

Level-of-Safety-Konzept für den Fußverkehr bei Großveranstaltungen

Stefan Holl, Maik Boltes, Armin Seyfried

Einleitung

Über die Medien veröffentlichte Bilder von Unfällen mit zahlreichen Toten und Verletzten im Rahmen von Großveranstaltungen haben sich – spätestens seit den Ereignissen bei der Loveparade 2010 in Duisburg – in unser kollektives Gedächtnis eingepägt. Welche Mängel oder Fehlentscheidungen sind aber ursächlich für diese Unfälle? Bei einer genaueren Analyse zeigt sich oft wie schwierig es ist zu ermitteln, welche Ursachen zu welchen Wirkungen und letztlich zum Schaden geführt haben. Eine mittelbare Ursache für die teils tödlichen Verletzungen ist auf den Bildern jedoch häufig zu erkennen: Die Überfüllung war so groß, dass es dem Einzelnen nicht mehr möglich war, sich dem Gedränge der Menschenmenge zu entziehen. Wann wird aber aus einem normalen Stau ein gefährliches Gedränge? Wie müssen die Verkehrsanlagen gestaltet sein, um solch ein Gedränge zu vermeiden?

Der vorliegende Beitrag soll den Stand der Wissenschaft sowie die Regeln der Technik vorstellen, auf deren Grundlage derzeit Fußverkehrsanlagen geplant werden bzw. werden sollten. Basis aller etablierten Bemessungsverfahren ist das sogenannte „Level-of-Service-Konzept“, in welchem die Verkehrsqualität in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte klassifiziert wird. Dieses Konzept dient jedoch vorrangig der Bemessung von Anlagen für den alltäglichen Verkehr mit moderaten Verkehrsdichten. Für die Anwendung bei Großveranstaltungen ist das vorhandene Bemessungskonzept nur eingeschränkt anwendbar, es fehlt die zuverlässige, empirische Datenbasis: Umfang und Qualität der in Feldbeobachtungen und Experimenten erhobenen Daten für den Verkehr bei Großveranstaltungen genügen nicht der im Level-of-Service-Konzept vorgesehenen, feinskaligen Einteilung in Qualitätsstufen. Spätestens bei der Beurteilung bi- und multidirektionaler Personenströme hoher Dichte, wie sie bei Großveranstaltungen regelmäßig vorkommen, stoßen die vorhandenen Regeln deshalb an ihre Grenzen. Es bedarf eines „Level-of-Safety-Konzepts“, in welchem die (Sicherheits-)Anforderungen an Großveranstaltungen besondere Berücksichtigung finden. Ziel des Beitrages ist es, den konzeptionellen Ansatz für solch eine Klassifizierung darzustellen. In einem Ausblick sollen zusätzlich die im Forschungsprojekt „Bausteine für die Sicherheit von Großveranstaltungen“ (BaSiGo) durchgeführten Laborexperimente vorgestellt werden. Diese Experimente –welche aktuell ausgewertet werden – sollen dazu beitragen, die vorhandenen Lücken in der empirischen Datenbasis zu schließen.

Klassifizierungskonzept der Proxemik

Menschen haben einen Raumannspruch. In einem ersten Ansatz könnte angenommen werden, dass dieser dem Volumen des menschlichen Körpers gleichkommt. In der zweidimensionalen Bewegungsebene entspräche dies der senkrechten Projektion des Körpers auf die Grundfläche. Nach Predtetschenski und Milinski (1971, p. 42) würde dies bedeuten, dass sich mehr als acht Personen pro Quadratmeter aufhalten können. Bewegung ist bei solch einer hohen Dichte jedoch nicht mehr möglich. Welche Personendichten sind aber akzeptabel? Bei welchen Dichten fühlen sich Menschen wohl? Und ab welcher Dichte wird es gefährlich?

Der amerikanische Anthropologe und Ethnologe Edward T. Hall (1966) prägte den Begriff der Proxemik. Er beschreibt damit das soziale Raumverhalten auf Basis einer vorwiegend nonverbalen Kommunikation und Interaktion. Hall empfiehlt, sich den Menschen im Raum so vorzustellen, als sei er von mehreren Feldern umgeben, in welchen unterschiedliche Informationen verfügbar sind. Er definiert vier Distanzzonen, die intime, persönliche, soziale und öffentliche Distanz. Jede dieser Zonen wird von ihm nochmals in eine nahe und eine entfernte Phase unterteilt. Die Wahrnehmung der Distanz und des Raumes ist jedoch nicht statisch, die Perzeption und Nutzung des Raumes hängen von den Handlungen innerhalb des Raumes ab und korrespondieren zudem mit der kulturellen Prägung der Beteiligten (cf. Hall, 1966, p. 115). Tabelle 1 gibt die von Hall definierten Distanzzonen mit einer verkürzten Beschreibung wieder.

Tabelle 1: Distanzzonen nach Hall

Distanzzone	Phase	Entfernung	Beschreibung
intim	nah	$d < 0,15 \text{ m}$	Unmittelbarer körperlicher Kontakt, meist ohne Vokalisation. Die Distanz wird mit Fremden nur beispielsweise bei Sportarten wie Ringen zugelassen.
	weit	$0,15 \text{ m} \leq d \leq 0,45 \text{ m}$	Hände können die Extremitäten erreichen. Stimme wird vornehmlich leise eingesetzt. Körperwärme und Geruch des Atems werden wahrgenommen. Mit Fremden ist diese Distanz z. B. in der U-Bahn möglich.
persönlich	nah	$0,45 \text{ m} \leq d \leq 0,75 \text{ m}$	Das Gegenüber kann noch gefasst und gehalten werden.
	weit	$0,75 \text{ m} \leq d \leq 1,20 \text{ m}$	Entfernung von ein bis zwei Armlängen, so dass keine Berührung mit der Hand mehr möglich ist. Die Stimme ist mäßig laut, Körperwärme ist nicht mehr wahrnehmbar. In dieser Entfernung können Themen mit persönlichem Interesse und Engagement erörtert werden.
sozial	nah	$1,20 \text{ m} \leq d \leq 2,20 \text{ m}$	Die „Schranke der Herrschaft“ (limit of domination) wird überschritten. In dieser Entfernung können unpersönliche Themen, in der nahen Phase noch mit mehr Engagement, erörtert werden. Diese Distanz wird z. B. meist zwischen Arbeitskollegen gewahrt.

weit		$2,20\text{ m} \leq d \leq 3,60\text{ m}$	Das Gegenüber kann vollständig gesehen werden. Der Blickkontakt ist erforderlich, um ein Gespräch aufrecht zu erhalten. Die Stimme wird merklich lauter. Diese Distanz wird z. B. häufig zwischen Geschäftspartnern eingenommen. In dieser Entfernung ist es aber auch möglich, sich voneinander abzuwenden, ohne unhöflich zu sein.
öffentlich	nah	$3,60\text{ m} \leq d \leq 7,50\text{ m}$	Die Stimme ist laut und akzentuiert. Ab dieser Entfernung ist es möglich, bei Bedrohung auszuweichen.
	weit	$d \geq 7,50\text{ m}$	Die Personen können sich noch wahrnehmen, mit zunehmender Entfernung löst sich die Verbindung jedoch auf.

