Uhr und enden um ca. 17:00 Uhr.  
Auf Grund der Vor- und Nachbereitungen beginnt die Arbeit der Helfer täglich um 09:00 Uhr und endet um ca. 18:00 Uhr.
- Die Anmeldung zur Teilnahme kann für einen, zwei oder alle drei Tage erfolgen.  
Die Einschreibung setzt ein pünktliches Erscheinen voraus. Wer an einem der ersten Tage trotz Anmeldung nicht erschienen ist, kann auch an den folgenden Tagen nicht teilnehmen.
- Aus technischen Gründen ist nur solchen Probanden die Teilnahme an den Experimenten erlaubt, die mindestens 150 cm und höchsten 200 cm groß sind. Die Teilnahme von Personen mit eingeschränkter Mobilität oder Platzangst ist nicht möglich.
- Jeder Teilnehmer verpflichtet sich, die Hausordnung der Messe Düsseldorf einzuhalten und den Anweisungen der Organisatoren und der von ihnen beauftragten Personen zu folgen.
- Für etwaige Verletzungen, die sich die Probanden bei dem Experiment an ihrer Gesundheit zuziehen, besteht eine gesetzliche Unfallversicherung.
- Während der Experimente werden Foto-, Audio- und Videoaufnahmen gemacht sowie Interviews und Erhebungen mittels Fragebögen durchgeführt. Wer an den Experimenten teilnimmt, erklärt damit sein Einverständnis, dass seine Bild- und Audiodaten für wissenschaftliche Zwecke und die Berichterstattung der Medien verwendet werden dürfen.
- Für die Teilnahme an den Experimenten wird den Probanden und Helfern ein Honorar von 50 Euro pro Tag ausbezahlt. Für die Besteuerung ist der Proband/Helfer selbst verantwortlich. Fahrtkosten o. ä. werden nicht erstattet. Die Auszahlung des Honorars erfolgt am Abend des jeweiligen Tages. Die Auszahlung setzt voraus, dass der Proband/Helfer ganztätig an den Experimenten teilgenommen hat.  
WICHTIG: Jeder Proband erhält bei seiner Einschreibung am Morgen eine persönliche Kappe. Diese Kappe darf während des Tages nicht mit anderen Probanden getauscht oder weitergegeben werden. Die Auszahlung am Abend erfolgt nur gegen persönliche Rückgabe der Kappe. Helfer erhalten statt der Kappe einen persönlichen Tagesausweis.
- Falls die Veranstaltung ausfällt, besteht kein Anspruch auf Auszahlung des Honorars.
- Der Veranstalter haftet nicht für Wertsachen und die Garderobe der Teilnehmer.
- Für einen Pausenimbiss ist gesorgt.
- Aus technischen Gründen bitten wir, keine helle oder gemusterte Kleidung zu tragen.

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

Mit freundlicher Unterstützung  
der Messe Düsseldorf



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Abb. A.3 – Teilnahmebedingungen für die BaSiGo-Experimente

|                           |  |   |
|---------------------------|--|---|
| <b>Probandenkarte</b>     | <b>22.06.2013</b>  |  |
| <b>Name:</b> _____        |  | <b>Kappennummer:</b>  |
| <b>Vorname:</b> _____     |  | <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> |
| <b>Geb.-Datum:</b> _____  |  |   |
| <b>E-Mail:</b> _____      |  | <b>Gelb Rot</b>   |
| <b>Straße, Nr.:</b> _____ |  | <input type="text"/> <input type="text"/>   |
| <b>PLZ, Ort:</b> _____    |  |   |
| <b>Beginn:</b>            | Hiermit bestätige ich die Richtigkeit der Angaben. Ich kenne und akzeptiere die Teilnahmebedingungen.  |   |
|                           | _____<br>(Unterschrift)  |   |
| <b>Abschluss:</b>         | Ich habe heute an den BaSiGo-Experimenten teilgenommen. Hiermit bestätige ich, das Honorar von 50 Euro in bar erhalten zu haben.                                       |   |
|                           | _____<br>(Unterschrift)  |   |
| <b>CNT</b>                | Teilnahme als Proband: <input type="checkbox"/> 19.06.2013 <input type="checkbox"/> 20.06.2013 <input type="checkbox"/> 21.06.2013 <input type="checkbox"/> 22.06.2013 |   |

**Abb. A.4** – Probandenkarte für Samstag, den 22.06.2013 (Muster)



## Anhang B

# Dokumentation der Rohdaten

Alle in dieser Arbeit ausgewerteten Trajektoriensätze der BaSiGo- und Hermes-Experimente finden sich auf dem anliegenden Datenträger. Ein großer Teil der Daten steht zudem über die Internetseite der Abteilung „Civil Security and Traffic“ am Jülich Supercomputing Centre der Forschungszentrum Jülich GmbH zur freien Verfügung: <http://ped.fz-juelich.de/database>.

Die Tabellen B.1 und B.2 geben eine Übersicht über die Zeiträume, die mit dem in Abschnitt 5.2 beschriebenen Verfahren als stationäre Zustände innerhalb der Datensätze ausgewählt wurden. Die Bildnummern referenzieren auf die Einzelbilder (*frames*) der zugrunde liegenden Videodateien. Die Spalte „fps“ gibt an, mit welcher Bildwiederholrate (*frames per second*) die Videos aufgezeichnet wurden.

**Tab. B.1** – Zeiträume mit stationärem Zustand für die analysierten BaSiGo-Experimente

| Durchlauf <sup>1</sup> | fps | Gesamt<br>(erstes Bild) | Gesamt<br>(letztes Bild) | Stationarität<br>(erstes Bild) | Stationarität<br>(letztes Bild) |
|------------------------|-----|-------------------------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| UNI_CORR_500_01        | 16  | 32                      | 1412                     | 142                            | 1098                            |
| uni_corr_500_02        | 25  | 85                      | 4877                     | 150                            | 4619                            |
| UNI_CORR_500_03        | 16  | 1                       | 2661                     | 394                            | 1957                            |
| UNI_CORR_500_04        | 16  | 36                      | 2754                     | 675                            | 1812                            |
| UNI_CORR_500_05        | 16  | 40                      | 2699                     | 799                            | 2155                            |
| uni_corr_500_07        | 25  | 61                      | 5188                     | 1334                           | 3366                            |
| BI_CORR_400_A_01       | 16  | 80                      | 1606                     | 457                            | 1330                            |
| BI_CORR_400_A_02       | 16  | 63                      | 2366                     | 748                            | 1624                            |
| BI_CORR_400_A_03       | 16  | 53                      | 2341                     | 526                            | 1883                            |
| BI_CORR_400_A_04       | 16  | 25                      | 2670                     | 801                            | 1905                            |
| BI_CORR_400_A_05       | 16  | 1                       | 2838                     | 452                            | 2277                            |
| bi_corr_400_b_03       | 25  | 94                      | 3340                     | 233                            | 3126                            |
| bi_corr_400_b_04       | 25  | 104                     | 4848                     | 864                            | 3376                            |
| bi_corr_400_b_07       | 25  | 125                     | 4193                     | 895                            | 3670                            |
| bi_corr_400_b_08       | 25  | 22                      | 5777                     | 1986                           | 4855                            |
| bi_corr_400_b_09       | 25  | 125                     | 3107                     | 651                            | 2778                            |
| bi_corr_400_b_10       | 25  | 104                     | 5297                     | 1586                           | 3282                            |

Fortsetzung auf der nächsten Seite

*Fortsetzung der Tabelle*

| <b>Durchlauf</b> <sup>1</sup> | <b>fps</b> | <b>Gesamt<br/>(erstes Bild)</b> | <b>Gesamt<br/>(letztes Bild)</b> | <b>Stationarität<br/>(erstes Bild)</b> | <b>Stationarität<br/>(letztes Bild)</b> |
|-------------------------------|------------|---------------------------------|----------------------------------|--|---|
| crossing_90_a_01              | 25         | 118                             | 4320                             | 563                                    | 3665                                    |
| crossing_90_a_02              | 25         | 117                             | 3424                             | 616                                    | 2208                                    |
| crossing_90_a_03              | 25         | 91                              | 2360                             | 605                                    | 2042                                    |
| crossing_90_a_04              | 25         | 141                             | 2767                             | 773                                    | 2084                                    |
| crossing_90_a_05              | 25         | 71                              | 2273                             | 668                                    | 1457                                    |
| crossing_90_a_06              | 25         | 126                             | 1315                             | 359                                    | 764                                     |
| crossing_90_a_07              | 25         | 120                             | 2621                             | 539                                    | 1791                                    |
| crossing_90_a_08              | 25         | 123                             | 1922                             | 503                                    | 1123                                    |
| crossing_90_a_09              | 25         | 130                             | 3036                             | 148                                    | 2827                                    |
| crossing_90_a_10              | 25         | 125                             | 2477                             | 500                                    | 1675                                    |
| crossing_90_b_03              | 25         | 126                             | 3056                             | 2397                                   | 2824                                    |
| crossing_90_b_04              | 25         | 124                             | 2826                             | 660                                    | 1494                                    |
| crossing_90_b_05              | 25         | 116                             | 2520                             | 799                                    | 1821                                    |
| crossing_90_b_06              | 25         | 43                              | 2520                             | 674                                    | 1719                                    |
| crossing_90_b_07              | 25         | 106                             | 2511                             | 285                                    | 1904                                    |
| crossing_90_c_03              | 25         | 117                             | 2364                             | 523                                    | 2089                                    |
| crossing_90_c_04              | 25         | 113                             | 2633                             | 741                                    | 1959                                    |
| crossing_90_c_05              | 25         | 87                              | 3048                             | 893                                    | 1904                                    |
| crossing_90_c_06              | 25         | 64                              | 2745                             | 794                                    | 1814                                    |
| crossing_90_c_07              | 25         | 108                             | 2489                             | 635                                    | 1490                                    |
| crossing_90_c_08              | 25         | 117                             | 2359                             | 698                                    | 1840                                    |
| CROSSING_90_D_01              | 16         | 15                              | 3200                             | 2557                                   | 2934                                    |
| CROSSING_90_D_03              | 16         | 40                              | 3027                             | 320                                    | 2411                                    |
| CROSSING_90_D_05              | 16         | 1                               | 2460                             | 634                                    | 1757                                    |
| CROSSING_90_D_06              | 16         | 42                              | 2147                             | 447                                    | 1387                                    |
| CROSSING_90_D_07              | 16         | 24                              | 2256                             | 701                                    | 1353                                    |
| CROSSING_90_E_02              | 16         | 46                              | 3394                             | 116                                    | 2058                                    |
| CROSSING_90_E_03              | 16         | 84                              | 3018                             | 406                                    | 2317                                    |
| CROSSING_90_E_04              | 16         | 62                              | 3308                             | 738                                    | 2648                                    |
| CROSSING_90_E_05              | 16         | 68                              | 2997                             | 863                                    | 2625                                    |
| CROSSING_90_E_06              | 16         | 51                              | 2548                             | 590                                    | 1960                                    |
| CROSSING_90_F_01              | 16         | 59                              | 2962                             | 918                                    | 1894                                    |
| CROSSING_90_F_02              | 16         | 62                              | 2888                             | 414                                    | 2232                                    |
| CROSSING_90_F_03              | 16         | 32                              | 2776                             | 753                                    | 2143                                    |
| CROSSING_90_G_01              | 16         | 48                              | 2711                             | 891                                    | 1740                                    |
| CROSSING_90_G_02              | 16         | 1                               | 2926                             | 909                                    | 2208                                    |
| CROSSING_90_G_03              | 16         | 21                              | 2372                             | 383                                    | 1792                                    |
| CROSSING_120_A_01             | 16         | 75                              | 1337                             | 175                                    | 1161                                    |
| CROSSING_120_A_02             | 16         | 74                              | 1571                             | 317                                    | 1097                                    |
| CROSSING_120_A_03             | 16         | 66                              | 1611                             | 239                                    | 993                                     |

*Fortsetzung auf der nächsten Seite*

Fortsetzung der Tabelle

| Durchlauf <sup>1</sup> | fps | Gesamt<br>(erstes Bild) | Gesamt<br>(letztes Bild) | Stationarität<br>(erstes Bild) | Stationarität<br>(letztes Bild) |
|------------------------|-----|-------------------------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| CROSSING_120_A_04      | 16  | 77                      | 2456                     | 556                            | 1549                            |
| CROSSING_120_A_05      | 16  | 72                      | 3050                     | 328                            | 2638                            |
| CROSSING_120_A_06      | 16  | 35                      | 2954                     | 937                            | 2157                            |
| CROSSING_120_A_07      | 16  | 28                      | 3309                     | 446                            | 2624                            |
| CROSSING_120_B_01      | 16  | 51                      | 3501                     | 639                            | 2897                            |
| CROSSING_120_B_02      | 16  | 1                       | 2919                     | 637                            | 2618                            |
| CROSSING_120_C_01      | 16  | 51                      | 1440                     | 396                            | 1109                            |
| CROSSING_120_C_02      | 16  | 63                      | 1649                     | 218                            | 1459                            |
| CROSSING_120_C_03      | 16  | 68                      | 2574                     | 700                            | 1551                            |
| CROSSING_120_C_05      | 16  | 29                      | 3258                     | 787                            | 2275                            |
| CROSSING_120_C_06      | 16  | 36                      | 4428                     | 634                            | 3166                            |
| CROSSING_120_C_07      | 16  | 31                      | 3095                     | 599                            | 2671                            |

<sup>1</sup> Zur Groß-/Kleinschreibung der Namen vgl. Hinweise in Anhang E.2

Tab. B.2 – Zeiträume mit stationärem Zustand für die analysierten Hermes-Experimente

| Durchlauf <sup>1</sup> | fps | Gesamt<br>(erstes Bild) | Gesamt<br>(letztes Bild) | Stationarität<br>(erstes Bild) | Stationarität<br>(letztes Bild) |
|------------------------|-----|-------------------------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| uo-060-180-180         | 16  | 76                      | 980                      | 145                            | 852                             |
| uo-070-180-180         | 16  | 77                      | 1364                     | 148                            | 1254                            |
| uo-100-180-180         | 16  | 15                      | 958                      | 105                            | 837                             |
| uo-145-180-180         | 16  | 87                      | 1305                     | 248                            | 1138                            |
| uo-180-180-070         | 16  | 218                     | 1817                     | 493                            | 1452                            |
| uo-180-180-120         | 16  | 60                      | 1371                     | 375                            | 1162                            |
| uo-180-180-180         | 16  | 29                      | 1467                     | 269                            | 1324                            |
| uo-095-240-240         | 16  | 75                      | 991                      | 121                            | 877                             |
| uo-145-240-240         | 16  | 149                     | 1092                     | 226                            | 961                             |
| uo-190-240-240         | 16  | 64                      | 1213                     | 347                            | 746                             |
| uo-240-240-100         | 16  | 23                      | 1999                     | 364                            | 1221                            |
| uo-240-240-130         | 16  | 45                      | 1636                     | 437                            | 1257                            |
| uo-240-240-160         | 16  | 360                     | 1945                     | 462                            | 1631                            |
| uo-240-240-240         | 16  | 119                     | 1318                     | 330                            | 1043                            |
| uo-080-300-300         | 16  | 155                     | 1499                     | 234                            | 1353                            |
| uo-100-300-300         | 16  | 67                      | 915                      | 132                            | 798                             |
| uo-120-300-300         | 16  | 154                     | 1231                     | 273                            | 1115                            |
| uo-180-300-300         | 16  | 68                      | 1042                     | 252                            | 935                             |
| uo-240-300-300         | 16  | 113                     | 1235                     | 212                            | 1087                            |
| uo-300-300-080         | 16  | 61                      | 2672                     | 510                            | 2115                            |
| uo-300-300-120         | 16  | 264                     | 2383                     | 564                            | 2062                            |
| uo-300-300-160         | 16  | 112                     | 1674                     | 440                            | 1434                            |
| uo-300-300-300         | 16  | 115                     | 1439                     | 288                            | 1055                            |

