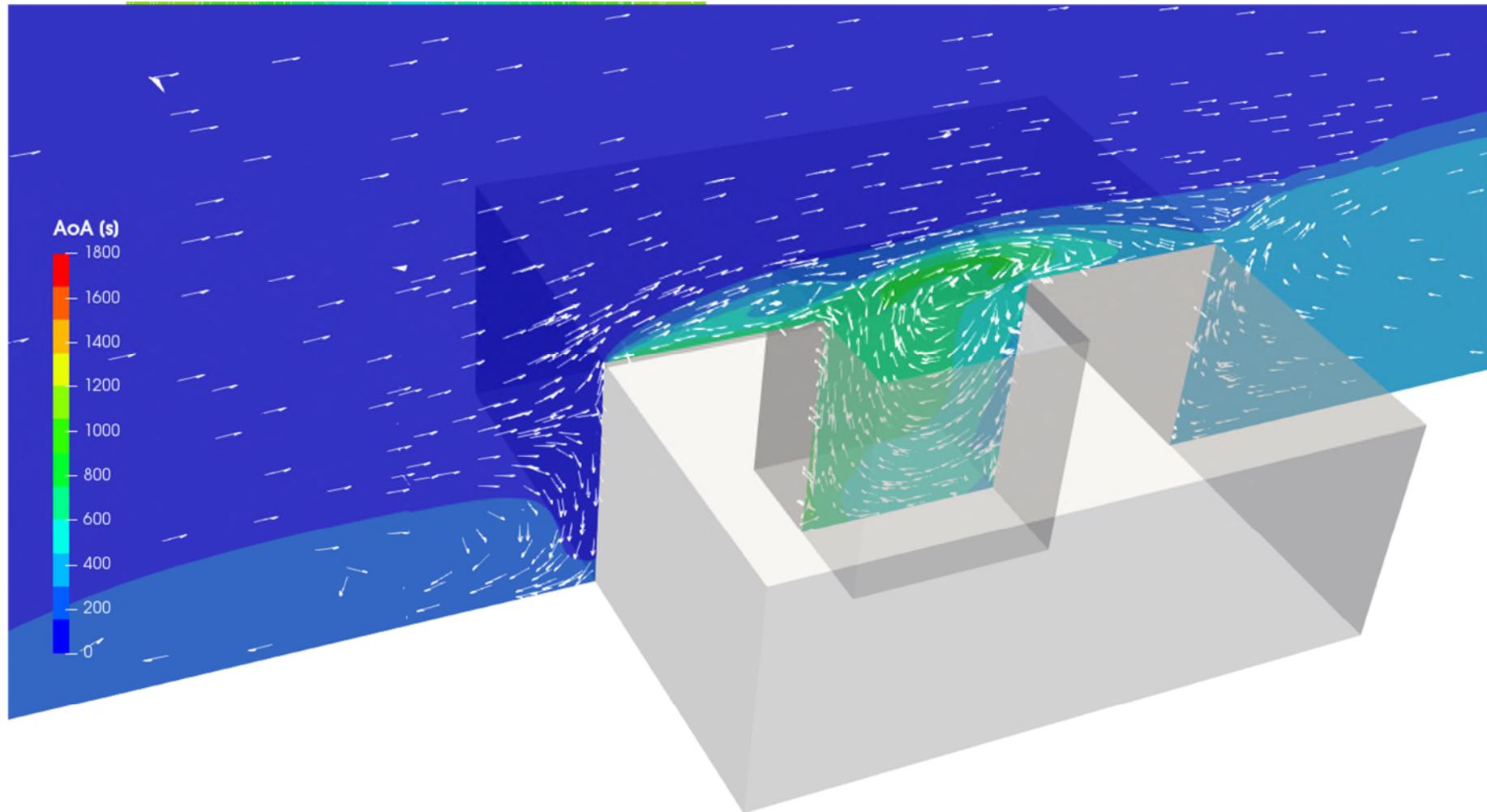


Innenhöfe als Lärmschutz – Luftqualität im Innenhof bei Fensterlüftung Untersuchungen mittels Simulationen

Version 02 | Stand: 13.05.2019



Impressum

Thema

Innenhöfe als Lärmschutz

Auftraggeber

Kanton Zürich, Baudirektion
Tiefbauamt
Fachstelle Lärmschutz
Walcheplatz 2
8090 Zürich

Herr Eisenring
Herr Gastberger

Dynamische Gebäudesimulationen

Lemon Consult AG
Sumatrasstrasse 10
CH-8006 Zürich
Tel. +41 44 200 77 44

Dr. Sarah Leenknecht, MSc. Architektur/PhD Bauphysik	Projektleiterin
Heinrich Hörth, Dipl.-Ing. (FH)	QS
Winfried Seidinger, dipl. El. Ing. FH / Energie-Ing. NDS FH	GL

Dokument

23171_BER_InnenhöfeLärmschutz_Zürich_20190513.docx

Zürich, 13.05.2019

Inhalt

1. Ausgangssituation	4	7. Modul 2: Resultate des CFD-Modells	60
1.1. Ausgangslage	4	7.1. Einleitung	60
1.2. Zielsetzung	4	7.2. Besprechung	60
1.3. Vorgehen	5	7.3. Einfluss der Parameter: AR	61
2. Grundlagen und Methodik	6	7.4. Einfluss der Parameter: Windgeschwindigkeit	65
2.1. Bisherige Vollzugspraxis und Literatur	6	7.5. Einfluss des Parameters: Auftrieb	73
2.2. Methodik	9	7.6. Einfluss des Parameters: Stau	81
3. Modul 1: Parameterstudie mittels Zonenmodell	12	7.7. Einfluss des Parameters: Windrichtung	83
3.1. Simulationsvarianten nach Geometrie	12	7.8. Einfluss der Parameter: Öffnung	84
3.2. Zonierung	12	8. Modul 2: Erkenntnisse des CFD-Modell	87
3.3. Nutzung	16	8.1. Globale Bewertung	87
3.4. Standort und Wetterdaten	17	8.2. Besprechung der Tendenzen	87
3.5. Anforderungen	17	8.3. Einfluss von Öffnungen	89
3.6. Auswertungsebene	18	9. Modul 3: Zusammenfassung	90
4. Modul 1: Resultate des Zonenmodells	19	9.1. Zusammenfassung der Simulationsergebnisse	90
4.1. Lüftung und CO ₂ -Konzentrationen im Innenraum	19	9.2. Qualitative Besprechung der Innenhofgestaltung	92
4.2. CO ₂ -Verteilung im Innenhof	20	9.3. Anwendung im Vollzug	94
4.3. Zusammenhang mit der Aussenlufttemperatur	28	10. Anhang	97
4.4. Analyse der thermischen Phänomene	32	10.1. Modul 2: Age of Air, Luftwechsel und Lüftungseffizienz im vertikalen Verlauf	98
4.5. Einfluss von weiteren Parametern	36	10.2. Modul 2: Visualisierung der Luftströmung und Age of Air	129
5. Modul 1: Erkenntnisse des Zonenmodells	41	10.3. Modul 2: Vergleich mit Bewertung nach Parameter	160
5.1. Zusammenfassung	41		
5.2. Ansatz für weitere Ermittlungen	44		
5.3. Vergleich Wetterdaten	45		
6. Modul 2: Parameterstudie mittels CFD-Modell	51		
6.1. Einleitung	51		
6.2. Simulationsvarianten	51		
6.3. Geometrie und Modellierung	54		
6.4. Bewertung	55		

1. Ausgangssituation

Die Luftqualität in Innenhöfen für die Nutzung zur Lüftung von Wohnungen wird ermittelt. Aus den Erkenntnissen werden Empfehlungen hinsichtlich der Anforderungen an Innenhöfe für die Fachstelle Lärmschutz des Kantons Zürich abgeleitet.

1.1. Ausgangslage

In Lagen mit hoher Lärmbelastung ist die Benutzung von Fenstern zur Lüftung von Wohnungen problematisch. Bei Gebäuden mit Innenhof können Lüftungsfenster auf der Innenhofseite eine Lösung bieten. Hier ist die Lärmbelastung meistens deutlich geringer. In diesem Fall ist jedoch eine hinreichend gute Durchlüftung des Innenhofes erforderlich.

In der bisherigen Praxis werden von der Fachstelle Lärmschutz des Kantons Zürich mittels Tabelle die Anforderungen an einen Innenhof mit Belüftungsfunktion zusammengefasst (Tab. 1). Die Anforderungen basieren auf der Doktorarbeit von Stefan Hajek (2006¹), sowie hauptsächlich auf dem Artikel von Hall (1999²). Mittels Messungen in einem Windtunnel wurde von Hall die Verteilung von Schadstoffen ab einer Quelle unten im Innenhof ermittelt. Es wurden Innenhöfe mit einem „Höhe zu Breite Verhältnis“ ($AR = H/B$) von 0.1 bis 5 berücksichtigt. Weitere Parameter waren Öffnungen zum Innenhof, Windrichtung, Gebäudetiefe und Stratifizierung. Der Zusammenhang dieser Parameter mit der Durchlüftung des Innenhofes ist sehr komplex. Der AR-Faktor wurde als wesentlicher Parameter für die Belüftung identifiziert. Im Bereich $AR < 0.3$ und $1 < AR < 1.5$ wurde gemäss den Messungen die beste Durchlüftung erreicht.

In der Tabelle für die bisherige Vollzugspraxis werden die Anforderungen hinsichtlich Mindestbreite und Mindestgrundfläche dargestellt:

- Anzahl Geschosse ≤ 2 : Brandschutz massgebend
- Anzahl Geschosse > 2 : $AR < 1.5$ massgebend (AR berechnet sich aus Höhe durch Mindestbreite des Innenhofes)

Tab. 1: Tabelle für die Bewertung von Innenhöfen für Belüftung nach bisheriger Vollzugspraxis (rot = massgebend für min. Fläche/Breite)

Geschosse	Gebäude	Belüftung		
	Wohneinheiten pro Geschoss	min. Fläche	min. Breite	AR
Anzahl	Anzahl	m ²	m	-
1	1	9	2.3	1.2
1	> 1	16	4.0	0.7
2	1	14	3.7	1.5
2	> 1	16	4.0	1.4
3		31	5.6	1.5
4		56	7.5	1.5
5		87	9.3	1.5
6		125	11.2	1.5
7		171	13.1	1.5
8		223	14.9	1.5

1.2. Zielsetzung

Die bisherige Vollzugspraxis soll überprüft werden. Die Bewertung aufgrund des ARs entspricht einer vereinfachten Methodik. Ebenfalls sind die Grundlagen hinsichtlich der Anforderungen an Innenhöfe neu zu verifizieren. Aus diesen Gründen ist eine Aktualisierung dieser Tabelle für den Vollzug gewünscht.

Lemon Consult AG wurde von der Fachstelle Lärmschutz des Kantons Zürich angefragt eine neue Tabelle für den Vollzug zu entwickeln.

¹ Hajek, Stefan: Untersuchungen zu mikroklimatischen Eigenschaften nach oben offener Räume (Atrien). Dissertation, Technische Universität München, 2006.

² Hall, DJ et al: Dispersion from courtyards and other enclosed spaces, Atmospheric Environment 33 (18), p.1187-1203, 1999.

Die neue Tabelle hat die folgenden Ansprüche:

- **Konservativ:** Die Tabelle soll für die grosse Mehrheit der Innenhöfe eine gute Luftqualität gewährleisten. Spezialfälle oder kritische Situationen sollen einzeln bewertet werden.
- **Pragmatisch:** Der schlimmste Fall soll nicht massgebend sein, da sonst die Tabellenwerte in der Praxis kaum brauchbar sind.
- **Begründet:** Die relevanten Parameter werden in den Ermittlungen berücksichtigt und liegen dieser Tabelle zugrunde.
- **Abgegrenzt:** Eine allgemein gültige Tabelle ist ohne äusserst konservative Werte nicht realistisch, deshalb muss klar definiert sein, für welche Konfigurationen diese sinnvoll anwendbar ist.
- **Robust:** Aus der Ermittlung soll hervorgehen, welche Parameter bezüglich der Luftqualität kritisch sind und wo Spielraum besteht.

1.3. Vorgehen

Damit eine allgemeine Bewertung der Luftqualität in Innenhöfen möglich ist und die relevanten Kriterien ermittelt werden können, wird eine Parameterstudie mittels eines Zonenmodells (dynamisch) und CFD-Modells (stationär) durchgeführt.

Die bestehende Literatur und Methodik wird im nächsten Abschnitt erläutert. Die Parameterstudie mittels Zonenmodell wird in den Abschnitten 3 bis 5 dargestellt. Die Randbedingungen zu den thermisch-dynamischen Simulationen sind in Abschnitt 3 dokumentiert. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 4 dokumentiert, eine Zusammenfassung der Erkenntnisse ist im Abschnitt 5 enthalten.

Die Parameterstudie mittels CFD-Modell wird in den Abschnitten 6 bis 8 dargestellt. Die Randbedingungen zu den Strömungssimulationen sind in Abschnitt 6 dokumentiert. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 7 dargestellt, eine Zusammenfassung der Erkenntnisse ist im Abschnitt 8 enthalten.

Die Zusammenfassung mit Empfehlungen für die Vollzugspraxis hinsichtlich Lüftung über Innenhöfe ist in Abschnitt 9 enthalten.

2. Grundlagen und Methodik

Die Grundlagen beschreiben die Literatur und die Methodik.

2.1. Bisherige Vollzugspraxis und Literatur

2.1.1. Literatur

Die bestehende Literatur bezüglich Luftqualität in Innenhöfen ist meistens veraltet oder ist auf Fallbeispiele in heissen Klimazonen begrenzt. Das Paper von Hall (1999), auf dem die aktuelle Entscheidungsgrundlage abgestützt ist, ergibt eine strukturierte Ermittlung mittels Windtunnel-Messungen unter Berücksichtigung von mehreren Parametern und bleibt eine relevante Quelle. Aus diesem Grund werden die Erkenntnisse kurz beschrieben.

In Abb. 1 werden die Ergebnisse von Hall (1999) für einen Innenhof mit orthogonaler Windrichtung und ohne thermische Einflüsse dargestellt. Hier ersichtlich ist die Abhängigkeit von Luftqualität zum Verhältnis H_{\max} (maximale Höhe) zu B (Breite Innenhof) oder Aspect Ratio AR bei Windströmung über Gebäuden mit Innenhof.

- Blauer Bereich: Im Bereich $AR < 0.2$ ist der Abstand zwischen den Gebäuden so gross, dass der Wind, der nach dem ersten „Obstakel“ in einer Scherschicht getrennt ist, sich wieder am Boden im Innenhof „kleben“ kann. So wird der Innenhof gut durchflutet und die Konzentrationen sind tief. Je näher die beiden Trakte beieinanderliegen, desto weniger erreicht die Scherschicht den unteren Bereich vom Innenhof. Ab $AR > 0.2$ steigen die Konzentrationen schnell an, mit einem Maximum bei $AR = 0.3$.
- Roter Bereich: Zwischen $AR 0.3$ und 1 ändert sich das Strömungsmuster. Ab einem gewissen AR entsteht ein Wirbel im Innenhof. Dank des Wirbels ist der Wind wieder in der Lage den Innenhof bis am Boden zu durchströmen. Die Messungen von Hall (1999) zeigen, dass der Wirbel tendenziell eine Kreisform annimmt. Die beste Luftqualität wird erreicht, wenn die Kreisform sich optimal entwickeln kann ($AR = 1$ bis 1.5). Bei einem steigenden AR

wird der Wirbel weniger effizient und die Konzentrationen werden langsam höher.

- Hellgrüner Bereich: Bei $AR > 1.5$ wird der Innenhof so tief, dass der Wirbel, der sich bevorzugt der Kreisform annähert, den unteren Bereich nicht mehr durchströmt. Lokal sind die Luftgeschwindigkeiten tief und die Schadstoffe bleiben unten im Innenhof hängen.

Änderungen an der Geometrie des Innenhofes werden eine von den drei hier oben beschriebenen Konfigurationen fördern und die Konzentrationen entsprechend beeinflussen.

Ein zweiter Parameter ist die Windrichtung (senkrecht = 0°).

- Bei kleinem AR (z.B. 0.3) ist die Konzentration kaum von der Windrichtung abhängig.
- Bei mittlerem AR (z.B. 1) verdoppelt sich die Konzentration bei einer Windrichtung ab 15° Abweichung von senkrecht auf der Fassade.
- Bei hohem AR (z.B. 3) senkt sich die Konzentration zu einem Drittel bei einer Windrichtung von 30° , steigt dann jedoch wieder an.

Der dritte Parameter ist die Gebäudetiefe T, mit als Basis ein Verhältnis $T/B = 1$.

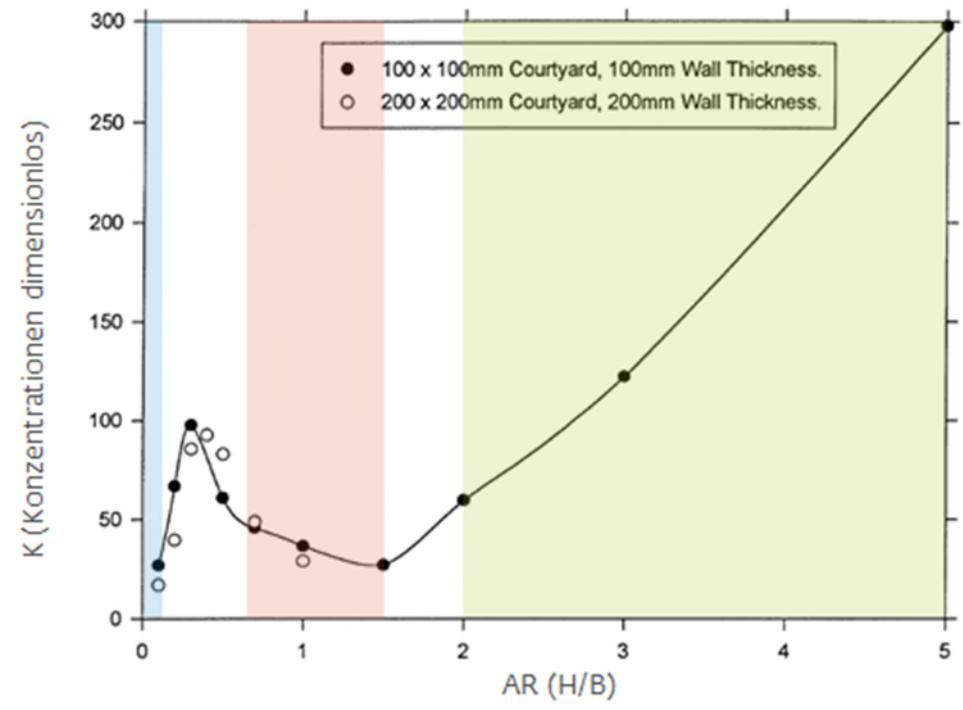
- Bei kleinem AR (z.B. 0.3) ist der Einfluss begrenzt: Bei höheren Tiefen steigen die Konzentrationen leicht.
- Bei mittlerem AR (z.B. 1) verdoppelt sich die Konzentration bei einer Verdoppelung der Gebäudetiefe.

Der vierte Parameter sind mögliche Öffnungen zum Innenhof. Diese Ergebnisse sind sehr dynamisch. Je nach Öffnung und Windrichtung sind die Konzentrationen bis zum Faktor 3 höher oder tiefer als der Referenzfall ohne Öffnungen.

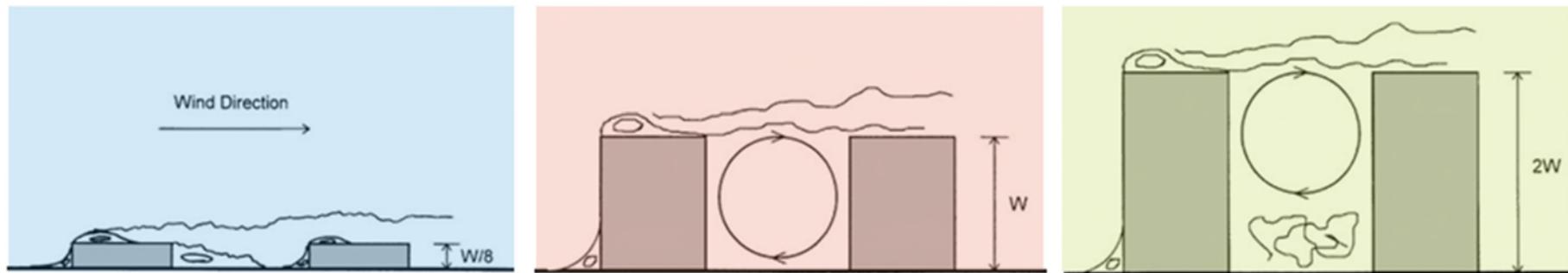
Der fünfte Parameter berücksichtigt thermische Einflüsse. Die folgenden Tendenzen wurden in den Messungen wahrgenommen, obwohl konkretere Aussagen nicht möglich waren.

- Falls unter thermischen Bedingungen die Luft im Innenhof „staut“ (stabile Stratifizierung), können die Konzentrationen schnell zunehmen.
- Bei unstabiler Stratifizierung sinken die Konzentrationen.

Abb. 1: Analyse der Ergebnisse aus Hall (1999)



Einfluss von H/B auf CO₂-Konzentrationen unten im Innenhof (Windrichtung 0°)



Schliesslich wird darauf hingewiesen, dass Innenhöfe grundsätzlich nur begrenzt durchlüftet sind und dass die Konzentrationen in Innenhöfen erheblich höher sein können als ausserhalb. In der Studie von Hall (1999) hat z.B. eine Quelle innerhalb des Innenhofes den äquivalenten Einfluss auf die Luftqualität als ca. 100 identische Quellen ausserhalb des Innenhofes.

Die Ergebnisse dieser Messungen können nicht direkt in der Baupraxis angesetzt werden, da es hier um ein skaliertes Modell geht. Mittels dimensionsloser Kennzahlen kann die Luftströmung um einen Gegenstand charakterisiert werden. Diese Zahlen werden zum Beispiel aus einer charakteristischen Länge und Geschwindigkeit berechnet. Das Modell kann dann hoch oder runter skaliert werden, unter der Bedingung, dass die charakteristische Länge und Geschwindigkeit so angepasst werden, dass die relevante dimensionslose Kennzahl ähnlich ist. In diesem Fall ist das Strömungsfeld des skalierten Modells äquivalent mit dem hochskalierten Fall.

Die Messungen von Hall erfolgten in einem Windtunnel und mit einem Modell mit einer Höhe von 10 bis 500 mm. Die Zuluftgeschwindigkeit bei den Messungen war 1.5 m/s. Mit der dimensionslosen Froude-Zahl können die Randbedingungen von Hall auf die Grösse eines realistischen Gebäudes umgerechnet werden. Mit als charakteristische Länge die Breite des Innenhofes von 100 bis 200 mm, wäre die äquivalente Windgeschwindigkeit für eine Luftströmung bei einem Innenhof mit einer Breite von 10 m 12 bis 18 m/s. Diese Windgeschwindigkeit ist sehr hoch und entspricht nicht einem statistisch relevanten Bereich für die Städte im Schweizer Mittelland.

2.1.2. Bisherige Vollzugspraxis

In der bisherigen Vollzugspraxis wird die Entscheidung aufgrund vom AR gemacht: Bei einem AR-Wert $(H/B) < 1.5$ ist die Fensterlüftung zum Innenhof erlaubt. Die obenstehende Abhandlung zeigt, dass diese Vollzugspraxis einer vereinfachten Interpretation der Ergebnisse entspricht und dass eine Aktualisierung notwendig ist. Tatsächlich wurden hohe Konzentrationen bei einem $AR < 0.5$ gemessen. Ausserdem wird hier der Einfluss von thermisch-geförderter Durchströmung nicht berücksichtigt und ist der gemessene Bereich hinsichtlich Windgeschwindigkeit nicht relevant für die Baupraxis in der Schweiz.

2.1.3. Erkenntnisse aus der Literatur

Als Vorbereitung auf die aktuelle Studie können diese Erkenntnisse erfolgen:

- Der Einfluss von senkrechtem Wind auf quadratische, symmetrische Innenhöfe ohne thermische Einflüsse ist gut beschrieben und erklärt.
- Die thermisch-geförderte Durchströmung von Innenhöfen muss weiter ermittelt werden.
- Das Zusammenspiel (bremsend/fördernd) von Wind und Auftrieb muss weiter ermittelt werden. Dazu ist eine statistische Analyse des Wetterdatensatzes hinsichtlich Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Solarstrahlung sinnvoll.
- Die Berücksichtigung von Öffnungen kann in dieser Studie nicht strukturiert untersucht werden, da das Benehmen zu fallspezifisch ist. Aus diesem Grund werden hauptsächlich Innenhöfe ohne Öffnungen berücksichtigt. Öffnungen begrenzen ausserdem die Schallschutzwirkung eines Innenhofes.

2.2. Methodik

Als Vorgehen wird eine Top-Down Methodik mit drei Stufen vorgestellt.

- Modul 1:
Thermische Studie mit dynamischer Berechnung des Zonenmodells inkl. Analyse des Wetterdatensatzes.
- Modul 2:
Analyse der Luftströmungen und CO₂-Transport bei Wind und Thermik mittels stationären CFD-Simulationen
- Modul 3:
In einem abschliessenden Modul 3 werden die gesammelten Daten analysiert und eine Tabelle für die praktische Handhabung erstellt.

In der Methodik werden zwei Simulationsverfahren angewendet: Das dynamische Zonenmodell und das CFD-Modell. Für ein gutes Verständnis des Vorgehens ist es wichtig, zu unterscheiden, welche Konfigurationen sinnvoll mittels jedem dieser Simulationsverfahren ermittelt werden können. In Tab. 2 werden beide Simulationsverfahren hinsichtlich der relevanten Kriterien verglichen.

2.2.1. Modul 1: Parameterstudie mittels Zonenmodell

In einem ersten Schritt wird mittels eines Zonenmodells (thermisch-dynamischer Gebäudesimulationen) eine Parameterstudie erstellt. Im Zonenmodell wird die Luftzirkulation (Wirbel) innerhalb des Innenhofs aufgrund von Wind nicht ermittelt. Deshalb ist es nur begrenzt sinnvoll in dieser Vorstudie die Geometrie mit einzubeziehen und der Aufwand wird entsprechend auf quadratische Gebäude mit einem unterschiedlichen Aspect Ratio begrenzt.

Es werden 17 quadratische Gebäude mit Innenhof und mit unterschiedlichem AR modelliert. Die Parameter sind die Anzahl Geschosse und die Innenhofbreite. Pro Fassadenlänge von 5 m zum Innenhof entsteht eine Wohneinheit mit je 3 Personen. Die Belegungsdichte und CO₂-Produktion pro Wohneinheit richten sich nach SIA 2024 (MFH) und SIA 180. Mittels eines Tagesprofils hinsichtlich Belegung, CO₂-Produktion und Fensterlüftung wird die dynamische CO₂-Belastung im Innenhof aufgrund von Fensterlüftung modelliert. Die CO₂-Konzentrationen im Innenhof werden über das ganze Jahr berechnet.

In Modul 1 werden die Vorteile des Zonenmodells genutzt:

- Dynamische Berechnung über das ganze Jahr mit Wetterdatensatz nach SIA 2028
- Detaillierte Modellierung der Wohneinheiten mit Belegung, Luftmenge und CO₂-Quellen
- Modellierung der Fensterlüftung unter Berücksichtigung von thermischen Einflüssen und Winddruck
- Modellierung der Luftzirkulation und CO₂-Transport im Innenhof unter Berücksichtigung von thermischen Einflüssen

Die Ziele des Moduls 1 lassen sich zusammenfassen:

- Parameterstudie mit unterschiedlichem AR-Wert
- Analyse von 8760 Datensätze pro Simulationsvariante: Solarstrahlung und Temperatur, Luftwechselrate und CO₂ im Innenhof
- Verteilung von CO₂-Werten im Innenhof
- Kritische Stunden und Konfigurationen abgrenzen
- Thermische Randbedingungen für CFD (Modul 2)
- Analyse Wetterdatensatz hinsichtlich Wind und Solarstrahlung

Die Untersuchung wird mit dem thermischen Simulationsprogramm TAS durchgeführt. TAS ist ein weltweit anerkanntes und mehrfach validiertes (ASHRAE 140-1, EN ISO 13791, VDI 6020) und zertifiziertes (LEED, BREEAM) Gebäudesimulationsprogramm für die Entwicklung nachhaltiger und energieeffizienter Gebäude.

2.2.2. Modul 2: Parameterstudie mittels CFD-Modell

Die Ergebnisse aus Modul 1 fließen in Modul 2 ein. Basierend auf der Parameterstudie mit Zonenmodell wird mittels Strömungssimulationen eine gezielte und abgegrenzte Parameterstudie durchgeführt.

Es werden 24 quadratische Gebäude mit Innenhof und mit unterschiedlichem AR modelliert. Zur Begrenzung der Modellierung wird mit einer Innenhofbreite von 10 m modelliert. 4 Parameter wurden variiert: die Anzahl Geschosse, die Windrichtung, die Windgeschwindigkeit und der Temperaturunterschied zwischen Aussenluft und Oberflächentemperatur im Innenhof.

Die stationäre Luftströmung im Innenhof wird als Momentaufnahme visualisiert. Die Lüftungseffizienz wird berechnet.

Hier werden die Vorteile der Strömungssimulationen ausgenutzt:

- Detaillierte Berechnung von Luftströmungen unter Berücksichtigung von Wind und Temperaturunterschiede
- Berücksichtigung von unterschiedlichen Geometrien

Die Ziele des Moduls 2 lassen sich zusammenfassen:

- Qualitative Analyse und Visualisierung der Luftströmung im Innenhof
- Quantitative Analyse der lokalen Lüftungseffizienz mittels Age of Air Konzept

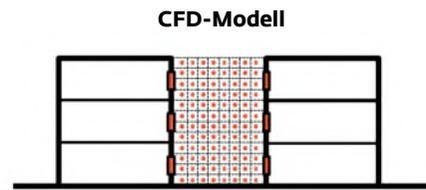
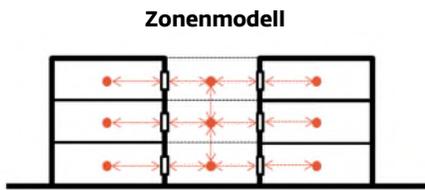
Die Untersuchung wird mit dem CFD Solver OpenFOAM (Version 1712) durchgeführt.

2.2.3. Modul 3: Bewertung und Analyse

Im dritten und abschliessenden Modul werden die Simulationsergebnisse weiter analysiert. So können die nötigen Daten für die Analyse und Synthese in der gefragten Anforderungstabelle gesammelt werden.

Tab. 2: Parametervergleich für Zonenmodell und CFD-Modell – Grundlage für die Top-Down Methodik

Kriterien



Kriterien	Zonenmodell	CFD-Modell
Zeitraum	– Dynamisch inkl. Wetterdatensatz, 1 Jahr, stündliche Werte	– Stationär: Momentaufnahme
Auflösung	– Ein Rechenpunkt (Knoten) pro Zone/Raum	– Bis zu Millionen von Rechenpunkte/Zellen pro Raum
CO ₂ als Schadstoff	– Mehrere Wohneinheiten pro Geschoss – Fenster von Wohneinheit zum Innenhof – Gleichzeitigkeitsprofil pro Wohneinheit – Dynamische CO ₂ -Produktion pro Person – Aktivitätsgrad und Lüftungsbenehmen der Nutzer	– Innenraum der Wohneinheiten wird nicht modelliert – CO ₂ wird nicht modelliert – Die Lüftungseffizienz des Innenhofs wird für jede geometrische Konfiguration bewertet, unabhängig vom dynamischen Nutzerbenehmen
Fensterlüftung	– Dynamische Berechnung von Luftaustausch (zwei Richtungen) durch Fenster aufgrund von Temperaturunterschieden im Innenraum/Außenraum, inkl. Modellierung von Winddruck	– Keine Fensterlüftung
Luftzirkulation innerhalb des Innenhofes	– Luftzirkulation und CO ₂ -Transport aufgrund von thermischem Auftrieb – Keine Modellierung von Luftbewegung durch Wind	– Luftzirkulation aufgrund von Wind und Temperaturunterschieden, mit Berücksichtigung von Turbulenz und Viskosität
Gebäudeform (Geschosse, quadratisch/rechteckig, Proportionen)	– Einfluss begrenzt	– Kritische Parameter für die Berechnung der Luftzirkulation
Form Innenhof (Breite, Höhe, Form)	– Höhe und Fassadenfläche zu Innenhofvolumen relevant – Einfluss begrenzt	– Kritische Parameter für die Berechnung der Luftzirkulation
Materialisierung	– Absorption der Solarstrahlung bestimmt die Oberflächentemperatur und somit die thermisch bedingte Luftzirkulation im Innenhof	– Berücksichtigung mittels Übernahme der thermischen Werte aus Zonenmodell als Randbedingung

3. Modul 1: Parameterstudie mittels Zonenmodell

In einer Parameterstudie werden die CO₂-Werte im Innenhof unter thermisch-dynamischen Bedingungen und über das ganze Jahr berechnet.

3.1. Simulationsvarianten nach Geometrie

Es werden 17 Fälle mit einer unterschiedlichen Geometrie modelliert und berechnet. Die Fälle wurden mit der kantonalen Fachstelle Lärmschutz Zürich abgeklärt und vereinbart. In Abb. 2 sind die Varianten rot markiert.

Für die Abgrenzung der Varianten wurden die Parameter nach Tab. 3 berücksichtigt: AR (H/B), Innenhofbreite B und Anzahl Geschosse. Zunächst wurde die quantitative Abgrenzung praxisbezogen betrachtet (blaues Dreieck in Abb. 2). Im zweiten Schritt wurden zusätzliche Varianten mit tieferer Innenhofbreite oder > 8 Geschosse hinzugefügt, indem eine gleichmässige Verteilung der AR-Werte erreicht wird.

Tab. 3: Parameterbereich für die Geometrievarianten

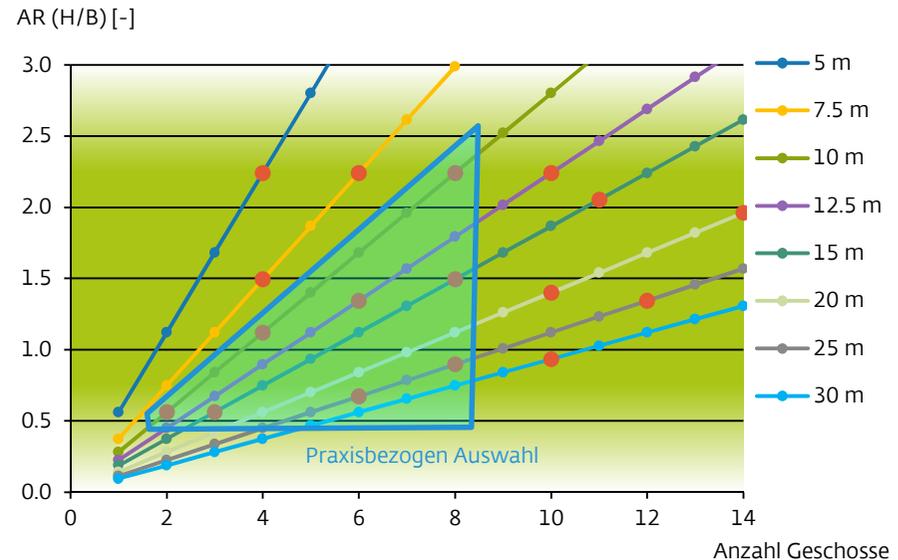
Parameter	Bereich praxisbezogen	Bereich für Parameterstudie
AR	Bei AR > 2.5 wird die architektonische Qualität beeinträchtigt.	0.5 bis 2.5
Innenhofbreite	10 – 30 m	5 bis 30 m
Anzahl Geschosse	2 bis 8 (Hochhausgrenze)	2 bis 14

Die Geschosshöhe ist mit 2.8 m hinsichtlich CO₂-Ausstosses eher konservativ angesetzt. Je höher die Geschosshöhe, desto weniger Wohneinheiten entstehen bei einer bestimmten Gebäudehöhe und desto tiefer ist die CO₂-Belastung des Innenhofes

Es wurden nur einfache quadratische Geometrien berücksichtigt. Weitere geometrische Parameter, wie Form vom Innenhof, Gebäudetiefe, Dachform, Balkone, usw. sind mittels eines Zonenmodells nicht sinnvoll zu berücksichtigen. Der

Einfluss von solchen Parametern muss mittels eines Strömungsmodells (CFD) ermittelt werden. Hier ist das Zusammenspiel mit dem Windklima ausschlaggebend.

Abb. 2: Verteilung der Simulationsvarianten nach AR, Anzahl Geschosse, mit einer Kurve pro Innenhofbreite B



3.2. Zonierung

Alle 5 m Fassadenlänge zum Innenhof wird eine Wohneinheit (WE) vorgesehen. Die Zonierung ist in Abb. 3 ersichtlich.

Die Wohneinheiten wurden schematisch modelliert und entsprechen nicht der spezifischen Raumfläche pro Person nach SIA 2024. Im Simulationsmodell liegt die Fläche pro Wohneinheit zwischen 25 und 45 m². Diese Vereinfachung hat keinen Einfluss auf die Erkenntnisse.

Der Innenhof wurde mit 9 Zonen pro Geschoss modelliert.

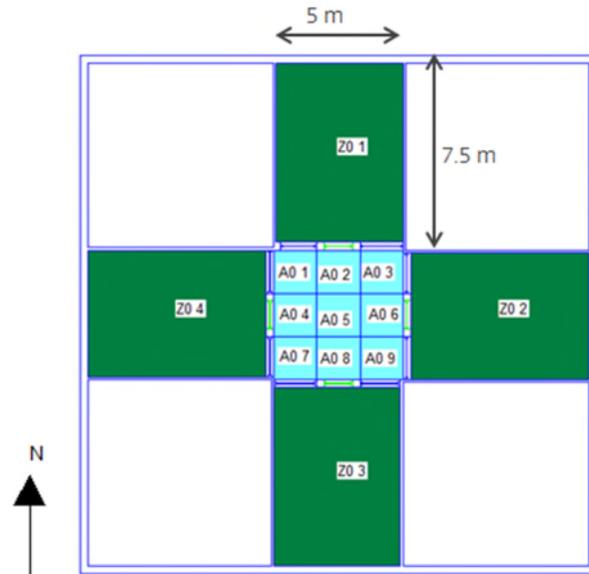
In der untenstehenden Tabelle werden die Varianten aufgelistet. In der letzten Spalte ist die Abkürzung/Code für jeden Einzelfall ersichtlich.

Tab. 4: Übersicht der Geometrien

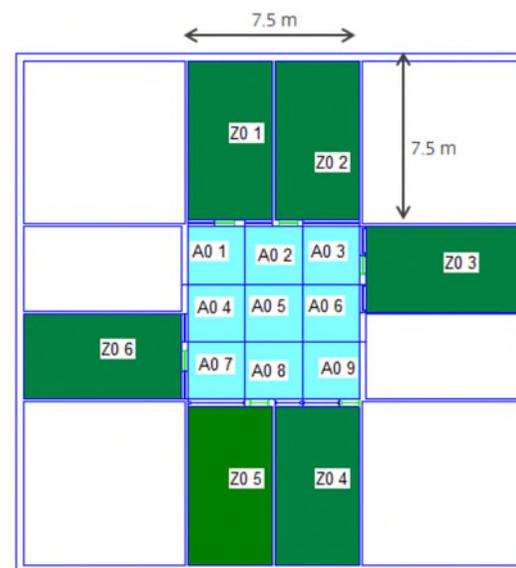
Nr.	Breite Innenhof B (m)	Tiefe (m)	Höhe H (m)	Anzahl Geschosse	AR (H/B)	Wohneinheiten pro Geschoss	Code
1	5	7.5	11.2	4	2.24	4	B050_G04_2.2
2	7.5	7.5	11.2	4	1.49	6	B075_G04_1.5
3	7.5	7.5	16.8	6	2.24	6	B075_G06_2.2
4	10	10	5.6	2	0.56	8	B100_G02_0.6
5	10	10	11.2	4	1.12	8	B100_G04_1.1
6	10	10	22.4	8	2.24	8	B100_G08_2.2
7	12.5	10	16.8	6	1.34	10	B125_G06_1.3
8	12.5	10	28	10	2.24	10	B125_G10_2.2
9	15	10	8.6	3	0.56	12	B150_G03_0.6
10	15	15	22.4	8	1.49	12	B150_G08_1.5
11	15	15	33.6	12	2.24	12	B150_G12_2.2
12	20	15	28	10	1.40	16	B200_G10_1.4
13	20	15	39.2	14	1.96	16	B200_G14_2
14	25	15	16.8	6	0.67	20	B250_G06_0.7
15	25	15	22.4	8	0.90	20	B250_G08_0.9
16	25	15	33.6	12	1.34	20	B250_G12_1.3
17	30	15	28	10	0.93	24	B300_G10_0.9

Abb. 3: Zonierung

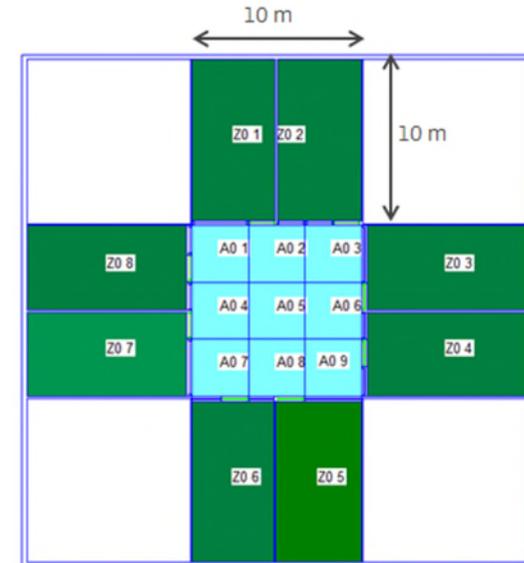
Fall 1: Breite 5 m , 4 Wohneinheiten/Geschoss



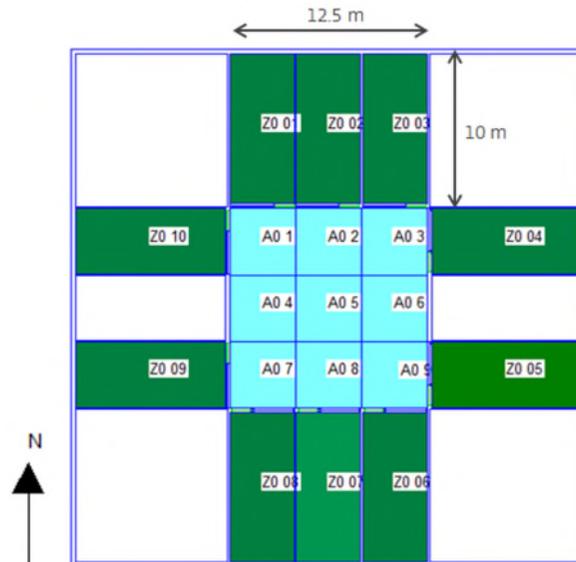
Fall 2/3: Breite 7.5 m, 6 Wohneinheiten/Geschoss



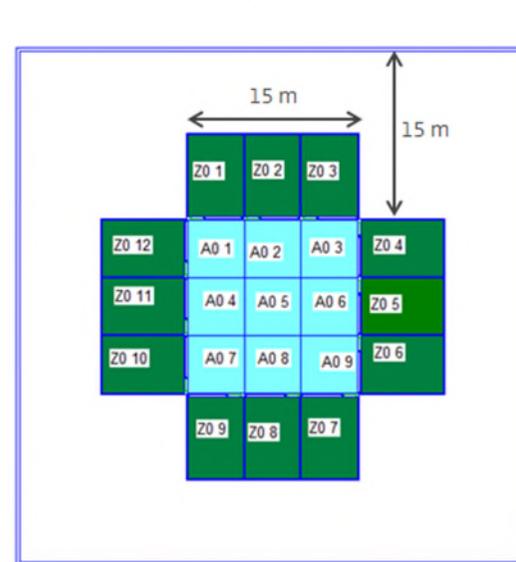
Fall 4/5/6: Breite 10 m, 8 Wohneinheiten/Geschoss



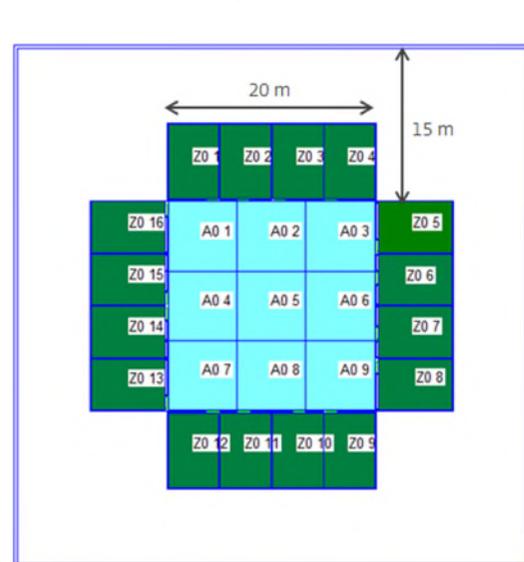
Fall 7/8: Breite 12.5 m, 10 Wohneinheiten/Geschoss



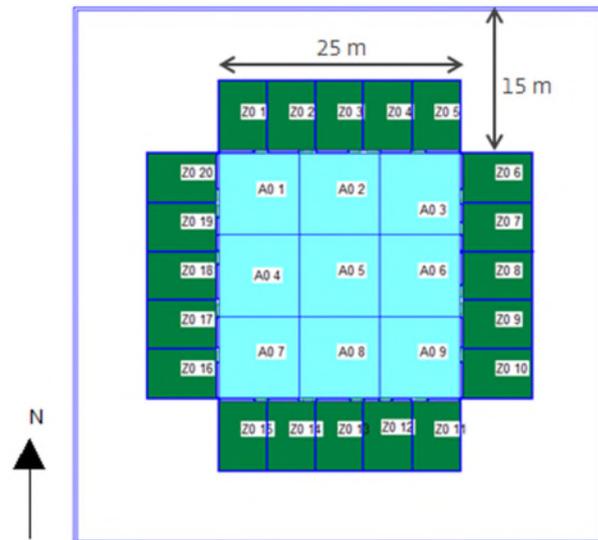
Fall 9/10/11: Breite 15 m, 12 Wohneinheiten/Geschoss



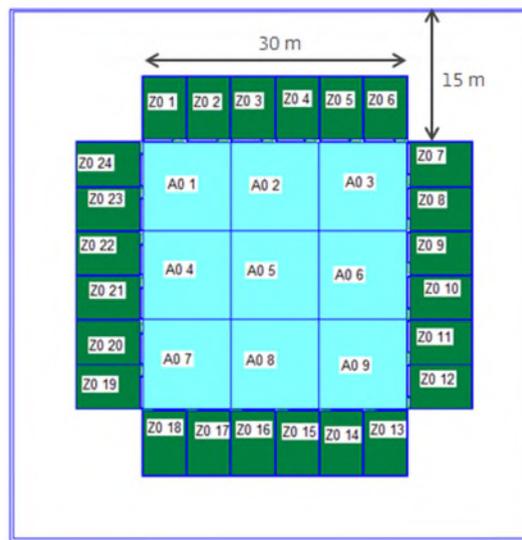
Fall 12/13: Breite 20 m, 16 Wohneinheiten/Geschoss



Fall 14/15/16: Breite 25 m, 20 Wohneinheiten/Geschoss



Fall 17: Breite 30 m, 24 Wohneinheiten/Geschoss

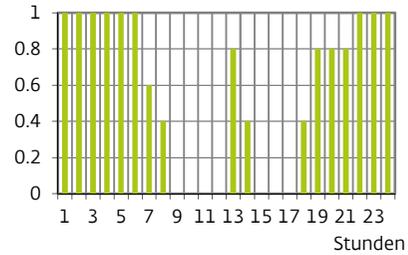


3.3. Nutzung

Die Nutzung wurde gemäss SIA 2024 für Mehrfamilienhäuser (MFH) angesetzt.

Abb. 4: Nutzung MFH

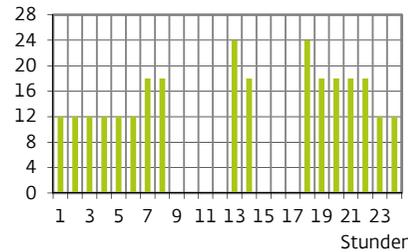
Anwesenheit Personen



Fensterlüftung



CO₂-Produktion in l/(hP)



3.3.1. Personen

Die Anwesenheit von Personen bestimmt den CO₂-Ausstoss und die Option zur Fensterlüftung. Es werden 3 Personen pro Wohneinheit berücksichtigt.

3.3.2. Fensterlüftung

Jede Wohneinheit hat ein Lüftungsfenster mit einer Grösse von 5 % der Raumfläche und entspricht so den Anforderungen für Fensterlüftung nach SIA 382/1. Das Fenster wird zu den Zeiten im Profil geöffnet (Stosslüftung). Diese Situation entspricht dem „Worst Case“, indem alle Nutzer gleichzeitig die Fenster öffnen.

Ein alternativer Ansatz mit Dauerlüftung wurde ebenfalls kurz berücksichtigt (Abschnitt 4.5).

Für die Wohnbereiche wird eine übliche Infiltration des 0.1-fachen Raumvolumens über Fugen und Undichtheiten angenommen.

3.3.3. CO₂-Produktion

Die Produktion von CO₂ ist von der Tätigkeit abhängig und wurde gemäss Richtwerten in SIA 180 angesetzt.

Die Wohneinheiten wurden schematisch modelliert. Die CO₂-Produktion entspricht dem absoluten Massenstrom an CO₂ für einen Haushalt mit 3 Personen.

In der Auswertung wird die äquivalente Konzentration bei einer Belegungsichte von 30 m²/P berechnet und dargestellt.

Die Wohnungen werden auf 20-27 °C konditioniert.

3.4. Standort und Wetterdaten

3.4.1. Wetterdaten

Der Standort des Gebäudes ist Zürich. Es wurde mit dem Wetterdatensatz gemäss SIA 2028 „Zürich SMA Normal“ simuliert.

3.4.2. Simulationsperiode

Es wird ein ganzes Jahr betrachtet. Die Auswertung erfolgt in Stundenschritten.

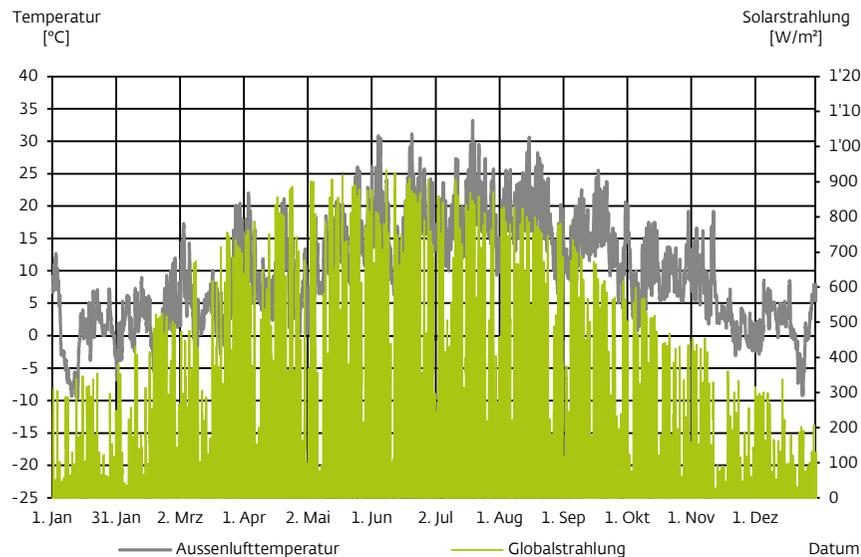
Tab. 5: Standort und Klima

Kennwert	
Standort Studie	Zürich
Klimadatensatz	SIA 2028 Zürich SMA Normal
Simulationsperiode	1 Jahr, Auswertung in Stundenschritte

Tab. 6: Wetterdatensatz für SIA 2028 Zürich SMA - Normal

Kennwert	Einheit	Min.	Mittel	Max.	Tag Min.	Tag Max.
Lufttemperatur	°C	-9.8	9.3	33.2	20. Februar	20. Juli
Wind	m/s	0	2.4	17.7	9. März	2. Januar

Abb. 5: Jahresverlauf des Aussenklimas (SIA 2028 – Zürich SMA - Normal)



3.5. Anforderungen

3.5.1. Grenzwert CO₂ für das Zonenmodell

Für diese Ermittlung wird ein quantitativer Grenzwert für die CO₂-Konzentration im Innenhof zwecks Fensterlüftung benötigt. In der Literatur und in den aktuellen Normen wurden keine Anforderungen hinsichtlich CO₂-Konzentration der Aussenluft für die Lüftung von Gebäuden gefunden.

Alternativ können die Anforderungen für Umluft betrachtet werden. Umluft ist die Wiederverwendung der Abluft. Grundsätzlich kann Luft aus Aufenthaltsräumen, deren Hauptemissionsquellen der menschliche Stoffwechsel, Baustoffe und das Bauwerk sind, als Zuluft verwendet werden. Diese Beschreibung entspricht der Kategorie ETA 1 nach DIN EN 13779. Für die Umluft wurden jedoch keine quantitativen Grenzwerte angegeben.

Nach DIN 13779 werden Kategorien für die Luftqualität im Innenraum definiert. Massgebend ist der CO₂-Gehalt über dem Gehalt in der Aussenluft. Die beste Kategorie IDA 1 erlaubt bis 400 ppm über der Aussenluft, oder absolut eine CO₂-Konzentration von 400 bis 800 ppm. Abluft aus solchen Räumen ist grundsätzlich für Umluft geeignet. Aufgrund dieser Klassifizierung wird in dieser Ermittlung für die Fensterlüftung eine maximale CO₂-Konzentration im Innenhof von 600 ppm als Mittelwert angestrebt.

Tab. 7: Bewertung der Luftqualität im Innenraum nach DIN 13779

Tabelle A.10 — CO₂-Gehalt in Räumen

Kategorie	CO ₂ -Gehalt über dem Gehalt in der Aussenluft, in ppm	
	Üblicher Bereich	Standardwert
IDA 1	≤ 400	350
IDA 2	400 – 600	500
IDA 3	600 – 1 000	800
IDA 4	> 1 000	1 200

3.6. Auswertungsebene

17 Geometrien wurden über das ganze Jahr simuliert. Die Fensterlüftung erfolgt dynamisch unter Berücksichtigung der Nutzung. Die Aussenluftmenge ist variabel und abhängig von der Fensteröffnung, den Temperaturunterschieden zwischen Innen und Aussen und den Winddrücken. Die Reinfiltration von CO₂ mittels kontaminierter Aussenluft wird berücksichtigt.

Die Auswertung erfolgt in den folgenden Schritten.

Tab. 8: Auswertungsstufen des Zonenmodells

Nr.	Lage	Zeitraum	Parameter	Ziel
4.1	Innenraum der Wohneinheiten	1 Wintertag 1 Sommertag	Aussenluftmengen WE CO ₂ -Konzentrationen	Kontrolle der angesetzten Randbedingungen hinsichtlich Nutzung, CO ₂ als Schadstoff und Fensterlüftung
	Zentrale Zonen des Innenhofs (A5)	1 Stunde Winter 1 Stunde Sommer		Vergleich der Fälle und Einfluss von AR bei der CO ₂ -Verteilung im Innenhof über die Höhe
4.2	Zentrale + Eckzonen des Innenhofs (A1, A3, A5, A7, A9)	Mittelwert bei FL Winter Mittelwert bei FL Sommer	CO ₂ -Konzentrationen	Vergleich Jahreszeit und Ausrichtung Einfluss AR
	Zentrale + Süd-Fassade des Innenhofs (A2, A5)	Jahresverteilung		Dynamische Verteilung über das Jahr Einfluss AR
	Mittelwert EG und 7. OG des Innenhofs (A1-A9)	1 Wintertag 1 Sommertag		Dynamischer Verlauf über einen Tag Vergleich EG und 7. OG, Einfluss AR
4.3	Mittelwert EG des Innenhofs (A1-A9)	3 Std./Tag mit FL, ganze Jahr Stündliche Werte, ganze Jahr	CO ₂ -Konzentrationen Aussenlufttemperatur	Zusammenhang mit der Aussenlufttemperatur Thermischer Einfluss der Fensterlüftung
4.4	Gesamter Innenhof	/	CO ₂ -Konzentrationen Aussenlufttemperatur	Analyse der typischen thermischen Konfigurationen Begründung der Ergebnisse
4.5	Zentrale Zonen des Innenhofs (A5)	1 Stunde Winter/Sommer Jahresverteilung	CO ₂ -Konzentrationen	Einfluss von weiteren Parametern: Durchfahrt, Begrünung und Dauerlüftung
	Mittelwert EG und 7. OG des Innenhofs (A1-A9)	Stündliche Werte, ganze Jahr		

4. Modul 1: Resultate des Zonenmodells

Zur Auswertung der Ergebnisse der dynamischen Gebäudesimulation wurden für die Varianten verschiedene Kennwerte untersucht und dargestellt.

4.1. Lüftung und CO₂-Konzentrationen im Innenraum

Zur Kontrolle wurde für jede Variante eine Wohneinheit (Z0 1) im EG an einem Tag im Februar und im August ausgewertet. Als Beispiel ist der Fall mit Innenhofbreite 12.5 m und 6 Geschosse (AR = 1.34) ersichtlich.

Die CO₂-Konzentration entspricht einem realistischen Verlauf. Die Stosslüftung über die Fenster ergibt aufgrund der höheren Temperaturunterschiede zwischen Innen- und Aussenraum höhere Luftmengen im Winter als im Sommer. Die Luftmenge ist fast immer höher als die von SIA 180 geforderte, personsgebundene minimale Luftmenge von 30 m³/(hP).

Abb. 6: Verlauf CO₂ und Fensterlüftung – B 12.5 m, 6 Geschosse, Zone Z0 1 – 15. Februar

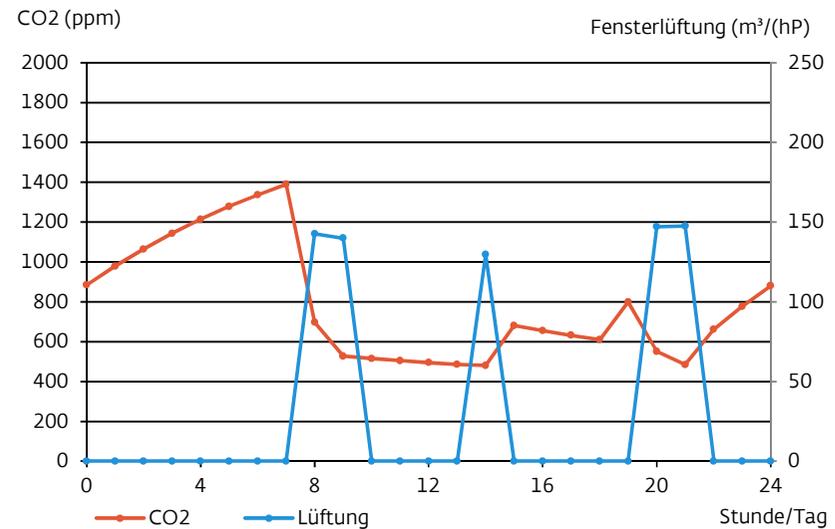
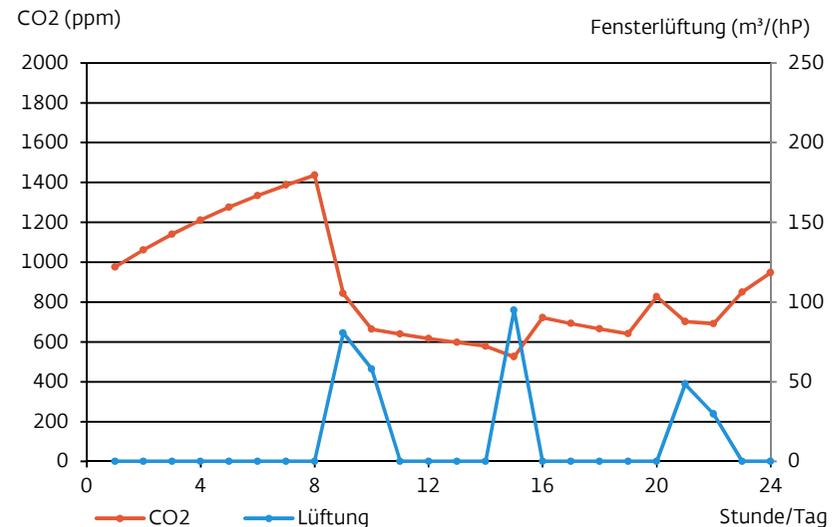


Abb. 7: Verlauf CO₂ und Fensterlüftung – B 12.5 m, 6 Geschosse, Zone Z0 1 – 21. Juni



4.2. CO₂-Verteilung im Innenhof

4.2.1. Vertikaler Verlauf: kritische Stunde im Sommer und im Winter

Der Verlauf der CO₂-Konzentrationen über die Höhe im Innenhof wird in Abb. 8 bis Abb. 13 dargestellt. Die Abkürzungen der Fälle sind in Tab. 4 zu finden.

Als Beispiel wird der vertikale Verlauf, zentral im Innenhof, für zwei Stunden im Jahr dargestellt. Die 17 Fälle werden an diesen zwei Uhrzeiten verglichen. Als Stichprobe wurden die folgenden zwei Stunden gewählt:

- Wintertag: 15. Februar 7 Uhr
- Sommertag: 21. Juni 19 Uhr

Für den Vergleich wurde die Höhe relativ dargestellt: H/H_{\max} . So können die Fälle mit einer unterschiedlichen Anzahl Geschosse direkt verglichen werden. Im unteren Bereich ist zu beachten, dass aufgrund einer mangelhaften Durchlüftung hier erhöhte CO₂-Werte auftreten könnten. Der obere Bereich ist grundsätzlich weniger kritisch einzustufen.

Bei $AR < 1$ bleibt die CO₂-Konzentration unter 550 ppm (Abb. 8, Abb. 9). Je tiefer AR und je höher die Innenhofbreite B, desto kleiner ist der Unterschied zwischen oben und unten im Innenhof. Im untersten Geschoss liegen die Werte nur ca. 50 ppm höher als im obersten Geschoss. Der Grenzwert von 600 ppm wird sehr gut eingehalten. Im obersten Geschoss liegen die CO₂-Werte nur knapp über dem Umgebungswert von 400 ppm.

Bei AR zwischen 1 und 1.5 liegen die Werte über die ganze Innenhofhöhe etwas höher (Abb. 10, Abb. 11). Der Grenzwert von 600 ppm wird an dieser Uhrzeit am 15. Februar knapp eingehalten, am 21. Juni jedoch nicht. Im untersten Geschoss liegen die Werte bis 400 ppm höher als im obersten Geschoss. Vor allem die Fälle mit mehr als 6 Geschossen sind kritisch, trotz $AR < 1.5$.

Bei $AR > 2$ liegen die Werte, wie erwartet, noch höher (Abb. 12, Abb. 13). Der Grenzwert von 600 ppm wird fast überall überschritten, auch in den obersten Geschossen. An der kritischen Uhrzeit am 21. Juni wird sogar fast 1100 ppm erreicht (B150_G12 im Juni). Im untersten Geschoss liegen die Werte 400 bis 600 ppm höher als im obersten Geschoss. Hier sind alle Fälle als kritisch einzustufen, auch bei nur 4 bis 6 Geschosse.

Grundsätzlich ist der Sommer als kritischer zu bewerten: Obwohl die CO₂-Belastung aufgrund der Fensterlüftung um 19 Uhr weniger hoch ist als um 7 Uhr, entsteht hier punktuell eine sehr schlechte Durchlüftung und eine sehr hohe CO₂-Konzentration im unteren Bereich.

Im nächsten Abschnitt wird die Analyse auf das ganze Jahr bezogen.

AR < 1

Abb. 8: CO₂-Verlauf über die Höhe – 15. Februar, 7 Uhr – AR < 1

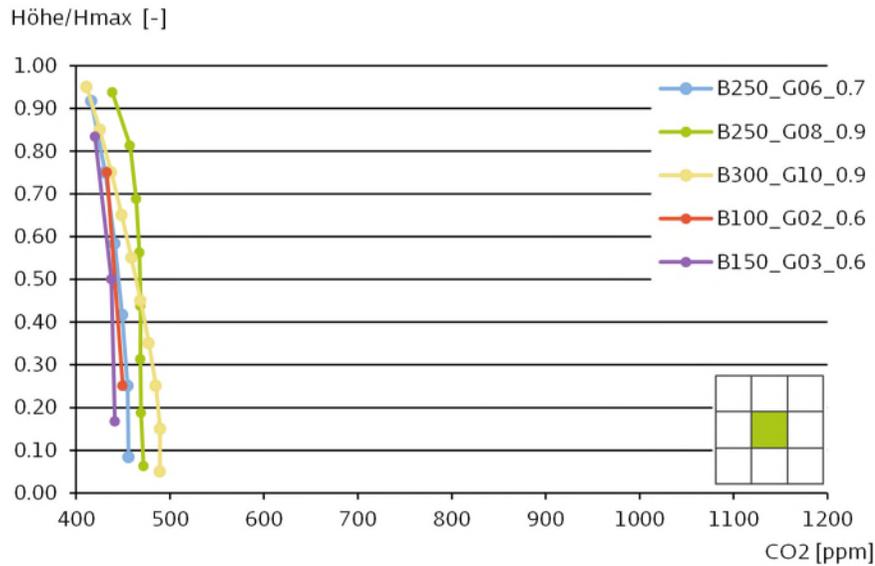
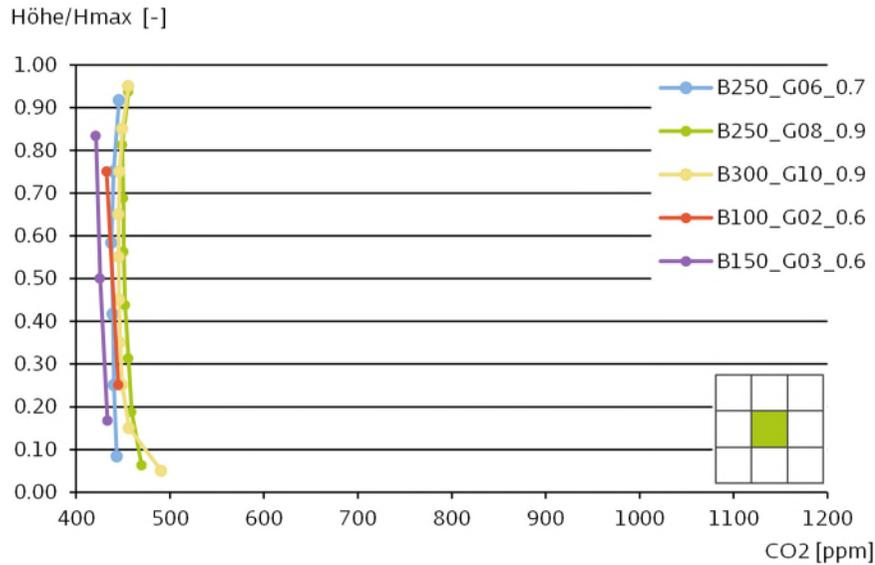


Abb. 9: CO₂-Verlauf über die Höhe – 21. Juni, 19 Uhr – AR < 1



1 < AR ≤ 1.5

Abb. 10: CO₂-Verlauf über die Höhe – 15. Februar, 7 Uhr – 1 < AR ≤ 1.5

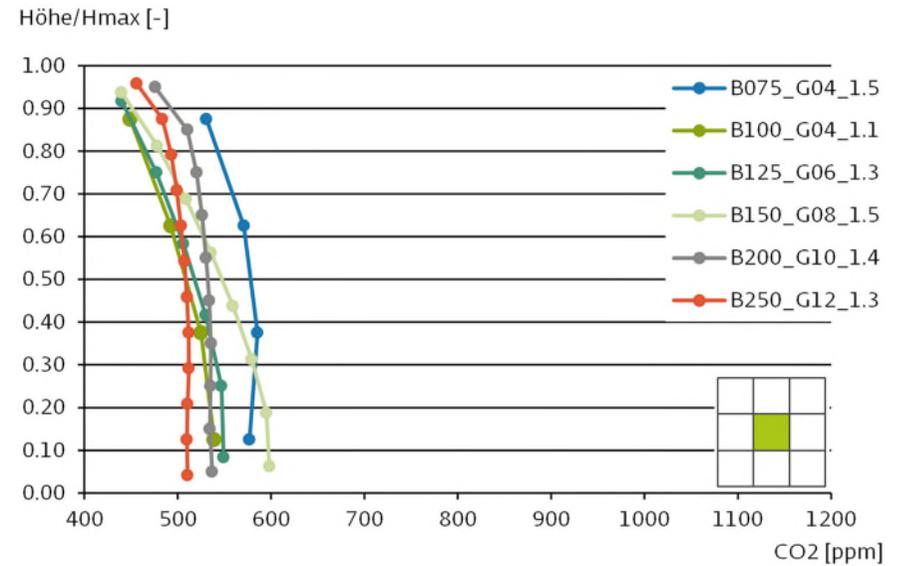
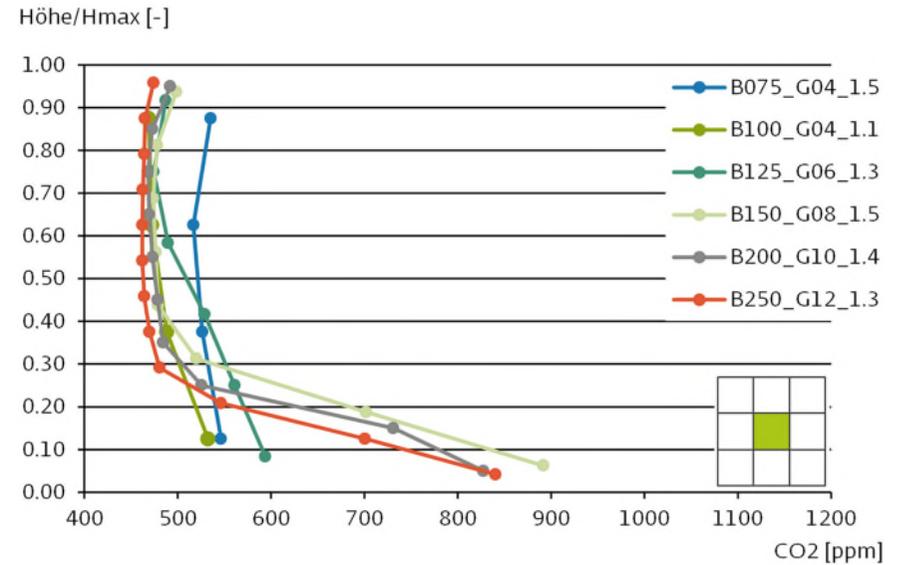


Abb. 11: CO₂-Verlauf über die Höhe – 21. Juni, 19 Uhr – 1 < AR ≤ 1.5



AR ≥ 2

Abb. 12: CO₂-Verlauf über die Höhe – 15. Februar, 7 Uhr – AR ≥ 2

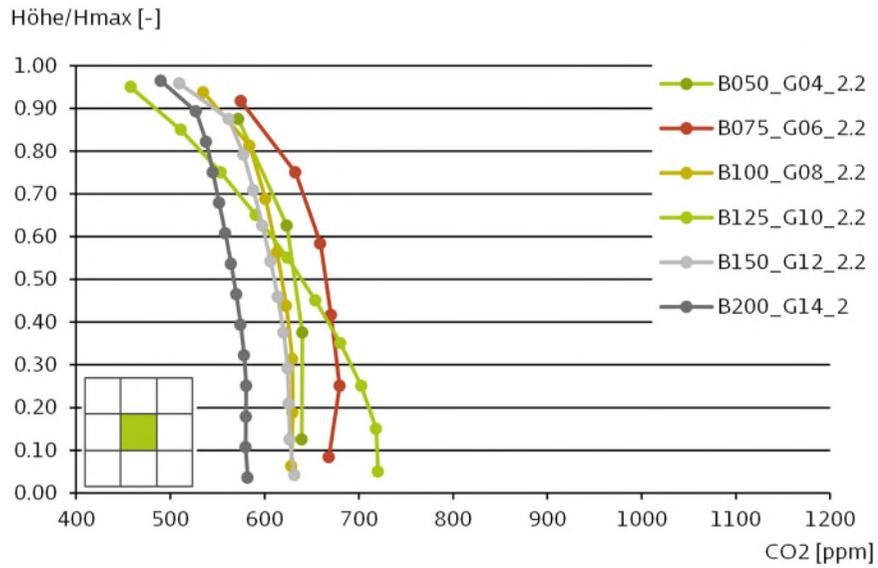
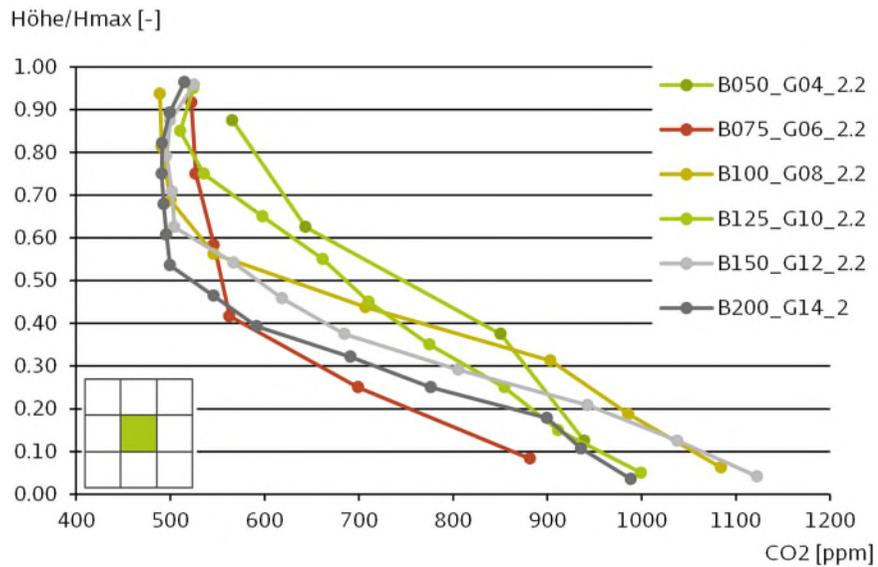


Abb. 13: CO₂-Verlauf über die Höhe – 21. Juni, 19 Uhr – AR ≥ 2



4.2.2. Vergleich Jahreszeit und Ausrichtung

In diesem Abschnitt wurden die Stunden mit Fensterlüftung separat nach den Jahreszeiten Winter und Sommer betrachtet. Es wurde ermittelt, in welcher Jahreszeit die Luftqualität mehr beeinträchtigt wird.

Der Mittelwert über die Sommer- und Winterperiode der CO₂-Konzentration in den Innenhofzonen wurde berechnet. Pro Geschoss (horizontale Ebene) wurden 9 Zonen im Innenhof modelliert (Abb. 3); davon werden hier die 4 Eckzonen (A1, A3, A7, A9) und die zentrale Zone (A5) dargestellt. So wird auch der Unterschied nach der Ausrichtung ersichtlich.

Die Grafiken zeigen drei Fallbeispiele, die je einer AR-Gruppe entsprechen:

- AR < 1 → Fallbeispiel: Breite 30 m, 10 Geschosse
- 1 < AR ≤ 1.5 → Fallbeispiel: Breite 15 m, 8 Geschosse
- 2 ≥ AR → Fallbeispiel: Breite 10 m, 8 Geschosse

Für die 3 Fälle sind die Mittelwerte über den Sommer höher als im Winter. Je grösser AR, desto ausgeprägter ist der Unterschied.

- Für den Fall AR < 1 ist der Unterschied Sommer/Winter typisch nur 10 bis 20 ppm.
- Beim Fall AR ≥ 2 liegt der Unterschied bei 40 bis 60 ppm.

Auffälliger jedoch sind die Unterschiede innerhalb einer horizontalen Ebene. In allen 3 Fällen sind die Mittelwerte in den Zonen 1+3 höher als in der zentralen Zone 5 und in den Zonen 7+9. Die Seite 1+3 vom Innenhof ist südlich ausgerichtet und zeigt eine grössere thermische Aufheizung. Aufgrund des lokalen Auftriebs entsteht eine Konvektionszelle im Innenhof. Frischluft fliesst an der Nord-Seite runter und kontaminierte Luft fliesst an der Süd-Seite hoch. Der Effekt ist genügend ausgeprägt, dass in den Mittelwerten der Unterschied klar wahrnehmbar ist.

Bei AR ≤ 1.5 (B ≥ 15 m) werden die tiefsten CO₂-Werten in der zentralen Zone 5 gezeigt. Die Fassadenzonen werden direkt über die Fensterlüftung mit CO₂ belastet. Das Volumen des Innenhofs ist noch genügend gross für die Verdünnung der kontaminierten Zuluft. Je enger der Innenhof, desto weniger Luftpuffer ist für die Verdünnung verfügbar, bei gleicher Menge Wohneinheiten pro Fassadenlänge. Hier ist auch zentral im Innenhof die Luftqualität beeinträchtigt.

AR < 1 (B30_G10)

Abb. 14: CO₂-Verlauf über die Höhe – Mittelwert bei Fensterlüftung im WINTER – AR < 1
Höhe/Hmax [-]

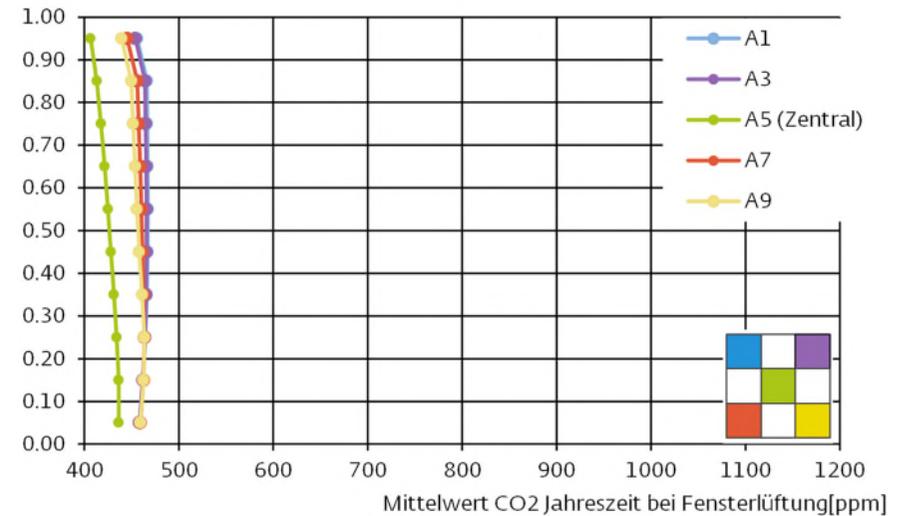
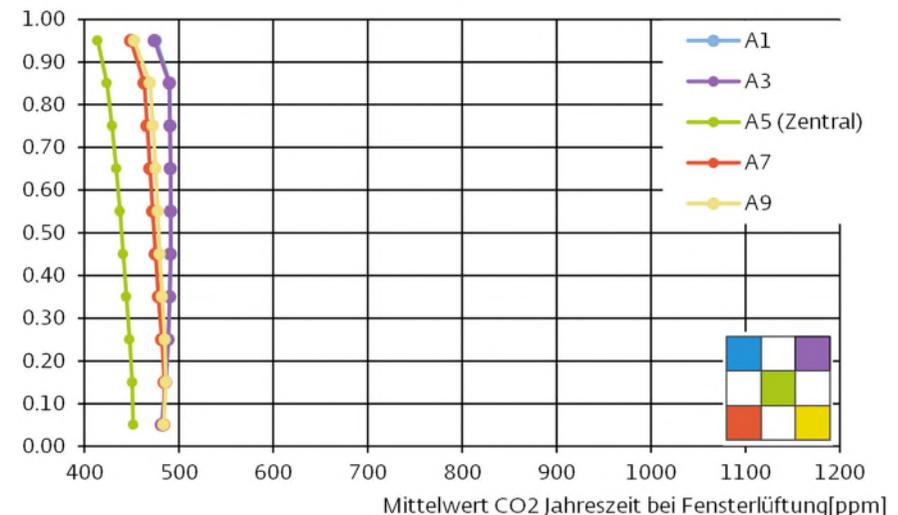
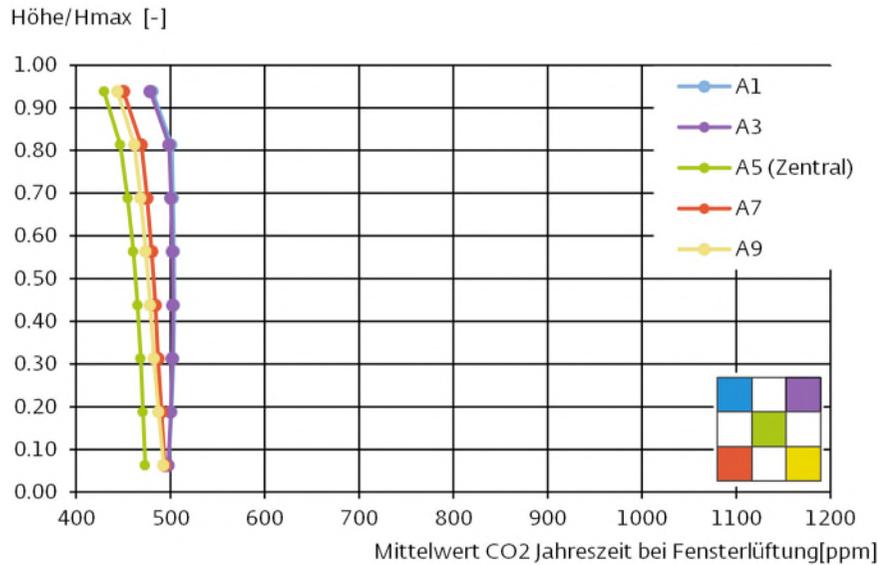


Abb. 15: CO₂-Verlauf über die Höhe – Mittelwert bei Fensterlüftung im SOMMER – AR < 1
Höhe/Hmax [-]



1 < AR ≤ 1.5 (B15_G08)

Abb. 16: CO₂-Verlauf über die Höhe – Mittelwert bei Fensterlüftung im WINTER – AR = 1.5



AR ≥ 2.0 (B10_G08)

Abb. 18: CO₂-Verlauf über die Höhe – Mittelwert bei Fensterlüftung im WINTER – AR = 2.0

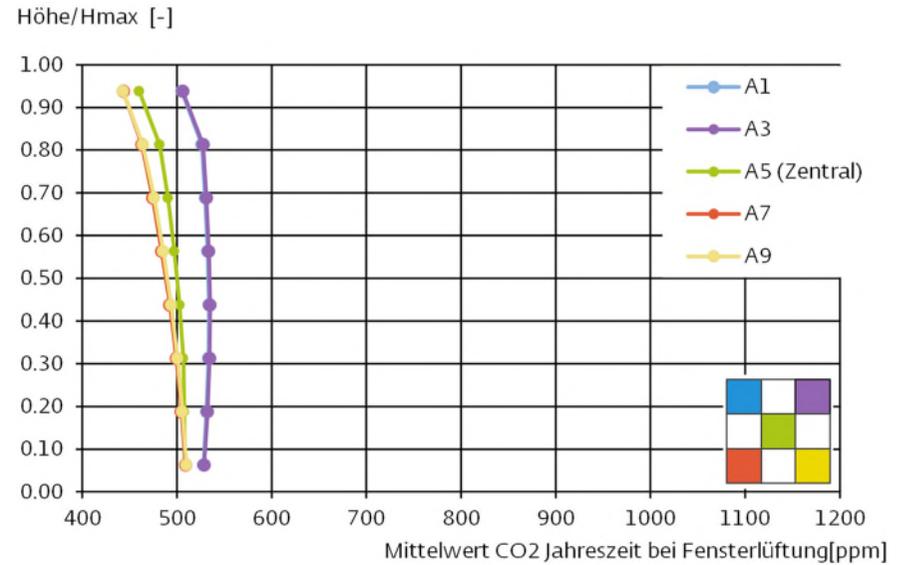


Abb. 17: CO₂-Verlauf über die Höhe – Mittelwert bei Fensterlüftung im SOMMER – AR = 1.5

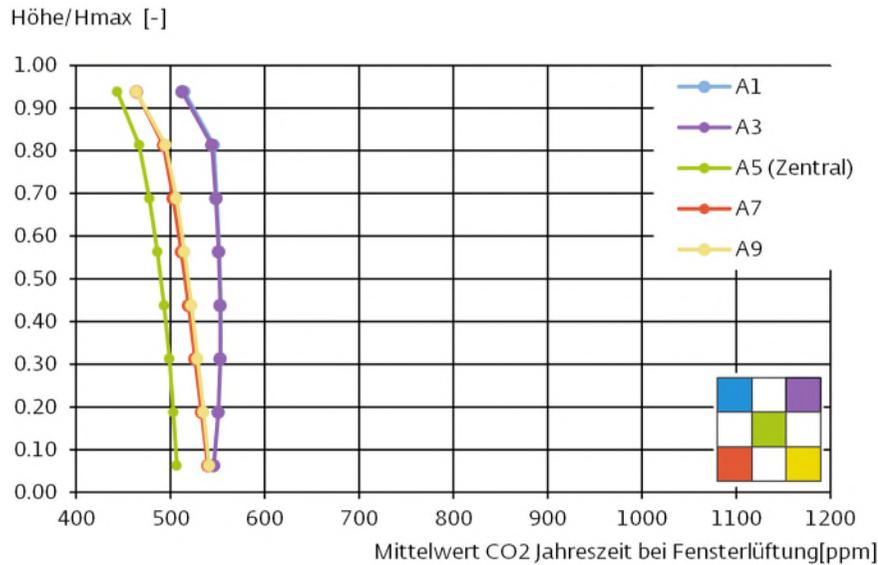
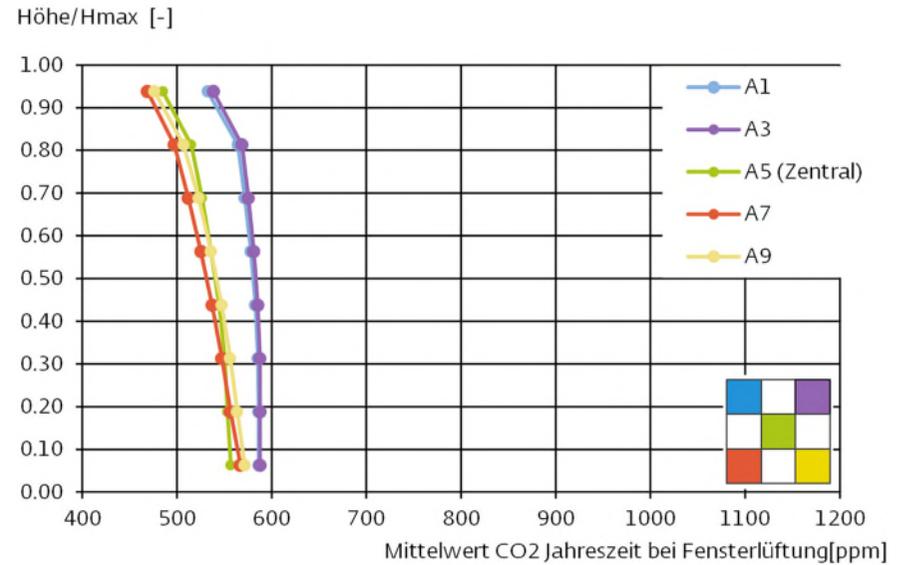


Abb. 19: CO₂-Verlauf über die Höhe – Mittelwert bei Fensterlüftung im SOMMER – AR = 2.0



4.2.3. Vertikaler Verlauf: Jahresverteilung

Die CO₂-Konzentrationen zentral im Innenhof (Zone A 5) und an der kritischeren Südfassade (Zone A 2) wurden für jedes Geschoss über das ganze Jahr ausgewertet. Die Werte werden für jede Stunde ausgewiesen. Hieraus ergibt sich eine Jahresverteilung der CO₂-Konzentrationen pro Geschoss.

Die Grafiken zeigen die Verteilung der Konzentrationen für 3 Fälle und während den Stunden mit Fensterlüftung: Nur die Stunden mit Fensterlüftung (5 Std./Tag, Profil nach Abb. 4) werden berücksichtigt. Die 3 Beispiele entsprechen je einer AR-Gruppe:

- AR < 1 → Fallbeispiel: Breite 30 m, 10 Geschosse
- 1 < AR ≤ 1.5 → Fallbeispiel: Breite 15 m, 8 Geschosse
- 2 ≥ AR → Fallbeispiel: Breite 10 m, 8 Geschosse

Die Legende zur Grafiken:

- Grau = Minimumwert bis Mittelwert über das Jahr während Fensterlüftung
- Grün = Mittelwert bis sub-Maximum über das Jahr während Fensterlüftung
- Grün umrandet = 10 extremste Werte (sub-Maximum bis Maximum)

Die CO₂-Konzentrationen können bis über 1000 ppm steigen, vor allem im unteren Bereich des Innenhofs. Die sehr hohen Werte treten jedoch nur begrenzt (< 1 % der Stunden mit Fensterlüftung) und nur im unteren Bereich auf.

- Bei AR < 1 wird der Grenzwert von 600 ppm das ganze Jahr und in jedem Geschoss sehr gut eingehalten.
- Bei AR ≤ 1.5 wird der Grenzwert in den unteren Geschossen regelmässig überschritten. Die Werte im EG können sehr hoch werden.
- Bei AR > 2 wird der Grenzwert in jedem Geschoss überschritten. Die Werte in den untersten 3-4 Geschosse können sehr hoch werden.

Die kritischen Zeitpunkte sind um 7 und um 19 Uhr:

- Morgens: Das über Nacht im Innenraum gesammelte CO₂ strömt über die Fensterlüftung in den Innenhof.
- Abends: Bei hohen Aussenlufttemperaturen im Sommer kann sich die Luft im unteren Bereich des Innenhofs stauen und die Luftwechselrate ist begrenzt.

Die Abhängigkeit zur Aussenlufttemperatur wird in Abschnitt 4.3.1 dargestellt.

AR < 1

Abb. 20: CO₂-Verlauf über die Höhe – AR < 1 (Beispiel: B 30 m, 10 Geschosse) – Süd-Fassade

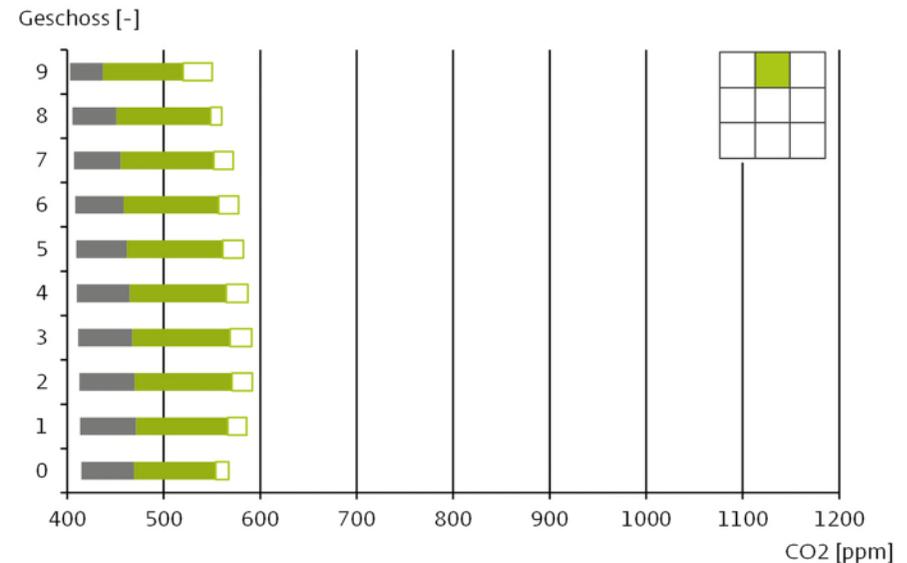
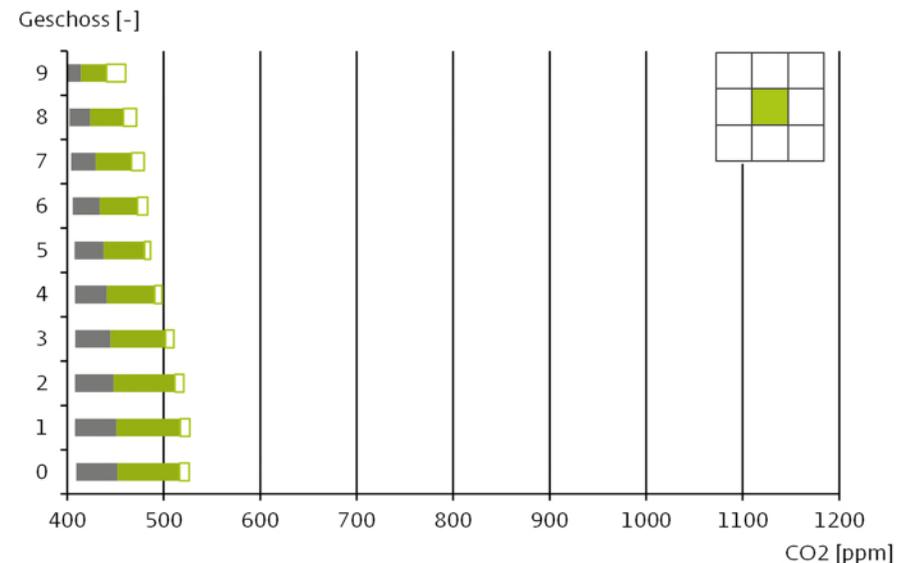
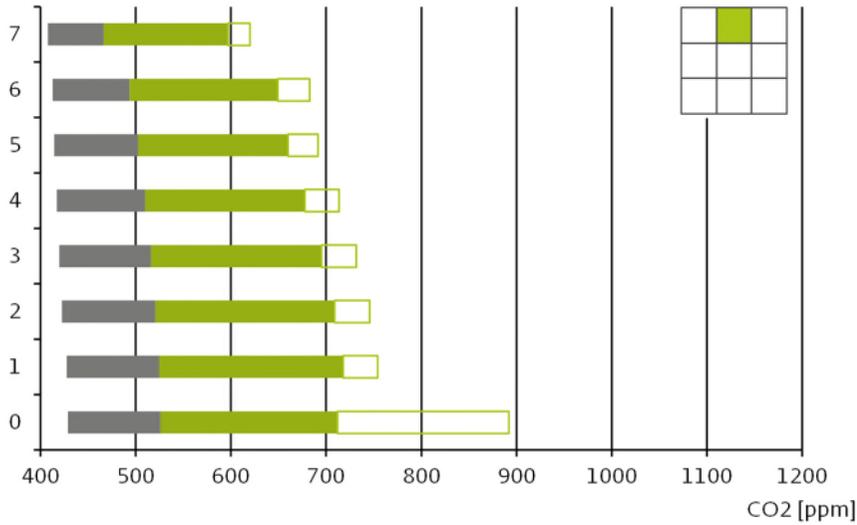


Abb. 21: CO₂-Verlauf über die Höhe – AR < 1 (Beispiel: B 30 m, 10 Geschosse) - Zentral



1 < AR ≤ 1.5

Abb. 22: CO₂-Verlauf über die Höhe – 1 < AR < 1.5 (Beispiel: B 15 m, 8 Geschosse) – Süd-Fassade
Geschoss [-]



AR ≥ 2

Abb. 24: CO₂-Verlauf über die Höhe – AR > 2 (Beispiel: B 10 m, 8 Geschosse) – Süd-Fassade
Geschoss [-]

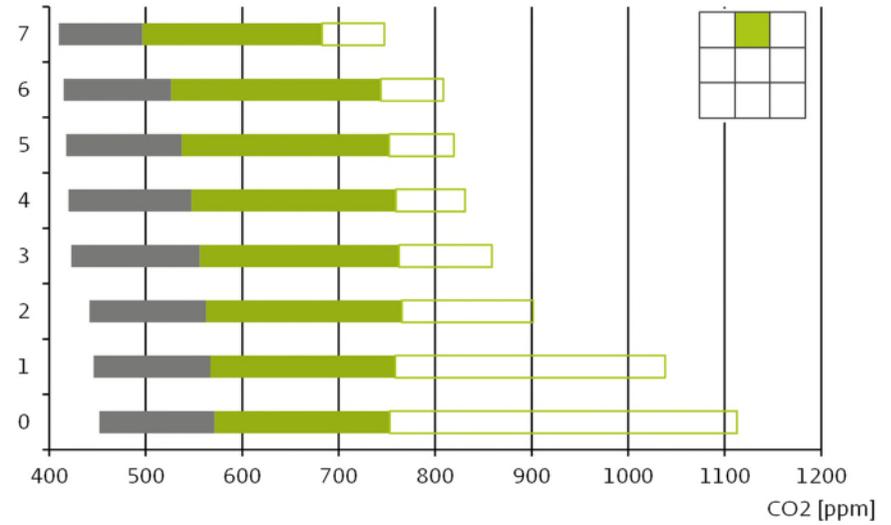


Abb. 23: CO₂-Verlauf über die Höhe – 1 < AR < 1.5 (Beispiel: B 15 m, 8 Geschosse) – Zentral
Geschoss [-]

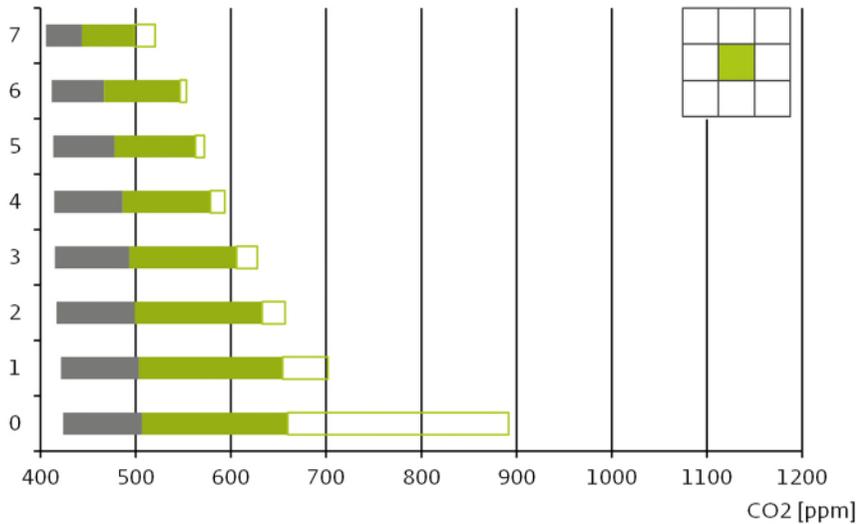
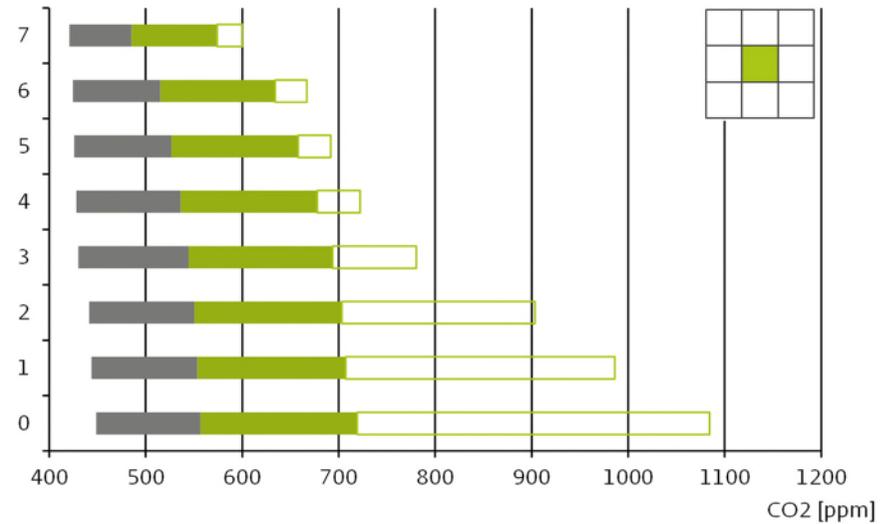


Abb. 25: CO₂-Verlauf über die Höhe – AR > 2 (Beispiel: B 10 m, 8 Geschosse) - Zentral
Geschoss [-]



4.2.4. Verlauf über den Tag

In der vorgehenden Analyse wurden die Stunden während der Fensterlüftung berücksichtigt. Der Abbau von CO₂ während den Stunden ohne Fensterlüftung wird anschliessend ermittelt.

In den untenstehenden Grafiken sind die CO₂-Werte über das Jahr nach Tages- uhrzeit dargestellt. Die maximalen Werte im EG und im 7. OG sind für die drei Referenzfälle ersichtlich.

- Bei den Fällen mit $AR \leq 1.5$ nehmen die Werte während den Stunden ohne Fensterlüftung sehr schnell ab und sind unproblematisch. Eine Stunde nach der Fensterlüftung ist die CO₂-Konzentration < 450 ppm und so kaum höher als der Umgebungswert.
- Beim Fall mit $AR = 2.2$ treten 2 Stunden nach der Fensterlüftung im EG noch Werte > 500 ppm auf. Hier fehlt eine gute Durchlüftung und wird das CO₂ nur langsam verdünnt und abgeführt.

