



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

Bachelor-Thesis

**Empirische Untersuchungen zur Kapazität
von Fahrtreppen**

Fachbereich D – Abteilung Bauingenieurwesen

Lehr- und Forschungsgebiet Computersimulation für
Brandschutz und Fußgängerverkehr

Leitung: Prof. Dr. Armin Seyfried

Betreuer: Dipl.-Ing. Stefan Holl

Von Tanja Böhm-Franke

April 2015

Eidesstattliche Erklärung

Ich gewährleiste hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig erarbeitet und verfasst habe. Ich habe ausschließlich die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und sämtliche Zitate kenntlich gemacht.

Wuppertal, den 09.04.2015

Tanja Böhm-Franke

Kurzfassung

Aus der Großstadt sind Fahrtreppen heute nicht mehr wegzudenken. Täglich nutzen große Menschenmassen Fahrtreppen als Verbindung zwischen Gebäudeebenen. Bei der Planung dieser Gebäude spielt der Fußgängerverkehr eine entscheidende Rolle. Zwar stehen diverse Normen und Richtlinien für diese Planung von Fahrtreppen zur Verfügung, die auch Bemessungsgrundlagen für die Kapazität von diesen liefern. Gleichzeitig aber ist die tatsächliche Leistungsfähigkeit von Fahrtreppen noch nicht hinreichend untersucht worden.

Diese Arbeit untersucht die Leistungsfähigkeit von Fahrtreppen in Einkaufszentren und auf Bahnhöfen anhand von Feldstudien. Die untersuchten Fahrtreppen haben eine Stufenbreite von 1,00 m und laufen mit der Nenngeschwindigkeit von 0,5 m/s. Für Fahrtreppen solcher Bauart werden in den Richtlinien Bemessungskapazitäten von ungefähr 100 Personen/min angegeben. Die Analyse der Feldstudien ergab im Durchschnitt aber nur Förderleistungen in Höhe von ca. 65 Personen/min. Anhand der Untersuchungen wurden desweiteren maßgebende Parameter für die Kapazität benannt und Qualitätsstufen für den Verkehrsablauf auf Fahrtreppen empfohlen.

Verkehrssimulationsprogramme sind heute zudem eine bedeutende Hilfe bei der Planung von Verkehrswegen. Die Ergebnisse der Feldstudien wurden darum mit den Ergebnissen aus Fußgänger-Simulationen mit dem Programm VISSIM verglichen.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	2
2	Grundlagen der Fußgängerdynamik	4
2.1	Parameter zur Beschreibung von Fußgängerströmen.....	4
2.1.1	Dichte	4
2.1.2	Geschwindigkeit.....	6
2.1.3	Fluss	7
3	Fahrtreppen - Grundlagen und Begriffe	10
3.1	Definition	10
3.2	Bauteile der Fahrtreppe	10
3.3	Funktionsweise und Einsatzgebiete	11
3.4	Geschichte der Fahrtreppe (Mihm, 2005)	12
3.5	Parameter.....	14
3.5.1	Nenngeschwindigkeit.....	14
3.5.2	Stufenmaße.....	14
3.5.3	Neigungswinkel.....	14
4	Normen und Richtlinien für die Planung von Fahrtreppen	16
4.1	Theoretische Kapazität	16
4.2	Normen und Richtlinien	16
4.2.1	DIN EN 115-1 „Sicherheit von Fahrtreppen und Fahrsteigen - Teil 1: Konstruktion und Einbau“ (2010-06).....	16
4.2.2	BS 5656-2:2004 „Escalator and moving walks -Safety rules for the construction and installation of escalators and moving walks, Part 2” (2004-11).....	17
4.2.3	Richtlinie der Deutschenbahn (DB RIL 813.0202A01, 05-2012)	17
4.2.4	Handbuch zur Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS, 2009).....	18
4.3	Empfehlungen der Hersteller	19
4.3.1	Schindler (2014).....	19
4.3.2	OTIS (2014)	19
4.3.3	KONE (2010)	20
4.3.4	ThyssenKrupp (2014).....	20
4.4	Weitere Veröffentlichungen	21
4.4.1	Westphal (1971)	21
4.4.2	Weidmann (1993).....	22
4.4.3	Oeding (1963)	24
4.4.4	Janßen (1970)	24

4.5	Zusammenfassung von Kapitel 4	24
5	Feldstudien	26
5.1	Allgemeines / Methode	26
5.2	Dokumentation der Messungen.....	26
5.3	Analyse und Auswertungen	29
5.3.1	Kategorisierung der Messungen.....	29
5.3.2	Belastung.....	29
5.3.3	Förderleistung.....	30
5.3.4	Der Zusammenhang zwischen Stauungen an der Landestelle und der Kapazität einer Fahrtreppe.....	39
5.3.5	Kapazitätsbestimmungen	43
6	Level of Service – LOS	45
6.1	LOS nach Weidmann (1993).....	45
6.2	Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (HBS, 2009).....	46
6.3	Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs auf Fahrtreppen.....	48
7	Integration in VISSIM.....	52
7.1	VISSIM	52
7.2	Modell	52
7.3	Auswertung der Simulationen.....	54
7.4	Ergebnisse der Simulationen	55
7.4.1	Simulation 1	55
7.4.2	Simulation 2	56
7.4.3	Simulation 3	57
7.4.4	Simulation 4	58
7.4.5	Zusammenfassung der Ergebnisse	59
8	Schlussbetrachtung.....	60
8.1	Fazit.....	60
8.2	Ausblick	61

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Gewölbte Fahrtreppe im Eingang zur Elbphilharmonie, Quelle: (www.bild.de aufgerufen am 04.03.2015).....	2
Abbildung 2	Auf die Ebene projizierte Fläche einer Person	6
Abbildung 3	N(t)-Diagramm	7
Abbildung 4	Fundamentaldiagramm $J(\rho)$, Quelle: (Friedrich & Seyfried, 2010)	8
Abbildung 5	Flussdiagramm $v(\rho)$, $v(J_s)$ und $J(\rho)$, Quelle: (Friedrich & Seyfried, 2010).....	9
Abbildung 6	Bauteile einer Fahrtreppe, Quelle: (http://www.schramms.de/uploads/pics/mech_schi_01.jpg , aufgerufen am 12.03.2015, Beschriftung von der Autorin).....	10
Abbildung 7	Stufenband, Illustration aus einem amerikanischen Kinderbuch,1984 Quelle:(Mihm, 2005, S. 32).....	11
Abbildung 8	Schema einer Fahrtreppe, Quelle: (www.newworldencyclopedia.org aufgerufen am 12.3.2015, Beschriftung von der Autorin).....	12
Abbildung 9	Revolving Stairs von Nathan Ames, Quelle: (www.wikimedia.de aufgerufen am 22.03.2015)	13
Abbildung 10	Stufen, Hauptmaße, Quelle: (DIN EN 115-1, 2010-06, S. 41).....	14
Abbildung 11	Neigungswinkel α , Quelle: (DIN EN 115-1, 2010-06)	15
Abbildung 12	Typischer People Flow in einem mehrstöckigen Einkaufszentrum mit drei Stoßzeiten, Quelle: (KONE, 2010).....	20
Abbildung 13	Typischer People Flow in einer U-Bahn-Station, die rund um die Uhr geöffnet ist, mit zwei wesentlichen Spitzen, Quelle: (KONE, 2010)	20
Abbildung 14	Förderleistungen von Fahrtreppen, Quelle: (ThyssenKrupp Elevator, 2014, S. 6).....	21
Abbildung 15	Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit von der Fahrgeschwindigkeit bei aufwärts begangenen zweispurigen Fahrtreppen nach Turner. Weidmann gibt an, dass das dargestellte Leistungsniveau allerdings zu groß sei. (Weidmann, 1993, S. 72).....	23
Abbildung 16	Beobachtungsprotokoll für Fahrtreppen	27
Abbildung 17	Typischer Verlauf einer N(t)-Kurve auf Bahnhöfen (Messung mit der ID 45, gemessen am 7.7.2014 im U-Bahnhof in Düsseldorf, Fahrtrichtung „aufwärts“)	30
Abbildung 18	Typischer Verlauf einer N(t)-Kurve in Einkaufszentren (Messung mit der ID 53, gemessen am 19.11.2013 in den CityArcaden in Wuppertal, Fahrtrichtung „abwärts“)	30
Abbildung 19	Gegenüberstellung von N(t)- und J(t)-Diagrammen aus einer Messung am Bahnhof und einer im Einkaufszentrum (ID 45 und ID 53) für unterschiedliche Zeitintervalle.....	33
Abbildung 20	Belastungsprofil einer aufwärtslaufenden Rolltreppe nach Herrmann, Quelle: (Weidmann, 1993, S. 81).....	34
Abbildung 21	Durchschnittliche Förderleistung der Fahrtreppen aller Messungen in Bahnhöfen in Abhängigkeit von Δt (10 s bis 240 s in Schritten von je 1 s).....	37
Abbildung 22	Kontinuierliche Darstellung der Förderleistung der beobachteten Fahrtreppen in definierten Zeitfenstern von 10 s bis 120 s in 1s-Schritten mit Fehlerbalken. Vergleich von Messungen von aufwärts- bzw. abwärtslaufenden Fahrtreppen in Einkaufszentren bzw. Bahnhöfen	38

Abbildung 23	Screenshots aus dem Video zur Messung mit der ID 21 (die Fahrtreppe am unteren Bildrand wird betrachtet) zu markanten Zeitpunkten.....	41
Abbildung 24	N(t)- und J(t)-Diagramm für ID 21 mit markanten Zeitpunkten	42
Abbildung 25	Bevorzugte Verteilung von Personen auf zweispurigen Fahrtreppen, Quelle: (Rogsch, 2013).....	43
Abbildung 26	Personen mit Rollkoffern auf Fahrtreppen (aus dem Video zur Messung mit der ID 29).....	44
Abbildung 27	Verkehrsstärke-Dichte-Beziehung und Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs für Gehwege, Korridore und Rampen für unterschiedliche Gehgeschwindigkeiten, Quelle: (HBS, 2009, S. 11-13)	47
Abbildung 28	Verkehrsstärke-Dichte-Beziehung und Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs für Treppen, Quelle: (HBS, 2009, S. 11-14)	48
Abbildung 29	Beispielhafte, schematische Darstellung einer Fahrtreppe mit einer Förderleistung von 0,2 Personen/Stufe (15 Personen/min) (Obere Grenze der Qualitätsstufe A).....	49
Abbildung 30	Beispielhafte, schematische Darstellung einer Fahrtreppe mit einer Förderleistung von 0,5 Personen/Stufe (37,5 Personen/min) (Obere Grenze der Qualitätsstufe B)	49
Abbildung 31	Beispielhafte, schematische Darstellung einer Fahrtreppe mit einer Förderleistung von 1,0 Personen/Stufe (75 Personen/min) (Obere Grenze der Qualitätsstufe C)	50
Abbildung 32	Beispielhafte, schematische Darstellung einer Fahrtreppe mit einer Förderleistung von 1,2 Personen/Stufe (90 Personen/min) (Obere Grenze der Qualitätsstufe D).....	50
Abbildung 33	Beispielhafte, schematische Darstellung einer Fahrtreppe mit einer Förderleistung von 1,5 Personen/Stufe (112,5 Personen/min) (Zustand in Qualitätsstufe E)	50
Abbildung 34	Modell der Simulation in 2D	52
Abbildung 35	Modell der Simulation in 3D	53
Abbildung 36	Zustand in Simulation 1	55
Abbildung 37	Fluss Simulation 1 Ausschnitt 1	56
Abbildung 38	Fluss Simulation 1 Ausschnitt 2	56
Abbildung 39	Fluss Simulation 1 Fahrtreppe 1	56
Abbildung 40	Fluss Simulation 1 Fahrtreppe 2	56
Abbildung 41	Zustand in Simulation 2.....	56
Abbildung 42	Fluss Simulation 2 Ausschnitt 1	57
Abbildung 43	Fluss Simulation 2 Ausschnitt 2	57
Abbildung 44	Fluss Simulation 2 Fahrtreppe 1	57
Abbildung 45	Fluss Simulation 2 Fahrtreppe 2	57
Abbildung 46	Zustand Simulation 3.....	57
Abbildung 47	Fluss Simulation 3 Ausschnitt 1	58
Abbildung 48	Fluss Simulation 3 Ausschnitt 2	58
Abbildung 49	Fluss Simulation 3 Fahrtreppe 1	58
Abbildung 50	Fluss Simulation 3 Fahrtreppe 2	58
Abbildung 51	Zustand Simulation 4.....	58
Abbildung 52	Fluss Simulation 4 Ausschnitt 1	59
Abbildung 53	Fluss Simulation 4 Ausschnitt 2	59

Abbildung 54 Fluss Simulation 4 Fahrtreppe 1	59
Abbildung 55 Fluss Simulation 4 Fahrtreppe 2	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Platzbedarf f für verschiedene Fußgängertypen (Predteckenskij & Milinskij, 1971).....	5
Tabelle 2	Durchschnittliche Geschwindigkeiten in der Ebene und auf Treppen nach Weidmann.....	7
Tabelle 3	Maximale Förderleistung von Fahrtreppen und Fahrsteigen laut DIN EN 115-1:2010-06.....	16
Tabelle 4	Planungswerte für die Bemessung von Fahrtreppen, Quelle: (British Standard, 2004-11).....	17
Tabelle 5	Kapazitäten linienhafter Fußgängerverkehrsanlagen (HBS, 2009, S. 11-14) ..	18
Tabelle 6	Beförderungskapazitäten laut Schindler	19
Tabelle 7	Theoretische und tatsächliche Förderleistungen einer Fahrtreppe laut OTIS ..	19
Tabelle 8	Zusammenfassung der praktischen Förderleistungen für Fahrtreppen (v=0,5m/s, b=1,00m) aus den Literaturangaben.....	25
Tabelle 9	Ausschnitt der Rohdaten aus einer txt.Datei.....	28
Tabelle 10	Anzahl der ausgewerteten Messungen.....	29
Tabelle 11	Durchschnittliche und maximale Förderleistungen der beobachteten Fahrtreppen in Abhängigkeit vom betrachteten Zeitintervall Δt in Einkaufszentren (Maximalwerte der Spalten sind gelb markiert)	35
Tabelle 12	Durchschnittliche und maximale Förderleistungen der beobachteten Fahrtreppen in Abhängigkeit vom betrachteten Zeitintervall Δt in Bahnhöfen (Maximalwerte der Spalten sind gelb markiert)	36
Tabelle 13	Maximalwerte der gemessenen Förderleistungen für unterschiedliche Zeitfenster, unterteilt in die Kategorien „Einsatzort“ (Bahnhof bzw. Einkaufszentrum) und „Fahrtrichtung“ (aufwärts bzw. abwärts).....	37
Tabelle 14	Zusammenstellung der Qualitätsklassen nach Weidmann (1993).....	46
Tabelle 15	Grenzwerte der Fußgängerverkehrsdichten für Fußgänger in Bewegungen und in Wartesituationen aus dem HBS (HBS, 2009, S. 11-10).....	46
Tabelle 16	Empfehlung für Qualitätsstufen für Fahrtreppen.....	49
Tabelle 17	Angepasstes LOS-Farbschema für die Dichte auf Fahrtreppen in der Simulation mit VISSIM.....	54
Tabelle 18	Unterschiedliche Parameter der Simulationen.....	55

1 Motivation

In Bauwerken mit hohem Personenaufkommen sind häufig Fahrtreppen vorhanden. Die theoretische, maximale Förderleistung, d.h. die maximale Anzahl der Personen, die pro Zeiteinheit befördert werden kann, wird von der Breite und der Geschwindigkeit der Fahrtreppe bestimmt, die tatsächliche Förderleistung liegt aber deutlich unter diesem Wert. Veröffentlichungen zum Thema Kapazität auf Fahrtreppen geben eine große Spannbreite von Bemessungsförderleistungen an.

In dieser Arbeit werden die im Rahmen zweier Projektseminare durchgeführten Vor-Ort-Messungen an Fahrtreppen unter alltäglichen Bedingungen an Bahnsteigen und in Einkaufszentren ausgewertet, sowie mit eigenständigen Messungen ergänzt. Die Ergebnisse der Messungen werden mit Normen und Richtlinien für die Planung von Fahrtreppen verglichen.

Ziel der Arbeit ist es, die Leistungsfähigkeit von Fahrtreppen sowie maßgeblichen Faktoren, die diese Leistungsfähigkeit beeinflussen, empirisch zu ermitteln und in Anlehnung an das Level-of-Service-Konzept (LOS) zu klassifizieren.

In Zusammenarbeit mit der Firma PTV Planung Transport Verkehr soll darüber hinaus untersucht werden, inwieweit die Ergebnisse in die Simulationssoftware VISSIM integriert werden können.



Abbildung 1 Gewölbte Fahrtreppe im Eingang zur Elbphilharmonie, Quelle: (www.bild.de aufgerufen am 04.03.2015)

Diese gewölbte Fahrtreppe im Eingangsbereich zur (noch im Bau befindlichen) Elbphilharmonie in Hamburg gab den Anstoß zur Fragestellung. Da der Benutzer nicht genau sehen kann, wie die Situation am Ende der Fahrtreppe ist, kann er nicht entscheiden, ob es

sinnvoll / ungefährlich ist, diese Fahrtreppe an der unteren Landestelle zu besteigen. Welche Menschenmengen pro Zeiteinheit befördert eine solche Fahrtreppe tatsächlich? Und ist diese Kapazität hinreichend für das einströmende Personenaufkommen? Bzw. wie groß wird der Fluss des Personenstromes am Ende der Fahrtreppe sein und kann dieser abgeführt werden? Welche Kapazität sollte zur Bemessung dieser Fahrtreppe herangezogen werden?

2 Grundlagen der Fußgängerdynamik

2.1 Parameter zur Beschreibung von Fußgängerströmen

Die maßgebenden Kenngrößen des bewegten Verkehrs sind:

- Dichte
- Geschwindigkeit
- Fluss

2.1.1 Dichte

Die allgemein gängigste Definition der Dichte ρ eines Personenstroms ist das Verhältnis Personenanzahl N zur Bezugsfläche A .

$$\rho = \frac{N}{A} \left[\frac{1}{m^2} \right]$$

Formel 1 Dichte eines Personenstroms

Um die maximale Dichte von Personenmengen berechnen zu können, wird eine weitere in der Forschung benutzte Definition von Dichte eingeführt. Diese stammt von dem Forscherteam Predteckenskij und Milinskij. Sie definieren die Dichte eines Personenstroms als Quotient aus der Summe der Projektionsflächen f der einzelnen Personen auf einer Bezugsfläche A und der Bezugsfläche selbst. (Predteckenskij & Milinskij, 1971)

$$D = \frac{\sum f}{A} \left[\frac{m^2}{m^2} \right]$$

Formel 2 Dichte nach Predteckenskij und Milinskij

Die Projektionsflächen der einzelnen Personen können Werte zwischen 0,04 und 0,39 m² annehmen. Die Fläche ist abhängig vom Alter, der Kleidung und dem mitgeführten Gepäck der Personen und kann aus der folgenden Tabelle abgelesen werden.

Alter, Bekleidung und Gepäck der Person	Fläche f [m ²]
Kind	0,040 ... 0,060
Jugendlicher	0,060 ... 0,090
Erwachsener:	
in Sommerkleidung bzw. Hausbekleidung	0,100
in Übergangsstraßenkleidung	0,113
in Winterstraßenkleidung	0,125
Erwachsener in Übergangsstraßenkleidung:	
mit leichtem Gepäck (z.B. Aktentasche)	0,180
mit einem Koffer	0,240
mit Rucksack	0,260
mit schwerem Gepäck (z.B. zwei Koffer)	0,390
mit einem Kind an der Hand	0,200
mit einem Kind auf dem Arm	0,260
mit einem Kind an der Hand (einschl. Gepäck)	0,320

Tabelle 1 Platzbedarf f für verschiedene Fußgängertypen (Predtecenskij & Milinskij, 1971)

Das Forscherteam definiert noch zwei weitere Kenngrößen von Personenströmen:

Der mittlere verfügbare Platz \bar{A} pro Person errechnet sich aus dem Kehrwert der Dichte ρ .

$$\bar{A} = \frac{1}{\rho} [m^2]$$

Formel 3 Mittlerer verfügbarer Platz pro Person

Der mittlere Abstand \bar{d} zwischen den Personen ist die Wurzel aus \bar{A} .

$$\bar{d} = \frac{1}{\sqrt{\rho}} [m]$$

Formel 4 Mittlerer Abstand zwischen den Personen

Geht man von einem durchschnittlichen Mindestbedarf von $f_{\min} = 0,1 \text{ m}^2$ pro Person (in Sommer- bzw. Hausbekleidung) aus (vgl. Tabelle 1), so ergibt sich hieraus eine durchschnittliche maximale Dichte von 10 Personen pro Quadratmeter.

$$\rho_{\max} = \frac{1}{f_{\min}} = \frac{1}{0,1m^2} = 10,0 \frac{1}{m^2}$$

Formel 5 Maximale durchschnittliche Dichte nach Predtecenskij und Milinskij

Weidmann (1993, S. 14-16) beschreibt den Platzbedarf eines stehenden Menschen als Ellipse. Die Körperbreite und -tiefe sind die beiden Hauptachsen.

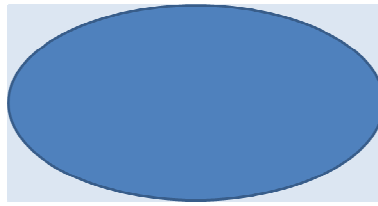


Abbildung 2 Auf die Ebene projizierte Fläche einer Person

So berechnet sich ein minimaler Platzbedarf für Personen ohne Kleidung und ohne Gepäck zu $0,085 \text{ m}^2$ bzw. einer maximalen Dichte von $\rho_{\max} = 11,76 \text{ P/m}^2$. Berechnet man die Grundfläche (zur Berücksichtigung der nicht ausfüllbaren Zwischenräume) als Rechtecke, so ist der minimale Platzbedarf $A = 0,11 \text{ m}^2$ und damit die maximale Dichte $\rho_{\max} = 9,1 \text{ P/m}^2$.

Da diese Berechnungen von Menschen ohne Kleidung und ohne Gepäck ausgehen, sind diese Dichten für die Bemessung laut Weidmann zu hoch angesetzt. Er schreibt weiter, dass der Grenzwert von $6,6 \text{ P/m}^2$ nicht überschritten werden kann.

2.1.2 Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit v eines Körpers ist grundsätzlich der zurückgelegte Weg Δx im Verhältnis zur dazu benötigten Zeit Δt .

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Formel 6 Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit von Fußgängern wird im zweidimensionalen Raum betrachtet. Die Positionsänderung einer Person wird demnach über einen Vektor beschrieben. Somit wird auch die Geschwindigkeit als Vektor mit Komponenten in x- und y-Richtung ausgedrückt.

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}$$

Formel 7 Geschwindigkeit als Vektor in 2D

Die Gehgeschwindigkeit der Person ist der Betrag dieses Vektors.

$$v = |\vec{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{\Delta t}\right)^2} = \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}{\Delta t}$$

Formel 8 Betrag der Gehgeschwindigkeit

Die Geschwindigkeit von Fußgängern ist von vielen Einflüssen abhängig. Weidmann (1993, S. 43-53) schreibt, dass die Geschwindigkeit bestimmt wird durch die Eigenschaften der Fußgänger (z.B. Alter, Geschlecht, Größe, Gesundheitszustand, Stimmungslage), den Begleitumständen der Bewegung (z.B. Verkehrszweck, Jahreszeit, Weglänge), den Charakteristika der Anlage (z.B. Steigung bei Rampen und Treppen, Attraktivität der

Umgebung) und der Dichte. Laut Weidmann ist die freie durchschnittliche Gehgeschwindigkeit in der Ebene mit 1,34 m/s (4,83 km/h) anzusetzen. Beim Gehen auf Treppen unterscheidet er Aufwärts- und Abwärtsgehen und trennt die Geschwindigkeit in eine horizontale und eine vertikale Richtung auf.

	Geschwindigkeit horizontal	Geschwindigkeit vertikal
Gehen in der Ebene	$v_h = 1,340 \text{ m/s}$	-
Aufwärtsgehen	$v_h = 0,610 \text{ m/s}$	$v_v = 0,305 \text{ m/s}$
Abwärtsgehen	$v_h = 0,694 \text{ m/s}$	$v_v = 0,347 \text{ m/s}$
Durchschnittliche Geschwindigkeit auf Treppen	$v_h = 0,652 \text{ m/s}$	$v_v = 0,326 \text{ m/s}$

Tabelle 2 Durchschnittliche Geschwindigkeiten in der Ebene und auf Treppen nach Weidmann

2.1.3 Fluss

Der Fluss J beschreibt die Personenanzahl N , die in einer bestimmten Zeit t eine Messstelle überschreitet.

Um den Fluss von Personenströmen zu bestimmen, werden an einer Messstelle die Zeitpunkte erfasst, an denen eine Person die Messlinie überschreitet. Trägt man die Personenanzahl N in Abhängigkeit zur Zeit t in ein Diagramm ein, entsteht ein sogenanntes $N(t)$ -Diagramm.

