



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Experimentelle Bestimmung von Druckverlusten in
Sicherheitstreppe nräumen unter Berücksichtigung wesentlicher
baulicher Merkmale

vorgelegt von

Magda-Lena Siemers

Matrikelnummer: 1961582

in Hamburg

am 08. Oktober 2012

Gutachter: Prof. Dr.

Rainer Stank

Gutachter: Dr.- Ing.

Thomas Winkler

Diese Abschlussarbeit wurde betreut und erstellt in Zusammenarbeit mit der Firma
Imtech Deutschland GmbH & Co. KG

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig verfasst und keine anderen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe, als angegeben.

Alle wörtlich und sinngemäß übernommenen Textstellen habe ich als solche kenntlich gemacht.

.....

[Ort, Datum, Unterschrift]

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit ergreifen und mich bei den Personen bedanken, die mich während der Erstellung meiner Bachelorarbeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Rainer Stank, der stets für mich ansprechbar war und mir beratend zur Seite stand.

Des Weiteren möchte ich mich bei dem gesamten Kollegium der Forschung und Entwicklung der Firma Imtech Deutschland GmbH & Co. KG für die fachliche und tatkräftige Unterstützung bedanken, ohne die diese Bachelorarbeit nicht hätte entstehen können. Im Speziellen danke ich Herrn Dr.- Ing. Thomas Winkler für die gewissenhafte Betreuung dieser Arbeit.

Außerdem bin ich meiner Familie und meinen Freunden unter anderem für die moralische Unterstützung zu tiefem Dank verpflichtet.

Kurzfassung

In dieser Bachelorarbeit wird der Druckverlust von Treppenraummodellen verschiedener Geländer, Lauf- und Augenbreiten bestimmt. Spezifische Druckverlustbeiwerte und Effektivflächen werden für 21 Treppenräume ermittelt und in den folgenden Formeln zusammengefasst.

Treppenräume mit einem Handlauf:

$$A_{eff} = 4,68 \cdot b_A + 4,02 \cdot b_T - 3,57$$

Treppenräume mit einer Brüstung:

$$A_{eff} = 4,96 \cdot b_A + 3,14 \cdot b_T - 1,69$$

Treppenräume mit einem geschlossenen Treppenauge:

$$A_{eff} = 2,2 \cdot b_T - 0,34$$

$$(b_A > 0,3 \text{ m})$$

Diese Formeln gelten für Treppenräume mit einer Geschosshöhe $h_G = 3,75 \text{ m}$ und einem Treppenverlauf, bei dem die oberste Stufe jeder Treppe eben an den Podesten anschließt. In der Arbeit sind verschiedene Treppenverläufe erläutert.

Es wird ein Vergleich mit ähnlichen formalen Zusammenhängen von RAHN dargestellt [12]. Mithilfe eines Treppenraummodelles wird der spezifische Druckverlustbeiwert eines Treppenraumes im Tower 185 (Frankfurt/M.) bestimmt. Dieser Wert wird mit den Ergebnissen einer Vor-Ort-Messung verglichen. Des Weiteren werden die ermittelten Druckverluste denen einer numerischen Strömungssimulation gegenübergestellt [1].

Schlussendlich wird der Einfluss wesentlicher Treppenraumgeometrien auf den Druckverlust dargestellt. Dies geschieht direkt anhand der Ergebnisse aus den Modellversuchen und indirekt durch die erwähnten Gegenüberstellungen mit Referenzwerten.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung.....	I
Danksagung.....	II
Kurzfassung.....	III
Symbolverzeichnis.....	VI
Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
Abbildungsverzeichnis.....	IX
Tabellenverzeichnis.....	XI
1. Einleitung.....	1
2. Aufgabenstellung.....	3
3. Grundlagen.....	4
3.1 Physikalische Grundlagen.....	4
3.1.1 Bernoulli-Gleichung und verschiedene Druckbegriffe.....	4
3.1.2 Druckverlust.....	5
3.1.3 Thermischer Auftrieb.....	8
3.2 Ähnlichkeitstheorie.....	11
3.3 Maßstabsfaktoren.....	12
3.4 Strömungsformen.....	14
3.5 Wesentliche Merkmale eines Treppenraumes.....	15
3.6 Wichtige Begriffe des Brandschutzes.....	19
3.7 Gesetze und Normen des Brandschutzes in Hochhäusern.....	21
3.8 Tower 185.....	22
3.8.1 Allgemeine Informationen.....	22
3.8.2 Aufbau des Treppenraumes.....	23
4. Versuchsaufbau.....	26
4.1 Versuchsmodell.....	26
4.2 Bau des Modells.....	29
4.3 Modellvarianten.....	31
4.3.1 Modellvariante Handlauf.....	34
4.3.2 Modellvariante Brüstung.....	34

4.3.3	Modellvariante verschlossenes Treppenauge	35
4.4	Messtechnik.....	36
4.4.1	Bestimmung des Zuluftvolumenstromes	36
4.4.2	Bestimmung des Differenzdruckes	37
5.	Ergebnisse der Untersuchung, Berechnung, Betrachtung	39
5.1	Berechnung der Effektivfläche und des spezifischen Druckverlustbeiwertes des Towers 185	39
5.2	Ergebnisse.....	42
5.3	Analyse der Ergebnisse	44
6.	Bewertung, Vergleich mit Referenzergebnissen	47
6.1	Kritische Betrachtung der Ergebnisse.....	47
6.1.1	Mögliche Fehlerquellen im Zuge der Versuchsplanung.....	47
6.1.2	Mögliche Fehlerquellen bedingt durch den Modellbau	50
6.1.3	Bewertung möglicher Fehlerquellen	50
6.2	Bewertung der ermittelten Formeln	51
6.3	Vergleich der Ergebnisse mit ähnlichen Untersuchungen.....	52
6.3.1	Untersuchungen von RAHN	53
6.3.2	Numerische Strömungssimulation (CFD)	61
6.3.3	Vor-Ort-Messung	71
7.	Fazit	75
8.	Ausblick und weiteres Vorgehen.....	79
9.	Quellenverzeichnis	81

Symbolverzeichnis

Arabische Zeichen	Einheit	Bezeichnung
A	m^2	Fläche
C	$\frac{m^3}{hPa^{0,5}}$	Blendenkonstante
E	–	Ebene
Eu	–	Euler-Zahl
F	N	Kraft
R	$\frac{J}{kgK}$	Gaskonstante
Re	–	Reynolds-Zahl
T	K	Temperatur
\dot{V}	$\frac{m^3}{s}$	Volumenstrom
b	m	Breite
f_i	–	Maßstabsfaktor der Größe i
d	mm	Durchmesser
g	$\frac{m}{s^2}$	Erdbeschleunigung
h	m	Höhe
k	mm	Rohrrauigkeit
l	m	(charakteristische) Länge
m		Steigung einer Geraden
n		y-Achsenabschnitt einer Geraden
p	Pa	Druck
Δp	Pa	Druckdifferenz
r	mm	Radius
t	m	Tiefe
w	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit
\bar{w}	$\frac{m}{s}$	charakteristische Geschwindigkeit
x, y		kartesische Koordinaten
z	m	Abstand

Griechische Zeichen	Einheit	Bezeichnung
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	Dichte
λ	–	Rohrreibungszahl
ν	$\frac{m^2}{s}$	kinematische Viskosität
ζ	–	Druckverlustbeiwert
ζ^*	$\frac{1}{m}$	spezifischer Druckverlustbeiwert

Indizes	Bezeichnung
<i>A</i>	(Treppen-) Auge
<i>G</i>	Geschoss
<i>M</i>	Modell
<i>O</i>	Original
<i>P</i>	Podest
<i>S</i>	Stufe
<i>T</i>	Treppe
<i>V</i>	Verlust
<i>a</i>	außen
<i>ab</i>	Abluft-
<i>dyn</i>	dynamisch
<i>eff</i>	Effektiv-
<i>hydro</i>	hydrostatisch
<i>i</i>	innen
<i>krit</i>	kritisch
<i>leck</i>	Leckluft-
<i>max</i>	maximal
<i>stat</i>	statisch
<i>t</i>	Total-
<i>w</i>	Wirk-
<i>zu</i>	Zuluft-
%	prozentualer Anteil

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
Abs.	Absatz
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung
LBO	Landesbauordnung
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
MBO	Musterbauordnung
MHHR	Muster-Hochhaus-Richtlinie
NF	neutrale Fläche
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
bzw.	beziehungsweise
const	konstant
u.a.	unter anderem
vgl.	vergleiche

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: schematisches Strömungsbild durch einen Treppenraum [5]	2
Abbildung 3-1: Veranschaulichung der Bernoulli-Gleichung	6
Abbildung 3-2: Bezugsfläche	7
Abbildung 3-3: höhenabhängiger Druckverlauf im Winter [10]	9
Abbildung 3-4: höhenabhängiger Differenzdruck [10]	10
Abbildung 3-5: schematisches Strömungsbild eines Treppenraumes im Winter [4]	10
Abbildung 3-6: Rohrströmungen, (oben: laminar, unten: turbulent) [2]	14
Abbildung 3-7: Colebrook-Nikuradse-Diagramm [6]	15
Abbildung 3-8: Seitenansicht eines Treppenraumes	16
Abbildung 3-9: Schnitt durch ein Treppenhaus aus der Vogelperspektive	16
Abbildung 3-10: Detaildarstellung einer Treppenstufe	16
Abbildung 3-11: Treppenverlauf Nummer 1 [7]	17
Abbildung 3-12: Treppenverlauf Nummer 2 [7]	17
Abbildung 3-13: Treppenverlauf Nummer 3 [7]	18
Abbildung 3-14: Treppenverlauf Nummer 4 [7]	18
Abbildung 3-15: Funktionsweise einer Druckbelüftungsanlage [10]	20
Abbildung 3-16: Außenansicht des Towers 185 [9]	23
Abbildung 3-17: Grundriss des Treppenraumes und seiner Schleuse [8]	23
Abbildung 3-18: Zuluftführung im Treppenraum des Towers 185 [8]	24
Abbildung 4-1: Grundriss eines Regelstockwerkes [8]	27
Abbildung 4-2: Seitenansicht eines Regelstockwerkes [8]	27
Abbildung 4-3: Versuchsaufbau	28
Abbildung 4-4: Schnitt durch die Luftkiste	28
Abbildung 4-5: Treppenraum mit montierten Podesten	29
Abbildung 4-6: Modell mit Podesten und Treppen	30
Abbildung 4-7: verspanntes Treppenraummodell	30
Abbildung 4-8: Darstellung der drei Geländervarianten	33
Abbildung 4-9: Treppenraummodell der Variante Handlauf	34
Abbildung 4-10: minimale Geländerrhöhen nach [3]	34
Abbildung 4-11: Versuchsmodell mit eingebauter Brüstung	35
Abbildung 4-12: Versuchsmodell mit verschlossenem Treppenauge	35
Abbildung 4-13: Darstellung der Ebenen, über denen der Differenzdruck gemessen wird	37
Abbildung 4-14: Positionen der Druckmessstellen	38
Abbildung 5-1: Druckverlust eines Geschosses über dem Quadrat des Volumenstromes	41
Abbildung 5-2: spezifische Druckverlustbeiwerte ($bT = 1,25 m$)	44
Abbildung 5-3: spezifische Druckverlustbeiwerte ($bT = 1,35 m$)	44
Abbildung 5-4: Effektivflächen ($bT = 1,25 m$)	45
Abbildung 5-5: Effektivflächen ($bT = 1,35 m$)	45

Abbildung 6-1: Strömungsrichtungen und –geschwindigkeiten [1]	49
Abbildung 6-2: Vergleich der Effektivflächen ($bT = 1,25\ m$)	54
Abbildung 6-3: Vergleich der Effektivflächen ($bT = 1,35\ m$)	55
Abbildung 6-4: höhenabhängige Effektivflächen [10]	56
Abbildung 6-5: Treppenverlauf Nummer 1 (links) und Nummer 4 (rechts)	56
Abbildung 6-6: Abhängigkeit der Effektivfläche von der Augen- und der Laufbreite nach RAHN.....	59
Abbildung 6-7: Abhängigkeit der Effektivfläche von der Laufbreite nach RAHN	60
Abbildung 6-8: mögliches Berechnungsgitter aus der Vogelperspektive [1].....	61
Abbildung 6-9: mögliches Berechnungsgitter; Seitenansicht [1].....	62
Abbildung 6-10: Modellvariante der Simulation mit einem Handlauf [1]	63
Abbildung 6-11: Modellvariante der Simulation mit einer Brüstung; Seitenansicht [1]	63
Abbildung 6-12: Modellvariante der Simulation mit einer Brüstung [1]	63
Abbildung 6-13: Modellvariante der Simulation mit einem verschlossenen Treppenauge [1].....	64
Abbildung 6-14: Druckverteilung über der 11., 12. und 13. Etage der Variante mit einem Handlauf	65
Abbildung 6-15: parallel geschaltete Widerstände	72
Abbildung 6-16: Strömungsverlauf durch den Zuluftkanal.....	73
Abbildung 7-1: Abhängigkeit der Effektivfläche von der Augenbreite ($bT = 1,25\ m$)	76
Abbildung 7-2: Einfluss der Laufbreite bei montiertem Handlauf.....	77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Maßstabsfaktoren des Modellversuches	13
Tabelle 4-1: Versuchsvarianten	32
Tabelle 5-1: Zwischenergebnisse der Messwertanalyse.....	40
Tabelle 5-2: Übersicht der Versuchsergebnisse.....	43
Tabelle 6-1: Vergleich der Ergebnisse ($bT = 1,35 m$).....	51
Tabelle 6-2: Vergleich der Ergebnisse ($bT = 1,25 m$).....	52
Tabelle 6-3: Gegenüberstellung der Effektivflächen ($bT = 1,35 m$)	58
Tabelle 6-4: Gegenüberstellung der Effektivflächen ($bT = 1,25 m$)	58
Tabelle 6-5: Übersicht der spezifischen Druckverlustbeiwerte der Simulation bei einem montierten Handlauf	66
Tabelle 6-6: spezifische Druckverlustbeiwerte der unterschiedlichen Modellvarianten	66
Tabelle 6-7: gitterunabhängige Ergebnisse der Simulation	67
Tabelle 6-8: Gegenüberstellung der in den Tabellen 6-3 und 6-5 dargestellten spezifischen Druckverlustbeiwerte.....	67
Tabelle 6-9: volumenstromabhängige Ergebnisse der Simulation	68
Tabelle 6-10: durchschnittliche spezifische Druckverlustbeiwerte der 11. bis 48. Etage	69
Tabelle 6-11: Gegenüberstellung der spezifischen Druckverlustbeiwerte, Simulation/ Vor-Ort-Messung	74

1. Einleitung

Immer wieder sterben Menschen durch Gebäudebrände, wobei die Gefahr grundsätzlich nicht direkt vom Feuer ausgeht. Gefährlicher als die Flammen des Feuers, ist der entstehende Brandrauch. Dieser besteht aus Gasen, Rußpartikeln und kleinen Tropfen, die zum größten Teil toxisch sind. Aufgrund des Sauerstoffmangels im Brandrauch und der hohen Konzentration an Kohlenstoffmonoxid und –dioxid reichen oft schon drei Atemzüge dieses Gemisches aus, um bewusstlos zu werden. Als Folge der Ohnmacht ersticken die meisten Brandopfer. Damit Menschen sich bei einem Brand in Sicherheit bringen können und ein Löschangriff der Feuerwehr gezielt erfolgen kann, ist eine effektive Ableitung des Brandrauches besonders wichtig.

Je höher ein Gebäude ist, umso mehr Menschen können sich in diesem aufhalten und umso länger werden die Fluchtwege. In Hochhäusern muss die Entfluchtung über Treppenräume erfolgen. Ein brandschutztechnisches Konzept zur Rauchfreihaltung von Treppenräumen in Hochhäusern ist aus sicherheitstechnischen Gründen daher zwingend geboten. Sicherheitstreppenräume müssen aus diesem Grunde neben der Brandbeständigkeit der Baumaterialien auch mit technischen Anlagen ausgestattet sein, die das Eindringen von Feuer und Rauch zuverlässig verhindern. In Sicherheitstreppenräumen werden dazu Druckbelüftungsanlagen installiert, welche dafür sorgen, dass der Treppenraum und seine Vorräume im Vergleich zu den angrenzenden Geschossen unter Überdruck stehen.

Druckbelüftungsanlagen fördern einen definierten Luftvolumenstrom in einen Treppenraum. Über eine Überdruckklappe im Treppenraumkopf wird ein Druckniveau im Treppenraum eingestellt. Fluchttüren müssen gegen den im Treppenraum herrschenden Überdruck geöffnet werden. Damit die Türöffnungskräfte nicht zu groß werden, darf der maximale Überdruck 50 Pa nicht übersteigen. Aufgrund des Überdruckes strömt bei geöffneten Türen ein Luftstrom aus dem Treppenraum in die angrenzenden Geschosse. Die Abströmgeschwindigkeit dieses Sperrluftstromes durch die Türen des Sicherheitstreppenraumes muss mindestens 2,0 m/s betragen, um im Brandfall einen Raucheintritt in den Treppenraum zu verhindern.

Wie Abbildung 1-1 zeigt, sind die Strömungsvorgänge in Sicherheitstreppenräumen komplex.

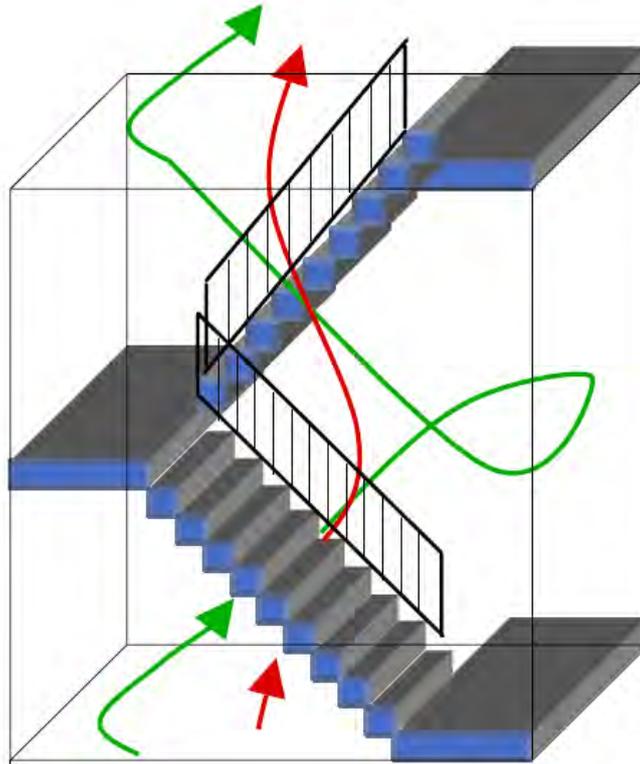


Abbildung 1-1: schematisches Strömungsbild durch einen Treppenraum [5]

Vereinfacht, bestehen sie aus Überlagerungen einer Strömung, welche dem Treppenverlauf folgt (grüne Strömung in Abbildung 1-1) und einer weiteren Strömung, welche hauptsächlich durch das Treppenauge strömt (rote Strömung in Abbildung 1-1). Als Treppenaug wird der Luftraum bezeichnet, welcher durch die Treppenläufe und die Podeste begrenzt wird.

Wie in anderen durchströmten Objekten, erzeugen unter anderem Verwirbelungen und Reibungen der Strömung einen Druckverlust in dem jeweiligen Objekt. Die Druckverluste sind für die Auslegung von strömungstechnischen Anlagen von großer Bedeutung. Für gebräuchliche Strömungseinbauten werden Druckverlustbeiwerte ermittelt und tabellarisch zusammengefasst. Druckverluste in klassischen Strömungsanlagen lassen sich daher meistens mit überschaubarem Aufwand berechnen. Nur mit der Kenntnis über den Druckabfall in Treppenräumen können die zur Rauchfreihaltung notwendigen Volumenströme der Druckbelüftungsanlagen bestimmt werden. Die Schwierigkeit bei der Auslegung von diesen besteht jedoch darin, dass es kein solches Tabellenwerk für Druckverlustbeiwerte von Treppenräumen gibt. Um Druckverluste zu bestimmen, müssen die Strömungen in den jeweiligen Treppenräumen computergestützt berechnet oder anhand eines Versuchsmodelles analysiert werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, durch Experimente an verschiedenen Modellvarianten eines Treppenraumes die Abhängigkeit des Druckverlustes von typischen Treppenraumgeometrien zu untersuchen.

2. Aufgabenstellung

Gegenstand dieser Bachelorarbeit ist die experimentelle Untersuchung von Modellvarianten verschiedener Treppenräume, bei denen wesentliche bauliche Merkmale systematisch verändert werden, um so ihren Einfluss auf den im durchströmten Treppenraum entstehenden Druckverlust zu analysieren. Sowohl die Geländergestaltung, als auch die Augen- und Laufbreiten sollen verändert werden. Als Geländerausführungen werden drei verschiedene Varianten mit einem Handlauf, einer Brüstung und einem komplett verschlossenem Treppenauge festgelegt.

Unter anderem soll ein bereits existierender Treppenraum des Towers 185 (Frankfurt/M.) im Modell nachgebaut werden, um die Ergebnisse des Modellversuchs mit Messungen zu vergleichen, welche vor Ort in diesem Treppenraum durchgeführt wurden. Teilweise werden zeitgleich zu der Anfertigung dieser Arbeit numerische Strömungssimulationen durchgeführt [1]. Auch diese befassen sich mit der Analyse des Strömungsverlaufes in einem Treppenraum des Towers 185. Die Ergebnisse des Modellversuches sollen direkt mit denen der Simulation verglichen werden.

Der Einfluss der Treppenraumgeometrien auf den Druckverlust in Treppenräumen ist letztendlich in einem funktionalen Zusammenhang zusammenzufassen. Dieser soll mit den von RAHN [12] bestimmten Formeln verglichen werden, welche das Abschätzen von Druckverlusten in Treppenräumen ermöglichen sollen.

3. Grundlagen

In diesem Kapitel werden sowohl physikalische Zusammenhänge erklärt, als auch relevante Begriffe beschrieben, um den Kontext dieser Arbeit verständlicher zu machen.

3.1 Physikalische Grundlagen

3.1.1 Bernoulli-Gleichung und verschiedene Druckbegriffe

Druck setzt sich definitionsgemäß aus einer senkrecht auf eine Fläche wirkenden Kraft pro Flächeneinheit zusammen:

$$p = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

Auf einem als starr betrachteten Masseteilchen, welches sich entlang einer Stromlinie bewegt, wirken folgende Kräfte:

- die Trägheitskraft
- die Gewichtskraft
- die Druckkraft
- die Reibungskraft

Wird an diesem Masseteilchen eine Kräftebilanz unter der Annahme einer reibungsfreien Strömung durchgeführt, so ergibt sich nach einigen Umformungen und Vernachlässigungen schließlich die Bernoulli-Gleichung:

$$\frac{p_i}{\rho} + g \cdot z_i + \frac{w_i^2}{2} = const \quad (3.2)$$

Die genaue Herleitung kann der Literatur entnommen werden. Siehe hierfür [2].

Hier steht der Index i für eine bestimmte Stelle entlang der Stromlinie. Es gibt verschiedene Schreibweisen der Bernoulli-Formel. Formel (3.2) zeigt die Energieform. Sie beschreibt die Energieerhaltung inkompressibler, verlustfreier, stationärer Strömungen und besagt, dass die Summe der Druck-, der potentiellen und der kinetischen Energie konstant bleibt.

Durch Multiplikation der Formel (3.2) mit der Dichte ergibt sich die Druckform der Bernoulli-Gleichung:

$$p_i + \rho \cdot g \cdot z_i + \frac{\rho}{2} \cdot w_i^2 = \text{const} \quad (3.3)$$

An ihr lassen sich verschiedene Druckbegriffe erklären. Als statischer Druck wird die Summe der ersten beiden Terme bezeichnet.

Statischer Druck:
$$p_{stat} = p_i + \rho \cdot g \cdot z_i \quad (3.4)$$

Hier stellt wiederum der zweite Summand den hydrostatischen Druck dar, welcher die Höhenabhängigkeit des Druckes widerspiegelt.

Hydrostatischer Druck:
$$p_{hydro} = \rho \cdot g \cdot z_i \quad (3.5)$$

Der letzte Term der Bernoulli-Gleichung ist der geschwindigkeitsabhängige dynamische Druck.

Dynamischer Druck:
$$p_{dyn} = \frac{\rho}{2} w_i^2 \quad (3.6)$$

Die Summe aus dem statischen und dem dynamischen Druck wird auch als Totaldruck bezeichnet.

Totaldruck:
$$p_t = p_{stat} + p_{dyn} \quad (3.7)$$

3.1.2 Druckverlust

Voraussetzung für die in Gleichung (3.3) dargestellte Bernoulli-Gleichung, ist die stationäre, inkompressible, verlustfreie Strömung. In der Realität treten in Strömungen Verluste auf, welche aus Reibungen, Ablösungsvorgängen und Umlenkungen der Strömung resultieren. Durch die Analyse einer horizontalen Strömung in einem Rohr mit konstantem Querschnitt wird deutlich, dass sich diese Verluste ausschließlich in einem Druckabfall äußern können.

Aufgrund der Massenerhaltung ändert sich der Volumenstrom bei konstanter Dichte nicht. Ist zudem der durchströmte Querschnitt konstant, muss die Geschwindigkeit der Strömung es ebenfalls bleiben. Dies besagt die Kontinuitätsgleichung:

$$\dot{V} = A \cdot w \quad (3.8)$$

Somit ist der geschwindigkeitsabhängige dynamische Druck der Bernoulli-Gleichung konstant (vgl. Gleichung (3.3)). Da es sich um eine horizontale Strömung handelt, ändert sich der höhenabhängige

hydrostatische Druck nicht. Folglich ändert sich bei einer verlustbehafteten Strömung nur der erste Term der Bernoulli-Gleichung und somit der Druck.

Durch eine Erweiterung der Bernoulli-Gleichung um einen Druckverlustterm lassen sich mit ihr verlustbehaftete Strömungen berechnen:

$$p_1 + \rho \cdot g \cdot z_1 + \frac{\rho}{2} \cdot w_1^2 = p_2 + \rho \cdot g \cdot z_2 + \frac{\rho}{2} \cdot w_2^2 + \Delta p_V \quad (3.9)$$

Die Indizes stellen zwei Punkte entlang einer Stromlinie dar (vgl. Abbildung 3-1).

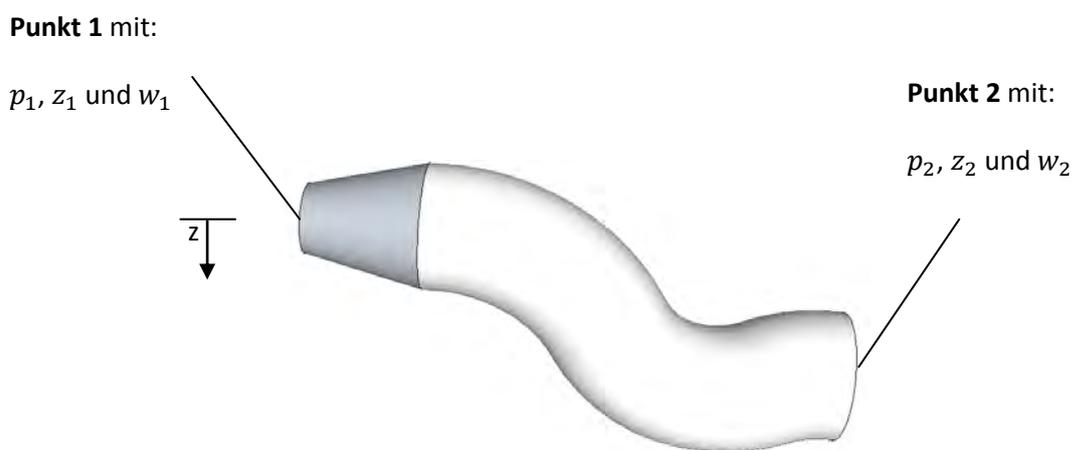


Abbildung 3-1: Veranschaulichung der Bernoulli-Gleichung

Ebenso wie die Druckverluste in Strömungseinbauten, wie Krümmern, Blenden und Drosselklappen können mithilfe der folgenden Formel Druckverluste in durchströmten Treppenräumen berechnet werden:

$$\Delta p_V = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \bar{w}^2 \quad (3.10)$$

Hier stellt \bar{w} eine charakteristische Geschwindigkeit der Strömung dar. Wie bereits Abbildung 1-1 zeigt, durchströmt Luft auf verschiedenen Wegen einen Treppenraum, somit ist es schwer eine Geschwindigkeit zu bestimmen, welche repräsentativ für die gesamte Strömung ist. Um dieses Problem zu lösen, wird Gleichung (3.8) nach der Geschwindigkeit umgeformt und anschließend in Formel (3.10) eingesetzt. Es entsteht folgender Ausdruck:

$$\Delta p_V = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{\dot{V}}{A} \right)^2 \quad (3.11)$$

Der Volumenstrom \dot{V} lässt sich messtechnisch relativ einfach bestimmen. Als Bezugsfläche A können verschiedene Flächen in einem Treppenraum gewählt werden. Das Wissen darüber, welche Fläche

der Berechnung zugrunde liegt, ist relevant. Da sich bei der Durchströmung eines Treppenraumes die viereckige Grundfläche anbietet, welche von den Außenwänden begrenzt wird, dient diese der vorliegenden Arbeit als Bezugsfläche. In der Abbildung 3-2 ist die Bezugsfläche farblich gekennzeichnet.