Der Mensch als Teil des Personenstroms

Das Klassifizierungskonzept von Hall wurde von zahlreichen Wissenschaftlern übernommen und modifiziert (Fast, 1979, p. 29; Fruin, 1971/1987; Poggendorf, 2006). Die Einteilung in Distanzonen erleichtert zwar das Verständnis über den individuellen Platzanspruch, kann jedoch noch nicht hinreichend erklären, welche die relevanten Parameter sind, um die Bewegung des Einzelnen innerhalb eines Personenstromes zu beschreiben. Diese Bewegung wird durch die Eigenschaften des Menschen selbst, aber auch durch die umgebende Gruppe/Menschenmenge sowie durch die Eigenschaften des Raumes beeinflusst. Abbildung 1 zeigt eine nicht abschließende Liste dieser Einflüsse.

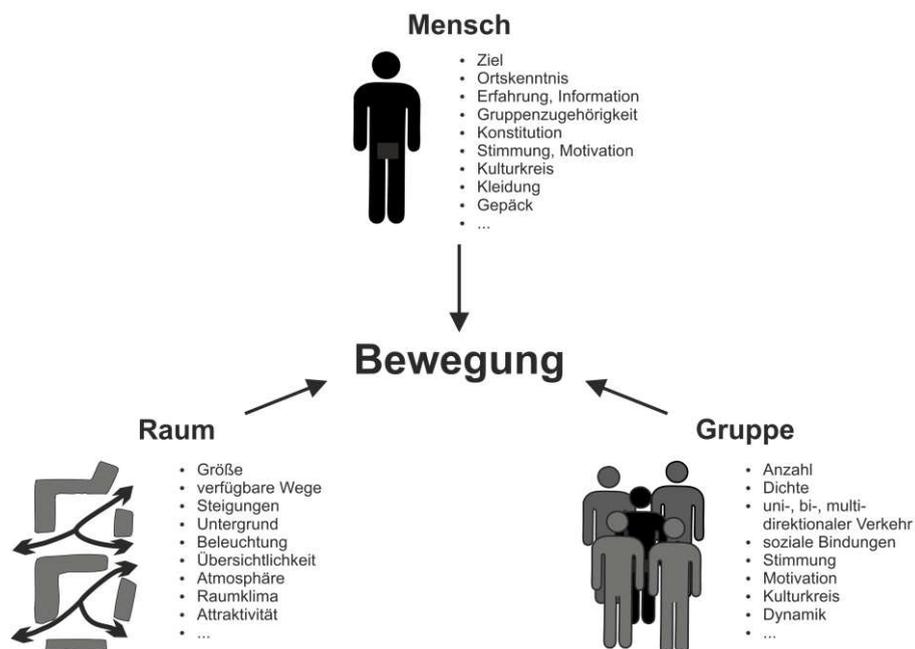


Abbildung 1: Einflüsse auf die Bewegung des Menschen

Die Vielzahl der in Wechselwirkung stehenden Einflüsse bedingt, dass die in anderen Disziplinen verwendeten Modellansätze für granulare Medien, Flüssigkeiten und Gase nur eingeschränkt auf die Fußgängerdynamik übertragen werden können. Die Bewegung innerhalb der Menschen-

menge muss vielmehr als komplexes System „selbstgetriebener Teilchen“ verstanden werden, welches Phänomene der Selbstorganisation sowie Nichtgleichgewichtseffekte aufweist. Bislang wurde aber nur ein kleiner Bruchteil der genannten Einflüsse und Wechselwirkungen wissenschaftlich untersucht. Erst in den letzten Jahren gab es Ansätze einer interdisziplinären Forschung unter Beteiligung von Ingenieur-, Natur- und Sozialwissenschaftlern.

Grundlagen der Fußverkehrsplanung

Schon in der Antike wurden Anlagen für Fußgänger sorgfältig geplant. Beispiel hierfür ist das Kolosseum in Rom, welches nach knapp zehnjähriger Bauzeit im Jahr 80 n. Chr. eröffnet wurde: Mit einem ausgeklügelten System an Verkehrswegen war es möglich, die bis zu 50.000 Besucher in wenigen Minuten ein- bzw. auszulassen. Auch nach heutigen Kriterien gilt die verkehrstechnische Gestaltung des Kolosseums als vorbildlich.

In Folge mehrerer dramatischer Theaterbrände in Europa und den USA in der zweiten Hälfte des neunzehnten und beginnenden zwanzigsten Jahrhunderts wurde die Notwendigkeit zur wissenschaftlichen Erforschung der Anforderungen an die Anlagen des Fußverkehrs erkannt. Grundlegende Untersuchungen wurden beispielsweise von Dieckmann (1911) und Fischer (1933) durchgeführt. Wenige Jahre nachdem Greenshields (1934) das „Fundamentaldiagramm“ als Ergebnis seiner Untersuchungen zum motorisierten Straßenverkehr präsentierte, veröffentlichte Reimer (1947) ein solches auch für den Fußverkehr. Der Begriff „Fundamentaldiagramm“ bringt zum Ausdruck, dass der dargestellte Zusammenhang zwischen Dichte und Fluss, alternativ auch zwischen Dichte und Geschwindigkeit, von Ingenieuren und Naturwissenschaftlern als grundlegend für die Beschreibung der Verkehrsqualität angesehen wird. Reimer führt sein Diagramm noch zurückhaltend als „wahrscheinliche[n] Verlauf der Abhängigkeit“ zwischen „Strömungsgeschwindigkeit“ und „Dichte der Masse“ ein (Reimer, 1947, p. 122). Abbildung 4 zeigt, dass er mit seinem Kurvenverlauf deutlich oberhalb aller in den nachfolgenden Jahren veröffentlichten Fundamentaldiagramme liegt und er selbst korrigiert die genannten Werte bereits einige Jahre später nach unten (cf. Reimer, 1953). Für konkrete Fragestellungen, wie beispielsweise den Ausbau des Londoner U-Bahn-Netzes (Hankin, B. D. & Wright, R. A., 1958) oder den Fußverkehr auf Gehwegen an Einkaufsstraßen (Older, 1968) wurden in den folgenden Jahren Feldstudien und zum Teil auch Experimente durchgeführt und weitere Fundamentaldiagramme veröffentlicht.

