



Dokumentation von Versuchen zur Personenstromdynamik

Projekt „HERMES“

von **Christian Keip**
Kevin Ries

Stand: November 2009

Im vorliegenden Dokument wird die Versuchsreihe beschrieben und dokumentiert, welche als Teil des Projekts HERMES im Rahmen der Initiative “Forschung für die zivile Sicherheit” des Bundesministeriums für Bildung und Forschung von der Bergischen Universität Wuppertal, Lehrstuhl für Baustofftechnologie und Brandschutz, unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfram Klingsch durchgeführt wurde. Diese Versuche waren die bislang größten ihrer Art und sollen wichtige Erkenntnisse auf dem Gebiet der Evakuierungsplanung liefern.

Inhaltsverzeichnis

1	Das Projekt „Hermes“	1
2	Ablauf der Versuchstage	2
2.1	Allgemeines	2
2.2	Der Versuchstag im Einzelnen	2
3	Esprit-Arena Düsseldorf	6
3.1	Allgemeines	6
3.2	TAG 1: Mittwoch, der 29.04.2009	6
3.3	TAG 2: Donnerstag, der 30.04.2009	13
4	Messe Düsseldorf	20
4.1	Allgemeines	20
4.2	TAG 1: Dienstag, der 12.05.2009	20
4.3	TAG 2: Freitag, der 15.05.2009	25

Abbildungsverzeichnis

1	eingekleidete Probanden	3
2	Experiment MU2	8
3	Experiment MU1	9
4	Experiment TZ	11
5	Experiment TU	13
6	Experiment MO1	14
7	Experiment MO2	15
8	Experiment TP	16
9	Skizze Experiment FT	17
10	Momentaufnahme Experiment FT	18
11	Experiment TO	18
12	Experiment UG	22
13	Experiment UO	24
14	Experiment AO	25
15	Experiment BO	27
16	Experiment KO	28
17	Experiment EO	29

1 Das Projekt „Hermes“

Das Projekt „Hermes“, welches vom „Bundesministerium für Bildung und Forschung“ (BMBF) finanziert und vom „Jülich Supercomputing Centre“ koordiniert wird, begann am 1. November 2008. In dieses Projekt sind eingebunden:

- VDI Technologiezentrum GmbH
- Forschungszentrum Jülich GmbH
- Bergische Universität Wuppertal
- Feuerwehr Düsseldorf
- Imtech Deutschland GmbH & Co. KG
- Landesamt für Zentrale Polizeiliche Dienste NRW
- ESPRIT arena (ehem. Esprit arena)
- PTV Planung Transport Verkehr AG
- Special Security Service SSSD GmbH
- TraffGo HT GmbH
- Universität Bonn, Geographisches Institut
- Universität zu Köln, Institut für Theoretische Physik
- Vitracom AG

Das Ziel des Forschungsprojekts liegt in der Entwicklung eines Evakuierungsassistenten, welcher in Gefahrensituationen die Sicherheitsdienste entlasten und so zur Sicherheit bei Massenveranstaltungen beitragen soll. Die Hauptaufgabe des JSC besteht darin, ein Modell zur Prognose der Personenstromdynamik zu entwickeln. Die Simulation soll unter anderem an ein automatisches System zur Personenzählung gekoppelt werden, um den aktuellen Evakuierungsstatus zu erfassen.

2 Ablauf der Versuchstage

2.1 Allgemeines

Das Organisationsteam traf sich gegen 09.00 Uhr zu einer kurzen Vorbesprechung und um evtl. letzte Änderungen im geplanten Tagesablauf durchzusprechen. Vor Eintreffen der ersten Probanden begann auch die Gruppe vom Malteserorden mit dem Aufbau und der Einrichtung des Verpflegungsbereichs. Für die Probanden begannen die Versuchstage in der Regel um 10.00 Uhr und endeten um 17.00 Uhr. In dieser Zeit sollten jeweils mehrere Versuchsblöcke durchgeführt werden. Die Pausen zwischen den Versuchsblöcken wurden zum Umbau des Versuchsaufbaus und der Kamerainstallation genutzt. Eine ausgiebige Mittagspause war ebenfalls vorgesehen. Am Ende des Versuchstages erfolgte die Auszahlung der Probanden.

2.2 Der Versuchstag im Einzelnen

Ankunft der Probanden / Check-In

Die Probanden hatten vorab ein Einladungsschreiben zum Versuch erhalten. Nach Vorlage dieses Schreibens erhielten sie Einlass zum Versuchsgelände. Der Check-In-Vorgang verlief folgendermaßen: Die Probanden meldeten sich am Counter. Dort erhielten sie nach Vorlage eines Lichtbildausweises einen Tagesausweis mit einer Personalnummer laut Teilnehmerliste. Dieser Tagesausweis diente zur Zuordnung der Probanden zu einer Gruppe und als Quittung. Die Farbe des Tagesausweises war von Versuchstag zu Versuchstag verschieden, um eine Manipulation zu verhindern. Zusätzlich erhielten sie einen Fragebogen zum allgemeinen Feedback und als Grundlage für eine statistische Auswertung. Außerdem mussten die Teilnehmer eine Einverständniserklärung unterschreiben. Mit dieser Einverständniserklärung willigten sie in die Weiterverwendung der von ihnen gemachten Aufnahmen ein. Im Anschluss begaben sich die Probanden zur Einkleidung. Hier erhielten sie in Abhängigkeit von ihrer Personalnummer ein schwarzes, rotes oder khakifarbenes Langarm-T-Shirt und eine weiße Stoffhaube mit schwarzem Punkt.



Abbildung 1: eingekleidete Probanden

Bei der Einkleidung wurden die Teilnehmer angewiesen, ihre Jacken und Taschen an der Garderobe abzulegen. Diese Anweisung war einerseits eine Frage des Komforts und andererseits eine Frage der erfolgreichen Versuchsdurchführung. Bei Versuchen mit hoher Personendichte wären dicke Jacken, Taschen und Rucksäcke hinderlich gewesen. Nachdem die Probanden ihre Garderobe abgelegt hatten, hatten sie die Gelegenheit, bis zur Ankunft der restlichen Teilnehmer im Verpflegungsbereich zu warten. Für den Anmeldevorgang war ein Zeitfenster bis 11.00 Uhr vorgesehen, jedoch sollten die Counter noch bis Ende des Einlasses um 11.25 Uhr geöffnet bleiben, um mögliche Nachzügler noch anmelden zu können.

Begrüßung

Die Begrüßung wurde von Dr. Seyfried, an manchen Tagen auch zusammen mit Prof. Klingsch vorgenommen. Dabei wurden die Teilnehmer über die Beweggründe zur Durchführung der Experimente informiert und erhielten organisatorische Hinweise. Diese Hinweise bezogen sich unter anderem auf Raucherbereiche auf dem jeweiligen Versuchsgelände und darauf, dass für die Garderobe keine Haftung übernommen werden könne. Weiterhin wurde auf die Wichtigkeit der Tagesausweise und auf gewisse “Spielregeln” hingewiesen. Hier wurde beispielsweise erklärt, warum die ausgegebenen Stoffhauben zu tragen sind und welches Verhalten von den Probanden erwartet wird.

Einweisung der Teilnehmer und Erster Versuchsblock

Auf die Begrüßung folgte die Einweisung der Teilnehmer; das bedeutete im konkreten Fall die Anordnung der Teilnehmer laut Versuchsaufbau. Da die Versuche in der Esprit arena und in der Messe Düsseldorf bezüglich des Aufbaus unterschiedlich waren, wird die genaue Einweisung der Probanden bei der Beschreibung des jeweiligen Versuchs erläutert. Die Versuche begannen jeweils mit einer Durchsage mit etwa diesem Wortlaut: „Sehr geehrte Damen und Herren, es ist ein technischer Defekt aufgetreten. Es besteht keine direkte Gefährdung. Bitte verlassen Sie zügig, auf direktem Weg und ohne zu drängeln das Gebäude.“

Mittagspause

Nach dem ersten Versuchsblock wurde eine Mittagspause eingelegt. In dieser Pause gab es die Möglichkeit, im Verpflegungsbereich ein kostenloses Mittagessen zu sich zu nehmen, welches von den Maltesern ausgegeben wurde. Aus Rücksichtnahme auf Vegetarier und religiöse Vorschriften konnte zwischen zwei verschiedenen Gerichten gewählt werden. Das Organisationsteam nutzte die Mittagspause zusätzlich zum Umbau des Versuchsaufbaus und der technischen Einrichtung bzw. der Kamerainstallation. Teilweise mussten die Probanden in der Mittagspause auch noch einmal ihre T-Shirts tauschen, falls die anschließenden Versuche eine andere Farbverteilung erforderten.

Einweisung der Teilnehmer und Zweiter Versuchsblock

Der zweite Versuchsblock nach der Mittagspause war für den Zeitraum zwischen 14.00 Uhr und 17.00 Uhr angesetzt. Zwischen den Versuchen wurden zwecks Umbau der Technik vereinzelt wieder Pausen eingelegt.