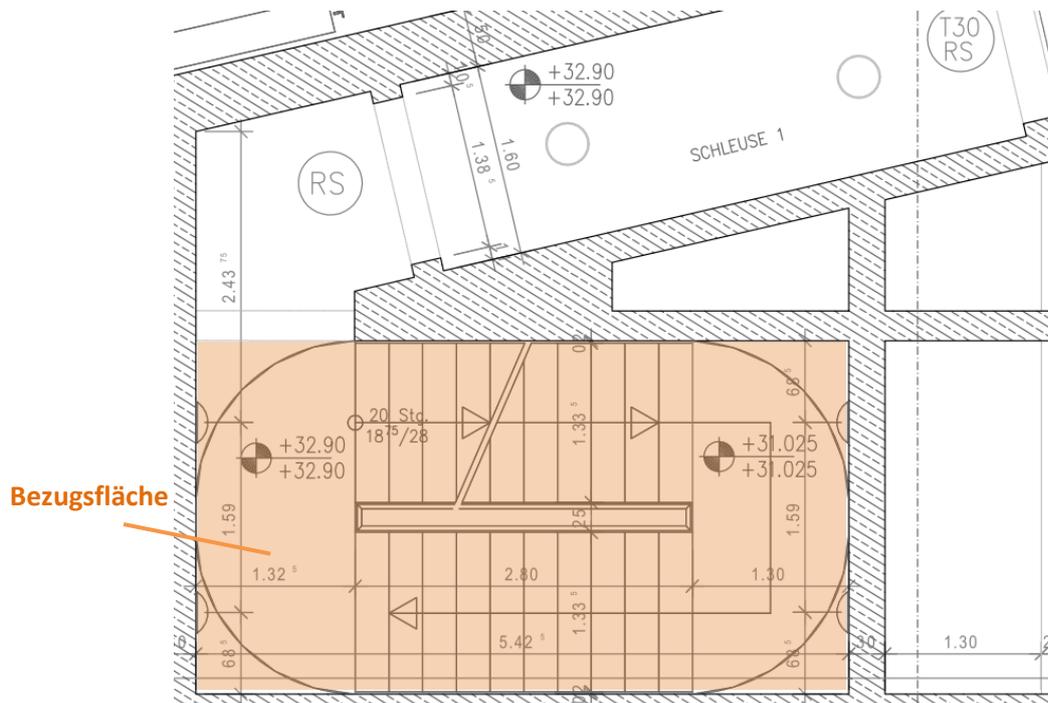


Abbildung 3-2: Bezugsfläche

Der dimensionslose Druckverlustbeiwert ζ lässt sich durch umstellen der Formel (3.11) wie folgt berechnen:

$$\zeta = \frac{\Delta p_V}{\frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{V}{A}\right)^2} \quad (3.12)$$

In der vorliegenden Arbeit wird der Druckverlust in einem durchströmten Treppenraum über jeweils einer Etage bestimmt. Der Abstand zwischen den Druckmessstellen ist also die Geschosshöhe h_G . Wird der Druckverlustbeiwert auf diese Distanz bezogen, ergibt sich der spezifische Druckverlustbeiwert:

$$\zeta^* = \frac{\zeta}{h_G} = \frac{\Delta p_V}{\frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{V}{A}\right)^2 \cdot h_G} \quad (3.13)$$

Dieser Wert spiegelt den Druckabfall pro durchströmten Höhenmeter wider.

Neben der Angabe eines Druckverlustbeiwertes ist es auch üblich so genannte Effektivflächen anzugeben, welche den Druckabfall in einem System beschreiben. Hierbei handelt es sich um eine fiktive Fläche, welche bei einem Druckverlustbeiwert von 1 denselben Druckabfall erzeugt, wie das mit demselben Volumenstrom durchströmte Objekt. Wird daher in Formel (3.11) $\zeta = 1$ gesetzt, ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\Delta p_V = \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{\dot{V}}{A_{eff}} \right)^2 \quad (3.14)$$

Durch Lösen der Formel (3.14) nach der Effektivfläche entsteht Formel (3.15):

$$A_{eff} = \sqrt{\frac{\rho}{2 \cdot \Delta p_V}} \cdot \dot{V} \quad (3.15)$$

Der Zusammenhang zwischen dem Druckverlustbeiwert und der Effektivfläche ist ersichtlich, wenn zunächst Formel (3.11) und (3.14) gleichgesetzt werden:

$$\zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{\dot{V}}{A} \right)^2 = \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{\dot{V}}{A_{eff}} \right)^2 \quad (3.16)$$

Nach kürzen und umstellen ergibt sich Formel (3.17):

$$\zeta = \left(\frac{A}{A_{eff}} \right)^2 \quad (3.17)$$

3.1.3 Thermischer Auftrieb

Thermisch bedingt kommt es zwischen zwei Luftsäulen unterschiedlicher Temperatur zu einer Druckdifferenz, mit dessen Ausgleich sich der thermische Auftrieb befasst.

Der statische Druck innerhalb einer Luftsäule nimmt mit steigender Höhe h ab und kann durch eine Anpassung der Formel (3.4) berechnet werden. Die Höhe der Luftsäule wird entgegen der Richtung z gemessen wird, daher ergibt sich für den höhenabhängigen statischen Druck innerhalb einer Luftsäule folgender Zusammenhang:

$$p_{stat} = p_i - \rho \cdot g \cdot h \quad (3.18)$$

Er ist von dem Druck am Boden der betrachteten Luftsäule, ihrer Dichte, der Fallbeschleunigung und der jeweiligen Höhe abhängig. Hierbei ist die Dichte temperaturabhängig. Aus der allgemeinen Gasgleichung folgt für ideale Gase:

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (3.19)$$

Zwischen zwei (miteinander verbundenen) Luftsäulen unterschiedlicher Temperatur entsteht aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Dichte ein Differenzdruck.

Herrscht innerhalb eines Treppenraumes eine Temperatur T_i , die sich von der Außentemperatur T_a unterscheidet, kommt es zu einer höhenabhängigen Druckdifferenz zwischen dem Treppenraum und der Umgebung, welche sich wie folgt berechnet:

$$\Delta p = (\rho_A - \rho_I) \cdot g \cdot h \quad (3.20)$$

In der nebenstehenden Abbildung 3-3 sind für den Fall ($T_i > T_a$) zwei Druckverläufe über der Höhe h aufgetragen. Der eine Verlauf spiegelt den Druck der Luftsäule innerhalb eines Treppenraumes wider, der andere den Umgebungsdruck. Auf der Höhe, auf der der innere Druck dem äußeren entspricht befindet sich die sogenannte neutrale Fläche (NF), welche ebenfalls eingetragen ist. Die Lage der neutralen Fläche hängt ausschließlich von der Anordnung, Größe und Form der Bauwerksöffnungen ab [4].

Die Druckdifferenz dieser beiden Verläufe ist in Abbildung 3-4 dargestellt, wobei der Außendruck als Referenzdruck gewählt ist.

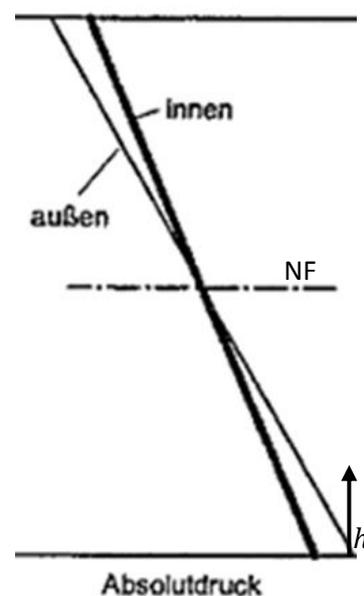


Abbildung 3-3: höhenabhängiger Druckverlauf im Winter [10]

Es ist zu erkennen, dass unterhalb der neutralen Fläche ein Unterdruck herrscht. Der Unterdruck ist abhängig von der Temperaturdifferenz. Die Temperaturunterschiede zwischen der Luft in einem Treppenraum und der Umgebungstemperatur sind im Winter am größten und können durchaus bis zu 40K betragen. Bei hohen Treppenräumen kann der Temperaturunterschied im Winter somit im unteren Teil des Treppenraumes zu einem erheblichen Unterdruck führen.

Können die zwei Luftsäulen unterschiedlicher Temperatur durch Öffnungen in verschiedenen Höhen miteinander in Kontakt treten, kommt es zu einer druckausgleichenden Strömung. Hierbei strömt die Luft aus der Luftsäule höheren Druckes in die mit dem niedrigeren Druck. Dieses Phänomen wird auch als Kamineffekt bezeichnet. Abbildung 3-5 stellt ein stark vereinfachtes Strömungsbild eines Hochhauses im Winter dar. Im Sommer kehrt sich dieses Bild um. Da die Temperaturunterschiede im Sommer nicht so groß sind, sind die Strömungen dann nicht so stark ausgeprägt, wie im Winter.

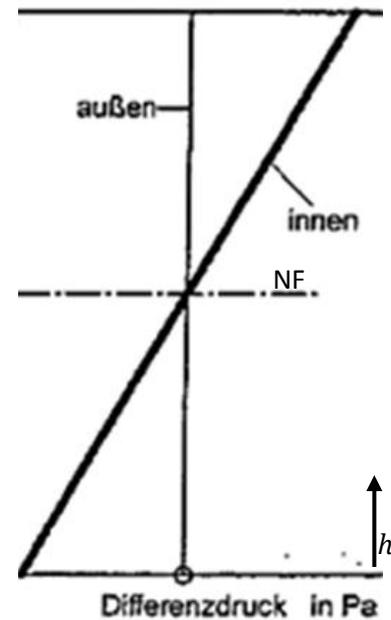


Abbildung 3-4: höhenabhängiger Differenzdruck [10]

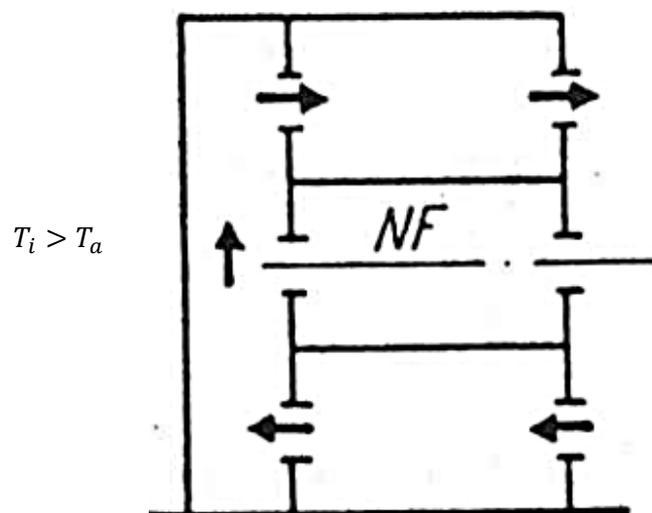


Abbildung 3-5: schematisches Strömungsbild eines Treppenraumes im Winter [4]

3.2 Ähnlichkeitstheorie

Um physikalische Sachverhalte im Bereich der Strömungsmechanik zu untersuchen gibt es verschiedene Möglichkeiten. In vielen Situationen steht die numerische Strömungssimulation dem Modellversuch gegenüber. Ein Vorteil der Modellversuche ist es, dass die untersuchten Modelle relativ schnell verändert und zeitnah untersucht werden können. Bei Strömungssimulationen werden ebenfalls Strömungen in Modellen analysiert, dies geschieht jedoch computergestützt. Die Rechenzeit einer Simulationsrechnung kann je nach Komplexität mehrere Tage bis Wochen dauern. Bei sehr komplexen Begebenheiten wird vermehrt der Modellversuch bevorzugt.

Im Modellversuch wird das zu untersuchende originale System (Index O) oder ein relevantes Teilsystem in einem Modell (Index M) nachgebildet. Neben der maßstabsgetreuen Vergrößerung oder Verkleinerung des Originals, die als geometrische Ähnlichkeit bezeichnet wird, müssen auch die den physikalischen Vorgängen zugrunde liegenden mechanischen und thermischen Größen in entsprechenden Maßstäben berücksichtigt werden (physikalische Ähnlichkeit). Grundlegend für Modellversuche sind die so genannten Ähnlichkeitskennzahlen. Dies sind dimensionslose Kennzahlen, die bestimmte physikalische Vorgänge beschreiben. Aus ihnen lassen sich die Maßstäbe physikalischer Größen zwischen einem Original und seinem Modell ermitteln.

Eine der bekanntesten dimensionslosen Kennzahlen ist die Reynolds-Zahl. Sie beschreibt den Quotienten aus Trägheitskraft und Reibungskraft in einer Strömung:

$$Re = \frac{wl}{\nu} = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Reibungskraft}} \quad (3.21)$$

Stimmt die Reynolds-Zahl in zwei geometrisch ähnlichen Systemen überein, so sind die Strömungen hinsichtlich des Reibungseinflusses in diesen Systemen ähnlich.

Da es eine Vielzahl dieser Kennzahlen gibt und die Übereinstimmung aller Kennzahlen zwischen zwei Systemen nicht immer möglich ist, muss das Modell mit den wichtigsten, die Fragestellung betreffenden Ähnlichkeitskennzahlen mit dem Original übereinstimmen.

Eine weitere Ähnlichkeitskennzahl ist die Euler-Zahl. Sie ist wie folgt definiert:

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2} = \frac{\text{Druckkraft}}{\text{Trägheitskraft}} \quad (3.22)$$

Für die Untersuchung des Druckabfalls in Treppenhäusern unter isothermen Bedingungen ist die Übereinstimmung der Reynolds- und der Euler-Zahl bestimmend. Auf weitere Kennzahlen wird hier nicht eingegangen.

3.3 Maßstabsfaktoren

Um Erkenntnisse aus Modellversuchen auf das Original zu übertragen und umgekehrt, können Maßstabsfaktoren für verschiedene physikalische Größen (Index i) angewandt werden. Diese werden nachfolgend dargestellt und basieren auf den zugrundeliegenden Ähnlichkeitskennzahlen, welche in Kapitel 3.2 beschrieben werden.

Wie in Kapitel 3.2 erwähnt basieren die durchzuführenden Versuche auf der Reynolds- und der Euler-Zahl. Stimmen diese für Original und Modell überein, ergeben sich die Maßstabsfaktoren f_i , welche aus dem Quotienten der jeweiligen physikalischen Größe des Modells und des Originals gebildet werden:

$$f_i = \frac{l_M}{l_O} \quad (3.23)$$

Stimmt die Reynolds-Zahl im Original und im Modell überein, so ergibt sich:

$$Re = \frac{w_O \cdot l_O}{\nu_O} = \frac{w_M \cdot l_M}{\nu_M} \quad (3.24)$$

Aus diesem Zusammenhang folgt:

$$\frac{f_w \cdot f_l}{f_\nu} = 1 \quad (3.25)$$

f_l stellt den Längenmaßstab dar, welcher grundsätzlich frei wählbar ist. Wird ein Modell jedoch zu klein, sind die an ihm zu beobachtenden physikalischen Vorgänge nicht mehr auf das Original zu übertragen, da Grenzschichten in Wandnähe die Ergebnisse verfälschen. Der Längenmaßstab beträgt in dieser Arbeit:

$$f_l = \frac{1}{6} \quad (3.26)$$

Da sowohl durch das Modell, als auch durch das Original Luft der gleichen kinetischen Viskosität strömt, ergibt sich für den Maßstabsfaktor der kinetischen Viskosität:

$$f_\nu = 1 \quad (3.27)$$

Für den Maßstabsfaktor der Geschwindigkeit w ergibt sich über Formel (3.25):

$$f_w = \frac{f_\nu}{f_l} = 6 \quad (3.28)$$

Formel (3.28) besagt, dass die Strömungsgeschwindigkeiten im Modell sechsmal so groß sind, wie die im Original.

Da die Euler-Zahl ebenfalls übereinstimmt, können weitere Maßstabsfaktoren berechnet werden. Es gilt:

$$Eu = \frac{\Delta p_o}{\rho_o \cdot w_o^2} = \frac{\Delta p_M}{\rho_M \cdot w_M^2} \quad (3.29)$$

Aus Formel (3.29) ergibt sich:

$$\frac{f_p}{f_\rho \cdot f_w^2} = 1 \quad (3.30)$$

Unter der Annahme, dass beide Systeme isotherm mit Luft der gleichen Dichte durchströmt werden, berechnet sich der Maßstabsfaktor der Dichte wie folgt:

$$f_\rho = 1 \quad (3.31)$$

Über Formel (3.30) kann ein Maßstabsfaktor für den Druck bestimmt werden. Für diesen ergibt sich:

$$f_p = f_\rho \cdot f_w^2 = 36 \quad (3.32)$$

Aus der Definition des Volumenstromes, welche in Formel (3.8) (vgl. Kapitel 3.1.2) dargestellt ist, berechnet sich der Maßstabsfaktor des Volumenstroms wie folgt:

$$f_{\dot{V}} = f_w \cdot f_A = f_w \cdot f_l^2 = 6 \cdot \left(\frac{1}{6}\right)^2 = \frac{1}{6} \quad (3.33)$$

In der nachfolgenden Tabelle 3-1 sind die wichtigsten Maßstabsfaktoren dieser Arbeit zusammengestellt:

Tabelle 3-1: Maßstabsfaktoren des Modellversuches

Maßstabsfaktor	$f_i = \frac{i_M}{i_o}$
der Länge ($i = l$)	$f_l = 1/6$
der Geschwindigkeit ($i = w$)	$f_w = 6$
des Druckes ($i = p$)	$f_p = 36$
des Volumenstroms ($i = \dot{V}$)	$f_{\dot{V}} = 1/6$

3.4 Strömungsformen

Grundsätzlich werden Strömungen anhand ihres Strömungsbildes und Geschwindigkeitsprofils in zwei Strömungsformen aufgeteilt. Je nach dem, welchen Wert bestimmte Kenngrößen, wie zum Beispiel die Reynolds-Zahl annehmen, stellt sich beispielsweise in Rohren eine laminare oder eine turbulente Strömung ein. In der nachfolgenden Abbildung 3-6 sind typische Geschwindigkeitsprofile dieser beiden Strömungsformen dargestellt.

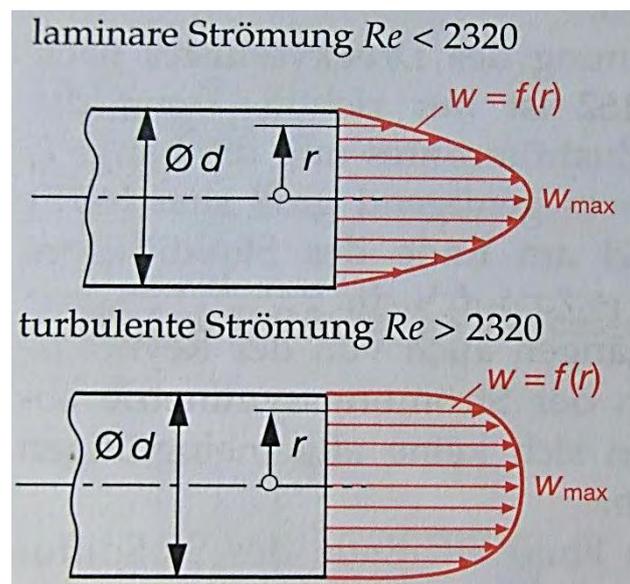


Abbildung 3-6: Rohrströmungen, (oben: laminar, unten: turbulent) [2]

Das Geschwindigkeitsprofil einer laminaren Rohrströmung entspricht der Form eines quadratischen Paraboloids. Die Fluidteilchen bewegen sich auf Strömungsbahnen, welche parallel zur Rohrachse verlaufen. Bei dieser Strömungsform findet im Gegensatz zu der turbulenten Rohrströmung keine radiale Bewegung statt. Diese Querbewegung ist bei der turbulenten Rohrströmung ausgeprägt und hat zur Folge, dass das Geschwindigkeitsprofil flacher ist, als das der laminaren Strömung. Es wird demnach von einem Rotationsparaboloid höherer Ordnung beschrieben. Die kritische Reynolds-Zahl, welche die laminare von der turbulenten Rohrströmung unterscheidet, beträgt 2320.

Je nachdem, ob eine Strömung laminar oder turbulent ist, ist der Druckverlust in Rohrleitungen von der Reynolds-Zahl oder von der Wandrauhigkeit abhängig. Dies ist Abbildung 3-7, dem dargestellten Colebrook-Nikuradse-Diagramm zu entnehmen. Hier ist der λ -Wert für unterschiedlich raue Rohre über der Reynolds-Zahl aufgezeigt. Der λ -Wert beschreibt den Druckverlust in Rohrleitungen. Er wird auch als Rohrreibungszahl bezeichnet. Im laminaren Bereich ist der Druckverlust nur von der Reynolds-Zahl abhängig und im turbulenten Bereich von dem Quotienten d/k . Dieser beschreibt das

Verhältnis des Durchmessers d zu der Rohrrauigkeit k . Es ist zu erkennen, dass ein Übergangsbereich existiert, in dem der Druckverlust sowohl von der Reynolds-Zahl, als auch von der Wandrauigkeit abhängig ist. Zudem ist ersichtlich, dass dieser Übergangsbereich umso kleiner ist, je rauer ein Rohr ist.

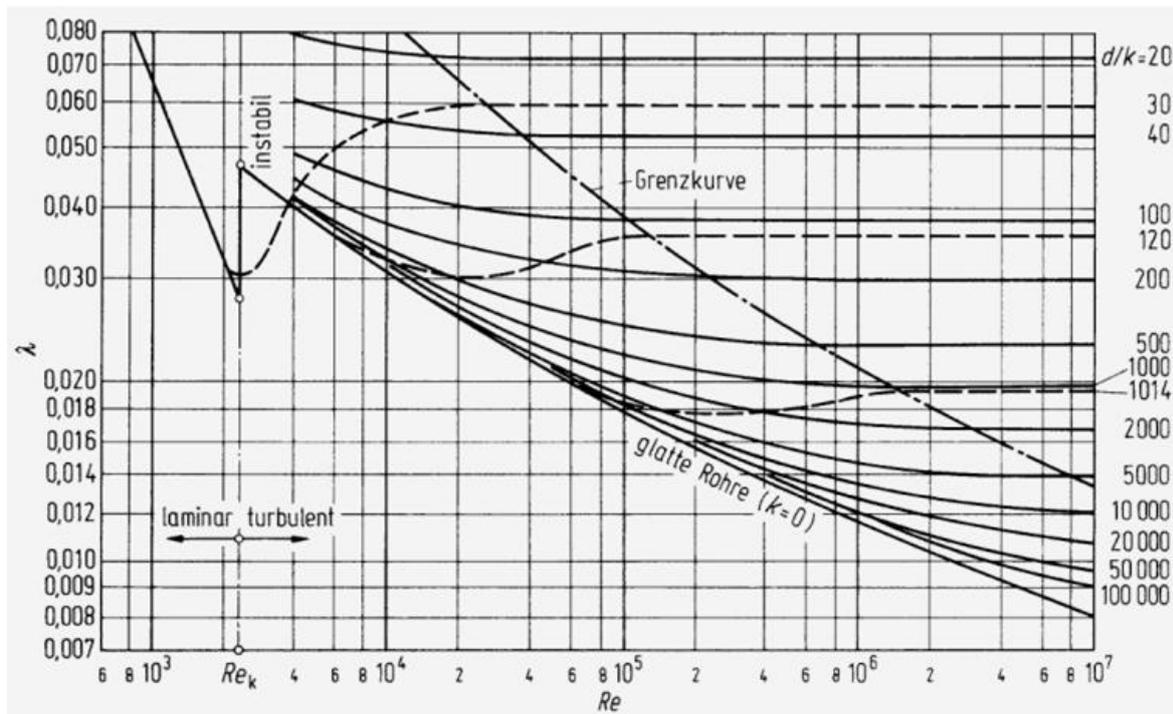


Abbildung 3-7: Colebrook-Nikuradse-Diagramm [6]

3.5 Wesentliche Merkmale eines Treppenraumes

Im folgenden Abschnitt wird der grundlegende Aufbau von Treppenhäusern beschrieben. In den Abbildungen sind die wichtigsten Merkmale veranschaulicht. Die Abbildungen 3-8 und 3-9 zeigen den Aufbau eines Treppenhauses aus seitlicher bzw. aus der Vogelperspektive, wohingegen Abbildung 3-10 die schematische Detailansicht einer Treppenstufe darstellt.

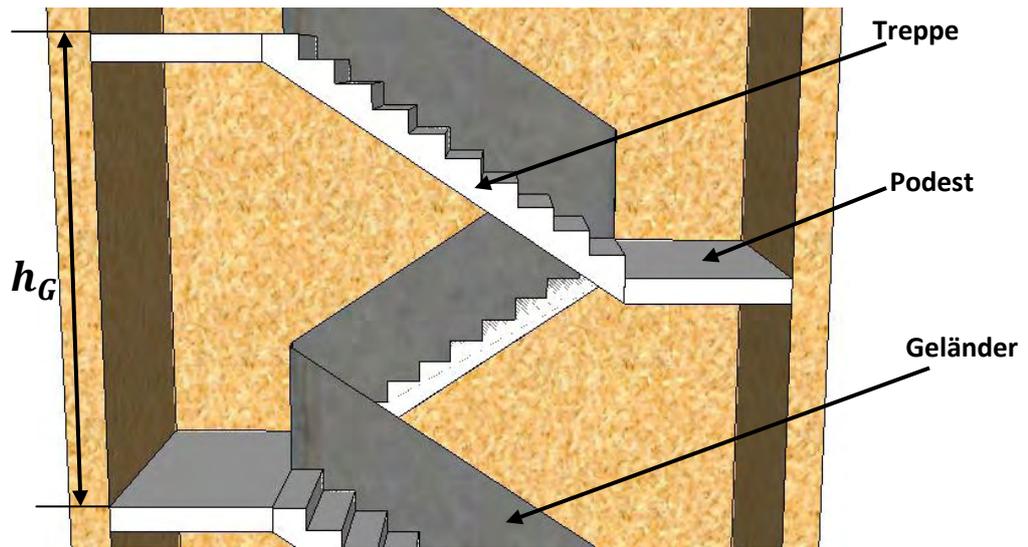


Abbildung 3-8: Seitenansicht eines Treppenraumes

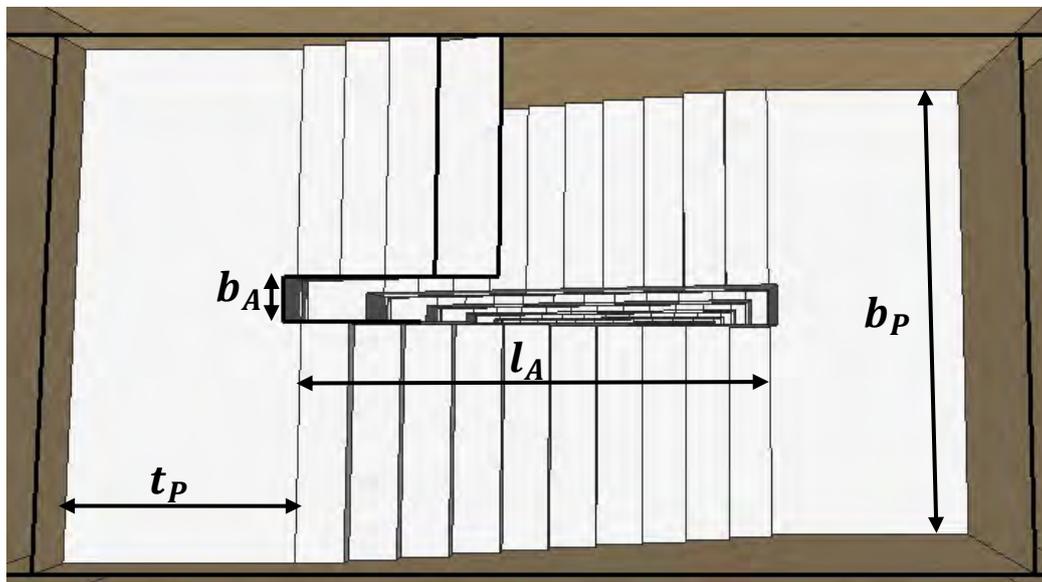


Abbildung 3-9: Schnitt durch ein Treppenhaus aus der Vogelperspektive

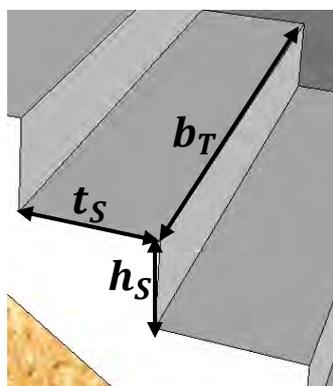


Abbildung 3-10: Detaildarstellung einer Treppenstufe

Die Treppen, deren Breite b_T auch als Laufbreite bezeichnet wird, führen von einem Podest zum nächsten. Weitere Treppenmaße, wie die Stufenhöhe h_S und -tiefe t_S sind der Abbildung 3-10 zu entnehmen. Die lichte Öffnung, welche durch die Treppen und Podeste begrenzt wird, wird auch als Lichtauge bezeichnet, dessen Maße als Augenbreite b_A und -länge l_A bezeichnet werden. Um einen Absturz zu verhindern, ist an den Treppen auf der Seite zum Lichtauge ein Geländer montiert. Als Geländer kann wie in Abbildung 3-11 ein einfacher Handlauf dienen, welcher mit einer Vielzahl von Streben an den Treppen befestigt ist. Sind die freien Flächen zwischen der Treppe und dem Handlauf verschlossen, wird das Geländer als verschlossene Brüstung bezeichnet (vgl. Abbildung 3-8). In dieser Abbildung ist des Weiteren die Geschosshöhe h_G eingetragen.