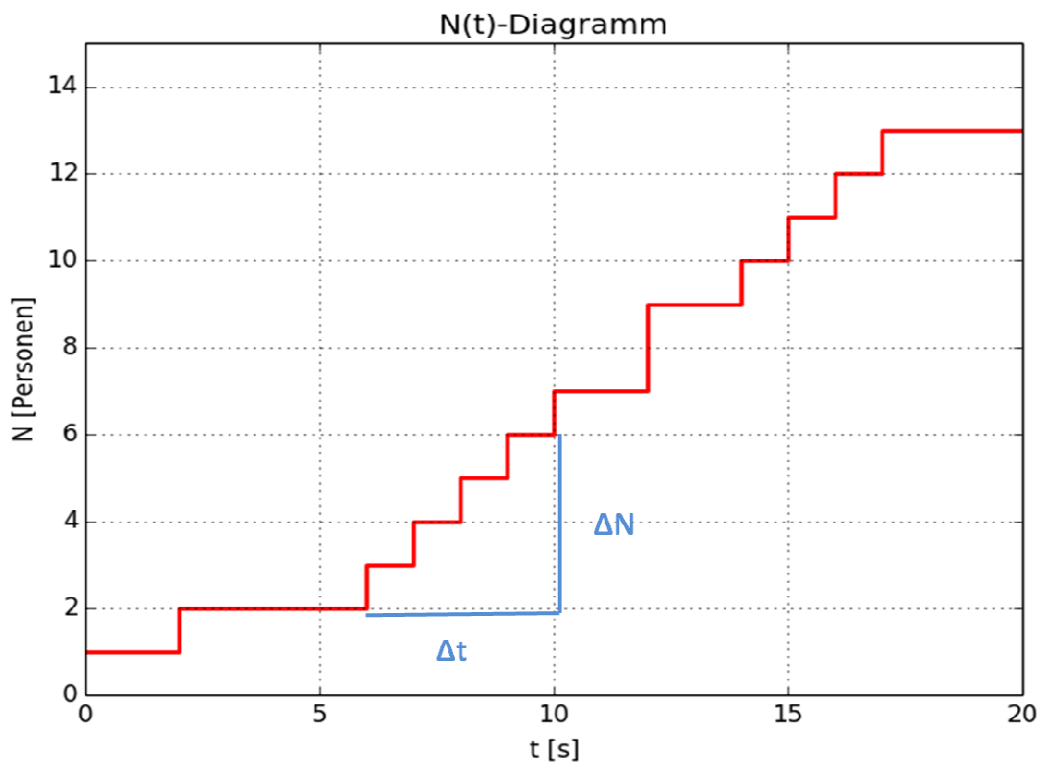


Abbildung 3 N(t)-Diagramm

Der Fluss J ist die Ableitung der $N(t)$ -Kurve. Dazu wird der Quotient aus der Summe der Personen ΔN , die die Messlinie in einem bestimmten Zeitintervall Δt überschreiten, und dem Zeitintervall gebildet.

$$J = \frac{\Delta N}{\Delta t} \left[\frac{\text{Personen}}{\text{Zeiteinheit}} \right]$$

Formel 9 Gleichung für den Fluss von Verkehrsströmen

Um vergleichbare Werte zu erhalten, teilt man den Fluss J durch die Breite des betrachteten Weges b . Der so genannte spezifische Fluss J_s gibt den Fluss pro Einheitsbreite an.

$$J_s = \frac{J}{b} \left[\frac{\text{Personen}}{\text{m} \cdot \text{Zeiteinheit}} \right]$$

Formel 10 Spezifischer Fluss

Der Fluss lässt sich auch in Analogie zum Fluss einer Flüssigkeit berechnen. Dazu wird das Produkt aus der mittleren Dichte ρ , der mittleren Geschwindigkeit v und der Breite des Weges b gebildet.

$$J = \rho \cdot v \cdot b \left[\frac{1}{s} \right]$$

Formel 11 Flussgleichung in Analogie zum Fluss einer Flüssigkeit

Somit ist der spezifische Fluss J_s das Produkt aus der mittleren Geschwindigkeit v und der mittleren Dichte ρ .

$$J_s = \rho \cdot v \left[\frac{1}{\text{m} \cdot \text{s}} \right]$$

Formel 12 Spezifischer Fluss in Abhängigkeit von Dichte und Geschwindigkeit

Das Fundamentaldiagramm zeigt diesen Zusammenhang zwischen Dichte, Geschwindigkeit und Fluss. Der maximale Fluss wird als Kapazität C bezeichnet und tritt bei der Dichte ρ_c auf. Bei der Dichte ρ_0 kommt der Fluss zum Erliegen (Stau).

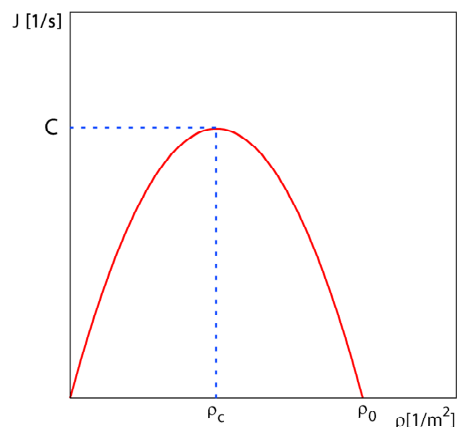


Abbildung 4 Fundamentaldiagramm $J(\rho)$, Quelle: (Friedrich & Seyfried, 2010)

Die folgenden drei Diagramme $v(\rho)$, $v(J_s)$ und $J(\rho)$ verdeutlichen die Zusammenhänge von Dichte, Geschwindigkeit und Fluss.

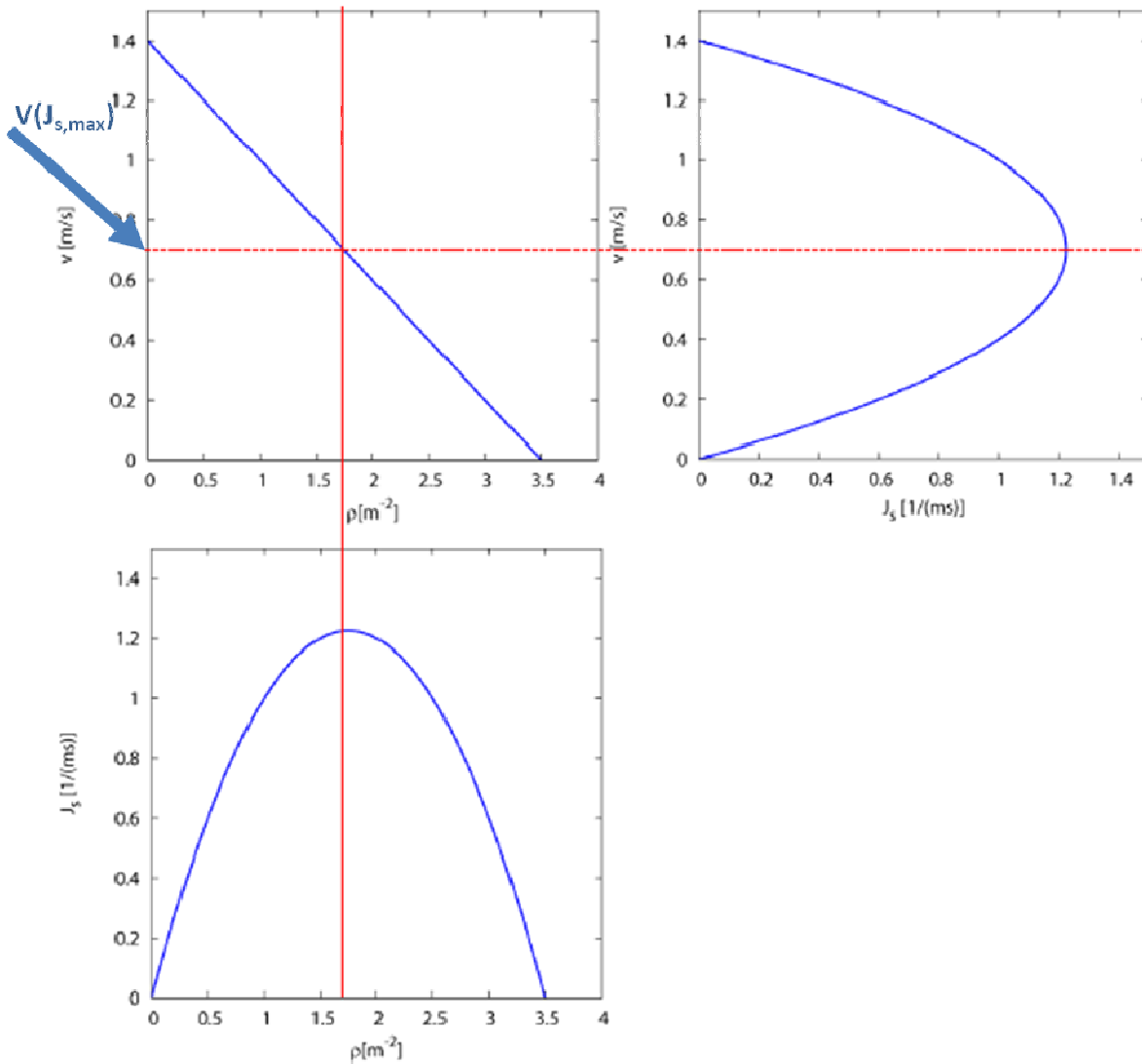


Abbildung 5 Flussdiagramm $v(\rho)$, $v(J_s)$ und $J(\rho)$, Quelle: (Friedrich & Seyfried, 2010)

Fundamentaldiagramme sind Grundlage für Handrechenverfahren zur Berechnung von Reise- und Evakuierungszeiten und dienen der Kapazitätsanalyse. In der Literatur finden sich unterschiedliche Fundamentaldiagramme für verschiedene Anlagentypen (ebene Wege, Rampen, Treppen etc.) Die Abbildungen auf den Seiten 47 und 48 zeigen Fundamentaldiagramme für Ebenen und Treppen.

3 Fahrtreppen - Grundlagen und Begriffe

3.1 Definition

Umgangssprachlich werden Fahrtreppen auch Rolltreppen genannt.

Die Fahrtreppe wird in der DIN EN 115-1 wie folgt definiert:

„Fahrtreppe

kraftbetätigte, geneigte, sich kontinuierlich bewegende Treppe zum Heben und Senken von Personen, bei der die den Nutzer aufnehmende Fläche (z.B. Stufe) horizontal verbleibt
ANMERKUNG Fahrtreppen sind Maschinen – auch wenn sie nicht in Betrieb sind – und können nicht als fest eingebaute Treppen angesehen werden.“ (Deutsches Institut für Normierung e.V., 2010-06, S. 9)

(Aus der Anmerkung geht hervor, dass Fahrtreppen zwar als Treppen genutzt werden können, aber nicht als Fluchtweg angerechnet werden dürfen.)

Sie grenzen sich von den Fahrsteigen (umgangssprachlich auch Rollsteig, Laufband, bewegter oder rollender Bürgersteig) durch die horizontale Standfläche ab. Die Standfläche von Fahrsteigen verbleibt parallel zu ihrer Bewegungsrichtung und ist nicht unterbrochen. Fahrsteige werden in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

3.2 Bauteile der Fahrtreppe

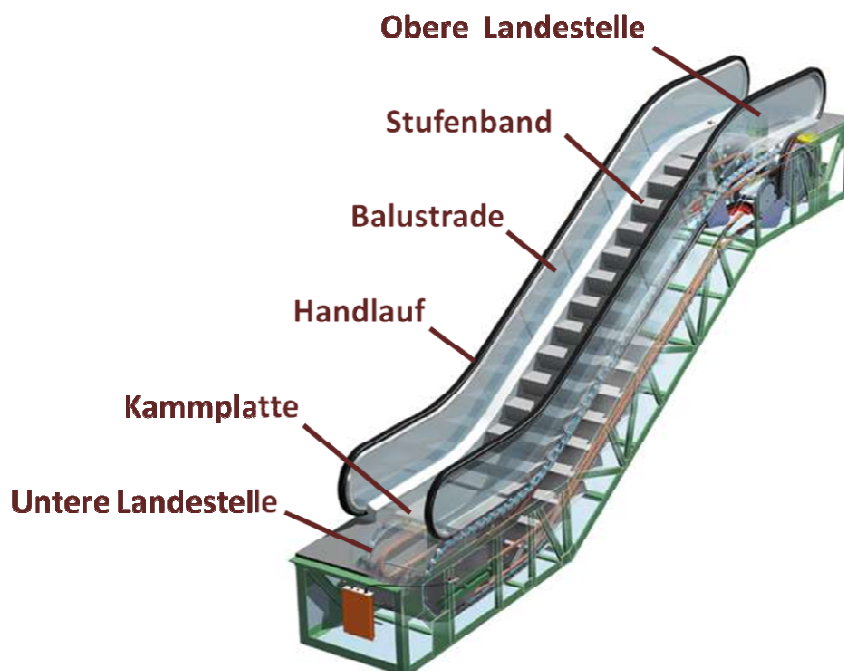


Abbildung 6 Bauteile einer Fahrtreppe, Quelle: (http://www.schramms.de/uploads/pics/mech_schi_01.jpg, aufgerufen am 12.03.2015, Beschriftung von der Autorin)

Die Landstellen sind die horizontalen Ebenen am Anfang sowie am Ende von Fahrtreppen. Am Übergang zum Stufenband befindet sich die Kammplatte mit Kammsegmenten. Ihr folgt der horizontale Stufenlauf (2 - 4 Stufen). Dieser ist Teil des Stufenbandes, welches sich im Anschluss durch die Bewegung des Bandes zu den einzelnen Stufen ausbildet. Seitlich begrenzt die Balustrade die Fahrttreppe. Heutzutage wird diese meistens aus Glas oder Metall gefertigt. Auf der Balustrade läuft der Handlauf im Idealfall mit der gleichen Geschwindigkeit wie das Stufenband. Seine Geschwindigkeit darf maximal 2 % größer sein als die aktuelle Geschwindigkeit des Stufenbandes.(DIN EN 115-1, 2010-06, S. 32) Der Handlauf dient den Fahrgästen als Stütze.

3.3 Funktionsweise und Einsatzgebiete

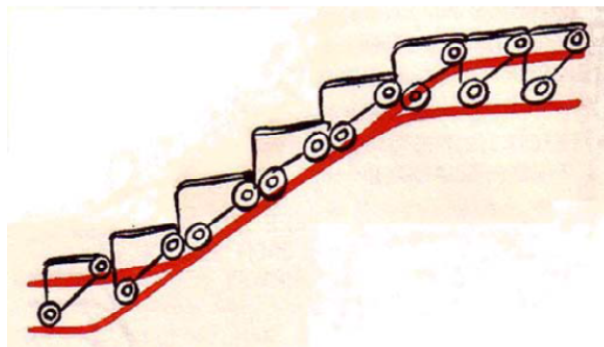


Abbildung 7 Stufenband, Illustration aus einem amerikanischen Kinderbuch,1984 Quelle:(Mihm, 2005, S. 32)

Abbildung 7 zeigt in einer vereinfachten Darstellung die Funktionsweise einer Fahrttreppe. Die einzelnen Stufenelemente des Stufenbandes laufen auf zwei Schienen. Durch den Abstand der Schienen werden die Elemente gedreht und bilden horizontale Flächen am Anfang und am Ende einer Fahrttreppe.

Abbildung 8 zeigt und benennt weitere Bauteile einer Fahrttreppe.

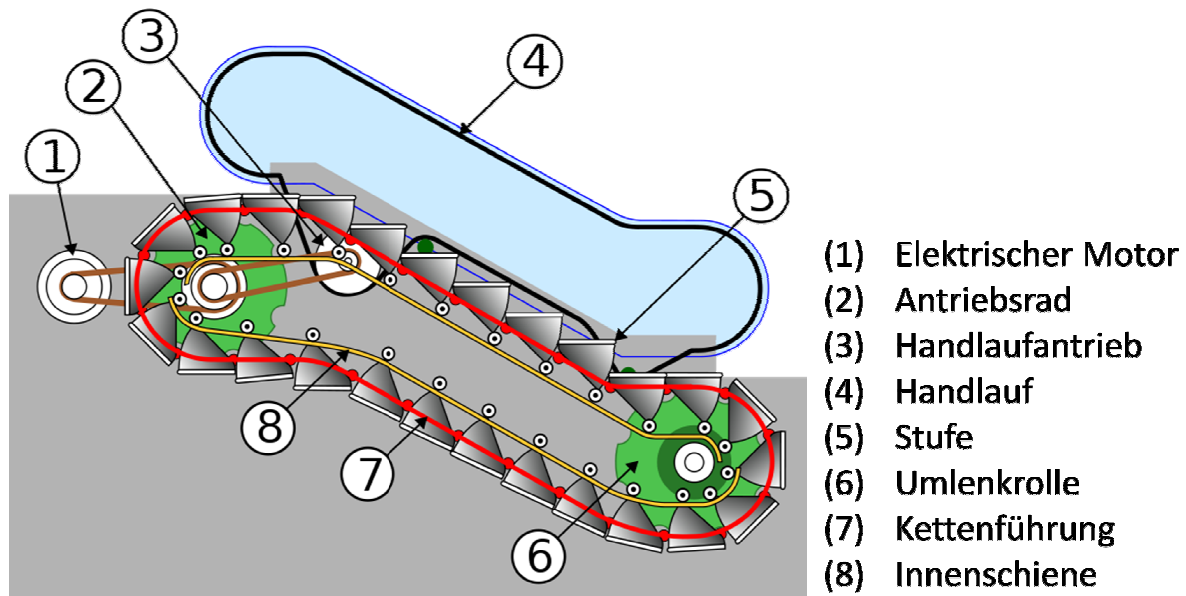


Abbildung 8 Schema einer Fahrtreppe, Quelle: (www.newworldencyclopedia.org aufgerufen am 12.3.2015, Beschriftung von der Autorin)

Fahrtreppen finden ihre Anwendung in mehrstöckigen Gebäuden mit hohem Personenaufkommen. Zu den Anwendungsgebieten zählen Kaufhäuser, Gebäude des Nah- und Fernverkehrs (U-Bahn-Stationen, Bahnhöfe) und Flughäfen, seltener auch weitere öffentliche Gebäude wie z.B. Kinos, Theater, Museen.

3.4 Geschichte der Fahrtreppe (Mihm, 2005)

Die ersten Fahrtreppen wurden im 19. Jahrhundert gebaut. Anfang des 20. Jahrhunderts schritt die Entwicklung dieser neuen Erfindung rasant voran.

Am 9. August 1859 meldete Nathan Ames das Patent für seine Erfindung der „Revolving Stairs“ (Übersetzung: „umlaufende Stufen“) an. Seine Erfindung wurde aber nie realisiert.

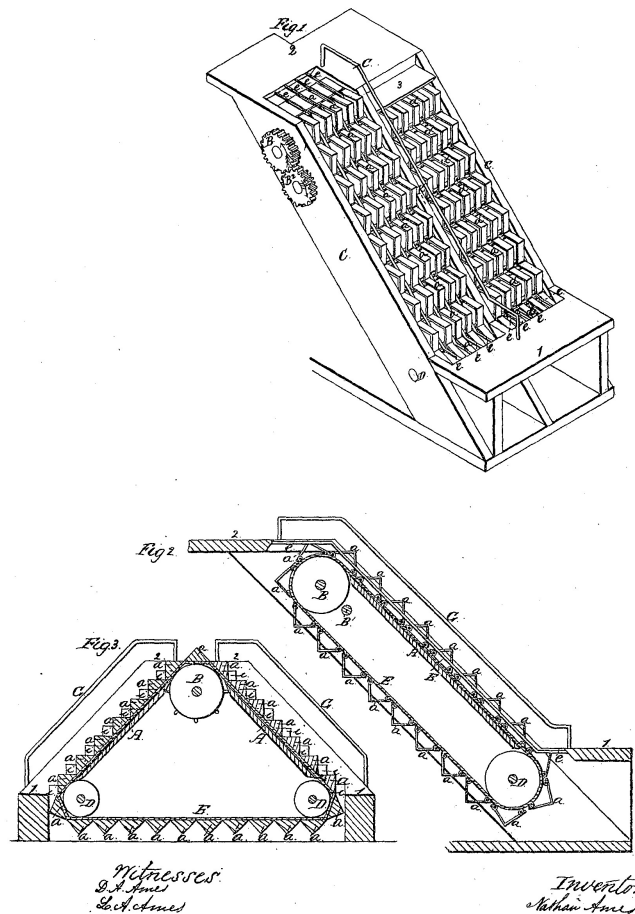


Abbildung 9 Revolving Stairs von Nathan Ames, Quelle: (www.wikimedia.de aufgerufen am 22.03.2015)

Die 1892 patentierte Idee „Endless Conveyer or Elevator“ von Jesse Wilford Reno wurde 1895 auf Coney Island in einem Freizeitpark installiert. Diese Erfindung ist mit den heutigen Fahrsteigen vergleichbar. Reno gab in seiner Patentschrift eine theoretische maximale Kapazität von 6000 P/h an. Die tatsächliche Kapazität lag bei 4000 P/h. Im Folgejahr wurde die bewegte Treppe demontiert und in New York an der Brooklyn Bridge aufgebaut. Dort diente sie dem öffentlichen Verkehr als Alternative zur festen Treppe. Damit war der Grundstein der bewegten Treppe als Massentransportmittel gelegt. Es folgten Installationen in Kaufhäusern und Ausstellungen.

Im gleichen Jahr wie Reno ließ sich George A. Wheeler sein Modell eines „new and useful Elevator“ patentieren. Diese Erfindung ist der von Ames ähnlich, da sie im Gegensatz zu Renos geneigtem Laufband bewegte Stufen hat. 1898 verkaufte Wheeler sein Patent an Charles D. Seeberger. Seeberger prägte den Warennamen „Escalator“ (Übersetzt: „Rolltreppe / Fahrtreppe“) 1899 schloss er ein Fertigungsabkommen mit der Aufzugsfirma Otis ab. Diese baute den ersten „neuezeitlichen“ Prototypen der Stufen-Rolltreppe.

1900 wurden auf der Pariser Weltausstellung sämtliche bis dahin entwickelten Fahrtreppen und Laufbänder zur Schau gestellt. Dadurch gelang der Fahrtreppe der wirtschaftliche Durchbruch. Zur selben Zeit entstanden die ersten Kaufhäuser. Diese mehrstöckigen Gebäude wurden oft mit Fahrtreppen ausgestattet. Die erste Fahrtreppe in Deutschland wurde 1925 im Kaufhaus „Tietz“ in Köln eröffnet.

(Mihm, 2005, S. 74-86)

3.5 Parameter

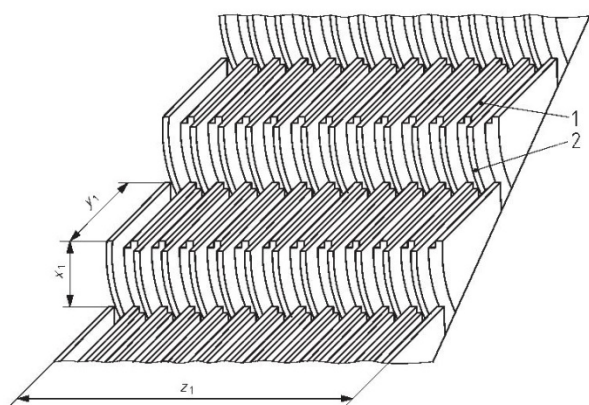
Fahrtreppen unterscheiden sich durch folgende Parameter:

3.5.1 Nenngeschwindigkeit

Die Nenngeschwindigkeit wird in der DIN EN 115-1 (2010-06, S. 10) definiert als „Geschwindigkeit in Richtung der sich bewegenden Stufen, Paletten oder des sich bewegenden Gurts unter lastfreien Bedingungen (d.h. ohne Personen), für die die Fahrtreppe oder der Fahrsteig vom Hersteller ausgelegt wurde.“

Gängige Nenngeschwindigkeiten in Deutschland sind 0,5 m/s, 0,65 m/s und 0,75 m/s.

3.5.2 Stufenmaße



Legende

- 1 Trittstufe
- 2 Setzstufe

Hauptmaße

- Stufenhöhe $x_1 \leq 0,24$ m
- Stufentiefe $y_1 \geq 0,38$ m
- Stufenbreite $0,58 \text{ m} \leq z_1 \leq 1,10$ m

Abbildung 10 Stufen, Hauptmaße, Quelle: (DIN EN 115-1, 2010-06, S. 41)

In Deutschland sind gewöhnliche Nennbreiten von Fahrtreppen 0,60 m, 0,80 m und 1,00 m. Diese Breiten entsprechen einer maximalen Stufenbelegung von 1 Person/Stufe, 1,5 Personen/Stufe und 2 Personen/Stufe.

Der horizontale Stufenlauf an den Zu- und Abgängen der Fahrtreppe muss mindestens 0,8 m betragen. Bei Nenngeschwindigkeiten zwischen 0,5 m/s und 0,65 m/s oder bei Förderhöhen über 6 m muss dieser mindestens 1,20 m betragen. Bei größeren Geschwindigkeiten muss der horizontale Stufenlauf mindestens 1,60 m betragen. (Deutsches Institut für Normierung e.V., 2010-06, S. 33)

3.5.3 Neigungswinkel

Der Neigungswinkel α darf laut DIN E 115-1 12° nicht unterschreiten. Bei Förderhöhen ≤ 6 m und Nenngeschwindigkeiten bis maximal 0,5 m/s darf der Neigungswinkel maximal 35° betragen. Bei größeren Förderhöhen und Nenngeschwindigkeiten darf er 30° nicht überschreiten.

