



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Life Sciences

Numerische Analyse historischer Lüftungssysteme mittels CFD-Simulation. Entwicklung einer pragmatischen Entwurfsgrundlage für natürliche Lüftungssysteme von aktuellen Gebäuden durch die Erarbeitung eines Nomogramms.

Bachelorarbeit

im Studiengang Umwelttechnik

vorgelegt von

Martje Peters

Matrikelnummer: 1960382

Hamburg

am 12.06.2012

- | | | |
|---------------|------------------------------|---------------|
| 1. Gutachter: | Prof. Dr. Heiner Kühle | (HAW Hamburg) |
| 2. Gutachter: | Dipl.-Ing. Bernd Schwarzfeld | (Ökoplan) |

Danksagung

Zu Beginn möchte ich mich für die Anregungen, die Ratschläge und die Bereitstellung der Hilfsmittel bei Herrn Dipl.-Ing Bernd Schwarzfeld bedanken. Außerdem gilt mein Dank meinem Betreuer Herrn Prof. Dr. Heiner Kühle für die Anmerkungen und Hinweise.

Ich möchte meinen Eltern Christine und Hauke für die Ermöglichung meines Studiums und die Unterstützung bei dieser Arbeit danken.

Weiterer Dank gilt meinem Bruder Cornelius für die Anmerkungen zum Verfassen wissenschaftlicher Texte. Sowie meinen Kolleginnen Sarah und Anna für den fachlichen Austausch. Außerdem danke ich Simone für die Entwirrung von sprachlicher Vergangenheit und Gegenwart.

Mein besonderer Dank gilt Daniel.

Inhalt

Danksagung.....	2
Abbildungen, Tabellen, Diagramme.....	5
Symbolverzeichnis.....	7
Zusammenfassung.....	8
1. Einleitung.....	9
2. Natürliche Lüftung von Gebäuden.....	11
2.1. Anforderungen an eine Lüftung.....	11
2.2. Antriebskräfte der natürlichen Lüftung.....	12
2.3. Wind als Antriebskraft der natürlichen Lüftung.....	13
2.4. Thermischer Auftrieb als Antriebskraft der natürlichen Lüftung.....	15
2.5. Überlagerung von Auftriebs- und Windkräften.....	17
2.6. Natürliche Lüftung in der Vergangenheit.....	18
2.6.1. Atriumhäuser.....	18
2.6.2. Persische Windfänger.....	19
2.6.3. Völkerkundemuseum in Wien.....	21
2.6.4. Quelllüftung in der Wiener Staatsoper.....	22
2.6.5. House of Commons in London.....	23
2.6.6. Jubiläumsschulen in Österreich.....	24
2.6.7. Grundlagen aus der natürlichen Lüftung der Vergangenheit.....	26
2.7. Natürliche Lüftung in der heutigen Zeit.....	28
2.7.1. Schloss Schönbrunn in Wien.....	28
2.7.2. Portcullis House in London.....	30
2.7.3. Manitoba Hydro Place in Winnipeg.....	32
2.7.4. Grundlagen aus heutigen natürlichen Lüftungssystemen.....	35
3. CFD Simulation von natürlichen Lüftungen.....	37
3.1. Methode.....	37
3.1.1. Simulation mittels CFD.....	37

3.1.2.	Grundgleichungen der Strömungsmechanik.....	39
3.1.3.	Netzgenerierung.....	41
3.1.4.	Berechnungsgrundlagen	42
3.1.4.1.	Turbulenzmodellierung.....	42
3.1.4.1.1.	k- ϵ -Modell	43
3.1.4.1.2.	Shear Stress Transport (SST)	44
3.1.4.2.	Wärmestrahlung nach dem Monte Carlo Modell	44
3.1.5.	Diskretisierung der Erhaltungsgleichungen	46
3.1.6.	Lösungsverfahren.....	50
3.1.6.1.	Zentrale Verfahren	50
3.1.6.2.	Upwind-Verfahren.....	50
3.1.6.3.	High-Resolution-Verfahren	50
3.2.	Simulationen	52
3.2.1.	Geometrie	52
3.2.2.	Angewandte Berechnungsgrundlagen	54
3.2.3.	Randbedingungen	54
3.3.	Ergebnisse der Simulationen.....	56
3.4.	Auswertung der Ergebnisse	58
4.	Fazit	64
	Literaturverzeichnis.....	66
	Anhang	67
	Eidesstattliche Erklärung zur Bachelorarbeit	71

Abbildungen, Tabellen, Diagramme

Abbildung 1: Wirkmechanismus der freien Lüftung, Quelle: Heinz (2011, S. 72).....	12
Abbildung 2: Luftströmungen bei einseitiger Lüftung, Quelle: Heinz (2011, S. 74).....	13
Abbildung 3: Druckverteilung an einem Gebäude im Wind, Quelle: Heinz (2011, S.76).....	15
Abbildung 4: Zonenverteilung bei thermischem Auftrieb, Quelle: Fiedler (2011, S.43).....	16
Abbildung 5: Überlagerung von Auftrieb und Wind, Quelle: Heinz (2011, S.81).....	17
Abbildung 6: Typischer Aufbau eines Atriumhauses, Quelle: Wikipedia/Atriumhaus.....	18
Abbildung 7: Funktionsweise eines Badgir, Quelle: EcologicArchitektur15.03.12.....	19
Abbildung 8: Luftverteilung im Völkerkundemuseum, Quelle: Käferhaus (2005, S.19)	21
Abbildung 9: Kellergrundriss der Wiener Staatsoper, Quelle: Käferhaus (2011,S.5).....	22
Abbildung 10: Hauptabluftschacht in der Staatsoper, Quelle: Käferhaus (2011,S.5).....	23
Abbildung 11: Der Luftweg im House of Commons, Quelle: Fitzner, Finke (2010, S.49).....	24
Abbildung 12: Schachtlüftung in den Jubiläumsschulen, Quelle: eigene Darstellung	25
Abbildung 13: Axialventilator, Quelle: www.Klimapartner-berlin.de (12.03.2012).	29
Abbildung 14: Rückgewinnungskamin, Quelle: urbanwindenergy.org.uk (12.03.2012).	30
Abbildung 15: Strömungswege der Luft, Quelle: xia (10-12/10, S.31).....	34
Abbildung 16: Vergleich Integral- und Differentialform, Quelle:Lecheler(2011, S.8).....	40
Abbildung 17: Zusammensetzung der Kraft für Fluide, Quelle: Lecheler (2011,S.11).....	40
Abbildung 18: Blockstrukturiertes Netz, Quelle: eigene Darstellung.	41
Abbildung 19: Unstrukturiertes Netz, Quelle: eigene Darstellung.	41
Abbildung 20: Prismenschicht, Quelle: eigene Darstellung.	42
Abbildung 21: Modellierte k-Gleichung, Quelle: Laurien (2011, S.178).	43
Abbildung 22: Modellierte ϵ Gleichung, Quelle: Laurien (2011, S. 178).....	44
Abbildung 23: Strahlungstransportgleichung, Quelle Brunn (2010, S.29).....	45
Abbildung 24: Vergleich der verschiedene Differenzen, Quelle: Lecheler (2011, S. 42).	47
Abbildung 25: 1. Ableitung der Taylor-Reihe, Quelle: Lecheler (2011, S.43).....	47
Abbildung 26: Ebenen der zeitlichen Diskretisierung, Quelle: Lecheler (2011, S. 40).....	49
Abbildung 27: Verwendete Geometrie in der Seitenansicht, Quelle: eigene Darstellung	53
Abbildung 28: Vergrößerte Geometrie in der Isometrie, Quelle: eigene Darstellung.....	53
Abbildung 29: Druckprofil im Abluftschacht mit einer Kantenlänge von 600 mm	56
Abbildung 30: Geschwindigkeitsverteilung im Abluftschacht.....	57

Tabelle 1: Eigenschaften der Geometrie.....	52
Tabelle 2: Randbedingungen der durchgeführten Simulationen.....	55
Tabelle 3: Nachfolgend verwendete Größe aus den Simulationen	58
Tabelle 4: Berechneter Volumenstrom in m ³ /h.....	58
Diagramm 1: Auswirkungen der Schachthöhe auf die Druckdifferenz und den Volumenstrom....	54
Diagramm 2: Druckdifferenz in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit	59
Diagramm 3: Änderung der Druckdifferenz abhängig von der Geschwindigkeit	60
Diagramm 4: Geschwindigkeitsänderung in Abhängigkeit vom Volumenstrom	61
Diagramm 5: Volumenstromänderung in Abhängigkeit der Druckdifferenz	62
Diagramm 6: Nomogramm als Entwurfsgrundlage für natürliche Lüftungssysteme	63

Symbolverzeichnis

Abkürzung	Einheit	Erklärung
A	m ²	Fläche
a	m/s ²	Beschleunigung
C _p	-	Aerodynamischer Druckkoeffizient
c _μ	-	Konstante = 0,09
E _i	J/s	Strahlungsleistung
F	N	Kraft
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
h	m	Höhe
k	m ² /s ²	Turbulente kinetische Energie
k _j	1/cm	Absorptionskoeffizient
m	kg	Masse
\dot{M}	kg/s	Massenstrom
n	-	Brechungsindex
n	-	Zeitpunkt
p	Pa	Druck
\dot{Q}	W	Wärmestrom
S	J/K	Entropie
T	K	Temperatur
t	s	Zeit
U	J	Innere Energie
U	-	Stellvertretend für jede Strömungsgröße
u,v,w	m/s	Geschwindigkeitskomponenten in x-, y-, z-Richtung
V	m ³	Volumen
\dot{V}	m ³ /s	Volumenstrom
v	m/s	Geschwindigkeit
W	J	Arbeit
x,y,z	m	Kartesische Raumkoordinaten
α	-	Durchflusszahl
ε	m ² /s ³	Turbulente Dissipationsrate
ε _j	-	Emissivität
ζ	-	Widerstandsbeiwert
μ _T	Pa·s	Wirbelviskosität
ρ	kg/m ³	Dichte
σ	W/m ² ·K ⁴	Stefan Boltzmann Konstante
τ _{xx}	N/m ²	Normalspannung in x-Richtung normal zur x=const-Fläche <i>dydz</i>
τ _{yx}	N/m ²	Normalspannung in y-Richtung normal zur x=const-Fläche <i>dx dz</i>
τ _{zx}	N/m ²	Normalspannung in z-Richtung normal zur x=const-Fläche <i>dx dy</i>
ω	m ² /s ³	Turbulente Frequenz

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Betrachtung von historischen und gegenwärtigen natürlichen Lüftungssystemen sowie der numerischen Analyse von natürlichen Lüftungssystemen.

Im ersten Teil der Arbeit wird Grundlegendes über die natürliche Lüftung behandelt. Dabei werden die Anforderungen an eine Lüftung geklärt und näher auf die verschiedenen Antriebskräfte der natürlichen Lüftung eingegangen. Die Überlagerung der Antriebskräfte wird näher erläutert.

Im zweiten Teil werden mehrere natürliche Lüftungssysteme aus der Vergangenheit und deren Funktionsweise vorgestellt. Die Beispiele reichen von der Antike bis in das 19. Jahrhundert hinein. Aus diesen Systemen werden Erkenntnisse über die Realisierbarkeit und die Übertragung in die heutige Zeit gewonnen. Danach werden Beispiele vorgestellt, bei denen natürliche Lüftungssysteme in der Gegenwart realisiert wurden. Neben zwei Neubauten mit natürlichen Lüftungssystemen, wird ein Projekt näher betrachtet bei dem eine historische, natürliche Lüftung auf den heutigen Stand der Technik gebracht wurde.

Im dritten Teil folgt die numerische Strömungssimulation einer natürlichen Lüftung mittels Schacht. Es wird zu Beginn das Simulationsprogramm vorgestellt und dessen Arbeitsgrundlagen erläutert. Bei der Strömungssimulation wird untersucht, wie sich eine Veränderung des Schachtquerschnitts auf die Geschwindigkeit, den Volumenstrom und vor allem die Druckdifferenz im Schacht auswirken. Zusätzlich wird ermittelt, wie die Windgeschwindigkeit der Umgebung sich auf die Parameter auswirken. Aus den Simulationsergebnissen wird ein Nomogramm als Entwurfsgrundlage für die Auslegung von Schächten für eine natürliche Lüftung erstellt. Daraus abzulesen sind die Zusammenhänge der oben genannten Parameter. Die Ergebnisse der Simulationen und deren Auswertung zeigen, dass die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Parametern den erläuterten, physikalischen Grundlagen entsprechen.

1. Einleitung

Die In- und Exfiltration von Gebäuden ist bei der Planung von Neubauten und Sanierungsvorhaben ein wesentlicher Bestandteil. Die Dichtigkeit eines Gebäudes führt zu einer Verringerung von Wärmeverlusten und damit zu einem geringeren Energieverbrauch.

Jedoch entsteht bei mehr oder weniger luftundurchlässigen Gebäuden die Problematik, dass Feuchtigkeit und Schadstoffe nicht mehr aus dem Gebäude abgeführt werden können. Hierdurch kommt es zu Bauteilschäden und einer Verminderung der Raumluftqualität. Um einen kontrollierten Feuchtigkeitsabtransport und eine Verbesserung des Rauminnenklimas zu erreichen werden in der Regel mechanische Lüftungsanlagen im Gebäude montiert. Sei es als reine Abluftanlage oder als Lüftungsanlage mit oder ohne Wärmerückgewinnung. Für den Betrieb von mechanischen Lüftungsanlagen ist jedoch eine Antriebsenergie, meistens Strom, erforderlich. Die Einsparung von Wärme erfordert also den Einsatz von Strom. Jedoch ist die Produktion von Strom aufwendiger und der Primärenergiebedarf für die Produktion ist höher. Oft ist Wärme sogar ein Abfallprodukt der Stromerzeugung. Daher ist Strom wertvoller als Wärme. Um nun mit Hilfe des wertvolleren Energieträgers Strom den weniger wertvollen Energieträger Wärme einzusparen ist daher aus primärenergetischer Sicht, problematisch und Bedarf entsprechender Analyse.

Das Ziel von Gebäudesanierungen und Neubauten sollte eine Verringerung des gesamten primärenergiebezogenen Energiebedarfs sein. Würde jedes Gebäude in Deutschland mit einer mechanischen Lüftungsanlage versehen, dann würde ein enormer Strombedarf entstehen. Diese Entwicklung hin zu mehr mechanischen Lüftungsanlagen im Wohnungsbau ist angewendet auf die ca. 40 Millionen Haushalte in Deutschland überhaupt nicht möglich. Es würde eine massive Erhöhung der Stromproduktion bedeuten.

Bei mechanischen Lüftungsanlagen wird die Stromaufnahme durch mangelnde Wartung und die damit verbundenen verschmutzten Filtern sowie eine Überdimensionierung bezüglich der Luftmengen bei der Auslegung weiter erhöht. Dabei gibt es neben strombetriebenen Lüftungsanlagen auch Alternativen. Wird der Blick in die Vergangenheit gerichtet, wird deutlich, dass es schon vor der Nutzung von elektrischem Strom Maßnahmen zur Lüftung von Gebäuden gegeben hat. Das Wissen über die Funktionsweise dieser natürlichen Lüftungssysteme ist mehr und mehr in Vergessenheit geraten. Natürliche Lüftungssysteme erfordern, jedoch eine ganzheitliche Betrachtung. Daher ist die Planung und Auslegung einer natürlichen Lüftung weitaus aufwendiger, als bei einer ventilatorgestützten Lüftungsanlage.

Um die Abfuhr von Feuchtigkeit, Wärme im Sommer und Schadstoffen (wie zum Beispiel flüchtige organische Verbindungen (VOC), Feinstaub und Stickoxide) und die Verbesserung des Rauminnenklimas mit Hilfe von natürlichen Lüftungssystemen realisieren zu können, wird in dieser Arbeit die Funktion der natürlichen Lüftung und die Auswirkungen von veränderten Bedingungen auf diese betrachtet.

Die vorliegende Arbeit ist in drei Abschnitte unterteilt. Im ersten Teil werden zu Beginn die Anforderungen an eine Lüftung im Allgemeinen und die Funktionsweise der natürlichen Lüftung erläutert.

Im Anschluss wird im zweiten Teil die Lüftung in der Vergangenheit näher betrachtet. Es werden verschiedene Beispiele vorgestellt, bei denen eine natürliche Lüftung und Klimatisierung realisiert wurde. Dabei handelt es sich um Konzepte, die sich in der Vergangenheit bewährt haben und aus denen Erkenntnisse für die Realisierung von heutigen Konzepten gezogen werden. Nach den Beispielen aus der Vergangenheit werden moderne Gebäude vorgestellt bei denen ein natürliches Lüftungs- und Klimatisierungskonzept angewandt wurde.

Der dritte Teil dieser Arbeit besteht aus einer numerischen Strömungssimulation einer beispielhaften Geometrie mit einer natürlichen Lüftung über einen Abluftschacht. Dabei werden aus einer Vielzahl an Simulationen Daten für die Erstellung eines Nomogramms gewonnen. Dieses Nomogramm soll die wesentlichen Zusammenhänge von Geschwindigkeit, Volumenstrom und Druckdifferenz bei verschiedenen Nennweiten verdeutlichen und bei der Planung von natürlichen Lüftungen unterstützen.

2. Natürliche Lüftung von Gebäuden

Natürliche Lüftung bezeichnet den Luftaustausch durch Öffnungen in einem Gebäude. Dieser Luftaustausch kann durch Undichtigkeiten, plan- und unplanmäßig, erfolgen. Außerdem entsteht ein Luftaustausch durch das Öffnen der Fenster und Außentüren durch den Nutzer des Gebäudes. Des Weiteren ist es möglich einen stärkeren Luftwechsel durch eine Schachtlüftung oder mit Hilfe von Dachaufsätzen zu erzeugen. (RECKNAGEL; SPRENGER; SCHRAMEK, 2009).

Nachfolgend werden die Anforderungen an eine Lüftung und die Entstehung von natürlicher Lüftung durch die verschiedenen Antriebskräfte dargelegt. Des Weiteren werden natürliche Lüftungssysteme aus der Vergangenheit und der Gegenwart vorgestellt.

2.1. Anforderungen an eine Lüftung

In geschlossenen Räumen ist die Lüftung auf Grund der Gegebenheiten von besonderer Bedeutung. Um eine gute Luftqualität im Raum zu gewährleisten werden an eine Lüftung drei wesentliche Anforderungen gestellt.

- Abtransport von Raumluft- und Bauwerksfeuchte
- Reduktion von Schad- und Geruchsstoffen
- Zufuhr von ausreichend Sauerstoff

Bei ausreichender Fensterlüftung oder Undichtigkeit des Gebäudes ist der erforderliche Luftaustausch für die Erfüllung der Anforderungen an eine Raumlüftung häufig gegeben.

Jedoch ergeben sich ganzjährig aus den allgemein angewandten Lösungsansätzen zur Erfüllung der Anforderungen erhebliche Probleme mit der Raumluftqualität.

In einem Wohngebäude sind diverse Feuchtequellen vorhanden die Feuchtigkeit an die Raumluft abgeben. Bei einem Duschbad entstehen durchschnittlich zum Beispiel 300g Feuchtlast. Zudem gibt ein Mensch etwa 1200g/d an die Umgebung ab (HEINZ, 2011). Es wird deutlich, dass die Eintragung von Feuchtelasten zum Einen partiell infolge von Tätigkeiten und zum Anderen kontinuierlich auf Grund des natürlichen Stoffwechsels auftritt. Für die Gesundheit des Menschen gilt eine Raumluftfeuchte von unter 30% und über 60% als bedenklich. Damit außerdem keine Schädigungen durch Taupunktunterschreitungen an Gebäudebauteilen auftreten können, sollte ein Abtransport über die erforderliche Lüftung erfolgen. Bei Gebäuden mit vermeintlich geringer In- und Exfiltration kann die Feuchtigkeit nicht auf natürlichem Wege abtransportiert werden. Um die situationsbedingten, komplexen Anforderungen zu erfüllen ist eine gelungene Lüftung erforderlich. (HEINZ, 2011).

Bei einer nichtgewährleisteten Abfuhr der Feuchtelasten steigt die Luftfeuchtigkeit im Raum an. Besonders in der Heizperiode kommt es an kühleren Oberflächen, wie Außenwänden und Wärmebrücken zu einem Anstieg der Oberflächenfeuchte bis hin zur Kondensation. Steigt die relative Luftfeuchte an Bauteilen an mehreren Tagen nacheinander auf 80%, besteht die Gefahr eines Schimmelbefalls an dieser Oberfläche (vgl. DIN EN ISO 13788).

2.2. Antriebskräfte der natürlichen Lüftung

Im Unterschied zur ventilatorgestützten Lüftung werden bei der natürlichen Lüftung nur erregte, natürliche Antriebskräfte genutzt. Erzeugt werden diese durch den thermischen Auftrieb und den Wind. Erst genannter entsteht durch die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen. Außerdem verstärkt die wirksame Höhe, d.h. die Höhe zwischen Luftein- und Luftauslass, den thermischen Auftrieb. Durch das Entweichen der Luft aufgrund des thermischen Auftriebs entsteht im Inneren des Gebäudes ein Unterdruck und Außenluft strömt hinein. Der als zweites genannte Wind als Antriebskraft beeinflusst die natürliche Lüftung auf Grund der herrschenden Windgeschwindigkeit. Der Eintritt der Luft mit erhöhter Geschwindigkeit verursacht einen dynamischen

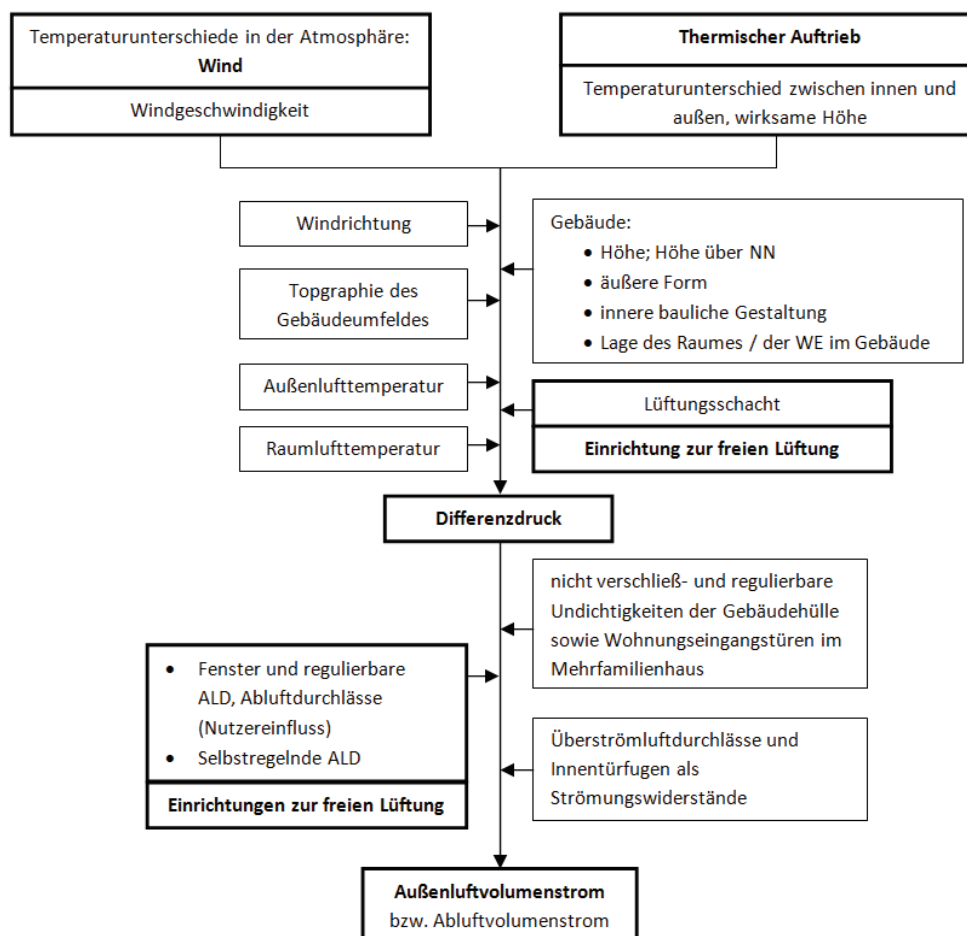


Abbildung 1: Wirkmechanismus der freien Lüftung, Quelle: Heinz (2011, S. 72).