Fortsetzung auf der nächsten Seite

*Fortsetzung der Tabelle*

| <b>Durchlauf</b> <sup>1</sup> | <b>fps</b> | <b>Gesamt<br/>(erstes Bild)</b> | <b>Gesamt<br/>(letztes Bild)</b> | <b>Stationarität<br/>(erstes Bild)</b> | <b>Stationarität<br/>(letztes Bild)</b> |
|-------------------------------|------------|---------------------------------|----------------------------------|--|---|
| bo-360-075-075                | 16         | 33                              | 1151                             | 144                                    | 693                                     |
| bo-360-090-090                | 16         | 102                             | 1160                             | 236                                    | 1027                                    |
| bo-360-160-160                | 16         | 63                              | 1387                             | 296                                    | 1022                                    |
| boa-300-050-070               | 16         | 58                              | 1154                             | 158                                    | 818                                     |
| boa-300-050-085               | 16         | 48                              | 1071                             | 177                                    | 688                                     |
| boa-300-055-095               | 16         | 61                              | 905                              | 234                                    | 696                                     |
| boa-300-065-105               | 16         | 49                              | 1511                             | 205                                    | 987                                     |
| boa-300-080-120               | 16         | 40                              | 1223                             | 225                                    | 804                                     |
| bot-300-065-065               | 16         | 264                             | 1321                             | 341                                    | 1087                                    |
| bot-300-075-075               | 16         | 48                              | 1044                             | 248                                    | 700                                     |
| bot-300-085-085               | 16         | 137                             | 1311                             | 278                                    | 1058                                    |
| bot-300-100-100               | 16         | 40                              | 1148                             | 360                                    | 776                                     |
| bot-360-050-050               | 16         | 66                              | 1197                             | 152                                    | 900                                     |
| bot-360-075-075               | 16         | 47                              | 921                              | 115                                    | 689                                     |
| bot-360-090-090               | 16         | 1                               | 1076                             | 294                                    | 706                                     |
| bot-360-120-120v2             | 16         | 59                              | 985                              | 266                                    | 594                                     |
| bot-360-160-160               | 16         | 49                              | 1354                             | 379                                    | 1046                                    |
| bot-360-200-200               | 16         | 78                              | 1330                             | 276                                    | 1126                                    |
| bot-360-250-250               | 16         | 64                              | 1290                             | 337                                    | 1025                                    |
| ko-240-050-240                | 16         | 89                              | 1088                             | 121                                    | 960                                     |
| ko-240-060-240                | 16         | 69                              | 1010                             | 106                                    | 598                                     |
| ko-240-080-240                | 16         | 101                             | 1257                             | 135                                    | 1118                                    |
| ko-240-100-240                | 16         | 138                             | 1170                             | 254                                    | 1008                                    |
| ko-240-120-240                | 16         | 60                              | 1570                             | 242                                    | 1280                                    |
| ko-240-150-240                | 16         | 68                              | 1493                             | 371                                    | 1239                                    |
| ko-240-240-240                | 16         | 343                             | 1756                             | 425                                    | 1471                                    |
| ko-300-050-300                | 16         | 205                             | 1315                             | 268                                    | 1181                                    |
| ko-300-080-300                | 16         | 74                              | 1185                             | 172                                    | 1045                                    |
| ko-300-120-300                | 16         | 83                              | 1351                             | 312                                    | 1021                                    |
| ko-300-150-300                | 16         | 76                              | 1315                             | 289                                    | 991                                     |

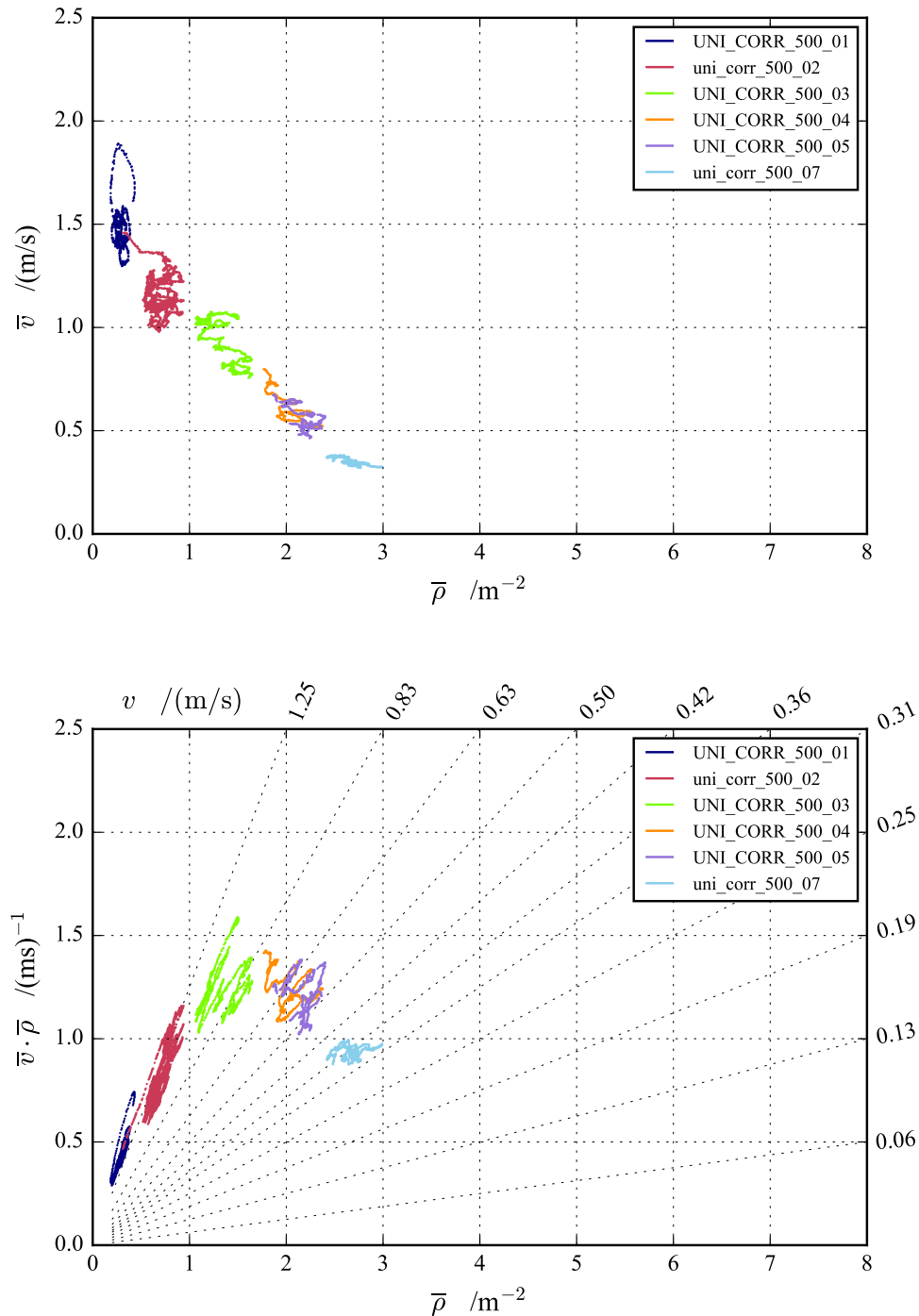
<sup>1</sup> Zur Groß-/Kleinschreibung der Namen vgl. Hinweise in Anhang E.2



## **Anhang C**

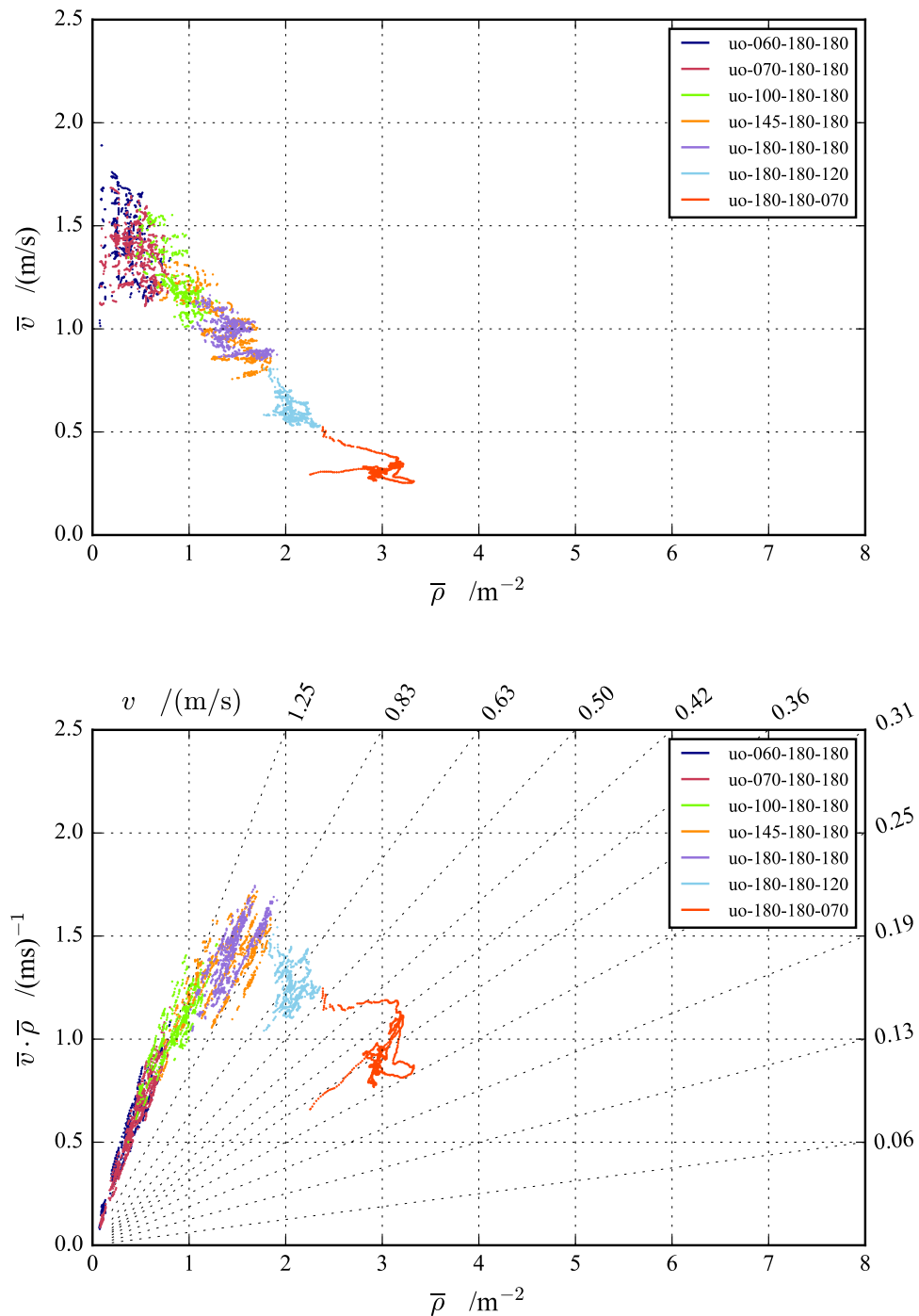
# **Fundamentaldiagramme der analysierten Einzelexperimente**

## C.1 BaSiGo: UNI\_CORR\_500



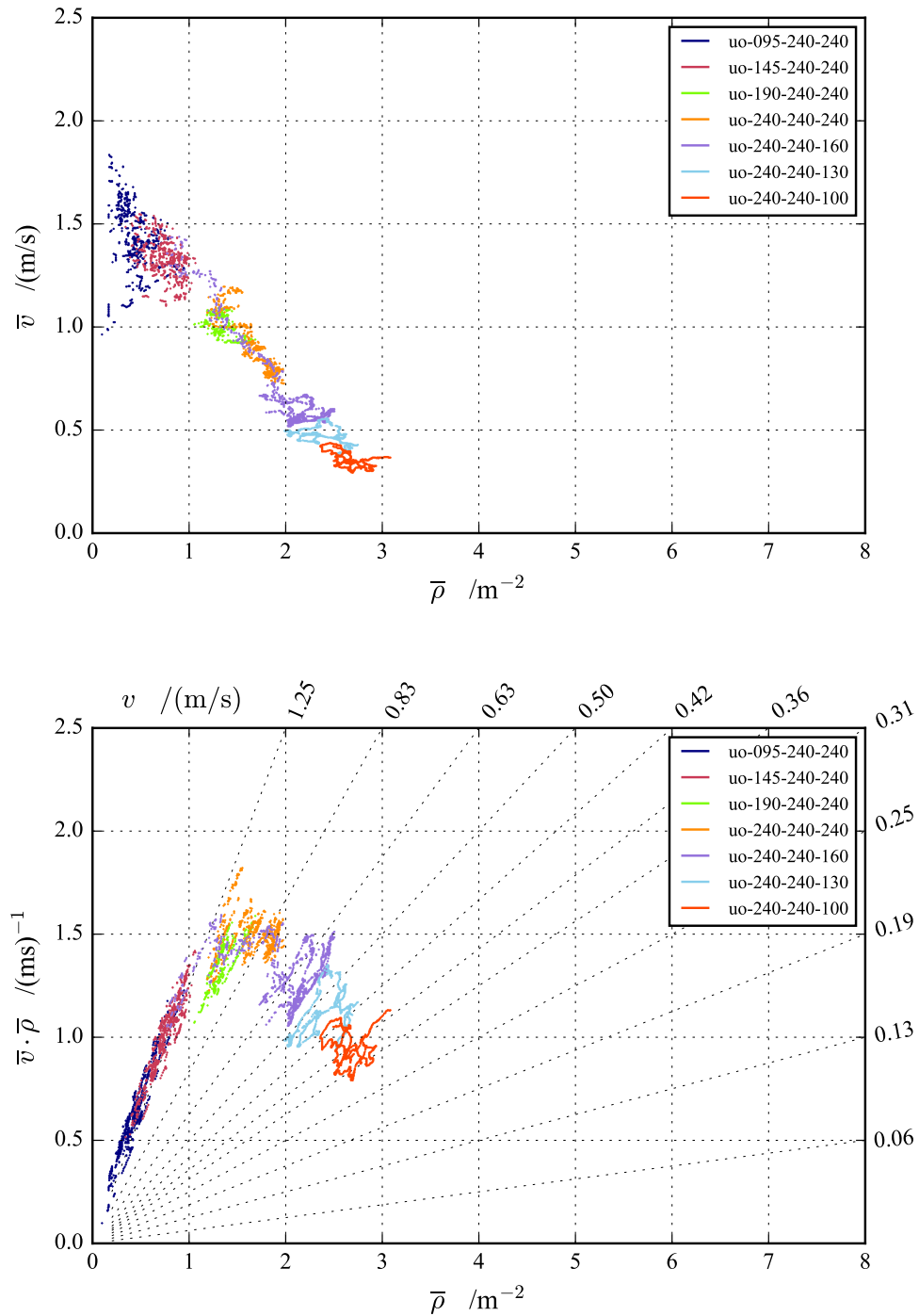
**Abb. C.1** – Fundamentaldiagramme für das BaSiGo-Experiment UNI\_CORR\_500. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe. Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe sowie Nomogrammlinien für die zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$ . Die Beschreibung der Datenanalyse findet sich in Abschnitt 5.4.1.