Abb. 26: Mittelwert CO₂ im EG und im 7. OG – B 30 m, 10 Geschosse, AR = 0.9

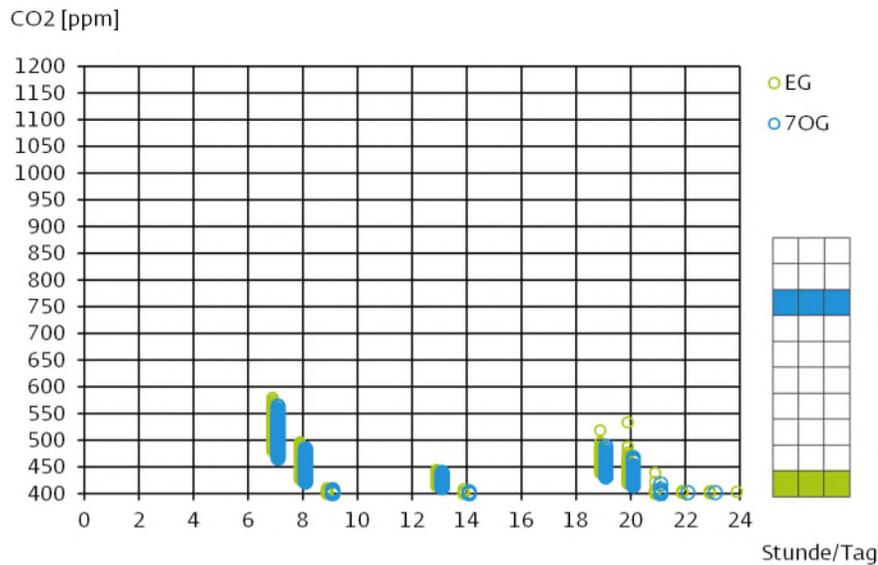


Abb. 27: Mittelwert CO₂ im EG und im 7. OG – B 15 m, 8 Geschosse, AR = 1.5

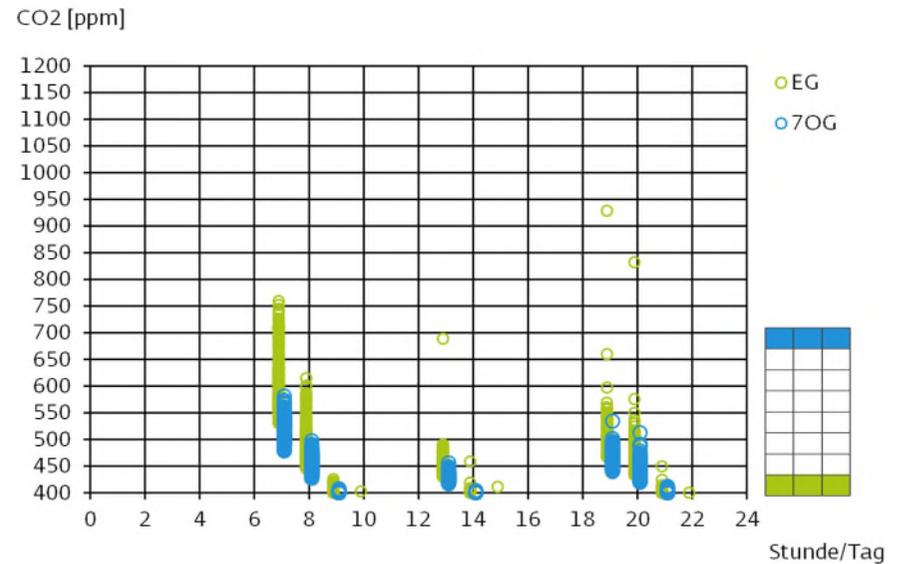
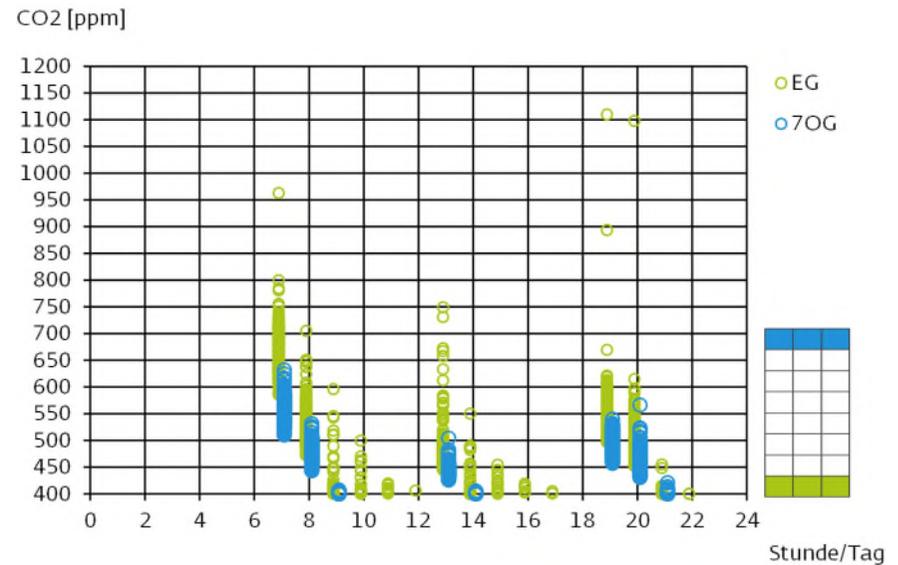


Abb. 28: Mittelwert CO₂ im EG und im 7. OG – B 10 m, 8 Geschosse, AR = 2.2



4.3. Zusammenhang mit der Aussenlufttemperatur

4.3.1. CO₂-Verlauf in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur

Es wurde gezeigt, dass der sommerliche Lastfall kritischer ist als der winterliche. In diesem Kontext wurde die Abhängigkeit der mittleren CO₂-Konzentrationen im EG zur Aussenlufttemperatur für drei Fälle dargestellt. Die Werte wurden gemäss dem Profil für Fensterlüftung für die drei Uhrzeiten am Tag eingefärbt.

Die 3 Fallbeispiele entsprechen je einer AR-Gruppe:

- AR < 1 → Fallbeispiel: Breite 30 m, 10 Geschosse
- 1 < AR ≤ 1.5 → Fallbeispiel: Breite 15 m, 8 Geschosse
- 2 ≥ AR → Fallbeispiel: Breite 10 m, 8 Geschosse

Die Werte zeigen einen flachen Verlauf und damit nur eine leichte Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur. Der Einfluss der Aussenlufttemperatur wird höher bei einem höheren AR.

Wenn die Aussenlufttemperatur ähnlich oder wärmer ist als die Innenlufttemperatur, ist der Auftrieb begrenzt. Im schlimmsten Fall entsteht ein Stau der kontaminierten Luft im unteren Bereich des Innenhofs. In dem Fall können hier sehr hohe Konzentrationen auftreten.

AR < 1

Abb. 29: Mittlere CO₂ im EG zu Aussenlufttemperatur – B30_G10 – AR 0.9

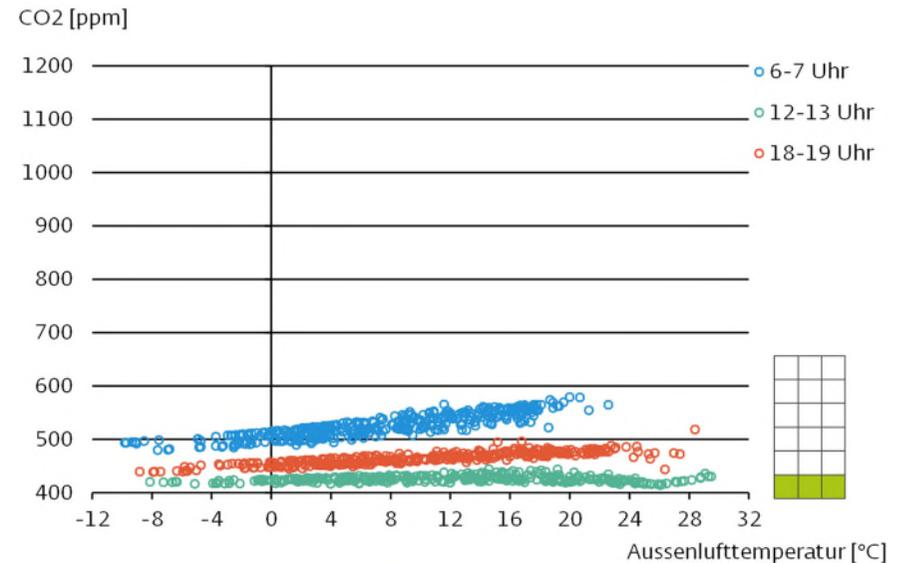
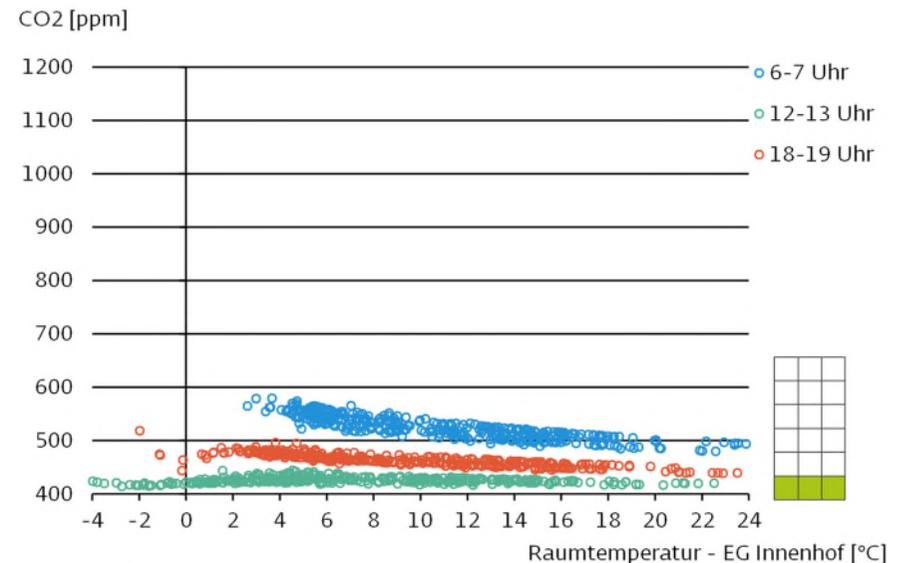
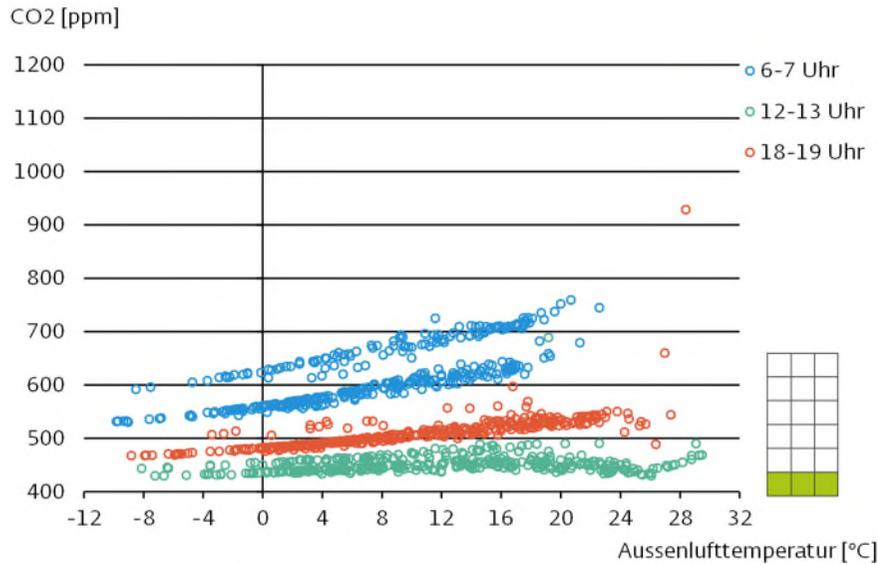


Abb. 30: Mittlere CO₂ im EG zu Temperaturunterschied Innen/Aussen – B30_G10 – AR 0.9



1 < AR ≤ 1.5

Abb. 31: Mittlere CO₂ im EG zu Aussenlufttemperatur – B15_G08 – AR 1.5



AR ≥ 2

Abb. 33: Mittlere CO₂ im EG zu Aussenlufttemperatur – B10_G08 – AR 2.2

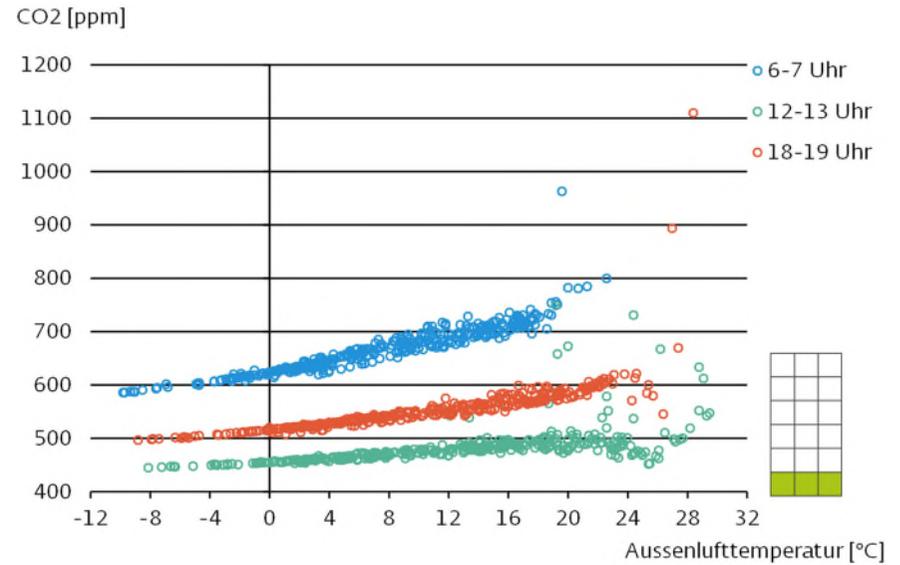


Abb. 32: Mittlere CO₂ im EG zu Temperaturunterschied Innen/Aussen – B15_G08 – AR 1.5

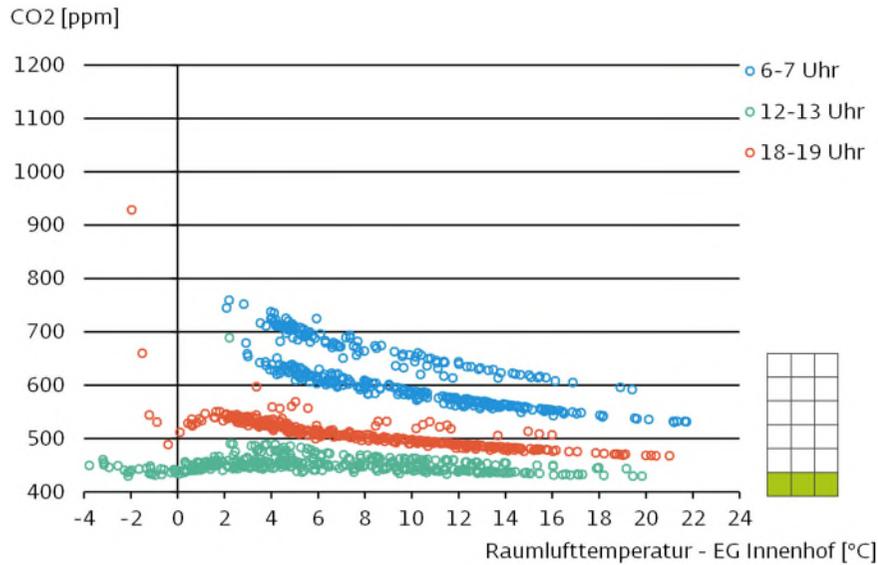
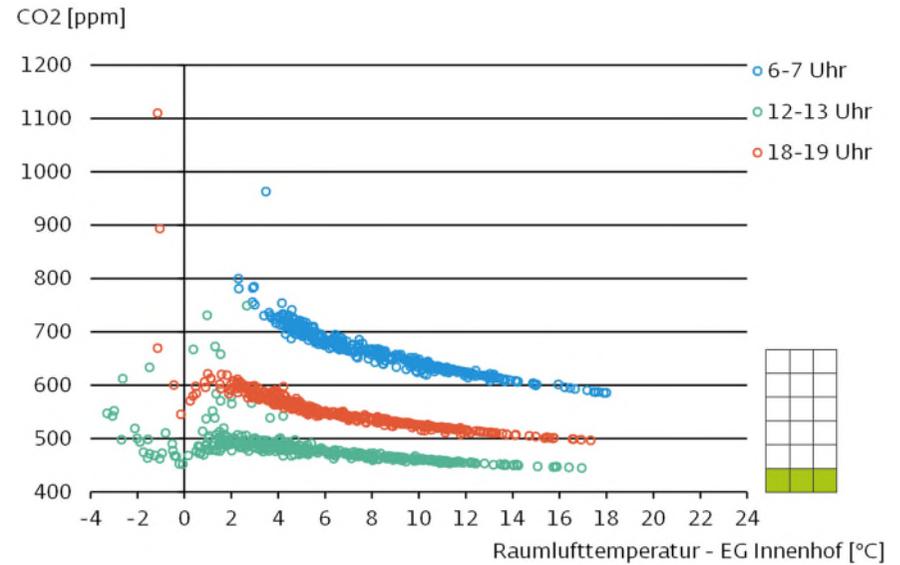


Abb. 34: Mittlere CO₂ im EG zu Temperaturunterschied Innen/Aussen – B10_G08 – AR 2.2



4.3.2. Temperaturunterschied zwischen Innenhof und Freiraum

Im Innenhof entsteht ein „Mikro-Klima“, aufgrund der Abschirmung vom Freiraum. In diesem Bereich sind höhere Lufttemperaturen, infolge der Reduktion des Windes und der thermischen Speichermasse der Innenhoffassade zu erwarten.

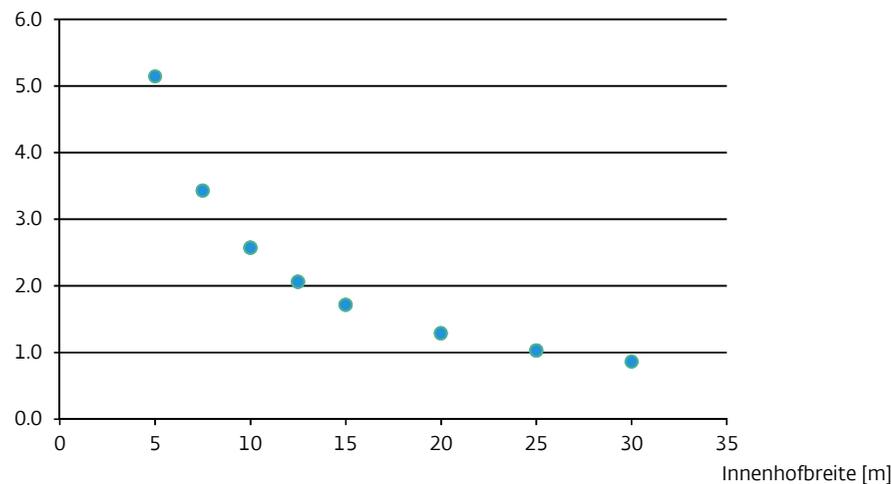
Die Luftmenge, die über die Fensterlüftung zum Innenhof strömt, beeinflusst die Lufttemperatur zusätzlich. Bei gleichzeitiger Fensterlüftung in allen Wohneinheiten mit 30 m³/(hP) kommt ein erheblicher Volumenstrom zum Innenhof zustande (Abb. 35). Ausserdem ist im Winter die Lufttemperatur aus den Wohneinheiten typisch 15 bis 25 K höher als die Aussenluft.

In den folgenden Grafiken wird der Unterschied der Lufttemperatur zwischen Innenhof (EG) und Freiraum dargestellt.

- Ohne Einfluss der Fensterlüftung entsteht tagsüber ein Unterschied von bis 2 K im Winter und bis 3 K im Sommer.
- Bei Fensterlüftung wird der Unterschied im Sommer knapp höher: bis ca. 4 K.
- Bei der Fensterlüftung im Winter steigt der Unterschied bis auf 12 K bei AR > 2. Die Luftmenge über die Fensterlüftung ist in diesem Fall jedoch 2.5 Mal das Innenhofvolumen, bei einem Temperaturunterschied von 20 bis 30 K.

Abb. 35: Verhältnis der Luftmenge über Fensterlüftung zum Innenhofvolumen

Luftmenge Fensterlüftung zu Innenhofvolumen [-]



AR < 1

Abb. 36: Temperaturunterschied EG Innenhof zu Freiraum – B30_G10 – AR 0.9

Temperaturunterschied EG Innenhof und Aussenluft [°C]

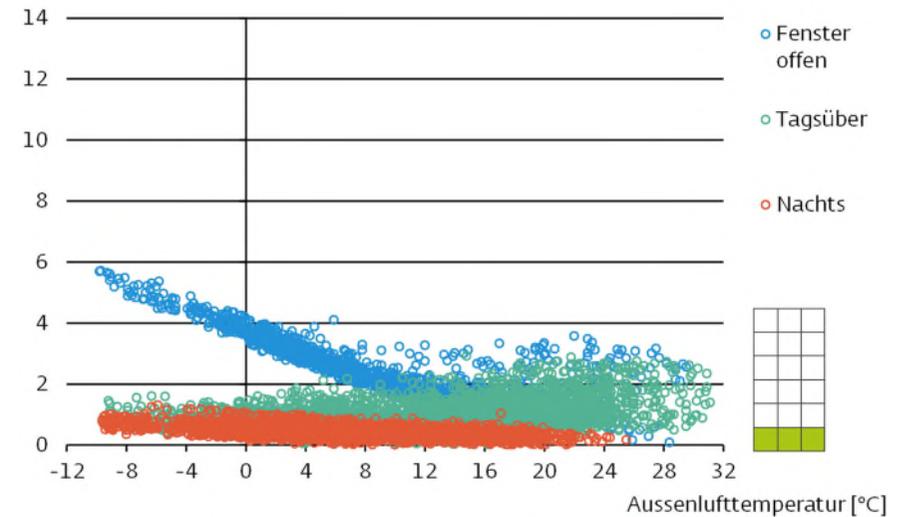
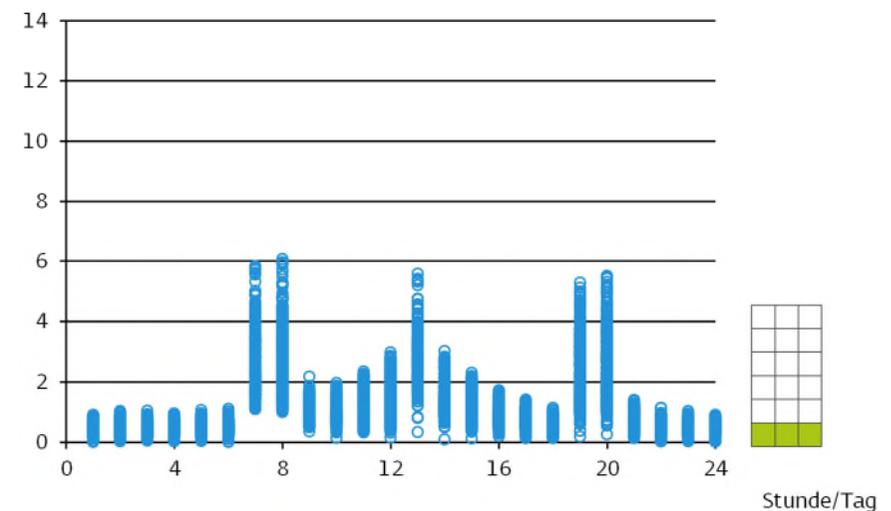


Abb. 37: Temperaturunterschied EG Innenhof zu Freiraum, stündliche Werte über das Jahr – B30_G10 – AR 0.9

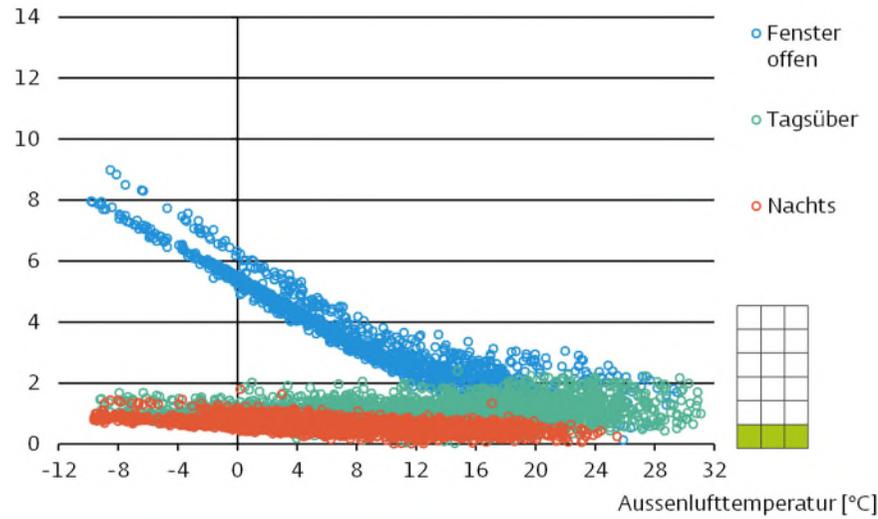
Mittlere Temperatur EG IH - Aussenlufttemperatur [°C]



1 < AR ≤ 1.5

Abb. 38: Temperaturunterschied EG Innenhof zu Freiraum – B15_G08 – AR 1.5

Temperaturunterschied EG Innenhof und Aussenluft [°C]



AR ≥ 2

Abb. 40: Temperaturunterschied EG Innenhof zu Freiraum – B10_G08 – AR 2.2

Temperaturunterschied EG Innenhof und Aussenluft [°C]

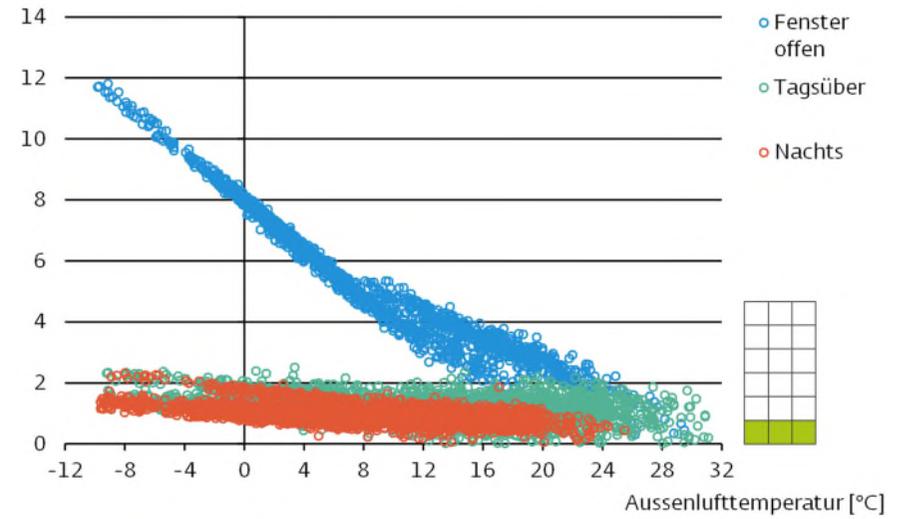


Abb. 39: Temperaturunterschied EG Innenhof zu Freiraum, stündliche Werte über das Jahr – B15_G08 – AR 1.5

Mittlere Temperatur EG IH - Aussenlufttemperatur [°C]

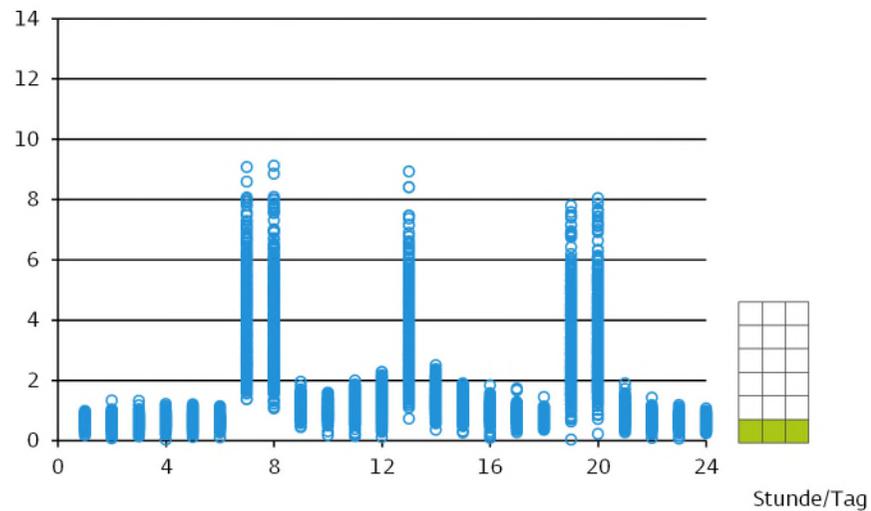
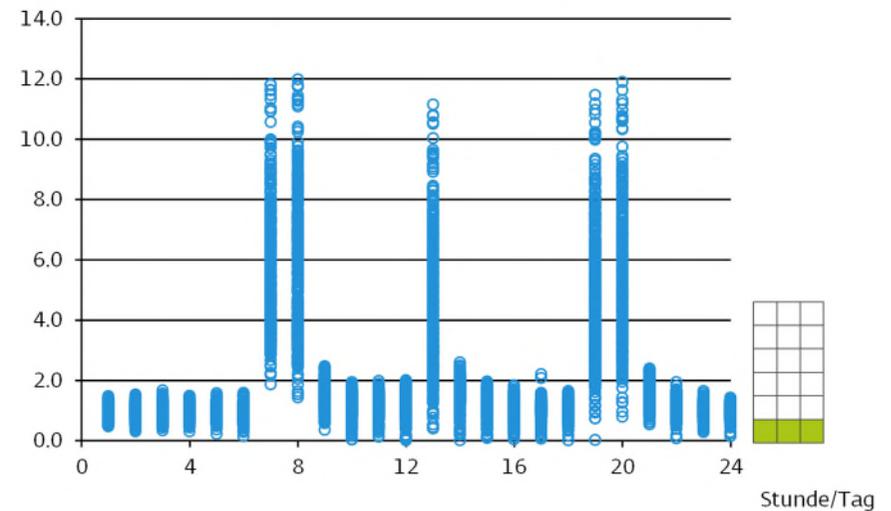


Abb. 41: Temperaturunterschied EG Innenhof zu Freiraum, stündliche Werte über das Jahr – B10_G08 – AR 2.2

Temperaturunterschied EG Innenhof und Aussenluft [°C]



4.4. Analyse der thermischen Phänomene

Die resultierenden Konzentrationen entstehen infolge unterschiedlicher Konfigurationen. Die auftretenden thermischen Phänomene werden in diesem Abschnitt identifiziert und die CO₂-Verteilungen aus dem Zonenmodell begründet. Aufgrund der angesetzten Auflösung des Innenhofes muss berücksichtigt werden, dass die thermischen Effekte vereinfacht und stärker ausgeprägt vorkommen. Bei einer thermisch-dynamischen Gebäudesimulation werden zwar die Winddrücke auf der Fassade bei der Fensterlüftung berücksichtigt, die Luftströmung wird jedoch innerhalb des Innenhofs nur mittels thermischen Auftriebs gefördert. Auch ohne direkte Windeinflüsse ist die CO₂-Verteilung im Innenhof jedoch sehr dynamisch und lokal geprägt.

Im Winter treten die gleichen Phänomene wie im Sommer auf. Grundsätzlich sind die Luftwechselraten bei tieferen Aussenlufttemperaturen höher, weshalb die CO₂-Konzentrationen im Innenhof weniger problematisch sind (Abb. 29, Abb. 31, Abb. 33).

Eine hochauflösende CFD-Simulation ist für eine belastbare Analyse der Durchströmung gefordert und wird im Modul 2 behandelt.

4.4.1. Globale Konvektionszelle

Diese Konfiguration ist in Abb. 42 bis Abb. 44 ersichtlich (Beispiel: am 16. August, 7 Uhr – B 10 m, 8 Geschosse, AR = 2.2).

Aufgrund solarer Einstrahlung entsteht eine lokale Erhitzung eines Fassadenabschnitts. Im Innenhof sieht man z.B. lokale Unterschiede in Lufttemperatur bis 3 K. Aufgrund der Temperaturunterschiede entsteht eine Konvektionszelle, auch ersichtlich mittels der Strömungspfeile. An der gegenüberliegenden Fassade strömt die Aussenluft vertikal nach unten und verdünnt die kontaminierte Luft. An der wärmeren Fassade steigt die Luft und wird mit kontaminierter Luft von unten durchflutet. So entstehen hier erhöhte CO₂-Werte: lokale Unterschiede bis 350 ppm werden wahrgenommen.

Je grösser das Verhältnis der Fassadenfläche zum Innenhofvolumen ist, desto kritischer ist dieser Kamineffekt. Bei den Fällen mit AR < 1.5 ist der Effekt ebenfalls ersichtlich, jedoch weniger ausgeprägt und mit weniger extremen Werten. Trotzdem wird auch in diesen Fällen der Grenzwert von 600 ppm an der wärmeren Fassade überschritten.

In Abschnitt 4.2.2 wurden tendenziell höhere CO₂-Werte an der südlich ausgerichteten Innenhoffassade gezeigt. Diese können mittels einer Konvektionszelle begründet werden. Kleine lokale Temperaturunterschiede, auch bei begrenzter Solarstrahlung oder sogar nur bei diffuser Strahlung, können schon eine Konvektionszelle im Innenhof auslösen. Da der Auftrieb in diesen Fällen weniger stark ist als bei direkter Einstrahlung, ist die Durchlüftung weniger effizient und es bleibt mehr CO₂ im Innenhof zurück.

Abb. 42: Globale Konvektionszelle – schematische Darstellung



Abb. 43: Globale Konvektionszelle - CO₂-Konzentration Innenhof

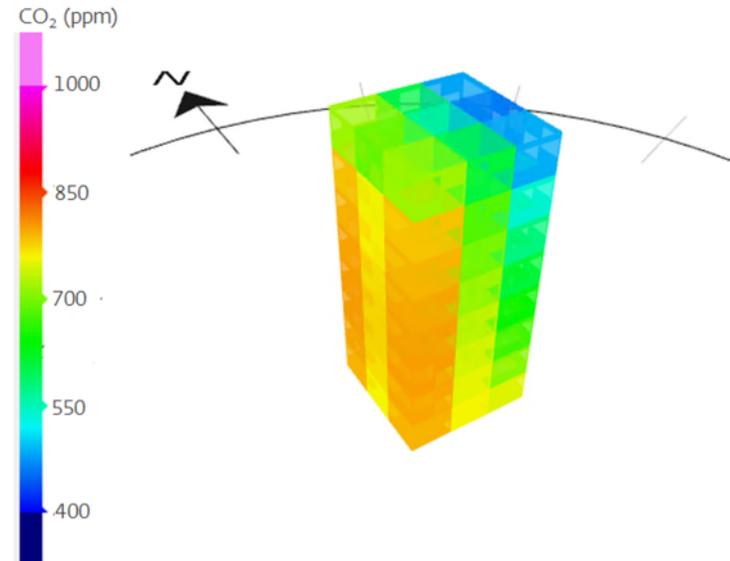
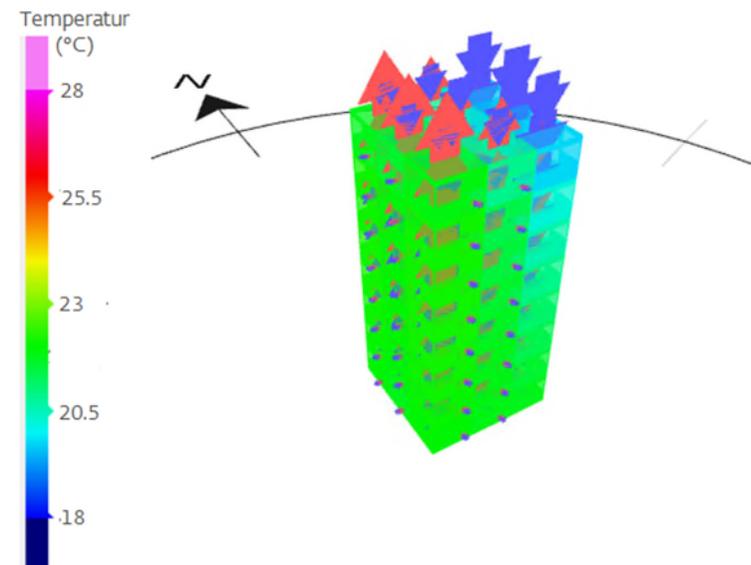


Abb. 44: Globale Konvektionszelle- Lufttemperatur Innenhof mit Strömungspfeilen



4.4.2. Stau

Diese Konfiguration ist in Abb. 45 bis Abb. 47 ersichtlich (Beispiel: am 21. Juni, 19 Uhr – B 20 m, 14 Geschosse, AR = 2.0).

Die Lufttemperatur im Innenhof ist ähnlich oder kühler als die Aussenlufttemperatur im Freiraum. Eine Konvektionszelle ist zwar ersichtlich, diese wird jedoch sehr schwach unten im Innenhof. Der Luftaustausch ist hier begrenzt und nur stark kontaminierte Luft erreicht diesen Bereich. In den Fassadenzonen wo die Luft der Konvektionszelle steigt, ist ebenfalls mit erhöhten CO₂-Werten zu rechnen.

Obwohl die Luftqualität an diesem Zeitpunkt sehr kritisch ist, ist die Häufigkeit beim angesetzten Wetterdatensatz auf einige Stunden pro Jahr begrenzt.

Abb. 45: Stau – schematische Darstellung

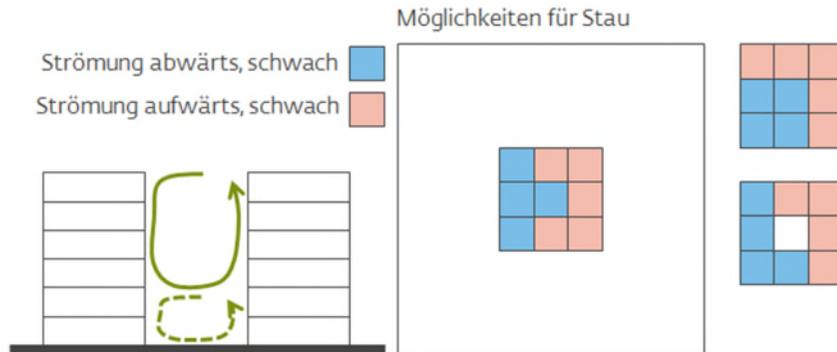


Abb. 46: Stau - CO₂-Konzentration Innenhof

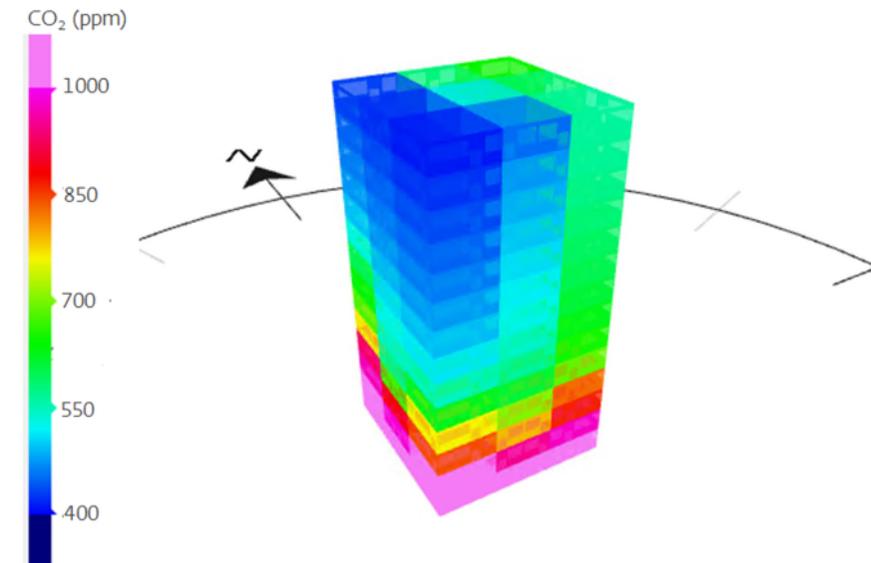
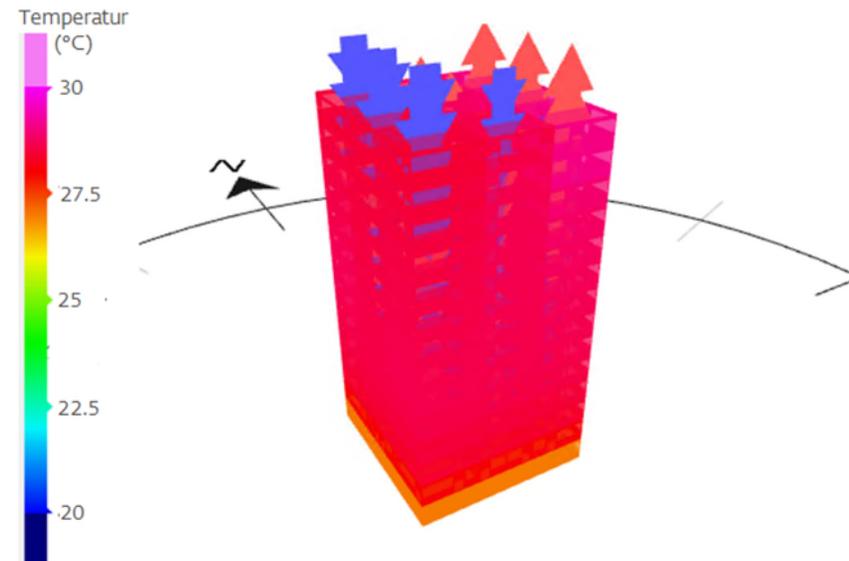


Abb. 47: Stau - Lufttemperatur Innenhof mit Strömungspfeilen



4.4.3. Doppelte Konvektionszelle

Diese Konfiguration ist in Abb. 48 bis Abb. 50 ersichtlich (Beispiel: am 21. August, 7 Uhr – B 10 m, 8 Geschosse, AR = 2.2).

Bei kleinen Innenhöfen entsteht in den Eckbereichen, aufgrund der hohen Außenwandfläche zu Innenhofvolumen, eine lokal erhöhte Aufwärmung. In diesen Zonen steigt die Luft: Eine Konvektionszelle mit zentral sinkender Luft entsteht. Bei dieser Konfiguration sammelt sich das CO₂ bevorzugt im unteren Bereich des Innenhofs. Die kontaminierte Luft steigt entlang den Fassaden.

Abb. 48: Doppelte Konvektionszelle – schematische Darstellung

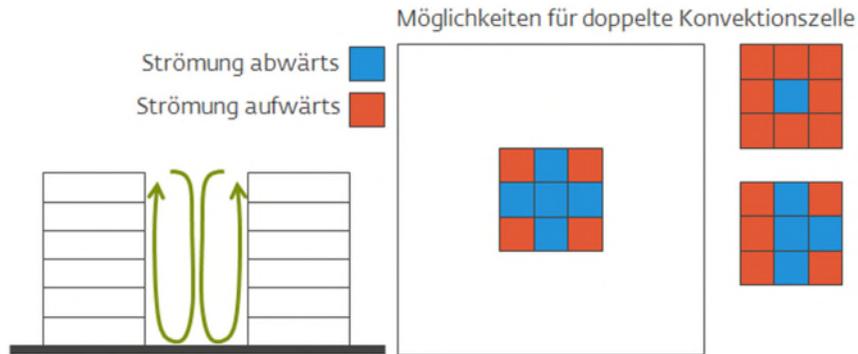


Abb. 49: Doppelte Konvektionszelle - CO₂-Konzentration Innenhof

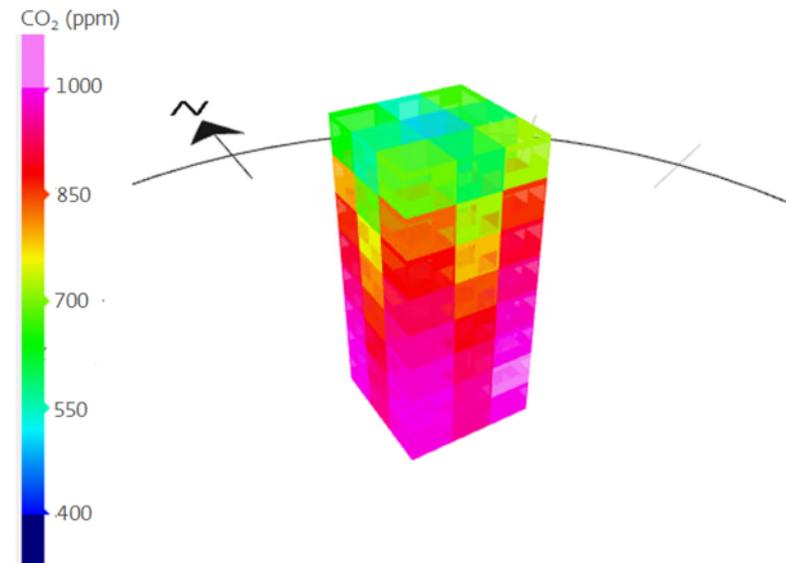
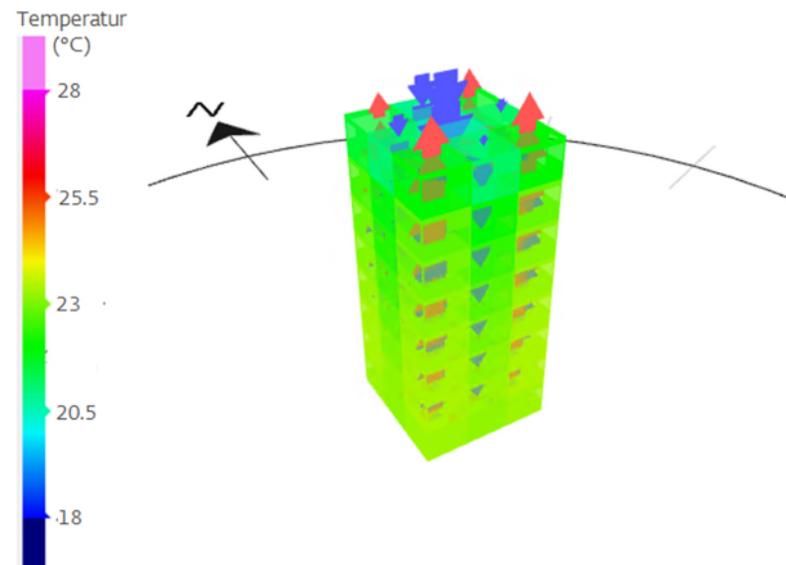


Abb. 50: Doppelte Konvektionszelle- Lufttemperatur Innenhof mit Strömungspfeilen

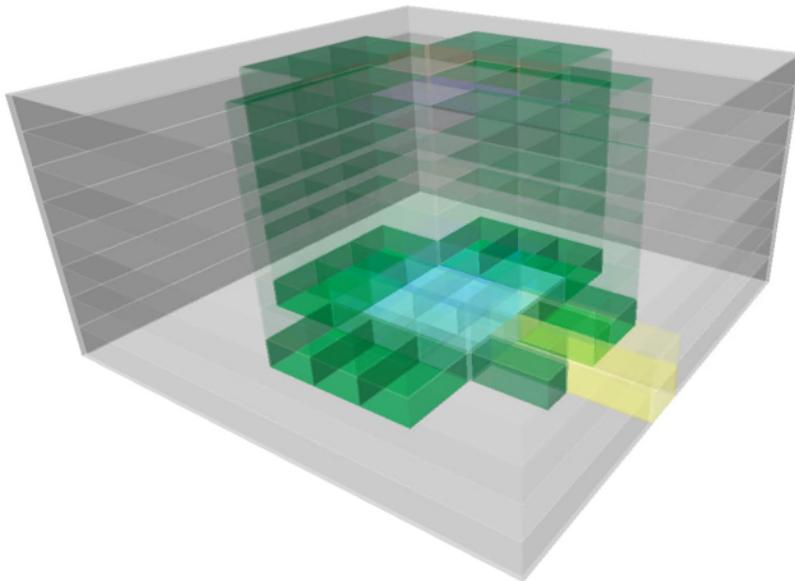


4.5. Einfluss von weiteren Parametern

4.5.1. Öffnung

Der Einfluss einer Durchfahrt zwischen Strasse und Innenhof wurde ermittelt. Die Durchfahrt wurde im Fall mit einer Innenhofbreite von 15 m und 8 Geschossen (AR 1.5) mit einer Breite von 4 m und über zwei Geschosse modelliert. So werden die Anforderungen einer Feuerwehruzufahrt von 3.5 m Breite und 4 m Höhe eingehalten.

Abb. 51: Durchfahrt zwischen Strasse und Innenhof (gelb)



Die Durchfahrt erlaubt eine zusätzliche Lüftung des Innenhofs, hauptsächlich im kritischen unteren Bereich. Eine lokal stark verbesserte Luftqualität ist zu erwarten.

Abb. 52: CO₂-Verlauf über die Höhe – 15. Februar, 7 Uhr – AR = 1.5 – Einfluss Durchfahrt im EG
Höhe/Hmax [-]

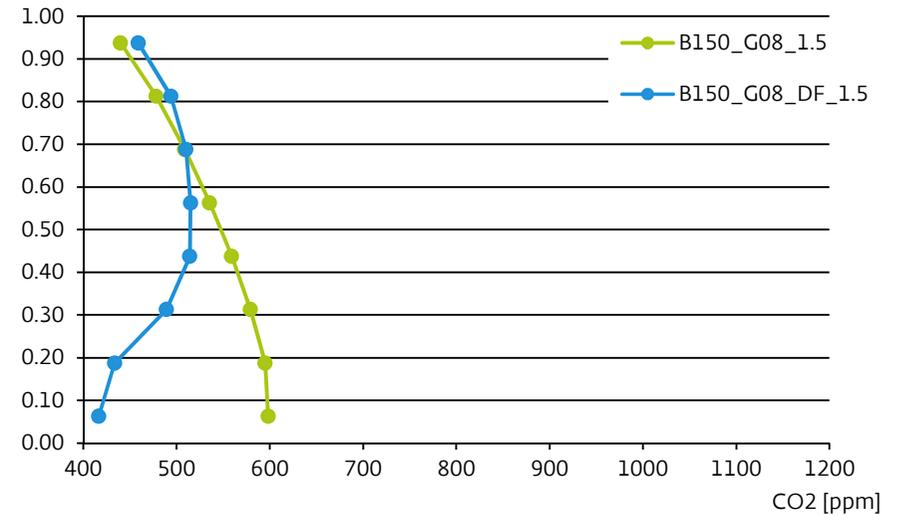


Abb. 53: CO₂-Verlauf über die Höhe – 21. Juni, 19 Uhr – AR = 1.5 – Einfluss Durchfahrt im EG
Höhe/Hmax [-]

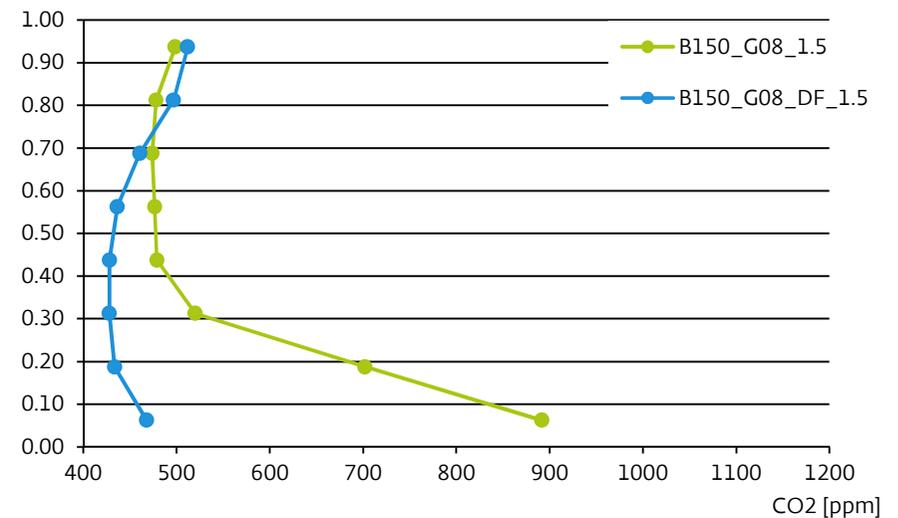


Abb. 54: CO₂-Verlauf über die Höhe – AR = 1.5 (Beispiel: B 15 m, 8 Geschosse) - Durchfahrt

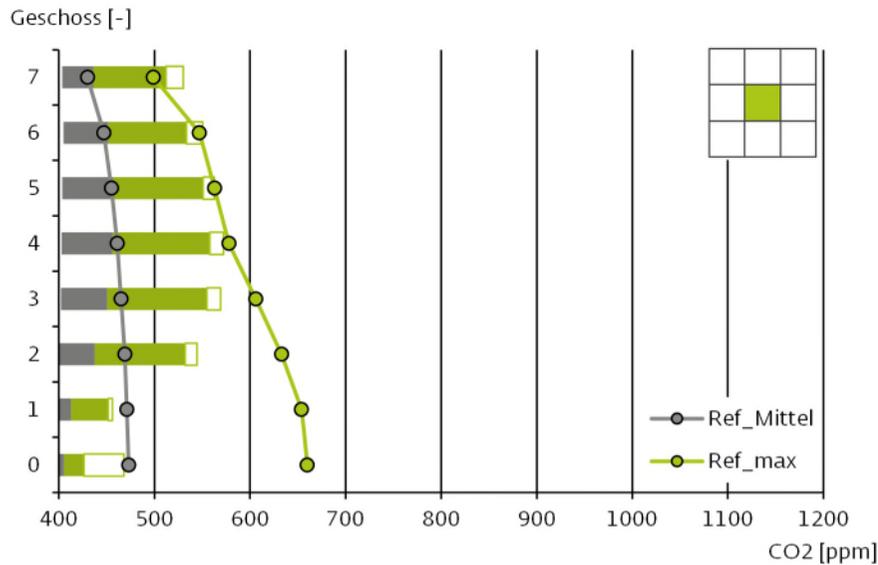
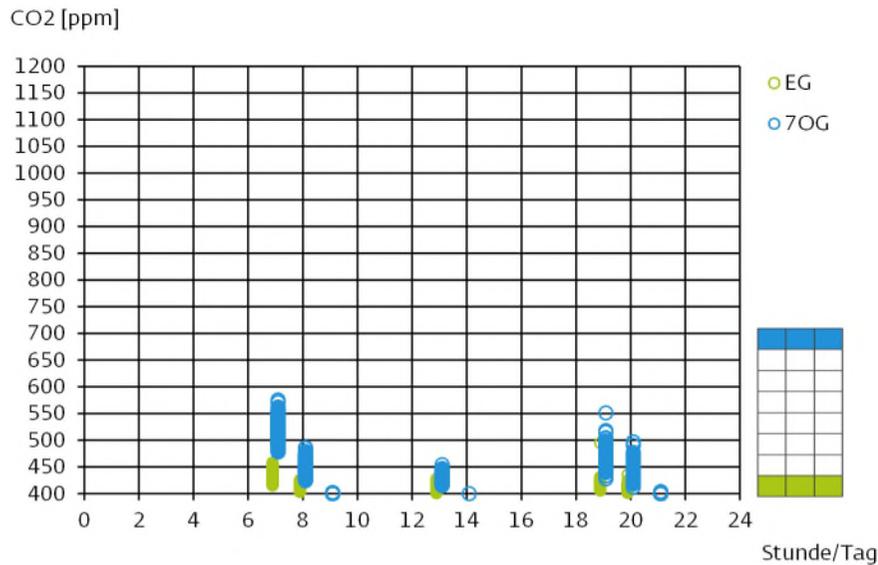


Abb. 55: Mittelwert CO₂ im EG und im 7. OG – B 15 m, 8 Geschosse, AR = 1.5 – mit Durchfahrt



4.5.2. Begrünung

Der Einfluss einer begrünten Innenhoffassade wurde ermittelt. Im Vergleich zu einer traditionellen Fassade mit Beton/Mauerwerk/Putz, ändert sich im Simulationsmodell die Reflektion/Absorption der Solarstrahlung. Eine begrünte Fassade wird typisch etwas mehr Solarstrahlung (hauptsächlich Licht) absorbieren und etwas weniger stark reflektieren. Auch im Infrarotbereich (Wärmestrahlung) wird etwas mehr Energie absorbiert und ausgestrahlt. Aufgrund des hohen konvektiven Wärmeaustauschs zur Aussenluft und die geringe thermische Masse ist die Oberflächentemperatur der Pflanzenschicht jedoch nahezu gleich wie die Aussenluft.

Thermisch wichtiger ist die dämmende Wirkung dieser Schicht, weshalb die Oberflächentemperatur der Aussenwand ausgeglichener ist: wärmer im Winter, kühler im Sommer. Die Strahlungsparameter der Aussenwand wurden entsprechend angepasst um das Ziel zu erreichen.

Der Einfluss der Begrünung ist begrenzt. Im Fall mit einer geringen Geschoszahl (B 15 m, 3 Geschosse) bleiben die CO₂-Konzentrationen nahezu gleich. Die Berechnung wurde nochmals wiederholt für den Fall mit 8 Geschossen (B 15 m).

Abb. 56: CO₂-Verlauf über die Höhe – 15. Februar, 7 Uhr – AR = 1.5 – Einfluss Begrünung
Höhe/Hmax [-]

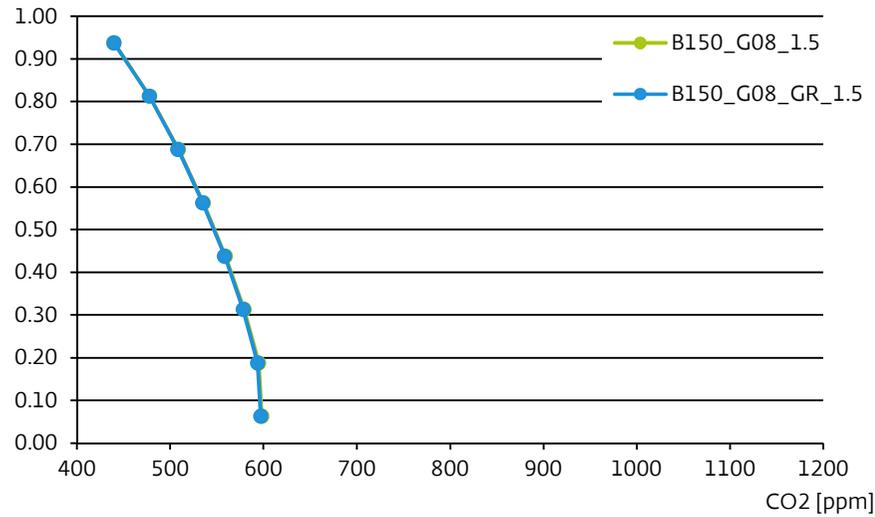


Abb. 57: CO₂-Verlauf über die Höhe – 21. Juni, 19 Uhr – AR = 1.5 – Einfluss Begrünung
Höhe/Hmax [-]

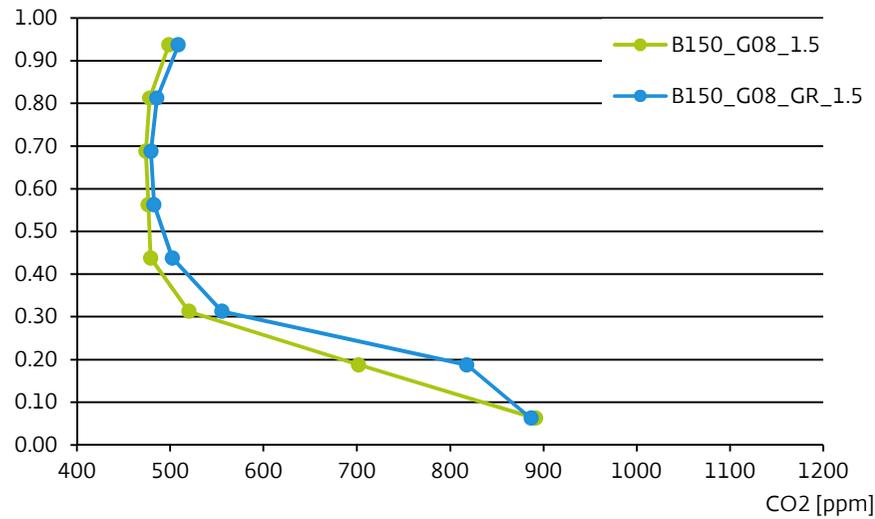


Abb. 58: CO₂-Verlauf über die Höhe – AR = 1.5 (Beispiel: B 15 m, 8 Geschosse) - Begrünung
Geschoss [-]

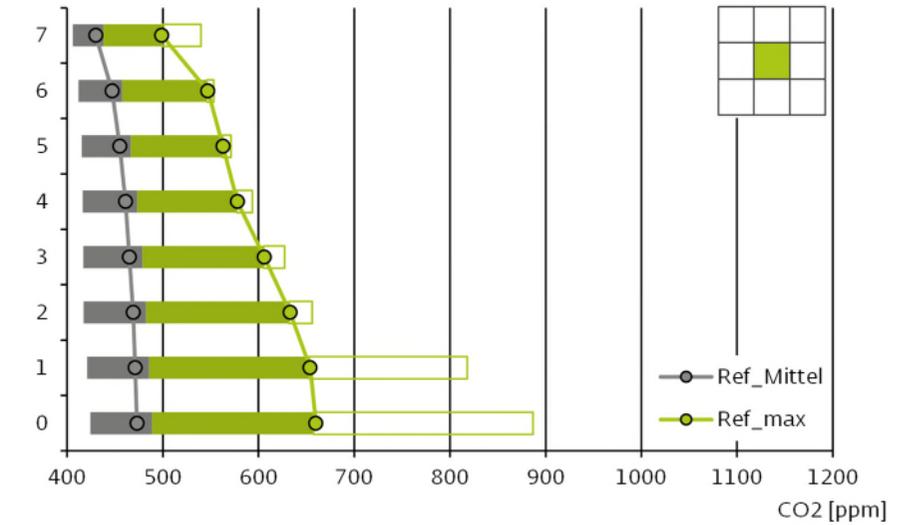
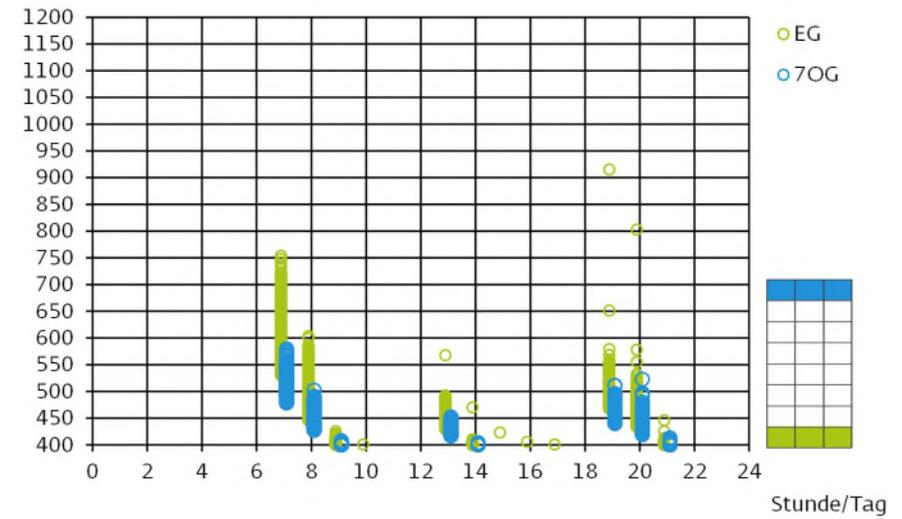


Abb. 59: Mittelwert CO₂ im EG und im 7. OG – B 15 m, 8 Geschosse, AR = 1.5 – mit Begrünung
CO₂ [ppm]



4.5.3. Dauerlüftung

Die Ergebnisse sind stark von den Annahmen hinsichtlich Fensterlüftung abhängig. Die angesetzten Randbedingungen berücksichtigen eine konservative Konfiguration: Alle Wohneinheiten öffnen gleichzeitig das Fenster, nach einer Nacht ohne Lüftung. Empfehlungen nach diesen Ergebnissen sind deshalb robust.

Ein alternativer Ansatz wurde ebenfalls getestet: Dauerlüftung mit Fenster auf Kipp (Öffnungsanteil 5 %) und um 7 Uhr Stosslüftung (Öffnungsanteil 100 %).

Obwohl die CO₂-Konzentrationen über den Tag aufgrund der Dauerlüftung etwas höher liegen, bleiben die Werte meistens unter dem Grenzwert von 600 ppm. Im kritischen Fall mit einer Breite von 10 m und 8 Geschossen (AR 2.2) sind nur ca. 20 Stunden im Jahr im EG > 600 ppm.

Abb. 60: CO₂-Verlauf über die Höhe – 15. Februar, 7 Uhr – AR = 1.5 – Einfluss Dauerlüftung

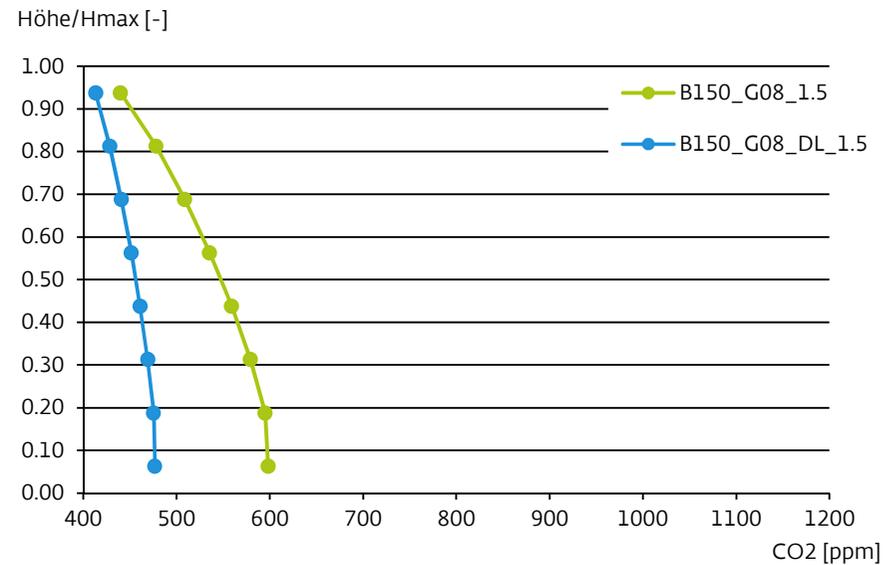


Abb. 61: CO₂-Verlauf über die Höhe – 21. Juni, 19 Uhr – AR = 1.5 – Einfluss Dauerlüftung

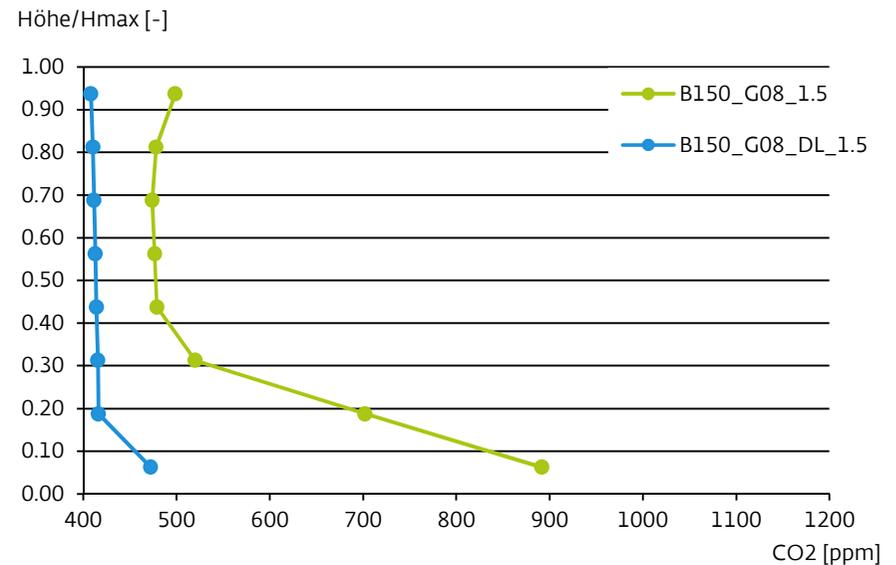


Abb. 62: CO₂-Verlauf über die Höhe – AR > 2 (Beispiel: B 15 m, 8 Geschosse) - Dauerlüftung

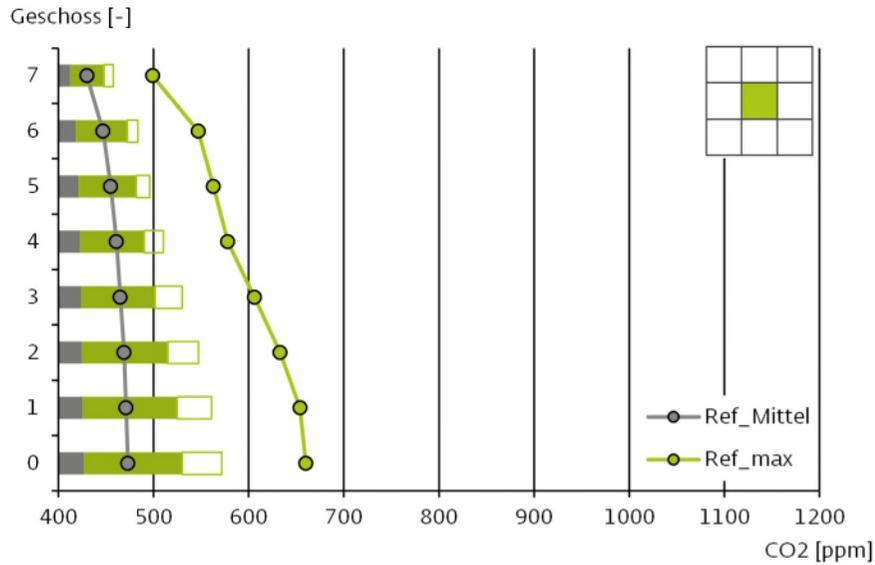
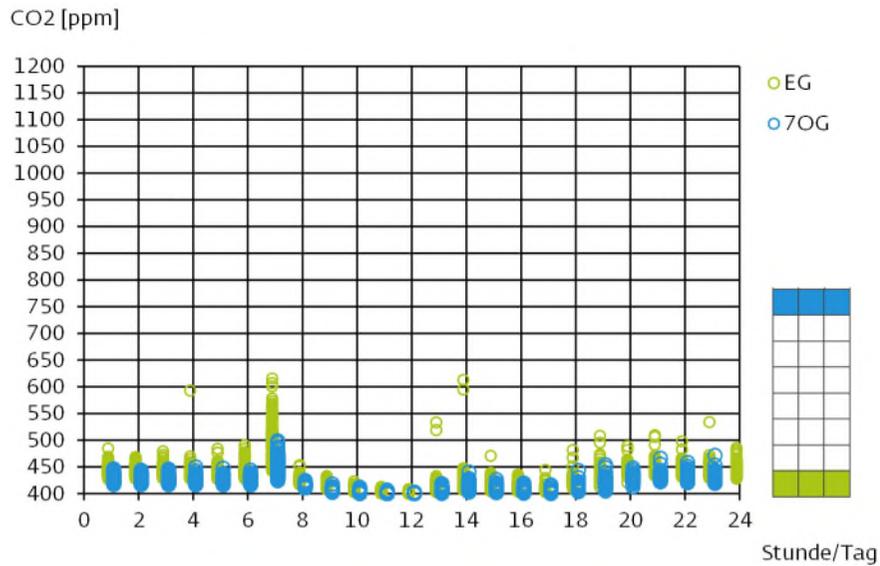


Abb. 63: Mittelwert CO₂ im EG – B 15 m, 8 Geschosse, AR = 1.5



5. Modul 1: Erkenntnisse des Zonenmodells

Die Ergebnisse und die wichtigsten Erkenntnisse und Empfehlungen werden zusammengefasst.

5.1. Zusammenfassung

Im Modul 1 wurde mittels Zonenmodell eine Parameterstudie durchgeführt. Für 17 Fälle mit unterschiedlichem Aspect Ratio AR (H/B), Gebäudebreite und -höhe, wurde die CO₂-Verteilung im Innenhof über das Jahr bei Fensterlüftung ermittelt. Ein absoluter Grenzwert von 600 ppm im Innenhof wurde definiert.

Die Auswertungen und Besprechungen zeigen, dass der Zusammenhang zwischen Wetterlage und Durchlüftung mit entsprechender CO₂-Verteilung sehr komplex und dynamisch ist. Tendenzen sind ersichtlich, jedoch konkrete und quantitative Empfehlungen lassen sich nicht direkt ableiten. Trotzdem wurde immer wieder eine Korrelation mit dem AR festgestellt. In den folgenden Grafiken wird diese Korrelation visualisiert.

Es können zwei Situationen verglichen werden:

- Worst case
Gemäss dem Lüftungsprofil in Abb. 4 wird mittels Stosslüftung während 5 Stunden pro Tag über die Fenster gelüftet. Alle Wohneinheiten werden gleichzeitig gelüftet, deshalb entsteht eine ausgesprochene Spitzenbelastung von CO₂ im Innenhof.
- Ausgeglichener Fall mit Dauerlüftung (Abschnitt 4.5.3)
Es wird 24 Stunden pro Tag über die Fenster in Kipp (15-150 m³/(hP)) gelüftet, mit einer einmaligen Stosslüftung um 7 Uhr. Die CO₂-Belastung im Innenhof ist mehr verteilt und die Spitzenbelastung um 7 Uhr ist begrenzt.

Für die 17 Fälle wurde die CO₂-Konzentration zentral im Innenhof um 7 Uhr und um 19 Uhr ausgewertet. In den Abbildungen Abb. 64 bis Abb. 67 wurde der „worst case“ dargestellt; in den Abbildungen Abb. 68 bis Abb. 71 die Fälle mit dem Dauerlüftungsprofil. Zwei Geschosse werden dargestellt: EG und 3. OG.

Aufgrund der höheren Temperaturen ist im Sommer die Durchlüftung des Innenhofs allgemein kritischer als im Winter. Im Sommer ist jedoch der Fall mit Dauerlüftung massgebend, da die Nutzer bei höheren Temperaturen die Fenster länger offen lassen und sind die Verläufe in Abb. 68 bis Abb. 71 relevant. Gemäss dieser Auswertung sind für Innenhöfe mit $AR \leq 1.5$ keine Probleme zu erwarten. Bei einem $1.5 < AR \leq 2$ können einzelne kritischen Stunden auftreten.

Im Winter/Frühling/Herbst ist mit dem „Worst Case“ zu rechnen und sind die Verläufe in Abb. 64 bis Abb. 67 relevant. Gemäss dieser Auswertung ist beim Grenzwert von 600 ppm ein $AR \leq 1.2$ zu empfehlen. Das Profil der Fensterlüftung ist hier sehr konservativ angesetzt. Eine Erhöhung bis auf $AR \leq 1.5$ ist deshalb vertretbar.

Aufgrund der Ergebnisse bei thermisch-geförderter Durchlüftung werden für einen Innenhof mit $AR < 1.5$ keine Probleme erwartet. Im folgenden Modul wird die Durchlüftung mittels Strömungssimulationen überprüft.

Abb. 64: Abhängigkeit von CO₂-Konzentration zu AR um 7 Uhr – Werte zentral im EG
CO₂ [ppm]

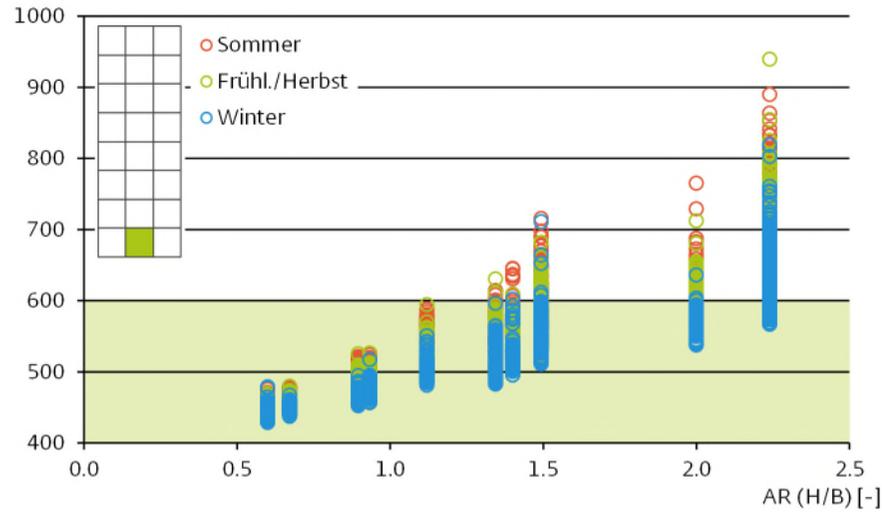


Abb. 66: Abhängigkeit von CO₂-Konzentration zu AR um 7 Uhr – Werte zentral im 3. OG
CO₂ [ppm]

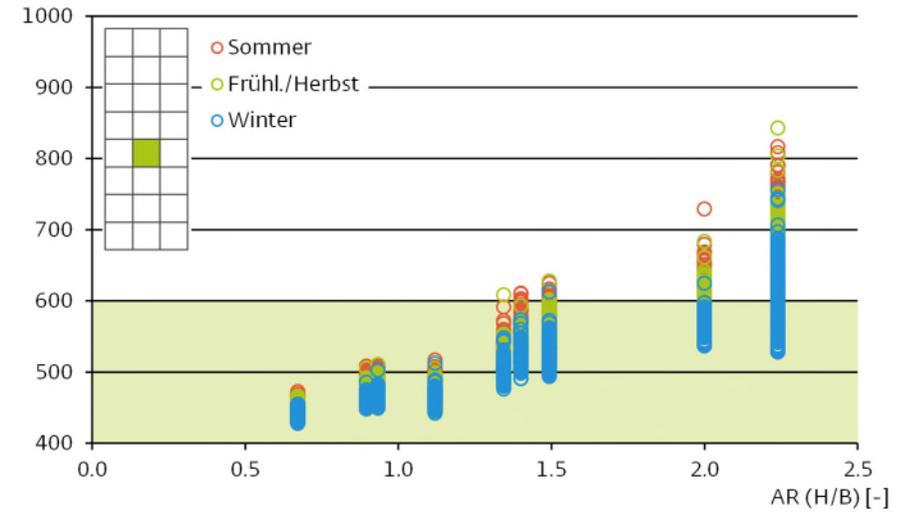


Abb. 65: Abhängigkeit von CO₂-Konzentration zu um 19 Uhr – Werte zentral im EG
CO₂ [ppm]

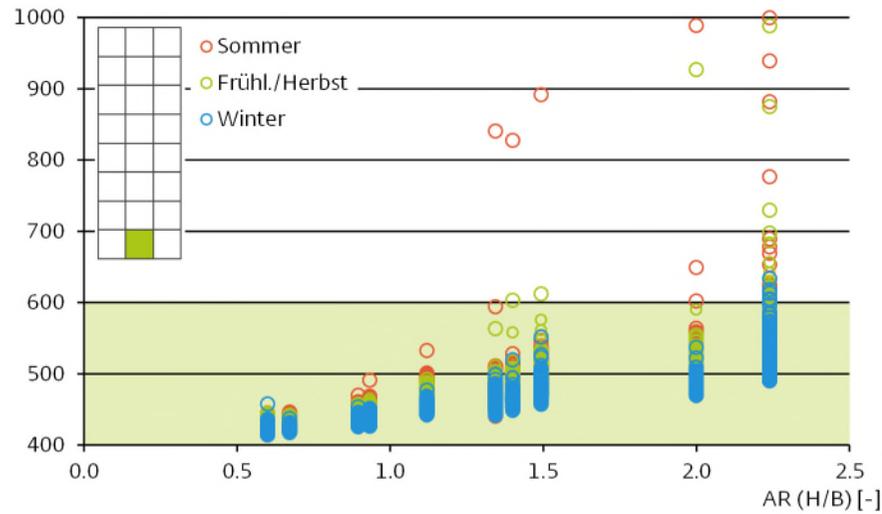


Abb. 67: Abhängigkeit von CO₂-Konzentration zu AR um 19 Uhr – Werte zentral im 3. OG
CO₂ [ppm]

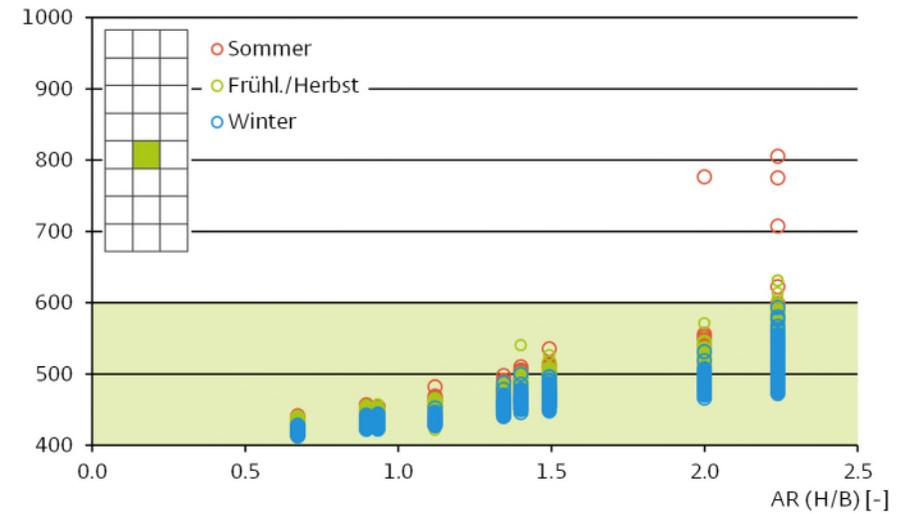


Abb. 68: Abhängigkeit von CO₂-Konzentration zu AR um 7 Uhr – Werte zentral im EG - Dauerlüftung

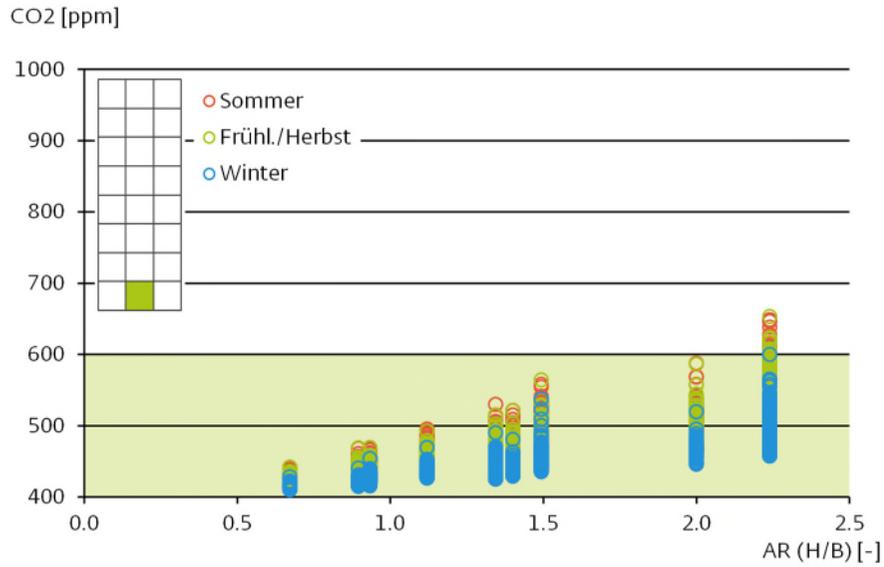


Abb. 70: Abhängigkeit von CO₂-Konzentration zu AR um 7 Uhr – Werte zentral im 3. OG - Dauerlüftung

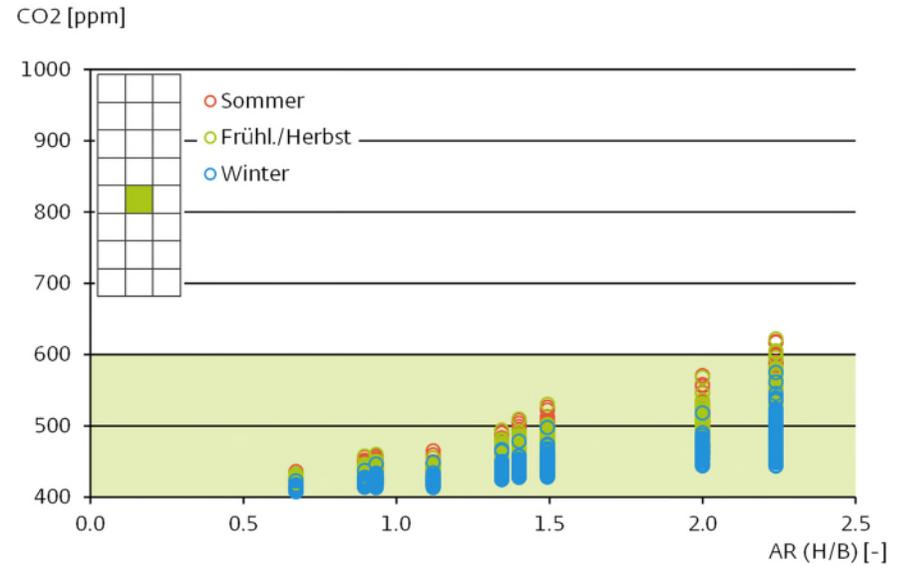


Abb. 69: Abhängigkeit von CO₂-Konzentration zu AR um 19 Uhr – Werte zentral im EG - Dauerlüftung

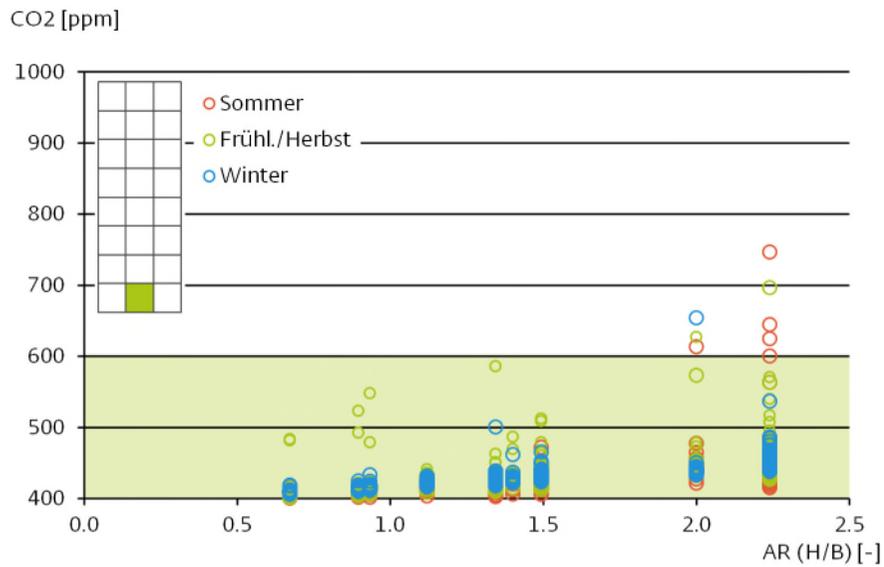
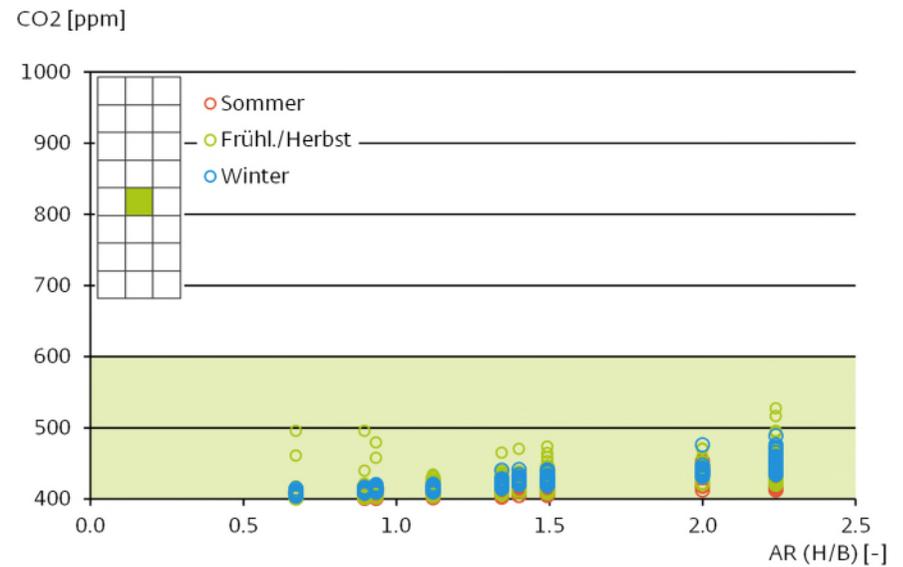


Abb. 71: Abhängigkeit von CO₂-Konzentration zu AR um 19 Uhr – Werte zentral im 3. OG - Dauerlüftung



5.2. Ansatz für weitere Ermittlungen

Mittels eines dynamischen Zonenmodells wurden die CO₂-Konzentrationen im Innenhof bei unterschiedlichen Geometrien und bei thermisch-geförderter Durchlüftung ermittelt. Ein konservatives Profil für die Fensterlüftung wurde angesetzt. So wurde der „Worst Case“ ermittelt. Die Wetterkonditionen und die Strömungskonfigurationen, bei denen kritische Werte im Innenhof auftreten, wurden besprochen.

Diese Analyse wird im nächsten Teil mit dem Einfluss von windgeförderter Durchlüftung mittels Strömungssimulationen ergänzt.

Zunächst wird eine statistische Kurzanalyse des Wetterdatensatzes gemacht. So können die Häufigkeiten der kritischen Konfigurationen abgeschätzt werden. Die folgenden Fragen sind offen:

- Kombination von Wind und Auftrieb
 - Wind kann bremsend oder fördernd auf eine Konvektionszelle wirken (Abb. 72, Abb. 73). Was ist der Einfluss auf die Durchlüftung des Innenhofes?
 - Ab welcher Windgeschwindigkeit ist der Wind dominant/irrelevant gegenüber dem Auftrieb?
 - Was ist der Einfluss von Windrichtung?
 - Was ist der Einfluss von AR?
- Analyse Wetterdaten: Häufigkeit der Wind/Sonnenposition, bremsend oder fördernd?
- Analyse Wetterdaten: Häufigkeit der direkten Strahlung zur Förderung von auftriebdominierten Strömungen?

Abb. 72: Kombination Wind + Auftrieb: bremsend oder fördernd

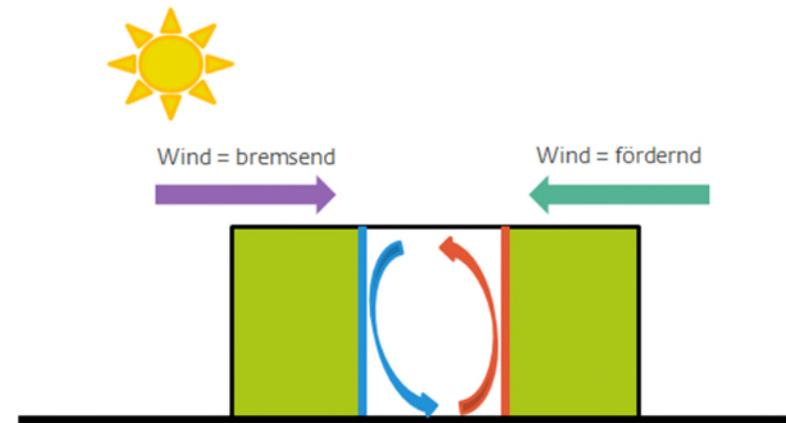
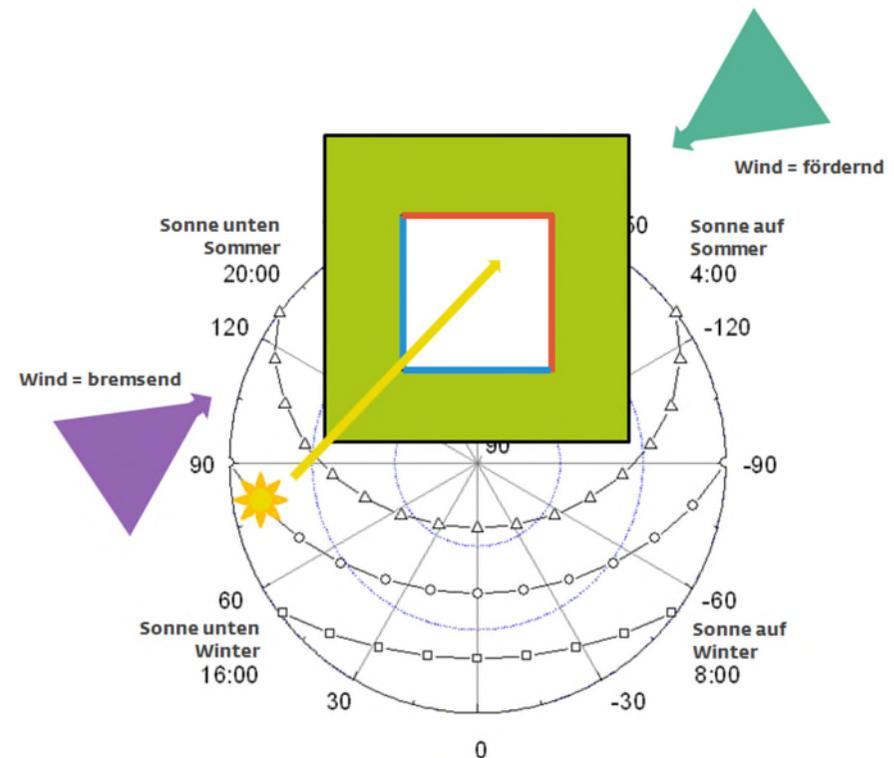


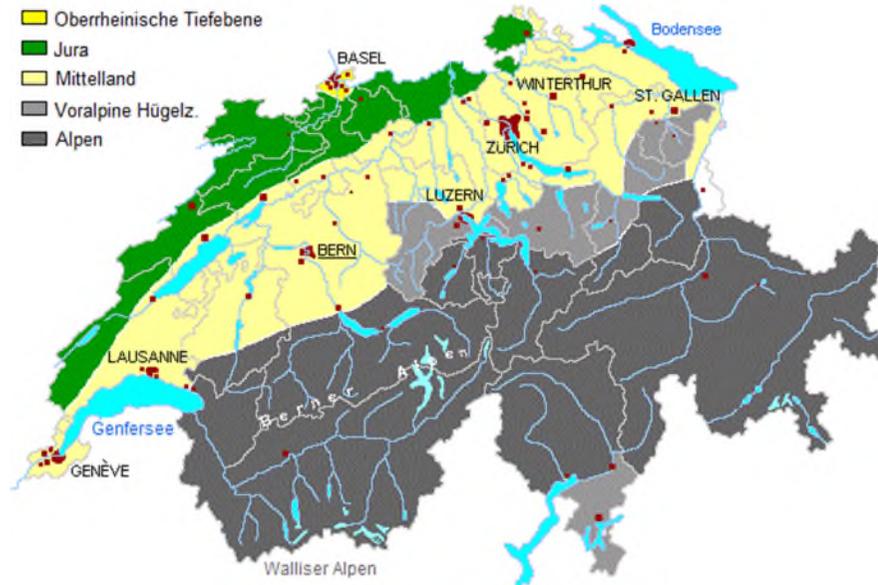
Abb. 73: Kombination Wind + Auftrieb: bremsend oder fördernd



5.3. Vergleich Wetterdaten

Als Ansatz zu weiteren Ermittlungen wird ein Vergleich der Wetterdatensätze gemacht. Die Berechnungen dieser Studie wurden für die Lage Stadt Zürich gemacht. Die Ergebnisse sollten jedoch für die Städte im Schweizer Mittelland ebenfalls gültig sein. Aus diesem Grund wird der Vergleich der Wetterdatensätze für 4 Städte im Mittelland dargestellt: Zürich, Bern, Lausanne und St. Gallen.

Abb. 74: Geografische Gliederung der Schweiz (Quelle: <https://www.infos-schweiz.ch>)

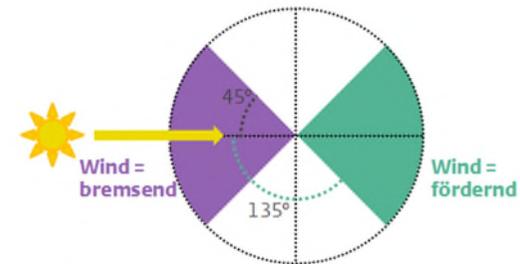


Die folgenden Parameter werden dargestellt.