Es gibt verschiedene Treppenverläufe, welche sich hinsichtlich des Übergangs der Treppen zu den angrenzenden Podesten unterscheiden (vgl. Abbildung 3-11 bis Abbildung 3-14). Je nach Art der Treppenführung wird an den Podesten die erforderliche Geländerhöhe bestimmt. Bei dem Verlauf Nummer 1 muss der minimalen Geländerhöhe beispielsweise die Höhe einer Treppenstufe hinzugerechnet werden.

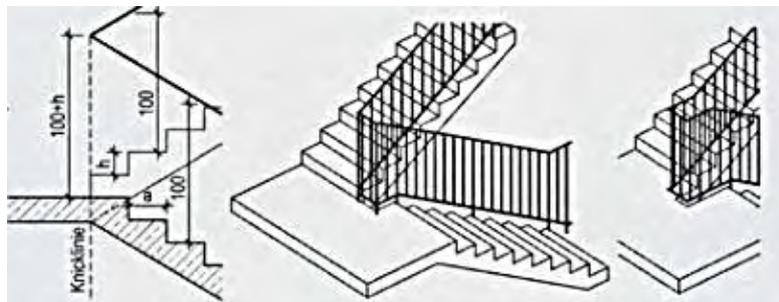


Abbildung 3-11: Treppenverlauf Nummer 1 [7]

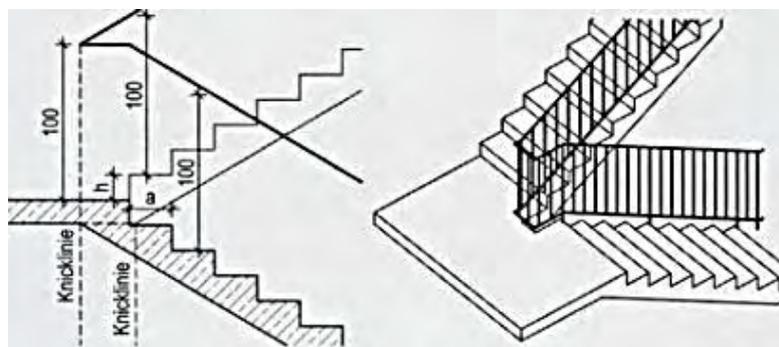


Abbildung 3-12: Treppenverlauf Nummer 2 [7]

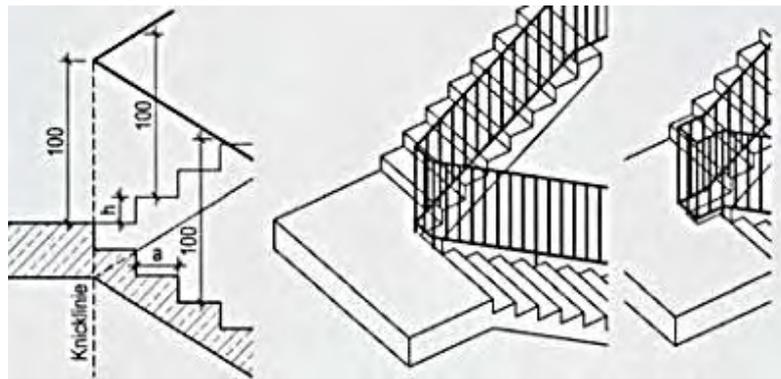


Abbildung 3-13: Treppenverlauf Nummer 3 [7]

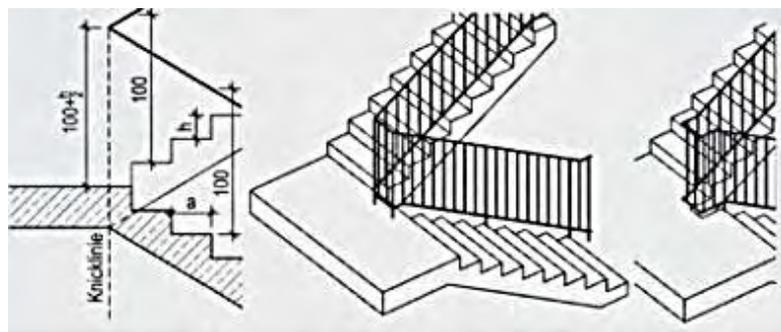


Abbildung 3-14: Treppenverlauf Nummer 4 [7]

Zusammenfassend lassen sich folgende markante Merkmale von Treppenhäusern festlegen:

- die Geländergestaltung
- der Treppenverlauf
- die Augenmaße (b_A und l_A)
- die Treppenmaße (b_T , h_S und t_S)
- die Podestmaße (b_P und l_P)
- die Geschosshöhe h_G

3.6 Wichtige Begriffe des Brandschutzes

Nachfolgend sind die wichtigsten Definitionen des Brandschutzes zusammengefasst. Hierbei handelt es sich um:

- notwendigen Flure
- notwendige Treppenräume
- Sicherheitstreppenräume
- Druckbelüftungsanlagen (DBA)

Notwendige Flure sind die Flure von den Nutzungseinheiten, welche keinen direkten Ausgang ins Freie besitzen. Sie führen zu einem Ausgang oder zu einem Treppenraum. Ihre baulichen Anforderungen sind in den Landesbauordnungen geregelt.

Als **notwendige Treppenräume** werden die Treppenräume bezeichnet, in denen sich die Treppen befinden, über welche das Verlassen eines Gebäudes aus nicht ebenerdigen Geschossen im Regelfall sichergestellt wird. Notwendige Treppenräume unterscheiden sich von Sicherheitstreppenräumen hinsichtlich der baulichen und technischen Anforderungen, welche analog zu den notwendigen Fluren in den Landesbauordnungen festgelegt sind.

Sicherheitstreppenräume sind spezielle Treppenräume, in die aus brandschutztechnischen Gründen kein Feuer oder Rauch eindringen darf. Um das Eindringen zu verhindern, werden besondere Anforderungen an die Brandbeständigkeit ihrer Baustoffe und ihre technische Ausstattung gestellt. Sie müssen jeder Zeit begehbar sein und sobald es sich um innenliegende Sicherheitstreppenräume handelt, muss der Zugang über Vorräume erfolgen. In diese Schleusen darf ebenfalls kein Rauch oder Feuer eindringen. Aus diesem Grund werden Sicherheitstreppenräume und ihre Vorräume u.a. mit Druckbelüftungsanlagen ausgestattet.

Über eine **Druckbelüftungsanlage** wird ein definierter Volumenstrom in einen Treppenraum und die angrenzenden Schleusen gefördert. Dieser Luftstrom verlässt den Treppenraum durch Überdruckklappen einer Druckentlastungseinheit, über welche ein Druckniveau im Sicherheitstreppenraum eingestellt wird.

Der Luftstrom kann dem Abtransport von Brandrauch dienen, falls jener trotz aller Vorsichtsmaßnahmen in den Treppenraum eingedrungen ist. Der Abtransport erfolgt dabei über die erwähnten Klappen.

Sind die Schleusentüren geöffnet, strömt Luft in die jeweiligen Geschosse. Öffnen flüchtende Personen im Brandfall die Schleusentüren des Brandgeschosses, soll der Brandrauch über gezieltes Öffnen von Fenstern oder Klappen in diesem Geschoss nach außen getragen werden. Die nachstehende Abbildung 3-15 verdeutlicht dies:

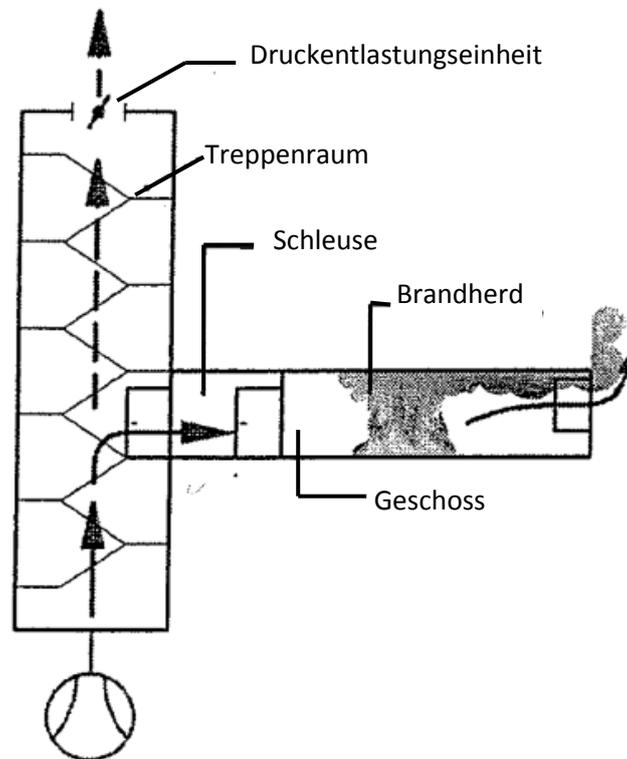


Abbildung 3-15: Funktionsweise einer Druckbelüftungsanlage [10]

Die Konzeption von DBAs gestaltet sich als schwierig. Um einen Raucheintritt zu verhindern muss, ein möglichst hoher Überdruck erzeugt werden, sodass die Strömungsgeschwindigkeit der Luft aus dem Treppenraum durch die geöffneten Türen mindestens $2,0 \text{ m/s}$ beträgt. Dieser Luftstrom wird auch als Sperrluftstrom bezeichnet. Die Schleusentüren gehen in Fluchrichtung auf, somit müssen sie gegen den Überdruck geöffnet werden können. Sollte die zum Öffnen benötigte Kraft zu hoch sein, kann der Eindruck entstehen, dass die Tür verschlossen ist. Im Brandfall kann dies verheerende Folgen nach sich ziehen, daher ist der Überdruck auf 50 Pa begrenzt. Dieser Wert ergibt sich aus einer Momentenbilanz an einer Schleusenstür mit typischen Maßen und den am Türgriff zulässigen 100 N der Öffnungskraft [5].

3.7 Gesetze und Normen des Brandschutzes in Hochhäusern

Es gibt verschiedene Gesetze und Normen, die den Brandschutz von Gebäuden und im Speziellen von Hochhäusern betreffen. Diese sind u.a. in der Musterbauordnung (MBO), der Landesbauordnung (LBO) und der Muster-Hochhaus-Richtlinie (MHHR) festgelegt. Weitere Vorschriften werden von Institutionen wie dem Deutschen Institut für Normung (DIN) oder dem Verein Deutscher Ingenieure (VDI) zur Verfügung gestellt.

In der **Musterbauordnung** sind Vorgaben beschrieben, die den Bau und Betrieb von Gebäuden betreffen. Sie ist grundlegend für die auf Länderebene gültigen Gesetze der Landesbauordnungen.

Laut § 2 Abs. 4 Nr. 1 der MBO gelten Gebäude mit einer Höhe von mehr als 22 Metern als Hochhaus. Hier ist die Höhe des Bodens der obersten Nutzungseinheit über dem Gelände gemeint. Diese Maßgabe ergibt sich aus der durchschnittlichen Reichweite von Leiterwagen, da bei Nutzungseinheiten oberhalb dieser 22 Meter eine Rettung durch die Feuerwehr von außen nicht mehr gewährleistet ist.

Aus § 33 der MBO geht hervor, dass Nutzungseinheiten mit mindestens einem Aufenthaltsraum in jedem Geschoss mindestens zwei voneinander unabhängige Rettungswege ins Freie haben müssen. Hier kann einer der Rettungswege eine Stelle der Nutzungseinheit sein, welche mit Rettungsgeräten der Feuerwehr erreichbar ist. Der Abschnitt 4.2 der MHHR konkretisiert die Auflagen an Treppenträume in Hochhäusern. So können unter gewissen Umständen, diese zwei notwendigen Treppenträume durch einen Sicherheitstreppenraum ersetzt werden. In Hochhäusern, die höher als 60 Meter sind, müssen jedoch alle Treppenträume als Sicherheitstreppenträume ausgestattet werden.

Die Muster-Hochhaus-Richtlinie „regelt besondere Anforderungen und Erleichterungen im Sinne von § 51 Abs. 1 MBO für den Bau und Betrieb von Hochhäusern (§ 2 Abs. 4 Nr. 1 MBO)“ [11]. Beispielsweise sind die maximalen 100 N der Türöffnungskraft und die minimale Strömungsgeschwindigkeit der Sperrluftströmung von 2,0 m/s in der MHHR festgelegt.

Weitere Vorschriften, die den Bau und den Betrieb von Gebäuden betreffen, sind zum Beispiel von dem DIN oder dem VDI verfasst. Hier ist die DIN EN 12101 zu nennen, welche in Teil 6 Festlegungen der Rauch- und Wärmefreihaltung für Differenzdrucksysteme beschreibt. Für diese Bachelorarbeit ist zudem die DIN 18065 relevant. Sie legt Definitionen, Messregeln und Hauptmaße von Treppen, wie beispielsweise die minimale Geländerhöhe, fest.

3.8 Tower 185

Die dieser Arbeit zugrundeliegenden Versuche werden an einem Modell eines Sicherheitstreppenraumes durchgeführt, welches in Anlehnung an einen bereits existierenden Treppenraum gebaut wird. Dieser Treppenraum befindet sich in dem Tower 185, welcher im nachfolgenden Abschnitt näher beschrieben wird.

3.8.1 Allgemeine Informationen

Der 2011 fertiggestellte Tower 185 steht in Frankfurt am Main und ist mit einer Höhe von 200 Metern das vierthöchste Gebäude Deutschlands.

Durch zahlreiche innovative Ideen setzt er neue Maßstäbe, beispielsweise im Hinblick auf umweltbewusstes Bauen oder im Betreiben von Gebäuden solch einer Größe. Es wurde u.a. darauf geachtet, vermehrt regionale Baustoffe einzusetzen, um den Transportweg und somit den CO₂-Ausstoß zu minimieren. Der umweltfreundliche, ressourcenschonende und nachhaltige Bau wurde daher von dem internationalen Gütesiegels LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) mit Gold ausgezeichnet.

Ein Beispiel für den vorbildlichen Betrieb des Hochhauses ist die Regenwassernutzung. Hierdurch sollen jährlich rund 2,3 Millionen Liter Trinkwasser eingespart werden [13].

In der Abbildung 3-16 ist zu erkennen, dass der Tower 185 im Wesentlichen aus einem U-förmigen Sockel besteht, aus dem der Hauptturm mit seinen 50 Etagen emporragt.



Abbildung 3-16: Außenansicht des Towers 185 [9]

3.8.2 Aufbau des Treppenraumes

Die Abbildung 3-17 zeigt einen Ausschnitt aus dem Installationsplan der Raumluftechnik. Der Treppenraum des 5. Obergeschosses ist blau und die dazugehörige Schleuse lila markiert. Des Weiteren ist der Zuluftkanal eingezeichnet (grüne Markierung).

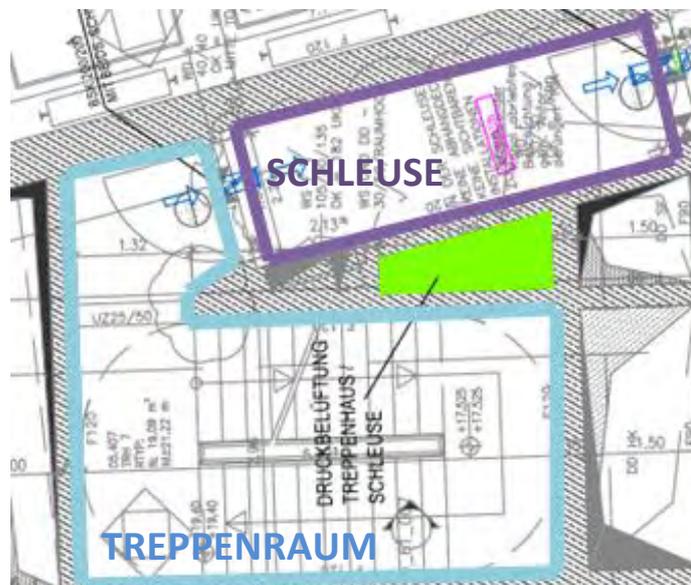


Abbildung 3-17: Grundriss des Treppenraumes und seiner Schleuse [8]

In Abbildung 3-18 ist ein Schnitt durch den Treppenraum dargestellt, anhand dessen sich die Funktionsweise dieses Zuluftschachtes erklären lässt.

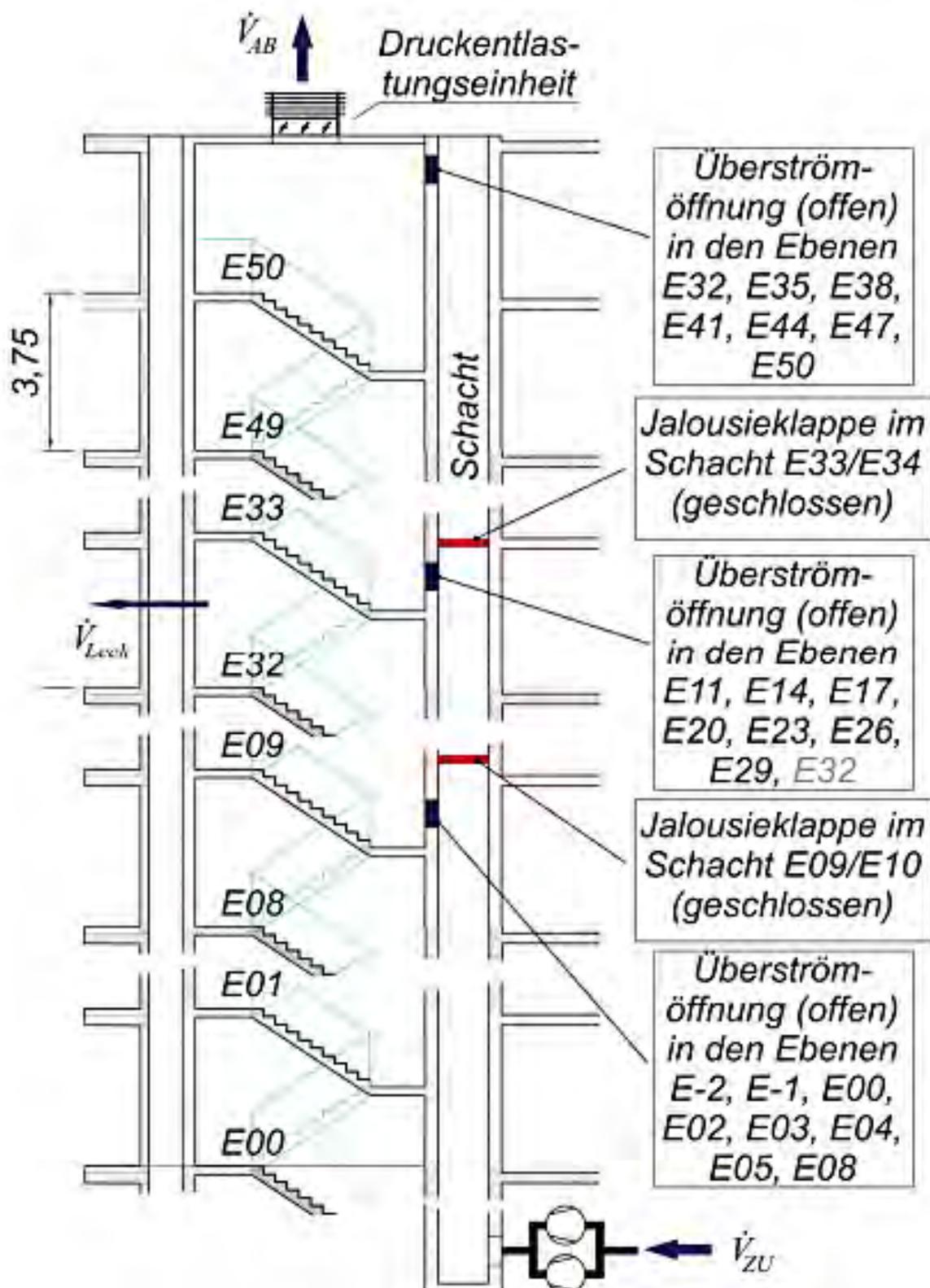


Abbildung 3-18: Zuluftführung im Treppenraum des Towers 185 [8]

Über zwei parallelgeschaltete Ventilatoren wird Luft in den Zuluftkanal gefördert. In jedem dritten Regelgeschoss befindet sich eine Überströmöffnung, durch die die Luft aus dem Kanal in den Treppenraum strömen kann. Am Kopf des Treppenhauses befindet sich eine Druckentlastungseinheit, über die der Überdruck im Treppenraum eingestellt wird.

In dem Zuluftkanal befindet sich zwischen den Ebenen 9/10 und 33/34 jeweils eine Jalousieklappe. Sind beide geöffnet, strömt die Zuluft über die gesamte Höhe des Kanals über die Überströmöffnungen in den Treppenraum. Temperaturbedingt kommt es im Winter aufgrund des beschriebenen thermischen Auftriebes im unteren Bereich des Treppenhauses zu einem Unterdruck (siehe Kapitel 3.1.3). Es muss sichergestellt sein, dass sich auch im Winter im gesamten Treppenraum ein Überdruck einstellt. Im Winter erfolgt die Luftzufuhr bis zur 9. und im Frühjahr und Herbst bis zur 33. Etage. Lediglich im Sommer sind beide Jalousieklappen geöffnet und die Luft strömt über die gesamte Höhe in den Treppenraum.

4. Versuchsaufbau

Im Rahmen dieser Arbeit werden Differenzdruckmessungen an verschiedenen Modellvarianten von Treppenräumen durchgeführt. Systematisch wird die Augenbreite, die Geländerausführung und die Laufbreite dieser Treppenraummodelle verändert. In diesem Kapitel wird zunächst das Versuchsmodell mit seinen Varianten beschrieben.

4.1 Versuchsmodell

Zunächst wird ein Modell in Anlehnung an einen Sicherheitstreppenraum des Towers 185 angefertigt. Um allgemeingültige Ergebnisse zu erhalten, werden bestimmte Details dieses Treppenraumes abstrahiert. Auf diese wird im Folgenden eingegangen.

Die Luftzufuhr erfolgt im Tower 185 über einen parallel zum Treppenraum verlaufenden Zuluftschacht (siehe Kapitel 3.8.2), welcher im Modell nicht nachgebildet wird. Auch ein über Eck führender Übergang des Treppenraumes zu den angrenzenden Schleusen wird im Modell nicht nachgebildet. Dieser Übergang ist in Abbildung 4-1 grün markiert. Einige Etagen des Treppenraumes weisen Unterschiede zu den überwiegenden Regelstockwerken auf. Die Regelstockwerke haben eine Geschosshöhe von 3,75 m. Die 6., 7., 46. und 47. Etage sind so genannte Technikgeschosse mit einer abweichenden Geschosshöhe von drei Metern. Auch die untersten Stockwerke bis einschließlich dem 1. Obergeschoss unterscheiden sich von den übrigen Stockwerken. Diese sind u.a. versetzt und befinden sich daher nicht direkt unter den anderen Stockwerken.

Folgende konzeptionelle Details des Treppenraumes des Towers 185 werden im Modell im Sinne einer erhöhten Allgemeingültigkeit nicht berücksichtigt:

- Übergang vom Treppenraum zur Schleuse
- Zuluftschacht
- Versatz einiger Etagen
- Unterschiedliche Etagenhöhen

Repräsentativ für den gesamten Treppenraum werden in dem Modell sieben Regelstockwerke des Towers 185 im Maßstab M 1:6 nachgebildet. Das in Abbildung 4-1 und 4-2 abgebildete 9. Obergeschoss stellt ein Regelstockwerk dar. Diesen Abbildungen können alle relevanten Maße entnommen werden. Zusätzlich sind in der Abbildung 4-1 die Modellgrenzen in orange und der vernachlässigte Übergang in grün eingezeichnet.

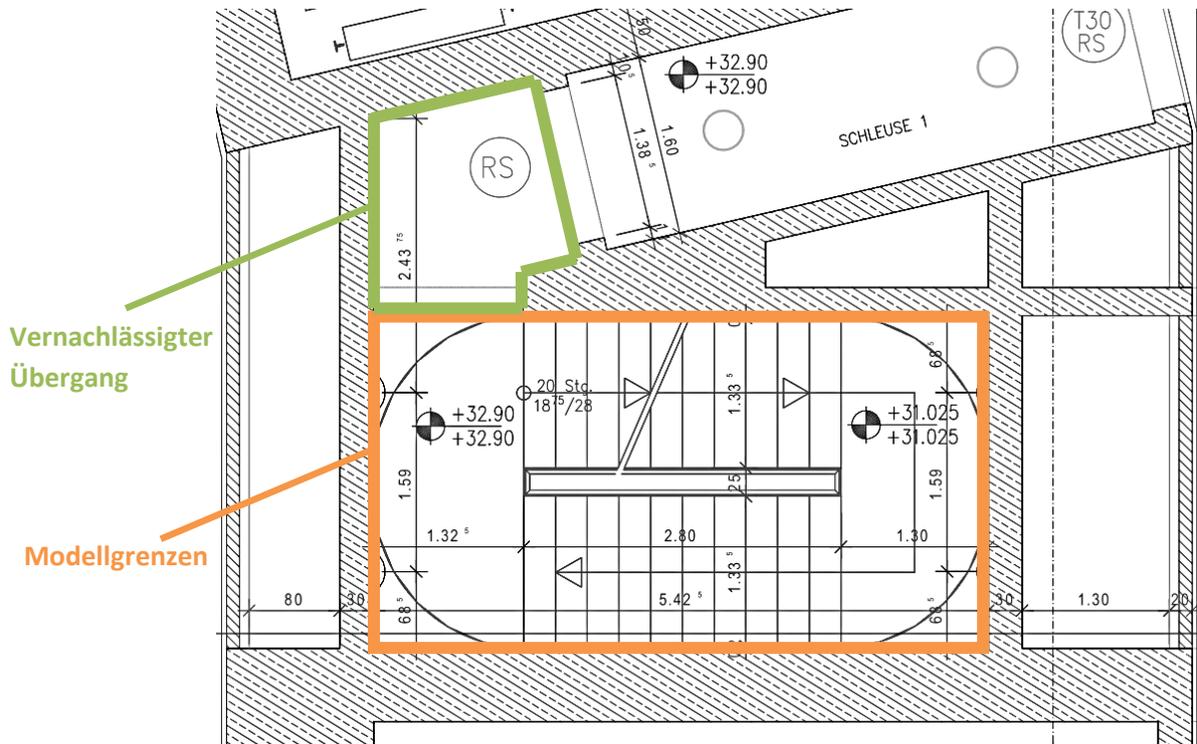


Abbildung 4-1: Grundriss eines Regelstockwerkes [8]

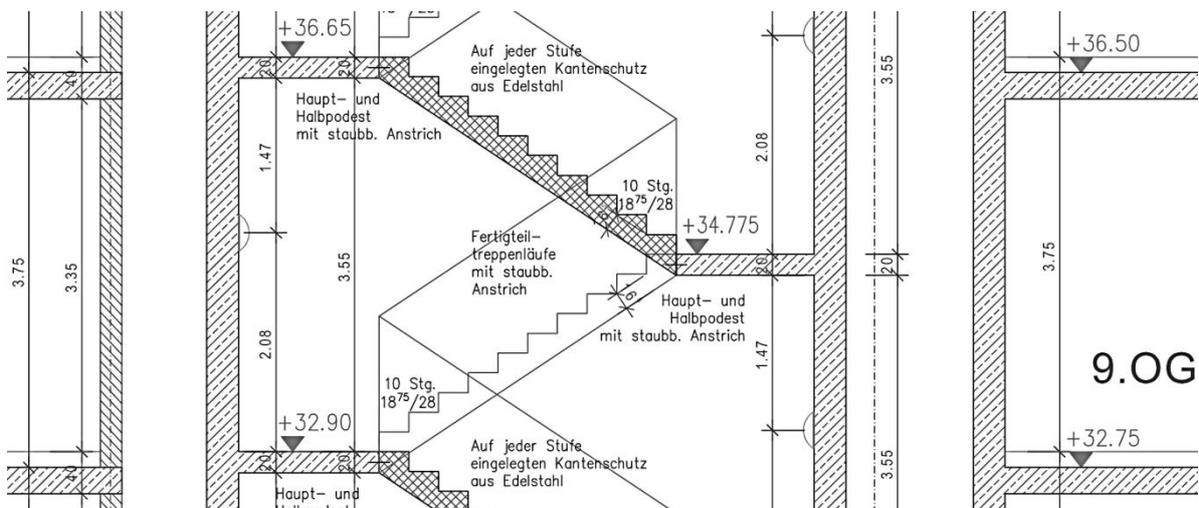


Abbildung 4-2: Seitenansicht eines Regelstockwerkes [8]

Der Versuchsaufbau ist in der Abbildung 4-3 dargestellt. Um die durchzuführenden **Zuluft** Umbauarbeiten zu erleichtern, liegt das Treppenraummodell auf der Seite. Zwischen dem Modell und dem Lüfter der Firma Zenner ist eine Kiste montiert. Diese so genannte Luftkiste beeinflusst die Strömungsform der Zuluft, sodass das Modell stirnseitig homogen mit Luft durchströmt wird.