Druck, welcher einen Überdruck im Gebäude bewirkt und die Luft nach außen strömen lässt. Insgesamt entsteht infolge beider Faktoren folglich eine Druckdifferenz, die eine Luftbewegung zur Folge hat und somit zu einer Lüftung führt. Damit der Luftvolumenstrom kontrollierbar ist, werden regulierbare Öffnungen in verschiedenen Formen vorgesehen, wie zum Beispiel selbstregelnde Schachtverengungen oder Luftdurchlässe in der Außenwand. In Abbildung 1 sind beide Antriebskräfte und die Einflussfaktoren der natürlichen Lüftung dargestellt (HEINZ, 2011).

Die durch thermischen Auftrieb und Wind entstehenden Kräfte werden von weiteren individuellen Gegebenheiten beeinflusst. Die Beschaffenheit des zu lüftenden Gebäudes mit Form, inneren baulichen Gegebenheiten sowie Höhe wirken sich besonders auf den thermischen Auftrieb aus. Eine Verstärkung kann mit Hilfe von Lüftungsschächten eintreten. Der Wind als Antriebskraft wird von der Windgeschwindigkeit und der Topographie des Außengeländes bestimmt. Außerdem spielt die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen bei der natürlichen Lüftung eine erhebliche Rolle. Da im Sommer diese Temperaturdifferenz erheblich kleiner ist, kann es zu einer Verminderung der natürlichen Lüftung kommen. Im Winter hingegen kann die Leistung der natürlichen Lüftung unerwünscht groß werden, da die Temperaturdifferenz sehr groß ist. In beiden Fällen ist eine Regulierung durch z.B. eine Veränderung des Schachtquerschnitts ratsam, um einer Auskühlung oder einer unzureichenden Lüftung entgegen zu wirken.

2.3. Wind als Antriebskraft der natürlichen Lüftung

Wird ein Gebäude vom Wind angeströmt entsteht an der dem Wind zugewandten Seite (Luv) ein Überdruck und an der dem Wind abgewandten Seite (Lee) ein Unterdruck. Außerdem entsteht durch die stetige Änderung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung eine ständige Druckänderung. Diese Druckdifferenzen werden bei der Windlüftung genutzt. Es wird zwischen einseitiger Lüftung und Querlüftung unterschieden.

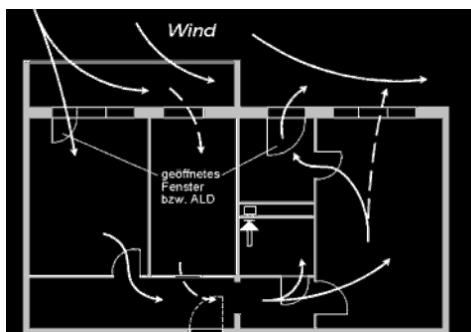


Abbildung 2: Luftströmungen bei einseitiger Lüftung, Quelle: Heinz (2011, S. 74).

Die einseitige Lüftung wird bei Wohneinheiten genutzt, die lediglich auf einer Seite mit Fenstern oder Außenluftdurchlässen ausgestattet sind. Damit die einseitige Lüftung funktionsfähig ist, sind große Öffnungen in der Außenwand erforderlich. Die Verteilung der Luft wird in Abbildung 2 verdeutlicht. Die Öffnung, auf welche der Wind als erstes trifft wird zur Zuluftöffnung. Der Wind weht in diese hinein und verteilt sich dadurch im

Inneren. Die sich in der Nutzungseinheit befindende Luft entweicht durch eine weitere Öffnung nach außen. Die Lüftung erfolgt durch die Druckänderung, welche durch die Änderung von Wind-

richtung und Windgeschwindigkeit entsteht. Der Luftwechsel, der bei einer einseitigen Lüftung erreicht wird, lässt sich nur schwer erfassen und vorhersagen. Die Änderungen der schaften sind auf eine einfache Art und Weise nicht beschreibbar.

Befinden sich in einer Nutzungseinheit auf zwei gegenüberliegenden Seiten oder über Eck Fenster oder Außenluftdurchlässe, wird von einer Querlüftung gesprochen. Bei dieser Form der Lüftung entsteht ein Luftwechsel auf Grund der Druckdifferenz zwischen Wind abgewandter und Wind zugewandter Seite. Die entstehende Druckdifferenz kann aus der Bernoulli'schen Energiegleichung als die vereinfachte Druckgleichung (Gleichung 2.3.1) abgeleitet werden (HEINZ, 2011). Dabei ist der Gesamtdruck p_t als die Summe aus dem statischen Druck p_{st} und dem dynamischen Druck p_{dyn} konstant:

$$p_{st,1} + p_{dyn,1} = p_{st,2} + p_{dyn,2} = p_t = konst. \quad (2.3.1)$$

Mit der allgemeinen Gleichung für den dynamischen Druck, der sich als Produkt aus der halben Dichte ρ und der Geschwindigkeit v ins Quadrat ergibt,

$$p_{dyn.} = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad (2.3.2)$$

kann unter Vernachlässigung des geodätischen Drucks und der Annahme, dass im Staupunkt vor dem Gebäude die Geschwindigkeit v etwa Null Meter pro Sekunde beträgt und die statische Druckänderung gleich der dynamischen ist, aus den Gleichung 2.3.1 und 2.3.2 die Druckdifferenz Δp_{st} als Produkt der halben Dichte ρ und der Geschwindigkeit v ins Quadrat abgeleitet werden:

$$\Delta p_{st} = \frac{\rho}{2} \cdot v_{Wi,1}^2 \quad (2.3.3)$$

Aus Gleichung 2.3.3 kann auf die Geschwindigkeit des eintretenden Luftstroms geschlossen werden.

$$v = \left(\frac{2 \cdot \Delta p_{st}}{\rho} \right)^{0,5} \quad (2.3.4)$$

Unter Einbeziehen des aerodynamischen Druckkoeffizienten C_p kann die vom Wind verursachte Druckdifferenz zwischen Luv und Lee wie folgt beschrieben werden:

$$\Delta p_{Wi} = \Delta C_p \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{Wi,ist}^2 \quad (2.3.5)$$

Die vom Wind erzeugte Druckdifferenz Δp_{Wi} ist das Produkt aus der Differenz der aerodynamischen Druckbeiwerte ΔC_p , der halben Dichte ρ und der Geschwindigkeit v ins Quadrat.

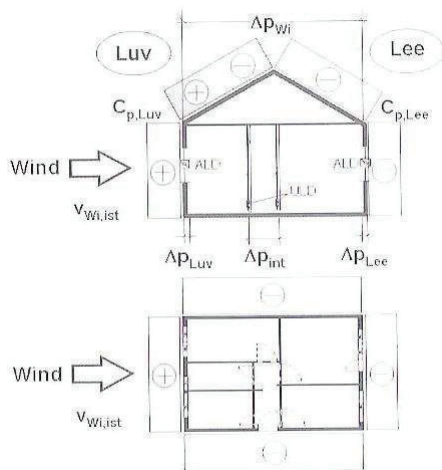


Abbildung 3: Druckverteilung an einem Gebäude im Wind, Quelle: Heinz (2011, S.76).

In Abbildung 3 werden die entstehenden Unter-(-) bzw. Überdrücke(+) auf der dem Wind abgewandten und dem Wind zugewandten Seiten verdeutlicht. Die Druckdifferenz ergibt sich aus dem jeweiligen Druck an der Luv- und der Lee-Seite.

Mit der allgemeinen Durchflussformel eines Rohres kann auf den Massenstrom \dot{M} geschlossen werden. Dieser ergibt sich als das konstante Produkt von Dichte ρ , Fläche A und Geschwindigkeit v :

$$\dot{M} = \rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot v_2 = \text{konst.} \quad (2.3.6)$$

Jedoch gilt diese Formel für ein geschlossenes Rohr. Zur Berücksichtigung der auftretenden Einzelwiderstände, welche durch das Ein- und Ausströmen entstehen, wird eine Durchflusszahl α eingeführt. Diese erfasst alle konstanten Widerstandsbeiwerte ζ_{ges} und hängt negativ von ihr ab.

$$\alpha = \left(\frac{1}{1 + \zeta_{ges.}} \right) \quad (2.3.6)$$

Nach erweitern von Gleichung 2.3.6 um die Durchflusszahl α ergibt sich für die einströmende Luft der Luftmassenstrom \dot{M}_L nach folgender Formel:

$$\dot{M}_L = \alpha \cdot \rho \cdot A \cdot \left(\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho} \right)^{0,5} \quad (2.3.7)$$

Für die Berechnung des ein- und austretenden Luftvolumenstromes durch zwei Öffnungen in einem Raum mit den Flächen A_1 und A_2 und gleicher Dichte ρ ergibt sich folgende Gleichung:

$$\dot{V} = \left[(\alpha_1 \cdot A_1)^{-2} + (\alpha_2 \cdot A_2)^{-2} \right]^{-0,5} \cdot \left(\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_L} \right)^{0,5} \quad (2.3.8)$$

Die Gleichung 2.3.8 ist lediglich auf Querlüftung anzuwenden. Für die Berechnung von Luftmassenströmen bei einseitiger Lüftung ist die Gleichung 2.3.7 heranzuziehen (HEINZ, 2011).

2.4. Thermischer Auftrieb als Antriebskraft der natürlichen Lüftung

Auf Grund von Luftdichtedifferenzen innerhalb und außerhalb eines Gebäudes entsteht thermischer Auftrieb. Ist die Temperatur in einem Schacht konstant ist der Auftriebsdruck Δp_{therm} proportional zur Differenz aus Außen- und Innendruck ($\rho_{außen}$ bzw. ρ_{innen})

$$\Delta p_{therm} = (\rho_{ausssen} - \rho_{innen}) \cdot g \cdot h_{ges} \quad (2.4.1)$$

Da jedoch innerhalb eines Gebäudes die Temperatur über die Höhe nicht konstant ist, entsteht ein Druckprofil. Der tatsächliche Auftriebsdruck wird durch die Integration der Dichte über die Höhe gewonnen. Dabei sind die Höhe der anfallenden Wärmelast und die Lage der Zuluftöffnung von besonderer Bedeutung. Hiervon abhängig stellt sich ein Temperaturprofil im Gebäude ein. Erfolgt die Eintragung der Wärmelast am Boden, stellt sich ein linearer Druckanstieg mit der Höhe ein. Es gilt für den Auftriebsdruck die Gleichung 2.4.1. Bei Freiwerden der Wärmelast in der Mitte des Gebäudes entsteht hingegen nur in der oberen Hälfte des Gebäudes ein thermischer Auftrieb, dieser wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\Delta p(h_{ges}) = \Delta \rho \cdot g \cdot (0,5 \cdot h_{ges}) \quad (2.4.2)$$

Vergleichbar mit dem ersten Fall entsteht ein linearer Druckanstieg, da jedoch die wirksame Höhe nur die Hälfte beträgt, entsteht auch nur ein halb so großer Druckanstieg. Es gilt also: je größer die wirksame Höhe desto größer ist die Druckdifferenz und damit der thermische Auftrieb.

Der auftretende Gesamtdruck teilt sich in Ein- und Ausströmdruckverluste auf, die Verteilung hängt von der Größe der jeweiligen Öffnungen ab. Wird die Einlassöffnung größer, vergrößert sich der Druck am Auslass. Bei Schließung einer der beiden Öffnungen liegt an dieser die gesamte

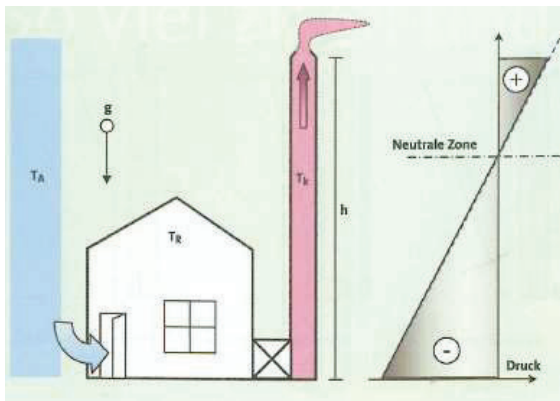


Abbildung 4: Zonenverteilung bei thermischem Auftrieb, Quelle: Fiedler (2011, S.43).

Druckdifferenz an. An der anderen Öffnung herrscht Umgebungsdruck. Der thermische Auftrieb erzeugt im Gebäude eine Unterdruck-, eine Neutrale- und eine Überdruckzone. Der Übergang von einer zur anderen Zone ist weitestgehend linear. Die neutrale Zone befindet sich an dem Punkt, an dem der Innendruck gleich dem Außendruck ist. Unterhalb der neutralen Zone herrscht ein Unterdruck und oberhalb ein Überdruck (siehe Abbildung 4). In Abbildung 4 wird verdeutlicht, dass die eintretende Luft mit Außentemperatur T_A im Inneren des Gebäudes auf die Raumtemperatur T_R erwärmt wird. Die warme Luft tritt am Boden in den Schacht ein und steigt nach außen. Es ergibt sich eine Aufteilung in Druckzonen. Die Lage der neutralen Zone wird dabei durch die Druckverluste an den Öffnungen bestimmt, dabei sind alle Verluste gleich dem Auftriebsdruck. Diese Tatsache kann zur Regulierung des thermischen Auftriebs genutzt werden. Die Verkleinerung einer Öffnung hat zur Folge, dass der Druckverlust an der anderen Öffnung steigt und somit der Auftrieb verändert wird (FIEDLER, 2011).

Mehrgeschossige Gebäude wurden in der Vergangenheit mit Lüftungsschachtsystemen versehen. Im Wesentlichen wird zwischen Sammelschächten und Einzelschächten unterschieden. Bei der Lüftung über Sammelschächte besteht ein zentraler Schacht von dem in jede Nutzungseinheit Abzweigungen verlaufen. Die Luft aus der Nutzungseinheit wird gesammelt und über Dach geführt. Von dieser Lüftung ist jedoch auf Grund von nicht zu kontrollierender Luftströmung abzu- sehen. Außerdem erfolgt eine Verbindung der einzelnen Nutzungseinheiten, dies ist auf Grund von Schall- und Brandschutz jedoch nicht sinnvoll und deswegen nicht mehr zulässig. Die Lüftung über Einzelschachtsysteme hingegen zeigt diese Problematik nicht. Jede Nutzungseinheit verfügt über einen separaten Schacht. Dabei wird durch die Art der Zuluftzuführung unterschieden. Zum einen kann die Zuluftversorgung über definierte Öffnungen in der Außenwand erfolgen. Zum anderen kann die Zuluft über einen Schacht in die Nutzungseinheiten gelangen. Dabei verteilt sich die Luft in den Nutzungseinheiten auf Grund der Anordnung von Zuluft einbringung und Abluftschacht, wobei die Innenraumtüren mit einem Unterschnitt oder Überströmöffnungen versehen werden um eine Strömung in der Nutzungseinheit zu gewährleisten (HEINZ, 2011).

2.5. Überlagerung von Auftriebs- und Windkräften

Wie in den beiden Abschnitten zuvor gezeigt, spielen sowohl der thermische Auftrieb als auch der Wind bei der natürlichen Lüftung eine entscheidende Rolle. Eine einzelne Betrachtung der Druck-

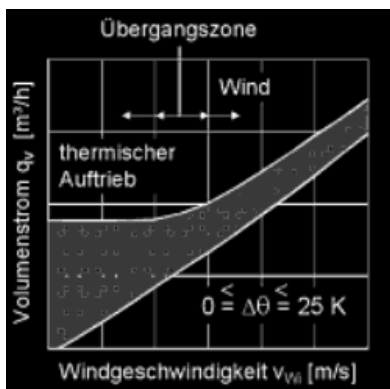


Abbildung 5: Überlagerung von Auftrieb und Wind, Quelle: Heinz (2011, S.81)

differenzen beschreibt die Lüftung jedoch in nicht ausreichendem Maße. Die Berechnung der Luftvolumenströme wird unterschiedlich beschrieben. Zum einen wird die These vertreten, dass die einzelnen Druckdifferenzen sich addieren und als Gesamtdifferenzdruck in eine allgemeine Gleichung eingefügt werden können (vgl. IEA, 1989). Zum anderen besteht die Meinung, dass die Einzelluftvolumenströme separat voneinander ermittelt werden (vgl. IEA, 1989). Bei einer Messung von Un-

dichtigkeiten bzw. anhand theoretischer Untersuchungen wurde gezeigt, dass bei niedrigen Windgeschwindigkeiten (2-3 m/s) die Schachtlüftung lediglich durch den thermischen Auftrieb angetrieben wurde und bei höheren Windgeschwindigkeiten dieser Antrieb den unbedeutenderen Faktor darstellte, dies wird in Abbildung 5 verdeutlicht (HEINZ, 2011). Die Untersuchungen lassen sich jedoch nicht verallgemeinern, da diese unter Laborbedingungen durchgeführt wurden und eine Betrachtung in realen Gegebenheiten nicht stattgefunden hat.

2.6. Natürliche Lüftung in der Vergangenheit

Bereits in der Vergangenheit wurden das Klima und die Belüftung von Gebäuden auf die unterschiedlichsten Arten realisiert. Bei der Planung der Gebäude und der Lüftungstechnik wurden die Nutzung und die Umgebung mit einbezogen. Dies war notwendig, da die Lüftung ausschließlich natürlich erfolgte. Zur Verdeutlichung der Komplexität der natürlichen Lüftung werden nachfolgend einige Beispiele von funktionierender natürlicher Lüftung und Klimatisierung von historischen Gebäuden dargestellt und beschrieben.

2.6.1. Atriumhäuser

Schon im antiken Rom haben sich die Baumeister Gedanken über ein angenehmes Raumklima gemacht. Dies spiegelt sich in den Atriumhäusern der damaligen Zeit wieder, die auf Grund des Vesuvausbruches und der damit verbundenen Verschüttung von Pompeji erforscht werden konnten.

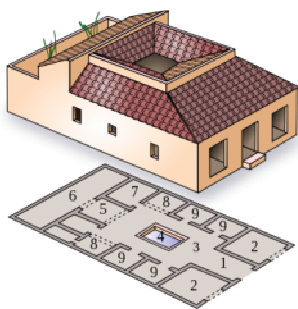


Abbildung 6: Typischer Aufbau eines Atriumhauses, Quelle: Wikipedia/Atriumhaus

Der Aufbau der Atriumhäuser erfolgte stets nach dem gleichen Grundmodell, es wurde lediglich die Größe und die Anzahl der vorhandenen Räume variiert. Beispielhaft ist dies in Abbildung 6 dargestellt. Zur Straße hin befand sich meist ein Laden oder eine Werkstatt, tabernae(2). Die anderen Außenwände waren häufig mit wenig oder gar keinen Fenstern versehen. Atriumhäuser konnten freistehend oder als Reihenhäuser gebaut werden. Der Eingangsbereich, fauces(1), führte direkt in das Atrium (3). In seiner Mitte lag ein Wasserbecken, Impluvium (4), über dem eine Öffnung im Dach, compluvium, war. Von dem Atrium gingen alle weiteren Räume des Hauses ab, diese waren häufig nur durch Tücher abgetrennt. Hinter dem eigentlichen Wohnhaus war der Garten, hortus(6), angelegt. (BENTZ, 2006)

Auf Grund der geringen Fensterfläche wurde der Eintrag von Wärmelasten durch die Sonne verhindert. Durch die Öffnung im Dach gelangt ausreichend Licht in das Atrium und die angrenzenden geöffneten Räume. Die von der Straße oder auch von dem Garten einströmende Luft war durch die Verschattung häufig kühl. Zusätzlich erfolgte eine weitere Kühlung durch die in der Mitte des Atriums angelegte Wasserfläche. Letztere wurde von der Luft überströmt und es verdunstet Wasser. Somit erfolgte eine Abkühlung der Luft auf Grund einer adiabaten Kühlung. Die wärmere Luft im Gebäude stieg im Atrium nach oben und konnte durch die Öffnung im Dach nach außen gelangen. Hiermit wurde eine Durchströmung des Gebäudes erzielt. Auf Grund der Offen-

heit der Atriumhäuser war diese Bauweise in feuchten und kalten Gebieten ungeeignet. Der Aufbau diente der Erschaffung eines angenehmen Raumklimas in warmen und trockenen Gebieten.

Die Betrachtung des Atriumhauses zeigt, dass bereits die Römer Lösungen für Klimatisierung von Gebäuden in warmen Klimazonen gefunden hatten. Damals wurde bereits erkannt, dass die Eintragung von Wärmelasten durch die Sonne einen erheblichen Einfluss auf die Rauminnentemperatur hatte.

Die Verminderung von Wärmelasten und die Kühlung mit Hilfe von Verdampfungsenergie sind Techniken, die sich in die heutige Gebäudetechnik integrieren lassen. Bei der Gestaltung von Gebäuden können zum Beispiel die Ausrichtung der Fenster und deren Verschattung berücksichtigt werden. Die Gestaltung von Fensterflächen sowie eine außenliegende Verschattung mindern den Eintrag von Wärmelasten in erheblichem Maße. Desweiteren können Wasserflächen installiert werden. Diese dienen nicht nur als Blickfang sondern haben im Sommer auf Grund der Verdampfungsenergie eine kühlende Wirkung.

2.6.2. Persische Windfänger

Im arabischen Raum wurden in der Vergangenheit Windfänger zur Belüftung und Kühlung von Räumen verwendet. Dieser Windfänger wird als *badgir* bezeichnet. Der thermische Auftrieb, der durch hohe Gebäude verstärkt wird, wird als Antriebskraft zur Lüftung der Räume genutzt. Außerdem wird die Wärmekapazität der Schachtwände berücksichtigt (RASHAD, 2008).

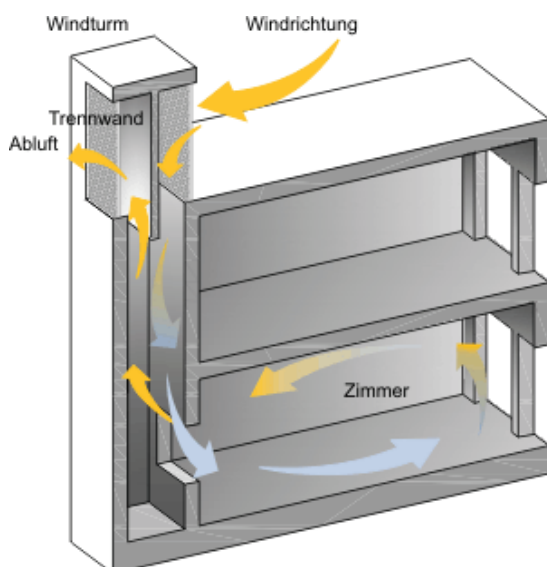


Abbildung 7: Funktionsweise eines Badgir, Quelle: EcologicArchitecture15.03.12

Ein Windfänger besteht aus einem über Dach geführten Turm. In diesem befinden sich in alle Himmelsrichtungen senkrechte Öffnungen um den Wind aus verschiedenen Richtungen einfangen zu können. Das Innere des Windfängers ist in verschiedene Schächte unterteilt, so wird jeder Raum durch einen eigenen Schacht mit Außenluft versorgt. Jeder Schacht ist im oberen Teil mit einer Mitteltrennwand versehen, diese entfällt im Gebäude, damit die Luft ungehindert aneinander vorbei in die Räume strömt. Die Verteilung der Luft im Gebäude wird durch eine offene Gestaltung der Räume gefördert (siehe Abbildung 7).