Check-Out / Auszahlung

Der Check-Out am Ende des Versuchstags lief nach folgendem Schema ab: Nach Ende der Versuche begaben sich die Teilnehmer zur T-Shirt-Ausgabe. Die T-Shirts wurden angenommen, gezählt, in einer Liste erfasst und für die Abholung durch eine Großwäscherei abgepackt. Die Stoffhauben hingegen sollten von den Probanden für die kommenden Versuchstage aufbewahrt und wieder mitgebracht werden. Nach der T-Shirt-Rückgabe gingen die Probanden zu den Countern, an denen sie sich morgens auch angemeldet hatten. Hier legten sie ihren Tagesausweis und einen Lichtbildausweis vor und erhielten einen Umschlag mit der Aufwandsentschädigung. Die Höhe der Aufwandsentschädigung betrug an allen Versuchstagen 50,- €. Zur Nachverfolgung der ausgegebenen Aufwandsentschädigungen musste auf dem Tagesausweis die Anschrift des Probanden vorhanden sein. Mit einer Unterschrift wurde der Empfang des Betrages

quittiert. Mit den letzten organisatorischen Restarbeiten, dem Aufräumen der Counter usw. endete auch für das Organisationsteam der Versuchstag.

3 Esprit-Arena Düsseldorf

3.1 Allgemeines

Die im Januar 2005 eröffnete Esprit-Arena im Norden Düsseldorfs ist eine sog. Multifunktionsarena mit Platz für bis zu 66.500 Zuschauer, welche sowohl für sportliche als auch für musikalische Großereignisse genutzt wird. Da ein entsprechender Versuchsaufbau einen großen Aufwand bedeutet hätte, bietet sich die Versuchsdurchführung in der Arena an. Die Esprit arena liegt im Düsseldorfer Stadtteil Stockum in direkter Nachbarschaft zum Messegelände der Messe - Düsseldorf GmbH und wurde im Januar 2005 eröffnet.

Das Messegelände ist auf der Nordseite an die A 44 angebunden. Eine weitere verkehrstechnische Anbindung ist durch die U-Bahn-Haltestelle Messe-Nord gegeben.

Etwa 600m südlich des Geländes befindet sich der Rhein.

Durch die Multifunktionalität dieser Versammlungsstätte können sowohl Sportveranstaltungen, Konzertveranstaltungen als auch Tagungen und Ausstellungen, unter geschlossenem sowie bei offenem Dach durchgeführt werden. Hierzu finden 51.500 Besucher auf überdachten Sitzplätzen auf den Tribünen platz. Die Maximalkapazität bei Konzerten mit Innenraumnutzung beläuft sich auf 66.500 Personen.

Die Esprit arena verfügt über ein verschließbares, lichtundurchlässiges Dach. Wesentlicher Teil dieser Konstruktion sind zwei bewegliche Dachelemente, die jeweils ca. 800 Tonnen wiegen. Diese Dachelemente öffnen oder schließen in nur 30 Minuten. Durch dieses Dach ist die Esprit arena sowohl wärmeisoliert als auch schallgedämpft.

Zudem verfügt die Esprit arena über eine hochmoderne und einzigartige Heizungsanlage. Das ganze Jahr über können wetterunabhängig Veranstaltungen stattfinden. Bei geschlossenem Dach sitzen Besucher auch im Winter bei angenehmen Temperaturen auf den Tribünen.

Im Rahmen des Projektes HERMES dient das Gebäude der Esprit arena zur Erforschung und Erprobung des Evakuierungsassistenten. Zur realistischen Modellierung in zukünftigen Simulationen, wurden die Bewegungen größerer Personengruppen auf den Treppen und Tribünen der Esprit arena durchgeführt.

3.2 TAG 1: Mittwoch, der 29.04.2009

Experimente MU1 und MU2 - Mundloch Unterrang

Zielsetzung: Mit diesem Experiment sollten Erkenntnisse über Unterschiede beim Zusammenfluss zweier und dreier Personenströme unter Variation von Personendichte und unter Einfluss von Hindernissen gewonnen werden.

Versuchsablauf: Wie in den Abb.2 und 3 zu erkennen ist, wurden die Teilnehmer nach T-Shirt-Farben geordnet um ein Mundloch gruppiert. Die Teilnehmer wurden

angewiesen, nach einer Durchsage (siehe S.4) die Plätze zu verlassen und den Block über das Mundloch zu verlassen. Nach dem Gang durch das Mundloch wurden die Probanden von den Zuführern empfangen und weitergeleitet. Sie sollten wieder durch die Mundlöcher der benachbarten Blöcke in eine Warteposition für den nächsten Durchlauf vorrücken. Diese Versuchsaufbauten wurde mit verschiedenen Randbedingungen mehrfach durchlaufen:

<i>Nr.</i>	<i>Beschreibung</i>	$N_{Personen}$	<i>Zeit [min]</i>	<i>Bemerkungen</i>
MU21	Alle Plätze besetzt	300	1:53	ohne untere Sitzplätze
MU22	Jeder zweite Platz besetzt	150	1:30	ohne untere Sitzplätze
MU23	wurde nicht durchgeführt			
MU11	Alle Plätze besetzt	300	1:34	mit unteren Sitzplätzen
MU12	Jeder zweite Platz besetzt	150	1:10	mit unteren Sitzplätzen
MU13	wurde nicht durchgeführt			
MU14	Alle Plätze besetzt; Hindernis: Ordner Pos.1	300	1:37	mit unteren Sitzplätzen
MU15	Alle Plätze besetzt; Hindernis: Ordner Pos.2	300	1:43	mit unteren Sitzplätzen
MU16	Alle Plätze besetzt; linker Türflügel geschlossen	300	2:18	mit unteren Sitzplätzen
MU24	Alle Plätze besetzt; linker Türflügel geschlossen	300	2:23	ohne untere Sitzplätzen