Ein Meilenstein in der Erforschung der Fußgängerdynamik setzte Oeding (1963). Er untersuchte systematisch den Zusammenhang zwischen Verkehrsdichte und Gehgeschwindigkeit in Perso-

nenströmen. Hierfür führte er Feldstudien durch, in welchen er, neben dem Berufs-, Einkaufs- und Werkverkehr auch Veranstaltungsverkehre untersuchte. Da besonders hohe Dichten im Alltag selten auftreten, ergänzte Oeding seine Feldstudien durch Experimente, bei welchen mehr als 250 Studenten als Probanden mitwirkten. In Abbildung 2 sind die von Oeding ermittelten Fundamentaldiagramme (Oeding, 1963, p. 4) dargestellt. Die von Oeding verwendeten Einheiten wurden für die Darstellung in das SI-System überführt. J_s steht für den spezifischen Fluss in der Einheit ms^{-1} und ρ für die Personendichte in der Einheit m^{-2} . Die zugehörigen Geschwindigkeiten v wurden in Form eines Nomogramms als Geraden in das Diagramm eingefügt. Die Kurven repräsentieren die Höchstwerte der von Oeding gemessenen Leistungsfähigkeiten.

Anfang der 1970er Jahre veröffentlichte Fruin die erste Auflage seines Buchs "pedestrian planning and design", eine überarbeitete 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 von Fußverkehrsanlagen.

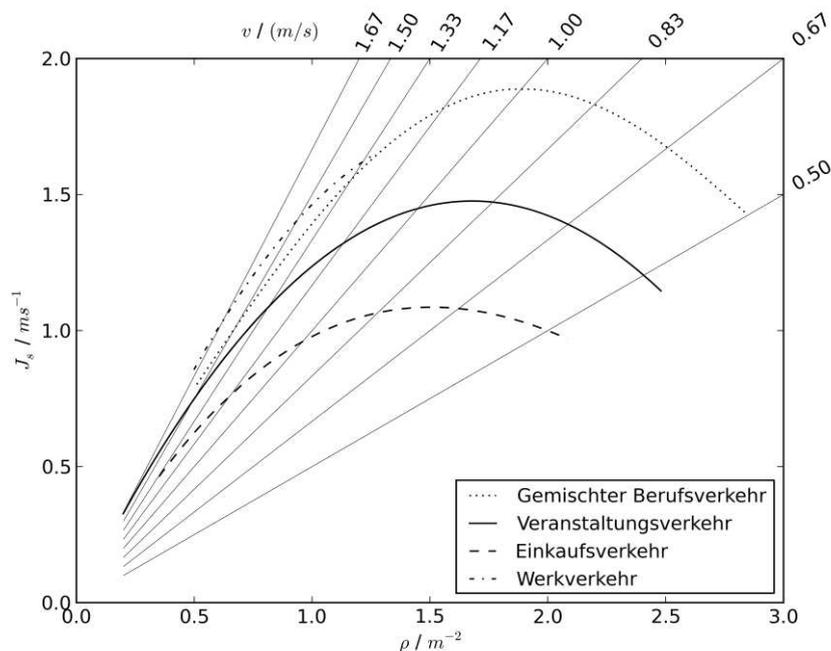


Abbildung 2: Fundamentaldiagramme nach Oeding

Er führt ein Konzept von den Körper umgebenden Pufferzonen, das "personal body buffer zone concept" (Fruin, 1971/1987, pp. 20 ff.), ein, welches auf den von Hall definierten Distanzzonen basiert. 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 auszuwei-

chen. Das Unterbrechen der normalen Gangart, das Stoppen und zu nahe Konfrontationen mit anderen Personen werden als Konflikte definiert (cf. Fruin, 1971/1987, p. 48).

Im Gegensatz zu Oeding empfiehlt Fruin, im Fundamentaldiagramm die Geschwindigkeit bzw. den Fluss nicht in Abhängigkeit von der Personendichte ρ , sondern als Funktion der verfügbaren Fläche $A = 1/\rho$ auszudrücken. Abbildung 3 zeigt das Fundamentaldiagramm nach Fruin für den unidirektionalen Verkehr. Die in der Originaldarstellung von Fruin verwendeten angloamerikanischen Maße wurden für die Darstellung in das metrische Maßsystem umgerechnet. Auf der unteren Abszissenachse ist die verfügbare Fläche A , auf der oberen die zugehörige Dichte $\rho = 1/A$ aufgetragen. Die linke Ordinatenachse zeigt die Geschwindigkeit v , die rechte den spezifischen Fluss J_s . Abbildung 4 zeigt das Fundamentaldiagramm nach Fruin auch in der Darstellungsform, wie sie von Oeding und den meisten anderen Autoren verwendet wird. Die von Fruin gezeigten Kurven beziehen sich auf den Ein-Richtungsverkehr, er geht jedoch davon aus, dass sich bei bi- und multidirektionalen Verkehren die Geschwindigkeit und der Personenfluss "nicht drastisch reduziert" (Fruin, 1971/1987, p. 43).

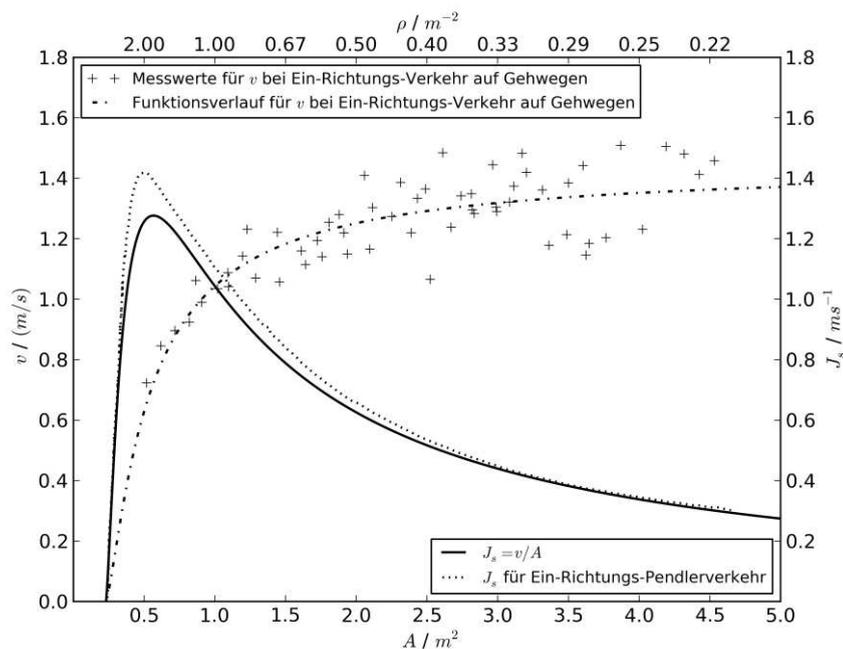


Abbildung 3: Fundamentaldiagramme nach Fruin

Level-of-Service-Konzept

Durch Oeding (1963) wurden erstmals Qualitätsstufen für Fußverkehrsanlagen definiert. Dieses Konzept der Klassifizierung wurde von Fruin als „Level-of-Service-Konzept“ (1970; 1971/1987) übernommen und in den folgenden Jahren durch zahlreiche Autoren adaptiert (Henson, 2000; Knoflacher, 1995; Predtetschenski & Milinski, 1971; Pushkarev & Zupan, 1975; Weidmann,