## C.2 Hermes: UO\_180



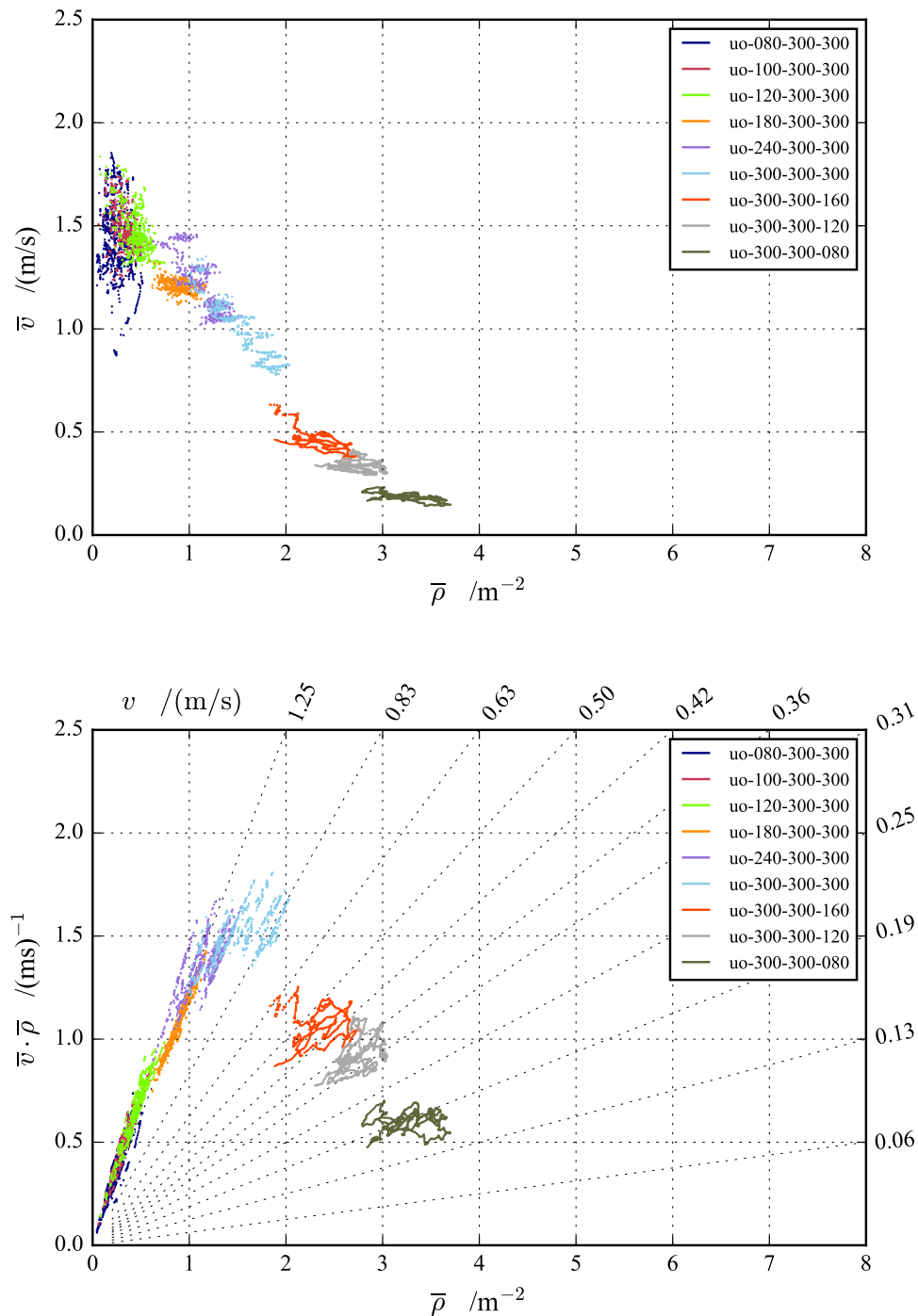
**Abb. C.2** – Fundamentaldiagramme für das Hermes-Experiment UO\_180. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe. Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe sowie Nomogrammlinien für die zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$ . Die Beschreibung der Datenanalyse findet sich in Abschnitt 5.4.1.

## C.3 Hermes: UO\_240



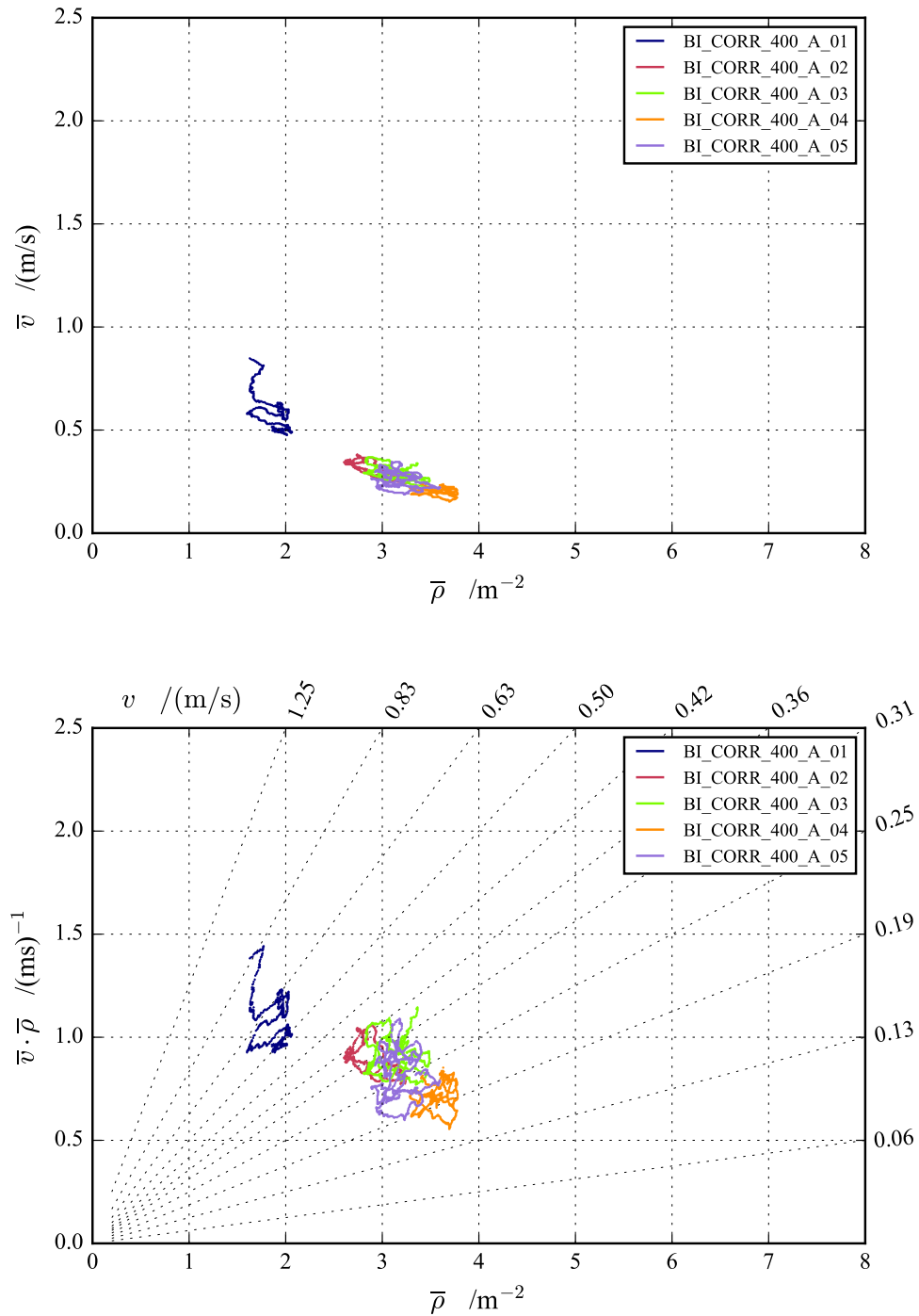
**Abb. C.3** – Fundamentaldiagramme für das Hermes-Experiment UO\_240. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe. Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe sowie Nomogrammlinien für die zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$ . Die Beschreibung der Datenanalyse findet sich in Abschnitt 5.4.1.

## C.4 Hermes: UO\_300



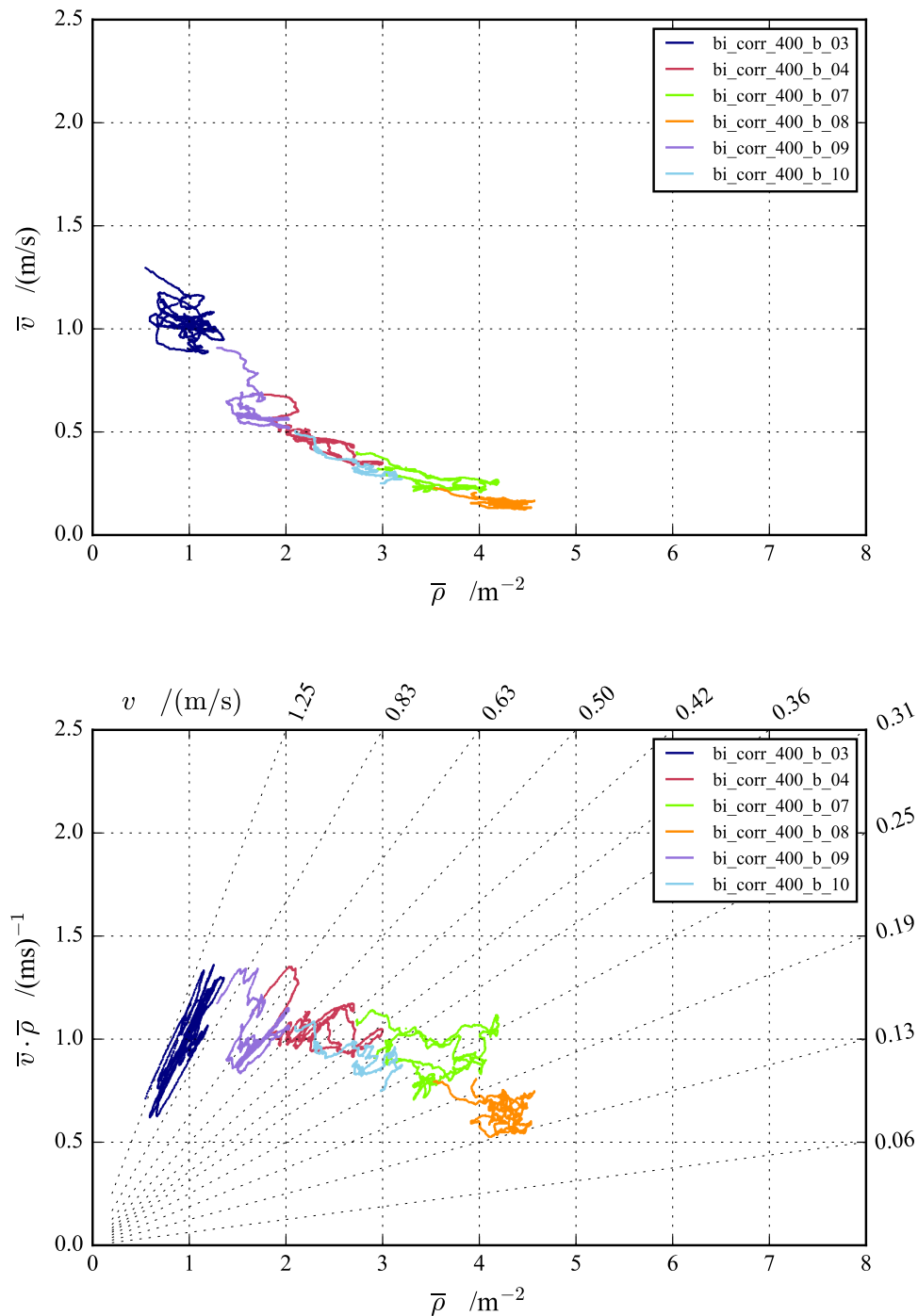
**Abb. C.4** – Fundamentaldiagramme für das Hermes-Experiment UO\_300. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe. Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe sowie Nomogrammlinien für die zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$ . Die Beschreibung der Datenanalyse findet sich in Abschnitt 5.4.1.

## C.5 BaSiGo: BI\_CORR\_400\_A



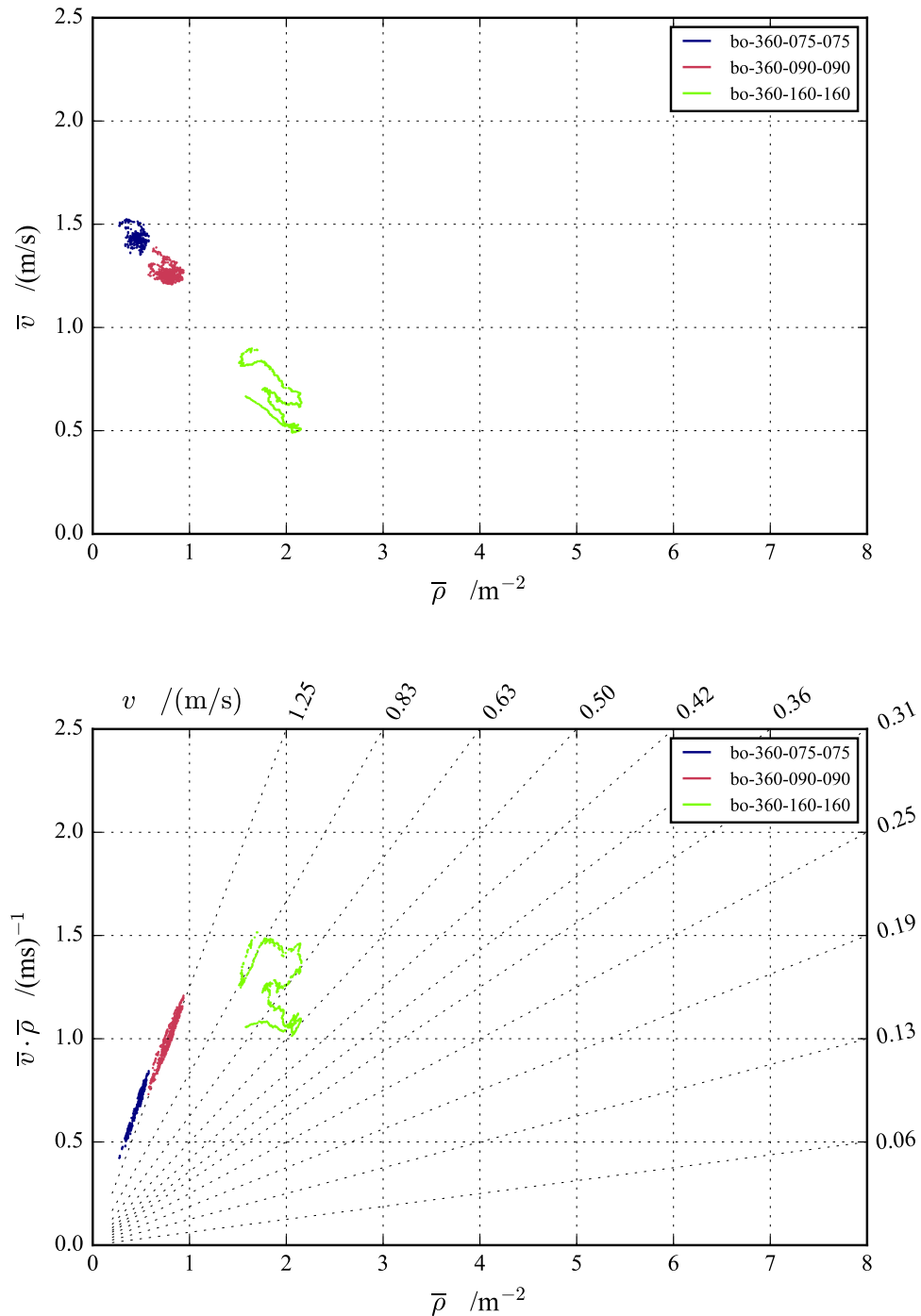
**Abb. C.5** – Fundamentaldiagramme für das BaSiGo-Experiment BI\_CORR\_400\_A. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe. Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe sowie Nomogrammlinien für die zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$ . Die Beschreibung der Datenanalyse findet sich in Abschnitt 5.4.2.

## C.6 BaSiGo: BI\_CORR\_400\_B



**Abb. C.6** – Fundamentaldiagramme für das BaSiGo-Experiment BI\_CORR\_400\_B. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe. Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe sowie Nomogrammlinien für die zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$ . Die Beschreibung der Datenanalyse findet sich in Abschnitt 5.4.2.