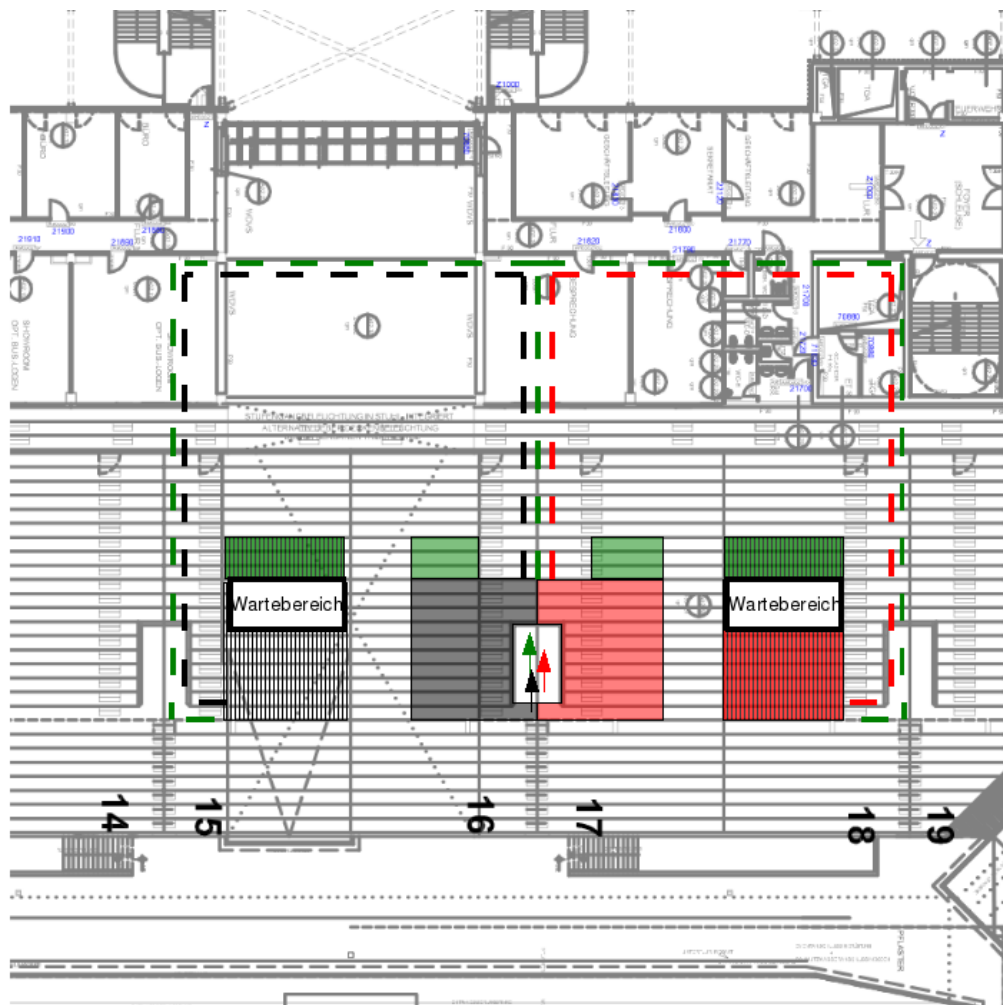


Abbildung 2: Experiment MU2

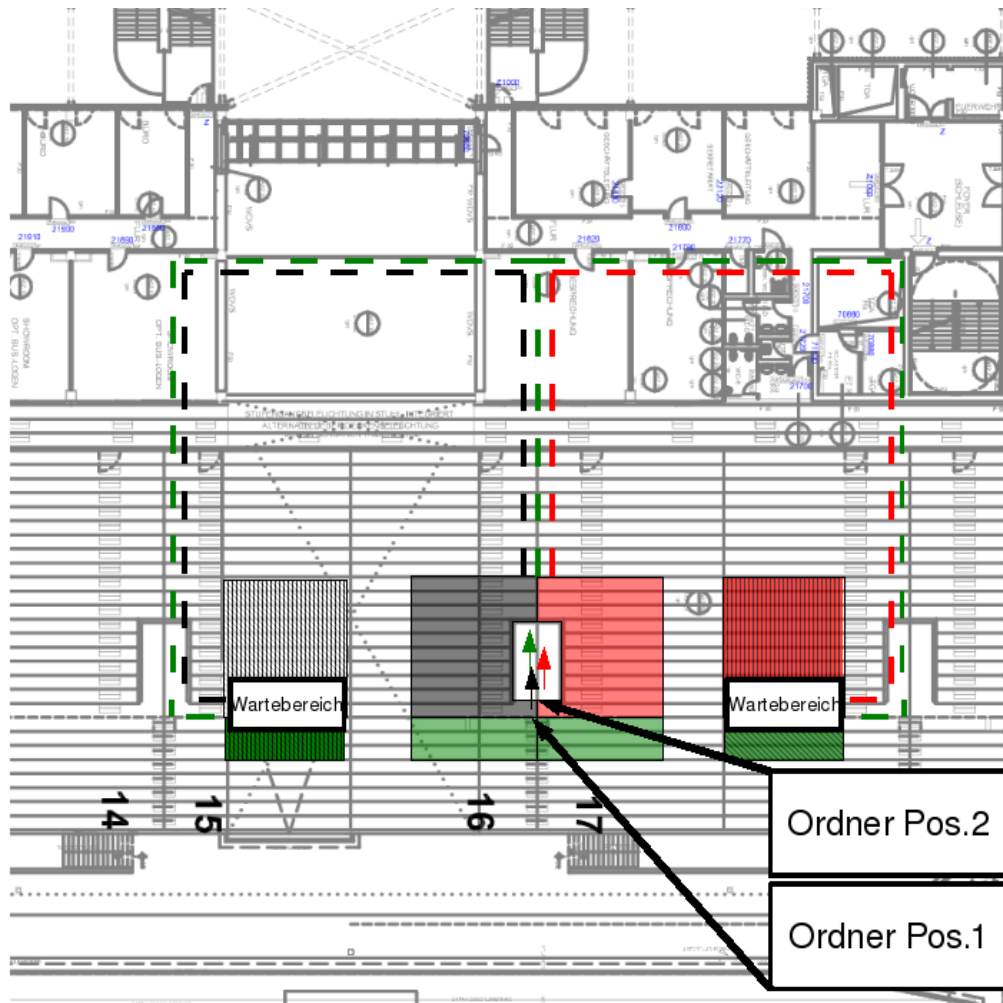


Abbildung 3: Experiment MU1

Beobachtungen: Der Versuch zeigte den Einfluss der Anzahl an Personenströmen auf den Zeitbedarf. Die Evakuierung von drei Personenströmen dauerte kürzer als die Evakuierung zweier Personenströme. Der Einfluss von Hindernissen stellte sich wie folgt dar: Das Schließen eines Türflügels hatte einen erheblichen Einfluss auf die Dauer der Evakuierung, der Einfluss von Ordnern am Mundloch war vernachlässigbar.

Komplikationen und Bemerkungen: Die Versuche **MU13** und **MU23**, bei denen jeder dritte Platz besetzt gewesen wäre, wurden nicht durchgeführt. Stattdessen sind während der Versuchsdurchführung die Versuche **MU16** und **MU24** ergänzt worden.

Experiment TZ - Außentreppe T13

Zielsetzung: Das Ziel dieser Versuchsreihe war die Beobachtung von zusammenfließenden Personenströmen an Treppenabsätzen. Bei diesen Versuchen wurde die Personendichte über die Stärke des Zuflusses von Personen aus Ebene 3 beeinflusst.

Versuchsablauf: Zu Beginn des Versuchs befanden sich die Versuchsteilnehmer mit

roten T- Shirts auf den Podesten und Treppenläufen der Außentreppe. Auf der Ebene 3 warteten in einer Bereitstellungszone Teilnehmer in schwarzen T-Shirts darauf, sich in den Personenstrom auf der Treppe einzugliedern. Die Zugangsbreite von Ebene 3 zur Treppe und die Durchgangsbreite im Treppenverlauf wurden bei den aufeinanderfolgenden Versuchen verändert.

<i>Nr.</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>N_{Personen}</i>	<i>Zeit [min]</i>	<i>Bemerkungen</i>
TZ1	150 Pers. auf der Treppe, $b_{Treppe}=2,40\text{m}$	150	1:22	
TZ2	150 Pers. vor der Tür, $b_{Tür}=2,40\text{m}$	150	1:05	
TZ3	150 Pers. auf der Treppe, 150 Pers. vor der Tür $b_{Treppe}=2,40\text{m}; b_{Tür}=2,40\text{m}$	300	2:12	
TZ4	150 Pers. auf der Treppe, 150 Pers. vor der Tür $b_{Treppe}=2,40\text{m}; b_{Tür}=1,20\text{m}$	300	1:41	
TZ5	150 Pers. auf der Treppe, 150 Pers. vor der Tür $b_{Treppe}=1,20\text{m}; b_{Tür}=2,40\text{m}$	300	1:59	
TZ6	150 Pers. auf der Treppe, 150 Pers. vor der Tür $b_{Treppe}=0,90\text{m}; b_{Tür}=0,90\text{m}$	300	3:07	

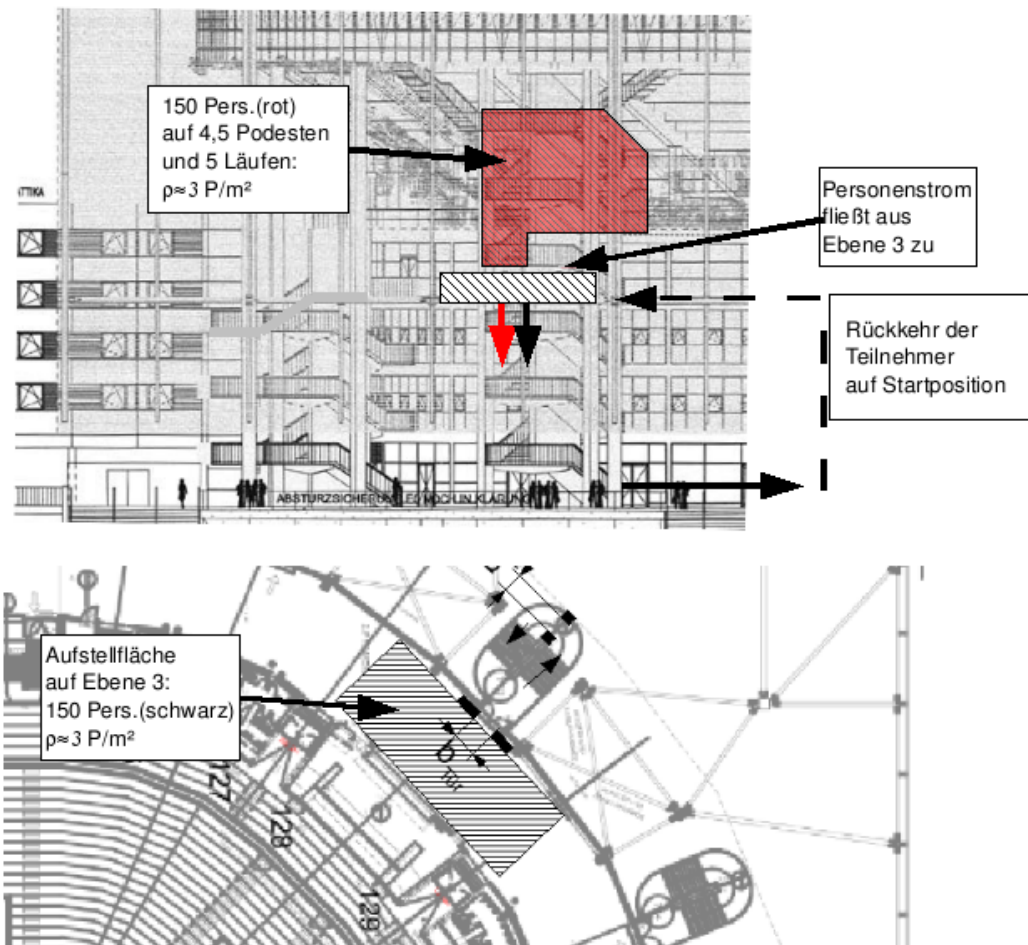


Abbildung 4: Experiment TZ

Beobachtungen: Es zeigte sich, dass der Zeitbedarf zur Evakuierung wesentlich von der Breite der Zu- und Ablauföffnungen beeinflusst wurde.

Experiment TU - Treppe Unterrang

Zielsetzung: Das Experiment TU sollte als Grundlage für die Entwicklung eines Fundamentaldiagramms für Treppen dienen. Ferner sollte der Einfluss von Zufluss aus den Sitzreihen, der Einfluss der Dichte und der Einfluss der Steigung beobachtet werden. Der Vergleich des Steigungseinflusses erfolgt durch den Vergleich der Ergebnisse aus den Experimenten im Oberrang.