1993). Auch die nationalen und internationalen Regelwerke (Chartered Institution of Building Services Engineers, 2010; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., 2001; Transportation Research Board, 2000) basieren bis heute auf diesem weitgehend unveränderten Konzept.

Nach Weidmann, der „gegen 200 Veröffentlichungen zum Fussgängerverkehr“ (Weidmann, 1993, p. 6) auswertete, haben sich für die Bewertung der Verkehrsqualität die folgenden Kriterien etabliert (ebd., p. 75):

- 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 Ueberholen
- K8 Häufigkeit unbeabsichtigter Berührungen

Tabelle 2 zeigt die von Weidmann gewählte und durch Knoflacher (1995, p. 91 f.) unverändert 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.

Tabelle 2: Level-of-Service-Kategorien nach Weidmann/Knoflacher

LOS	Dichte P/m ²	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	Gesamtcharakterisierung
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

Auch wenn bezüglich des Prinzips der Klassifizierung ein weitgehender Konsens zwischen den oben genannten Autoren zu erkennen ist, gibt es bei den Grenzen der gewählten Qualitätsstufen, aber auch deren Beschreibungen deutliche Unterschiede: es fehlen einheitliche Maße und Begriffe für die Quantifizierung der Verkehrsqualität. Tabelle 3 gibt eine Übersicht über die in verschiedenen Veröffentlichungen genannten Grenzwerte der Personendichte ρ in der Einheit m^{-2} für die Level-of-Service-Kategorien. Vereinfachend wird hier der Begriff „Level-of-Service“ (LOS) auch für solche Veröffentlichungen verwendet, in welchen bspw. von „Stufe“ (Oeding, 1963) oder „Bereiche für die Bewegungsform von Personenströmen“ (Predtetschenski & Milinski, 1971) gesprochen wird. Die Definitionen der dichteabhängigen Verkehrsqualitäten erfolgt in der Regel verbal, die teils umfangreichen Beschreibungen täuschen aber leicht darüber hinweg, dass die dynamischen Wechselwirkungen innerhalb eines Personenstromes bis heute nicht hinreichend erforscht sind. Tabelle 3 zeigt, dass schon bei niedrigen Dichten die Qualität der Fortbewegung sehr unterschiedlich bewertet wird, für Personenströme hoher Dichte erscheint die Wahl der Grenzwerte beinahe beliebig, bi- und multidirektionale Verkehre können ebenfalls nicht zuverlässig bewertet werden: Es fehlt ein praktikables Konzept für die Kategorisierung der Verkehrsqualitäten.

Tabelle 3: Grenzwerte der Personendichte in den Level-of-Service-Kategorien verschiedener Veröffentlichungen

Grenzwerte der Personendichte für LOS A bis I	ρ_A / m^{-2}	ρ_B / m^{-2}	ρ_C / m^{-2}	ρ_D / m^{-2}	ρ_E / m^{-2}	ρ_F / m^{-2}	ρ_G / m^{-2}	ρ_H / m^{-2}	ρ_I / m^{-2}
Oeding (1963)	$\leq 0,30$	$\leq 0,60$	$\leq 1,00$	$\leq 1,50$	$> 1,50$				
(Fruin, 1971/1987)	$\leq 0,31$	$\leq 0,43$	$\leq 0,72$	$\leq 1,08$	$\leq 2,15$	$\geq 2,15$			
Predtetschenski and Milinski (1971) mit $f = 0,113 m^2$	$\leq 0,44$	$\leq 1,33$	$\leq 3,54$	$\leq 6,64$	$\leq 8,14$	$\leq 9,20$	$\leq 10,18$		
Pushkarev and Zupan (1975)	$< 0,27$	$\leq 0,43$	$\leq 0,60$	$\leq 0,72$	$\leq 0,98$	$\leq 1,54$	$\leq 2,15$	$\leq 5,38$	$> 5,38$
Transportation Research Board (1985)	$\leq 0,08$	$\leq 0,27$	$\leq 0,45$	$\leq 0,72$	$\leq 1,79$	$\geq 1,79$			
Weidmann (1993)	$\leq 0,10$	$\leq 0,30$	$\leq 0,45$	$\leq 0,60$	$\leq 0,75$	$\leq 1,00$	$\leq 1,50$	$\leq 2,00$	$\leq 5,00$
Knoflachner (1995)	$\leq 0,10$	$\leq 0,30$	$\leq 0,45$	$\leq 0,60$	$\leq 0,75$	$\leq 1,00$	$\leq 1,50$	$\leq 2,00$	$\leq 5,40$
Henson (2000)	$\leq 0,54$	$\leq 0,71$	$\leq 1,08$	$\leq 1,54$	$\leq 2,63$	$> 2,63$			
Forschungsges. für Straßen- und Verkehrswesen (2001)	$\leq 0,10$	$\leq 0,25$	$\leq 0,40$	$\leq 0,70$	$\leq 1,80$	$> 1,80$			(für Einrichtungsverkehr)
	$\leq 1,00$	$\leq 1,50$	$\leq 2,00$	$\leq 3,00$	$\leq 6,00$	$> 6,00$			(für Wartesituationen)
Transportation Research Board (2000)	$< 0,18$	$< 0,27$	$< 0,45$	$< 0,72$	$< 1,35$	$\geq 1,35$			

Ein Vergleich der in Abbildung 4 zusammengestellten, häufig zitierten Fundamentaldiagramme erklärt die signifikanten Abweichungen in den Grenzwerten und belegt zugleich den bestehenden Forschungsbedarf.