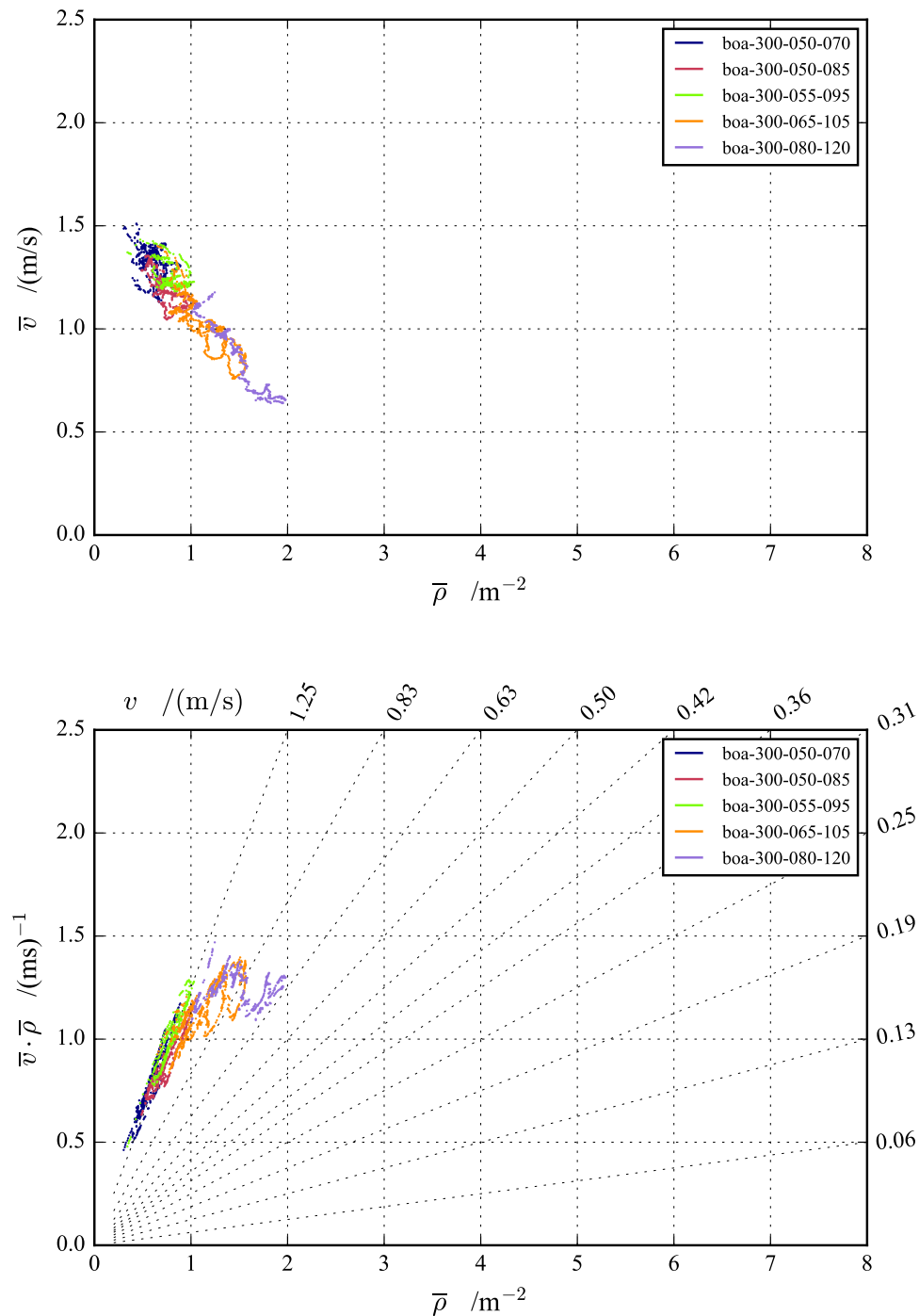
## C.7 Hermes: BO\_360



**Abb. C.7** – Fundamentaldiagramme für das Hermes-Experiment BO\_360. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe. Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe sowie Nomogrammlinien für die zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$ . Die Beschreibung der Datenanalyse findet sich in Abschnitt 5.4.2.

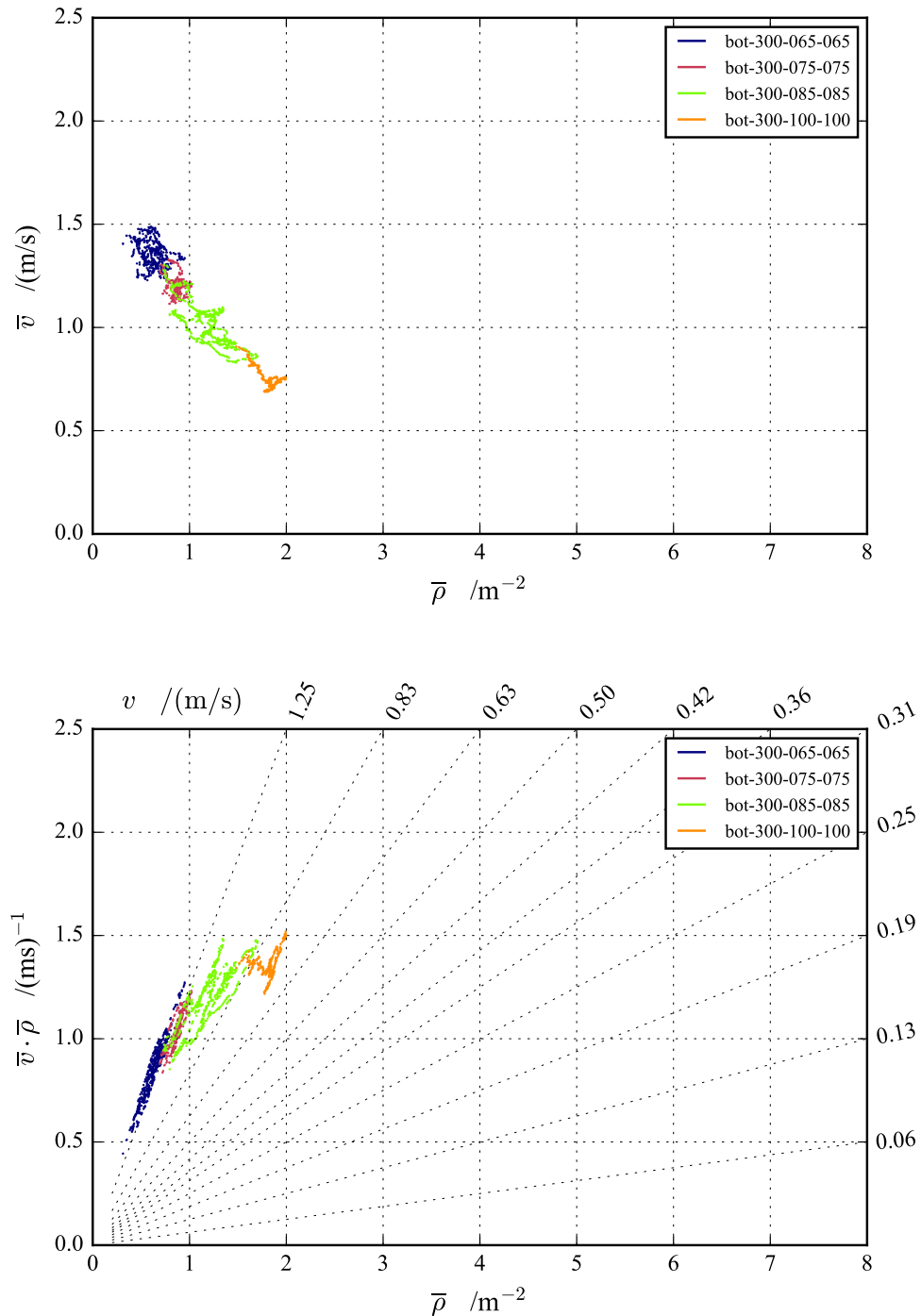


## C.8 Hermes: BOA\_300



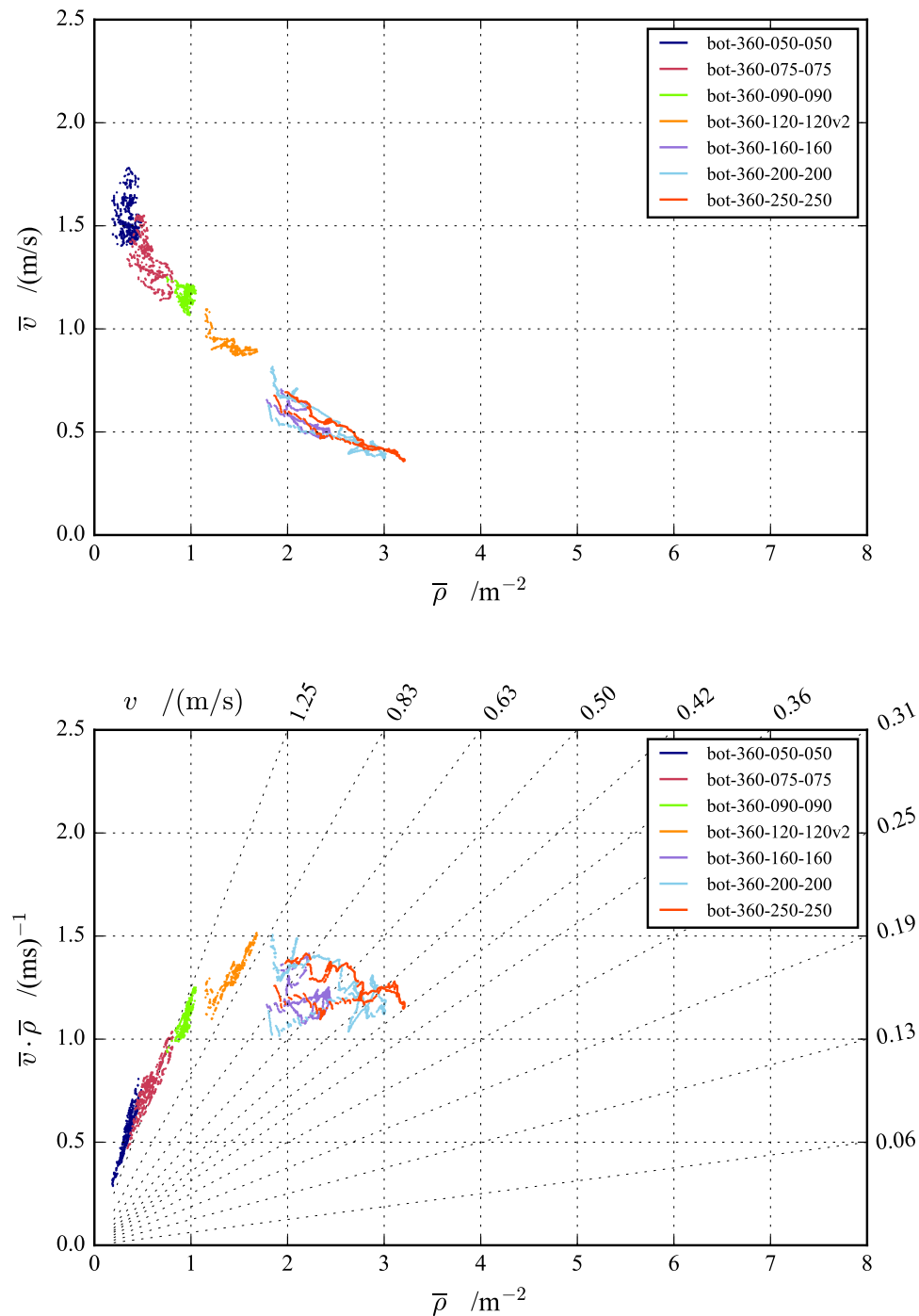
**Abb. C.8** – Fundamentaldiagramme für das Hermes-Experiment BOA\_300. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe. Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe sowie Nomogrammlinien für die zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$ . Die Beschreibung der Datenanalyse findet sich in Abschnitt 5.4.2.

## C.9 Hermes: BOT\_300



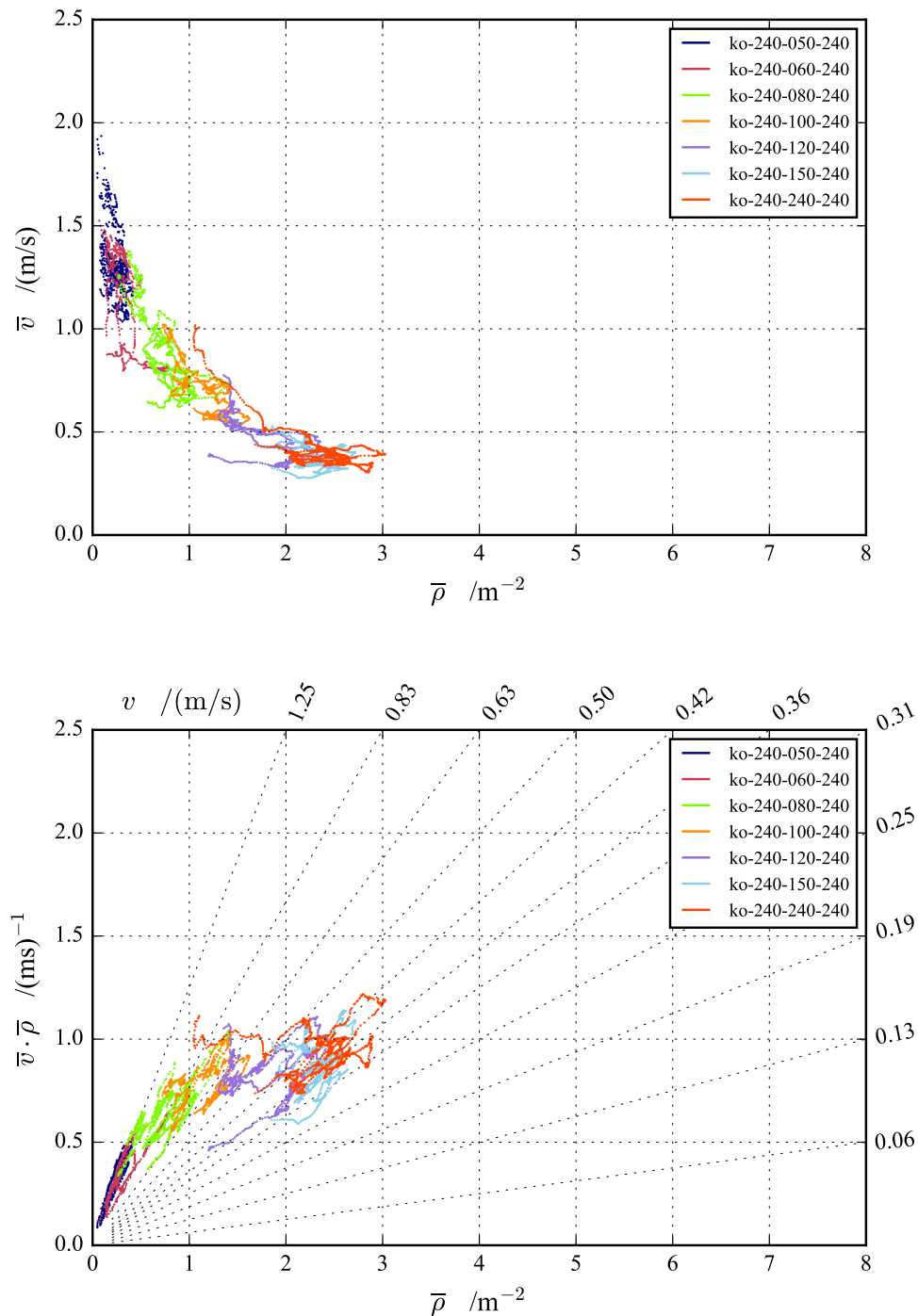
**Abb. C.9** – Fundamentaldiagramme für das Hermes-Experiment BOT\_300. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe. Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe sowie Nomogrammlinien für die zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$ . Die Beschreibung der Datenanalyse findet sich in Abschnitt 5.4.2.

## C.10 Hermes: BOT\_360



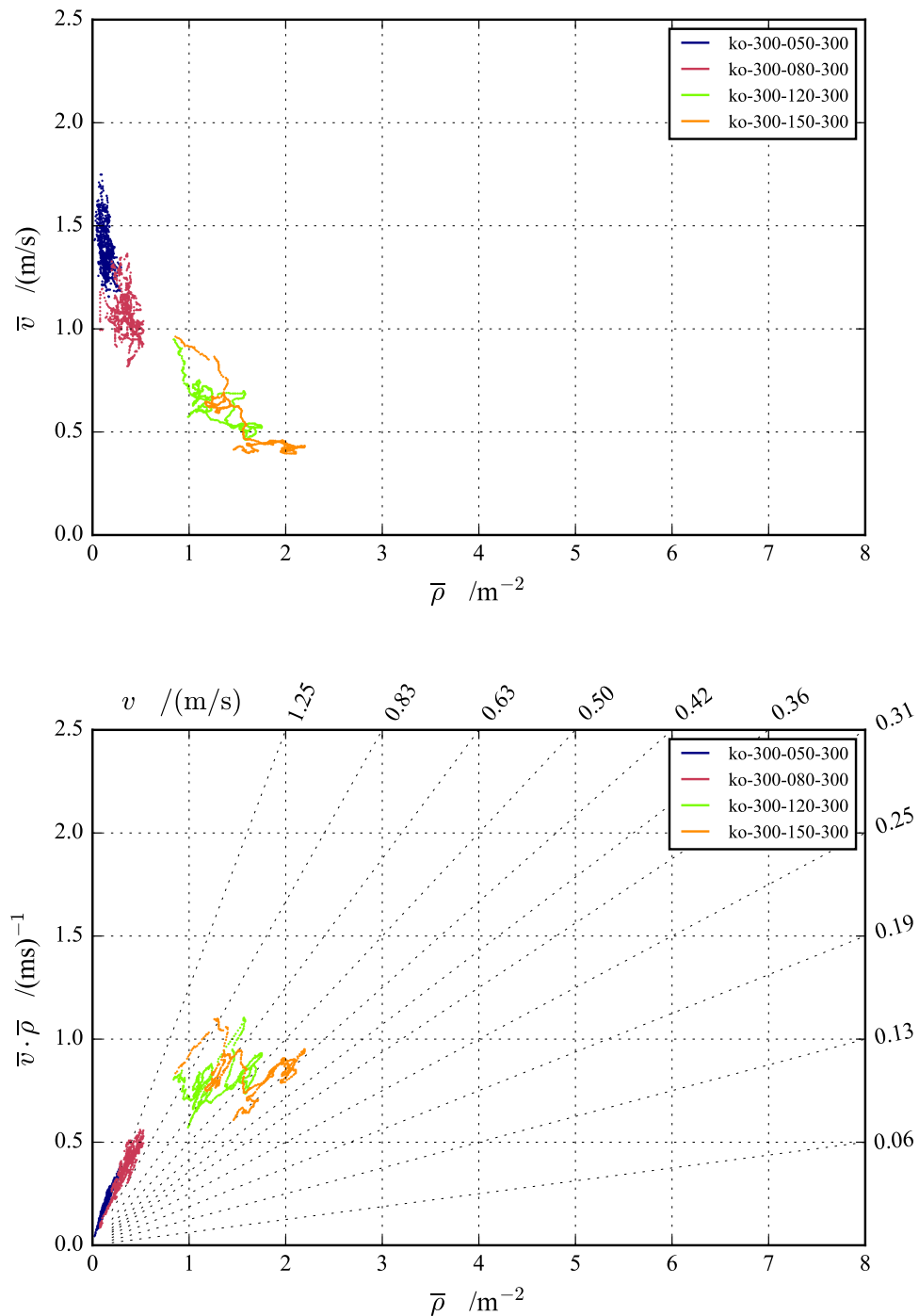
**Abb. C.10** – Fundamentaldiagramme für das Hermes-Experiment BOT\_360. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe. Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe sowie Nomogrammlinien für die zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$ . Die Beschreibung der Datenanalyse findet sich in Abschnitt 5.4.2.