Die klimatischen Bedingungen in der Umgebung ändern sich je nach Jahres- und Tageszeit. Herrscht, wie häufig im Sommer nachts, im Inneren des Gebäudes eine höhere Temperatur als außerhalb, strömt die Luft durch den thermischen Auftrieb im Windfänger nach oben und damit aus dem Gebäude heraus. Auf Grund der daraus entstehende Druckdifferenz strömt kühle Luft von außen durch den Windfänger in das Gebäude. Es kommt neben dem Luftaustausch zu einer Abkühlung der Wände des Windfängers.

Neben dieser sommerlichen Nachtkühlung durch den thermischen Auftrieb kann außerdem der Wind als Antriebskraft der Lüftung genutzt werden. Auf Grund des Aufbaues des Windfängers kann bereits Luft bei sehr niedrigen Windgeschwindigkeiten durch die senkrecht verlaufenden Öffnungen auf dem Dach einströmen. Die Luft bewegt sich wegen des Dichteunterschiedes nach unten in das Gebäude und kühlt dieses bei niedrigen Außentemperaturen weiter (siehe Gleichung 2.4.1).

Steigt die Temperaturdifferenz zwischen Außen und Innen ($T_A - T_I > 0$), kühlt sich die Luft im Windfänger infolge der Wärmekapazität der Lehmwände ab und sinkt nach unten. Die sich im Raum befindende Luft wird verdrängt und eine Lüftung des Raumes erfolgt. Weht zudem Wind in den Windfänger, strömt die Luft durch den dynamischen Druck in den Schächten nach unten. Diese einströmende Luft kühlt sich an den Schachtwänden ebenfalls ab.

Damit eine schnelle Erwärmung der Schachtwände durch einen hohen Luftwechsel verhindert wird, kann die Öffnung des Schachtes zum Raum verringert werden. Auf Grund der verringerten Strömung bleibt die Aufnahmefähigkeit der Schachtwände länger erhalten und die Lüftung erhitzt den Raum nicht übermäßig.

Die Kühlung der Luft kann durch die Nutzung der Verdampfungsenthalpie verstärkt werden. Dazu können feuchte Tücher in den Schächten aufgehängt werden oder einem Wasserbassin unter den Schächten platziert werden. Die Luft strömt über diese und kühlt sich auf Grund der Änderung des Aggregatzustandes des verdampfen Wassers von flüssig zu gasförmig ab (RASHAD, 2008).

Der Kontakt von Zu- und Abluft ist aus hygienischen Gründen nicht mehr zulässig. Jedoch lässt sich der Aufbau des Windfängers oberhalb des Gebäudes gut in die Gegenwart überführen. Der Windfänger kann sich als Dachhaube auf einem Schacht befinden um die Antriebskräfte der natürlichen Lüftung zu verstärken. Die Luftströmungen können in voneinander getrennten Schächten aneinander vorbei strömen, um den Temperaturübergang zu gewährleisten. Dies kann auch als ein Schacht-in-Schacht-System ausgeführt werden. Dabei sind der Wärmeübergang und die Wärmekapazität der Schachtwände von erheblicher Bedeutung. Durch steuerbare Blenden kann die Grö-

ße der Öffnungen variieren und damit die Regelung vom Nutzer unabhängig erfolgen. Außerdem ist wie bei den Atriumhäusern die Nutzung der Verdampfungsenergie möglich.

2.6.3. Völkerkundemuseum in Wien

Das Völkerkundemuseum in Wien, welches sich im ehemaligen Corps de Logis der Hofburg befindet, ist mit einem natürlichen Lüftungssystem ausgestattet. Die Außenluft wird über einen gemauerten Gang vom Burggarten angesaugt. Die Luft verteilt sich in den beiden unteren Geschossen, welche labyrinthartig aufgebaut sind. Da im Winter die Temperatur im Keller höher ist als außen, wird die einströmende Luft vorgewärmt. Die Luftverteilung in den oberirdischen Geschossen erfolgt über ein Schachtsystem. In jeder Ecke des Gebäudes befinden sich zwei Schächte. Der eine ist oben abgedeckt, der andere führt über Dach. Die vorgewärmte Luft aus dem Keller wird über die abgedeckten Schächte in die Schauräume des Völkerkundemuseums transportiert. Überströmgitter in den Türen ermöglichen eine Verteilung der Luft in den Räumen. Die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen verursacht einen thermischen Auftrieb im Gebäude. Die Luft strömt durch die über Dach geführten Schächte nach außen.

Auf Grund des entstehenden Unterdrucks gelangt Luft aus dem Keller nach und es erfolgt eine natürliche Lüftung des Gebäudes. Die entstehenden Luftströmungen im Gebäude werden in Abbildung 8 verdeutlicht.

Bei sommerlichen Temperaturen ist der thermische Auftrieb wegen der kleineren Temperaturdifferenz geringer. Um jedoch eine ausreichende Zufuhr von frischer Luft zu gewährleisten, sind in die Abluftschächte Ventilatoren eingebaut, die bei Bedarf zugeschaltet werden. Das Lüftungssystem erreicht einen Luftwechsel von ca. 32.000 m³/h, dies entspricht einer durchschnittlichen Luftgeschwindigkeit im Keller von 0,3 m/s (KÄFERHAUS, 2005).

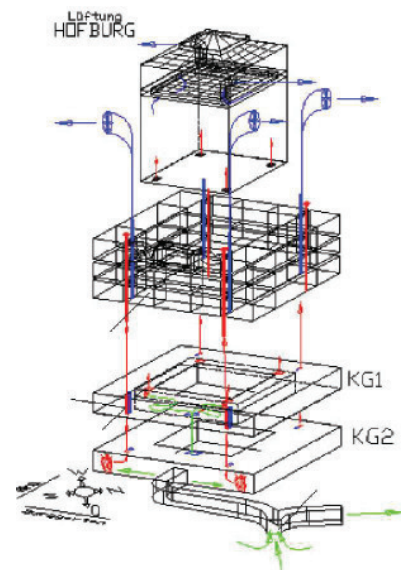


Abbildung 8: Luftverteilung im Völkerkundemuseum, Quelle: Käferhaus (2005, S.19)

Ein weiterer Bestandteil der natürlichen Lüftung ist ein zweischaliges Dachkuppelsystem über der Aula. Im Sommer wärmt sich das Glasdach stark auf. Die Luft im Inneren des Gebäudes kann durch Venturidüsen nach außen gelangen. Es entsteht ein Unterdruck und die Luft strömt aus dem Keller nach. Die nachströmende Luft ist durch den Keller abgekühlt und es entsteht ein angenehmeres Raumklima.

Um die Erwärmung der Bauteile im Sommer zu minimieren, ist das Völkerkundemuseum mit einer Bauteilkühlung versehen. In den Außenwänden befinden sich Schächte mit den Abmaßen von 15x15 cm. Diese führen vom Keller bis über das Dach und sind im Keller mit einer Klappe versehen. Im Sommer wird die Klappe geöffnet und es entsteht in den Schächten ein thermischer Auftrieb. Die Wärme der Fassade wird von der Luft aufgenommen und über Dach nach außen geführt. Die kühlere nachströmende Luft aus dem Keller sorgt weiterhin für eine Abkühlung der Bauteile. Im Winter wurden die Klappen geschlossen und die dadurch gebildete stehende Luftsäule führt zu einer thermisch verbesserten Außenfassade (KÄFERHAUS, 2005).

Die Betrachtung des Völkerkundemuseums zeigt, dass die natürliche Lüftung auch in der heutigen Zeit mit geringen Hilfsmitteln realisiert werden kann. Die Verbindung des Gebäudes über die Schächte führt jedoch zu Schallschutzproblemen. Um eine Abtrennung der einzelnen Brandabschnitte zu erreichen, kann jeder Abschnitt mit einem eigenen Schachtsystem versehen werden. Die Bauteilkühlung kann auch heute noch gut realisiert werden. Dabei kann die Schließung der Klappen mit Hilfe einer Regelung erfolgen um das System Nutzerunabhängig zu machen.

2.6.4. Quelllüftung in der Wiener Staatsoper

Ein weiteres Beispiel aus Österreich ist die Wiener Staatsoper, diese wurde am 25.5.1869 eröffnet. Die Belüftung des Gebäudes erfolgt nur über eine natürliche Lüftung, die durch den thermischen Auftrieb angetrieben wird. Die Lüftung der Wiener Staatsoper ist die erste funktionierende Quelllüftung. Bei der Quelllüftung wird die Zuluft mit einer geringen Geschwindigkeit dicht über dem Boden in den Raum eingebracht. Die Luft steigt durch Erwärmung nach oben. Dabei wird die verbrauchte Luft durch Verdrängung nach oben und von dort aus dem Raum transportiert.

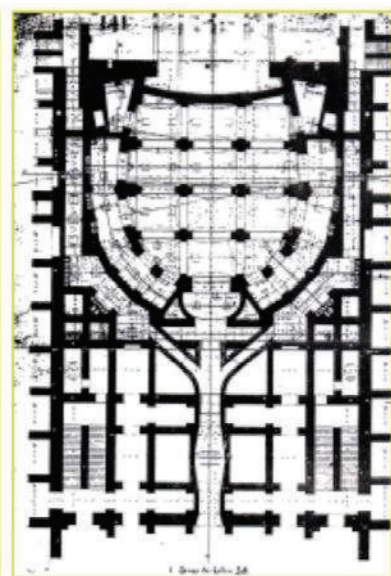


Abbildung 9: Kellergrundriss der Wiener Staatsoper, Quelle: Käferhaus (2011,S.5)

Die Luft steigt durch Erwärmung nach oben. Dabei wird die verbrauchte Luft durch Verdrängung nach oben und von dort aus dem Raum transportiert.

In das Lüftungskonzept wurde das gesamte Gebäude einbezogen. Die Außenluft strömt in den Keller, der labyrinthartig aufgebaut ist, ein. Dort herrschen auf Grund des niedrigen Temperaturniveaus des Erdreiches im Sommer kühlere Temperaturen als außen. Die eintretende, warme Luft wird abgekühlt. Im Winter tritt hingegen kalte Außenluft in den Keller ein und wird in diesem erwärmt. Die Erhaltung der Temperatur des Kellers wird durch die umgebende Erdschicht erreicht. Das Gangsystem im Keller verteilt die Luft unter dem Gebäude,

siehe Abbildung 9.

Im Opernsaal steigen die Sitzreihen treppenartig an. Unter den Sitzen sind Öffnungen, welche mit einem Lochblech versehen sind, durch die die Luft aus dem Keller einströmen kann. Um den thermischen Auftrieb im Saal zu verstärken und für eine ausreichende Beleuchtung zu sorgen ist in einem großen Abluftschacht im Zuschauerraum ein sogenannter Coronabrenner installiert, siehe Abbildung 10. Die warme Luft steigt, durch die Wärme des Brenners angeregt, den Schacht nach oben und wird über Dach geführt. Dadurch entsteht im Saal ein Unterdruck. Dies hatte zur Folge, dass die Luft aus dem Keller nachströmt. Die Lüftung wird durch die Anwesenheit der Personen und der damit verbundenen Eintragung von Wärme im Opernsaal verstärkt. Befinden sich mehr Personen im Saal steigt die Temperatur und der thermische Auftrieb erhöht sich. (KÄFERHAUS, 2011).

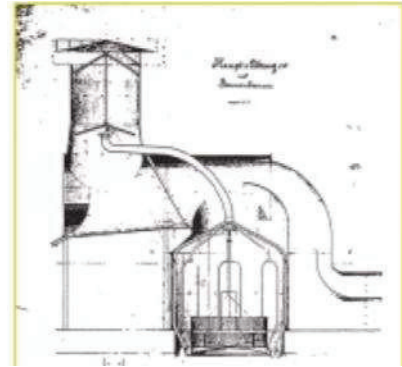


Abbildung 10: Hauptabluftschacht in der Staatsoper, Quelle: Käferhaus (2011,S.5).

Den heute geltenden Brandschutzanforderungen ist das Lüftungssystem in der Wiener Staatsoper allerdings nicht gewachsen. Außerdem fällt bei der Temperaturabsenkung der Luft im Keller Kondensat an. Der Abtransport dieses muss auf jeden Fall erfolgen.

Die Funktionsweise ist jedoch ein gutes Beispiel für die Einfachheit und Funktionalität der natürlichen Lüftungssysteme. Die Quelllüftung lässt sich mit wenigen technischen Hilfsmitteln auf den aktuellen Stand der Technik bringen ohne dass eine mechanische Lüftungsanlage eingebaut werden muss. Erfolgt eine Trennung der einzelnen Brandabschnitte in einem Gebäude mit Hilfe von Brandschutzklappen und werden Schallschutzmaßnahmen getroffen, kann das System auch heute eingesetzt werden. Dabei ist eine detaillierte und umfassende Auslegung der Quelllüftung erforderlich.

2.6.5. House of Commons in London

Ähnlich wie die Lüftung der Wiener Staatsoper entwarf David Boswell Reid Mitte des 19. Jahrhunderts das House of Commons in London. Das System umfasst alle Komponenten um ein angenehmes Klima herbeizuführen. Nur durch eine Quelllüftung wird geheizt, gekühlt, be- und entfeuchtet sowie gefiltert.

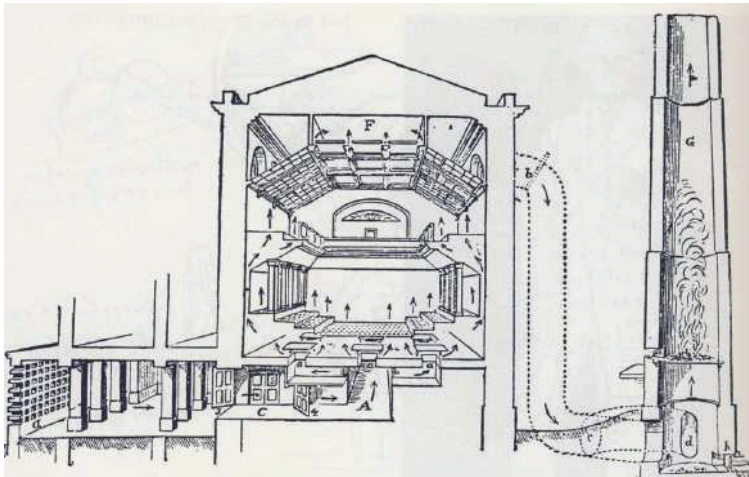


Abbildung 11: Der Luftweg im House of Commons, Quelle: Fitzner, Finke (2010, S.49).

Eine Kühlung erfolgte in der Regel mit Wasser und die Lüftung durch den thermischen Auftrieb. Dabei werden Viktoria Tower und Big Ben nicht nur als Fahnen- bzw. Uhrenturm genutzt, sondern sind durch den entstehenden thermischen Auftrieb als Bestandteil des Lüftungssystems zu sehen. Der Weg der Luft im House of Com-

mons ist in Abbildung 11 schematisch dargestellt. Die Einströmung der Außenluft erfolgt dicht über der Themse (a) in eine Einströmkammer. Im Sommer konnte diese mit Eis gefüllt werden um eine Kühlung der einströmenden Luft zu erzielen. Anschließend strömt die Luft durch Filterkammern (c). Die dortige Filterung erfolgt mit Hilfe von Baumwollschichten. Dahinter befinden sich Heizkammern, in denen die Luft bei Bedarf vorgewärmt werden kann. Die Verteilung der Luft unter dem Saal erfolgt über einen Doppelboden (A). Durch Öffnungen im Fussboden tritt die Luft ein. Die Luft strömt durch den thermischen Auftrieb im Saal nach oben und gelangt in eine Zwischendecke (F). Im Winter wird die Luft von dort über Fenster nach außen geleitet. Hingegen im Sommer wird im Kamin ein sogenanntes Lockfeuer entzündet. Dieses erzeugt einen thermischen Auftrieb. Die Luft aus der Zwischendecke wird angesaugt und strömt über den Kamin nach außen. Durch das Ausströmen entsteht im Gebäude ein Unterdruck und die Außenluft wird wieder oberhalb der Themse angesaugt (FITZNER; FINKE, 2010).

Die Belüftung mit Hilfe des Lockfeuers ist aus heutiger Sicht nicht mehr zeitgemäß, auch die einzelnen Kammern erfordern ausreichend Platz. Außerdem erfolgt lediglich die Belüftung des Saals. Angrenzende Räume werden mit diesem System nicht über ausreichend Frischluft versorgt. Das Lüftungssystem des House of Commons zeigt das Wissen der damaligen Zeit sehr gut. Auch die Einbindung der Umgebung wird durch die Ansaugung direkt über der Themse, deutlich. Dort ist die Luft auf Grund der Verdunstung des Wassers etwas kühler.

2.6.6. Jubiläumsschulen in Österreich

Um die Jahrhundertwende (1900) wurden in Österreich die sogenannten Jubiläumsschulen entworfen und jeweils am Geburtstag von Kaiser Franz-Josef eröffnet. Diese Schulen bieten aus damaliger Sicht eine gute Lösung für die in Klassenräumen auftretenden Problematiken. In einem

Klassenraum einer Schule halten sich ungefähr 25 Kinder auf. Dadurch kommt es schnell zu einer erhöhten CO₂ Konzentration und Luftfeuchtigkeit. Außerdem nimmt die Luftqualität ab. Messungen in Schulen ergaben, dass die CO₂-Konzentration in Klassenräumen auf Spitzenwerte von 6000 ppm stieg (HARTWIG, 2010). Es gilt bereits eine CO₂-Konzentration von 1000ppm als bedenklich und es treten vermehrt Müdigkeit und Kopfschmerzen der sich im Raum aufhaltenden Personen auf (HEINZ, 2011).

Bei der Planung der Jubiläumsschulen wurden diese Problematiken bereits erkannt und berücksichtigt. Die Klassenräume wurden neben Fenstern mit einem Luftschacht, der über Dach geführt wird, ausgestattet. Durch die von den Schülern abgegebene Wärme und der Schachthöhe entsteht ein thermischer Auftrieb. Die Undichtigkeit des Gebäudes sorgt für ein Nachströmen von frischer Außenluft, siehe Abbildung 12. Auf diese Weise kommt ein Luftwechsel zu Stande der für eine gute Luftqualität und den Abtransport von Schadstoffen sorgt (KÄFERHAUS, 2006).

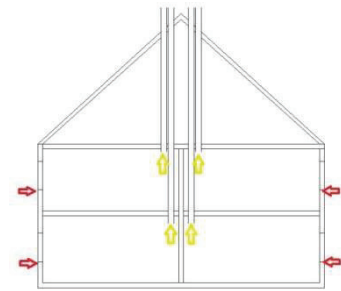


Abbildung 12: Schachtlüftung in den Jubiläumsschulen, Quelle: eigene Darstellung

Im Vergleich zu heute konnte diese Lösung ohne großen Aufwand realisiert werden. Jedoch ist diese Art der Lüftung wegen der heutigen Dichtigkeitsanforderungen an ein Gebäude nicht mehr zeitgemäß. Da in Schulen häufig keine regelmäßigen Stoßlüftungen durchgeführt werden, sorgt eine reine Fensterlüftung in Schulen für keine ausreichende Verbesserung der Luftqualität. Hinzu kommt, dass die Verteilung der Luft in einem Klassenzimmer mit einseitiger Lüftung nicht optimal ist. Die Schließung der Fenster erfolgt häufig bevor ein ausreichender Luftaustausch stattgefunden hat. Außerdem wird beim Lüften nicht auf die Thermostateinstellung der Heizung geachtet und somit strömt die erwärmte Luft direkt aus dem Fenster heraus. Daher wird das Problem der schlechten Luftqualität heute oft mit einer mechanischen Lüftungsanlage gelöst, ohne die physikalischen Gegebenheiten zu nutzen wie es in den Jubiläumsschulen der Fall war (KÄFERHAUS, 2006).

Aus dem Modell der Jubiläumsschulen ist eine Weiterentwicklung, die den heutigen Anforderungen gewachsen ist, möglich. Die Einzelschachtlüftung angetrieben durch die Abwärme der Schüler kann übernommen werden, dabei ist aber sicherzustellen, dass bei zu geringem Luftwechsel mit Hilfe einfacher Ventilatoren die Lüftung angetrieben wird. Außerdem kann die definierte Zufuhr von Luft über regelbare Einlässe realisiert werden. Dabei darf die Dichtigkeit des Gebäudes nur in angemessenen Maß beeinträchtigen werden.

2.6.7. Grundlagen aus der natürlichen Lüftung der Vergangenheit

Die erläuterten Beispiele zeigen verschiedene Möglichkeiten der natürlichen Lüftungssysteme aus der Vergangenheit. Bei der Betrachtung aus heutiger Sicht wird bei allen deutlich, dass die Brandschutzanforderungen mit diesen Systemen nicht eingehalten werden können. Jedoch kann eine Weiterentwicklung und Anpassung der bekannten natürlichen Lüftungen mit wenigen Hilfsmitteln erfolgen. Ebenso verhält es sich mit dem Schallschutz. Die Abtrennung der einzelnen Bereiche erfolgte in der Vergangenheit nicht, aber auch dies kann auf die heutigen Vorschriften angepasst werden. Diese Anpassung bedeutet jedoch auch eine Einschränkung der Funktionsfähigkeit der Lüftung, da jedes Bauteil einen zusätzlichen Druckverlust bedeutet.

Aus den Lüftungssystemen der Vergangenheit lassen sich für zu planende Anlagen viele Erkenntnisse gewinnen. Bereits im Atriumhaus und in den Windfängern wird die Verdunstungskälte genutzt. Wasser hat bei 25°C eine molare Verdampfungsenthalpie von 43,99 kJ/mol. Mit der molaren Masse von 18,02 g/mol kann auf die spezifische Verdampfungsenthalpie geschlossen werden. Diese beträgt 2,44 kJ/g. Für die heutige Architektur bedeutet dies, dass der Einbau von Wasserflächen im Gebäude neben der angenehmen Optik auch einen großen Beitrag an der Verbesserung des Raumklimas hat. Jedoch ist der Einbau von Wasserflächen aus hygienischen Gründen nicht unbedenklich. Es sind mehrere Fälle bekannt in denen sich Personen an Springbrunnen oder anderen Wasserflächen mit den Legionella-Bakterien infiziert haben. Ein Beispiel ist die Blumenanschau Flora im nordholländischen Bovenkarspel. Dort verstarben 21 Personen an der Legionärskrankheit. Das Gesundheitsministerium geht davon aus, dass die Ansteckung an einem Springbrunnen erfolgte (HETZEL, 1999).

Weiterhin lassen sich die Verschattung des Atriumhauses und die geringe Fensterfläche einfach in die heutige Zeit integrieren. Um den Komfortansprüchen der Nutzer zu genügen, kann eine regelbare Verschattung an den Fenstern vorgesehen werden. Die Regelung erfolgt je nach Rauminnentemperatur und direkter Sonneneinstrahlung. Scheint die Sonne in einen Raum hinein und steigt dadurch die Rauminnentemperatur über einen definierten Wert, so werden die Fenster verschattet. Natürlich kommen dabei stromgesteuerte Regelungen zum Einsatz. Die Alternative sind wenige und kleine Fenster oder eine sich selbst verschattende Architektur durch zum Beispiel Überhänge, Fensterform oder Balkone.

Mit den Dachaufbauten der Windfänger ist eine Verstärkung der Lüftung möglich. Dabei ist zu beachten, dass auf Grund von hygienischen Anforderungen der Kontakt von Frisch- und Fortluft nicht zulässig ist. Dies kann durch ein Schacht-in-Schacht-System verhindert werden. Außerdem sollte die Regelung über steuerbare Öffnungen erfolgen. Ansonsten kann es zu einem sehr großen

Luftwechsel im Gebäude kommen. Zusätzlich kann die Wärmekapazität der Schachtwände mit einbezogen werden.

Eine natürliche Abluftanlage für Schulen lässt sich aus dem Modell der Jubiläumsschulen in Österreich ableiten. Da die Nutzung von Schulen häufig lediglich ca. 1700 Stunden im Jahr beträgt, ist der Einbau einer konventionellen Lüftungsanlage, die 8760 Stunden im Jahr in Betrieb ist, unnötig. Bei einer natürlichen Abluftanlage in Schulen, leistet jeder Schüler einen Betrag zum Antrieb der Anlage. Jeder Klassenraum kann mit einem Schacht versehen werden. In diesem entsteht durch die Abwärme ein Auftrieb. Durch regelbare Öffnungen kann die Zufuhr von frischer Luft gesteuert werden. Dies kann in Abhängigkeit der CO₂-Konzentration im Raum, der Rauminnentemperatur und der Schülerpräsenz erfolgen. Ist diese Lüftung nicht ausreichend, kann ein kleiner Ventilator im Schacht angesteuert werden.