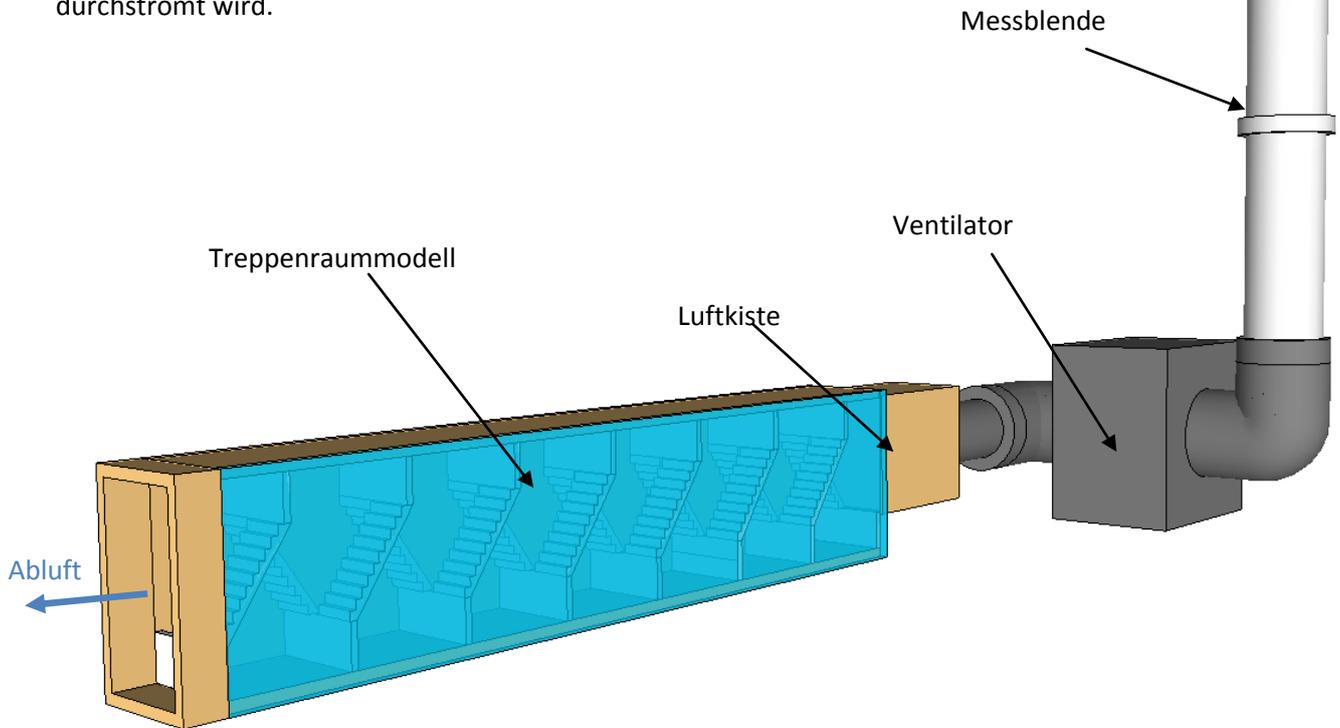


Abbildung 4-3: Versuchsaufbau

Der Aufbau der Luftkiste und des angrenzenden Treppenraumes ist in der Schnittzeichnung Abbildung 4-4 abgebildet.

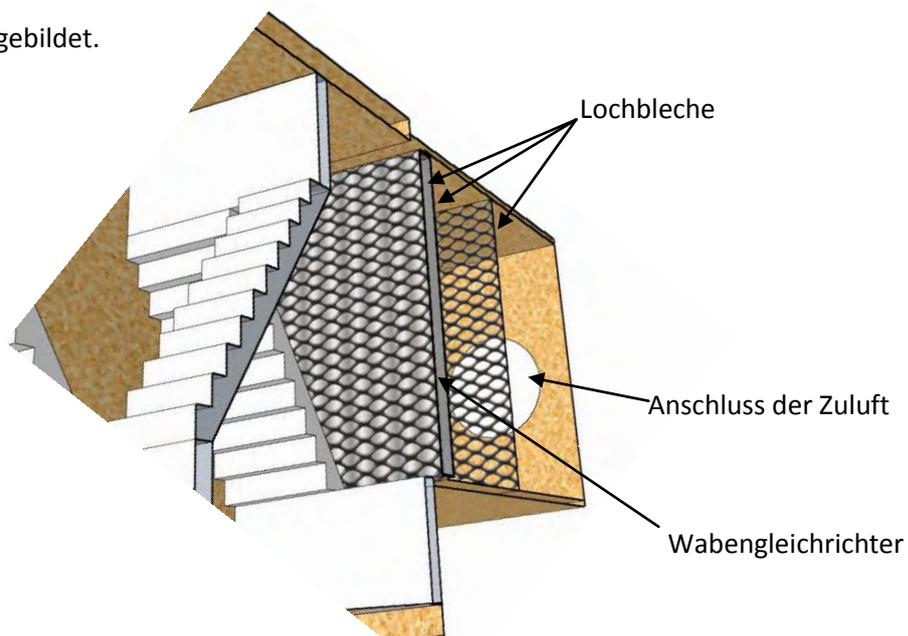


Abbildung 4-4: Schnitt durch die Luftkiste

In der Luftkiste sind drei Lochbleche und ein Wabengleichrichter eingebaut, die ein gleichmäßiges Anströmen des Treppenraumes gewährleisten. Die Maße dieser Kiste betragen: 0,72 m x 0,8 m x 0,53 m. Eines der Lochbleche ist mittig in der Kiste, die anderen zwei sind vor bzw. direkt nach dem Wabengleichrichter an dem Übergang zum Modell befestigt.

4.2 Bau des Modells

Mit dem Zeichenprogramm Google SketchUp wird zunächst anhand der Maße eines Regelstockwerkes des Towers 185 und den im vorigen Abschnitt beschriebenen Vereinfachungen ein 3D Modell am Computer konstruiert. Dieses Modell dient der Demonstration des fertigen Treppenraummodells. Mithilfe der erstellten Zeichnungen werden die einzelnen Bauteile des Treppenraumes angefertigt.

Das Modell besteht aus 15 Treppen, die über weitere 15 Podeste miteinander verbunden sind. Die aus Holz bestehenden Podeste werden in einem Abstand von 0,625 m an den ebenfalls aus Holz bestehenden Seitenwänden befestigt. Diese 0,625 m entsprechen gemäß des Maßstabs M 1:6 der Geschosshöhe von 3,75 m im Original. Lediglich eine Seitenwand besteht aus Plexiglasscheiben, damit der Innenraum während der Messungen beobachtet werden kann. Ebenfalls ermöglichen sie, Strömungen durch den Treppenraum zu betrachten, wenn saugseitig auf den angeschlossenen Lüfter Theaternebel eingelassen wird. In Abbildung 4-5 sind die montierten Podeste in dem Treppenraumrohbau dargestellt.

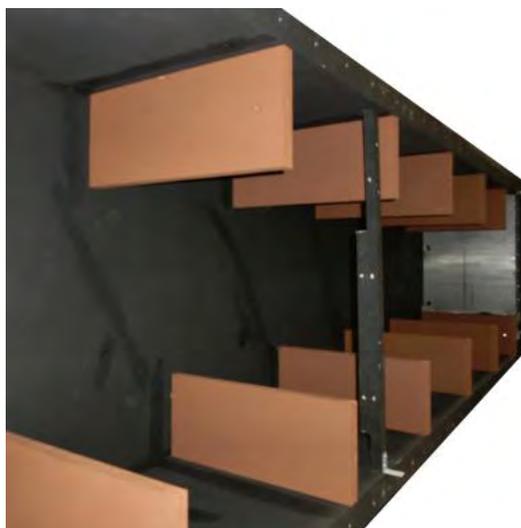


Abbildung 4-5: Treppenraum mit montierten Podesten

Jede Treppe des Modelles besteht aus zehn Styroporstufen, welche in einer Metallfassung befestigt sind. Die Stufenhöhe beträgt 31 mm und die Stufentiefe 47 mm, diese Maße entsprechen im Original 187,5 mm und 280 mm. Die montierten Treppen sind in der nachfolgenden Abbildung 4-6 zu erkennen.



Abbildung 4-6: Modell mit Podesten und Treppen

Nachdem die Front mit Plexiglasscheiben verschlossen ist, muss das gesamte Modell über Gewindestangen und Holzbalken verspannt werden, da der Innendruck während der Versuche sehr groß wird und die Plexiglasscheiben zu platzen drohen. Das verspannte Modell ist in der Abbildung 4-7 zu sehen.

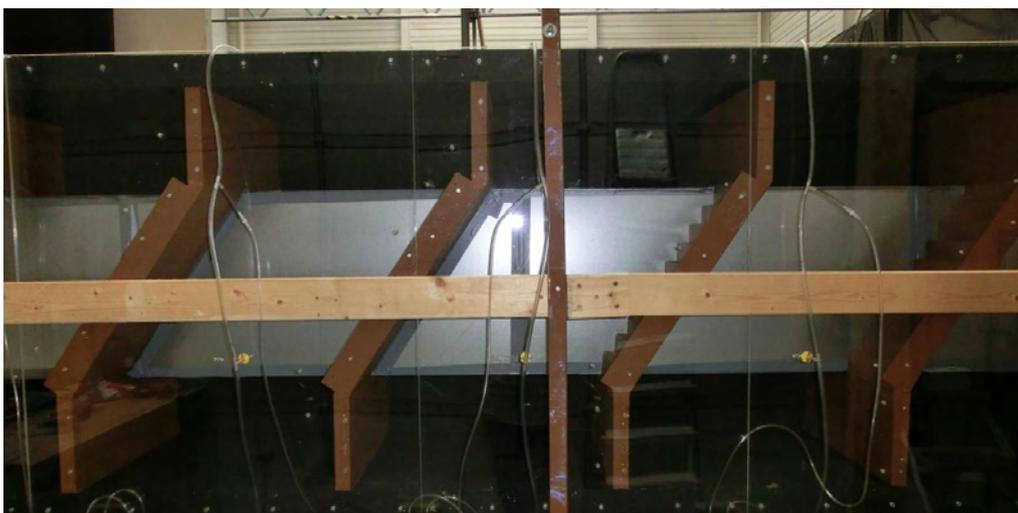


Abbildung 4-7: verspanntes Treppenraummodell

4.3 Modellvarianten

Laut §32 Abs. 5 der MBO muss die Laufbreite in Treppenträumen auf den größten zu erwartenden Personenstrom ausgelegt sein. In Hochhäusern beträgt die minimale Laufbreite 1,25 m, wenn im Notfall weniger als 150 Personen den Sicherheitstreppenraum nutzen müssen. Werden mehr Menschen erwartet, müssen die Treppen dementsprechend breiter sein. Im Modellversuch werden zwei Laufbreiten untersucht, einerseits die minimale Laufbreite von 1,25 m und andererseits die Laufbreite des Towers 185, welche 1,35 m beträgt.

Für die Bezeichnung der einzelnen Versuchsvarianten wird im Rahmen dieser Arbeit ein Schlüssel verwendet, der sich wie folgt definiert:

X - Y - Z

mit:

X: Kennzeichnung Treppenbreite,

$X_1=BT$ (breite Treppe, $b_T=1,35$ m)

$X_2=ST$ (schmale Treppe, $b_T=1,25$ m)

Y: Variationsparameter Augenbreite, kennzeichnet die Augenbreite in Metern

Z: Kennzeichnung Geländergestaltung

$Z_1=H$ (Handlauf)

$Z_2=B$ (Brüstung)

$Z_3=GA$ (geschlossenes Treppenauge)

Die Versuchsvarianten unterscheiden sich maßgeblich durch die Treppen-, Augenbreite und Geländergestaltung. In Tabelle 4-1 ist eine Übersicht der durchgeführten Versuchsvarianten dargestellt.

Die untersuchten Augenbreiten bei den breiten Treppen haben im Original die Maße 0,25 m (Anlehnung an Tower 185), 0,32 m, 0,41 m und 0,50 m. Bei den schmalen Treppen betragen die Augenbreiten 0,15 m, 0,31 m und 0,49 m.

Tabelle 4-1: Versuchsvarianten

Variante	Laufbreite im Original [m]	Augenbreite im Original [m]	Geländerart
breite Treppe			
BT-0,25-H	1,35	0,25	Handlauf
BT-0,25-B	1,35	0,25	Brüstung
BT-0,25-GA	1,35	0,25	Geschlossenes Treppenauge
breite Treppe			
BT-0,32-H	1,35	0,32	Handlauf
BT-0,32-B	1,35	0,32	Brüstung
BT-0,32-GA	1,35	0,32	Geschlossenes Treppenauge
breite Treppe			
BT-0,41-H	1,35	0,41	Handlauf
BT-0,41-B	1,35	0,41	Brüstung
BT-0,41-GA	1,35	0,41	Geschlossenes Treppenauge
breite Treppe			
BT-0,50-H	1,35	0,5	Handlauf
BT-0,50-B	1,35	0,5	Brüstung
BT-0,50-GA	1,35	0,5	Geschlossenes Treppenauge
schmale Treppe			
ST-0,15-H	1,25	0,15	Handlauf
ST-0,15-B	1,25	0,15	Brüstung
ST-0,15-GA	1,25	0,15	Geschlossenes Treppenauge
schmale Treppe			
ST-0,31-H	1,25	0,31	Handlauf
ST-0,31-B	1,25	0,31	Brüstung
ST-0,31-GA	1,25	0,31	Geschlossenes Treppenauge
schmale Treppe			
ST-0,49-H	1,25	0,49	Handlauf
ST-0,49-B	1,25	0,49	Brüstung
ST-0,49-GA	1,25	0,49	Geschlossenes Treppenauge

Die Variante BT-0,25-H entspricht dem Modell des Towers 185.

Die Unterschiede in der Treppen- und Augenbreite sind in Abbildungen nicht erkennbar, sodass Abbildung 4-8 lediglich der Demonstration der drei Geländervarianten dient. Links ist ein Treppenraum mit einem verschlossenem Treppenauge zu sehen. In dem Modell in der Mitte ist eine Brüstung dargestellt. Rechts ist ein Treppenraum ohne jegliches Geländer zu sehen, dieses stellt ein Modell mit einem Handlauf dar.

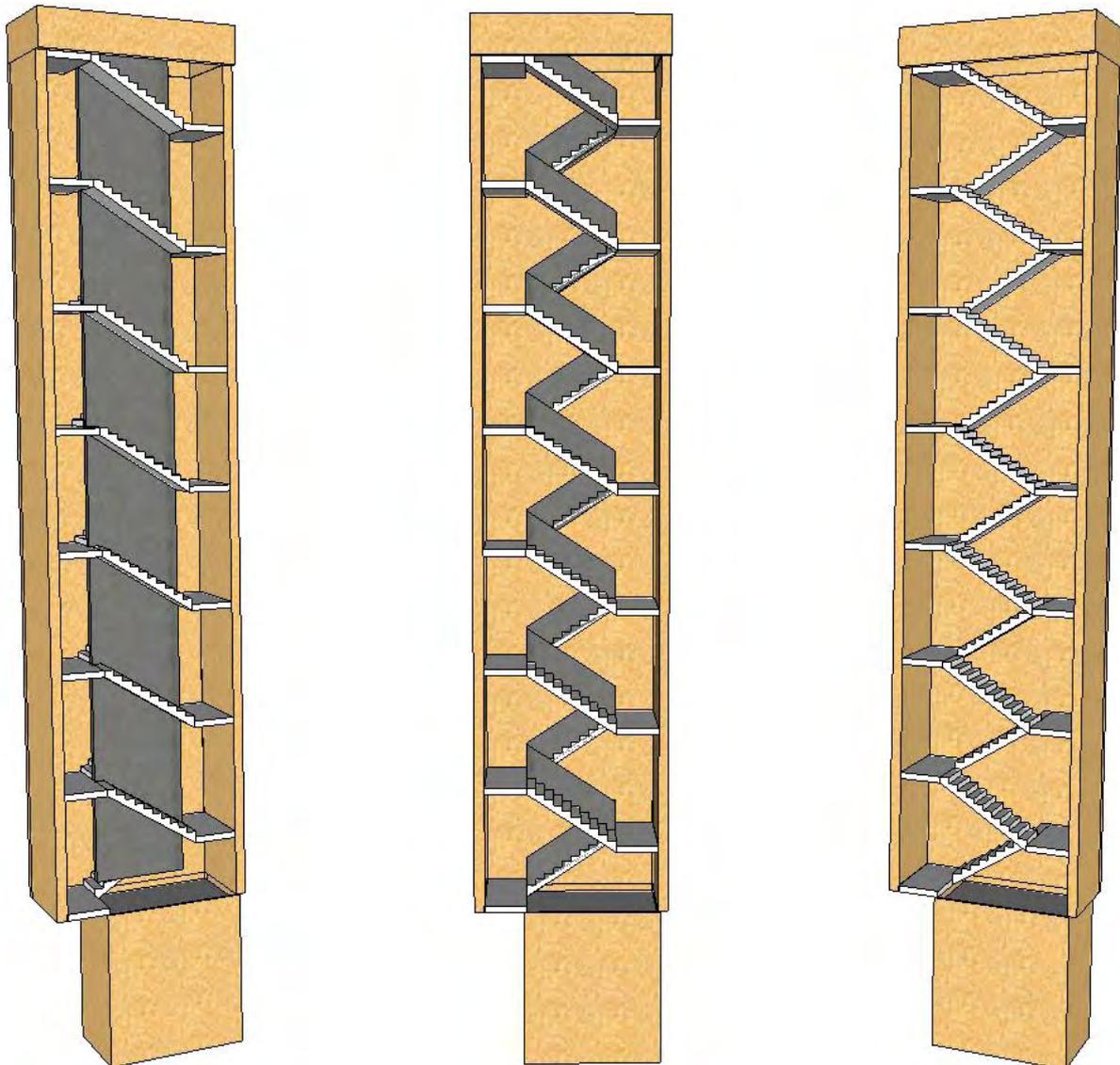


Abbildung 4-8: Darstellung der drei Geländervarianten

4.3.1 Modellvariante Handlauf

Es kann davon ausgegangen werden, dass ein Handlauf kein großes Strömungshindernis darstellt und wird daher in diesen Modellvarianten nicht nachgebildet. In der nachfolgenden Abbildung 4-9 ist ein Ausschnitt aus einem solchen Treppenraummodell zu sehen.

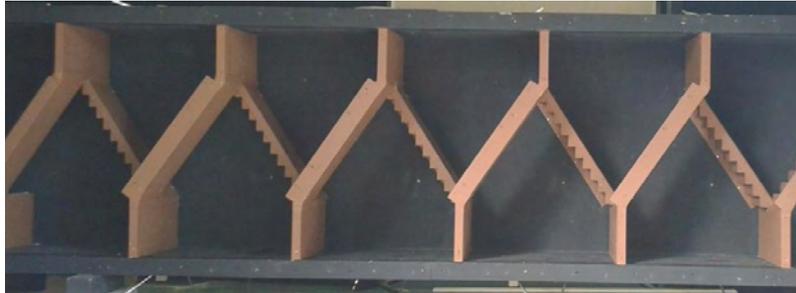


Abbildung 4-9: Treppenraummodell der Variante Handlauf

4.3.2 Modellvariante Brüstung

Je nach Gebäudeart, Absturzhöhe und Augenbreite, sind in der DIN 18065 minimale Geländerhöhen festgelegt, welche in Abbildung 4-10 angegeben sind.

Gebäude im Allgemeinen		
Absturzhöhen	Gebäudearten	min. Treppengeländerhöhe
≥ 12 m	Gebäude, die nicht der Arbeitsstättenverordnung unterliegen	900 ^a
≥ 12 m ^c	Arbeitsstätten	1000 ^b
> 12 m ^c	für alle Gebäudearten	1100
^a nach Bauordnungsrecht ^b nach Arbeitsschutzrecht ^c bei Treppenaugenbreiten ≤ 200 mm gelten die Anforderungen nach Zeile 1, bei Arbeitsstätten nach Zeile 2		

Abbildung 4-10: minimale Geländerhöhen nach [3]

Für die untersuchten Treppenhäuser wird aufgrund der Fallhöhe von mehr als zwölf Meter und der Treppenaugenbreite des Towers 185 (250 mm), eine Geländerhöhe von 1100 mm gewählt. Wie schon in Kapitel 3.5 beschrieben, ist bei der Ausführung der Geländerhöhe zudem der Treppenverlauf zu beachten. Da der Treppenverlauf im Modell der Treppenführung Nummer 1 entspricht (vgl. Abbildung 3-11), muss die Geländerhöhe an den Podesten, entsprechend einer

Stufenhöhe, um 188 mm höher sein. Die Brüstungshöhe beträgt somit 1288 mm. Über den Maßstabsfaktor M 1:6 berechnet sich die Brüstungshöhe im Modell zu etwa 0,21 m.

Die Ausführung der Brüstung wird im Modell durch Metallbleche simuliert, welche an den Treppen und Podesten montiert und in der Abbildung 4-11 zu sehen sind.

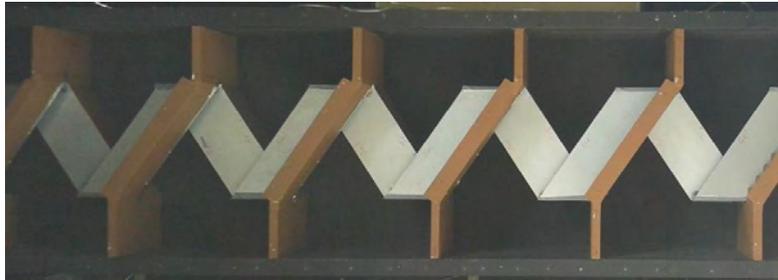


Abbildung 4-11: Versuchsmodell mit eingebauter Brüstung

4.3.3 Modellvariante verschlossenes Treppenauge

Manchmal wird der Raum des Treppenauges genutzt, um die technische Gebäudeausrüstung in diesem unterzubringen. Wird das Treppenauge komplett verschlossen, kann die Luft den Treppenraum ausschließlich spiralförmig über den Lauf der Treppen durchströmen. Das Treppenauge wird in einigen Versuchsvarianten verschlossen, indem ein Metallkern in diesem befestigt wird. Dieser Metallkern besteht aus Blechen und ist in der nachfolgenden Abbildung 4-12 dargestellt.



Abbildung 4-12: Versuchsmodell mit verschlossenem Treppenauge

4.4 Messtechnik

Für die Datengewinnung aus den experimentellen Versuchen und um Randbedingungen regulieren zu können, ist es notwendig, Volumenströme und Differenzdrücke messtechnisch zu erfassen.

Der Druckabfall in durchströmten Objekten wird üblicherweise durch einen Druckverlustbeiwert oder über die Angabe einer Effektivfläche ausgedrückt (vgl. Kapitel 3.1.2). Zur Berechnung des spezifischen Druckverlustbeiwertes kann die Formel 3.12 verwendet werden. Da die Versuche bei Raumtemperatur durchgeführt werden, kann angenommen werden, dass die Luftdichte konstant $1,2 \text{ kg/m}^3$ beträgt. Als Bezugsfläche wird, wie bereits erwähnt, die Grundfläche des Treppenraumes gewählt.

Zur Bestimmung eines Druckverlustbeiwertes muss der Volumenstrom gemessen werden, sowie der von diesem Volumenstrom abhängige Differenzdruck über einer Etage im Treppenraum.

4.4.1 Bestimmung des Zuluftvolumenstromes

Stirnseitig an das Versuchsmodell wird ein Ventilator der Firma Zenner angeschlossen. Dieser kann Volumenströme bis zu $29.880 \text{ m}^3/\text{h}$ fördern. Während der Versuche wird das Modell mit verschiedenen Volumenströmen durchströmt. Zur Bestimmung dieser Luftströme wird eine Messblende der Firma Trox mit einem Durchmesser von 400 mm und ein Differenzdruckmessgerät (DPM) der Firma DP Measurement des Modells TT4705 verwendet. Die Messblende wird saugseitig an dem Lüfter montiert. Mit ihr können Volumenströme von $612 \text{ m}^3/\text{h}$ - $6048 \text{ m}^3/\text{h}$ mit einer Genauigkeit von $\pm 5\%$ bestimmt werden. Das Messverfahren dieser Messblende beruht auf der Kontinuitätsgleichung, welche in Formel (3.8) dargestellt ist und der durch die Bernoulli-Gleichung (siehe Formel (3.3)) ausgedrückten Energieerhaltung (vgl. Kapitel 3.1.2). Da der Strömungsquerschnitt in der Messblende verringert wird, muss sich die Strömungsgeschwindigkeit nach Formel (3.8) erhöhen, wobei die Gesamtenergie der Strömung erhalten bleibt. Weder die Erdbeschleunigung, noch die Strömungshöhe oder die Dichte ändert sich relevant, daher bewirkt die Querschnittsverengung der Messblende einen Druckabfall. Dies geht aus der Bernoulli-Gleichung hervor. Der an der Messblende gemessene Wirkdruck wird von einem DPM erfasst und kann an einer

Digitalanzeige abgelesen werden. Aus dem Wirkdruck kann mit folgender Formel der Volumenstrom bestimmt werden:

$$\dot{V} = C \cdot \sqrt{\Delta p_w} \quad (4.1)$$

C ist eine Messblendenkonstante und wird von dem Hersteller der jeweiligen Messblende angegeben. Sie beträgt für die verwendete Messblende $381,6 \frac{m^3}{h \cdot Pa^{0,5}}$.

Die Formel (4.1) gilt bei Normtemperatur von 20 °C bzw. einer Luftdichte von $\rho = 1,2 \frac{kg}{m^3}$. Andernfalls muss eine Dichtekorrektur erfolgen. Aus Formel (4.1) ergibt sich dann:

$$\dot{V} = C \cdot \sqrt{\Delta p_w} \cdot \sqrt{\frac{1,2 \frac{kg}{m^3}}{\rho}} \quad (4.2)$$

4.4.2 Bestimmung des Differenzdruckes

Parallel zum Zuluftvolumenstrom, muss der Differenzdruck über den Etagen des Treppenraummodelles gemessen werden. Hierfür werden 16 Druckmessstellen an dem Modell eingerichtet. Gemessen werden die Druckdifferenzen zwischen den Ebenen E3/E4, E4/E5 und E5/E6 welche in der nachfolgenden Abbildung 4-13 rot markiert sind.

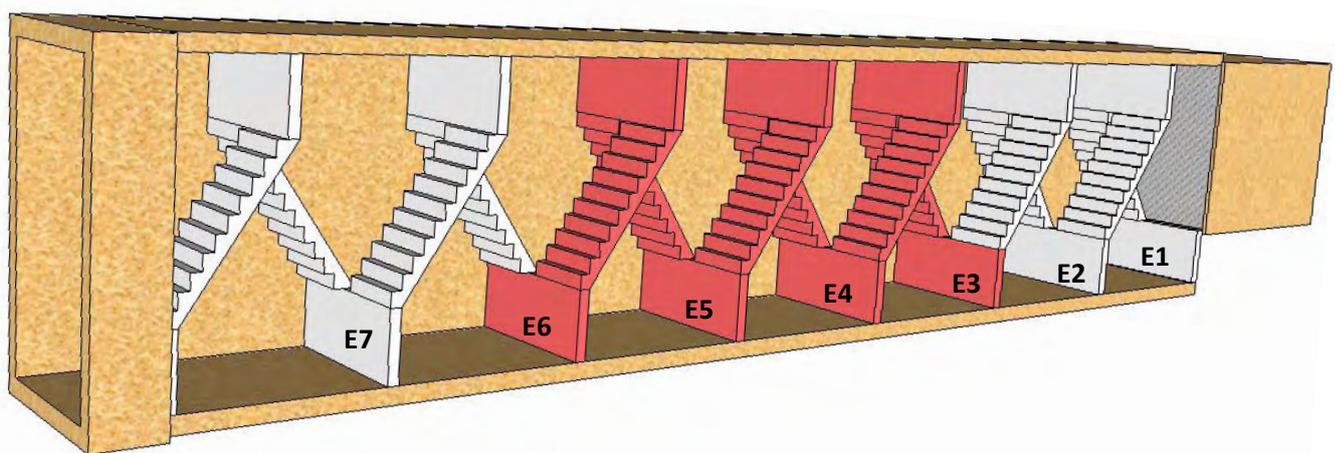


Abbildung 4-13: Darstellung der Ebenen, über denen der Differenzdruck gemessen wird

Die beiden unteren Geschosse dienen dem Strömungsaufbau, die beiden oberen dem Strömungsabbau. An diesen Geschossen werden keine Druckmessstellen angebracht. Die Anordnung der Messpunkte im mittleren Teil des Modells soll verhindern, dass die untersuchte Strömung bedingt durch Ein- und Ausströmungsverhältnisse des Modells gestört wird. Je vier Messstellen werden entlang einer Achse auf den Umfang des Modelles verteilt. Um die Messgenauigkeit zu erhöhen werden die vier Messpunkte, welche jeweils auf einer Schnittfläche oberhalb der Ebenen sind, mit luftdichten Schläuchen verbunden. An den angeschlossenen DPMs wird folglich der Mittelwert der vier einzelnen Messstellen angezeigt. Die Anordnung der Messstellen und die Positionen der DPMs sind der Abbildung 4-14 zu entnehmen.