## C.11 Hermes: KO\_240



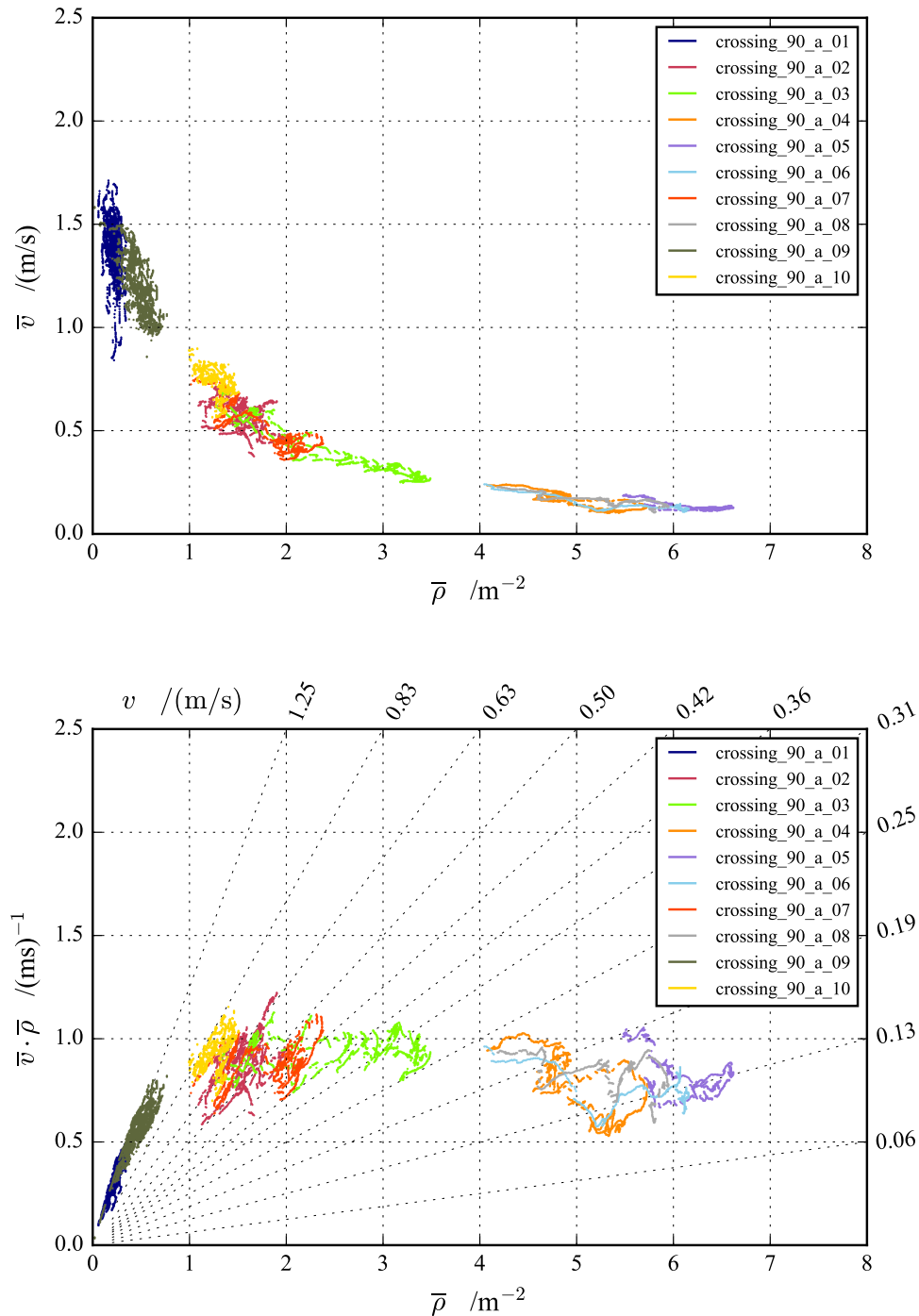
**Abb. C.11** – Fundamentaldiagramme für das Hermes-Experiment KO\_240. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe. Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe sowie Nomogrammlinien für die zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$ . Die Beschreibung der Datenanalyse findet sich in Abschnitt 5.4.3.

## C.12 Hermes: KO\_300



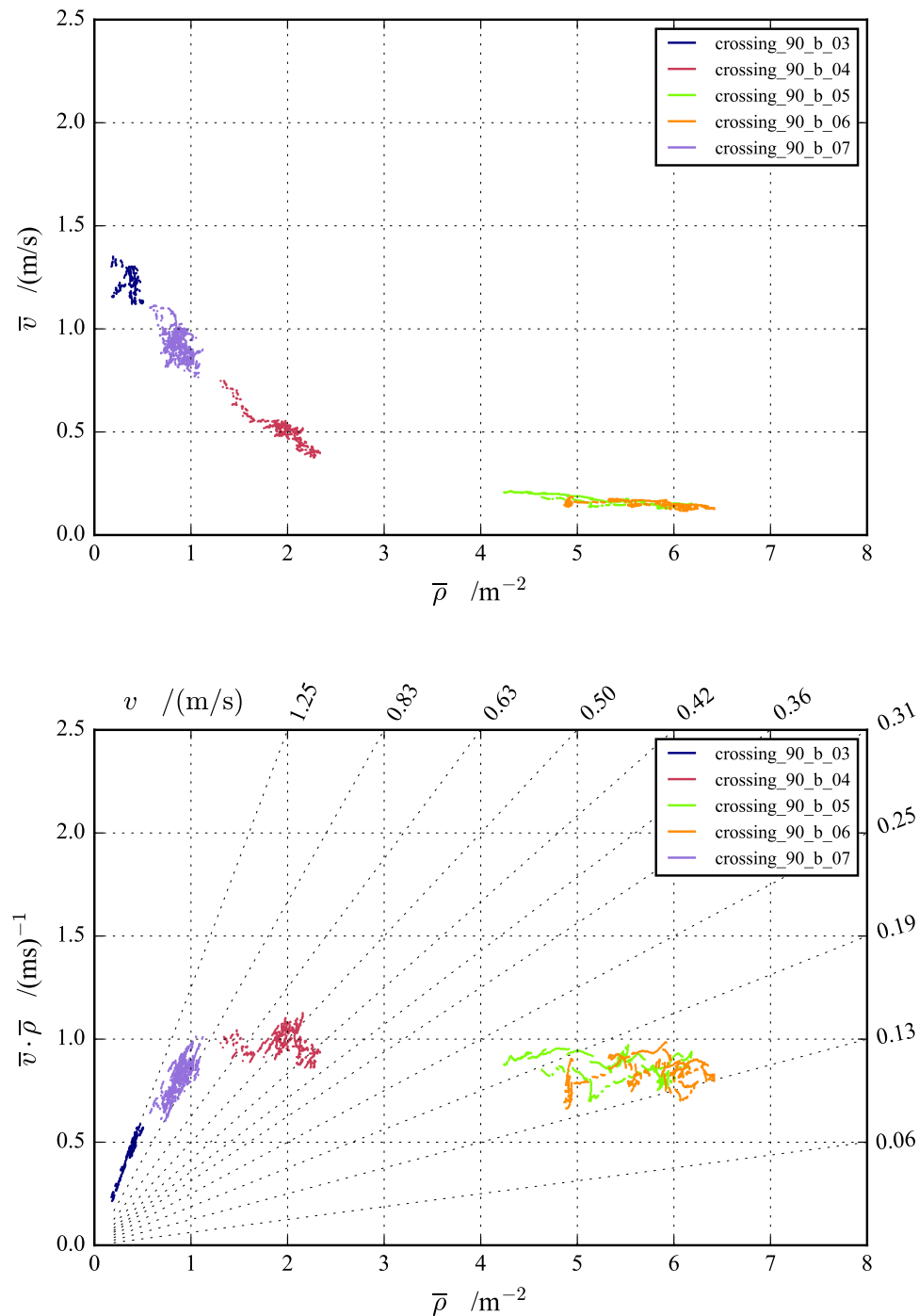
**Abb. C.12** – Fundamentaldiagramme für das Hermes-Experiment KO\_300. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe. Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe sowie Nomogrammlinien für die zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$ . Die Beschreibung der Datenanalyse findet sich in Abschnitt 5.4.3.

## C.13 BaSiGo: CROSSING\_90\_A



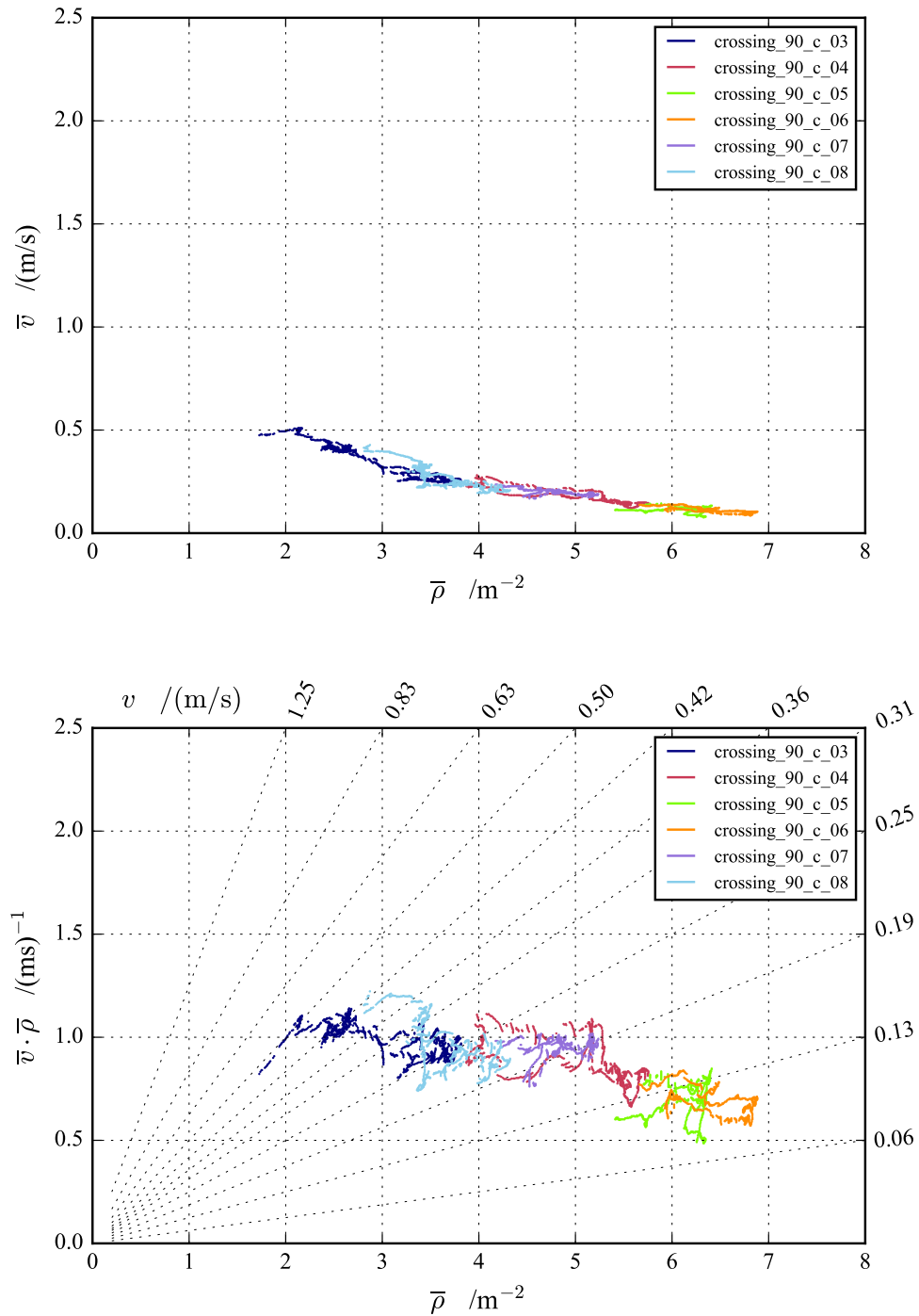
**Abb. C.13** – Fundamentaldiagramme für das BaSiGo-Experiment CROSSING\_90\_A. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe. Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe sowie Nomogrammlinien für die zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$ . Die Beschreibung der Datenanalyse findet sich in Abschnitt 5.4.4.

## C.14 BaSiGo: CROSSING\_90\_B



**Abb. C.14** – Fundamentaldiagramme für das BaSiGo-Experiment CROSSING\_90\_B. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe. Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe sowie Nomogrammlinien für die zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$ . Die Beschreibung der Datenanalyse findet sich in Abschnitt 5.4.4.

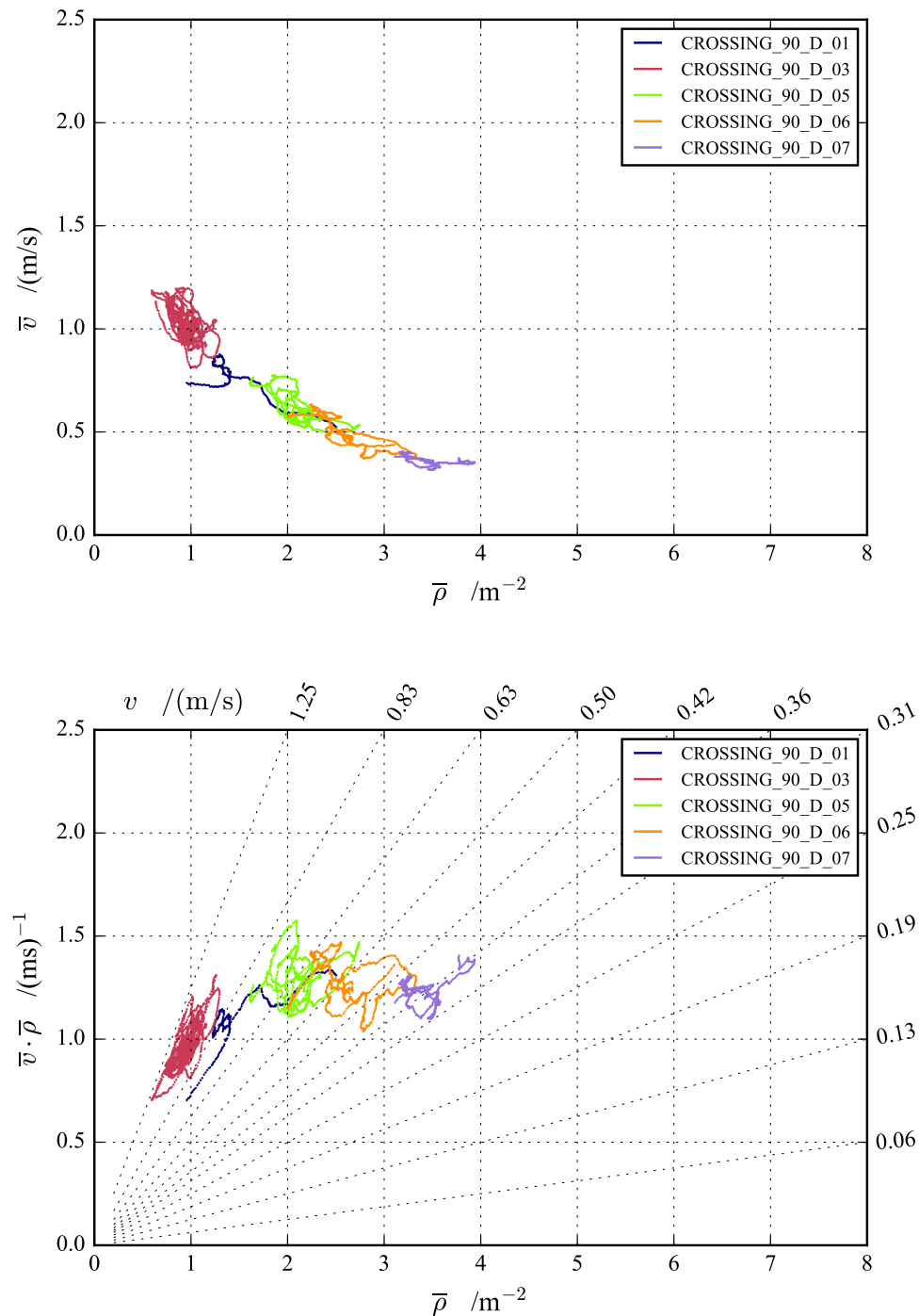
## C.15 BaSiGo: CROSSING\_90\_C



**Abb. C.15** – Fundamentaldiagramme für das BaSiGo-Experiment CROSSING\_90\_C. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe. Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe sowie Nomogrammlinien für die zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$ . Die Beschreibung der Datenanalyse findet sich in Abschnitt 5.4.4.