Versuchsablauf: Den Teilnehmern wurden wie in den ersten Experimenten Sitzplätze im Block zugeteilt. Diese sollten dann über die Treppe und das Mundloch verlassen werden. Ebenfalls wie bei den ersten Experimenten erfolgte die Zuführung der Probanden über die Promenade in den Wartebereich und von dort wieder auf Ausgangsposition für den nächsten Versuch. Die unterschiedlichen Randbedingungen der einzelnen Durchläufe sind in der folgenden Tabelle aufgeführt:

<i>Nr.</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>N_{Personen}</i>	<i>Zeit [min]</i>	<i>Bemerkungen</i>
TU11	Teilnehmer nur auf der Treppe (hohe Dichte)	57	-	
TU12	Teilnehmer nur auf der Treppe (mittlere Dichte)	42	0:39	
TU13	Teilnehmer nur auf der Treppe (niedrige Dichte)	28	0:30	
TU21	Volle Besetzung nach Abb.5	300	3:08	
TU22	Jeder zweite Platz besetzt	150	1:47	
TU23	Jeder dritte Platz besetzt	100	1:19	
TU24	Jeder vierte Platz besetzt	75	1:04	
TU14	Teilnehmer nur auf der Treppe (sehr niedrige Dichte)	14	0:24	
TU25	Volle Besetzung	300	2:59	Wiederholungsversuch TU21

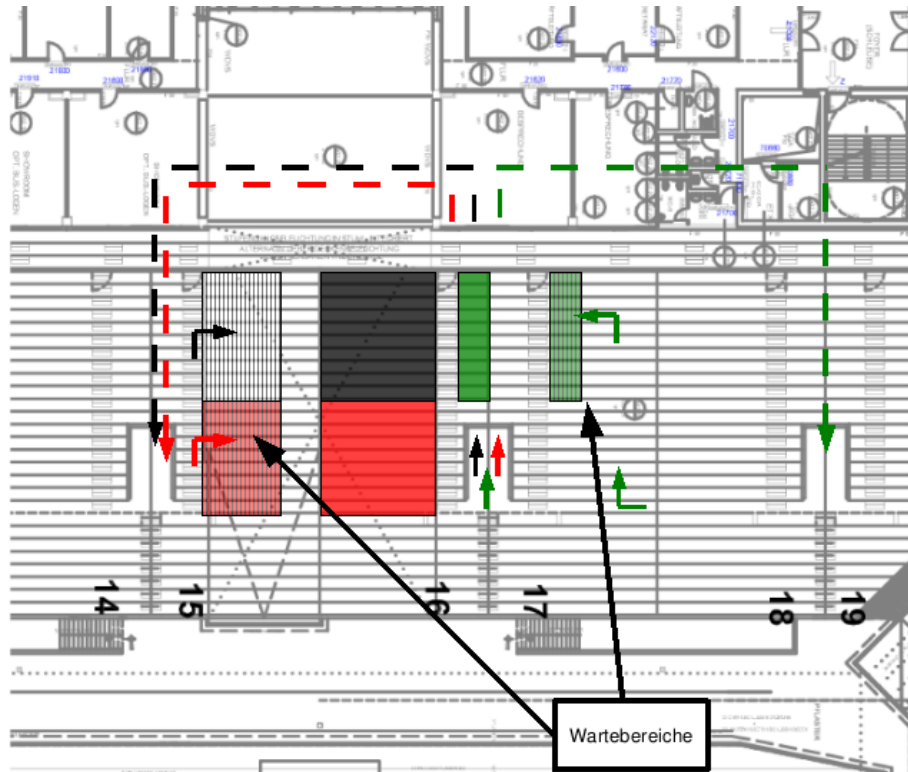


Abbildung 5: Experiment TU

Beobachtungen: Im Versuch zeigte sich bei steigender Personendichte ein größerer Zeitbedarf für die Räumung der Treppe. Bei den Versuchen mit hoher Personendichte waren Stauungen auf der Treppe zu beobachten. Das lag möglicherweise daran, dass die Probanden aufgrund der hohen Dichte die Stufen schlecht erkennen konnten und sich daher entsprechend vorsichtig bewegten.

3.3 TAG 2: Donnerstag, der 30.04.2009

Experiment MO - Mundloch Oberrang

Zielsetzung: Mit den Versuchen im Oberrang sollte der Zusammenfluss zweier und dreier Personenströme im Mundloch untersucht werden. Die einzelnen Durchläufe wurden mit unterschiedlichen Randbedingungen durchgeführt und sollten den Einfluss von unterschiedlichen Personendichten sowie die Auswirkung von Hindernissen am Mundloch erkennbar machen.

Versuchsablauf: Den Versuchsteilnehmern wurden Sitzplätze im Block zugewiesen. Auf ein Kommando sollten die Plätze verlassen und der Block durch das Mundloch verlassen werden.

<i>Nr.</i>	<i>Beschreibung</i>	$N_{Personen}$	<i>Zeit [min]</i>	<i>Bemerkungen</i>
MO11	Alle Plätze besetzt	300	1:38	mit unteren Sitzplätzen
MO12	Alle Plätze besetzt, linker Türflügel geschlossen	300	2:32	mit unteren Sitzplätzen
MO13	Jeder zweite Platz besetzt	150	1:10	mit unteren Sitzplätzen
MO21	Alle Plätze besetzt	300	2:13	ohne untere Sitzplätze
MO22	Jeder zweite Platz besetzt	200	1:16	ohne untere Sitzplätze
MO15	Alle Plätze besetzt; Ordner auf Pos.1	300	1:41	mit unteren Sitzplätzen, analog MU14
MO16	Alle Plätze besetzt; Ordner auf Pos.2	300	1:43	mit unteren Sitzplätzen, analog MU15
MO24	Alle Plätze besetzt, linker Türflügel geschlossen	300	2:42	ohne untere Sitzplätze, analog MU12

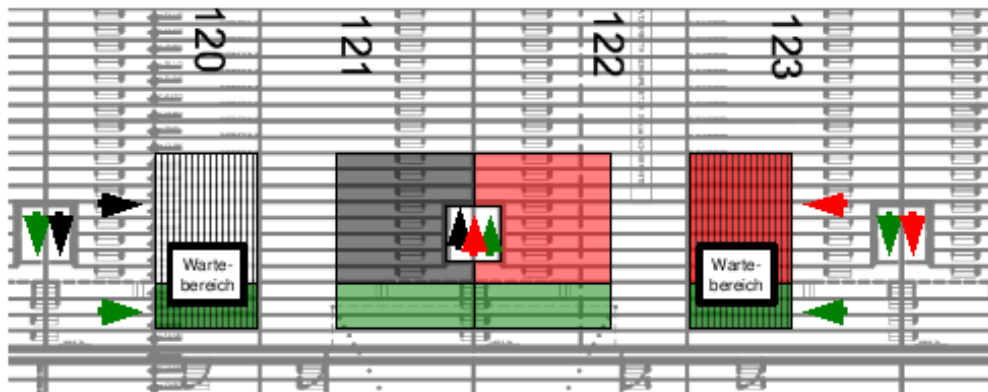


Abbildung 6: Experiment MO1

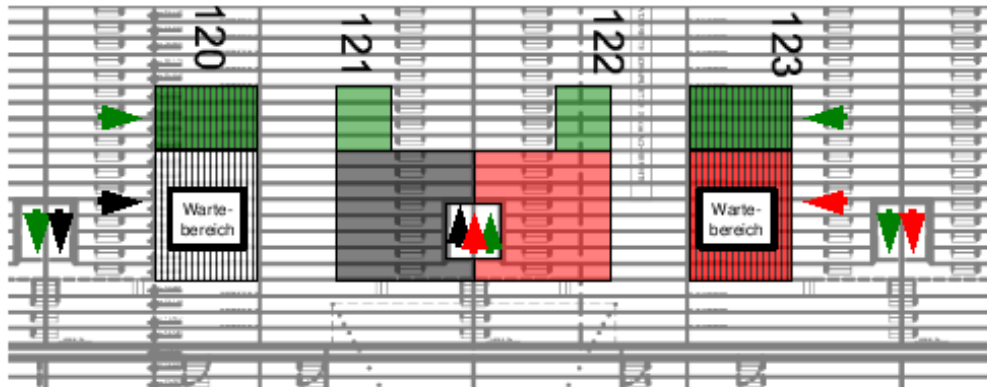


Abbildung 7: Experiment MO2

Beobachtungen: Die Auswertung des Versuchs und der Vergleich mit den Ergebnissen aus dem Experiment MU zeigte, dass die Steigung der Treppe keinen nennenswerten Einfluss auf die Evakuierungszeit hat. Ansonsten gleichen sich die Erkenntnisse aus den beiden Experimenten MO und MU.

Experiment TP - Treppe und Podest

Zielsetzung: Dieses Experiment sollte eine Datenbasis zur Entwicklung eines Fundamentaldiagramms für Personenströme auf Treppen liefern. Hier sollten auch Einflüsse der Bewegung um Ecken und der Personendichte betrachtet werden. Die Variation der Dichte wurde über den Zufluss von Personen geregelt.

Versuchsablauf: Die Versuchsteilnehmer befanden sich zu Beginn des Versuchs auf einer Fläche von insgesamt 100m^2 , dabei waren jeweils Teilflächen von $33,3\text{m}^2$ abgegrenzt. Die Teilnehmer sollten über die Außentreppe T22 bis zur Ebene 0 hinuntergehen und sich anschließend über die benachbarte Außentreppe wieder zur Aufstellungsfläche begeben.