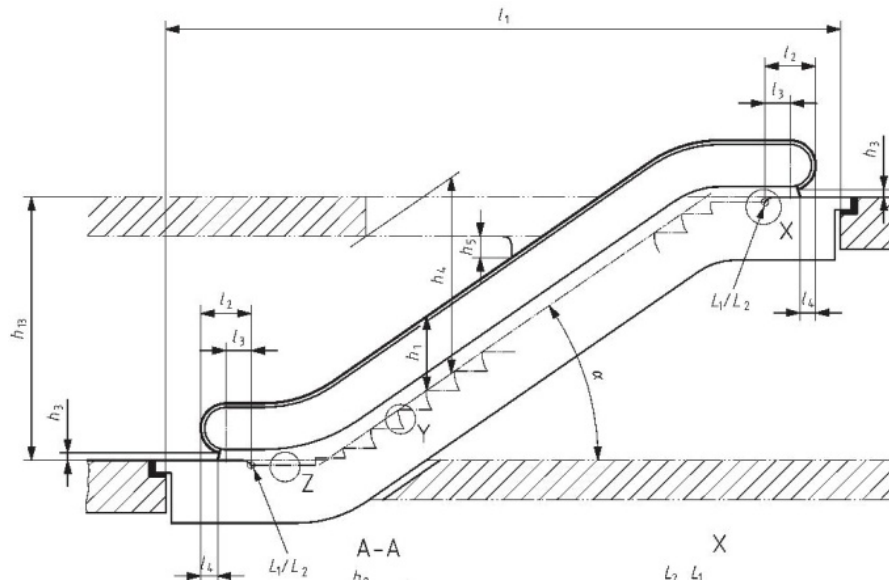


Abbildung 11 Neigungswinkel α , Quelle: (DIN EN 115-1, 2010-06)

4 Normen und Richtlinien für die Planung von Fahrtreppen

4.1 Theoretische Kapazität

Die theoretische Kapazität C von Fahrtreppen berechnet sich aus Nenngeschwindigkeit v, maximaler Stufenbelegung n (abhängig von der Breite b der Stufen) und Stufentiefe a.

$$C_{theoretisch} = \frac{n \cdot v}{a} \left[\frac{\text{Personen}}{\text{Zeiteinheit}} \right]$$

$$C_{theoretisch} = \frac{0,5 \frac{m}{s} \cdot 2 \frac{\text{Personen}}{\text{Stufe}}}{0,4 \frac{m}{\text{Stufe}}} \cdot 60 \frac{s}{\text{min}} = 150 \frac{\text{Personen}}{\text{min}} = 9000 \frac{\text{Personen}}{h}$$

Formel 13 Theoretische Kapazität mit Beispiel für v=0,5 m/s, a=0,4 m und b=1,0 m

4.2 Normen und Richtlinien

4.2.1 DIN EN 115-1 „Sicherheit von Fahrtreppen und Fahrsteigen - Teil 1: Konstruktion und Einbau“ (2010-06)

Auf Seite 10 der DIN EN 115-1 (2010-06) wird der Begriff der maximalen Förderleistung definiert als „höchster Durchsatz an Personen, der unter Betriebsbedingungen erreicht werden kann“.

Stufen-/Palettenbreite z_1 m	Nenngeschwindigkeit v m/s		
	0,50	0,65	0,75
0,60	3 600 Personen/h	4 400 Personen/h	4 900 Personen/h
0,80	4 800 Personen/h	5 900 Personen/h	6 600 Personen/h
1,00	6 000 Personen/h	7 300 Personen/h	8 200 Personen/h

ANMERKUNG 1 Die Benutzung von Einkaufs- und Gepäckwagen (siehe Anhang I) verringert die Förderleistung um etwa 80 %.

ANMERKUNG 2 Bei Fahrsteigen mit einer Palettenbreite von mehr als 1,00 m erhöht sich die Förderleistung nicht, da der Benutzer sich am Handlauf festhalten muss; die zusätzliche Breite dient dazu, den Einsatz von Einkaufs- und Gepäckwagen grundsätzlich zu ermöglichen.

Tabelle 3 Maximale Förderleistung von Fahrtreppen und Fahrsteigen laut DIN EN 115-1:2010-06

Bei einer Fahrtreppe mit 1,00 m Stufenbreite und einer Geschwindigkeit von 0,50 m/s geht die Norm von einer maximalen Förderleistung in Höhe von 6000 Personen/h aus. Das entspricht 100 Personen/min. Es werden keine Angaben zur „permanenten“ Förderleistung gemacht. Diese Tabelle dient der Information, ist aber nicht normativ.

4.2.2 BS 5656-2:2004 „Escalator and moving walks -Safety rules for the construction and installation of escalators and moving walks, Part 2” (2004-11)

Als Planungswerte für die Bemessung von Fahrtreppen gibt die Britische Norm (British Standard) 50 % der theoretischen Förderleistung an.

Geschwindigkeit m/s	Praktische Förderleistung		
	Stufenbreite 1000 mm Personen/h	Stufenbreite 800 mm Personen/h	Stufenbreite 600 mm Personen/h
0,50	4500	3375	2250
0,65	5850	4388	2925
0,75	6750	5063	3375

Tabelle 4 Planungswerte für die Bemessung von Fahrtreppen, Quelle: (British Standard, 2004-11)

4.2.3 Richtlinie der Deutschenbahn (DB RIL 813.0202A01, 05-2012)

Die Richtlinien der Deutschen Bahn berechnen die Förderleistungen Q über folgende Formel:

$$Q_{Fahrtreppe} = \frac{n \times \eta \times v}{a}$$

Formel 14 Leistungsfähigkeit von Fahrtreppen (DB RIL 813.0202A01, 05-2012)

Es bedeuten:

$Q_{Fahrtreppe}$	[Personen/s]	Leistungsfähigkeit der Fahrtreppe
n	[Personen]	Theoretische Personenzahl bezogen auf den Querschnitt der Fahrtreppe bei 1,00 m Stufenbreite ist n = 2,0 bei 0,80 m Stufenbreite ist n = 1,5 anzusetzen
η	[-]	Umrechnungsfaktor zur Berücksichtigung realistischer Stufenbesetzung $\eta = 0,5$ für Nahverkehr und Veranstaltungsverkehr $\eta = 0,25$ für Fernverkehr bei gemischter Nutzung (Nah- und Fernverkehr) kann anteilig gerechnet werden
v	[m/s]	Betriebsgeschwindigkeit der Fahrtreppe = 0,5 m/s
a	[m]	Stufentiefe = 0,40 m

Daraus ergeben sich folgende Leistungsfähigkeiten:

für Nah- und Veranstaltungsverkehr ($\eta = 0,5$, Stufenbreite = 1,00 m)

$$Q_{Fahrtreppe} = \frac{2,0 \times 0,5 \times 0,5}{0,40} = 1,25 \text{ Personen/s}$$

$$= 75,00 \text{ Personen}/_{\text{min}} = 4500 \text{ Personen}/_h$$

für Fernverkehr ($\eta = 0,25$, Stufenbreite = 1,00 m)

$$Q_{\text{Fahrtrepp}} = \frac{2,0 \times 0,5 \times 0,25}{0,40}$$

$$= 0,63 \text{ Personen}/_s$$

$$= 37,50 \text{ Personen}/_{\text{min}} = 2250 \text{ Personen}/_h$$

4.2.4 Handbuch zur Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS, 2009)

Das Handbuch gibt nur spezifische Kapazitäten für ebene Anlagen und feste Treppen. Es macht keine Angaben zur Kapazität von Fahrtreppen.

Eingangsgröße	spezifische Kapazität [Pers/(m · s)]
Gehwege, Korridoren und Rampen bei Verkehrszwecktyp	
– durchschnittliche Mischung	1,22
– Pendlerverkehr	1,36
– Einkaufsverkehr	1,06
– Freizeitverkehr	1,01
Treppen	
– aufwärts	0,80
– abwärts	0,85

Tabelle 5 Kapazitäten linienhafter Fußgängerverkehrsanlagen (HBS, 2009, S. 11-14)

4.3 Empfehlungen der Hersteller

4.3.1 Schindler (2014)

Schindler unterteilt die mögliche Förderleistung in die drei Qualitätsstufen:

- locker
- mittel
- gedrängt

Stufenbreite	Theoretische Beförderungskapazität		Praktische Beförderungskapazität bei einer Nenngeschwindigkeit von		
	$v = 0,5 \text{ m/s}$	$v = 0,5 \text{ m/s}$	$v = 0,5 \text{ m/s}$	$v = 0,5 \text{ m/s}$	$v = 0,65 \text{ m/s}$
		locker	mittel	dicht gedrängt	dicht gedrängt
600 mm	4500 Pers./h	1800 Pers./h	2700 Pers./h	3600 Pers./h	4400 Pers./h
800 mm	6750 Pers./h	2400 Pers./h	3600 Pers./h	4800 Pers./h	5900 Pers./h
1000 mm	9000 Pers./h	3000 Pers./h	4500 Pers./h	6000 Pers./h	7300 Pers./h

Tabelle gemäß EN 115-1 (andere nationale Vorschriften können erfüllt werden)

Tabelle 6 Beförderungskapazitäten laut Schindler

Diese Bemessungsförderleistungen entsprechen 33 % bis 80 % der theoretischen Förderleistung.

Die Werte für „dicht gedrängt“ entsprechen den Vorgaben der DIN.

4.3.2 OTIS (2014)

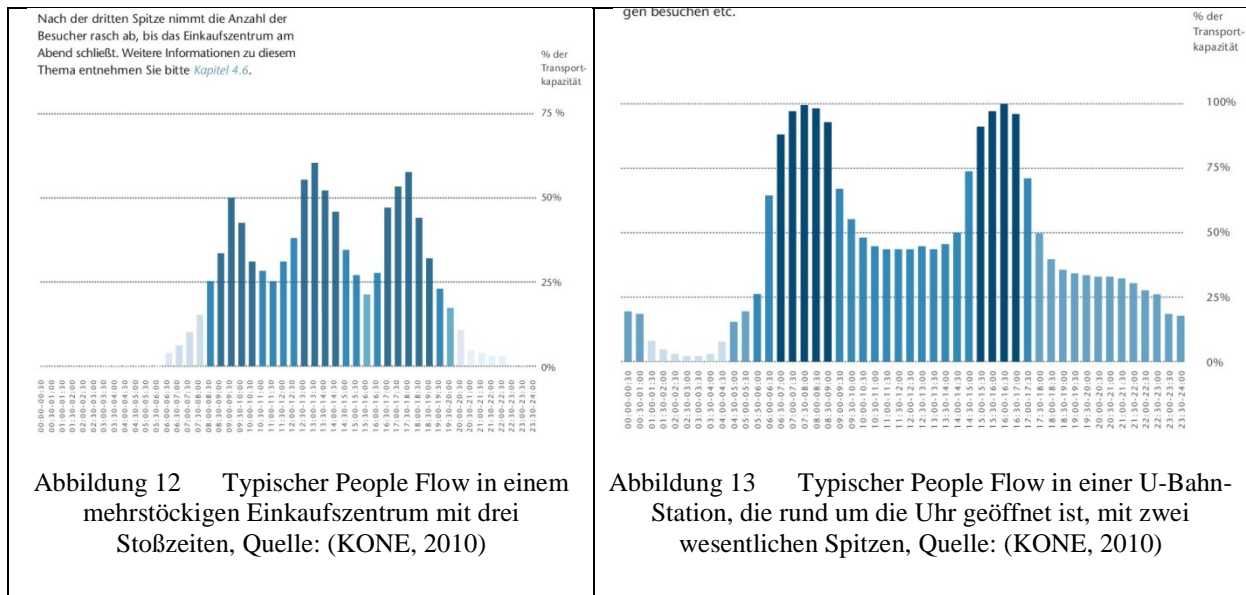
Das Planungshandbuch von OTIS geht von der theoretischen Förderleistung aus und gibt Faktoren für die tatsächliche Förderleistung an.

	Stufenbreite							
	1,00 m				0,80 m			
	Geschwindigkeit [m/s]				Geschwindigkeit [m/s]			
	0,50	0,65	0,75	0,90	0,50	0,65	0,75	0,90
Theoretische Förderleistung [Personen/h] ([Personen/min])	9000 (150)	11700 (195)	13500 (225)	16200 (270)	6750 (113)	8775 (146)	10125 (169)	12150 (203)
Faktor	0,70	0,65	0,60	0,45	0,70	0,65	0,60	0,45
Tatsächliche Förderleistung [Personen/h] ([Personen/min])	6300 (105)	7605 (127)	8100 (135)	7290 (122)	4725 (79)	5704 (95)	6075 (101)	5468 (91)

Tabelle 7 Theoretische und tatsächliche Förderleistungen einer Fahrtreppe laut OTIS

4.3.3 KONE (2010)

KONE orientiert sich an der DIN EN 115-1. merkt aber im Katalog an, dass es über den Tag verteilt unterschiedliche Auslastungen gibt. Zwei Diagramme zeigen die typische Personenbelastung über 24 Stunden im Einkaufszentrum bzw. an einer U-Bahn-Station. Im ersten Fall (Einkaufszentrum) geht KONE davon aus, dass es drei Peaks gibt, die zwischen 50 % und ca. 65 % der Transportkapazität ausnutzen. Im zweiten Fall wird der zeitliche Verlauf des Verkehrsaufkommens an einer U-Bahn-Station vorgestellt. Die morgendliche sowie die abendliche Spitze nutzen zu 100 % die Transportkapazität aus.



4.3.4 ThyssenKrupp (2014)

Der Fahrtreppenhersteller ThyssenKrupp Elevator verweist an die DIN EN 115-1 und übernimmt die Förderleistungen, „...die auch in der Praxis gut erreicht werden können“.(ThyssenKrupp Elevator, 2014)

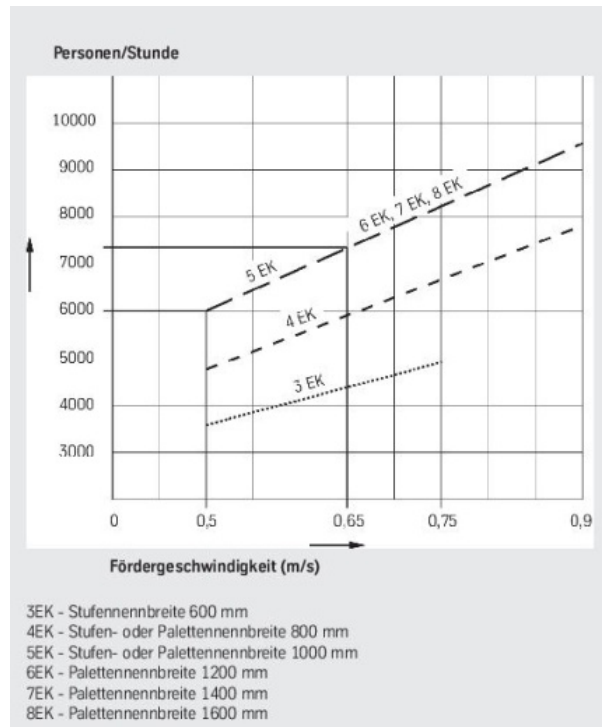


Abbildung 14 Förderleistungen von Fahrtreppen, Quelle: (ThyssenKrupp Elevator, 2014, S. 6)

4.4 Weitere Veröffentlichungen

4.4.1 Westphal (1971)

Westphals zusammengefasste Literaturangaben geben für die Leistungsfähigkeit von Fahrtreppen (Nennbreite 1,00 m und Geschwindigkeit 0,5 m/s) Werte zwischen 3.600 P/h (Oeding und Kratky) und 16.000 P/h (Schmelzer, Capelle, Herker und Plag für beidseitig gehende Fahrgäste) an.

Eigenen Messungen zufolge gibt Westphal eine anzusetzende durchschnittliche Leistungsfähigkeit in Höhe von 100 P/min (6000 P/h) an, welche nur bei ständigem Stau vor der Fahrtreppe erreicht wird. Die maximale durchschnittliche Leistungsfähigkeit liege bei 70 % der theoretischen Leistungsfähigkeit. ($150 \text{ P/min} \times 0,7 = 105 \text{ P/min} = 6300 \text{ P/h}$)

Westphal gibt Faktoren zur Berechnung der gleitenden maximalen Leistungsfähigkeit für drei Zeitintervalle (1,00 min, 0,50 min und 0,25 min) an. Bei einer durchschnittlichen Leistungsfähigkeit von 100 P/min ergeben sich seinen Berechnungen zufolge folgende Faktoren:

- $Q_{LRD\ 1,00} = 1,09$
- $Q_{LRD\ 0,50} = 1,16$
- $Q_{LRD\ 0,25} = 1,23$

Dies bedeutet z.B., dass in einem 0,25-min-Intervall die durchschnittliche Leistungsfähigkeit um 23 % gesteigert sein kann.

4.4.2 Weidmann (1993)

Weidmanns Arbeit ist eine Literaturlauswertung. Dies begründet seine schwankenden Angaben.

Zur Berechnung der theoretischen Leistungsfähigkeit gibt Weidmann folgende Formel an:

$$L_R = \frac{F_{St} \cdot v_{R,s}}{a_R}$$

Formel 15 Theoretische Leistungsfähigkeit nach Weidmann

Es bedeuten:

L_R	[Personen/s]	Leistungsfähigkeit der Fahrtreppe
F_{St}	[Personen]	Personen pro Treppenstufe
$v_{R,s}$	[m/s]	Schräggeschwindigkeit der Fahrtreppe
a_R	[m]	Stufentiefe der Fahrtreppe

Bei zwei Personen pro Stufe, einer Geschwindigkeit von 0,5 m/s und der minimal zulässigen Stufentiefe von 0,38 m ergibt sich somit eine theoretische Leistungsfähigkeit von 2,6 P/s (= 158 P/min = 9474 P/h) (Weidmann, 1993)

Durch die Eigenbewegung der Fußgänger erhöht sich die Leistungsfähigkeit der Fahrtreppe. Diese berechnet sich durch:

$$L_R = q_{T,b} \cdot F_{St} \cdot \left(\frac{v_{R,s}}{a_R} + \frac{v_{F,v}}{h_R} \right) + (1 - q_{T,b}) \cdot F_{St} \cdot \frac{v_{R,s}}{a_R}$$

Formel 16 Leistungsfähigkeit inkl. Eigenbewegung der Fußgänger (Weidmann bezieht sich bei dieser Berechnung auf Reimer.)

Es bedeuten:

$q_{T,b}$	[-]	Anteil der Fußgänger, die sich zusätzlich aktiv auf der Fahrtreppe hinauf- oder hinunterbewegen
$v_{F,v}$	[m/s]	Vertikalgeschwindigkeit der Fußgänger auf der Fahrtreppe
h_R	[m]	Höhe der Treppenstufen

Dadurch berechnet sich folgende maximale theoretische Leistungsfähigkeit (100 % Geheranteil):

$$\begin{aligned} L_R &= 1,0 \cdot 2 \cdot \left(\frac{0,5 \text{ m/s}}{0,38 \text{ m}} + \frac{1,5 \cdot 0,24 \text{ m/s}}{0,24 \text{ m}} \right) + (1 - 1) \cdot 2 \text{ P} \cdot \frac{0,5 \text{ m/s}}{0,38 \text{ m}} = 5,6 \text{ P/s} \\ &= 338 \text{ P/min} = 20273 \text{ P/h} \end{aligned}$$

Zur Berechnung der spezifischen theoretischen Leistungsfähigkeit wird die Leistungsfähigkeit ins Verhältnis zur Bruttobreite (bauliche Breite) der Fahrtreppe gesetzt. Folgende theoretische spezifische Leistungsfähigkeiten für 1,00 m breite Fahrtreppen ergeben sich:

- $L_{R,s,stehe\text{nd}} = 1,63 \text{ P/s m} = 98 \text{ P/min m} = 5868 \text{ P/h m}$
- $L_{R,s,gehe\text{nd}} = 3,50 \text{ P/s m} = 210 \text{ P/min m} = 12600 \text{ P/h m}$

Weidmann gibt im weiteren Verlauf seiner Arbeit an, dass diese Werte der theoretischen Leistungsfähigkeit unrealistisch hohe und unerreichbare Fußgängerdichten von rund $5,9 \text{ P/m}^2$ bedeuten würden. Zusätzlich wird die praktische Leistungsfähigkeit durch die Leistungsfähigkeit des Eintrittsquerschnitts sowie die Sicherheit der Personen beim Betreten der Fahrtreppe bestimmt. Der Eintrittsquerschnitt bei doppelspurigen Fahrtreppen (Nennbreite 1,00 m) hat eine Leistungsfähigkeit von maximal $1,75 \text{ P/s}$ ($= 105 \text{ P/min} = 6300 \text{ P/h}$). Dies bedeutet, dass die Leistungsfähigkeit der Fahrtreppe auch nicht durch eine höhere Antriebsgeschwindigkeit gesteigert werden kann. Auch durch die Eigenbewegung kann die Leistungsfähigkeit nicht gesteigert werden, da sich durch das Treppensteigen der Platzbedarf der Personen erhöht und die Fußgängerdichte abnimmt. Bei höheren Geschwindigkeiten zögern die Personen beim Betreten der Fahrtreppe öfter, was die Leistungsfähigkeit des Eintrittsquerschnitts mindert. Der reale Besetzungsgrad der Stufen nähert sich kaum dem theoretischen Wert von 2 Personen pro Stufe. Aufgrund dieser Abhängigkeit des Besetzungsgrades von der Geschwindigkeit ist die Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit von der Geschwindigkeit nicht wie theoretisch angenommen linear. Weidmann gibt als leistungsoptimierte Geschwindigkeit einen Wert von etwa $0,70 \text{ m/s}$ an.

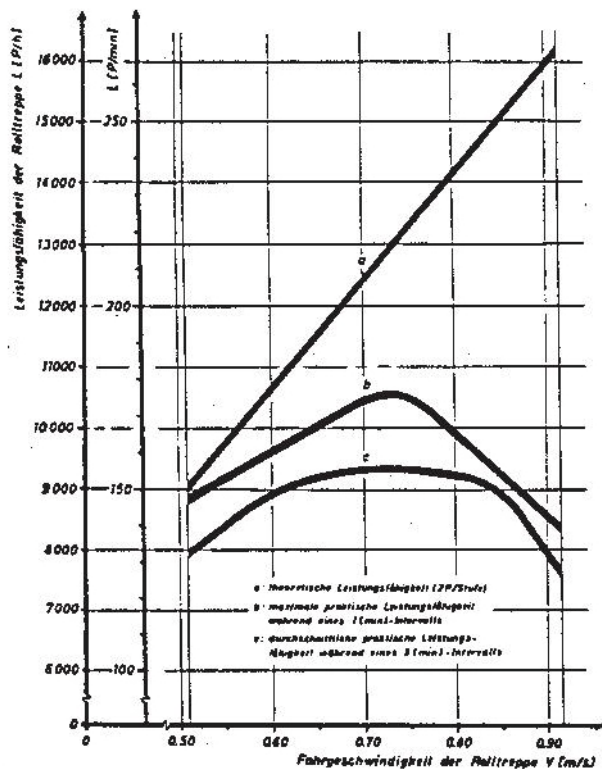


Abbildung 15 Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit von der Fahrgeschwindigkeit bei aufwärts begangenen zweispurigen Fahrtreppen nach Turner. Weidmann gibt an, dass das dargestellte Leistungsniveau allerdings zu groß sei. (Weidmann, 1993, S. 72)

Als maximal erreichbare praktische Durchschnittsleistungsfähigkeit für Fahrtreppen gibt Weidmann $1,75 \text{ P/s}$ an; dieser Wert darf sich bei Stoßbelastung um 23 % erhöhen. Weidmann beruft sich an dieser Stelle auf Westphals Faktoren für die Erhöhung. (Weidmann, 1993)

4.4.3 Oeding (1963)

Oeding untersucht Treppenanlagen, die aus festen Treppen in Verbindung mit Fahrtreppen bestehen. Daher gelten seine Messergebnisse auch nur für solche Anlagen, denn bei hohen Belastungen nutzen verhältnismäßig wenige Personen die Fahrtreppe, um durch die Benutzung der festen Treppe Zeit zu sparen.

Die Vollauslastung einer Fahrtreppe beschreibt Oeding als einen Zustand, „[...] bis zu dem die Verlangsamung im Zustrom und die gegenseitige Behinderung der Passanten noch erträglich und durchaus zumutbar ist“. (Oeding, 1963) Die Leistungsfähigkeit liegt für diesen Zustand bei 60 P/min (3600 P/h). Die praktische Höchstleistung unter Rückstau kann 80 bis 90 P/min (4800 bis 5400 P/h) betragen.

4.4.4 Janßen (1970)

Zusammenfassend gibt Janßen an, dass die Förderleistung abhängig von der verkehrsgünstigen Ausbildung des Fahrtreppenantritts ist. Ob die Fahrgäste während der Fahrt stehen oder gehen, beeinflusst die Förderleistung nicht. Betriebsgeschwindigkeiten über 0,5 m/s ergeben keine höheren Förderleistungen. Er gibt folgende rechnerische Förderleistungen an:

- Breite der Stufen: 0,60 m 4570 P/h
- Breite der Stufen: 0,80 m 6855 P/h
- Breite der Stufen: 1,00 m 9140 P/h

Die Planungswerte entsprechen 75 % dieser rechnerischen Werte:

- Breite der Stufen: 0,60 m 3425 P/h = 57,1 P/min
- Breite der Stufen: 0,80 m 5140 P/h = 85,7 P/min
- Breite der Stufen: 1,00 m 6850 P/h = 114,2 P/min

Desweiteren nennt er zwei Werte für die höchste erreichbare Förderleistung von einzeln angeordneten Fahrtreppen:

- Breite der Stufen 0,65 m 3600 P/h = 60 P/min
- Breite der Stufen 1,00 m 6984 P/h = 116,4 P/min

Für Fahrtreppen mit 1,00 m Breite, die neben festen Treppen angeordnet sind, beträgt die Förderleistung nur 90 P/min (= 5400 P/h). An dieser Stelle beruft sich Janßen auf Oeding.

4.5 Zusammenfassung von Kapitel 4

Diese Arbeit untersucht nur Fahrtreppen mit einer Nennbreite von 1,00 m und einer Nenngeschwindigkeit von 0,5 m/s. Aus diesem Grunde werden an dieser Stelle die angegebenen Förderleistungen in diesem Kapitel für diese Fahrtreppentypen tabellarisch zusammengefasst.