Tab. 10: Kurzanalyse Wetterdaten

Abb.	Hinweis
Abb. 75	Häufigkeit der Windgeschwindigkeiten über das ganze Jahr
Abb. 77	Verteilung der Windrichtungen mittels Windrose (ganzes Jahr)
Abb. 78	Häufigkeit der direkten Solarstrahlung (während Tageslichtstunden, Nächte nicht berücksichtigt)
	Häufigkeit, dass aufgrund der Windrichtung der Wind als Bremse/Förderung der thermischen Konvektionszelle wirkt (Abb. 73)
	- Bremse = Differenz Windrichtung und Azimut ist maximal 45°
	- Förderung = Differenz Windrichtung und Azimut ist minimal 135°

Abb. 79

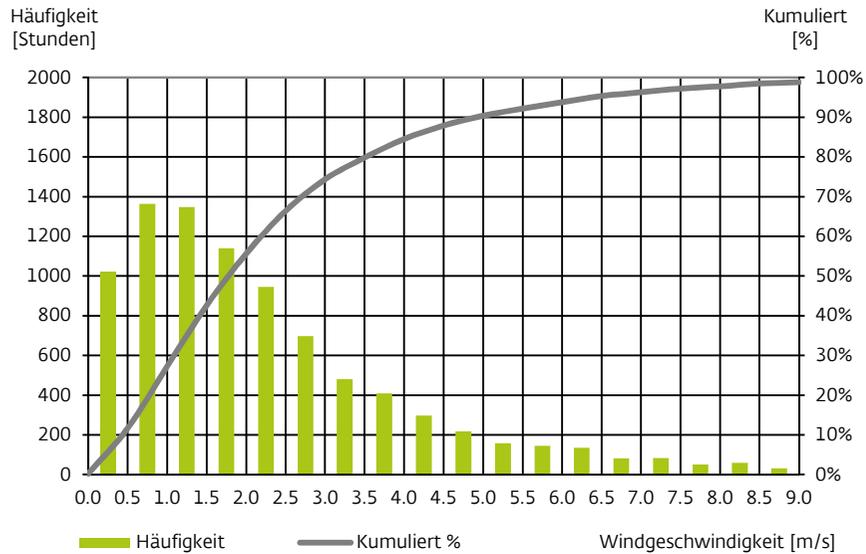


Tab. 11: Vergleich Wetterdaten - Häufigkeit Windgeschwindigkeit

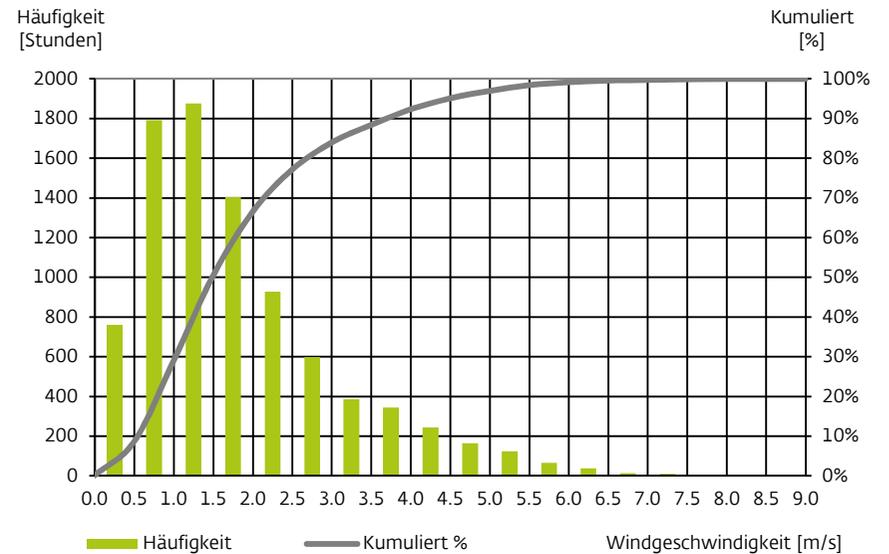
Abb.	Zürich	Bern	Lausanne	St. Gallen
Wind ≤ 0.1 m/s	2 %	2 %	1 %	2 %
Wind ≤ 0.5 m/s	12 %	16 %	9 %	12 %
Wind ≤ 1.5 m/s	43 %	58 %	51 %	46 %
Wind > 3.0 m/s	26 %	17 %	16 %	20 %

Abb. 75: Häufigkeit der Windgeschwindigkeiten

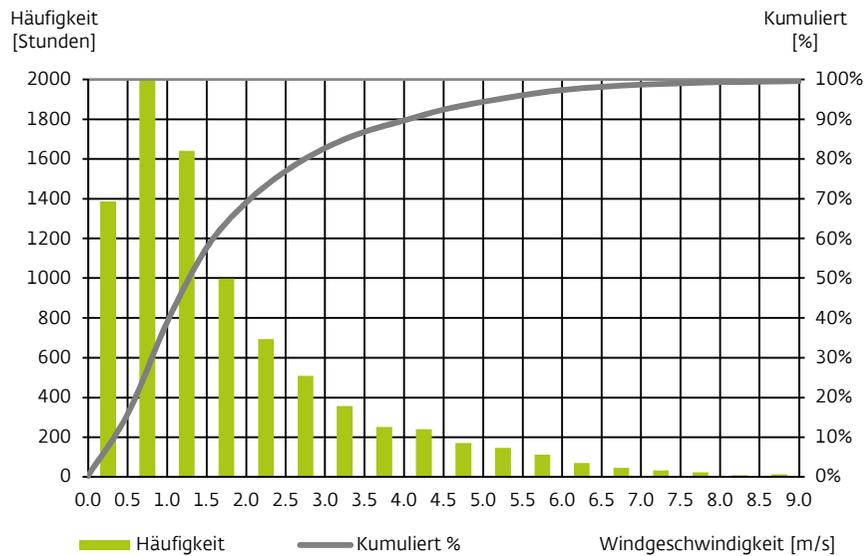
SIA 2028 Zürich SMA Normal



SIA 2028 Pully Normal (Lausanne)



SIA 2028 Bern Liebefeld Normal



SIA 2028 St. Gallen Normal

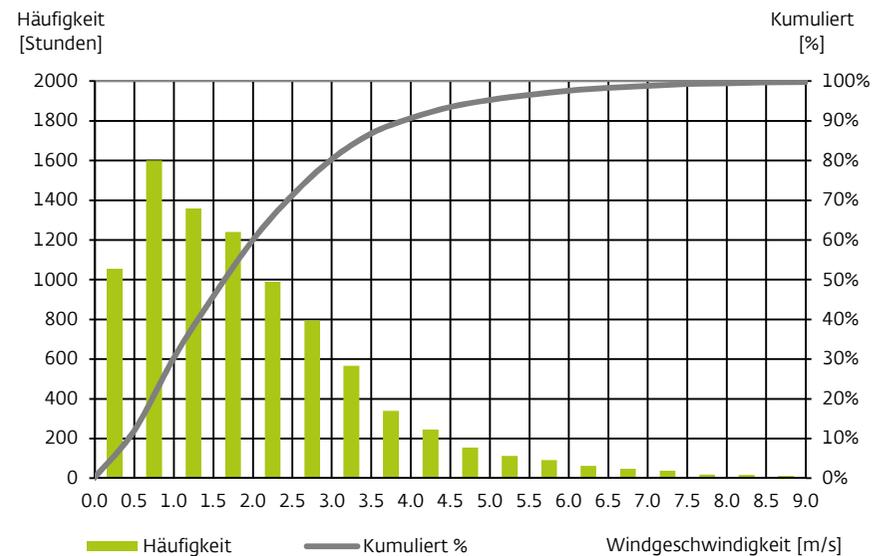
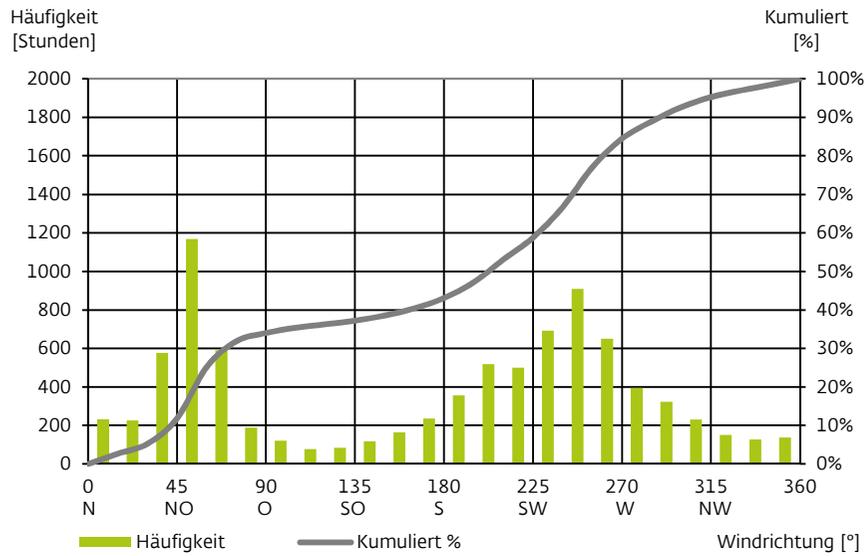
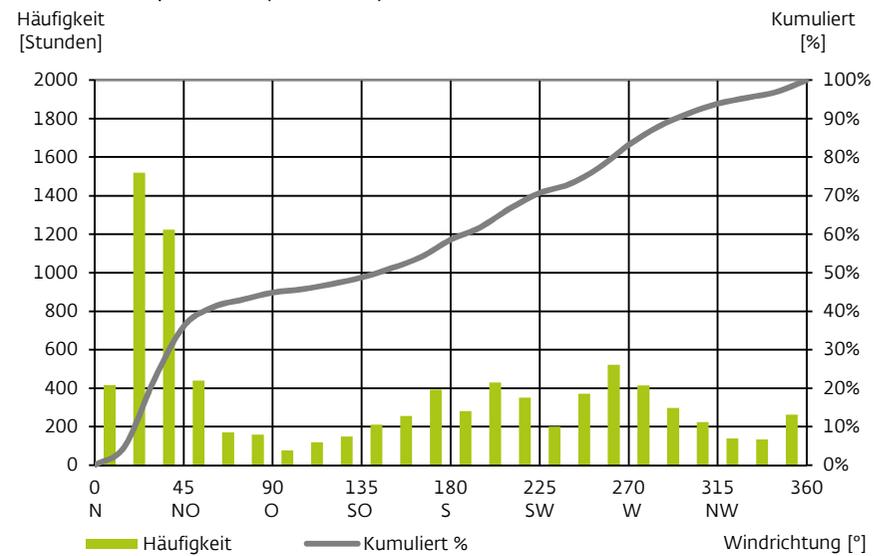


Abb. 76: Häufigkeit der Windrichtungen

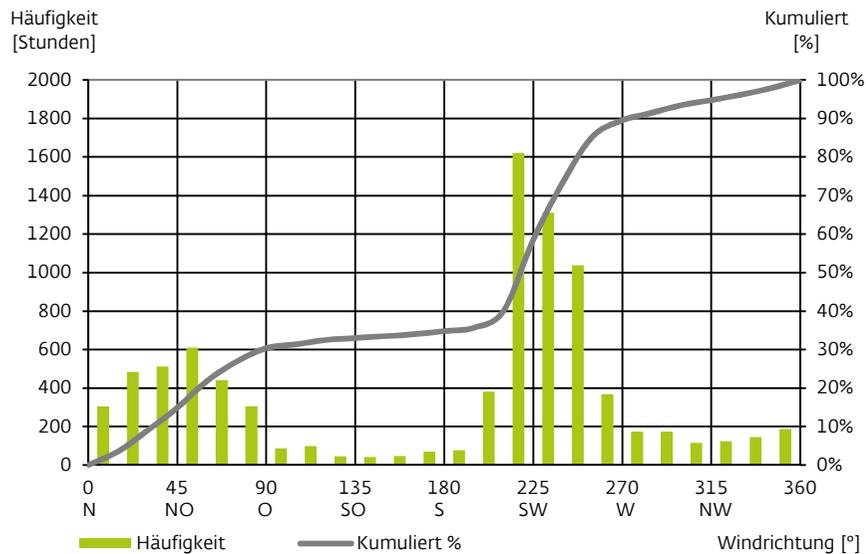
SIA 2028 Zürich SMA Normal



SIA 2028 Pully Normal (Lausanne)



SIA 2028 Bern Liebefeld Normal



SIA 2028 St. Gallen Normal

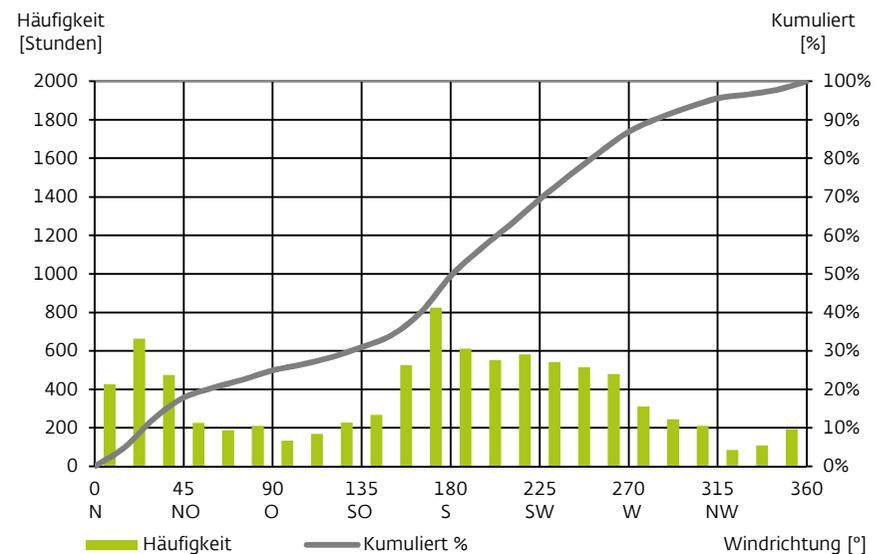
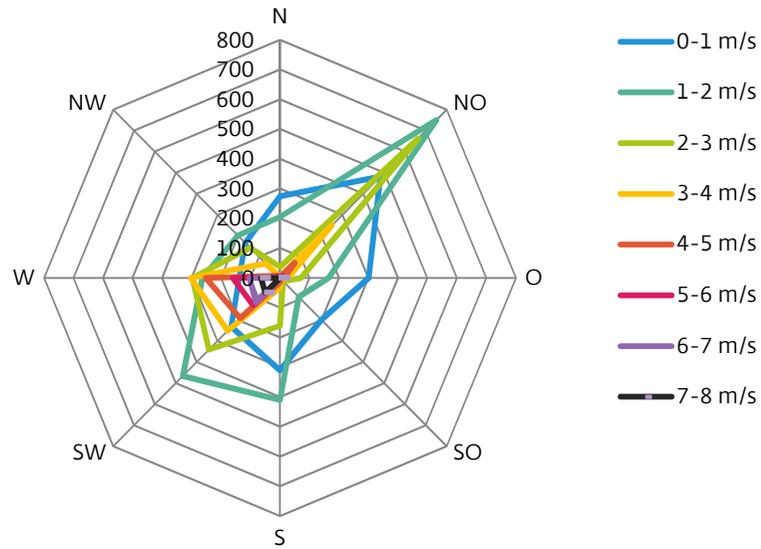
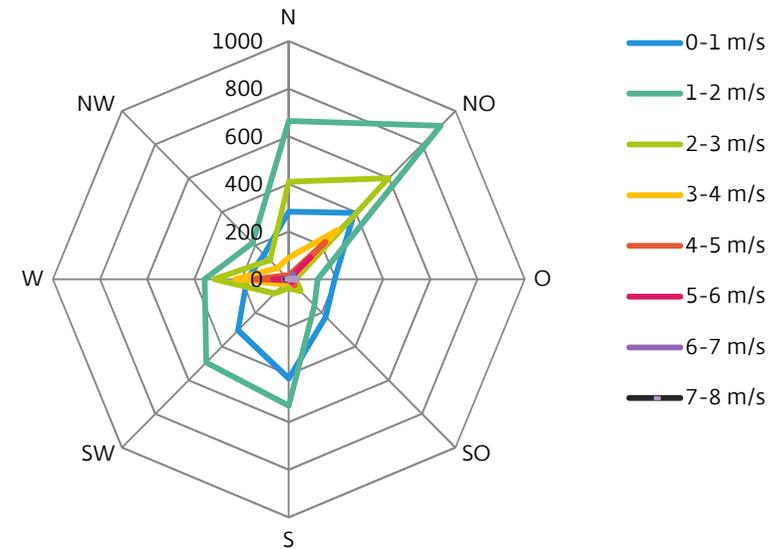


Abb. 77: Windrose – Häufigkeit in Std./Jahr

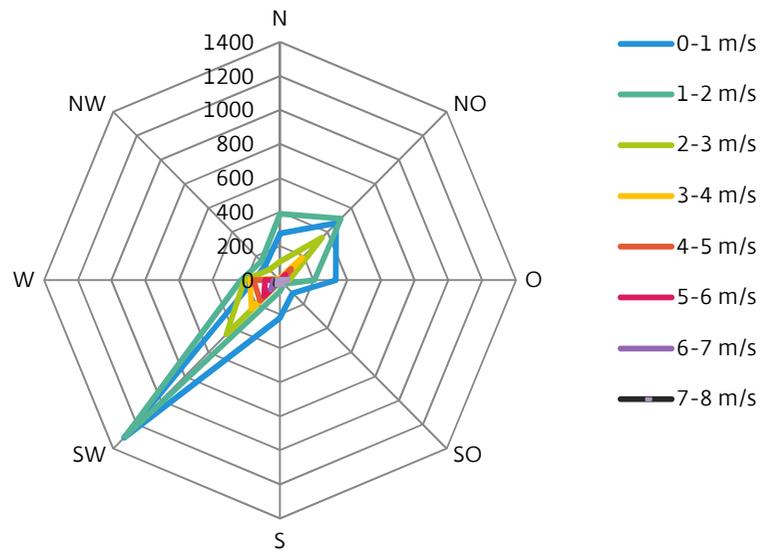
SIA 2028 Zürich SMA Normal



SIA 2028 Pully Normal (Lausanne)



SIA 2028 Bern Liebefeld Normal



SIA 2028 St. Gallen Normal

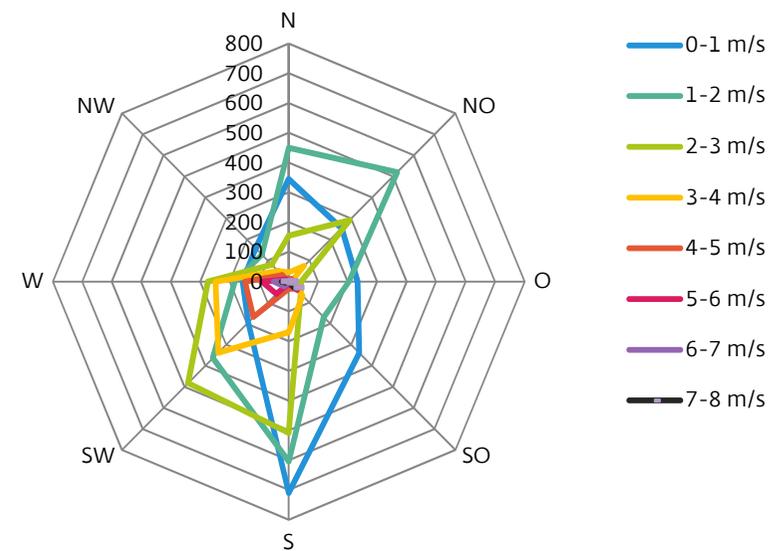
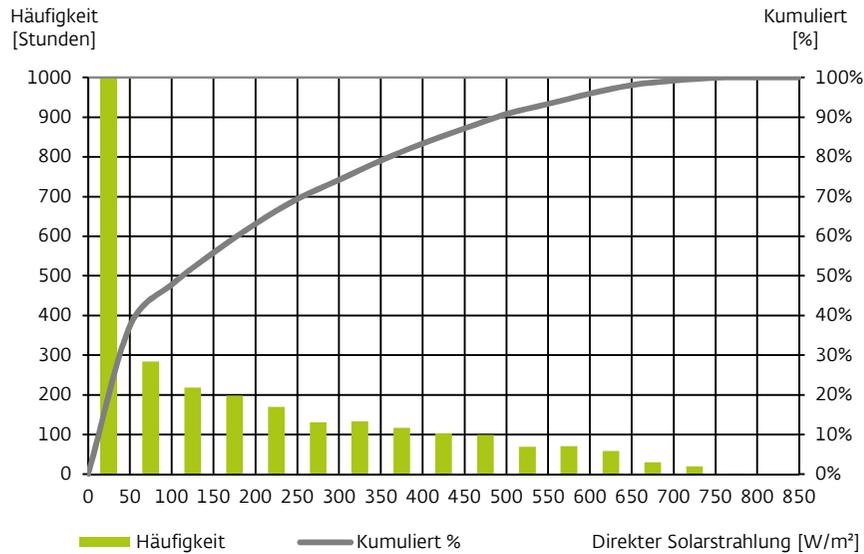
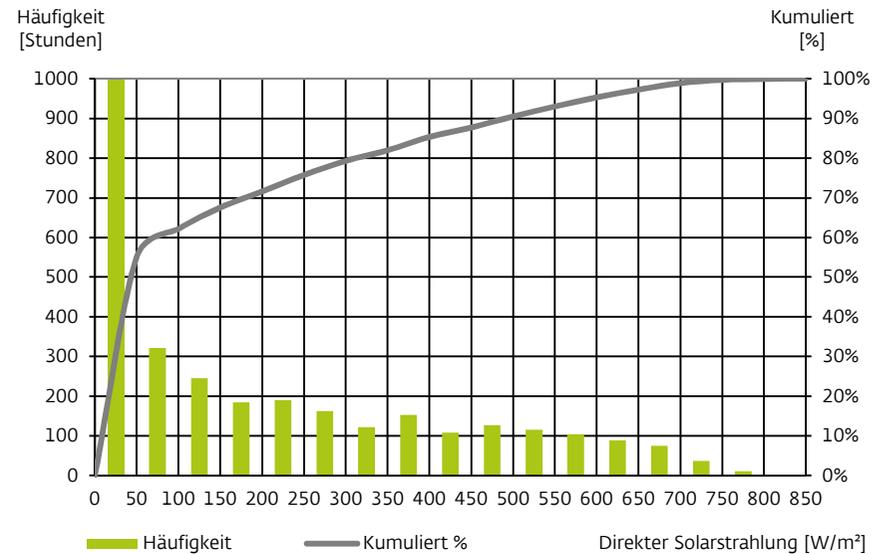


Abb. 78: Häufigkeit der direkten Solarstrahlung (tagsüber)

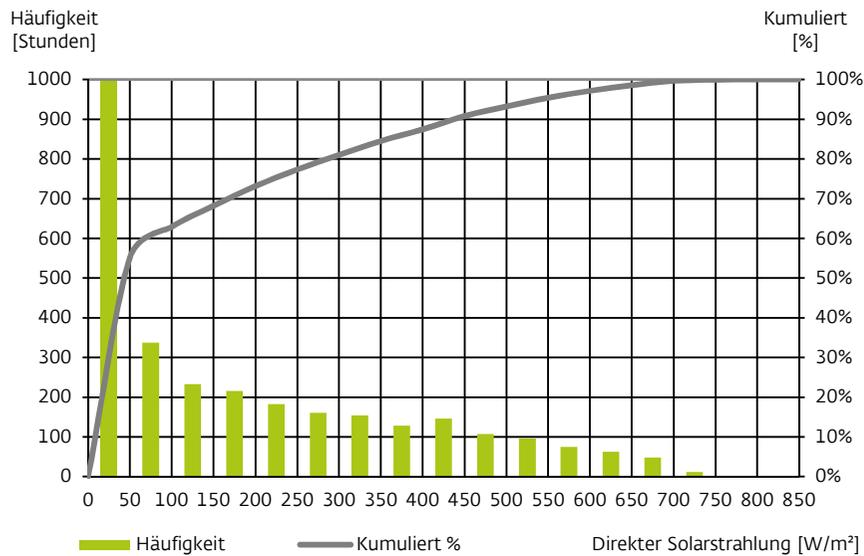
SIA 2028 Zürich SMA Normal



SIA 2028 Pully Normal (Lausanne)



SIA 2028 Bern Liebefeld Normal



SIA 2028 St. Gallen Normal

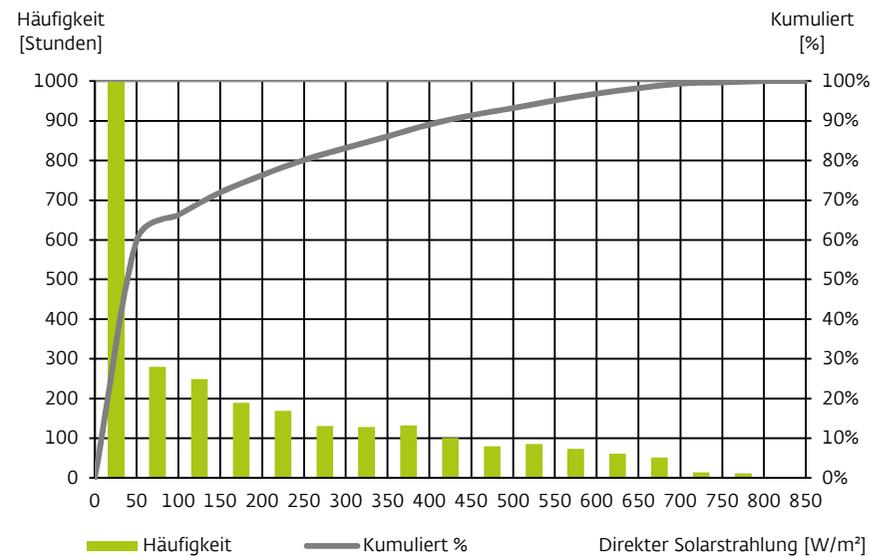
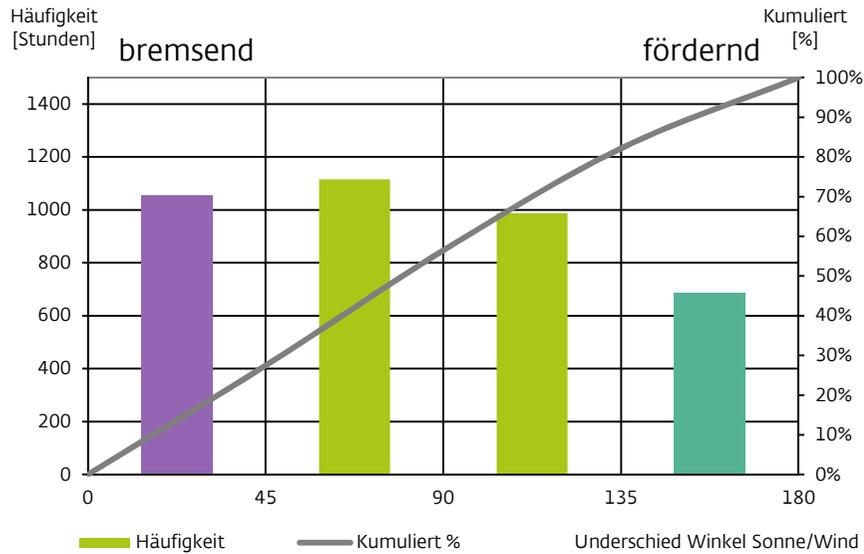
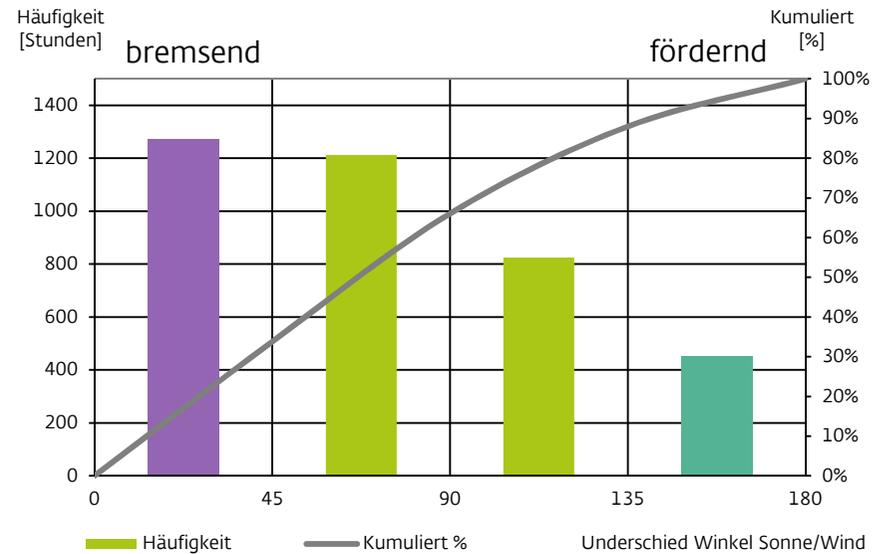


Abb. 79: Häufigkeit - Wind als Förderung oder Bremse für die thermische Konvektionszelle

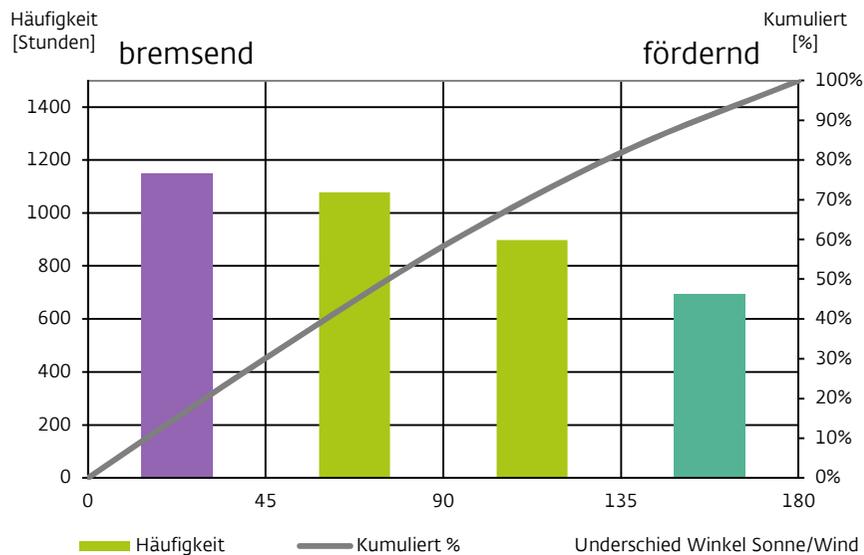
SIA 2028 Zürich SMA Normal



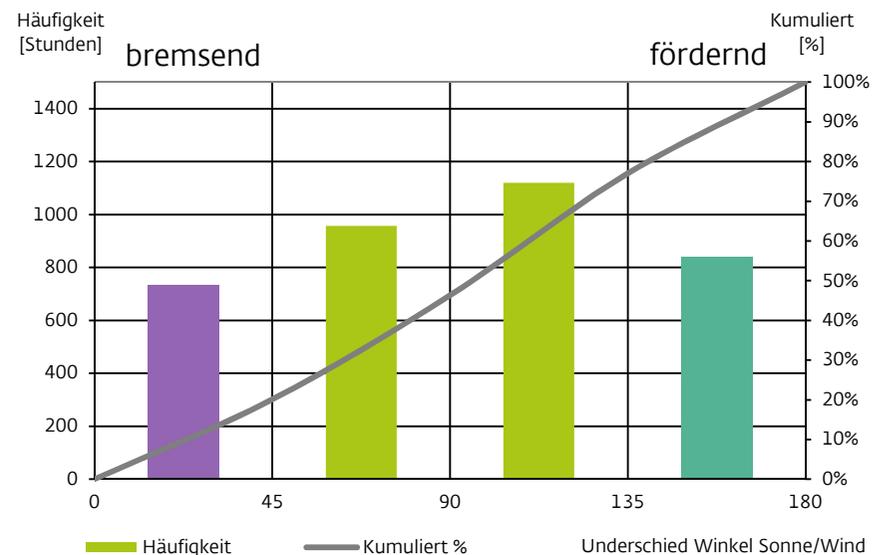
SIA 2028 Pully Normal (Lausanne)



SIA 2028 Bern Liebefeld Normal



SIA 2028 St. Gallen Normal



6. Modul 2: Parameterstudie mittels CFD-Modell

In einer Parameterstudie wird die Durchlüftung des Innenhofes bei unterschiedlichem Windklima und thermischen Bedingungen stationär berechnet.

6.1. Einleitung

Basierend auf der ersten Parameterstudie mit Zonenmodell wird mittels CFD-Modell eine zweite gezielte und abgegrenzte Parameterstudie gemacht. Die Unterschiede zwischen beiden Modellen und die Ziele des Moduls 2 wurden in Abschnitt 2.2 erläutert.

6.2. Simulationsvarianten

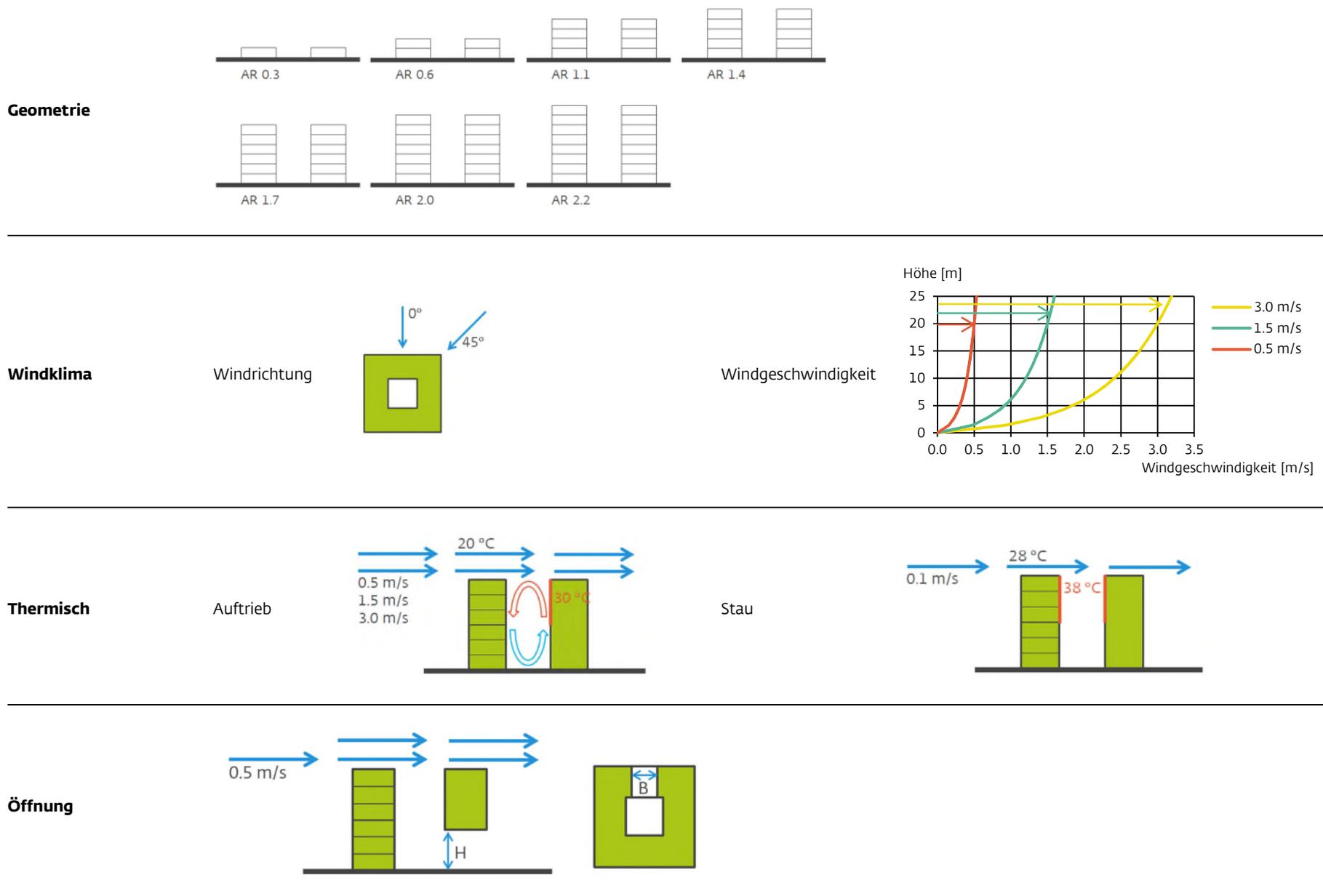
6.2.1. Parameter

Die Parameterstudie unterscheidet 4 Parameter.

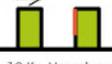
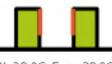
Tab. 12: Parameter für CFD-Studie

Bereich	Parameter	Wert	Hinweis
Geometrie	Anzahl Geschosse	1/2/4/5/6/7/8	Geschosshöhe = 2.8 m
	Windrichtung	0° 45°	0° = senkrecht auf die Nord-Fassade
Windklima	Windgeschwindigkeit	0.1 m/s	SIA 2028 Zürich SMA Normal: 2 % der Zeit ist die Windgeschwindigkeit \leq 0.1 m/s
		0.5 m/s	SIA 2028 Zürich SMA Normal: 12 % der Zeit ist die Windgeschwindigkeit \leq 0.5 m/s
		1.5 m/s	SIA 2028 Zürich SMA Normal: 43 % der Zeit ist die Windgeschwindigkeit \leq 1.5 m/s
		3.0 m/s	SIA 2028 Zürich SMA Normal: 74 % der Zeit ist die Windgeschwindigkeit \leq 3.0 m/s
	Isotherm	/	Keine Berücksichtigung der Temperaturunterschiede
Thermisch	Auftrieb	+ 10 K	Temperaturunterschied zwischen Aussenluft und Oberflächentemperatur der Nord-Fassade für die oberen 3 Geschosse im Innenhof, Konvektionszelle tendenziell bremsend mit Bezug auf Windrichtung
	Stau	+ 10 K	Temperaturunterschied zwischen Aussenluft und Oberflächentemperatur der oberen 3 Geschosse im Innenhof
Öffnung	Durchfahrt	20/40/60 %	Eine Öffnung im Nordtrakt wird berücksichtigt. Die Höhe der Öffnung entspricht 20/40/60 % der Gebäudehöhe.

Abb. 80: Schematische Darstellung der Parameter



6.2.2. Simulationsvarianten

Geometrie		Thermisch			Windrichtung			Windgeschwindigkeit				Öffnung
			 10 K > Umgebung	 AUL 28 °C, Fass 38 °C								
Geschosse	AR	Isotherm	Auftrieb	Stau	0°	45°	180°	0.1 m/s	0.5 m/s	1.5 m/s	3 m/s	H x B
Isotherm												
S01	1	0.3	Isotherm							1.5 m/s		
S22	2	0.6	Isotherm						0.5 m/s			
S02	2	0.6	Isotherm							1.5 m/s		
S03	4	1.1	Isotherm							1.5 m/s		
S04	4	1.1	Isotherm								3 m/s	
S05	4	1.1	Isotherm				45°			1.5 m/s		
S23	5	1.4	Isotherm						0.5 m/s			
S06	5	1.4	Isotherm							1.5 m/s		
S24	5	1.4	Isotherm								3 m/s	
S25	5	1.4	Isotherm						0.5 m/s			2.8 x 2.8 m
S26	5	1.4	Isotherm						0.5 m/s			5.6 x 5.6 m
S27	5	1.4	Isotherm						0.5 m/s			8.4 x 5.6 m
S28	5	1.4	Isotherm						0.5 m/s			2.8 x 2.8 m
S29	5	1.4	Isotherm				180°		0.5 m/s			5.6 x 5.6 m
S30	5	1.4	Isotherm				180°		0.5 m/s			8.4 x 5.6 m
S07	6	1.7	Isotherm							1.5 m/s		
S08	7	2.0	Isotherm							1.5 m/s		
S09	8	2.2	Isotherm							1.5 m/s		
Stratifizierung												
S10	2	0.6			Stau	0°			0.1 m/s			
S11	5	1.4			Stau	0°			0.1 m/s			
Einfluss Sonne/Auftrieb, Interaktion Wind												
S12	2	0.6		Auftrieb		0°			0.5 m/s			
S13	2	0.6		Auftrieb		0°				1.5 m/s		
S14	4	1.1		Auftrieb		0°			0.5 m/s			
S15	4	1.1		Auftrieb		0°				1.5 m/s		
S16	5	1.4		Auftrieb		0°			0.5 m/s			
S17	5	1.4		Auftrieb		0°				1.5 m/s		
S18	5	1.4		Auftrieb		0°					3 m/s	
S19	7	2.0		Auftrieb		0°			0.5 m/s			
S20	7	2.0		Auftrieb		0°				1.5 m/s		
S21	7	2.0		Auftrieb		0°					3 m/s	

6.3. Geometrie und Modellierung

Die Studie wurde auf 7 Geometrien mit je einer Innenhofbreite von 10 m und mit der Anzahl Geschosse von 1 bis 8 begrenzt. Die gleiche Geschosshöhe von 2.8 m wurde aus dem Zonenmodell übernommen. So entsprechen die 7 Geometrievarianten einer AR-Zahl von 0.3 bis 2.2.

Für die Gittererstellung wurde ein Optimum zwischen Rechenzeit und Genauigkeit gesucht. Im Innenhof und rund um das Gebäude wird eine Zellgröße von 17.5 cm, mit Verfeinerung bis 8.75 cm an den Innenhofwänden, gewählt. In 3 Stufen, in zunehmender Distanz vom Gebäude, wird das Gitter schrittweise gröber.

Tab. 13: Gittergröße

Anzahl Geschosse	1	2	4	5	6	7	8
Anzahl Zellen (Millionen)	2.0	2.7	3.5	3.8	4.1	5.4	5.8

Die Simulationen werden mit der Open Source Software OpenFOAM 1712 ausgeführt. Das benutzte Turbulenzmodell ist BouyantBoussinesqSimpleFoam: ein stationärer Solver für thermische Auftrieb bei inkompressibler Strömung.

Abb. 81: Gebäude zu Rechendomain

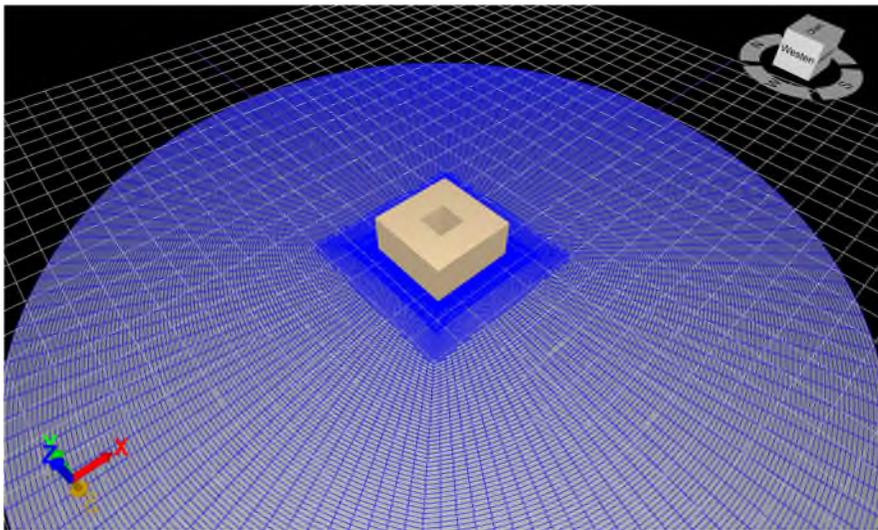


Abb. 82: Gitterverfeinerung von Umgebung bis zum Gebäude

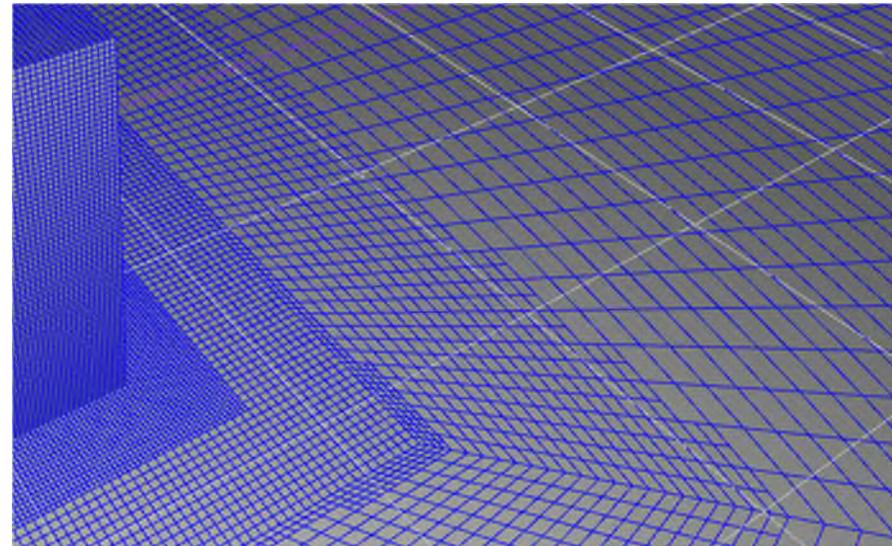
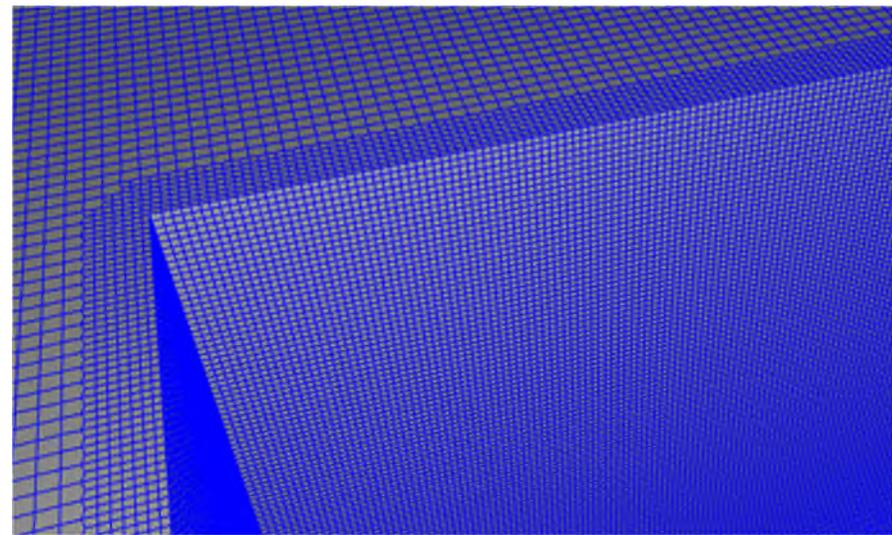


Abb. 83: Gitterverfeinerung im Innenhof



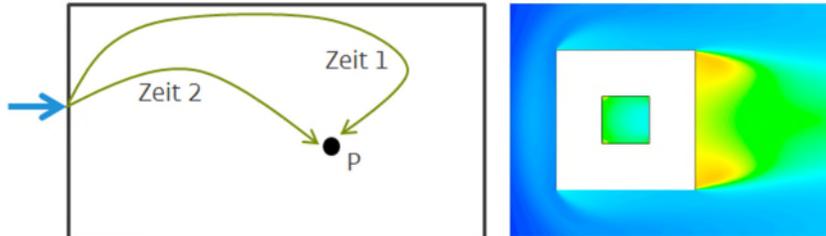
6.4. Bewertung

Im Gegensatz zum Zonenmodell wird in den CFD-Simulationen der CO₂-Ausstoss nicht berücksichtigt. Die CO₂-Produktion wäre stark von den Annahmen hinsichtlich Nutzerbenehmen, Tagesuhrzeit, Fensterlüftung, Wohneinheiten usw. abhängig. Aus diesem Grund ist eine allgemeine Bewertung der Durchlüftung des Innenhofes nach CO₂-Konzentration bei einer stationären Berechnung nicht sinnvoll.

6.4.1. Age of Air

Die erreichbare Luftqualität wird in den CFD-Simulationen mit dem Konzept „Age of Air“ quantifiziert. In jedem Punkt wird das lokale mittlere Alter der Luft berechnet. Die Definition vom Alter der Luft ist die Zeit, die von einem Luftpartikel benötigt wird, um sich vom Startpunkt (Zuluft) bis zum Auswertungspunkt zu bewegen. Da es mehrere Pfade gibt zwischen Startpunkt und Auswertungspunkt, wird die mittlere Zeit berechnet.

Abb. 84: (links) Konzept des „Age of Air“ in Punkt P; (rechts) Beispiel einer Visualisierung vom lokalen mittleren „Age of Air“ bei einem Gebäude mit Innenhof (Quelle³)



Der Parameter Age of Air wird in der Literatur vielfach für die Bewertung der Luftqualität innerhalb von Gebäuden angewendet. Das Alter der Luft wird zu 100 % vom Strömungsfeld bestimmt.

6.4.2. Luftwechsel

Aus der Age of Air kann der Luftwechsel *ACH* berechnet werden. Die Luftwechselrate (1/h) gibt das Vielfache des Raumvolumens an, das als Zuluft zugeführt wird. Z.B. bei einem Luftwechsel von 2 h⁻¹ wird die Luft im Innenhof zwei Mal pro Stunde komplett ausgetauscht (Annahme der perfekten Mischung).

Diese quantitative Bewertung erlaubt einen direkten Vergleich der Varianten mit einem konkreten Grenzwert. Z.B. eine identische Geometrie wird bei einer höheren Windgeschwindigkeit einen höheren Luftwechsel *ACH* und so eine bessere Luftqualität zeigen.

6.4.3. Lüftungseffizienz

Die Lüftungseffizienz ϵ in einem Raum bei unterschiedlichen Lüftungssystemen kann zusätzlich berechnet werden. In aktueller Forschung wird der Parameter ebenfalls für Luftqualität im Aussenraum berücksichtigt.

In der Berechnung der Lüftungseffizienz wird das nominale Age of Air τ_n berücksichtigt. τ_n ist die minimale Zeit zum Wechseln aller Luft im Lüftungsbereich unter Annahme einer perfekt gemischten Lüftung. Die Zeit ist direkt von der Windgeschwindigkeit abhängig. Die Lüftungseffizienz ergibt so eine qualitative Bewertung der Durchlüftung und erlaubt einen relativen Vergleich der Varianten. Die Lüftungseffizienz berücksichtigt die theoretisch erreichbare Lüftung beim angesetzten Windklima. Bei tiefer Luftgeschwindigkeit kann kein hoher Luftwechsel erwartet werden. Trotzdem kann die Lüftungseffizienz, relativ zum bestehenden Windklima, hoch sein.

In der untenstehenden Tabelle werden diese Bewertungsparameter nach dem Age of Air Konzept zusammengefasst.

Tab. 14: Bewertungsparameter nach dem Age of Air Konzept

Parameter	Definition
AoA	lokales mittleres Alter der Luft in Punkt P
\overline{AoA}	Mittelwert von AoA über alle Punkte in einem Bereich
$ACH = \frac{1}{2 \overline{AoA}}$	Anzahl Luftwechsel des betrachteten Bereichs
$\tau_n = \frac{V}{Q}$	nominale Alter der Luft bei perfekt gemischter Lüftung; die minimale Zeit zum Wechsel aller Luft im Domain (V = Volumen Lüftungsbereich; Q = Zuluftmenge wegen Wind)
$\epsilon = \frac{\tau_n}{AoA}$	Lüftungseffizienz, Referenz = der Fall mit perfekt gemischter Lüftung, perfekte Mischung hat Effizienz = 100 %

³ M.A Padilla-Marcos, M. Alberto, Assessment for the Age-Of-The-Air and Ventilation Efficiency in Confined Outdoor Spaces through Computational Fluid Dynamics Techniques, Energies, 2018

6.4.4. Grenzwert für die quantitative Bewertung

Massgebend für die Bewertung ist die quantitative Bewertung nach Luftwechsel: Die tatsächliche Durchlüftung bestimmt die Luftqualität. Die quantitative Bewertung richtet sich nach SIA 382/1 für den notwendigen Zuluftvolumenstrom zur Verdünnung von Luftverunreinigungen.

$$Q_{a,ZUL} = \frac{c_{WE} Q_{WE}}{c_{IH} - c_{ZUL}}$$

Tab. 15: Legende zur Berechnung der benötigten Luftmenge zum Innenhof

Parameter	Definition
$Q_{a,ZUL}$	Erforderliche Luftmenge Aussenluft zum Innenhof [m³/h]
c_{ZUL}	Schadstoffkonzentration Aussenluft [ppm]
c_{IH}	Grenzwert der Schadstoffkonzentration im Innenhof [ppm]
c_{WE}	Schadstoffkonzentration in den WE mit Fensterlüftung [ppm]
Q_{WE}	Luftmenge von WE über Fensterlüftung zum Innenhof [m³/h]

Die notwendige Luftmenge $Q_{a,ZUL}$ für die Durchlüftung des Innenhofs wird berechnet. Die Schadstoffkonzentration der Aussenluft c_{ZUL} wird mit 400 ppm angesetzt. Der Grenzwert c_{IH} für den Innenhof von 600 ppm wird behalten. Für die Schadstoffkonzentration c_{WE} in den Wohneinheiten und die Luftmenge Q_{WE} über die Fensterlüftung zum Innenhof können die folgenden Annahmen angesetzt werden:

- Q_{WE} mit 3 P/WE und 30 m³/(hP), bei einer Gleichzeitigkeit von 20 % (in 20 % von den Wohneinheiten wird am gleichen Moment gelüftet)
- c_{WE} mit 500 bis 800 ppm als leichte Vorbelastung, 800 bis 1000 ppm als mittlere und > 1000 ppm als schwere Vorbelastung

Die folgenden Grafiken zeigen den erforderlichen Luftwechsel des Innenhofs zum Einhalten des Grenzwerts von 600 ppm bei verschiedenen Szenarien.

Aus den Grafiken kommt hervor, dass ein Luftwechsel von 1 h⁻¹ im sehr konservativen Fall (z.B. Vorbelastung mit 1000 ppm, 1 Wohneinheit pro 5 m Fassade, 10 m Innenhofbreite) ausreichen würde. Bei einer Innenhofbreite von 20 m oder 1 Wohneinheit pro 10 m Fassade wurde bereits ein Luftwechsel von 0.5 h⁻¹ ausreichen.

Abb. 85: Erforderlicher Luftwechsel des Innenhofs bei 5 m Fassadenlänge pro Wohneinheit, nach Vorbelastung in den Wohneinheiten

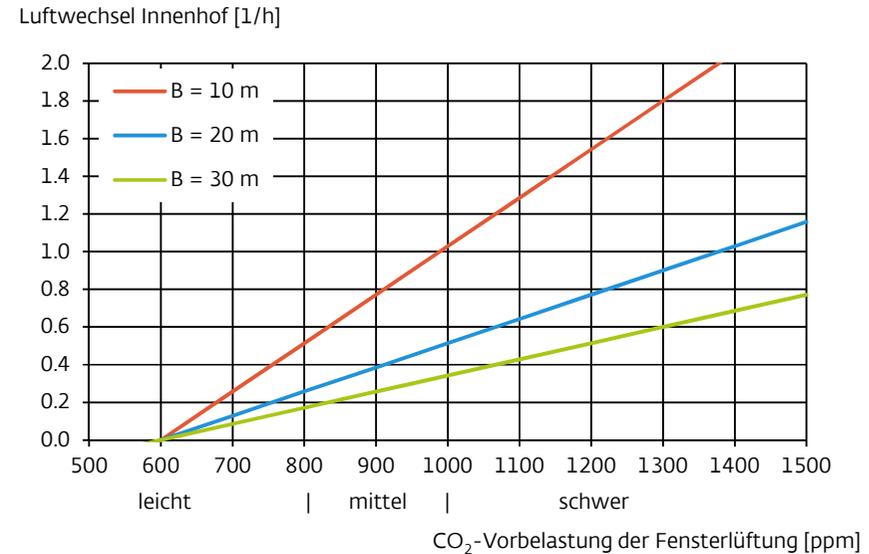
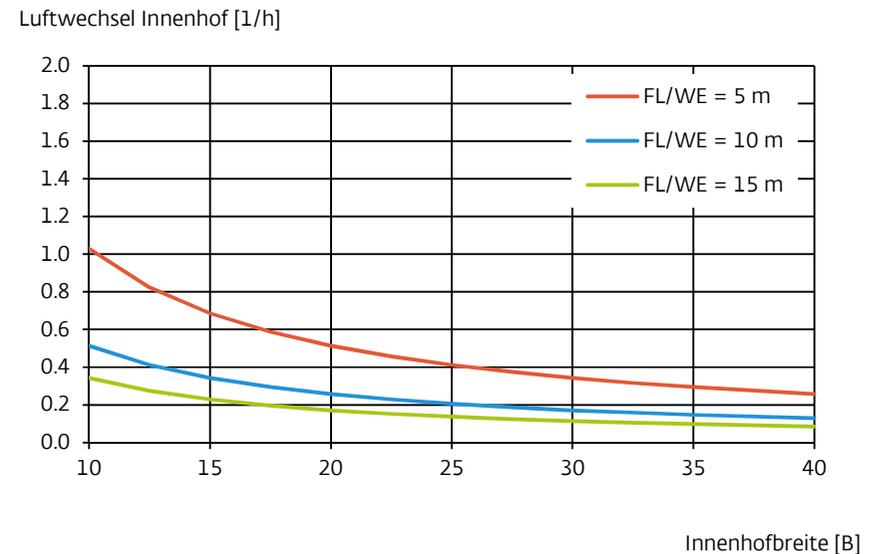


Abb. 86: Erforderlicher Luftwechsel des Innenhofs bei Vorbelastung von 1000 ppm in den Wohneinheiten, nach Fassadenlänge (FL) Innenhof pro Wohneinheit (WE)



Bei sehr tiefen Windgeschwindigkeiten kann jedoch kaum ein Luftwechsel von 1 h^{-1} gefordert werden. Im Innenhof kann keine bessere Durchlüftung als in der Nachstromzone gefordert werden. Hier müssten die Anforderungen im Innenhof entsprechend vernünftig angesetzt werden. Illustrativ wird deshalb für jede Simulationsvariante die Lüftungseffizienz ebenfalls ausgewertet.

In der nachfolgenden Parameterstudie wird ein Luftwechsel von 1 h^{-1} angestrebt, mit einem Minimum von 0.5 h^{-1} in den kritischen Bereichen und bei tiefen Luftgeschwindigkeiten.

6.4.5. Auswertungsebene

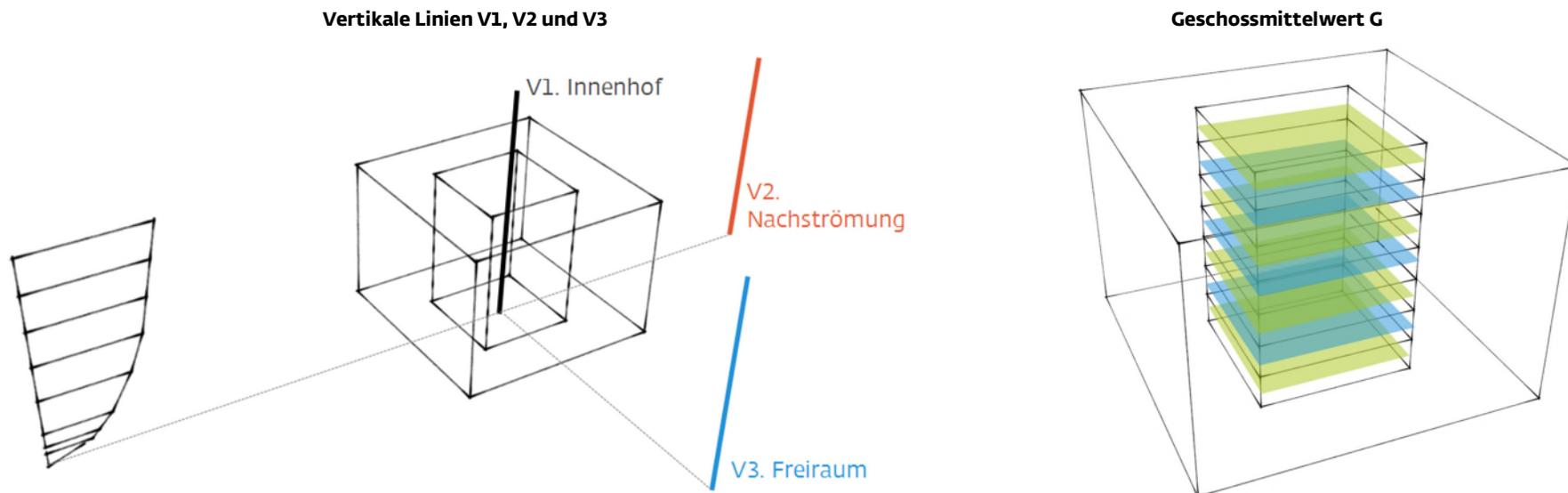
Die Auswertung erfolgt in mehreren Ebenen.

- Der vertikale Verlauf wird für 3 Stellen ausgewertet: V1 zentral im Innenhof, V2 im Bereich Nachströmungswirbel und V3 im Freiraum.
- Für jedes Geschoss wird der Mittelwert auf mittlerer Höhe berechnet.
- Für die Visualisierung werden eine horizontale HE und vertikale VE Ebene dargestellt.

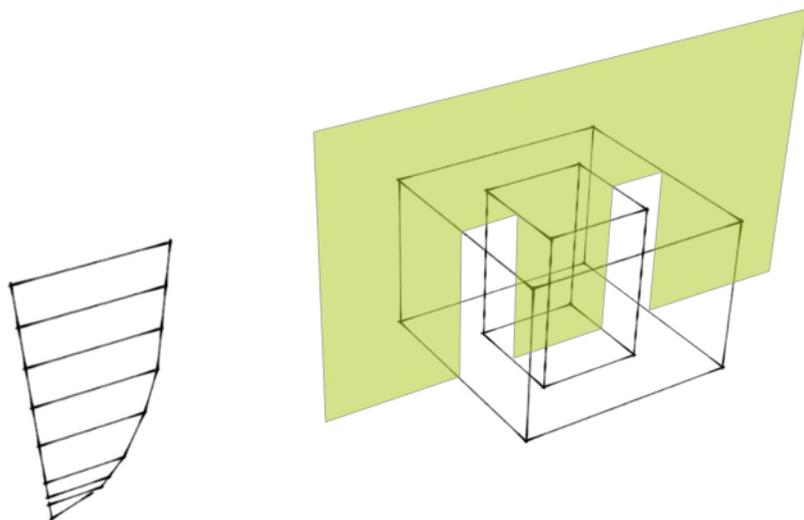
Tab. 16: Auswertungsebene

Ebene	Definition	Auswertung
V1	Vertikale Linie, zentral im Innenhof	Vertikaler Verlauf des „Age of Air“ und Lüftungseffizienz
V2	Vertikale Linie, in der Nachstromzone, 30 m hinter dem Gebäude	Vertikaler Verlauf des „Age of Air“ und Lüftungseffizienz
V3	Vertikale Linie, im Freiraum, Einfluss vom Gebäude begrenzt, 30 m neben Gebäude	Vertikaler Verlauf des „Age of Air“ und Lüftungseffizienz
G	Horizontale Ebene, pro Geschoss, mittlere Höhe je Geschoss	Mittelwert des „Age of Air“ und Luftwechselrate Geschoss
VE	Vertikale Ebene, zentral durch Innenhof, parallel mit Windrichtung	Visualisierung der Luftströmung: Luftgeschwindigkeit und „Age of Air“
HE	Horizontale Ebene, auf mittlerer Höhe im Innenhof	Visualisierung der Luftströmung: Luftgeschwindigkeit und „Age of Air“

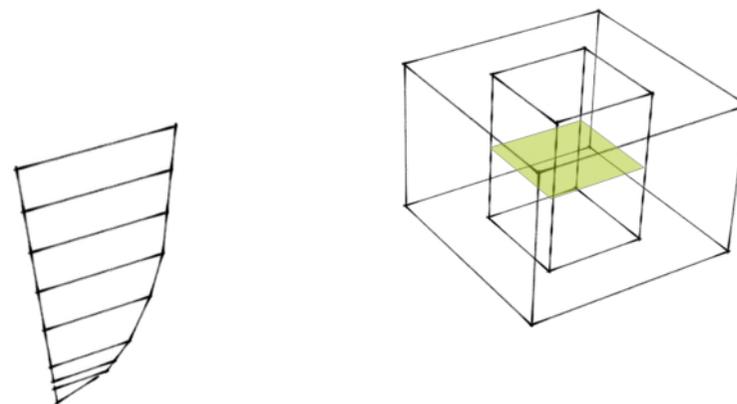
Abb. 87: Auswertungsebene - schematische Darstellung



Vertikale Ebene VE



Horizontale Ebene HE



7. Modul 2: Resultate des CFD-Modells

Zur Auswertung der Ergebnisse der CFD-Simulationen wurden für die Varianten verschiedene Kennwerte untersucht und dargestellt.

7.1. Einleitung

Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse pro Simulationsvariante ist im Anhang 10.1 und 10.2 zu finden. Für jede Variante sind die folgenden Auswertungen verfügbar:

- Age of Air, Luftwechsel und Lüftungseffizienz im vertikalen Verlauf und Mittelwerte pro Geschoss
- Visualisierung der Strömung und der Age of Air für die Ebenen HE und VE

Im vorliegenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Simulationsvarianten verglichen. Im Abschnitt 7.3 bis 7.7 wird der Einfluss von jedem einzelnen Parameter dargestellt und besprochen. Die Unterschiede hinsichtlich Luftwechsel und Age of Air werden dargestellt und eine kurze Erläuterung wird gegeben. Für jeden Fall wurde eine schematische Darstellung der Luftströmung gemacht.

7.2. Besprechung

Der Einfluss der Windgeschwindigkeit ist logisch.

- Bei tiefen Windgeschwindigkeiten ist das Einhalten des Grenzwerts von minimal 0.5 h^{-1} auch bei einem mittleren bis tiefen AR-Wert kritisch. In Zürich ist die Windgeschwindigkeit 12 % der Zeit $\leq 0.5 \text{ m/s}$ (SIA 2028 Zürich SMA). Dieser Wert tritt sowohl im Winter als auch im Sommer auf. Tiefe Luftgeschwindigkeiten sind nachts häufiger als tagsüber.
- Bei hohen Windgeschwindigkeiten wird der Grenzwert von 1 h^{-1} auch bei AR-Werten bis 2.2 eingehalten.
- Bei mittleren Windgeschwindigkeiten wird der Unterschied in AR-Werten sehr relevant. In Zürich ist die Windgeschwindigkeit 43 % der Zeit $\leq 1.5 \text{ m/s}$ (SIA 2028 Zürich SMA). Bis AR 1.4 und bei senkrechter Windrichtung werden die Anforderungen eingehalten. Bei diagonalen Windrichtung ist jedoch schon bei AR 1.1 der Luftwechsel nur ausreichend.

Der Einfluss der Windrichtung darf nicht unterschätzt werden. Jedoch können aufgrund des einen Falls (S05) keine detaillierten Schlussfolgerungen gezogen werden. Ohne zusätzliche Simulationen zur weiteren Analyse dieses Parameters kann lediglich in den Empfehlungen eine zusätzliche Sicherheit berücksichtigt werden.

Der Einfluss von Auftrieb ist sehr dynamisch. Je nach Geometrie und Windgeschwindigkeit wird entweder ein fördernder oder ein bremsender Effekt wahrgenommen.

- Bei tiefen Windgeschwindigkeiten löst ein Temperaturunterschied zwischen Aussenluft und Oberflächentemperatur (z.B. lokale Einstrahlung der Sonne auf die Fassade) grundsätzlich eine Luftströmung aus. Die Durchlüftung des Innenhofs wird tendenziell besser.
- Bei hohen Windgeschwindigkeiten ist der Wind dominant. Der Einfluss vom aufgelösten Auftrieb ist begrenzt und kann lokal sowohl bremsend als auch fördernd wirken.
- Bei mittleren Windgeschwindigkeiten ist der Einfluss sehr unterschiedlich und kann mittels den folgenden Beispielen erläutert werden:
 - Im Fall mit AR 1.1 und Wind 1.5 m/s wird die Durchlüftung im unteren Bereich gebremst und im oberen Bereich gefördert (Abb. 112). Im isothermen Fall entsteht ein regelmässiger Wirbel und der untere Bereich wird effizient durchströmt (S03). Dieser Wirbel ist beim Fall mit Auftrieb (S15) nicht mehr klar definiert. Trotzdem ist die Durchlüftung im oberen Bereich dank Auftrieb besser.
 - Im Fall mit AR 1.4 und Wind 1.5 m/s wirkt der Auftrieb negativ (Abb. 116). Die Durchströmung vom isothermen Fall (S06) wird tatsächlich von einer Konvektionszelle (S17) gebremst.
 - Im Fall mit AR 2.0 und Wind 1.5 m/s wirkt der Auftrieb positiv (Abb. 120). Im isothermen Fall (S08) kommt in diesem engen Innenhof keine strukturierte Strömung zustande. Der Auftrieb (S20) löst eine Konvektionszelle aus und durchflutet so ebenfalls den kritischeren unteren Bereich.

7.3. Einfluss der Parameter: AR

In den untenstehenden Grafiken wird der Einfluss des Parameters **AR** ermittelt. Die folgenden Gruppen können mit diesem Parameter als Variable abgegrenzt werden:

Tab. 17: Anzahl Fälle im Datensatz mit AR als Parameter

Windrichtung	0°			45°
	0.5 m/s	1.5 m/s	3.0 m/s	1.5 m/s
Isotherm		7 Fälle		
Auftrieb	4 Fälle	4 Fälle		
Stau				

Isotherm, WR 0, Wind 1.5 m/s

Bei AR bis 1.4 wird bis unten im Innenhof ein Luftwechsel von ca. 1 h⁻¹ oder höher wahrgenommen. In den Strömungsbildern ist ersichtlich, dass sich hier der Wirbel bis zum unteren Bereich des Innenhofs entwickeln kann. Bei AR gleich 1.4 entsteht kein klarer Wirbel mehr, jedoch wird der Innenhof bis unten mit Aussenluft durchströmt.

Bei AR gleich 1.7 wird eine sehr kritische Situation wahrgenommen: Hier entsteht eine Zelle im unteren Bereich, wo kontaminierte Luft zirkuliert. Die Aussenluft erreicht hauptsächlich nur die obere Hälfte des Innenhofs. Der Austausch zwischen dem oberen und unteren Bereich ist begrenzt; so entsteht im unteren Bereich ein sehr tiefer Luftwechsel.

Bei AR > 1.7 ist die Situation weniger kritisch, jedoch ist der Luftwechsel in der unteren Hälfte < 0.5 h⁻¹ und deshalb unzureichend.

Abb. 88: Luftwechsel – Auswertung pro Geschoss

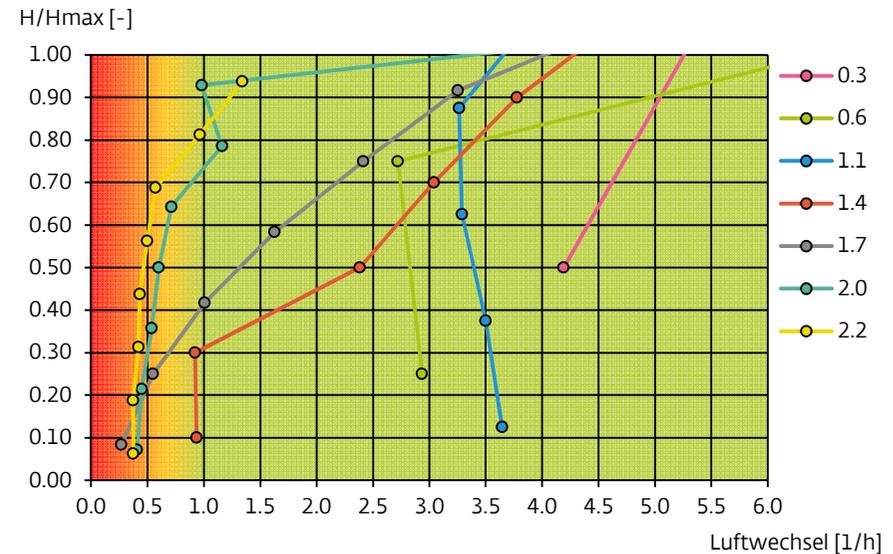


Abb. 89: Strömungsbilder – Vergleich AR – Isotherm

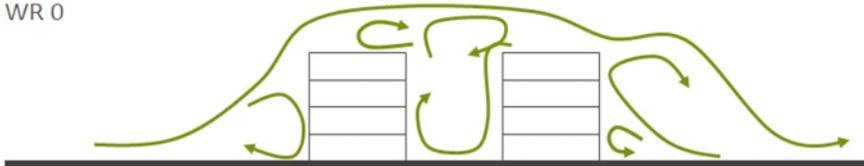
S01
AR 0.3
Isotherm
Wind 1.5 m/s
WR 0



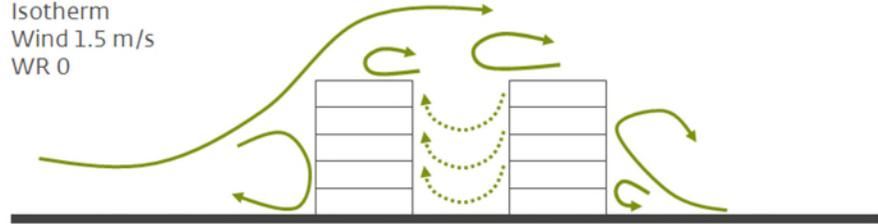
S02
AR 0.6
Isotherm
Wind 1.5 m/s
WR 0



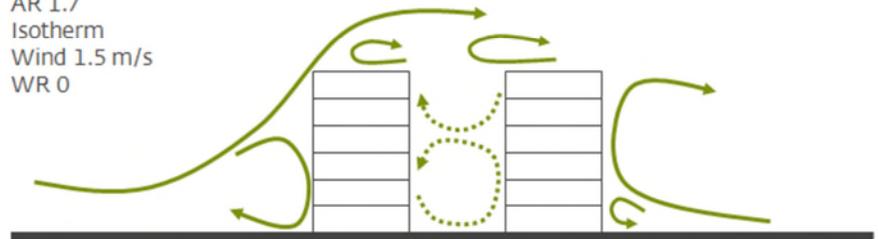
S03
AR 1.1
Isotherm
Wind 1.5 m/s
WR 0



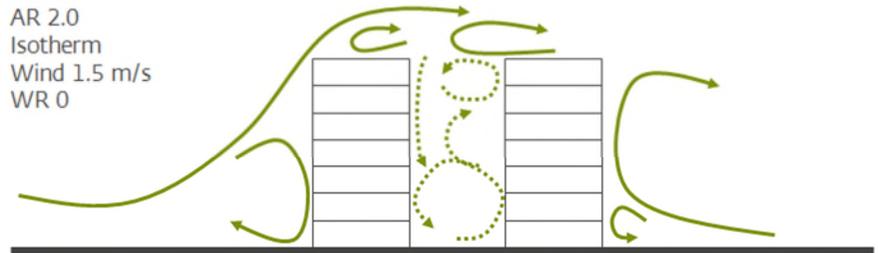
S06
AR 1.4
Isotherm
Wind 1.5 m/s
WR 0



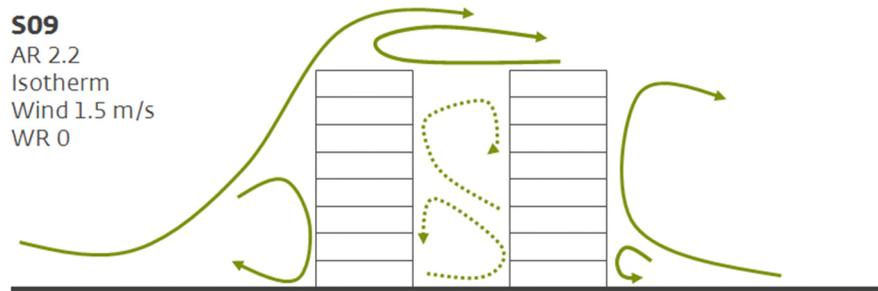
S07
AR 1.7
Isotherm
Wind 1.5 m/s
WR 0



S08
AR 2.0
Isotherm
Wind 1.5 m/s
WR 0



S09
AR 2.2
Isotherm
Wind 1.5 m/s
WR 0



Auftrieb, WR 0, Wind 0.5 m/s

Bei der Luftgeschwindigkeit von 0.5 m/s wird die Durchlüftung des Innenhofs kritischer. Bei keinem von den 4 simulierten Fällen wird im EG ein Luftwechsel von 1 h⁻¹ erreicht. Bis AR = 1.1 ist die Durchlüftung mit > 0.5 h⁻¹ ausreichend.

Eine Luftgeschwindigkeit < 0.5 m/s hat in Zürich eine Häufigkeit von ca. 10 %.

Abb. 90: Luftwechsel – Auswertung pro Geschoss

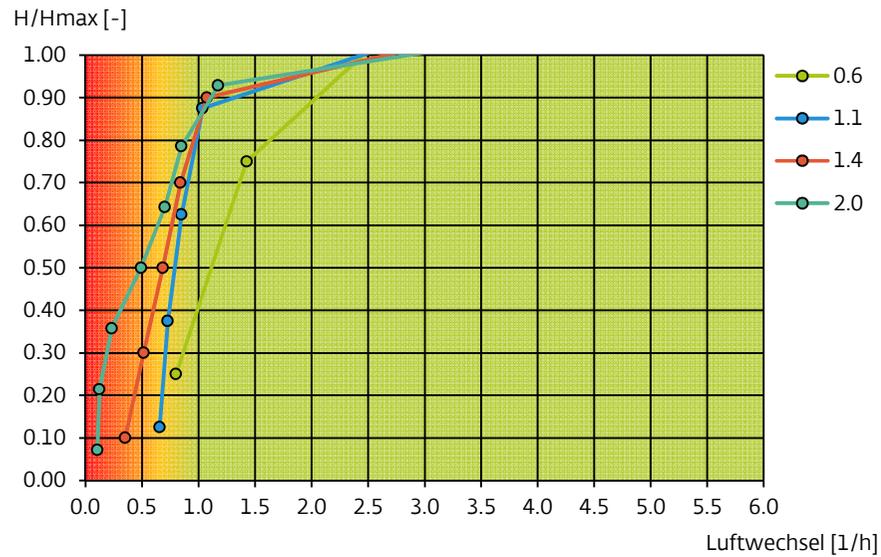


Abb. 91: Strömungsbilder – Vergleich AR – Auftrieb, Wind 0.5 m/s, WR 0

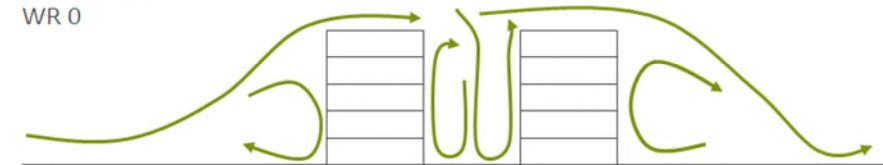
S12
AR 0.6
Sonne/Auftrieb
Wind 0.5 m/s
WR 0



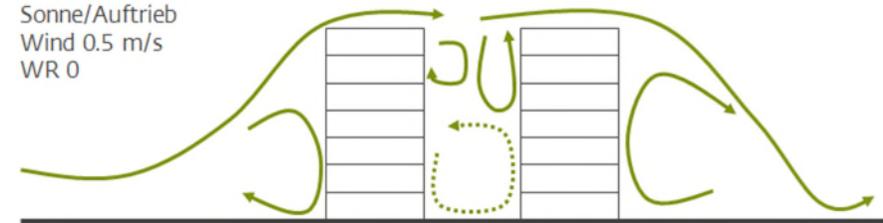
S14
AR 1.1
Sonne/Auftrieb
Wind 0.5 m/s
WR 0



S16
AR 1.4
Sonne/Auftrieb
Wind 0.5 m/s
WR 0



S19
AR 2.0
Sonne/Auftrieb
Wind 0.5 m/s
WR 0



Auftrieb, WR 0, Wind 1.5 m/s

Bei der Luftgeschwindigkeit von 1.5 m/s ist die Durchlüftung in diesen 4 Fällen gewährleistet.

Eine Luftgeschwindigkeit < 1.5 m/s hat in Zürich eine Häufigkeit von ca. 45 %.

Abb. 92: Luftwechsel – Auswertung pro Geschoss

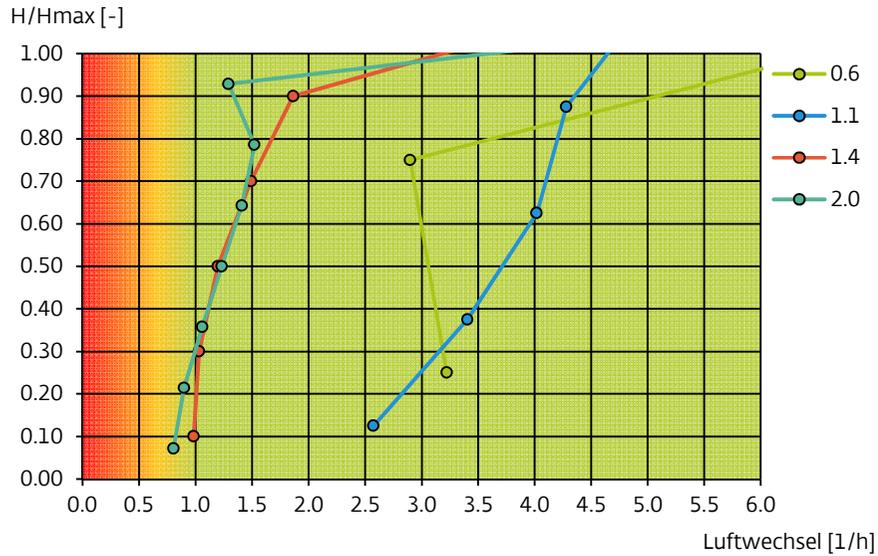


Abb. 93: Strömungsbilder – Vergleich AR – Auftrieb, Wind 1.5 m/s, WR 0

S13

AR 0.6
Sonne/Auftrieb
Wind 1.5 m/s
WR 0



S15

AR 1.1
Sonne/Auftrieb
Wind 1.5 m/s
WR 0



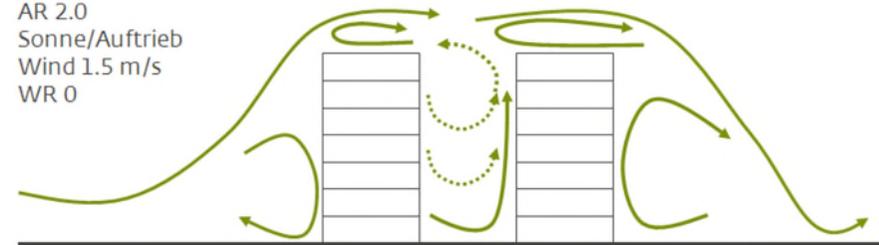
S17

AR 1.4
Sonne/Auftrieb
Wind 1.5 m/s
WR 0



S20

AR 2.0
Sonne/Auftrieb
Wind 1.5 m/s
WR 0



7.4. Einfluss der Parameter: Windgeschwindigkeit

In den untenstehenden Grafiken wird der Einfluss des Parameters **Windgeschwindigkeit** ermittelt. Die folgenden Gruppen können mit diesem Parameter als Variable abgegrenzt werden:

Tab. 18: Anzahl Fälle im Datensatz mit Windgeschwindigkeit als Parameter

Windrichtung	0°								45°
	AR	0.3	0.6	1.1	1.4	1.7	2.0	2.2	1.1
Isotherm			2	2	3				
Auftrieb			2	2	3		3		

Isotherm, AR 0.6, WR 0

Eine Luftgeschwindigkeit von 1.5 m/s statt 0.5 m/s verbessert die Durchlüftung des Innenhofs mit Faktor 5 bis 6.

Abb. 94: Luftwechsel – Auswertung pro Geschoss

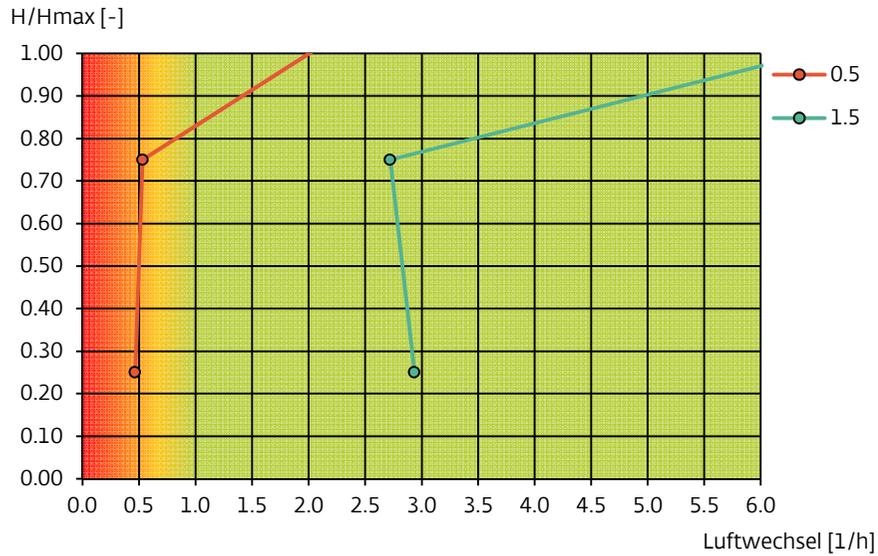


Abb. 95: Strömungsbilder – Vergleich Windgeschwindigkeit – Isotherm, AR 0.6

S22
AR 0.6
Isotherm
Wind 0.5 m/s
WR 0



S02
AR 0.6
Isotherm
Wind 1.5 m/s
WR 0



Isotherm, AR 1.1, WR 0

Eine Luftgeschwindigkeit von 3.0 m/s statt 1.5 m/s verbessert die Durchlüftung des Innenhofs mit Faktor 3.

Eine Luftgeschwindigkeit > 3.0 m/s hat in Zürich eine Häufigkeit von ca. 25 %.

Abb. 96: Luftwechsel – Auswertung pro Geschoss

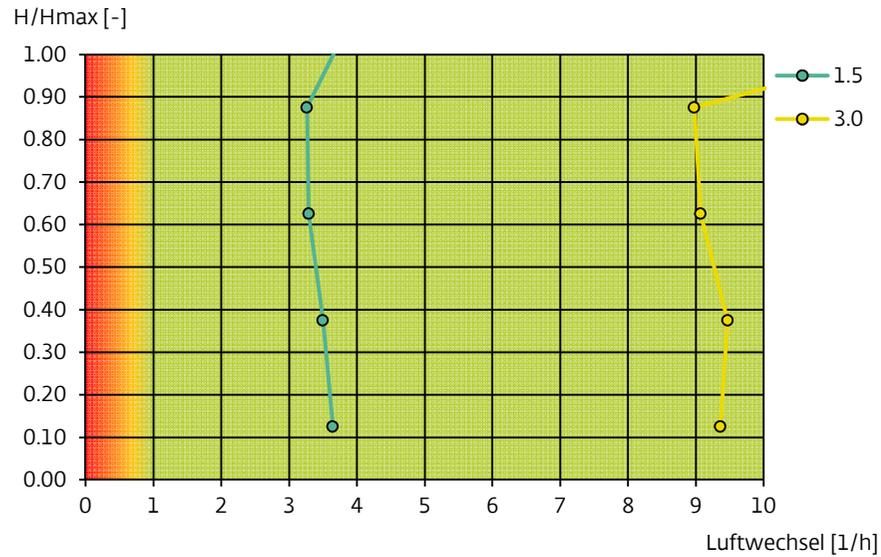


Abb. 97: Strömungsbilder – Vergleich Windgeschwindigkeit – Isotherm, AR 1.1

S03
AR 1.1
Isotherm
Wind 1.5 m/s
WR 0



S04
AR 1.1
Isotherm
Wind 3.0 m/s
WR 0



Isotherm, AR 1.4, WR 0

Bei einem AR von 1.4 ist die Durchlüftung bei Windgeschwindigkeit 0.5 m/s kritisch mit einem Luftwechsel knapp $< 0.5 \text{ h}^{-1}$. Bei einer 3 Mal höheren Luftgeschwindigkeit wird die Durchlüftung ausreichend mit einem Luftwechsel knapp $< 1 \text{ h}^{-1}$. Falls die Luftgeschwindigkeit noch weiter zunimmt, steigt die Durchlüftung sehr schnell.

Abb. 98: Luftwechsel – Auswertung pro Geschoss

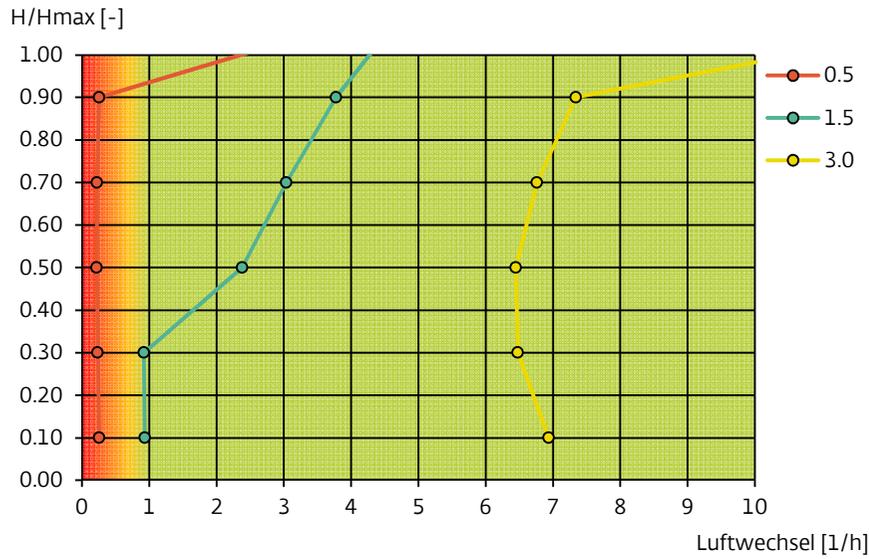
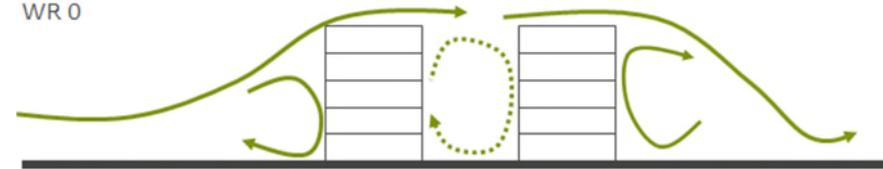


Abb. 99: Strömungsbilder – Vergleich Windgeschwindigkeit – Isotherm, AR 1.4

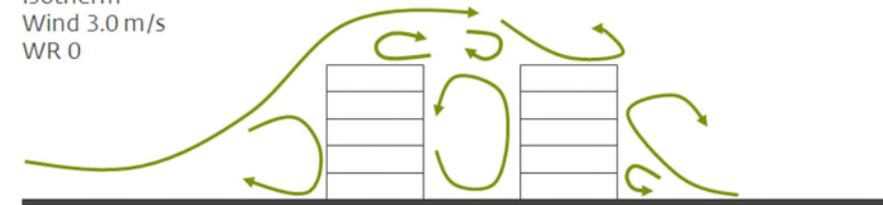
S23
AR 1.4
Isotherm
Wind 0.5 m/s
WR 0



S06
AR 1.4
Isotherm
Wind 1.5 m/s
WR 0



S24
AR 1.4
Isotherm
Wind 3.0 m/s
WR 0



Auftrieb, AR 0.6, WR 0

Bei AR = 0.6 ist die Durchlüftung des Innenhofs auch bei einer Windgeschwindigkeit von 0.5 m/s ausreichend bis gut.

Abb. 100: Luftwechsel – Auswertung pro Geschoss

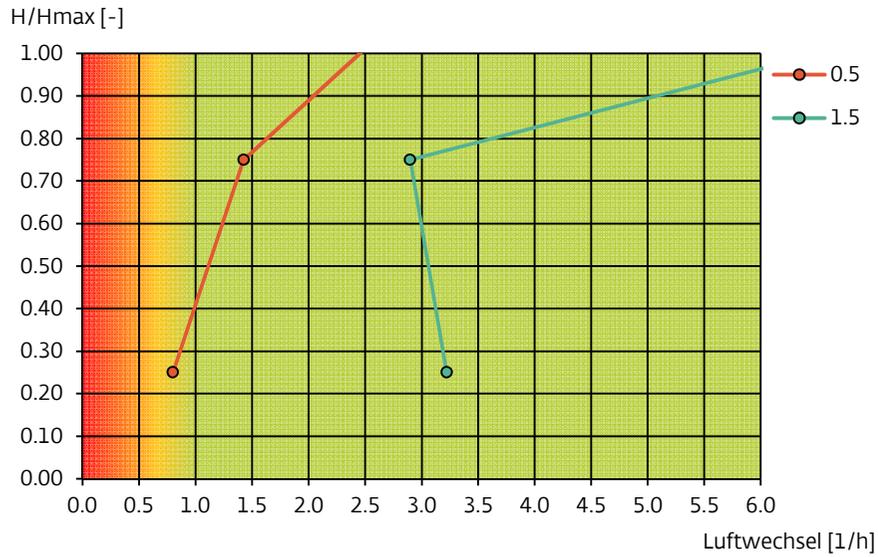


Abb. 101: Strömungsbilder – Vergleich Windgeschwindigkeit – Auftrieb, AR 0.6

S12
AR 0.6
Sonne/Auftrieb
Wind 0.5 m/s
WR 0



S13
AR 0.6
Sonne/Auftrieb
Wind 1.5 m/s
WR 0



Auftrieb, AR 1.1, WR 0

Bei AR = 1.1 ist die Durchlüftung des Innenhofs auch bei einer Windgeschwindigkeit von 0.5 m/s gewährleistet.

Abb. 102: Luftwechsel – Auswertung pro Geschoss

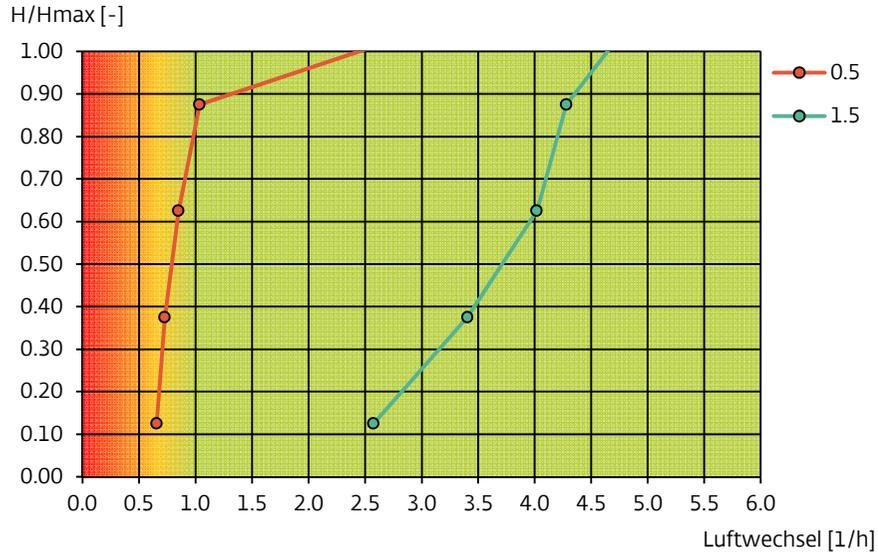


Abb. 103: Strömungsbilder – Vergleich Windgeschwindigkeit – Auftrieb, AR 1.1

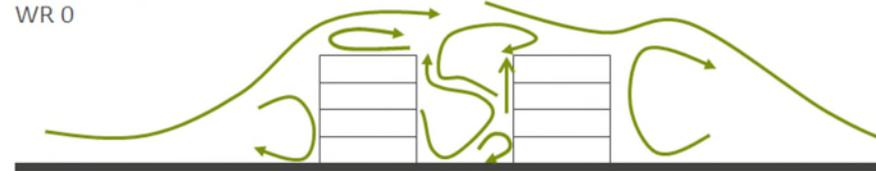
S14

AR 1.1
Sonne/Auftrieb
Wind 0.5 m/s
WR 0



S15

AR 1.1
Sonne/Auftrieb
Wind 1.5 m/s
WR 0



Auftrieb, AR 1.4, WR 0

Bei einem AR = 1.4 ist die Durchlüftung bei einer Windgeschwindigkeit von 0.5 m/s im EG nicht mehr gewährleistet. Bei einer Windgeschwindigkeit von 1.5 m/s ist die Durchlüftung ausreichend.

Abb. 104: Luftwechsel – Auswertung pro Geschoss

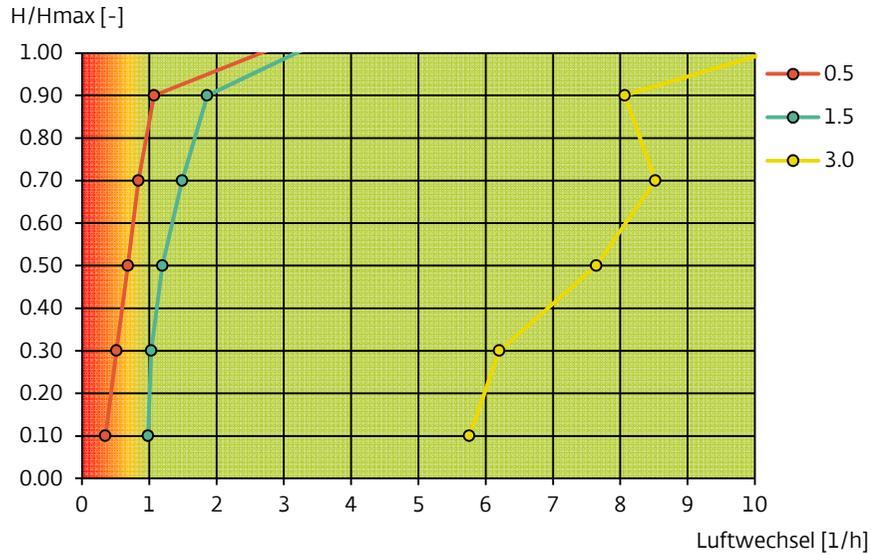


Abb. 105: Strömungsbilder – Vergleich Windgeschwindigkeit – Auftrieb, AR 1.4

S16

AR 1.4
Sonne/Auftrieb
Wind 0.5 m/s
WR 0



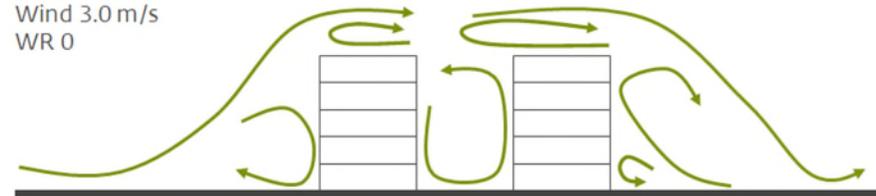
S17

AR 1.4
Sonne/Auftrieb
Wind 1.5 m/s
WR 0



S18

AR 1.4
Sonne/Auftrieb
Wind 3.0 m/s
WR 0



Auftrieb, AR 2.0, WR 0

Bei einem AR = 2.0 ist die Durchlüftung bei einer Windgeschwindigkeit von 1.5 m/s ausreichend. Bei einer Windgeschwindigkeit von 0.5 m/s ist die Situation kritisch, obwohl der Auftrieb zu einem zusätzlichen Austausch führt.

Abb. 106: Luftwechsel – Auswertung pro Geschoss

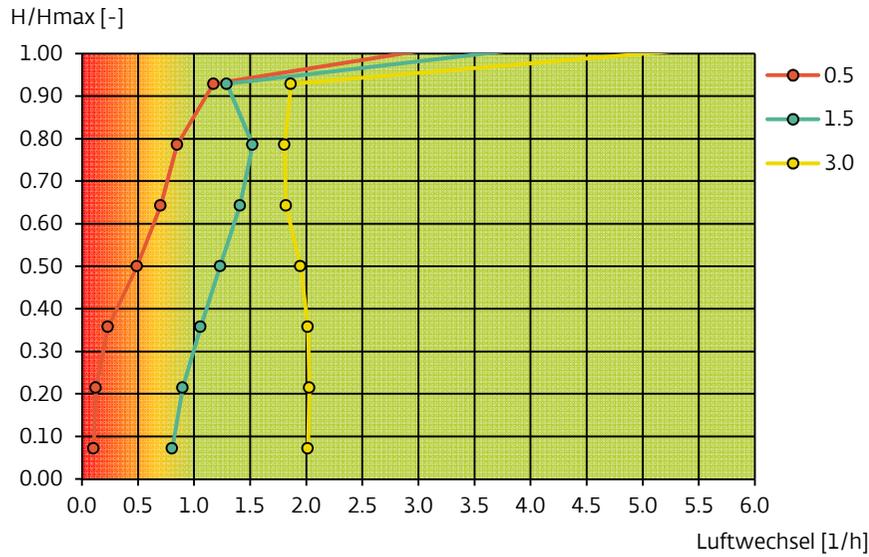
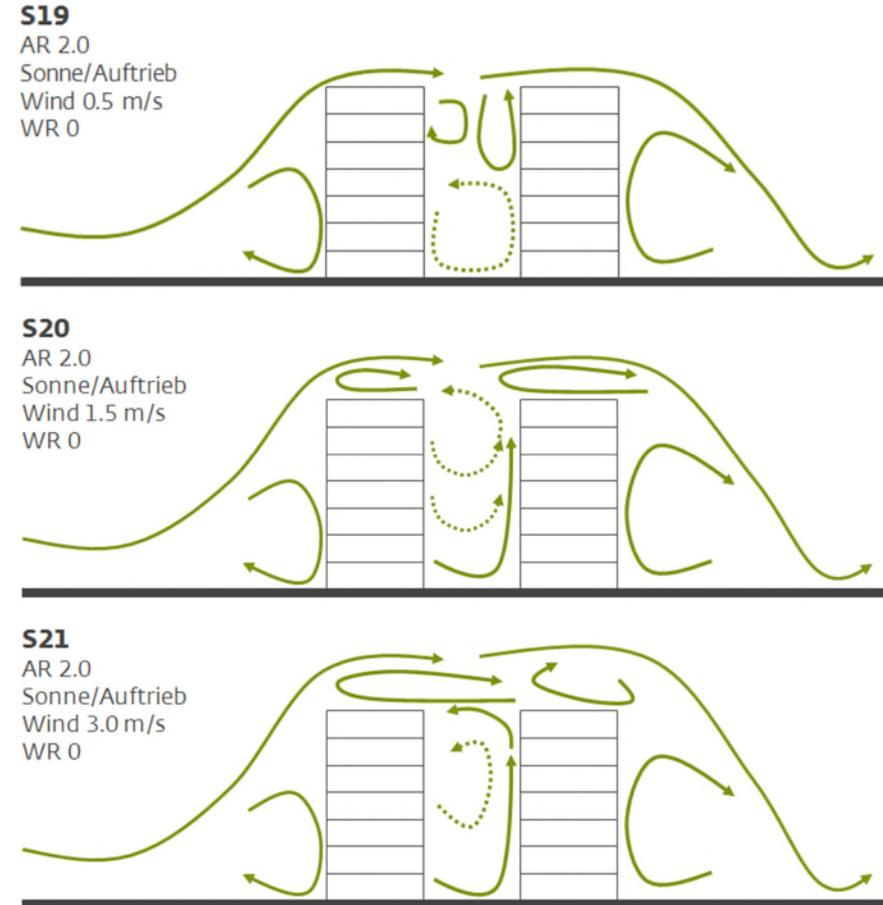


Abb. 107: Strömungsbilder – Vergleich Windgeschwindigkeit – Auftrieb, AR 2.0



7.5. Einfluss des Parameters: Auftrieb

In den untenstehenden Grafiken wird der Einfluss des Parameters **Auftrieb** ermittelt. Die folgenden Gruppen können mit diesem Parameter als Variable abgegrenzt werden:

Tab. 19: Anzahl Fälle im Datensatz mit Auftrieb als Parameter

Windrichtung	0°								45°
	AR	0.3	0.6	1.1	1.4	1.7	2.0	2.2	1.1
0.5 m/s			2		2				
1.5 m/s			2	2	2		2		
3.0 m/s					2				

Wind 0.5 m/s, AR 0.6, WR 0

Im Fall mit Auftrieb wurde eine wärmere Fassade im Innenhof modelliert. Theoretisch löst dieser Fassadenabschnitt eine Konvektionszelle mit einer bremsenden Wirkung auf den Windwirbel aus. Trotzdem hat die warme Fassade bei dieser tiefen Luftgeschwindigkeit einen positiven Einfluss auf die Durchlüftung und es kommt allgemein mehr Auftrieb und so auch eine stärkere Durchströmung zustande.

Der isotherme Fall mit AR 0.6 und Windgeschwindigkeit 0.5 m/s hat einen knapp ausreichenden Luftwechsel von 0.5 h⁻¹. Inklusiv Auftrieb entsteht fast eine Verdoppelung des Luftwechsels

Abb. 108: Luftwechsel - Auswertung pro Geschoss

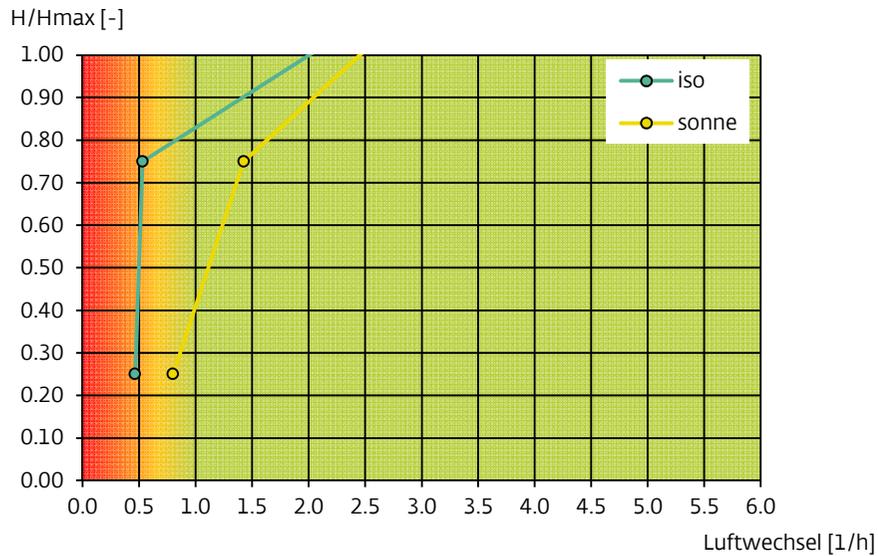


Abb. 109: Strömungsbilder - Vergleich Auftrieb - Wind 0.5 m/s, AR 0.6

S22
AR 0.6
Isotherm
Wind 0.5 m/s
WR 0



S12
AR 0.6
Sonne/Auftrieb
Wind 0.5 m/s
WR 0



Wind 1.5 m/s, AR 0.6, WR 0

Der isotherme Fall mit AR 0.6 und Windgeschwindigkeit 1.5 m/s hat einen sehr hohen Luftwechsel von ca. 3 h⁻¹. Inklusiv Auftrieb entsteht nur eine kleine Erhöhung des Luftwechsels. Der Wind ist hier dominant.

Abb. 110: Luftwechsel – Auswertung pro Geschoss

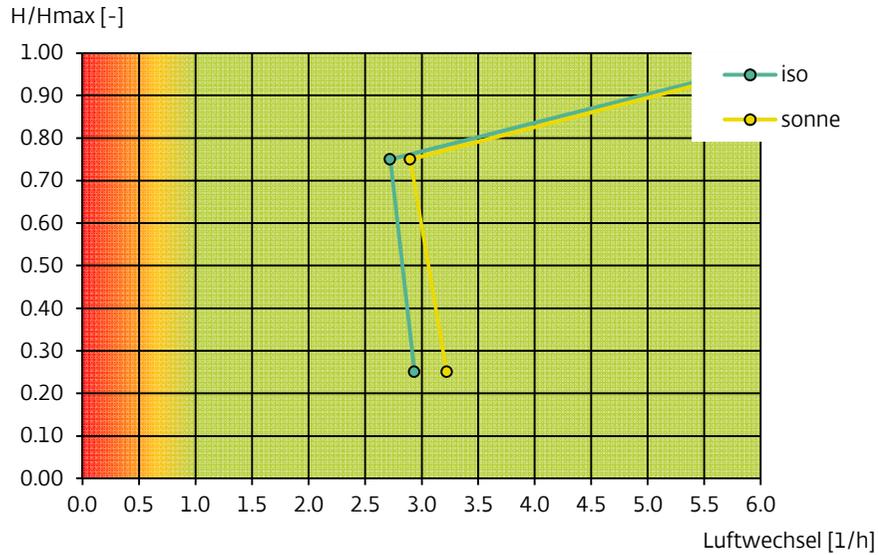


Abb. 111: Strömungsbilder – Vergleich Auftrieb – Wind 1.5 m/s, AR 0.6

S02
AR 0.6
Isotherm
Wind 1.5 m/s
WR 0



S13
AR 0.6
Sonne/Auftrieb
Wind 1.5 m/s
WR 0



Wind 1.5 m/s, AR 1.1, WR 0

Der isotherme Fall mit AR 1.1 und Windgeschwindigkeit 1.5 m/s hat einen sehr hohen Luftwechsel von $> 3 \text{ h}^{-1}$. Im Fall mit Auftrieb entsteht im unteren Bereich des Innenhofs eine kleine Reduktion des Luftwechsels. In diesem Bereich wurde keine wärmere Fassade modelliert. Hier fehlt der positive Einfluss des Auftriebs und entsteht ein begrenzter Stau-Effekt.

Im oberen Bereich ist der Auftrieb dominant und steigert den Luftwechsel um 0.5 bis 1 h^{-1} .