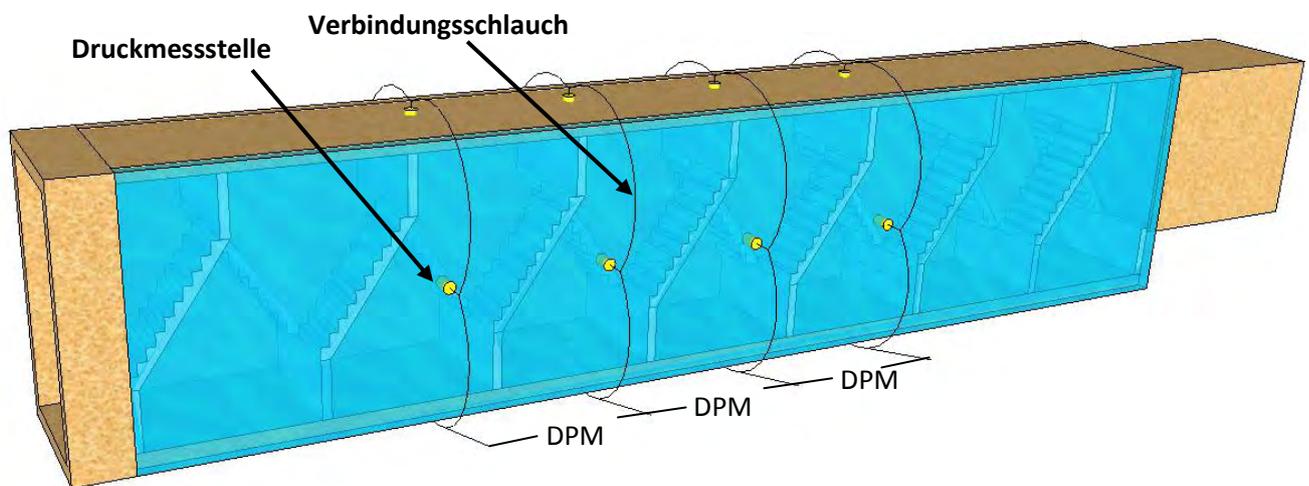


Abbildung 4-14: Positionen der Druckmessstellen

Wird der Volumenstrom schrittweise verändert, so kann der jeweilige Differenzdruck an den angeschlossenen DPMs abgelesen werden. Der Volumenstrom variiert während der Messungen zwischen $2090 \text{ m}^3/\text{h}$ und $6040 \text{ m}^3/\text{h}$. Diese Volumenströme entsprechen im Original $12540 \text{ m}^3/\text{h}$ und $36240 \text{ m}^3/\text{h}$.

Zunächst wird der Volumenstrom schrittweise erhöht und die Differenzdrücke werden aufgezeichnet. Im weiteren Verlauf wird der Volumenstrom verringert und die Differenzdrücke werden ebenfalls erfasst. An den Ergebnissen darf keine Hysterese erkennbar sein. Weisen die Messwerte bei steigendem und sinkendem Volumenstrom Unterschiede auf, so scheint sich die Strömung während der Messungen verändert zu haben. Dies kann geschehen, wenn durch hohe Strömungsgeschwindigkeiten und Drücke das Modell seine Form verändert und zum Beispiel Spalte aufgedrückt werden, die nicht von vorn herein durchströmt werden.

5. Ergebnisse der Untersuchung, Berechnung, Betrachtung

Aus den Messungen des Wirkdruckes an der Messblende und den Differenzdruckmessungen über den einzelnen Geschossen wird für jede Modellvariante eine Effektivfläche bestimmt. In dieser Arbeit werden zusätzlich spezifische Druckverlustbeiwerte berechnet, um die Ergebnisse mit anderen Untersuchungen vergleichen zu können.

5.1 Berechnung der Effektivfläche und des spezifischen Druckverlustbeiwertes des Towers 185

Der Berechnung eines jeden Druckverlustbeiwertes liegt eine Messreihe von meist 23 Volumenströmen und dem arithmetischen Mittelwert der Druckdifferenzen zwischen den Etagen E3/E4, E4/E5 und E5/E6 zugrunde.

Um den Rechenweg darzustellen, wird im folgenden Abschnitt eine Beispielrechnung durchgeführt. Diese basiert auf einer Messreihe der Modellvariante BT-0,25-H, welche dem Modell eines Treppenraumes des Towers 185 entspricht. Beträgt der Wirkdruck an der Messblende 30 Pa, wird über den einzelnen Stockwerken ein durchschnittlicher Differenzdruck von 29 Pa gemessen. Hierbei handelt es sich um den arithmetischen Mittelwert der drei gemessenen Differenzdrücke. Unter der Annahme einer konstanten Luftdichte von $\rho = 1,2 \frac{kg}{m^3}$ kann der Volumenstrom über die Formel (4.1) berechnet werden:

$$\dot{V}_M = C \cdot \sqrt{\Delta p_w} = 381,6 \frac{m^3}{h \cdot Pa^{0,5}} \cdot \sqrt{30 Pa} = 2090 \frac{m^3}{h}$$

Im weiteren Verlauf der Auswertung wird der durchschnittliche Druckverlust über dem Quadrat des jeweiligen Volumenstroms in $(m^3/s)^2$ in ein Koordinatensystem eingetragen. Dieses berechnet sich wie folgt:

$$\dot{V}_M^2 = \left(\frac{\dot{V}_M}{3600s/h} \right)^2 = \left(\frac{2090m^3/h}{3600s/h} \right)^2 = 0,337 \left(\frac{m^3}{s} \right)^2$$

In der Tabelle 5-1 ist eine Messreihe zu sehen, die den Druckverlust im Modell des Towers 185 bei verschiedenen Volumenströmen widerspiegelt. Eingetragen sind die Messwerte des Wirkdruckes und

5. Ergebnisse der Untersuchung, Berechnung, Betrachtung

des durchschnittlichen Differenzdruckes über einem Geschoss. Zudem sind die errechneten Volumenströme des Modells in m^3/h und das Quadrat des Volumenstromes in $(\text{m}^3/\text{s})^2$ angegeben.

Tabelle 5-1: Zwischenergebnisse der Messwertanalyse

Δp_w	\dot{V}_M	\dot{V}_M^2	$\Delta p_{G,M}$
[Pa]	[m^3/h]	[$(\text{m}^3/\text{s})^2$]	[Pa]
30	2090	0,337	29,0
39	2383	0,438	38,3
50	2698	0,562	48,7
60	2956	0,674	57,0
70	3193	0,787	67,3
80	3413	0,899	75,7
90	3620	1,011	86,0
100	3816	1,124	95,0
110	4002	1,236	105,3
120	4180	1,348	114,0
130	4351	1,461	126,0
140	4515	1,573	132,3
150	4674	1,685	144,0
160	4827	1,798	152,0
170	4975	1,910	164,7
180	5120	2,022	169,0
190	5260	2,135	182,3
200	5397	2,247	191,7
210	5530	2,360	201,7
220	5660	2,472	207,7
230	5787	2,584	217,3
240	5912	2,697	227,7
250	6034	2,809	237,3
250	6034	2,809	240,0

Um die Effektivfläche zu bestimmen wird der Druckverlust eines Geschosses über dem Quadrat des dazugehörigen Volumenstromes aufgetragen. In der nächsten Abbildung 5-1 ist zu sehen, dass die eingetragenen Werte eine Gerade ergeben.

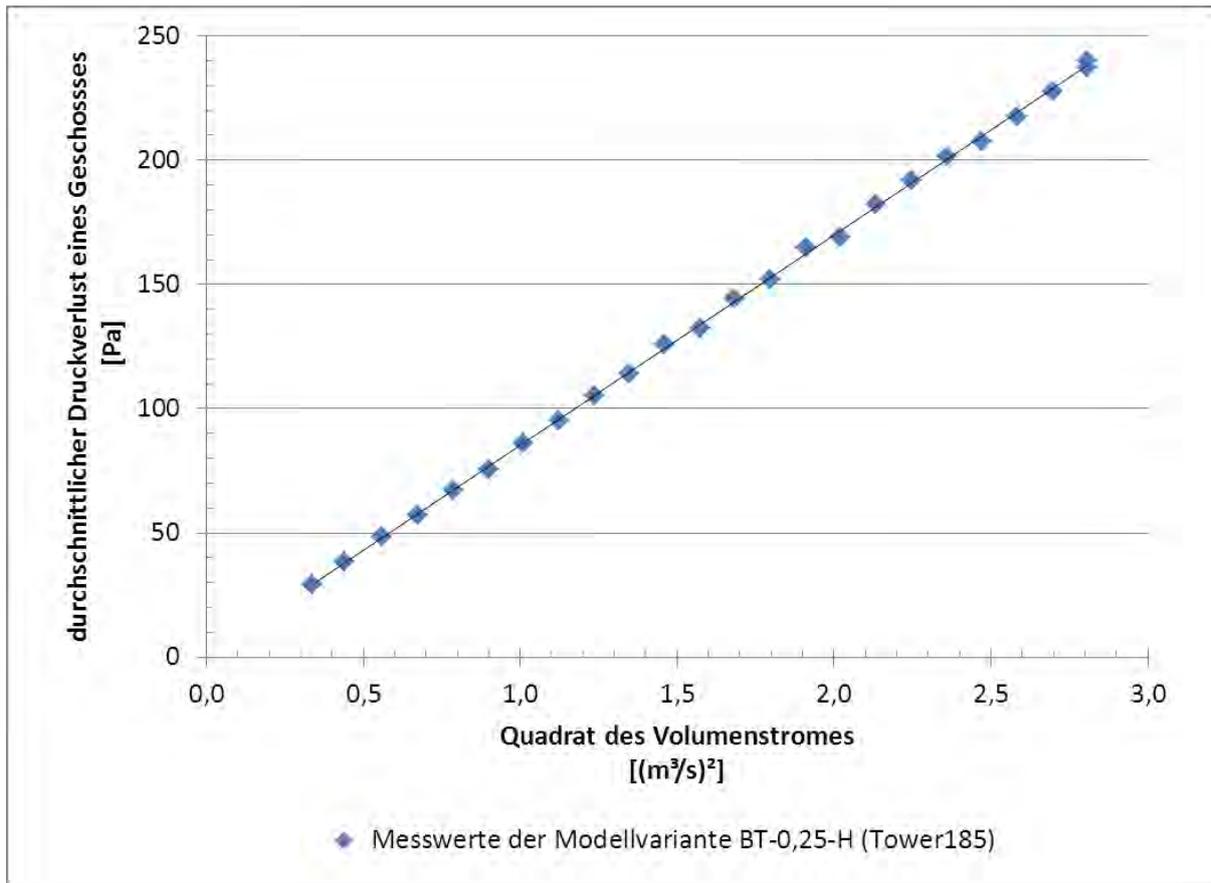


Abbildung 5-1: Druckverlust eines Geschosses über dem Quadrat des Volumenstromes

Dem Zusammenhang des Druckverlustes und des Volumenstromes liegt Formel (3.14) zugrunde (vgl. Kapitel 3.1.2). Sie kann wie folgt umgeschrieben werden:

$$\Delta p_V = \Delta p_G = \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{\dot{V}}{A_{eff}} \right)^2 = \left(\frac{\rho}{2 \cdot A_{eff}^2} \right) \cdot \dot{V}^2 \quad (5.1)$$

Die allgemeine Geradengleichung lautet:

$$y = m \cdot x + n \quad (5.2)$$

Hier stellt m die Steigung und n den y -Achsenabschnitt der Geraden dar. Werden Formel (5.1) und (5.2) verglichen, so ist ersichtlich, dass der Druckverlust linear vom Quadrat des Volumenstromes abhängig ist. Die Steigung der Formel (5.1) beträgt somit:

$$m = \left(\frac{\rho}{2 \cdot A_{eff}^2} \right) \quad (5.3)$$

Die Gleichung der ebenfalls in Abbildung 5-1 dargestellten, approximierten Gerade lautet:

$$\Delta p_V = 84,484 \frac{Pa}{(m^3/s)^2} \dot{V}^2 + 0,709 Pa \quad (5.4)$$

Hier beträgt die Steigung $m = 84,484 \frac{Pa}{(m^3/s)^2}$.

Aus der Steigung der approximierten Geraden kann die Effektivfläche berechnet werden. Hierfür wird Formel (5.3) wie folgt umgestellt:

$$A_{eff,M} = \sqrt{\frac{\rho}{2 \cdot m}} = \sqrt{\frac{1,2kg/m^3}{2 \cdot 84,484Pa/(m^3/s)^2}} = 0,08427m^2$$

Diese Effektivfläche beschreibt den Druckverlust im Modell und muss über den Maßstabsfaktor der Länge in eine Effektivfläche umgerechnet werden, welche den Druckverlust im Original widerspiegelt:

$$A_{eff,o} = A_{eff,M} \cdot \left(\frac{1}{f_l}\right)^2 = 0,0827m^2 \cdot (6)^2 = 3,03m^2$$

Aus dieser Effektivfläche und der Grundfläche des Towers 185 lässt sich mit der Formel (3.17) der Druckverlustbeiwert eines Geschosses berechnen:

$$\zeta = \left(\frac{A}{A_{eff}}\right)^2 = \left(\frac{16,06m^2}{3,03m^2}\right)^2 = 28,09$$

Der spezifische Druckverlustbeiwert berechnet sich mit Formel (3.13) (vgl. Kapitel 3.1.2) wie folgt:

$$\zeta^* = \frac{\zeta}{h} = \frac{28,09}{3,75m} = 7,49 \frac{1}{m}$$

Für alle Modellvarianten werden auf diese Weise die Effektivflächen und spezifischen Druckverlustbeiwerte berechnet.

5.2 Ergebnisse

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der Rechnungen zusammengetragen. In der Tabelle 5-2 sind die berechneten Effektivflächen und spezifischen Druckverlustbeiwerte der einzelnen Varianten zusammengefasst.

Tabelle 5-2: Übersicht der Versuchsergebnisse

Variante:	A_{eff}	ζ^* -Wert
	$[m^2]$	$[m^{-1}]$
breite Treppe		
BT-0,25-H (Tower 185)	3,03	7,5
BT-0,25-B	3,78	4,8
BT-0,25-GA	2,51	10,9
BT-0,32-H	3,38	6,3
BT-0,32-B	4,20	4,1
BT-0,32-GA	2,63	10,4
BT-0,41-H	3,78	5,3
BT-0,41-B	4,54	3,7
BT-0,41-GA	2,63	11,0
BT-0,50-H	4,20	4,6
BT-0,50-B	5,05	3,2
BT-0,50-GA	2,63	11,7
schmale Treppe		
ST-0,15-H	2,18	11,6
ST-0,15-B	3,00	6,1
ST-0,15-GA	2,31	10,3
ST-0,31-H	2,90	7,4
ST-0,31-B	3,74	4,4
ST-0,31-GA	2,41	10,6
ST-0,49-H	3,80	4,9
ST-0,49-B	4,72	3,1
ST-0,49-GA	2,42	12,0

5.3 Analyse der Ergebnisse

In den Abbildungen 5-2 und 5-3 sind die ermittelten spezifischen Druckverlustbeiwerte dargestellt. In den Abbildungen 5-4 und 5-5 sind die Effektivflächen über der jeweiligen Augenbreite aufgetragen. Für die weitere Analyse der Ergebnisse und das Erstellen der formalen Zusammenhänge sind die Effektivflächen von besonderer Bedeutung.

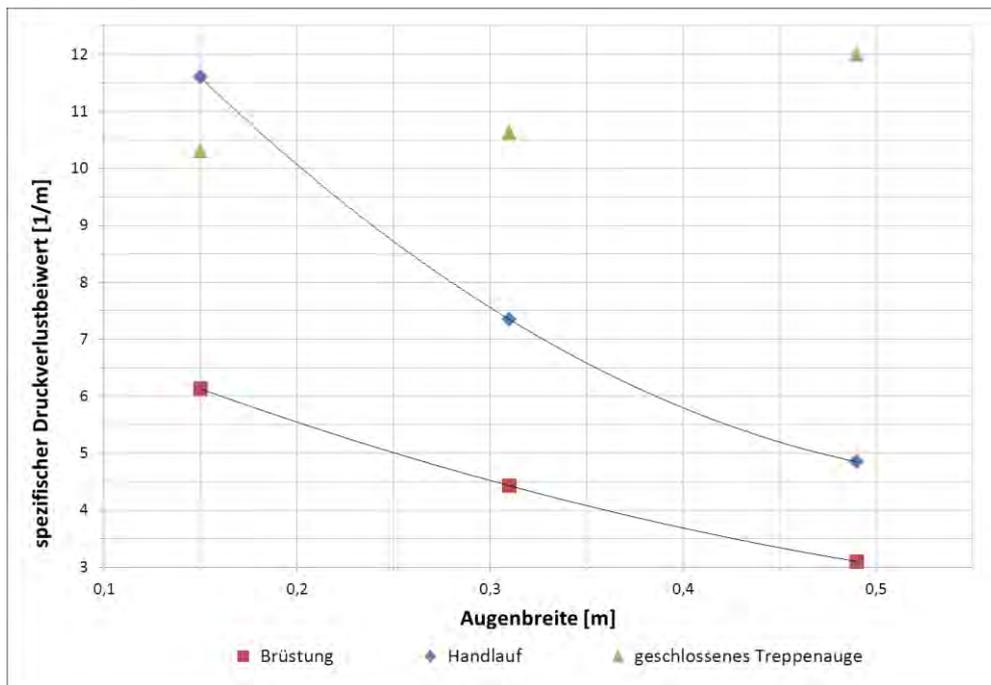


Abbildung 5-2: spezifische Druckverlustbeiwerte ($b_T = 1,25 \text{ m}$)

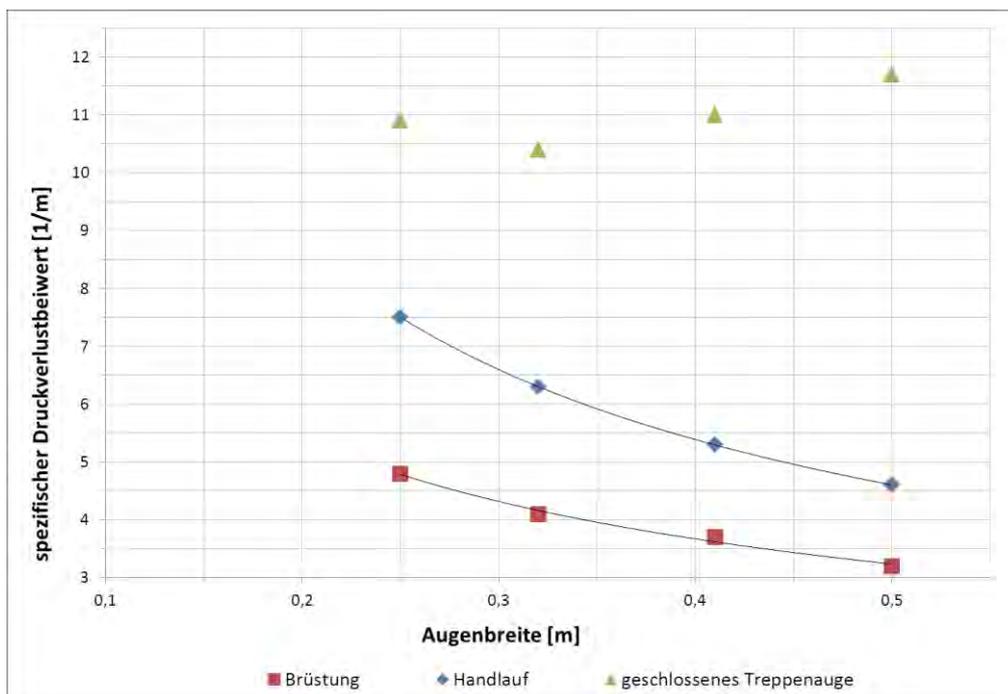


Abbildung 5-3: spezifische Druckverlustbeiwerte ($b_T = 1,35 \text{ m}$)

5. Ergebnisse der Untersuchung, Berechnung, Betrachtung

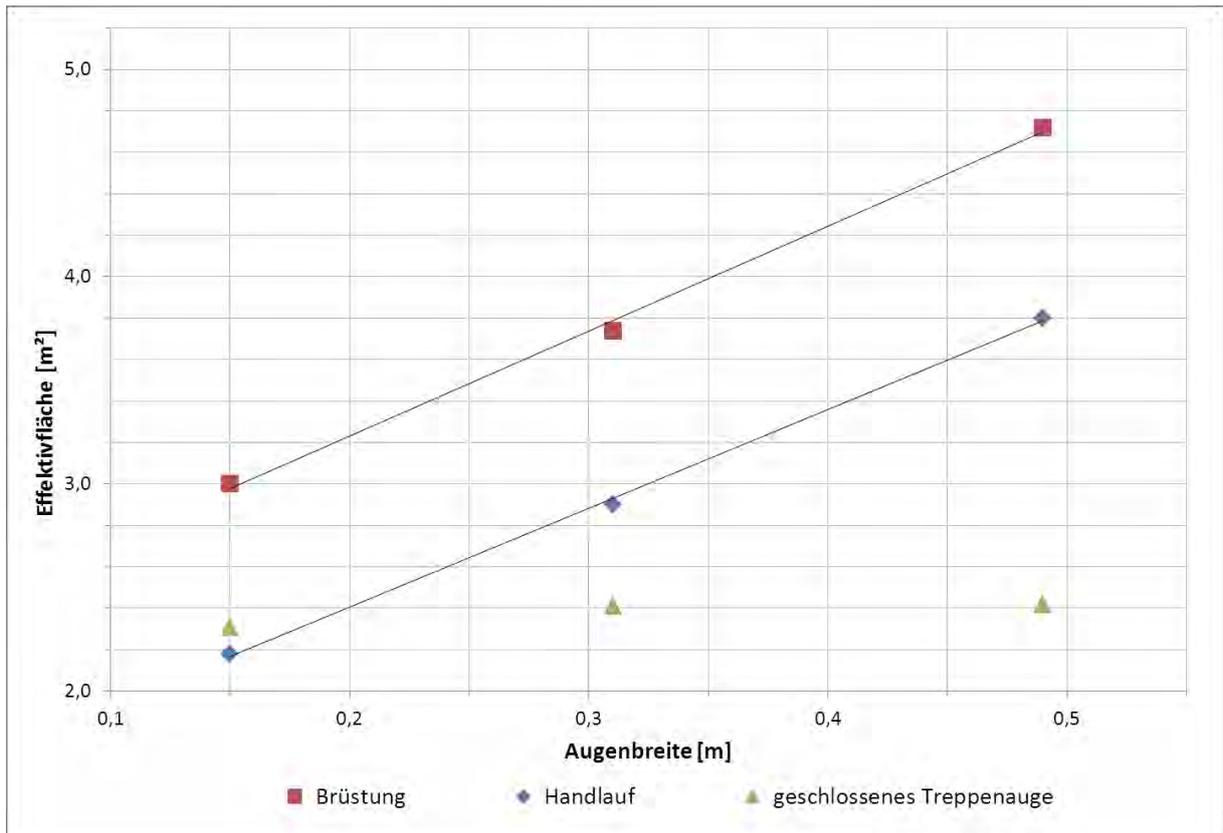


Abbildung 5-4: Effektivflächen ($b_T = 1,25 m$)

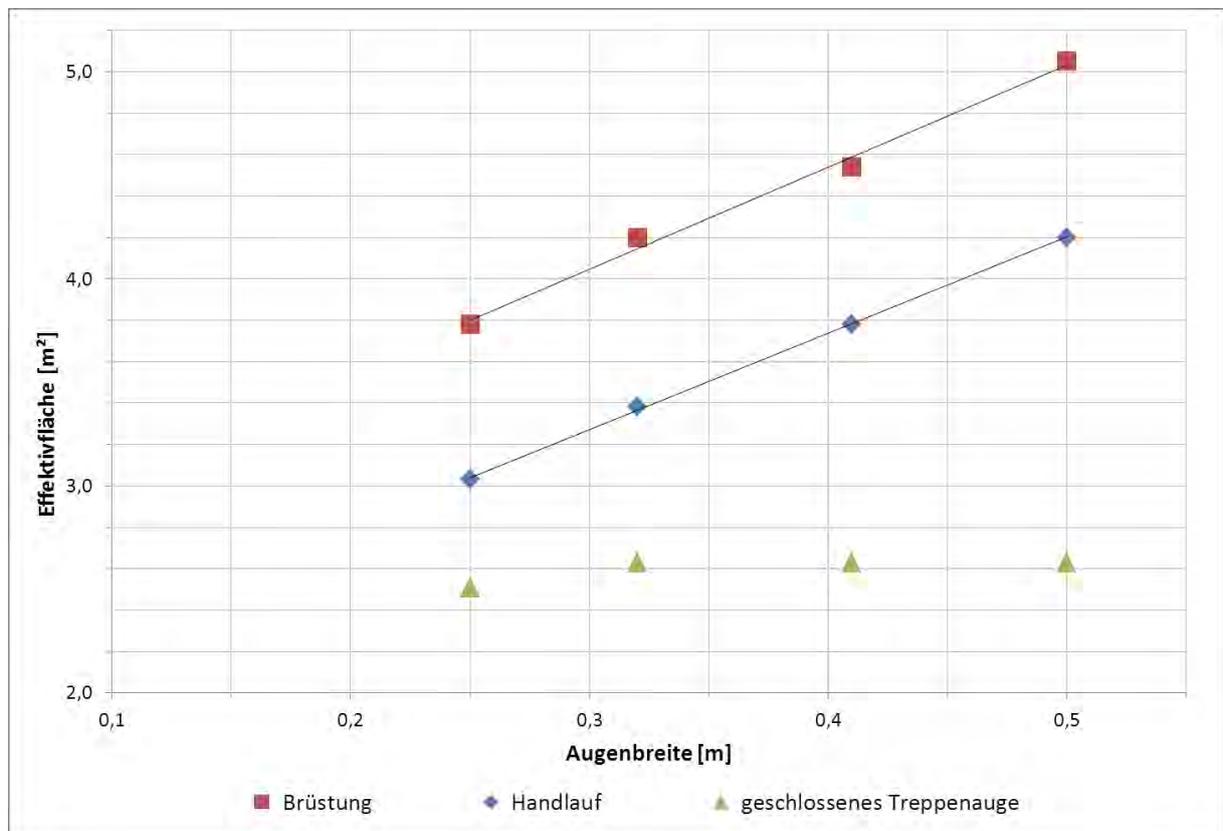


Abbildung 5-5: Effektivflächen ($b_T = 1,35 m$)

5. Ergebnisse der Untersuchung, Berechnung, Betrachtung

In den Abbildungen 5-4 und 5-5 ist zu erkennen, dass die Effektivfläche der Varianten mit dem Handlauf und der Brüstung linear von der Augenbreite abhängt. Die Effektivflächen der Varianten mit verschlossenem Treppenauge sind ab einer Augenbreite von etwa 0,30 m unabhängig von dieser und nehmen einen konstanten Wert an. Bei kleineren Treppenaugen sinken die Werte der Effektivflächen.

Da lediglich der Einfluss zweier Laufbreiten untersucht wird, können keine fundierten Aussagen über den formalen Zusammenhang der Effektivfläche und der Laufbreite getroffen werden. Es wird ebenfalls ein linearer Zusammenhang angenommen.

Für jede Geländerart werden zwei Geraden ermittelt. Eine spiegelt die Abhängigkeit von der Augenbreite, die andere die von der Laufbreite wider. Diese beiden Geraden spannen im dreidimensionalen Raum für jede Geländervariante eine Fläche auf, welche durch die folgenden Formeln beschrieben werden:

Treppenraum mit Handlauf:

$$A_{eff} = 4,68 \cdot b_A + 4,02 \cdot b_T - 3,57 \quad (5.5)$$

Treppenraum mit Brüstung:

$$A_{eff} = 4,96 \cdot b_A + 3,14 \cdot b_T - 1,69 \quad (5.6)$$

Treppenraum mit verschlossenem Treppenauge:

$$A_{eff} = 2,2 \cdot b_T - 0,34 \quad (b_A > 0,3 \text{ m}) \quad (5.7)$$

6. Bewertung, Vergleich mit Referenzergebnissen

In diesem Kapitel werden die ermittelten Ergebnisse bewertet und mit verschiedenen Untersuchungen verglichen, die sich ebenfalls mit dem Druckverlust in Treppenträumen befassen.

6.1 Kritische Betrachtung der Ergebnisse

Da Modellversuche die Basis dieser Arbeit bilden, müssen die untersuchten Modellvarianten auf Fehlerquellen hin untersucht werden. Hierzu werden im folgenden Abschnitt zunächst mögliche Fehlerquellen der Planungsphase, aufgedeckt welche die Ergebnisse verfälschen können. Des Weiteren werden mögliche Fehlerquellen des Modellbaus näher beleuchtet.

6.1.1 Mögliche Fehlerquellen im Zuge der Versuchsplanung

Während der Versuchsplanung werden Annahmen getroffen, um allgemeingültige Ergebnisse aus den Modellversuchen zu erhalten. Die Vernachlässigungen betreffen hauptsächlich den Zuluftkanal, den Versatz und den Übergang des Treppenraumes des Towers 185 zu den Schleusen (vgl. Kapitel 4.1). Im Folgenden wird zunächst bewertet, ob nach den getroffenen Annahmen direkte Rückschlüsse aus den Ergebnissen der Modellversuche auf den Druckverlust im Treppenraum des Towers 185 zulässig sind oder ob diese durch die Allgemeingültigkeit anzupassen sind.

Der **Zuluftkanal** des Towers 185 wird im Modell nicht nachgebildet. Im Februar 2012 wurden im Tower 185 Vor- Ort- Messungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass das Strömungsbild wesentlich durch die Jalousieklappen des Zuluftkanals geprägt ist [8]. Anhand der analysierten Modellversuche können daher keine direkten Rückschlüsse auf den Druckverlust in dem Tower 185 gezogen werden. Die Strömungsverhältnisse müssen in gesonderten Untersuchungen analysiert werden. Da ein solcher, als Bypass fungierender Zuluftkanal, in Sicherheitstreppenträumen relativ selten ist, stellt diese Vernachlässigung keine Fehlerquelle für die Allgemeingültigkeit der Ergebnisse dar.