	Förderleistung [Personen/min]	Bemerkung
Theoretische Förderleistung	150	
DIN EN 115-1	100	
BS 5656-2:2004	75	
DB RIL 813	75 / 37,5	Nah- / Fernverkehr
Schindler	50 / 75 / 100	Qualitätsstufe locker / mittel / dichtgedrängt
OTIS	105	
Kone	100	
ThyssenKrupp	100	
Westphal	100	unter ständigem Stau an der Landestelle
Weidmann	105 / 129	durchschnittliche praktische Leistungsfähigkeit / Leistungsfähigkeit für Stoßbelastungen
Oeding	60 / 80-90	„zumutbarer Zustand“ / praktische Höchstleistung unter Rückstau
Janßen	114 / 90	Fahrtreppen / Anlage kombiniert aus Fahrtreppe und fester Treppe

Tabelle 8 Zusammenfassung der praktischen Förderleistungen für Fahrtreppen ($v=0,5\text{m/s}$, $b=1,00\text{m}$) aus den Literaturangaben

Die Angaben der Bemessungsförderleistungen für die in dieser Studie betrachteten Fahrtreppen reichen von 37,5 bis 129 Personen/min.

5 Feldstudien

5.1 Allgemeines / Methode

In den beiden Projektseminaren „Fahrtreppen“ im Wintersemester 2013/14 sowie „Treppen und Fahrtreppen“ im Sommersemester 2014 an der Bergischen Universität Wuppertal wurden unter der Leitung von Stefan Holl diverse Vor-Ort-Messungen an stark frequentierten Fahrtreppen durchgeführt. Diese Messungen wurden durch eigene Messungen im Rahmen dieser Studie ergänzt.

Die Messungen fanden vom 19.November 2013 bis 7.Dezember 2014 in den Städten Berlin, Düsseldorf, Essen, Gelsenkirchen, Köln, Neuss, Oberhausen und Wuppertal statt. Die Dauer der Datenerhebungen schwang stark. Sie reicht von 0:21 bis 20:50 min. Im Durchschnitt betrug sie 3:52 min.

5.2 Dokumentation der Messungen

Bei jeder Messung wurde ein Beobachtungsprotokoll zur Dokumentation angefertigt. Abbildung 16 zeigt ein solches Blanko-Protokoll. Zusätzlich wurden größtenteils Fotos von den Messorten und / oder Videos von den Messungen gemacht.

Beobachtungsprotokoll Fahrtreppen																												
<table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 15%;">Datum</td> <td style="width: 15%;"> . . 2 0 1 4</td> <td style="width: 15%;">Mo - Fr</td> <td style="width: 15%;">()</td> <td style="width: 15%;">Sa - So</td> <td style="width: 15%;">()</td> </tr> <tr> <td>Beginn</td> <td> : </td> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td>Ende</td> <td> : </td> <td colspan="4"></td> </tr> </table>	Datum	. . 2 0 1 4	Mo - Fr	()	Sa - So	()	Beginn	:					Ende	:					<table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 100%;">Protokollanten</td> </tr> <tr> <td>1. _____</td> </tr> <tr> <td>2. _____</td> </tr> <tr> <td>3. _____</td> </tr> </table>	Protokollanten	1. _____	2. _____	3. _____					
Datum	. . 2 0 1 4	Mo - Fr	()	Sa - So	()																							
Beginn	:																											
Ende	:																											
Protokollanten																												
1. _____																												
2. _____																												
3. _____																												
<table style="width: 100%;"> <tr> <th style="background-color: #cccccc;">Adresse der Anlage</th> </tr> <tr> <td>Einrichtung _____</td> </tr> <tr> <td>Straße / Nr _____</td> </tr> <tr> <td>PLZ _____</td> </tr> <tr> <td>Ort _____</td> </tr> </table>		Adresse der Anlage	Einrichtung _____	Straße / Nr _____	PLZ _____	Ort _____																						
Adresse der Anlage																												
Einrichtung _____																												
Straße / Nr _____																												
PLZ _____																												
Ort _____																												
<table style="width: 100%;"> <tr> <th style="background-color: #cccccc;">Wo wird gemessen?</th> <td style="width: 100px;">Einkaufszentrum <input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Flughafen <input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>S-Bahn <input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>U-Bahn <input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Regional- und Fernverkehr <input type="checkbox"/></td> </tr> </table>	Wo wird gemessen?	Einkaufszentrum <input type="checkbox"/>	Flughafen <input type="checkbox"/>	S-Bahn <input type="checkbox"/>	U-Bahn <input type="checkbox"/>	Regional- und Fernverkehr <input type="checkbox"/>	<table style="width: 100%;"> <tr> <th style="background-color: #cccccc;">Angaben zur Fahrtrepe</th> <td style="width: 100px;">Hersteller _____</td> </tr> <tr> <td>Typ _____</td> </tr> <tr> <td>Länge (horizontal) _____</td> <td style="text-align: right;">m</td> </tr> <tr> <td>Höhe (vertikal) _____</td> <td style="text-align: right;">m</td> </tr> <tr> <td>Nenngeschwindigkeit _____</td> <td style="text-align: right;">m/s</td> </tr> <tr> <td>Stufenhöhe x1 _____</td> <td style="text-align: right;">mm</td> </tr> <tr> <td>Stufentiefe y1 _____</td> <td style="text-align: right;">mm</td> </tr> <tr> <td>Nennbreite z1 _____</td> <td style="text-align: right;">mm</td> </tr> <tr> <td>Neigungswinkel α _____</td> <td style="text-align: right;">°</td> </tr> <tr> <td>Länge horizontaler Stufenlauf _____</td> <td style="text-align: right;">St.</td> </tr> <tr> <td>Fahrtrichtung _____</td> <td style="text-align: right;">auf <input type="checkbox"/> ab <input type="checkbox"/></td> </tr> </table>	Angaben zur Fahrtrepe	Hersteller _____	Typ _____	Länge (horizontal) _____	m	Höhe (vertikal) _____	m	Nenngeschwindigkeit _____	m/s	Stufenhöhe x1 _____	mm	Stufentiefe y1 _____	mm	Nennbreite z1 _____	mm	Neigungswinkel α _____	°	Länge horizontaler Stufenlauf _____	St.	Fahrtrichtung _____	auf <input type="checkbox"/> ab <input type="checkbox"/>
Wo wird gemessen?	Einkaufszentrum <input type="checkbox"/>																											
Flughafen <input type="checkbox"/>																												
S-Bahn <input type="checkbox"/>																												
U-Bahn <input type="checkbox"/>																												
Regional- und Fernverkehr <input type="checkbox"/>																												
Angaben zur Fahrtrepe	Hersteller _____																											
Typ _____																												
Länge (horizontal) _____	m																											
Höhe (vertikal) _____	m																											
Nenngeschwindigkeit _____	m/s																											
Stufenhöhe x1 _____	mm																											
Stufentiefe y1 _____	mm																											
Nennbreite z1 _____	mm																											
Neigungswinkel α _____	°																											
Länge horizontaler Stufenlauf _____	St.																											
Fahrtrichtung _____	auf <input type="checkbox"/> ab <input type="checkbox"/>																											
<table style="width: 100%;"> <tr> <th style="background-color: #cccccc;">Walk-Stand-Ratio</th> </tr> <tr> <td>gehend <input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>stehend <input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>beides <input type="checkbox"/></td> </tr> </table>		Walk-Stand-Ratio	gehend <input type="checkbox"/>	stehend <input type="checkbox"/>	beides <input type="checkbox"/>																							
Walk-Stand-Ratio																												
gehend <input type="checkbox"/>																												
stehend <input type="checkbox"/>																												
beides <input type="checkbox"/>																												
<table style="width: 100%;"> <tr> <th style="background-color: #cccccc;">TimeStamper-Datei</th> <td style="width: 200px;">_____</td> </tr> </table>		TimeStamper-Datei	_____																									
TimeStamper-Datei	_____																											
<table style="width: 100%;"> <tr> <th style="background-color: #cccccc;">Dokumentation</th> </tr> <tr> <td>Fotos <input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Videos <input type="checkbox"/></td> </tr> </table>		Dokumentation	Fotos <input type="checkbox"/>	Videos <input type="checkbox"/>																								
Dokumentation																												
Fotos <input type="checkbox"/>																												
Videos <input type="checkbox"/>																												
<table style="width: 100%;"> <tr> <th style="background-color: #cccccc;">Kommentare / Besonderheiten</th> </tr> <tr> <td style="height: 100px;">_____</td> </tr> </table>		Kommentare / Besonderheiten	_____																									
Kommentare / Besonderheiten																												

Abbildung 16 Beobachtungsprotokoll für Fahrtreppen

Die Messungen können auf diese Weise in folgende Kategorien unterteilt werden:

- Datum
 - Werktag
 - Wochenende
- Uhrzeit
 - vormittags
 - nachmittags
- Nutzung
 - Einkaufszentrum
 - Bahngleis Zu- und Abgang
 - Nahverkehr
 - Regional- und Fernverkehr
 - Flughafen
 - Kultur
- Nenngeschwindigkeit
 - 0,5 m/s
 - 0,65 m/s

- 0,75 m/s
- Nennbreite
 - 0,60 m
 - 0,80 m
 - 1,00 m
- Stufentiefe
- Stufenhöhe
- Höhe / Länge / Neigungswinkel
- Länge horizontaler Stufenlauf
- Fahrtrichtung
 - aufwärts
 - abwärts
- Walk-Stand-Ratio
 - gehend
 - stehend
 - beides

Die Daten aus den Beobachtungsprotokollen werden in eine Excel-Tabelle übertragen; jede Messreihe erhält eine Identifikationsnummer (ID).

Die Rohdaten zu diesen Messungen sind txt-Dateien, die mit Hilfe des TimeStampers erzeugt wurden. Der TimeStamper ist eine App für Android Smartphones. Mit Hilfe dieser App werden Listen mit Zeitstempeln geschrieben. Durch Berühren des Bildschirms durch den Beobachter wird der Zeitpunkt des Betretens der Fahrtreppe erfasst. Jeder Person, die die Fahrtreppe betritt, kann so ein Zeitstempel zugeordnet werden. Die Zeitstempel beinhalten Informationen nach folgendem Schema:

Jahr.Monat.Tag_Stunde.Minute.Sekunde_Millisekunde

2014.12.07_03.07.06_332
2014.12.07_03.07.06_725
2014.12.07_03.07.07_429
2014.12.07_03.07.08_163
2014.12.07_03.07.09_581
2014.12.07_03.07.10_610
2014.12.07_03.07.12_340
2014.12.07_03.07.12_847
2014.12.07_03.07.14_329
2014.12.07_03.07.14_791

Tabelle 9 Ausschnitt der Rohdaten aus einer txt.Datei

Mit Hilfe sogenannter Python-Skripts wurden diese Listen ausgewertet. Python ist eine universelle, interpretierte Programmiersprache. Für diese Studie wird Python(x,y) in der Version 2.7.6.0 und die Entwicklungsumgebung (IDE) Spyder benutzt. Näheres zu den geschriebenen Skripts in Kapitel 5.3 Analyse und Auswertungen. Die meisten in dieser Arbeit

angewendeten Skripts wurden mit Hilfe von Max Osterkamp entwickelt und von der Autorin für diese Arbeit angepasst und ergänzt.

5.3 Analyse und Auswertungen

5.3.1 Kategorisierung der Messungen

In der vorliegenden Arbeit werden Fahrtreppen mit einer Nenngeschwindigkeit von 0,5 m/s und einer Nennbreite von 1,00 m ausgewertet. Die meisten Messungen wurden an Fahrtreppen in Einkaufszentren und an Bahnsteigen durchgeführt. Aufgrund der geringen Anzahl von Beobachtungen an Flughäfen und in sonstigen öffentlichen Gebäuden werden diese außer Acht gelassen. Zudem werden auch die Auswirkungen von Höhe, Länge und Neigungswinkel bei der Auswertung vernachlässigt.

	Einkaufszentrum	Bahnhof	<u>gesamt</u>
abwärts	38	35	<u>73</u>
aufwärts	39	47	<u>87</u>
<u>gesamt</u>	<u>77</u>	<u>82</u>	<u>159</u>

Tabelle 10 Anzahl der ausgewerteten Messungen

Tabelle 10 zeigt die Aufteilung der 159 ausgewerteten Messungen in zwei Hauptkategorien. Zum Einen werden die Messungen entsprechend der Nutzung der Gebäude aufgeteilt, in denen sich die Fahrtreppen befinden. 77 Messungen fanden in Einkaufszentren und 82 Messungen in Bahnhöfen statt. Zum anderen werden sie anhand der Fahrtrichtung der Fahrtreppen unterteilt. In der Hauptkategorie „Fahrtrichtung“ werden 73 mit der Fahrtrichtung „abwärts“ und 87 in Fahrtrichtung „aufwärts“ untersucht. Es ist davon auszugehen, dass die Personen, die die Fahrtreppe benutzen, sich in Bahnhöfen anders verhalten als in Einkaufszentren: Auf Bahnhöfen sind die Menschen eher in Eile, da sie oft ein Ziel erreichen wollen (z.B. den Verbindungsanschluss oder ein örtliches Ziel). In Einkaufszentren dagegen sind sie meist schon am Ziel und im „Freizeitmodus“: Sie schauen sich um und haben oft mehr Zeit. Desweiteren ist zu beachten, dass die Nutzer von Fahrtreppen unterschiedliche Gepäckstücke mit sich führen und sich somit unterschiedliche maximale Dichten auf den Fahrtreppen in Einkaufszentren und Bahnhöfen einstellen können. Die Kategorie „Fahrtrichtung“ wird eingeführt, da sich auch auf Treppen unterschiedliche Verhaltensmuster bezüglich der Laufrichtung zeigen, wie in Kapitel 2 beschrieben wird.

5.3.2 Belastung

Zunächst werden aus allen Messungen mit Hilfe von Python-Skripts N(t)-Diagramme erstellt, um eine Übersicht bezüglich der Belastungen zu erhalten. Hierfür werden die Zeitstempel in Sekunden umgerechnet und die Anzahl der Personen aus der Anzahl der Zeitstempel ermittelt. Anschließend werden diese Werte in Diagrammen dargestellt.

An ihnen ist deutlich zu erkennen, dass die Belastungen an Bahnhöfen ein anderes Muster aufweisen als in Einkaufszentren. Fahrtreppen an Bahnsteigen werden in der Regel stoßweise belastet, da die Belastung von dem Fahrplan der Züge mitbestimmt wird. In Einkaufszentren

ist die Belastung nahezu linear. Bezüglich der Fahrtrichtung ist hier noch keine Differenz aufgefallen.

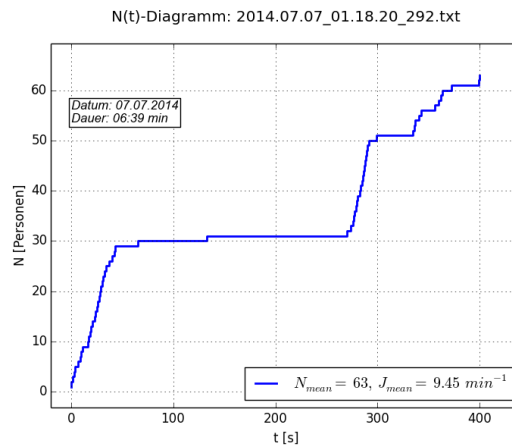


Abbildung 17 Typischer Verlauf einer N(t)-Kurve auf Bahnhöfen (Messung mit der ID 45, gemessen am 7.7.2014 im U-Bahnhof in Düsseldorf, Fahrtrichtung „aufwärts“)

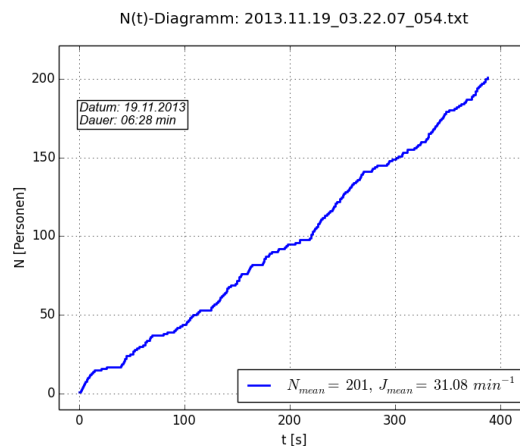


Abbildung 18 Typischer Verlauf einer N(t)-Kurve in Einkaufszentren (Messung mit der ID 53, gemessen am 19.11.2013 in den CityArcaden in Wuppertal, Fahrtrichtung „abwärts“)

5.3.3 Förderleistung

Um aus den N(t)-Diagrammen Aussagen über die gemessene Förderleistung der Fahrtreppen treffen zu können, muss die Steigung der N(t)-Kurven untersucht werden. Wie schon in Kapitel 2.1.3 beschrieben, ist der Fluss J (tatsächliche Förderleistung) die Ableitung der Personenanzahl N nach dem Zeitintervall t:

$$J = \frac{\Delta N}{\Delta t} \left[\frac{\text{Personen}}{\text{Zeiteinheit}} \right]$$

Formel 17 Gleichung für den Fluss von Personenströmen

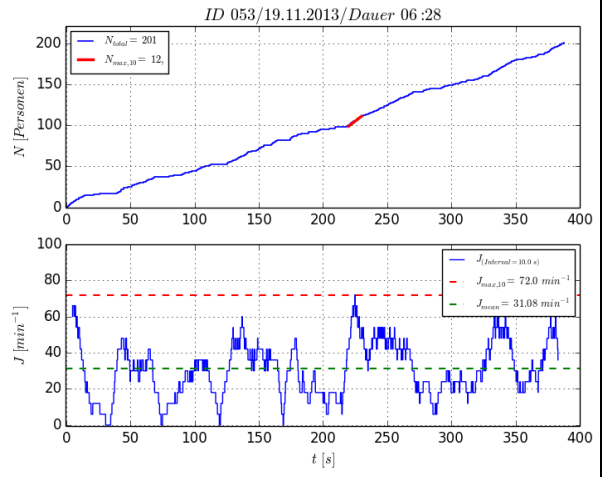
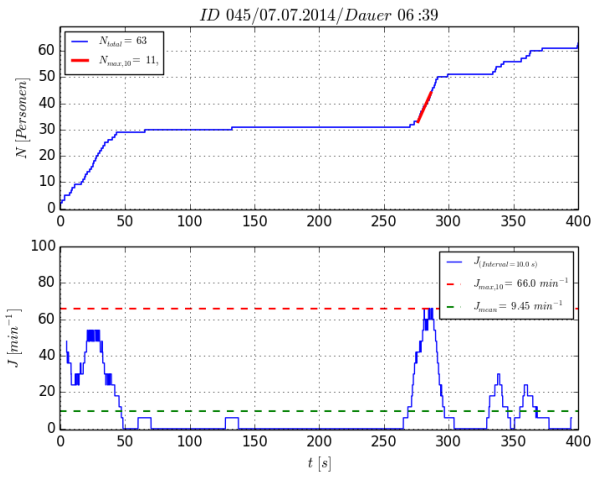
J(t)-Diagramme werden ebenfalls aus allen Messungen mit Hilfe von Python-Skripts erstellt. Dabei stellt sich die Frage, wie groß das Zeitintervall Δt gewählt werden sollte, da die Kapazität stark davon abhängt. Dies wurde auch von Bodendorf, Osterkamp, Seyfried, & Holl (2014) untersucht. Die Auswertung der Messergebnisse lehnt sich an diesen Bericht an.

Um diesen Sachverhalt genauer zu verdeutlichen, werden für die beiden oben gezeigten Messungen (ID 45 und ID 53) die Förderleistungen für fünf unterschiedliche Zeitintervalle ($\Delta t = 10, 30, 60, 90, 120$ s) berechnet und kontinuierlich über die Messdauer dargestellt. Das Zeitintervall $\Delta t = 10$ s wird als unterste untersuchte Grenze gewählt, damit so ein Personenstrom einer Länge von ungefähr 5 m betrachtet werden kann. Dies entspricht ungefähr 12 Stufen einer Fahrtreppe ($12 \cdot 0,4 \text{ m} = 4,8 \text{ m}$). Die obere Grenze wird bei zwei Minuten gesetzt, da zum einen die Räumzeit eines Bahnsteigs maximal 2 Minuten dauern soll und zum anderen auch das HBS zur Berechnung von Fußgängerverkehrsstärken mit 2 min-Intervallen arbeitet.

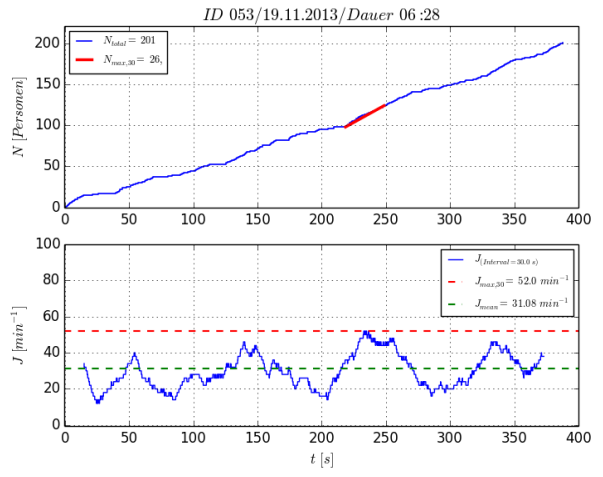
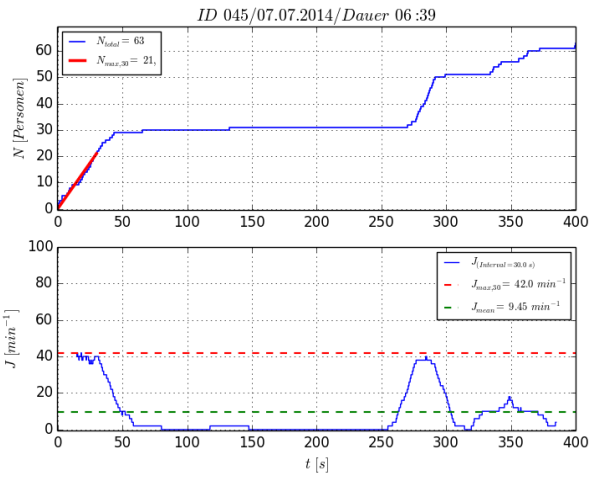
In der Grafik auf Seite 33 werden zehn Auswertungen zueinander ins Verhältnis gesetzt. Jede einzelne Auswertung zeigt ein $N(t)$ -Diagramm und ist jeweils in dem Bereich rot markiert, wo die Förderleistung für das jeweilige Zeitintervall Δt für diese Messung am größten ist. Unter diesem $N(t)$ -Diagramm wird die Förderleistung für das jeweils definierte Zeitintervall kontinuierlich dargestellt. Zudem werden durch zwei horizontale Linien die maximale Förderleistung (rot) und die durchschnittliche Förderleistung (blau) für das definierte Zeitintervall markiert. In der linken Spalte werden die Ergebnisse der Messung am Bahnhof und in der rechten Spalte die Messungen im Einkaufszentrum gezeigt. In der ersten Zeile sind die Ergebnisse für das Zeitintervall $\Delta t = 10$ s zu sehen, in den darauffolgenden Zeilen diejenigen für die weiteren vier definierten Zeitintervalle ($\Delta t = 30, 60, 90, 120$ s).