Abb. 112: Luftwechsel - Auswertung pro Geschoss

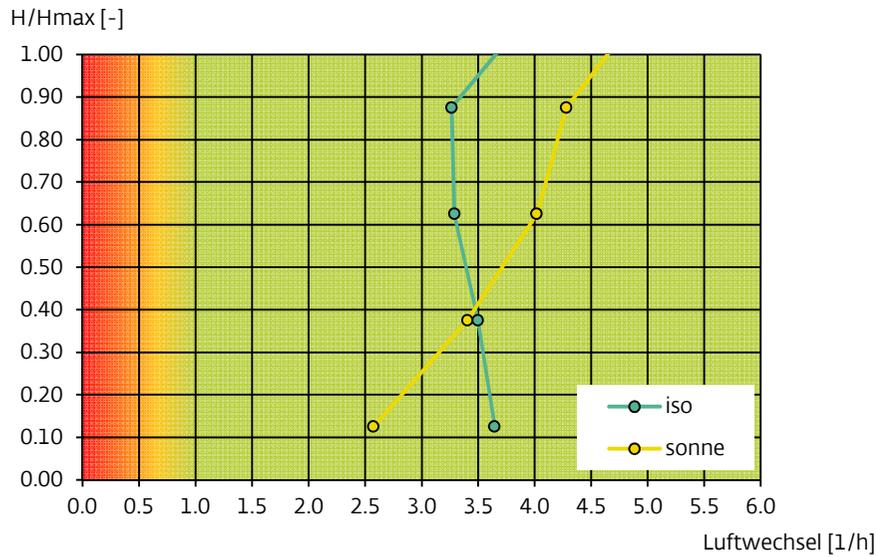


Abb. 113: Strömungsbilder - Vergleich Auftrieb - Wind 1.5 m/s, AR 1.1

S03
AR 1.1
Isotherm
Wind 1.5 m/s
WR 0



S15
AR 1.1
Sonne/Auftrieb
Wind 1.5 m/s
WR 0



Wind 0.5 m/s, AR 1.4, WR 0

Der isotherme Fall mit AR 1.4 und Windgeschwindigkeit 0.5 m/s hat einen kritischen Luftwechsel von $< 0.5 \text{ h}^{-1}$. Im Fall mit Auftrieb entsteht im Innenhof eine Zunahme des Luftwechsels.

In den unteren 2 Geschossen wurde keine wärmere Fassade modelliert. Hier ist der positive Einfluss des Auftriebs begrenzt. Im EG bleibt der Luftwechsel kritisch.

Abb. 114: Luftwechsel – Auswertung pro Geschoss

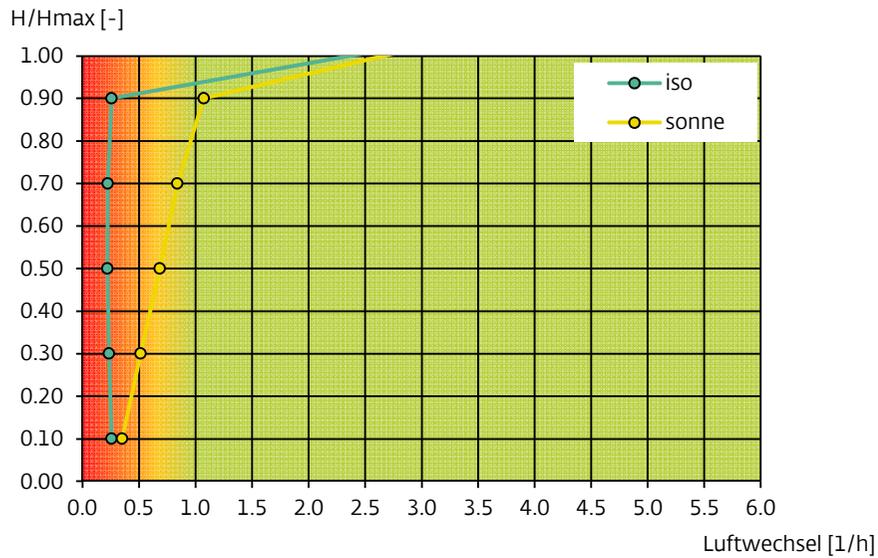


Abb. 115: Strömungsbilder – Vergleich Auftrieb – Wind 0.5 m/s, AR 1.4

S23
AR 1.4
Isotherm
Wind 0.5 m/s
WR 0



S16
AR 1.4
Sonne/Auftrieb
Wind 0.5 m/s
WR 0



Wind 1.5 m/s, AR 1.4, WR 0

Der isotherme Fall mit AR 1.4 und Windgeschwindigkeit 1.5 m/s hat einen ausreichenden Luftwechsel von 1 h⁻¹ oder höher. Im Fall mit Auftrieb entsteht im Innenhof eine Reduktion des Luftwechsels. Hier kommt die bremsende Wirkung der Konvektionszelle zustande: Der Luftwechsel im isothermen Fall wird um 1 bis 1.5 h⁻¹ reduziert und quasi halbiert. Bei dieser Windgeschwindigkeit ist die Durchlüftung jedoch immerhin ausreichend.

Abb. 116: Luftwechsel – Auswertung pro Geschoss

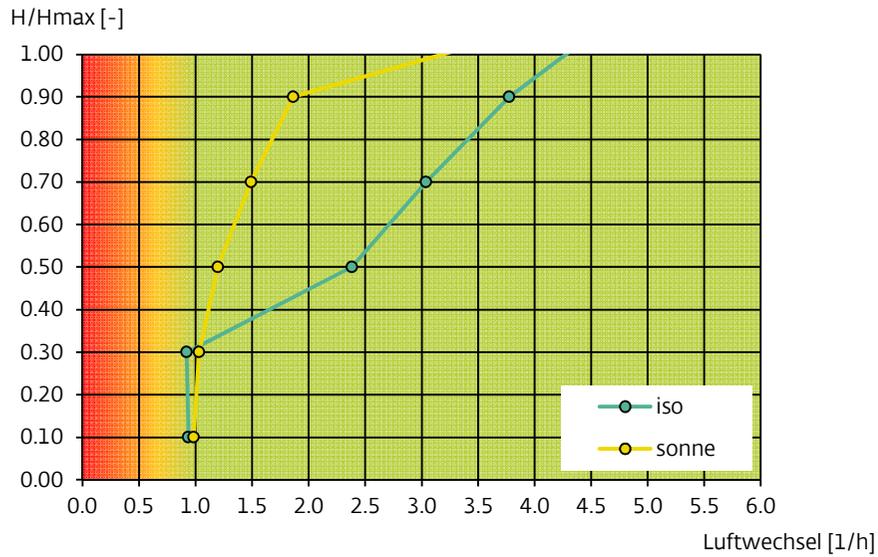
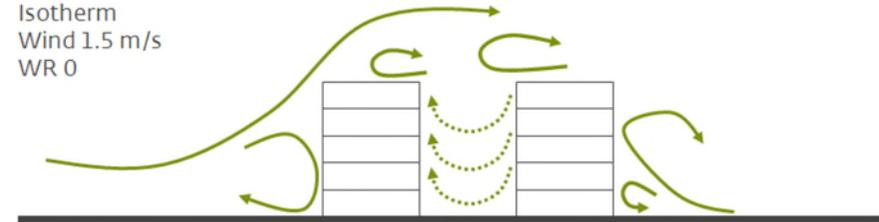
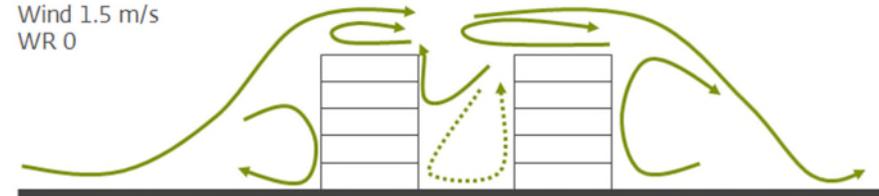


Abb. 117: Strömungsbilder – Vergleich Auftrieb – Wind 1.5 m/s, AR 1.4

S06
AR 1.4
Isotherm
Wind 1.5 m/s
WR 0



S17
AR 1.4
Sonne/Auftrieb
Wind 1.5 m/s
WR 0



Wind 3.0 m/s, AR 1.4, WR 0

Der isotherme Fall mit AR 1.4 und Windgeschwindigkeit 3.0 m/s hat einen sehr hohen Luftwechsel von > 6 h⁻¹. Im Fall mit Auftrieb entsteht im unteren Bereich des Innenhofs eine kleine Reduktion des Luftwechsels. In diesem Bereich wurde keine wärmere Fassade modelliert. Hier fehlt der positive Einfluss des Auftriebs und entsteht ein begrenzter Stau-Effekt.

Im oberen Bereich ist der Auftrieb dominant und steigert den Luftwechsel um 1 bis 1.5 h⁻¹.

Abb. 118: Luftwechsel - Auswertung pro Geschoss

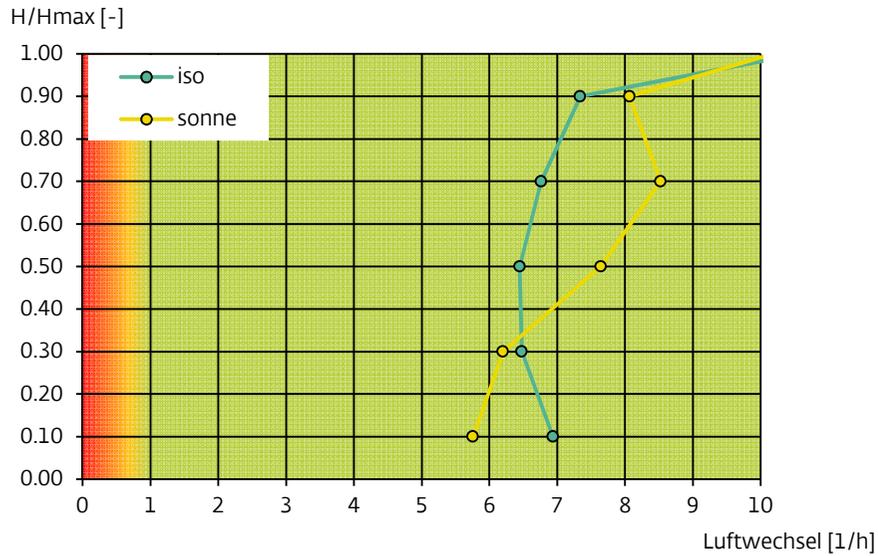
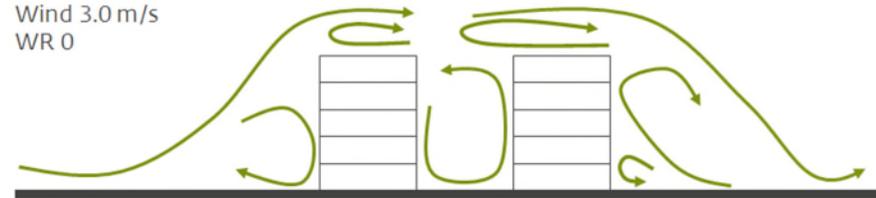


Abb. 119: Strömungsbilder - Vergleich Auftrieb - Wind 3.0 m/s, AR 1.4

S24
AR 1.4
Isotherm
Wind 3.0 m/s
WR 0



S18
AR 1.4
Sonne/Auftrieb
Wind 3.0 m/s
WR 0



Wind 1.5 m/s, AR 2.0, WR 0

Der isotherme Fall mit AR 2.0 und Windgeschwindigkeit 1.5 m/s hat einen knapp unzureichenden Luftwechsel von $< 0.5 \text{ h}^{-1}$ im unteren Bereich. Im Fall mit Auftrieb entsteht im Innenhof eine Erhöhung des Luftwechsels. Die Durchlüftung wird ausreichend bis gut.

Abb. 120: Luftwechsel – Auswertung pro Geschoss

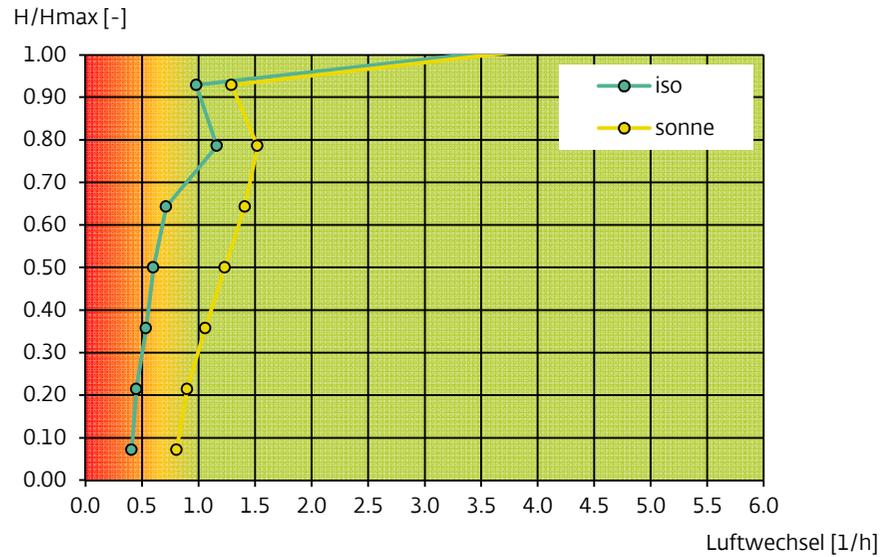
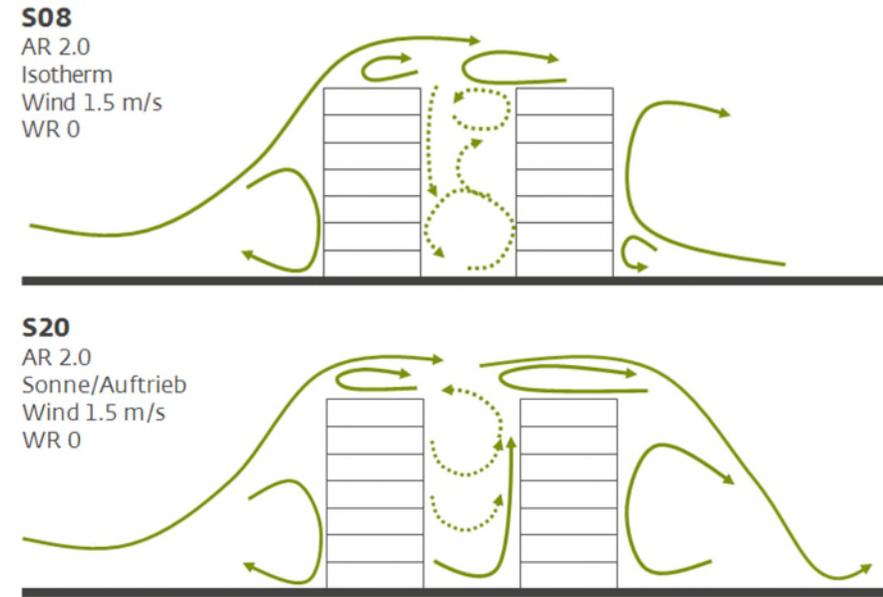


Abb. 121: Strömungsbilder – Vergleich Auftrieb – Wind 1.5 m/s, AR 2.0



7.6. Einfluss des Parameters: Stau

In den untenstehenden Grafiken wird der Einfluss des Parameters **Stau** ermittelt. Die folgenden Gruppen können mit diesem Parameter als Variable abgegrenzt werden:

Tab. 20: Anzahl Fälle im Datensatz mit Stau als Parameter

Windrichtung	0°								45°	
	AR	0.3	0.6	1.1	1.4	1.7	2.0	2.2	1.1	
0.1-0.5 m/s			2		2					

Wind 0.1 m/s oder 0.5 m/s, AR 0.6, WR 0

Der Einfluss der Stratifizierung ist bei AR 0.6 sehr begrenzt. Tendenziell ergibt die Simulation einen positiven Effekt auf den Luftwechsel. Ein direkter Vergleich ist begrenzt sinnvoll, aufgrund der unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten.

Abb. 122: Luftwechsel - Auswertung pro Geschoss

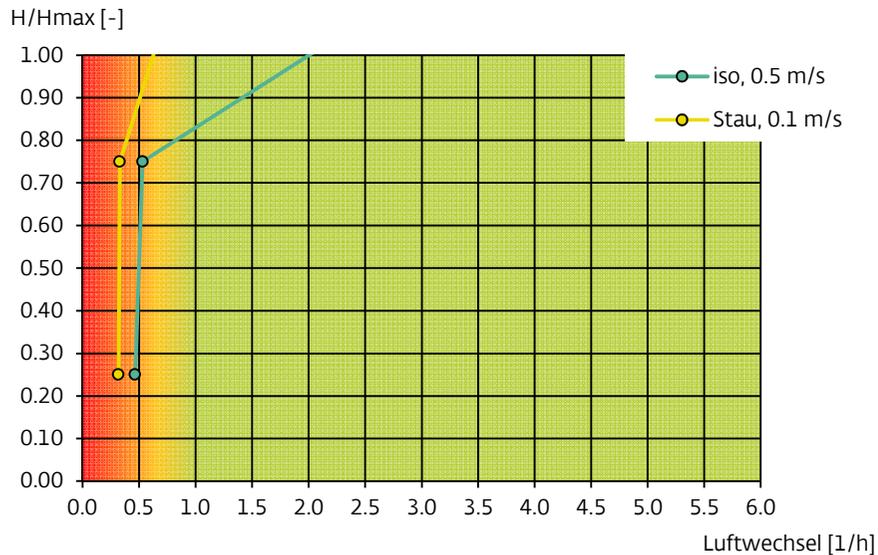


Abb. 123: Strömungsbilder - Vergleich Stau - Wind 0.1/0.5 m/s, AR 0.6

S22

AR 0.6
Isotherm
Wind 0.5 m/s
WR 0



S10

AR 0.6
Stratifizierung
Wind 0.1 m/s
WR 0



Wind 0.1 m/s oder 0.5 m/s, AR 1.4, WR 0

Der Einfluss der Stratifizierung ist bei AR 1.4 sehr begrenzt. Tendenziell ergibt die Simulation einen positiven Effekt auf den Luftwechsel. Ein direkter Vergleich ist begrenzt sinnvoll, aufgrund der unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten.

Abb. 124: Luftwechsel – Auswertung pro Geschoss

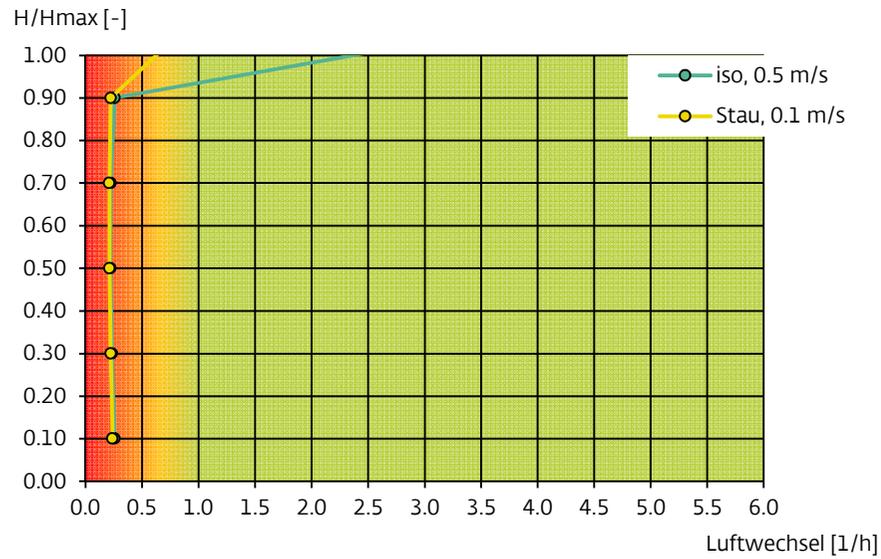
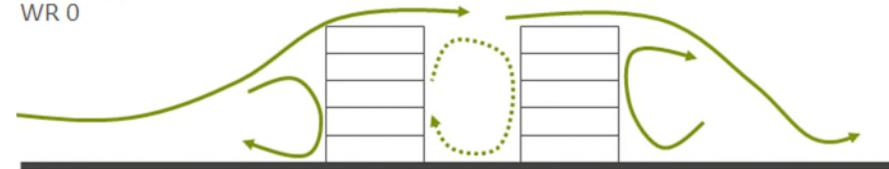
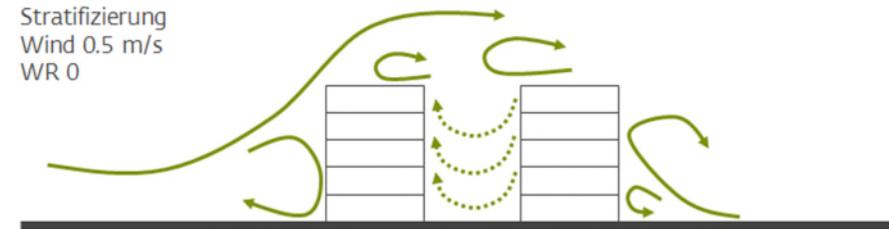


Abb. 125: Strömungsbilder – Vergleich Stau- Wind 0.1/0.5 m/s, AR 1.1

S23
AR 1.4
Isotherm
Wind 0.5 m/s
WR 0



S11
AR 1.4
Stratifizierung
Wind 0.5 m/s
WR 0



7.7. Einfluss des Parameters: Windrichtung

In den untenstehenden Grafiken wird der Einfluss des Parameters **Windrichtung** ermittelt. Die folgenden Gruppen können mit diesem Parameter als Variable abgegrenzt werden:

Tab. 21: Anzahl Fälle im Datensatz mit Windrichtung als Parameter

Windgeschwindigkeit	AR	1.5 m/s						
		0.3	0.6	1.1	1.4	1.7	2.0	2.2
Isotherm				2				

Isotherm, AR 1.1, Wind 1.5 m/s

Der Einfluss der Windrichtung ist kaum zu unterschätzen. Der Luftwechsel bei der Windrichtung 45° statt 0° wird um einen Faktor 3 gesenkt. Aufgrund der grösseren horizontalen Strecke zwischen Aussenfassade und Innenhof entstehen weniger Wirbel oberhalb vom Gebäude und eine Kurzschlussströmung fliesst über den Innenhof. Die Luft im Innenhof wird nur begrenzt aktiviert.

Abb. 126: Luftwechsel – Auswertung pro Geschoss

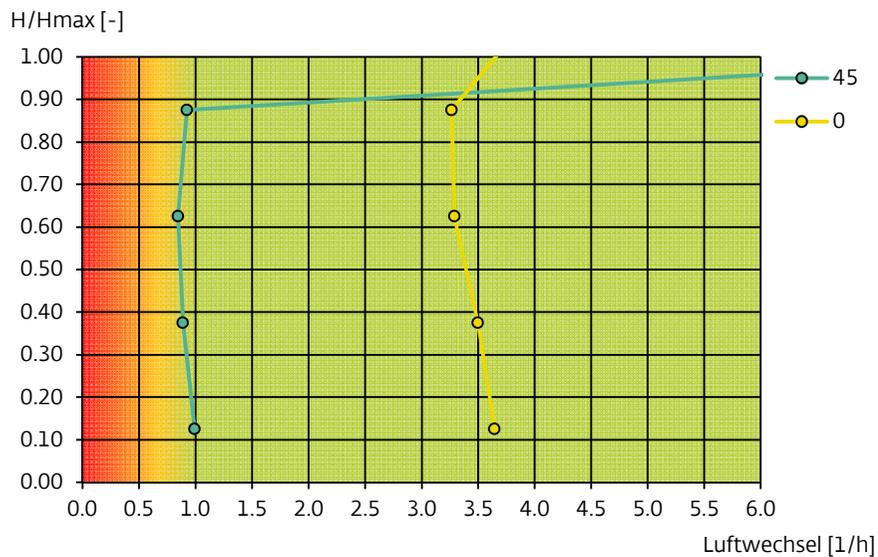


Abb. 127: Strömungsbilder – Vergleich Windrichtung– Wind 1.5 m/s, AR 1.1

S03

AR 1.1
Isotherm
Wind 1.5 m/s
WR 0



S05

AR 1.1
Isotherm
Wind 1.5 m/s
WR 45



7.8. Einfluss der Parameter: Öffnung

In den untenstehenden Grafiken wird der Einfluss des Parameters **Öffnung** ermittelt. Die folgenden Gruppen können mit diesem Parameter als Variable abgegrenzt werden:

Tab. 22: Anzahl Fälle im Datensatz mit Öffnung als Parameter

Windrichtung	0°	180°
AR	1.4	1.4
Öffnung	4	4

Isotherm, AR 1.4, WR 0°

Die Öffnung liegt auf der Luv-Seite vom Gebäude. Der Wind strömt durch die Durchfahrt direkt durch den Innenhof und die Durchlüftung ist entsprechend hoch. Auch bei einer kleinen Durchfahrt (DF 20 % = Höhe der Öffnung entspricht 20 % der Gebäudehöhe) ist die Durchlüftung des Innenhofs 5 bis 8 Mal höher und wird die Anforderung von 1 h⁻¹ sehr gut eingehalten.

Abb. 128: Luftwechsel – Auswertung pro Geschoss

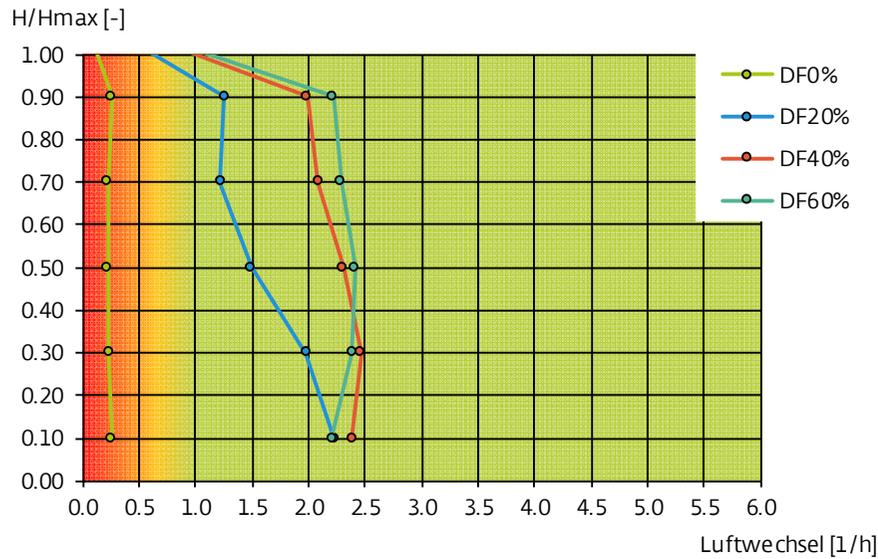
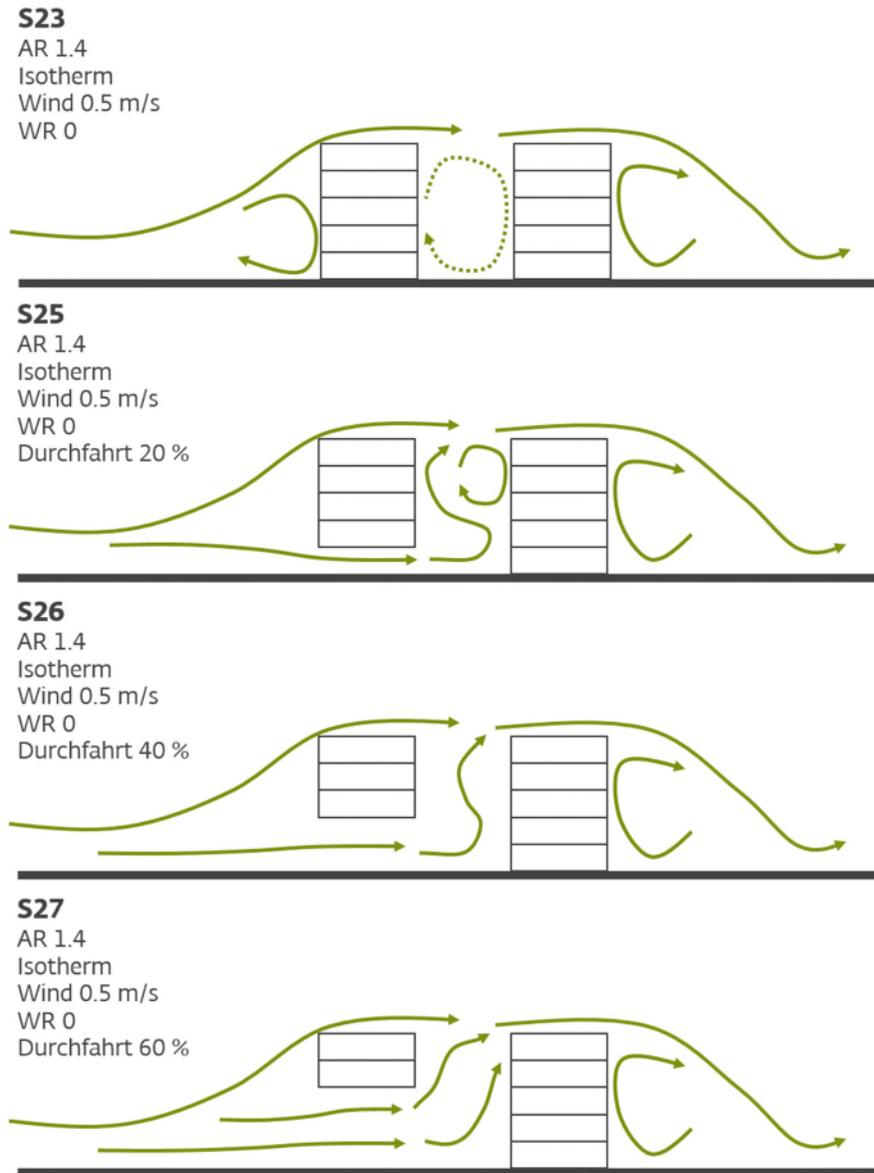


Abb. 129: Strömungsbilder – Vergleich Öffnung – Isotherm, AR 1.4



Isotherm, AR 1.4, WR 180°

Die Öffnung liegt auf der Lee-Seite vom Gebäude. Auch hier ist eine Verbesserung der Durchlüftung ersichtlich, jedoch weniger ausgesprochen. Eine kleine Öffnung über 20 % der Höhe ergibt keine ausreichende Durchlüftung. Bei einer Öffnung über 40 % und 60 % der Höhe wird die Durchlüftung ausreichend, respektive gut.

Abb. 130: Luftwechsel – Auswertung pro Geschoss

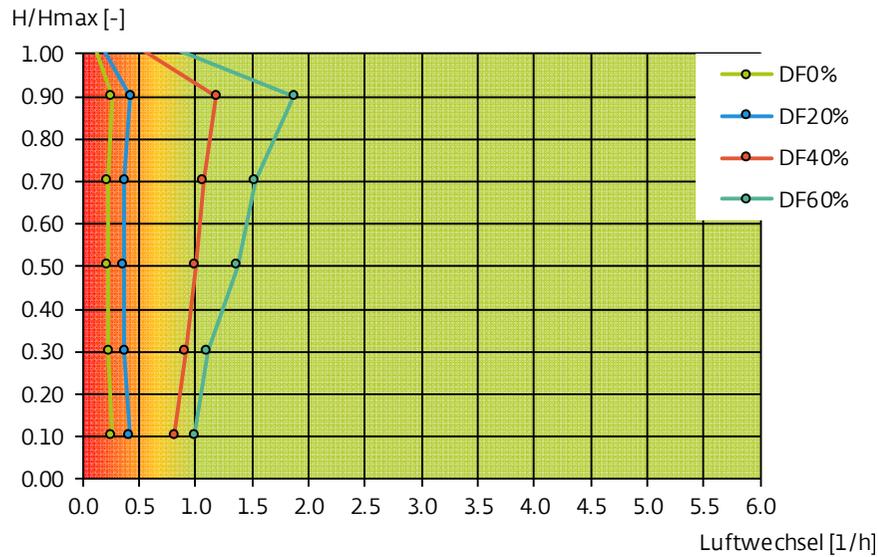
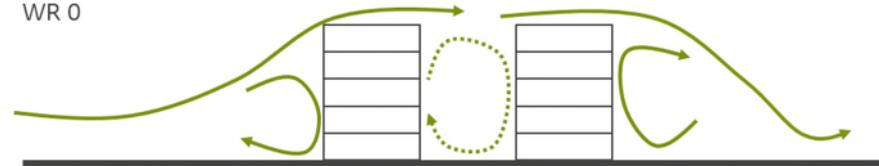


Abb. 131: Strömungsbilder – Vergleich Öffnung – Isotherm, AR 1.4

S23
AR 1.4
Isotherm
Wind 0.5 m/s
WR 0



S28
AR 1.4
Isotherm
Wind 0.5 m/s
WR 180
Durchfahrt 20 %



S29
AR 1.4
Isotherm
Wind 0.5 m/s
WR 180
Durchfahrt 40 %



S30
AR 1.4
Isotherm
Wind 0.5 m/s
WR 180
Durchfahrt 60 %



8. Modul 2: Erkenntnisse des CFD-Modell

Die Ergebnisse und die wichtigsten Erkenntnisse und Empfehlungen werden zusammengefasst.

8.1. Globale Bewertung

In der untenstehenden Tabelle werden alle Fälle hinsichtlich Luftwechselrate bewertet. Massgebend für die Bewertung ist der Luftwechsel im EG.

Tab. 23: Globale Bewertung der CFD-Simulationen

Parameter	0.5 m/s						
AR	0.3	0.6	1.1	1.4	1.7	2.0	2.2
Isotherm		■		■			
Auftrieb		■	■	■		■	
Stau		■		■			
	1.5 m/s						
AR	0.3	0.6	1.1	1.4	1.7	2.0	2.2
Isotherm	■	■	■	■	■	■	■
Auftrieb		■	■	■		■	
WR 45°			■			■	
	3.0 m/s						
AR	0.3	0.6	1.1	1.4	1.7	2.0	2.2
Isotherm			■	■			
Auftrieb				■		■	
Legende	■	Gut	Luftwechsel > 1 h ⁻¹				
	■	Ausreichend	0.5 h ⁻¹ < Luftwechsel < 1 h ⁻¹				
	■	Nicht ausreichend	Luftwechsel < 0.5 h ⁻¹				

8.2. Besprechung der Tendenzen

Die Parameterstudie mit 24 stationären Fällen erlaubt die Identifikation von Tendenzen hinsichtlich der Durchlüftung von Innenhöfen bei unterschiedlichen Geometrien und Wetterbedingungen. Diese Tendenzen werden in den folgenden Grafiken dargestellt.

Abb. 132 und Abb. 133 zeigen die Abhängigkeit des Luftwechsels und der Lüftungseffizienz zum AR-Wert. Die Fälle wurden mittels separaten Kurven nach Windgeschwindigkeit sortiert. Abb. 134 und Abb. 135 zeigen die Abhängigkeit des Luftwechsels und der Lüftungseffizienz zur Windgeschwindigkeit. Die Fälle wurden mittels separaten Kurven nach AR sortiert. Lineare Trendlinien wurden ebenfalls dargestellt, damit die Verläufe besser ersichtlich sind.

Der Luftwechsel ergibt eine quantitative Bewertung der Durchlüftung und ist die Basis dieser Bewertung. Er unterscheidet sich von der Lüftungseffizienz. Die Lüftungseffizienz berücksichtigt das angesetzte Windklima und zeigt wie stark der Innenhof vom theoretisch erreichbaren Luftwechsel abgeschirmt wird. Die Definitionen wurden in Abschnitt 6.4.1 erläutert.

Die Darstellung bestätigt die Besprechung in Abschnitt 7.2. Bei Windgeschwindigkeiten < 0.5 m/s kann kein hoher Luftwechsel erwartet werden, auch bei einem tiefen AR-Wert. Bis AR 1.1 ist der Luftwechsel noch ausreichend. Bei AR 1.4 ist der Luftwechsel nicht ausreichend. Unter Berücksichtigung des Auftriebs wird die Durchlüftung besser, aber bleibt im EG kritisch.

Wenn die Windrichtung berücksichtigt wird, ist allgemein ein Sicherheitszuschlag einzurechnen. Beim simulierten Fall mit AR 1.1 und Wind 1.5 m/s ist die Durchlüftung um einen Faktor 3 tiefer. Bei tiefen Windgeschwindigkeiten ist ein geringerer Einfluss der Windrichtung zu erwarten. Bei höheren Windgeschwindigkeiten oder schmälere Innenhöfe könnte der Einfluss noch grösser sein. Weitere Ermittlungen wären für eine begründete Aussage jedoch erforderlich.

Abb. 132: Luftwechsel im EG nach AR, sortiert nach Windgeschwindigkeit

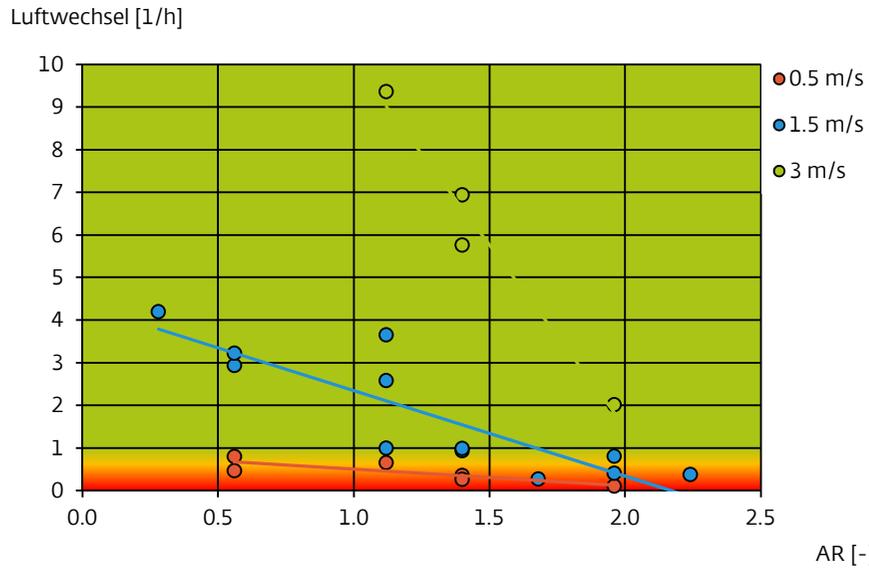


Abb. 134: Luftwechsel im EG nach Windgeschwindigkeit, sortiert nach AR

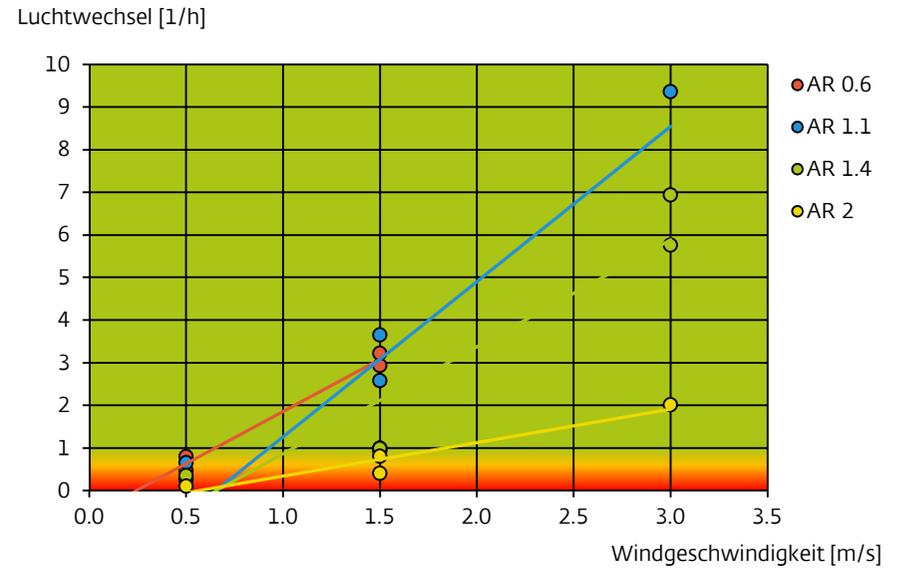


Abb. 133: Lüftungseffizienz im EG nach AR, sortiert nach Windgeschwindigkeit

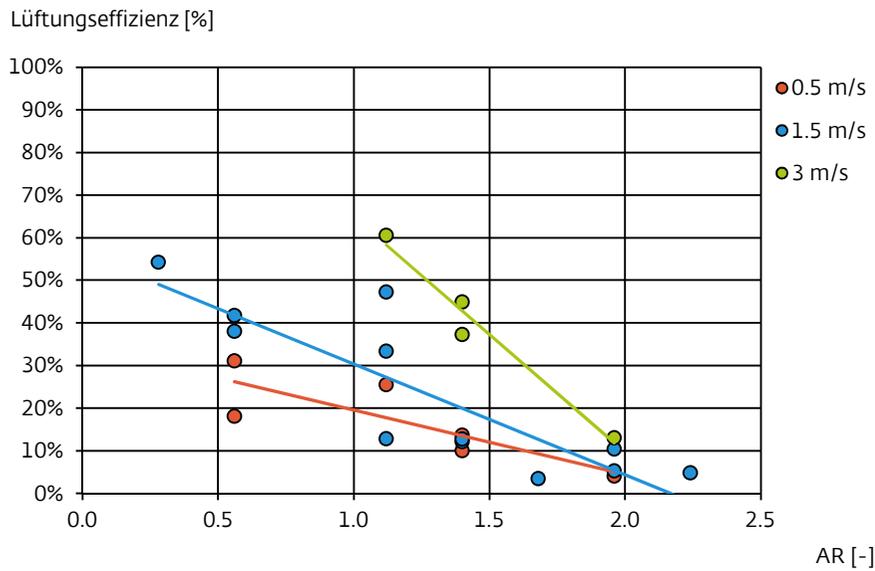
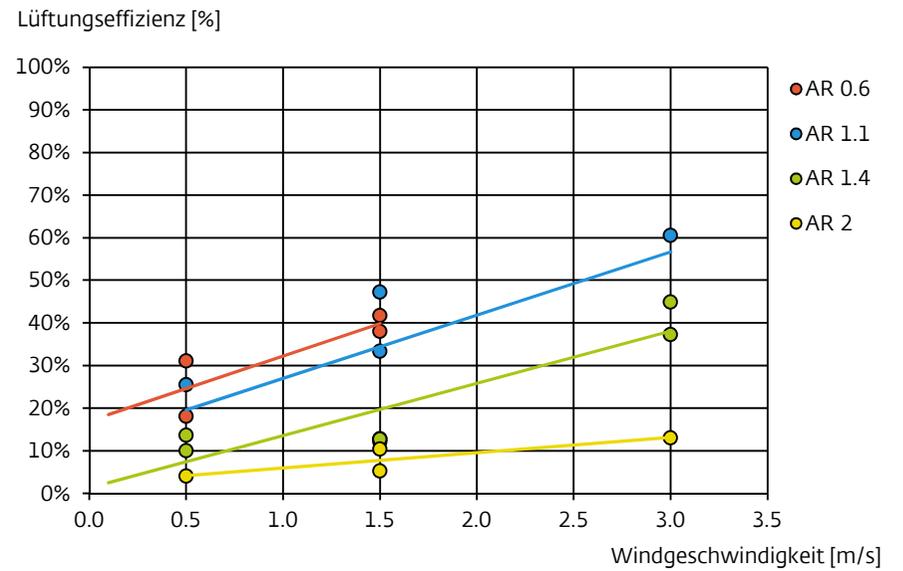


Abb. 135: Lüftungseffizienz im EG nach Windgeschwindigkeit, sortiert nach AR



8.3. Einfluss von Öffnungen

In der untenstehenden Tabelle werden alle Fälle mit einer Öffnung hinsichtlich Luftwechselrate bewertet. Massgebend für die Bewertung ist der Luftwechsel im EG.

Bei einer Durchfahrt an der Luv-Seite (parallel mit der Windrichtung) wird der Innenhof sehr effizient durchströmt. Auch bei einer kleinen Öffnung erfolgt einen Luftwechsel $> 1 \text{ h}^{-1}$.

Bei einer Durchfahrt an der Lee-Seite (parallel mit der Windrichtung) wird im Innenhof erst bei einer grossen Öffnung (60 % der Gebäudehöhe) einen Luftwechsel $> 1 \text{ h}^{-1}$ erreicht. Es ist zu erwarten, dass Öffnungen an der Seite des Gebäudes (90° zur Windrichtung) ähnliche Ergebnisse erreichen.

Tab. 24: Bewertung der CFD-Simulationen - Öffnung

Parameter	0.5 m/s und AR 1.4			
	Geschlossen	20 % der Höhe	40 % der Höhe	60 % der Höhe
Durchfahrt				
Öffnung Luv				
Öffnung Lee				

Legende		
	Gut	Luftwechsel $> 1 \text{ h}^{-1}$
	Ausreichend	$0.5 \text{ h}^{-1} < \text{Luftwechsel} < 1 \text{ h}^{-1}$
	Nicht ausreichend	Luftwechsel $< 0.5 \text{ h}^{-1}$

9. Modul 3: Zusammenfassung

Die Ergebnisse und Erkenntnisse aus Modul 1 und 2 werden weiter analysiert und eine Anforderungstabelle wird erstellt.

9.1. Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

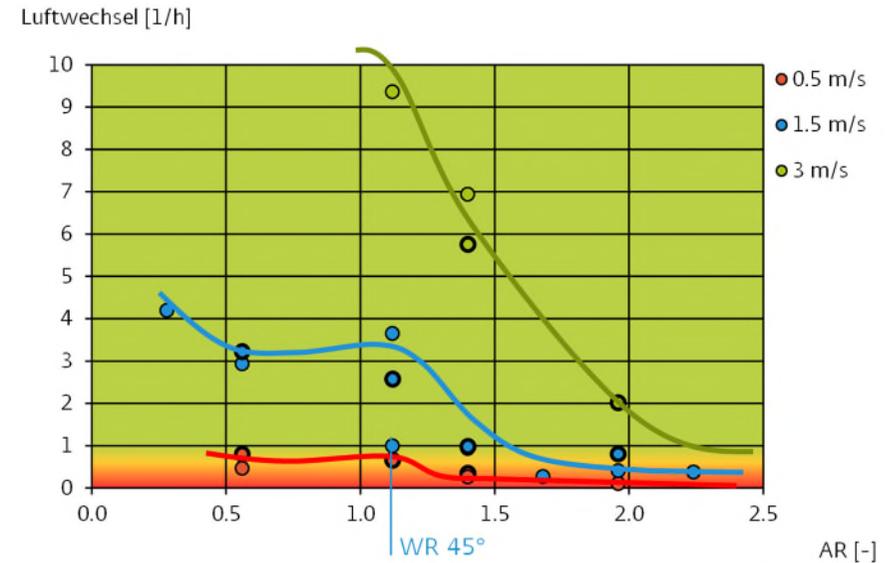
In Modul 1 wurde mittels Zonenmodell die dynamische Durchlüftung über das Jahr bei thermisch-geförderter Durchlüftung berechnet. Aufgrund der Ergebnisse werden für einen Innenhof mit $AR < 1.5$ keine Probleme erwartet.

In Modul 2 wurde mittels CFD-Modell die stationäre Durchlüftung als Momentaufnahme bei thermisch- und Wind-geförderter Durchlüftung berechnet. Hier zeigt sich die erreichbare Durchlüftung kritischer. Die Ergebnisse aus Modul 2 formen die Grundlage für die Empfehlungen der Vollzugspraxis hinsichtlich Fensterlüftung über Innenhöfe.

9.1.1. Parameter: AR und Windgeschwindigkeit

Der Luftwechsel im EG nach AR wird in Abb. 136 weiter analysiert. Die Fälle mit Auftrieb wurden im Fett dargestellt. Gemäss den Ermittlungen von Hall (1999) wurde bei einem AR-Wert $\cong 1$ eine effizientere Durchlüftung wahrgenommen. Diese Aussage wird auch bei den aktuellen Simulationsergebnissen wahrgenommen und ist hier mittels der Kurve visualisiert. Bei höherem AR senkt die Durchlüftung jedoch rasch. Bei tieferem AR bleibt die Durchlüftung stabil oder steigt an.

Abb. 136: Luftwechsel im EG nach AR



9.1.2. Parameter: Windrichtung

Der Einfluss der Windrichtung muss jedoch ebenfalls berücksichtigt werden. Aufgrund der Zuluft aus einer 45° Winkel erhöht sich der horizontale Abstand zwischen Aussenfassade und Innenhof. In den hier ermittelten Geometrien erhöht sich die Distanz von 10 m auf ca. 14 m und wird so wesentlich länger als die Innenhofbreite. So entsteht eine Kurzschlussströmung und wird die Luft innerhalb vom Innenhof nur begrenzt aktiviert (Abb. 137).

In Abb. 138 wird eine Sicherheit aufgrund von Windrichtung angesetzt. Als konservative Annahme wurde der resultierende Luftwechsel bei einer Windgeschwindigkeit von 1.5 m/s halbiert, bei 3.0 m/s gedrittelt. Bei 0.5 m/s wurde der Einfluss von Windrichtung vernachlässigt. Diese Korrektur ist eher konservativ; brauchte jedoch noch weitere Simulationen zur Bestätigung.

Abb. 137: Kurzschlussströmung bei schmalen Innenhöfen

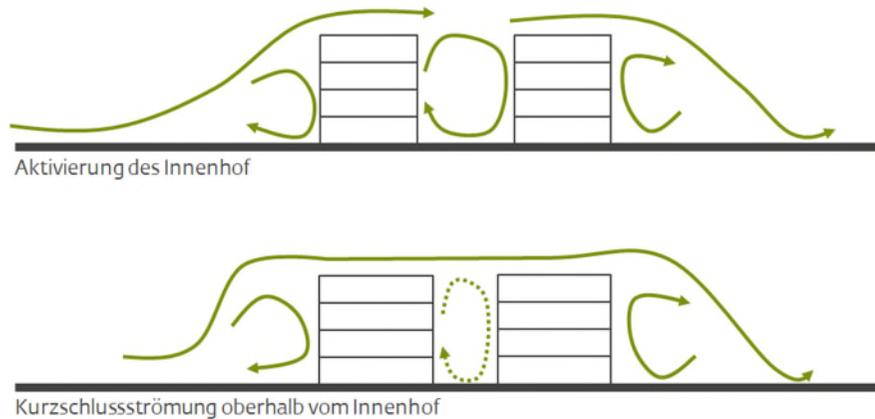
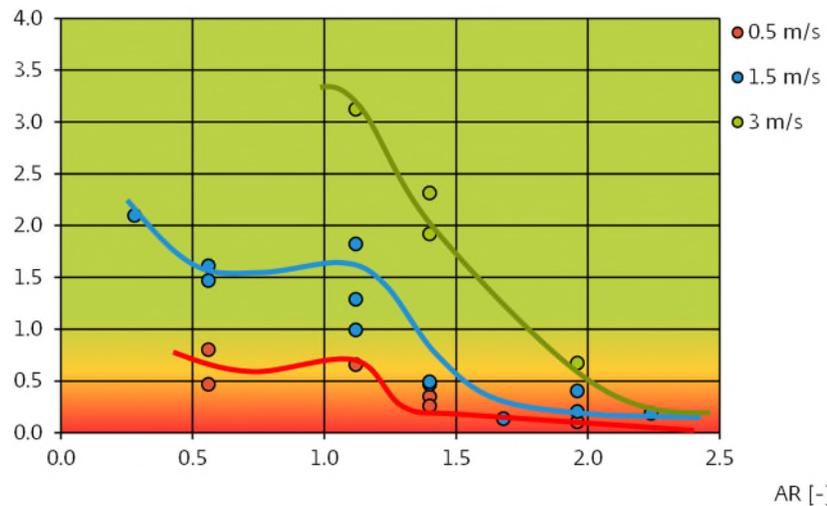


Abb. 138: Luftwechsel im EG nach AR – Sicherheitsreduktion für Windrichtung

Luftwechsel [1/h]



9.1.3. Parameter: Gebäudetiefe

Die Auswirkung von Gebäudetiefe wurde nicht separat ermittelt, läuft jedoch parallel mit der Windrichtung. Bei einer Gebäudetiefe >> Innenhofbreite ist eine ähnliche Kurzschlussströmung zu erwarten. Die Situation mit nicht-senkrechter Windrichtung wird hier noch kritischer.

9.1.4. Parameter: Öffnungen

Der Einfluss von Öffnungen wurde für 6 Geometrien mit 5 Geschosse (AR 1.4) bei 0.5 m/s Windgeschwindigkeit ermittelt. Die äquivalente Variante ohne Öffnungen (S23) hat einen unzureichenden Luftwechsel. Für Öffnungen an der Lee-Seite ist ein Durchbruch von 60 % der Gebäudehöhe (3 Geschosse) erforderlich für eine gute Durchlüftung.

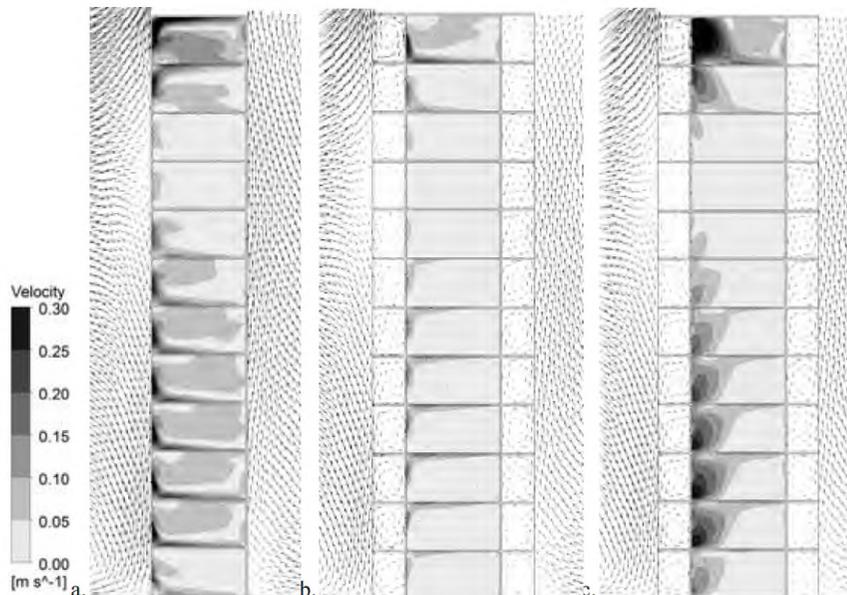
9.2. Qualitative Besprechung der Innenhofgestaltung

Die Simulationsergebnisse werden mit einer weiteren Besprechung von bestimmten Parameter hinsichtlich der Innenhofgestaltung ergänzt. Mithilfe einer Literaturstudie kann der Einfluss dieser einzelnen Parameter auf die Durchlüftung qualitativ erläutert werden. Leider ist die wissenschaftliche Literatur mit relevanten Messungen oder Berechnung der Durchlüftung von Innenhöfen sehr begrenzt und oft veraltet. Die untenstehende Besprechung ergibt eine Zusammenfassung der Einsichten zum diesen Thema.

9.2.1. Balkone

In Abb. 139 ist ersichtlich, dass die Windströmung im Balkonbereich gemäss der Studie von Mohamed⁴ stark gebremst wird. Dieser Bereich kann bei der Berücksichtigung der Entwicklung von Windwirbel im Innenhof nicht berücksichtigt werden. Balkone verringern deshalb den freien Querschnitt des Innenhofs und sollten bei der Innenhofbreite B abgezogen werden.

Abb. 139: Strömungsfeld bei einem Hochhaus mit und ohne Balkone (a. keine Balkone, b+c. inkl. Balkone)⁴



Mohamed ermittelt die Effektivität einer natürlichen einseitigen Lüftung (single-sided ventilation) von Wohneinheiten mit und ohne Balkone. Bei Balkone an einer freistehenden Fassade kann mittels eines durchdachten Entwurf die Lüftung optimiert werden. Der Balkon könnte z.B. als «Windschaukel» eingesetzt werden⁴. Zu diesem Zweck dürften die Balkone nicht über die ganze Breite der Wohneinheit strecken. Im Idealfall sollten mehrere offenbaren Fenster zur Wohnung vorgesehen werden und sollte die Tiefe auf 2 m begrenzt werden. Auch die Gestaltung des Geländers ist massgebend. Jedoch sind diese Empfehlungen von der Windrichtung abhängig und können kaum allgemein gültige Empfehlungen gegeben werden. Vor allem innerhalb eines Innenhofs ist die Windrichtung auf den inneren Fassaden sehr wechselhaft. Allgemein sind durchlaufende Balkone oder Umgänge für eine effiziente natürliche Fensterlüftung nicht zu empfehlen.

9.2.2. Brücken

Bestehende Literatur zum Einfluss der Brücken auf die Durchlüftung der Innenhöfe wurde nicht gefunden. Grundsätzlich sind Brücken im Innenhof zu beschränken. Es werden allgemeine Empfehlungen gegeben, jedoch sind diese nur auf Erfahrung gestützt.

Bei sehr tiefen Windgeschwindigkeiten ist die Durchlüftung des Innenhofs hauptsächlich vom Auftrieb abhängig. Bei thermisch getriebenen Strömungen kann der Einfluss von Brücken abgeschätzt werden:

- Bei einer thermisch getriebenen Strömung kommt aufgrund der Temperatur- und Höheunterschied einen bestimmten Druckunterschied zustande. Aus der Druckdifferenz entsteht eine Luftgeschwindigkeit und Strömungsrichtung. Die Gesamtluftmenge ist von der freien Querschnittsfläche des Innenhofs abhängig. Die Präsenz von Brücken begrenzt den freien Querschnitt und damit die Gesamtluftmenge für die Durchlüftung.
- Typisch bleiben genügend grosse Querschnitte übrig, damit bei tiefen Luftgeschwindigkeiten kaum Druckverlust aufgrund der Brücken entsteht.
- Eine grosse und stabile Konvektionszelle kann sich nur begrenzt entwickeln. Die Durchströmung des Innenhofs wird komplexer und es entstehen mehrere kleinen Konvektionszellen.
- Die thermisch getriebene Strömung wird von der globalen Temperaturdifferenz innerhalb vom Innenhof, z.B. zwischen den Fassaden oder über die

⁴ Mohamed, The Potential of Balconies to Induce Wind-Driven Natural Ventilation in Single-sided Ventilated High-Rise Apartments, PhD, University of New South Wales, Australia, 2011

Hohe, ausgelöst. Brücken verursachen Verschattung auf den Innenhoffassaden und können so den globalen Temperaturunterschied begrenzen. Gleichzeitig bieten Brücken zusätzliche Fläche die von der Sonne einstrahlt wird und können so selber eine thermisch getriebene Strömung auslösen.

- Im extremen Fall blockieren Brücken die Einstrahlung bis zum unteren Bereich des Innenhofs und wird der Bereich kritisch hinsichtlich Durchströmung.
- Faustregel: Wenn die Brücken das Tageslicht im unteren Bereich des Innenhofs nicht beeinträchtigen, wird der Einfluss auf die thermisch getriebene Durchlüftung als neutral eingestuft.

Bei windgetriebenen Strömungen kann der Einfluss von Brücken abgeschätzt werden:

- Die Präsenz von Brücken ist kritischer als bei thermisch getriebener Strömung. Eine Brücke formt eine physische Bremse für den Wind.
- Die Wirbel im Innenhof können sich nicht frei entwickeln und verlieren an Energie aufgrund der Reibung mit den Brücken. Der Turbulenzgrad steigt. Es entstehen kleine Wirbel, die für die Durchlüftung des Innenhofs wenig effizient sind.
- Brücken sollten dementsprechend möglichst «luftdurchlässig» gestaltet werden.

9.3. Anwendung im Vollzug

Damit Wohnungslüftung über Lüftungsfenster auf der Innenhofseite möglich ist, müssen minimale Anforderungen hinsichtlich der Innenhofgestaltung eingehalten werden. So wird eine ausreichende Durchlüftung des Innenhofs und gute Luftqualität in den Wohnungen gewährleistet. In der vorliegenden Studie wurden mittels Simulationen von Zonenmodellen und Strömungsmodellen diese Anforderungen ermittelt. In der Studie wurde ein abgegrenzter Bereich hinsichtlich Geometrien und Randbedingungen berücksichtigt.

Die Schlussfolgerungen, die hier unten aufgeführt werden, stützen teilweise auf den Simulationsergebnissen, jedoch teilweise nur auf Literatur und Erfahrungswerte. Im letzten Fall können die Empfehlungen nur als Richtwerte und als Startpunkt der Diskussion angesetzt werden. Weitere Details zu den untenstehenden Parametern sind im Bericht enthalten.

9.3.1. Basisregel: $AR_{max} = 1.3$

Der Hauptparameter für die Bewertung eines Innenhofs hinsichtlich Luftqualität ist der AR-Wert. AR ist der Höhe-zu-minimaler-Breite Verhältnis. Im Normalfall kann bis einem $AR \leq 1.3$ eine ausreichende Durchlüftung erwartet werden.

Jedoch müssen die folgenden Abgrenzungen berücksichtigt werden.

9.3.2. Lage mit tieferer Windgeschwindigkeiten

Für kritische Lagen hinsichtlich tieferer Windgeschwindigkeiten wird eine Begrenzung des AR-Werts auf ≤ 1.1 empfohlen. Ein Beispiel ist eine innenstädtische Lage wo die Umgebungsbebauung höher als das zum bewerteten Gebäude ist.

9.3.3. Risiko auf Kurzschlussströmung

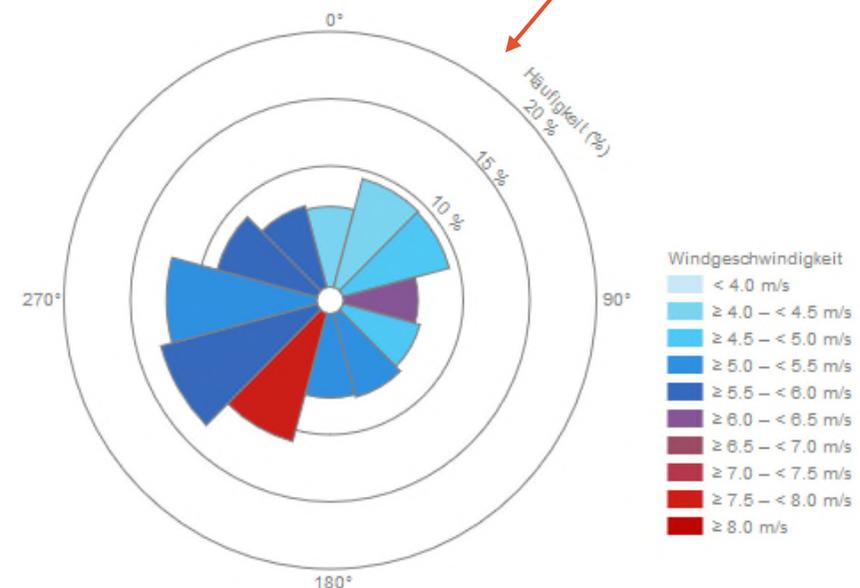
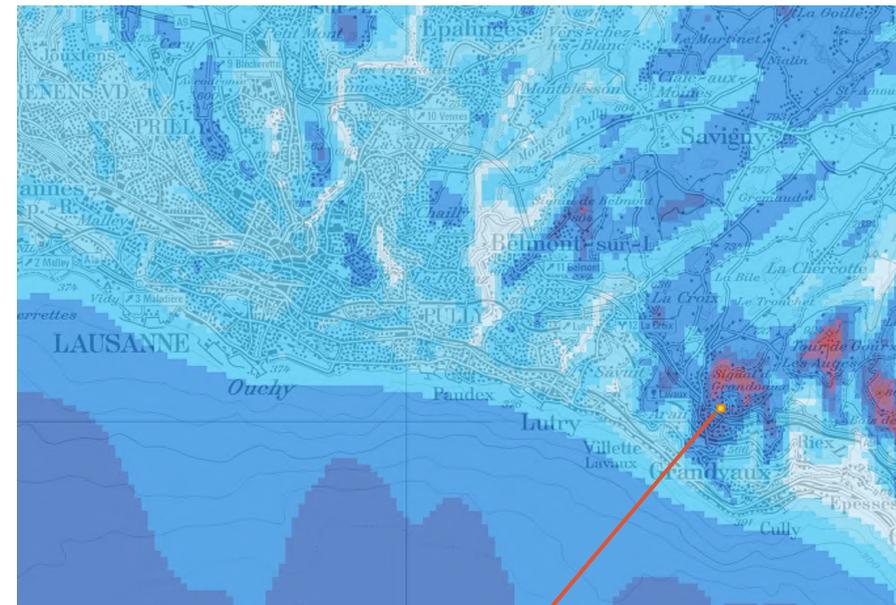
Aufgrund der begrenzten Daten ist es nicht möglich eine Aussage hinsichtlich des Risikos auf Kurzschlussströmung zu machen.

9.3.4. Lage mit hoher Windgeschwindigkeiten

Für optimale Lagen mit hohen Windgeschwindigkeiten, wird eine Erhöhung des maximalen AR-Werts auf ≤ 1.4 empfohlen. Ein Beispiel ist eine exponierte geografische Lage, wo die lokalen Windgeschwindigkeiten nur bis 5 % der Zeit < 0.5 m/s sind (Beispiel in Abb. 140).

Abb. 140: Beispiel einer exponierten Lage – Grandvaux (Lausanne) mit einer Häufigkeit von ca. 4 % für einer Windgeschwindigkeit < 0.5 m/s, Jahresmittelwert 5.5 m/s

(Quelle: map.geo.admin.ch mit Windgeschwindigkeit auf 50 m Höhe)



9.3.5. Öffnungen

Öffnungen zum Innenhof können die Durchlüftung erheblich verbessern. Hier ist die Ausrichtung gegenüber der Windrichtung jedoch massgebend. Aufgrund der begrenzter Ermittlung von 6 Geometrien können nur Richtwerte formuliert werden. Für quantitative Empfehlungen sind weitere Simulationen erforderlich.

Bei Öffnungen mit minimalen Dimensionen kann der maximale AR-Wert nach oben korrigiert werden. Wenn die folgenden Anforderungen eingehalten werden, kann eine Erhöhung des maximalen AR-Werts auf ≤ 1.4 empfohlen werden.

- eine minimale Höhe von 2 Geschosse oder eine minimale Höhe $\geq 50\%$ der Gebäudehöhe
- eine minimale Breite $\geq 50\%$ der Öffnungshöhe

9.3.6. Brücken

Brücken im Innenhof ergeben nicht nur eine Einschränkung des freien Querschnitts, sondern auch eine Aufteilung dessen in mehreren Abschnitten. Die folgenden Empfehlungen sind **Richtwerte auf Basis von Erfahrungswerte**. Falls diese Richtwerte eingehalten werden, kann die Basisregel mit $AR_{max} = 1.3$ erhalten werden.

- Minimale Abmessung des freien Querschnittes (nicht unterbrochene Abschnitte): 4 m
- Maximale horizontale Fläche eingenommen durch Brücken: 15 % der Innenhoffläche A_{IH}
- Für die Berechnung des tatsächlichen freien Querschnitts $A_{IH, frei}$ (Summe der freien Abschnitten) wird die horizontale Fläche der Brücke $A_{Brücke}$ abgezogen. Der tatsächliche freie Querschnitt muss die Anforderung nach AR_{max} einhalten.

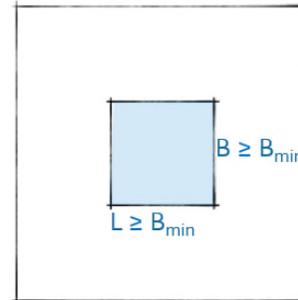
Abb. 141: Brücken

1.

$$AR_{max} = 1.3$$

$$B_{min} = H/AR_{max}$$

$$A_{IH, frei, min} \geq B_{min}^2$$



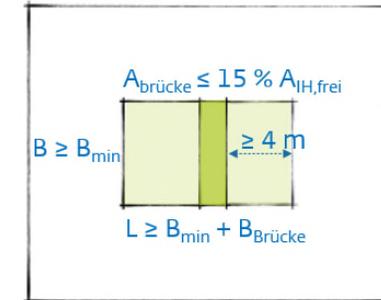
2.

$$A_{IH, frei} = B(L - B_{Brücke})$$

$$L_{min} = B_{min} + B_{Brücke}$$

$$A_{Brücke} \leq 15\% A_{IH, frei}$$

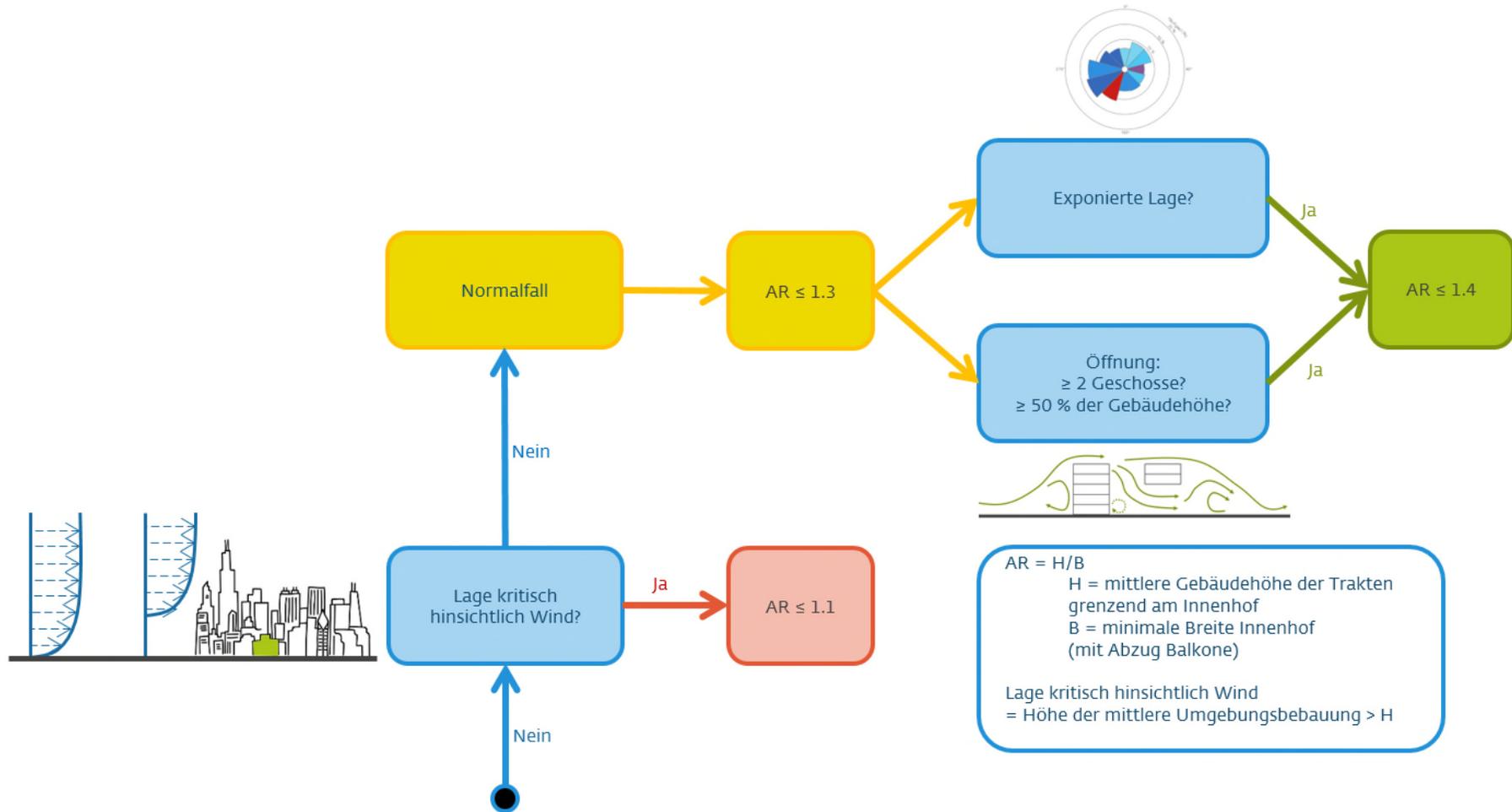
$$B_{Brücke} \leq 0.15(L - B_{Brücke})$$



Unten ist ein Rechenbeispiel gegeben.

Tab. 25: Rechenbeispiel – Brücke mit Breite $B_{Br} = 2\text{ m}$

G	Innenhof			Anforderung 1	Anforderung 2	L _{min}
	Höhe	B _{min}	A _{IH, frei, min}	$A_{Br} \leq 0.15 A_{IH, frei, min}$	$A_{IH, frei} \geq A_{IH, frei, min}$	
	m	m	m ²	L_{min1} $= 1.15 \cdot B_{Brücke} / 0.15$	L_{min2} $= B_{min} + B_{Brücke}$	m
2	5.6	4.3	19	15.3	6.3	15.3
3	8.4	6.5	42	15.3	8.5	15.3
4	11.2	8.6	74	15.3	10.6	15.3
5	14.0	10.8	116	15.3	12.8	15.3
6	16.8	12.9	167	15.3	14.9	15.3
7	19.6	15.1	227	15.3	17.1	17.1
8	22.4	17.2	297	15.3	19.2	19.2



10. Anhang

10.1 Modul 2: Age of Air, Luftwechsel und Lüftungseffizienz im vertikalen Verlauf

10.2 Modul 2: Visualisierung

10.3 Modul 2: Vergleich mit Bewertung nach Parameter

10.1. Modul 2: Age of Air, Luftwechsel und Lüftungseffizienz im vertikalen Verlauf

10.1.1. S01: G = 1, AR = 0.3, isotherm, Wind 1.5 m/s

Abb. 142: Age of Air – vertikaler Verlauf

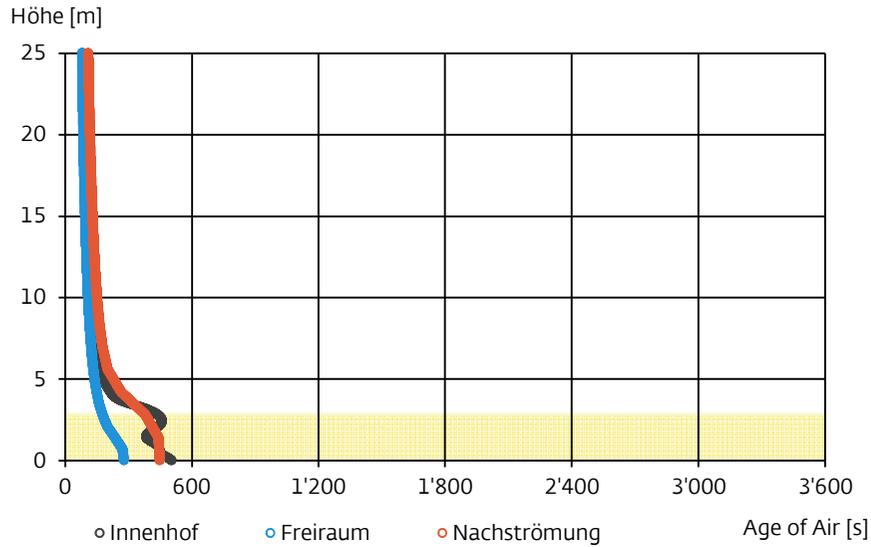


Abb. 144: Luftwechsel – Innenhof – Mittelwert pro Geschoss

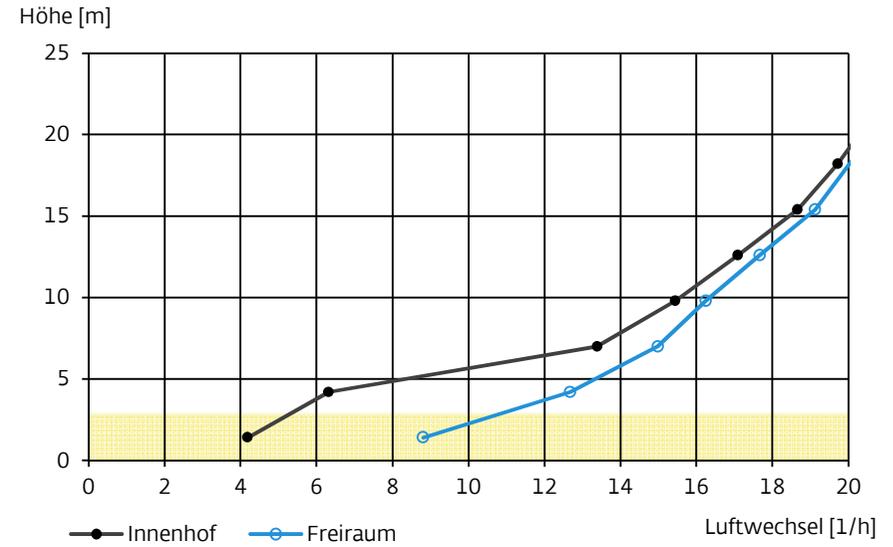


Abb. 143: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

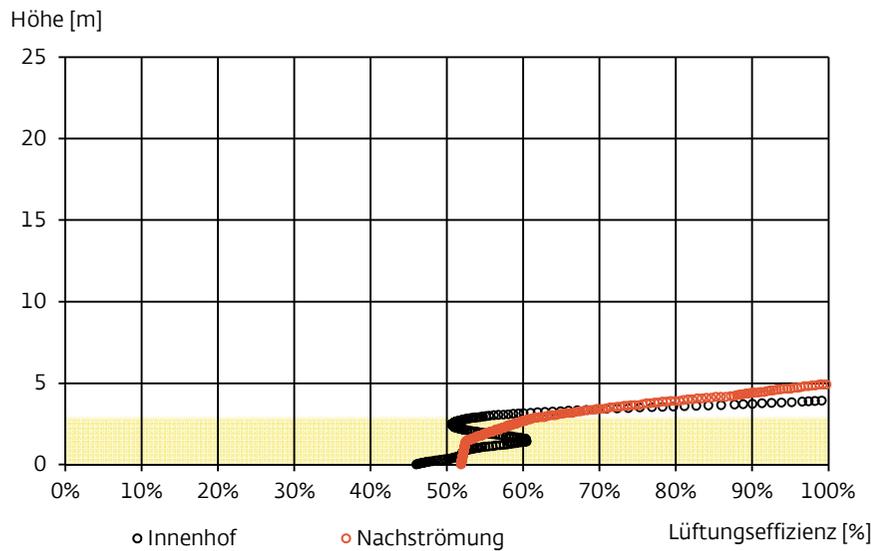
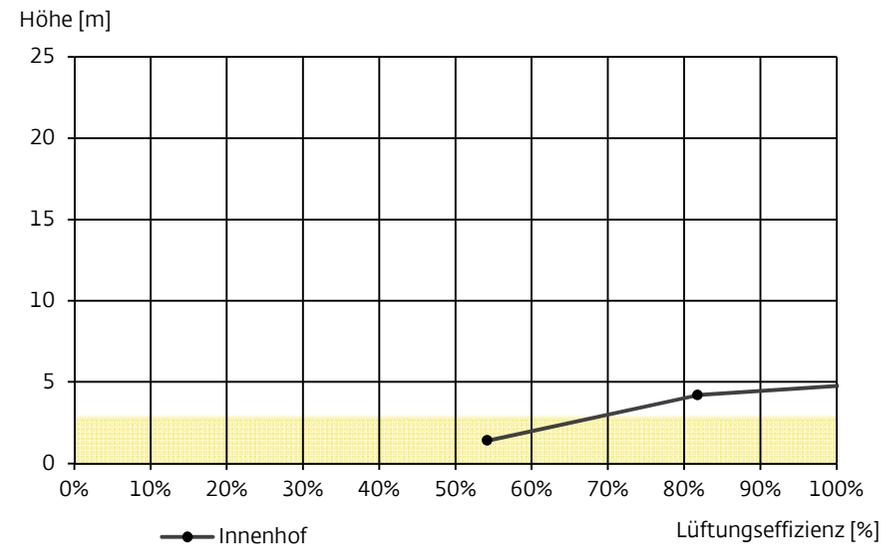


Abb. 145: Lüftungseffizienz – Innenhof – Mittelwert pro Geschoss



10.1.2. S02: G = 2, AR = 0.6, isotherm, Wind 1.5 m/s

Abb. 146: Age of Air – vertikaler Verlauf

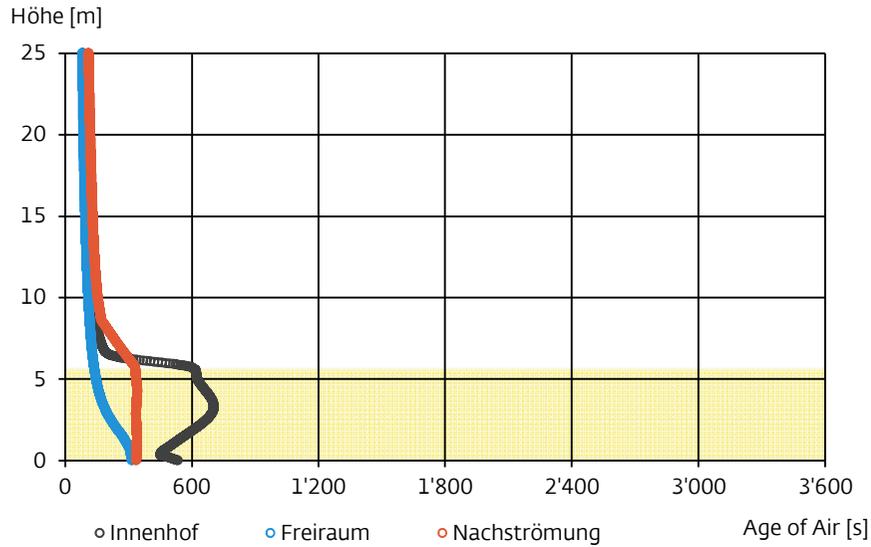


Abb. 148: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

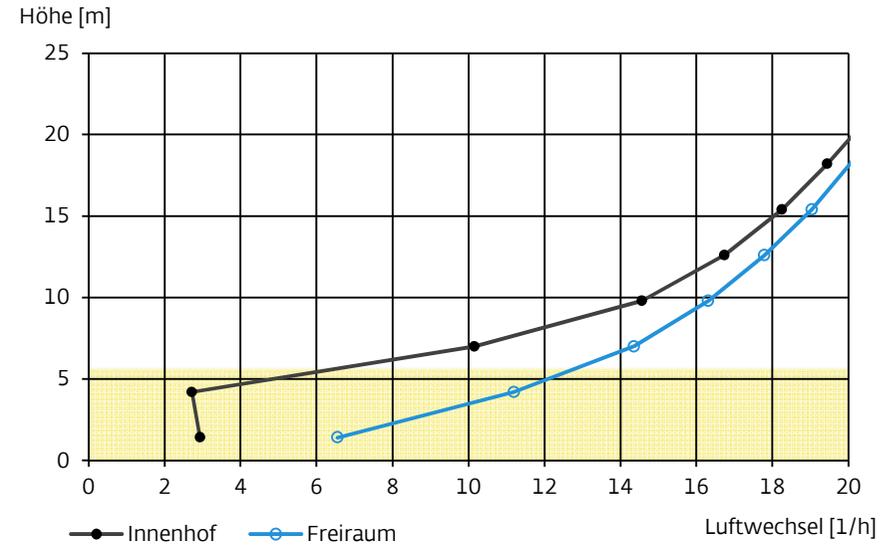


Abb. 147: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

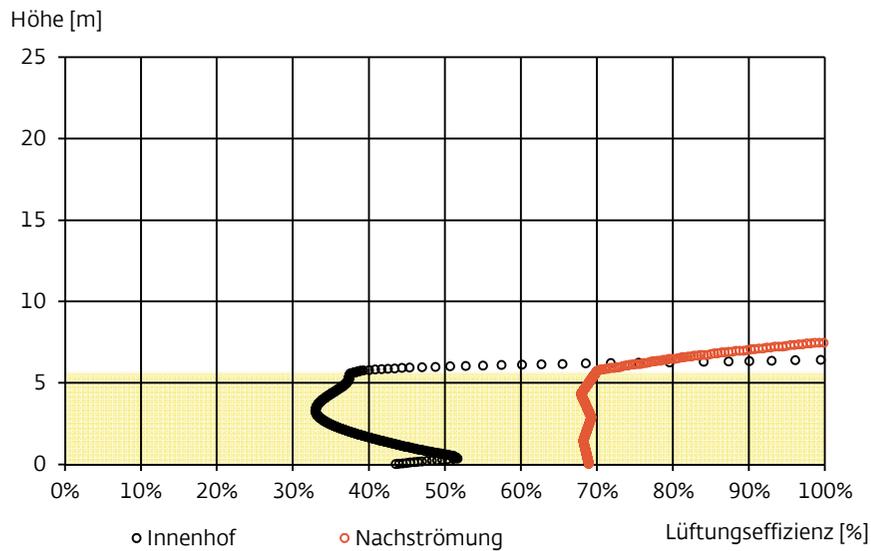
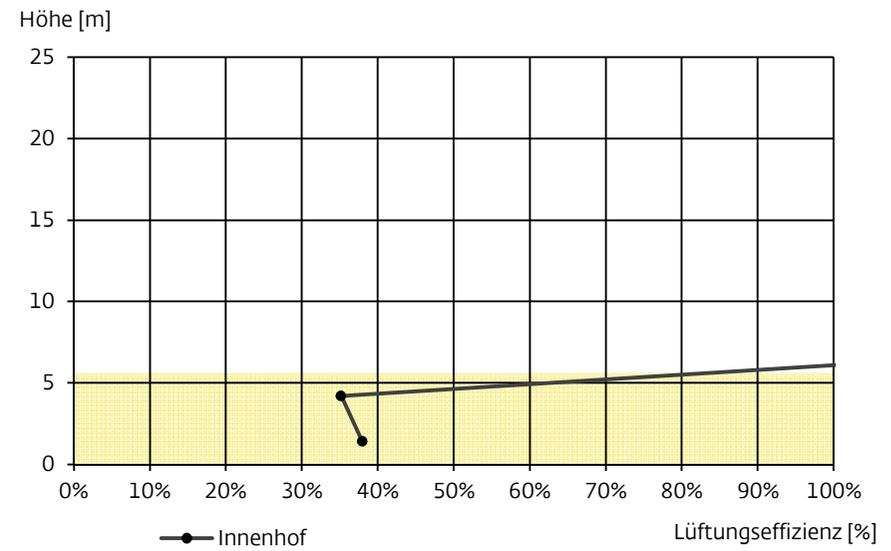


Abb. 149: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.3. S03: G = 4, AR = 1.1, isotherm, Wind 1.5 m/s

Abb. 150: Age of Air – vertikaler Verlauf

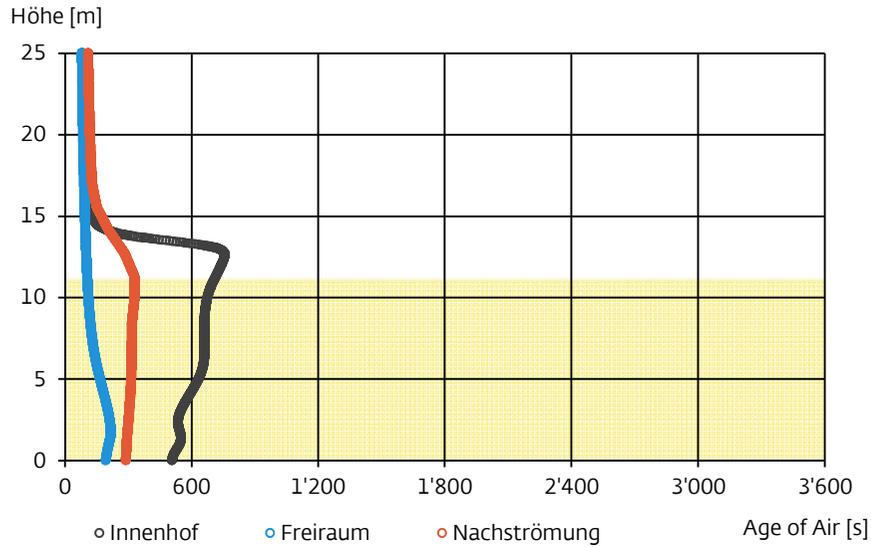


Abb. 152: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

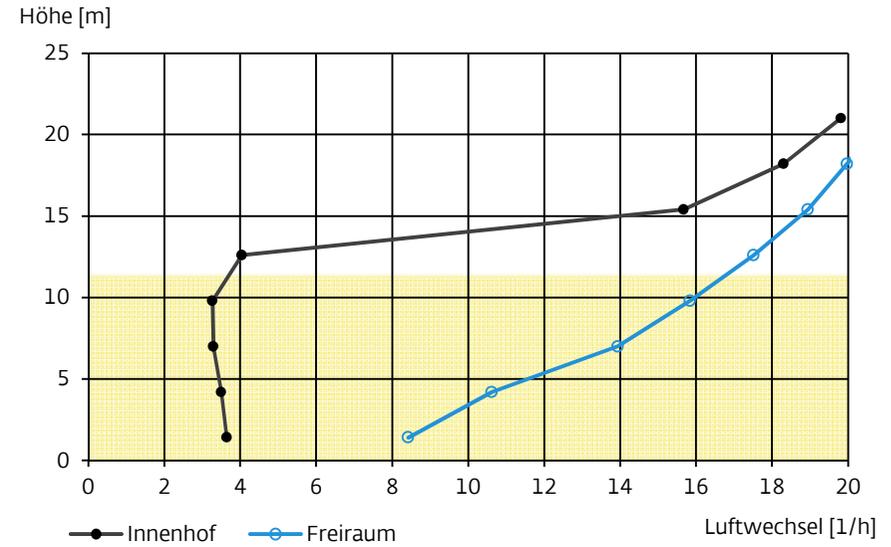


Abb. 151: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

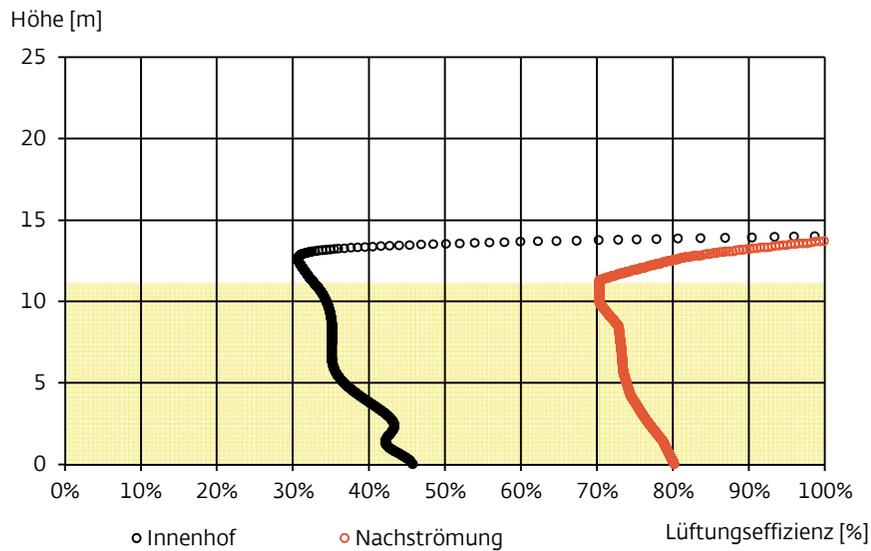
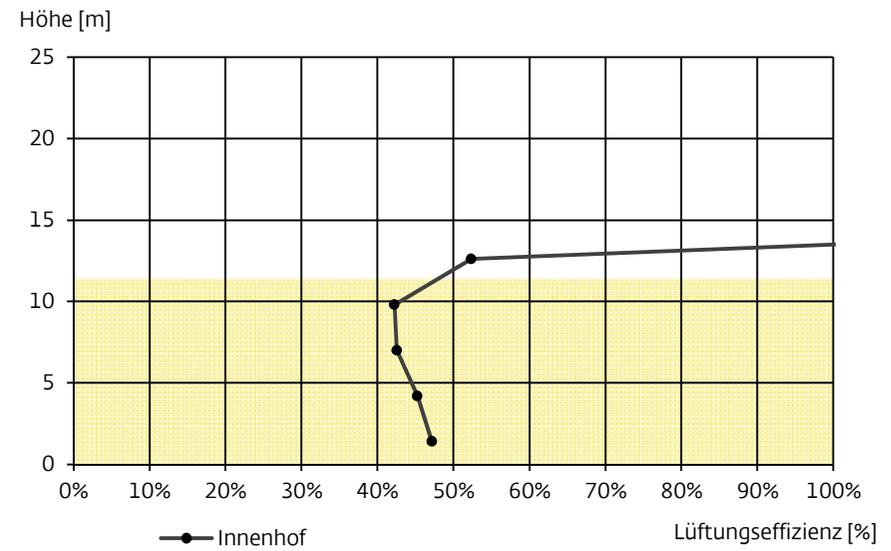


Abb. 153: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.4. S04: G = 4, AR = 1.1, isotherm, Wind 3.0 m/s

Abb. 154: Age of Air – vertikaler Verlauf

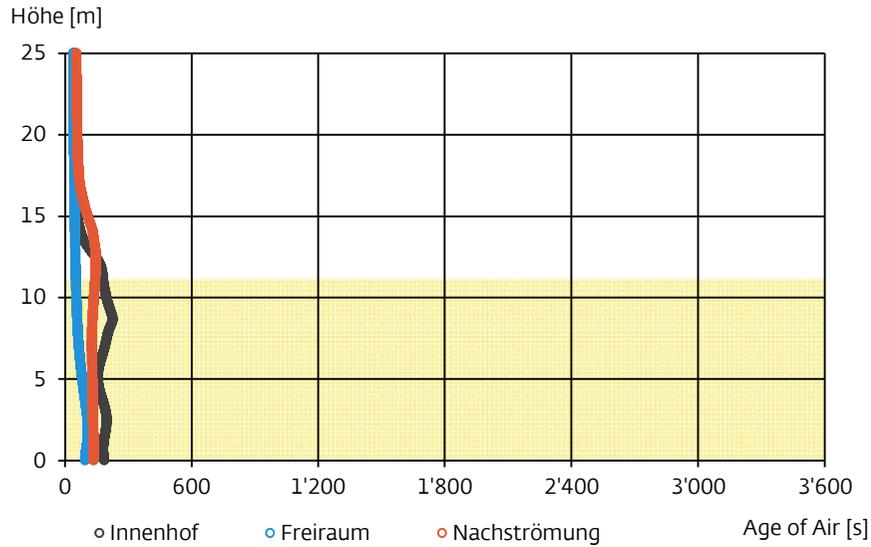


Abb. 156: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

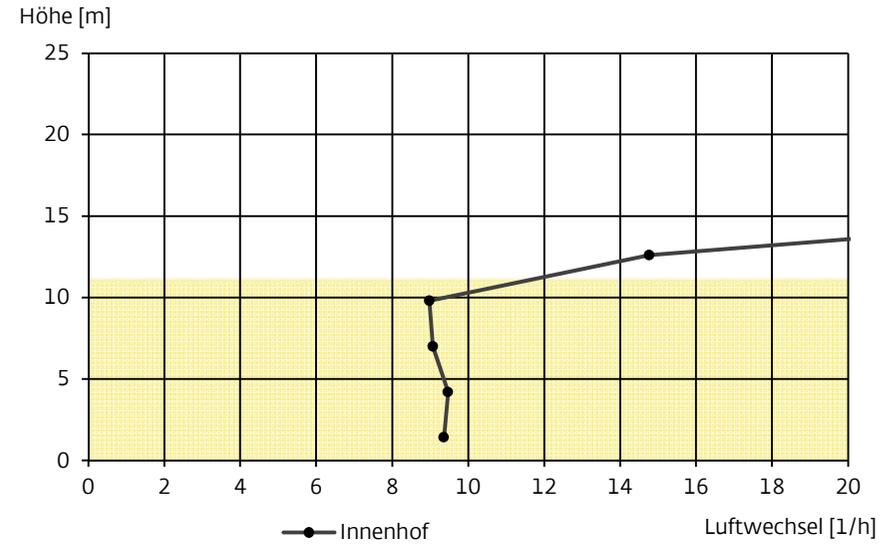


Abb. 155: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

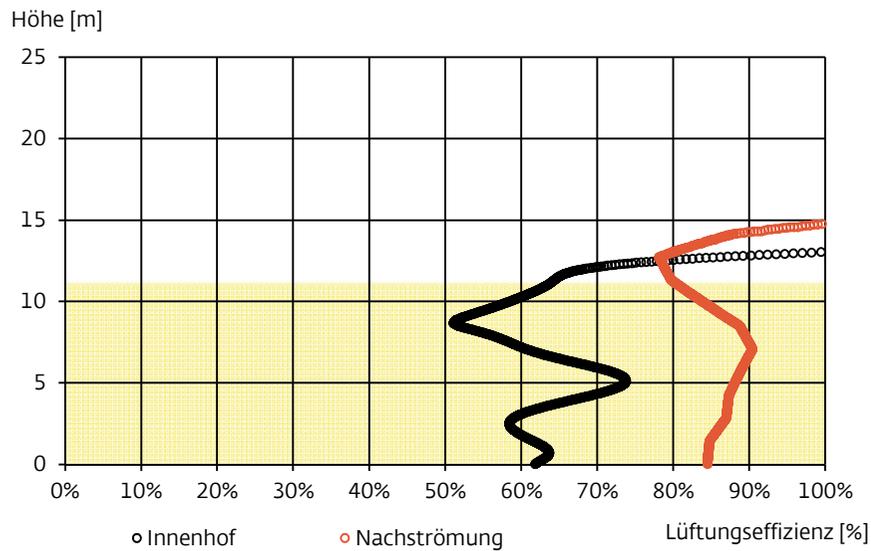
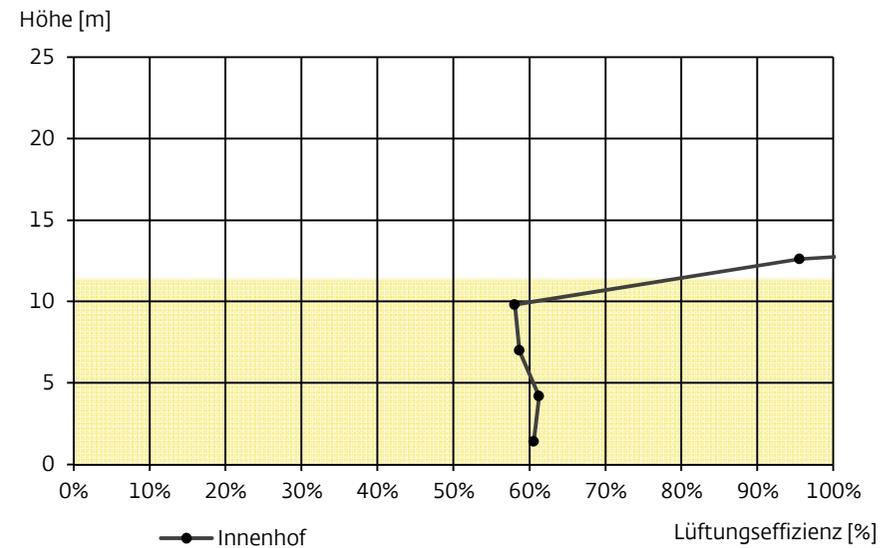


Abb. 157: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.5. S05: G = 4, AR = 1.1, isotherm, Wind 1.5 m/s, Windrichtung 45°

Abb. 158: Age of Air – vertikaler Verlauf

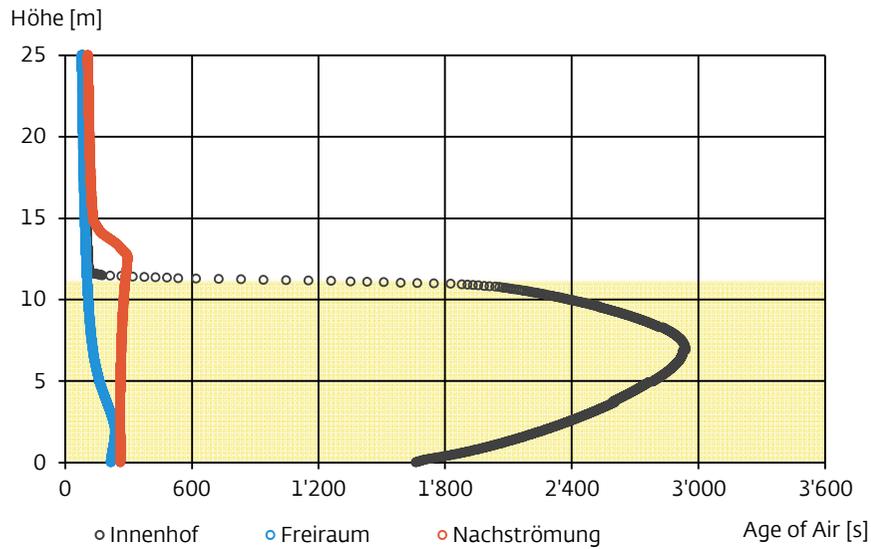


Abb. 160: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

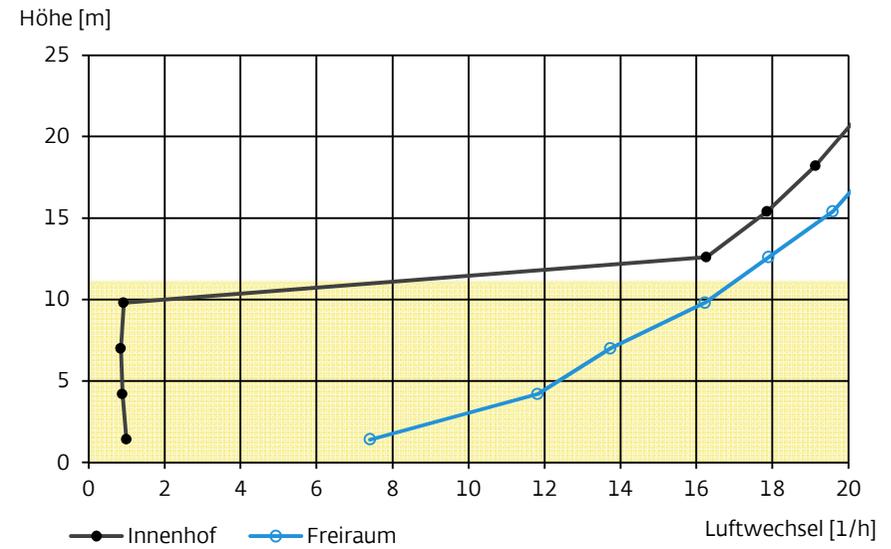


Abb. 159: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

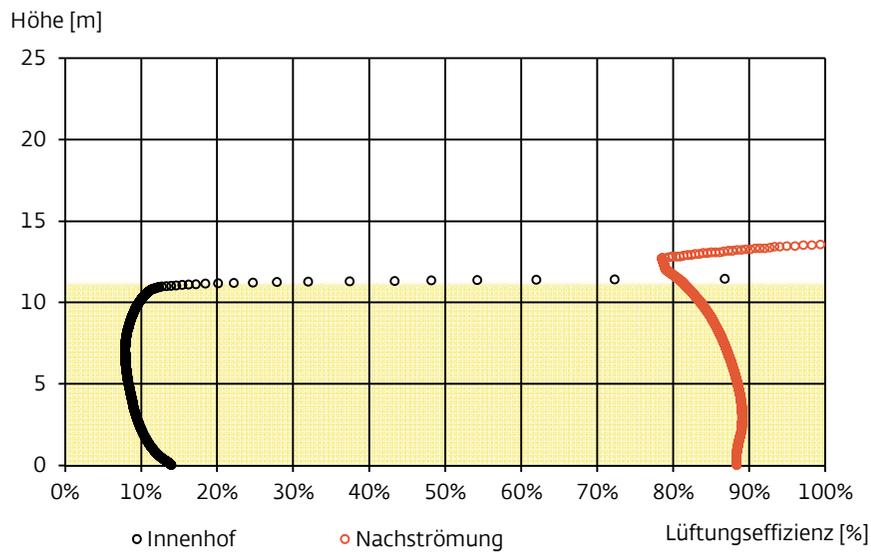
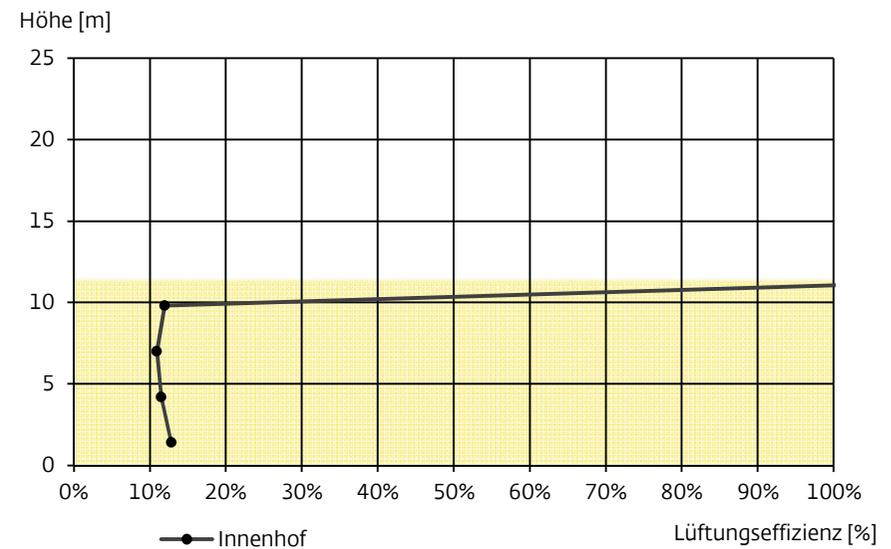