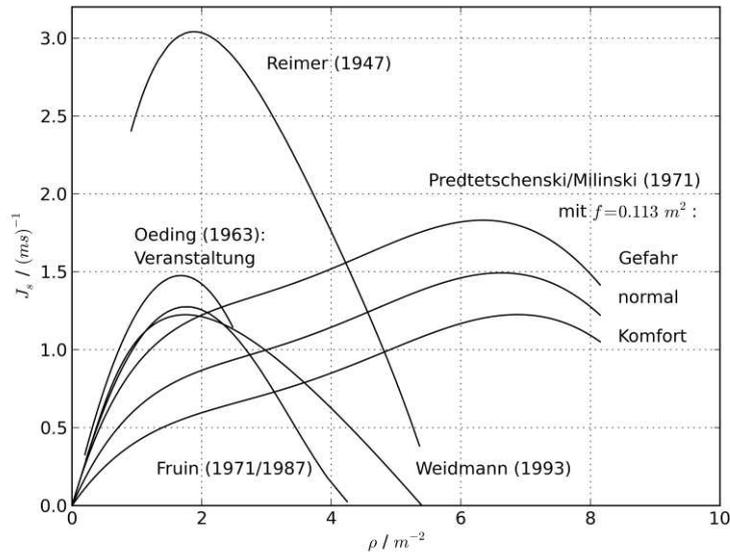


Abbildung 4: Vergleich häufig zitiertes Fundamentaldiagramme

Level-of-Safety-Konzept

Die Anzahl der Qualitätsstufen des Level-of-Service-Konzepts variiert in den genannten Veröffentlichungen zwischen fünf und neun. Für das Level-of-Safety-Konzept wird vorgeschlagen, nur drei elementare Qualitätsstufen zu verwenden und diese entsprechend eines Ampelsystems zu kennzeichnen:

- 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 gezwungen. Lokale Störungen können sich bereits auf den Verkehrsfluss als Ganzes auswirken.
- ROT: Das Verkehrsaufkommen überschreitet die Kapazität der Anlage. Es kann zu erheblichen Behinderungen und Staus kommen. Mit sicherheitskritischen Situationen muss gerechnet werden.

Abbildung 5 zeigt den prinzipiellen Verlauf eines Fundamentaldiagramms am Beispiel des unidirektionalen Verkehrs. Die verschiedene Phasen innerhalb des Kurvenverlaufs können wie folgt erklärt werden: Bei sehr geringen Personendichten (GRÜN) können die Personen weitgehend ihre eigene Geschwindigkeit wählen. Der Freiflussast des Graphen weist am Übergang zum „gebundenen Verkehr“ (GELB) einen leichten Knick auf. Die Wechselwirkungen zwischen den Fußgängern nehmen zu, so dass Anpassungen der Geschwindigkeit und ggf. auch der Richtung erforderlich werden. Mit zunehmender Personendichte kann zunächst der Personenfluss weiter erhöht werden, nahe der Kapazitätsgrenze findet jedoch ein Übergang vom Freifluss- zum ge-

stauten Ast (ROT) statt. Bei einer weiteren Erhöhung der Personendichte findet eine Separation der Verkehrszustände statt. Ein Teil der Personen wird zum Stillstand, zum Teil auch mit Rückwärtsbewegungen, gezwungen, andere können sich mit langsamer Geschwindigkeit weiterbewegen (Stop-and-go-Wellen). Ziel jeder Bemessung muss es sein, Verkehrszustände im Bereich des gestauten Astes zu vermeiden oder zumindest die Dauer, in der eine Person in diesem Zustand verbleibt, möglichst gering zu halten.

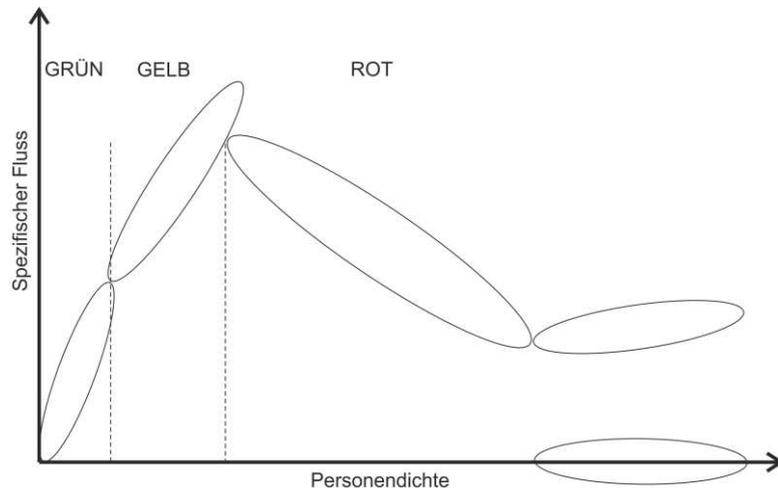


Abbildung 5: Prinzipieller Verlauf des Fundamentaldiagramms für den unidirektionalen Verkehr

Ermittlung von Besucherzahl und Personendichte bei Großveranstaltungen

Voraussetzung für eine Bewertung der Verkehrsqualität – gleichgültig, ob mit dem Level-of-Service- oder dem Level-of-Safety-Konzept – ist die Kenntnis über das zu erwartende Verkehrsaufkommen. Im Idealfall erfolgt die Nachfrageermittlung im Rahmen der Projektplanung. Als Verfahren für die Berechnung der Verkehrsnachfrage kann die im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., 2001) beschriebene Vorgehensweise empfohlen werden. Der Idealfall ist aber leider nicht der Regelfall. Aus diesem Grund soll nachfolgend auf die Vor-Ort-Ermittlung von Besucherzahl und Personendichte eingegangen werden. Im Rahmen der Veranstaltungs-Nachbereitung sollten die ermittelten Werte dokumentiert werden und als Grundlage für die Planung später stattfindender Veranstaltungen Verwendung finden.

Für Großveranstaltungen, bei denen keine Personenzählung an den Ein- und Ausgängen durchgeführt werden (z. B. durch Ticket-/Einlasskontrollen oder automatische Zählsysteme), werden zumeist vom Veranstalter und der Polizei Teilnehmerzahlen geschätzt. Die Ermittlung der Besucherzahl dient zum einen der Sicherheit, insbesondere der Vermeidung einer Überfüllung, sie ist aber ebenfalls Grundlage für statistische Erhebungen und das Marketing der Veranstaltung

selbst. So ist es nicht verwunderlich, dass die Teilnehmerzahlen des Veranstalters häufig über denen liegen, die von der Polizei ermittelt werden: je größer die ausgewiesene Teilnehmerzahl, desto höher die gesellschaftliche Relevanz der Veranstaltung.