Bahnhof

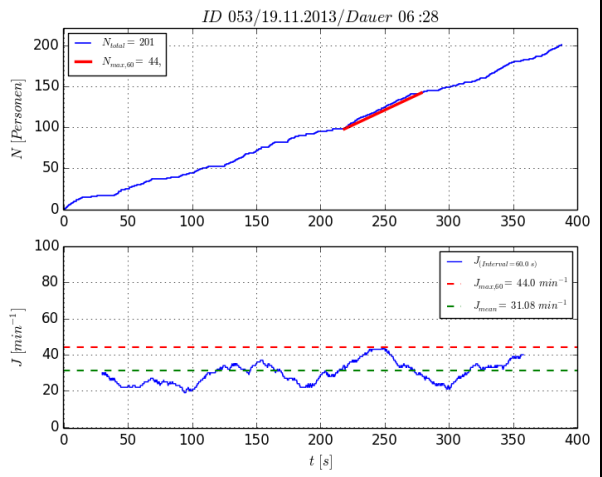
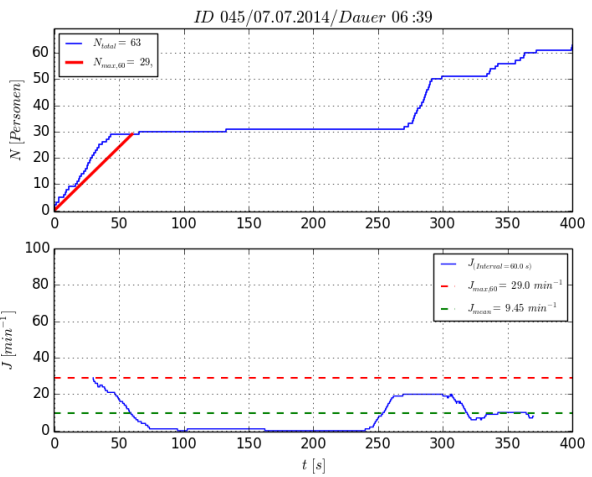
Einkaufszentrum



$\Delta t = 10 \text{ s}$



$\Delta t = 30 \text{ s}$



$\Delta t = 60 \text{ s}$

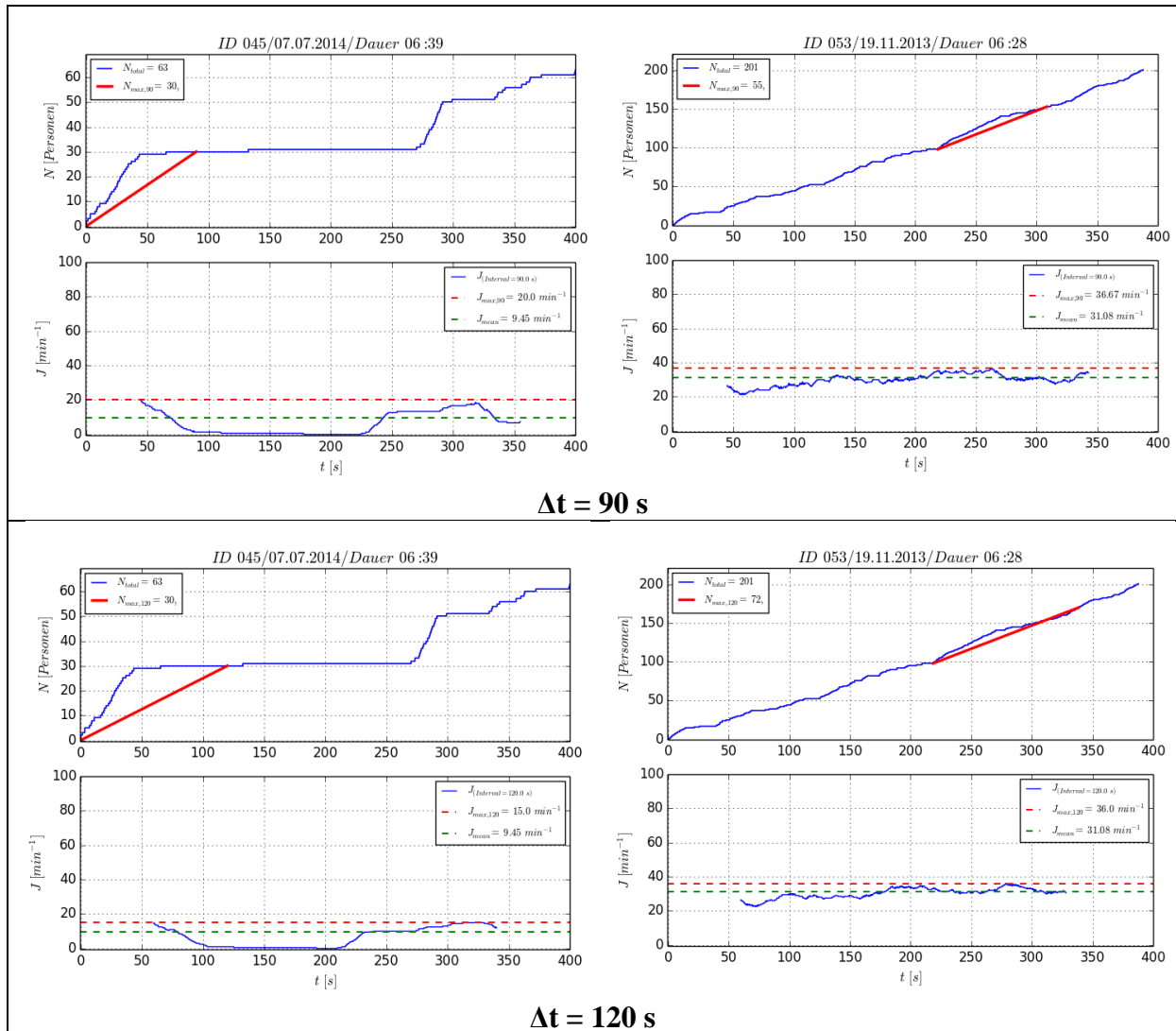


Abbildung 19 Gegenüberstellung von $N(t)$ - und $J(t)$ -Diagrammen aus einer Messung am Bahnhof und einer im Einkaufszentrum (ID 45 und ID 53) für unterschiedliche Zeitintervalle

Es zeigt sich deutlich, dass das betrachtete Zeitintervall bei der Auswertung der Messungen einen starken Einfluss auf die Förderleistung hat. Die maximale Förderleistung J_{max} sinkt mit größer werdendem Zeitintervall Δt und nähert sich der durchschnittlichen Förderleistung J_{mean} an. Bei kleineren Zeitintervallen schwankt die kontinuierlich dargestellte Förderleistung noch stark, bei größeren hingegen flacht sie ab. Außerdem ist auch erkennbar, dass der Zeitpunkt, zu dem die maximale Förderleistung auftritt, abhängig von dem betrachteten Zeitintervall ist.

Zusammenfassend ist zu sagen: Würde man das betrachtete Zeitintervall Δt gegen Null tendieren lassen, dann erhielte man unendlich große Kapazitäten. Setzte man Δt dagegen gleich 24 Stunden oder noch länger, wäre die errechnete Kapazität viel zu gering, da eine Fahrtreppe über 24 Stunden nicht voll besetzt ist (vgl. Abbildung 12 und Abbildung 13). Es ist davon auszugehen, dass eine Fahrtreppe nur 0,5 Stunden am Tag zu mindestens 80 % ausgelastet ist. Die Belastung einer aufwärtslaufenden Rolltreppe über die tägliche Betriebsdauer gleicht folgender Grafik:

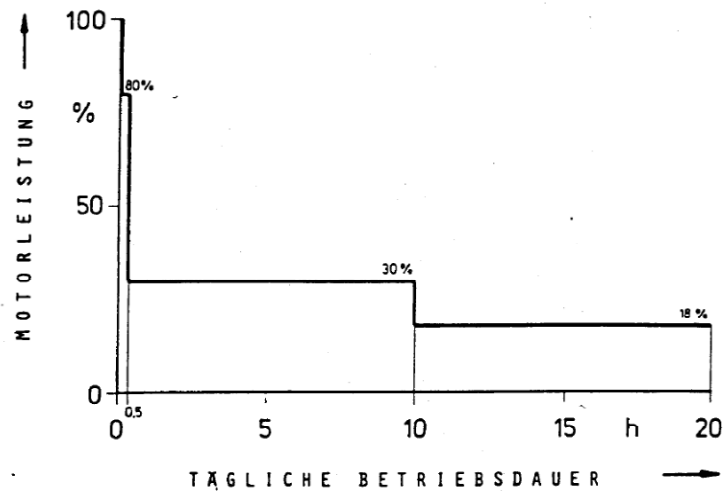


Abbildung 20 Belastungsprofil einer aufwärtslaufenden Rolltreppe nach Herrmann, Quelle: (Weidmann, 1993, S. 81)

Die Förderleistungen für die fünf definierten Zeitintervalle ($\Delta t = 10, 30, 60, 90, 120$ s) und die durchschnittlichen Förderleistungen werden für alle Messungen berechnet und sind in Tabelle 11 für Einkaufszentren sowie in Tabelle 12 für Bahnhöfe abzulesen. Die beiden Tabellen werden in die Fahrrichtungen „aufwärts“ und „abwärts“ unterteilt. Die Messungen sind absteigend nach den Ergebnissen von $J_{\max, \Delta t=10s}$ sortiert.

Fahrtreppen in Einkaufszentren

		maximale Förderleistungen der beobachteten Fahrtreppen im jeweiligen Zeitintervall Δt [s] [Personen/min]								maximale Förderleistungen der beobachteten Fahrtreppen im jeweiligen Zeitintervall Δt [s] [Personen/min]					
Richtung	ID	J _{mean}	$\Delta t = 10$	$\Delta t = 30$	$\Delta t = 60$	$\Delta t = 90$	$\Delta t = 120$	Richtung	ID	J _{mean}	$\Delta t = 10$	$\Delta t = 30$	$\Delta t = 60$	$\Delta t = 90$	$\Delta t = 120$
hoch	64	23,46	90,00	60,00	44,00	40,00	36,50	runter	42	72,72	90,00	78,00	-	-	-
	107	49,86	84,00	70,00	64,00	57,33	56,50		75	54,08	90,00	82,00	70,00	66,00	62,50
	66	23,05	84,00	60,00	47,00	42,67	35,50		76	55,54	90,00	72,00	67,00	64,67	62,50
	95	46,38	78,00	70,00	63,00	59,33	53,00		43	63,15	84,00	74,00	68,00	63,33	-
	33	38,08	78,00	64,00	53,00	50,67	46,50		172	47,78	84,00	58,00	52,00	46,67	-
	109	37,41	78,00	64,00	51,00	44,67	45,50		110	50,30	84,00	74,00	65,00	57,33	54,50
	39	30,83	78,00	56,00	44,00	40,00	36,50		77	35,70	84,00	60,00	54,00	50,00	45,00
	78	31,47	72,00	52,00	46,00	43,33	43,00		130	42,17	84,00	58,00	49,00	46,67	43,50
	19	24,01	66,00	50,00	38,00	34,00	29,00		96	44,90	78,00	60,00	54,00	52,00	51,50
	17	23,45	66,00	44,00	35,00	26,67	29,00		152	34,41	78,00	44,00	39,00	36,00	36,00
	31	29,50	60,00	42,00	37,00	32,00	-		21	22,46	78,00	44,00	37,00	33,33	30,50
	81	21,54	60,00	40,00	36,00	30,67	27,50		40	36,04	72,00	54,00	46,00	37,33	-
	20	19,48	60,00	38,00	33,00	28,67	27,00		129	35,21	72,00	50,00	41,00	40,00	38,50
	15	18,55	60,00	30,00	25,00	22,00	21,50		53	31,08	72,00	52,00	44,00	36,67	36,00
	5	19,65	54,00	40,00	28,00	23,33	-		32	24,59	72,00	56,00	39,00	34,00	35,00
	38	23,63	54,00	44,00	36,00	30,00	29,50		131	28,98	72,00	44,00	35,00	32,00	30,00
	162	25,86	54,00	36,00	33,00	28,00	27,50		108	41,12	66,00	58,00	49,00	44,67	43,50
	52	18,27	54,00	34,00	29,00	26,00	23,50		80	27,54	66,00	48,00	45,00	43,33	40,00
	67	14,29	54,00	26,00	24,00	20,67	18,00		106	32,90	66,00	58,00	43,00	40,00	38,50
	35	30,40	48,00	34,00	31,00	-	-		155	34,65	66,00	54,00	40,00	40,00	38,00
	34	22,79	48,00	34,00	24,00	-	-		70	25,71	66,00	42,00	38,00	34,00	31,50
	1	20,55	48,00	32,00	22,00	20,00	-		135	30,89	66,00	42,00	34,00	31,33	31,50
	115	17,40	48,00	32,00	27,00	26,00	21,00		16	19,36	66,00	50,00	38,00	34,67	30,50
	68	13,19	48,00	30,00	23,00	20,00	18,00		105	19,57	66,00	40,00	27,00	26,67	26,50
	127	13,42	48,00	26,00	18,00	16,67	15,50		153	37,77	60,00	42,00	37,00	-	-
	124	11,42	48,00	22,00	18,00	14,00	12,50		30	32,94	60,00	40,00	34,00	32,00	-
	9	15,04	42,00	28,00	20,00	16,67	-		151	29,25	60,00	44,00	35,00	33,33	33,50
	12	15,39	42,00	22,00	19,00	15,33	14,50		18	23,63	54,00	38,00	30,00	29,33	25,50
	126	12,09	42,00	20,00	16,00	13,33	11,50		116	17,66	54,00	32,00	27,00	24,00	20,00
	125	13,62	36,00	24,00	21,00	17,33	16,00		154	35,64	48,00	40,00	37,00	-	-
	65	13,24	36,00	24,00	19,00	17,33	15,50		4	16,51	48,00	28,00	21,00	17,33	-
	128	12,10	36,00	22,00	20,00	17,33	15,00		41	24,67	42,00	28,00	-	-	-
	55	11,13	36,00	22,00	17,00	14,00	12,50		3	19,31	42,00	30,00	19,00	19,33	-
	13	7,42	36,00	14,00	10,00	10,00	8,00		10	18,13	42,00	26,00	20,00	19,33	17,50
	6	15,03	30,00	20,00	16,00	14,00	-		54	12,47	42,00	22,00	18,00	15,33	14,50
	114	6,60	30,00	16,00	11,00	8,67	8,00		7	17,33	36,00	26,00	18,00	16,67	-
	2	10,05	24,00	16,00	11,00	9,33	9,50		8	15,70	36,00	26,00	22,00	16,00	15,00
	14	7,93	24,00	14,00	10,00	10,00	7,50		123	12,20	36,00	24,00	15,00	13,33	11,50
	11	5,69	18,00	8,00	4,00	-	-								

Tabelle 11 Durchschnittliche und maximale Förderleistungen der beobachteten Fahrtreppen in Abhängigkeit vom betrachteten Zeitintervall Δt in Einkaufszentren (Maximalwerte der Spalten sind gelb markiert)

Fahrtreppen in Bahnhöfen

		maximale Förderleistungen der beobachteten Fahrtreppen im jeweiligen Zeitintervall Δt [s]							maximale Förderleistungen der beobachteten Fahrtreppen im jeweiligen Zeitintervall Δt [s]						
		[Personen/min]							[Personen/min]						
Richtung	ID	J _{mean}	$\Delta t = 10$	$\Delta t = 30$	$\Delta t = 60$	$\Delta t = 90$	$\Delta t = 120$	Richtung	ID	J _{mean}	$\Delta t = 10$	$\Delta t = 30$	$\Delta t = 60$	$\Delta t = 90$	$\Delta t = 120$
hoch	86	75,96	108,00	82,00	-	-	-	runter	91	77,77	102,00	88,00	87,00	84,67	81,00
	161	30,84	102,00	76,00	50,00	37,33	29,50		87	71,18	102,00	88,00	85,00	83,33	77,50
	94	42,20	102,00	70,00	58,00	51,33	49,00		25	74,16	96,00	88,00	76,00	-	-
	146	66,63	102,00	86,00	72,00	-	-		113	68,01	96,00	76,00	73,00	-	-
	84	79,92	96,00	86,00	80,00	-	-		28	73,89	90,00	-	-	-	-
	83	63,53	90,00	72,00	-	-	-		23	70,58	90,00	82,00	75,00	-	-
	165	48,81	90,00	62,00	-	-	-		97	64,77	90,00	80,00	71,00	-	-
	148	47,47	90,00	66,00	58,00	54,00	-		24	63,92	90,00	80,00	75,00	66,67	-
	74	23,53	84,00	50,00	31,00	20,67	23,00		103	61,49	90,00	74,00	69,00	-	-
	121	23,25	84,00	56,00	48,00	39,33	30,00		102	53,81	90,00	74,00	67,00	65,33	56,00
	69	23,45	84,00	58,00	50,00	43,33	40,00		112	37,49	90,00	70,00	63,00	54,67	48,00
	149	55,21	84,00	62,00	-	-	-		101	66,40	84,00	76,00	70,00	-	-
	118	24,42	78,00	58,00	39,00	26,00	25,50		22	66,16	84,00	74,00	-	-	-
	138	28,67	78,00	46,00	37,00	34,67	32,50		100	61,14	84,00	72,00	-	-	-
	139	36,05	78,00	48,00	42,00	40,00	39,50		92	58,81	84,00	66,00	62,00	-	-
	150	52,40	78,00	66,00	-	-	-		93	44,25	84,00	64,00	54,00	50,67	49,50
	147	46,48	78,00	62,00	-	-	-		89	52,80	84,00	56,00	-	-	-
	46	59,63	78,00	60,00	-	-	-		98	59,01	78,00	72,00	65,00	-	-
	119	33,48	78,00	50,00	38,00	33,33	-		90	54,53	78,00	66,00	54,00	-	-
	71	22,13	72,00	60,00	43,00	28,67	21,50		88	52,06	78,00	64,00	52,00	-	-
	63	13,87	72,00	52,00	36,00	29,33	29,00		72	21,10	78,00	60,00	45,00	38,00	35,00
	73	15,43	72,00	58,00	55,00	50,67	47,00		99	49,18	78,00	56,00	-	-	-
	169	40,85	72,00	60,00	49,00	-	-		163	41,53	72,00	56,00	45,00	-	-
	167	36,39	72,00	56,00	45,00	42,00	-		62	21,91	72,00	54,00	43,00	38,67	36,00
	111	30,33	72,00	50,00	37,00	30,00	-		164	36,97	72,00	52,00	43,00	40,00	38,50
	45	9,45	66,00	42,00	29,00	20,00	15,00		143	43,04	60,00	50,00	46,00	45,33	44,00
	82	18,17	66,00	40,00	31,00	25,33	24,00		145	34,64	60,00	46,00	41,00	39,33	38,00
	49	23,54	66,00	50,00	30,00	32,67	25,50		142	27,48	54,00	46,00	34,00	-	-
	61	18,36	66,00	50,00	41,00	34,67	27,00		144	29,91	54,00	44,00	37,00	34,67	33,50
	50	12,63	66,00	46,00	42,00	30,67	30,50		171	24,26	54,00	30,00	27,00	-	-
	51	12,62	66,00	46,00	42,00	30,67	31,00		168	16,10	54,00	26,00	21,00	16,67	-
	26	30,29	66,00	46,00	34,00	-	-		170	21,90	42,00	26,00	24,00	-	-
	59	37,77	60,00	46,00	-	-	-		57	15,24	42,00	26,00	16,00	-	-
	58	32,16	60,00	42,00	32,00	-	-		159	7,94	30,00	16,00	11,00	8,67	8,50
	120	11,01	54,00	38,00	31,00	20,67	20,50		56	6,82	18,00	12,00	6,00	-	-
	122	24,67	54,00	36,00	32,00	27,33	24,50								
	85	47,93	54,00	-	-	-	-								
	44	21,03	54,00	32,00	21,00	22,67	-								
	158	12,22	48,00	28,00	25,00	18,00	13,50								
	79	25,49	48,00	40,00	31,00	28,67	27,00								
	104	18,38	48,00	36,00	32,00	30,00	28,50								
	47	35,69	48,00	38,00	-	-	-								
	166	19,28	48,00	38,00	24,00	20,67	-								
	117	6,20	42,00	26,00	17,00	11,33	8,50								
	60	26,05	42,00	38,00	27,00	-	-								
	29	20,03	42,00	30,00	26,00	20,67	-								
	27	23,25	30,00	20,00	-	-	-								

Tabelle 12 Durchschnittliche und maximale Förderleistungen der beobachteten Fahrtreppen in Abhängigkeit vom betrachteten Zeitintervall Δt in Bahnhöfen (Maximalwerte der Spalten sind gelb markiert)

In Einkaufszentren erreichen die Fahrtreppen bei den Messungen eine maximale Förderleistung (für $\Delta t=10s$) von 90 Personen/min in beide Fahrtrichtungen (ID 64 und ID 75). Die maximale beobachtete Förderleistung der Fahrtreppen an Bahnsteigen beträgt 108 Personen/min (Fahrtrichtung „aufwärts“) (ID 86) bzw. 102 Personen/min (Fahrtrichtung „abwärts“) (ID 87). Diese Werte nähern sich der in (DIN EN 115-1, 2010-06) angegebenen Kapazität von 100 Personen/min für Fahrtreppen von 1,00 m Breite und einer Nenngeschwindigkeit von 0,5 m/s an. Doch es ist zu beachten, dass diese Förderleistungen nur in Zeitfenstern von 10 s beobachtet werden. Wenn man die maximalen Förderleistungen dieser Messungen für längere Zeitfenster betrachtet, sinken diese stark ab. Tabelle 13 fasst die maximal gemessenen Förderleistungen der beobachteten Fahrtreppen noch einmal zusammen.

	aufwärts	abwärts	aufwärts	abwärts	aufwärts	abwärts	aufwärts	abwärts	aufwärts	abwärts
Einkaufszentrum	90,00	90,00	70,00	82,00	64,00	70,00	59,33	66,00	56,50	62,50
Bahnhof	108,00	102,00	86,00	88,00	80,00	87,00	54,00	84,67	49,00	81,00
	$\Delta t = 10s$		$\Delta t = 30s$		$\Delta t = 60s$		$\Delta t = 90s$		$\Delta t = 120s$	

Tabelle 13 Maximalwerte der gemessenen Förderleistungen für unterschiedliche Zeitfenster, unterteilt in die Kategorien „Einsatzort“ (Bahnhof bzw. Einkaufszentrum) und „Fahrtrichtung“ (aufwärts bzw. abwärts)

Um diesen Zusammenhang zwischen Förderleistung und betrachtetem Zeitintervall weiter zu untersuchen, werden die Förderleistungen in Abhängigkeit von Δt in Zeitschritten von je einer Sekunde berechnet und in ein Diagramm übertragen. Die folgende Grafik zeigt den Verlauf der durchschnittlichen Förderleistung J_{mean} über alle Messungen hinweg in Abhängigkeit von Δt . Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichungen. Die maximalen und minimalen Förderleistungen (J_{max} und J_{min}) sind in rot und gelb dargestellt. Das betrachtete Zeitintervall Δt nimmt hierbei Werte von 10 s bis 120 s in Ein-Sekunden-Schritten an.

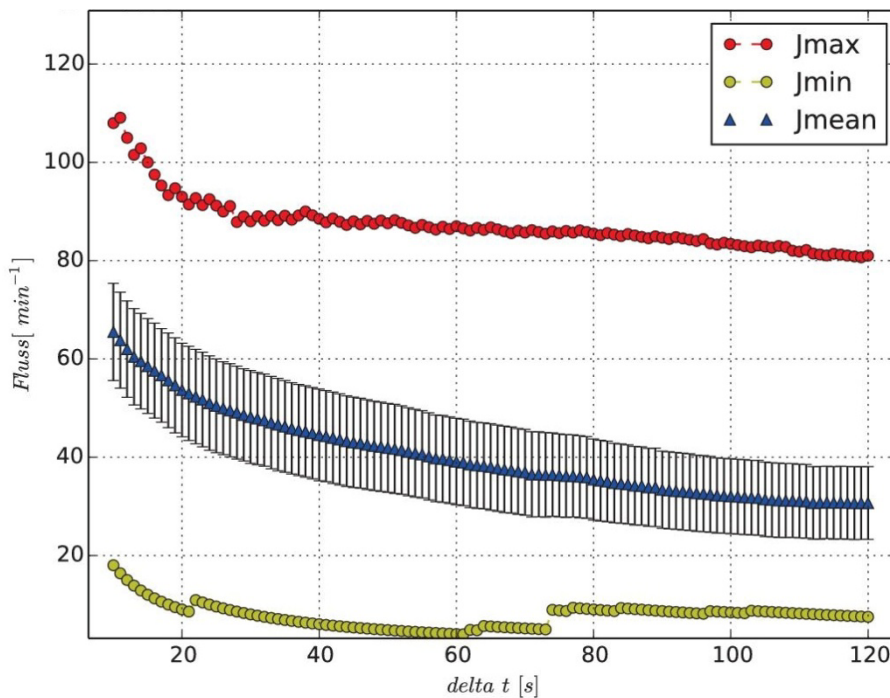


Abbildung 21 Durchschnittliche Förderleistung der Fahrtreppen aller Messungen in Bahnhöfen in Abhängigkeit von Δt (10 s bis 240 s in Schritten von je 1 s)

Die durchschnittliche Förderleistung aus allen Messungen nimmt für $\Delta t = 10$ s Werte zwischen 60 und 70 Personen/min an, was Oeding (1963) und auch die britische Norm (British Standard, 2004-11) als Bemessungsleistung für Fahrtreppen dieser Art beschreiben. (vgl. Tabelle 8) Für größere Zeitintervalle unterschreitet die durchschnittliche Förderleistung alle in den Veröffentlichungen empfohlenen Bemessungsförderleistungen. Für $\Delta t = 120$ s sinkt die durchschnittliche Förderleistung auf ca. 30 Personen/min.

Um genauere Aussagen zu den beiden Kategorien treffen zu können, die im Kapitel 5.3.1 beschrieben wurden, werden im Folgenden die durchschnittlichen Förderleistungen der

Fahrtreppen in den Kategorien „Einsatzort“ (Bahnhof bzw. Einkaufszentrum) und „Fahrtrichtung“ (aufwärts bzw. abwärts) miteinander verglichen.

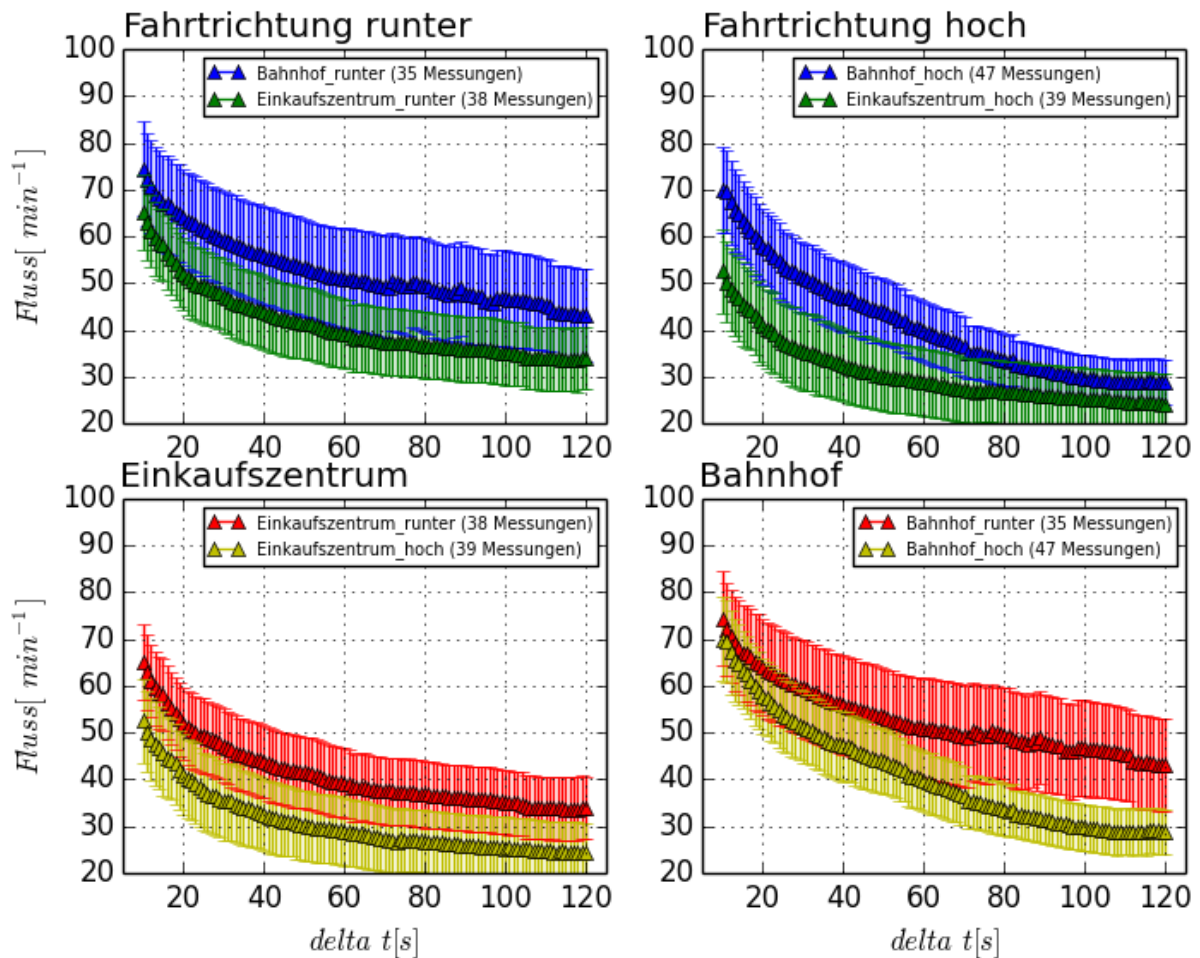


Abbildung 22 Kontinuierliche Darstellung der Förderleistung der beobachteten Fahrtreppen in definierten Zeitfenstern von 10 s bis 120 s in 1s-Schritten mit Fehlerbalken. Vergleich von Messungen von aufwärts- bzw. abwärtslaufenden Fahrtreppen in Einkaufszentren bzw. Bahnhöfen

Die Förderleistung sinkt auch in dieser differenzierten Darstellung, sobald die betrachteten Zeitintervalle größer werden. Die kontinuierliche Darstellung der Förderleistung der beobachteten Fahrtreppen in definierten Zeitfenstern von 10 s bis 120 s beschreibt näherungsweise eine Exponential-Funktion, die sich mit größer werdendem Zeitintervall an eine horizontale Linie schmiegt.