Die natürlichen Lüftungsanlagen aus dem Völkerkundemuseum, der Wiener Staatsoper und dem House of Commons sind im Grunde ähnlich aufgebaut und stellen hier die aufwendigste Form einer natürlichen Lüftung dar. In allen drei Beispielen wird die Luft von außen in einen Keller geführt und dort im Winter vorgewärmt. Dies ist auch in heutigen Gebäuden gut möglich, dabei ist auf Grund der Hygiene eine Führung der Luft in Leitungen von Vorteil. Die Einströmung über Quellauslässe wie in der Wiener Staatsoper oder dem House of Commons ist für den Nutzer angenehm, da Zegerscheinungen vermieden werden. Diese Form der Zuluft ist auch heute möglich, jedoch ist dabei die Abtrennung der einzelnen Bereiche erforderlich. Dadurch erhöht sich die erforderliche Druckdifferenz um die Funktionsweise der Lüftung nicht zu verringern. Die Einbringung der Luft wie im Völkerkundemuseum bietet den Vorteil, dass die Luft im Treppenhaus weiter erwärmt wird und die Räume weniger auskühlen. Es wird deutlich, dass die Zuluft bei diesen Systemen weniger das Problem darstellt. Der Antrieb der natürlichen Lüftung gestaltet sich in der heutigen Zeit als problematischer. Lockfeuer oder Coronarbrenner finden keine Anwendung mehr. In den Wintermonaten wird der Auftrieb im Schacht für eine Belüftung ausreichen, da auf Grund der hohen Temperaturdifferenz eine große Druckdifferenz entsteht. Im Sommer hingegen wird die Belüftung schwieriger, die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen ist geringer. Daher ist die Druckdifferenz und damit die Antriebskraft der Lüftung geringer. Hier kann jedoch auch wieder auf Ventilatoren zurückgegriffen werden, die mit einem Sensor ausgestattet sind und nur bei zu geringer Luftgeschwindigkeit die Lüftung unterstützen. Außerdem kann die Temperaturdifferenz erhöht werden in dem der Abluftschacht durch z.B. eine schwarze Schachtoberfläche solarthermisch erwärmt wird.

2.7. Natürliche Lüftung in der heutigen Zeit

Die Betrachtungen von Lüftungen aus der Vergangenheit zeigen, dass die heutigen Anforderungen an eine Lüftung mit Hilfe dieser Lösungen oft nur erfüllt werden könnten, wenn die heute geltenden Brand- und Schallschutzbestimmungen sowie solche zur Winddichtigkeit eines Gebäudes außer Acht gelassen werden. Die moderne natürliche Lüftung erfordert häufig den Einsatz zusätzlicher Technik damit die geltenden Anforderungen erfüllt werden. Die nachfolgenden Beispiele verdeutlichen die Nutzung der natürlichen Lüftung und deren Unterstützung mit einfacher Regelungstechnik in der Gegenwart.

2.7.1. Schloss Schönbrunn in Wien

Das Schloss Schönbrunn in Wien wurde Ende des 17. Jahrhunderts erbaut. Seit dem Ende der Kaiserzeit wird das Schloss als Ausstellungstätte für historische Kunstobjekte genutzt. An den Kunstobjekten und am Gebäude wurden zunehmend Schäden sichtbar. Um eine Erhaltung von beidem sicherzustellen wurden Sanierungsmaßnahmen in den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts eingeleitet.

Der Ansatz der Sanierung ist der Aufbau eines für die Kunstobjekte und das Gebäude schonenden Innenraumklimas. Aus Sanierungen anderer Schlösser und historischer Gebäude lernte man, dass der Einbau von Klimaanlage und konventioneller Haustechnik oft nicht zu optimalen Ergebnissen führt. Daraus lässt sich schließen, dass das Zusammenspiel von Haustechnik und Gebäude eine große Rolle spielt und nur eine ganzheitliche Betrachtung zu gewünschten Ergebnissen führen kann.

Bei der Erforschung der Ursachen für die Schädigungen, wurde zu Beginn der Sanierung die Frage geklärt, ob die große Anzahl an Besuchern, die täglich die Schauräume betreten, Einfluss auf das Rauminnenklima haben. Die durchgeführten Messungen ergaben jedoch, dass der Grund für die Schädigungen nicht auf den Besucherandrang zurückzuführen ist. Hingegen zeigten Messungen der Luftgeschwindigkeit im Gebäude, dass der durch geschlossene Fenster und Undichtigkeiten im Gebäude erzielte einfache Luftwechsel bei großen Windlasten oder offenen Fenstern stark anstieg. Durch diese unkontrollierte Lüftung wurde das Rauminnenklima erheblich gestört und eine Schädigung der Kunstobjekte hervorgerufen. Aus dieser Erkenntnis schloss man, dass die Stabilisierung des Rauminnenklimas eine Schädigungsprävention darstellte. Bei der Sanierung von Schloss Schönbrunn wurden für diese Stabilisierung zu Beginn Rahmenbedingungen definiert. Der Temperaturübergang von Sommer und Winter sollte gleitend stattfinden und die relative Feuchte sollte sich zwischen 40-60% bewegen. Außerdem sollte das Innenraumklima, gepuffert durch das

Gebäude, das Außenklima widerspiegeln. Des Weiteren sollten Raumtemperatur und relative Feuchte einen von der Außenluft abhängigen gepufferten Verlauf aufweisen (KÄFERHAUS, 2004).

Diese Ziele wurden mit Hilfe von geringer aber gezielt eingesetzter Haustechnik und ausgleichenden Bausubstanz realisiert. Dabei wurden der Einfluss des Außenklimas und die damit verbundenen jahreszeitlichen Schwankungen auf das Innenklima minimiert. Außerdem wurde eine Kurzzeitkonstanz von Temperatur und Feuchtigkeit im Gebäude angestrebt. Die Stärke der Gebäudehülle führt zu einer Trägheit und puffert dadurch starke Temperaturschwankungen ab. Die jahreszeitliche Temperaturveränderung im Gebäude verlaufen daher nach der Sanierung gleitend und wirkt sich positiv auf das Innenklima aus.

In unsaniertem Zustand ergibt sich die optimale Luftwechselrate von eins nur bei optimalen außenklimatischen Bedingungen, jedoch ist die Kontrolle der Luftwechsel der Schlüssel zur Stabilisierung des Rauminnenklimas. Um eine Regulierung der Lüftung zu erzielen ist der Einsatz einer kontrollierten, natürlichen Lüftung erforderlich. Damit diese optimal einreguliert werden kann, ist die Winddichtigkeit des Schlosses eine zwingende Anforderung. Diese wurde im Zuge der Sanierung durchgeführt.

Um die Auswirkungen der geplanten Sanierungsmaßnahmen zu überwachen, wurden im Vorfeld ausführliche Messungen, wie zum Beispiel zur Wandfeuchte und Luftgeschwindigkeit durchgeführt. Sie ergaben Wandfeuchten von zum Teil 10% und stark ändernde Luftgeschwindigkeiten, je nach Wind und Fensteröffnung.

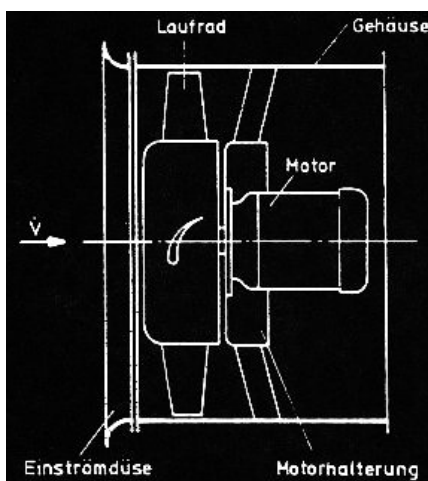


Abbildung 13: Axialventilator, Quelle: www.Klimapartner-berlin.de (12.03.2012).

Die örtlichen Gegebenheiten lieferten für den Einbau eines natürlichen Lüftungssystems gute Voraussetzungen, da die Räume beim Bau des Schlosses bereits mit Abluftkaminen versehen worden waren. Diese nutzt auch das neue Lüftungssystem als Abluftkamine, jedoch werden zur Regulierung Klappen und zugverstärkende Ventilatoren eingebaut. Bei zu großen Luftwechseln oder ungünstigen Witterungsverhältnissen schließen die Klappen und drosseln somit den Luftaustausch. Der natürliche Auftrieb versetzt das Laufrad, der waagrecht in den Schacht eingebauten Ventilatoren, in Autorotation. Dadurch wird die Luftmenge ermittelt. Ist

diese zu gering, wird dem Ventilator so viel Strom zugeführt, wie der Motor für einen Ausgleich benötigt, siehe Abbildung 13. Durch diese beiden Systeme wird das Abluftsystem kontrolliert und natürlich betrieben.

Da Undichtigkeiten am Schloss verringert wurden, muss die Zufuhr von Frischluft anders erfolgen, denn ohne Zuluft keine Abluft. Zu Beginn der Planung sollte ein neu gebauter Erdwärmetauscher die Frischluft temperieren, doch in der Planungsphase wurde ein historischer Abwassergang entdeckt und mit in das Lüftungssystem integriert. Die Frischluft gelangt über diesen unterirdischen 250 m langen Gang in das Gebäude und wird dort über die Treppenhäuser verteilt. Der Erdwärmetauscher kühlt und entfeuchtet im Sommer die Zuluft. Im Winter wird diese aufgewärmt und befeuchtet. Dadurch kann das Außenklima abgemildert und das Innenklima positiv beeinflusst werden. Durch die Abluft der einzelnen Räume entsteht im Gebäude eine Luftströmung, durch die die Zuluft verteilt wird. Sind zum Beispiel im Sommer die Bedingungen in der Atmosphäre günstiger als im Erdwärmetauscher oder ist die Witterungssituation ungünstig, wird ein kontrolliertes Lüftungsgeräte für die Frischluftzufuhr eingebunden. Durch die Unterstützung des vorhandenen natürlichen Lüftungssystems durch heutige Technik wird ein für die Ausstellungsstücke und das Gebäude günstiges Rauminnenklima geschaffen und diese nehmen keinen weiteren Schaden. (KÄFERHAUS, 2004).

2.7.2. Portcullis House in London

Das Portcullis House ist im Londoner Regierungsviertel als Parlamentsgebäude im Jahre 2001 errichtet worden. Es wurde für 210 Abgeordnete und deren Mitarbeiter entworfen. Architektonisch passt sich das Portcullis House seiner historischen Umgebung von Big Ben und dem House of Commons an. Bei der Planung des Gebäudes ist besonderes Augenmerk auf die natürliche Regulierung des Innenraumklimas gelegt worden.

Das Porcullis House ist sieben Stockwerke hoch. Die Front des Gebäudes mit dem Haupteingang

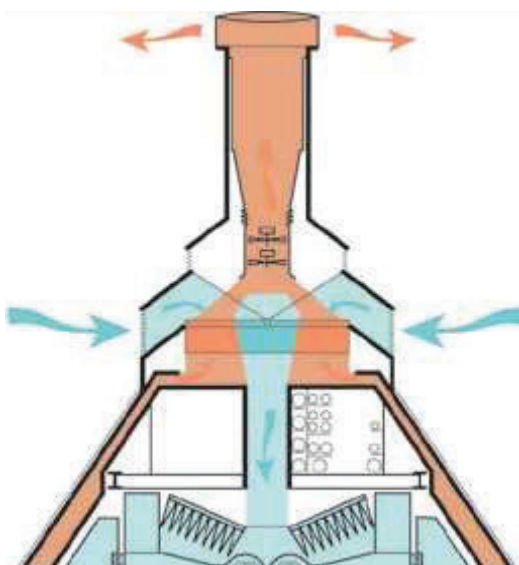


Abbildung 14: Rückgewinnungskamin, Quelle: urbanwindenergy.org.uk (12.03.2012).

ist 52,5 m und zur Bridge Street 75 m lang. Es ist um einen 1180 m² großen Innenhof gebaut, welcher mit einem Glasdach versehen und als Lese-raum eingerichtet ist. Im Keller des Gebäudes sind Serviceeinrichtungen angesiedelt. Über eine Unterführung ist das Gebäude mit dem Parlamentsgebäude, dem Ober- und Unterhaus, verbunden. Im Erdgeschoss befinden sich Gemeinschaftseinrichtungen für die Abgeordneten und die Öffentlichkeit. In den höheren Stockwerken sind verschiedene Büros und Konferenzräume für die Abgeordneten und deren Mitarbeiter angesiedelt.

Im Portcullis House ist eine besondere Form der natürlichen Lüftung im Einsatz. Die Abluft wird auf der, von der Straße abgewandten Seite angesogen. Durch den thermischen Auftrieb steigt die, durch Personen und elektrische Geräte, erwärmte Luft, in den Abluftschächten nach oben. Diese befinden sich zwischen den einzelnen Räumen an der Außenwand und enden in den Rückgewinnungskaminen, siehe Abbildung 14. Die Schächte haben einen Durchmesser von unten 5,0 m und oben 2,3 m. Die warme Abluft aus dem Gebäude und die kalte Frischluft strömen in dem Rückgewinnungskamin aneinander vorbei. Es findet ein Wärmeaustausch statt. Die erwärmte Zuluft gelangt durch die doppelten Decken des Gebäudes über Verdrängungsluft-Diffusoren in die Räume. Dabei wird die Strömung verlangsamt und es entsteht eine Druckdifferenz. Hierdurch wird die Luft in den Raum hineingedrückt und die vorhandene Luft verdrängt. Im Sommer werden die doppelten Decken als Kältespeicher genutzt. Die Wandung der Decken besteht aus einem Baustoff, welcher sich durch eine hohe Wärmekapazität auszeichnet. Die Nachtluft mit einer hohen Temperaturdifferenz zur Innenraumluft strömt Computer gesteuert in die doppelten Decken und kann bei steigender Rauminnentemperatur in die Räume einströmen. Steigt die Außentemperatur an und strömt diese Luft durch die doppelten Decken, kühlt sich diese an den Wandungen ab. Die Kühlung des Gebäudes erfolgt zum größtmöglichen Teil durch die Außenluft. Benötigtes Kühlwasser wird aus einer Tiefenbohrung unterhalb des Gebäudes gewonnen. Anschließend wird das Wasser als Brauchwasser verwendet. Dadurch wird der Frischwasserbedarf gesenkt.

Die Beheizung wird mit Hilfe von Strahlungsheizkörpern realisiert. Diese sind auf das Verdrängungslüftungskonzept abgestimmt. Um Energie zu sparen arbeitet das Heizungssystem mit niedrigen Vor- und Rücklauftemperaturen. Befeuert wird die Heizung durch Brennwertkessel. Um den Wirkungsgrad der Heizung weiter zu erhöhen wird der Rücklauf durch die Fußbodenheizung im Atrium und Empfangsbereich geleitet. Dadurch erfolgt eine weitere Abkühlung und hat zur Folge, dass der Wirkungsgrad des Brennwertkessels steigt. Neben den verwendeten Heiz- und Kühlvorgängen wird auch die thermische Masse des Gebäudes für den Temperatureausgleich verwendet. Die Trägheit hat zur Folge, dass im Sommer tagsüber die Wärme aufgenommen wird um nachts an die kühlere Luft abgegeben zu werden.

Die Beleuchtung des Gebäudes erfolgt ebenfalls energiesparend. Tageslicht wird mit Hilfe von externen Lichtplatten an die Geschossdecke reflektiert um damit eine natürliche Beleuchtung zu verbessern. Um eine Blendung zu Verhindern sind Jalousien in einem Hohlraum zwischen den einzelnen Glasscheiben angebracht. Diese Hohlräume werden mit Luft durchströmt. Im Winter wird die dort entstehende Wärme mit Hilfe von solarbetriebenen Lüftern zurückgewonnen und zur Erwärmung der Frischluft verwendet. Hingegen im Sommer hat die Durchströmung der Fens-

ter eine Kühlung dieser zur Folge. Dadurch verringert sich der Aufwand für die Raumkühlung (Fassade, 2002).

Durch die Art der Belüftung wird deutlich, dass bei der Planung auf Wissen über natürlichen Belüftung und Klimatisierung aus der Vergangenheit zurückgegriffen wurde und mit moderner Technik, die so wenig aufwendig wie möglich ist, kombiniert wurde. Durch diese Verknüpfung entsteht ein Energiebedarf, der im Vergleich zu einem Gebäude mit herkömmlicher Klimaanlage, von lediglich einem Drittel.

2.7.3. Manitoba Hydro Place in Winnipeg

Architektur und Technik des Manitoba Hydro Place in Winnipeg, Kanada stellen eine Verbindung verschiedener Komponenten der natürlichen Lüftung dar. Einige Bestandteile wie zum Beispiel der Solarkamin, das Geothermalsystem und die Quellauslässe finden sich in den unter Kapitel 2.6 beschriebenen historischen Lüftungssystemen wieder.

Winnipeg ist eine Stadt der Temperaturextreme, die im Jahr zwischen -35°C und $+35^{\circ}\text{C}$ schwankt. Durch diese große Temperaturdifferenz werden an die Gebäudetechnik hohe Anforderungen gestellt.

Der Neubau der Manitoba Hydro ist 21 Stockwerke hoch und hat eine Geschossfläche von 65.000 m^2 . Aufgebaut ist das Gebäude in Form eines großen „A“. Die Schenkel des „A“ bestehen aus zwei Türmen, die sich im Kopf zu einem 115 Meter hohen Solarkamin vereinen. Die Geschosse im Zwischenraum der Schenkeltürme sind mit drei Wintergärten, die jeweils über sechs Stockwerke gehen, versehen. In diesen befindet sich ein 23 m hoher Wasserfall, der je nach Jahreszeit der Be- bzw. Entfeuchtung dient.

Auf Grund des extremen Unterschiedes von Sommer und Winter ist die Lüftung in zwei Modi unterteilt. Im Sommermodus bei angenehmen Außentemperaturen strömt die Außenluft durch große, geöffnete Fenster direkt in das Gebäude. Dabei gelangt die Luft an den Wasserfällen vorbei und kühlt sich auf Grund der Verdunstungskälte ab. Dabei erfolgt die Verteilung der Luft über den doppelten Fussboden. Ist eine Kühlung der Luft auf Grund einer zu hohen Außentemperatur erforderlich, wird die Luft über die Tiefgarage in ein geothermales System geleitet, dort abgekühlt, um dann über die Decke in den Geschossen verteilt zu werden. Die aufgewärmte Abluft steigt im Solarkamin nach oben und wird an die Umgebung abgegeben. Dadurch entsteht ein Unterdruck im Gebäude und Außenluft strömt in das Geothermalsystem ein.

Im Wintermodus tritt die Luft direkt in das geothermale System ein um im Erdreich vorgewärmt zu werden. Der Eintritt der Luft in die Geschosse erfolgt über die Decke. Der Solarkamin ist im Wintermodus geschlossen um die warme Abluft nicht an die Umgebung abzugeben. Die Luft gelangt in die Tiefgarage um diese zu erwärmen. Dort wird die Wärme über einen Wärmetauscher rückgewonnen und den Wintergärten zugeführt. Eintretende Außenluft wird dadurch in den Wintergärten ebenfalls vorgewärmt. Die Luftströmungen in den verschiedenen Modi werden in Abbildung 15 verdeutlicht (xia, 2010).

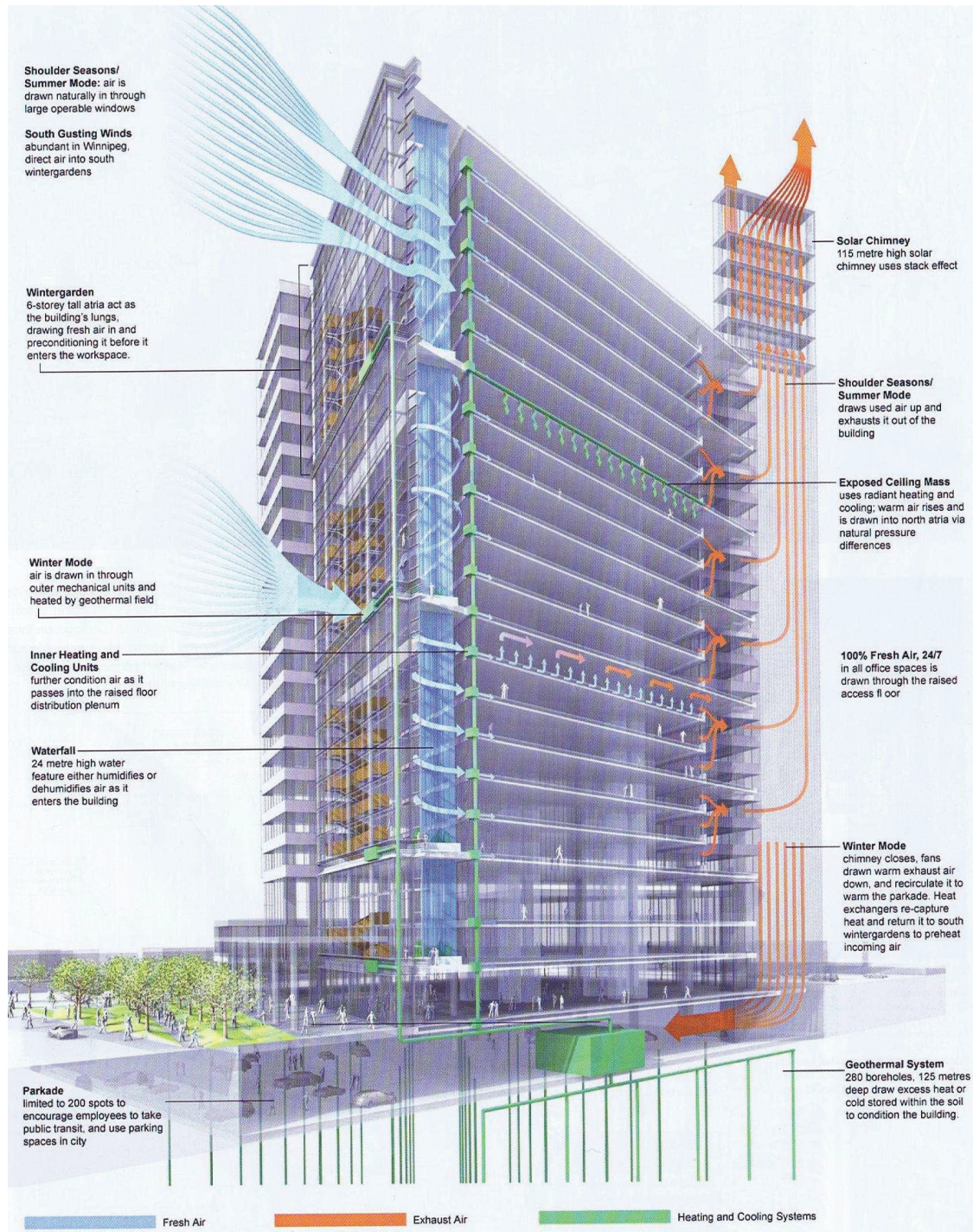


Abbildung 15: Strömungswege der Luft, Quelle: xia (10-12/10, S.31).

2.7.4. Grundlagen aus heutigen natürlichen Lüftungssystemen

Die betrachteten natürlichen Lüftungssysteme zeigen, dass durch eine Unterstützung mit heutiger Technik eine Lüftung von Gebäuden bei allen Umgebungsbedingungen sichergestellt werden kann. Aus den Beispielen lassen sich für weitere natürliche Lüftungssysteme Maßnahmen und bauliche Konsequenzen ziehen.