Bei ortsgebundenen Veranstaltungen kann für eine dem Anschein nach repräsentative Teilfläche A_{teil} des Veranstaltungsgeländes die Anzahl der Besucher N_{teil} ausgezählt und mit der Verhältniszahl zwischen Gesamtfläche A_{ges} und Teilfläche A_{teil} multipliziert werden:

$$N_{ges} = N_{teil} \cdot \frac{A_{ges}}{A_{teil}} .$$

Die Vorgehensweise gilt analog auch für Festumzüge, als Teilfläche A_{teil} wird hier sinnvollerweise die Grundfläche einer der vorbeiziehenden Reihen gewählt. Die Dichte ρ berechnet sich in beiden Fällen als

$$\rho_{ges} = \frac{N_{ges}}{A_{ges}} \quad \text{bzw.} \quad \rho_{teil} = \frac{N_{teil}}{A_{teil}} .$$

Während die Größe der Veranstaltungsfläche – bei entsprechender Vorbereitung an Hand von Planunterlagen – bekannt sein sollte, fällt es selbst erfahrenen Einsatzleitern der Polizei und der Feuerwehr schwer, die Größe einer repräsentativen Teilfläche und die Anzahl der auf dieser Teilfläche anwesenden Personen zuverlässig zu ermitteln. Die visuelle Ermittlung der Personenanzahl und -dichte wird beispielsweise erschwert durch:

- Verdeckungen durch Gebäude, Aufbauten, Fahrzeuge etc.
- Verdeckungen durch Personen bei hoher Dichte in Folge der Schrägsicht
- Abhängigkeit des sichtbaren Kopfabstandes vom Betrachtungswinkel
- Unzureichende oder wechselnde Lichtverhältnisse
- Fluktuationen innerhalb der Menschenmenge
- Unzureichende geometrische Referenzen für die Bestimmung der Grundfläche

Im Falle der Verfügbarkeit von Bild- bzw. Videomaterial wird deren Darstellung u. a. durch die Entfernung zur Menschenmenge, die Perspektive bzw. den Blickwinkel und den Bildwinkel (maximal einzusehender Öffnungswinkel der Kamera) beeinflusst. Um für die Schätzung der Personendichte eine Hilfestellung zu geben, wurden die weiter unten vorgestellten Laborexperimente im Projekt „BaSiGo“ dafür genutzt, exakte Personendichten ρ aus verschiedenen Abständen d von der Kamera zum Kopf in der Bildmitte, Blickwinkeln α zur Bewegungsebene und

horizontalen Bildwinkeln β zu dokumentieren. Diese Aufnahmen können als Referenzwerte oder zu Trainingszwecken genutzt werden.

Die Abbildungen 6 bis 9 zeigen vier verschiedene Dichten ρ bei gleichbleibendem Abstand d sowie Blick- und Bildwinkel α und β .



Abbildung 6: $\rho = 1,04/m^2$, $d = 5,7 m$, $\alpha = 90^\circ$, $\beta = 80^\circ$



Abbildung 7: $\rho = 2,05/m^2$, $d = 5,7 m$, $\alpha = 90^\circ$, $\beta = 80^\circ$



Abbildung 8: $\rho = 4,02/m^2$, $d = 5,7 m$, $\alpha = 90^\circ$, $\beta = 80^\circ$



Abbildung 9: $\rho = 5,86/m^2$, $d = 5,7\text{ m}$, $\alpha = 90^\circ$, $\beta = 80^\circ$

Die Abbildungen 10 bis 12 zeigen dreimal dieselbe Dichte $\rho = 4,02/m^2$ mit variierenden Parametern für den Abstand d sowie die Blick- und Bildwinkel α und β .



Abbildung 10: $\rho = 4,02/m^2$, $d = 5,7\text{ m}$, $\alpha = 90^\circ$, $\beta = 80^\circ$



Abbildung 11: $\rho = 4,02/m^2$, $d = 12,2\text{ m}$, $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 116^\circ$



Abbildung 12: $\rho = 4,02/m^2$, $d = 2,6 m$, $\alpha = 40^\circ$, $\beta = 116^\circ$

Die Abbildungen 13 und 14 zeigen dieselbe Dichte $\rho = 4,02/m^2$. In beiden Bildern beträgt der Abstand $d = 5,7 m$ und der Blickwinkel $\alpha = 90^\circ$. Nur der horizontalen Bildwinkel β variiert.

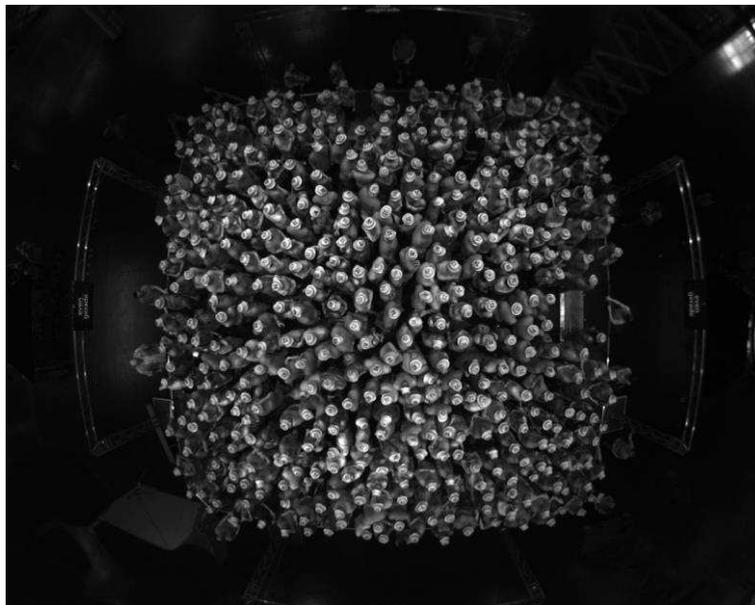


Abbildung 13: $\rho = 4,02/m^2$, $d = 5,7 m$, $\alpha = 90^\circ$, $\beta = 97^\circ$



Abbildung 14: $\rho = 4,02/m^2$, $d = 5,7 m$, $\alpha = 90^\circ$, $\beta = 40^\circ$

Auf Grund der vorgenannten Schwierigkeiten bei der visuellen Abschätzung der Personenzahl und -dichte werden seit einigen Jahren zunehmend Verfahren eingesetzt, welche die Sendeinformationen der mitgeführten Mobiltelefone (Bluetooth, GSM (global system for mobile communications), WLAN (wireless local area network)) interpretieren oder auf der RFID-Technik (radio-frequency identification) basieren (cf. Boltes, 2015, p. 41). Die Auswertung der Mobilfunk-Daten wirft jedoch zahlreiche Fragen hinsichtlich des Datenschutzes auf. Voraussetzung für eine quantitative Auswertung ist zudem, dass der Anteil der Personen, deren Mobilgeräte die entsprechenden Informationen senden, bekannt ist oder zuverlässig abgeschätzt werden kann. Der Einsatz von RFID setzt voraus, dass von den Personen ein aus Kostengründen meist passiver Transponder, z. B. an Eintrittskarte oder Armband, mitgeführt wird.