Wie schon Bodendorf, Osterkamp, Seyfried, & Holl (2014) in ihren Untersuchungen feststellten, sind auch in dieser Studie die beobachteten Förderleistungen auf Fahrtreppen an Bahnsteigen immer größer als diejenigen in Einkaufszentren, ebenso die Förderleistungen auf abwärtslaufenden Fahrtreppen im Vergleich zu aufwärtslaufenden. Die höheren Förderleistungen für Fahrtreppen in Bahnhöfen lassen sich zum einen durch die stärkeren Belastungen in den Stoßzeiten begründen und zum anderen durch die Motivation der Personen zügig voranzukommen. Im Gegensatz hierzu sind Personen in Einkaufszentren seltener in Eile. Bei den Messungen in Bahnhöfen wurden größtenteils (83 %) Fahrtreppen an U- und S-Bahnsteigen untersucht. An diesen Bahnsteigen führen die Personen nur wenig

Gepäck mit sich. In Einkaufszentren trägt ein Teil der Menschen seine Einkäufe mit sich. Damit lässt sich begründen, warum die Dichte auf Fahrtreppen an Bahngleisen und somit der Fluss größer ist. Die durchschnittliche Förderleistung (für $\Delta t = 10$ s) in Bahnhöfen (ca. 70 Personen/min) ist auf aufwärtslaufenden Fahrtreppen um knapp 20 Personen/min höher als in Einkaufszentren (ca. 50 Personen/min). Betrachtet man aber ein Zeitintervall von $\Delta t = 120$ s, beträgt die Differenz nur noch ca. 5 Personen/min und die durchschnittlichen Förderleistungen sind auf 30 und 25 Personen/min abgesunken. Diese geringere Differenz lässt sich ebenfalls durch die Stoßbelastung an Bahnsteigen begründen. Dennoch stellt sich dieses Phänomen nicht bei abwärtslaufenden Fahrtreppen im Vergleich Bahnhof vs. Einkaufszentrum ein. Hier laufen die Kurven annähernd parallel.

Auch die Kurven, die die Förderleistungen von aufwärts- und abwärtslaufenden Fahrtreppen in Einkaufszentren vergleichen, laufen nahezu parallel sinkend über die Zeitintervalle. Die vergleichenden Kurven zu den Fahrtreppen in Bahnhöfen gehen für größere Zeitintervalle auseinander. Für das Zeitintervall $\Delta t = 10$ s betragen die Förderleistungen in beide Fahrtrichtungen zwischen 70 und 75 Personen/min. Für $\Delta t = 120$ s beträgt die durchschnittliche Förderleistung bei abwärtslaufenden Fahrtreppen ungefähr 40 Personen/min im Gegensatz zu ca. 30 Personen/min für aufwärtslaufende.

Die höheren Förderleistungen auf abwärtslaufenden Fahrtreppen lassen sich zum einen durch das Bestreben der Menschen nach möglichst viel persönlichem Raum begründen. Auf einer abwärtslaufenden Fahrtreppe kann der Nutzer über die Personen vor ihm hinwegsehen und hat einen freien Blick. Auf aufwärtslaufenden Fahrtreppen versperrt der Rücken des Vordermanns diese Sicht, was für viele Menschen eher unangenehm ist. Dieses subjektive Empfinden mindert die Stufenbesetzung. Zum anderen ist der Blick auf den horizontalen Stufenlauf beim Betreten von abwärtslaufenden Fahrtreppe freier. Dadurch steigt das Sicherheitsempfinden der Personen und sie betreten zügiger die Fahrtreppe.

5.3.4 Der Zusammenhang zwischen Stauungen an der Landestelle und der Kapazität einer Fahrtreppe

Wie im Kapitel 2.1.3 (Fluss) beschrieben, ist die Kapazität C einer Verkehrsanlage der maximale Fluss bei einer Dichte ρ_c . Wird die Dichte durch zuströmende Menschen weiter erhöht, kommt es zu Stauungen.

Daraus ergibt sich die Frage: Sind Stauungen auf und vor der Landestelle also ein Zeichen dafür, dass die Fahrtreppe ihre Kapazität erreicht hat?

Durch genauere Untersuchung eines Videos, das in den Neukölln-Arcaden in Berlin aufgenommen wurde (ID 21), konnte der Zusammenhang zwischen der Stauung vor der Landestelle und der Kapazität beschrieben werden.

Es gibt demnach zwei Ursachen für Stauungen an der Landestelle einer Fahrtreppe:

1. Das Zögern einer Person beim Betreten der Fahrtreppenstufen. Dadurch kann der Zustrom an nachfolgenden Menschen nicht abgeführt werden. Es bildet sich eine Stauung und der Fluss auf der Fahrtreppe sinkt.

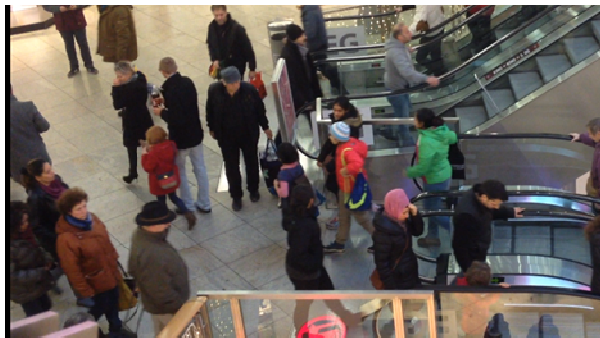
2. Der Zustrom von Personen, die die Fahrtreppe betreten wollen, ist größer als deren Leistungsfähigkeit. Der Fluss auf der Fahrtreppe steigt an und variiert danach nur noch minimal über die Dauer des Staus. Dies ist ein Zeichen dafür, dass die Kapazität erreicht wurde. Es sei denn, eine Person zögert, dann tritt wieder Ursache 1 in Kraft.



① $t = 84 \text{ s}$



② $t = 93 \text{ s}$



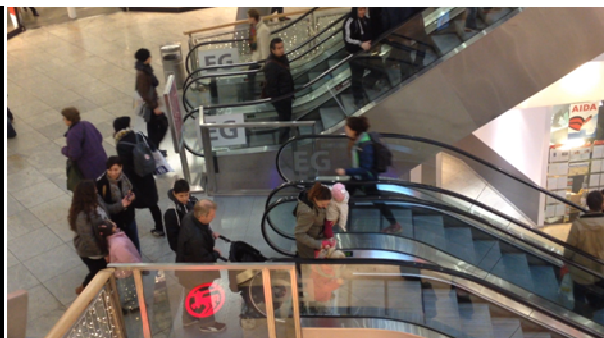
③ $t = 137 \text{ s}$



④ $t = 153 \text{ s}$



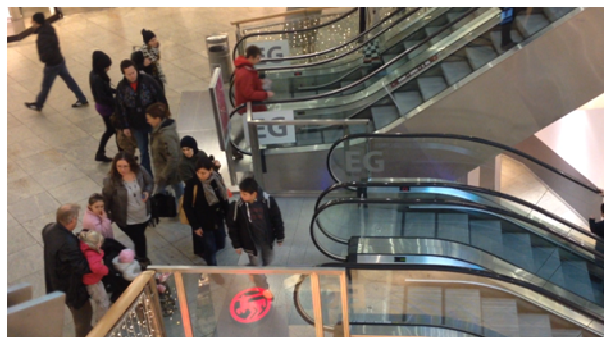
⑤ $t = 175 \text{ s}$



⑥ $t = 199 \text{ s}$



$t = 208 \text{ s}$



⑦ $t = 315 \text{ s}$

Abbildung 23 Screenshots aus dem Video zur Messung mit der ID 21 (die Fahrtrepppe am unteren Bildrand wird betrachtet) zu markanten Zeitpunkten

Die Bilder auf Seite 41 zeigen Ausschnitte aus dem Video zur Messung in den Neukölln-Arcaden in Berlin vom 22.11.2014 (ID 21). Abbildung 24 zeigt den zeitlichen Verlauf der Förderleistung für $\Delta t = 10$ s. Folgendes passiert zu den Zeitpunkten:

- ① $t = 84$ s Stauung beginnt, fließt aber zügig ab. Die maximale Förderleistung dieser Messung $J_{\max,10} = 80$ Personen/min wird erreicht.
- ② $t = 93$ s Stauung hat sich wieder aufgelöst. Förderleistung sinkt, da der Zustrom sich verringert.
- ③ $t = 137$ s Stauung beginnt, da Zustrom sich erhöht.
- ④ $t = 153$ s Stauung erreicht Höhepunkt. Die Förderleistung sinkt zu diesem Zeitpunkt, da erst ein Mann mit Rollwagen die Fahrtreppe betritt, dann die Frau mit brauner Jacke zögert und im Anschluss eine Frau mit einem weiteren Rollwagen die Fahrtreppe besteigt.
- ⑤ $t = 175$ s Stauung hat sich aufgelöst. Zustrom geringer. Förderleistung sinkt.
- ⑥ $t = 199$ s Eltern mit Kind und Kinderwagen zögern. Förderleistung sinkt auf null, da der Zugang durch die Familie versperrt wird.
- $t = 208$ s Kind fällt.
- ⑦ $t = 315$ s Landestelle wurde von der Familie wieder geräumt. Förderleistung steigt wieder an.

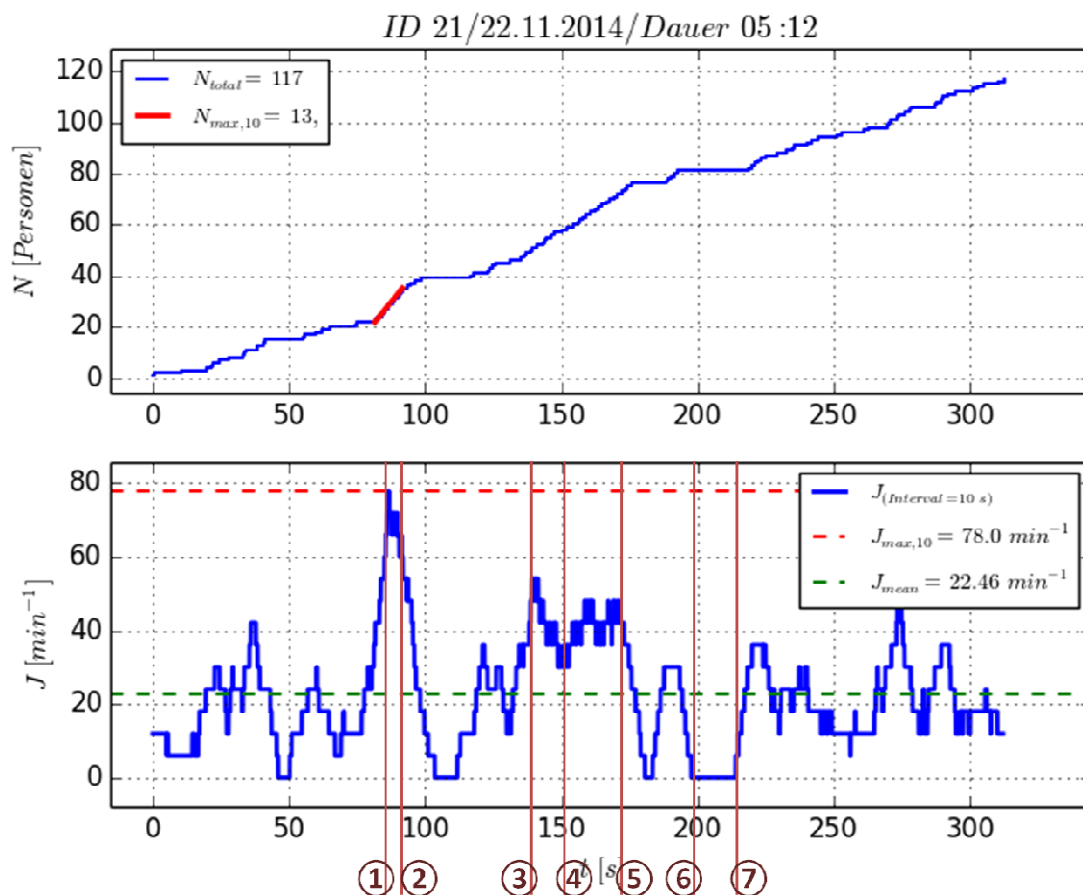


Abbildung 24 N(t)- und J(t)-Diagramm für ID 21 mit markanten Zeitpunkten

Das Erreichen der Kapazität lässt sich also nicht nur an den Stauungen an der Landestelle erkennen. Für eine hohe Förderleistung ist ein zügiges Betreten der Fahrtreppe maßgebend.

Um praktische Förderleistungen für die Bemessung von Fahrtreppen angeben zu können, muss also auch beachtet werden, wie flüssig der zuströmende Personenstrom die Fahrtreppe betritt.

5.3.5 Kapazitätsbestimmungen

Die Kapazität auf Fahrtreppen lässt sich nicht wie bei sonstigen Fußgängeranlagen über Fundamental-Diagramme bestimmen, da die Geschwindigkeit den Personen auf der Fahrtreppe vorgegeben ist. Es lässt sich also keine Kapazität aus einem Fundamentaldiagramm herleiten.

Im Rahmen der Feldstudien wurde beobachtet, dass die Kapazität einer Fahrtreppe von folgenden weiteren Parametern abhängt, die in weiteren Forschungen genauer untersucht werden sollten:

- Kapazität des Zugangs

Die Kapazität der Fahrtreppe wird bestimmt durch die Kapazität des Zugangs. Die baulichen Gegebenheiten ähneln einer Engstelle. Kapazitätsbestimmungen für Engstellen sind noch nicht ausreichend untersucht worden. Verschiedene Planungshandbücher geben zur Abschätzung des Flusses durch Engstellen Werte von 0,8 bis 1,6 Personen/m·s (48 bis 96 Personen/m·min) an. In Experimenten wurden Werte bis 1,9 Personen/m·s (114 Personen/m·min) gemessen. Diese Werte erinnern an die gemessenen maximalen Flüsse auf Fahrtreppen. Die theoretische Kapazität einer Fahrtreppe von 150 P/min kann aufgrund der geringeren Kapazität des Zugangs wegen der Kontinuitätsgleichung nicht erreicht werden.

- Stufenbesetzung

Die Besetzung der Stufen beeinflusst die Dichte auf der Fahrtreppe und somit auch den Fluss.

Die volle Auslastung von 2 Personen pro Stufe konnte in den Messungen nicht beobachtet werden. Laut Rogsch (2013) versuchen Nutzer von Fahrtreppen möglichst viel freien Raum um sich zu haben. Sie bevorzugen es, dass mindestens eine freie Stufe auf ihrer Fahrtreppenseite frei ist.

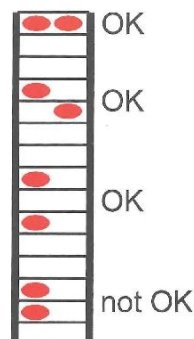


Abbildung 25 Bevorzugte Verteilung von Personen auf zweispurigen Fahrtreppen, Quelle: (Rogsch, 2013)

- Platzbedarf der Nutzer und Zusammensetzung des Personenstroms

An Fahrtreppen, die an Bahnsteigen für den Fernverkehr liegen, wurde beobachtet, dass die meisten Reisenden mindestens einen Trolley (Rollkoffer) bei sich führen. Diesen stellen sie auf der Stufe vor oder hinter sich ab. Diese Personen mit Rollkoffern besetzen mindestens 2 Stufen. Dadurch ist die Bemessungsleistungsfähigkeit begründet, die die Richtlinie der Deutschen Bahn (DB RIL 813.0202A01, 05-2012) angibt. Sie beträgt 25 % der theoretischen Förderleistung (37,5 Personen/min). In dem Video zur Messung (ID 29) am Fernverkehrsbahnsteig im Berliner Hauptbahnhof ist dies zu erkennen.



Abbildung 26 Personen mit Rollkoffern auf Fahrtreppen (aus dem Video zur Messung mit der ID 29)

Der Platzbedarf der Nutzer beeinflusst die Dichte und somit die Kapazität der Fahrtreppe. Kenntnisse über die Zusammensetzung der Nutzer der jeweiligen Fahrtreppen sind somit notwendig.

- Stimmung / Motivation der Nutzer / Einsatzort

Aus dem Vergleich „Einkaufszentrum vs. Bahnhof“ lässt sich schließen, dass unterschiedliche Gründe der Nutzung der Fahrtreppe die Kapazität beeinflussen.

- Fahrtrichtung

Die unterschiedlichen Ergebnisse der Förderleistung bezüglich der Fahrtrichtung (aufwärts vs. abwärts) lassen darauf schließen, dass die Bestimmung der Kapazität auch von diesem Kriterium abhängt.

- Sicherheit und Geschwindigkeit beim Betreten der Fahrtreppe

Wie am Beispiel des fallenden Kindes oder auch der zögernden Personen aus der Messung im Einkaufszentrum (ID 21) gezeigt werden konnte, beeinflusst dieser Faktor auch den Fluss auf der Fahrtreppe. Bei höheren Nenngeschwindigkeiten würden Personen öfter zögerlich die Fahrtreppe betreten.

6 Level of Service – LOS

Das Level-of-Service- Konzept (LOS) unterteilt die Belastung von Verkehrsflächen in Qualitätsstufen. Betrachtet wird hierbei neben der Dichte auch der Komfort für die Nutzer. Seine Ursprünge hat dieses Konzept im angelsächsischen Raum. Um die Qualität des motorisierten Individualverkehrs beschreiben zu können, wurden Kriterien definiert: die Erfüllung oder Nichterfüllung dieser Kriterien bestimmt die Qualitätsstufe. Später wurde dieses Konzept auch auf den Fußverkehr übertragen. In diesem Kapitel werden zwei gebräuchliche Konzepte für den Fußverkehr erläutert (nach Weidmann und nach der FGSV) und daran angelehnt werden Qualitätsstufen speziell für Fahrtreppen erstellt.

6.1 LOS nach Weidmann (1993)

Schon 1963 schrieb Oeding über die Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Verkehrsdichte in Fußgängerströmen. Er unterteilte die beobachteten Verkehrszustände in vier Stufen bezüglich der Verkehrsdichte. (Oeding, 1963, S. 5 & 6)

Fruin entwickelte 1971 aus dem LOS für den motorisierten Individualverkehr ein Konzept für den Fußgängerverkehr. Diese Unterteilung ist heute noch gebräuchlich und wurde von Weidmann genauer beschrieben. (Fruin, 1971)

Weidmann beschreibt acht Kriterien zur Bestimmung der Benutzungsqualität:

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

Durch die Erfüllung bzw. Nichterfüllung dieser Kriterien lassen sich die neun LOS-Stufen A bis I definieren. Aus den LOS-Stufen lässt sich auf die Dichte ρ , Geschwindigkeit v und Leistungsfähigkeit C der Anlage schließen. Diese Richtwerte wurden von Weidmann für gehende Personen auf Ebenen und Treppen angegeben. Bezüglich der Geschwindigkeit und der Kapazität unterteilt Weidmann Treppen noch in aufwärts- und abwärtsgehende Personenströme. Bei der Dimensionierung von Fußverkehrswegen sind die LOS-Stufen A-D anzustreben. Die Stufen E und F sollten nur kurzzeitig bei Stoßbelastungen auftreten. Die restlichen dürfen nur sehr selten erreicht werden. Tabelle 14 zeigt eine Zusammenfassung einiger Tabellen von Weidmann.

LOS	Kriterien								Gesamtcharakterisierung	Gehen in der Ebene			Gehen auf Treppen					
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8		ρ [Pers/m ²]	v [m/s]	C [Pers/sm]	aufwärts		abwärts			
													ρ [Pers/m ²]	v [m/s]	C [Pers/sm]	v [m/s]		C [Pers/sm]
A	+	+	+	+	+	+	+	+	absolut freie Bewegung	0,00-0,10	1,34	0,07	0,00-0,20	0,61	0,06	0,69	0,07	akzeptabel
B	+	+	=	+	+	+	+	+	freie Bewegung	0,10-0,30	1,34	0,27	0,20-0,60	0,61	0,24	0,69	0,28	
C	=	+	=	=	=	=	=	+	schwache Behinderung	0,30-0,45	1,33	0,50	0,60-0,75	0,60	0,41	0,68	0,47	
D	=	=	=	=	=	=	=	+	mässige Behinderung	0,45-0,60	1,29	0,68	0,75-0,90	0,60	0,49	0,68	0,56	
E	-	-	=	-	-	-	-	+	starke Behinderung	0,60-0,75	1,23	0,83	0,90-1,15	0,58	0,59	0,66	0,68	kurzzeitig
F	-	-	-	-	-	-	-	+	dichter Verkehr	0,75-1,00	1,12	0,99	1,15-1,65	0,52	0,73	0,60	0,84	
G	-	-	-	-	-	-	-	=	mässiges Gedränge	1,00-1,50	0,93	1,16	1,65-2,15	0,44	0,83	0,50	0,96	sehr selten
H	-	-	-	-	-	-	-	-	starkes Gedränge	1,50-2,00	0,70	0,94	2,15-2,60	0,36	0,85	0,41	0,98	
I	-	-	-	-	-	-	-	-	massives Gedränge	2,00-5,40	0,16	0,65	2,60-5,40	0,13	0,52	0,15	0,61	

+ gut
= mittelmäßig
- schlecht

Tabelle 14 Zusammenstellung der Qualitätsklassen nach Weidmann (1993)

6.2 Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (HBS, 2009)

Eine weitere Qualitätsunterscheidung für Verkehrszustände in Fußgängerströmen sind die im „Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen“ (HBS) beschriebenen Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (QSV) von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV). (HBS, 2009, S. 11-10) Die Qualitätsstufen sind hierbei abhängig von der Fußgängerkehrsdichte und in Tabelle 15 aufgezeigt.

Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs	Fußgängerkehrsdichte k [Pers/m ²]	
	Fußgänger in Bewegung	Fußgänger in Wartesituationen
A	≤ 0,10	≤ 1,00
B	≤ 0,25	≤ 1,50
C	≤ 0,40	≤ 2,00
D	≤ 0,70	≤ 3,00
E	≤ 1,80	≤ 6,00
F	> 1,80	> 6,00

Tabelle 15 Grenzwerte der Fußgängerkehrsdichten für Fußgänger in Bewegungen und in Wartesituationen aus dem HBS (HBS, 2009, S. 11-10)

Das HBS (2009) beschreibt die einzelnen Qualitätsstufen wie folgt:

- Stufe A:** Die Fußgänger haben freie Geschwindigkeitswahl. Sie werden durch andere Fußgänger äußerst selten beeinflusst. Die Verkehrsdichte ist sehr gering. In Wartesituationen gibt es keine Beeinträchtigungen.
- Stufe B:** Die Fußgänger werden nur selten wegen anderer Personen zu Geschwindigkeits- oder Richtungsänderungen gezwungen. Bei geringer Verkehrsdichte kommt es insgesamt nur zu geringfügigen Beeinträchtigungen. In Wartesituationen gibt es nur sehr geringe Beeinträchtigungen.

Stufe C: Die freie Geschwindigkeitswahl ist eingeschränkt. Die Verkehrsdichte erreicht ein spürbares Maß. Gelegentlich treten erzwungene Geschwindigkeits- oder Richtungsänderungen durch andere Fußgänger auf, die ständig beachtet werden müssen. In Wartesituationen sind Beeinträchtigungen durch andere Personen möglich, ohne dass es zu Körperkontakten kommt.

Stufe D: Die Geschwindigkeitswahl ist deutlich eingeschränkt. Fußgänger sind häufig zu Geschwindigkeits- und Richtungsänderungen gezwungen. Die Verkehrsdichte ist hoch und die freie Bewegung stark behindert. Die mittlere Geschwindigkeit sinkt erkennbar ab. In Wartesituationen kommt es zur Bildung von Reihen oder Gruppen und zu unbeabsichtigten Körperkontakten mit anderen Personen. Der Verkehrszustand ist noch stabil.

Stufe E: Die Fußgänger haben keine freie Geschwindigkeitswahl. Gegenverkehr ist erheblich erschwert. Die Verkehrsdichte ist so hoch, dass es zu massiven Behinderungen kommt. In Wartesituationen sind Körperkontakte zu anderen Personen nicht zu vermeiden. Die Kapazität wird erreicht.