Alte Gebäude wie das Schloss Schönbrunn sind häufig mit einer natürlichen Lüftung über z.B. Schächte ausgestattet. Dadurch entsteht bei günstigen Witterungsbedingungen eine Druckdifferenz, die die Lüftung antreibt. Bei der Entwicklung eines neuen natürlichen Lüftungskonzeptes muss daher die Lüftung bei ungünstigen Witterungsbedingungen unterstützt werden. Im Fall des Schlosses Schönbrunn sorgen die Axialventilatoren bei geringer Druckdifferenz und dadurch folgenden geringen Auftriebes für die nötige Unterstützung. Dabei wird die Strömung lediglich so viel wie nötig beschleunigt. Um bei einer hohen Druckdifferenz einen zu großen Luftwechsel zu verhindern können den Schächten regulierbare Klappen eingebaut werden, sodass durch eine Schließung der Klappen die Strömungsgeschwindigkeit verringert wird.

Bei der Planung von Neubauten lassen sich die Erkenntnisse aus vergangenen Lüftungskonzepten auch in der baulichen Gestaltung berücksichtigen. In das Gebäude des Manitoba Hydro Place wurde ein Solarkamin für eine natürliche Lüftung integriert. Mit Hilfe eines Solarkamins kann der thermische Auftrieb verstärkt werden, sodass die natürliche Lüftung bei einer zu geringen Druckdifferenz unterstützt wird. Dabei wirkt sich eine schwarze Außengestaltung des Schachtes positiv auf die verstärkende Wirkung aus. Um das System der natürlichen Lüftung mit den regulierbaren Maßnahmen weiter zu unterstützen, ist die Winddichtigkeit des Gebäudes von großer Bedeutung. Unkontrollierte In- und Exfiltrationen beeinflussen die Lüftung ungünstig. Es kann dadurch zu einer Änderung der Temperatur- oder Druckdifferenz kommen, die sich negativ auf die natürliche Lüftung auswirkt. Dabei zählt ebenfalls die Öffnung der Fenster durch den Nutzer zu einer Störung des Systems. Ziel eines Lüftungskonzeptes ist es daher ein angenehmes Rauminnenklima zu schaffen damit der Nutzer nicht das Bedürfnis verspürt ein Fenster unkontrolliert zu öffnen. Es spielt auch die Erhöhung der Rauminnentemperatur durch Sonneneinstrahlung eine erhebliche Rolle. Daher ist bei der Entwicklung eines neuen Gebäudekonzeptes der sommerliche Wärmeschutz durch eine Eigenverschattung oder durch gesteuerte Jalousien erforderlich.

Um bei niedrigen Außentemperaturen, die sich im Gebäude befindende Wärme zu erhalten, wurde das Portcullis House mit Wärmerückgewinnungskaminen ausgestattet. Die warme Abluft strömt an der kalten Zuluft vorbei und es findet ein Wärmeaustausch statt. Der Antrieb der natürlichen Lüftung erfolgt dabei durch die entstehende Druckdifferenz. Damit die Einbringung der

Zuluft in die einzelnen Räume kontrolliert erfolgen kann, können als unterstützende Technik Diffusoren eingesetzt werden. Dadurch ist gewährleistet, dass die Luft auch in strömungstechnisch ungünstig gelegen Räume gelangt.

Die hier gezeigten unterstützenden Techniken der natürlichen Lüftung wie zugverstärkende Axialventilatoren, Solarkamine und Diffusoren verdeutlichen die Einfachheit und die gute Realisierbarkeit. Die natürliche Lüftung sollte daher so wenig wie möglich und so viel wie nötig durch heutige Technik unterstützt werden. Diese Devise ist bei allen Lüftungskonzepten zu berücksichtigen. Dadurch entsteht eine maximale Nutzung der natürlichen Antriebskräfte.

3. CFD Simulation von natürlichen Lüftungen

Nachfolgend wird die natürliche Lüftung an Hand einer beispielhaften Geometrie mit Hilfe von Strömungssimulationen mit dem Computerprogramm ANSYS CFD Release 13.0 untersucht. Die Simulation wird unter verschiedenen Randbedingungen durchgeführt. Die Betrachtungen sollen Aufschluss über die Funktionalität und die Auswirkungen veränderter Gegebenheiten auf die freie Lüftung geben.

3.1. Methode

3.1.1. Simulation mittels CFD

Die Computersimulation auf Grundlage der numerischen Strömungsberechnung (engl. Computational Fluid Dynamics (CFD)) stellt Strömungen von Fluiden dar. Unter Fluiden werden strömende Medien wie Gase oder Flüssigkeiten verstanden. Diese füllen den durchströmten Raum vollständig (Gas) oder teilweise (Flüssigkeit) aus. Strömungen werden außerdem in laminar und turbulent unterschieden. Die erst genannte ist regelmäßig und stabil gegen äußere Einwirkungen. Dagegen ist die zweit genannte unregelmäßig, stark vermischend und bildet Wirbel aus. Desweiteren werden stationäre und instationäre Strömungen differenziert. Diese unterscheiden sich in der Änderung des Massenstromes, welcher sich nur bei instationären Strömungen ändert. Bei stationären Strömungen bleibt er gleich (LAURIEN, 2011).

Die nachfolgenden Simulationen werden mit Hilfe des Computerprogramms ANSYS CFD Release 13.0 durchgeführt. Dieses ist in fünf Bereiche unterteilt:

- Geometrieerstellung
- Netzgenerierung
- Festlegung der Randbedingungen
- Lösung
- Auswertung.

Als Erstes wird mit Hilfe des Space Claim Direct Modellers die Geometrie als 3D-Modell erstellt. Dabei ist zu beachten, dass die Geometrie die Umschließung des Fluides ist, diese ist also ein Negativabdruck. Es wird die Luft in Interaktion mit den Oberflächen und der Geometrie betrachtet.

Im Anschluss daran wird die Geometrie im Meshing lückenlos in Kontrollvolumina aufgeteilt. Diese stellen das Rechengitter der Simulation dar. Hierbei gilt: Was den einen Kontrollraum verlässt geht in den nächsten hinein ("konservativ"). Die Berechnungen von Temperatur, Druck, Ge-

schwindigkeit etc. finden an den Kreuzungspunkten der Kontrollvolumina, den sogenannten Knoten statt. Die Qualität der Berechnungen ist abhängig von der Qualität des Netzes.

Nach der Netzgenerierung werden im CFX-Pre die Randbedingungen der Berechnungen festgelegt. Diese sind die Anfangsbedingungen und somit die Startwerte für die Lösung der Strömungsgleichungen. Wie oben erläutert wird zwischen stationären und instationären Strömungen differenziert. Der Unterschied besteht in der Abhängigkeit des Endergebnisses von den Startwerten. Bei ersteren ist das Endergebnis unabhängig von den Startwerten. Hingegen bei letzteren stellen die Anfangswerte die tatsächlichen Startwerte der Berechnung dar. Bei der Festlegung der Randbedingungen wird grundsätzlich zwischen Luftein- und Luftauslässen, sowie Öffnungen, Wänden und Symmetrieebenen unterschieden. An Ein- und Auslässen kann der Massenstrom, der statische oder totale Druck sowie die Geschwindigkeit festgelegt werden. Die stabileren Eingaben sind am Einlass der Massenstrom und die Geschwindigkeit, am Auslass der statische Druck. Am Einlass wird ebenfalls die eintretende Temperatur definiert. An Öffnungen wird lediglich der Druck und nicht die Richtung der Luft vorgegeben. Diese ergibt sich aus den Randbedingungen der Ein- bzw. Auslässe und kann je nach Parametrierung variieren. Jeder Teil der Geometrie, der weder Ein- noch Auslass noch Öffnung ist wird als Wand definiert. Diese kann als adiabat angenommen werden. Jedoch kann an der Wand auch ein- oder austretender Wärmestrom oder eine Temperatur definiert werden. Außerdem kann die Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden. Dadurch wird eine Berücksichtigung der Umgebungstemperatur ermöglicht. Ist eine Geometrie symmetrisch kann diese zur Beschleunigung der Berechnung mit Hilfe einer Symmetrieebene nur zur Hälfte dargestellt werden. Die Spiegelachse wird hierbei als Symmetrieebene definiert.

Nach der Festlegung der Randbedingungen erfolgt die eigentliche Berechnung durch den CFX-Solver Manager. Im Anschluss können die Berechnungsergebnisse mit Hilfe von CFD Post visualisiert und ausgewertet werden. Auf Grund der Vielzahl von Daten bestehen verschiedenste Möglichkeiten der Visualisierung. Es kann die Temperaturverteilung oder auch die Geschwindigkeit auf den Oberflächen der Geometrie oder zuvor definierten Ebenen im Raum dargestellt werden. Die Parameter können neben der Darstellung auf einer Fläche auch als Vektor oder Stromlinie visualisiert werden. Dabei gibt die Länge der Vektoren Aufschluss über die Geschwindigkeit, bei einer Darstellung durch Stromlinien wird die Geschwindigkeit durch die Farbskalierung beschrieben.

Bei einer CFD-Simulation handelt es sich um ein iteratives Verfahren zur Lösung der Strömungsgleichungen. Auf Grund dieser Tatsache treten bei jeder Simulation relative Fehler auf. Dabei ist vom Nutzer abzuwägen, wann die Abweichung des Ergebnisses vom wahren Wert gering genug und die Genauigkeit ausreichend ist um eine Aussage über die betrachtete Problematik zu treffen.

Die Vielfalt der Simulation stellt hohe Anforderungen an den Anwender. Es werden Modelle ausgewählt und Vorgaben gemacht, die Grundlagen für die Berechnung sind. Ist die Auswahl nicht korrekt, wirken diese sich ungünstig auf die Berechnung aus. Außerdem ist die Berechnung ebenfalls mit Ungenauigkeiten behaftet, da diese immer nur eine Modellierung der Realität ist. Eine Geometrie wird nicht eins zu eins abgebildet. Desweiteren beinhaltet die Diskretisierung der Erhaltungsgleichungen und die Lösung der Gleichungen eine Abweichung vom wahren Wert, die aus Vereinfachungen und Modellen entstehen. Zusätzlich ergeben sich Berechnungsungenauigkeiten auf Grund der Tatsache, dass kein unendlich feines Netz verwendet wird.

Die numerische Strömungsberechnung liefert eine gute Darstellung der Strömung von Fluiden. Durch die Verfügbarkeit der unterschiedlichen Berechnungsmodelle und der Möglichkeit Varianten einer Simulation zu erstellen, sind dem Anwender verschiedenste Betrachtungsweisen einer Problematik möglich.

3.1.2. Grundgleichungen der Strömungsmechanik

Die Strömungsberechnung mit Hilfe eines CFD Programms beruht auf der Lösung der fünf Erhaltungsgleichungen. Diese bedeuten, dass die physikalischen Größen wie Impuls in x-,y- und z-Richtung Energie und Masse erhalten bleiben.

Die Erhaltungsgleichungen lassen sich sowohl in Integralform also auch in Differentialform darstellen. Der Unterschied dieser Formen besteht in den Kontrollvolumina. Bei der Differentialform ist die Beschreibung der Strömung an ein bewegtes Fluidelement gebunden. Das Kontrollvolumen ist infinitesimal klein. Es wird nicht durchströmt sondern bewegt sich mit dem Fluid. Die Diskretisierung dieser Methode erfolgt als Finites-Differenz-Verfahren. Nachteilig ist bei dieser Betrachtung die geringe physikalische Anschaulichkeit. Lediglich für die Betrachtung von Partikelbewegungen bietet sich diese Methode an. Hingegen ist bei der Integralform das Kontrollvolumen ortsfest und die Variablen an einen festen Punkt im Raum gebunden. Die Diskretisierung dieser Methode erfolgt als Finite-Volumen-Methode (LECHELER, 2011). Dabei wird ermittelt wie viel in ein Kontrollvolumen hinein und wieder heraus transportiert wird, dies erfolgt über die Umwandlung der Differentialgleichungen in Flussbilanzen durch die Integration der strömungsmechanischen Grundgleichung an den Integrationspunkten über ein Kontrollvolumen.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot w) = 0 \quad (3.1.2.3)$$

In Integralform:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \cdot dV + \iint_S \rho \cdot \vec{u} \cdot dS = 0 \quad (3.1.2.4)$$

Aus diesen Erhaltungsgleichungen wurde in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts unabhängig voneinander von Claude Louis Marie Henri Navier (1785-1836) und George Gabriel Stokes (1819-1903) die Navier-Stokes-Gleichung, welche die Strömung eines Fluides vollständig beschreibt, entwickelt. Auf Grund der Vielzahl an Variablen in den Erhaltungsgleichungen werden zur Lösung dieser weitere Gleichungen wie zum Beispiel die thermische Zustandsgleichung benötigt. Der Umfang der daraus resultierenden Gleichung und der Beschreibung jeder kleinen Turbulenz verursacht lange Rechenzeiten, daher wird heute die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichung verwendet. Diese berechnet im Vergleich zur vollständigen Gleichung Turbulenzen nicht direkt sondern über Turbulenzmodelle, dabei wird die Turbulenz nicht von dem Rechenetz aufgelöst. Daraus ergibt sich eine kürzere Rechenzeit. (LECHELER, 2011)

3.1.3. Netzgenerierung

Die Lösung der strömungsmechanischen Erhaltungsgleichungen kann lediglich an definierten Punkten erfolgen. Um diese Berechnungspunkte festzulegen wird ein Rechenetz benötigt, welches die Geometrie ausfüllt. An den Gitterpunkten dieses Netzes erfolgt die Berechnung, daher gilt je mehr Gitterpunkte, also je feiner das Netz, desto besser konvergiert das Ergebnis und desto

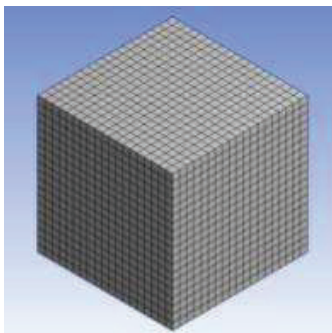


Abbildung 18: Blockstrukturiertes Netz, Quelle: eigene Darstellung.

genauer ist dieses. Da jedoch ein feines Netz eine lange Berechnungszeit bedeutet, muss das Netz so grob wie nötig aber so fein wie möglich sein. Die Gitterpunkte werden grundsätzlich so angeordnet, dass Fehler in der Lösung durch eine Netzverfeinerung und eine gute Grenzschichtauflösung minimal gehalten werden.

Die Rechenetze lassen sich in verschiedene Untergruppen einteilen. Das blockstrukturierte Netz zeichnet sich durch eine hohe Qualität sowie eine effiziente Speicherausnutzung aus (Siehe Abbildung 18). Es besteht aus Hexaedern, jedoch lassen sich komplexe Geometrien hiermit nicht realisieren (LECHELER, 2011).

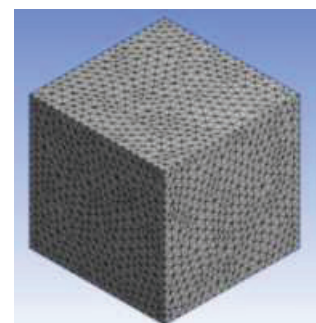


Abbildung 19: Unstrukturiertes Netz, Quelle: eigene Darstellung.

Außerdem gibt es das unstrukturierte Netz (siehe Abbildung 19), das für komplexere Geometrien geeignet ist, die Kontrollvolumen bestehen hier aus Pyramiden, Tetraedern sowie Prismen. Nachteilig bei den unstrukturierten Netzen ist, dass die Grenzschichtauflösung schlechter und die Anzahl der benötigten Knoten sehr hoch ist (LECHELER,2011).

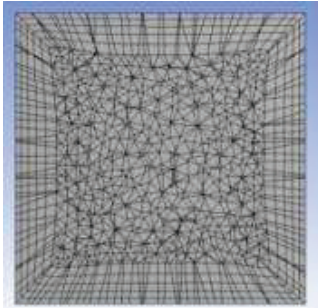


Abbildung 20: Prismschicht,
Quelle: eigene Darstellung.

Die Geschwindigkeit ist an tatsächlichen Begrenzungen $v=0$, daraus ergibt sich ein Geschwindigkeitsverlauf in der Grenzschicht. Für die Betrachtung der Strömungen ist besonders diese Grenzschicht für die Darstellung von Kräften und Ablösungen von Bedeutung. Um diese genauer berechnen zu können, werden alle tatsächlichen

Wandungen mit einer sogenannten Prismschicht, welche eine Netzverdichtung ist, belegt (siehe Abbildung 20). Bei der Einführung einer Prismschicht wird die maximale Anzahl der Schichten sowie deren Wachstumsrate parametrisiert. Durch diese kann auch Einfluss auf die Netzqualität genommen werden.

Bei der Netzgenerierung sollten die Gitterpunkte so regelmäßig wie möglich angeordnet sein, außerdem sollten diese entlang der Stromlinien verlaufen, sodass die Eintrittsfläche der einzelnen Kontrollvolumen senkrecht zu diesen steht. Beides ist in der Regel bei komplexen Geometrien nicht möglich. Die Qualität eines Netzes und damit die Qualität der Berechnung wird durch die Wachstumsrate der benachbarten Elemente, das Seitenverhältnis des Elementes und die Abweichung der Elementwinkel vom rechten Winkel beschrieben. Es gilt, je näher am rechten Winkel desto besser (HERFORT, 2010).

3.1.4. Berechnungsgrundlagen

Die Lösung der Strömungsgleichungen erfordert die Festlegung von Randbedingungen, diese werden nach dem Ziel der Simulation festgelegt. Es stehen verschiedene Modelle für die Berechnung von zum Beispiel Turbulenzen, Strahlung oder auch Mehrphasenströmungen zur Verfügung. Zu Beginn der Festlegung wird zwischen Fluiden und Feststoffen unterschieden. Außerdem wird ein Material bestimmt. Zusätzlich können die Richtung der Schwerkraft, ein Referenzdruck und ein Wärmeübergang definiert werden. Nachfolgend werden die Grundlagen der Turbulenzmodellierung und der Wärmestrahlung beschrieben.

3.1.4.1. Turbulenzmodellierung

Strömungen werden zwischen laminar und turbulent unterschieden. Erstere sind regelmäßig und stabil. Letztere sind stark vermischend, unregelmäßig und bilden Wirbel aus. Dies hat zur Folge,

dass der Hauptströmung Energie entzogen wird und dadurch kinetische Energie vernichtet wird. Zusätzlich ist bei turbulenten Strömungen die Wärmeübertragung ausgeprägter als bei laminaren Strömungen (HERFORT, 2010).

Je nach Art der erwarteten Strömungen wird eines der nachfolgenden Modelle ausgewählt.

3.1.4.1.1. k-ε-Modell

Bei der Betrachtung des Transportes von Turbulenzen wird davon ausgegangen, dass die Turbulenz an einem Ort entsteht, weitertransportiert wird und an einem anderen Ort durch Reibung zerstört wird. Dieser Prozess wird mit Hilfe des k-ε-Modells, bei dem es sich um ein Zweigleichungsmodell handelt, berechnet. Das k-ε-Modell zählt zu den Wirbelviskositätsmodellen und beinhaltet die Parameter turbulente kinetische Energie k und Dissipationsrate ε . Die Turbulenzen werden durch Transportgleichungen modelliert, es wird zwischen dem Transport mit der Strömung (Konvektion) und dem Transport durch Vermischung (Diffusion) unterschieden. Es wird angenommen, dass die Turbulenz richtungsunabhängig also isentrop ist. Daraus folgt, dass die turbulenten Schwankungen in die drei Koordinatenrichtungen gleich sind. Die Wirbelviskosität μ_T wird über die turbulente kinetische Energie k und die Dissipationsrate ε definiert. Zusätzlich wird die Dichte ρ und die empirische Konstante $c_\mu=0,09$ mit in die Berechnung einbezogen (LAURIEN, 2011).

$$\mu_T = \rho \cdot c_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (3.1.4.1)$$

Durch die kinetische Energie k wird eine Aussage über die Stärke der Turbulenz gegeben. Dabei gilt nach der Turbulenztheorie, dass in großen Wirbeln die Energie enthalten ist. Diese sind jedoch instabil und zerfallen zu kleineren Wirbeln. Je kleiner die Wirbel desto größer ist die Reibung. Dadurch steigt die Dissipationsrate ε . Sowohl die kinetische Energie k also auch die Dissipationsrate ε werden aus unabhängigen Transportgleichungen hergeleitet. Bei der Herleitung der kinetischen Energie k wird von der Impulsgleichung ausgegangen (LAURIEN, 2011).

$$\underbrace{\rho \frac{\partial K}{\partial t}}_{\text{Konvektion}} + \underbrace{\rho \bar{u}_j \frac{\partial K}{\partial x_j}}_{\text{Produktion}} = \underbrace{\mu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)}_{\text{Diffusion}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial K}{\partial x_j} + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial K}{\partial x_j} \right]}_{\text{Dissipation}} - \rho \cdot \varepsilon$$

Abbildung 21: Modellierte k-Gleichung, Quelle: Laurien (2011, S.178).

Dabei beschreibt der erste Term auf der linken Seite die zeitliche Änderung der kinetischen Energie K und der zweite den konvektiven Transport dar. Auf der rechten Seite steht der Produktions-

term gefolgt von dem Diffusionsterm mit den beiden Anteilen molekulare Diffusion und der modellierte turbulente Diffusion. Der letzte Term ist die Dissipation pro Volumen(LAURIEN, 2011).

Die Gleichung für die Dissipationsrate ε wird wie die Gleichung der kinetischen Energie k modelliert.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{\rho} \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{K} \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} - \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{\varepsilon 2} \cdot \rho \cdot \frac{\varepsilon^2}{K} \quad (1)$$

Konvektion
Produktion
Diffusion
Dissipation

Abbildung 22: Modellierter ε Gleichung, Quelle: Laurien (2011, S. 178).

Der erste Term auf der linken Seite beschreibt die Änderung von ε mit der Zeit, der zweite die Konvektion von ε . Auf der rechten Seite folgen der Produktionsterm, der Diffusionsterm wieder mit den beiden Anteilen der molekularen Diffusion und die modellierte Diffusion von ε . Abschließend dann der Dissipationsterm von ε (LAURIEN, 2011).

Bei angemessener Rechenzeit bietet das k - ε -Modell ausreichend genaue Ergebnisse. Jedoch treten durch Annahmen Ungenauigkeiten insbesondere bei Grenzschichtbetrachtungen auf. Um diese genauer zu betrachten und somit die Ungenauigkeiten zu reduzieren bietet sich das k - ω -Modell an. Dabei wird eine spezifische Dissipation ω mit $\omega = K/\varepsilon$ eingeführt. Diese beschreibt die Grenzschichten ausreichend genau. Jedoch entstehen im Übergang von Grenzschicht zu Freistrombereich Ungenauigkeiten und daher kann diese nicht ausreichend genau abgebildet werden (HERFORT, 2010).

3.1.4.1.2. Shear Stress Transport (SST)

Das Shear-Stress Transport Modell kurz SST verbindet die Genauigkeit des k - ε -Modells in den Freistrombereichen und die Genauigkeit des k - ω -Modells in Grenzschichten. Es werden in wandnahen Bereichen das k - ω -Modell verwendet und in wandfernen das k - ε -Modell. Jedoch ist in wandnahen Bereichen eine Netzverfeinerung für eine bessere Auflösung erforderlich. Außerdem können auf Grund der Kombination der beiden Modelle Ablösungen an Grenzschichten dargestellt werden (HERFORT, 2010).

3.1.4.2. Wärmestrahlung nach dem Monte Carlo Modell

Elektromagnetische Strahlung ändert mit der Frequenz seine Eigenschaften und wird daher in verschiedene Wellenlängenbereiche wie zum Beispiel ultraviolette Strahlung unterteilt. Als Wär-

mestralung wird die Strahlung im Wellenlängenbereich von 0,8-800 μm bezeichnet (RECKNAGEL, SPRENGER, SCHRAMEK, 2009).