Der **Versatz** innerhalb des Treppenraumes des Towers 185 wird ebenfalls nicht berücksichtigt. Da lediglich die untersten vier Stockwerke nicht unter den anderen 49 Stockwerken liegen, ist dieser Einfluss vernachlässigbar. Aus den Modellversuchen könnte durchaus der Druckverlust der 45 Regelstockwerke bestimmt werden, wenn die Zuluft in dem Tower 185 nicht über den erwähnten Zuluftkanal erfolgen würde.

Auch die Vernachlässigung des über Eck führenden **Überganges** des Treppenraumes zu den jeweiligen Schleusen scheint angemessen zu sein, um allgemeingültige Ergebnisse zu erhalten. Abbildung 6-14 zeigt, dass die Strömungen in diesem Übergang keine Auffälligkeiten aufweisen. Die Drücke in diesen Übergängen entsprechen dem durchschnittlichen Druck der jeweiligen Etagen. Da diese Übergänge Toträume darstellen, welche zusätzlich durchströmt werden, ist der Druckverlust bei einem Treppenraum mit einem solchen Übergang geringfügig höher als erwartet. Die Auswirkungen sind abschätzbar, daher ist diese Vernachlässigung zulässig, um allgemeingültige Ergebnisse zu erhalten.

Weitere Annahmen betreffen die Oberflächenstruktur, die Modellvarianten mit einem Handlauf, den Strömungsauf- und -abbau innerhalb des Modells und den Einfluss des hydrostatischen Drucks.

Es muss beachtet werden, dass die **Oberflächenstrukturen** des Originals nicht exakt nachgebildet werden. Da davon auszugehen ist, dass der untersuchte Druckverlust vorwiegend aus Strömungsumlenkungen und Verwirbelungen resultiert und der durch die Reibung entstehende Druckverlust der Strömung im Vergleich vernachlässigbar klein ist, verfälscht diese Vernachlässigung die Ergebnisse nicht. Der Einfluss der Oberflächenstruktur muss in weiterführenden Untersuchungen analysiert werden.

Im Modellversuch wird kein **Handlauf** nachgebildet, da angenommen wird, dass dieser kein großes Strömungshindernis darstellt. In der nächsten Abbildung 6-1 sind Strömungsbilder einer numerischen Strömungssimulation dargestellt [1]. In der Abbildung sind die Strömungsrichtungen und -geschwindigkeiten in einem Treppenraum mit einer Brüstung denen mit einem Handlauf gegenübergestellt. Der Handlauf wird bei dieser Simulationsrechnung als eine in Strömungsrichtung ausgerichtete Fläche mit einer Höhe von 0,04 m berücksichtigt. Bei der Variante mit einer Brüstung ist die Strömungsrichtung durch die Brüstungen geprägt und verläuft in Augennähe vertikal. Aus der Darstellung der Strömung durch die Modellvariante mit einem Handlauf geht hervor, dass die Strömung regelmäßig das Treppenauge kreuzt und der Handlauf kein großes Strömungshindernis darstellt. Somit verfälscht diese Vernachlässigung nicht die Ergebnisse der Modellversuche.

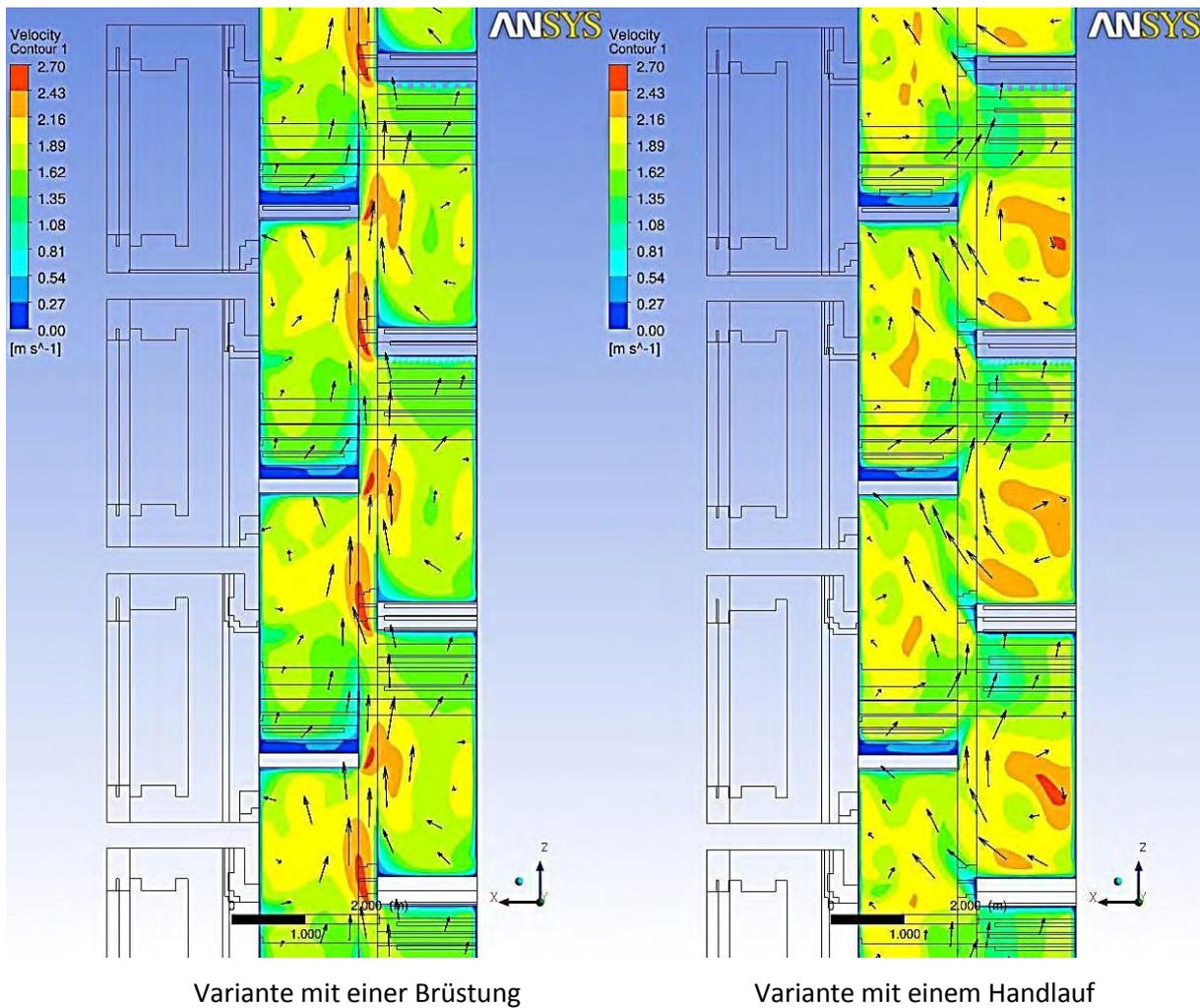


Abbildung 6-1: Strömungsrichtungen und –geschwindigkeiten [1]

Das Versuchsmodell besteht aus sieben Stockwerken, wobei die Messungen lediglich an den mittleren drei Stockwerken durchgeführt werden. Sind die erfassten Messwerte vom **Strömungsauf- und -abbau** abhängig, kann dies an unterschiedlichen Differenzdrücken der untersuchten Etagen abgelesen werden. Um den Einfluss des Strömungsauf- und -abbau zu kontrollieren, werden die Differenzdrücke über den drei mittleren Stockwerken einzeln gemessen. Nur wenn diese keine wesentlichen Unterschiede aufweisen, kann ein solcher Einfluss ausgeschlossen werden. Besteht der Verdacht, dass die Strömung gestört ist, werden die Messwerte nicht ausgewertet. Daher sind die untersuchten Strömungen unabhängig vom Strömungsauf- und -abbau.

Der untersuchte Treppenraum liegt auf der Seite. Es wird angenommen, dass der **hydrostatische Druck** keinen Einfluss auf den durch Umlenkungen und Verwirbelungen verursachten Druckverlust hat. Diese Annahme sollte in weiterführenden Untersuchungen überprüft werden.

6.1.2 Mögliche Fehlerquellen bedingt durch den Modellbau

Das Modell besteht aus Holz, Styropor, Plexiglasscheiben und Metall. Es muss beachtet werden, dass der Bau gewissen Genauigkeiten unterliegt.

Zum Beispiel kann es sein, dass die Druckmesspunkte nicht alle in exakt dem gleichen Abstand angebracht sind oder dass die Maße der Augenbreiten nicht exakt nachgebildet werden. Durch sehr gewissenhafte Durchführungen der Umbauarbeiten sind Messfehler, die den Bau des Modells betreffen minimiert.

Da das Modell aus vielen Einzelteilen besteht, ist eine vollständige Abdichtung des Modelles nicht möglich. Bei jeder Messung wird das Modell auf gravierende Undichtigkeiten untersucht, sodass diese ebenfalls minimiert werden können.

6.1.3 Bewertung möglicher Fehlerquellen

Im Rahmen der durchgeführten Versuche können allgemeingültige Rückschlüsse bezüglich der Einflussparameter auf den Druckverlust in Sicherheitstreppe räumen gezogen werden. Dies geht aus den im vorigen Teil analysierten möglichen Fehlerquellen hervor.

Die sorgfältige Arbeitsweise wird durch die im Laufe der Auswertungen ermittelten Bestimmungsgrade widerspiegelt. Für die Berechnung der Effektivflächen wird, der durchschnittliche Druckverlust eines Geschosses über dem Quadrat des jeweiligen Volumenstromes aufgetragen (vgl. Kapitel 5.1). Hier bilden die eingetragenen Punkte eine Gerade. Sowohl der Bestimmungsgrad dieser approximierten Geraden, als auch der der Geraden, welche die Abhängigkeit der Effektivfläche von der jeweiligen Augenbreite darstellt (siehe Abbildung 5-4 und 5-5), beträgt mindestens 99,3 %.

6.2 Bewertung der ermittelten Formeln

Um die Genauigkeit der ermittelten Formeln (5.5)-(5.7) zu überprüfen, werden mit Hilfe dieser Effektivflächen für die einzelnen Modellvarianten berechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden für die Varianten mit einer breiten Treppe in der nachfolgenden Tabelle 6-1 den bereits in Tabelle 5-2 dargestellten Ergebnissen der Modellversuche gegenübergestellt. Das Gleiche ist der Tabelle 6-2 für die Varianten mit einer schmalen Treppe zu entnehmen.

Tabelle 6-1: Vergleich der Ergebnisse ($b_T = 1,35 \text{ m}$)

Variante:	ζ^* -Wert (Modellversuch)	ζ^* -Wert (berechnet)	A_{eff} (Modellversuch)	A_{eff} (berechnet)	Abweichung (A_{eff})
	$[m^{-1}]$	$[m^{-1}]$	$[m^2]$	$[m^2]$	[%]
BT-0,25-H (Tower 185)	7,5	7,5	3,03	3,03	0
BT-0,25-B	4,8	4,8	3,78	3,79	-0,3
BT-0,32-H	6,3	6,4	3,38	3,35	0,9
BT-0,32-B	4,1	4,2	4,20	4,14	1,4
BT-0,32-GA	10,4	10,4	2,63	2,63	0
BT-0,41-H	5,3	5,4	3,78	3,78	0
BT-0,41-B	3,7	3,6	4,54	4,58	-0,9
BT-0,41-GA	11,0	11,1	2,63	2,63	0
BT-0,50-H	4,6	4,6	4,20	4,20	0
BT-0,50-B	3,2	3,2	5,05	5,03	0,4
BT-0,50-GA	11,7	11,7	2,63	2,63	0

Tabelle 6-2: Vergleich der Ergebnisse ($b_T = 1,25 \text{ m}$)

Variante:	ζ^* -Wert (Modellversuch)	ζ^* -Wert (berechnet)	A_{eff} (Modellversuch)	A_{eff} (berechnet)	Abweichung (A_{eff})
	$[m^{-1}]$	$[m^{-1}]$	$[m^2]$	$[m^2]$	[%]
ST-0,15-H	11,6	11,9	2,18	2,16	0,9
ST-0,15-B	6,1	6,2	3,00	2,98	0,7
ST-0,31-H	7,4	7,3	2,90	2,91	-0,3
ST-0,31-B	4,4	4,4	3,74	3,77	-0,8
ST-0,31-GA	10,6	10,7	2,41	2,41	0
ST-0,49-H	4,9	5,0	3,80	3,75	1,3
ST-0,49-B	3,1	3,2	4,72	4,67	1,1
ST-0,49-GA	12,0	12,1	2,42	2,41	0,4

Die prozentuale Abweichung der jeweiligen Effektivflächen ist den obigen Tabellen zu entnehmen. Die Effektivflächen können mithilfe der ermittelten Formeln relativ genau berechnet werden, da ihre Werte maximal eine Abweichung von 1,4 % aufweisen.

6.3 Vergleich der Ergebnisse mit ähnlichen Untersuchungen

Da das Interesse groß ist, den Druckverlust von Treppenhäusern zu bestimmen, ohne aufwendige Modellversuche oder Simulationen durchzuführen, wurden bereits ähnliche Untersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Arbeit können anderen Modellversuchen, Simulationsrechnungen und einer Vor-Ort-Messung gegenübergestellt werden.

6.3.1 Untersuchungen von RAHN

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurden im Jahre 2002 in dem Forschungslabor für Haustechnik an der Technischen Universität in München Modellversuche durchgeführt. Hier wurden Druckverluste verschiedener Treppenraummodelle untersucht. Die Ergebnisse wurden in dem Bericht des Forschungsvorhabens *„Rauchfreihaltung/Entrauchung von Räumen und Gebäuden – Grundlagenermittlung für die Erstellung Bauaufsichtlicher Richtlinien – Band B – Überdruckbelüftungsanlagen für Sicherheitstreppe nräume in Hochhäusern“* veröffentlicht [10]. Im Zuge der Auswertung dieser Ergebnisse wurden von RAHN Formeln entwickelt, die es ermöglichen sollen, den Druckverlust in Treppenträumen abzuschätzen [12].

6.3.1.1 Ergebnisse von RAHN [12]

Die von RAHN ermittelten Formeln lauten für die verschiedenen Geländervarianten wie folgt:

Treppenraum mit einem Handlauf:

$$A_{eff} = (0,307 \cdot b_T^{3,309}) \cdot \ln(h_G) + 0,5139 + 3,93 \cdot b_A \quad (6.1)$$

Treppenraum mit einer Brüstung:

$$A_{eff} = (0,307 \cdot b_T^{3,309}) \cdot \ln(h_G) + 0,5139 + 3,93 \cdot b_A + 0,5 \quad (6.2)$$

Treppenraum mit einem verschlossenen Treppenauge:

$$A_{eff} = (0,307 \cdot b_T^{3,309}) \cdot \ln(h_G) + 0,5139 \quad (6.3)$$

Es ist zu erkennen, dass diese Formeln sehr ähnlich aufgebaut sind. Auffallend ist, dass die Formel (6.3) unabhängig von der Augenbreite ist und sich aus der Formel (6.1) ergibt, wenn die Breite des Treppenauges bei dieser Variante 0 m beträgt.

RAHN gibt an, dass diese Formeln als unsicher zu bewerten sind, da sie teilweise aus extrapolierten Versuchsergebnissen ermittelt wurden. Der Vergleich mit etwa 50 ausgeführten Projekten zeigt, dass die berechneten Effektivflächen zu klein, sprich der Druckverlust zu groß ist. Werden Druckbelüftungsanlagen in Bezug auf zu kleine Effektivflächen ausgelegt, so werden die Anlagen auf jeden Fall in der Lage sein, die geforderten 50 Pa Überdruck im Treppenhaus zu erzeugen. Sofern

ausreichende Regelungsmöglichkeiten vorhanden sind, liegen die Ergebnisse aus den Berechnungen nach RAHN im unkritischen Bereich.

6.3.1.2 Vergleich des Modellversuches mit den Ergebnissen von RAHN

Mit den von RAHN bestimmten Formeln werden Effektivflächen für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Modellvarianten berechnet. Ein Vergleich dieser Effektivflächen mit denen der Modellversuche erfolgt in den nachfolgenden Abbildung 6-2 und 6-3.

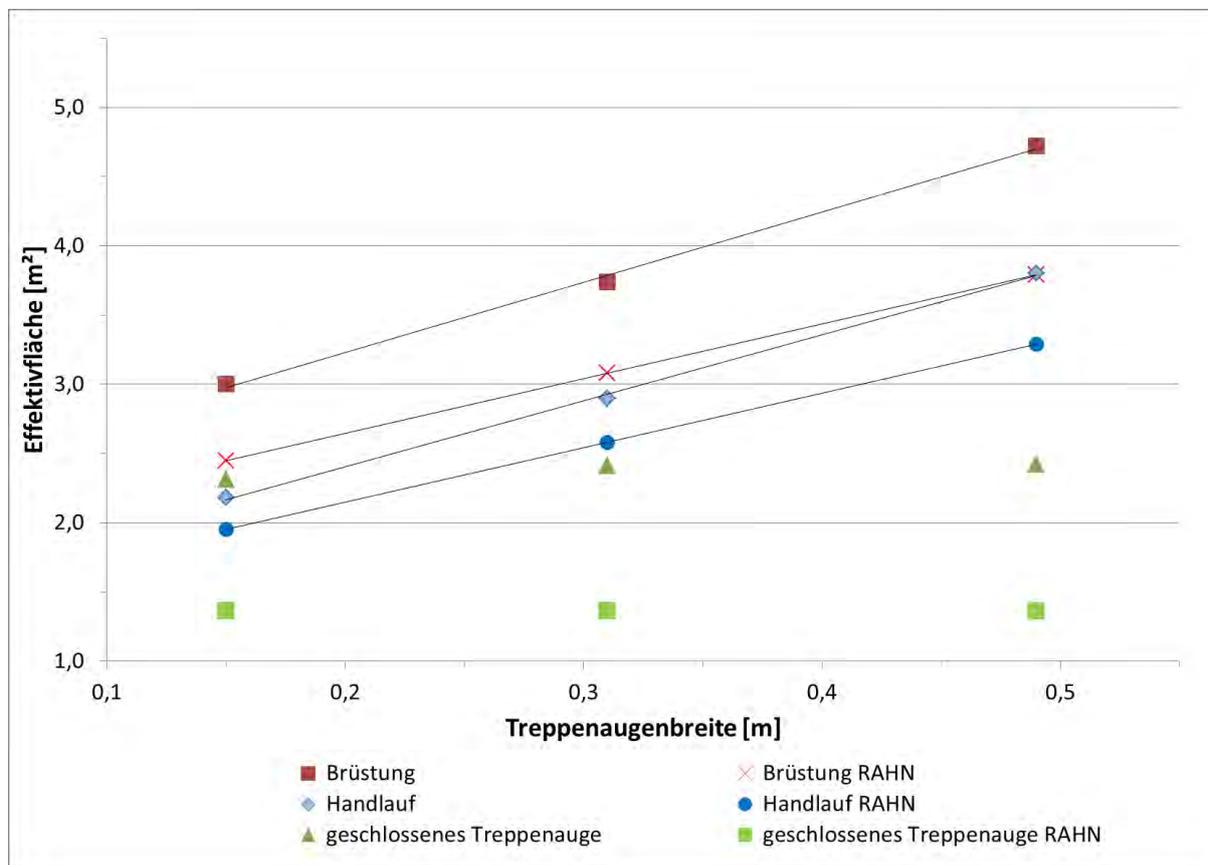


Abbildung 6-2: Vergleich der Effektivflächen ($b_T = 1,25 \text{ m}$)

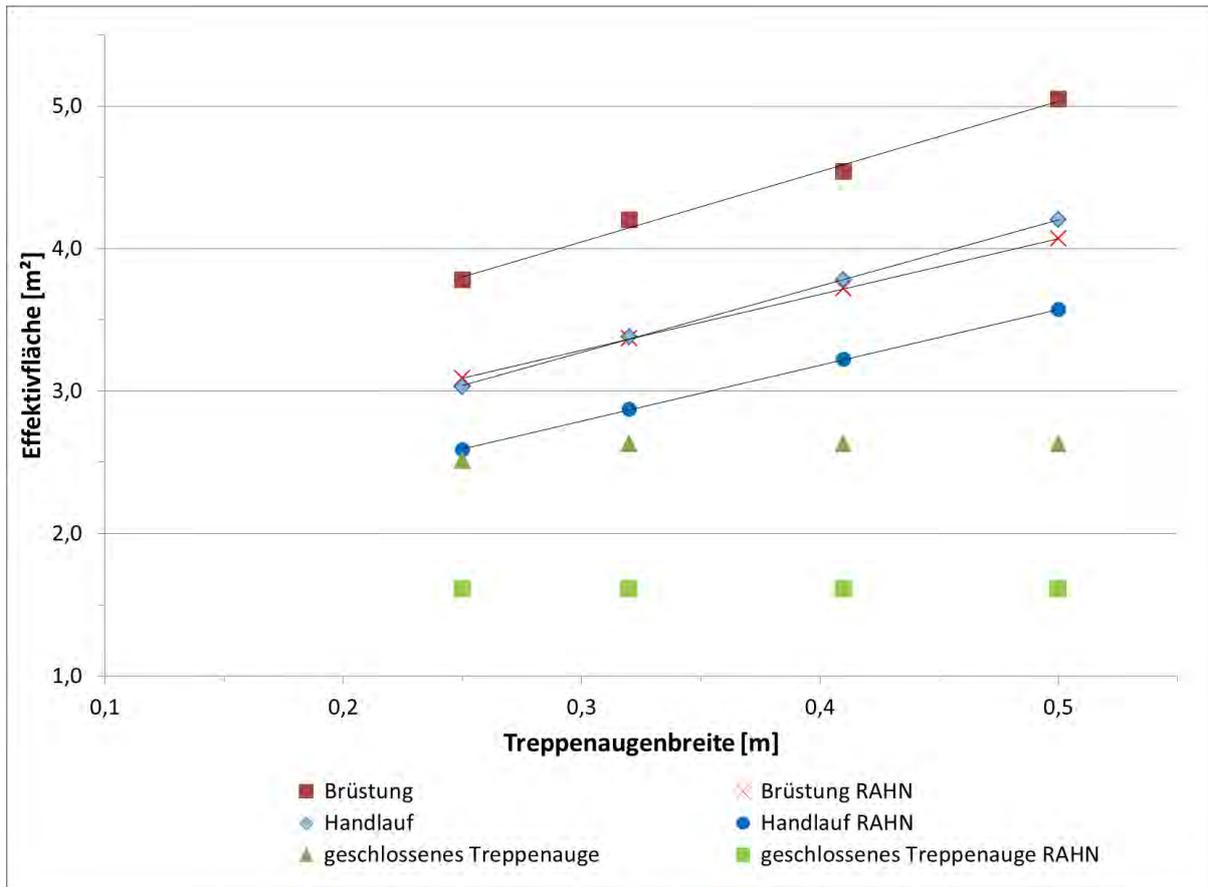


Abbildung 6-3: Vergleich der Effektivflächen ($b_T = 1,35\text{ m}$)

Wie RAHN bereits prognostiziert hat, sind die Ergebnisse der berechneten Effektivflächen kleiner, als die, die im Rahmen dieser Arbeit durch Modellversuche bestimmt werden.

In dieser Arbeit wird eine linearere Abhängigkeit der Effektivfläche von der Augenbreite bestimmt, diese wird durch die formalen Zusammenhänge von RAHN bestätigt.

Ausgewählte Versuchsergebnisse, auf denen die Berechnungen von RAHN basieren, sind in der nachfolgenden Abbildung 6-4 zu sehen.

6. Bewertung, Vergleich mit Referenzergebnissen

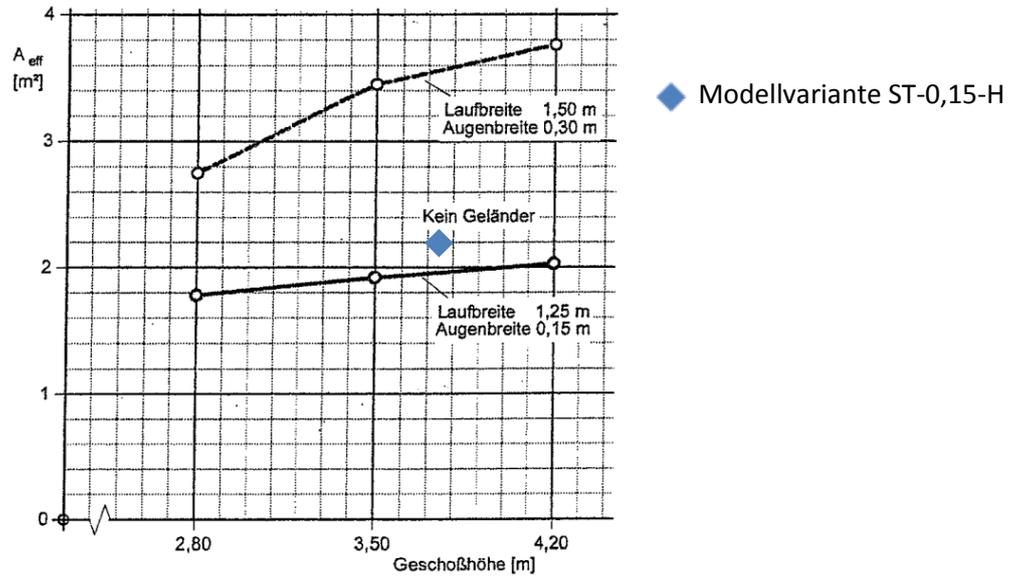


Abbildung 6-4: höhenabhängige Effektivflächen [10]

In der obigen Abbildung sind die Effektivflächen von Modellversuchen unterschiedlicher Geschosshöhen eingetragen. Bei den Versuchen war kein Geländer in den Modellen montiert, auch die Lauf- und Augenbreite von drei analysierten Modellen entspricht den jeweiligen Breiten der Variante ST-0,15-H, welche ebenfalls als blaue Raute in der Abbildung markiert ist.

Die in dieser Arbeit dokumentierte Effektivfläche der Variante ST-0,15-H beträgt $2,18 \text{ m}^2$. Aus Abbildung 6-4 geht hervor, dass die Effektivfläche des Treppenraumes entsprechend seiner Merkmale in etwa $1,9 \text{ m}^2$ betragen soll. Diese Differenz kann auf die unterschiedlichen Treppenführungen der untersuchten Modelle zurückgeführt werden. Die Modellvarianten, welche im Rahmen der vorliegenden Arbeit analysiert werden haben einen Treppenverlauf der Nummer 1. RAHN bezieht seine Ergebnisse aus Modellversuchen, mit einem Treppenverlauf der Nummer 4. In der nachfolgenden Abbildung 6-5 sind diese Treppenverläufe einander gegenübergestellt:

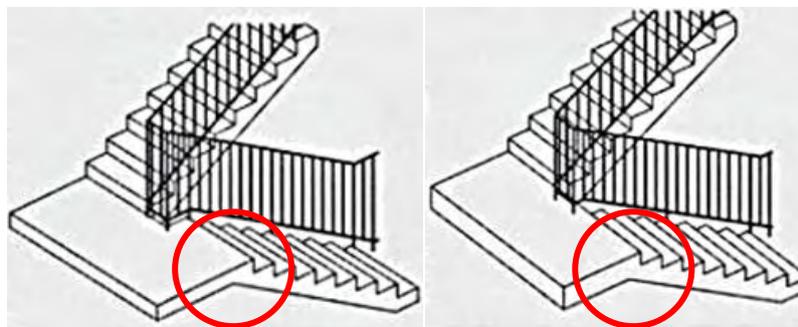


Abbildung 6-5: Treppenverlauf Nummer 1 (links) und Nummer 4 (rechts)

Die oberste Stufe einer jeden Treppe schließt bei dem Verlauf Nummer 1 direkt mit den Podesten ab. Bei dem Verlauf der Nummer 4 kann bei jeder Treppe auf diese eine Stufe verzichtet werden, da die

Podeste der obersten Stufe entsprechen. Um dieselbe Geschosshöhe zu erreichen, wird das Treppenauge bei einem Treppenverlauf der Nummer 1 aufgrund der zusätzlichen Stufen länger und die Augenflächen größer, als bei einem Treppenraum mit einem Verlauf der Nummer 4. Die durchströmten Augenflächen sind bei den Modellversuchen dieser Arbeit also bei identischer Augenbreite größer, als die der Modelle auf die RAHN sich bezieht. Es existieren keine Zeichnungen der Modellversuche, welche die Grundlage von RAHNs Formeln bilden. So kann im Nachhinein nicht nachvollzogen werden, wie groß die jeweiligen Treppenaugenflächen waren.

Um formale Zusammenhänge darzustellen, welche unabhängig von dem Treppenverlauf sind, ist es sinnvoll, die Abhängigkeit des Druckverlustes nicht auf die Augenbreite zu beziehen, sondern auf den prozentualen Flächenanteil, der Treppenaugenfläche im Verhältnis zur Grundfläche ($A_{\%}$). Die Formeln von RAHN können im Nachhinein nicht auf diesen Flächenanteil bezogen werden. Die folgenden formalen Zusammenhänge ergeben sich aus einer Anpassung der in dieser Arbeit herausgearbeiteten Formeln ((5.5)-(5.7)).

Treppenraum mit einem Handlauf:

$$A_{eff} = 0,315 \cdot A_{\%} + 4,261 \cdot b_T - 4,100 \quad (6.4)$$

Treppenraum mit einer Brüstung:

$$A_{eff} = 0,334 \cdot A_{\%} + 3,487 \cdot b_T - 2,375 \quad (6.5)$$

Treppenraum mit einem verschlossenen Treppenauge:

$$A_{eff} = 2,2 \cdot b_T - 0,34 \quad (A_{\%} > 5,5\%) \quad (6.6)$$

Für die untersuchten Modellvarianten werden über die Formeln (6.4) bis (6.6) Effektivflächen berechnet und den Ergebnissen der Versuche in den nachfolgenden Tabellen 6-3 und 6-4 gegenübergestellt.