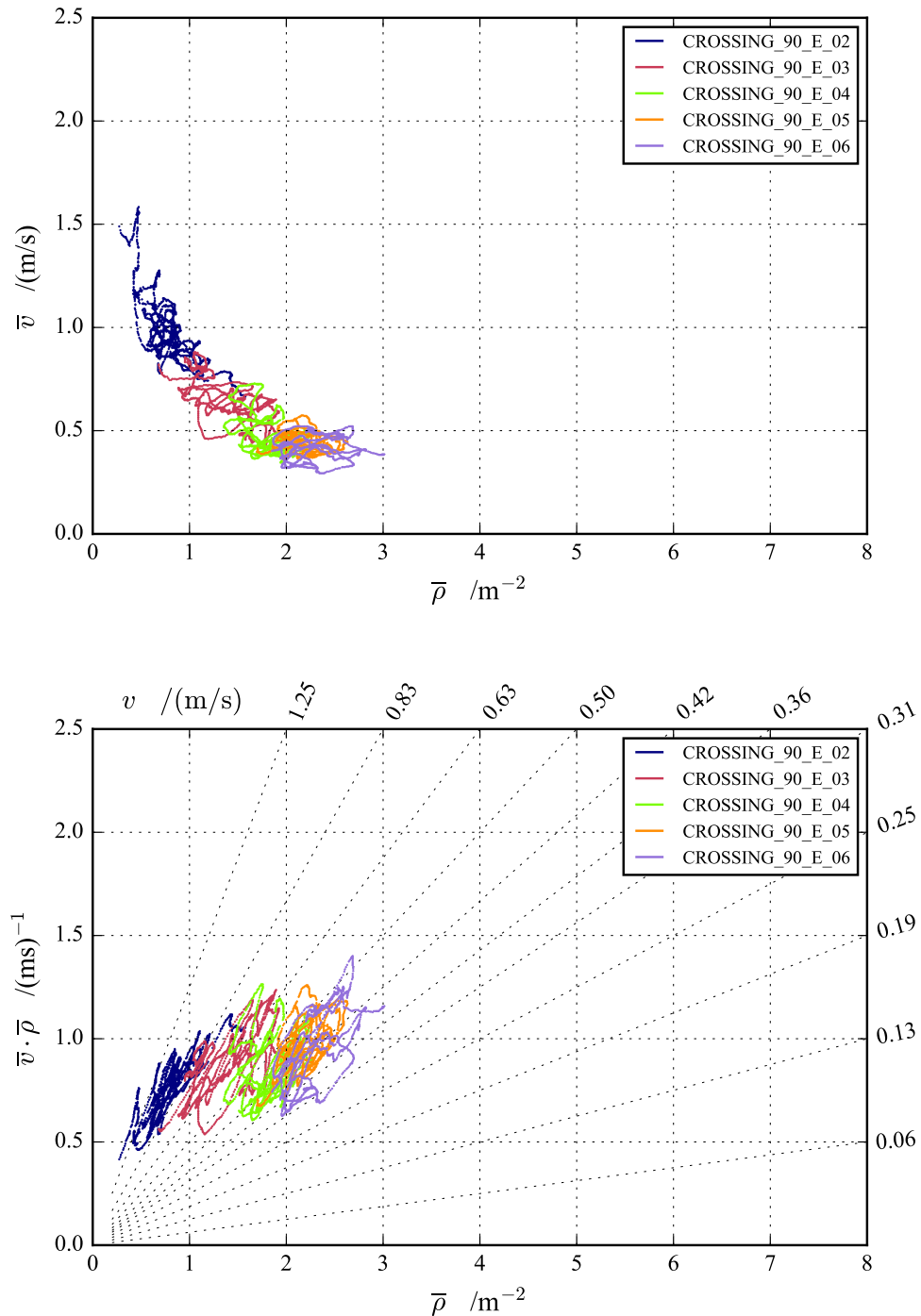


## C.16 BaSiGo: CROSSING\_90\_D



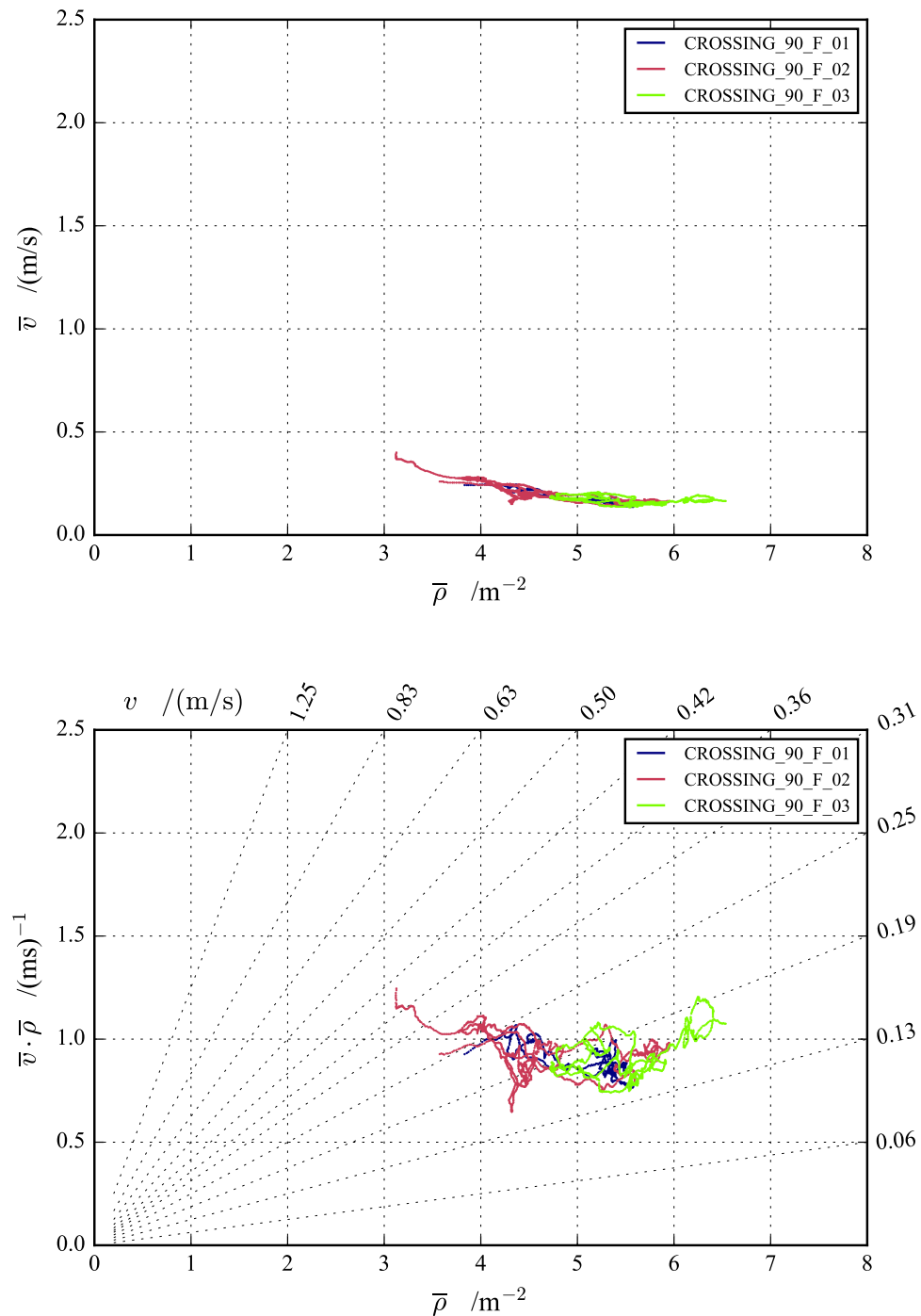
**Abb. C.16** – Fundamentaldiagramme für das BaSiGo-Experiment CROSSING\_90\_D. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe. Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe sowie Nomogrammlinien für die zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$ . Die Beschreibung der Datenanalyse findet sich in Abschnitt 5.4.4.

## C.17 BaSiGo: CROSSING\_90\_E



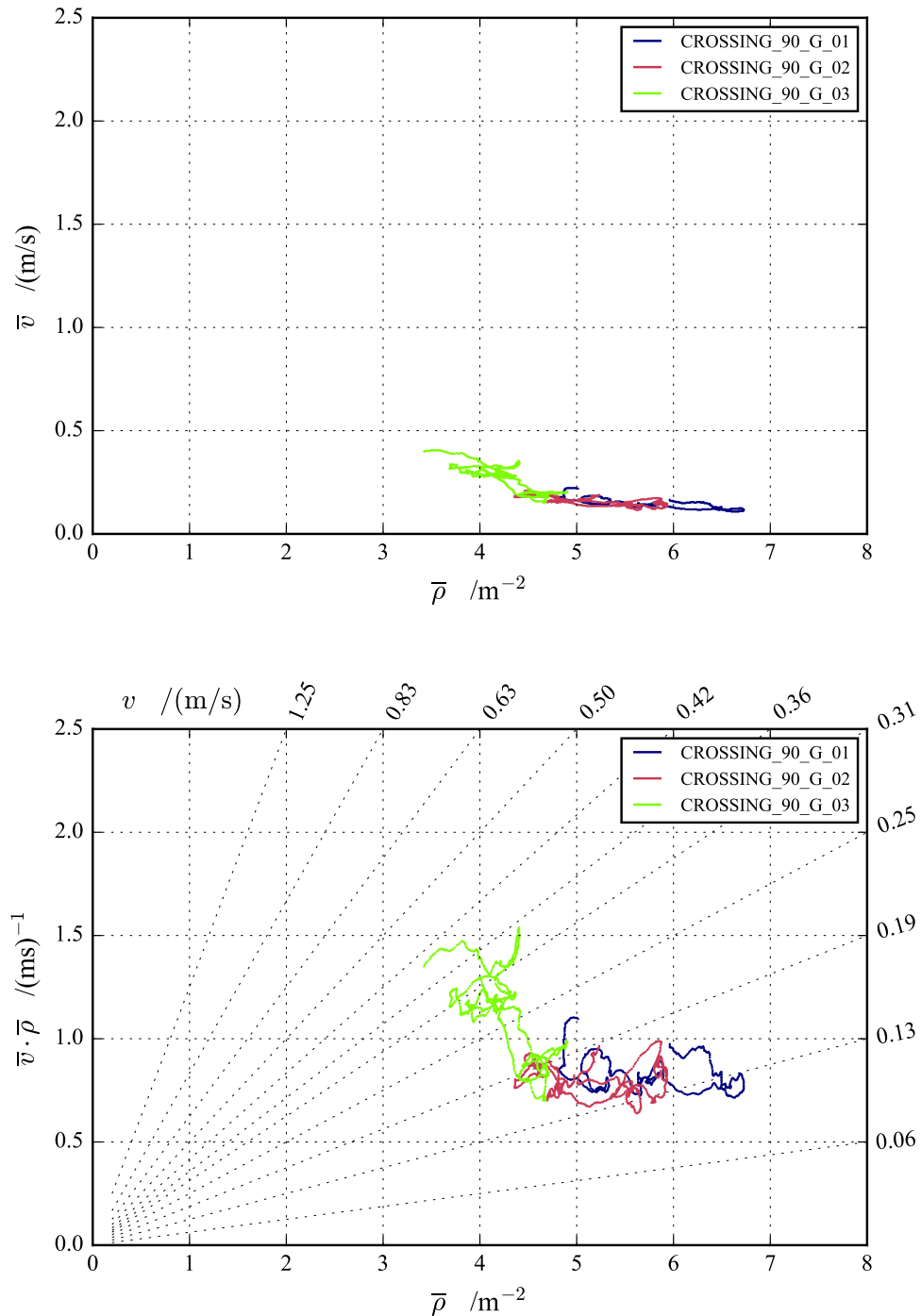
**Abb. C.17** – Fundamentaldiagramme für das BaSiGo-Experiment CROSSING\_90\_E. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe. Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe sowie Nomogrammlinien für die zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$ . Die Beschreibung der Datenanalyse findet sich in Abschnitt 5.4.4.

## C.18 BaSiGo: CROSSING\_90\_F



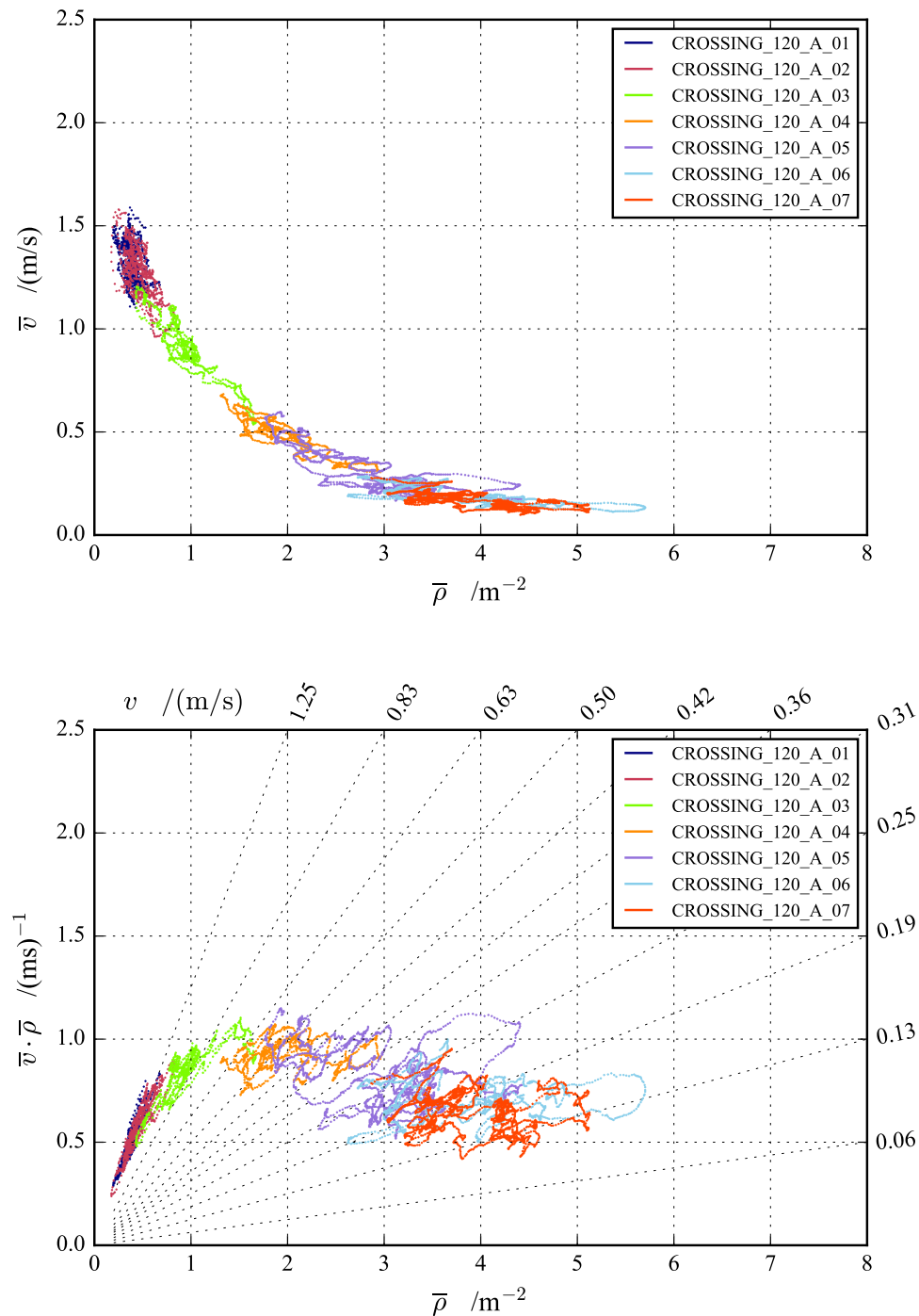
**Abb. C.18** – Fundamentaldiagramme für das BaSiGo-Experiment CROSSING\_90\_F. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe. Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe sowie Nomogrammlinien für die zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$ . Die Beschreibung der Datenanalyse findet sich in Abschnitt 5.4.4.