Feste Körper, Flüssigkeiten und einige Gase emittieren und absorbieren die Wärmestrahlung, dadurch erfolgt ein Transport der Wärme von einem Körper zum anderen. Die Ausbreitung der Wärmestrahlung ist nicht an ein Übertragungsmedium gebunden. Außerdem ist der Wärmestrom, der durch Strahlung übertragen wird, proportional zu einer Differenz von Temperaturen vierter Potenz.

$$q \propto \Delta T^4 \quad (3.1.4.2)$$

Der Transport der Strahlung wird unter Berücksichtigung der Strahlungsintensität betrachtet. Diese ist als die übertragene Strahlungsenergie pro Fläche, Wellenlänge und Raumwinkel definiert. Die Strahlungsintensität entlang einer Richtung wird durch die Emission, die Absorption, die Streuung und die Einstreuung beschrieben. Aus der Summe dieser Parameter ergibt sich die Änderung der Strahlungsintensität, welche mit Hilfe der nachfolgenden Strahlungstransportgleichung beschrieben wird (BRUNN, 2010).

$$\frac{dI_\lambda}{ds} = \vec{s} \cdot \nabla I_\lambda = \underbrace{\kappa_\lambda I_{b,\lambda}}_{\text{Emission}} - \underbrace{\kappa_\lambda I_\lambda}_{\text{Absorption}} - \underbrace{\sigma_{\lambda,s} I_\lambda}_{\text{Streuung}} + \underbrace{\frac{\sigma_{\lambda,s}}{4\pi} \int_{4\pi} I_\lambda(\vec{s}_i) \Phi_\lambda(\vec{s}_i, \vec{s}) d\Omega_i}_{\text{Einstreuung}}$$

Abbildung 23: Strahlungstransportgleichung, Quelle Brunn (2010, S.29).

„Die Monte Carlo Methode zum Lösen der Strahlungstransportgleichung basiert auf der Annahme, dass sich die Strahlungsenergie in Form einer großen Anzahl einzelner Energiebündel im Raum in zufällig ermittelten Raumrichtungen und bei zufällig ermittelter Wellenlänge ausbreitet.“ Brunn (2010, S. 48).

Aus dem lokalen thermodynamischen Zustand und der Strahlungseigenschaft wird für jedes Energiebündel der Energieinhalt ermittelt. Die von der Oberfläche emittierte Strahlungsleistung des Energiebündels wird wie folgt berechnet.

$$\Delta E_i = n^2 \varepsilon_i \sigma T_i^4 \frac{A_i}{N_{A,i}} \quad (3.1.4.3)$$

Bedeutung: Die von der Oberfläche emittierte Strahlungsleistung E_i wird aus dem Brechungsindex n , der Emissivität ε_i , der Stefan-Boltzman Konstanten σ , der Temperatur T_i , der Fläche A_i und der Gesamtzahl der Energiebündel ermittelt.

Ebenfalls lässt sich der Energiegehalt der volumetrisch emittierten Energiebündel unter Berücksichtigung des Brechungsindex n , der Stefan-Boltzman Konstanten σ , der Temperatur T_i , dem Volumen V_i , dem Absorptionskoeffizienten k_i und der Gesamtzahl der der Energiebündel nach folgender Formel berechnen.

$$\Delta E_i = 4n^2 k_i \sigma T_i^4 \frac{V_i}{N_{V,i}} \quad (3.1.4.4)$$

Aus beiden Gleichungen lässt sich die Anzahl der Energiebündel berechnen. In warmen Bereichen ist auf Grund der hohen Konzentration von CO₂ und H₂O die Anzahl der Energiebündel größer als in kälteren Bereichen. Die Berechnung der emittierten Strahlung wäre auch über diese Konzentration möglich, jedoch werden dabei die Strahlungseigenschaften und die Temperatur nicht berücksichtigt (BRUNN, 2010).

3.1.5. Diskretisierung der Erhaltungsgleichungen

„Die Überführung der kontinuierlichen Beschreibung mittels der zugrundeliegenden Differentialgleichungen in eine diskontinuierliche (oder diskrete) Beschreibung, welche mit einem Digitalrechner behandelbar ist, bezeichnet man als Diskretisierung“ LAURIEN (2011, S. 59).

Die Erhaltungsgleichungen für Masse, Energie und Impuls sind als vorliegendes Differentialgleichungssystem nicht lösbar. Die Lösung kann nur numerisch durch die Überführung der Differentiale in endliche Differenzen erfolgen. Diese Differenzgleichungen können auf einem generierten Netz gelöst werden. Es wird zwischen der räumlichen und der zeitlichen Diskretisierung unterschieden.

Bei der räumlichen Diskretisierung der 1. Ableitung werden die Differentiale $\frac{\partial}{\partial x}$ in finite Differenzen $\frac{\Delta}{\Delta x}$ umgewandelt. Bei der Bildung der räumlichen Ableitung bestehen drei Möglichkeiten. Erstens die Vorwärtsdifferenz, zweitens die Rückwärtsdifferenz und drittens die zentrale räumliche Differenz.

- die Vorwärtsdifferenz $\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_{i,j} \approx \frac{U_{i+1,j} - U_{i,j}}{x_{i+1,j} - x_{i,j}} = \frac{U_{i+1,j} - U_{i,j}}{\Delta x}$
- die Rückwärtsdifferenz $\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_{i,j} \approx \frac{U_{i,j} - U_{i-1,j}}{x_{i,j} - x_{i-1,j}} = \frac{U_{i,j} - U_{i-1,j}}{\Delta x}$
- die zentrale Differenz $\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_{i,j} \approx \frac{U_{i+1,j} - U_{i-1,j}}{x_{i+1,j} - x_{i-1,j}} = \frac{U_{i+1,j} - U_{i-1,j}}{2\Delta x}$

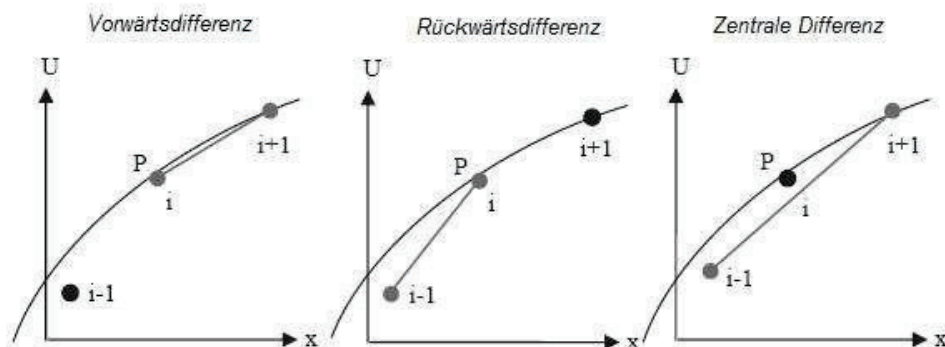


Abbildung 24: Vergleich der verschiedenen Differenzen, Quelle: Lecheler (2011, S. 42).

Der Unterschied der drei Differenzen wird erst deutlich, wenn der sogenannte Abbruchfehler eingeführt wird. Dieser besagt mit welcher Größenordnung die Differenz das Differential annähert. Für diese Einführung wird eine Taylor-Reihen-Entwicklung durchgeführt und ergibt für die erste Ableitung folgende Gleichung. Sie besteht aus der finiten Differenz und dem Abbruchfehler. Dieser besteht aus den Termen höherer Ordnung und wird vernachlässigt.

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_{i,j} = \underbrace{\frac{U_{i+1,j} - U_{i,j}}{\Delta x}}_{\text{Finite Differenz}} - \underbrace{\frac{(\Delta x)}{2} \cdot \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right)_{i,j} - \frac{(\Delta x)^2}{6} \cdot \left(\frac{\partial^3 U}{\partial x^3}\right)_{i,j} - \dots}_{\text{Abbruchfehler}}$$

Abbildung 25: 1. Ableitung der Taylor-Reihe, Quelle: Lecheler (2011, S.43).

Die Genauigkeit der Differenz wird über den größten Term des Abbruchfehlers definiert. Das heißt, kommt im Abbruchfehler ein Term erster Potenz vor, wird von einem Abbruchfehler 1. Ordnung gesprochen und damit einer Diskretisierung von 1. Ordnung Genauigkeit. Die Vorwärtsdifferenz 1. Ordnung ergibt sich aus der Taylor-Reihe mit dem Abbruchfehler wie folgt:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{U_{i+1,j} - U_{i,j}}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (3.1.5.1)$$

Analog dazu ergibt sich für die Rückwärtsdifferenz 1. Ordnung

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{U_{i,j} - U_{i-1,j}}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (3.1.5.2)$$

Dies zeigt, dass die beiden Differenzen nur 1. Ordnung genau sind. Diese Genauigkeit reicht jedoch für eine Lösung nicht aus. Eine Genauigkeit 2. Ordnung kann bei der Vorwärts- und der Rückwärtsdifferenz erreicht werden indem ein dritter Punkt in die Gleichung mit einbezogen wird.

Die zentrale Differenz hingegen ist bereits bei der Einbeziehung von zwei Punkten mit 2. Ordnung genau. Da der erste Term des Abbruchfehlers zweiter Potenz ist. Die zentrale Differenz ergibt sich nach der partiellen Ableitung wie folgt

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{U_{i+1,j} - U_{i-1,j}}{2 \cdot \Delta x} + O(\Delta x)^2 \quad (3.1.5.3)$$

Neben der räumlichen Diskretisierung der 1. Ableitung gibt es in den Impulserhaltungsgleichungen und der Energieerhaltungsgleichung auch 2. Ableitungen. Die finiten Differenzen der 2. Ableitung werden ebenfalls aus einer Taylor-Reihe entwickelt. Für die 2. Ableitungen in x-Richtung ergibt sich

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right)_{i,j} = \frac{U_{i+1,j} - 2 \cdot U_{i,j} + U_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} + O(\Delta x)^2 \quad (3.1.5.4)$$

Analog dazu ergibt sich in y-Richtung

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}\right)_{i,j} = \frac{U_{i,j+1} - 2 \cdot U_{i,j} + U_{i,j-1}}{(\Delta y)^2} + O(\Delta y)^2 \quad (3.1.5.5)$$

Und für gemischte 2. Ableitungen

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x \cdot \partial y}\right)_{i,j} = \frac{U_{i+1,j+1} - U_{i+1,j-1} + U_{i-1,j+1} - U_{i-1,j-1}}{4 \cdot \Delta x \cdot \Delta y} + O[(\Delta x)^2, (\Delta y)^2] \quad (3.1.5.6)$$

In CFD-Programmen ist die Genauigkeit zweiter Ordnung standard. Daher werden für 1. Ableitungen zentrale räumliche Differenzen verwendet. Jedoch wird dabei von einem stetigen Verlauf der Strömungsgrößen ausgegangen, dies führt aber zu einem Fehler (LECHELER, 2011).

Neben der räumlichen Diskretisierung besteht die Möglichkeit einer zeitlichen Diskretisierung. Diese erfolgt ähnlich. Dabei werden die drei unterschiedliche Zeitebenen n-1, n und n+1 untersucht. Wobei n+1 gesucht ist und alle vorangegangenen Lösungen zu den Zeitpunkten n, n-1, n-2 usw. bekannt sind.

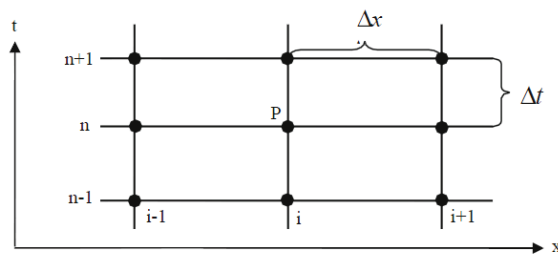


Abbildung 26: Ebenen der zeitlichen Diskretisierung, Quelle: Lecheler (2011, S. 40).

Es werden wie bei der räumlichen Differenz eine Vorwärtsdifferenz und eine zentrale Differenz gebildet, jedoch ist eine Rückwärtsdifferenz nicht möglich, da die Lösung zum Zeitpunkt $n+1$ unbekannt ist. Für die zeitliche Vorwärtsdifferenz 1. Ordnung ergibt sich

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_i^n = \frac{U_i^{n+1} - U_i^n}{\Delta t} + O(\Delta t) \quad (3.1.5.7)$$

Für die zeitliche zentrale Differenz 2. Ordnung

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_i^n = \frac{U_i^{n+1} - U_i^n}{2 \cdot \Delta t} + O(\Delta t)^2 \quad (3.1.5.8)$$

Die Verwendung dieser beiden Gleichungen hängt davon ab ob die zeitliche Genauigkeit von Bedeutung ist. Es wird zwischen stationären und instationären Lösungen unterschieden. Bei ersterer wird die zeitliche Vorwärtsdifferenz und für die zweite die zeitliche zentrale Differenz angewandt. Bei stationären Lösungen könnte die zeitliche Ableitung der Erhaltungsgleichungen vernachlässigt werden, da lediglich die räumliche Ableitung ausreicht. Jedoch tritt bei Über- und Unterschallströmungen ein Abweichung vom wahren Wert auf, da die Differentialgleichung den Typ zwischen elliptisch und hyperbolisch wechselt. Daher werden auch bei stationären Lösungen die instationären Erhaltungsgleichungen gelöst. Die Erhaltungsgleichungen können dann mit nur einem Lösungssystem gelöst werden, welches hyperbolisch bleibt. Von der zum Zeitpunkt $n=0$ ungenauen Anfangslösung wird eine neue Lösung zum nächsten Zeitintervall $n+1$ berechnet. Diese Berechnung erfolgt bis zu einer Lösung die sich in zwei aufeinanderfolgenden Zeitschritten nicht mehr verändern, dann gilt die Lösung als auskonvergiert. Die einzelnen Zwischenlösungen sind bei einer stationären Lösung nicht von Bedeutung und der Zeitschritt Δt kann so groß gewählt werden, dass die Lösung zügig konvergiert.

Instationäre Lösungen werden auf Grund der geforderten zeitlichen Genauigkeit mit einer zeitlich zentralen Differenz berechnet. Der Zeitschritt Δt wird an das physikalische Problem angepasst. Durch die geforderte Genauigkeit 2. Ordnung und der Speicherung der Lösungen zu jedem Zeitpunkt entsteht eine längere Rechenzeit als bei stationären Lösungen (LECHELER, 2011).

3.1.6. Lösungsverfahren

Die Lösung der Erhaltungsgleichungen kann mit drei unterschiedlichen Lösungsverfahren erfolgen. Erstens das zentrale Verfahren, zweitens das Upwind-Verfahren und drittens das High-Resolution-Verfahren. Diese drei verschiedenen Verfahren unterscheiden sich in der Stabilität und der Genauigkeit der Berechnung.

3.1.6.1. Zentrale Verfahren

Dem zentralen Verfahren liegt eine zentrale Diskretisierung der räumlichen Ableitung zu Grunde. Bei diesem Verfahren treten oftmals Konvergenzprobleme auf, jedoch zeichnet sich das Verfahren durch eine Genauigkeit 2. Ordnung aus. Bei der zentral, räumlichen Diskretisierung werden die Netzpunkte aus allen Raumrichtungen mit einander verknüpft ohne die Ausbreitungsrichtung zu berücksichtigen. Es wird die Annahme getroffen, dass die Strömungsgrößen stetig sind und mit Hilfe einer Taylor-Reihe approximiert werden. Für Verdichtungsstöße gilt dies jedoch nicht mehr. Es führt dazu, dass die Berechnung instabil wird und das System zu oszillieren beginnt.

Für die Stabilisierung der Lösung des zentralen Verfahrens kann eine numerische Viskosität hinzugefügt werden. Diese wird auf Grund der Verfälschung des Ergebnisses nur so groß wie nötig gewählt. Somit wird das Oszillieren verhindert und die Lösung konvergiert (LECHELER, 2011).

3.1.6.2. Upwind-Verfahren

Das Upwind-Verfahren wurde von Richard Courant, E. Isaacson und M. Reeves entwickelt. Dabei entfällt die Addition der numerischen Viskosität. Die Ausbreitungsrichtung der Strömungen wird bereits in der Diskretisierung berücksichtigt. Das Upwind-Verfahren enthält eine Dämpfung und die Addition dieser entfällt wie beim zentralen Verfahren. Diese Dämpfung wird größer je stärker die Stöße werden. Dies hat zur Folge, dass das Upwind-Verfahren stabiler als das zentrale Verfahren ist. Mit Hilfe der Monotonie des Systems wird das Problem des Oszillierens verhindert. Dies bedeutet, dass keine unphysikalischen Diskontinuitäten erzeugt werden. Da das Upwind-Verfahren lediglich eine Vorwärts- und Rückwärtsdifferenz hat, hat die Lösung nur eine Genauigkeit 1. Ordnung und erfüllt damit in der Regel die Anforderungen an eine Lösung nicht (LECHELER, 2011).

3.1.6.3. High-Resolution-Verfahren

Die Vorteile des zentralen Verfahrens und des Upwind-Verfahrens werden im High-Resolution-Verfahren vereint. Dieses zeichnet sich durch die Genauigkeit des zentralen Verfahrens und der Robustheit des Upwind-Verfahrens aus.

Die Grundlage des High-Resolution-Verfahrens ist ein monotones Upwind-Verfahren mit einer Genauigkeit 1. Ordnung. Die Monotonie wird lediglich von Verfahren 1. Ordnung erfüllt. Eine Genauigkeit 2. Ordnung kann durch eine lineare Verteilung innerhalb der Zelle erfolgen, jedoch neigen diese Verfahren ebenfalls zum Oszillieren. Um dies zu verhindern können zwei Bedingungen anstatt der Monotonie festgelegt werden. Zum einen die TVD-Bedingung. Diese besagt, dass bei einer zeitlichen Iteration die totale Variation einer Lösung abnehmen muss, jedoch können dadurch unphysikalische Ergebnisse produziert werden. Zum anderen die Entropiebedingung, diese verhindert die unphysikalischen Ergebnisse indem die Entropie nicht abnehmen darf. Diese Bedingungen führen dazu, dass das High-Resolution-Verfahren stabil ist und einer Genauigkeit 2. Ordnung (LECHELER, 2011).

3.2. Simulationen

In den nachfolgenden Simulationen soll die Lüftung über einen Schacht untersucht werden. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, sind der thermische Auftrieb und die Windgeschwindigkeit die Antriebskräfte der natürlichen Lüftung. Es soll verdeutlicht werden wie sich unterschiedliche Windgeschwindigkeiten und Schachtquerschnitte auf die Funktion der natürlichen Lüftung auswirken. Dabei werden Geschwindigkeit im Schacht, Volumenstrom, Druckdifferenz und Kantenlänge des Lüftungsschachtes betrachtet. Aus den gewonnen Daten wird ein Nomogramm über die Zusammenhänge erstellt.

3.2.1. Geometrie

Der Aufbau der Geometrie wird in den Abbildungen 27 und 28 verdeutlicht. Ein Raum ist mit einem Abluftschacht versehen. Um die Umströmung des Schachtes zu berücksichtigen, ragt dieser in die Atmosphäre hinein. Die Zuluft erfolgt über einen weiteren Schacht. Dieser soll die Luftzufuhr über eine Öffnung im Gebäude darstellen. Ein Einlass (Zuluftschacht) von der Decke war nötig, um bei der Simulation eine undefinierte Einströmung zu gewährleisten, da nur so die sich einstellenden Parameter bestimmt werden können. Wäre der Einlass als Inlet gewählt worden, hätten Angaben wie zum Beispiel der Volumenstrom der eintretenden Luft gemacht werden müssen. Durch die Festlegung des Volumenstroms in diesem Beispiel wäre der austretende Luftstrom vom eintretenden beeinflusst worden. Es soll jedoch die Luftbewegung ohne zuvor definierte Volumenströme untersucht werden. Die Schächte befinden sich in gegenüberliegenden Ecken des Raumes. Die Querschnitte der Schächte werden in den verschiedenen Simulationen variiert. Außerdem wird die Umgebung durch einen Luftraum dargestellt. Der Luft (Wind) strömt mit einer definierten Geschwindigkeit von rechts nach links. In der nachfolgenden Tabelle 1 werden die Eigenschaften der beschriebenen Geometrie verdeutlicht.

Tabelle 1: Eigenschaften der Geometrie

Grundfläche Umgebung	30 m x 30 m
Höhe Umgebung	30 m
Grundfläche Raum	5 m x 5 m
Höhe Raum	2,5 m
Höhe Abluftschacht	3 m
-davon in der Umgebung	2 m
Höhe Zuluftschacht	1 m

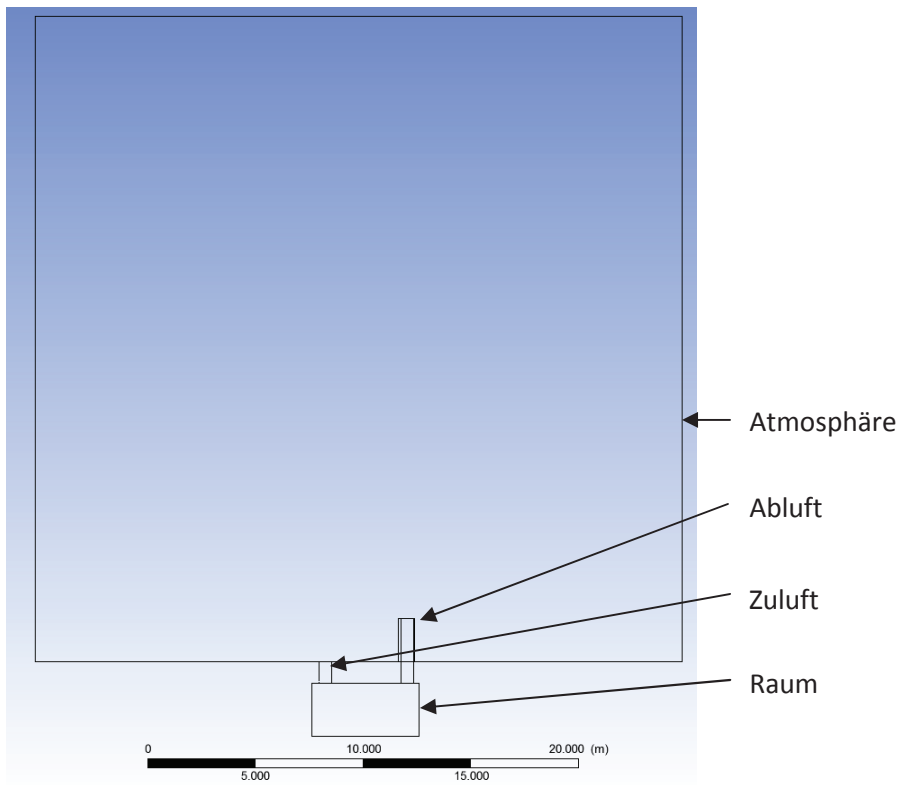


Abbildung 27: Verwendete Geometrie in der Seitenansicht, Quelle: eigene Darstellung

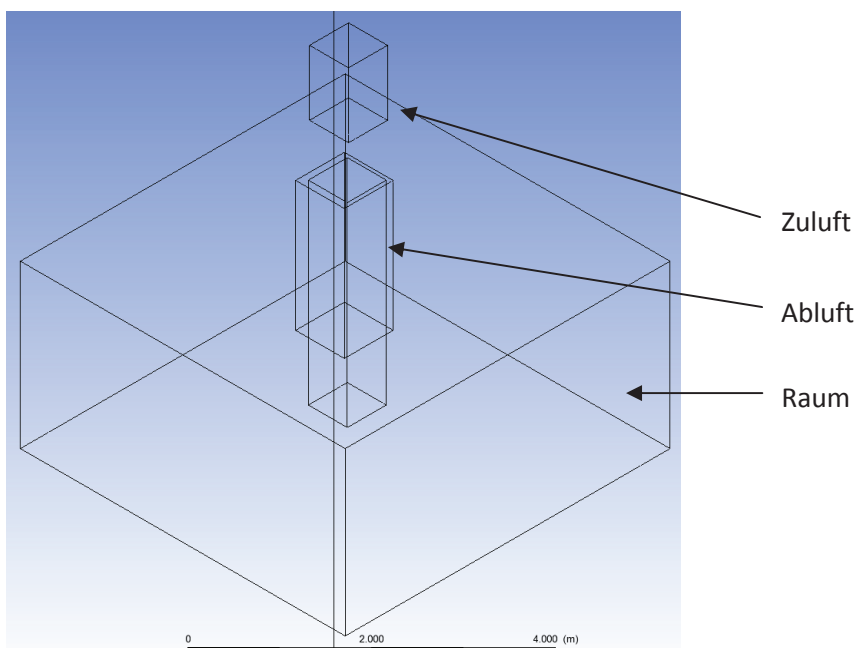


Abbildung 28: Vergrößerte Geometrie in der Isometrie, Quelle: eigene Darstellung

Der Festlegung der Schachthöhe geht die Betrachtung von Druckdifferenz und Volumenstrom bei verschiedenen Schachthöhen voran. Die Untersuchung wurde mit einer Schachtkantenlänge von 500 mm x 500 mm und einer Windgeschwindigkeit von 10 m/s durchgeführt.