Abb. 161: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.6. S06: G = 5, AR = 1.4, isotherm, Wind 1.5 m/s

Abb. 162: Age of Air – vertikaler Verlauf

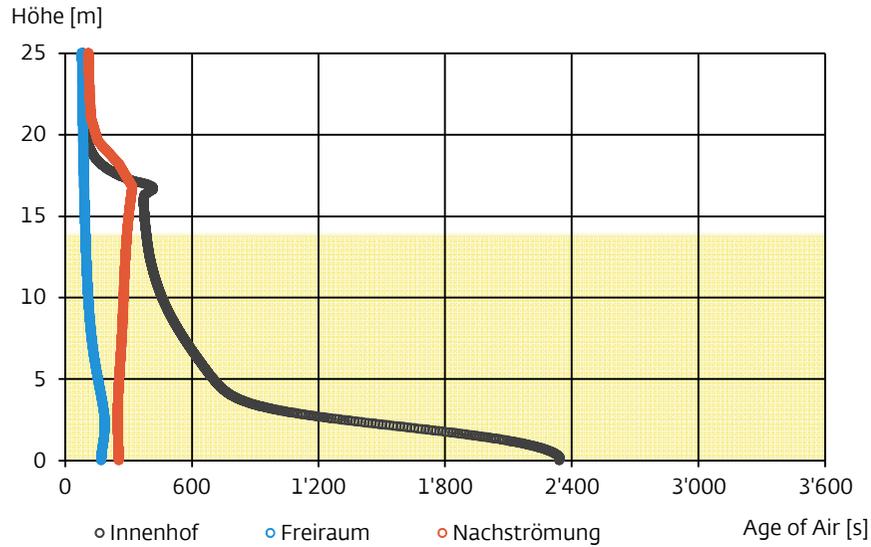


Abb. 164: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

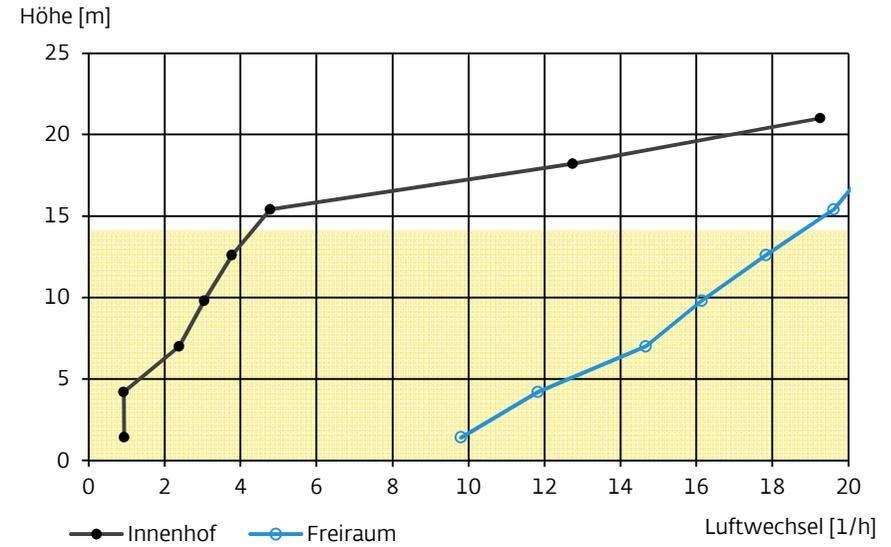


Abb. 163: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

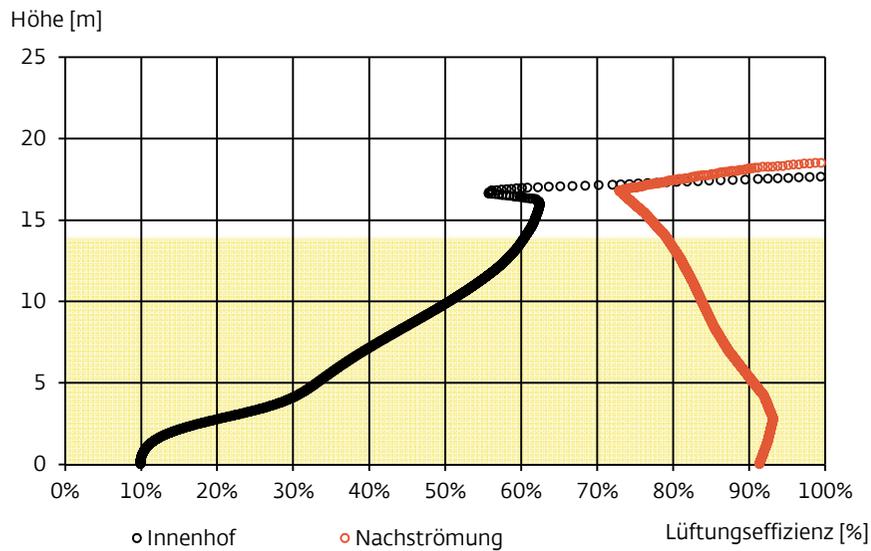
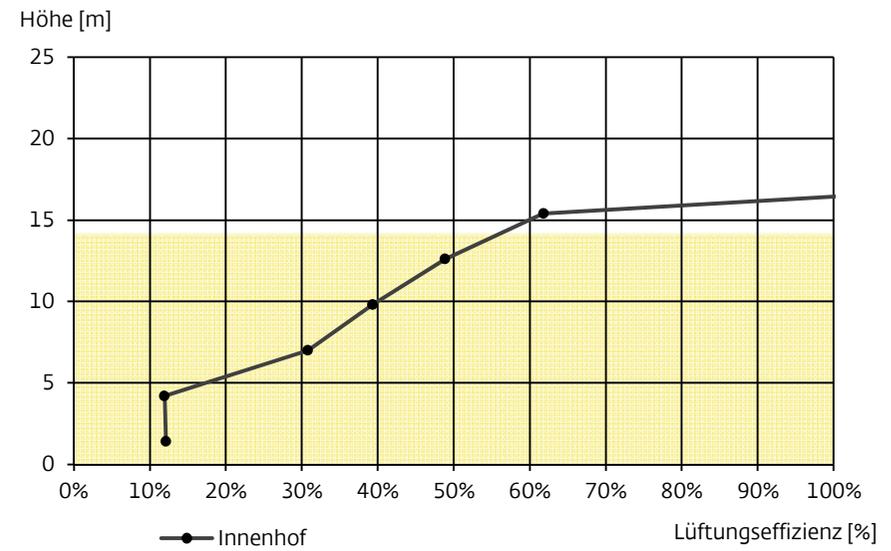


Abb. 165: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.7. S07: G = 6, AR = 1.7, isotherm, Wind 1.5 m/s

Abb. 166: Age of Air – vertikaler Verlauf

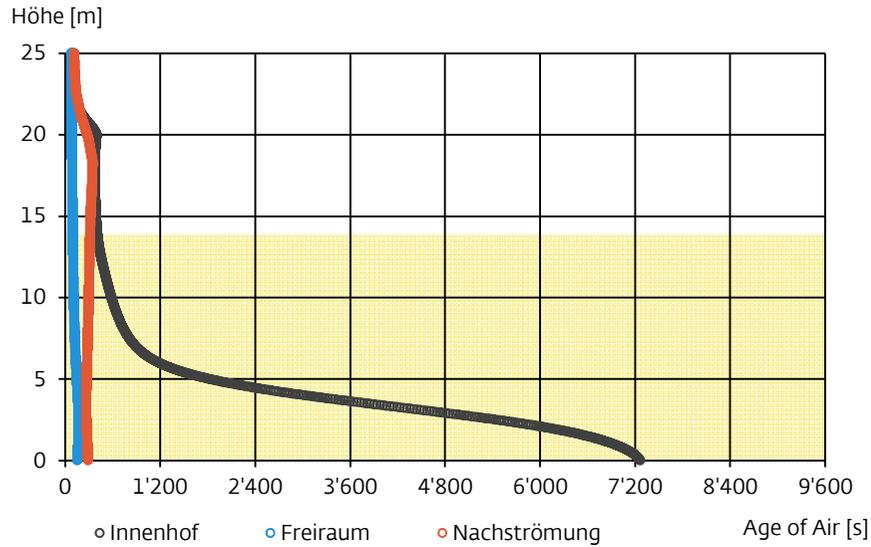


Abb. 168: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

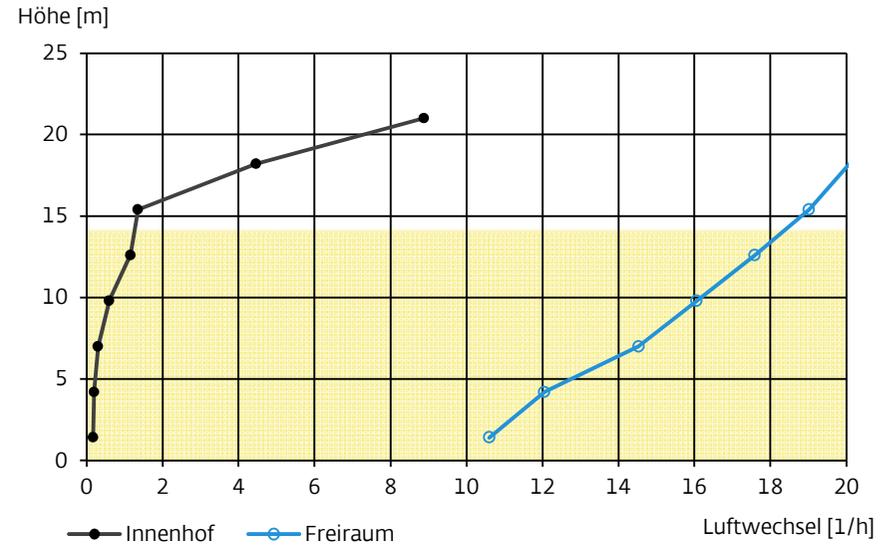


Abb. 167: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

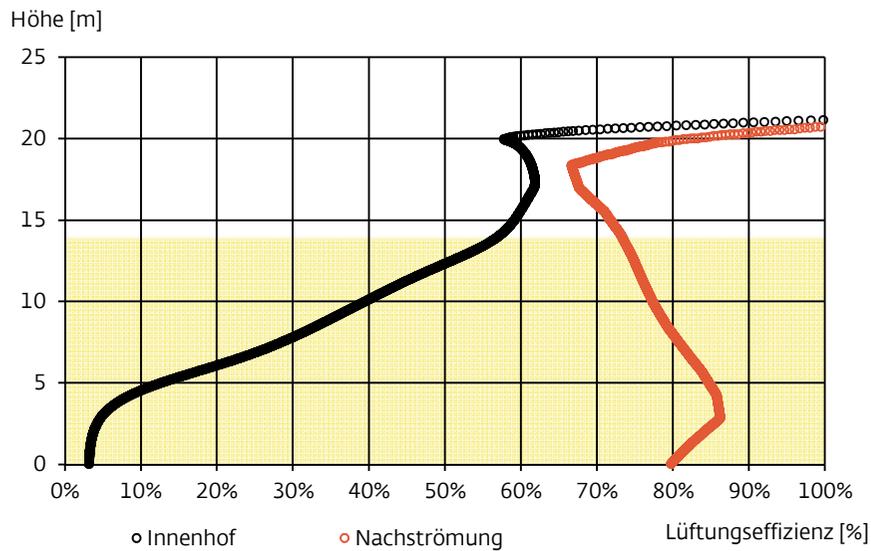
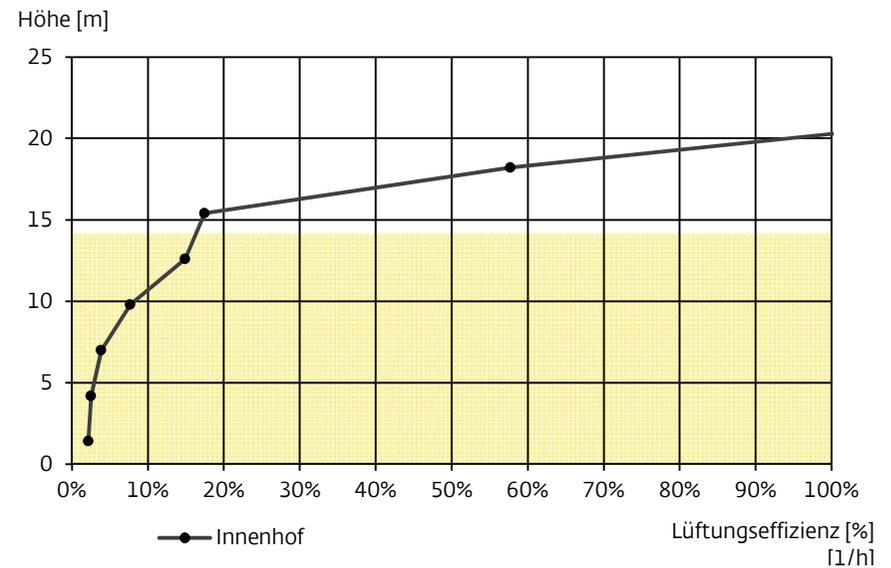


Abb. 169: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.8. S08: G = 7, AR = 2.0, isotherm, Wind 1.5 m/s

Abb. 170: Age of Air – vertikaler Verlauf

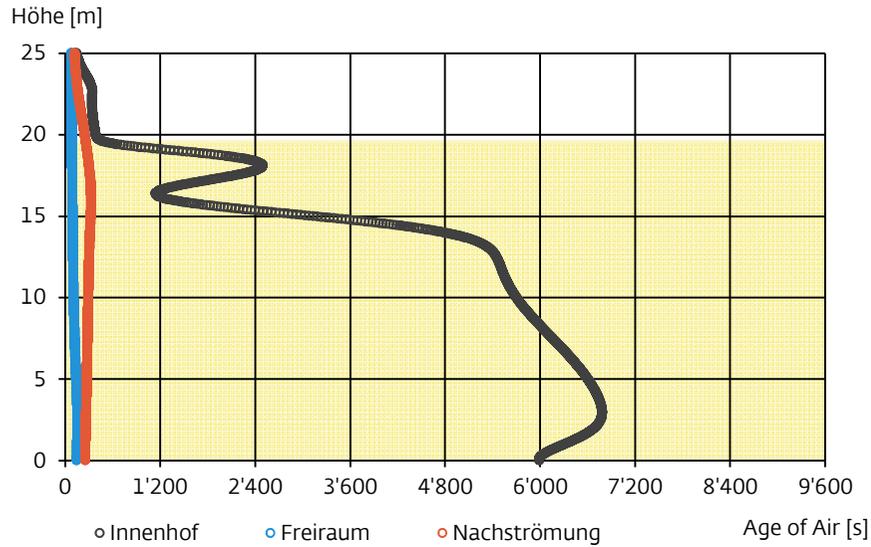


Abb. 172: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

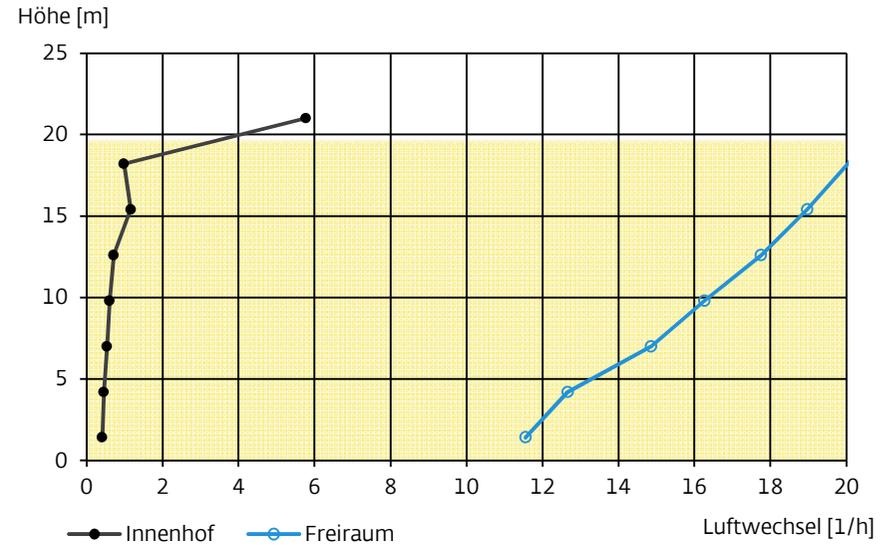


Abb. 171: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

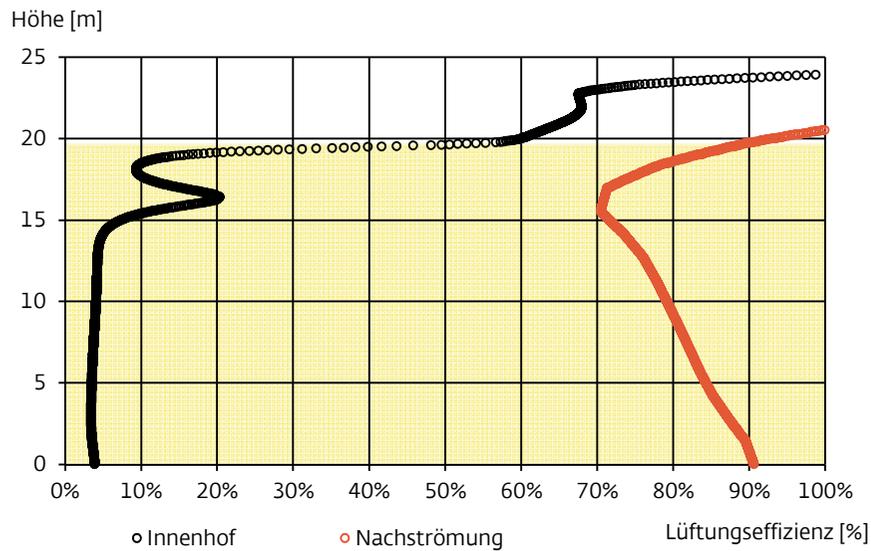
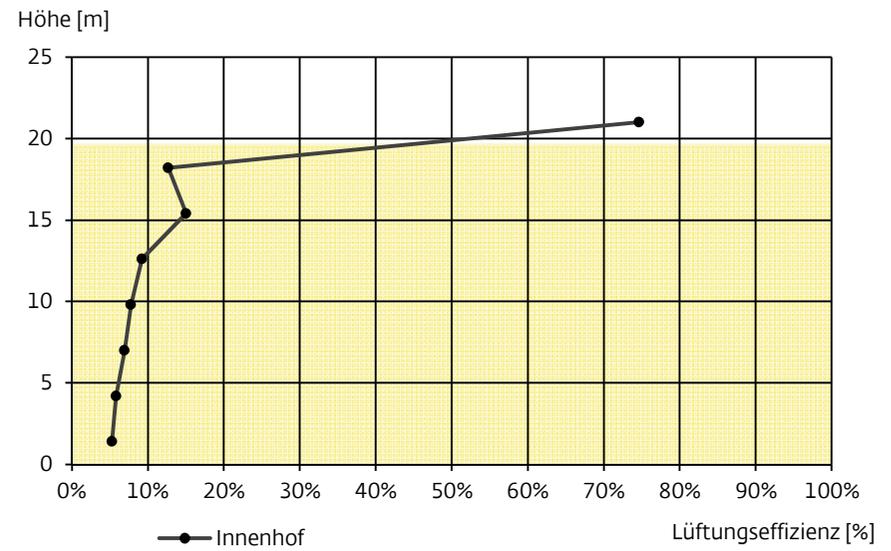


Abb. 173: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.9. S09: G = 8, AR = 2.2, isotherm, Wind 1.5 m/s

Abb. 174: Age of Air – vertikaler Verlauf

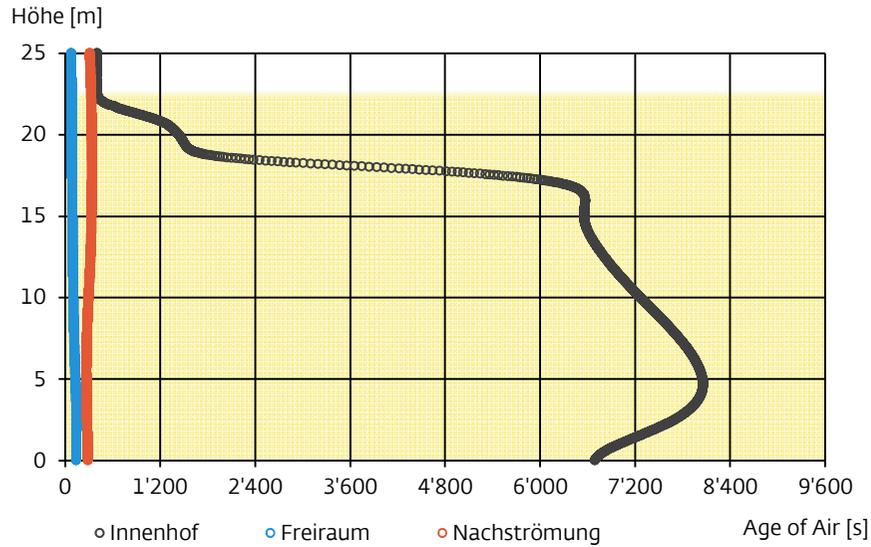


Abb. 176: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

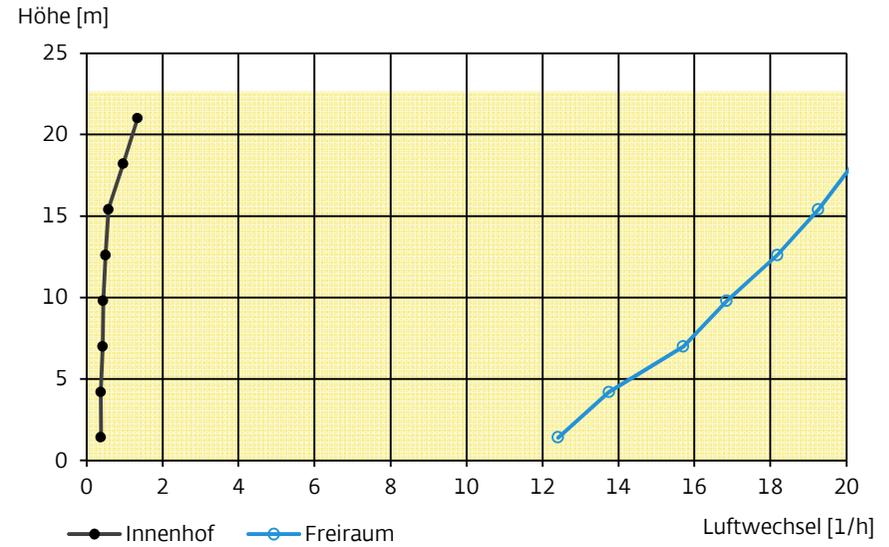


Abb. 175: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

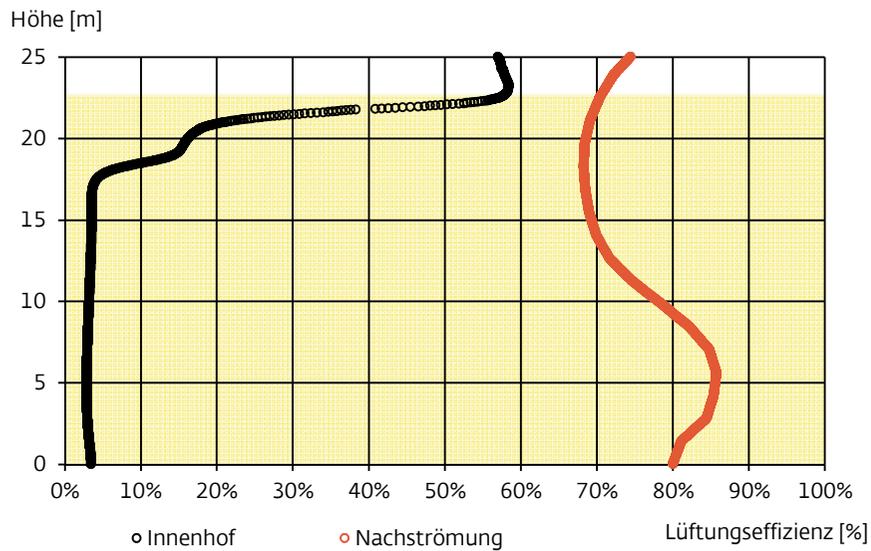
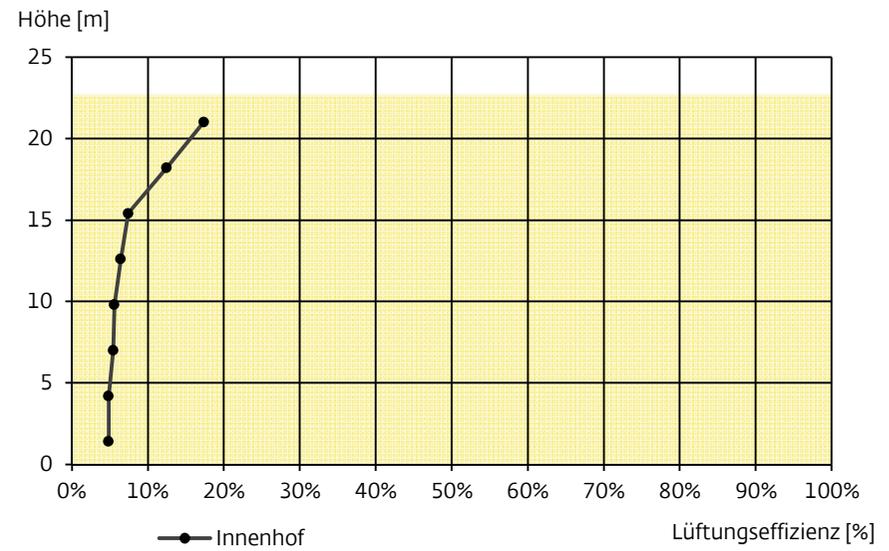


Abb. 177: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.10. S10: G = 2, AR = 0.6, Stau, Wind 0.1 m/s

Abb. 178: Age of Air – vertikaler Verlauf

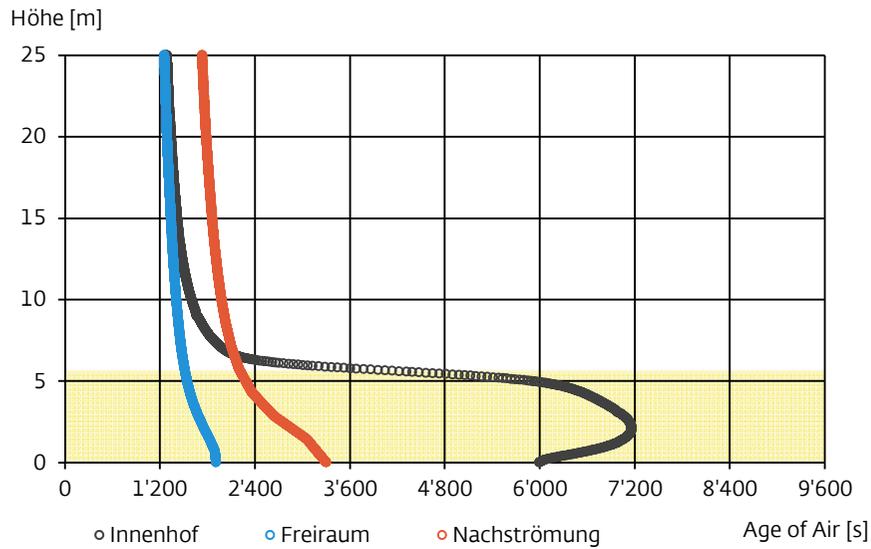


Abb. 180: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

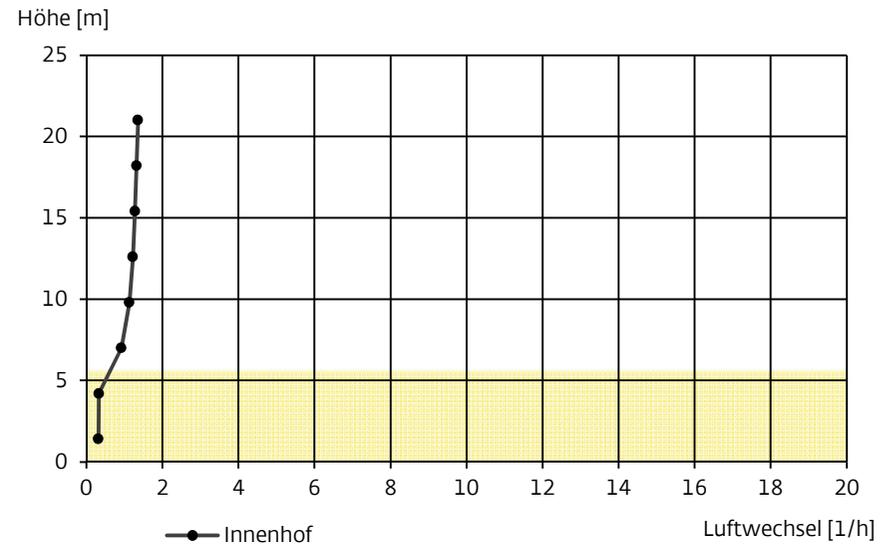


Abb. 179: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

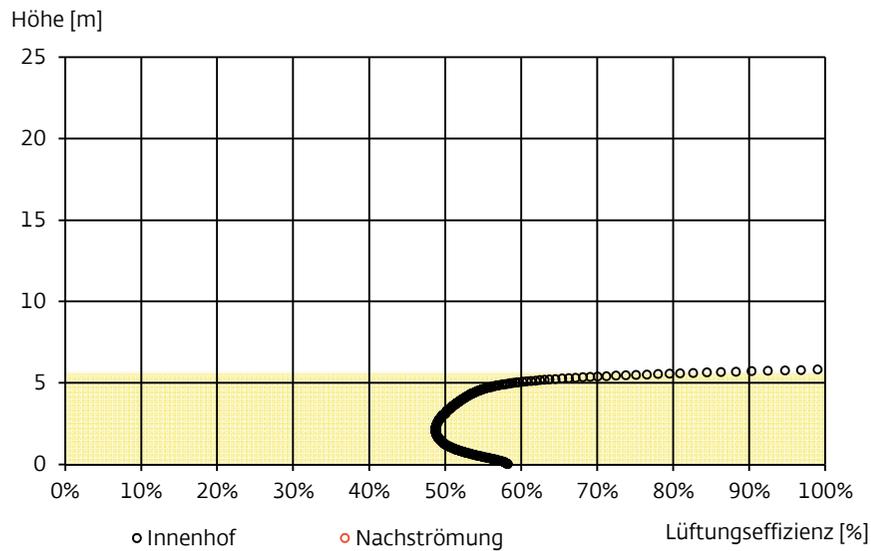
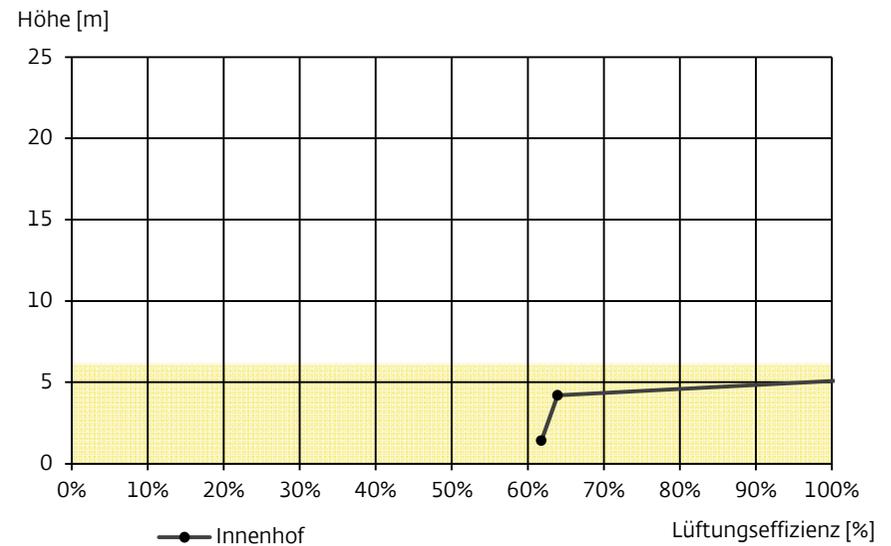


Abb. 181: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.11. S11: G = 5, AR = 1.4, Stau, Wind 0.1 m/s

Abb. 182: Age of Air – vertikaler Verlauf

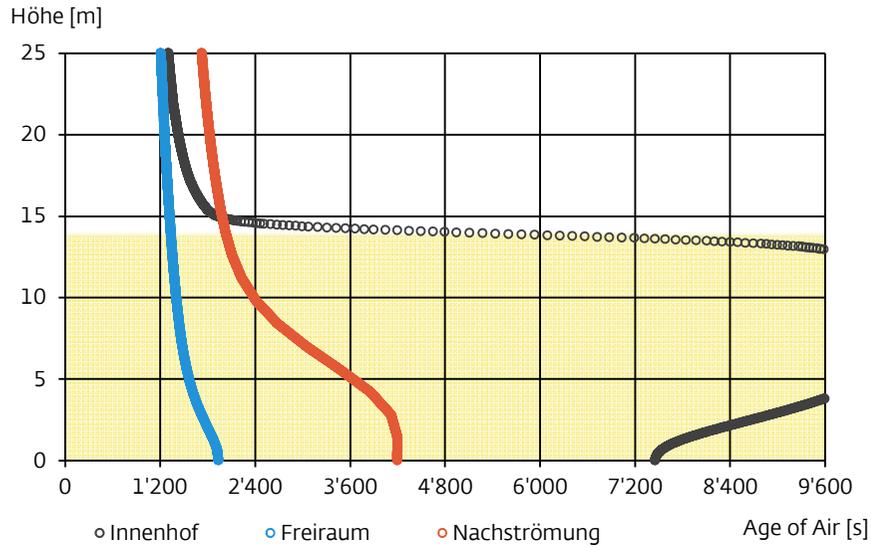


Abb. 184: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

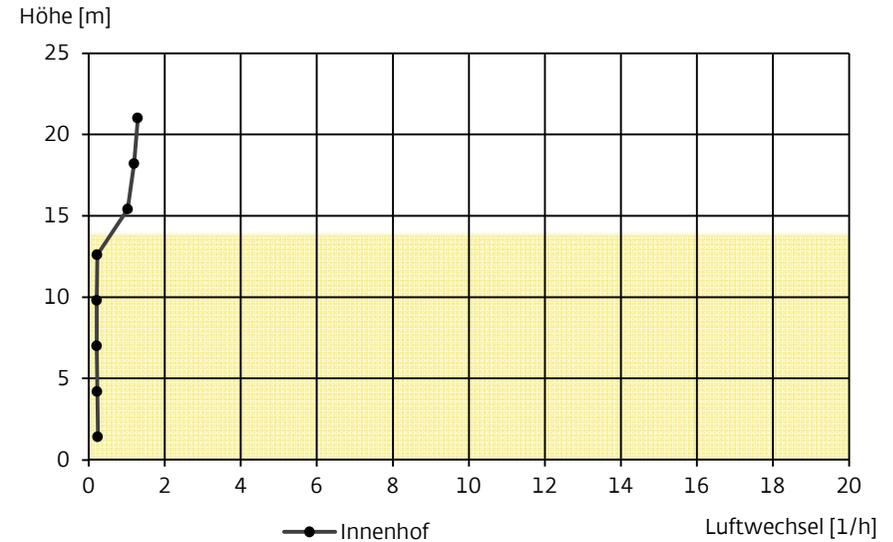


Abb. 183: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

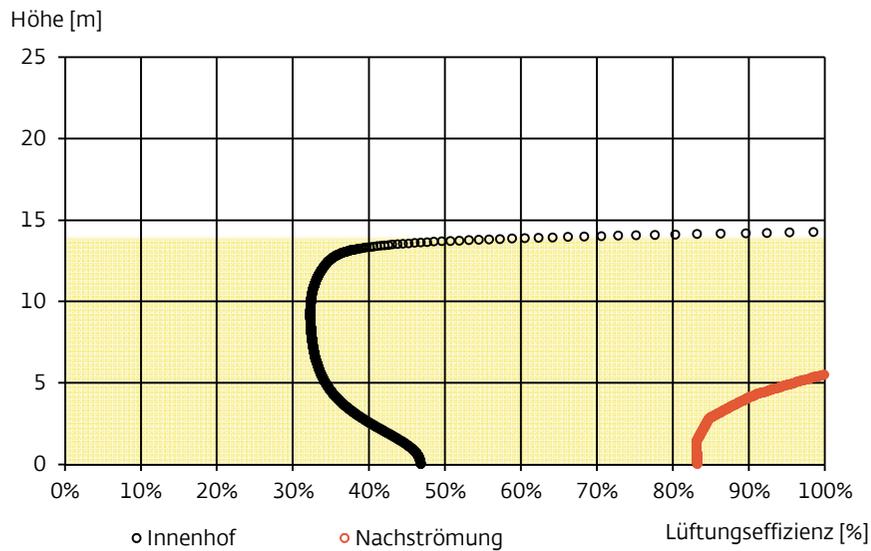
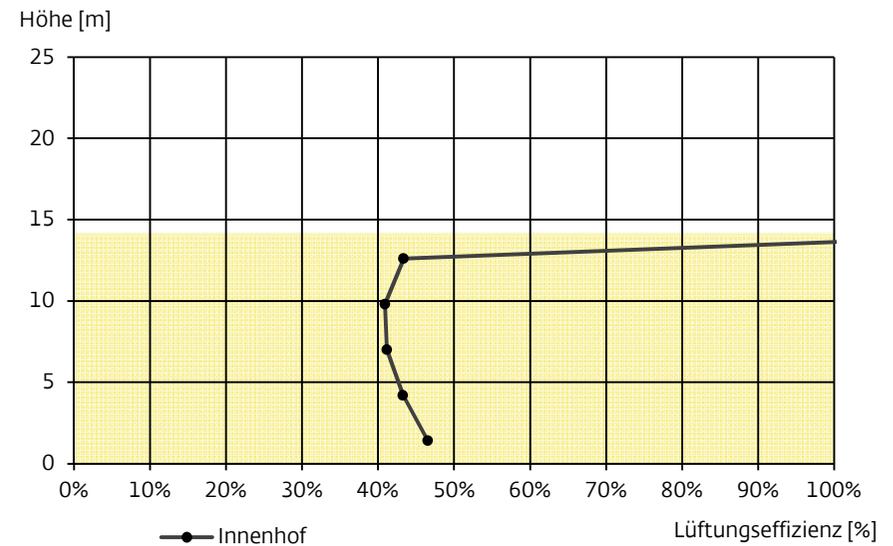


Abb. 185: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.12. S12: G = 2, AR = 0.6, Auftrieb, Wind 0.5 m/s

Abb. 186: Age of Air – vertikaler Verlauf

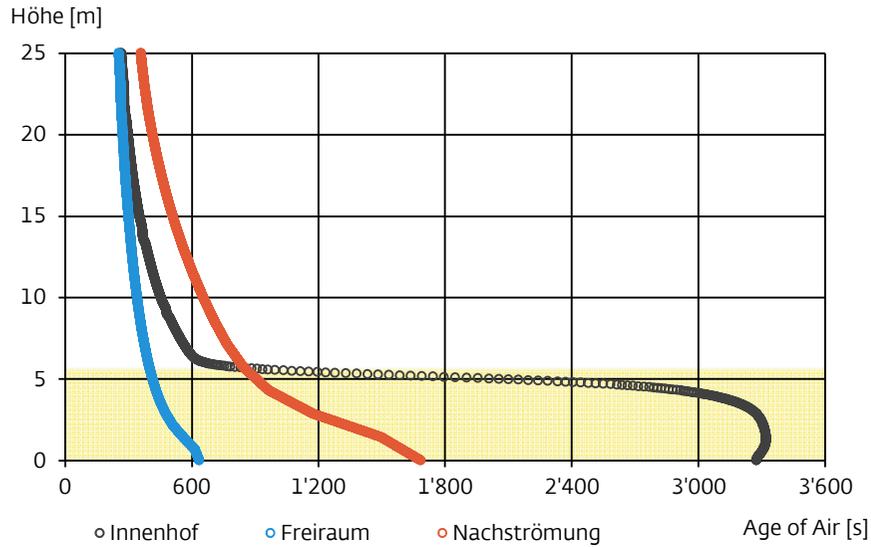


Abb. 188: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

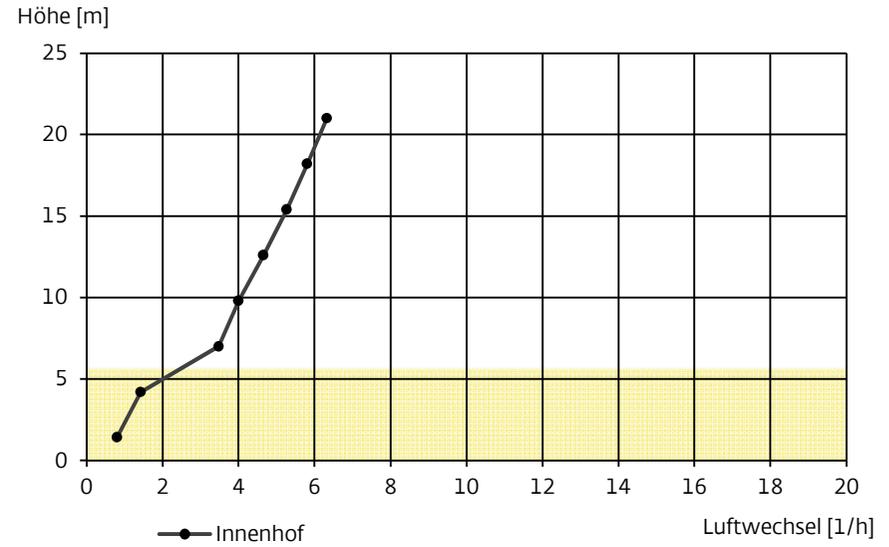


Abb. 187: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

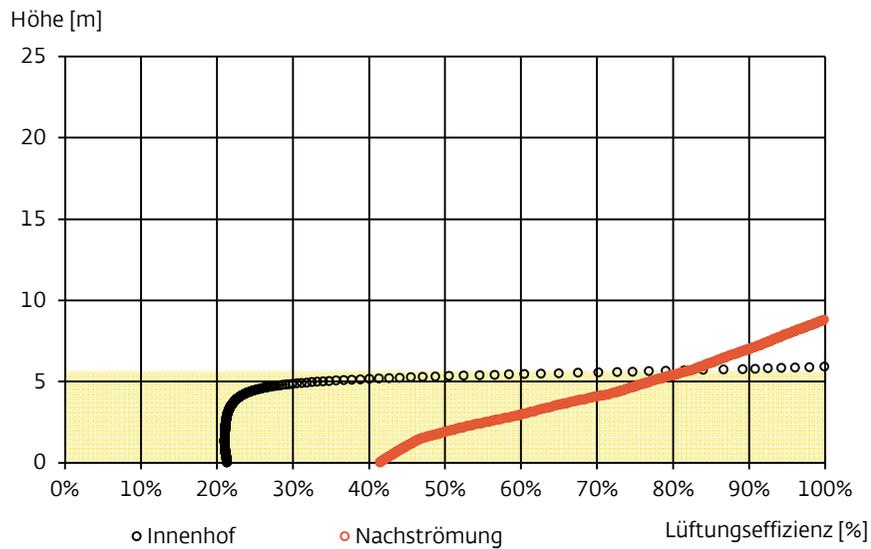
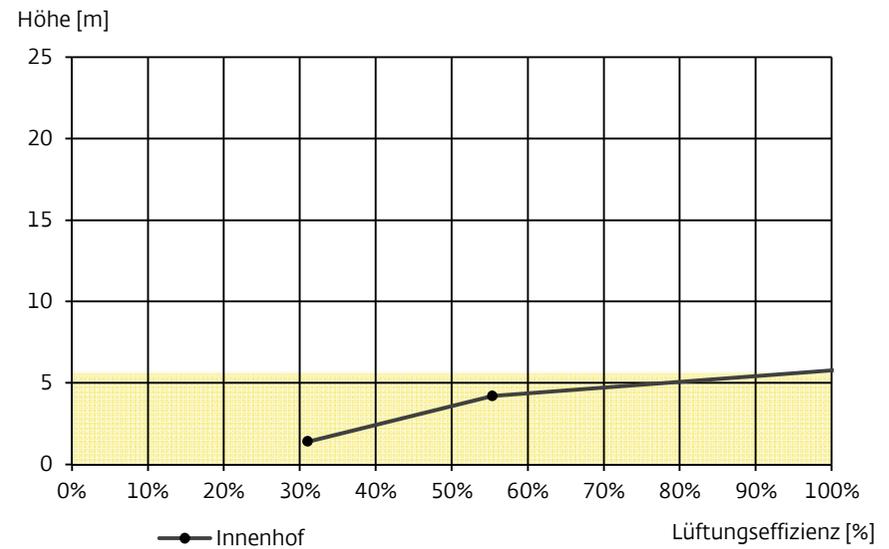


Abb. 189: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.13. S13: G = 2, AR = 0.6, Auftrieb, Wind 1.5 m/s

Abb. 190: Age of Air – vertikaler Verlauf

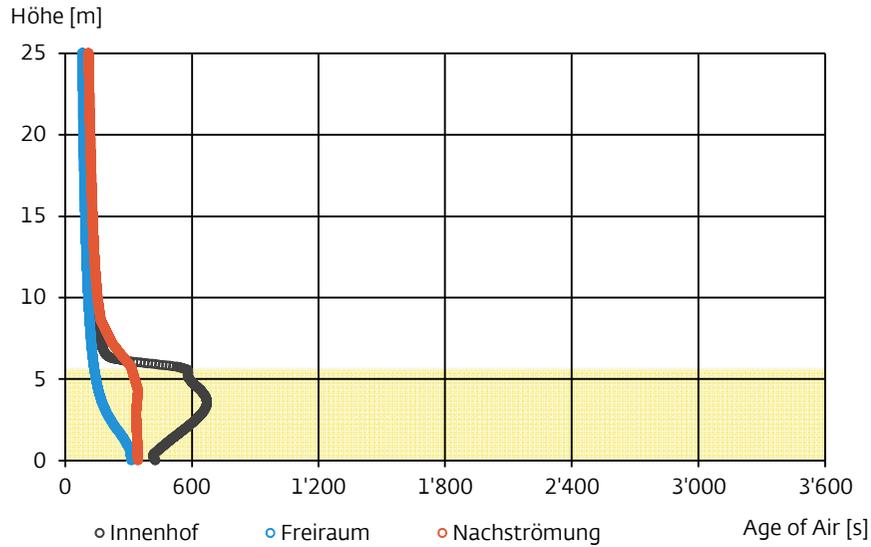


Abb. 192: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

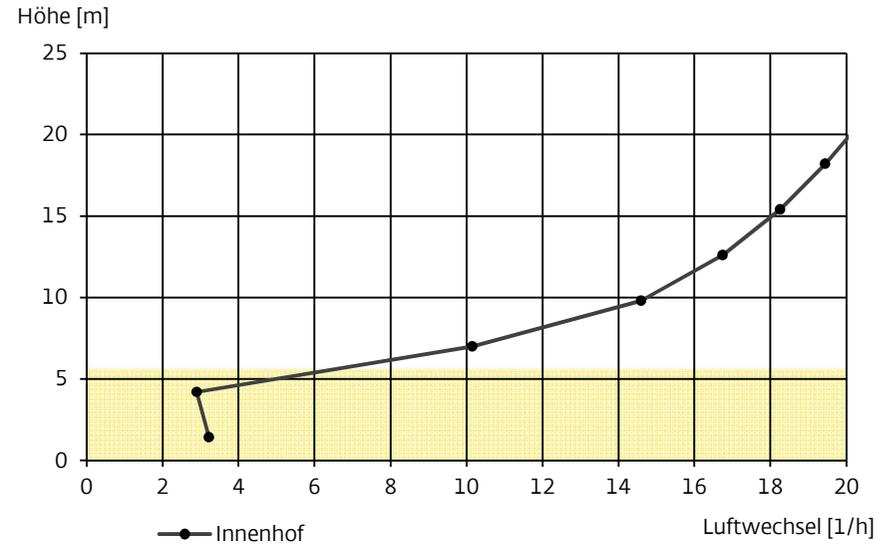


Abb. 191: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

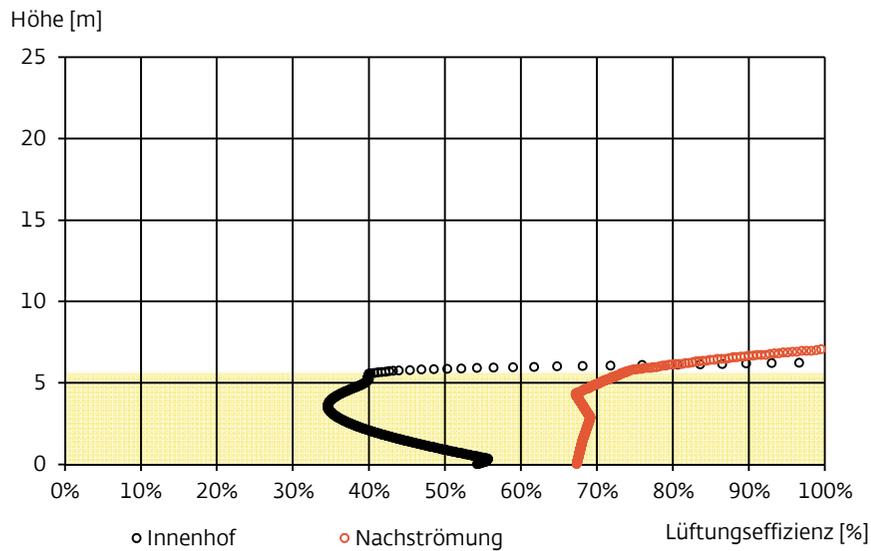
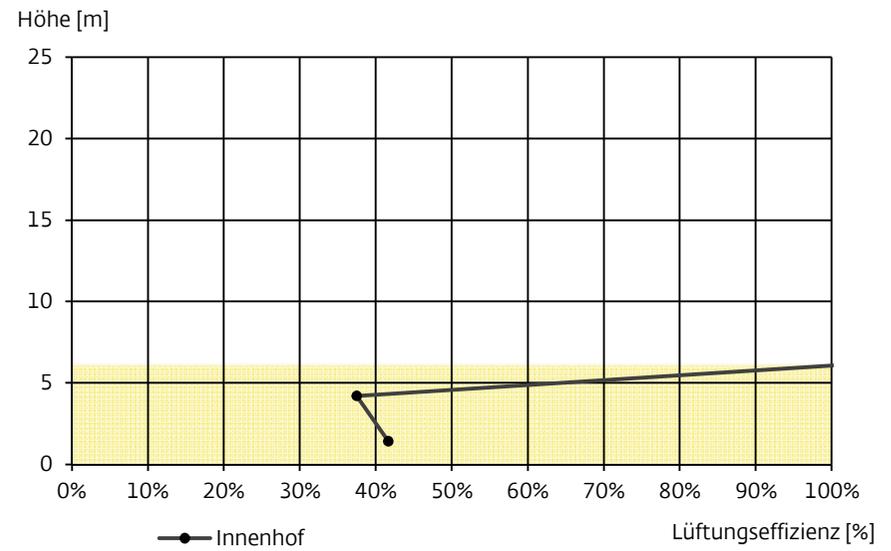


Abb. 193: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.14. S14: G = 4, AR = 1.1, Auftrieb, Wind 0.5 m/s

Abb. 194: Age of Air – vertikaler Verlauf

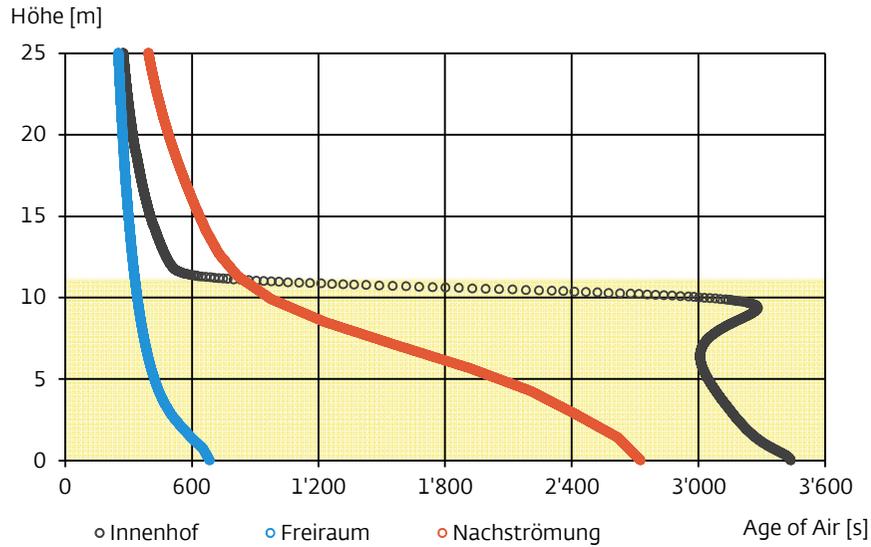


Abb. 196: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

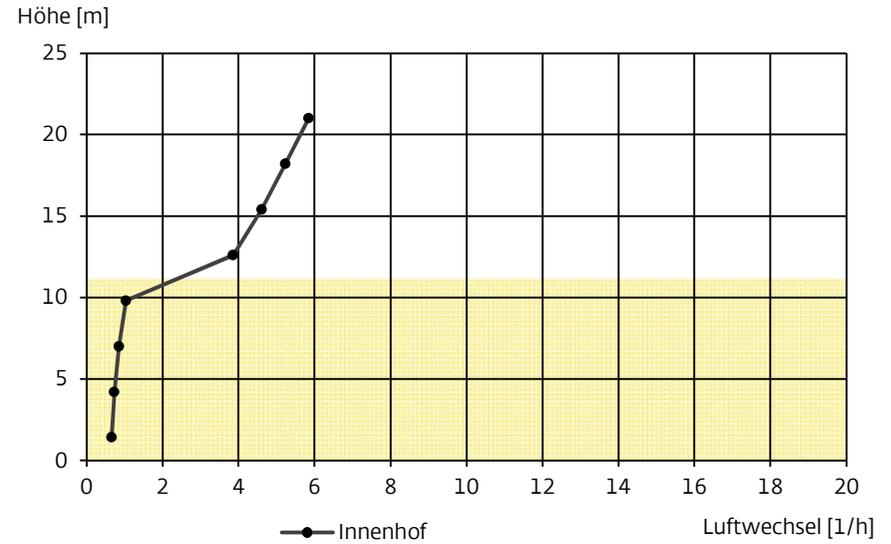


Abb. 195: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

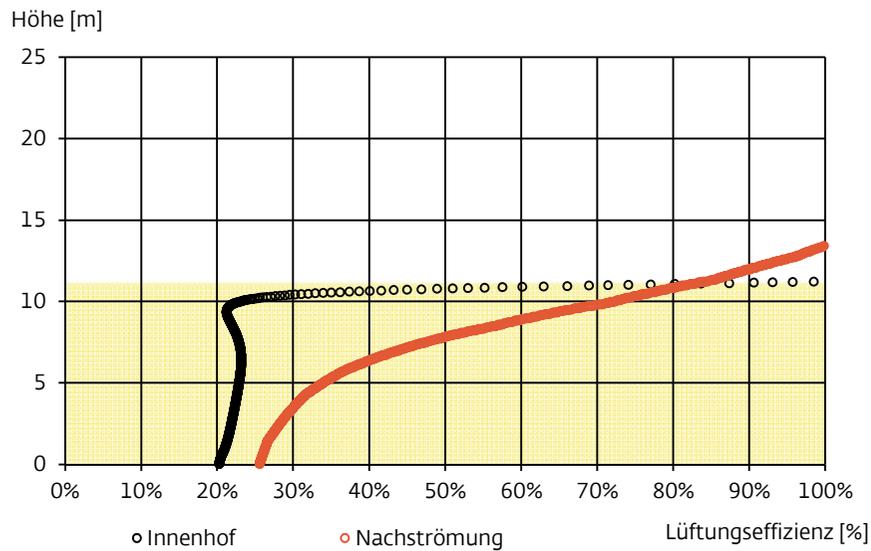
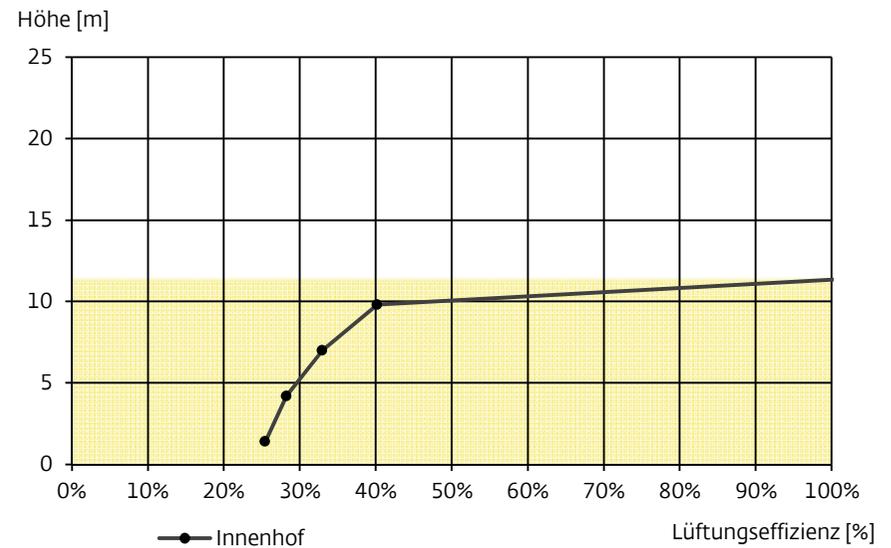


Abb. 197: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.15. S15: G = 4, AR = 1.1, Auftrieb, Wind 1.5 m/s

Abb. 198: Age of Air – vertikaler Verlauf

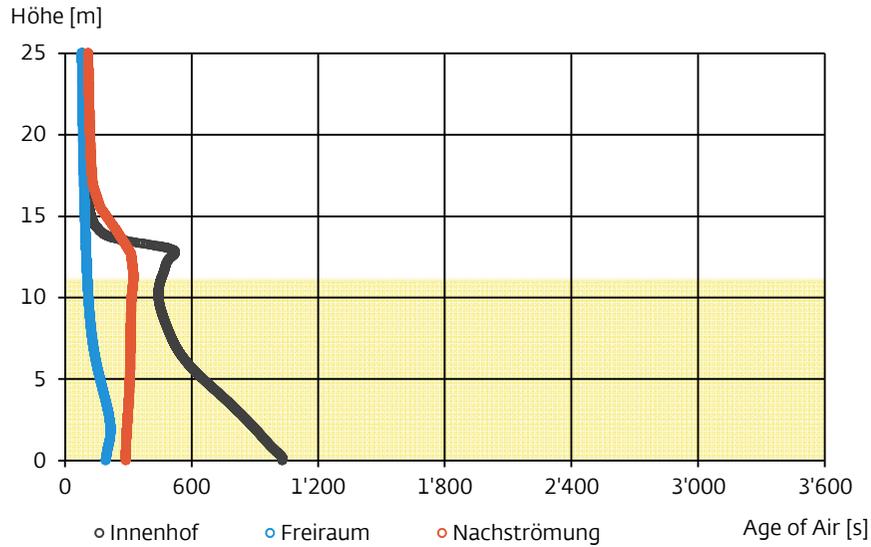


Abb. 200: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

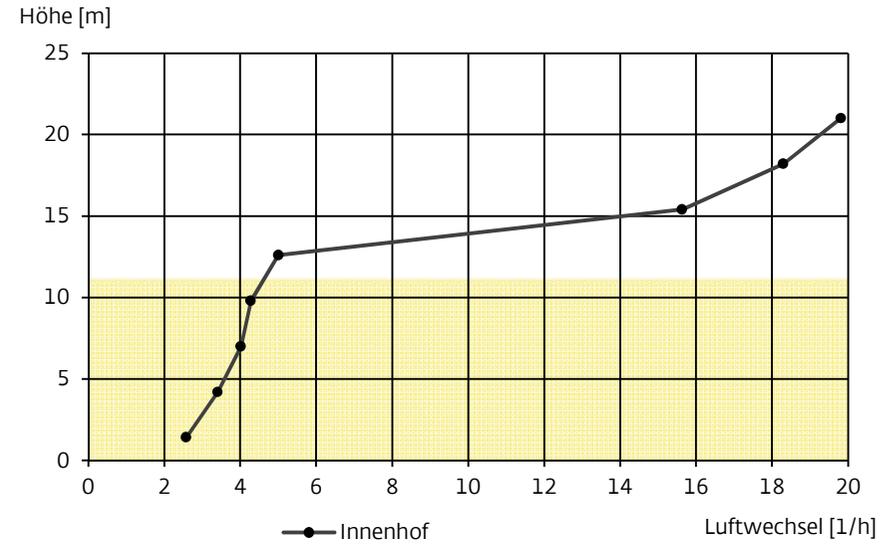


Abb. 199: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

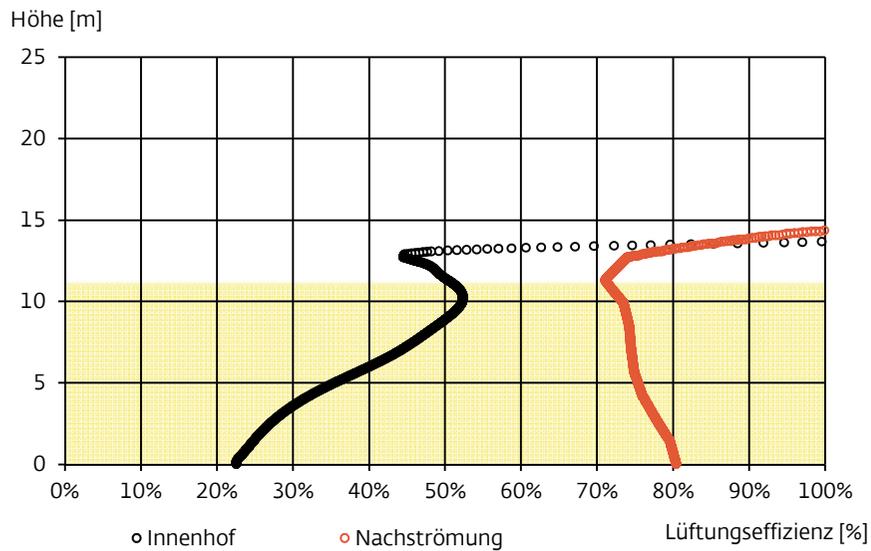
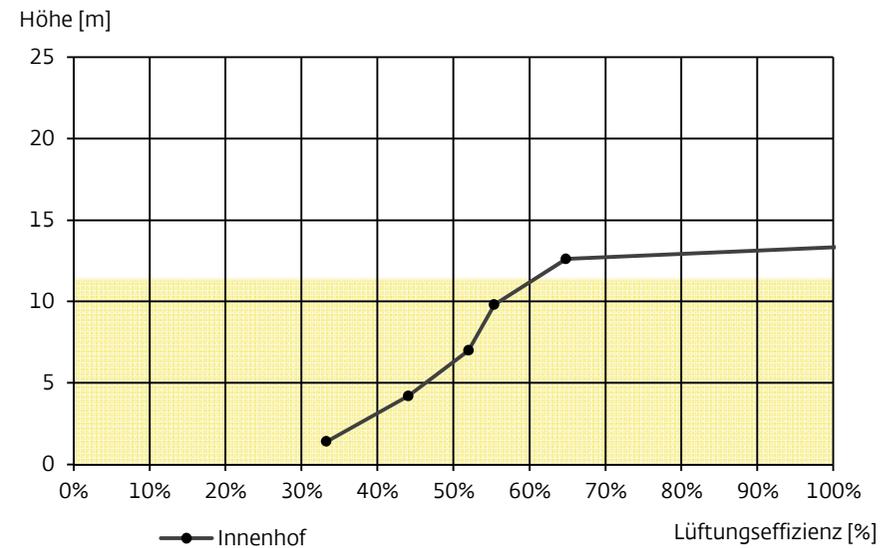


Abb. 201: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.16. S16: G = 5, AR = 1.4, Auftrieb, Wind 0.5 m/s

Abb. 202: Age of Air – vertikaler Verlauf

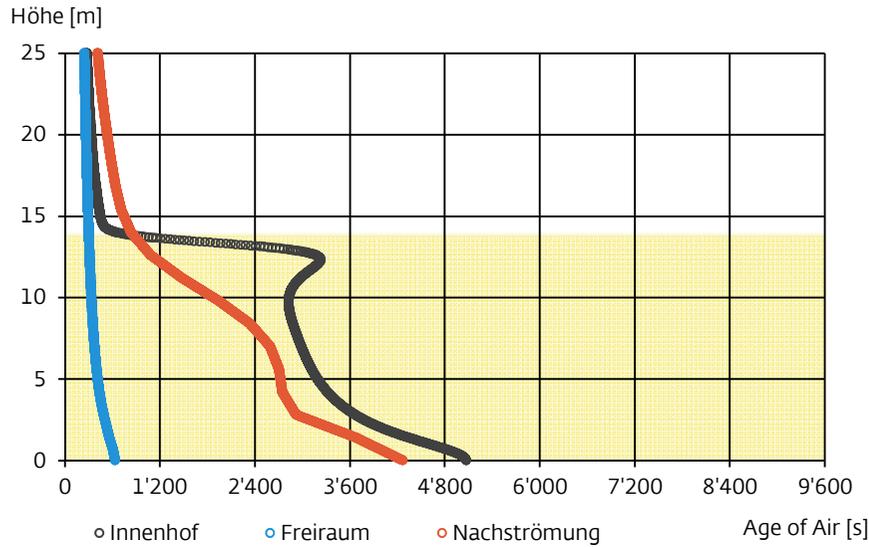


Abb. 204: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

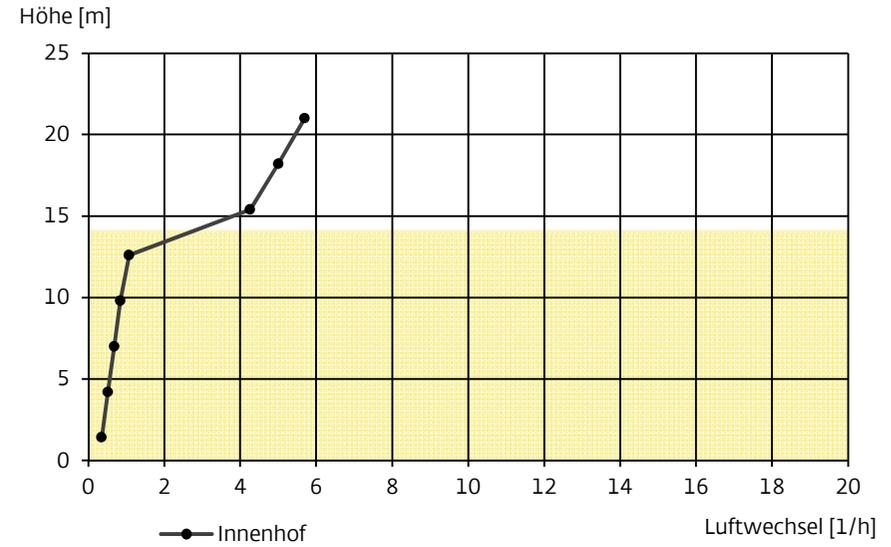


Abb. 203: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

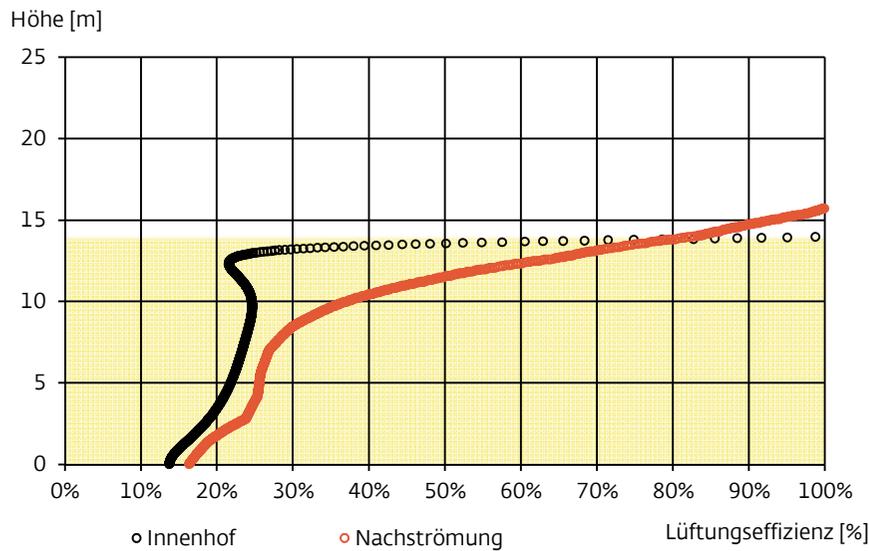
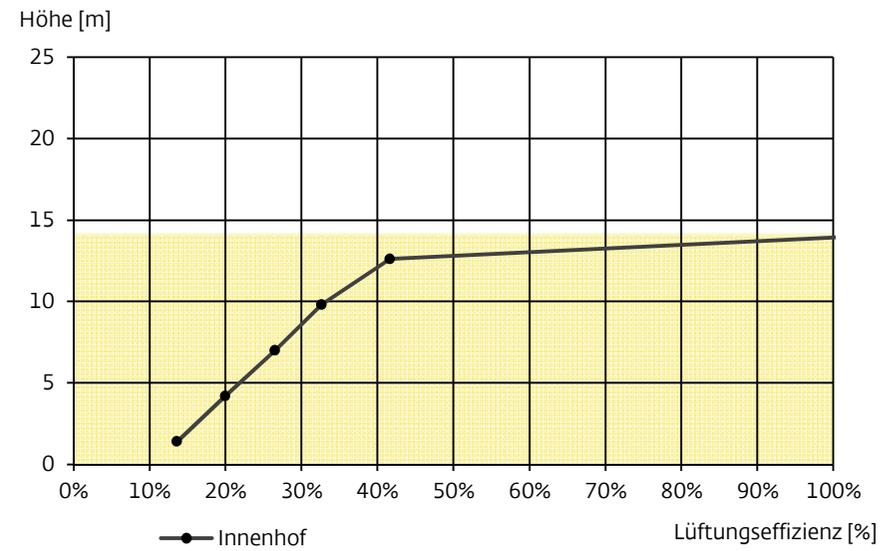


Abb. 205: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.17. S17: G = 5, AR = 1.4, Auftrieb, Wind 1.5 m/s

Abb. 206: Age of Air – vertikaler Verlauf

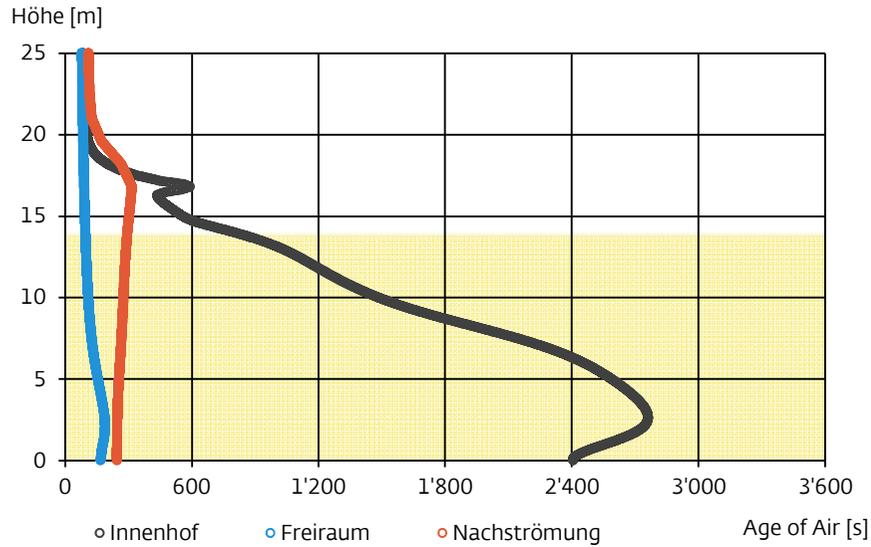


Abb. 208: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

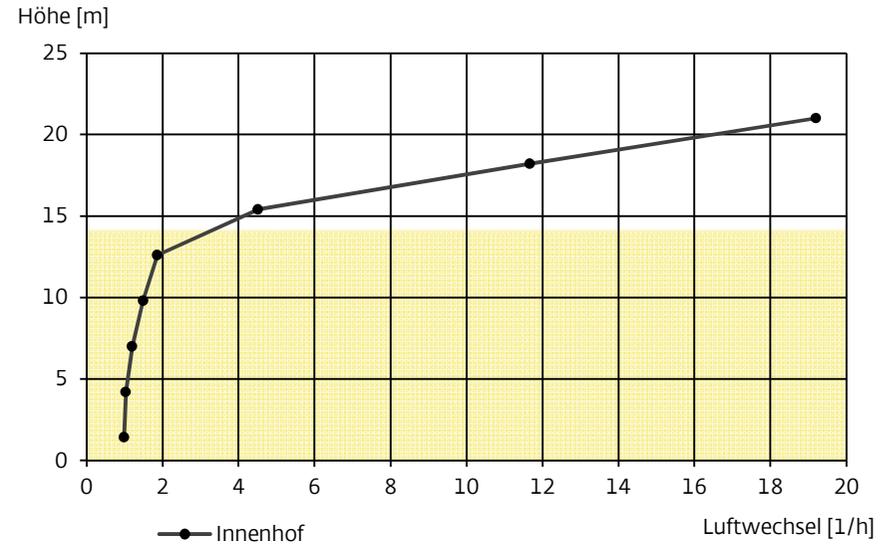


Abb. 207: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

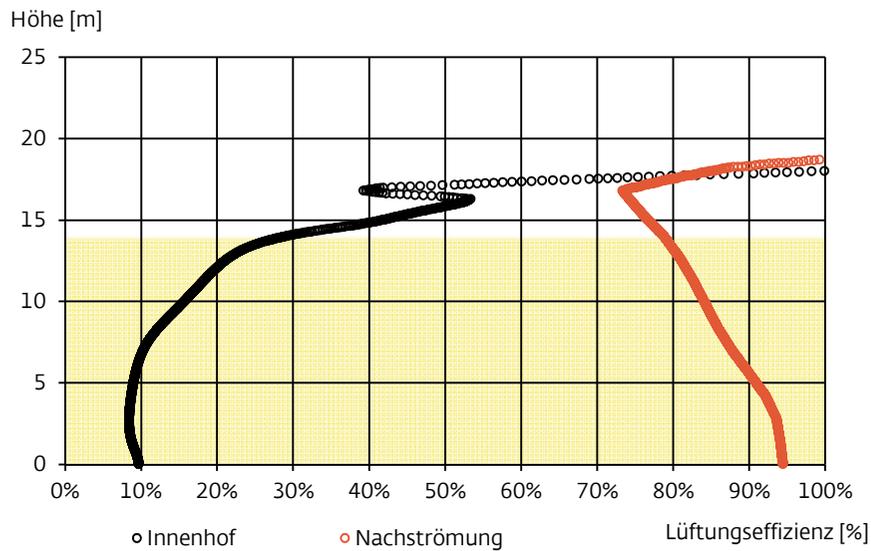
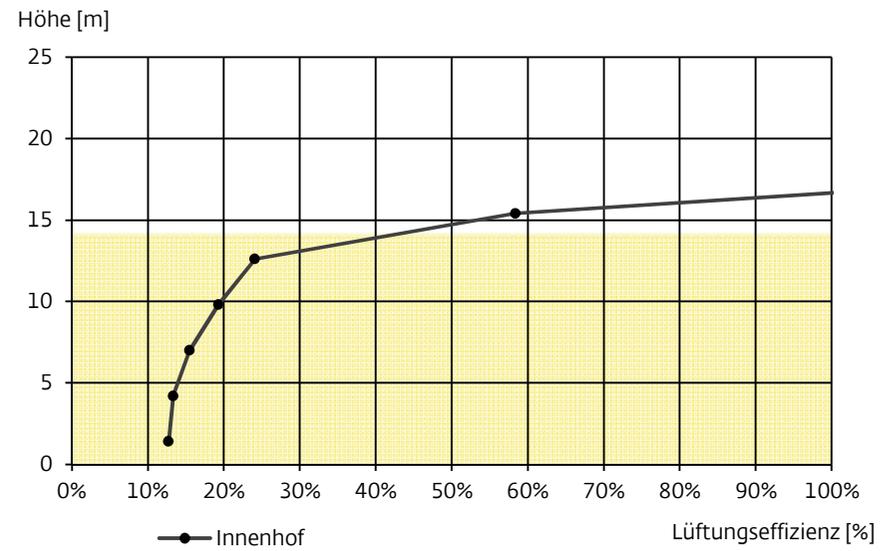


Abb. 209: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.18. S18: G = 5, AR = 1.4, Auftrieb, Wind 3.0 m/s

Abb. 210: Age of Air – vertikaler Verlauf

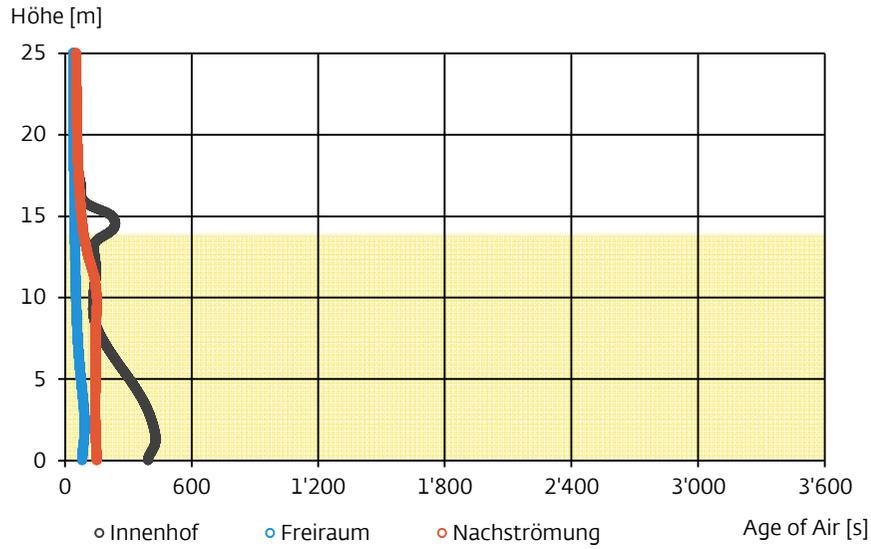


Abb. 212: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

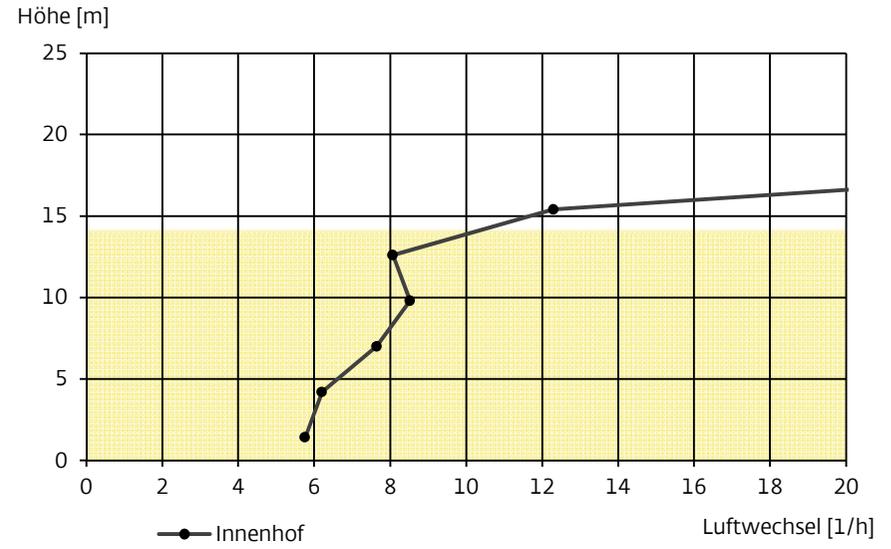


Abb. 211: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

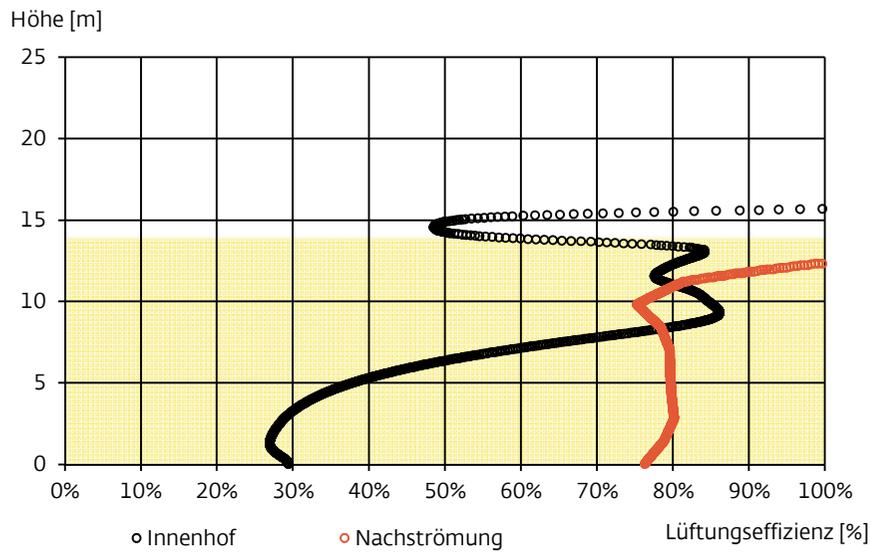
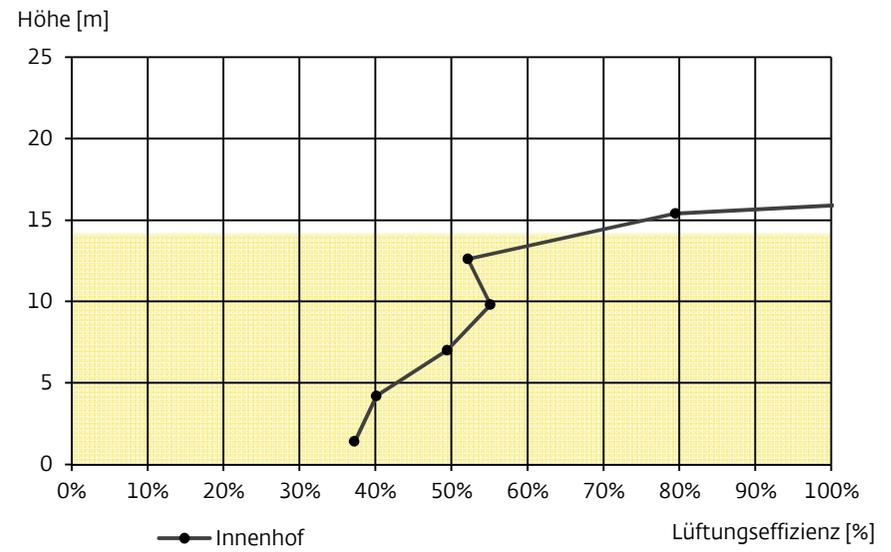


Abb. 213: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.19. S19: G = 7, AR = 2.0, Auftrieb, Wind 0.5 m/s

Abb. 214: Age of Air – vertikaler Verlauf

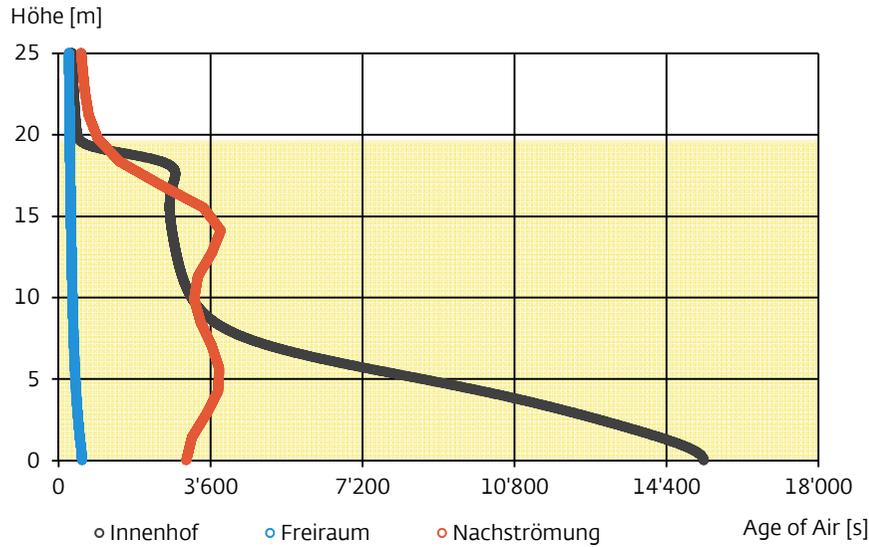


Abb. 216: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

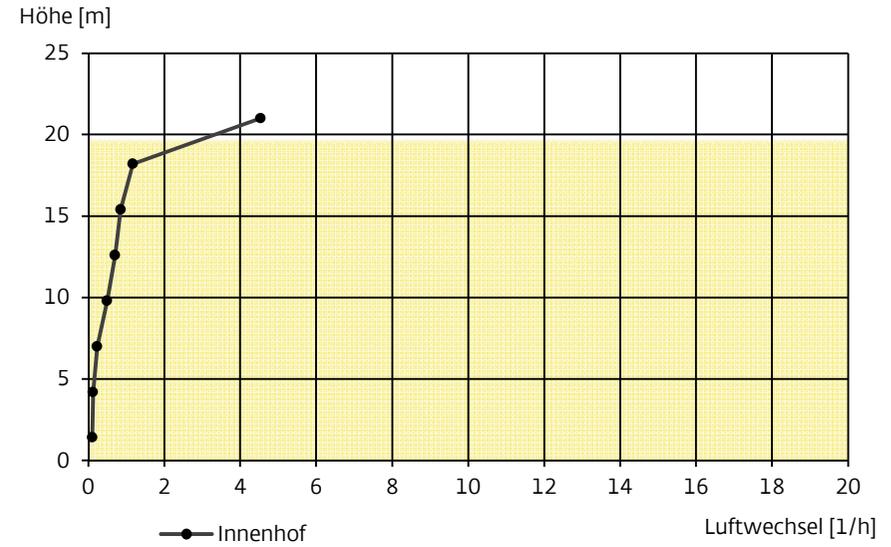


Abb. 215: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

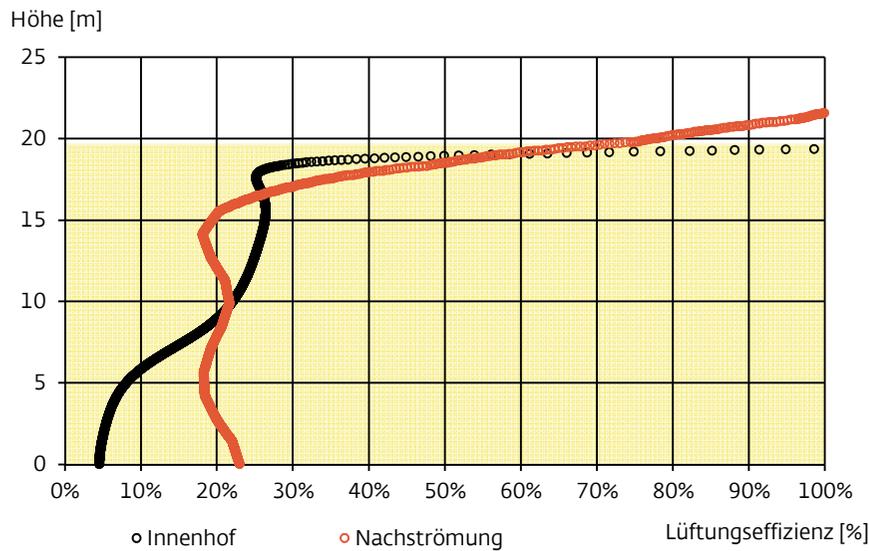
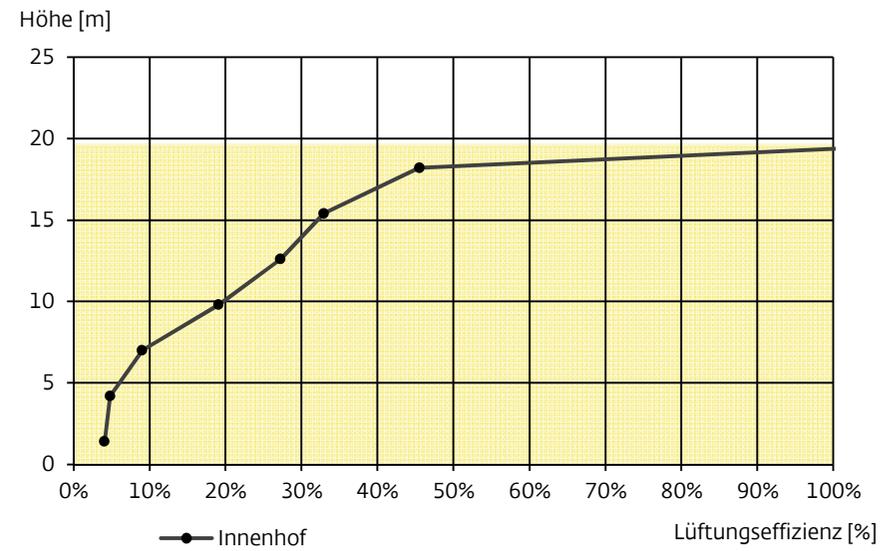


Abb. 217: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.20. S20: G = 7, AR = 2.0, Auftrieb, Wind 1.5 m/s

Abb. 218: Age of Air – vertikaler Verlauf

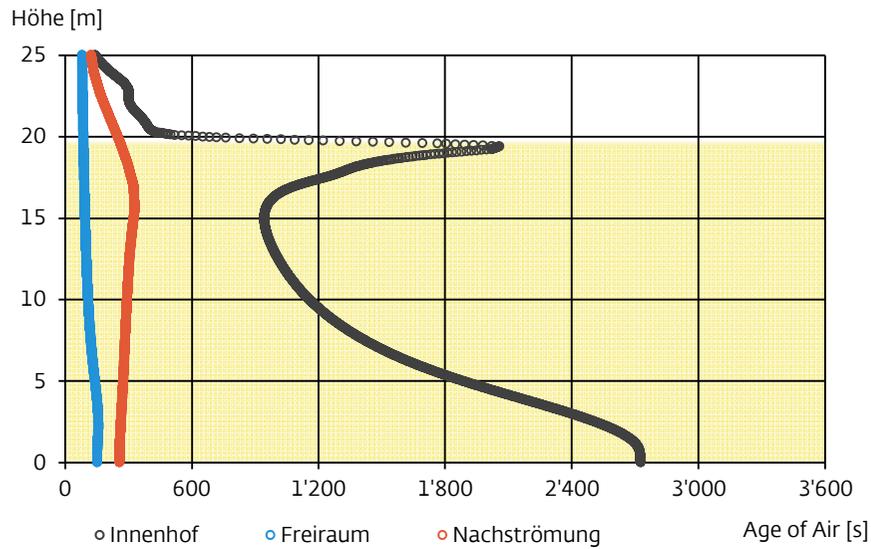


Abb. 220: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

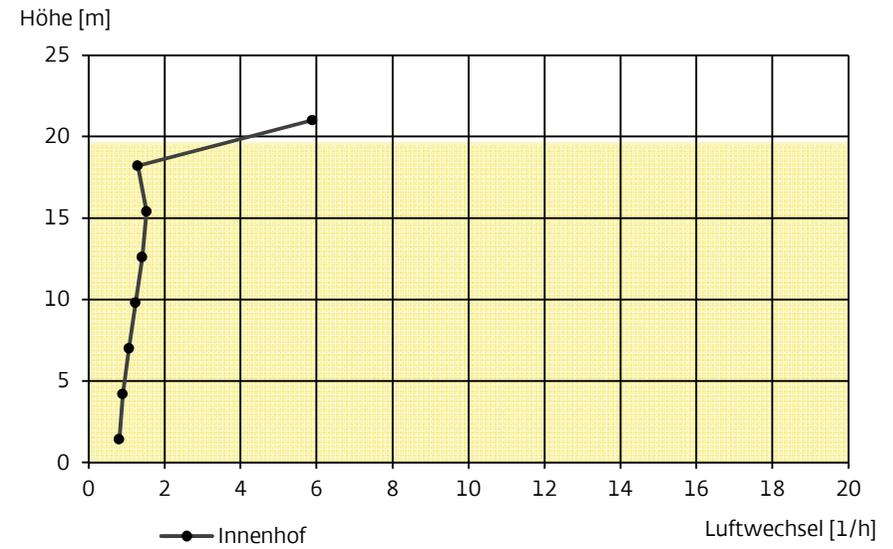


Abb. 219: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

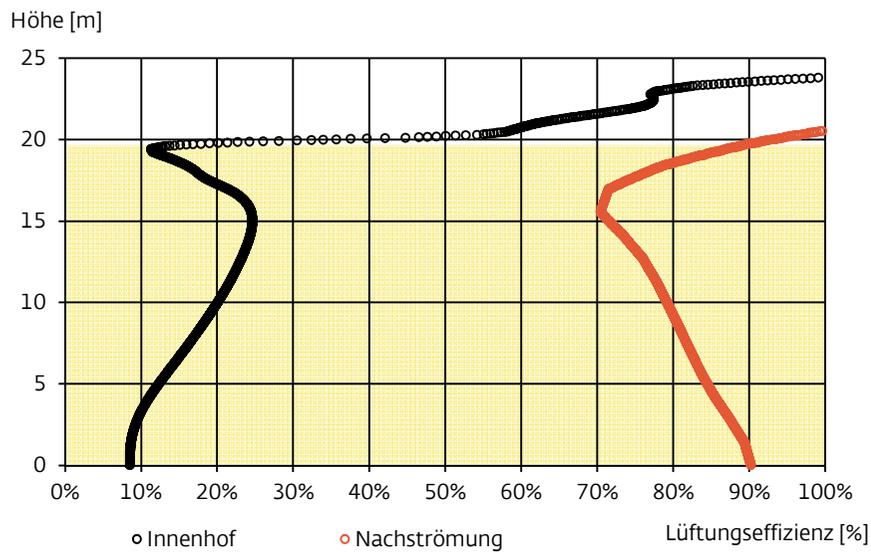
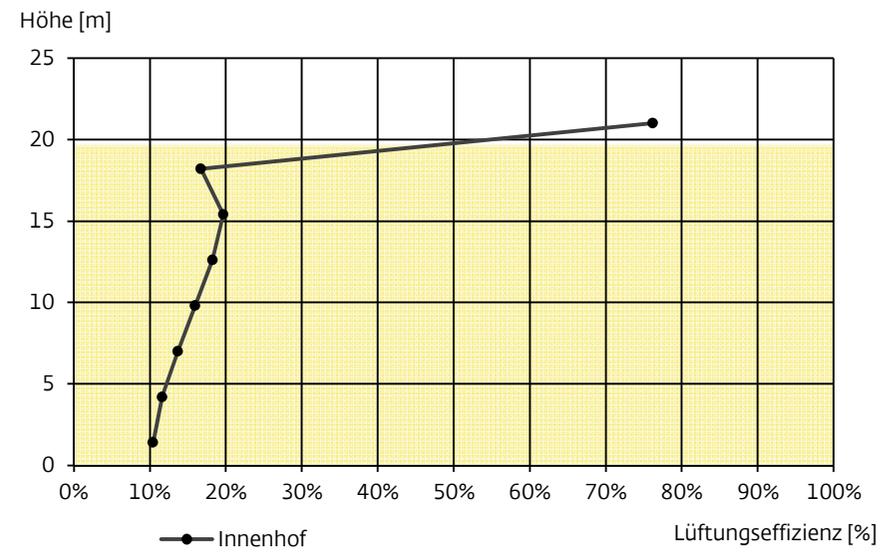


Abb. 221: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.21. S21: G = 7, AR = 2.0, Auftrieb, Wind 3.0 m/s

Abb. 222: Age of Air – vertikaler Verlauf

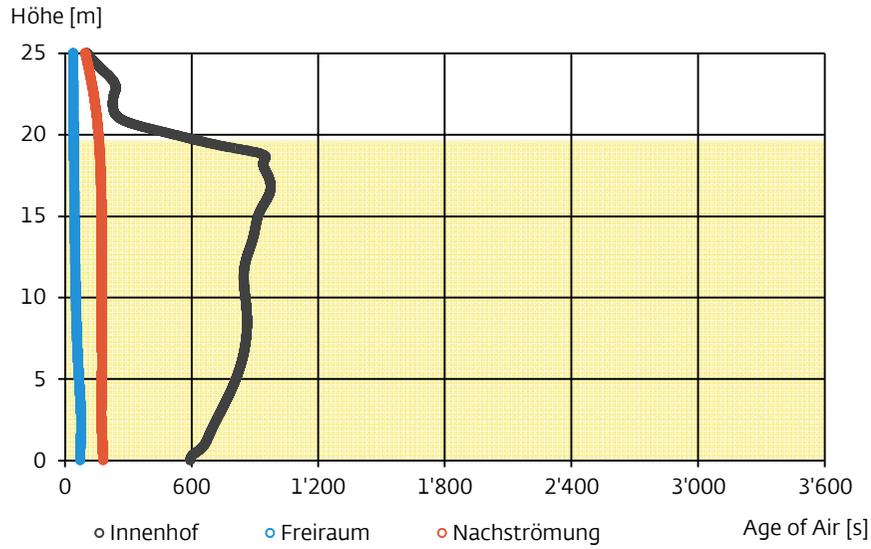


Abb. 224: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

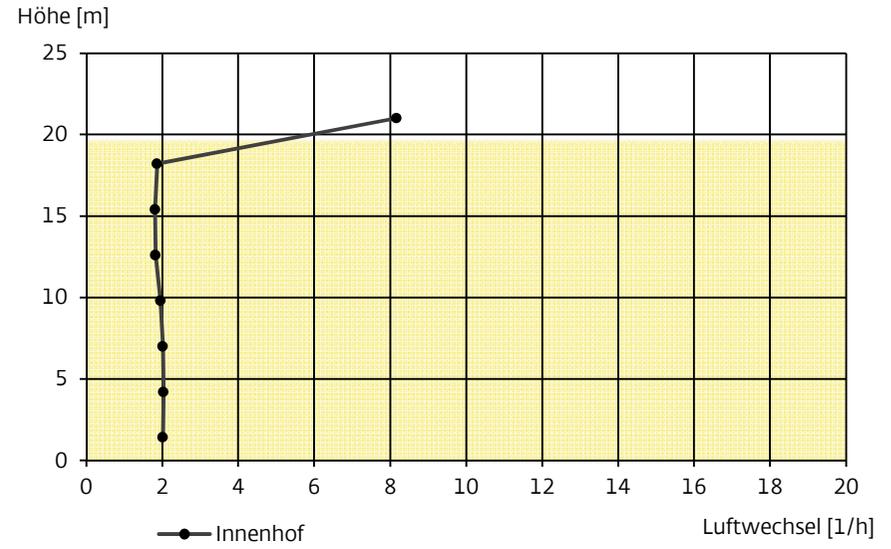


Abb. 223: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

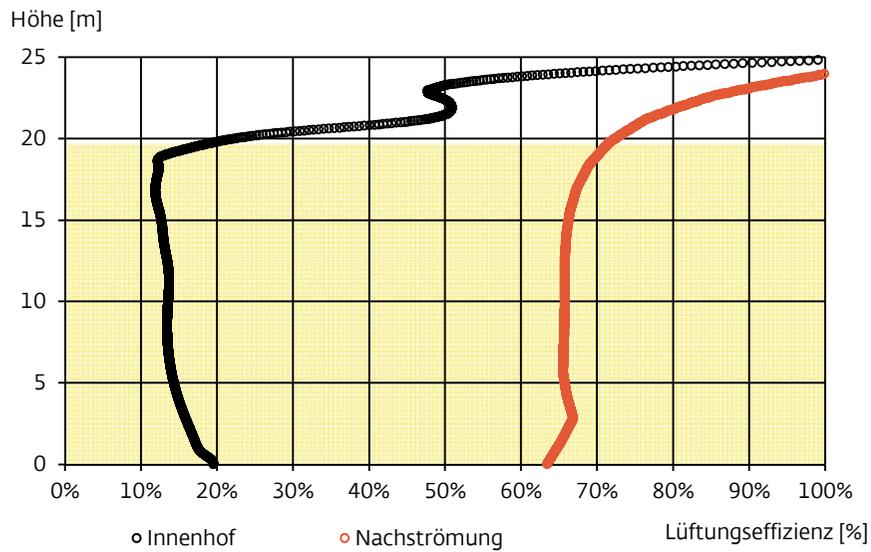
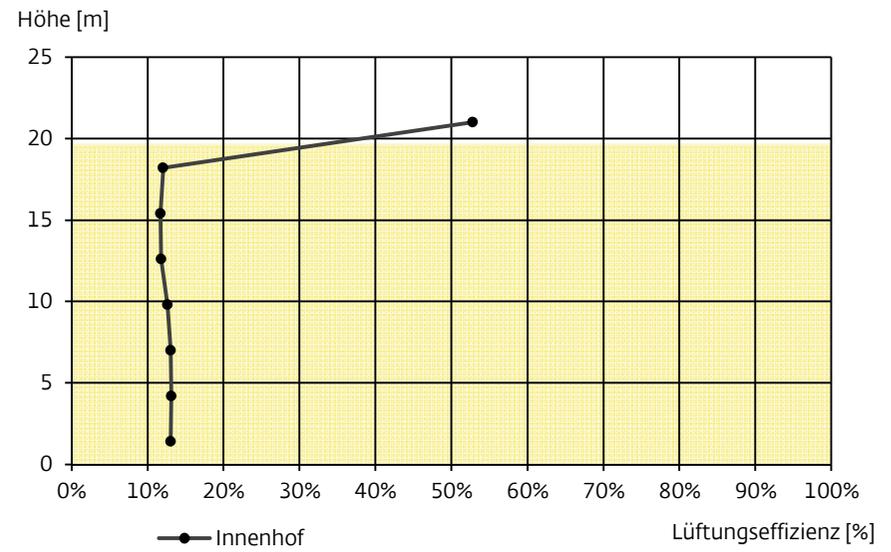