## C.19 BaSiGo: CROSSING\_90\_G



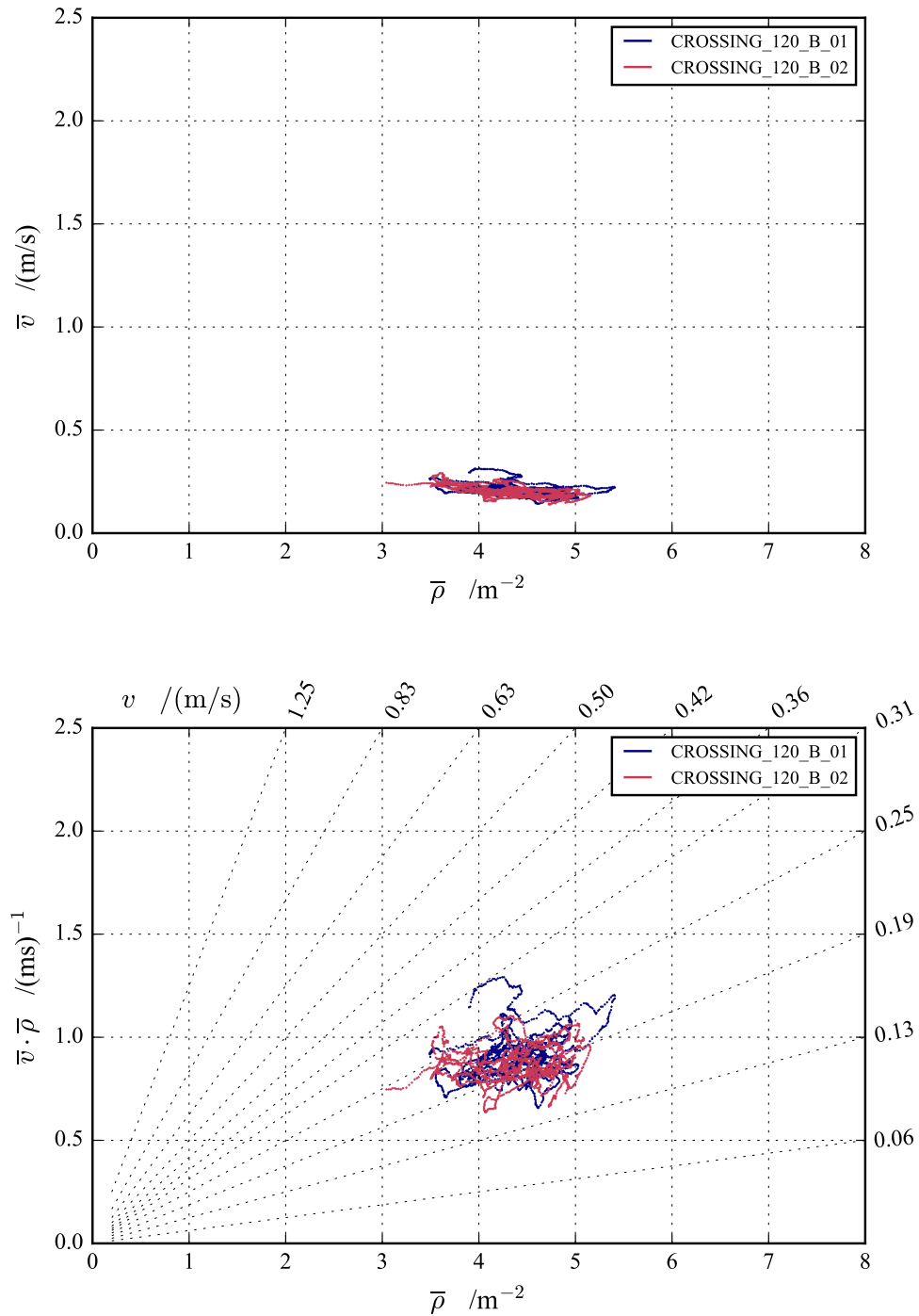
**Abb. C.19** – Fundamentaldiagramme für das BaSiGo-Experiment CROSSING\_90\_G. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe. Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe sowie Nomogrammlinien für die zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$ . Die Beschreibung der Datenanalyse findet sich in Abschnitt 5.4.4.

## C.20 BaSiGo: CROSSING\_120\_A



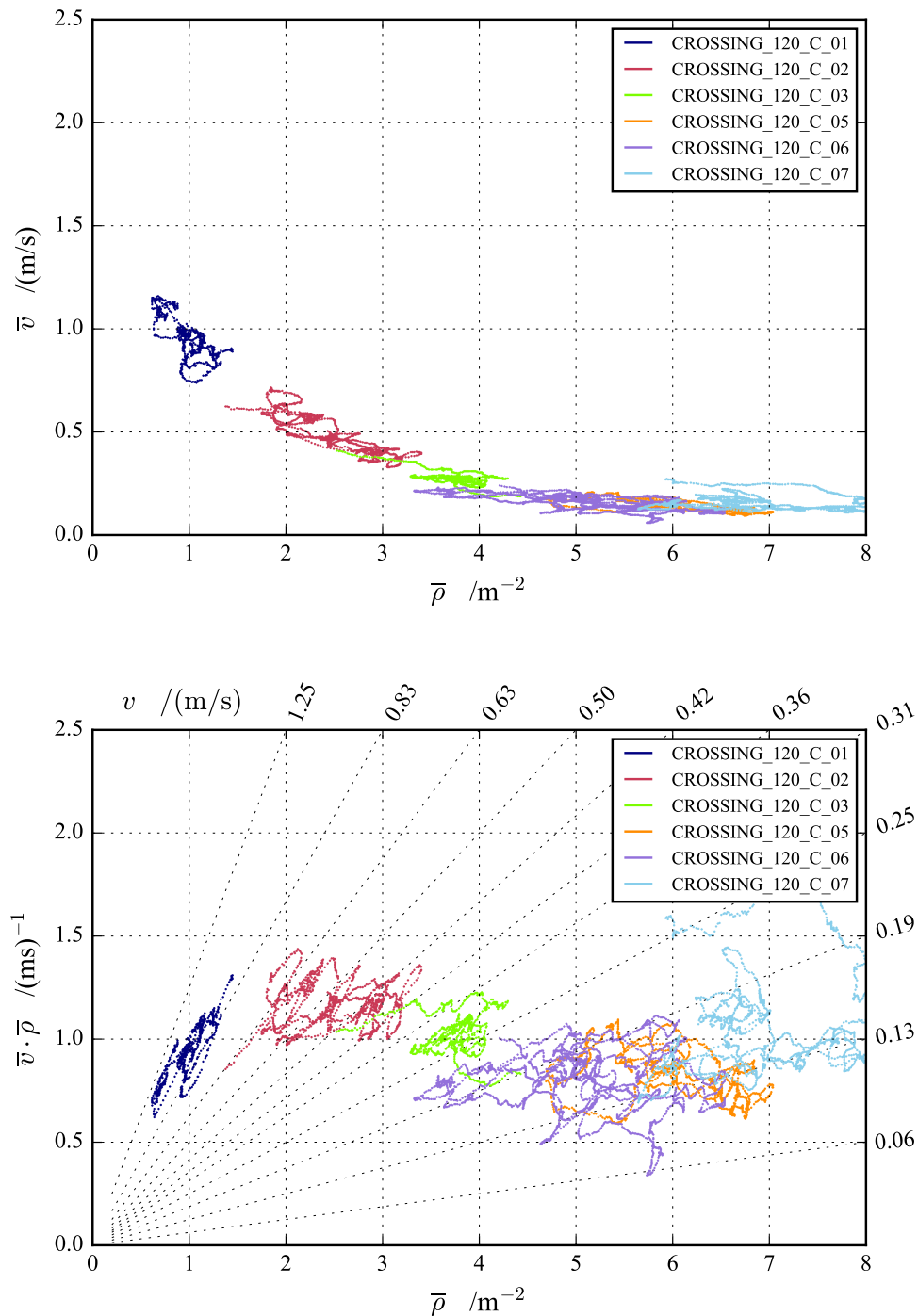
**Abb. C.20** – Fundamentaldiagramme für das BaSiGo-Experiment CROSSING\_120\_A. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe. Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe sowie Nomogrammlinien für die zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$ . Die Beschreibung der Datenanalyse findet sich in Abschnitt 5.4.5.

## C.21 BaSiGo: CROSSING\_120\_B



**Abb. C.21** – Fundamentaldiagramme für das BaSiGo-Experiment CROSSING\_120\_B. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe. Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe sowie Nomogrammlinien für die zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$ . Die Beschreibung der Datenanalyse findet sich in Abschnitt 5.4.5.

## C.22 BaSiGo: CROSSING\_120\_C



**Abb. C.22** – Fundamentaldiagramme für das BaSiGo-Experiment CROSSING\_120\_C. Oben: Fundamentaldiagramm  $\bar{v}(\bar{\rho})$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe. Unten: Fundamentaldiagramm  $J_s(\bar{\rho}) = \bar{v} \cdot \bar{\rho}$  mit den Werten der einzelnen Durchläufe sowie Nomogrammlinien für die zugehörigen Geschwindigkeiten  $v$ . Die Beschreibung der Datenanalyse findet sich in Abschnitt 5.4.5.