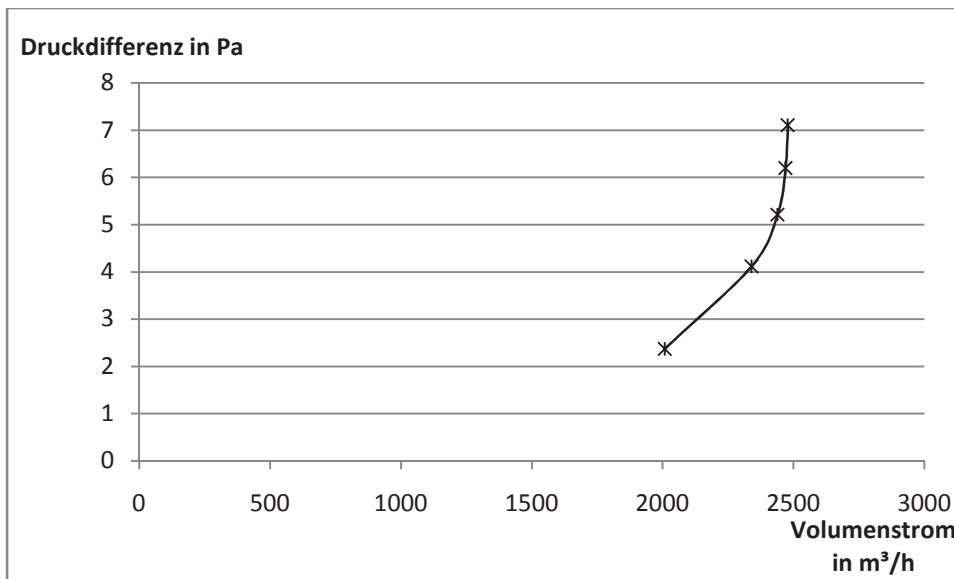


Diagramm 1: Auswirkungen der Schachthöhe auf die Druckdifferenz und den Volumenstrom

In Diagramm 1 wird deutlich, dass die Druckdifferenz bei doppelter Schachthöhe sich nicht verdoppelt. Jedoch ist die absolute Druckdifferenz größer. Dies ist auf den größeren Auftrieb zurück zu führen, jedoch nimmt der Widerstand im Schacht zu. Die Schachthöhe von 3 m ist gewählt worden, da dies der üblichen Geschosshöhe in einem Gebäude entspricht.

3.2.2. Angewandte Berechnungsgrundlagen

Für alle Simulationen wurde das Shear-Stress Transport Modell (kurz SST) zur Modellierung von Turbulenzen verwendet, um genaue Betrachtungen sowohl an den Grenzschichten als auch im Raum zu ermöglichen. Das SST Modell wird in Kapitel 3.1.4.2 näher erläutert.

Alle Lösungen erfolgten nach dem High-Resolution-Verfahren, welches in Kapitel 3.1.6.3 näher beschreiben wird.

3.2.3. Randbedingungen

Für die Erstellung eines Nomogramms ist eine Vielzahl an Daten erforderlich. Es werden dabei sowohl der Querschnitt der Schächte als auch die Windgeschwindigkeit variiert. In der nachfolgenden Tabelle 2 werden die Varianten aufgeführt. Dabei werden für jede Kantenlänge die 12 verschiedenen Windgeschwindigkeiten als Randbedingung verwendet. Daraus ergeben sich 72 Simulationen. Die gewählten Windgeschwindigkeiten sind ungefähre Mittelwerte aus der Einteilung der allgemein bekannten Beaufort-Skala. Die Wände des Raumes sind mit einer Temperatur

von 26 °C belegt um die Rauminnentemperatur auf einen wohnraumtypischen Wert zu erhöhen. Des Weiteren hat die Luft in der Atmosphäre eine Temperatur von 10 °C um die Funktionalität der natürlichen Lüftung in der Übergangszeit, bei der es im Gebäude warm und außen kalt ist, zu zeigen. Bei niedrigeren Außentemperaturen und damit größeren Temperaturdifferenzen wird die Lüftung auf Grund des thermischen Auftriebes verstärkt.

Tabelle 2: Randbedingungen der durchgeführten Simulationen

Kantenlänge in mm	600 x 600	500 x 500	400 x 400	300 x 300	200 x 200	100 x 100
Windgeschwindigkeit in m/s	1	1	1	1	1	1
	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
	5	5	5	5	5	5
	7	7	7	7	7	7
	10	10	10	10	10	10
	13	13	13	13	13	13
	15	15	15	15	15	15
	20	20	20	20	20	20
	23	23	23	23	23	23
	27	27	27	27	27	27
	30	30	30	30	30	30
	33	33	33	33	33	33

3.3. Ergebnisse der Simulationen

Die Ergebnisse der Simulationen sind erwartungsgemäß umfangreich. Daher sind den Auswertungen der Simulationsdaten, in Bezug auf die verschiedenen Parameter, nahezu keine Grenzen gesetzt. In dieser Arbeit werden die interessanten Zusammenhänge zwischen Geschwindigkeit, Querschnitt des Schachtes, Volumenstrom und Druckdifferenz verdeutlicht. Für eine bessere Übersichtlichkeit werden die Daten in mehreren Tabellen nach den Querschnittsflächen des Abluftschachtes geordnet dargestellt.

In Abbildung 29 wird das Druckprofil bei einer Schachtkantenlänge von 600 mm verdeutlicht. Der Wind kommt von der linken Seite der Atmosphäre. Auf der dem Wind zugewandten Seite entsteht am Schacht ein Überdruck. Auf der anderen Seite entsteht ein Unterdruck. An der Schachöffnung findet eine Druckangleichung statt. Dadurch wird ein Sog erzeugt und im Schacht entsteht ein geringerer Druck. Auf Grund dessen wird die Luft aus dem Raum hinaus transportiert.

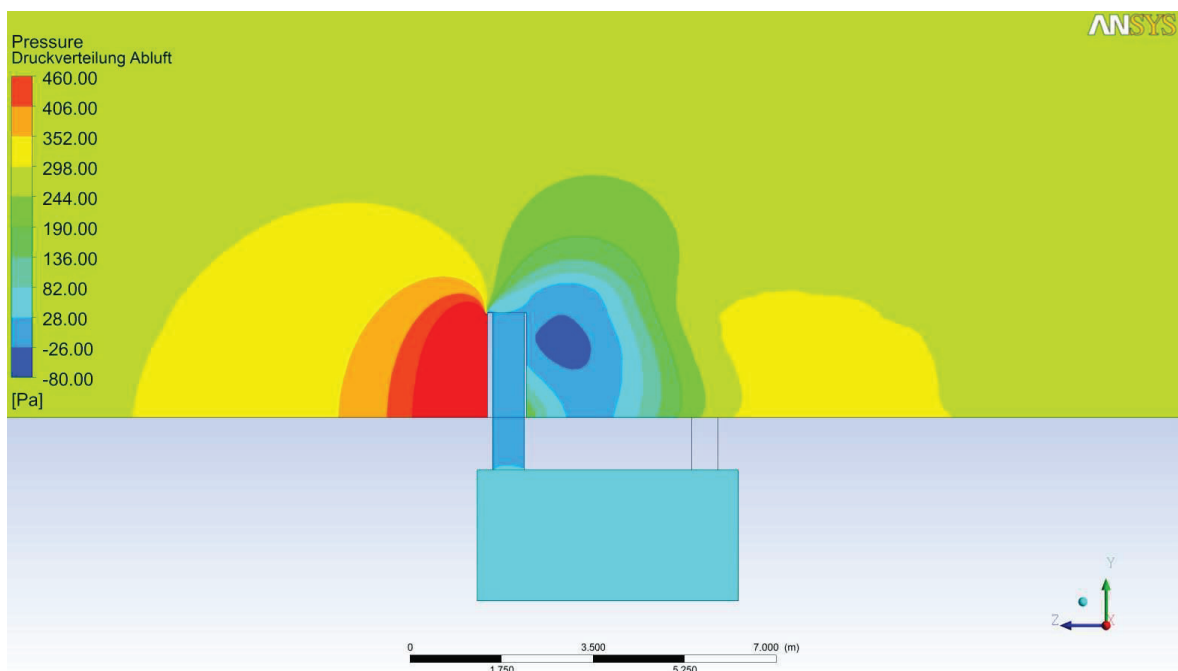


Abbildung 29: Druckprofil im Abluftschacht mit einer Kantenlänge von 600 mm

Die Abbildung 30 zeigt die Geschwindigkeitsverteilung in dem Schacht mit einer Kantenlänge von 600 mm. Es wird deutlich, dass direkt hinter dem Schacht die Geschwindigkeit geringer ist als die Eintrittsgeschwindigkeit in die Atmosphäre. Des Weiteren wird der Injektoreffekt, der durch die Druckdifferenzen entstehenden, siehe Abbildung 29, ebenfalls bei der Betrachtung der Geschwindigkeiten deutlich. Die Austrittsgeschwindigkeit aus dem Schacht ist höher als die herrschende Windgeschwindigkeit.

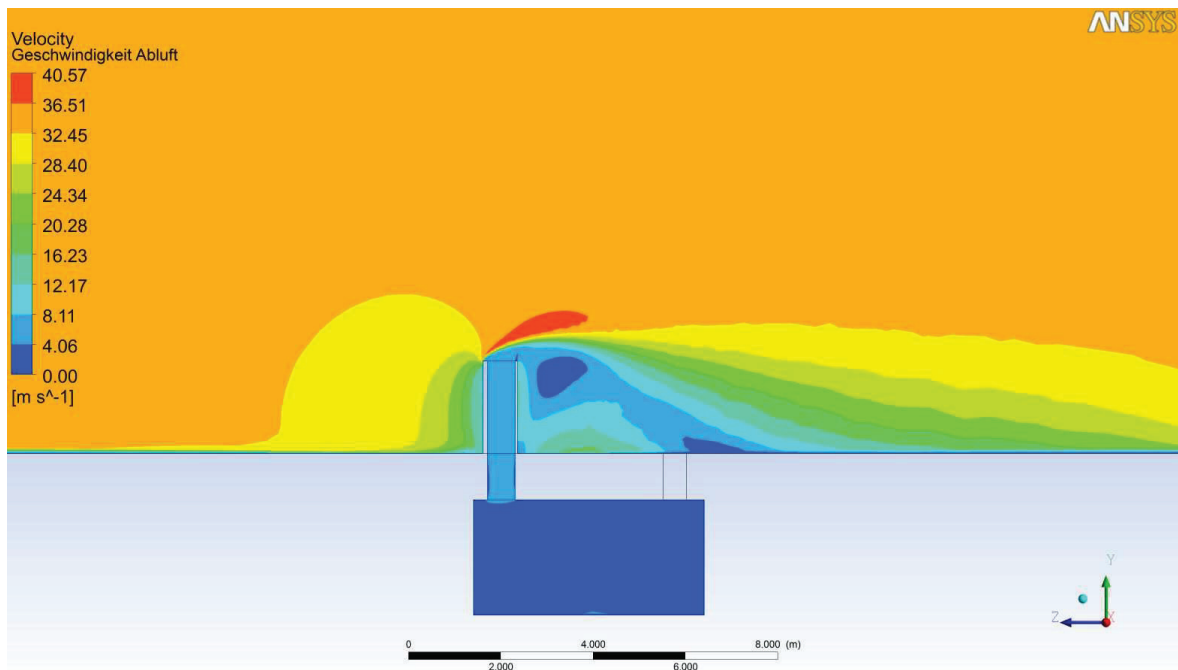


Abbildung 30: Geschwindigkeitsverteilung im Abluftschacht

Die Abbildungen 29 und 30 dienen der Veranschaulichung der Simulationsergebnisse. Die verdeutlichten Effekte sind bei allen durchgeführten Simulationen zu beobachten.

Im Anhang befinden sich Excel-Tabellen mit den Ergebnissen der durchgeführten Simulationen. Darin enthalten sind die errechneten Massenströme, Druckdifferenzen und Luftgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der unterschiedlichen Querschnitten und Windgeschwindigkeiten.

3.4. Auswertung der Ergebnisse

Um den Zusammenhang zwischen Druckdifferenz und Volumenstrom zu verdeutlichen, ist die Berechnung des Volumenstroms erforderlich. Dieser wird als Produkt von Massenstrom und Luftdichte, die aus den Simulationen entnommen wird, berechnet.

Tabelle 3: Nachfolgend verwendete Größe aus den Simulationen

Größe	Simulationsergebnis
Luftdichte	1,185 kg/m ³

In der nachfolgenden Tabelle sind die, aus dem Massenstrom und der Dichte, berechneten Volumenströme in Abhängigkeit der verschiedenen Windgeschwindigkeiten und den unterschiedlichen Schachtkantenlängen aufgeführt.

Tabelle 4: Berechneter Volumenstrom in m³/h

	1 m/s	2,5 m/s	5 m/s	7 m/s	10 m/s	13 m/s	15 m/s	20 m/s	23 m/s	27 m/s	30 m/s	33 m/s
600 mm	662	902	1466	1929	2703	3464	4007	4971	5342	5836	6479	7107
500 mm	506	661	1035	1436	2008	2588	2955	3910	4528	5262	5861	6419
400 mm	359	455	728	1005	1367	1781	2053	2708	3100	3643	4053	4442
300 mm	254	311	512	693	962	1248	1429	1872	2159	2525	2811	3086
200 mm	113	146	238	323	456	588	667	870	1018	1200	1322	1442
100 mm	29	41	71	97	137	178	206	275	316	373	415	458

Auf Grund der Veränderung der Windgeschwindigkeit in der Umgebung entstehen, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, unterschiedliche Druckdifferenzen im Schacht. Das nachfolgende Diagramm verdeutlicht die Änderung der Druckdifferenz in Abhängigkeit von der Änderung der Windgeschwindigkeiten bei den verschiedenen Schachtgrößen.

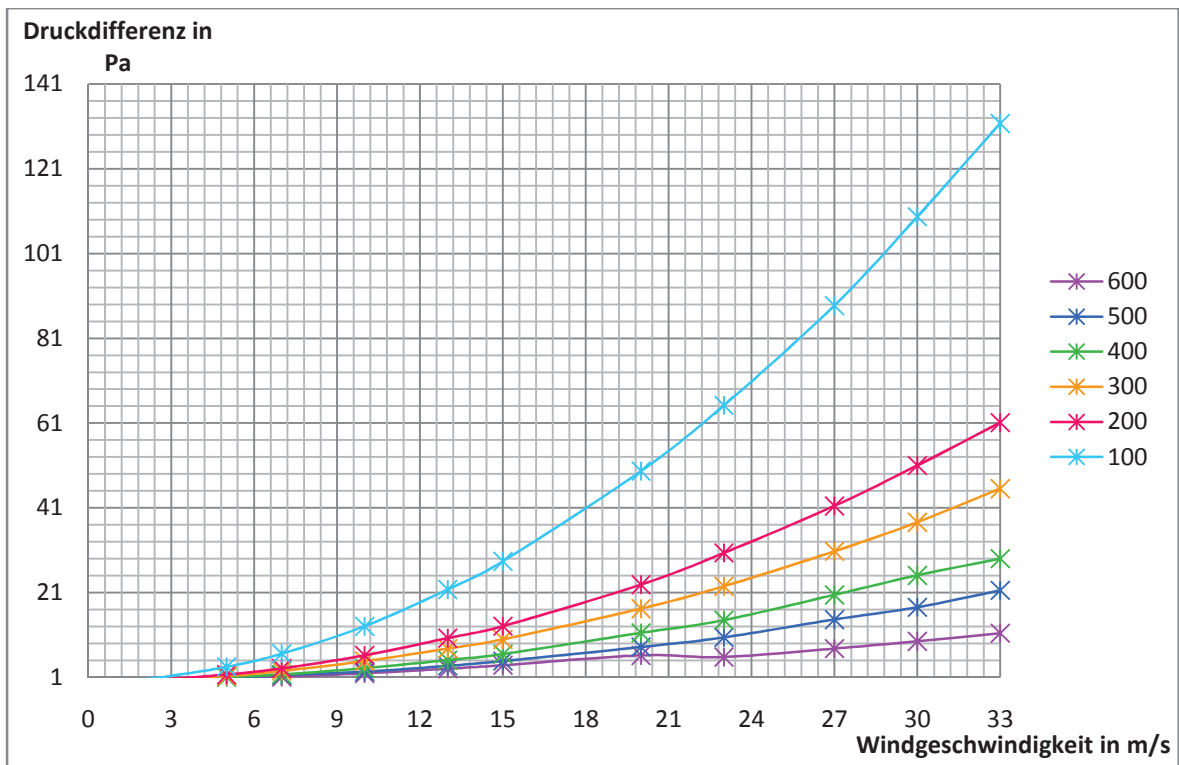


Diagramm 2: Druckdifferenz in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit

Aus Diagramm 2 wird deutlich, dass die Druckdifferenz mit Zunahme der Windgeschwindigkeit steigt. Wie in Gleichung 2.3.3 beschrieben, liegt ein quadratischer Zusammenhang vor. Dies lässt sich durch den Kurvenverlauf bestätigen. Zusätzlich wird deutlich, je kleiner die Schachtkantenlänge ist, desto stärker steigt die Druckdifferenz an.

Um aus den Simulationsergebnissen eine Entwurfsgrundlage in Form eines Nomogramms zu erstellen, ist die Verdeutlichung der verschiedenen Zusammenhänge erforderlich. In den nachfolgenden Diagrammen werden die Kurvenverläufe von Druckdifferenz und Geschwindigkeit, Volumenstrom und Geschwindigkeit sowie Volumenstrom und Druckdifferenz verdeutlicht.

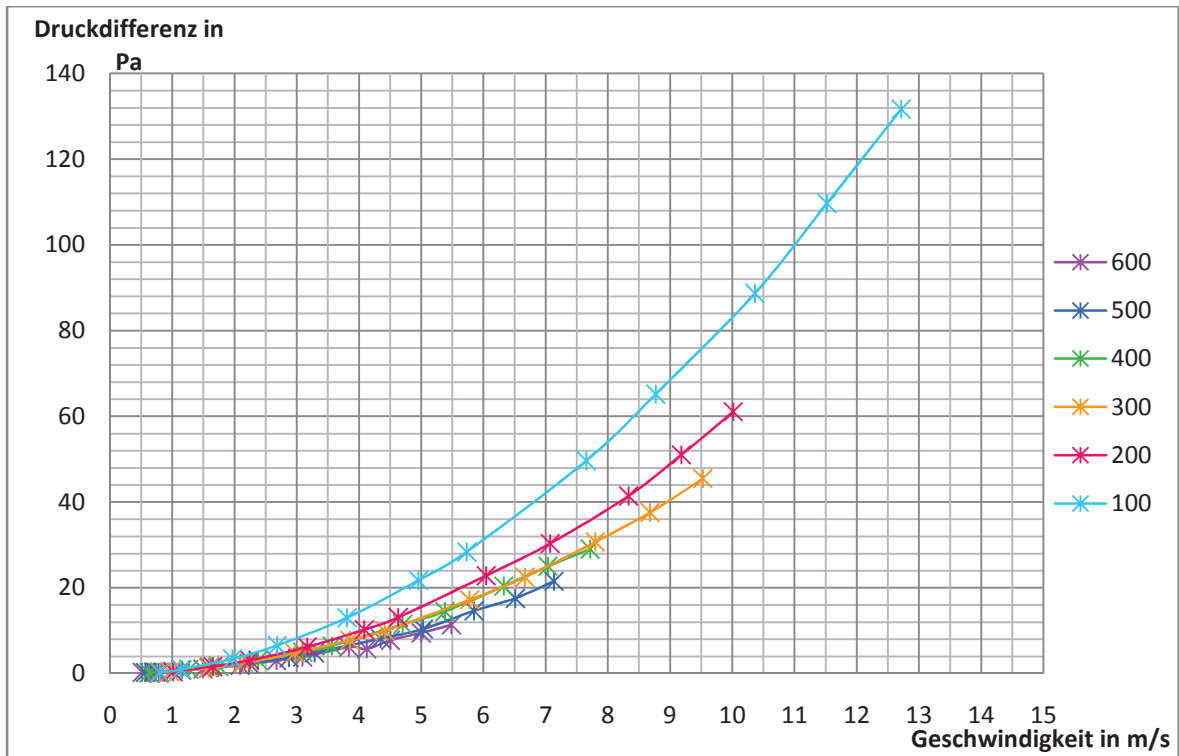


Diagramm 3: Änderung der Druckdifferenz abhängig von der Geschwindigkeit

In Diagramm 3 wird die Änderung der Druckdifferenz in Abhängigkeit der im Schacht entstandenen Geschwindigkeit aufgezeigt. Es wird deutlich, dass je kleiner die Kantenlänge des Schachtes gewählt wird desto größer wird die Geschwindigkeit. Auf Grund des, wie in Gleichung 2.3.3. beschriebenen, quadratischen Zusammenhanges zwischen Druckdifferenz und Geschwindigkeit ist die Druckdifferenz bei hoher Geschwindigkeit am Größten.

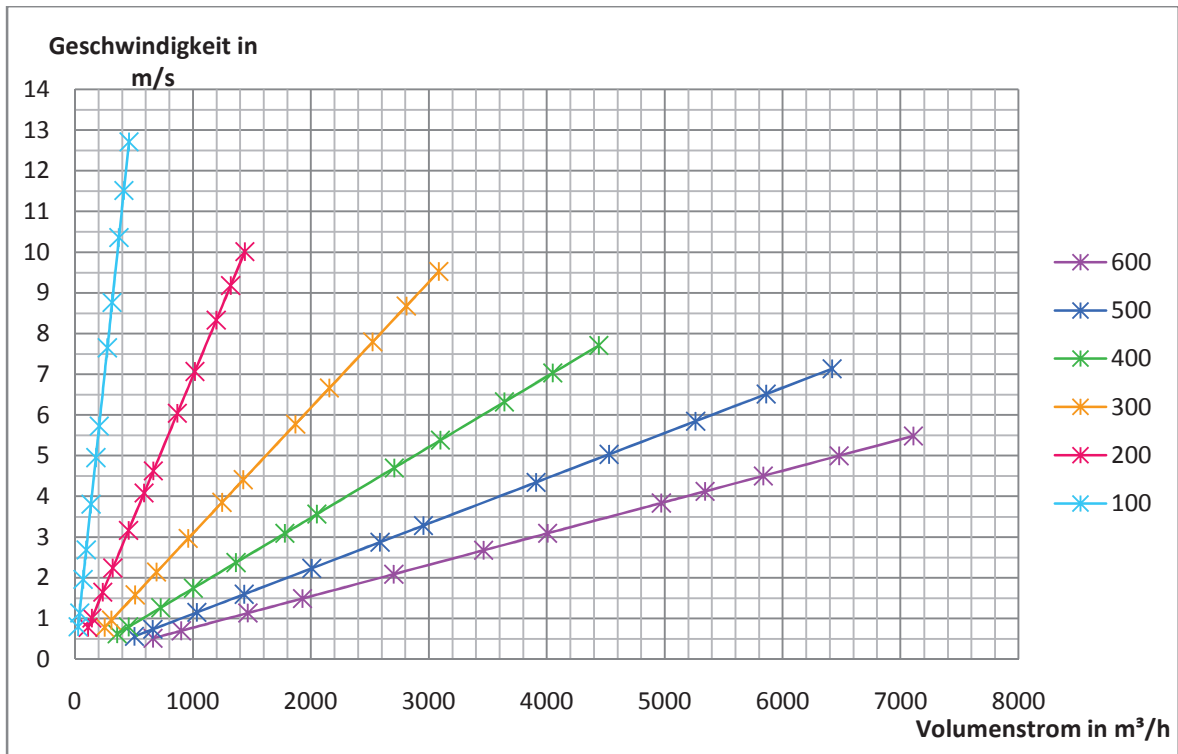


Diagramm 4: Geschwindigkeitsänderung in Abhängigkeit vom Volumenstrom

Der Zusammenhang der Änderung von der Geschwindigkeit in einem Schacht bedingt durch die Volumenstromänderung wird in Diagramm 4 veranschaulicht. Der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Volumenstrom verläuft linear. Dies lässt sich aus Gleichung 2.3.6 und der Tatsache, dass der Volumenstrom ein Produkt aus Massenstrom und Dichte ist, schließen. Je kleiner der Volumenstrom ist, desto kleiner ist die Geschwindigkeit in einem Schacht. Der größte Volumenstrom lässt sich daher mit der größten Kantenlänge eines Schachtes erzeugen. Hingegen wird die größte Geschwindigkeit bei der kleinsten Schachtkantenlänge erzielt.