Datenerfassung als Basis der Forschung

Im Sinne der von Burke (2014) definierten, elementaren Wissenspraktiken (sammeln, analysieren, verbreiten und anwenden des Wissens) gründet auch die Forschung im Bereich der Fußgängerdynamik auf einer strukturierten Beobachtung von Personenströmen sowie der Möglichkeit, die relevanten Daten zu erfassen. Entsprechend des erforderlichen Detaillierungsgrades können die Beobachtungen wie folgt unterteilt werden, mit steigender Ordnungszahl steigen auch die Anforderungen an die Datenerfassung (cf. Boltes, 2015, p. 16):

1. Menschenmenge als Ganzes (Anwesenheit von Personen in bestimmten Bereichen)
2. Dynamik innerhalb der Menschenmenge (Geschwindigkeiten, Flussrichtung) ohne Unterscheidung von Einzelpersonen
3. Laufwege von Einzelpersonen mit nur groben Orts-/Zeitangaben
4. Laufwege von Einzelpersonen mit fein aufgelösten Orts-/Zeitangaben (Trajektorien)
5. Identifizierte Einzelpersonen (individualisierte Trajektorien)
6. Körper (Kopfausrichtung, Bewegung von Gliedmaßen des Körpers etc.)
7. Körperdetails (Bewegung von Fingern, Blickrichtung)

Die oben angesprochene Vor-Ort-Ermittlung der Besucherzahl und der Personendichte bei Großveranstaltungen entspricht „nur“ dem erstgenannten Detaillierungs- und Anforderungsgrad. Um die Kräfte und Wechselwirkungen innerhalb eines Personenstromes verstehen und beschreiben zu können, bedarf es weitergehender Werkzeuge und Beobachtungsmethoden, welche es erlauben, die örtlich und zeitlich aufgelösten Laufwege jeder einzelnen Person (Trajektorien) zu erfassen. Während den oben zitierten Autoren für ihre Studien zum Fußverkehr nur Stoppuhren, Foto- und Filmkameras zur Verfügung standen, werden seit einigen Jahren im Bereich der experimentellen Forschung moderne Erfassungsmethoden eingesetzt, welche nicht nur eine makro-

skopische Verkehrsbeobachtung, sondern auch eine mikroskopische Analysen der dynamischen Prozesse innerhalb des Personenstroms erlauben.

Seit dem Jahr 2005 führt das Forschungszentrum Jülich mit verschiedenen Forschungspartnern Experimente zur Fußgänerdynamik durch. Nachdem in den ersten Jahren die Erfassung der Trajektorien noch von Hand bzw. halbautomatisch erfolgte, steht seit einigen Jahren die in Jülich entwickelte Software „PeTrack“ (Boltes & Seyfried, 2013) für die automatische Extraktion zur Verfügung. Tabelle 4 zeigt eine Übersicht der durchgeführten Experimente.

Tabelle 4: Laborexperimente des Forschungszentrums Jülich seit 2005

Jahr	Ort	Projekt	N _{Probanden}	Auswerteverfahren
2005	Jülich	Eigenforschung	34	manuell
2005	Jülich	Eigenforschung	60	manuell
2006	Düsseldorf	DFG-Projekt	200	automatisch
2008	Indien	Eigenforschung	64	manuell
2008	Wuppertal	DFG-Projekt	50	manuell
2009	Düsseldorf	BMBF-Projekt „Hermes“	ca. 400	automatisch
2013	Düsseldorf	BMBF-Projekt „BaSiGo“	ca. 1.000	automatisch

Laborexperimente im Projekt BaSiGo

Im Rahmen des Projektes BaSiGo wurden in Zusammenarbeit mit der Universität Siegen und der IBIT GmbH großskalige Laborexperimente realisiert. An insgesamt vier Tagen haben etwa 2.000 Personen als Probanden teilgenommen. In etwa 200 Versuchsdurchläufen wurde die Personendichte bei den Experimenten soweit erhöht, dass die Entstehung kritischer Zustände untersucht werden kann. Es wurden die uni- und bidirektionalen Fußgängerströme an Kreuzungen, Ecken und Korridoren, aber auch in Eingangssituationen, wie sie häufig bei Veranstaltungen auftreten, untersucht.

Bei den Experimenten wurden auch spezielle Geometrien und die Entscheidungen der Probanden, z. B. bei der Auswahl von Ausgangstüren, sowie die Wirkung sozialer Gruppen berücksichtigt. Die Kommunikation mit den Probanden wurde während der Versuche mit Hilfe von Lautsprecherdurchsagen und Hinweisschildern gewährleistet, die Interaktionen zwischen den Probanden mit Brillenkameras und mitgeführten Tonaufzeichnungsgeräten erfasst. Darüber hinaus wurde der Laufweg jeder einzelnen Person detektiert. Durch die individuelle Markierung aller Probanden (vgl. Abbildung 15) können zuvor abgefragte Eigenschaften, wie z. B. die Gruppenzugehörigkeit, das Alter oder die „Erfahrung“ mit Großveranstaltungen, zugeordnet und bei den Analysen berücksichtigt werden.



Abbildung 15: Individuelle Marker im Projekt BaSiGo. Bild: Marc Strunz

Ziel der durchgeführten Experimente war es, für unterschiedliche Szenarien aussagekräftige Kennwerte zur Erstellung von Planungshilfen für Großveranstaltungen zu erhalten. Auch wenn die Auswertung der Experimente bis dato noch nicht abgeschlossen werden konnte, sollen nachfolgend zwei der Versuchsaufbauten, in denen der Aspekt der „Kommunikation“ besondere Berücksichtigung fand, vorgestellt werden. In diesen Experimenten sollte untersucht werden, inwiefern besondere Verhaltensregeln erkannt, akzeptiert und umgesetzt werden.

Abbildung 16 zeigt eine perspektivische Projektion des Aufbaus für das Experiment „CROSSING_90“. Jeder der Zugänge hat eine Breite von 4 m , so dass der Kernbereich der Kreuzung eine Grundfläche von $4\text{ m} \cdot 4\text{ m} = 16\text{ m}^2$ aufweist. Die in der Mitte des Kernbereichs dargestellte Säule ($\varnothing = 60\text{ cm}$) konnte für die einzelnen Versuchsdurchläufe aufgebaut bzw. entfernt werden. Über die an den Zugängen installierten Monitore konnten „Verkehrsregeln“ visualisiert, durch die Regelung der Zugangsbreiten konnte die Personendichte im Kernbereich der Kreuzung variiert werden.