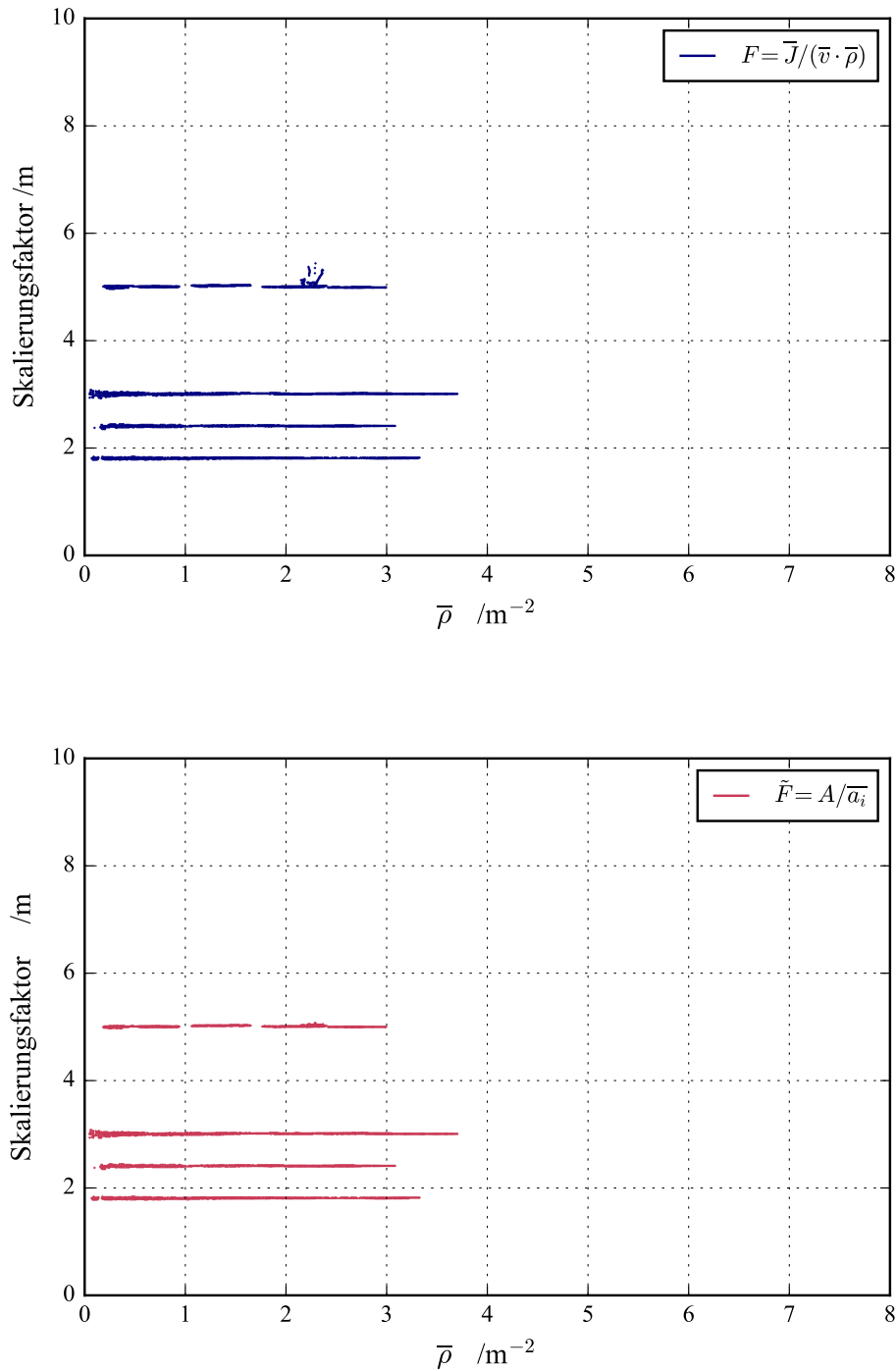




## **Anhang D**

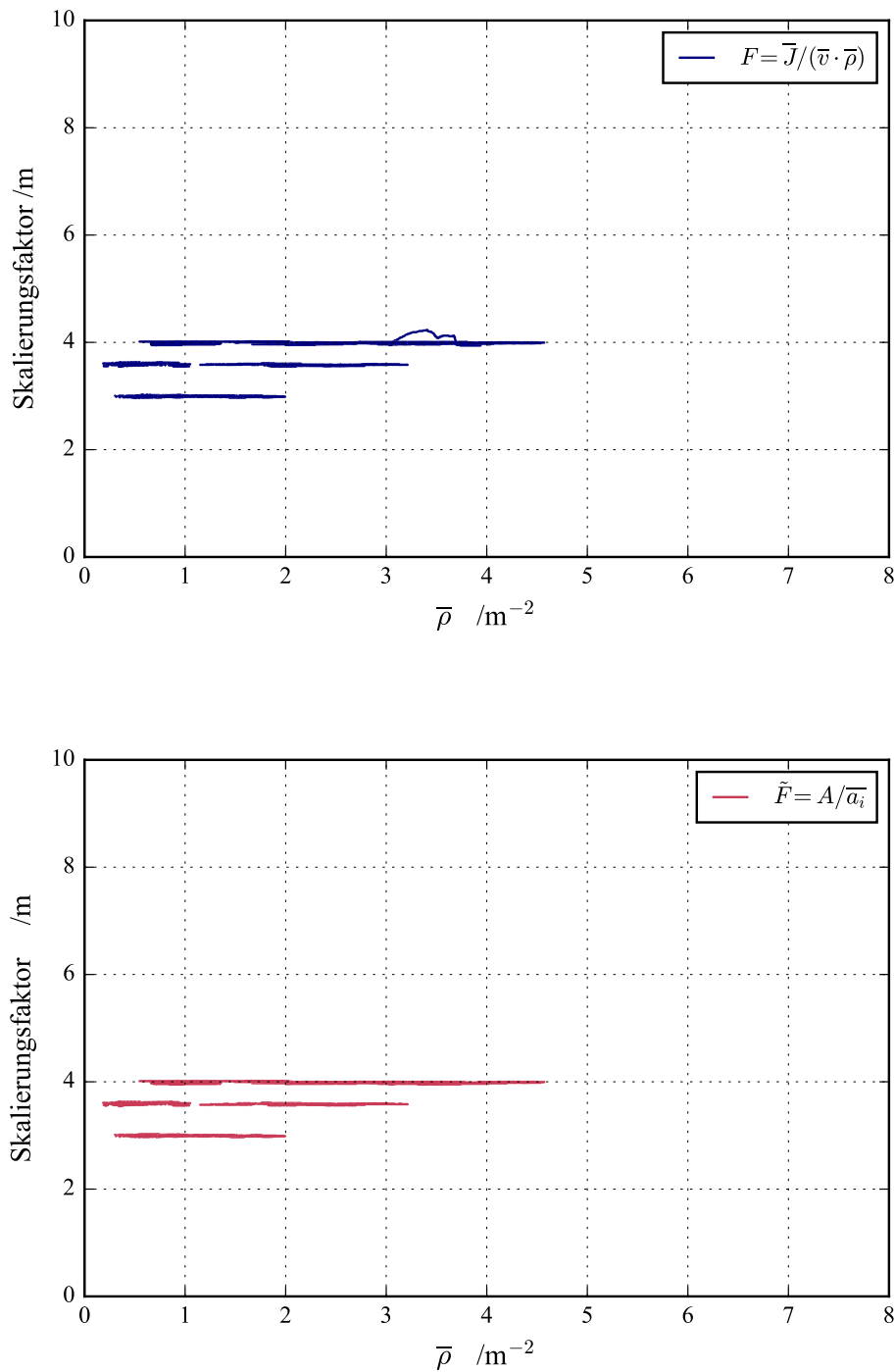
# **Ergänzende Diagramme**

### D.1 Skalierungsfaktoren für den unidirektionalen Verkehr



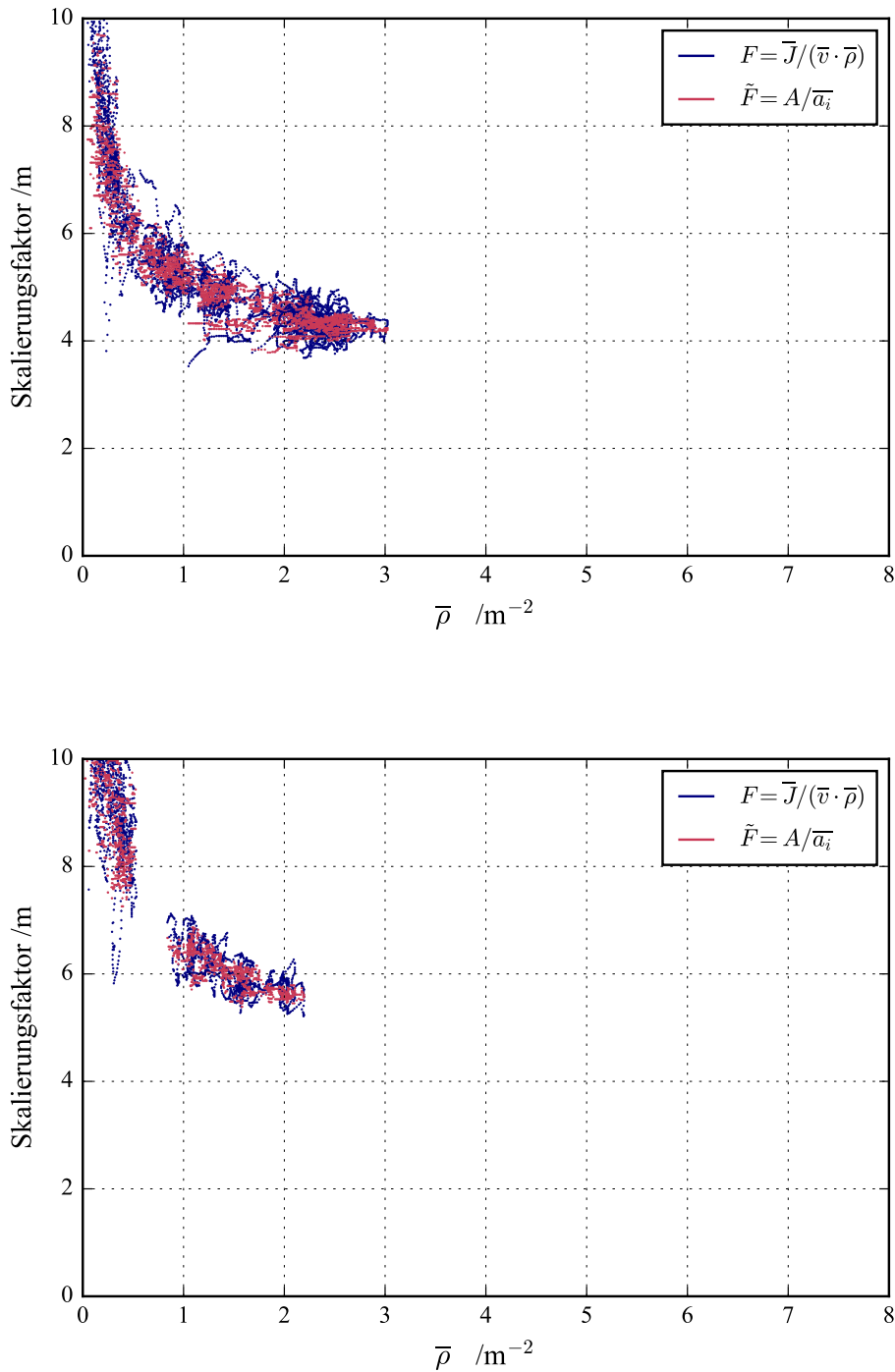
**Abb. D.1** – Vergleich der Skalierungsfaktoren  $F$  bzw.  $\tilde{F}$  als Funktion der mittleren Dichte  $\bar{\rho}$  für den unidirektionalen Verkehr im Korridor. Oben: Der Skalierungsfaktor berechnet sich als  $F = \bar{J} / (\bar{v} \cdot \bar{\rho})$ . Unten: Der Skalierungsfaktor berechnet sich als  $\tilde{F} = A / \bar{a}_i$ . Beide Berechnungsformen liefern weitgehend identische Ergebnisse (vgl. Abbildung 5.9)

## D.2 Skalierungsfaktoren für den bidirektionalen Verkehr



**Abb. D.2** – Vergleich der Skalierungsfaktoren  $F$  bzw.  $\tilde{F}$  als Funktion der mittleren Dichte  $\bar{\rho}$  für den bidirektionalen Verkehr im Korridor. Oben: Der Skalierungsfaktor berechnet sich als  $F = \bar{J} / (\bar{v} \cdot \bar{\rho})$ . Unten: Der Skalierungsfaktor berechnet sich als  $\tilde{F} = A / \bar{a}_i$ . Beide Berechnungsformen liefern weitgehend identische Ergebnisse (vgl. Abbildung 5.13)

### D.3 Skalierungsfaktoren für die T-Kreuzung



**Abb. D.3** – Vergleich der Skalierungsfaktoren  $F$  bzw.  $\tilde{F}$  als Funktion der mittleren Dichte  $\bar{\rho}$  für die T-Kreuzung. Oben: Skalierungsfaktoren für das Experiment KO\_240. Unten: Skalierungsfaktoren für das Experiment KO\_300. In Abbildung 5.17 sind die Skalierungsfaktoren beider Experimente in einem Diagramm dargestellt.

# Anhang E

## Nomenklatur

### E.1 Formelzeichen und Indizes

| Symbol      | Einheit                 | zuerst | Beschreibung   |
|-------------|-------------------------|--------|--|
| $A$         | $\text{m}^2$            | S. 14  | Fläche bzw. Messfläche   |
| $A_i$       | $\text{m}^2$            | S. 38  | Persönliche Fläche (z. B. Voronoi-Zelle) der Person $i$  |
| $a_i$       | m                       | S. 63  | Länge der Verbindungslinie zwischen den beiden Punkten, an denen die Person $i$ die Messfläche $A$ zuerst betreten und zuletzt verlassen hat   |
| $\vec{a}_i$ | m                       | S. 63  | Verbindungsvektor zwischen den beiden Punkten, an denen die Person $i$ die Messfläche $A$ zuerst betreten und zuletzt verlassen hat  |
| $\bar{a}_i$ | m                       | S. 67  | Mittelwert der $a_i$ -Werte  |
| $b$         | m                       | S. 10  | (Weg-)Breite   |
| $b_i$       | m                       | S. 63  | Länge der in Luftlinie gemessenen Strecke, die von Person $i$ innerhalb des Zeitintervalls $[t_0, t_1]$ und innerhalb der Messfläche $A$ zurückgelegt wurde                                |
| $b_{in}$    | m                       | S. 50  | Eingangsbreite der Geometrie bei den Laborexperimenten   |
| $b_{out}$   | m                       | S. 50  | Ausgangsbreite der Geometrie bei den Laborexperimenten   |
| $c_i$       | m                       | S. 63  | Länge der in Luftlinie gemessenen Strecke, die von Person $i$ innerhalb der Messfläche $A$ zum Zeitpunkt $t_0$ bereits zurückgelegt oder zum Zeitpunkt $t_1$ noch nicht zurückgelegt wurde |
| $D$         | $\text{m}^2/\text{m}^2$ | S. 10  | Dichte nach Predtetschenski und Milinski   |
| $d_i$       | -                       | S. 64  | Dimensionsloses Verhältnis zwischen der bereits zurückgelegten Strecke $b_i$ und der Summe aus $b_i$ und $c_i$   |

*Fortsetzung auf der nächsten Seite*

| Symbol                | Einheit            | zuerst | Beschreibung  |
|-----------------------|--------------------|--------|---|
| $e_i$                 | m                  | S. 64  | Länge der tatsächlich innerhalb des Zeitintervalls $[t_0, t_1]$ und innerhalb der Messfläche $A$ in Richtung des Vektors $\vec{a}_i$ zurückgelegten Strecke |
| $F$                   | m                  | S. 66  | Skalierungsfaktor, berechnet als $F = \bar{J}/(\bar{v} \cdot \bar{\rho})$   |
| $\tilde{F}$           | m                  | S. 67  | Skalierungsfaktor, berechnet als $\tilde{F} = A/\bar{a}_i$  |
| $f$                   | m <sup>2</sup>     | S. 10  | Flächenbedarf einer Person nach Predtetschenski und Milinski  |
| $\bar{f}$             | m <sup>2</sup>     | S. 12  | Mittlerer Flächenbedarf mehrerer Personen Predtetschenski und Milinski  |
| $J$                   | s <sup>-1</sup>    | S. 3   | Personenfluss: Anzahl der Personen, die eine Messlinie oder Messfläche im Zeitraum $\Delta t$ passieren   |
| $\bar{J}$             | s <sup>-1</sup>    | S. 62  | Mittelwert des Personenflusses  |
| $J_s$                 | (ms) <sup>-1</sup> | S. 3   | Spezifischer Personenfluss: Personenfluss pro Meter   |
| $J_V$                 | s <sup>-1</sup>    | S. 36  | Mit dem Voronoi-Verfahren bestimmter Personenfluss  |
| $l_{\text{Strom}}$    | m                  | S. 10  | Länge des Personenstroms nach Predtetschenski und Milinski  |
| $M$                   | s                  | S. 37  | Messintervall   |
| $N$                   | -                  | S. 28  | Personenanzahl  |
| $p$                   | -                  | S. 14  | Häufigkeit  |
| $q$                   | m/min              | S. 12  | Bewegungsintensität nach Predtetschenski und Milinski   |
| $q_{\text{max}}$      | m/min              | S. 13  | Maximale Bewegungsintensität nach Predtetschenski und Milinski  |
| $TTC$                 | s                  | S. 77  | Zeitdauer bis zur Kollision ( <i>time to collision</i> )  |
| $t$                   | s                  | S. 25  | Zeit  |
| $t_{i,in}, t_{i,out}$ | s                  | S. 63  | Zeitpunkte, zu denen die Person $i$ erstmals die Messfläche $A$ betritt und zuletzt wieder verlässt   |
| $t_0$                 | s                  | S. 25  | Zeitpunkt einer Messung   |
| $t_0, t_1$            | s                  | S. 62  | Untere und obere Grenze des Zeitintervalls $[t_0, t_1]$   |
| $\Delta t$            | s                  | S. 25  | Zeitdauer, Zeitintervall  |
| $v$                   | m/s                | S. 3   | Gehgeschwindigkeit: In der Regel in der Einheit m/s, bei Predtetschenski und Milinski in der Einheit m/min  |
| $\bar{v}$             | m/s                | S. 19  | Mittlere Gehgeschwindigkeit   |
| $v_0$                 | m/s                | S. 20  | Freie Gehgeschwindigkeit bzw. Wunschgeschwindigkeit einer Person ohne Beeinträchtigung durch andere Personen  |
| $\bar{v}_A$           | m/s                | S. 41  | Arithmetischer Mittelwert der Gehgeschwindigkeiten  |
| $\bar{v}_E$           | m/s                | S. 40  | Mittelwert der Gehgeschwindigkeiten nach Edie   |
| $\bar{v}_H$           | m/s                | S. 41  | Harmonischer Mittelwert der Gehgeschwindigkeiten  |
| $v_i$                 | m/s                | S. 32  | Momentangeschwindigkeit der Person $i$  |
| $\vec{v}_i$           | m/s                | S. 39  | Geschwindigkeitsvektor der Person $i$   |
| $v_{\text{max}}$      | m/s                | S. 8   | Obergrenze der Geschwindigkeit für den natürlichen Gang   |

Fortsetzung auf der nächsten Seite

| Symbol         | Einheit            | zuerst | Beschreibung  |
|----------------|--------------------|--------|---|
| $v_{\min}$     | m/s                | S. 7   | Untergrenze der Geschwindigkeit für den natürlichen Gang                |
| $v_V$          | m/s                | S. 36  | Mit dem Voronoi-Verfahren bestimmte Geschwindigkeit                     |
| $x$            | m                  | S. 26  | Hauptachse des Koordinatensystems                                       |
| $x_0$          | m                  | S. 25  | Ort einer Messung (Messlinie)   |
| $\vec{x}_i$    | m                  | S. 37  | Ortsvektor der Person $i$   |
| $\Delta x$     | m                  | S. 25  | Wegabschnitt auf der $x$ -Achse   |
| $y$            | m                  | S. 26  | Hauptachse des Koordinatensystems                                       |
| $y_0$          | m                  | S. 28  | Ort einer Messung (Messlinie)   |
| $\Delta y$     | m                  | S. 25  | Wegabschnitt auf der $y$ -Achse   |
| $\mu$          | wie Größe          | S. 87  | Mittelwert  |
| $\rho$         | $\text{m}^{-2}$    | S. 3   | Personen- oder Verkehrsdichte   |
| $\bar{\rho}$   | $\text{m}^{-2}$    | S. 34  | Mittlere Personen- oder Verkehrsdichte                                  |
| $\tilde{\rho}$ | -                  | S. 8   | Normierte, einheitenlose Dichte: $\tilde{\rho} = \rho \cdot \text{m}^2$ |
| $\rho_V$       | $\text{m}^{-2}$    | S. 36  | Mit dem Voronoi-Verfahren bestimmte Personendichte                      |
| $\sigma_{J_s}$ | $(\text{ms})^{-1}$ | S. 87  | Standardabweichung des spezifischen Flusses                             |
| $\sigma_v$     | m                  | S. 21  | Standardabweichung der Geschwindigkeit                                  |
| $\varnothing$  | -                  | S. 49  | Durchmesser   |
| #              | -                  | S. 49  | Anzahl  |

## E.2 Schriftschnitt und Konventionen

Englische Begriffe und Hervorhebungen im Text werden kursiv gesetzt. In Diagrammen werden englische Begriffe ohne Hervorhebung sowie Dezimalpunkte verwendet.

Variablen werden kursiv gesetzt. Vektoren werden durch einen Pfeil ausgezeichnet (Beispiel:  $\vec{x}$ ).

Die Standardabweichung wird im Text mit  $\pm$  angegeben.

Die in dieser Arbeit analysierten Trajektoriensätze wurden zum Teil mit der Software PeTrack [6, 7], zum Teil mit einem im Rahmen des Projektes BaSiGo erarbeiteten Verfahren [70] aus Videodaten extrahiert. In den Legenden der Diagramme sowie in den Tabellen B.1 und B.2 wird für die mit PeTrack gewonnenen Datensätze die Schreibweise in Kleinbuchstaben (Beispiel: uni\_corr\_500\_02), für die mit dem BaSiGo-Verfahren gewonnenen Datensätze die Schreibweise in Großbuchstaben (Beispiel: UNI\_CORR\_500\_01) gewählt. Da für einen Teil der Experimente beide Verfahren eingesetzt wurden, um die Trajektorien der einzelnen Durchläufe zu extrahieren, werden die Namen der Experimente, d. h. der Sammelname für all seine Durchläufe, immer in Großbuchstaben geschrieben (Beispiel: UNI\_CORR\_500).