Stufe F: Der Zugang ist höher als die Kapazität. Richtungsänderungen sind kaum noch durchführbar, zeitweise kommt es zum Stillstand. Gegenverkehr wird unmöglich. Die Fußgänger haben ständig unabweisbare Körperkontakte zu anderen. Die Verkehrsanlage ist überlastet.

In den folgenden Fundamentaldiagrammen für Fußgängerverkehr auf Gehwegen, in Korridoren und auf Rampen sowie auf Treppen wird die Verkehrsstärke-Dichte-Beziehung ($\rho(J_s)$) für unterschiedliche Gehgeschwindigkeiten bzw. unterschiedliche Gehrichtungen auf Treppen dargestellt. Die Qualitätsstufen sind eingezeichnet.

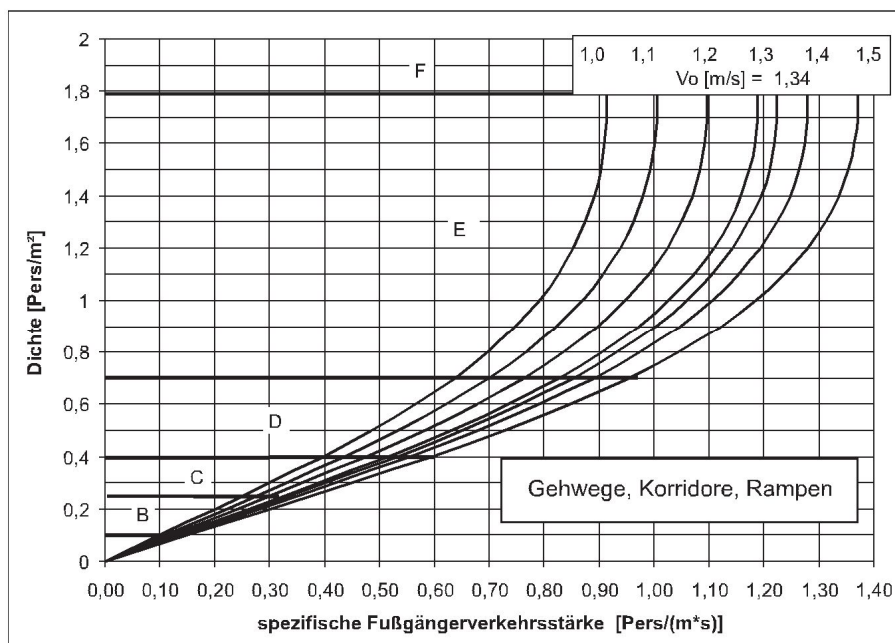


Abbildung 27 Verkehrsstärke-Dichte-Beziehung und Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs für Gehwege, Korridore und Rampen für unterschiedliche Gehgeschwindigkeiten, Quelle: (HBS, 2009, S. 11-13)

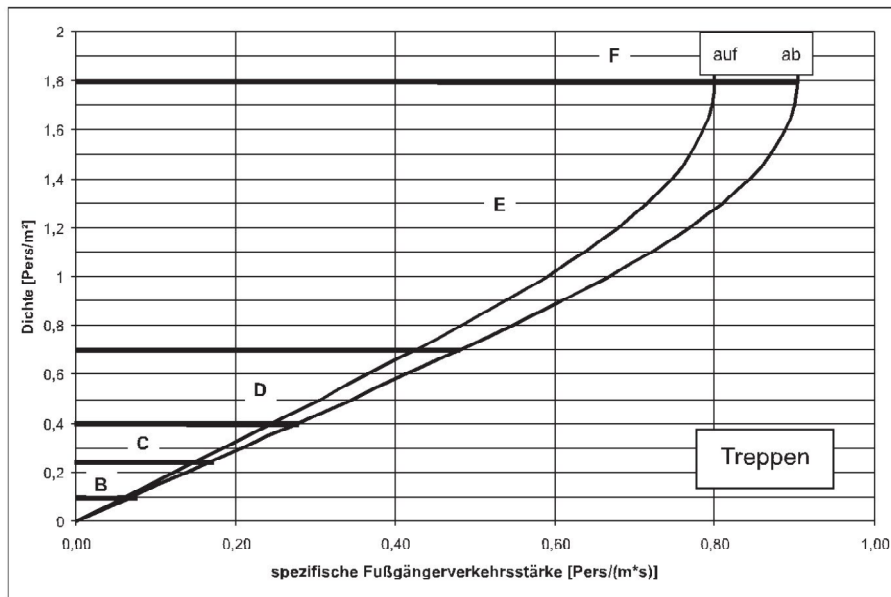


Abbildung 28 Verkehrsstärke-Dichte-Beziehung und Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs für Treppen, Quelle: (HBS, 2009, S. 11-14)

6.3 Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs auf Fahrtreppen

Das HBS wie auch Weidmann definieren die Qualitätsklassen in Abhängigkeit von der Nutzungsart. Sie unterscheiden die Anlagentypen „Ebene“ und „Treppen“ (aufwärts und abwärts). Für Fahrtreppen im Besonderen finden sich in der Literatur keinen vergleichbaren Qualitätsklassen-Definitionen.

Im Folgenden werden mögliche Kriterien für Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs auf Fahrtreppen beschrieben.

Nach E. T. Hall gibt es verschiedene Distanzzonen, die Menschen in westlichen Kulturkreisen einnehmen (Hall & E.T., 1976):

- Intime Distanz 0 cm – 45 cm
- Persönliche Distanz 45 cm – 120 cm
- Soziale Distanz 120 cm – 360 cm
- Öffentliche Distanz größer 360 cm

Angelehnt an diese Hall'schen Distanzzonen und anhand eigener Beobachtungen von Fahrtreppen werden folgende Qualitätsstufen für Fahrtreppen empfohlen.

Qualitätsstufen für Fahrtreppen	Abstand zur Person auf der gleichen Fahrtreppenseite		Förderleistung		Dichte
	[m]	[Stufen]	[Personen/Stufe]	[Personen/min]	[Personen/m ²]
A	≥ 3,60	≥ 9	≤ 0,2	≤ 15,0	≤ 0,50
B	≥ 1,20	≥ 3	≤ 0,5	≤ 37,5	≤ 1,25
C	≥ 0,40	≥ 1	≤ 1,0	≤ 75,0	≤ 2,50
D	≥ 0,27	≥ 0,7	≤ 1,2	≤ 90,0	≤ 3,00
E	< 0,27	< 0,7	> 1,2	> 90,0	> 3,00

Tabelle 16 Empfehlung für Qualitätsstufen für Fahrtreppen

Folgende Kriterien für die Qualitätsstufen werden empfohlen:

1. Unbeabsichtigtes Berühren
2. Möglichkeit zur freien Geschwindigkeitswahl beim Betreten der Fahrtreppe / andere Nutzer müssen nicht beachtet werden
3. Rückstau
4. Sicht auf den horizontalen Stufenlauf frei
5. Überholmöglichkeit / Gehmöglichkeit auf der Fahrtreppe

Qualitätsstufe A:



Abbildung 29 Beispielhafte, schematische Darstellung einer Fahrtreppe mit einer Förderleistung von 0,2 Personen/Stufe (15 Personen/min) (Obere Grenze der Qualitätsstufe A)

1. Kein unbeabsichtigtes Berühren von Personen auf der Fahrtreppe.
2. Die Fahrtreppe kann mit frei wählbarer Geschwindigkeit betreten werden. Andere Nutzer sind nicht zu beachten.
3. Kein Rückstau an der Landestelle.
4. Die Sicht auf den horizontalen Stufenlauf ist frei.
5. Es kann überholt und gegangen werden.

Qualitätsstufe B:



Abbildung 30 Beispielhafte, schematische Darstellung einer Fahrtreppe mit einer Förderleistung von 0,5 Personen/Stufe (37,5 Personen/min) (Obere Grenze der Qualitätsstufe B)

1. Kein unbeabsichtigtes Berühren von Personen auf der Fahrtreppe.
2. Die Fahrtreppe kann mit frei wählbarer Geschwindigkeit betreten werden. Andere Nutzer sind zum Teil zu beachten.
3. Kleinere Rückstaus an der Landestelle.
4. Die Sicht auf den horizontalen Stufenlauf ist frei.
5. Es kann überholt und gegangen werden.

Qualitätsstufe C:



Abbildung 31 Beispielhafte, schematische Darstellung einer Fahrtreppe mit einer Förderleistung von 1,0 Personen/Stufe (75 Personen/min) (Obere Grenze der Qualitätsstufe C)

1. Es kommt zum unbeabsichtigten Berühren von Personen auf der Fahrtreppe.
2. Die Fahrtreppe kann nicht mit frei wählbarer Geschwindigkeit betreten werden. Andere Nutzer sind zu beachten.
3. Es bilden sich Rückstaus an der Landestelle.
4. Die freie Sicht auf den horizontalen Stufenlauf ist oft versperrt.
5. Überholen und Gehen auf der Fahrtreppe sind schwierig.

Qualitätsstufe D:



Abbildung 32 Beispielhafte, schematische Darstellung einer Fahrtreppe mit einer Förderleistung von 1,2 Personen/Stufe (90 Personen/min) (Obere Grenze der Qualitätsstufe D)

1. Es kommt häufig zu unbeabsichtigtem Berühren von Personen auf der Fahrtreppe.
2. Die Fahrtreppe kann nur mit geringer Geschwindigkeit betreten werden. Andere Nutzer bestimmen den Ablauf.
3. Rückstaus an der Landestelle sind unvermeidbar.
4. Die freie Sicht auf den horizontalen Stufenlauf ist versperrt.
5. Überholen und Gehen auf der Fahrtreppe sind nur sehr erschwert möglich.

Qualitätsstufe E:



Abbildung 33 Beispielhafte, schematische Darstellung einer Fahrtreppe mit einer Förderleistung von 1,5 Personen/Stufe (112,5 Personen/min) (Zustand in Qualitätsstufe E)

1. Berührungen von Personen auf der Fahrtreppe sind unvermeidbar.
2. Die Fahrtreppe kann nur mit geringer Geschwindigkeit betreten werden. Andere Nutzer bestimmen den Ablauf.
3. Rückstaus an der Landestelle sind unvermeidbar. Zum Teil kommt es zum Stillstand.
4. Die freie Sicht auf den horizontalen Stufenlauf ist versperrt.
5. Überholen und Gehen auf der Fahrtreppe sind nicht möglich.

7 Integration in VISSIM

7.1 VISSIM

VISSIM ist ein mikroskopisches und raumdiskretes Verkehrssimulations-Programm der Firma PTV AG. Motorisierter Individualverkehr, Güterverkehr, schienen- und straßengebundener öffentlicher Verkehr, Fußgänger und Fahrradfahrer können in einem Modell abgebildet werden. Attribute zu den Verkehrsteilnehmern können individuell eingestellt werden. VISSIM bietet verschiedene Analysemöglichkeiten. So können mit der Simulationssoftware detaillierte numerische Ergebnisse oder auch 3D-Animationen für verschiedene Szenarien ausgegeben werden.

In dieser Arbeit wurde VISSIM in der Version 7.00-06 verwendet.

7.2 Modell

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein einfaches Modell auf zwei Ebenen angelegt. Diese Ebenen werden mit zwei Fahrtreppen miteinander verbunden.

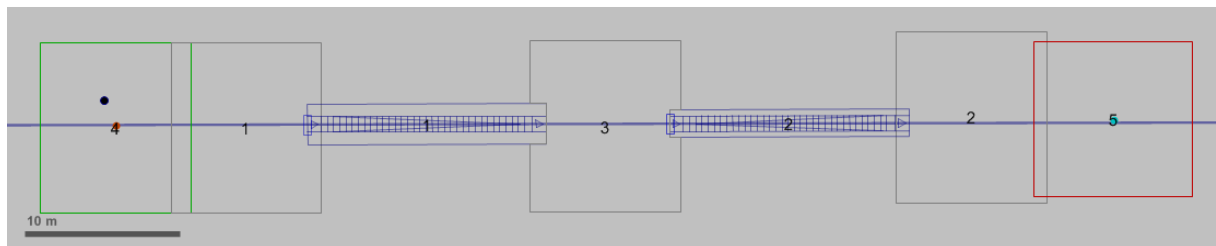


Abbildung 34 Modell der Simulation in 2D

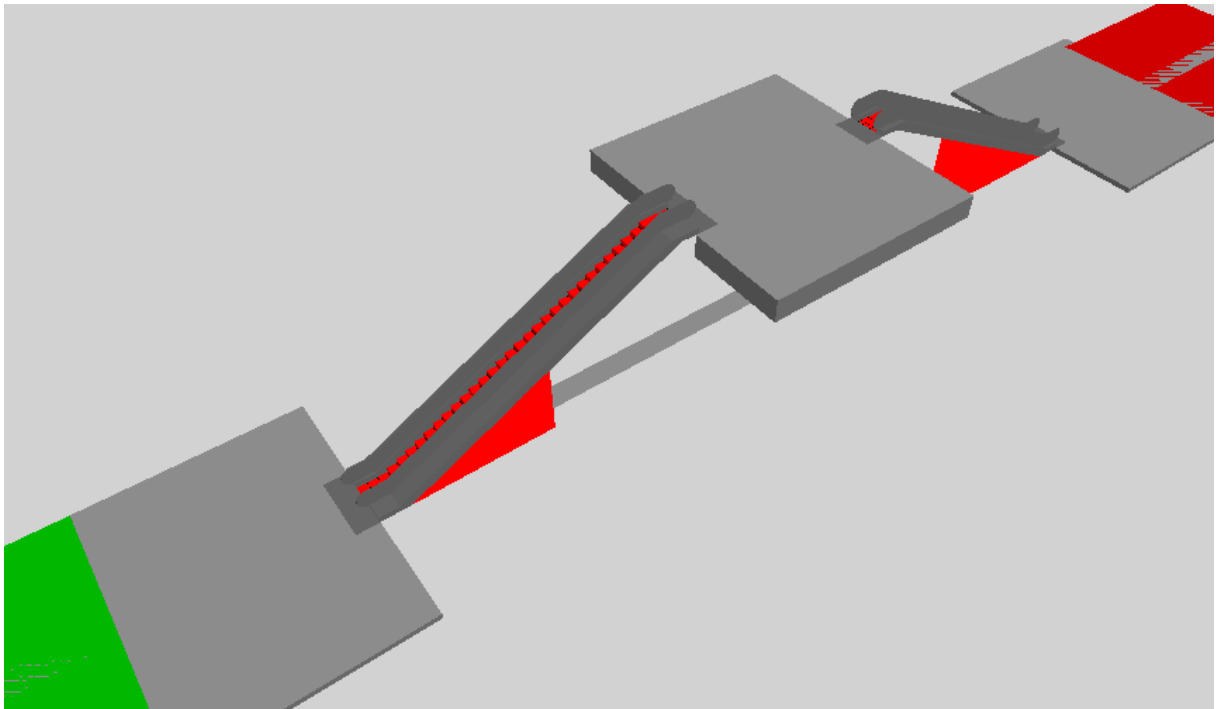


Abbildung 35 Modell der Simulation in 3D

Der Fußgängerzufluss befindet sich in der grünen Fläche 4. Als Ziel ist die rote Fläche 5 definiert.

Die beiden Fahrtreppen werden mit folgenden Parametern gestaltet:

- lichte Durchgangshöhe 2,30 m
- Geschwindigkeit 0,50 m/s
- nutzbare Breite 1,00 m
- Stufentiefe 0,40 m
- Länge ca. 15 m
- Horizontaler Stufenlauf 0,80 m
- Fahrtreppe 1 hat die Fahrtrichtung aufwärts und einen Geheranteil von 10 %
- Fahrtreppe 2 hat die Fahrtrichtung abwärts und einen Geheranteil von 0 %

Die Auswertungen in VISSIM sind aggregierte Werte für wählbare Zeitintervalle. Je kleiner das Intervall, desto größer die nötige Rechnerleistung. Bei den Simulationen im Rahmen dieser Arbeit wurde das Zeitintervall auf 10 Sekunden festgesetzt, da auch die Ergebnisse der Feldstudien vorwiegend für $\Delta t = 10$ s diskutiert wurden.

Neben der Frage der Größe des Zeitintervalls stellt sich auch die Frage nach der Rastergröße. Gewählt wurde ein Raster mit 0,60 m Kantenlänge.

VISSIM bietet für die Auswertung bzw. Visualisierung der Ergebnisse diverse LOS-Schemata an. Für diese Arbeit wurde ein selbstdefiniertes Farbschema für die Visualisierung der Dichten so angelegt, dass die Grenzen den empfohlenen Qualitätsstufen für Fahrtreppen aus Kapitel 6.3 entsprechen.

Qualitätsstufen für Fahrtreppen	Förderleistung		Dichte	Farbe
	[Personen/Stufe]	[Personen/min]	[Personen/m ²]	
A	≤ 0,2	≤ 15,0	≤ 0,50	blau
B	≤ 0,5	≤ 37,5	≤ 1,25	grün
C	≤ 1,0	≤ 75,0	≤ 2,50	gelb
D	≤ 1,2	≤ 90,0	≤ 3,00	orange
E	> 1,2	> 90,0	> 3,00	rot

Tabelle 17 Angepasstes LOS-Farbschema für die Dichte auf Fahrtreppen in der Simulation mit VISSIM

7.3 Auswertung der Simulationen

Um zu untersuchen ob es mit VISSIM möglich ist die Förderleistung einer Fahrtreppe realistisch abzubilden, werden Simulationen mit unterschiedlichen Parametereinstellungen für die Fußgänger ausgewertet. VISSIM bietet zum einen die Möglichkeit, einen Messquerschnitt in den Ebenen zu definieren. Solche Messquerschnitte (Ausschnitte) werden jeweils an die Eintritte der Fahrtreppen definiert (kleine Rechtecke in der Abbildung 34). Zum anderen werden die Kennwerte auf den Fahrtreppen ausgewertet. Diese wurden in Listen dokumentiert und auch visualisiert.

Tabelle 18 zeigt die Änderung der Parameter für die ausgewerteten Simulationsläufe.

VISSIM nutzt das Social-Force-Modell zur Berechnung der Dynamik in Fußgängersimulationen. Dieses Modell beschreibt die Interaktion von Menschen als soziale Kräfte. Fußgänger werden hierbei als selbstgetriebene Teilchen dargestellt. Diese stehen in Wechselwirkung über abstoßende Kräfte (ähnlich den Magneten) mit anderen Fußgängern und Wänden.(Seyfried, 2014)

$$m\ddot{\vec{x}}_i = \vec{F}_i = \vec{F}_i^{drv} + \sum_{j \neq i} \vec{F}_{ij}^{rep} + \sum_w \vec{F}_{iw}^{rep}$$

Formel 18 Bewegungsgleichung für das Social-Force-Modell, Quelle:(Seyfried, 2014)

Die Parameter VD und Tau beeinflussen diese abstoßenden Kräfte. Laut der PTV VISSIM Online-Hilfe ist Tau die Relaxationszeit oder Trägheit, die zu einer Reaktionszeit in Beziehung gesetzt werden kann, da Tau den Unterschied zwischen der Wunschgeschwindigkeit und Wunschrichtung v_0 mit der aktuellen Geschwindigkeit und Richtung v zur Beschleunigung a verknüpft. (PTV AG, 2014)

Simulationslauf	Belastung	Dauer	VD	Zeitintervall	Tau
	[Personen/h]	[min]	[s]	[s]	[-]
1 Standard	4500	20	3,00	10	0,4
2 VD kleiner	4500	20	0,50	10	0,4
3 Tau kleiner	4500	20	3,00	10	0,1
4 Tau kleiner, Belastung erhöht	6500	20	3,00	10	0,1

Tabelle 18 Unterschiedliche Parameter der Simulationen

Aus den Flächenmessungs-Ergebnissen werden die Attribute Dichte (Mittelwert) ρ_{mean} und Geschwindigkeit (Mittelwert) (Alle) v_{mean} genutzt, um daraus den Fluss J_{mean} (bzw. die Förderleistung) für die jeweiligen Zeitintervalle von 10 Sekunden zu berechnen.

$$J_{mean} = \rho_{mean} \cdot v_{mean}$$

Formel 19 Berechnung der Förderleistung aus der Simulation

Für die Rampenauswertung werden ebenfalls die aggregierten Werte für Dichte und Geschwindigkeit zur Berechnung des Flusses genutzt.

Diese Auswertungen $J_{mean}(t)$ für die beiden Flächenmessungen (Ausschnitt 1 und Ausschnitt 2) und für die Rampenmessungen (Fahrtreppe 1 und Fahrtreppe 2) werden als Diagramme im nächsten Kapitel („Ergebnisse der Simulationen“) gezeigt.

7.4 Ergebnisse der Simulationen

7.4.1 Simulation 1

Die erste Simulation wird zur ersten Orientierung mit den Standardwerten für Fußgänger durchgeführt.

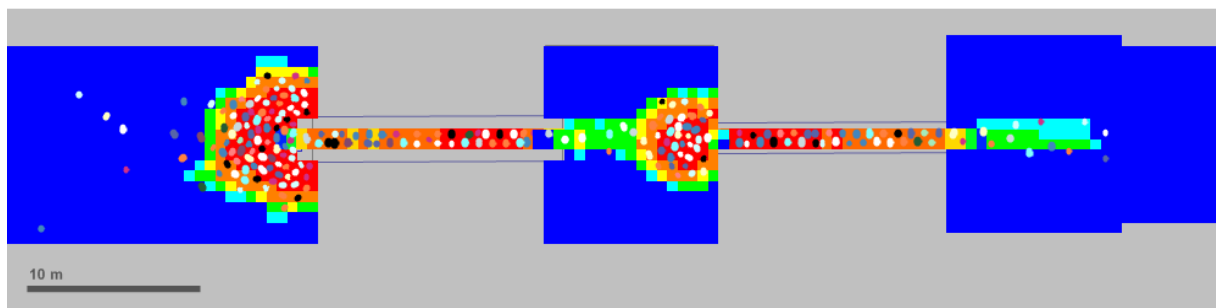


Abbildung 36 Zustand in Simulation 1

Vor beiden Fahrtreppen bilden sich Stauungen. Das bedeutet, dass die Kapazität an diesen Stellen erreicht ist.

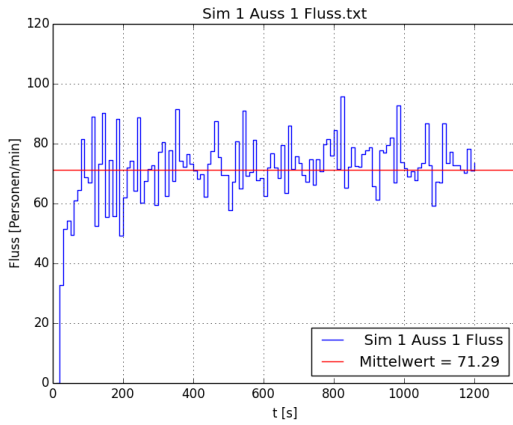


Abbildung 37 Fluss Simulation 1 Ausschnitt 1

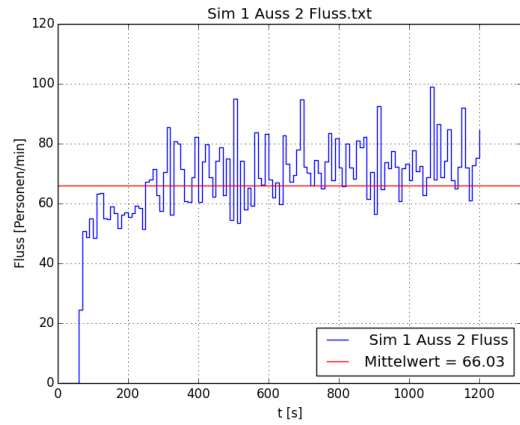


Abbildung 38 Fluss Simulation 1 Ausschnitt 2

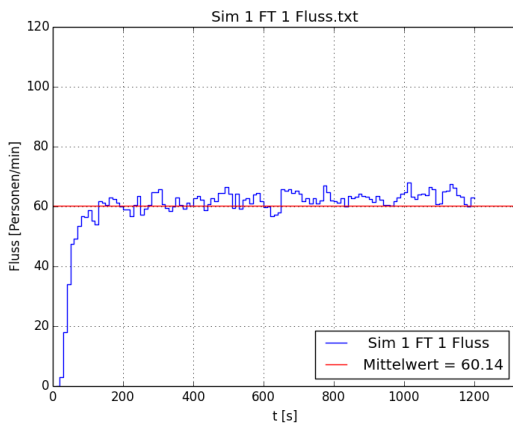


Abbildung 39 Fluss Simulation 1 Fahrtreppe 1

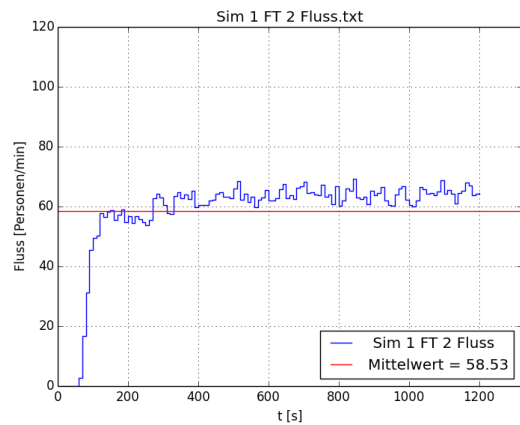


Abbildung 40 Fluss Simulation 1 Fahrtreppe 2

Man erkennt deutlich, dass der Fluss auf den Fahrtreppen in der Simulation unter den gemessenen Höchstförderleistungen von 108 Personen/min liegt. Dies liegt nicht an der Wahl der Fußgängerbelastung, da sich deutliche Stauungen an den Landstellen bilden.

7.4.2 Simulation 2

In der zweiten Simulation wird das Laufverhalten der Fußgänger durch Verkleinerung des Parameters VD geändert.