Abb. 225: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.22. S22: G = 2, AR = 0.6, Isotherm, Wind 0.5 m/s

Abb. 226: Age of Air – vertikaler Verlauf

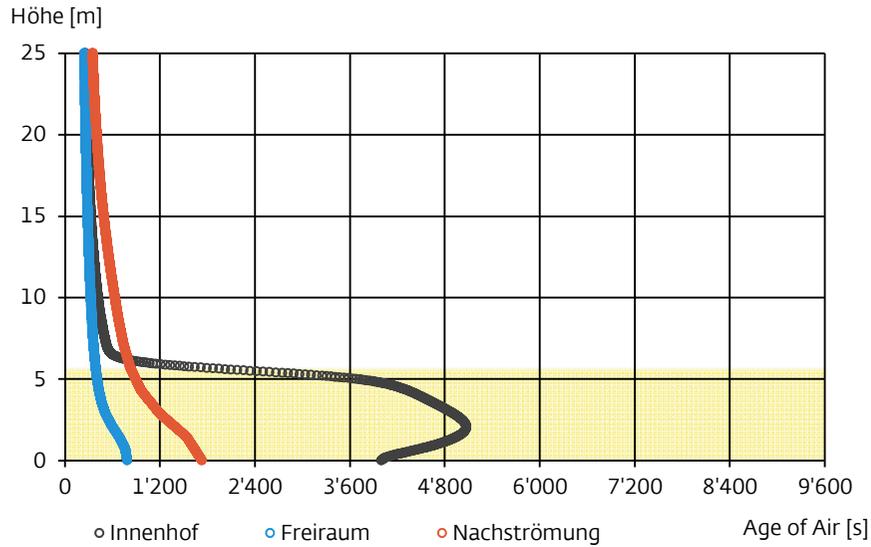


Abb. 228: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

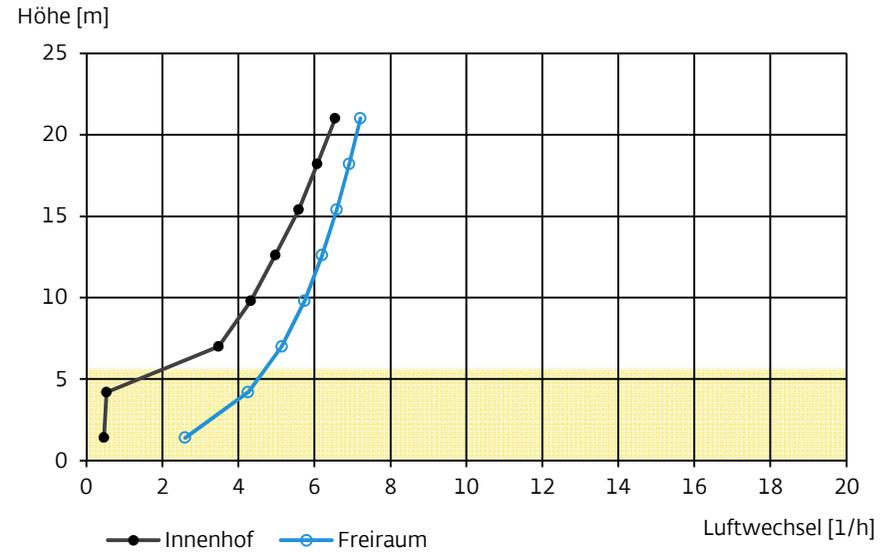


Abb. 227: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

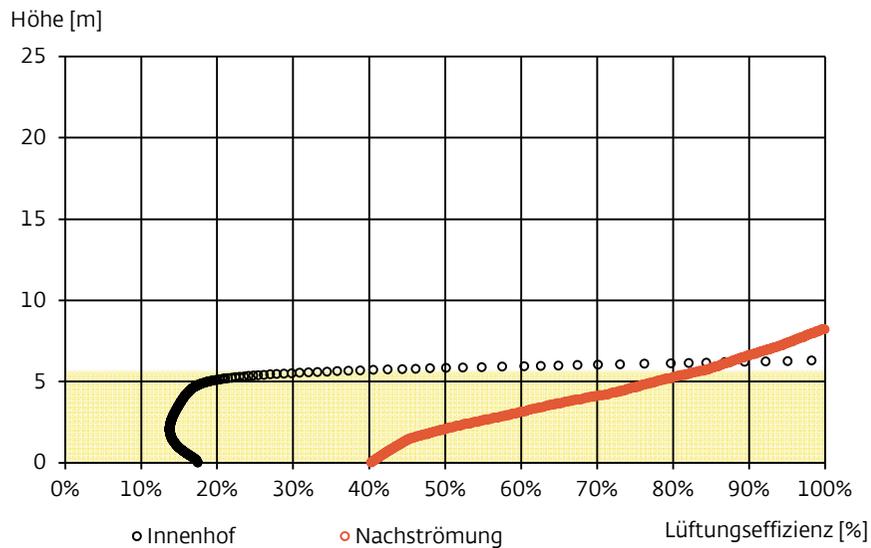
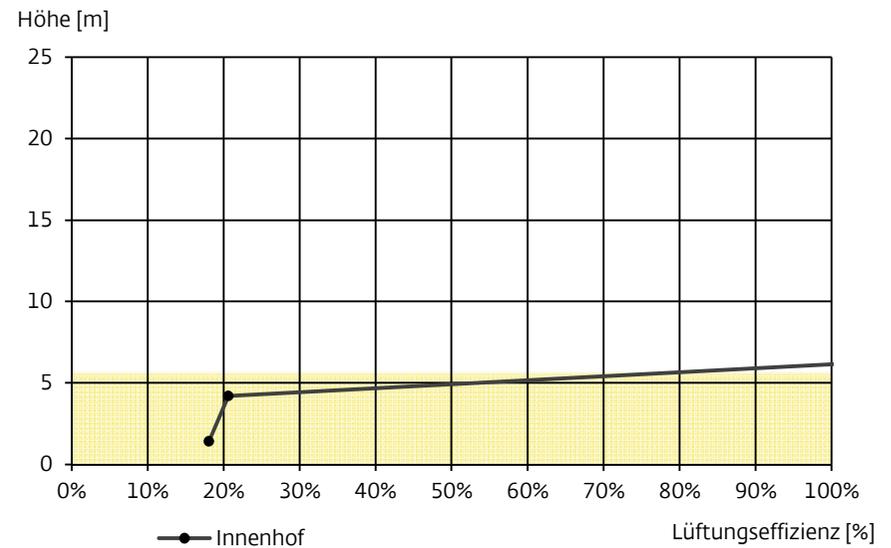


Abb. 229: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.23. S23: G = 5, AR = 1.4, Isotherm, Wind 0.5 m/s

Abb. 230: Age of Air – vertikaler Verlauf

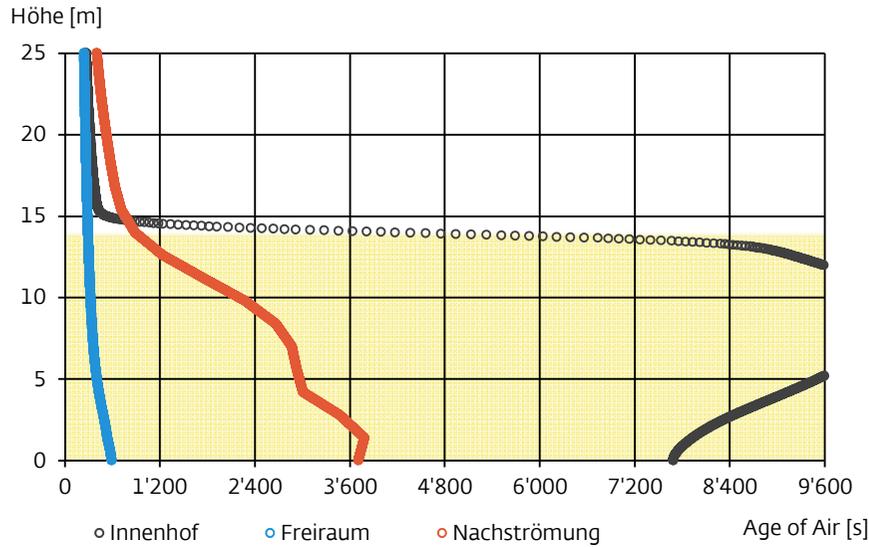


Abb. 232: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

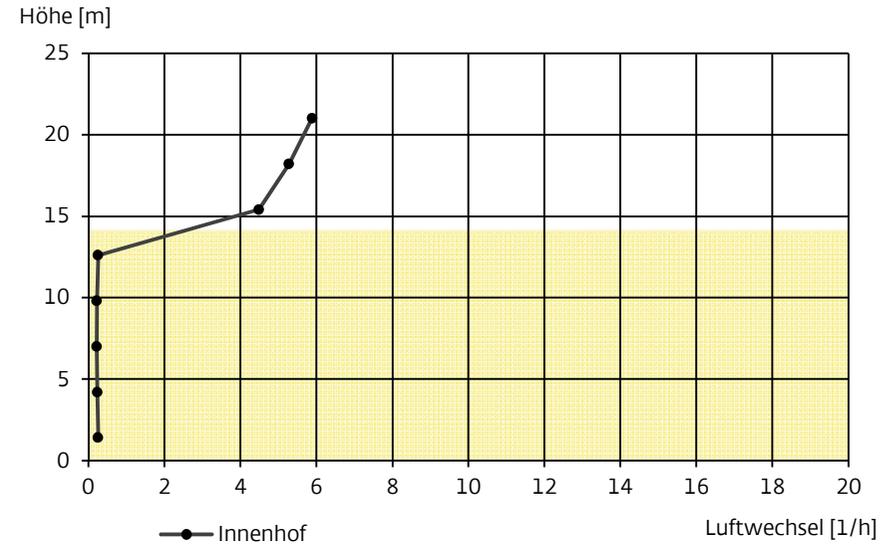


Abb. 231: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

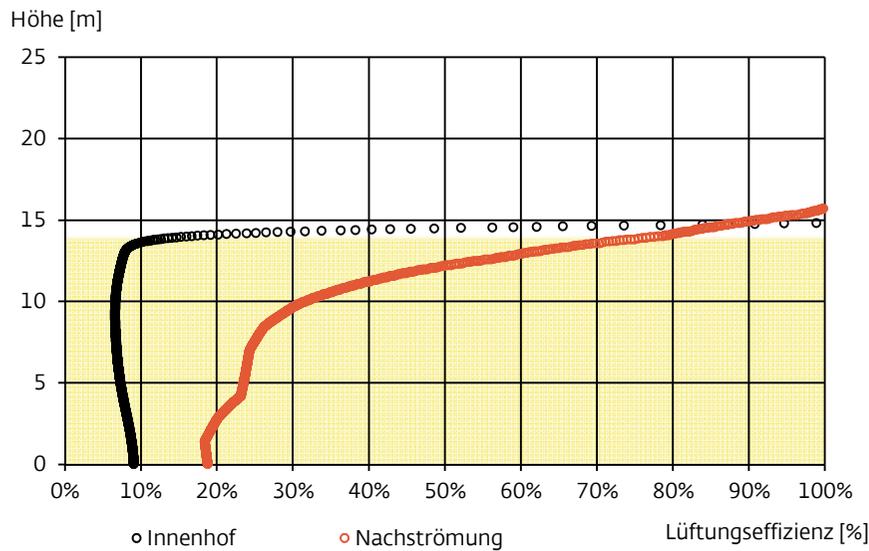
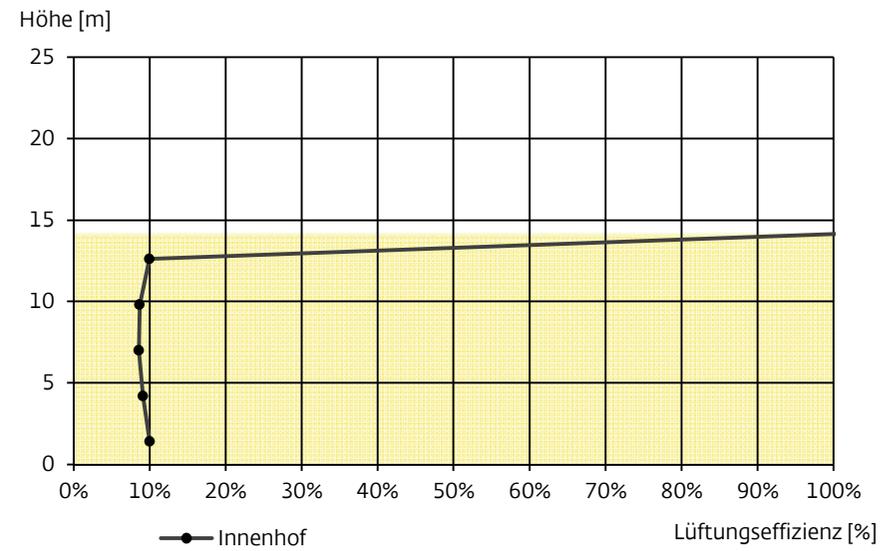


Abb. 233: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.24. S24: G = 5, AR = 1.4, Isotherm, Wind 3.0 m/s

Abb. 234: Age of Air – vertikaler Verlauf

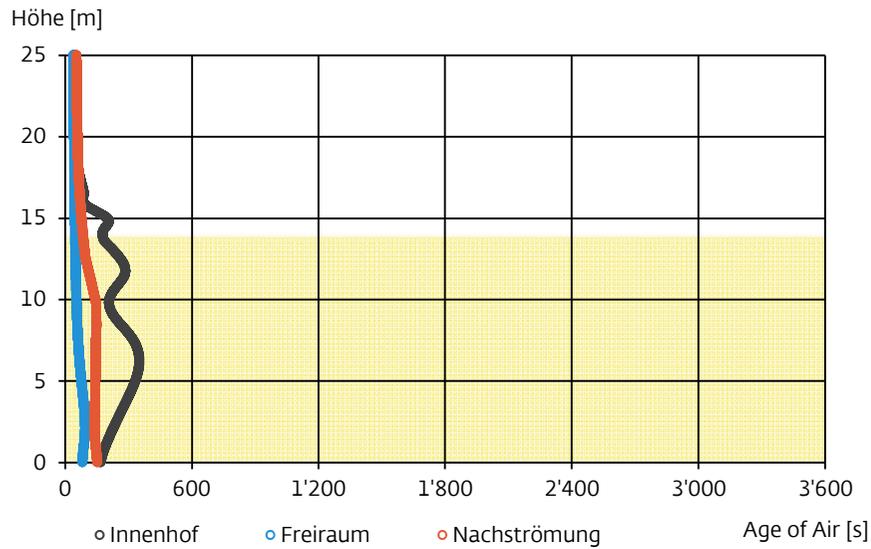


Abb. 236: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

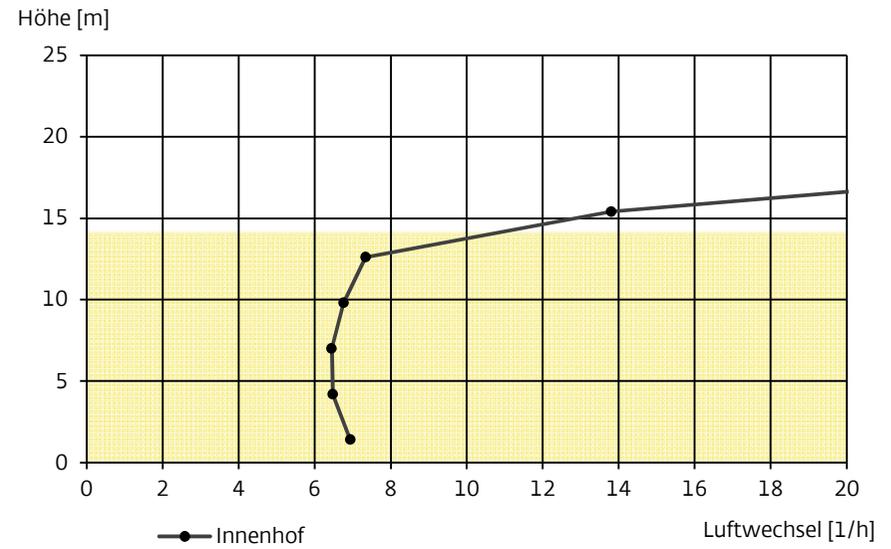


Abb. 235: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

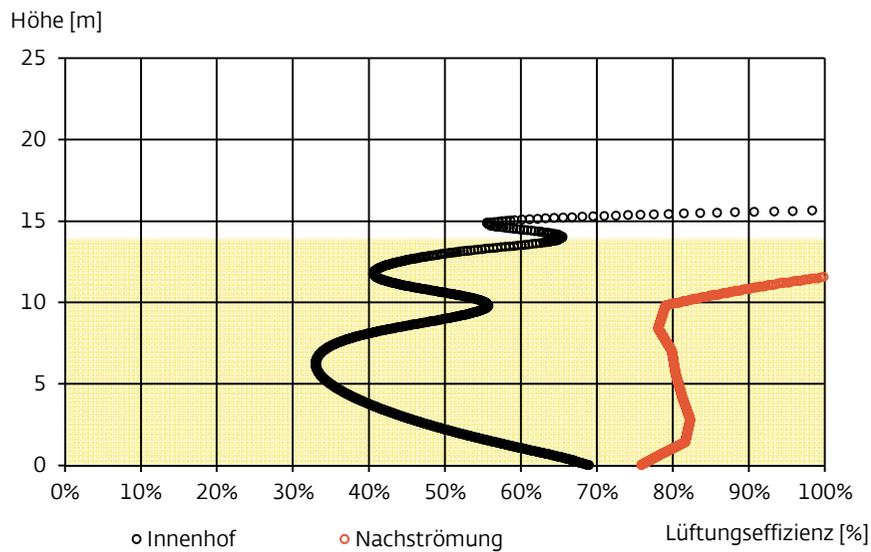
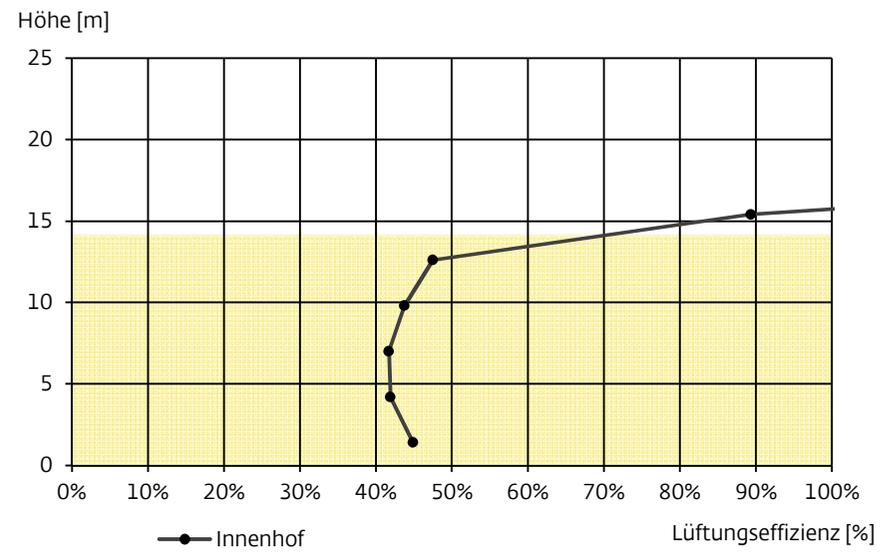


Abb. 237: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.25. S25: G = 5, AR = 1.4, Isotherm, Wind 0.5 m/s, WR 0°, DF 20 %

Abb. 238: Age of Air – vertikaler Verlauf

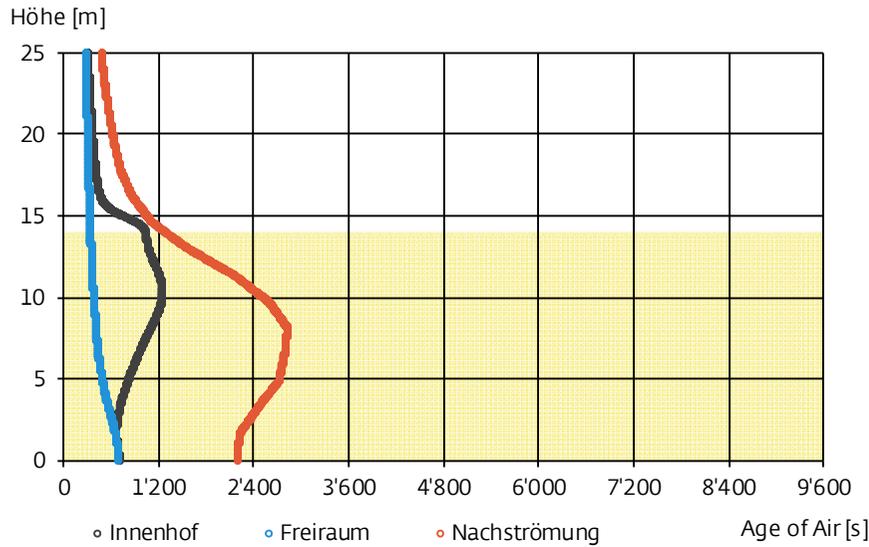


Abb. 240: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

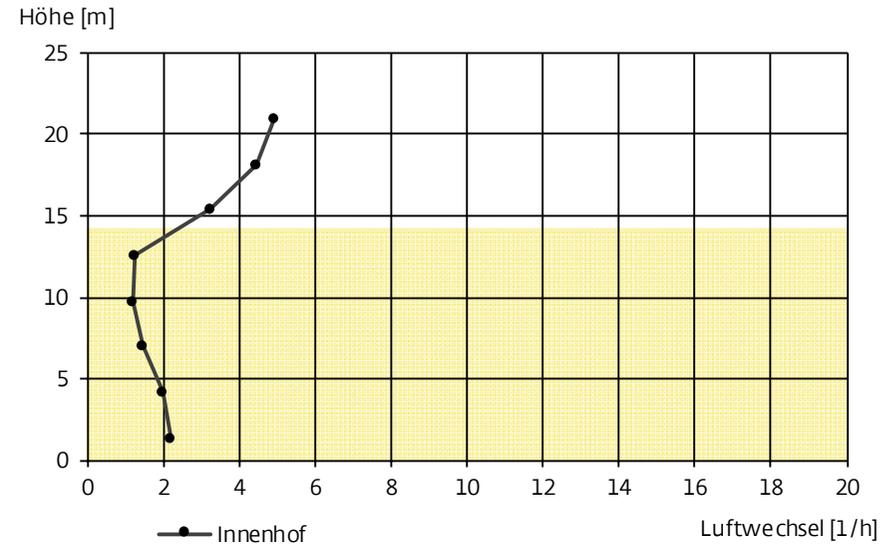


Abb. 239: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

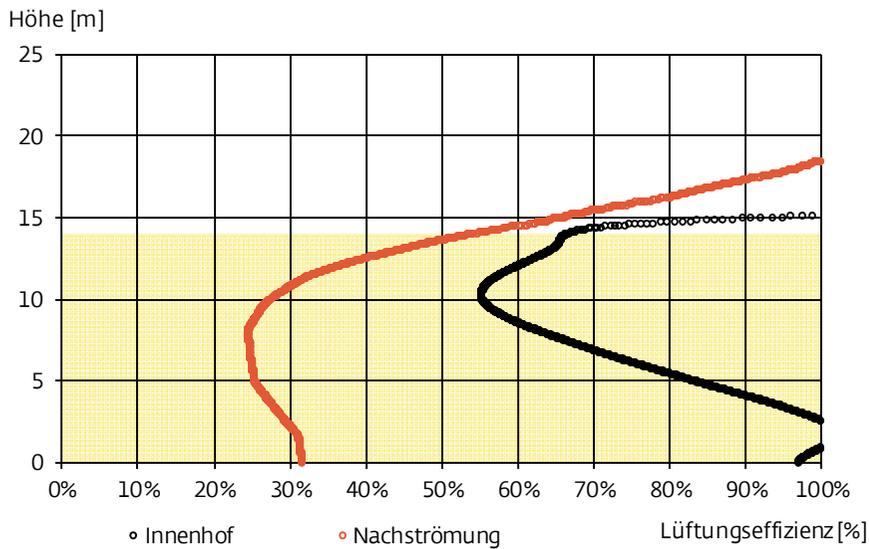
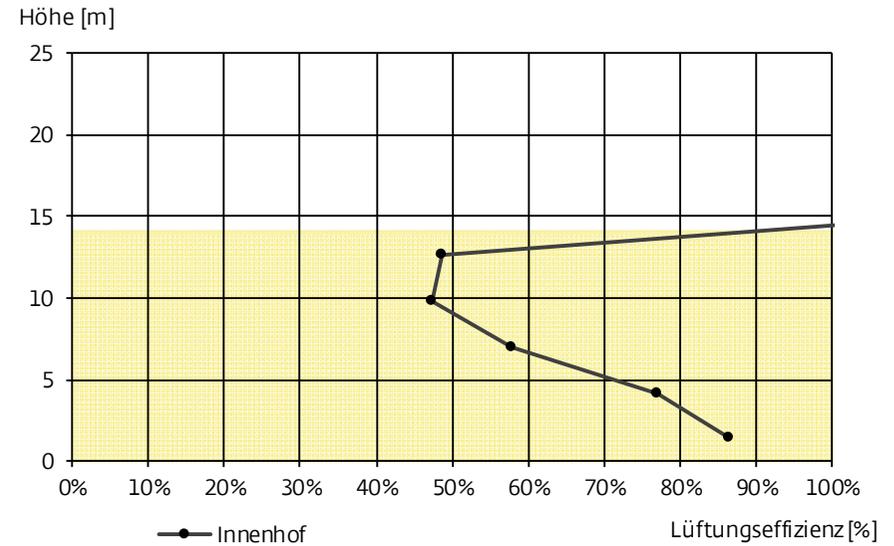


Abb. 241: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.26. S26: G = 5, AR = 1.4, Isotherm, Wind 0.5 m/s, WR 0°, DF 40 %

Abb. 242: Age of Air – vertikaler Verlauf

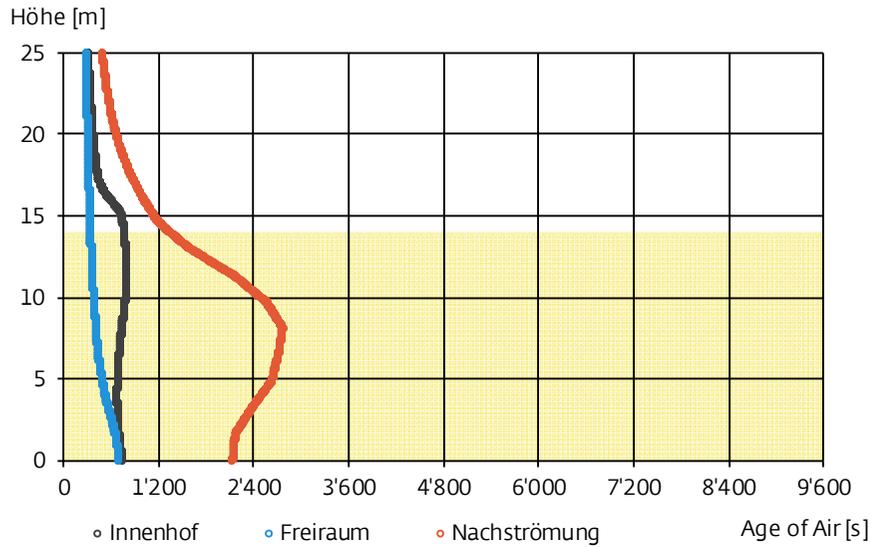


Abb. 244: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

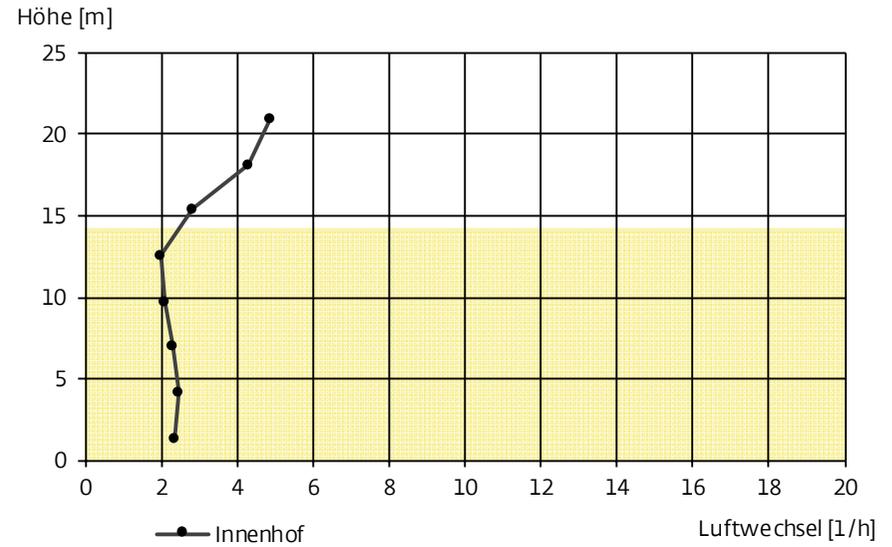


Abb. 243: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

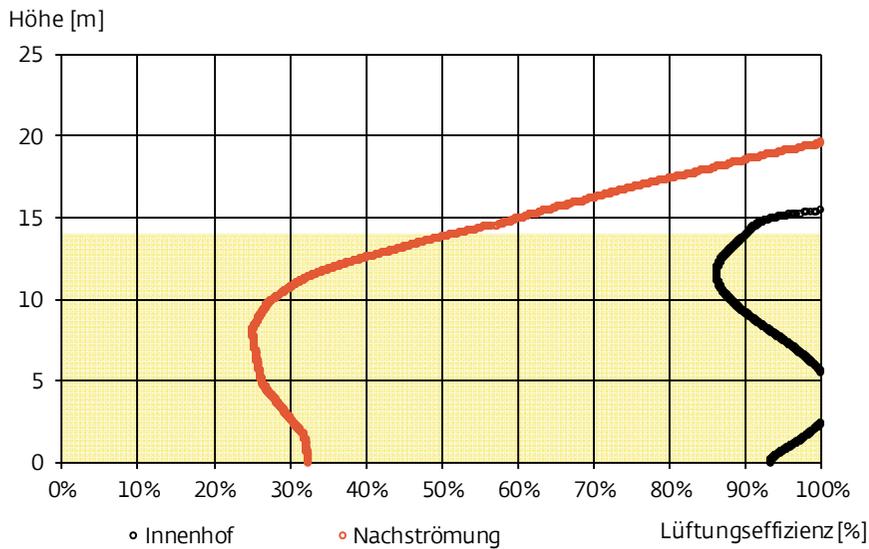
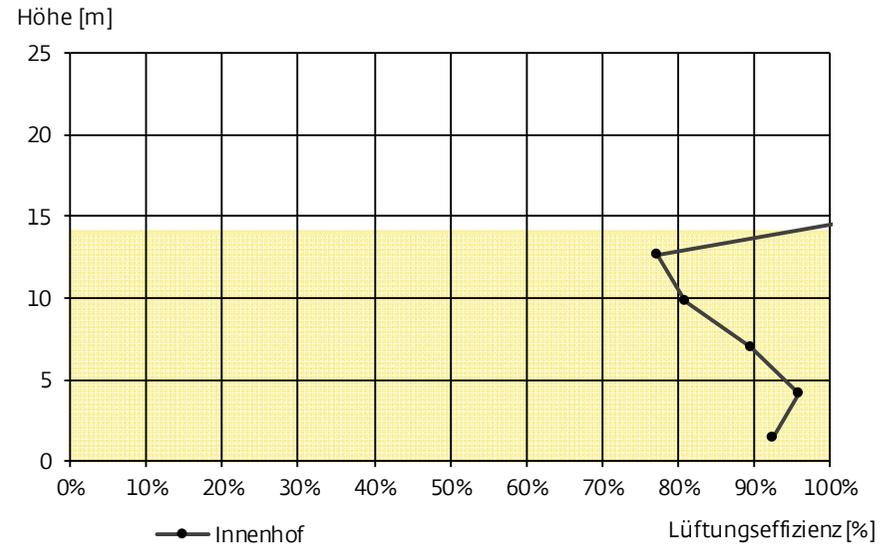


Abb. 245: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.27. S27: G = 5, AR = 1.4, Isotherm, Wind 0.5 m/s, WR 0°, DF 60 %

Abb. 246: Age of Air – vertikaler Verlauf

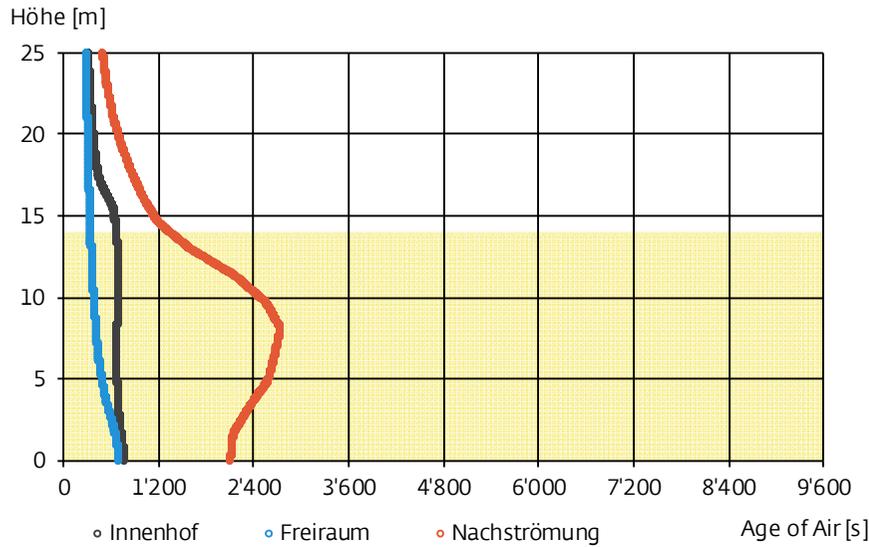


Abb. 248: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

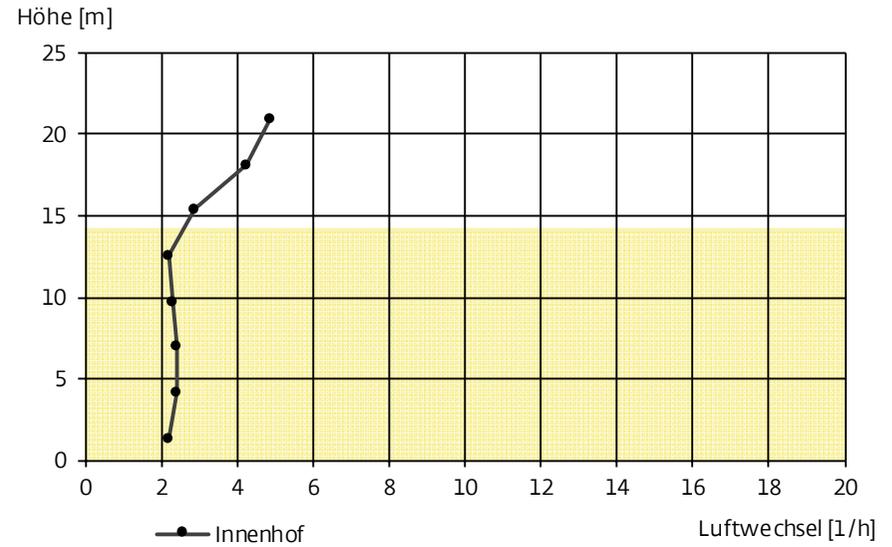


Abb. 247: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

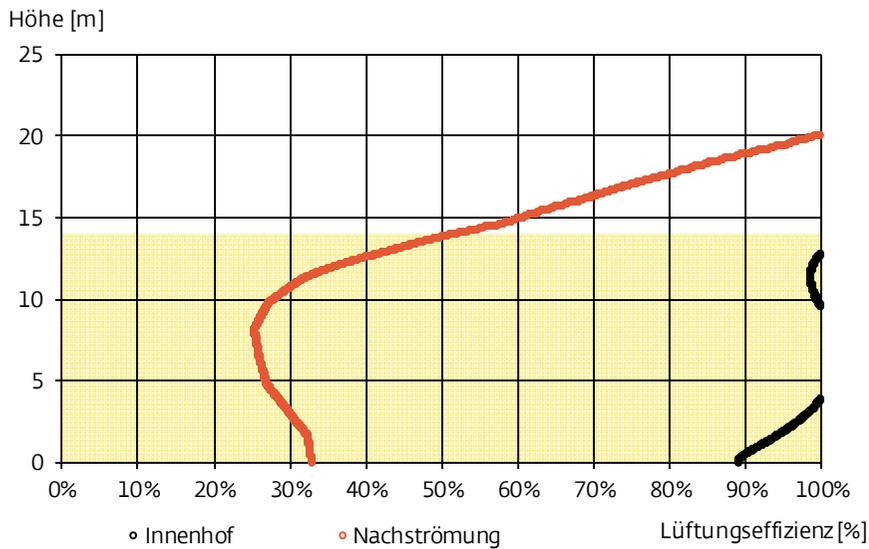
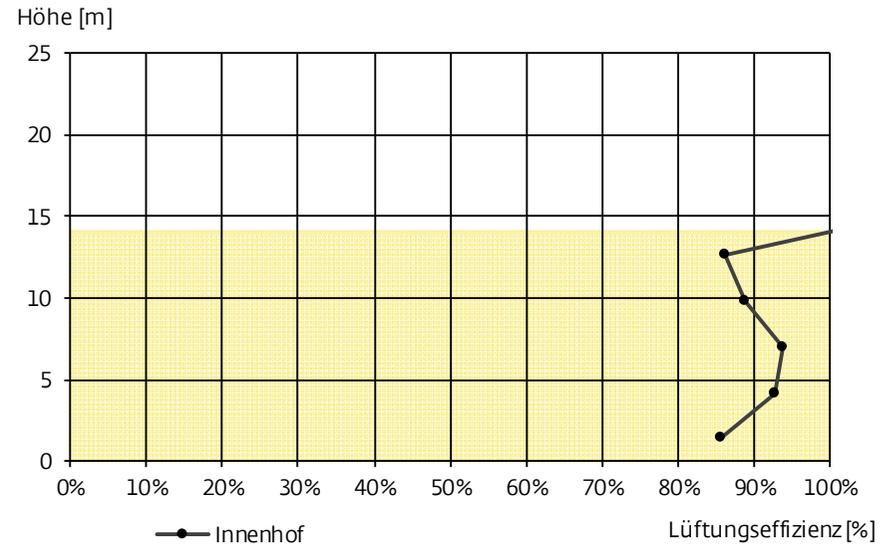


Abb. 249: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.28. S28: G = 5, AR = 1.4, Isotherm, Wind 0.5 m/s, WR 180°, DF 20 %

Abb. 250: Age of Air – vertikaler Verlauf

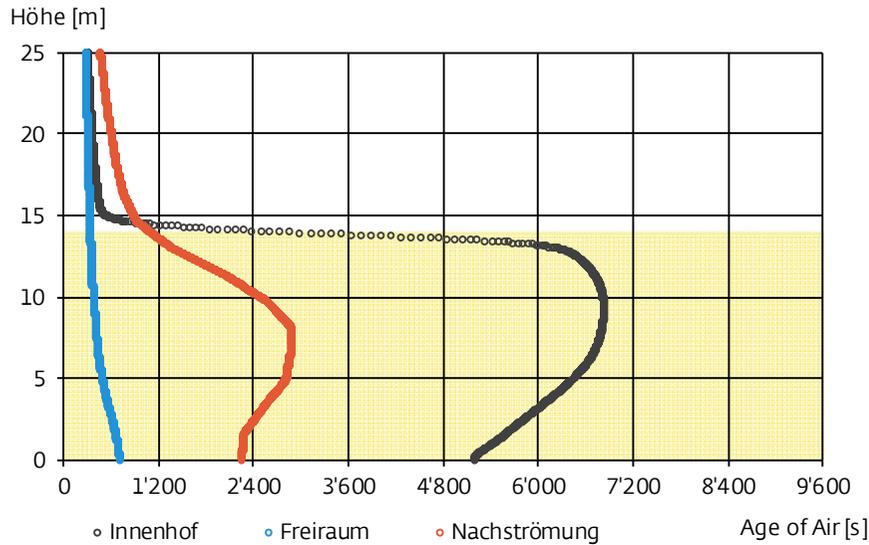


Abb. 252: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

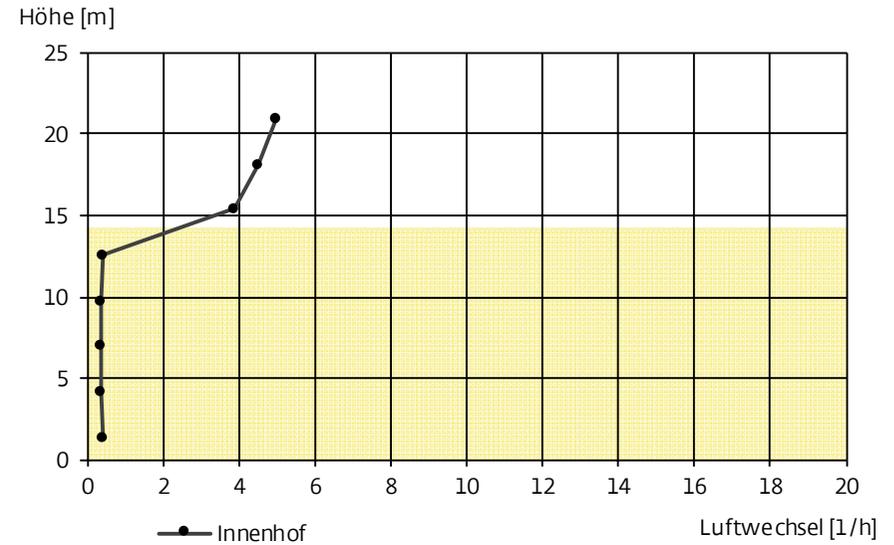


Abb. 251: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

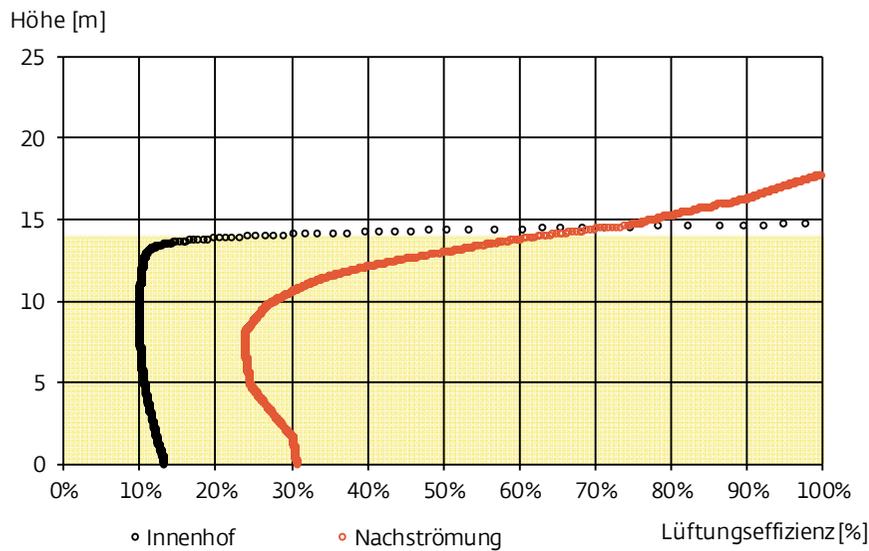
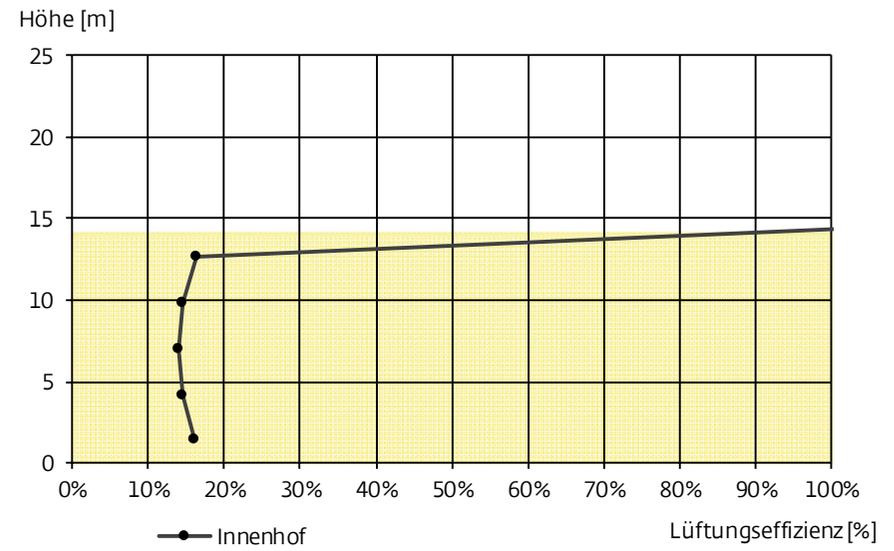


Abb. 253: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.29. S29: G = 5, AR = 1.4, Isotherm, Wind 0.5 m/s, WR 180°, DF 40 %

Abb. 254: Age of Air – vertikaler Verlauf

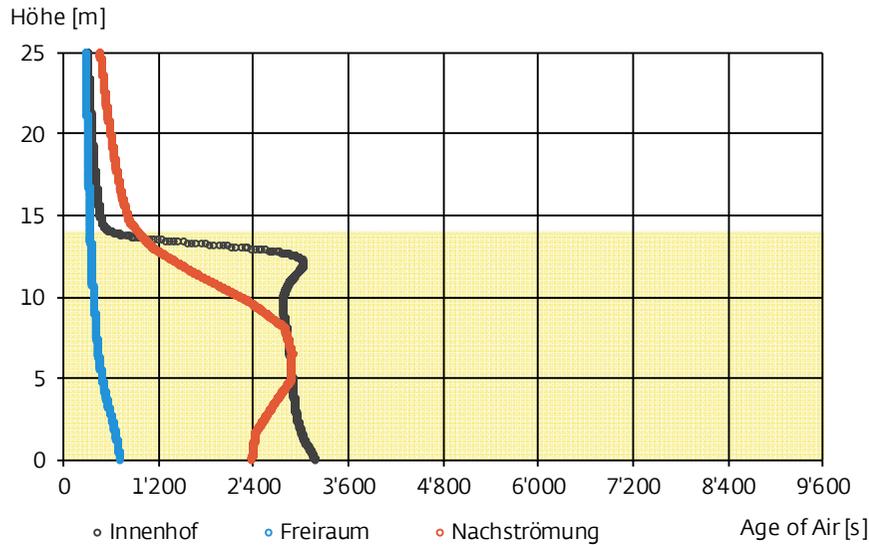


Abb. 256: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

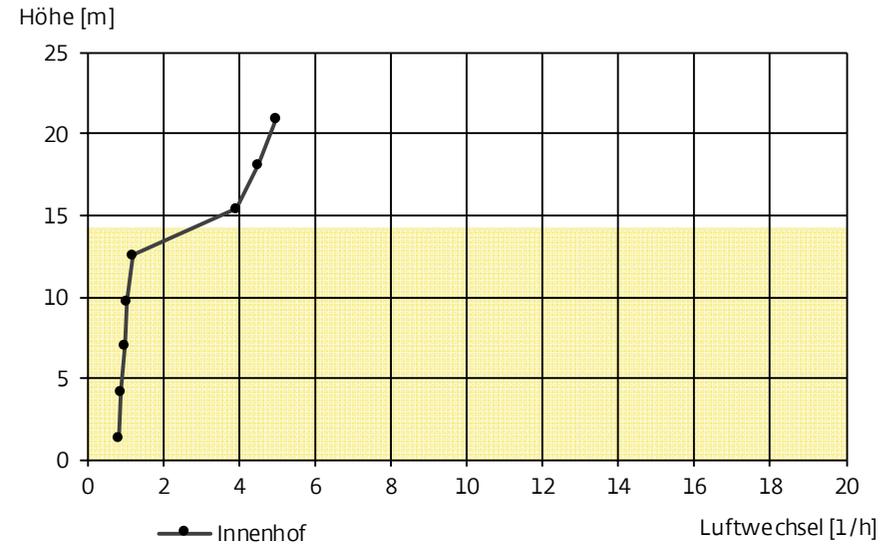


Abb. 255: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

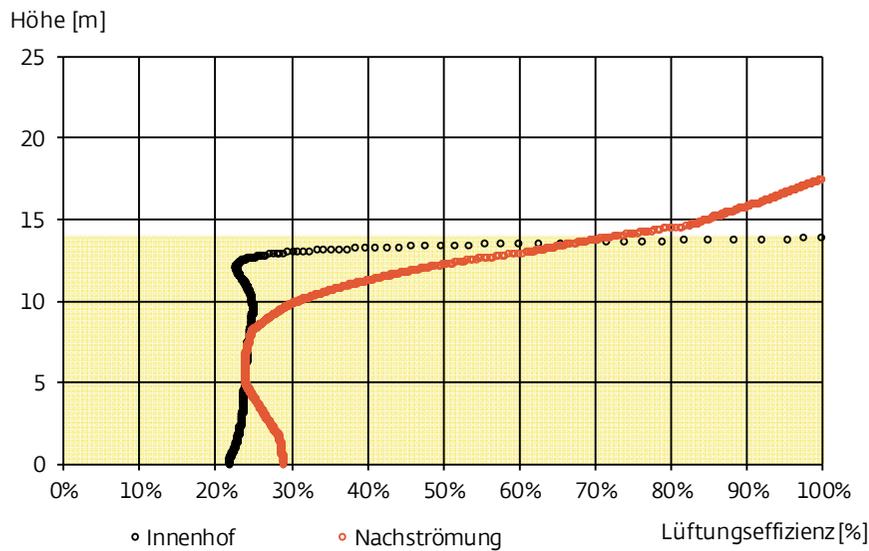
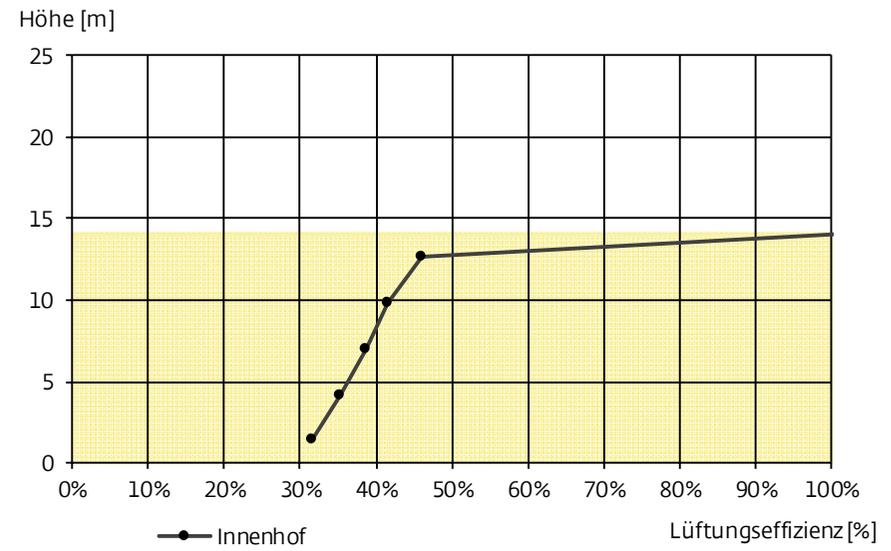


Abb. 257: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.1.30. S30: G = 5, AR = 1.4, Isotherm, Wind 0.5 m/s, WR 180°, DF 60 %

Abb. 258: Age of Air – vertikaler Verlauf

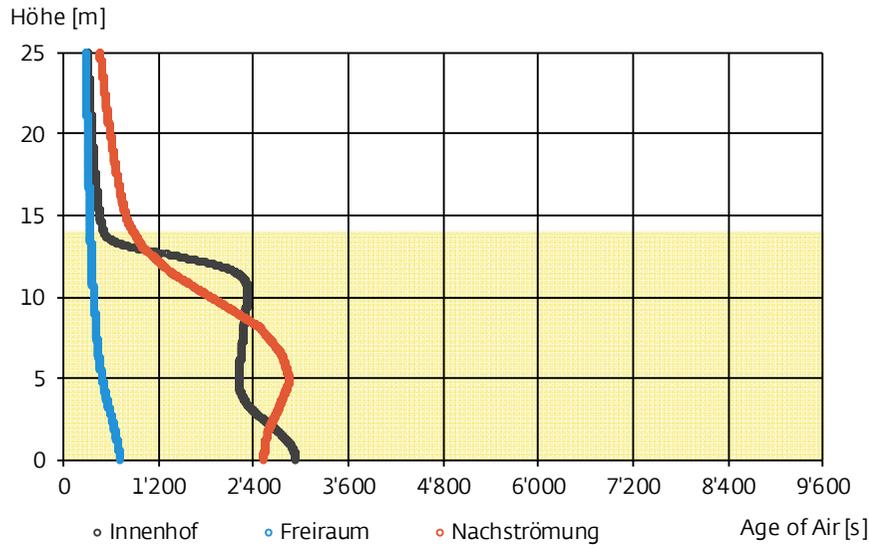


Abb. 260: Luftwechsel – Innenhof – pro Geschoss

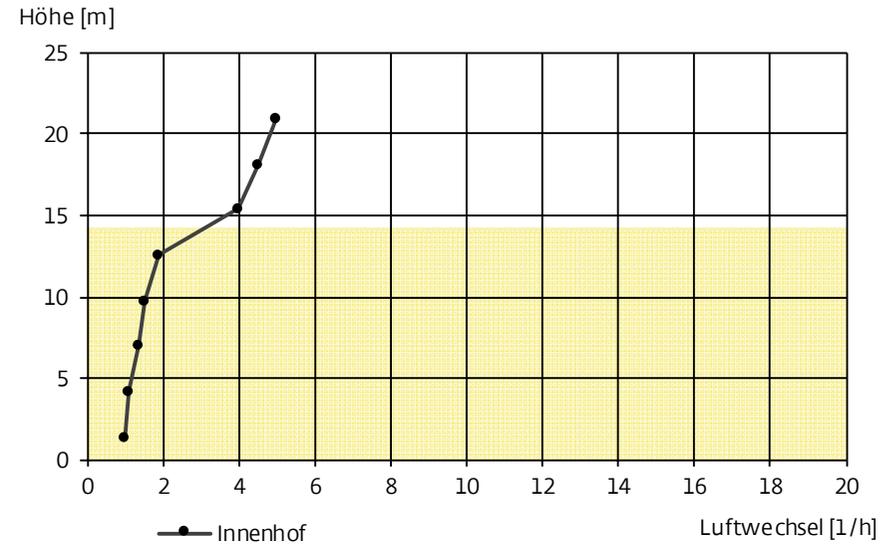


Abb. 259: Lüftungseffizienz – vertikaler Verlauf

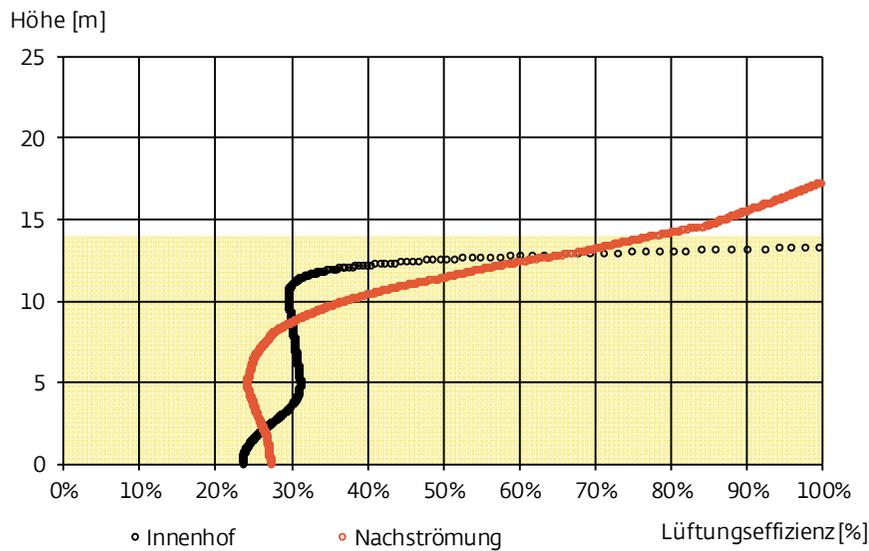
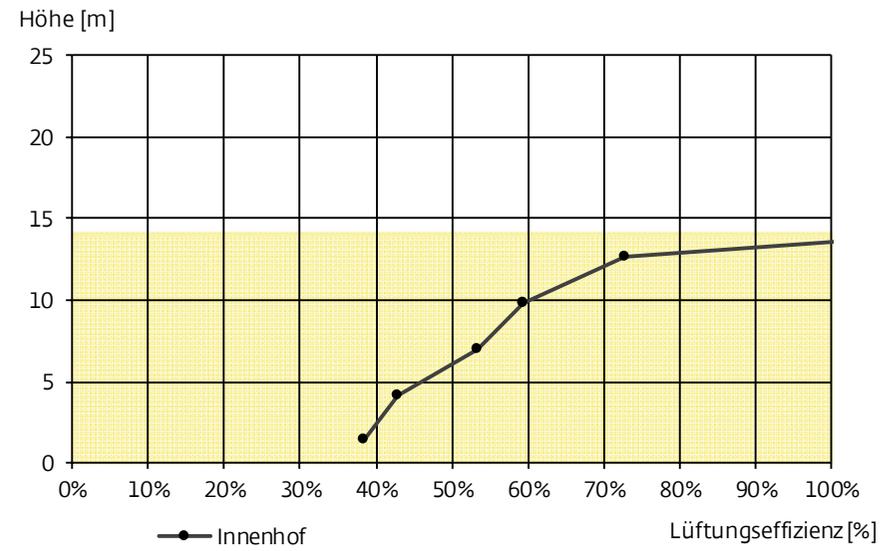


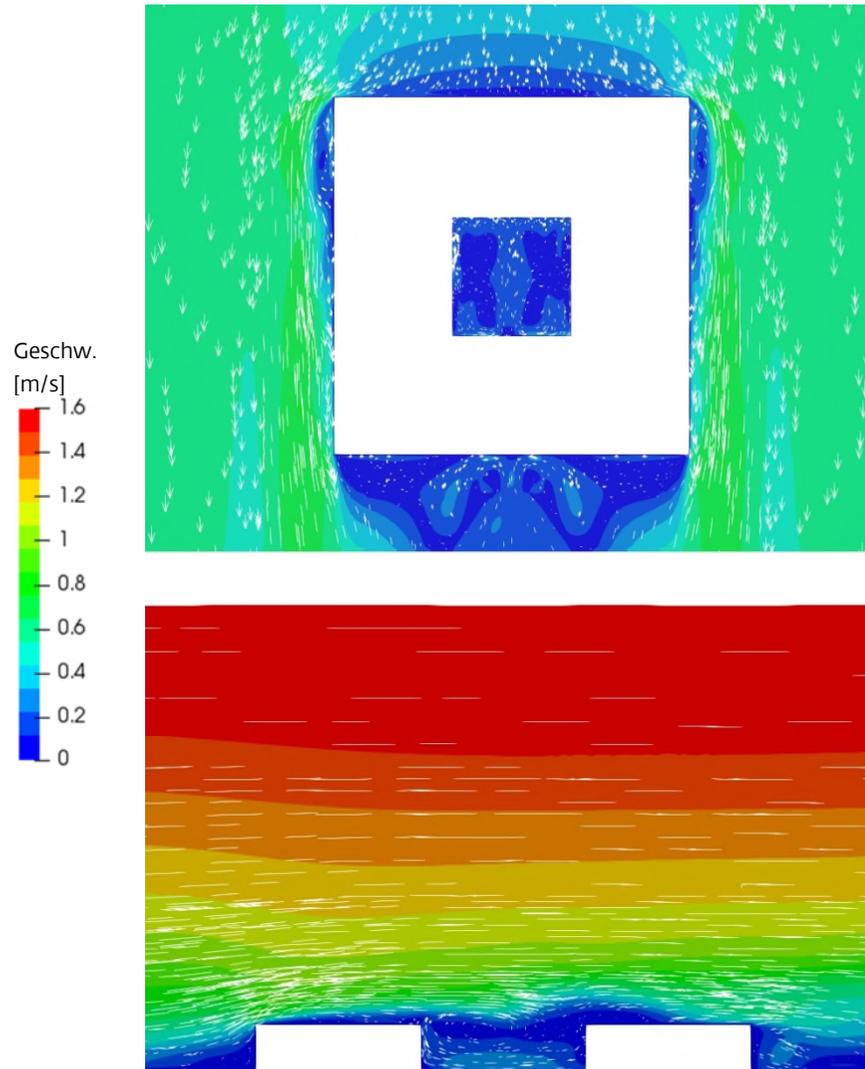
Abb. 261: Lüftungseffizienz – Innenhof – pro Geschoss



10.2. Modul 2: Visualisierung der Luftströmung und Age of Air

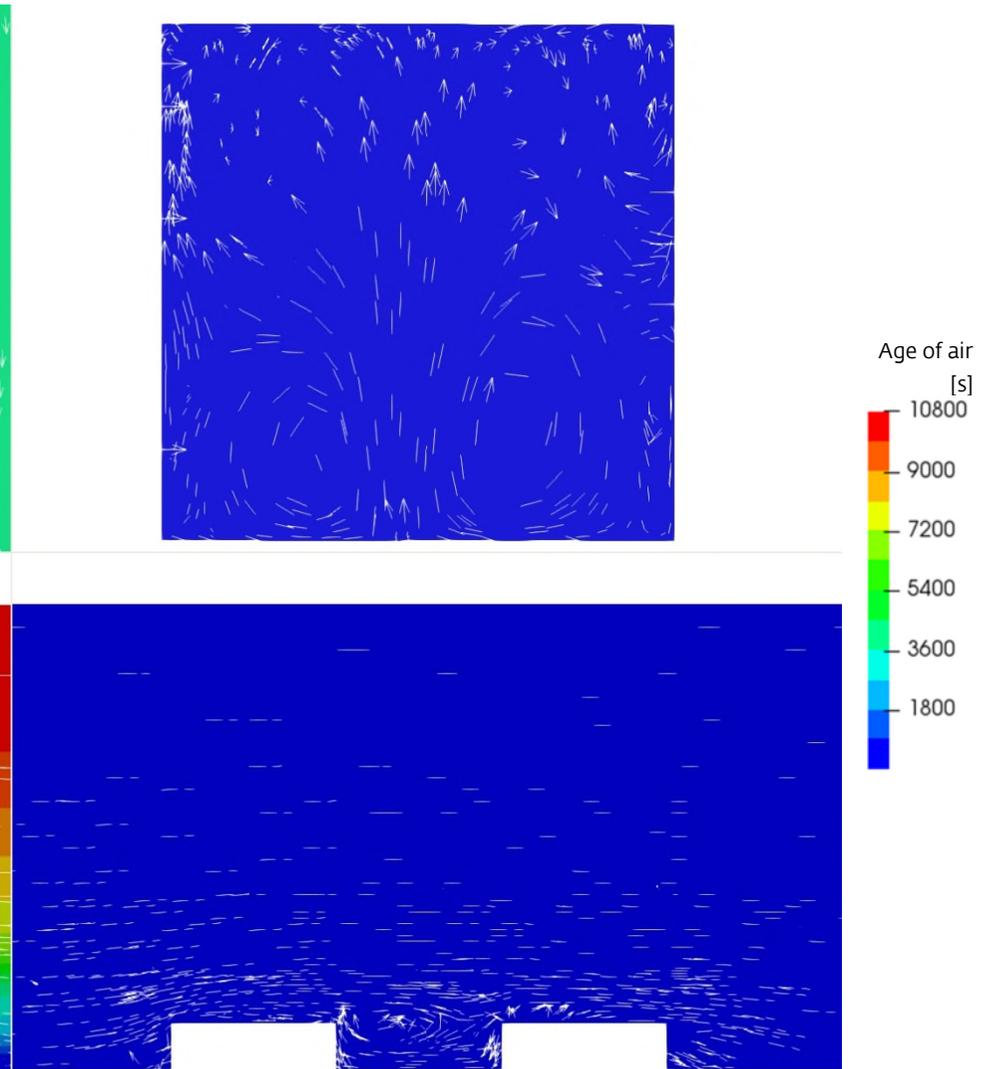
10.2.1. S 01: G = 1, AR = 0.3, isotherm, Wind 1.5 m/s

Abb. 262: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

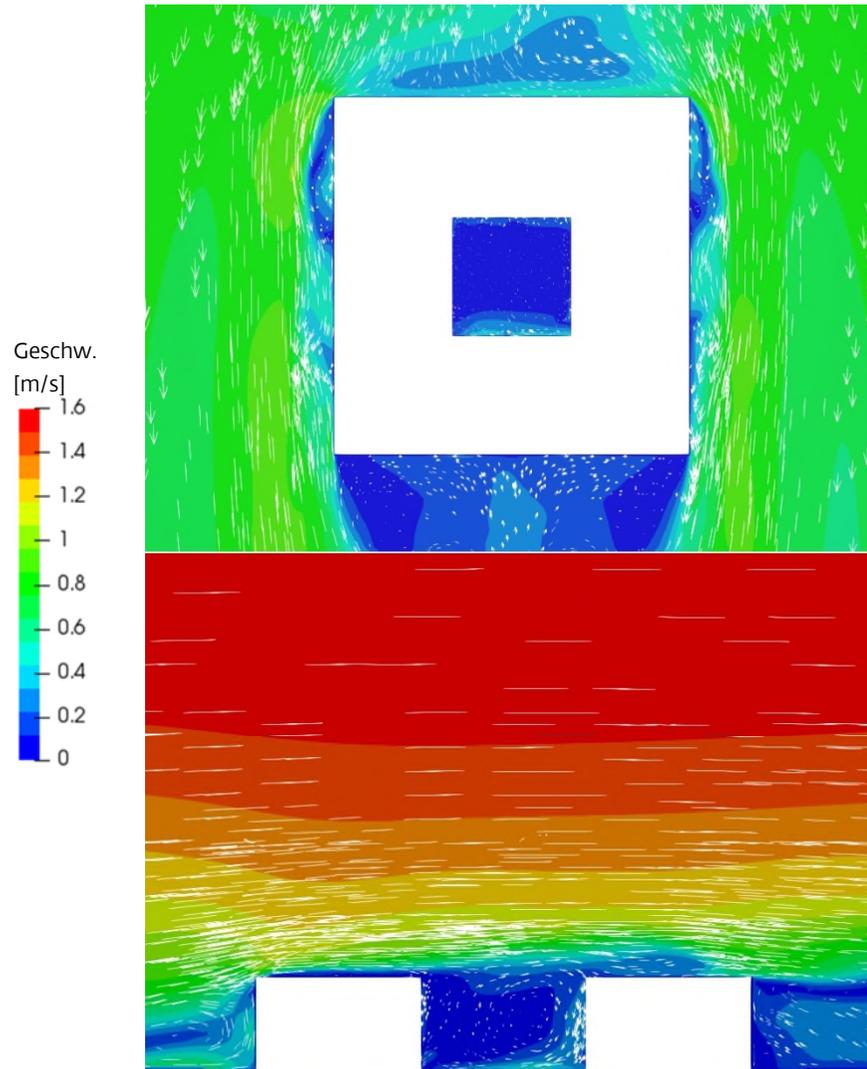
Abb. 263: Visualisierung des Age of Air



Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

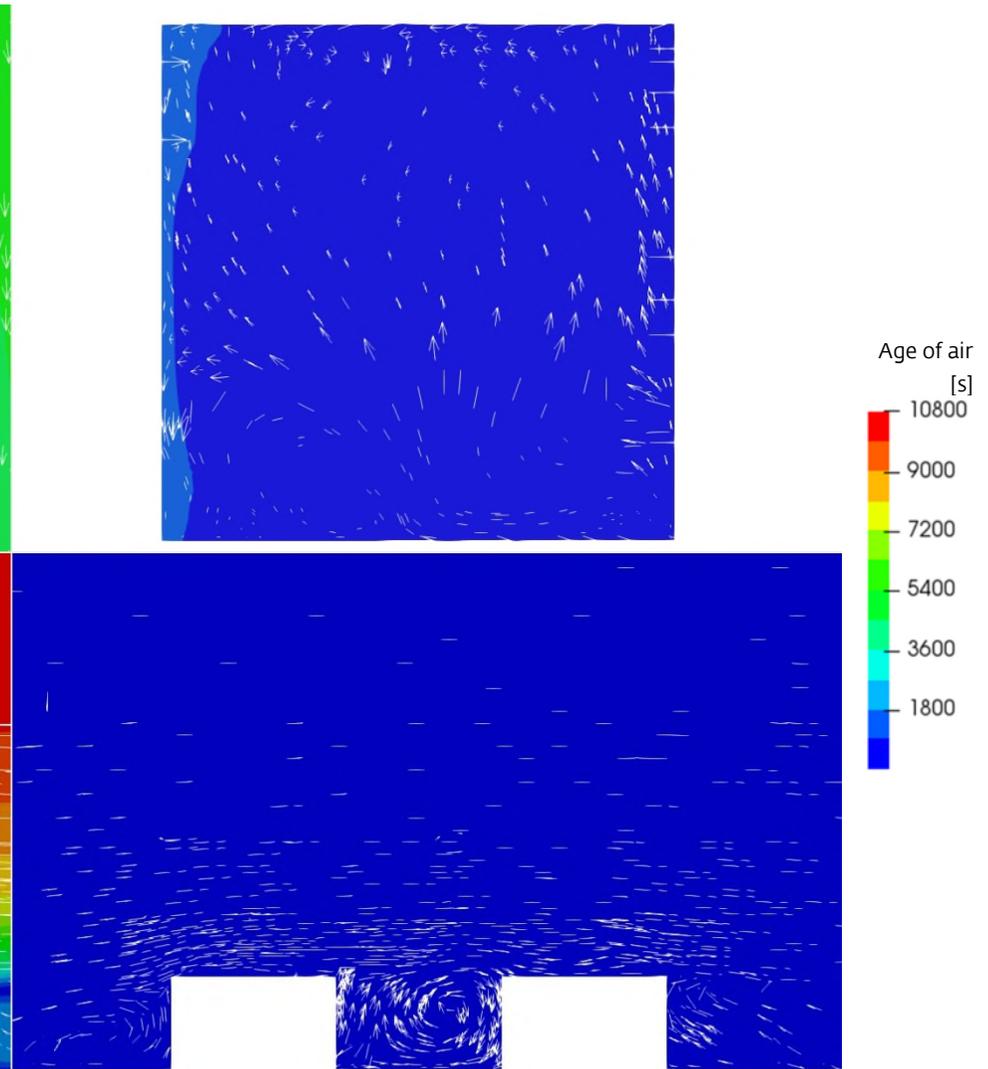
10.2.2. S02: $G = 2$, $AR = 0.6$, isotherm, Wind 1.5 m/s

Abb. 264: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

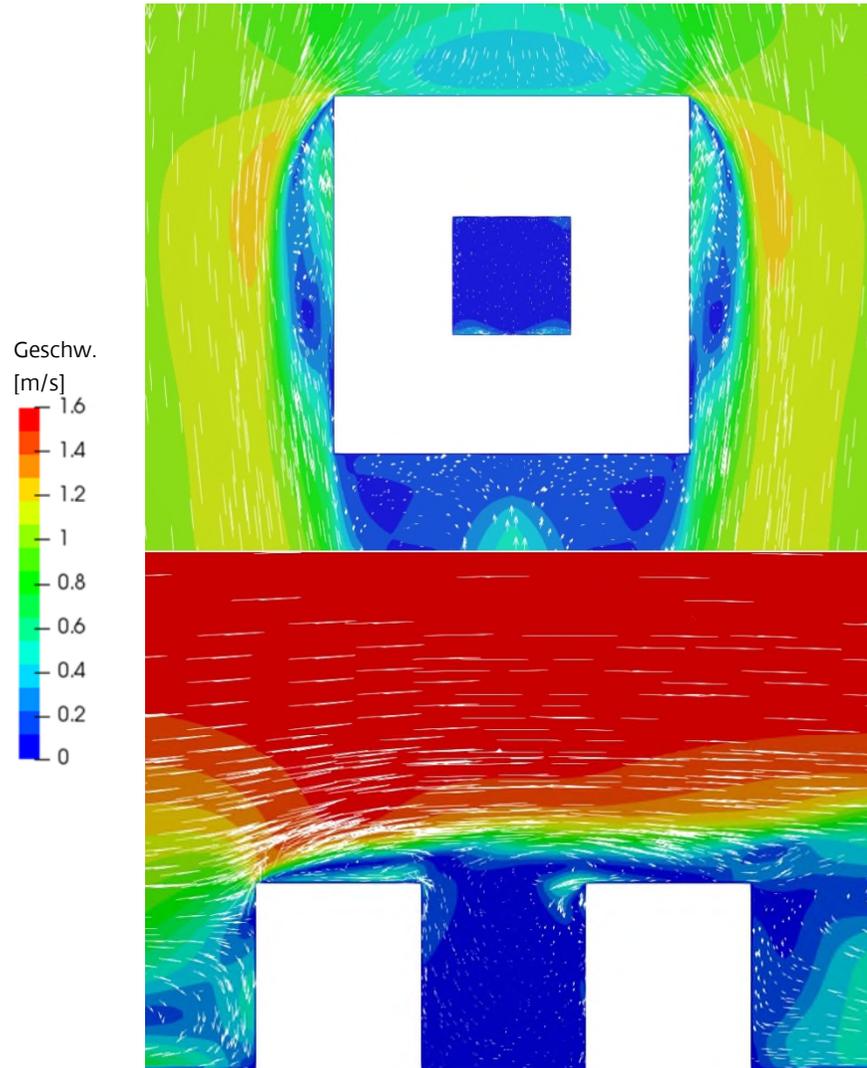
Abb. 265: Visualisierung des Age of Air



Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

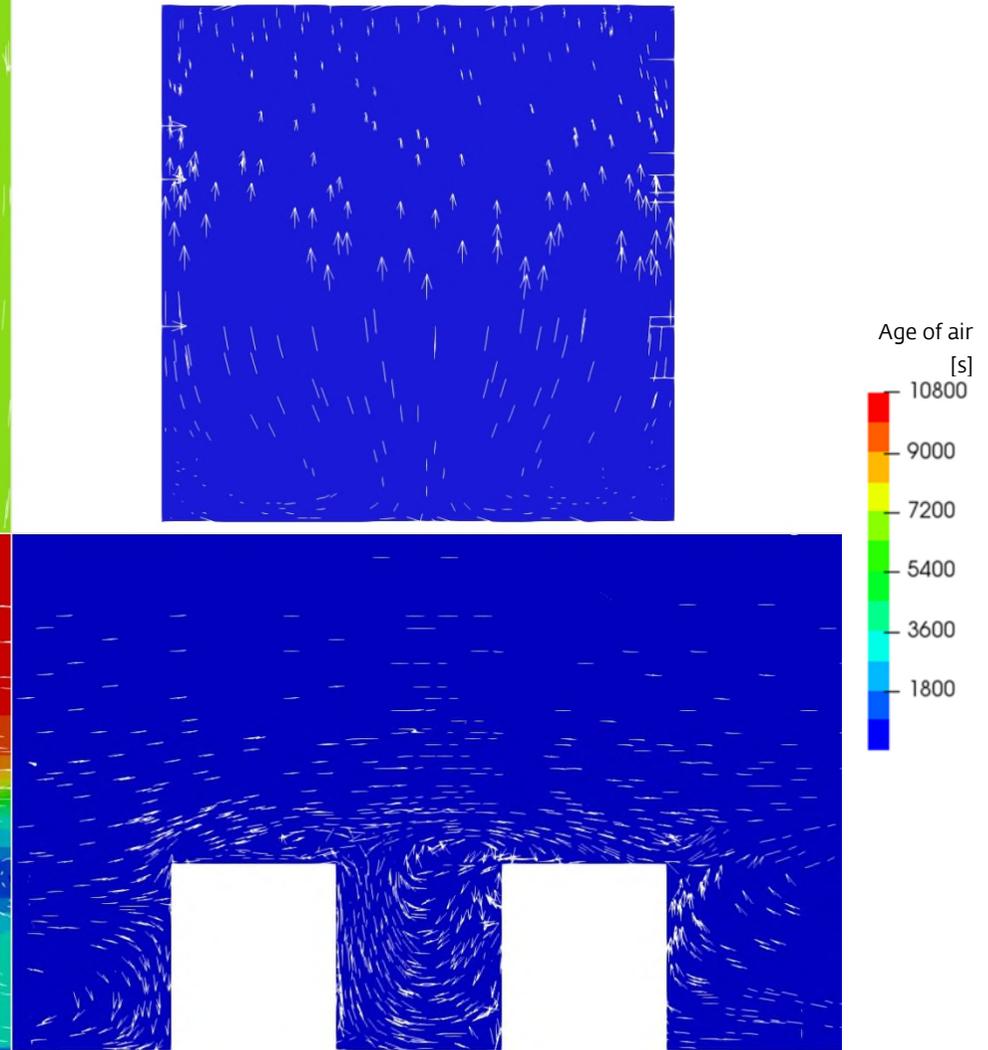
10.2.3. S03: G = 4, AR = 1.1, isotherm

Abb. 266: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

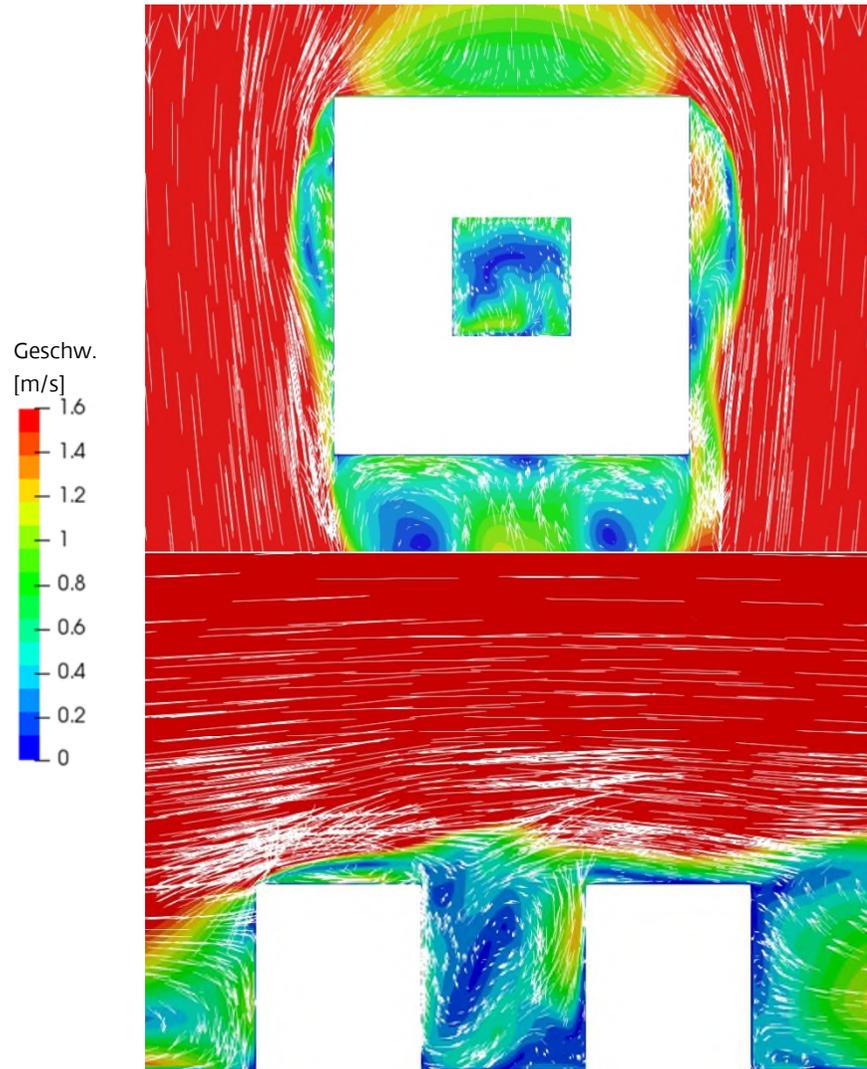
Abb. 267: Visualisierung des Age of Air



Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

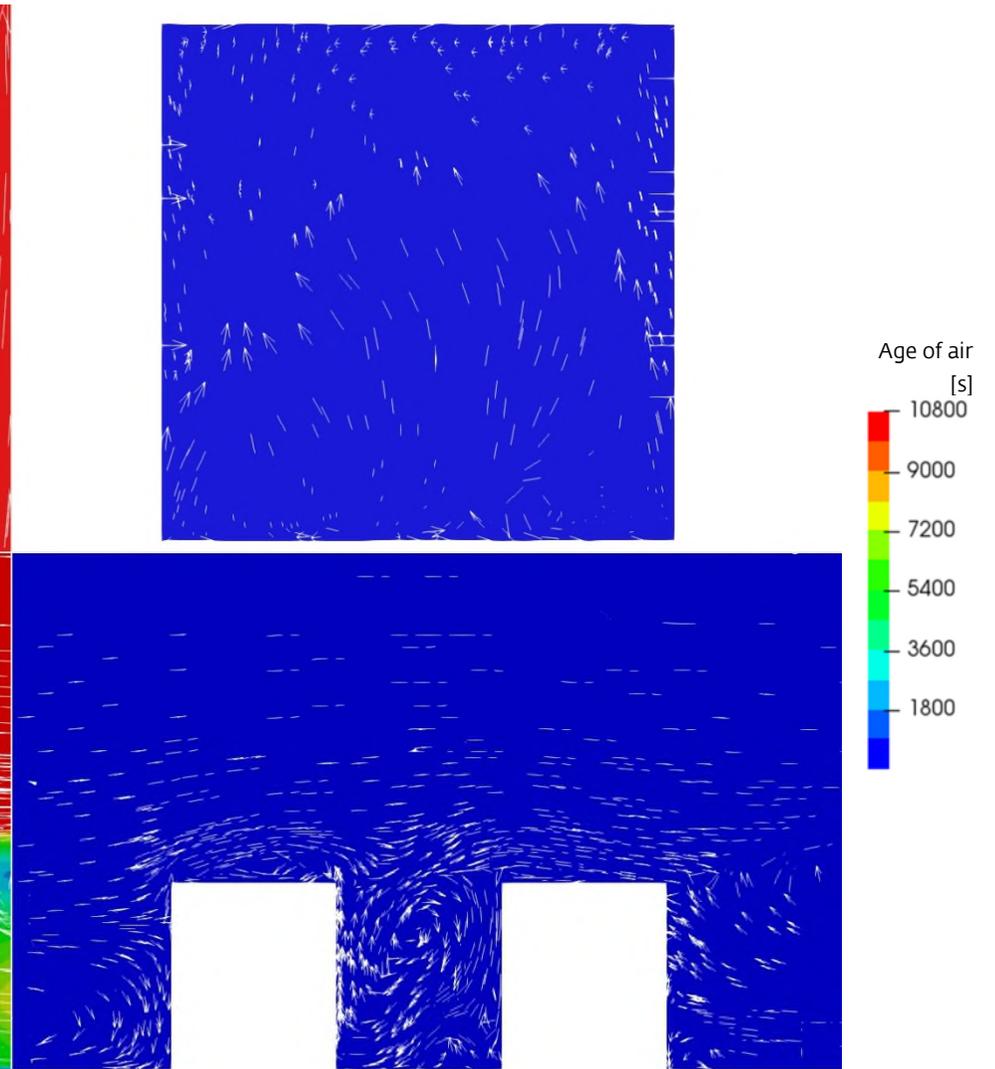
10.2.4. S04: $G = 4$, $AR = 1.1$, isotherm, Wind 3.0 m/s

Abb. 268: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

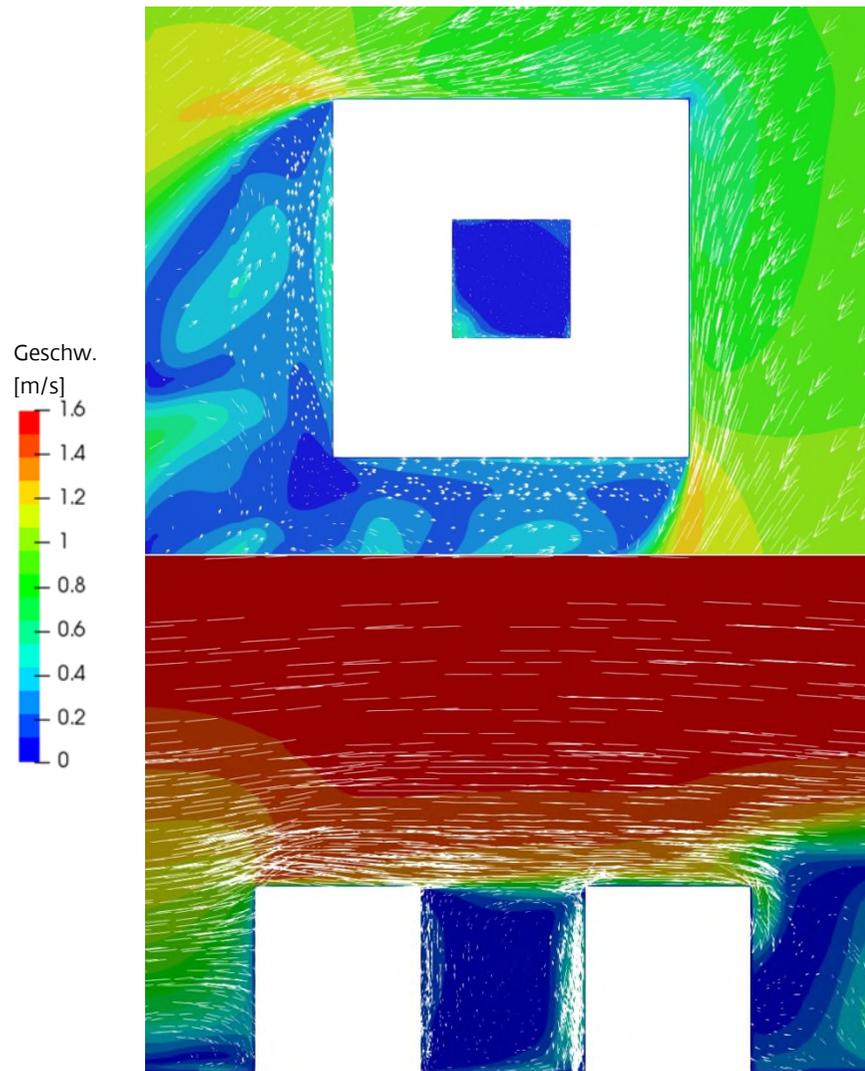
Abb. 269: Visualisierung des Age of Air



Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

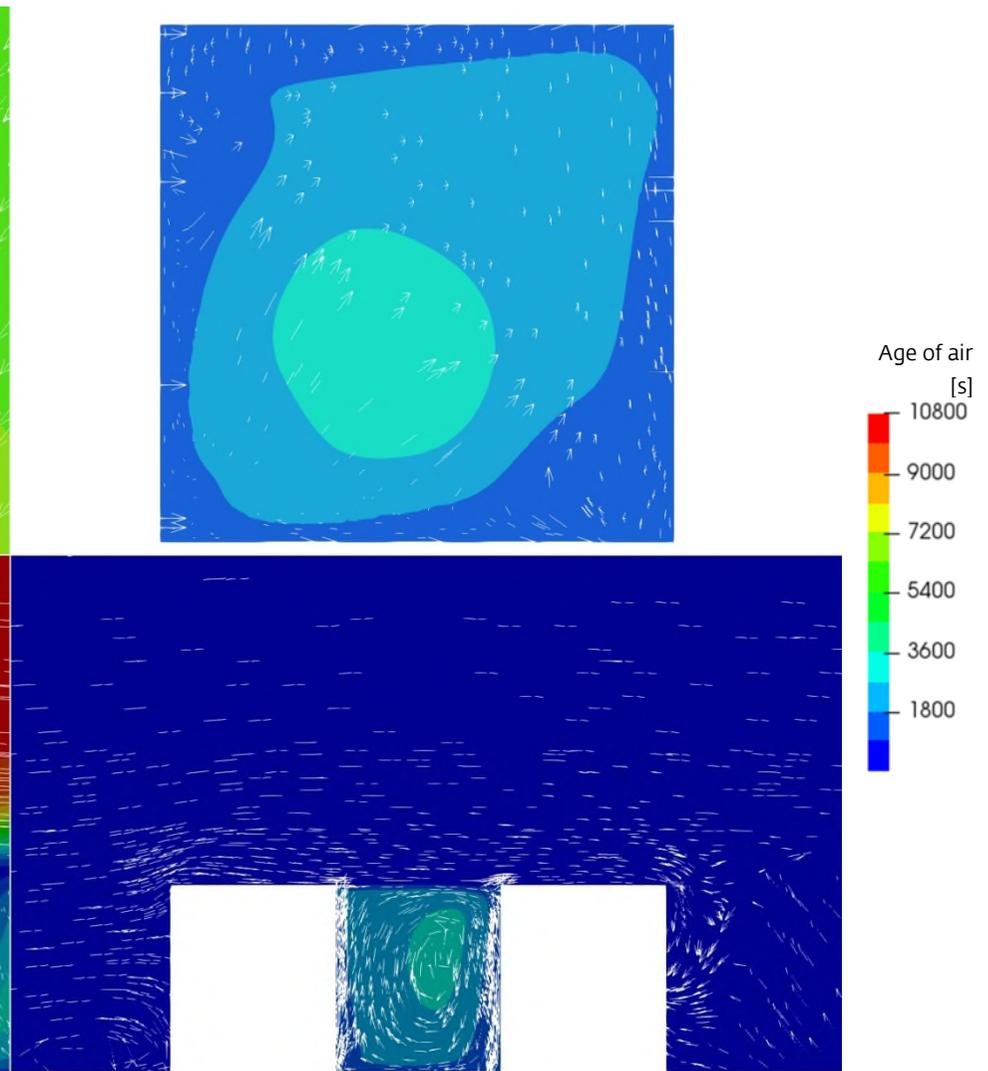
10.2.5. S05: G = 4, AR = 1.1, isotherm, Windrichtung 45°

Abb. 270: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

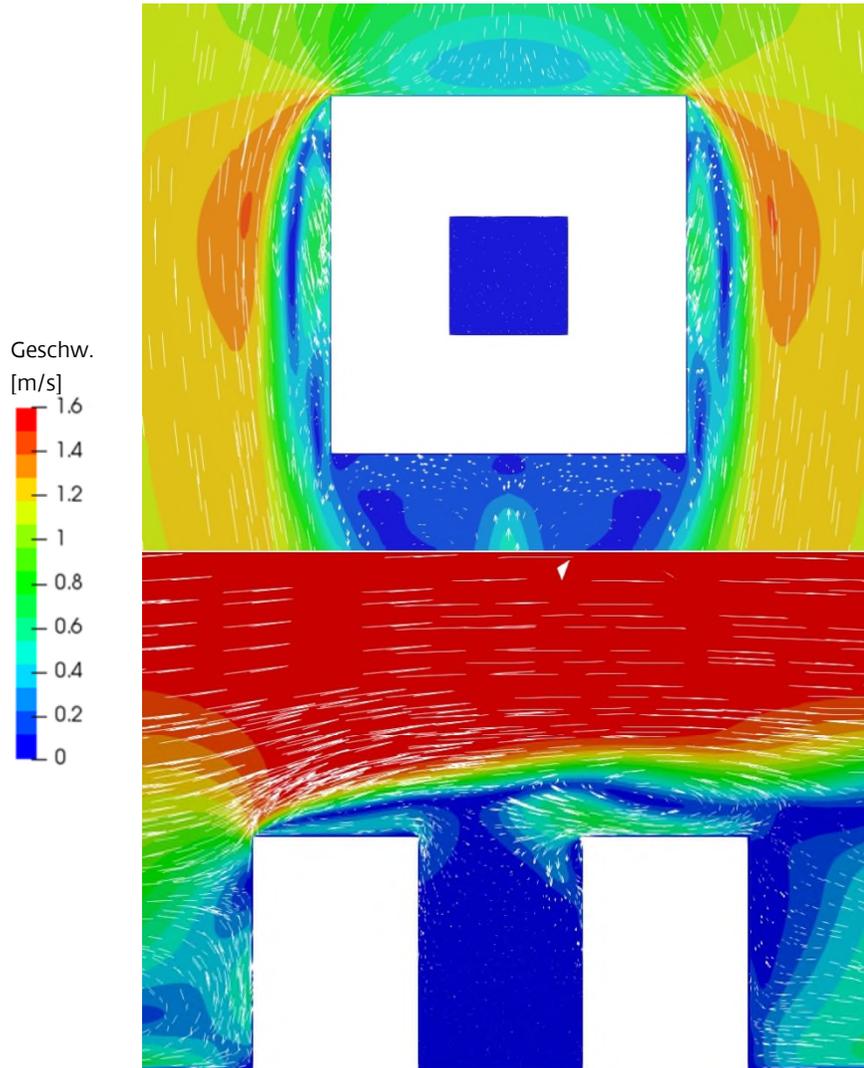
Abb. 271: Visualisierung des Age of Air



Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

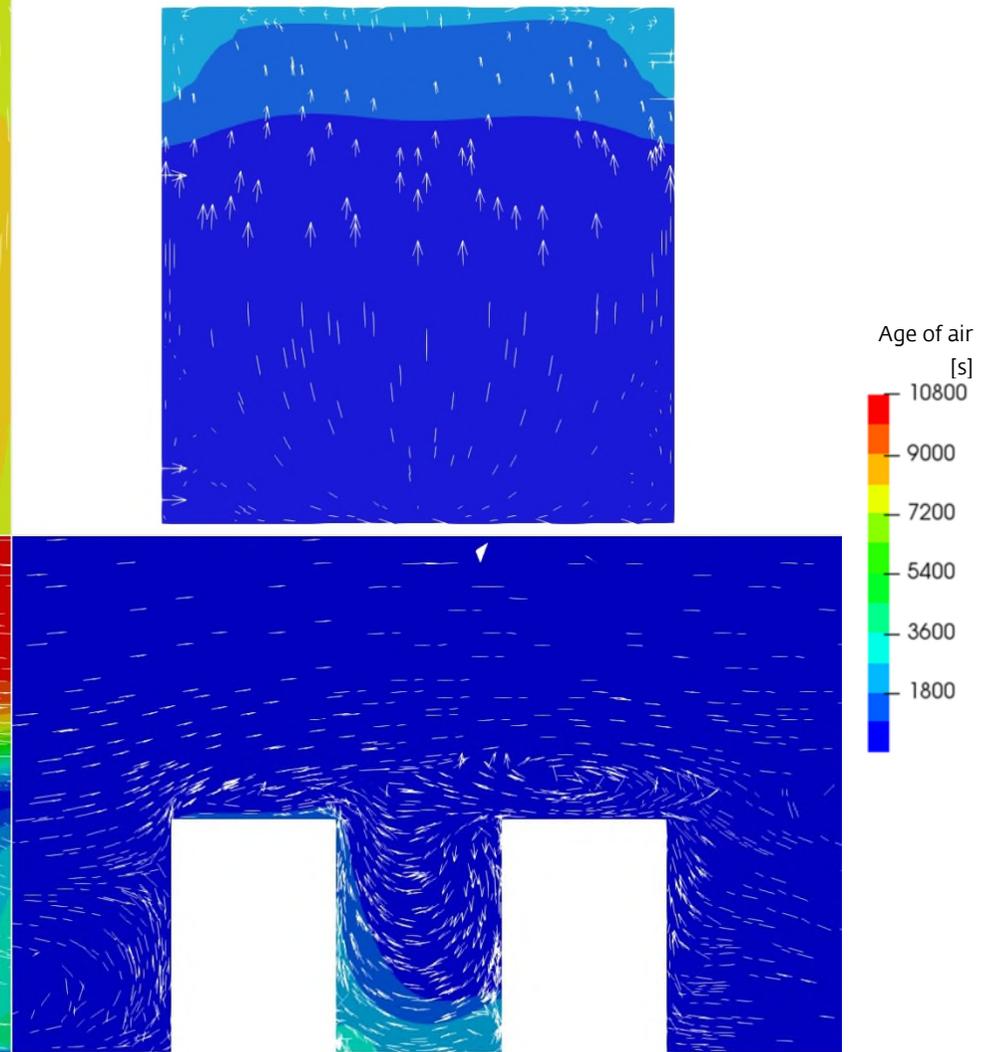
10.2.6. S06: G = 5, AR = 1.4, isotherm, Wind 1.5 m/s