<i>Nr.</i>	<i>Anordnung</i>	<i>N_{Personen}</i>	<i>Zeit [min]</i>	<i>Bemerkungen</i>
TP1	$b_{Zulau\text{f}}=2,4\text{m}$	300	2:34	
TP2	$b_{Zulau\text{f}}=1,4\text{m}$	200	1:45	
TP3	$b_{Zulau\text{f}}=1,2\text{m}$	200	1:48	
TP4	$b_{Zulau\text{f}}=1,0\text{m}$	200	1:55	
TP5	$b_{Zulau\text{f}}=0,9\text{m}$	100	1:08	
TP6	$b_{Zulau\text{f}}=0,75\text{m}$	100	1:14	
TP7	$b_{Zulau\text{f}}=0,8\text{m}$	100	6:17	freie Gehgeschwindigkeit

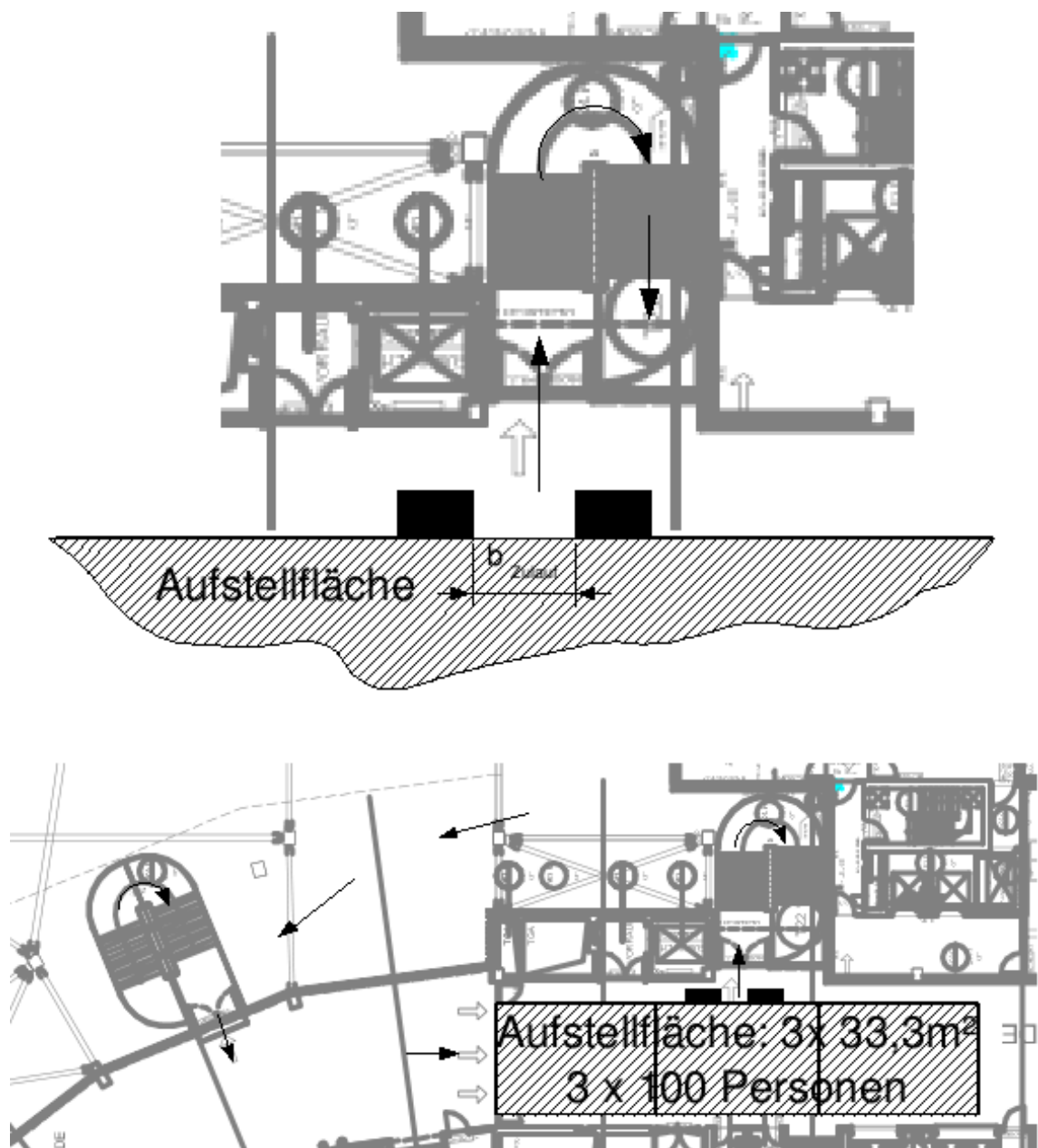


Abbildung 8: Experiment TP

Beobachtungen: Es war zu beobachten, dass die Probanden gerade bei hoher Personendichte anstreben, möglichst am Geländer gehen zu können. Während der letzten Versuche gingen die Probanden nicht zügig, wie es von ihnen eingangs verlangt wurde. Vielmehr unterhielten sie sich und bewegten sich entspannt.

Zwischenexperiment FT - Freitreppe

Zielsetzung: Das Experiment auf der Freitreppe sollte Aufschluss über die freie Gehgeschwindigkeit auf Treppen (abwärts und aufwärts) und in der Ebene geben.

Versuchsablauf:

<i>Nr.</i>	<i>Anordnung</i>	$N_{Personen}$	<i>Zeit [min]</i>	<i>Bemerkungen</i>
FT1	Personen gehen einzeln	≈ 50	4:18	
FT2	Personen gehen in Gruppen à 2-3 Personen	≈ 100	2:32	
FT1.2	Personen gehen einzeln	≈ 50	3:35	
FT3	Personen gehen als Strom	≈ 100	2:21	

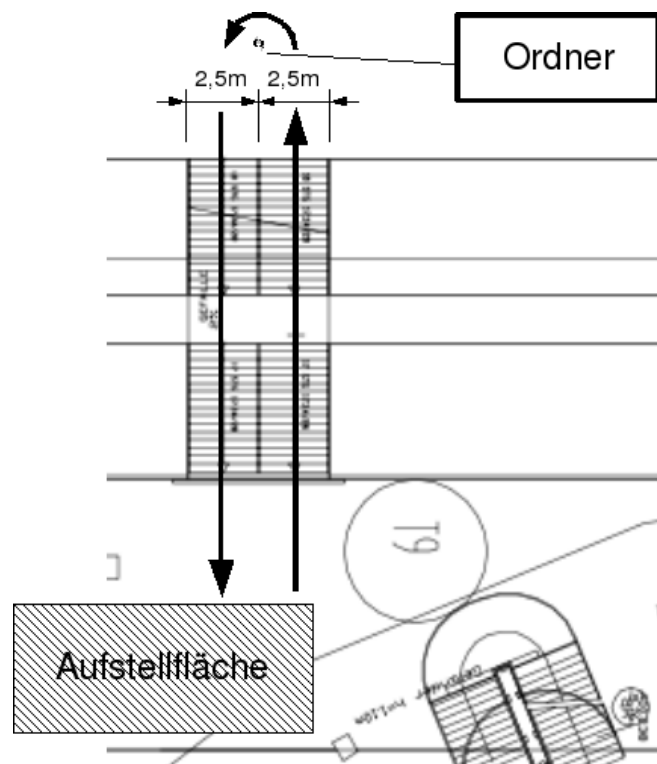


Abbildung 9: Skizze Experiment FT



Abbildung 10: Momentaufnahme Experiment FT

Experiment TO - Treppe Oberrang

Zielsetzung: Aus den Ergebnissen dieses Experimentes sollte ein Fundamentaldia-
gramm entwickelt werden. Es wurden die Einflüsse aus Dichte, Steigung (in Verbindung
mit den Experimenten im Unterrang) und Zufluss aus Sitzreihen betrachtet.

Versuchsablauf: Den Versuchsteilnehmern wurden Sitzplätze im Block zugewiesen.
Auf ein Kommando sollten die Plätze verlassen und der Block durch das Mundloch
verlassen werden.

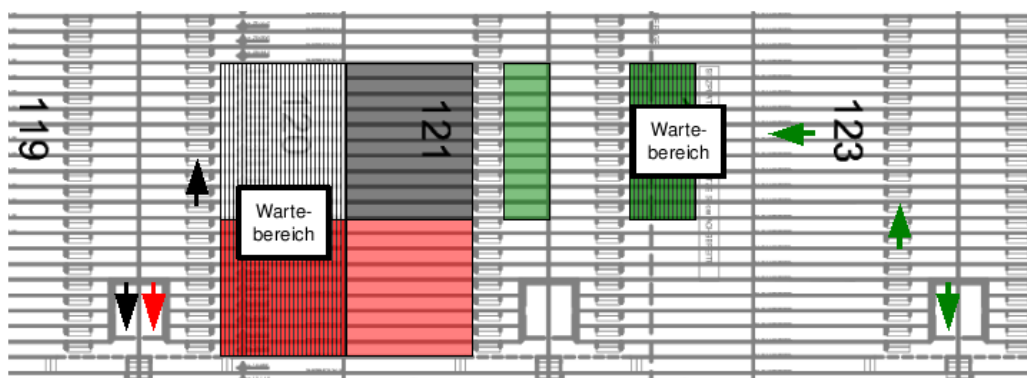


Abbildung 11: Experiment TO

<i>Nr.</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>N_{Personen}</i>	<i>Zeit [min]</i>	<i>Bemerkungen</i>
TO21	volle Besetzung	200	4:02	
TO22	jeder zweite Platz besetzt	150	2:25	
TO23	jeder dritte Platz besetzt	100	1:38	
TO24	jeder vierte Platz besetzt	75	1:22	
TO11	nur Treppe, hohe Dichte	65	0:54	1 Person / 1 Stufe
TO12	nur Treppe, mittlere Dichte	33	0:35	1 Person / 2 Stufen
TO13	nur Treppe, niedrige Dichte	22	0:32	1 Person / 3 Stufen
TO15	nur Treppe, hohe Dichte, freie Wahl des Ausgangs (Mundloch 119/120 und 121/122)	65	0:58	1 Person / Stufe (analog TO11)
TO16	nur Treppe, mittlere Dichte, freie Wahl des Ausgangs	33	0:37	1 Person / 2 Stufen (analog TO12)
TO17	nur Treppe, niedrige Dichte, freie Wahl des Ausgangs	22	0:31	1 Person / 3 Stufen (analog TO13)
TO14	nur Treppe, sehr niedrige Dichte	14	0:29	
TO17.2	nur Treppe, niedrige Dichte, freie Wahl des Ausgangs	22	0:33	Wiederholung TO17
TO18	nur Treppe, sehr niedrige Dichte, freie Wahl des Ausgangs	14	0:30	analog TO14
TO26	volle Besetzung, freie Wahl des Ausgangs	300	3:50	analog TO21