6. Bewertung, Vergleich mit Referenzergebnissen

Tabelle 6-3: Gegenüberstellung der Effektivflächen ($b_T = 1,35\text{ m}$)

Variante:	$A_{0\%}$	A_{eff} (Modellversuch)	A_{eff} (berechnet)	Abweichung (A_{eff})
	[%]	[m^2]	[m^2]	[%]
BT-0,25-H (Tower 185)	4,36	3,03	3,03	0
BT-0,25-B	4,36	3,78	3,79	-0,3
BT-0,32-H	5,45	3,38	3,37	0,3
BT-0,32-B	5,45	4,20	4,15	1,2
BT-0,32-GA	5,45	2,63	2,63	0
BT-0,41-H	6,78	3,78	3,79	-0,3
BT-0,41-B	6,78	4,54	4,6	-1,3
BT-0,41-GA	6,78	2,63	2,63	0
BT-0,50-H	8,04	4,20	4,19	0,2
BT-0,50-B	8,04	5,05	5,02	0,6
BT-0,50-GA	8,04	2,63	2,63	0

Tabelle 6-4: Gegenüberstellung der Effektivflächen ($b_T = 1,25\text{ m}$)

Variante:	$A_{0\%}$	A_{eff} (Modellversuch)	A_{eff} (berechnet)	Abweichung (A_{eff})
	[%]	[m^2]	[m^2]	[%]
ST-0,15-H	2,92	2,18	2,15	1,4
ST-0,15-B	2,92	3,00	2,96	1,3
ST-0,31-H	5,70	2,90	3,02	-4,1
ST-0,31-B	5,70	3,74	3,89	-4,0
ST-0,31-GA	5,70	2,41	2,41	0
ST-0,49-H	8,46	3,80	3,89	-2,4
ST-0,49-B	8,46	4,72	4,81	-1,9
ST-0,49-GA	8,46	2,42	2,41	0,4

Der Vergleich zeigt, dass die berechneten Effektivflächen bei den schmalen Treppen größere Abweichungen aufzeigen, als bei den breiten Treppen. Die größte prozentuale Abweichung beträgt - 4,1 %. Da nur Modellversuche mit einem Treppenverlauf durchgeführt werden, ist nicht bewiesen, dass die Abhängigkeit der Effektivfläche von der Laufbreite durch eine solche Anpassung umgangen werden kann. Die Ergebnisse der Formeln (5.5) bis (5.7) weisen für die schmalen und für die breiten Treppen kleinere prozentuale Abweichungen auf und sind zum Bestimmen des Druckverlustes in Treppenräumen zu bevorzugen.

Sowohl die Gültigkeit der Formeln (6.4) bis (6.6), als auch die der Formeln (5.5) bis (5.7) beschränkt sich auf Treppenräume einer Geschosshöhe von 3,75 m mit einer maximalen Laufbreite von 1,35 m. Nachfolgend wird erklärt, dass auch der Druckverlust von Treppenräumen mit einer größeren Laufbreite mithilfe dieser Formeln abgeschätzt werden kann.

In Modellversuchen werden Treppenräume mit zwei unterschiedlichen Laufbreiten untersucht (1,25 m und 1,35 m). Es wird angenommen, dass die Effektivfläche linear von der Laufbreite abhängt. Unter der Annahme, dass RAHNs Formeln die Abhängigkeit von der Laufbreite realitätsnah widerspiegeln, kann die angenommene Linearität wie folgt überprüft werden.

Treppenraum ohne Geländer

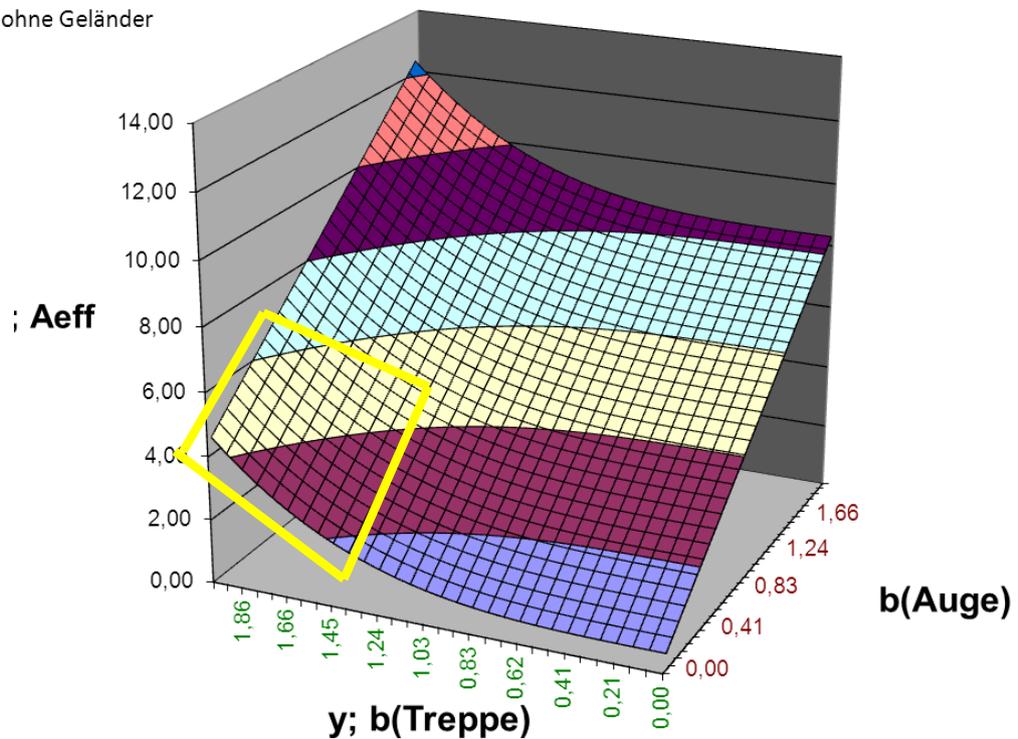


Abbildung 6-6: Abhängigkeit der Effektivfläche von der Augen- und der Laufbreite nach RAHN

Die in Abbildung 6-6 dargestellte Fläche resultiert aus der Formel (6.1) von RAHN, über welche die Effektivfläche von einem Sicherheitstreppenraum mit einem Handlauf berechnet werden kann. Ist die Höhe konstant, hängt die Effektivfläche ausschließlich von zwei Parametern ab (der Augen- und

der Laufbreite). Dieser Zusammenhang stellt in einem dreidimensionalen Koordinatensystem eine Fläche dar.

In der obigen Abbildung ist der Bereich für übliche Treppenraumgeometrien gelb gekennzeichnet. Dieser bezieht sich auf Laufbreiten zwischen 1,25 m und 2,00 m und Augenbreiten zwischen 0 m und etwa 0,6 m. Die lineare Abhängigkeit der Effektivfläche von der Augenbreite ist zu erkennen. Die Abhängigkeit von der Laufbreite ist in der nachfolgenden Abbildung 6-7 zu sehen. In dieser Abbildung sind die Rechenwerte von RAHN bei ebenfalls konstanter Höhe, zwei festen Augenbreiten und unterschiedlichen Laufbreiten dargestellt. Die Verläufe stellen zwei Schnitte durch die in Abbildung 6-6 abgebildete Fläche dar.

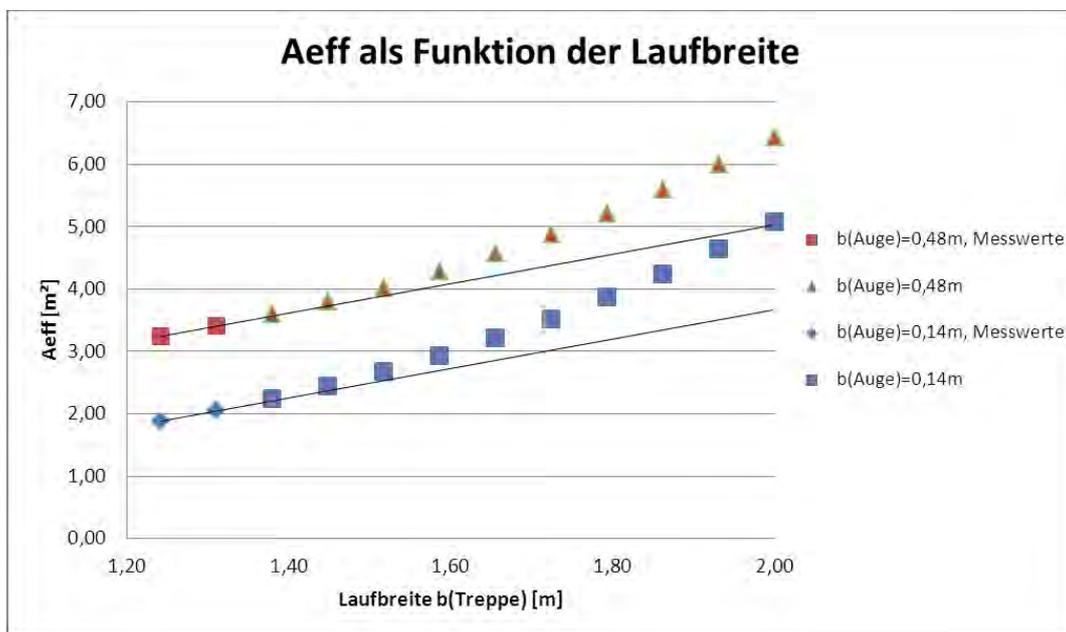


Abbildung 6-7: Abhängigkeit der Effektivfläche von der Laufbreite nach RAHN

Die Rechenwerte einer Laufbreite von 1,24 m und 1,31 m sind hervorgehoben. Sie stehen für Effektivflächen, welche beispielsweise aus Modellversuchen ermittelt werden. Es ist zu erkennen, dass eine durch diese Werte approximierte Gerade unterhalb der restlichen Rechenwerte von RAHN verläuft.

Wie es in der vorliegenden Arbeit der Fall ist, können basierend auf den Effektivflächen zweier Treppenräume mit relativ schmalen Laufbreiten und unter der Annahme einer linearen Abhängigkeit der Effektivflächen von der Laufbreite Formeln zur Berechnung von Effektivflächen bestimmt werden. Werden über diese Formeln Effektivflächen für breitere Laufbreiten berechnet, sind diese kleiner als in der Realität. Unter der Voraussetzung angemessener Regeltechnik können demnach Druckbelüftungsanlagen von Treppenräumen mit jeglichen Laufbreiten mit Hilfe der ermittelten Formeln ausgelegt werden.

6.3.2 Numerische Strömungssimulation (CFD)

Im Zuge einer Masterarbeit werden, teilweise parallel zu dieser Arbeit, Druckverluste in Treppenträumen mithilfe des Simulationsprogramms ANSYS Fluent ermittelt. Vereinfacht ausgedrückt bedeutet dies, dass ein Modell eines Treppentraumes digital erstellt wird, in welchem die Strömungen und Druckverluste computergestützt ermittelt werden. Hierfür werden in dem Modell Volumenzellen platziert, dessen Eckpunkte ein Berechnungsgitter formen. Diesen Volumenzellen werden Differenzialgleichungen zugrunde gelegt. Um sie zu lösen, werden Randbedingungen festgelegt. Die Lösung dieser Differenzialgleichungen ist meist sehr aufwendig und kann, abhängig von der Anzahl der verwendeten Volumenzellen mehrere Tage dauern.

In der Masterarbeit werden drei Modellvarianten analysiert, welche sich lediglich hinsichtlich der Geländerart unterscheiden. Es wird die Strömung durch einen Treppenraum des Towers 185 mit einem Handlauf, mit einer Brüstung und mit einem verschlossenen Treppenauge simuliert. Ein mögliches Berechnungsgitter dieser Simulation ist in den nachfolgenden Abbildung 6-8 und 6-9 zu sehen.

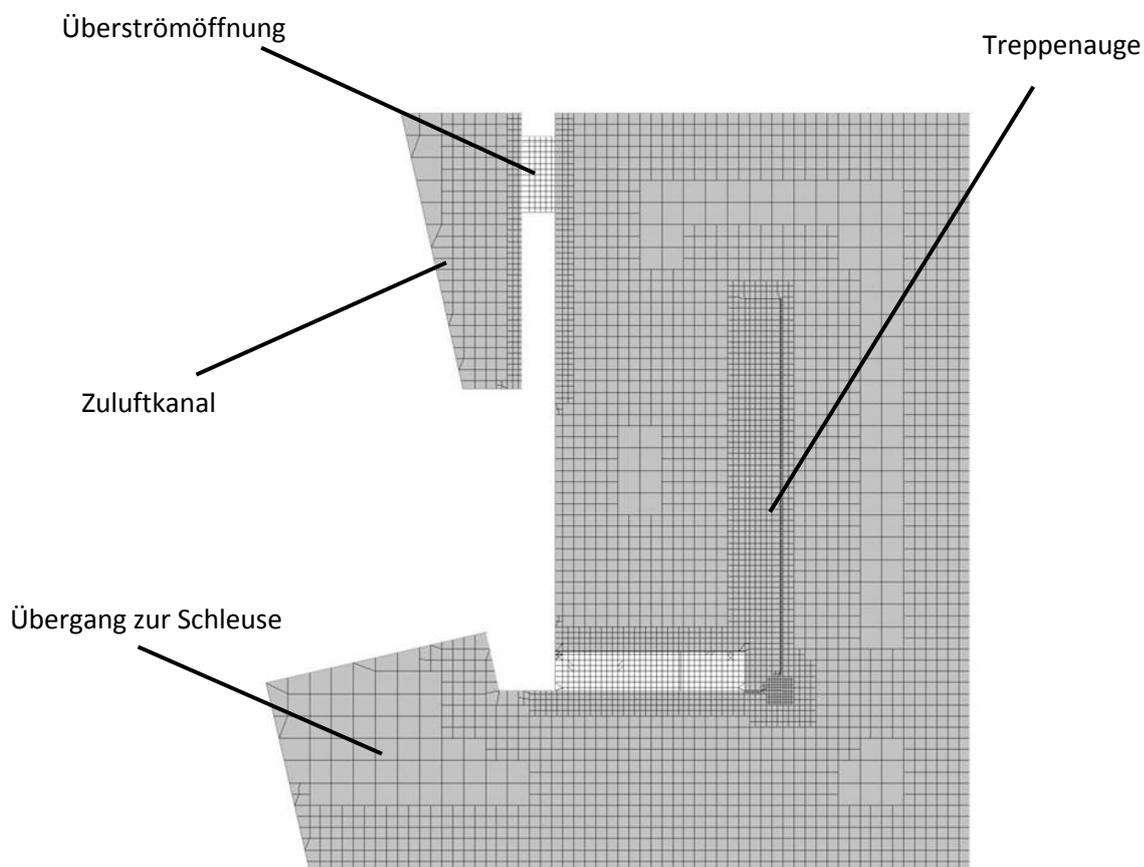


Abbildung 6-8: mögliches Berechnungsgitter aus der Vogelperspektive [1]

Übergang zur
Schleuse



Zuluftkanal

Treppe

Abbildung 6-9: mögliches Berechnungsgitter; Seitenansicht [1]

Zunächst werden die Strömungen durch die Etagen elf bis 50 simuliert. Da die Ergebnisse von Simulationsrechnungen von der Anzahl der verwendeten Volumenzellen abhängig sind, wird im weiteren Verlauf der Analyse die Volumenzellenanzahl der oberen fünf Stockwerke erhöht. Ziel ist es, gitterunabhängige Druckverluste zu ermitteln. Die weiterführende Analyse beschränkte sich lediglich auf diesen Bereich, da die Rechenzeit andernfalls zu hoch ausfiele.

Der einzige Unterschied der Simulationsrechnung zum realen Treppenraum besteht darin, dass die Strömung durch den Zuluftkanal mit seinen Überströmöffnungen nicht simuliert wird. Der Treppenraum wird, wie bei den Modellversuchen, gleichmäßig von unten durchströmt.

6.3.2.1 Modellvarianten

Wie bereits erwähnt, wird der Einfluss von drei Geländervarianten untersucht. Der Handlauf wird nicht durch einen Volumenkörper, sondern durch eine 0,04 m hohe Fläche simuliert. Die Oberkante dieser Fläche endet in einer Höhe von 1,10 m oberhalb der Podeste. Die Befestigungsstreben des Handlaufes werden nicht nachgebildet (vgl. Abbildung 6-10).

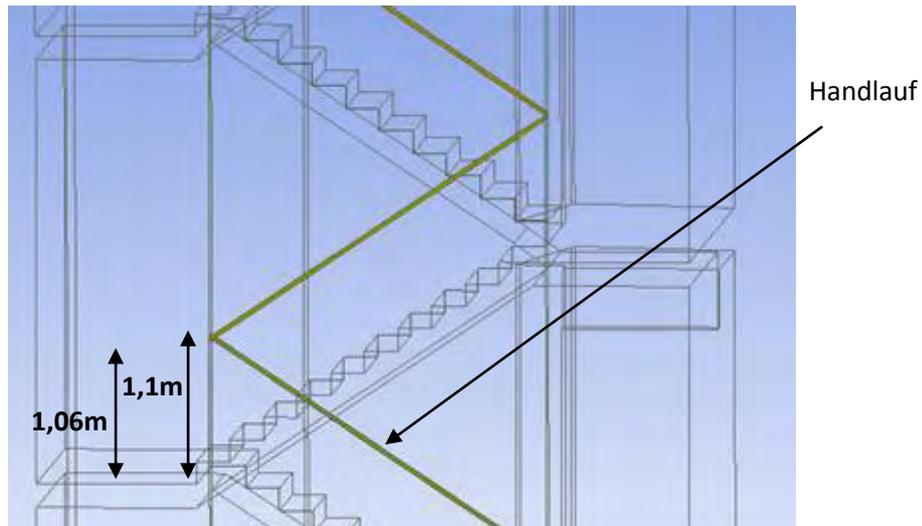


Abbildung 6-10: Modellvariante der Simulation mit einem Handlauf [1]

Wie in den Abbildung 6-11 und 6-12 zu sehen, ist die freie Fläche zwischen der Treppe und dem Handlauf bei der Variante mit einer Brüstung verschlossen.

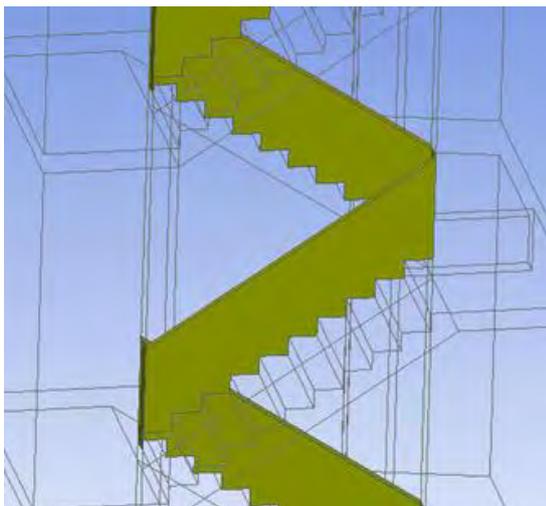


Abbildung 6-11: Modellvariante der Simulation mit einer Brüstung; Seitenansicht [1]

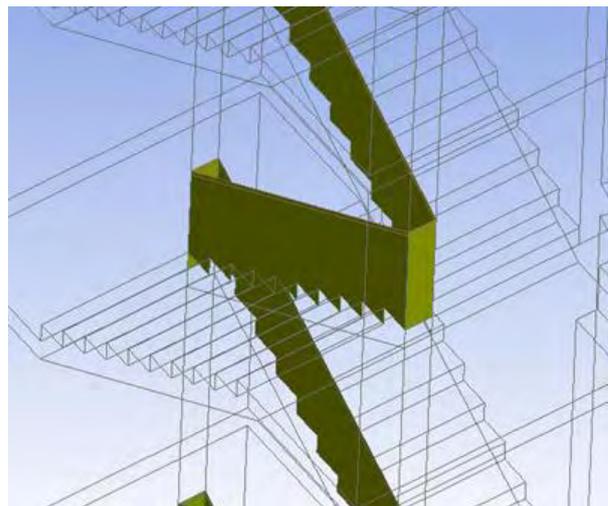


Abbildung 6-12: Modellvariante der Simulation mit einer Brüstung [1]

Das Treppenauge wird bei der dritten Variante von einem Kern ausgefüllt, sodass die Strömung lediglich über die Treppen durch das Treppenhaus strömen kann. Diese Variante ist in der nächsten Abbildung 6-13 zu sehen.

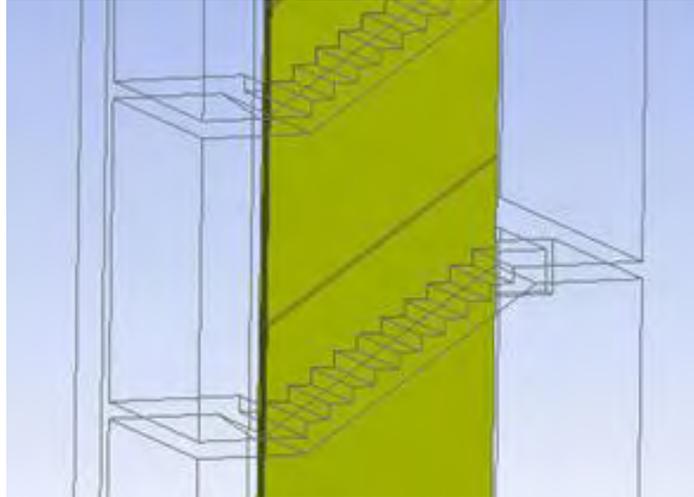


Abbildung 6-13: Modellvariante der Simulation mit einem verschlossenen Treppenauge [1]

6.3.2.2 Ergebnisse der Simulation [1]

Als Ergebnis einer Simulationsrechnung werden u.a. ortsabhängige physikalische Größen als mehrfarbige Grafiken ausgegeben. In der nächsten Abbildung 6-14 ist eine solche Grafik zu sehen, welche die Druckverteilung über der 11., 12. und 13. Etage bei der Variante mit dem Handlauf wiedergibt.

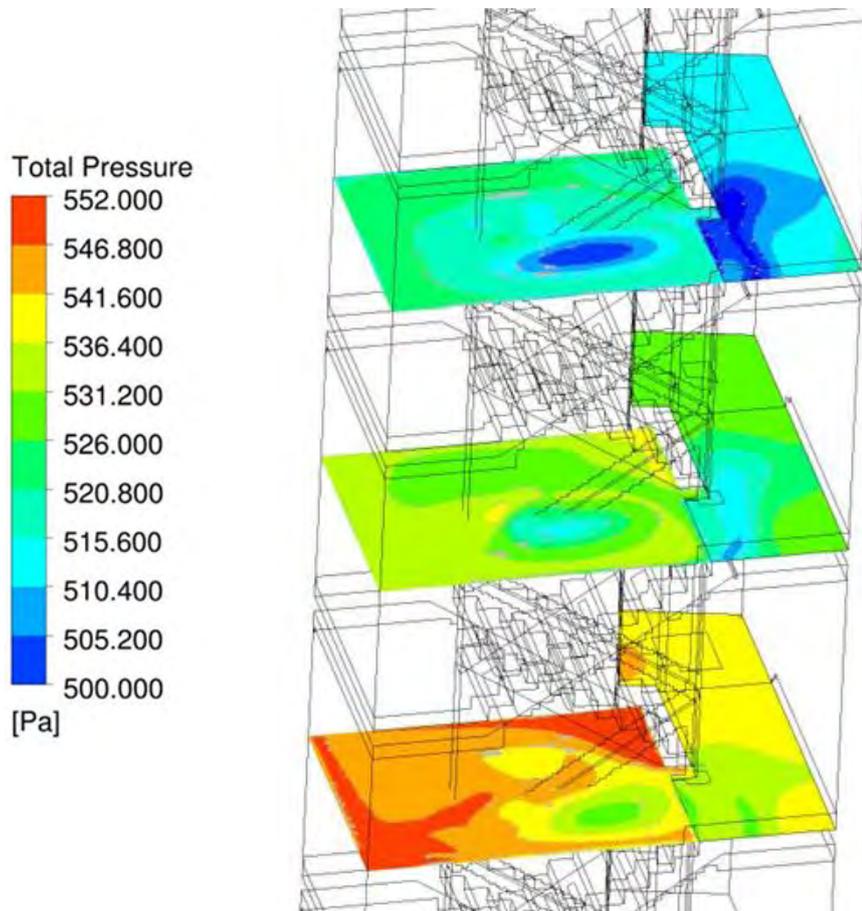


Abbildung 6-14: Druckverteilung über der 11., 12. und 13. Etage der Variante mit einem Handlauf

Computergestützt wird für jede Ebene ein Mittelwert aus der Druckverteilung ermittelt. Aus der Druckdifferenz zweier Ebenen und dem jeweiligen Volumenstrom wird ein spezifischer Druckverlustbeiwert berechnet. Tabelle 6-5 zeigt die spezifischen Druckverlustbeiwerte der Etagen elf bis 50 bei einem montierten Handlauf.

Tabelle 6-5: Übersicht der spezifischen Druckverlustbeiwerte der Simulation bei einem montierten Handlauf

Ebene	Spezifischer Druckverlustbeiwert	Arithmetischer Mittelwert
[-]	$\left[\frac{1}{m}\right]$	$\left[\frac{1}{m}\right]$
11-12	8,96	9,04
12-13	8,12	
13-28	9,36	
28-29	9,27	
29-30	9,37	
30-41	8,99	
41-45	9,18	16,05
45-46	17,59	
46-47	19,80	
47-48	10,75	
48-49	11,38	11,41
49-50	11,44	
11-50	9,72	
46-50	13,00	

Die rot markierten Stockwerke sind Technikstockwerke mit einer geringeren Geschosshöhe von 3,00 m. Für die Varianten mit einer Brüstung und mit dem verschlossenen Treppenauge werden keine derartig detaillierten Auswertungen für die einzelnen Stockwerke vorgenommen. Die Ergebnisse der Simulationen dieser Varianten liegen als Gesamtmittelwert über den Stockwerken elf bis 50 vor und sind in der nachfolgenden Tabelle 6-6 zusammengefasst.

Tabelle 6-6: spezifische Druckverlustbeiwerte der unterschiedlichen Modellvarianten

Spezifischer Druckverlustbeiwert in $\frac{1}{m}$			
Ebene	Variante mit einem Handlauf	Variante mit einer Brüstung	Variante mit einem verschlossenen Treppenaug
11-50	9,72	4,80	13,85

Im weiteren Verlauf der Analyse wird, wie im Kapitel 6.3.2 beschrieben, lediglich die Strömung in den obersten fünf Stockwerken simuliert. Es zeigt sich, dass mindestens elf Millionen Volumenzellen in

diesen Stockwerken berechnet werden müssen, um gitterunabhängige Lösungen zu erhalten. Die Volumenzellenanzahl, auf der die in Tabelle 6-5 und Tabelle 6-6 dokumentierten Ergebnisse basieren ist nicht bekannt. Die gitterunabhängigen Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 6-7 zusammengefasst.

Tabelle 6-7: gitterunabhängige Ergebnisse der Simulation

Spezifischer Druckverlustbeiwert in $\frac{1}{m}$			
Ebene	Variante mit einem Handlauf	Variante mit einer Brüstung	Variante mit einem verschlossenen Treppenauge
46-47	16,41	12,26	30,86
47-48	9,93	6,29	13,62
48-49	10,98	5,42	12,86
49-50	11,42	5,33	14,60
46-50	11,96	7,06	17,31

In der nachstehenden Tabelle 6-8 sind die spezifischen Druckverlustbeiwerte der Variante mit einem Handlauf aus Tabelle 6-3 und 6-5 gegenübergestellt.

Tabelle 6-8: Gegenüberstellung der in den Tabellen 6-3 und 6-5 dargestellten spezifischen Druckverlustbeiwerte

Spezifischer Druckverlustbeiwert in $\frac{1}{m}$			
Ebene	Gitterabhängig (Tabelle 6-5)	Gitterunabhängig (Tabelle 6-7)	Prozentuale Abweichung
46-47	19,80	16,41	-20,7%
47-48	10,75	9,93	-8,3%
48-49	11,38	10,98	-3,6%
49-50	11,44	11,42	-0,2%
46-50	13,00	11,96	-8,7%

Die Simulationsrechnungen deuten darauf hin, dass der Druckverlustbeiwert volumenstromabhängig ist (siehe Tabelle 6-9). Der Treppenraum wird bei den in den Tabellen 6-3, 6-4 und 6-5 dargestellten Ergebnissen jeweils mit einem Volumenstrom von 10,086 m³/s durchströmt.