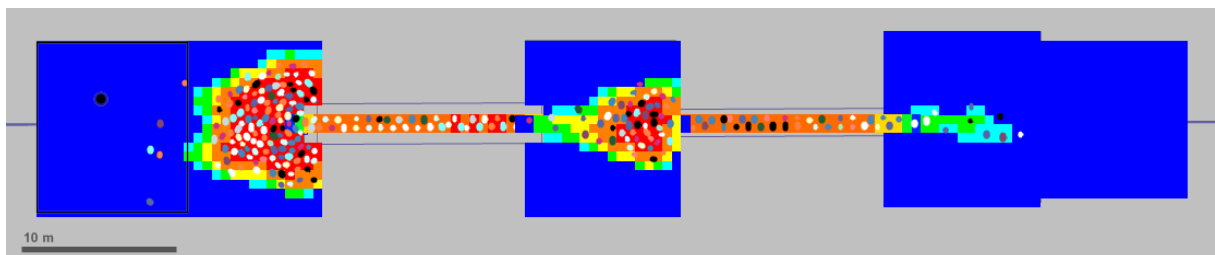


Abbildung 41 Zustand in Simulation 2

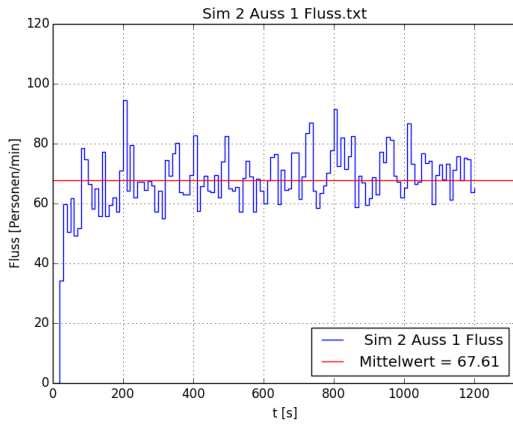


Abbildung 42 Fluss Simulation 2 Ausschnitt 1

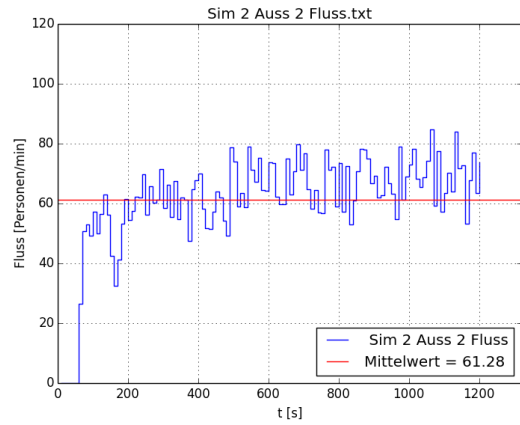


Abbildung 43 Fluss Simulation 2 Ausschnitt 2

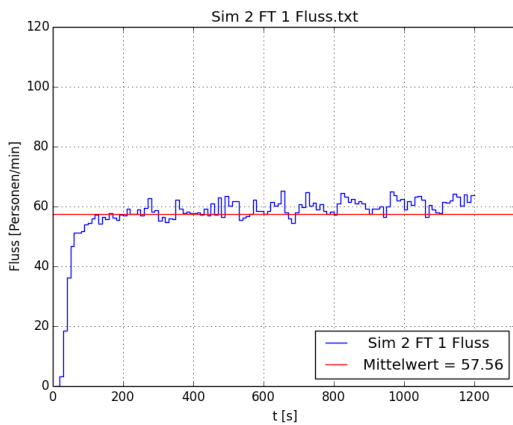


Abbildung 44 Fluss Simulation 2 Fahrtreppe 1

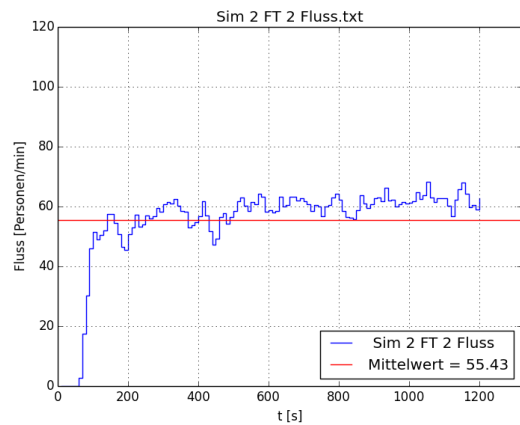


Abbildung 45 Fluss Simulation 2 Fahrtreppe 2

Man erkennt, dass sich dadurch der Fluss nicht stark geändert hat. Über die Simulationszeit von 20 min gemittelt, hat er sich sogar etwas verringert.

7.4.3 Simulation 3

Zwischen Simulation 1 und 2 gibt es keine großen Unterschiede. Also wird in Simulation 3 der Parameter VD wieder auf den Standardwert und der Parameter Tau von 0,4 auf 0,1 gesetzt.

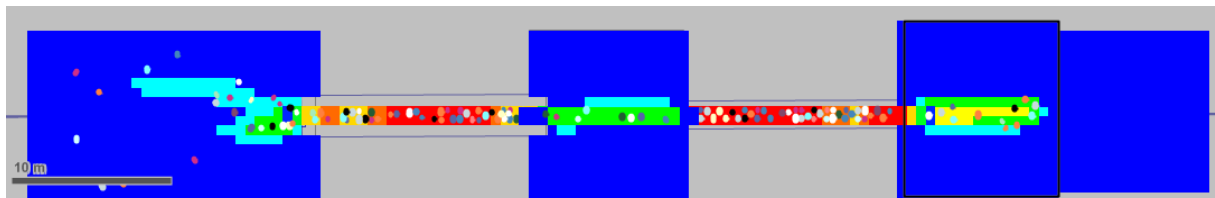


Abbildung 46 Zustand Simulation 3

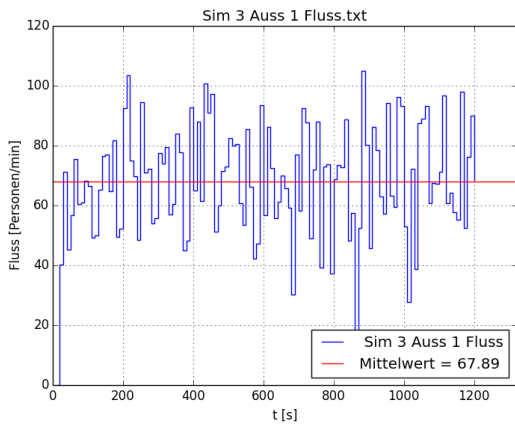


Abbildung 47 Fluss Simulation 3 Ausschnitt 1

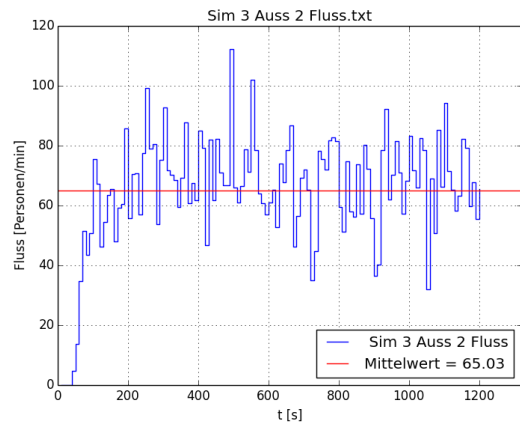


Abbildung 48 Fluss Simulation 3 Ausschnitt 2

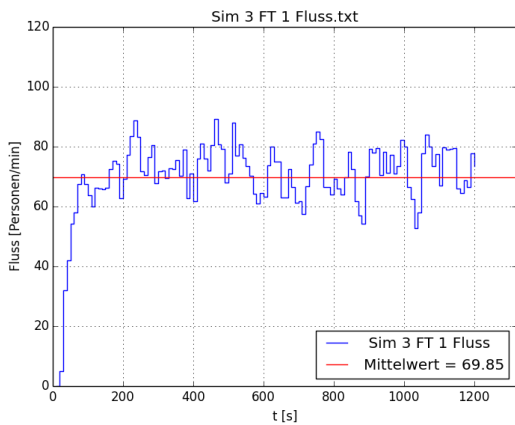


Abbildung 49 Fluss Simulation 3 Fahrtreppe 1

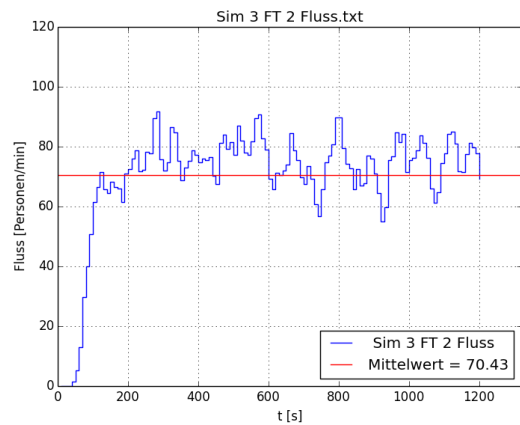


Abbildung 50 Fluss Simulation 3 Fahrtreppe 2

Durch ein geringeres Tau sind größere Dichten in Menschenmassen möglich, da die abstoßenden Kräfte zwischen den einzelnen Fußgängern geringer werden. Die Flüsse, die über die Ausschnitte berechnet werden, ähneln in der Größenordnung den Ergebnissen der Feldstudien. Es bilden sich keine Stauungen an den Landstellen bei $\tau = 0,1$.

7.4.4 Simulation 4

Da sich bei Simulation 3 keine Stauungen vor den Fahrtreppen gebildet haben, wurde in Simulation 4 die Belastung erhöht.

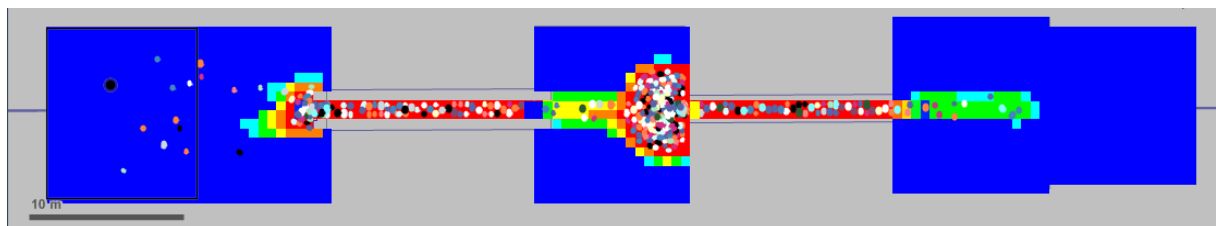


Abbildung 51 Zustand Simulation 4

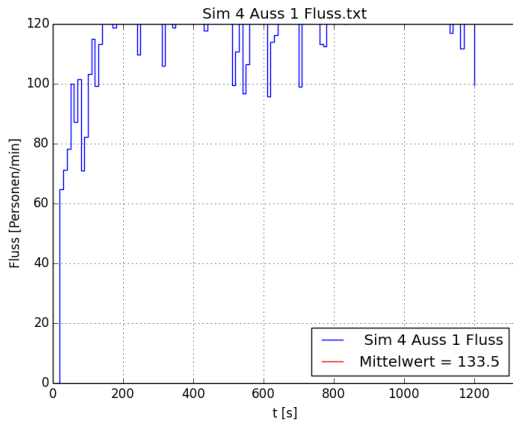


Abbildung 52 Fluss Simulation 4 Ausschnitt 1

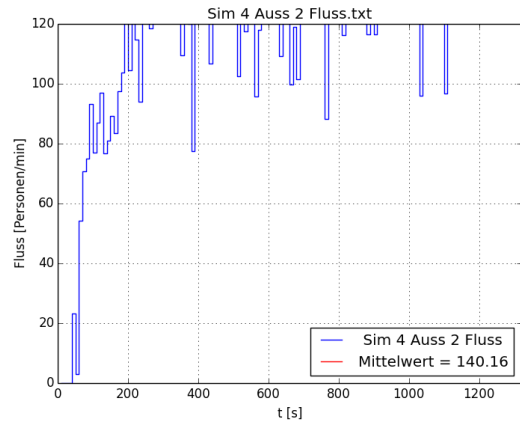


Abbildung 53 Fluss Simulation 4 Ausschnitt 2

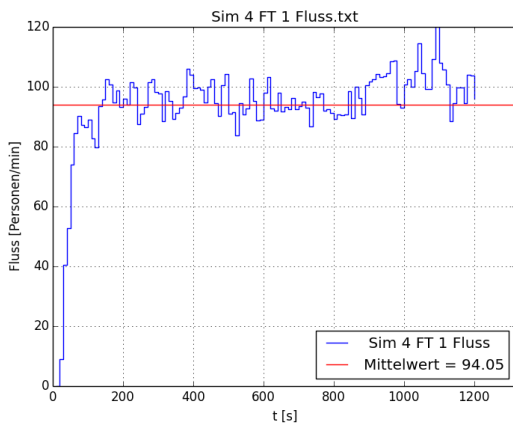


Abbildung 54 Fluss Simulation 4 Fahrtreppe 1

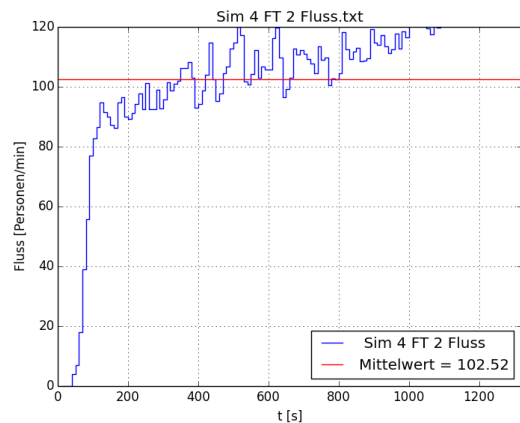


Abbildung 55 Fluss Simulation 4 Fahrtreppe 2

Durch die Erhöhung der Belastung sind auch die Flüsse unrealistisch hoch geworden.

7.4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

In VISSIM können LOS-Schemata einfach angepasst werden.

Das Verhalten der simulierten Fußgänger auf den Fahrtreppen wird mit den Standardeinstellungen nicht ganz realistisch abgebildet. Die ausgewerteten maximalen Förderleistungen auf den simulierten Fahrtreppen liegen unter den Ergebnissen der Feldstudien.

Durch weitere Untersuchungen können aber die Parameter des Laufverhaltens der Fußgänger angepasst werden. Weitere Versuche würden den Rahmen dieser Arbeit aber sprengen.

8 Schlussbetrachtung

8.1 Fazit

In der vorliegenden Arbeit wurden im Kapitel 2 die Grundlagen der Fußgängerdynamik beschrieben, um den Begriff „Kapazität“ zu erklären.

Das darauf folgende Kapitel behandelte das Themenfeld „Fahrtreppe“. Fahrtreppen sind Maschinen, die Personen mit Hilfe eines Förderbandes, das sich zu Stufen ausbildet, zwischen zwei Ebenen in Gebäuden bewegen. Einsatzgebiete für Fahrtreppen sind unter anderem Bahnhöfe und Einkaufszentren.

Die theoretische Förderleistung einer Fahrtreppe errechnet sich aus der Nenngeschwindigkeit v , der Stufentiefe a , der Stufenbreite b und der maximalen Besetzung der Stufen. Für die in dieser Arbeit untersuchten Fahrtreppen (mit $v = 0,5$ m, $a = 0,4$ m und $b = 1,00$ m) beträgt die theoretische Förderleistung 150 Personen/min.

Die tatsächliche Kapazität liegt aber unter diesem Wert. Unterschiedliche Veröffentlichungen zum Thema Leistungsfähigkeit von Fahrtreppen wurden daher ausgewertet. Die empfohlenen praktischen Förderleistungen für diese Fahrtreppentypen liegen zwischen 37,5 und 129 Personen/min.

Durch die Auswertung von Feldstudien (159 Messungen) wurde die tatsächliche Förderleistung von Fahrtreppen in Einkaufszentren und an Bahnhöfen untersucht. In diesem Zusammenhang stellte sich die Frage: Welches Zeitintervall Δt muss für die Analyse betrachtet werden, um gesicherte Aussagen bezüglich der Kapazität treffen zu können? Denn je größer das betrachtete Zeitintervall ist, desto geringer ist die berechnete Förderleistung der ausgewerteten Messungen. Die gemessene maximale Förderleistung lag bei 108 Personen/min für ein betrachtetes Zeitintervall von $\Delta t = 10$ s. Dieser Extremwert lag dennoch unter den höchsten Bemessungskapazitäten aus der Literatur. Deshalb ist davon auszugehen, dass die angegebenen Werte für die Bemessungskapazität (laut den meisten Veröffentlichungen ungefähr 100 Personen/min) deutlich zu hoch sind. Die durchschnittliche Förderleistung lag laut den Messergebnissen bei ca. 70 Personen/min für ein betrachtetes Zeitintervall von nur $\Delta t = 10$ s. Für ein Zeitintervall von $\Delta t = 120$ s betrug die durchschnittliche Förderleistung nur noch ca. 30 Personen/min.

Die Analyse der Feldstudien hat zudem ergeben, dass die Förderleistung in Bahnhöfen grundsätzlich höher ist als in Einkaufszentren. Ebenso ist die Förderleistung für abwärtslaufende Fahrtreppen größer als die für aufwärtslaufende.

Der Zusammenhang zwischen Stauungen an der Landestelle und den Förderleistungen wurde anhand von $J(t)$ -Diagrammen und einem Messvideo erörtert. Eine Stauung an der Landestelle ist demnach kein eindeutiges Zeichen für das Erreichen der Kapazität einer Fahrtreppe.

Die Kapazität einer Fahrtreppe lässt sich nicht über ein Fundamentaldiagramm bestimmen, da die Geschwindigkeit auf der Fahrtreppe kaum individuell ist. Desweiteren bilden sich für gewöhnlich keine Stauungen auf Fahrtreppen. Die Kapazität muss über andere Kenngrößen

ermittelt werden. Im Rahmen der Feldstudien wurde beobachtet, dass die Kapazität einer Fahrtreppe von folgenden Parametern abhängt:

- Kapazität des Zugangs
- Stufenbesetzung
- Platzbedarf der Nutzer und Zusammensetzung des Personenstroms
- Stimmung / Motivation der Nutzer / Einsatzort
- Fahrtrichtung
- Sicherheit und Geschwindigkeit beim Betreten der Fahrtreppe

Fünf Qualitätsstufen für den Verkehrsablauf auf Fahrtreppen wurden empfohlen. Diese stützen sich auf die Messergebnisse und -beobachtungen sowie die Hall'schen Distanzzonen.

Kapitel 7 beschreibt, wie die Messergebnisse in die Simulationssoftware VISSIM der Firma PTV AG integriert werden können. Die empfohlenen Qualitätsstufen lassen sich leicht in die Analyse einbauen. Die notwendigen Einstellungen bezüglich der Kapazitätsanpassung für Fahrtreppen gestalteten sich hingegen schwieriger. Im Rahmen dieser Arbeit kann leider nur aufgezeigt werden, dass die Standardeinstellungen für Fußgängerparameter nicht ausreichen, um die Kapazität von Fahrtreppen nachzuempfinden. Aus den Feldstudien geht hervor, dass Förderleistungen bis 108 Personen/min möglich sind. In der Simulation mit den Standardeinstellungen betragen die größten Förderleistungen trotz massiver Stauungen an den Landstellen knapp 100 Personen/min. Bei solch starken Belastungen wären aber tatsächlich höhere Werte zu erwarten. Dabei ist anzumerken, dass die Feldstudien unter alltäglichen Bedingungen durchgeführt wurden und damit nicht permanent Höchstbelastungen vorlagen. Um die Dichte auf der Fahrtreppe zu erhöhen, wurden Fußgängerparameter verändert, was jedoch zu keinem befriedigenden Ergebnis bezüglich der Fragestellung dieser Arbeit führte.

8.2 Ausblick

Diese Untersuchung der Leistungsfähigkeit von Fahrtreppen hat einerseits Antworten gefunden, andererseits stellen sich weitere, vertiefende Fragen zu dieser Thematik:

Im Rahmen der Feldstudien wurde beobachtet, dass die Kapazität einer Fahrtreppe von den oben genannten Parametern abhängt, welche in weiteren Forschungen genauer untersucht werden sollten.

Die Methodik bei den Feldstudien sollte so angepasst werden, dass auch die oben genannten Parameter erfasst werden. Dies ist zum Beispiel durch Über-Kopf-Videos möglich. Durch solche Videos kann das Verhalten der Fußgänger beim Betreten der Fahrtreppe beobachtet und ausgewertet werden. Da die Stufenbesetzung maßgebend für die Förderleistung ist, sollte auch jene genauer protokolliert und untersucht werden.

Das ideale, zu betrachtende Zeitintervall bei der Auswertung der Messergebnisse und dessen Aussagekraft für die tatsächliche Förderleistung wurde noch nicht zufriedenstellend analysiert und bedarf noch weiterer Forschung.

Die Grenzen der empfohlenen Qualitätsstufen sollten in weiteren Studien verifiziert werden. Zu dieser Thematik sollten auch Befragungen der Nutzer von Fahrtreppen durchgeführt und ausgewertet werden, um das subjektive Empfinden genauer zu verstehen.

Da die Anpassung der Attribute der mit VISSIM simulierten Fußgänger in dieser vorliegenden Arbeit nicht abschließend untersucht werden konnten, sollten auch in diesem Bereich weitere Forschungen stattfinden.

Literaturverzeichnis

- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV). (2009). HBS. *Handbuch für die Bemessung von Verkehrsanlagen*. (FGSV, Hrsg.) Köln: FGSV Verlag.
- Bodendorf, H., Osterkamp, M., Seyfried, A., & Holl, S. (2014). *Field Studies on the Capacity of Escalators*. Wuppertal: Elsevier B.V.
- British Standard. (2004-11). BS 5656-2:2004. *Escalators and moving walks - Safety rules for the construction and installation of escalators and moving walks - Part 2: Code of practice for the selection, installation and location of new escalators and moving walks*. BSI.
- Deutsche Bahn. (05-2012). DB RIL 813.0202A01. *Bemessung der Bahnsteigzugangsbreiten nach Reisendenaufkommen*. DB Station&Service AG.
- Deutsches Institut für Normierung e.V. (2010-06). DIN EN 115-1. *Sicherheit von Fahrtreppen und Fahrsteigen - Teil 1: Konstruktion und Einbau ; Deutsche Fassung EN 115-1:2008+A1:2010*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Friedrich, F., & Seyfried, A. (2010). *Vorlesungsfolien "Evakuierung" Wintersemester 2010/2011*. Bergische Universität Wuppertal.
- Fruin, J. J. (1971). *Pedestrian - Planning and Design*. University of Michigan: Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners.
- Hall, & E.T. (1976). *Die Sprache des Raumes*. Düsseldorf: Schwann.
- Holl, S., & Seyfried, A. (2014). *Vorlesungsfolien "Fahrtreppen und Treppen - Projekt", Sommersemester 2014*. Bergische Universität Wuppertal.
- Janßen, D.-I. W. (1970). *Treppen - Aufzüge - Fahrtreppen Untersuchungen über Anlage- und Betriebskosten, Fahrzeit, Leistungsfähigkeit und Platzbedarf von Einrichtungen für den vertikalen Personenverkehr in Geschößbauten*. Braunschweig: Fakultät für Bauwesen der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.
- KONE. (2010). Katalog "Rolltreppen ABC - KONE Rolltreppen & Rollsteige" ((pdf-download von www.kone.de)). Hannover: KONE.
- Mihm, A. (2005). *Die Rolltreppe. Kulturwissenschaftliche Studien zu einem mechanisch erschlossenen Zwischenraum*. Bad Salzungen: Philipps-Universität Marburg.
- Oeding, D. (1963). *Verkehrsbelastung und Dimensionierung von Gehwegen und anderen Anlagen des Fußgängerverkehrs*. Institut für Stadtbauwesen, Technische Hochschule Braunschweig. Braunschweig - Bonn: Strassenbau und Strassenverkehrstechnik (Heft 22), Herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau.
- OTIS. (2014). *Planungshandbuch - Projektierung von Fahrtreppen und Fahrsteigen* (pdf-download von www.otis.de). OTIS.

- Predtecenskij, V. M., & Milinskij, A. I. (1971). *Personenströme in Gebäuden - Berechnungsmethoden für die Projektierung*. Köln-Braunsfeld: Müller.
- PTV AG. (2014). VISSIM Onlinehilfe.
- Rogsch, C. (2013). Pedestrians and Escalators: Usage Under Normal Conditions. In V. K. (eds.), *Traffic and Granular Flow '11* (S. 299-304). Berlin - Heidelberg: Springer-Verlag.
- Schindler. (2014). Katalog "Planungsleitfaden für Fahrtreppen und Fahrsteige" (pdf-download unter www.schindler.de). Berlin: Schindler Aufzüge und Fahrtreppen GmbH.
- Seyfried, A. (2014). *Vorlesungsfolien "Evakuierungssimulationen" Sommersemester2014*. Bergische Universität Wuppertal.
- ThyssenKrupp Elevator. (2014). *Katalog "Planungsgrundlagen für Fahrtreppen und Fahrsteige - Der universelle Leitfaden für ThyssenKrupp Elevator (ES/PBB)-Produkte (pdf-download unter www.thyssenkrupp-escalator.com)*. ThyssenKrupp.
- Weidmann, U. (1993). *Transporttechnik der Fußgänger - Transporttechnische Eigenschaften des Fußgängerverkehrs (Literaturauswertung) (Zweite, ergänzte Auflage Ausg.)*. (T. S.-u. Institut für Verkehrsplanung, Hrsg.) Zürich: Schriftenreihe des IVT Nr.90.
- Westphal, J. (1971). *Untersuchungen von Fußgängerbewegungen auf Bahnhöfen mit starkem Nahverkehr*. Hannover: Lehrstuhl und Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb, Technische Universität Hannover.