Beobachtungen: Es zeigte sich im Vergleich zum Versuch TU ein deutlicher Einfluss der Steigung auf die Evakuierungszeit, die mit größerer Steigung ebenfalls stieg.

4 Messe Düsseldorf

4.1 Allgemeines

Der zweite Block von Versuchsreihen wurde am 12. und 15. Mai 2009 in einer Halle auf dem Düsseldorfer Messegelände durchgeführt. Als Veranstaltungsort bot sich eine Messehalle aus mehreren Gründen an:

- Größe
- Verfügbarkeit
- Witterungsunabhängigkeit
- Möglichkeit zur Deckenbefestigung von Kameras etc.

Während bei den Versuchen in der Esprit-Arena die Arena selbst den Versuchsaufbau darstellte, diente die Messehalle lediglich als witterungsgeschützter Ort für die Aufstellung des Versuchsaufbaus. Die Versuche selbst hätten also auch in jeder anderen ausreichend großen Halle stattfinden können.

4.2 TAG 1: Dienstag, der 12.05.2009

Experiment UG - unidirektional, geschlossen

Zielsetzung: Mit diesem Versuch sollte eine Datenbasis zur Erstellung eines Fundamentaldiagramms für Personenströme in einem geschlossenen System gewonnen werden. Darüber hinaus sollte das Konzept des spezifischen Flusses und der Unterschied zwischen einem offenen und einem geschlossenen System untersucht werden.

Versuchsablauf: Von Versuch zu Versuch wurde eine steigende Anzahl Versuchsteilnehmer auf die Versuchsstrecke geführt. Die Teilnehmer begannen dann auf ein Kommando hin, die Rundstrecke entlang zu gehen.

<i>Versuch.</i>	$b_{Korr}[m]$	N	ρ	<i>Zeit [min]</i>	<i>Bemerkungen</i>
UG-180-015	1,8	15	0,25	1:49	Wiederholung von UG-180-110
UG-180-030	1,8	30	0,50	1:38	
UG-180-60	1,8	60	1,00	1:50	
UG-180-085	1,8	85	1,50	2:01	
UG-180-110	1,8	110	2,00	3:19	
UG-180-140	1,8	140	2,50	2:17	
UG-180-170	1,8	170	3,00	2:03	
UG-180-230	1,8	230	4,00	3:26	
UG-180-110-2	1,8	110	2,00	3:23	
UG-140-010	1,4	10	0,25	???	
UG-140-020	1,4	20	0,50	???	
UG-140-045	1,4	45	1,00	???	
UG-140-065	1,4	65	1,50	???	
UG-140-085	1,4	85	2,00	???	
UG-140-110	1,4	110	2,50	???	
UG-140-130	1,4	130	3,00	???	
UG-140-170	1,4	170	4,00	???	
UG-100-007	1,0	7	0,25	???	
UG-100-015	1,0	15	0,50	???	
UG-100-030	1,0	30	1,00	???	
UG-100-045	1,0	45	1,50	???	
UG-100-060	1,0	60	2,00	???	
UG-100-075	1,0	75	2,50	???	
UG-100-090	1,0	90	3,00	???	
UG-100-120	1,0	120	4,00	???	

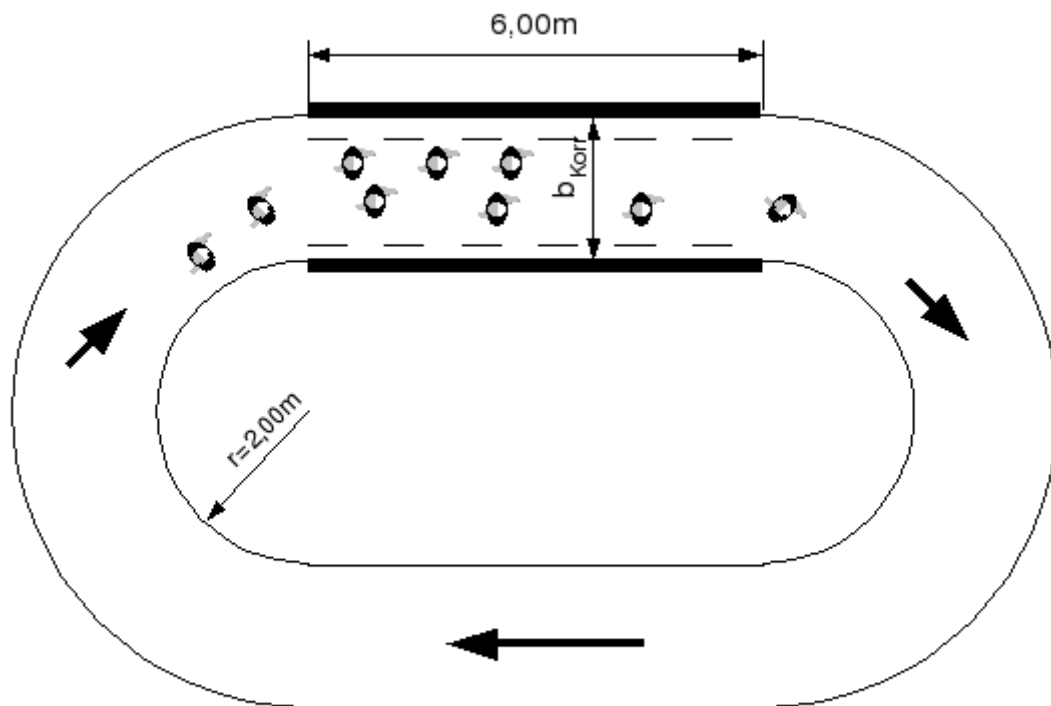


Abbildung 12: Experiment UG

Beobachtungen: In den ersten drei Versuchen bewegten sich die Probanden sehr entspannt mit mäßigem Tempo durch den Versuchsaufbau. Beim Versuch UG-180-110 waren Stauwellen zu erkennen. Bei der Aufstellung der Probanden auf der Versuchsstrecke waren diese teilweise erst nach mehrmaliger Aufforderung dazu bereit, entsprechend aufzurücken. Gerade bei den Versuchen mit hoher Dichte verzögerte sich der Beginn der flüssigen Bewegung, da die Probanden nicht koordiniert gleichzeitig losgingen.

Experiment UO - unidirektional, offen

Zielsetzung: Die Zielsetzung dieses Experiments war die Erstellung eines Fundamentaldiagramms für unidirektionale Personenströme in einem offenen System. Das Experiment diente außerdem der Überprüfung des spezifischen Flusskonzeptes und dem Vergleich von offenem und geschlossenem System.

Versuchsablauf: Die Versuchsteilnehmer befanden sich bei Versuchsbeginn innerhalb eines Wartebereichs. Sie gelangten durch einen Durchgang in einen Korridor, welcher durch einen weiteren Durchgang verlassen werden sollte. In den Durchläufen dieses Versuchsaufbaus variierten die Zustrom-, Korridor- und Abstrombreite.