Tabelle 6-9: volumenstromabhängige Ergebnisse der Simulation

	Einheit	Geschoss 11 bis 50					
Volumenstrom	m ³ /s	6,304	7,565	8,826	10,086	11,347	12,608
Variante mit einem Handlauf							
spezifischer Druckverlustbeiwert	$\frac{1}{m}$	6,87	7,38	9,35	9,82	9,00	9,39
Variante mit einer Brüstung							
spezifischer Druckverlustbeiwert	$\frac{1}{m}$	4,78	4,85	4,66	4,82	4,66	4,12
Variante mit einem verschossenen Treppenauge							
spezifischer Druckverlustbeiwert	$\frac{1}{m}$	16,51	15,77	15,69	12,67	12,76	12,91

6.3.2.3 Auswertung der Simulationsergebnisse

Der spezifische Druckverlustbeiwert ist bei der Variante mit der Brüstung jeweils am niedrigsten und bei der Variante mit dem verschlossenen Treppenauge am höchsten. Auffallend ist, dass die Geschosshöhe einen immensen Einfluss auf den Druckverlust hat. Der Druckverlust unterhalb der Technikstockwerke sollte dem der darüber liegenden Stockwerke entsprechen, weil diese identisch aufgebaut sind. In Tabelle 6-5 ist zu sehen, dass unterhalb der Technikstockwerke der spezifische Druckverlustbeiwert $9,04 \frac{1}{m}$ beträgt, im Bereich der Technikstockwerke beträgt er $16,05 \frac{1}{m}$ und oberhalb dieser $11,41 \frac{1}{m}$. Dies deutet darauf hin, dass die Strömungsverhältnisse der Geschosse mit einer abweichenden Geschosshöhe die Druckverluste der nachfolgenden Stockwerke beeinflussen. Im Rahmen der Simulationsberechnungen werden nur für die obersten fünf Stockwerke gitterunabhängige spezifische Druckverlustbeiwerte berechnet, wobei die ersten zwei Stockwerke

Technikstockwerke darstellen, welche die Druckverlustbeiwerte der nachfolgenden Stockwerke verfälschen.

In der Tabelle 6-10 sind die durchschnittlichen spezifischen Druckverlustbeiwerte der 11. bis 48. Etagen dokumentiert.

Tabelle 6-10: durchschnittliche spezifische Druckverlustbeiwerte der 11. bis 48. Etage

Ebene	Stockwerks- bezeichnung	Geschosshöhe [m]	Prozentuale Abweichung	Spezifischer Druckverlustbeiwert $\left[\frac{1}{m}\right]$	Prozentuale Abweichung
11-45	Regelstockwerk	3,75		9,04	
45-48	Technikstockwerk	3,00	-20 %	16,05	77 %

Unter der Annahme, dass die Etagen 45 bis 48 Technikgeschosse darstellen, leitet sich aus der obigen Tabelle ein deutlicher Einfluss der Geschosshöhe auf den Druckverlust ab. Die Technikgeschosse haben eine Geschosshöhe, die um 20 % niedriger ist, als die der Regelgeschosse und einen spezifische Druckverlustbeiwert, der um 77 % größer ist.

Aus der in Tabelle 6-8 dargestellten Gegenüberstellung der spezifischen Druckverlustbeiwerte ist der Einfluss der feineren Diskretisierung erkennbar. Der Vergleich zeigt, dass eine feinere Gitterstruktur die Druckverlustbeiwerte der Technikgeschosse deutlich beeinflusst. In den Technikgeschossen weist die Strömung auf kleinem Raum viele Unregelmäßigkeiten auf, welche von einem groben Berechnungsgitter nicht erfasst werden können. Die relativ große Abweichung der spezifischen Druckverlustbeiwerte der Technikgeschosse (-20,7 %) ist hierauf zurückzuführen. Insgesamt wird deutlich, dass der Druckverlustbeiwert sinkt, wenn die Anzahl der verwendeten Volumenzellen erhöht wird.

Die Ergebnisse der Tabelle 6-6 und Tabelle 6-9 weisen bei gleichem Volumenstrom Unterschiede auf. Im Nachhinein lässt sich nicht feststellen, woraus diese resultieren. Es ist möglich, dass verschiedene Berechnungsgitter verwendet werden oder dass unterschiedlich viele Iterationsschritte durchgeführt werden, da auch die die Anzahl der Iterationsschritte einen Einfluss auf die Ergebnisse haben kann.

6.3.2.4 Vergleich des Modellversuches mit den Ergebnissen der Simulation

Der Vergleich der Ergebnisse der Modellversuche mit denen der Simulation gestaltet sich als schwierig. Gitterunabhängige Ergebnisse werden lediglich für die obersten fünf Stockwerke ermittelt, wobei diese wie beschrieben durch den Einfluss der Technikstockwerke verfälscht werden. Es ist jedoch zu erkennen, dass die Variante mit der Brüstung sowohl im Modellversuch, als auch in der Simulation den kleinsten und die mit dem verschlossenen Treppenauge den größten Druckabfall erzeugt.

Der Mittelwert über den Stockwerken elf bis 45 mit $9,04 \frac{1}{m}$ (vgl. Tabelle 6-5) stellt kein gitterunabhängiges Ergebnis für einen Druckverlustbeiwert eines Regelstockwerkes mit einem Handlauf dar. Da der Druckverlust bei steigender Anzahl der verwendeten Volumenteile sinkt, muss der gitterunabhängige Beiwert kleiner sein. Der spezifische Druckverlustbeiwert des vergleichbaren Modellversuches beträgt $7,5 \frac{1}{m}$. Er ist um 17% kleiner als das gitterabhängige Ergebnis. Ausschließlich auf die Gitterabhängigkeit ist diese Differenz nicht zurückzuführen. Im Modellversuch werden die Übergänge vom Treppenraum zu den jeweiligen Schleusen vernachlässigt. Diese Übergänge stellen Toträume dar, durch welche die Strömungsvorgänge in der Simulationsrechnung beeinflusst werden. Durch zusätzliche Flächenreibungen, Scherströmungen und Verwirbelungen der Strömungen in diesen Bereichen ist der Druckverlust der Simulation zusätzlich höher.

Aus Tabelle 6-9 geht hervor, dass die ermittelten Druckverlustbeiwerte der Strömungssimulation volumenstromabhängig sind. Die Druckverluste sind im Modellversuch nicht vom Volumenstrom abhängig, weil die ermittelten Differenzdrücke über dem Quadrat der jeweiligen Volumenströme eine Gerade ergeben (vgl. Abbildung 5-1). Eine Volumenstromabhängigkeit kann aus laminaren Strömungsanteilen resultieren und ist an einer Tendenz der abhängigen Werte erkennbar. Die Volumenstromabhängigkeit der Simulationsrechnung lässt sich nicht erklären, weil sich eine solche Tendenz der Druckverlustbeiwerte nicht abzeichnet.

6.3.3 Vor-Ort-Messung

Die Druckbelüftungsanlage des Towers 185 wurde von Imtech Deutschland GmbH & Co. KG simuliert. Im Februar 2012 wurden vor Ort Druck- und Strömungsgeschwindigkeitsmessungen durchgeführt. Aus diesen Werten wurde ein spezifischer Druckverlustbeiwert des Treppenraumes bestimmt. Die Ergebnisse der Modellversuche und der Simulationsrechnungen können daher direkt mit den Ergebnissen einer Vor-Ort-Messung verglichen werden.

6.3.3.1 Messungen

Wie bereits in Kapitel 3.8.2 beschrieben, erfolgt die Luftzufuhr im Tower 185 über einen parallel zum Treppenraum verlaufenden Zuluftschacht. Dieser ist mit verschiedenen Klappen ausgestattet, sodass die Luftzufuhr je nach Außentemperatur bis hin zu verschiedenen Höhen erfolgt. Die Messungen wurden im Winter bei Außentemperaturen von etwa -5 °C durchgeführt. Um den durch den Kamineffekt bestehenden Unterdruck auszugleichen, waren beide Jalousieklappen verschlossen, sodass die Luftzufuhr bis zur 9. Etage erfolgte (vgl. Kapitel 3.1.3).

Zunächst wurden die Zuluft- und Abluftvolumenströme bestimmt.

Zur Bestimmung des Zuluftvolumenstromes wurden Strömungsgeschwindigkeiten in einem Kanal gemessen, welcher sich saugseitig an den Ventilatoren der Druckbelüftungsanlage befindet. Der Abluftvolumenstrom wurde am Einlass der Druckentlastungseinheit, am Dach des Treppenhauses bestimmt. Auch hier wurden Strömungsgeschwindigkeiten gemessen.

Während der Messung des Abluftvolumenstromes wurden die Schleusentüren in den Etagen 47 bis 50 abgedichtet und die Überströmöffnungen des Zuluftkanals wurden in diesem Bereich verschlossen. Durch das Abdichten der oberen Etagen wurde garantiert, dass der gemessene Abluftvolumenstrom die Etagen 47 bis 50 durchströmt, da keine relevanten Leckagen auftreten konnten und verhindert wurde, dass Teilströme durch den Zuluftkanal, anstatt durch den Treppenraum strömten. Gleichzeitig wurde der Differenzdruck zwischen dem Druck am Fußboden der Ebene 47 und dem der Ebene 49 gemessen. Des Weiteren wurden die Differenzdrücke über allen Stockwerken gemessen.

6.3.3.2 Ergebnisse und Analyse der Vor-Ort-Messungen [8]

Aus den Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten und der jeweiligen durchströmten Strömungsquerschnitte, wurde der Zuluftvolumenstrom zu 44.600 m³/h und der Abluftvolumenstrom zu 43.900 m³/h berechnet.

Die Werte der Zuluft und der Abluft können aufgrund der Undichtigkeiten des Treppenhauses nicht exakt übereinstimmen. Der Zuluftvolumenstrom entspricht der Summe aus dem Abluftvolumenstrom und dem Leckluftvolumenstrom, dies wird durch folgende Formel ausgedrückt:

$$\dot{V}_{zu} = \dot{V}_{ab} + \dot{V}_{leck} \quad (6.7)$$

Die Druckdifferenz zwischen den Ebenen 47 und 49 betrug 24 Pa. Da über einem Technikstockwerk mit einer Höhe von 3,00 m und über einem Regelstockwerk mit einer Geschosshöhe von 3,75 m gemessen wurde, betrug die Höhendifferenz zwischen den Druckmessstellen 6,75 m.

Aus dem Abluftvolumenstrom, dem Druckabfall, der Höhendifferenz und der Grundfläche A des Treppenraumes von 16,06 m² berechnete sich der spezifische Druckverlustbeiwert über Formel (3.13) wie folgt:

$$\zeta^* = \frac{\Delta p_v}{\frac{\rho}{2} \left(\frac{\dot{V}}{A} \right)^2 h} = \frac{24 \text{ Pa}}{\frac{1,2 \text{ kg/m}^3}{2} \left(\frac{43900 \text{ m}^3 / 3600 \text{ s}}{16,06 \text{ m}^2} \right)^2 6,75 \text{ m}} = 10,3 \frac{1}{\text{m}}$$

Dieser spezifische Druckverlustbeiwert kann nicht direkt auf die übrigen Stockwerke übertragen werden, da nicht alle mit einem Volumenstrom von 43.900 m³/h durchströmt werden.

Im Laufe der Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass der Zuluftkanal oberhalb der 9. Etage als Bypass fungiert. Durch diesen soll im Winter ab der 9. Etage keine Luft strömen. Die Überströmöffnungen zwischen dem Kanal und dem Treppenraum sind nicht verschließbar, so findet hier ein Luftaustausch statt. Die gesamte Strömung kann mit dem Stromfluss durch zwei parallel geschaltete Widerstände verglichen werden, bei denen der Strom den Weg des geringsten Widerstandes geht (vgl. Abbildung 6-15).

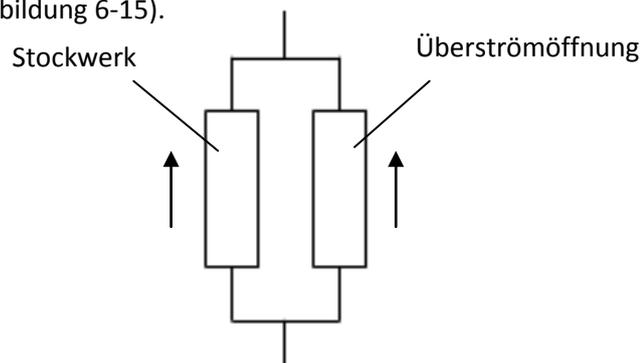


Abbildung 6-15: parallel geschaltete Widerstände

Ob ein Luftstrom durch den Treppenraum oder durch den Kanal strömt ist von den Druckverlusten der jeweiligen Stockwerke und Überströmöffnungen abhängig.

Wie die Abbildung 6-16 zeigt, wird das Strömungsbild von den Jalousieklappen geformt.

Auf Höhe der verschlossenen Jalousieklappen muss die gesamte Luft durch den Treppenraum strömen. In dem Bereich kurz über ihnen tritt Luft aus dem Treppenraum in den Zuluftschacht ein, welche kurz unter ihnen wieder in den Treppenraum zurückströmt.

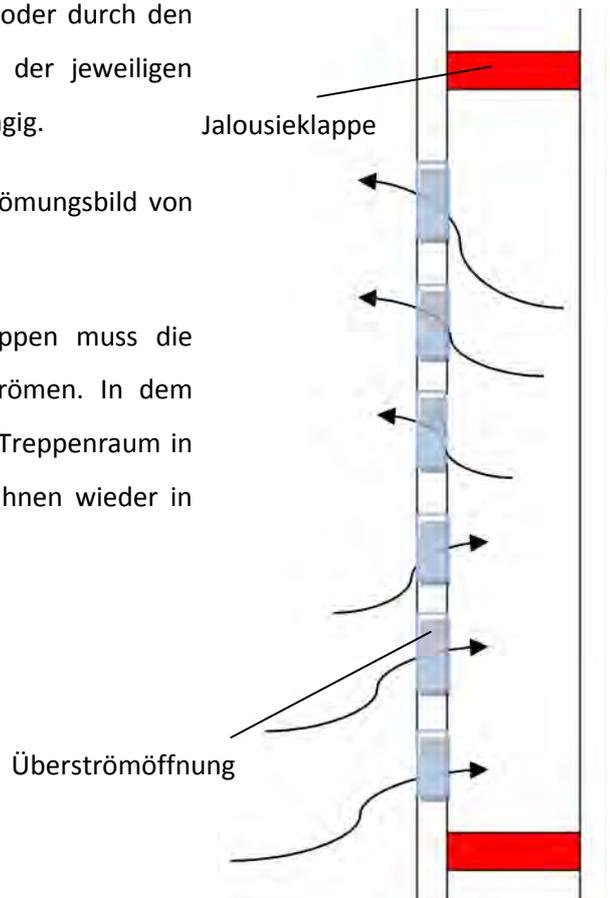


Abbildung 6-16: Strömungsverlauf durch den Zuluftkanal

6.3.3.3 Vergleich der Ergebnisse der Vor-Ort-Messungen mit denen aus dem Modellversuch

Der spezifische Druckverlustbeiwert wurde aus den Vor- Ort- Messungen zu $10,3 \frac{1}{m}$ berechnet. Aus den Modellversuchen geht hervor, dass der spezifische Druckverlustbeiwert $7,5 \frac{1}{m}$ beträgt. Wie die Auswertungen der Strömungssimulationen zeigen, ist der Druckverlustbeiwert stark von der Geschosshöhe abhängig. Die Stockwerke mit einer geringeren Höhe erhöhen auch die Druckverluste der angrenzenden Stockwerke. Da die Differenzdruckmessung der Vor-Ort-Messung über einem Regel- und einem Technikstockwerk erfolgte, ist der Druckverlust folglich höher.

In der Tabelle 6-11 sind die gitterunabhängigen spezifischen Druckverlustbeiwerte der Ebenen 47 bis 48 und 48 bis 49 dargestellt.

Tabelle 6-11: Gegenüberstellung der spezifischen Druckverlustbeiwerte, Simulation/ Vor-Ort-Messung

Ebene	Spezifischer Druckverlustbeiwert (Simulation)	Arithmetischer Mittelwert	Spezifischer Druckverlustbeiwert (vor Ort)
[-]	$\left[\frac{1}{m}\right]$	$\left[\frac{1}{m}\right]$	$\left[\frac{1}{m}\right]$
47-48	9,93	10,5	10,3
48-49	10,98		

Aus dieser Tabelle geht hervor, dass der spezifische Druckverlustbeiwert der Ebenen 47 bis 49 $10,5 \frac{1}{m}$ beträgt. Dieser stimmt weitestgehend mit dem vor Ort bestimmten spezifischen Druckverlustbeiwert überein. Die Abweichung beträgt lediglich 2 %.

7. Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Druckverluste verschiedener Treppenraummodelle bestimmt. Folgende Treppenraumgeometrien nehmen dabei maßgeblichen Einfluss in Sicherheitstreppe nräumen:

- die Geländergestaltung
- der Treppenverlauf
- die Augenmaße (b_A und l_A)
- die Treppenmaße (b_T , h_S und t_S)
- die Podestmaße (b_P und l_P)
- die Geschosshöhe h_G

Die Modelle unterscheiden sich in der Geländergestaltung, sowie der Augen- und Laufbreite der Treppe. Für die Bewertung der anderen zuvor genannten Einflussgrößen werden des Weiteren externe Untersuchungen [10][12] sowie Simulationsberechnungen im Rahmen einer bei Imtech Deutschland GmbH & Co. KG durchgeführten Masterarbeit [1] ausgewertet. Die ermittelten Druckverluste werden durch spezifische Druckverlustbeiwerte bzw. Effektivflächen ausgedrückt. Eine große Effektivfläche entspricht einem kleinen Druckverlust.

Geländergestaltung

Die analysierten Geländerarten werden durch einen Handlauf, eine Brüstung und ein verschlossenes Treppenauge beschrieben. Die Untersuchungen ergeben, dass der Druckverlust in Treppenräumen mit einer Brüstung am kleinsten und bei einem verschlossenen Auge am größten ist.

Die Flächen der Brüstungen wirken offensichtlich wie Leitbleche, die eine verlustfreie Durchströmung des Treppenraumes bewirken.

Die Strömung folgt bei verschlossenem Treppenaug e ausschließlich dem Treppenverlauf. Aufgrund der vermehrten Reibung und den Umlenkungen, denen die Strömung unterliegt, ist der Druckverlust bei dieser Variante bei großen Augenbreiten am höchsten.

Bei kleinen Augenbreiten gleicht sich der Druckverlust in Treppenräumen bei einem montierten Handlauf und einer montierten Brüstung dem mit einem verschlossenen Auge an. Bei sehr kleinen Augenflächen ist der Druckverlust bei einem montiertem Handlauf sogar größer als bei einem

verschlossenen Treppenauge (vgl. Abbildung 7-1, rote Markierung). Der hohe Druckverlust der Variante mit einem Handlauf resultiert aus zusätzlichen Verwirbelungen, welche durch einen Verschluss des Treppenauges verhindert werden.



Abbildung 7-1: Abhängigkeit der Effektivfläche von der Augenbreite ($b_r = 1,25 \text{ m}$)

Treppenverlauf/Augenmaße

Der Treppenverlauf beeinflusst direkt die Treppenaugenlänge. Hierdurch kann der Einfluss des Treppenlaufes mit dem der Augenmaße verglichen werden. Je größer das Treppenauge ist, umso kleiner ist der Druckverlust. Die Effektivfläche ist außer bei einem verschlossenen Treppenauge linear von den Augenmaßen abhängig, wobei sich die Steigungen nicht gravierend unterscheiden (vgl. Abbildung 7-1). Bei einem verschlossenen Auge ist der Druckverlust, außer bei sehr kleinen Augenbreiten ($b_A < 0,3 \text{ m}$) konstant. Ist die Augenbreite kleiner als 0,3 m, nimmt der Druckverlust zu.

Treppenmaße

In der DIN 18065 werden maßliche Anforderungen an Treppen geregelt. Die Stufenhöhe und –tiefe ergibt sich aus einer genormten Schrittweite und variiert nur geringfügig, sodass sie keine ausschlaggebenden Einflussgrößen darstellen. Die minimale Treppenbreite ist in Hochhäusern von der Personenzahl abhängig, welche im Notfall über diese fliehen muss. In der Abbildung 7-2 sind exemplarisch die Effektivflächen der Modellvarianten mit einem Handlauf bei unterschiedlichen Lauf- und Augenbreiten dargestellt. Die Variation der Laufbreite bewirkt auch bei den anderen Geländerarten einen solchen parallelen Versatz. Je größer die Laufbreite ist, umso kleiner ist der Druckverlust.

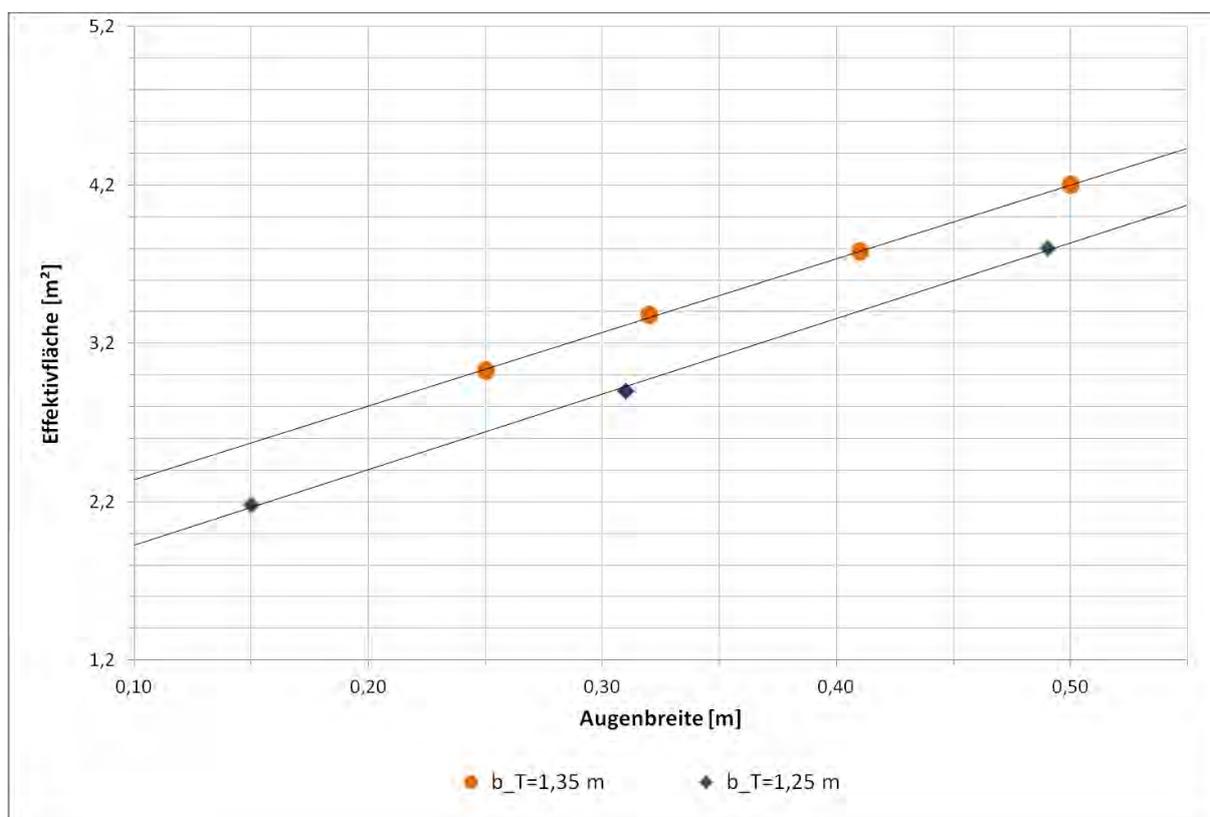


Abbildung 7-2: Einfluss der Laufbreite bei montiertem Handlauf

Podestmaße

Der Einfluss der Podestmaße wird im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht. Verglichen mit den anderen Treppenraumgeometrien haben diese vermutlich keinen großen Einfluss auf den Druckverlust, da sie das Strömungsbild nicht wesentlich verformen. Zur Prüfung dieser Annahme bedarf es weiterführenden Untersuchungen.

Geschosshöhe

Der Vergleich mit Referenzwerten aus numerischen Strömungssimulationen [1] zeigt, dass die Geschosshöhe einen immensen Einfluss auf den Druckverlust hat. Er ist bei höheren Stockwerken kleiner. In Abbildung 6-4 ist zu sehen, dass der Einfluss der Geschosshöhe von weiteren Treppenraumgeometrien abhängt. So ist dieser bei einer großen Augen- und Laufbreite stärker ausgeprägt als bei kleinen Breiten. Zudem wird das Strömungsbild durch angrenzende Stockwerke mit einer abweichenden Geschosshöhe beeinflusst.

Die beschriebenen Treppenraumgeometrien wirken sich unterschiedlich auf den Druckverlust in Sicherheitstreppenhäusern aus. Durch die vorausschauende Gestaltung von Sicherheitstreppenhäusern kann Einfluss auf den Druckverlust in diesen genommen werden. Je kleiner der Druckverlust ist, umso kleiner kann die Druckbelüftungsanlage dimensioniert werden, durch die der Überdruck im Treppenraum sichergestellt wird. Hierdurch lassen sich Kosten einsparen. Soll der Druckverlust klein sein, kann beispielsweise eine Brüstung an den Treppen montiert werden.

8. Ausblick und weiteres Vorgehen

Die Strömungsvorgänge in einem Sicherheitstreppe nraum sind komplex und werden von der Treppenraumgestaltung beeinflusst. In dieser Arbeit werden die Druckverluste von Treppenraummodellen unterschiedlicher Geländergestaltung, Lauf- und Augenbreite bestimmt. Aus den Ergebnissen dieser Modellversuche werden formale Zusammenhänge hergeleitet und schlussendlich in den folgenden Formeln zusammengefasst:

Treppenräume mit einem Handlauf:

$$A_{eff} = 4,68 \cdot b_A + 4,02 \cdot b_T - 3,57$$

Treppenräume mit einer Brüstung:

$$A_{eff} = 4,96 \cdot b_A + 3,14 \cdot b_T - 1,69$$

Treppenräume mit einem geschlossenen Treppenauge:

$$A_{eff} = 2,2 \cdot b_T - 0,34$$

$$(b_A > 0,3 \text{ m})$$

Diese gelten für Sicherheitstreppe nräume mit einer Geschosshöhe von $h_G = 3,75 \text{ m}$ und einem Treppenverlauf der Nummer 1, bei dem die oberste Stufe von jeder Treppe auf Höhe der Podeste endet. Sie müssen in weiteren Versuchen validiert werden.

Zunächst muss der Einfluss der Oberflächenstruktur und des hydrostatischen Druckes auf die ermittelten Druckverlustbeiwerte untersucht werden, um zu überprüfen, ob diese Vernachlässigungen die Ergebnisse der Modellversuche verfälschen.

Die Geschosshöhe hat einen entscheidenden Einfluss auf das gesamte Strömungsbild in einem Treppenraum. Um den funktionalen Zusammenhang der Geschosshöhe auf die Effektivfläche ableiten zu können, müssen mindestens zwei weitere Treppenräume mit unterschiedlichen Höhen analysiert werden. Eine Geschosshöhe könnte 3,00 m betragen, da es für diese Geschosshöhe Vergleichswerte aus Simulationsrechnungen gibt. Zudem sollte untersucht werden, inwiefern sich Stockwerke unterschiedlicher Höhen gegenseitig beeinflussen.

Weiteren Einfluss nimmt die Laufbreite auf den Druckverlust. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit können nur zwei verschiedene Laufbreiten untersucht werden. Es wird angenommen, dass die Effektivfläche linear von der Laufbreite abhängt. Durch weitere Untersuchungen mit mindestens

noch einer Laufbreite kann der Zusammenhang zwischen der Laufbreite und der Effektivfläche überprüft werden. Dabei empfiehlt es sich, weitere Untersuchungen an Treppenräumen mit einer Laufbreite durchzuführen, die weitaus größer ist, als die bereits untersuchten Treppenbreiten, da dann eine Abweichung von der Linearität am besten zu erkennen ist.

Der Treppenverlauf beeinflusst direkt die Augenlänge und somit die Augenfläche. Ob die Ergebnisse der Modellversuche auf andere Treppenverläufe übertragen werden können, indem die Effektivflächen über prozentuale Flächenanteile berechnet werden, muss ebenfalls überprüft werden.

Die genannten Untersuchungen sind im Modellversuch durchzuführen, da die Modellvarianten mit geringem Arbeits- und Zeitaufwand verändert werden können.

9. Quellenverzeichnis

- [1] Betzold, C.: Masterarbeit; *Numerische Bestimmung von Druckverlusten bei der Durchströmung von Treppenträumen unterschiedlicher Geometrien*; 2012
- [2] Bohl, W.; Elmendorf, W.: *Technische Strömungslehre*; 14. Auflage; Vogel Buchverlag; Würzburg; 2008
- [3] Deutsches Institut für Normung e. V.; DIN 18065, *Gebäudetreppen – Begriffe, Messregeln, Hauptmaße*; Beuth Verlag GmbH; Berlin; 2011
- [4] Dietze, L.: *Freie Lüftung von Industriegebäuden*; 1. Auflage; Verlag für Bauwesen; Berlin; 1987
- [5] Eichelberger, L.: *Rauchfreihaltung von Flucht- und Rettungswegen* <http://www.age-info.de> Juli 2012
- [6] Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau*; 23. Auflage; Springer-Verlag; Berlin, Heidelberg; 2011
- [7] Fink, F.; Rabenschlag, A.; Willkomm, W.: *Treppen*; Skriptum; HafenCity Universität Hamburg; Department Architektur; Lehrgebiet Konstruktion und Technik; 2008
- [8] Imtech Deutschland GmbH & Co. KG; Interne Firmenberichte
- [9] Kone Corporation; <http://www.kone.com> Juli 2012
- [10] Kuhn, J.; Ostertag, D.; Zitzelsberger, J.: *Bericht über das Forschungsvorhaben Rauchfreihaltung/Entrauchung von Räumen und Gebäuden, Grundlagenermittlung für die Erstellung Bauaufsichtlicher Richtlinien, Band B, Überdruckbelüftungsanlagen für Sicherheitstreppenträume in Hochhäusern*; 2002
- [11] Muster-Hochhaus-Richtlinie; 2008
- [12] Rahn, B.: *Differenzdruckanlagen*; Persönliche Aufzeichnungen
- [13] Tower 185; <http://www.tower185.de> Juli 2012