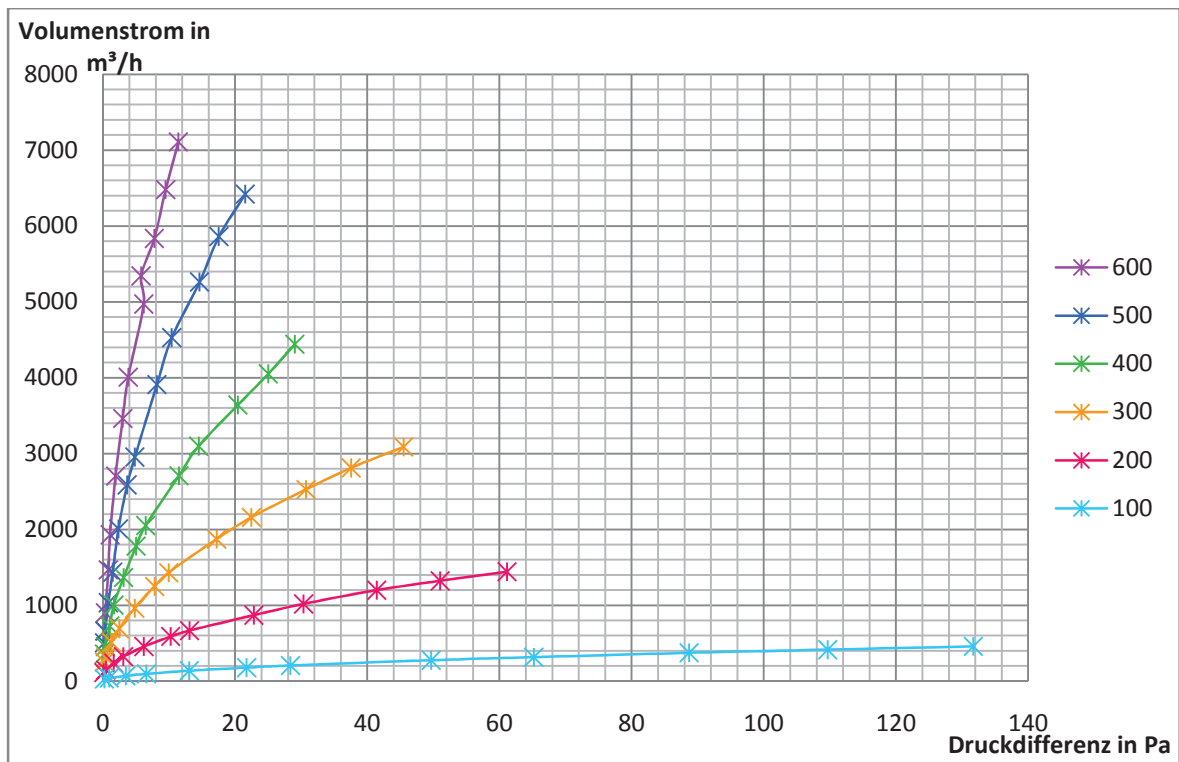


Diagramm 5: Volumenstromänderung in Abhängigkeit der Druckdifferenz

In Diagramm 5 wird die Änderung des Volumenstroms in Abhängigkeit von der entstehenden Druckdifferenz dargestellt. Dieser Zusammenhang wird im späteren Verlauf Grundlage des Nomogramms sein. Es wird erkennbar, dass die Druckänderung bei einem kleinen Volumenstrom am Größten ist.

Für die Erstellung des Nomogramms wurden die Erkenntnisse aus den drei vorangegangenen Diagrammen genutzt. Für die einzelnen Kurven wurden mit Hilfe der Tabellenkalkulation Excel von Microsoft die Gleichungen ermittelt. Die Gleichungen aus den Diagrammen 3 und 4 wurden als Grundlage für die Ermittlung des Zusammenhanges zwischen Geschwindigkeit, Druckdifferenz und Volumenstrom für das Nomogramm verwendet. Aus den Gleichungen von Diagramm 5 wurde eine Wertetabelle erstellt. Diese Werte sind Grundlage für die Kurven der Nennweiten im Nomogramm.

In Diagramm 6 werden die gewonnen Erkenntnisse in dem Nomogramm in einen Zusammenhang gebracht. Es wird deutlich, dass der Zusammenhang zwischen den Nennweiten sowie den Geschwindigkeiten logarithmisch ist. Mit Hilfe des Nomogramms lassen sich aus zwei Bekannten Rahmenbedingungen die beiden Unbekannten bestimmen.

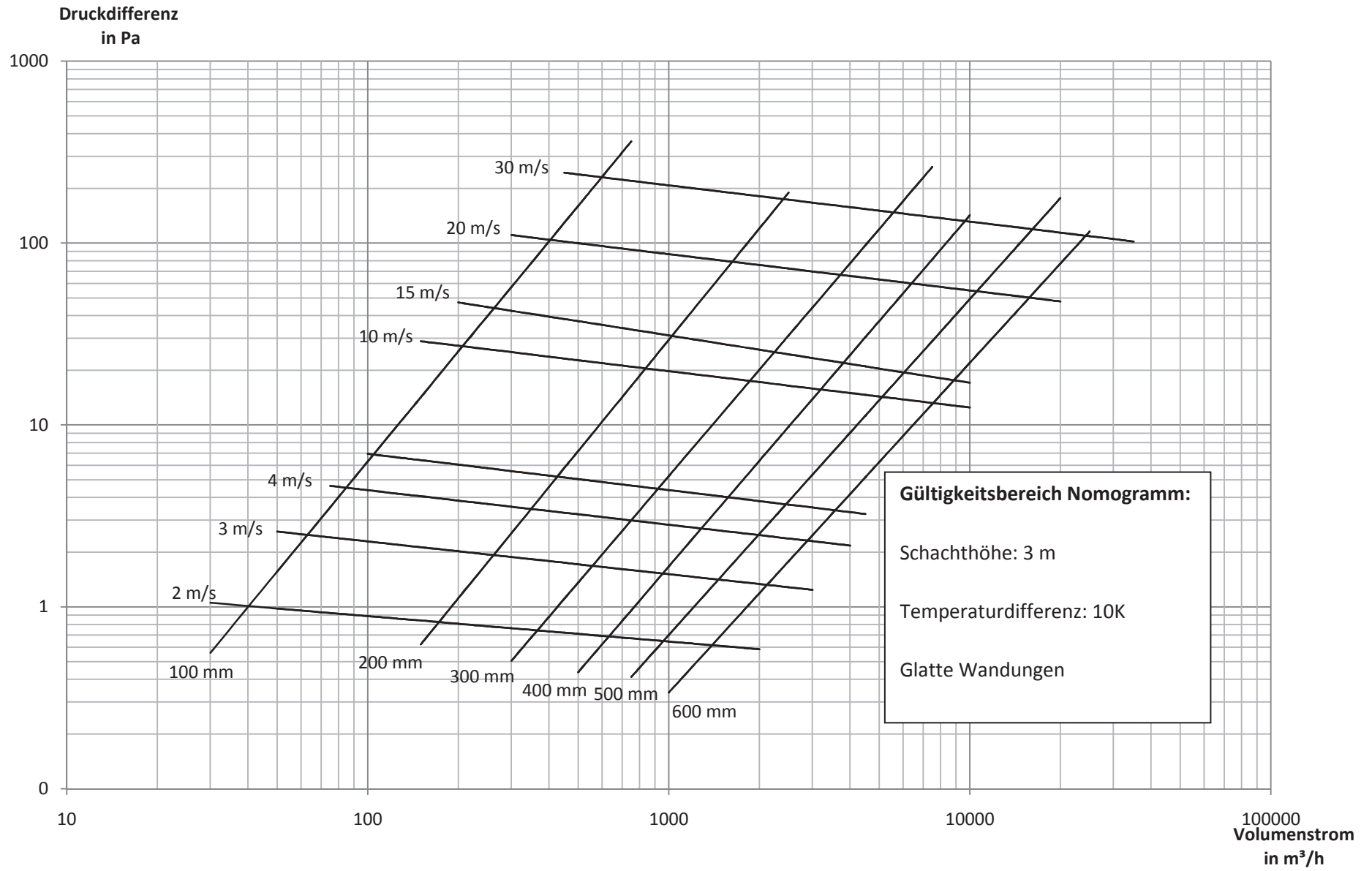


Diagramm 6: Nomogramm als Entwurfsgrundlage für natürliche Lüftungssysteme

4. Fazit

In dieser Arbeit ist deutlich geworden, dass bereits in der Vergangenheit der Einsatz von natürlichen Lüftungssystemen erfolgreich war. Die erläuterten Beispiele aus der Vergangenheit geben vielerlei Grundlagen und Anregungen für die Entwicklung von natürlichen Lüftungsanlagen in der Gegenwart. Die Anforderungen an den Brand- und Schallschutz sowie die Regelbarkeit stellen dabei bisher nicht gewesene Ansprüche dar. Diese lassen sich jedoch mit Hilfe von einfacher Technik wie zum Beispiel Ventilatoren erfüllen. Es wird deutlich, dass die Gestaltung eines Gebäudes unter Berücksichtigung vieler Punkte wie zum Beispiel der Verschattung oder der Ausrichtung erfolgen sollte. Dadurch lassen sich positive Effekte für ein angenehmes Innenraumklima schaffen. Es ist empfehlenswert eine umfangreiche Gebäudesystemanalyse durchzuführen. Der Einbau von Luftströmungsverstärkenden Bauteilen, wie am Beispiel des Windfängers erläutert, ist zusätzlich von Vorteil. Ein weiterer Punkt bei der Planung eines Gebäudes ist die Einbeziehung der Nutzung des Gebäudes. Wie am Beispiel der Jubiläumsschule in Österreich deutlich wird, ist die Analyse des Nutzerverhaltens für die Auslegung von einer Lüftung essenziell. Bei der Nichtbeachtung dessen kann es schnell zu einer Fehldimensionierung und damit zu einer Ressourcenverschwendung kommen. Zusätzlich können die Kapazität des Gebäudes und die Trägheit für das Gebäudekonzept hinzugezogen werden. Diese dürfen jedoch bei einer Planung nicht außeracht gelassen werden. Da sie positiv genutzt werden können.

Die Beispiele aus der Gegenwart zeigen, dass durch den Einsatz von natürlichen Lüftungssystemen keine Einbuße in der Funktionsfähigkeit entsteht. Die baulichen Gegebenheiten werden durch den Einbau von minimaler Technik unterstützt und regelbar gemacht. Die natürlichen Lüftungssysteme sind an das Nutzungsprofil angepasst und auf dieses abgestimmt. Die Lösung der Probleme im Schloss Schönbrunn zeigen, dass die historischen Lüftungssysteme weiterhin verwendet werden können und in ein neues Lüftungskonzept einbezogen werden. Die Lüftung im Portcullis House, die an die Lüftung im House of Commons erinnert, macht deutlich, dass selbst die Wärmerückgewinnung mit Hilfe einer natürlichen Lüftung kein Problem darstellt. Das Gebäude des Manitoba Hydro Place vereint verschiedenste Punkte der natürlichen Lüftung und stellt dadurch eine sehr gelungene Vorlage für weitere Gebäude dar.

Die Strömungssimulationen, die die Funktionsweise der natürlichen Schachtlüftung betrachten, haben die Zusammenhänge von Geschwindigkeit, Volumenstrom und besonders der Druckdifferenz verdeutlicht. Der Zusammenhang zwischen der Druckdifferenz pro Meter und der Strömungsgeschwindigkeit im Schacht zeigten, dass je kleiner die Kantenlänge des Schachtes und je größer die Geschwindigkeit, desto größer ist auch die Druckdifferenz. Aus der Betrachtung von

Geschwindigkeit und Volumenstrom wird deutlich, dass durch die Verringerung der Schachtkantenlänge eine Erhöhung der Geschwindigkeit erfolgt. Im Gegensatz dazu steigt der Volumenstrom mit der Vergrößerung der Schachtkantenlänge. Zusätzlich zeigt der Zusammenhang zwischen Druckdifferenz und Volumenstrom, dass die Verringerung der Schachtkantenlänge eine Erhöhung der Druckdifferenz und eine Verringerung des Volumenstroms zur Folge hat. Diese bisher bei der Auslegung von Lüftungssystemen berücksichtigten Annahmen konnten nun rechnerisch nachgewiesen werden.

Das aus den Simulationsergebnissen erstellte Nomogramm dient nun als Grundlage für die Auslegung von natürlichen Lüftungsschächten. Dieses stellt die Zusammenhänge zwischen Druckdifferenz, Volumenstrom, Geschwindigkeit und Schachtkantenlänge dar.

Es kann in jedem Fall gesagt werden, dass eine natürliche Lüftung auf Grund der physikalischen Grundlagen funktionsfähig ist und mit einigen wenigen unterstützenden Hilfsmitteln eine gute Alternative zur mechanischen Lüftung bietet. Das Ziel sollte sein, die Anzahl der bisher verwendeten mechanischen Lüftungsanlagen zu minimieren und durch natürliche Lüftungssysteme zu ersetzen.

Literaturverzeichnis

BENTZ, Martin (2006): Auf der Suche nach dem Ursprung des Atriumhauses. In: Akademie Aktuell, 2006, 03, S. 25-27.

BRUNN, Oliver (2010): Modellierung des dreidimensionalen Strahlungswärmeaustauschs in Verbrennungs-räumen mittels Monte Carlo Methode. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.

Ecologic Architecture: <http://ecologic-architecture.org/main/index.php?id=115&L=2> 15.03.12

FASSADE (2002): Das neue Portcullis House in London. In: Fassade, 2002, 2, S. 22-24

FIEDLER, Eckehard Dr.-Ing. (2010): Natürliche Lüftung großer Gebäude. Die Auslegung unter Berücksichtigung von Wettereinflüssen. In: tab, 2010, 7-8, S. 42-48.

HARTWIG, Martin (2010): Dicke Luft in deutschen Klassenzimmern. In: Spiegelonline vom 22.10.2010 <http://www.spiegel.de/schulspiegel/wissen/0,1518,724364,00.html> 27.02.12

HEINZ, Ehrenfried (2011) : Wohnungslüftung – frei und ventilatorgestützt. Anforderungen, Grundlagen, Maßnahmen, Normenanwendung. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

HERFORD, Jeffrey (2008): CFD-Studie zur effizienten Auslegung von Rauschgaskanaleinbauten bei vorgegebener Rauschgaskanalführung in einem Steinkohlekraftwerk. Diplomarbeit, Brandenburgische Technische Universität. http://www.vfa.tu-cottbus.de/VFA_Files/DA_SA/DA035.pdf (11.12.2011)

KÄFERHAUS, Jochen Dr. (2011): Historische Haustechnik. In: Restaurator im Handwerk, 2011, 3, S.22-24.

KÄFERHAUS, Jochen Dr. (2005): Historische Haustechnik – Schnee von gestern?, Teil 1. In: Heizung Lüftung Klimatechnik, 2005, 12, S. 16-21.

KÄFERHAUS, Jochen Dr. (2006): Historische Haustechnik – Schnee von gestern?, Teil 2. In: Heizung Lüftung Klimatechnik, 2006, 1-2, S. 4-7.

KÄFERHAUS, Jochen Dr. (2004): Kontrollierte natürliche Lüftung und Bauteilheizung als probate Mittel der Schadensprävention am Beispiel von Schloss Schönbrunn. In: Klima in Museen und historischen Gebäuden: Die Temperierung, Wien: Schloß Schönbrunn Kultur- und Betriebsges. m.b.H, S. 49-76.

LAURIEN, Eckehart Prof. Dr.-Ing. habil.; OERTEL, HERBERTJR. Prof. Prof. e.h. Dr.-Ing. habil.(2011): Numerische Strömungsmechanik: Grundgleichungen und Modelle-Lösungsmethoden – Qualität und Genauigkeit. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. 4. Auflage.

LECHELER, Stefan (2011): Numerische Strömungsberechnung: Schneller Einstieg durch anschauliche Beispiele. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. 2. Auflage.

RASHAD, Mahmoud (2008): Iran. Geschichte, Kultur und lebendige Traditionen-antike Stätten und islamische Kunst in Persien. Ostfildern: DuMont Reiseverlag. 5. Auflage.

RECKNAGEL, Hermann Dipl.-Ing.; SPRENGER, Eberhard Dipl.-Ing.; SCHRAMEK, Ernst-Rudolf Prof. Dr.-Ing.(2009): Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik. Oldenburg: Oldenburg Industrieverlag.

HETZEL, Hermann (1999): Thermalbad gibt Legionellen-Alarm. In: Welt, 07.04.1999.

xia(2010): Manitoba Hydro Place. In: Intelligente Architektur, 2010, 10-12, S. 26-33.

Anhang

Die Originalversion dieser Arbeit enthält eine SD-Karte. Die sich darauf befindenden Daten sind die Simulationsdaten zu den numerischen Strömungssimulationen einer natürlichen Lüftung.

Der Überordner „CFD-Simulation“ enthält die eigentlichen Simulationsdateien. Diese Daten lassen sich mit dem Simulationsprogramm Ansys 13 öffnen.

In dem Überordner „Simulationsergebnisse“ befinden sich Abbildungen von Simulationsergebnissen.

Der Anhang wird in der öffentlichen Version aus Datenschutzgründen entfernt.

Die SD-Karte hat folgende Ordnerstruktur:

- CFD-Simulation
 - Workbench der Simulation:
 - mit dieser lassen sich alle Simulationen aufrufen
 - Files der Simulation:
 - enthält die eigentlichen Dateien auf die die Workbench zugreift
- Simulationsergebnisse
 - Streamlines bei einer Kantenlänge von 400 mm
 - für jede Windgeschwindigkeit eine Abbildung der Streamline
 - Druckprofile im Abluftschacht
 - für jede Schachtkantenlänge eine Abbildung des Druckprofils bei einer Windgeschwindigkeit von 7 m/s
 - Geschwindigkeitsverteilungen
 - für jede Schachtkantenlänge eine Abbildung der Geschwindigkeitsverteilung bei einer Windgeschwindigkeit von 7 m/s
 - Animationen bei einer Kantenlänge von 400 mm
 - für jede Windgeschwindigkeit eine Animation der Streamlines

Simulationsergebnisse

Querschnitt des Lüftungsschachtes 600 mm x 600 mm

Wind- geschwindigkeit m/s	Massenstrom in kg/s	Druckdifferenz ΔP in Pa	Geschwindigkeit der Luft in m/s
1	0,218	0,299	0,511
2,5	0,297	0,384	0,696
5	0,483	0,836	1,131
7	0,635	1,101	1,488
10	0,890	1,936	2,086
13	1,140	3,012	2,673
15	1,319	3,848	3,092
20	1,636	6,173	3,836
23	1,759	5,781	4,122
27	1,921	7,770	4,503
30	2,133	9,489	4,999
33	2,340	11,396	5,484

Querschnitt des Lüftungsschachtes 500 mm x 500 mm

Wind- geschwindigkeit m/s	Massenstrom in kg/s	Druckdifferenz ΔP in Pa	Geschwindigkeit der Luft in m/s
1	0,167	0,247	0,562
2,5	0,218	0,350	0,735
5	0,341	0,845	1,150
7	0,473	1,502	1,595
10	0,661	2,366	2,231
13	0,852	3,691	2,875
15	0,973	4,849	3,283
20	1,287	8,175	4,344
23	1,491	10,425	5,032
27	1,732	14,633	5,847
30	1,929	17,543	6,512
33	2,113	21,532	7,133

Querschnitt des Lüftungsschachtes 400 mm x 400 mm

Wind- geschwindigkeit m/s	Massenstrom in kg/s	Druckdifferenz ΔP in Pa	Geschwindigkeit der Luft in m/s
1	0,118	0,227	0,623
2,5	0,150	0,354	0,790
5	0,239	1,024	1,263
7	0,331	1,651	1,744
10	0,450	3,141	2,372
13	0,586	5,025	3,091
15	0,676	6,468	3,564
20	0,891	11,497	4,701
23	1,020	14,490	5,381
27	1,199	20,436	6,324
30	1,334	25,038	7,036
33	1,462	29,035	7,713

Querschnitt des Lüftungsschachtes 300 mm x 300 mm

Wind- geschwindigkeit m/s	Massenstrom in kg/s	Druckdifferenz ΔP in Pa	Geschwindigkeit der Luft in m/s
1	0,083	0,218	0,783
2,5	0,102	0,402	0,959
5	0,169	1,282	1,581
7	0,228	2,483	2,140
10	0,317	4,803	2,969
13	0,411	7,803	3,851
15	0,470	9,955	4,409
20	0,616	17,200	5,776
23	0,711	22,478	6,662
27	0,831	30,730	7,795
30	0,925	37,584	8,676
33	1,016	45,515	9,524

Querschnitt des Lüftungsschachtes 200 mm x 200 mm

Wind- geschwindigkeit m/s	Massenstrom in kg/s	Druckdifferenz ΔP in Pa	Geschwindigkeit der Luft in m/s
1	0,037	0,148	0,785
2,5	0,048	0,455	1,012
5	0,078	1,647	1,650
7	0,106	3,111	2,242
10	0,150	6,208	3,166
13	0,194	10,246	4,085
15	0,219	13,097	4,630
20	0,286	22,855	6,042
23	0,335	30,365	7,069
27	0,395	41,432	8,330
30	0,435	51,011	9,179
33	0,475	61,118	10,011

Querschnitt des Lüftungsschachtes 100 mm x 100 mm

Wind- geschwindigkeit m/s	Massenstrom in kg/s	Druckdifferenz ΔP in Pa	Geschwindigkeit der Luft in m/s
1	0,009	0,223	0,797
2,5	0,013	0,942	1,136
5	0,023	3,470	1,962
7	0,032	6,576	2,682
10	0,045	13,039	3,807
13	0,059	21,736	4,954
15	0,068	28,370	5,731
20	0,091	49,664	7,652
23	0,104	65,183	8,767
27	0,123	88,707	10,362
30	0,137	109,679	11,519
33	0,151	131,692	12,714

Eidesstattliche Erklärung zur Bachelorarbeit

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Die vorliegende Bachelorarbeit, darf in der Bibliothek der Fakultät Life Sciences der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg ausgelegt werden, davon ausgenommen ist die CD-Rom, auf der sich die Anhänge befinden. Ich bin damit einverstanden, dass diese Arbeit Interessenten auch auf elektronischem Weg z.B. im Internet zugänglich gemacht wird.

Hamburg 11.6.12

Ort

Datum

Marie Perle

Unterschrift