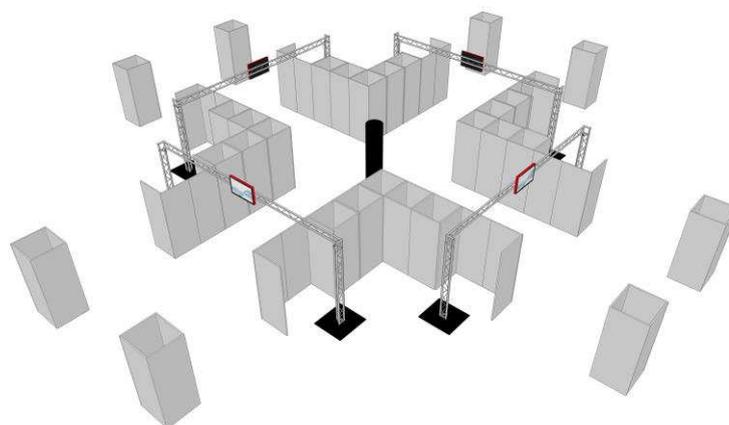


Abbildung 16: Aufbau für das Experiment „CROSSING_90“

Abbildung 17 zeigt eine Isometrie für das Experiment „BARRIER“. Die Grundfläche von ca. 100 m^2 wurde durch Bühnenabsperungen realisiert, wie sie auch bei Veranstaltungen zum Einsatz kommen. Über die Monitore an den $1,2\text{ m}$ breiten Türen wurde den Probanden angezeigt, welche Ausgänge genutzt werden sollen. Die Anzahl der teilnehmenden Personen wurde in mehreren Versuchsdurchläufen sukzessive erhöht, bis schließlich eine Personendichte von annähernd $6/\text{m}^2$ erreicht wurde.

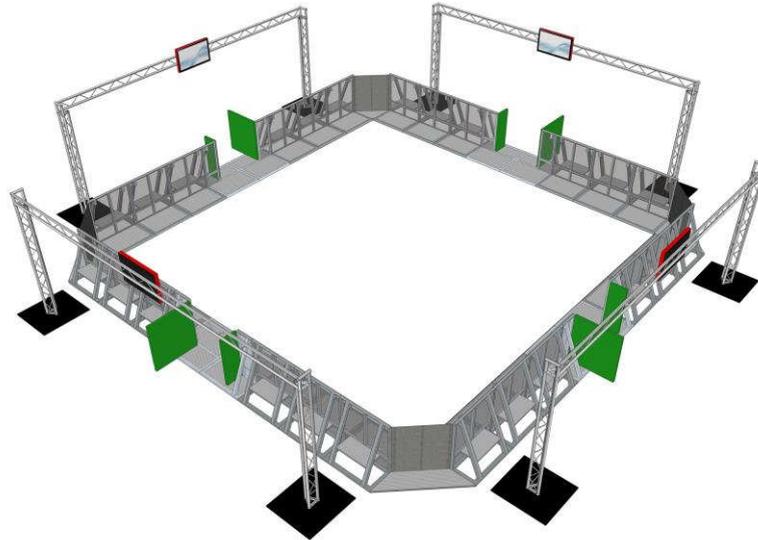


Abbildung 17: Aufbau für das Experiment „BARRIER“

References

- Boltes, M. (2015). *Automatische Erfassung präziser Trajektorien in Personenströmen hoher Dichte* (Dissertation). Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Universität zu Köln.
- Boltes, M., & Seyfried, A. (2013). Collecting pedestrian trajectories. *Neurocomputing*, *100*(0), 127–133.
- Burke, P. (2014). *Die Explosion des Wissens: Von der Encyclopédie bis Wikipedia*. Berlin: Wagenbach.
- Chartered Institution of Building Services Engineers. (2010). *Transportation systems in buildings: CIBSE guide D: 2010* (4th ed): CIBSE.
- Dieckmann, D. (1911). *Die Feuersicherheit in Theatern*. München: Jung.

- Fast, J. (1979). *Körpersprache. Rororo sachbuch: Vol. 7244*. Reinbek: Rowohlt.
- Fischer, H. (1933). *Über die Leistungsfähigkeit von Türen, Gängen und Treppen bei ruhigem, dichtem Verkehr*. Technische Hochschule Dresden.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (2001). *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen: HBS / Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen*. Köln: FGSV.
- Fruin, J. J. (1970). *Designing for Pedestrians: A Level of Service Concept* (PhD dissertation). Polytechnic University of Brooklyn.
- Fruin, J. J. (1987). *pedestrian planning and design* (Revised Edition): Elevator World (Original work published 1971).
- Greenshields, B. D. (1934). The photographic method of studying traffic behavior. In R. W. Crum (Ed.), *Proceedings of the Thirteenth Annual Meeting of the Highway Research Board, Part I* (pp. 382–399).
- Hall, E. T. (1966). *The hidden dimension*. New York: Doubleday and Company.
- Hankin, B. D., & Wright, R. A. (1958). Passenger Flow in Subways, *9*(2), 81–88.
- Henson, C. (2000). Levels of service for pedestrians. *ITE Journal*, *70*(9), 26–30.
- Knoflacher, H. (1995). *Fussgeher- und Fahrradverkehr: Planungsprinzipien*. Wien: Böhlau.
- Oeding, D. (1963). *Verkehrsbelastung und Dimensionierung von Gehwegen und anderen Anlagen des Fussgängerverkehrs. Straßenbau und Straßenverkehrstechnik: Vol. 22*. Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Abt. Straßenbau.
- Older, S. J. (1968). Movement of pedestrians on footways in shopping streets. *Traffic Engineering and Control*, *10*, 160–163.
- Poggendorf, A. (2006). Proxemik – Raumverhalten und Raumbedeutung. *Umwelt und Gesundheit*, (4), 137–140.
- Predtetschenski, W. M., & Milinski, A. I. (1971). *Personenströme in Gebäuden: Berechnungsmethoden für die Projektierung*. Leipzig: Staatsverlag der DDR.

- Pushkarev, B., & Zupan, J. M. (1975). Capacity of walkways. *Transportation Research Record*, 538, 1–15.
- Reimer, K. (1947). Die Bewegung der Menschenmassen in Verkehrsräumen. *Glaser's Annalen*, 71(7), 121–131.
- Reimer, K. (1953). Bewegungsvorgänge auf Bahnsteigen des großstädtischen Schnellverkehrs. *Glaser's Annalen*, 77(11), 338–341.
- Transportation Research Board. (1985). *Highway capacity manual: Special Report 209*. Washington, D.C.
- Transportation Research Board. (2000). *Highway capacity manual*. Washington, D.C.
- Weidmann, U. (1993). *Transporttechnik der Fussgänger: Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs (Literaturauswertung)* (Schriftenreihe des IVT No. 90). Zürich.