<i>Versuch.</i>	$b_{Zu}[m]$	$b_{Korr}[m]$	$b_{Ab}[m]$	N	<i>Zeit</i>	Bemerkungen
UO-300-300-300	3,0	3,0	3,0	>350	1:21	Wiederholung
UO-300-240-300	2,4	3,0	3,0	250	1:08	
UO-300-180-300	2×0,9	3,0	3,0	200	1:01	
UO-300-120-300	2×0,6	3,0	3,0	150	1:05	
UO-300-100-300	2×0,5	3,0	3,0	100	0:52	
UO-300-080-300	0,8	3,0	3,0	100	1:23	
UO-300-080-300-2	0,8	3,0	3,0	100	1:02	
UO-300-300-200	3,0	3,0	2,0	≈400	1:38	
UO-300-300-160	3,0	3,0	1,6	≈400	1:52	
UO-300-300-120	3,0	3,0	1,2	≈400	2:11	
UO-300-080-300-3	0,8	3,0	3,0	≈200	2:41	
UO-240-240-240	2,4	2,4	2,4	250	-	Wirklich 2 „Ausgänge“? Wirklich 2 „Ausgänge“? ohne Stoffhauben ohne Stoffhauben
UO-190-240-240	1,9	2,4	2,4	200	1:10	
UO-145-240-240	2×0,72	2,4	2,4	150	0:58	
UO-095-240-240	2×0,47	2,4	2,4	100	0:58	
UO-080-240-240	0,80	2,4	2,4	85	1:15	
UO-065-240-240	0,65	2,4	2,4	70	0:58	
UO-240-240-160	2,4	2,4	1,6	250	1:38	
UO-240-240-130	2,4	2,4	1,3	250	1:40	
UO-240-240-100	2,4	2,4	1,0	250	2:01	
UO-240-240-100	2,4	2,4	1,0	100	0:51	
UO-140-240-240	2,4	2,4	1,0	100	0:49	
UO-180-180-180	1,8	1,8	1,8	200	1:29	Wirklich 2 „Ausgänge“? Wirklich 2 „Ausgänge“?
UO-145-180-180	2×0,72	1,8	1,8	150	1:17	
UO-110-180-180	0,5+0,6	1,8	1,8	100	0:59	
UO-070-180-180	0,7	1,8	1,8	100	1:19	
UO-060-180-180	0,6	1,8	1,8	50	0:56	
UO-050-180-180	0,5	1,8	1,8	50	1:00	
UO-180-180-120	1,8	1,8	1,2	150	1:19	
UO-180-180-095	1,8	1,8	0,95	150	1:38	
UO-180-180-070	1,8	1,8	0,7	150	1:38	

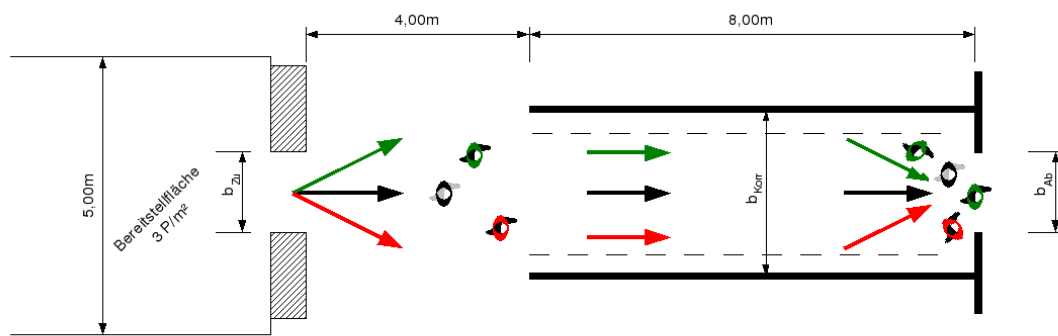


Abbildung 13: Experiment UO

Beobachtungen: Der Einfluss der Zulauf- und Ablaufbreiten hatte einen größeren Einfluss als die Anzahl der Versuchsteilnehmer.

Komplikationen: Im Versuch UO-300-080-300 verlor ein Proband seine Mütze und blieb stehen, um sie wieder aufzuheben. Dadurch wurde der Versuchsablauf gestört und der Versuch anschließend als OU-300-080-300-2 wiederholt.

Experiment AO - Ausgang, offen

Zielsetzung: Von diesem Versuch versprach man sich Erkenntnisse über das Abflussverhalten einer großen Menschenmenge durch einen breiten Ausgang.

Versuchsablauf: Die Versuchspersonen nahmen innerhalb der aufgezeichneten Radian Aufstellung. Auf ein Kommando hin sollte der Bereich durch einen Ausgang verlassen werden, dessen Breite während der Einzelversuche variierte.

<i>Versuch</i>	$b_{\text{Ausgang}}[\text{m}]$	N	<i>Zeit [min]</i>	<i>Bemerkungen</i>
AO-360-400	3,6	400	0:49	
AO-300-400	3,0	400	0:58	
AO-240-350	2,4	400	1:07	
AO-440-400	4,4	400	0:43	
AO-500-400	5,0	400	0:36	

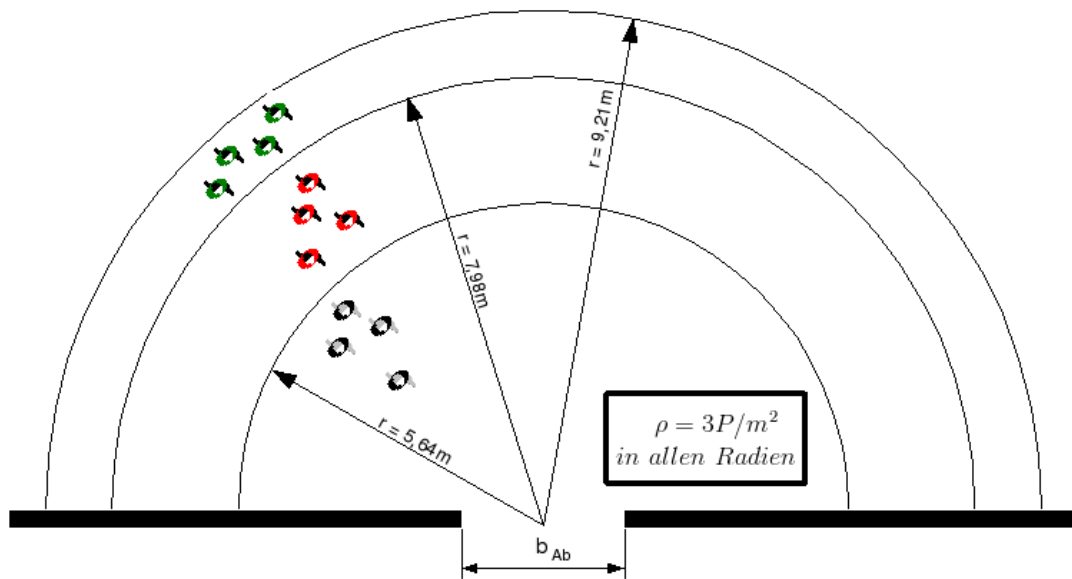


Abbildung 14: Experiment AO

Beobachtungen: In den ersten drei Versuchen trat das erwartete Phänomen nicht auf.

4.3 TAG 2: Freitag, der 15.05.2009

Experiment BO - bidirektional, offen

Zielsetzung: Bei diesem Versuch lag das Ziel darin, ein Fundamentaldiagramm für bidirektionale Personenströme in einem offenen, ebenen System zu erstellen. Darüber hinaus sollten der Einfluss aus der Möglichkeit zur freien Zielwahl und der Einfluss verschiedener Breiten der Zustromöffnung betrachtet werden. Abschließend soll das erhaltene Fundamentaldiagramm mit dem Fundamentaldiagramm für den unidirektionalen Strom verglichen werden.

Versuchsablauf: Zu Beginn des Experiments standen die Versuchsteilnehmer innerhalb der abgegrenzten Aufstellflächen zu beiden Seiten des Korridors. Der Korridor sollte durchschritten werden; dabei war den Probanden teilweise freigestellt, zu welcher Seite hin sie den Korridor am Ende verlassen. Bei den Einzelversuchen **ohne freie Wahl** des Ausgangs wurde den Teilnehmern zweckmäßigerweise anhand ihrer Personalnummer eine Ausgangsrichtung zugewiesen: Teilnehmer mit gerader Personalnummer sollten den Korridor auf der rechten Seite verlassen, Teilnehmer mit ungerader

Personalnummer sollten hingegen den Korridor auf der linken Seite verlassen.

<i>Versuch</i>	b_{Zu1} [m]	b_{Korr} [m]	b_{Zu2} [m]	N [Personen]	$Zeit$ [min]	<i>Bemerkungen</i>
BO-360-050-050	0,5	3,6	0,5	50/50	0:59	freie Wahl
BO-360-075-075	0,75	3,6	0,75	50/50	1:09	freie Wahl
BO-360-090-090	0,90	3,6	0,90	100/100	1:04	freie Wahl
BO-360-120-120	1,20	3,6	1,20	100/100	1:21	freie Wahl
BO-360-160-160	1,60	3,6	1,60	150/150	1:21	freie Wahl
BOT-360-050-050	0,50	3,6	0,50	50/50	1:08	keine freie Wahl
BOT-360-075-075	0,75	3,6	0,75	50/50	0:52	keine freie Wahl
BOT-360-090-090	0,90	3,6	0,90	100/100	1:05	keine freie Wahl
BOT-360-120-120	1,20	3,6	1,20	100/100	1:21	keine freie Wahl
BOT-360-160-160	1,60	3,6	1,60	150/150	1:19	keine freie Wahl
BOT-360-120-120	1,20	3,6	1,20	100/100	0:55	Wiederholung (N geringer)
BOT-360-200-200	2,00	3,6	2,00	150/150	1:17	keine freie Wahl
BOT-360-250-250	2,50	3,6	2,50	150/150	1:14	keine freie Wahl
BO-300-050-050	0,50	3,0	0,50	50/50	1:12	keine freie Wahl
BO-300-065-065	0,65	3,0	0,65	50/50	1:04	keine freie Wahl
BO-300-075-075	0,75	3,0	0,75	50/50	1:02	keine freie Wahl
BO-300-085-085	0,85	3,0	0,85	100/100	1:11	keine freie Wahl
BO-300-100-100	1,00	3,0	1,00	100/100	1:10	keine freie Wahl
BOA-300-050-070	0,50	3,0	0,70	50/50	1:13	asymmetrisch, keine freie Wahl
BOA-300-050-085	0,50	3,0	0,85	50/50	1:08	asymmetrisch, keine freie Wahl
BOA-300-055-095	0,55	3,0	0,95	50/50	0:52	asymmetrisch, keine freie Wahl
BOA-300-065-105	0,65	3,0	1,05	100/100	1:29	asymmetrisch, keine freie Wahl
BOA-300-080-120	0,80	3,0	1,20	100/100	1:13	asymmetrisch, keine freie Wahl
BOF-300-080	0,80	3,0		25/25	5:34	freie Gehge- schwindigkeit, abwechselnd

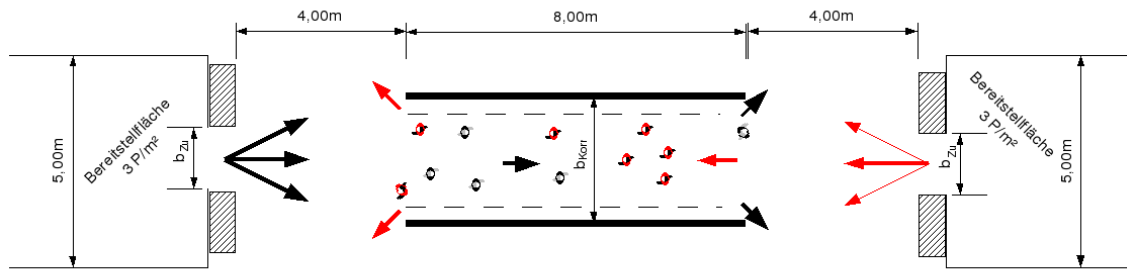


Abbildung 15: Experiment BO

Beobachtungen: Bei den Versuchen ohne freie Wahl des Ausgangs war zu beobachten, dass die Probanden sich bereits vor Versuchsbeginn in der Aufstellungsfläche so anordneten, dass sie sich bereits auf der jeweils richtigen Seite befanden. Während der Versuche kam es vereinzelt zu Zusammenstößen von Probanden.

Experiment KO - T-Kreuzung, offen

Zielsetzung: Mit diesem Versuch sollte die genutzte Wegbreite b_{eff} in Abhängigkeit von Personenzahl / Dichte ermittelt werden. Außerdem sollte das Zusammenstromverhalten untersucht und abschließend der Vergleich der Versuchsergebnisse mit dem Fundamentaldiagramm für einen unidirektionalen Strom im geraden Korridor gezogen werden.

Versuchsablauf: Die Teilnehmer befanden sich bei Versuchsbeginn innerhalb der Aufstellungsflächen. Anschließend durchliefen sie den Korridor; an der Kreuzung trafen beide Personenströme aufeinander und verließen gemeinsam den Versuchsaufbau.

Versuch	b_{Zu1} [m]	b_{Zu2} [m]	b_{Korr1} [m]	b_{Korr2} [m]	N [Pers.]	Zeit [min]	Bemerkungen
KO-300-050-300	0,5	0,5	3,0	3,0	70/70	1:08	
KO-300-080-300	0,8	0,8	3,0	3,0	100/100	1:08	
KO-300-120-300	1,2	1,2	3,0	3,0	150/150	1:15	
KO-300-150-300	1,5	1,5	3,0	3,0	150/150	1:13	
KO-240-050-240	0,5	0,5	2,4	2,4	50/50	1:00	
KO-240-060-240	0,6	0,6	2,4	2,4	50/50	0:56	
KO-240-080-240	0,8	0,8	2,4	2,4	100/100	1:10	
KO-240-100-240	1,0	1,0	2,4	2,4	100/100	1:02	
KO-240-240-240	2,4	2,4	2,4	2,4	150/150	1:24	
KO-240-150-240	1,5	1,5	2,4	2,4	150/150	1:27	
KO-240-120-240	1,2	1,2	2,4	2,4	150/150	1:31	

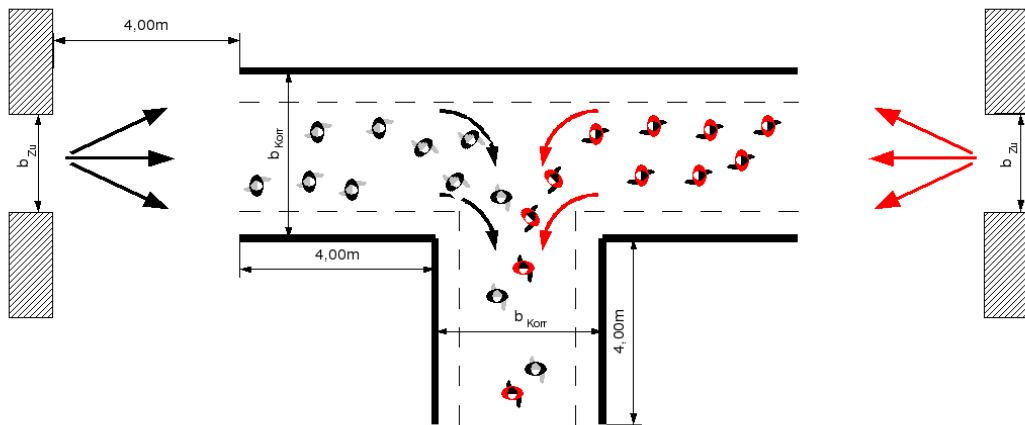


Abbildung 16: Experiment KO

Beobachtungen: Nach dem Durchgang der ersten Versuchspersonen hatten sich mehr oder weniger feste Spuren ausgebildet, welche von den nachfolgenden Probanden meist beibehalten wurden. Eine Einschnürung der Personenströme an der Kreuzung stellte sich ebenfalls ein.

Experiment EO - Ecke, offen

Zielsetzung: Dieser Versuch diente der Ermittlung der genutzten Wegbreite b_{eff} in Abhängigkeit der Personenzahl / Dichte.

Versuchsablauf: Die Probanden durchliefen nach Verlassen der Aufstellungsfläche den Korridor. Dabei variierten in den Einzelexperimenten die Breite der Zuflussöffnung und die Breite des Korridors.

<i>Versuch</i>	b_{Zu} [m]	b_{Korr1} [m]	b_{Korr2} [m]	N [Pers.]	<i>Zeit</i> [min]	<i>Bemerkungen</i>
EO240-050-240	0,50	2,4	2,4	50	0:55	
EO240-060-240	0,60	2,4	2,4	50	0:46	
EO240-080-240	0,80	2,4	2,4	100	1:01	
EO240-100-240	1,00	2,4	2,4	100	0:52	
EO240-150-240	1,50	2,4	2,4	100	0:41	
EO300-050-300	0,50	3,0	3,0	50	0:58	
EO300-060-300	0,60	3,0	3,0	50	0:45	
EO300-080-300	0,50	3,0	3,0	100	1:01	
EO300-100-300	1,00	3,0	3,0	100	0:57	
EO300-150-300	1,50	3,0	3,0	150	0:49	
EOF300-1	1,50	3,0	3,6	28	2:57	freie Gehgeschwindigkeit; Zulauf ₁
EOF300-2	1,50	3,0	3,6	28	3:27	freie Gehgeschwindigkeit; Zulauf ₂
EOF300-3	1,50/1,50	3,6	3,0	4:55		freie Gehgeschwindigkeit; bidirektional
EO300-300-OM	3,0	3,0	3,0	150	0:48	ohne Stoffhauben
EO-extra	?	?	?	?	1:32	?

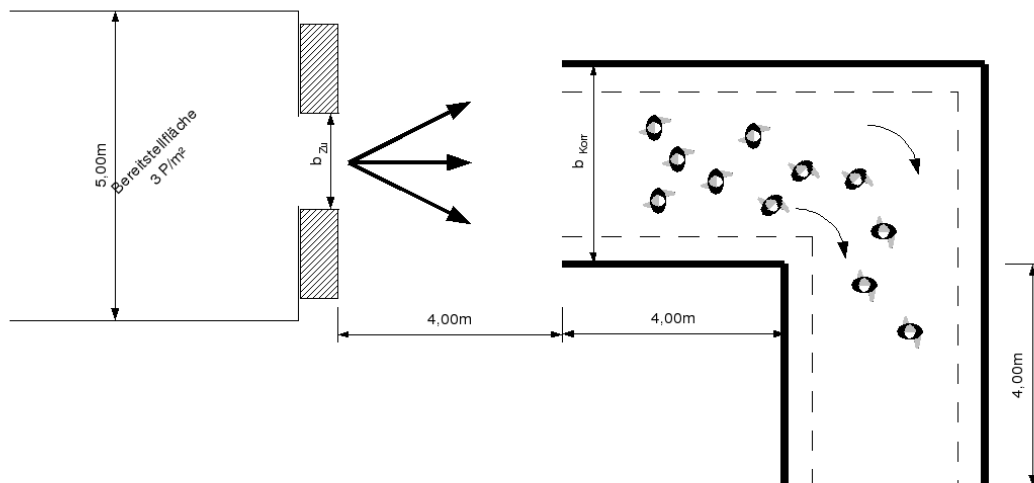


Abbildung 17: Experiment EO

Beobachtungen: Wie im Experiment KO bildeten sich bei den Versuchsdurchläufen

mit bidirektionalen Personenströmen deutliche Gehspuren aus.