Abb. 272: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

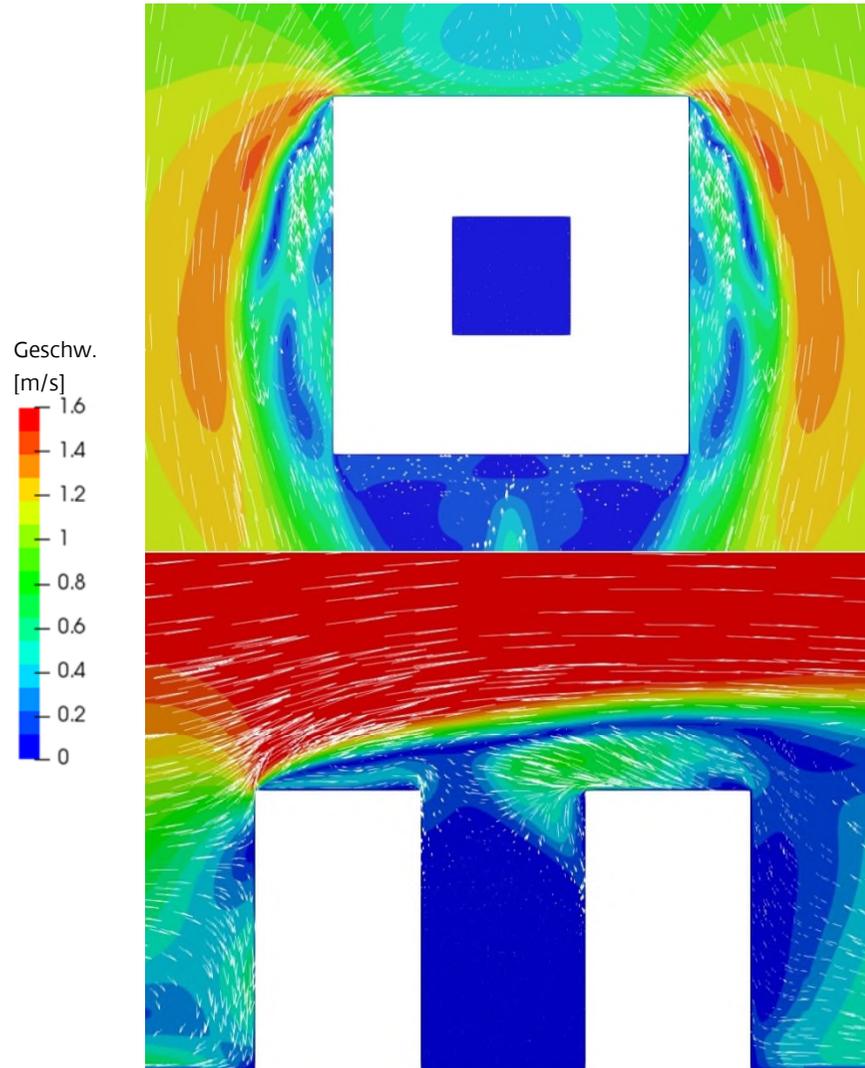
Abb. 273: Visualisierung des Age of Air



Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

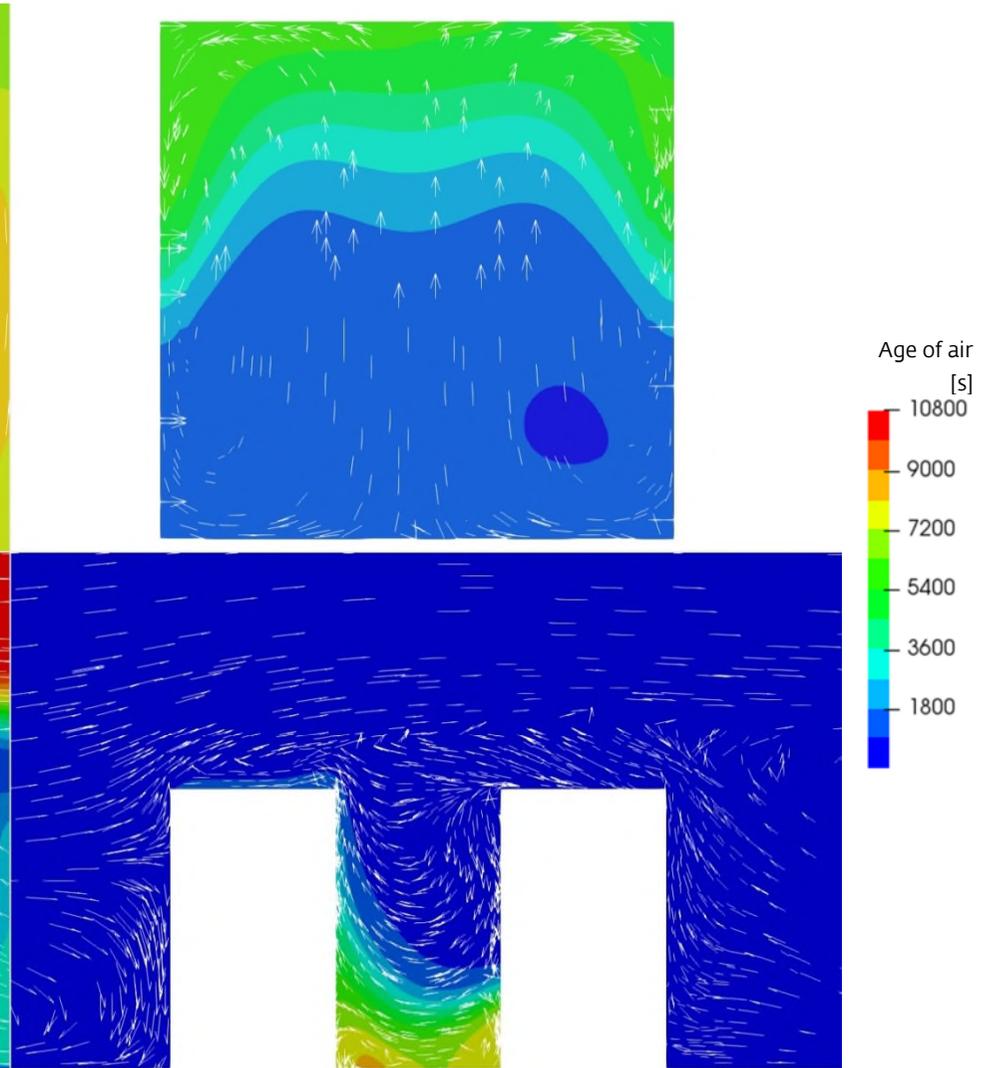
10.2.7. S07: G = 6, AR = 1.7, isotherm

Abb. 274: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

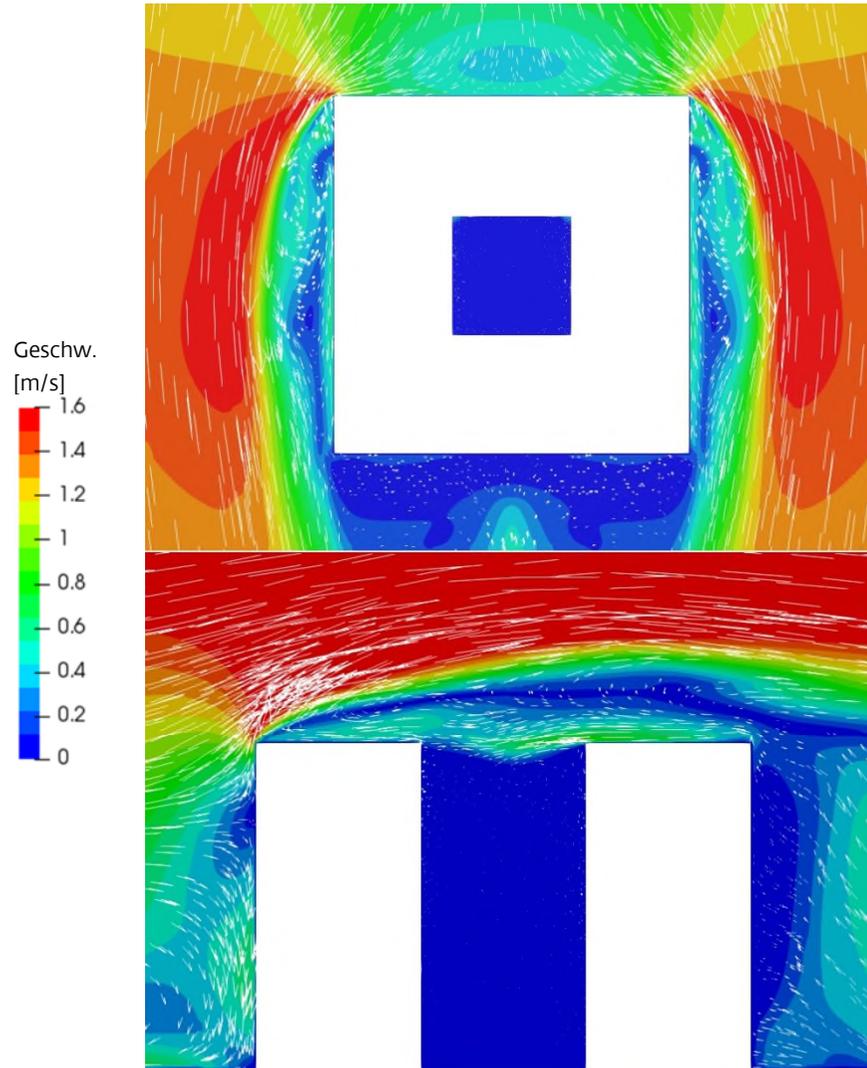
Abb. 275: Visualisierung des Age of Air



Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

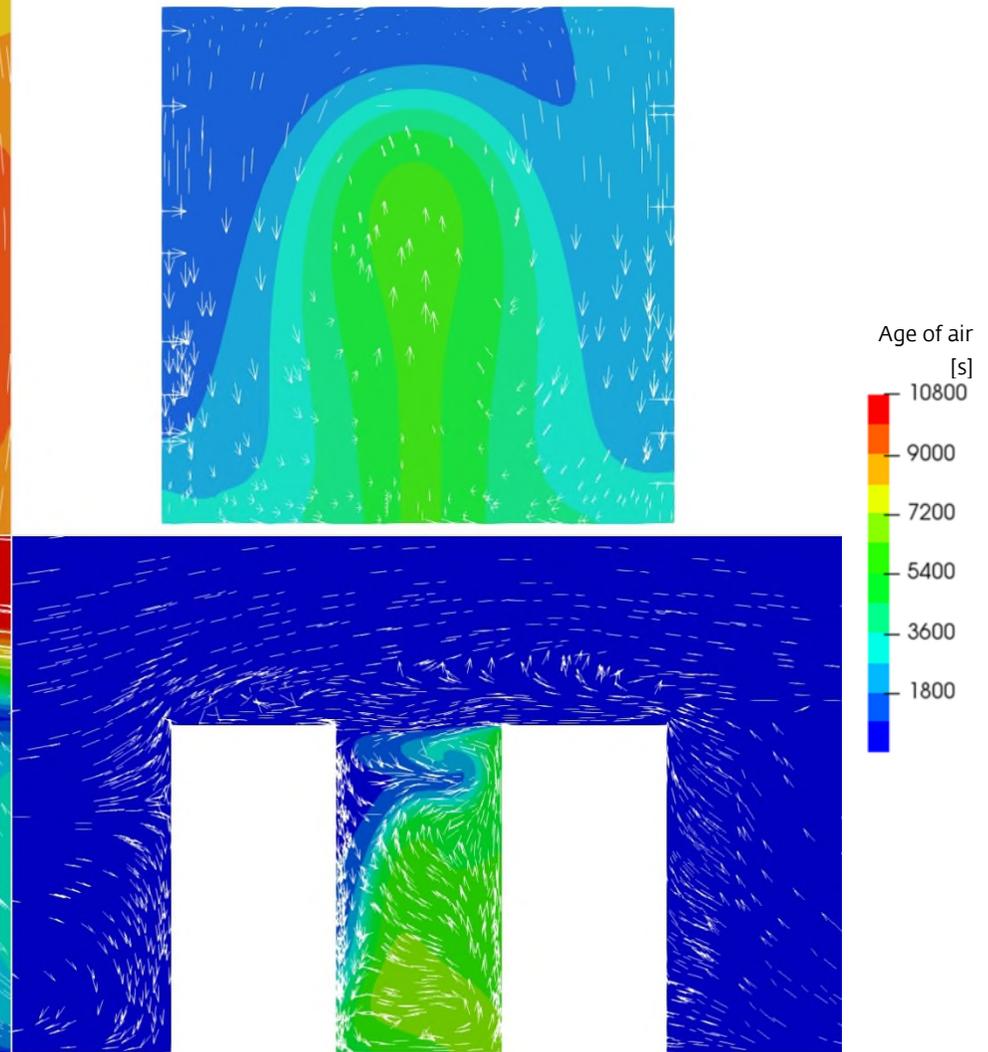
10.2.8. S08: G = 7, AR = 2.0, isotherm, Wind 1.5 m/s

Abb. 276: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

Abb. 277: Visualisierung des Age of Air



Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

10.2.9. S09: G = 8, AR = 2.2, isotherm

Abb. 278: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit

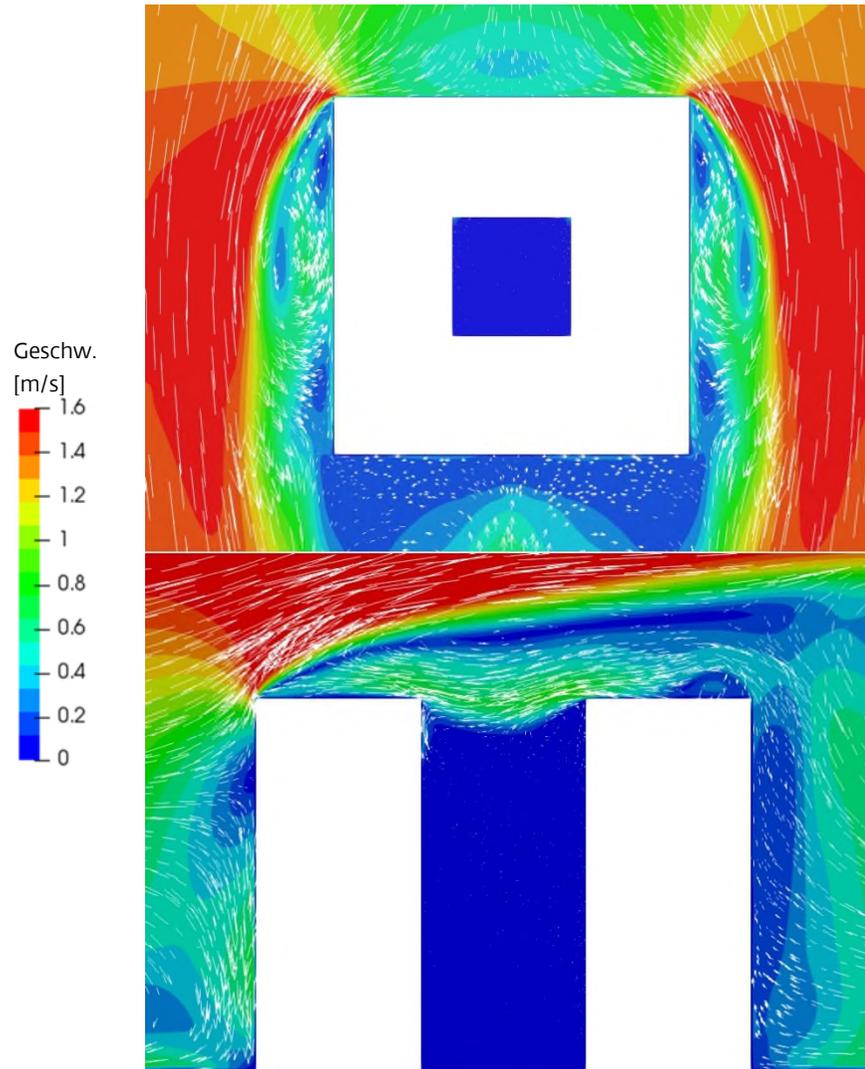
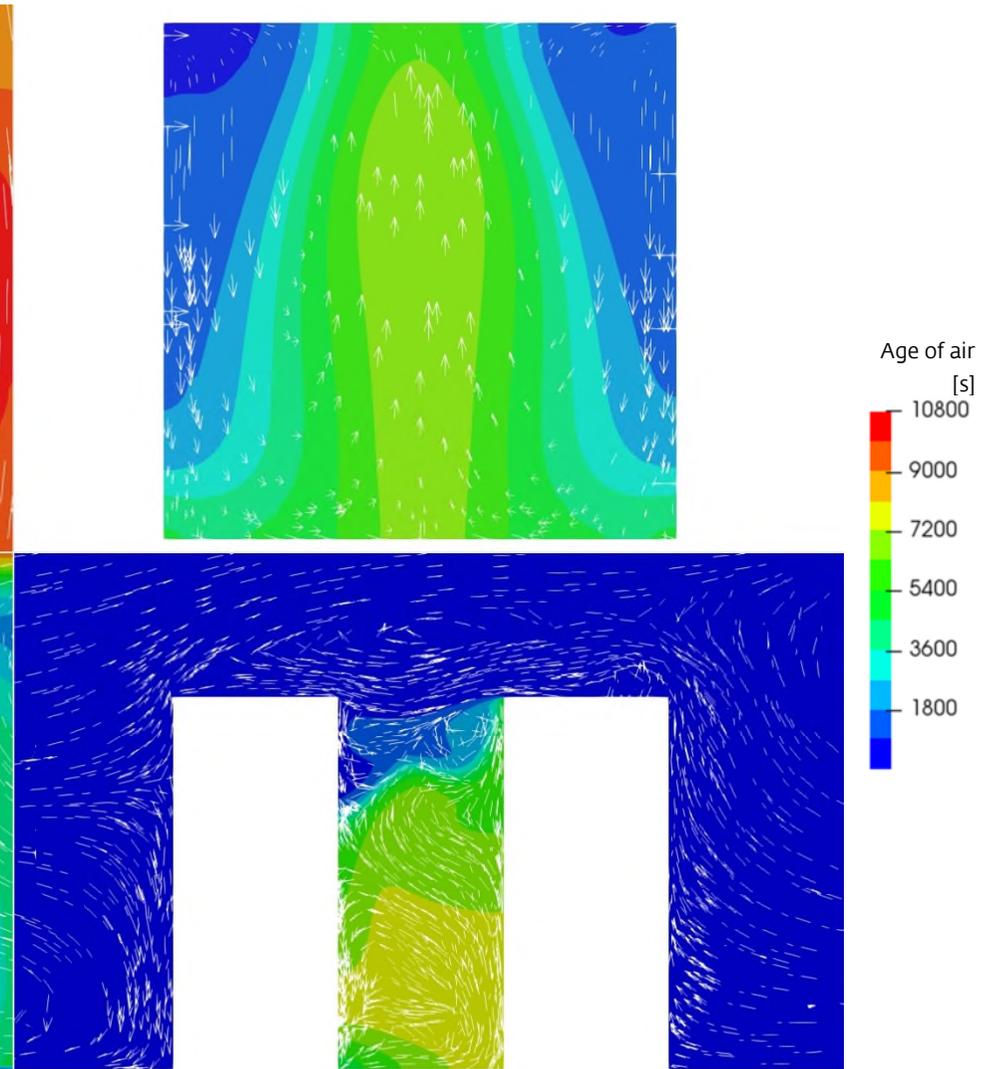


Abb. 279: Visualisierung des Age of Air

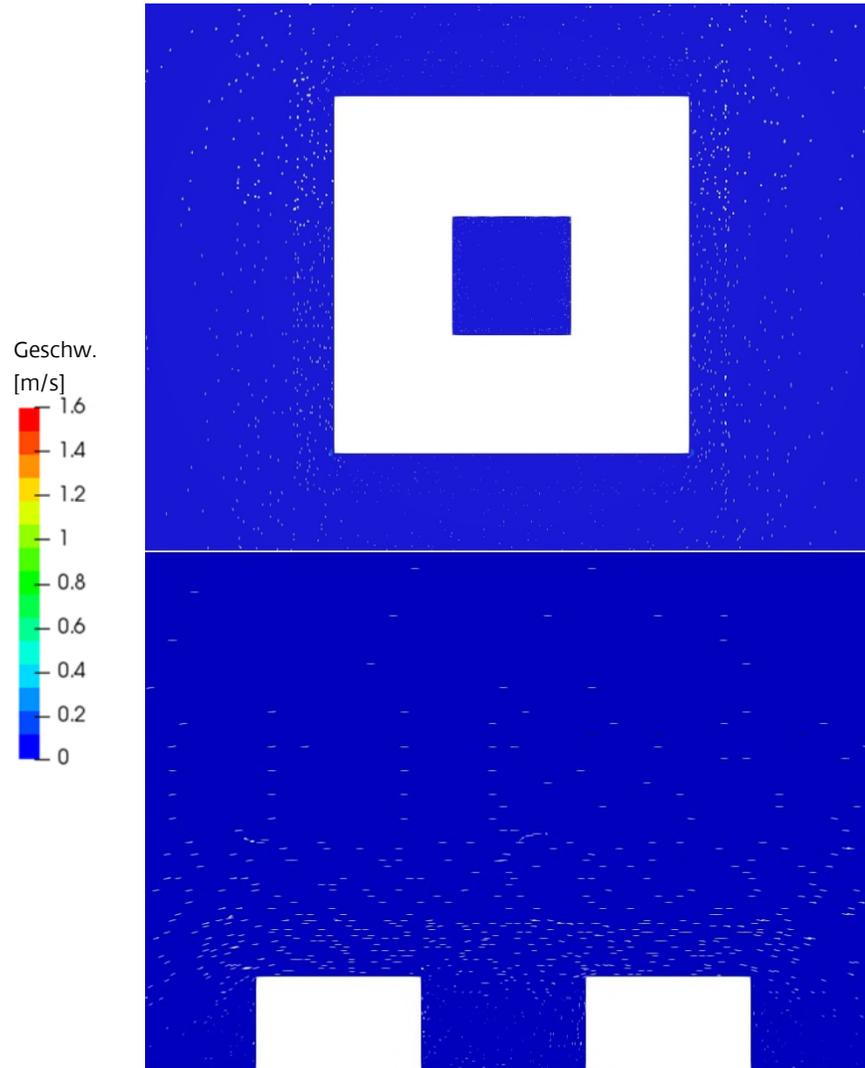


Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

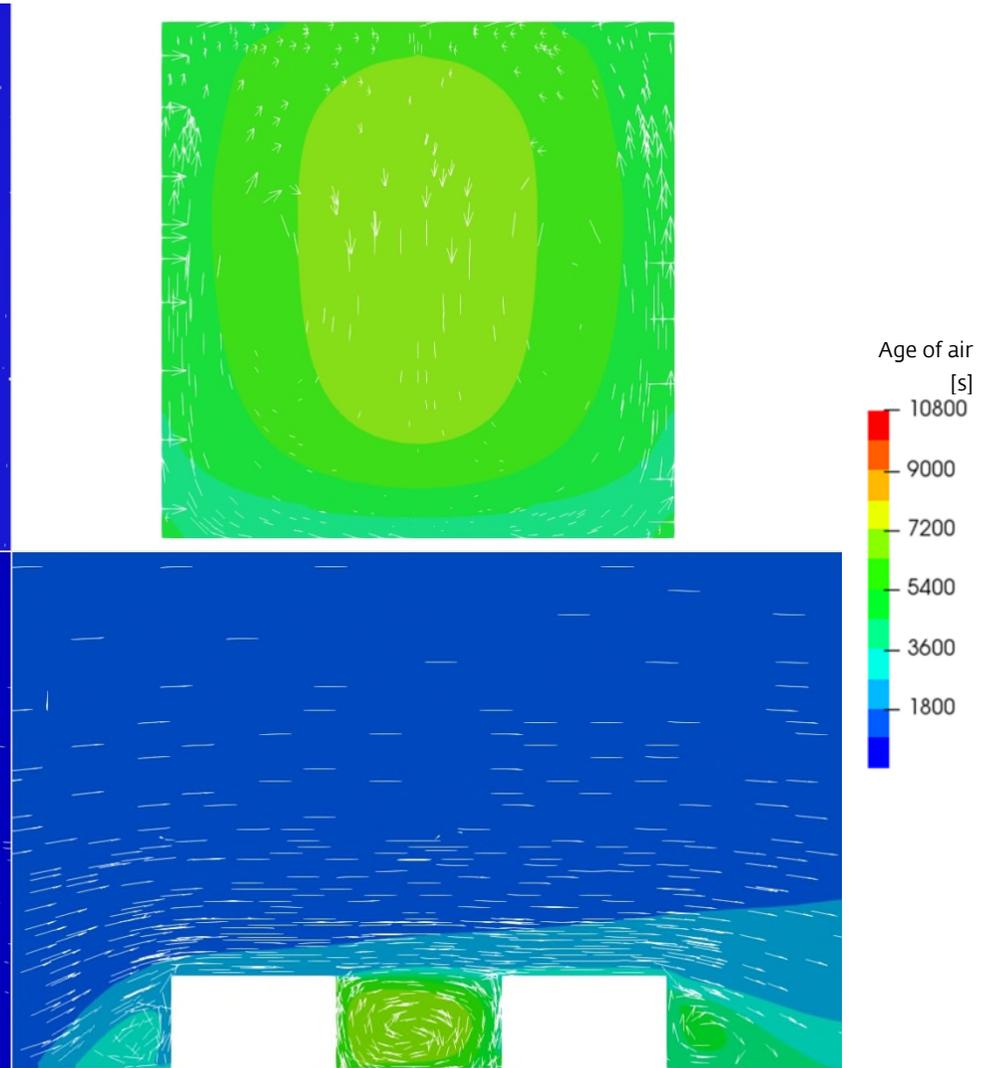
10.2.10. S10: G = 2, AR = 0.6, Stau, Wind 0.1 m/s

Abb. 280: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

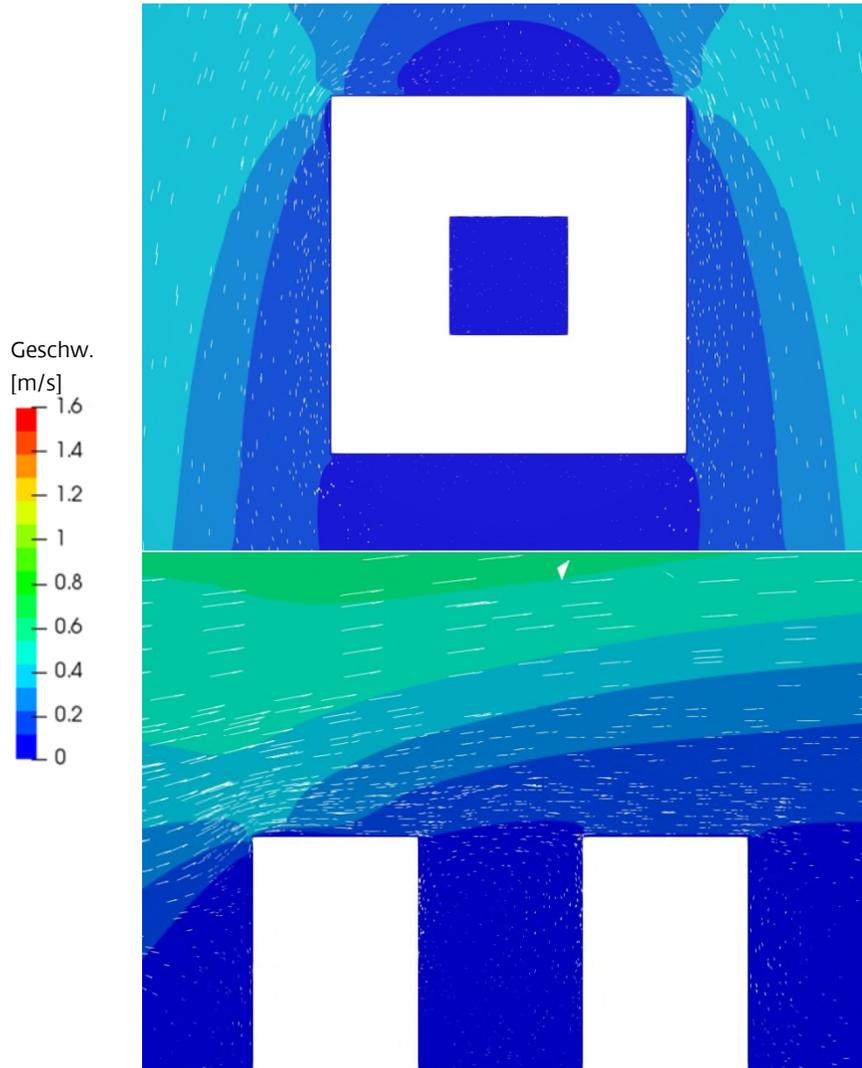
Abb. 281: Visualisierung des Age of Air



Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

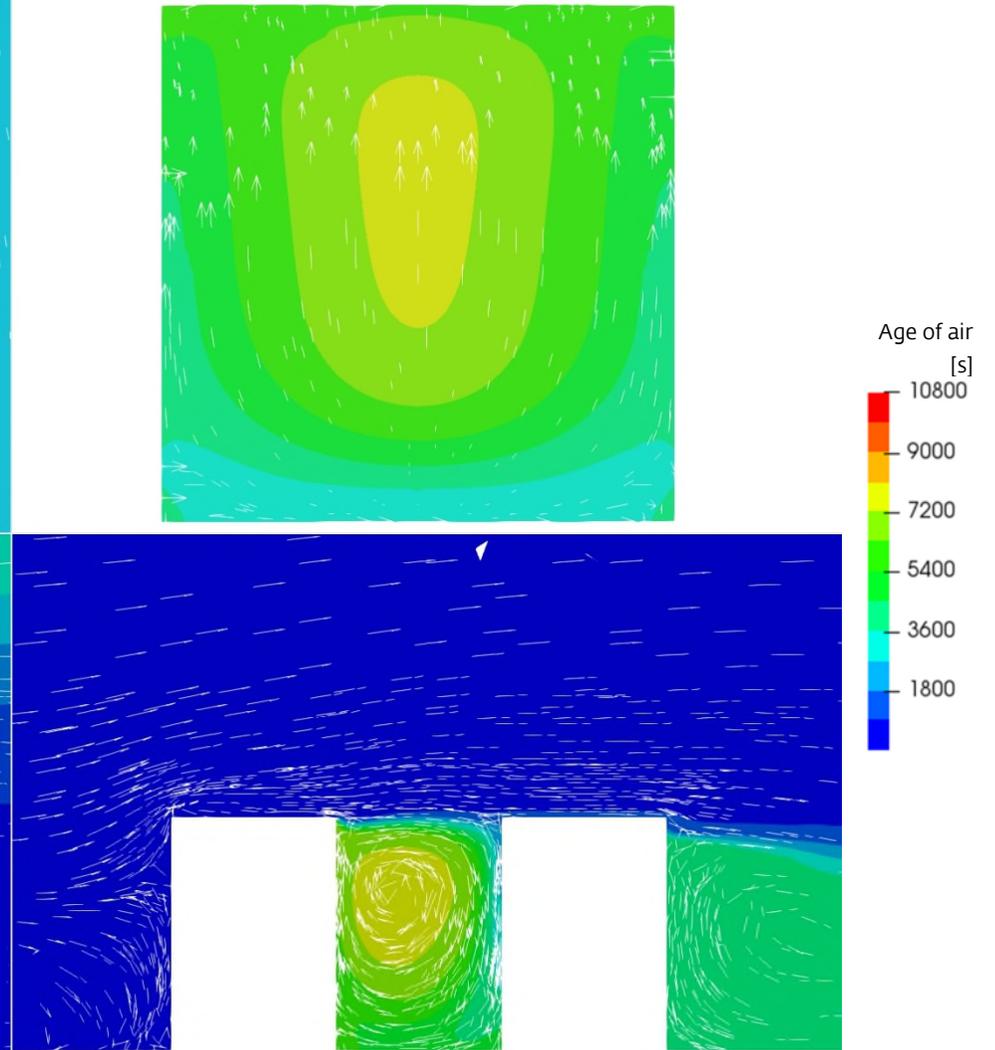
10.2.11. S11: G = 5, AR = 1.4, Stau, Wind 0.1 m/s

Abb. 282: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

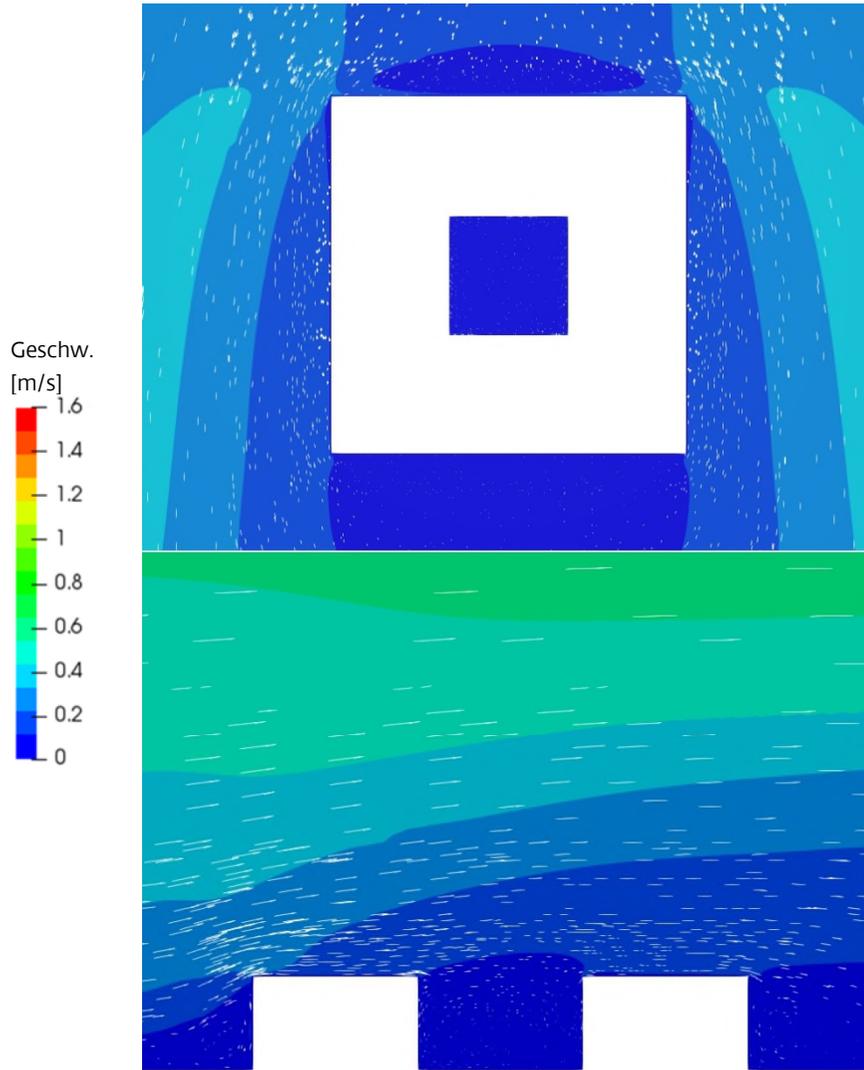
Abb. 283: Visualisierung des Age of Air



Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

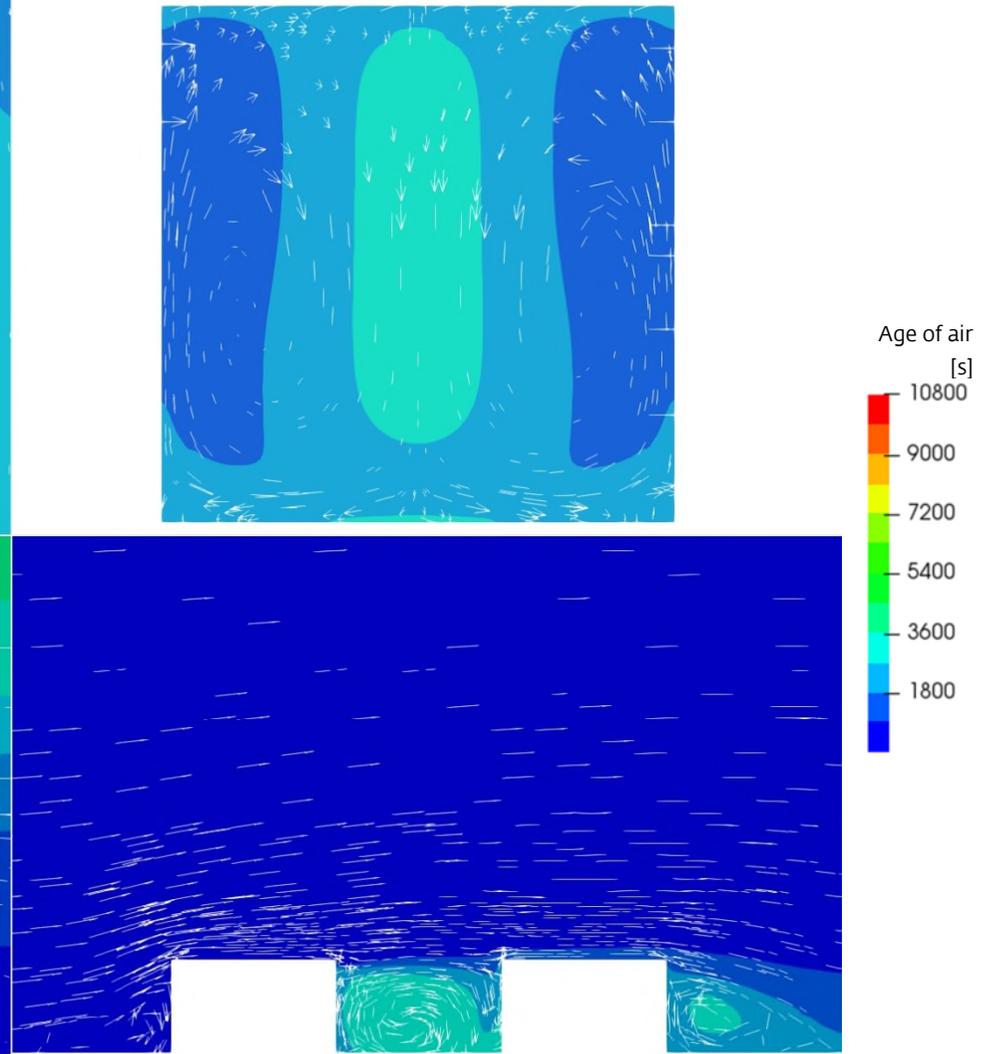
10.2.12. S12: G = 2, AR = 0.6, Auftrieb, Wind 0.5 m/s

Abb. 284: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

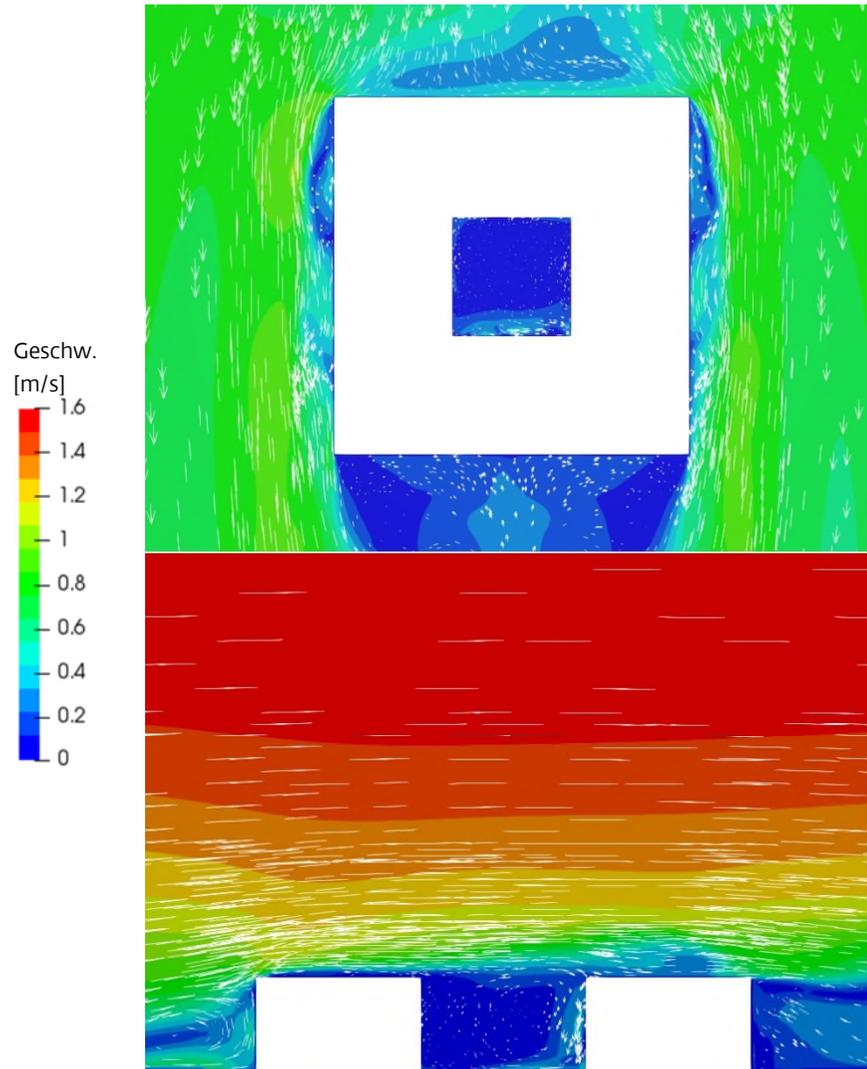
Abb. 285: Visualisierung des Age of Air



Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

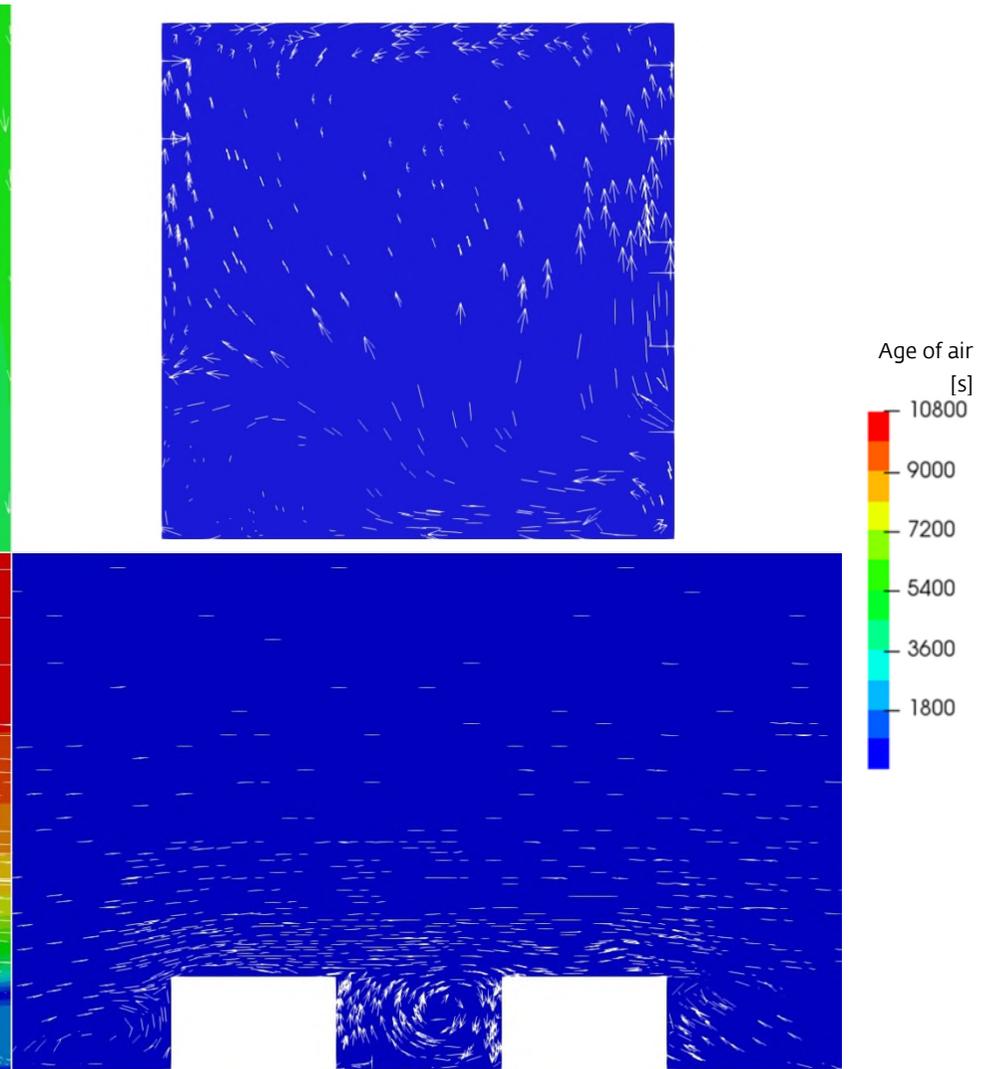
10.2.13. S13: G = 2, AR = 0.6, Auftrieb, Wind 1.5 m/s

Abb. 286: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

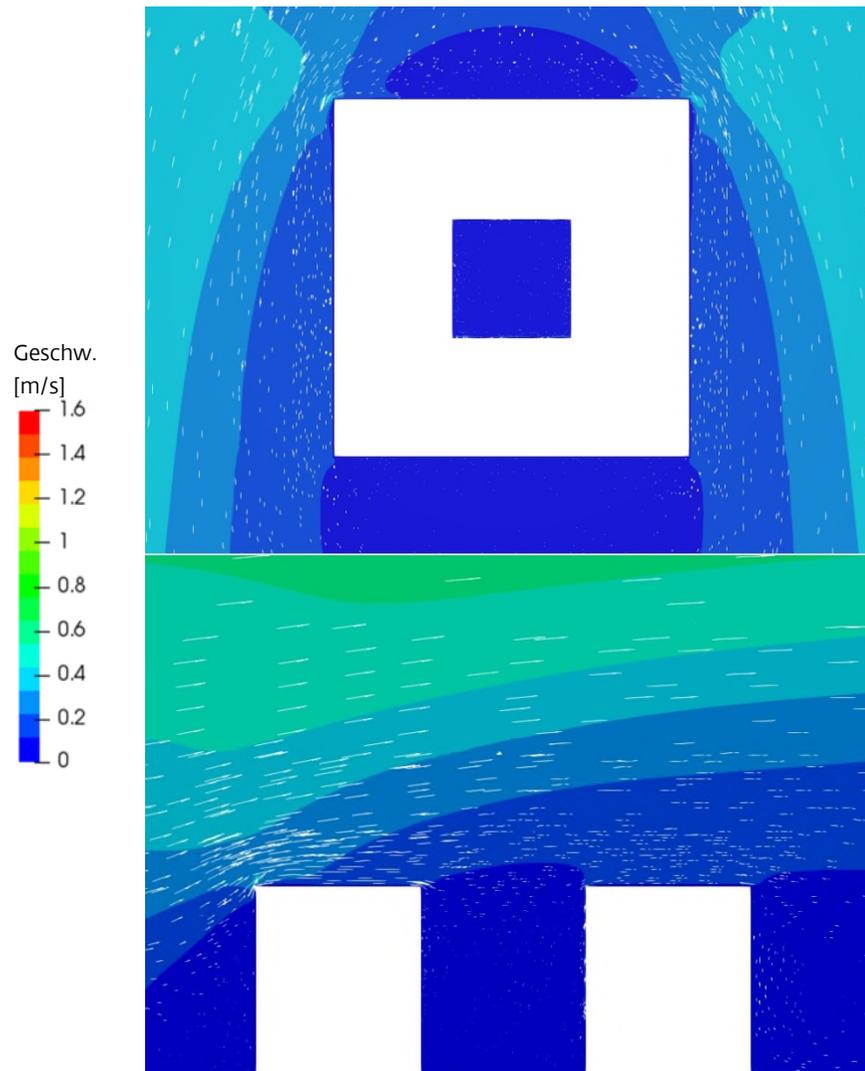
Abb. 287: Visualisierung des Age of Air



Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

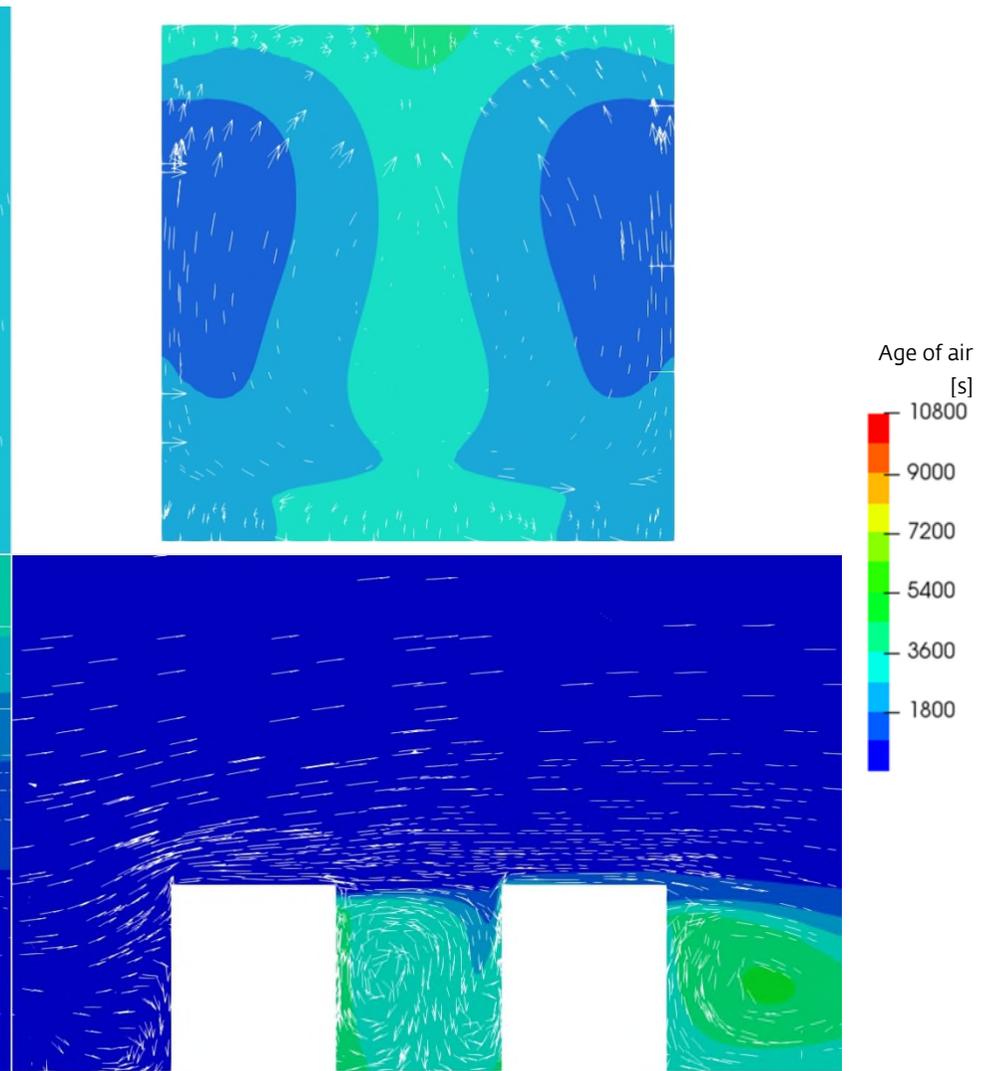
10.2.14. S14: $G = 4$, $AR = 1.1$, Auftrieb, Wind 0.5 m/s

Abb. 288: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

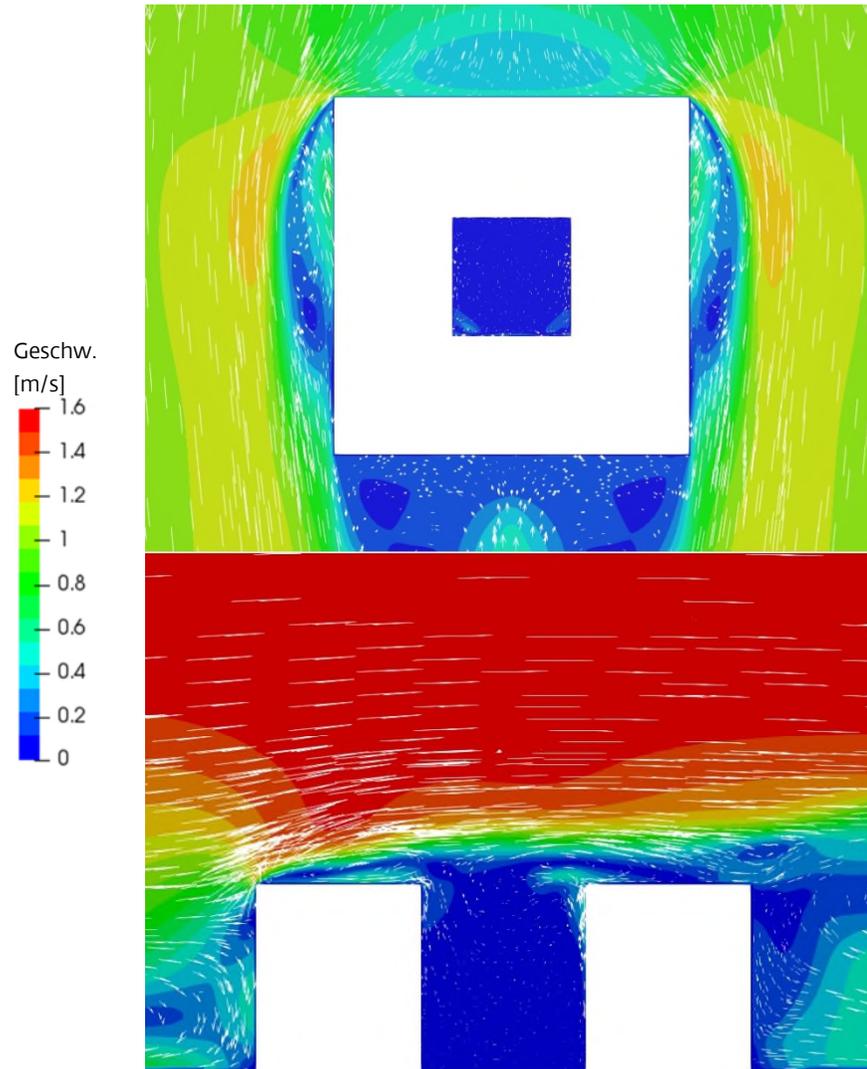
Abb. 289: Visualisierung des Age of Air



Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

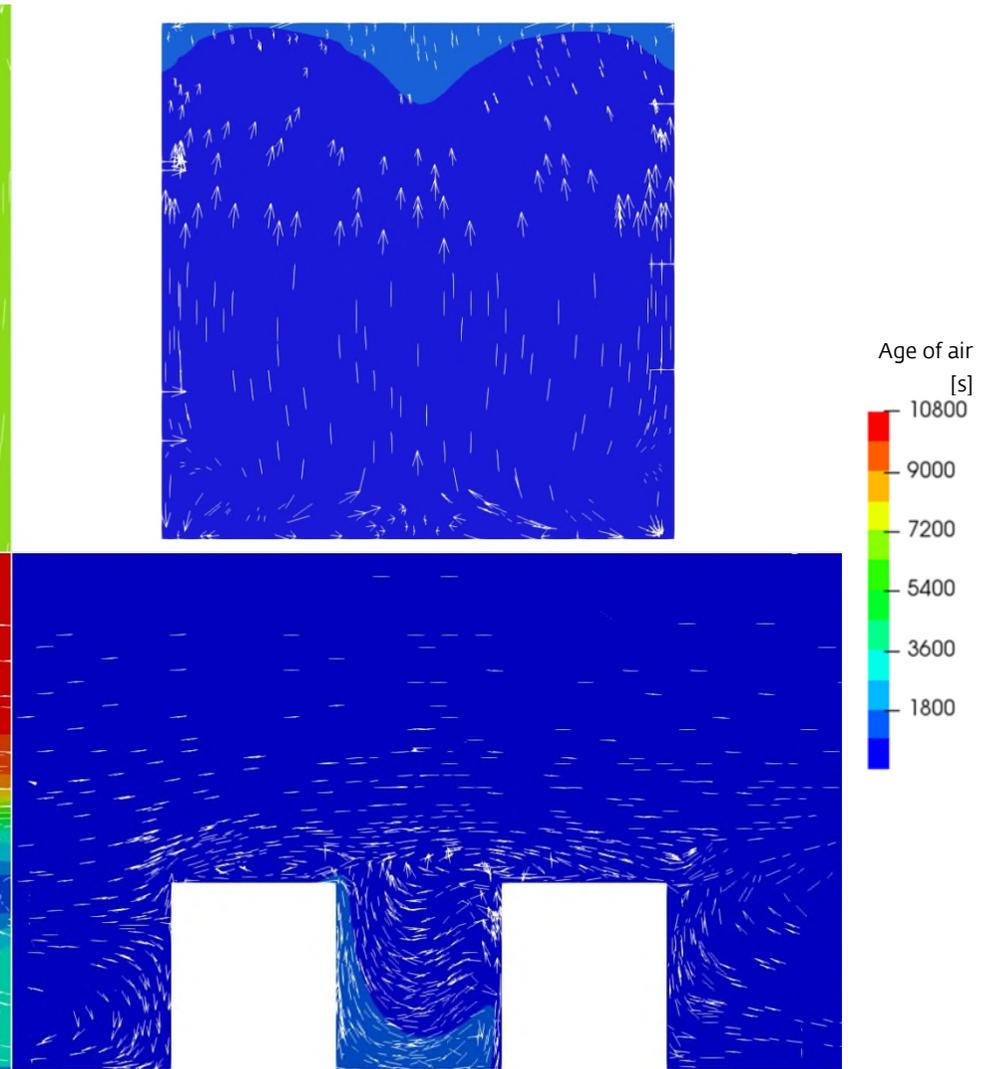
10.2.15. S15: $G = 4$, $AR = 1.1$, Auftrieb, Wind 1.5 m/s

Abb. 290: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

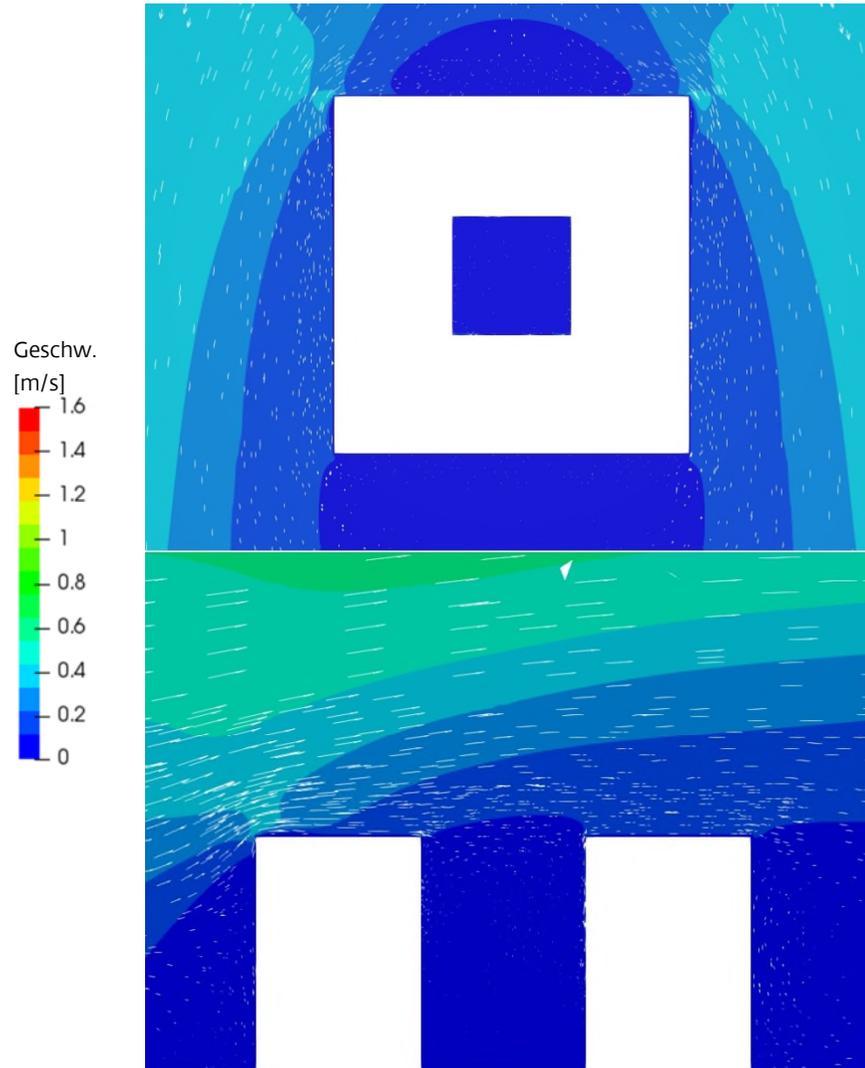
Abb. 291: Visualisierung des Age of Air



Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

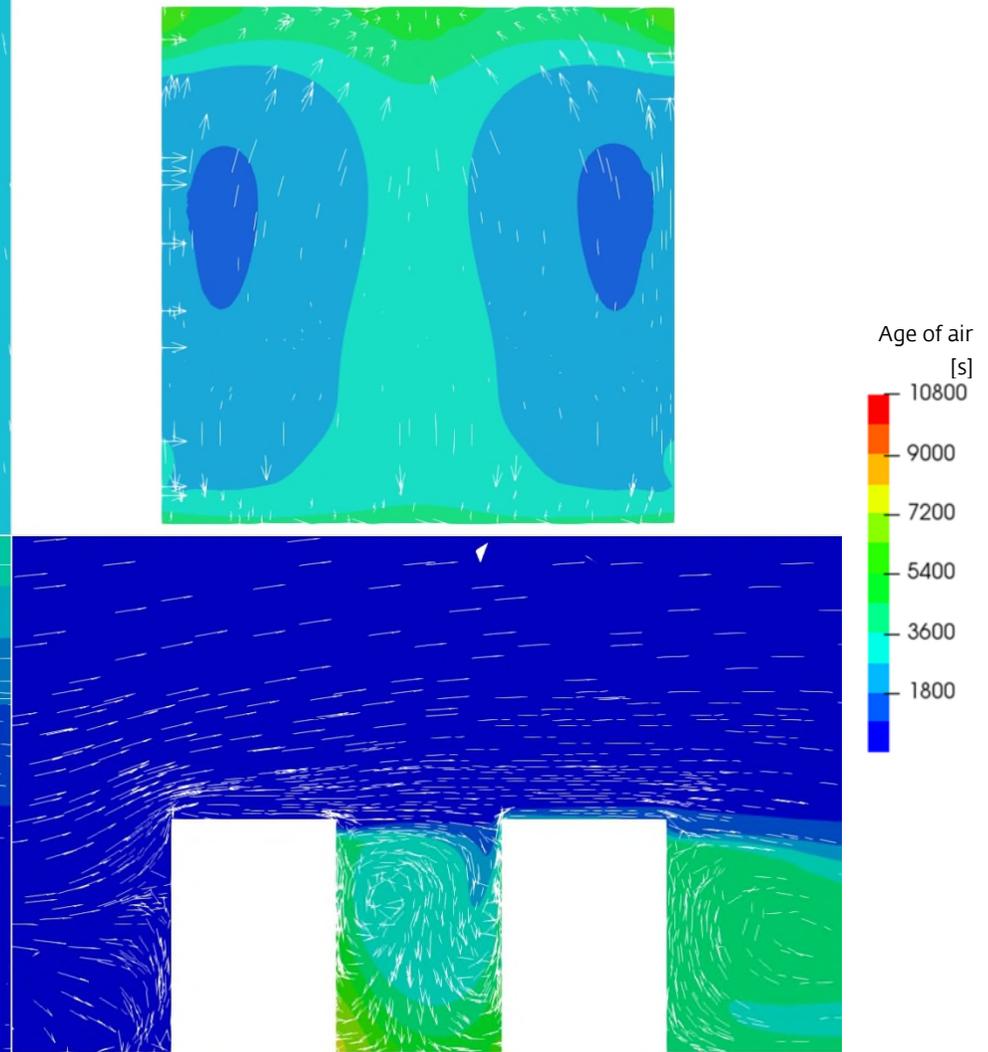
10.2.16. S16: G = 5, AR = 1.4, Auftrieb, Wind 0.5 m/s

Abb. 292: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

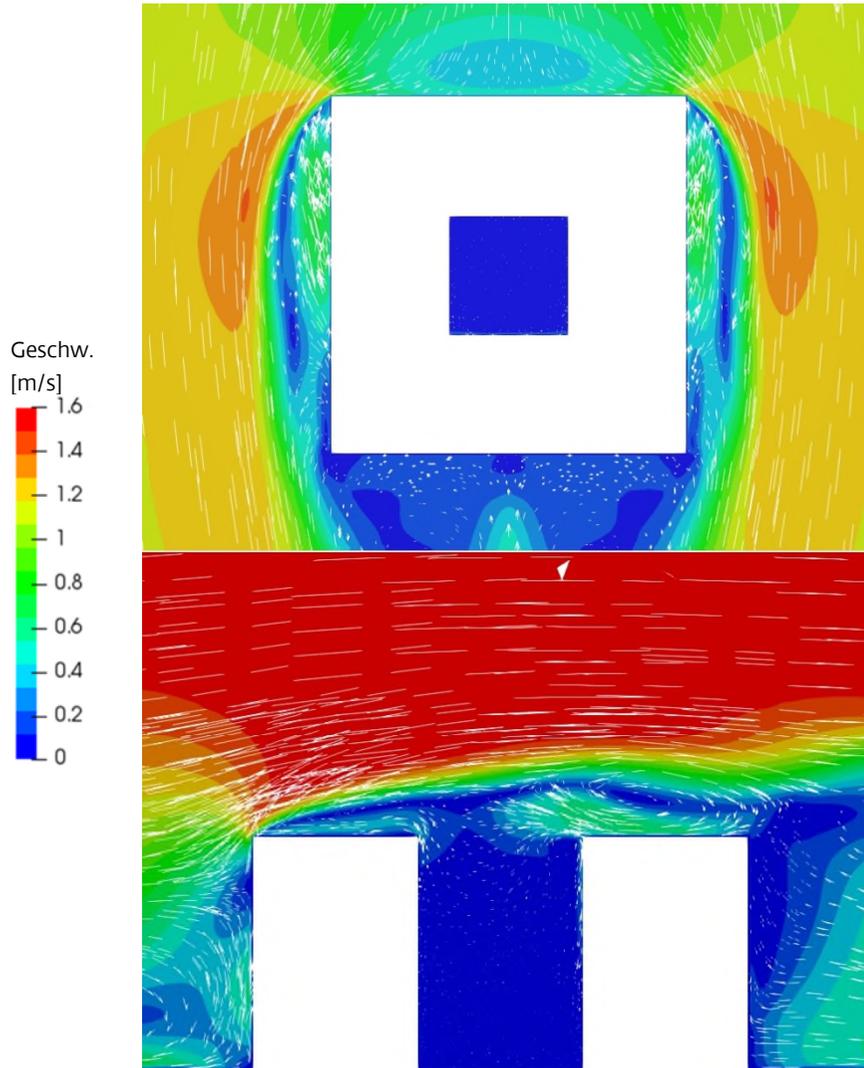
Abb. 293: Visualisierung des Age of Air



Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

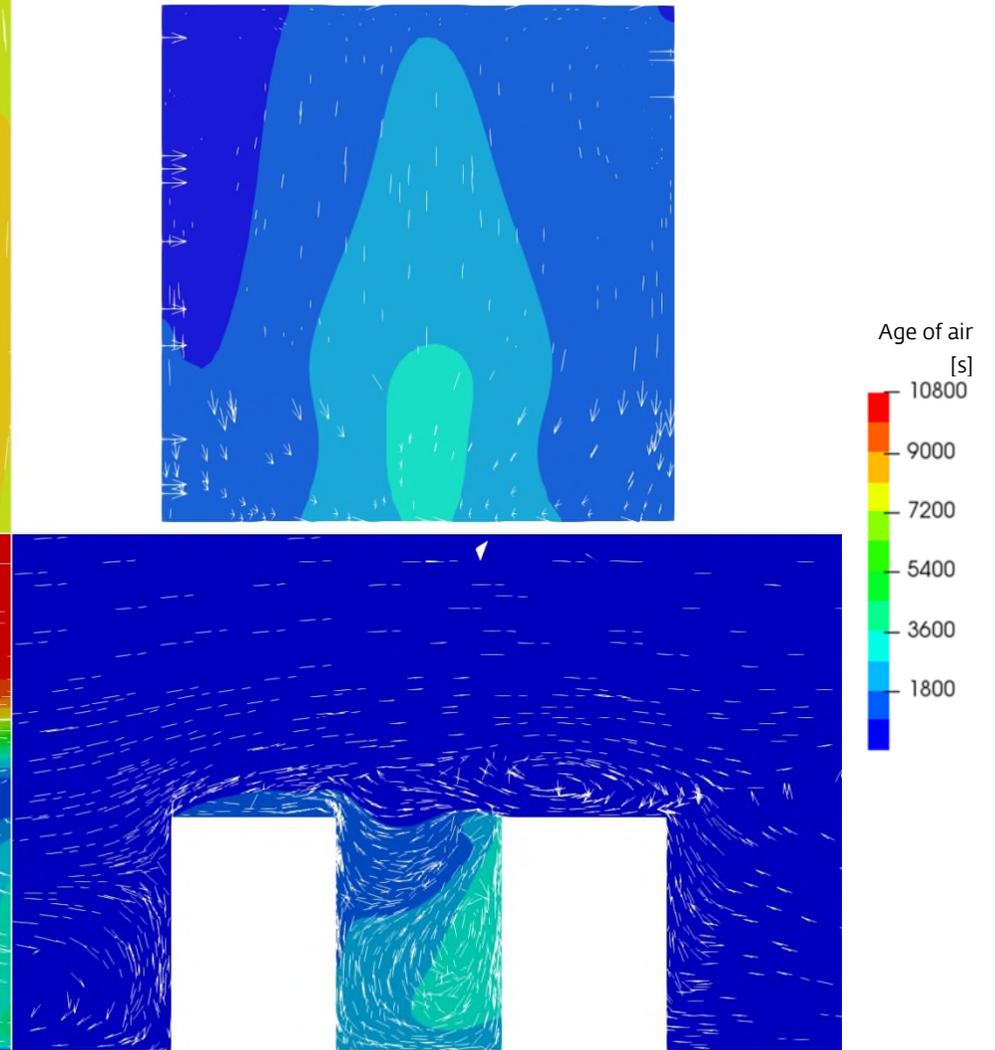
10.2.17. S17: G = 5, AR = 1.4, Auftrieb, Wind 1.5 m/s

Abb. 294: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

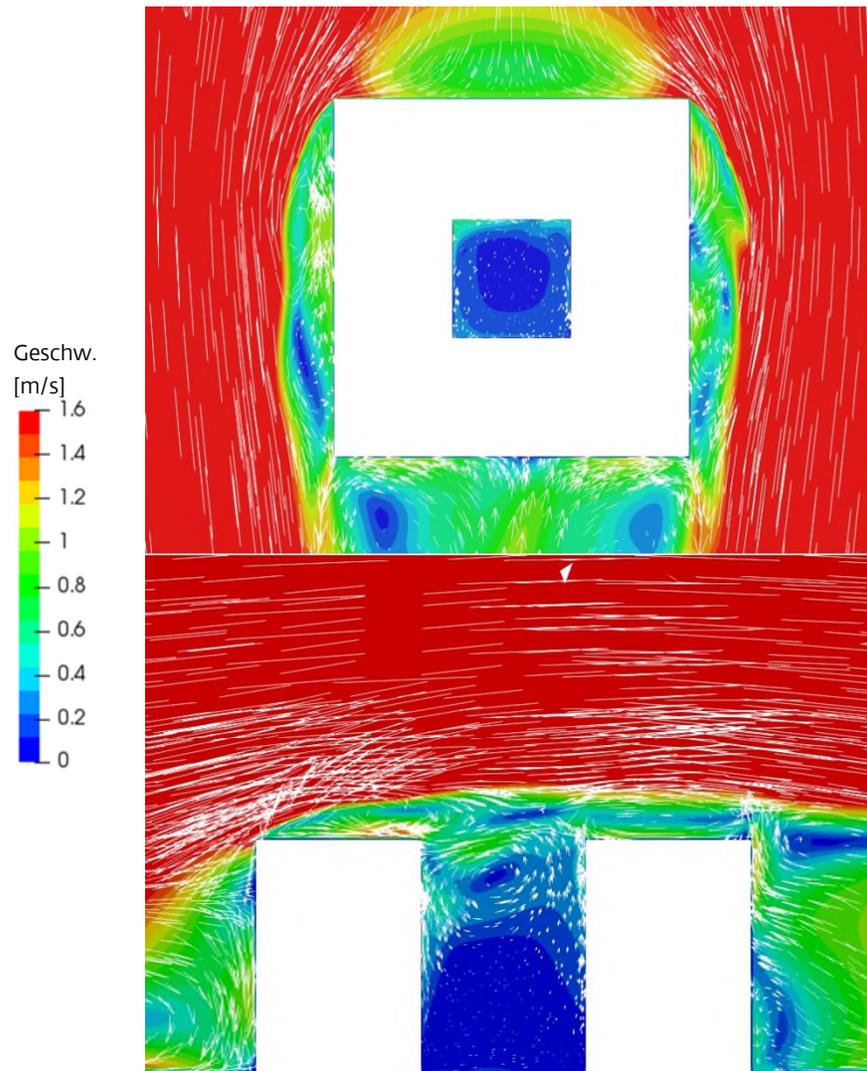
Abb. 295: Visualisierung des Age of Air



Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

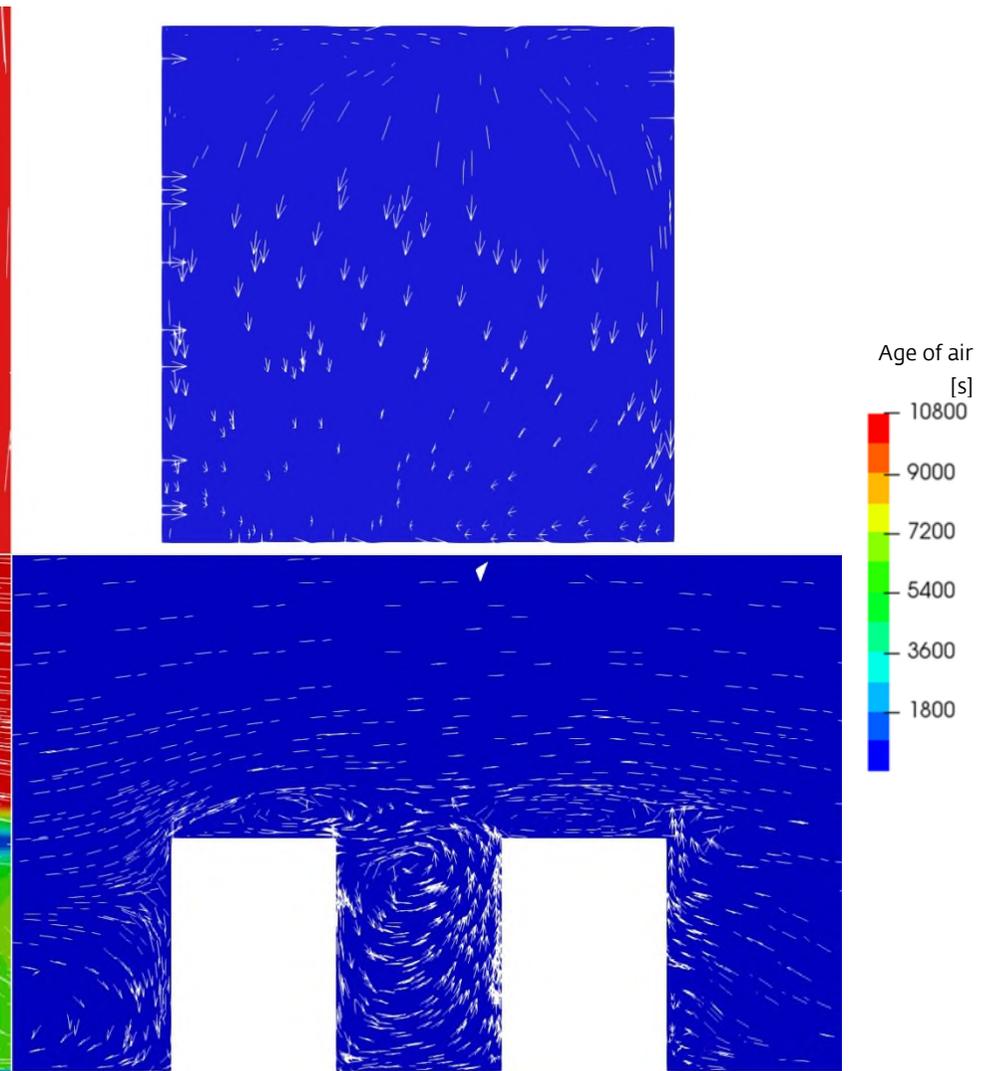
10.2.18. S18: G = 5, AR = 1.4, Auftrieb, Wind 3.0 m/s

Abb. 296: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

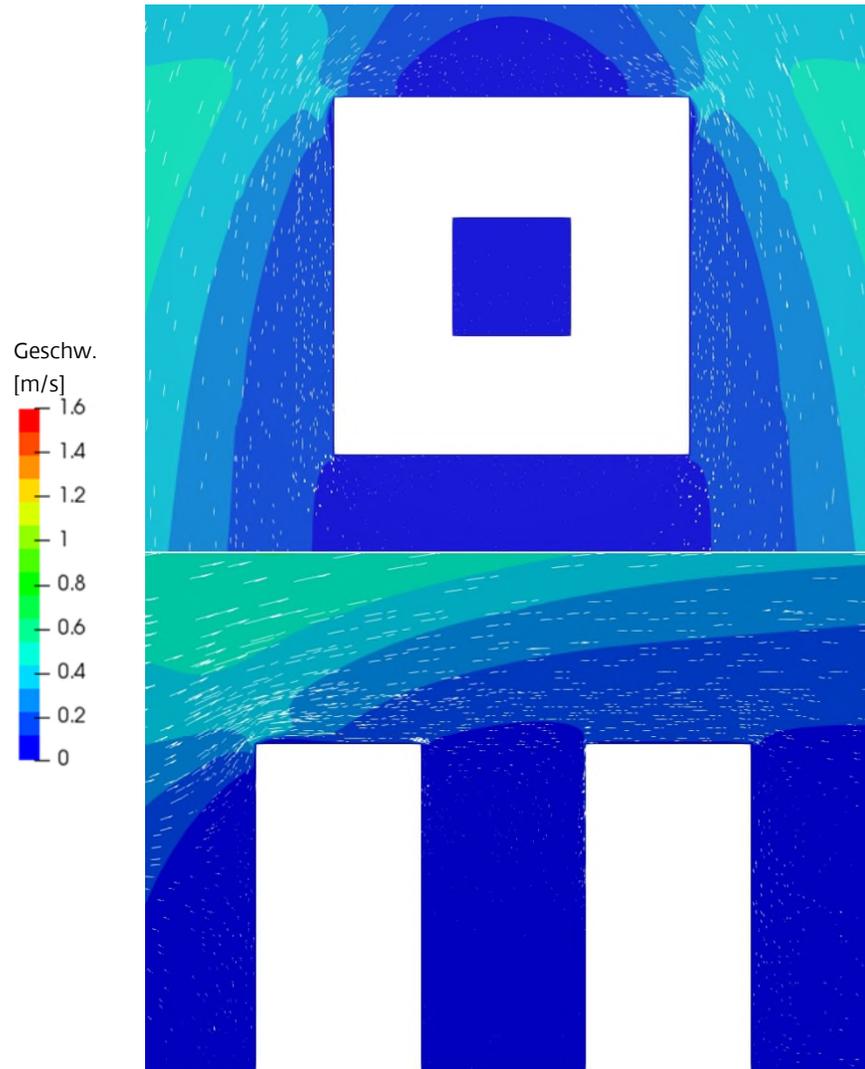
Abb. 297: Visualisierung des Age of Air



Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

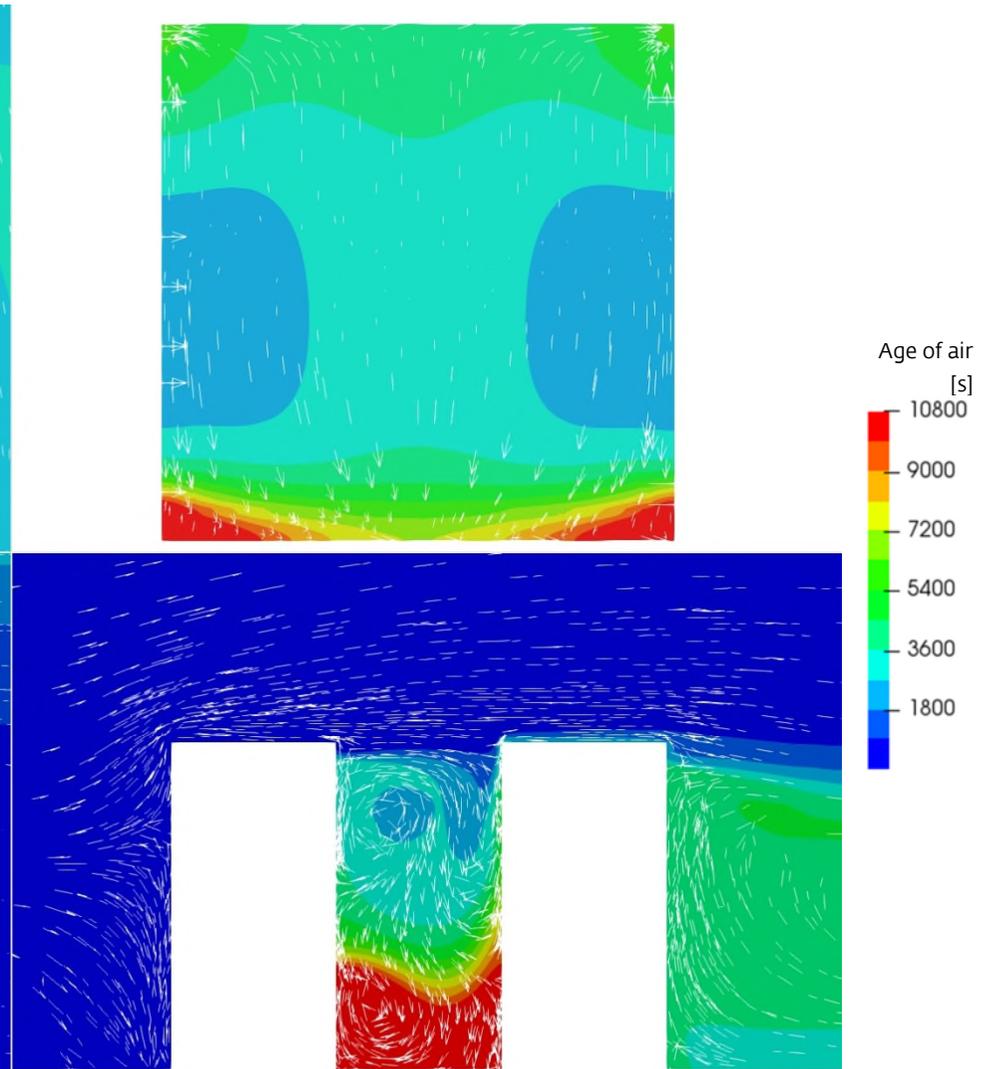
10.2.19. S19: G = 7, AR = 2.0, Auftrieb, Wind 0.5 m/s

Abb. 298: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

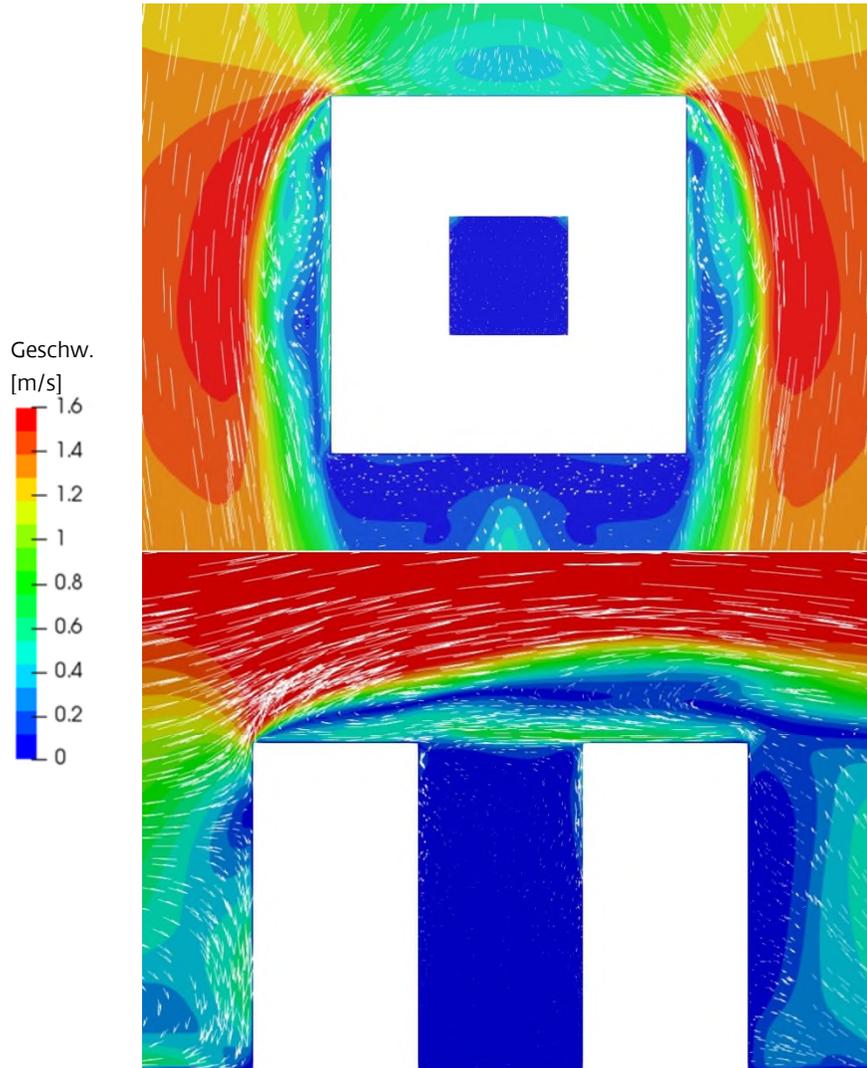
Abb. 299: Visualisierung des Age of Air



Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

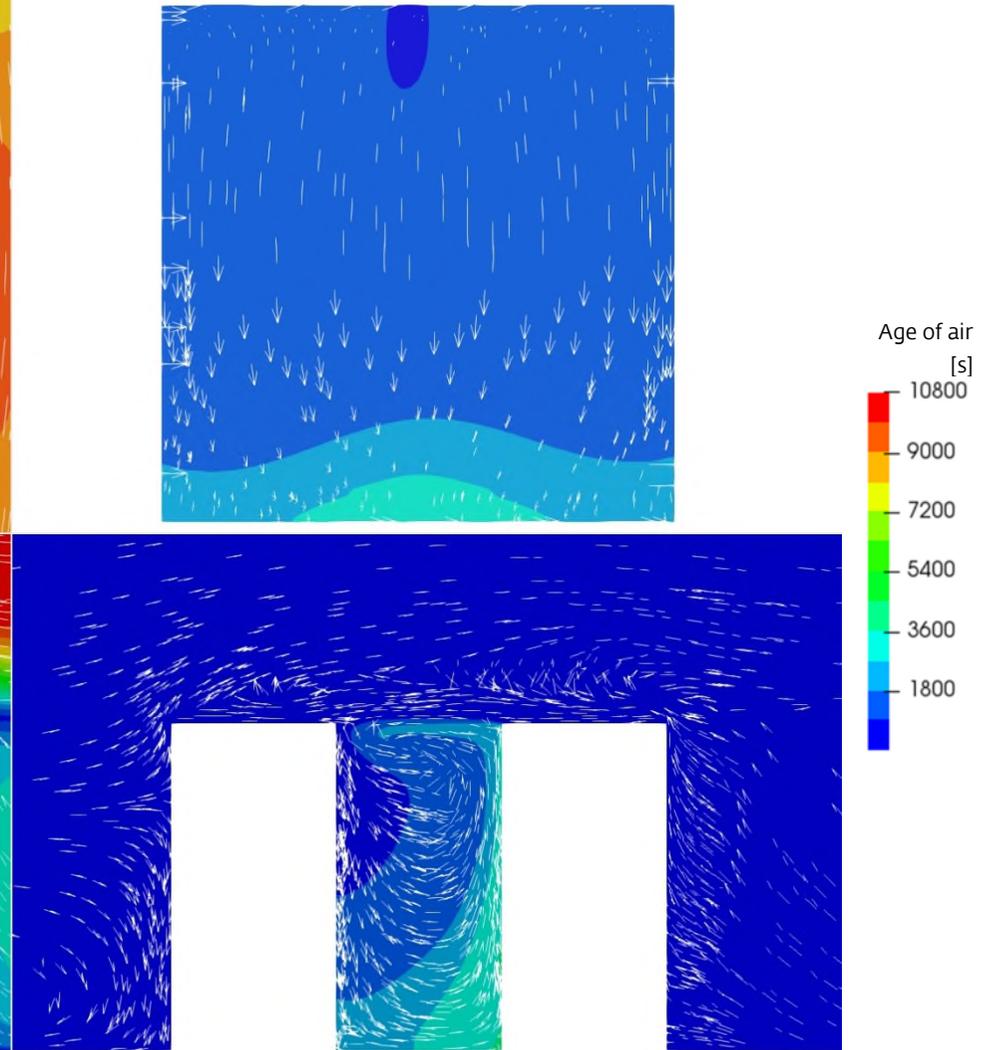
10.2.20. S20: G = 7, AR = 2.0, Auftrieb, Wind 1.5 m/s

Abb. 300: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

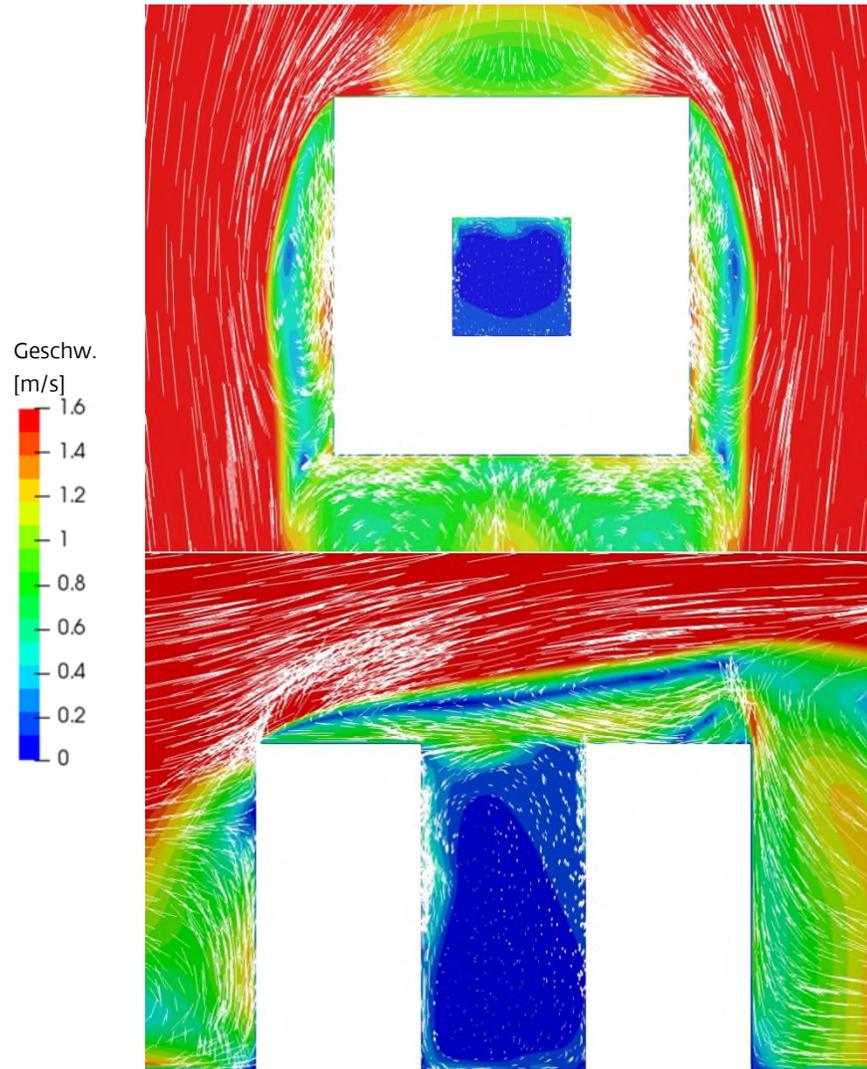
Abb. 301: Visualisierung des Age of Air



Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

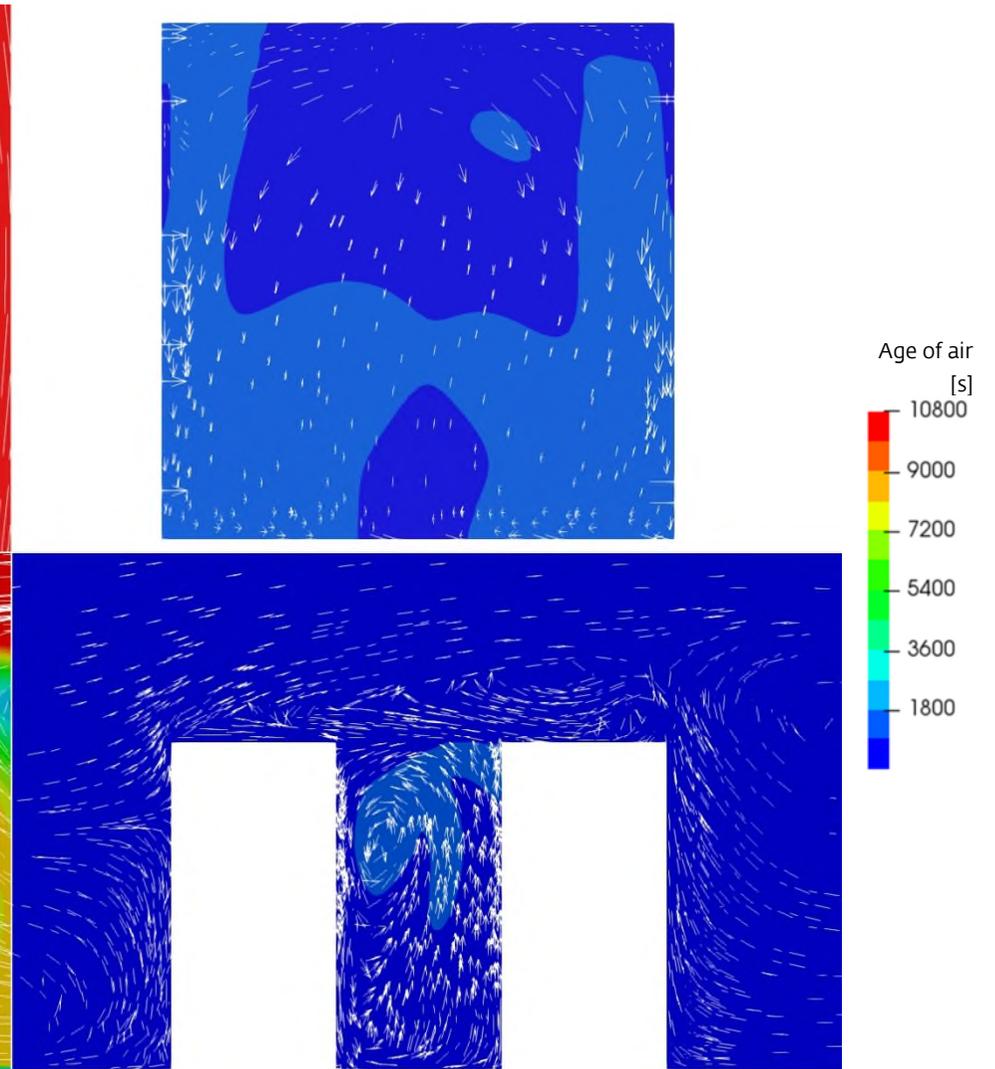
10.2.21. S21: G = 7, AR = 2.0, Auftrieb, Wind 3.0 m/s

Abb. 302: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

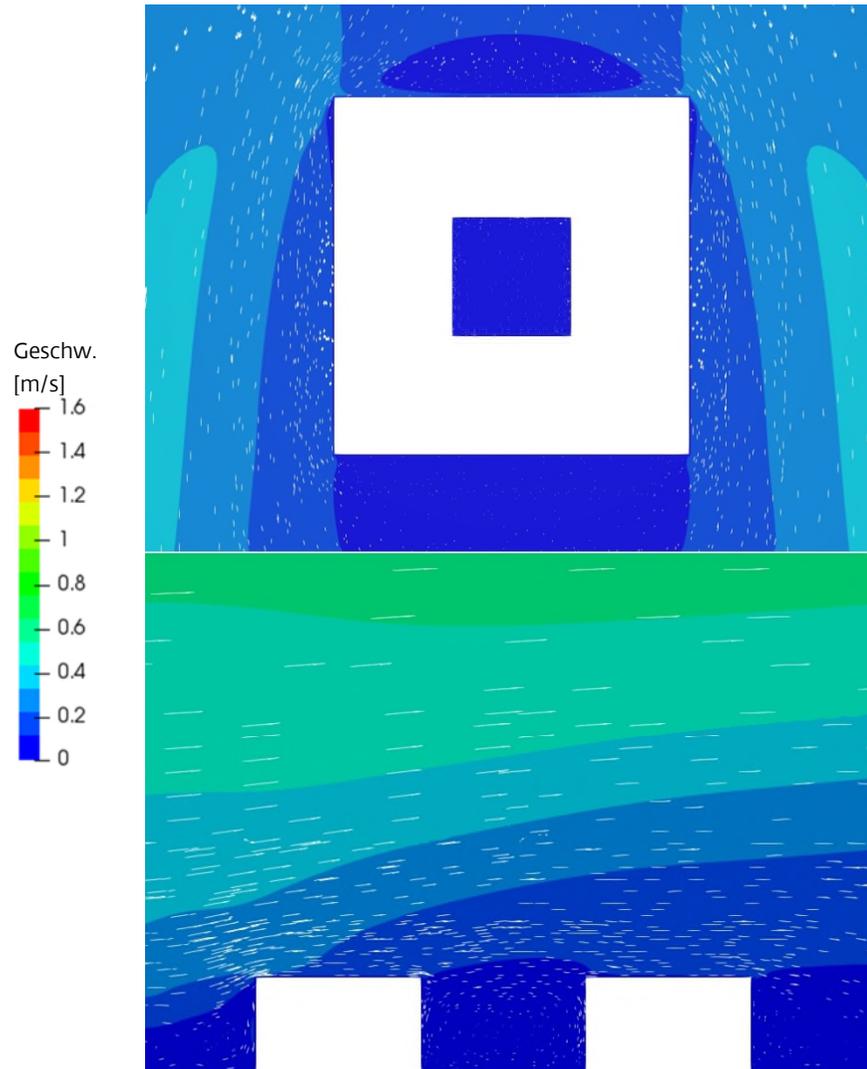
Abb. 303: Visualisierung des Age of Air



Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

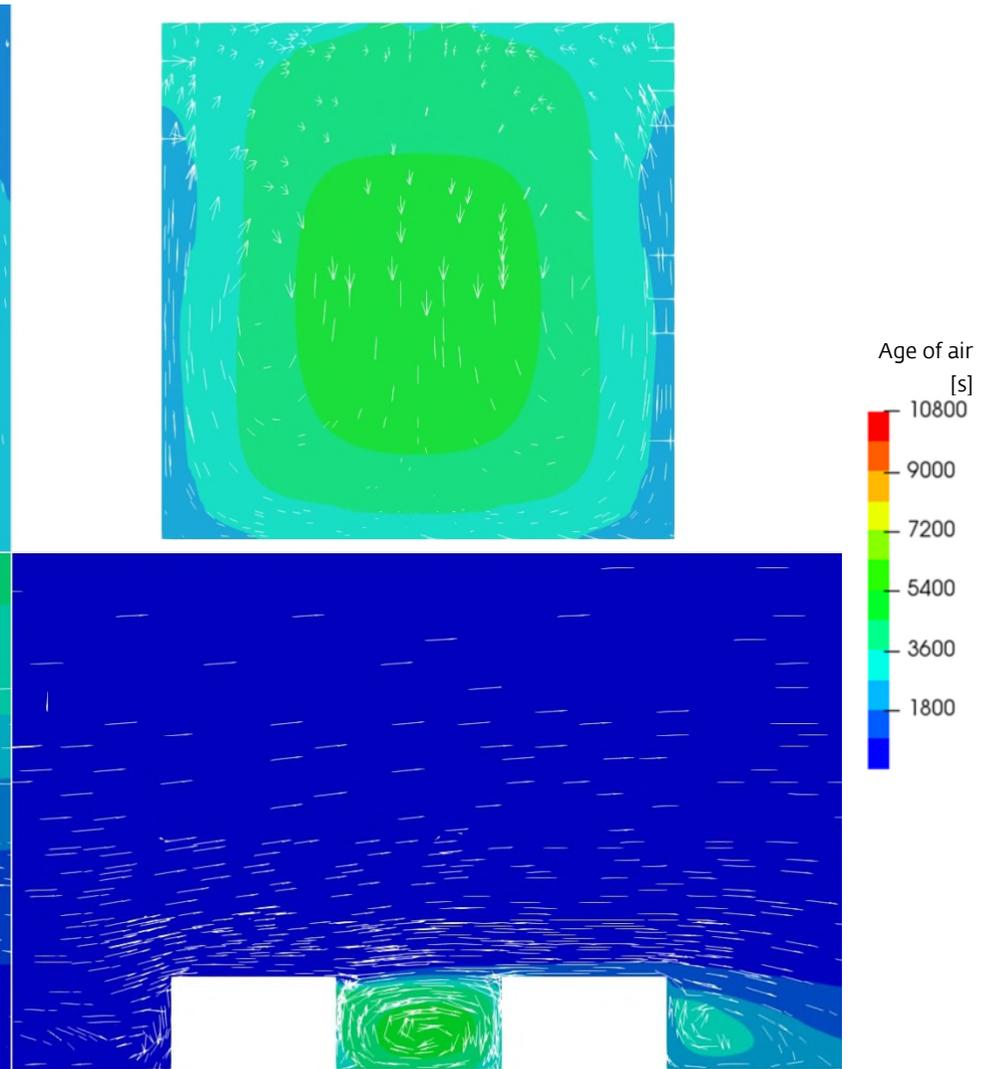
10.2.22. S22: G = 2, AR = 0.6, isotherm, Wind 0.5 m/s

Abb. 304: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

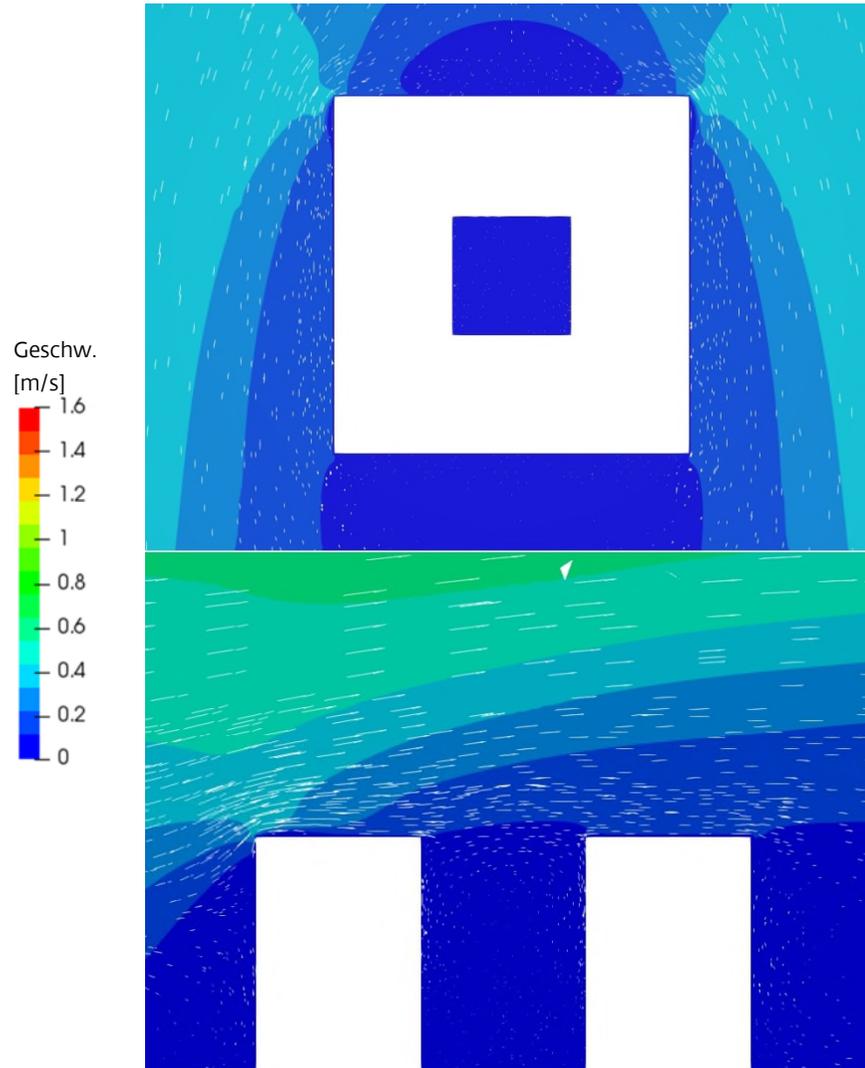
Abb. 305: Visualisierung des Alters der Luft



Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

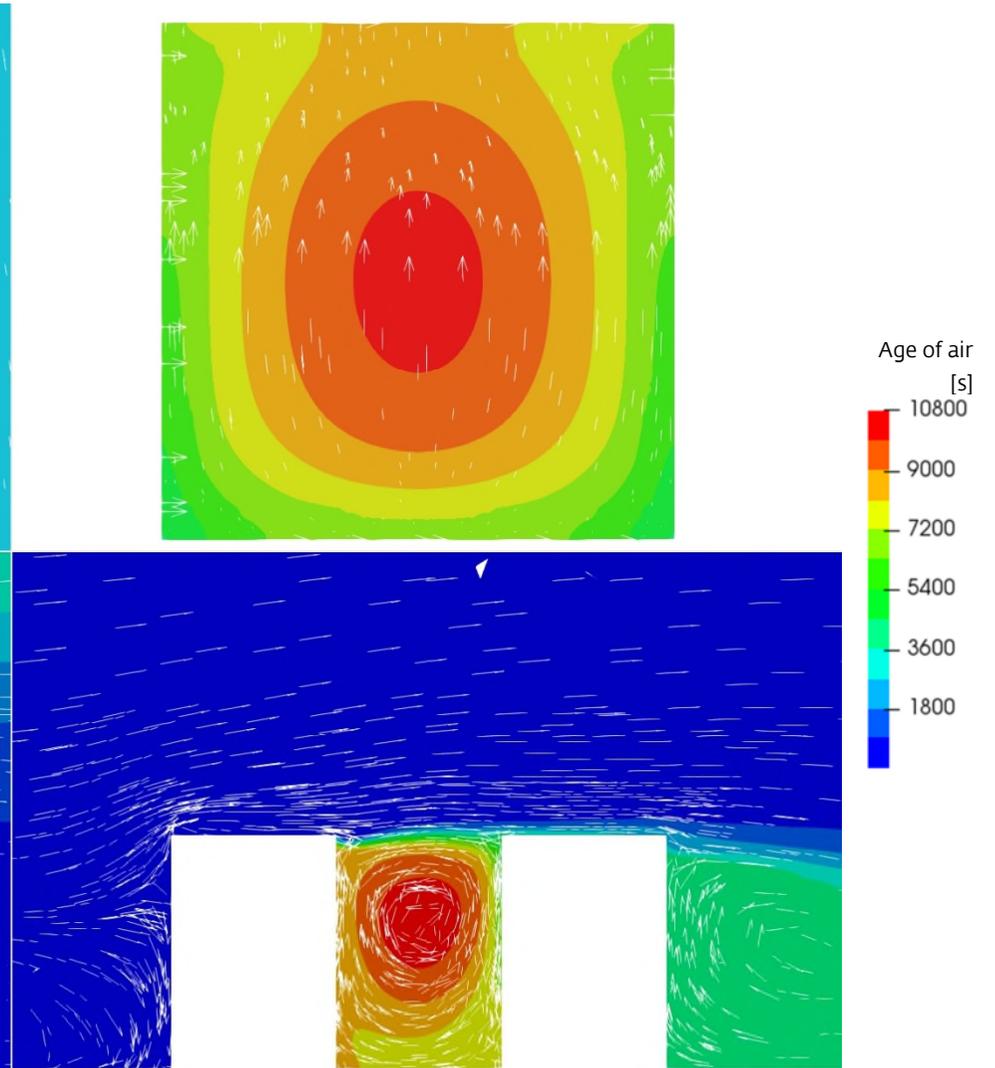
10.2.23. S23: G = 5, AR = 1.4, isotherm, Wind 0.5 m/s

Abb. 306: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

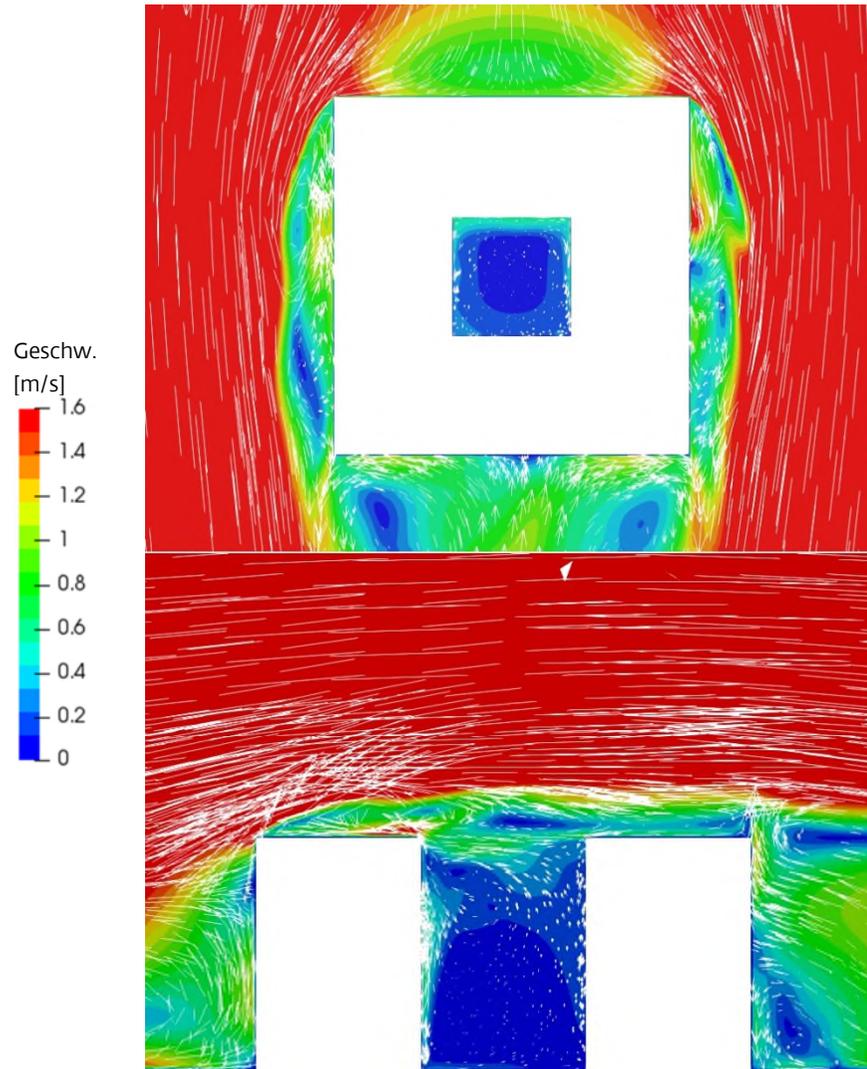
Abb. 307: Visualisierung des Age of Air



Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

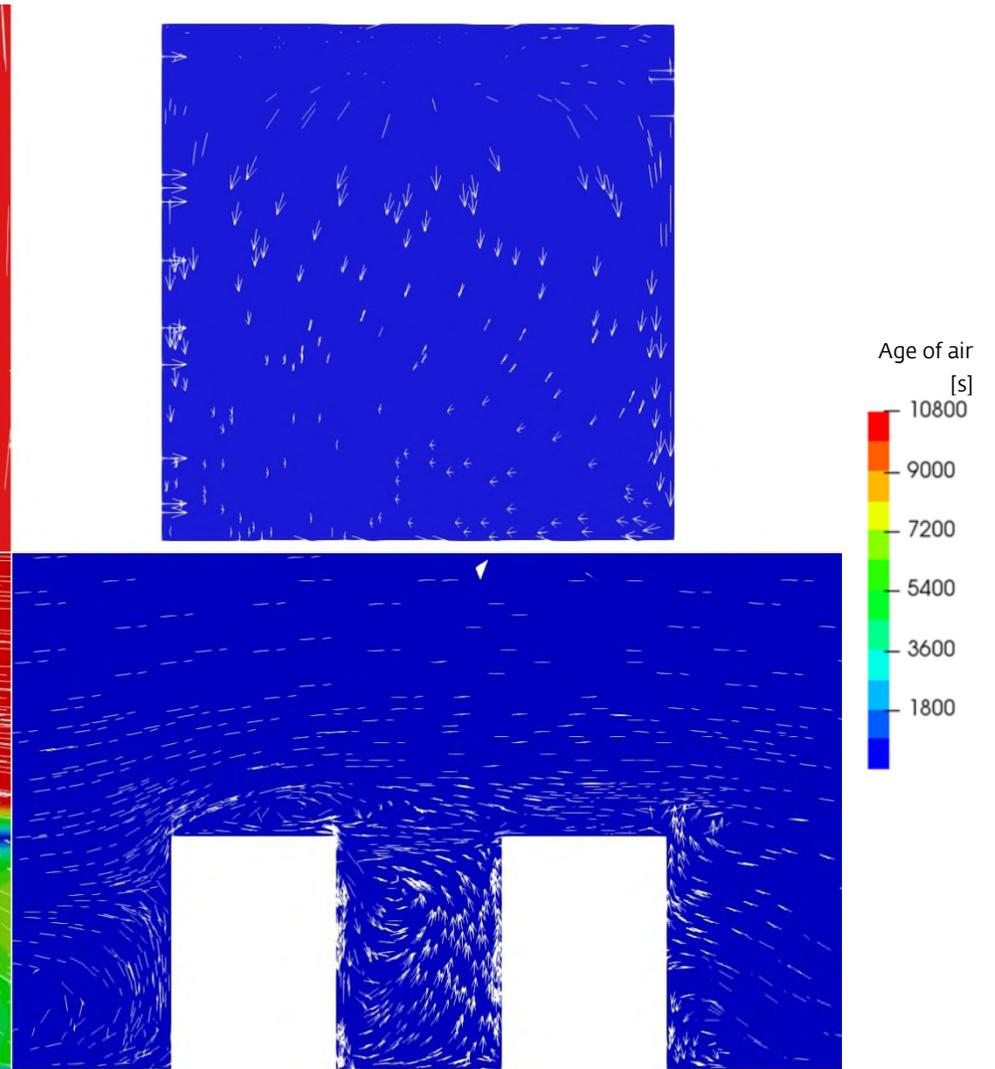
10.2.24. S24: G = 5, AR = 1.4, isotherm, Wind 3.0 m/s

Abb. 308: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

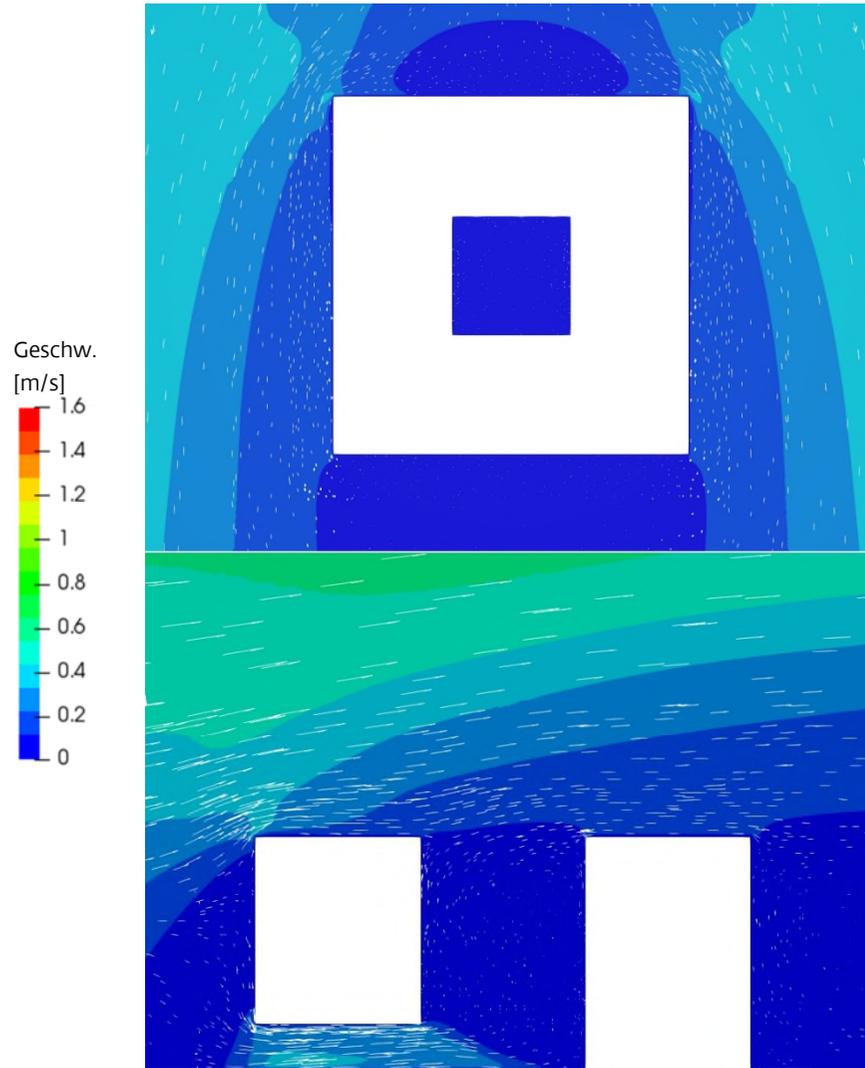
Abb. 309: Visualisierung des Age of Air



Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

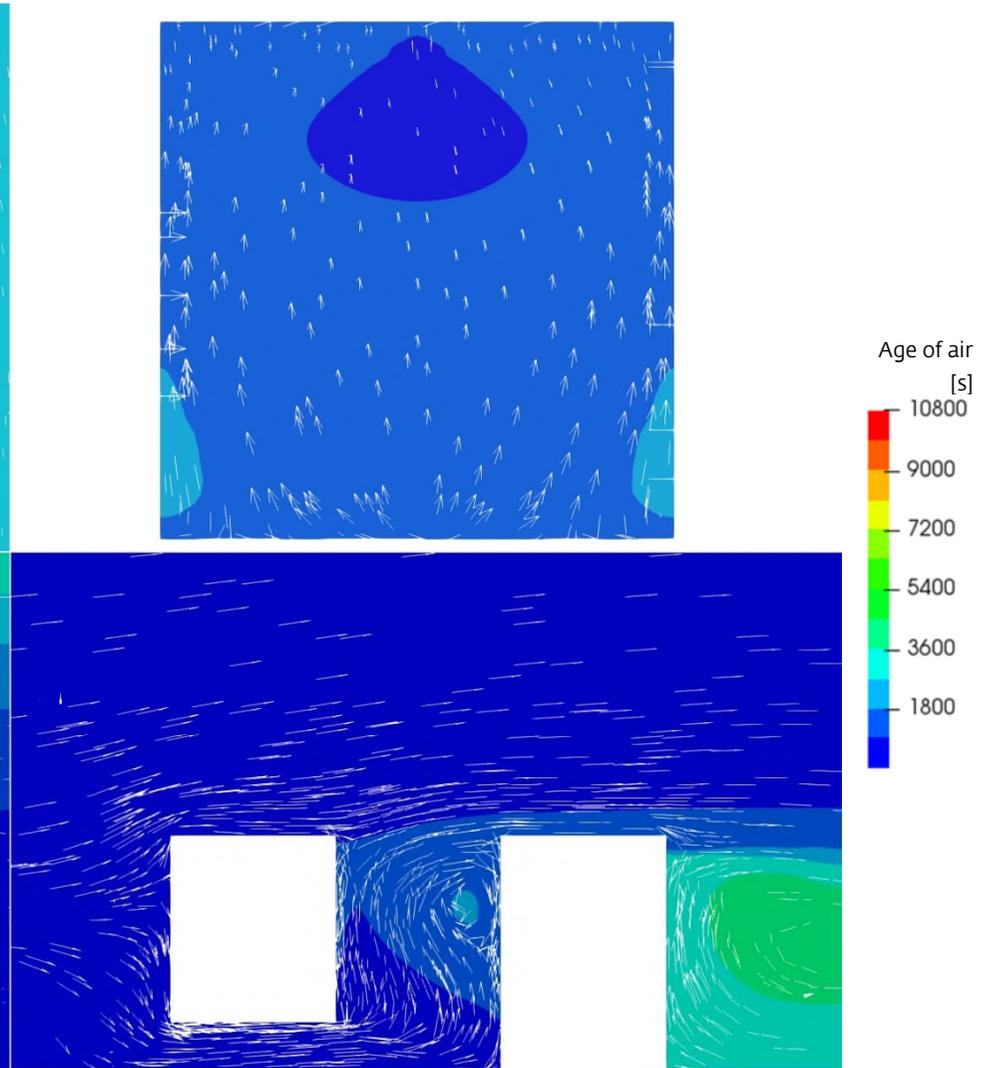
10.2.25. S25: G = 5, AR = 1.4, isotherm, Wind 0.5 m/s, WR 0°, DF 20 %

Abb. 310: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

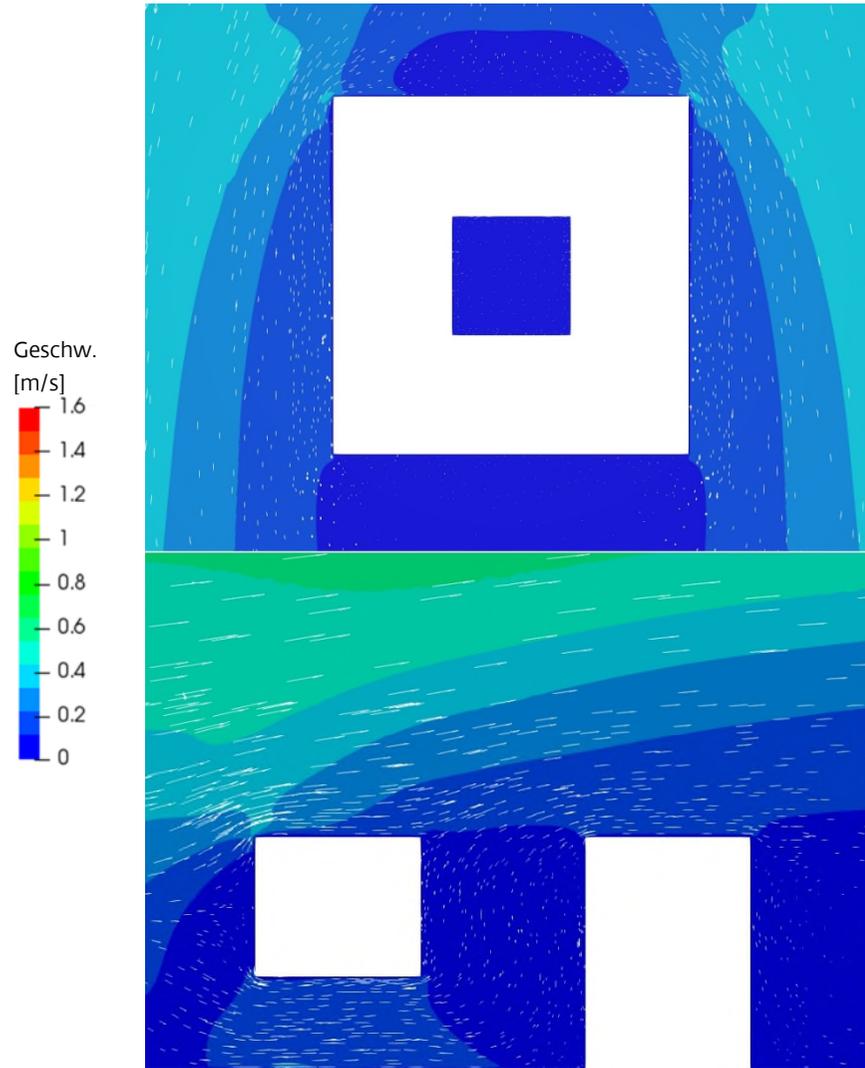
Abb. 311: Visualisierung des Age of Air



Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

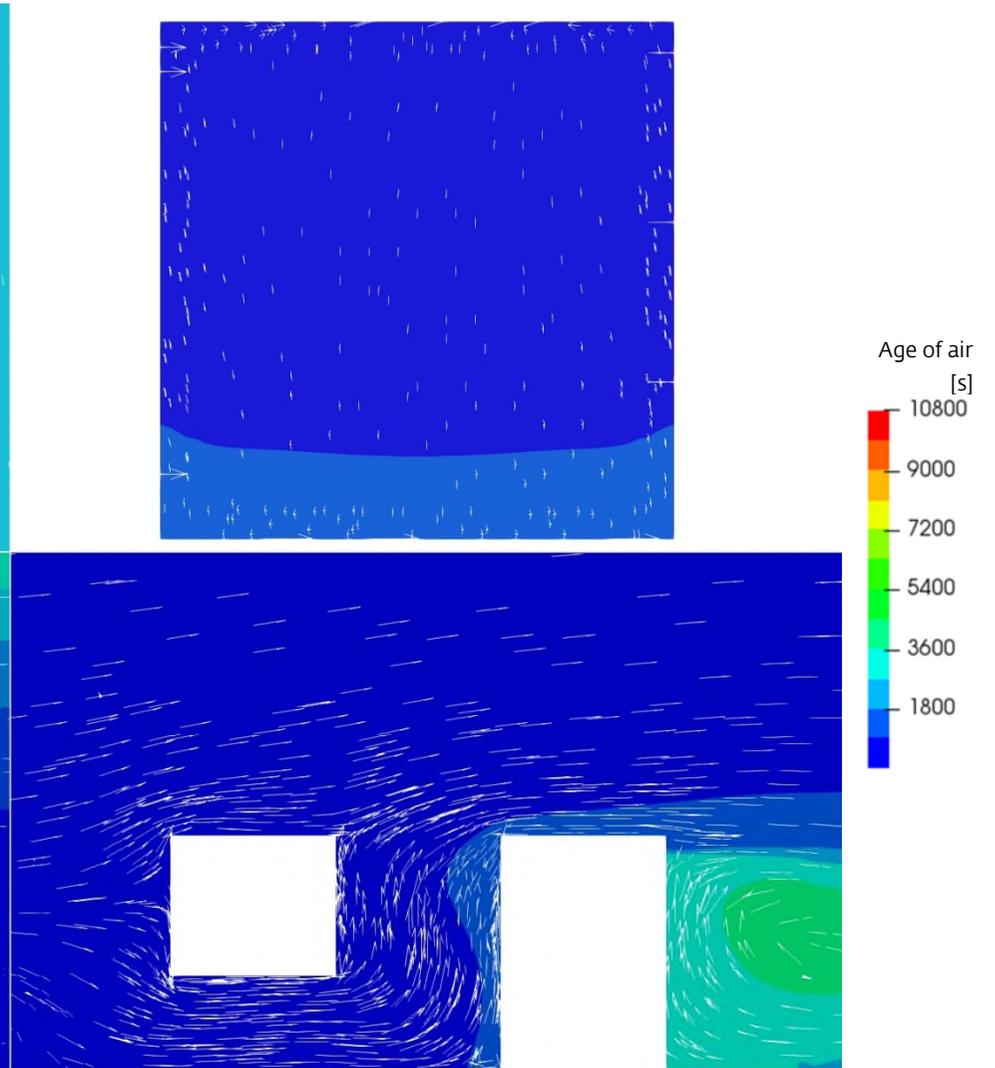
10.2.26. S26: G = 5, AR = 1.4, isotherm, Wind 0.5 m/s, WR 0°, DF 40 %

Abb. 312: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

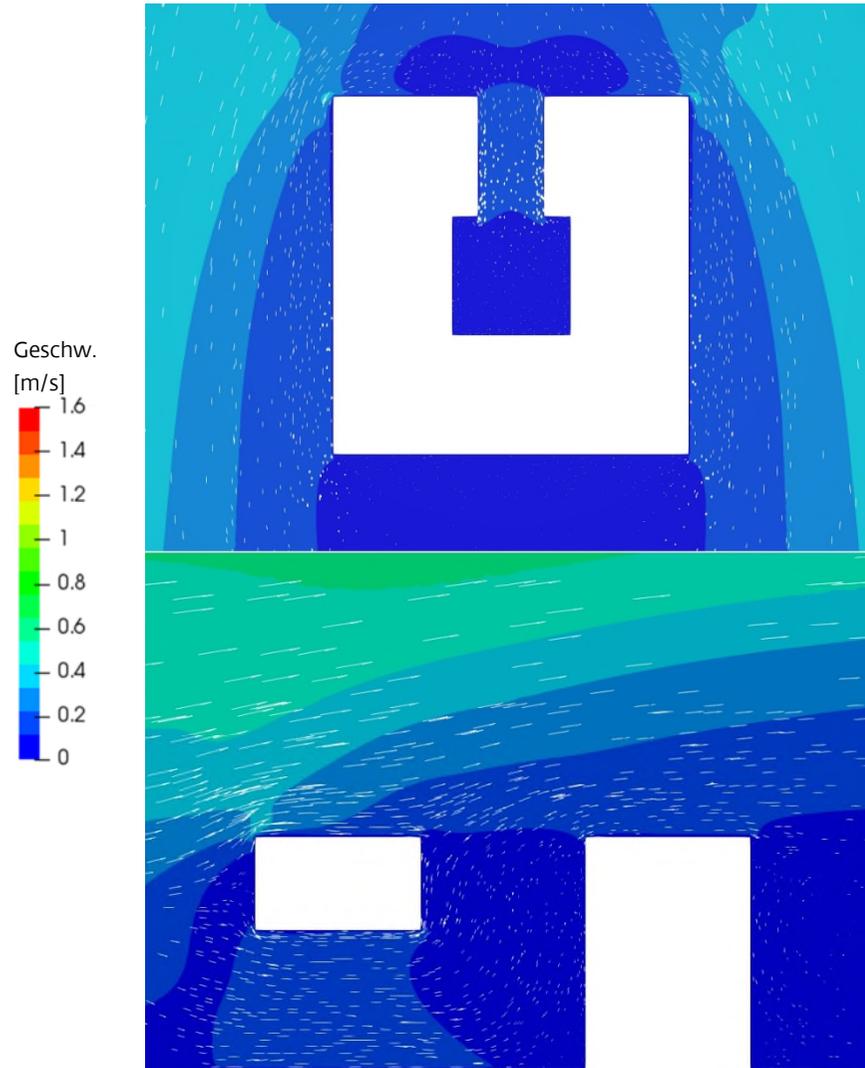
Abb. 313: Visualisierung des Age of Air



Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

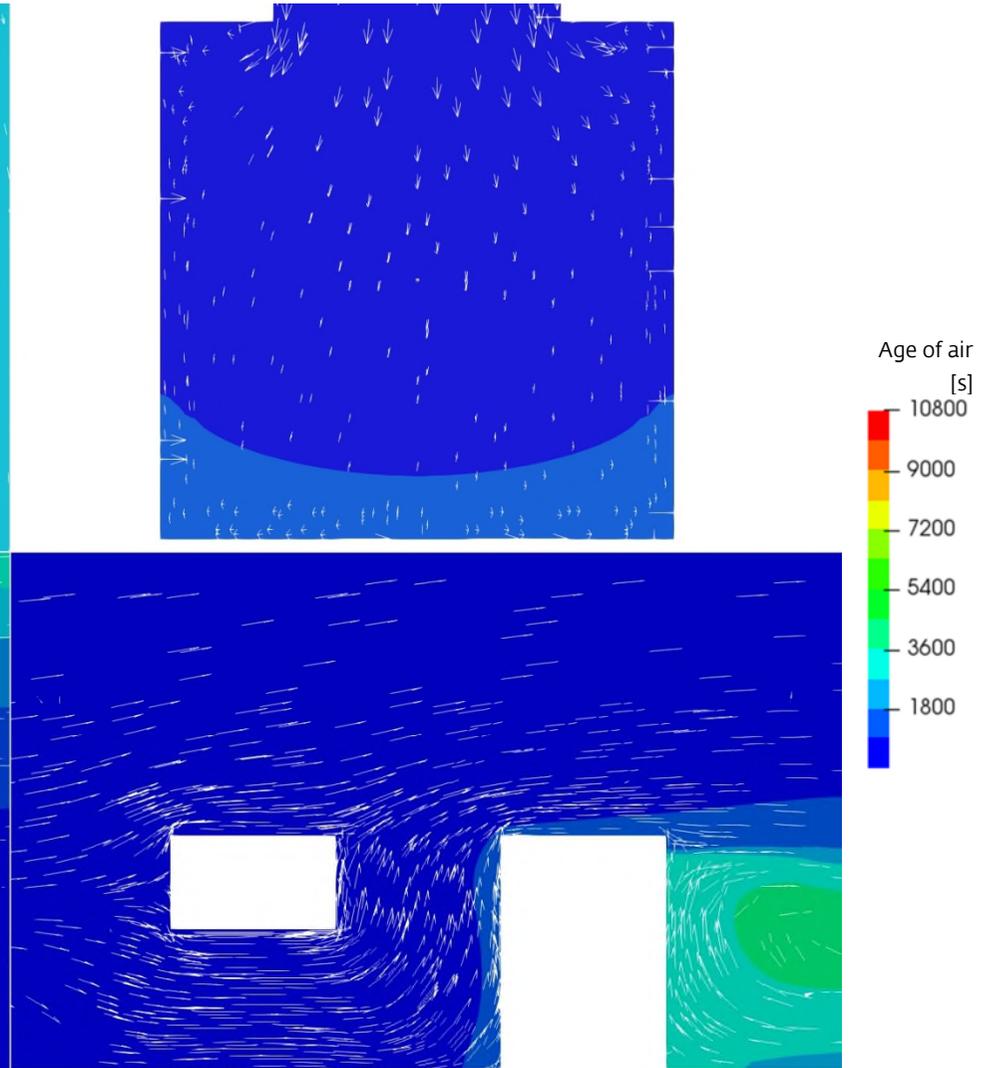
10.2.27. S27: G = 5, AR = 1.4, isotherm, Wind 0.5 m/s, WR 0°, DF 60 %

Abb. 314: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

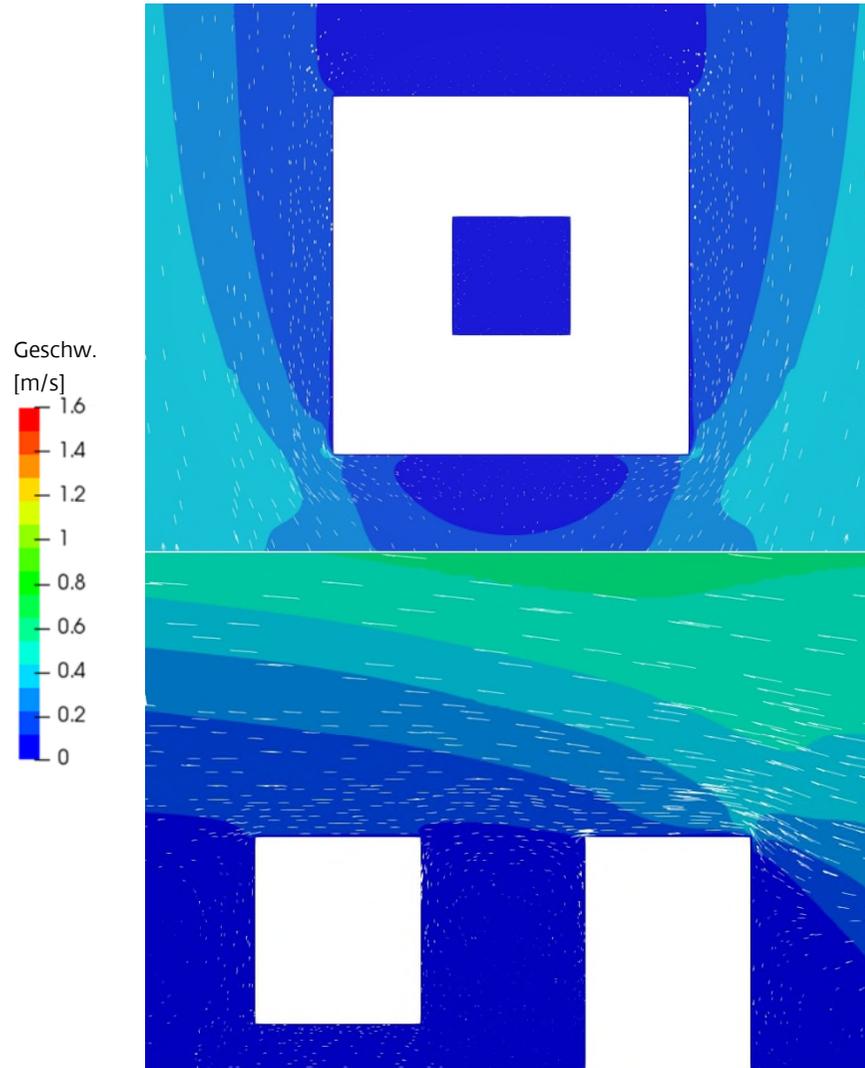
Abb. 315: Visualisierung des Age of Air



Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

10.2.28. S28: G = 5, AR = 1.4, isotherm, Wind 0.5 m/s, WR 180°, DF 20 %

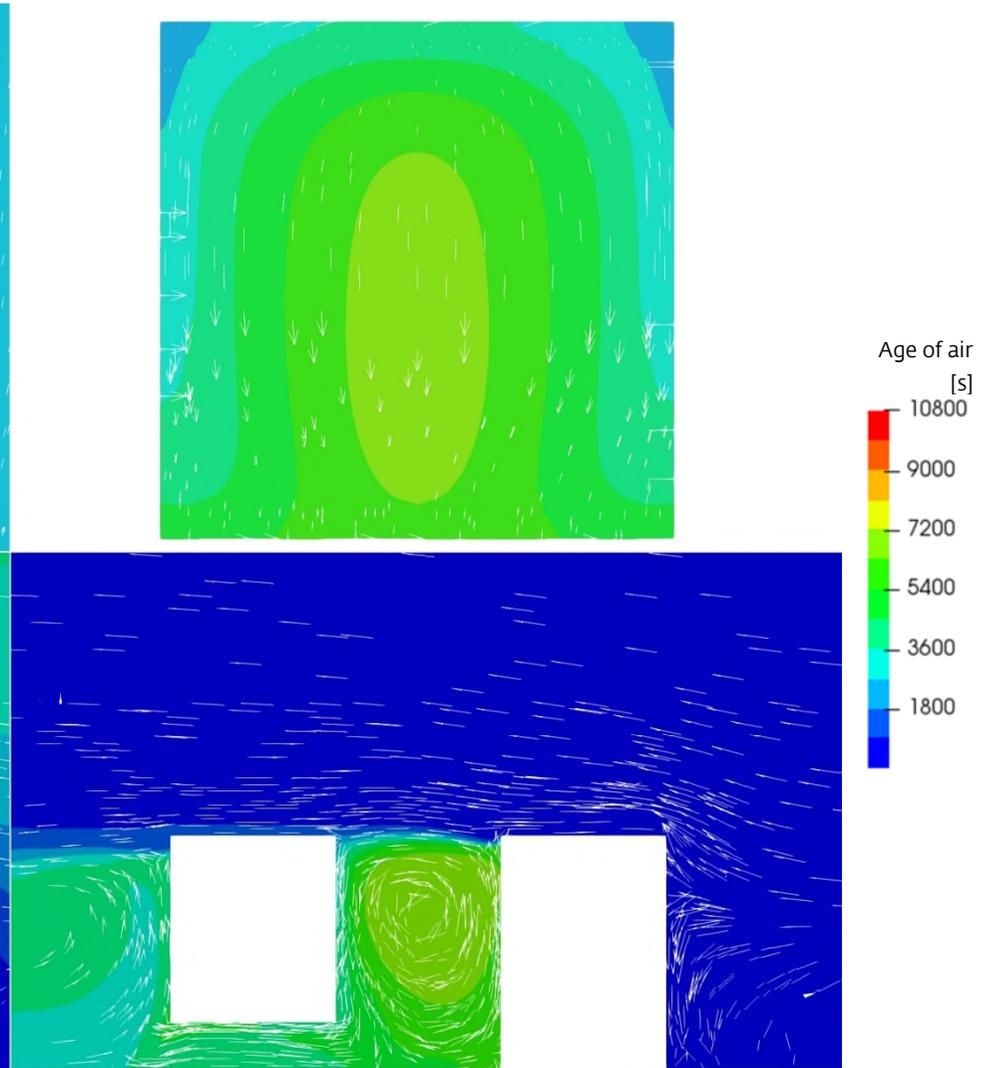
Abb. 316: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Geschw.
[m/s]
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0

Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

Abb. 317: Visualisierung des Age of Air

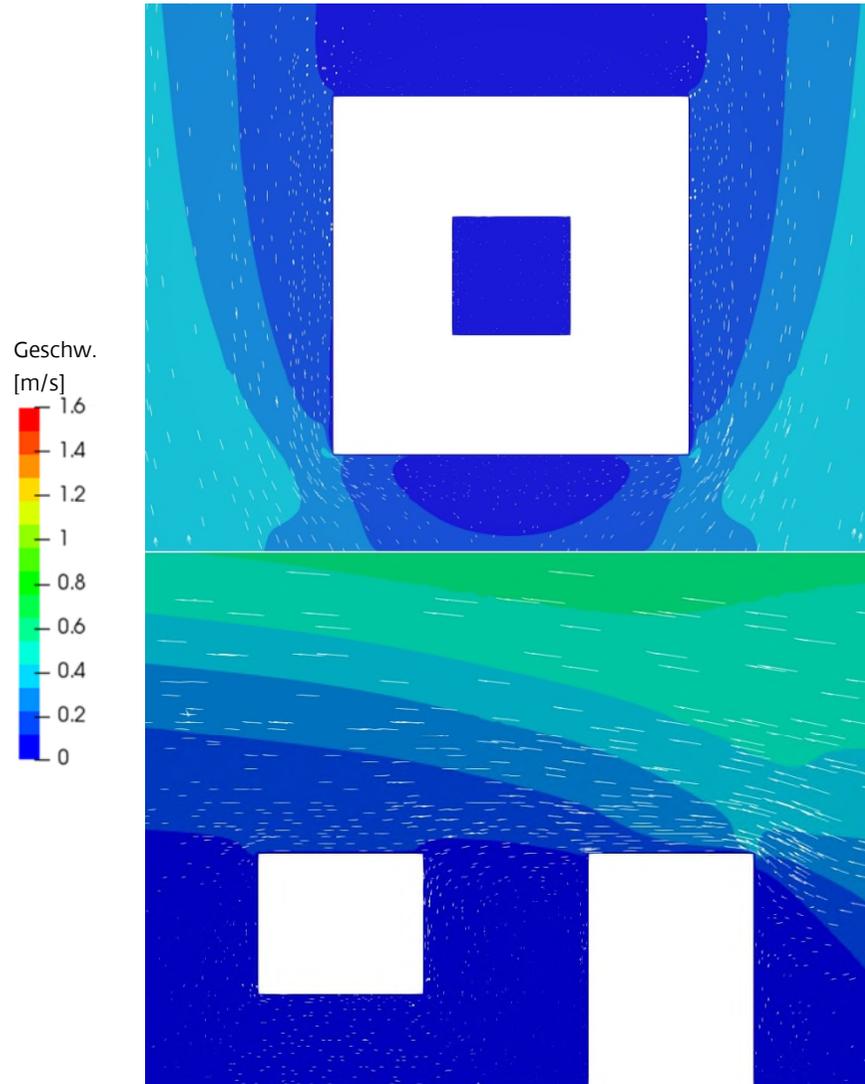


Age of air
[s]
10800
9000
7200
5400
3600
1800

Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

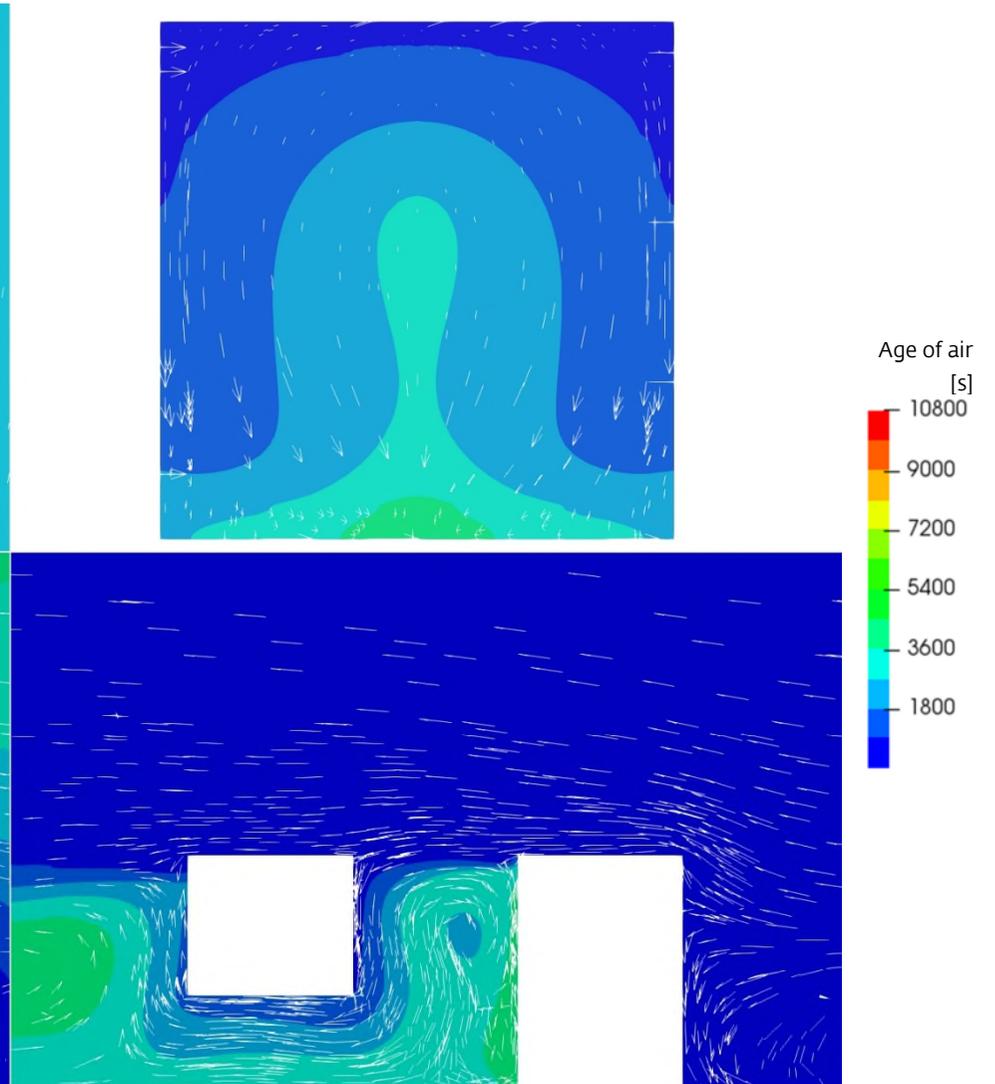
10.2.29. S29: G = 5, AR = 1.4, isotherm, Wind 0.5 m/s, WR 180°, DF 40 %

Abb. 318: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

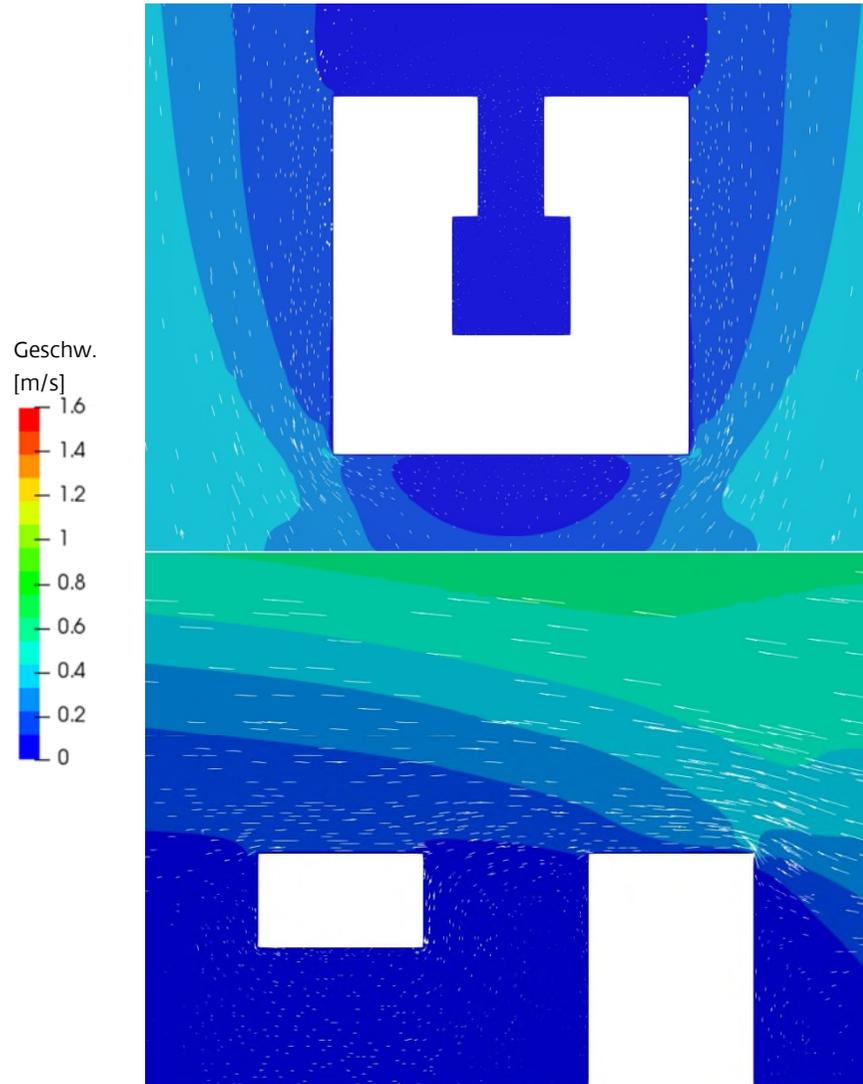
Abb. 319: Visualisierung des Age of Air



Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

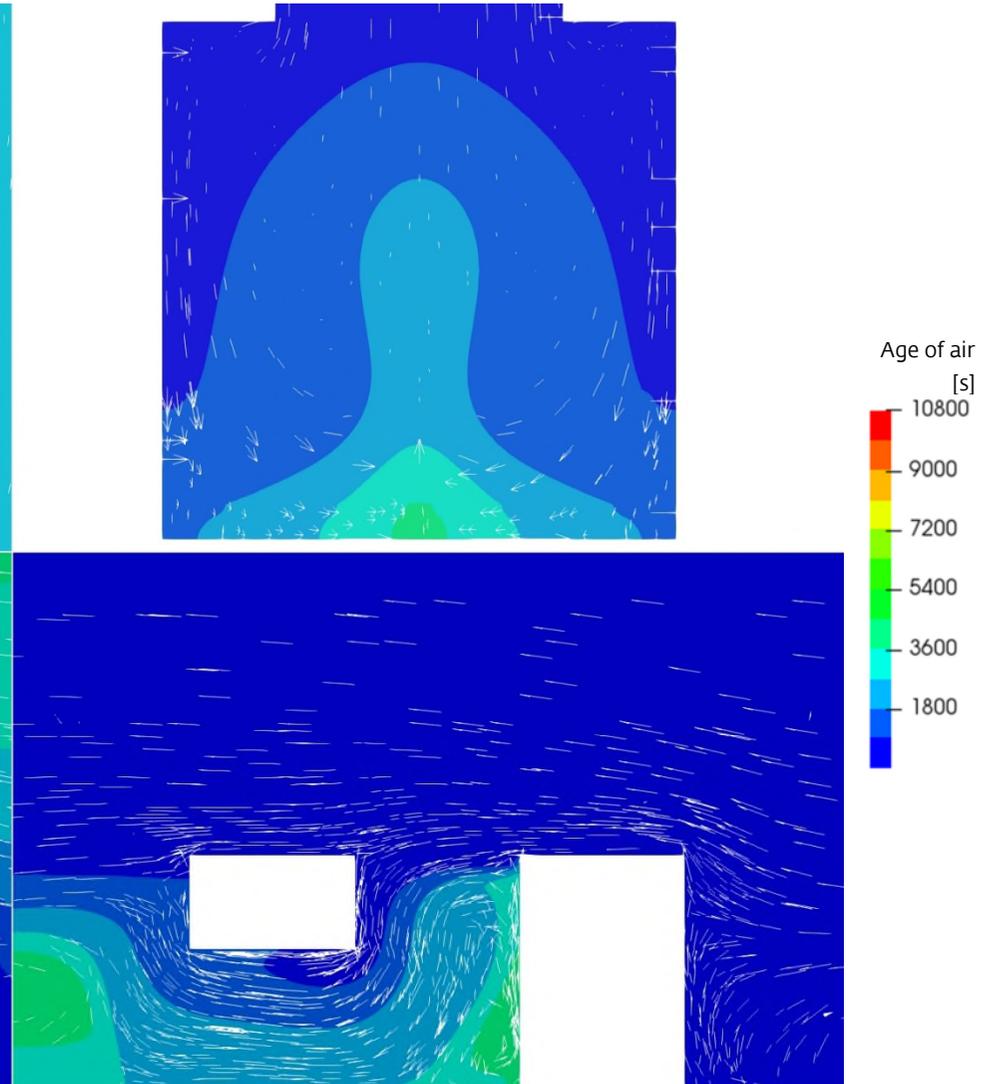
10.2.30. S30: G = 5, AR = 1.4, isotherm, Wind 0.5 m/s, WR 180°, DF 60 %

Abb. 320: Visualisierung der Luftströmung und Luftgeschwindigkeit



Pfeile der Strömungsvektoren sind skaliert nach Luftgeschwindigkeit

Abb. 321: Visualisierung des Age of Air



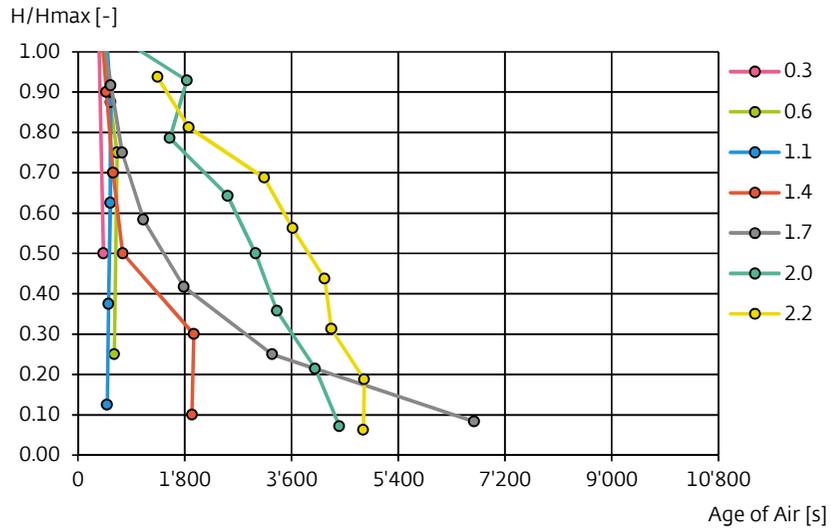
Pfeile der Strömungsvektoren wurden nicht skaliert

10.3. Modul 2: Vergleich mit Bewertung nach Parameter

10.3.1. Bewertung nach AR

Isotherm, WR 0, Wind 1.5 m/s

Abb. 322: Age of Air – Mittelwert pro Geschoss



Auftrieb, WR 0, Wind 0.5 m/s

Abb. 324: Age of Air – Mittelwert pro Geschoss

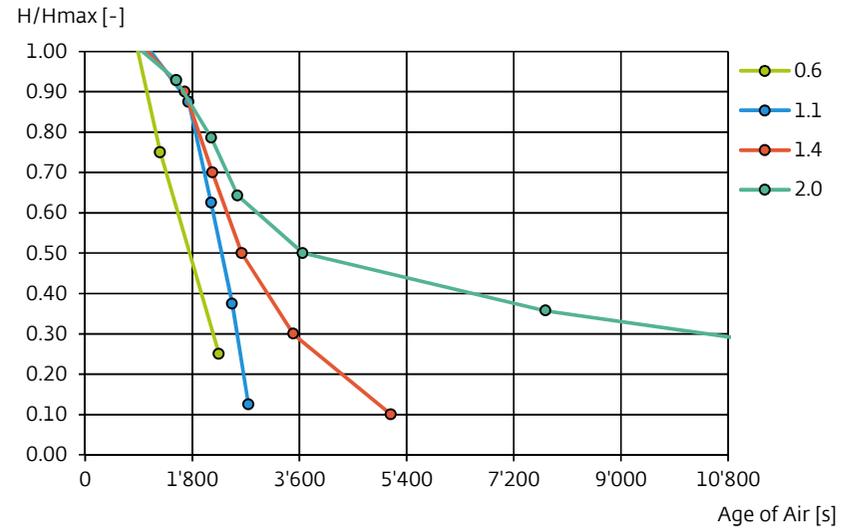


Abb. 323: Age of Air – vertikaler Verlauf zentral im IH (V1)

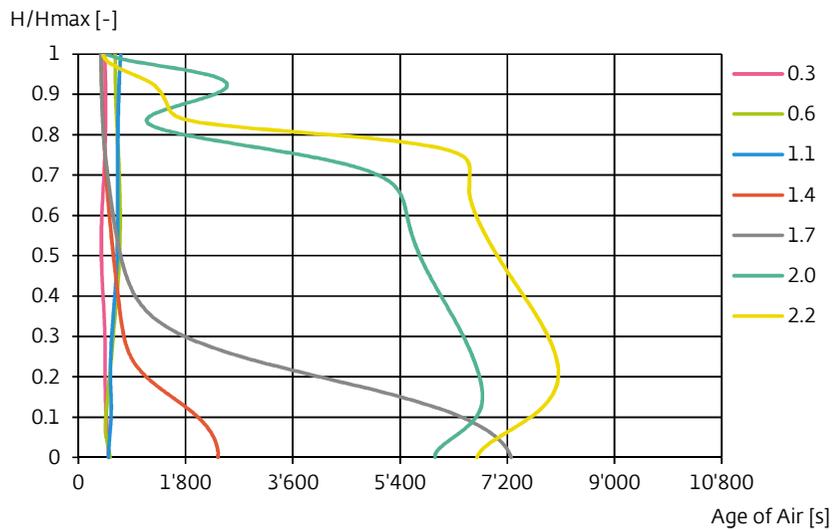
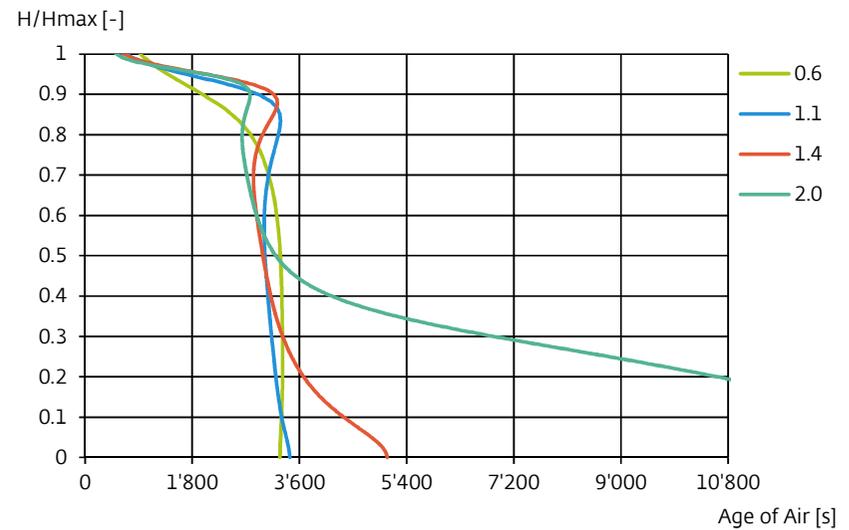
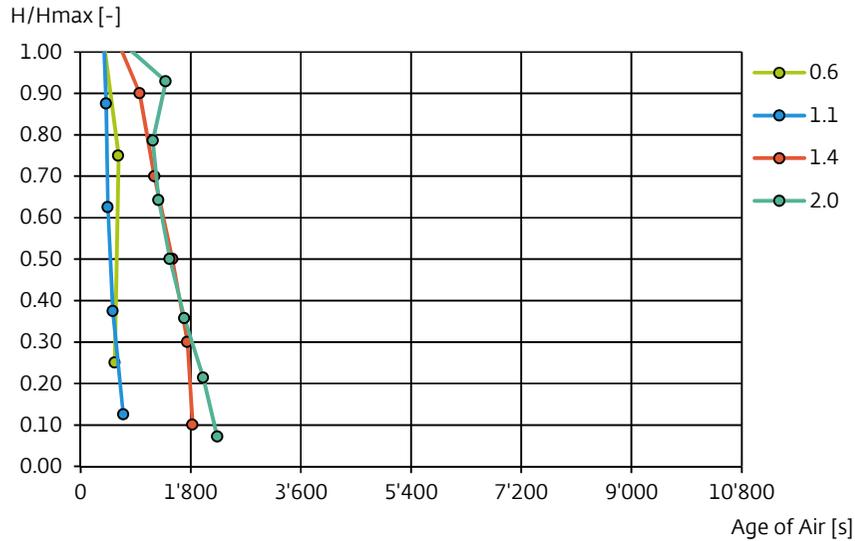


Abb. 325: Age of Air – vertikaler Verlauf zentral im IH (V1)



Auftrieb, WR 0, Wind 1.5 m/s

Abb. 326: Age of Air – Mittelwert pro Geschoss



10.3.2. Einfluss der Parameter: Windgeschwindigkeit Isotherm, AR 0.6, WR 0

Abb. 328: Age of Air – Mittelwert pro Geschoss

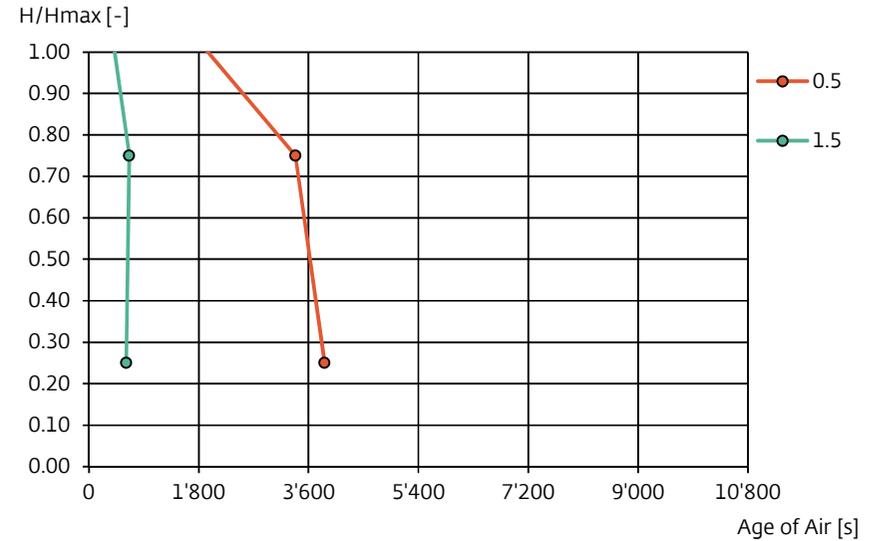


Abb. 327: Age of Air – vertikaler Verlauf zentral im IH (V1)

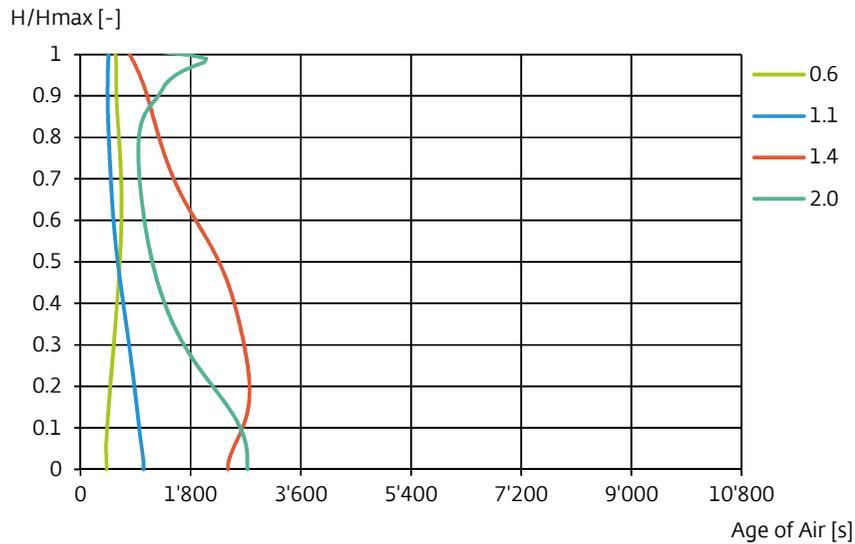
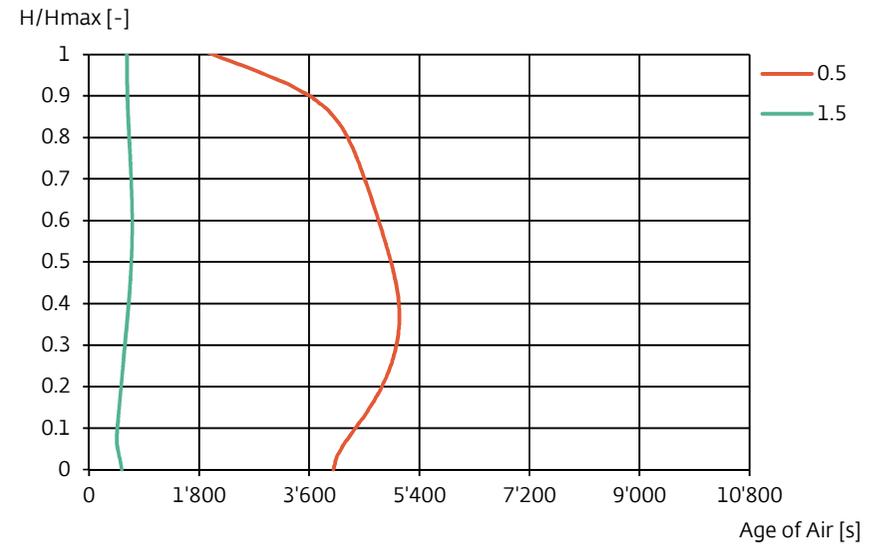
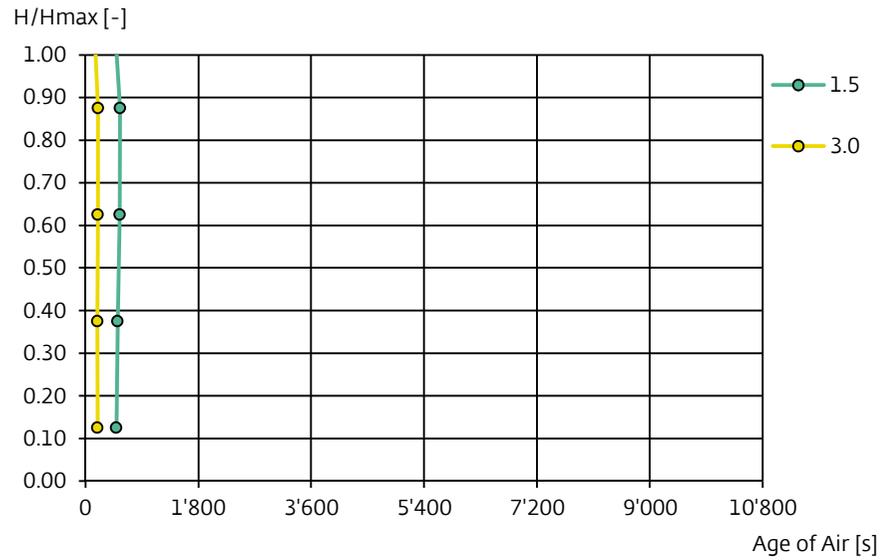


Abb. 329: Age of Air – vertikaler Verlauf zentral im IH (V1)



Isotherm, AR 1.1, WR 0

Abb. 330: Age of Air – Mittelwert pro Geschoss



Isotherm, AR 1.4, WR 0

Abb. 332: Age of Air – Mittelwert pro Geschoss

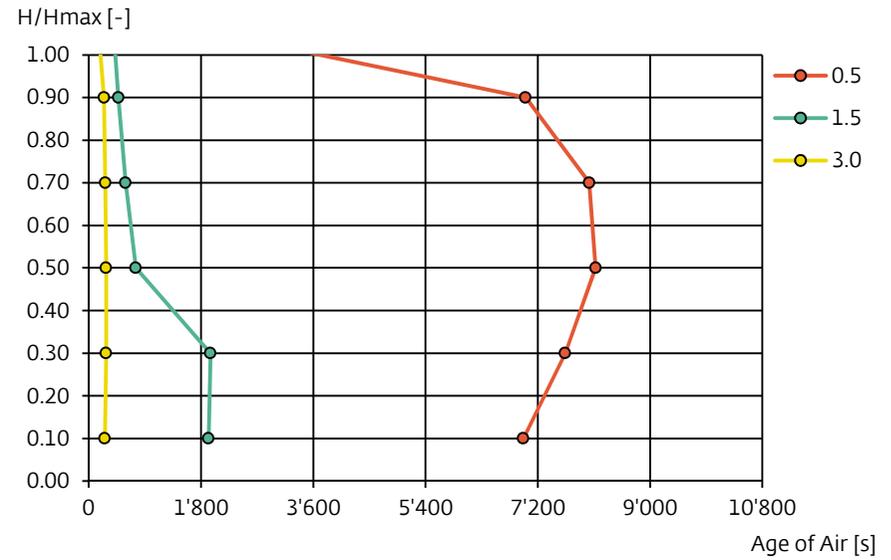


Abb. 331: Age of Air – vertikaler Verlauf zentral im IH (V1)

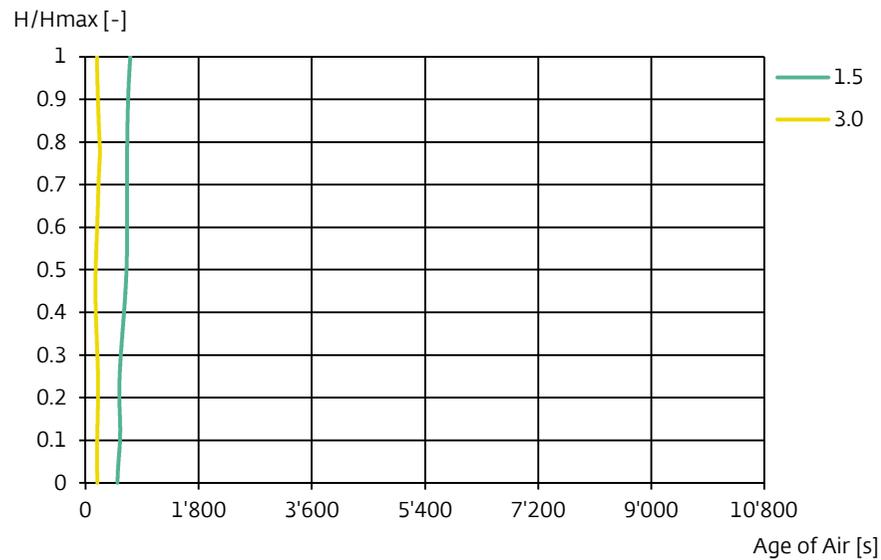
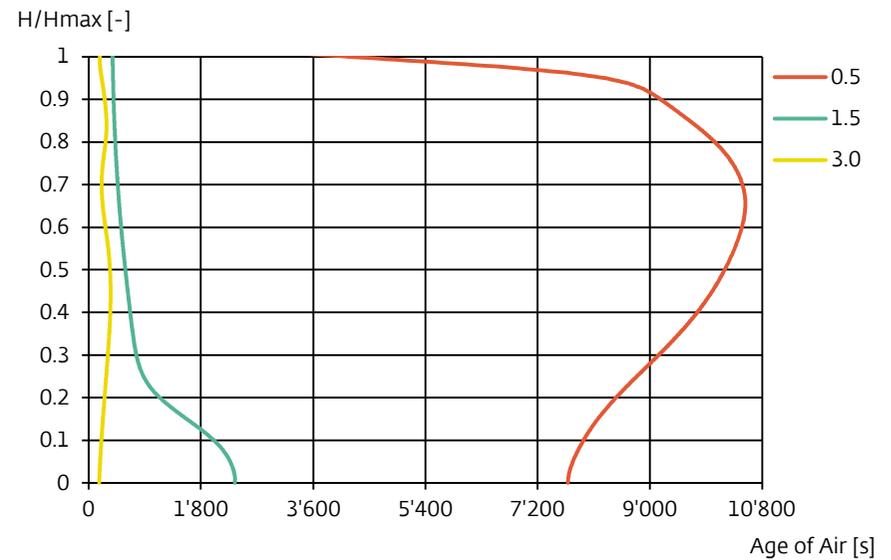
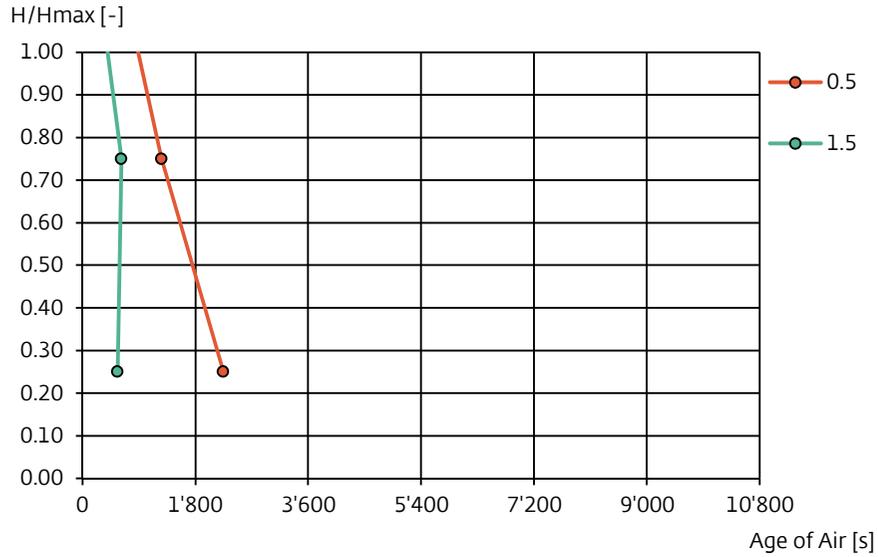


Abb. 333: Age of Air – vertikaler Verlauf zentral im IH (V1)



Auftrieb, AR 0.6, WR 0

Abb. 334: Age of Air – Mittelwert pro Geschoss



Auftrieb, AR 1.1, WR 0

Abb. 336: Age of Air – Mittelwert pro Geschoss

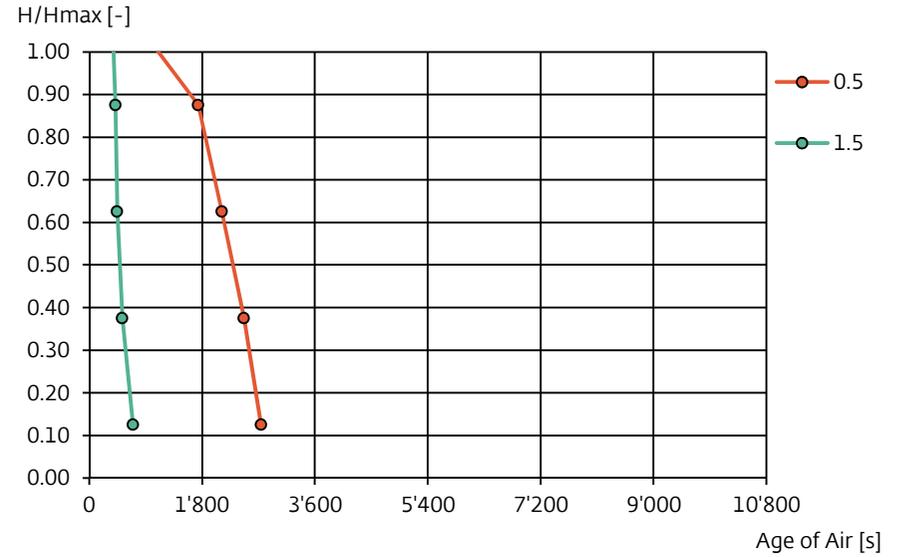


Abb. 335: Age of Air – vertikaler Verlauf zentral im IH (V1)

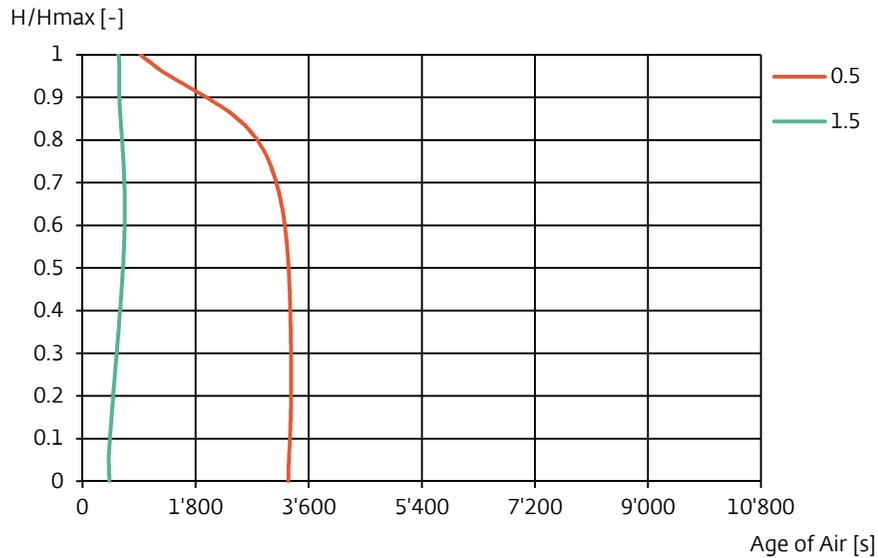
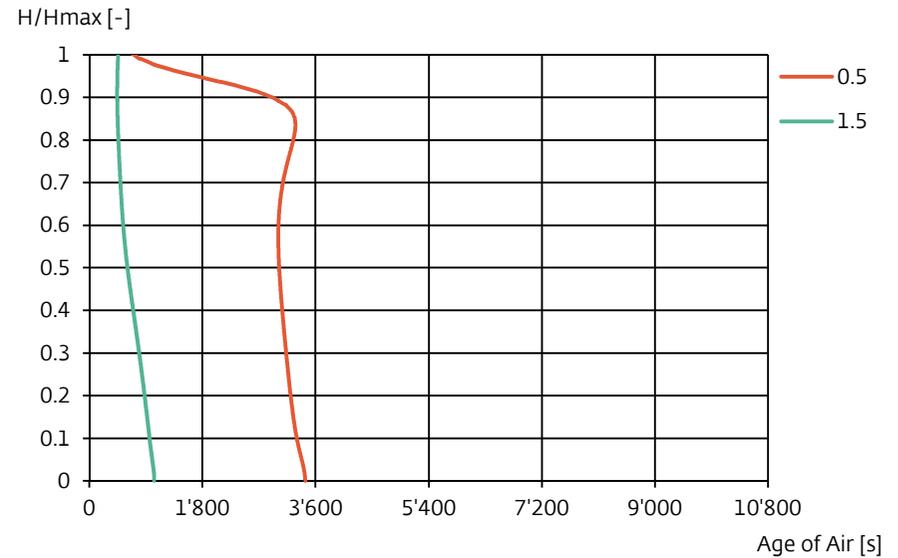
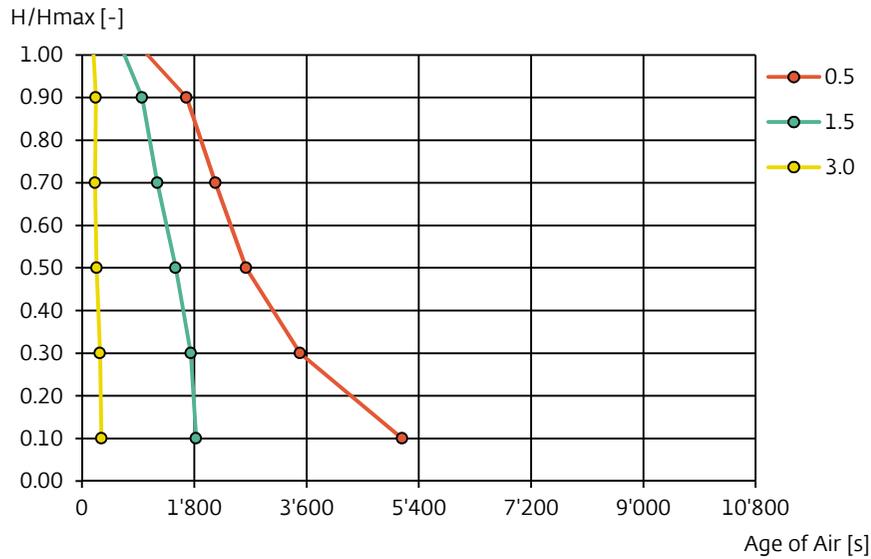


Abb. 337: Age of Air – vertikaler Verlauf zentral im IH (V1)



Auftrieb, AR 1.4, WR 0

Abb. 338: Age of Air – Mittelwert pro Geschoss



Auftrieb, AR 2.0, WR 0

Abb. 340: Age of Air – Mittelwert pro Geschoss

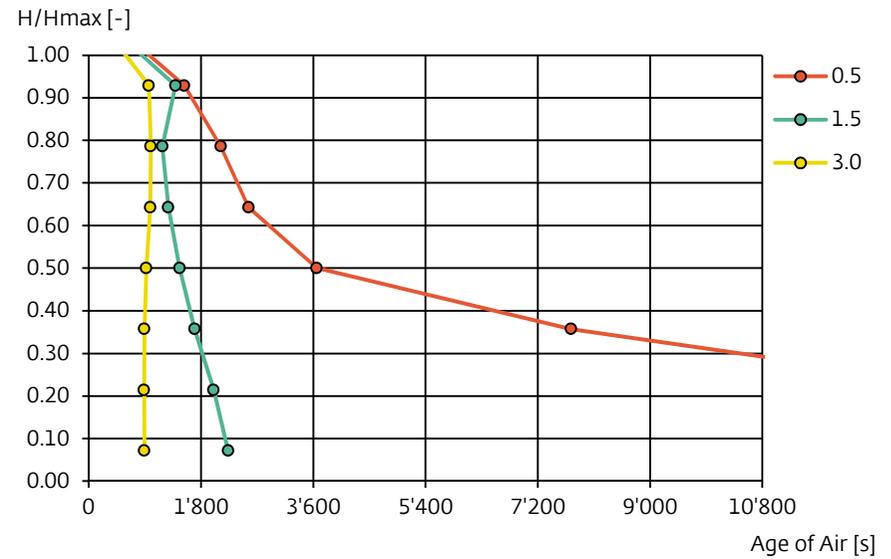


Abb. 339: Age of Air – vertikaler Verlauf zentral im IH (V1)

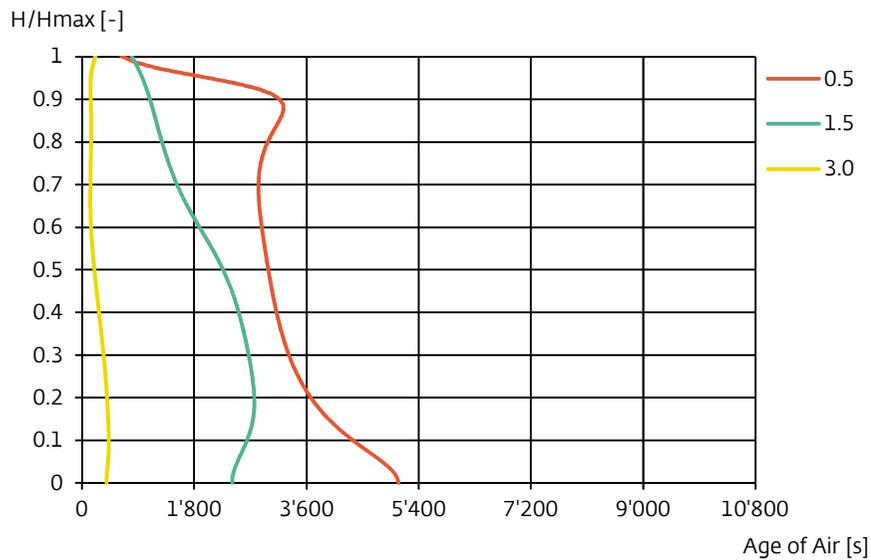
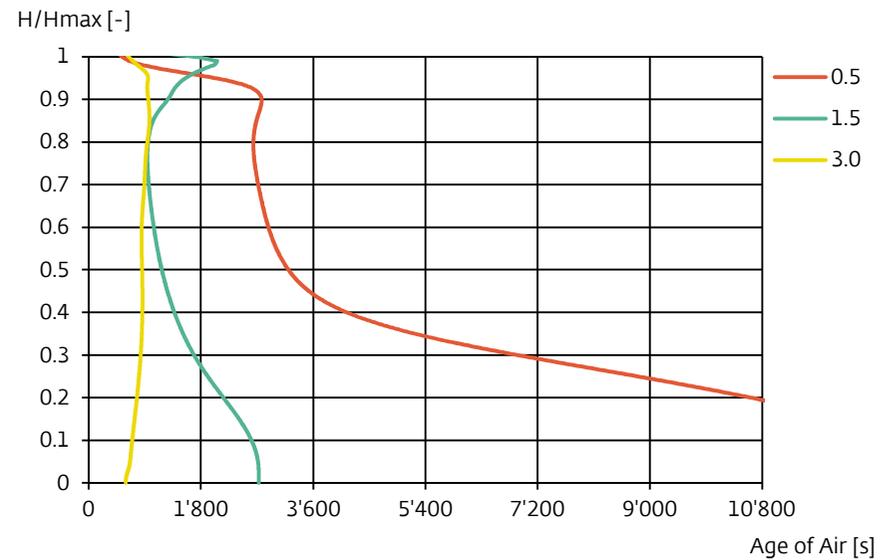


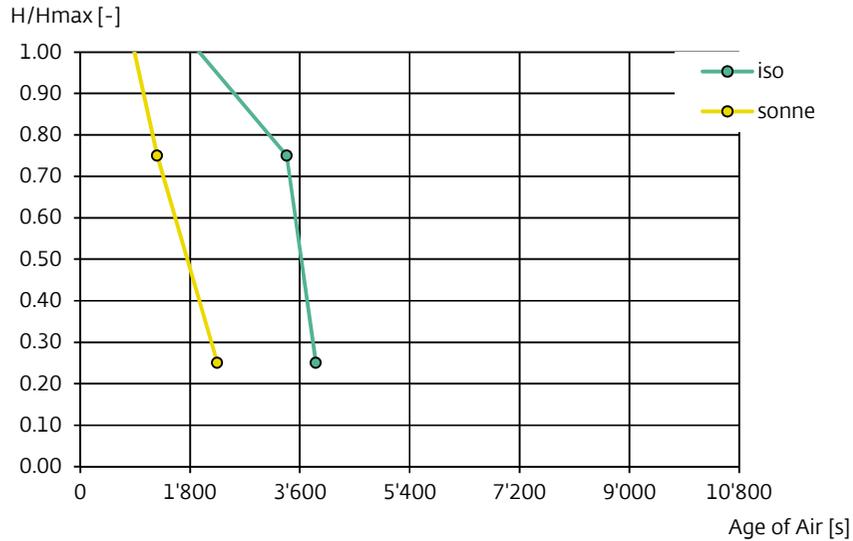
Abb. 341: Age of Air – vertikaler Verlauf zentral im IH (V1)



10.3.3. Einfluss des Parameters: Auftrieb

Wind 0.5 m/s, AR 0.6, WR 0

Abb. 342: Age of Air – Mittelwert pro Geschoss



Wind 1.5 m/s, AR 0.6, WR 0

Abb. 344: Age of Air – Mittelwert pro Geschoss

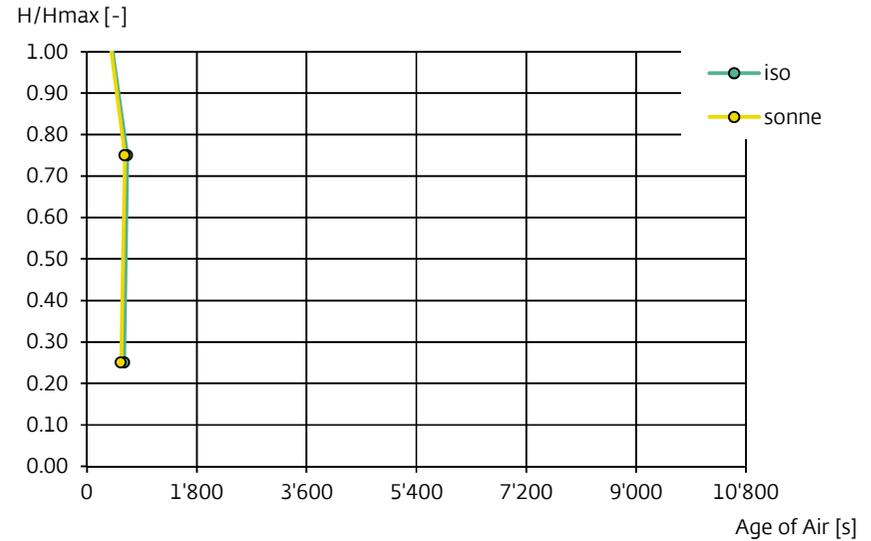


Abb. 343: Age of Air – vertikaler Verlauf zentral im IH (V1)

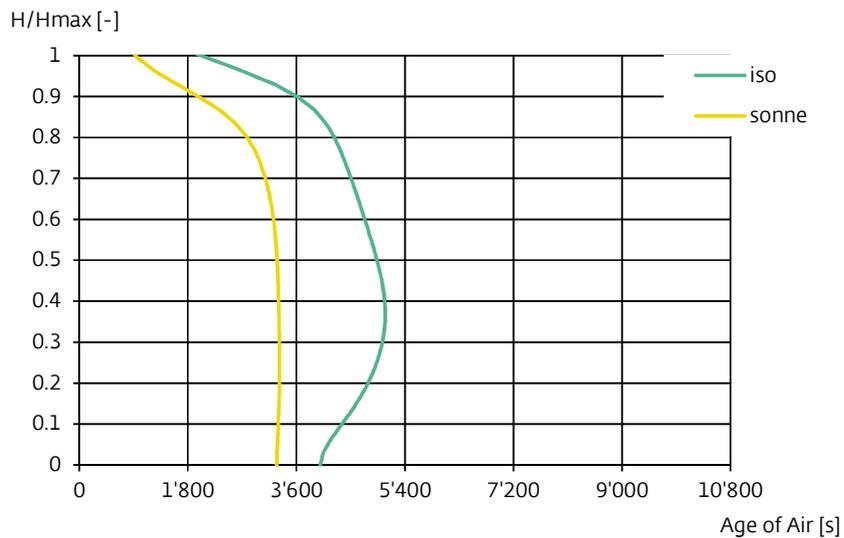
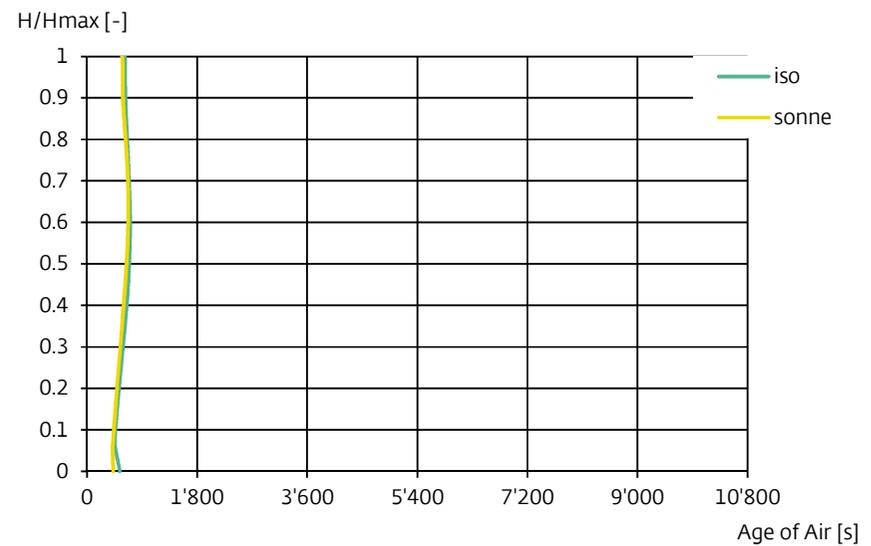
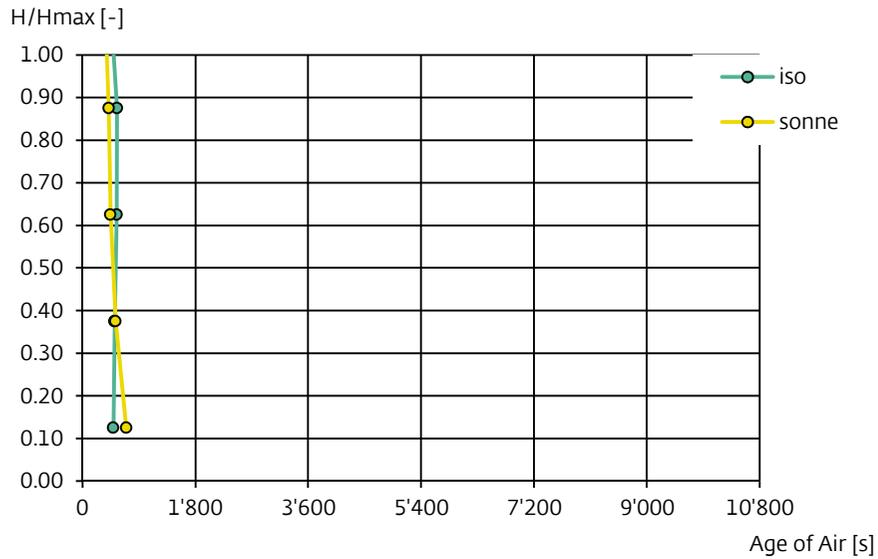


Abb. 345: Age of Air – vertikaler Verlauf zentral im IH (V1)



Wind 1.5 m/s, AR 1.1, WR 0

Abb. 346: Age of Air – Mittelwert pro Geschoss



Wind 0.5 m/s, AR 1.4, WR 0

Abb. 348: Age of Air – Mittelwert pro Geschoss

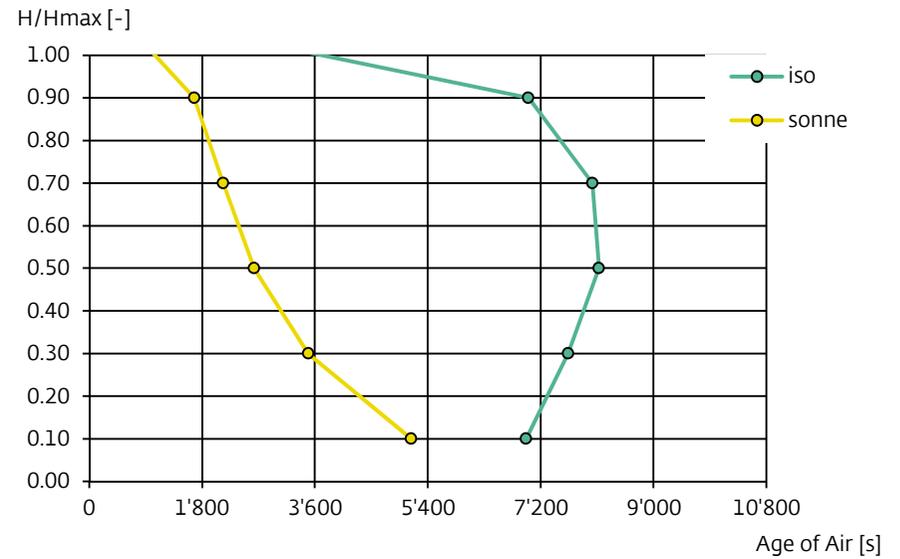


Abb. 347: Age of Air – vertikaler Verlauf zentral im IH (V1)

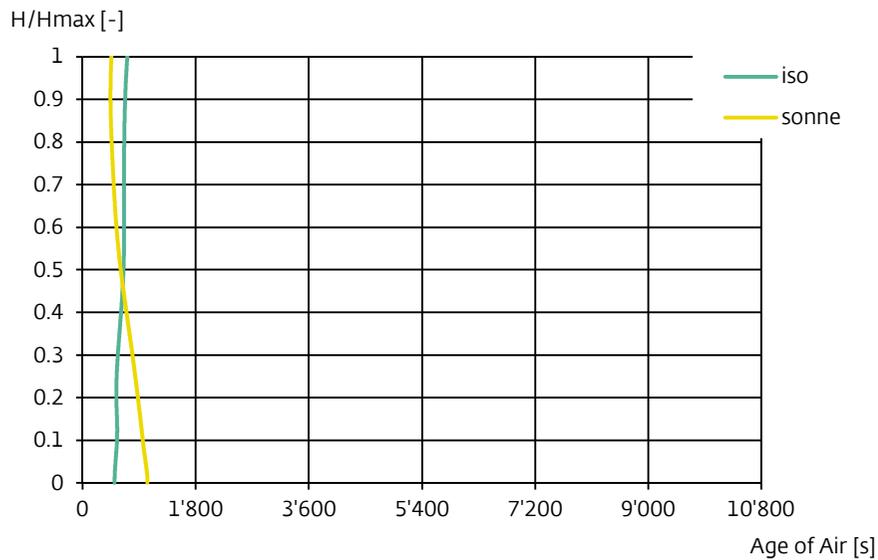
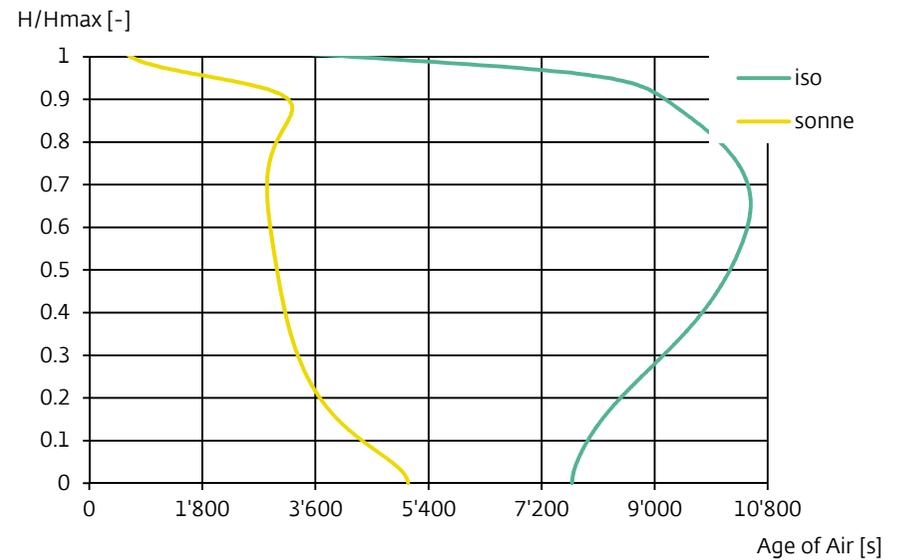
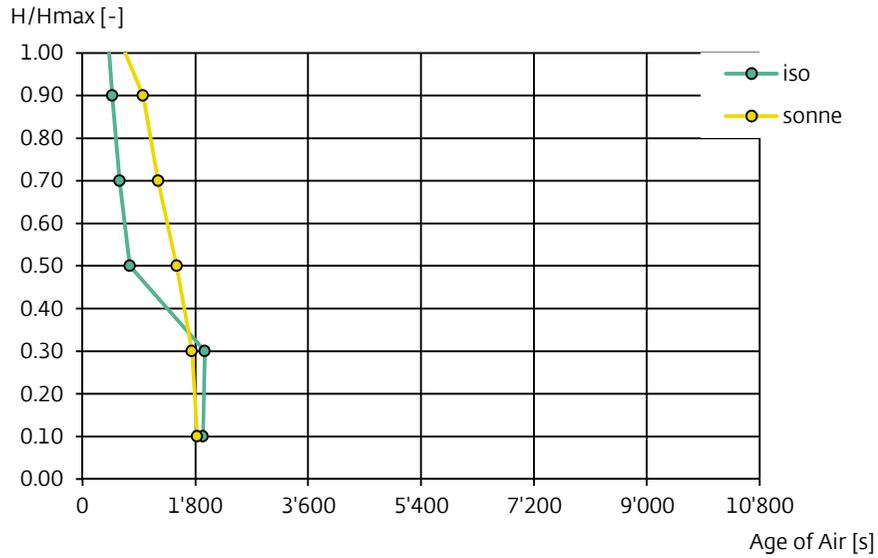


Abb. 349: Age of Air – vertikaler Verlauf zentral im IH (V1)



Wind 1.5 m/s, AR 1.4, WR 0

Abb. 350: Age of Air – Mittelwert pro Geschoss



Wind 3.0 m/s, AR 1.4, WR 0

Abb. 352: Age of Air – Mittelwert pro Geschoss

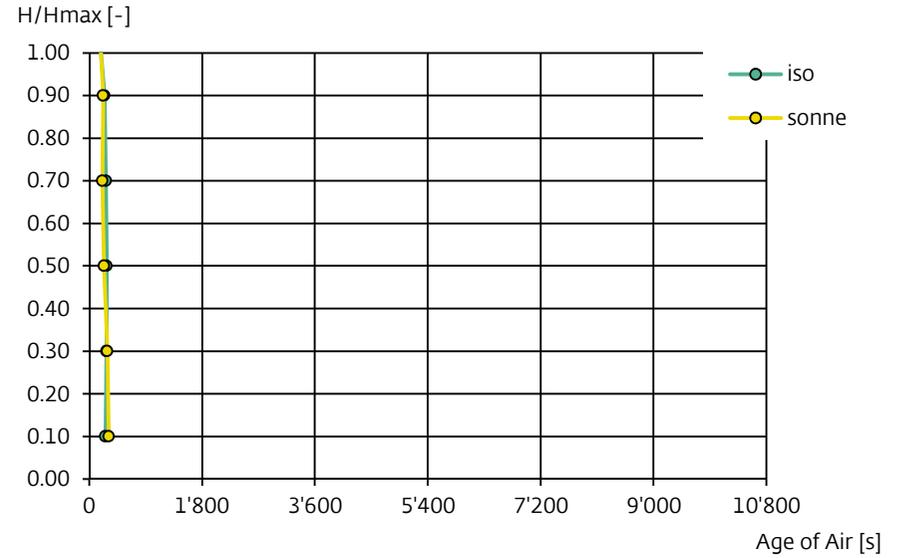


Abb. 351: Age of Air – vertikaler Verlauf zentral im IH (V1)

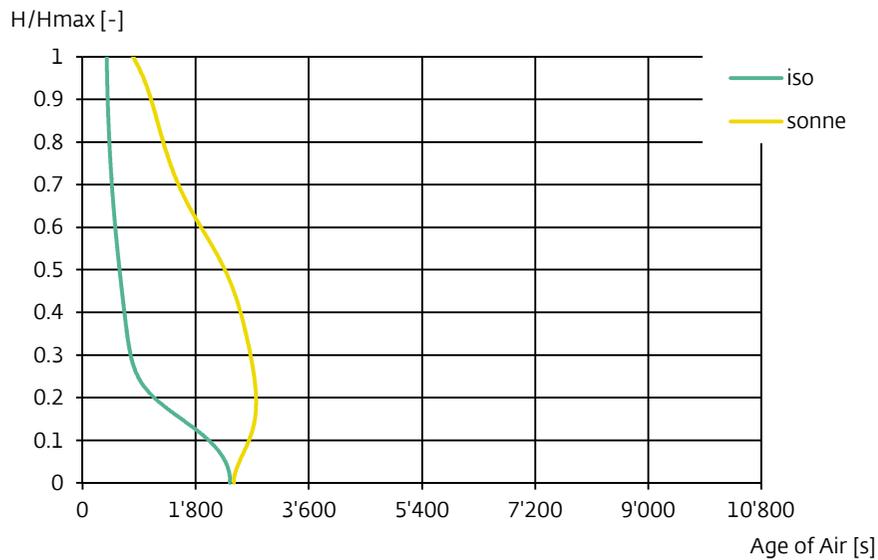
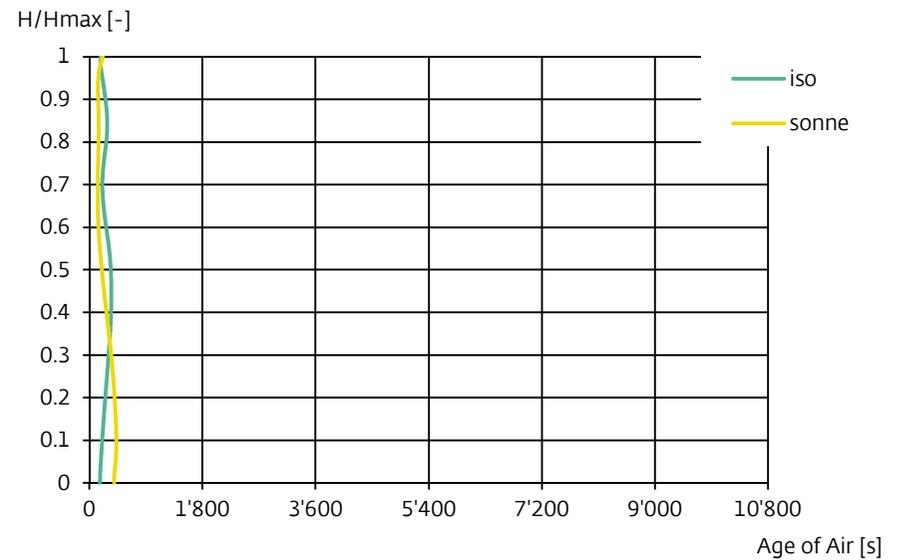
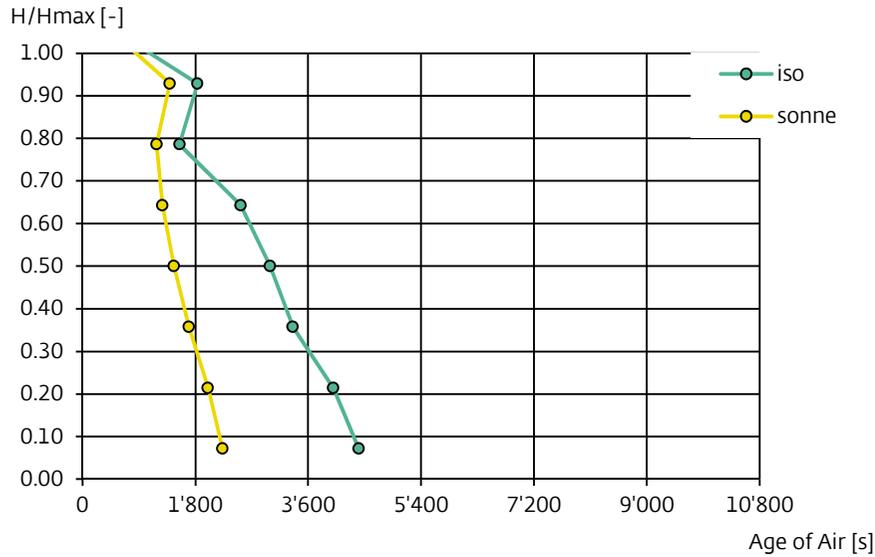


Abb. 353: Age of Air – vertikaler Verlauf zentral im IH (V1)



Wind 1.5 m/s, AR 2.0, WR 0

Abb. 354: Age of Air – Mittelwert pro Geschoss



Wind 0.1 m/s oder 0.5 m/s, AR 0.6, WR 0

Abb. 356: Age of Air – Mittelwert pro Geschoss

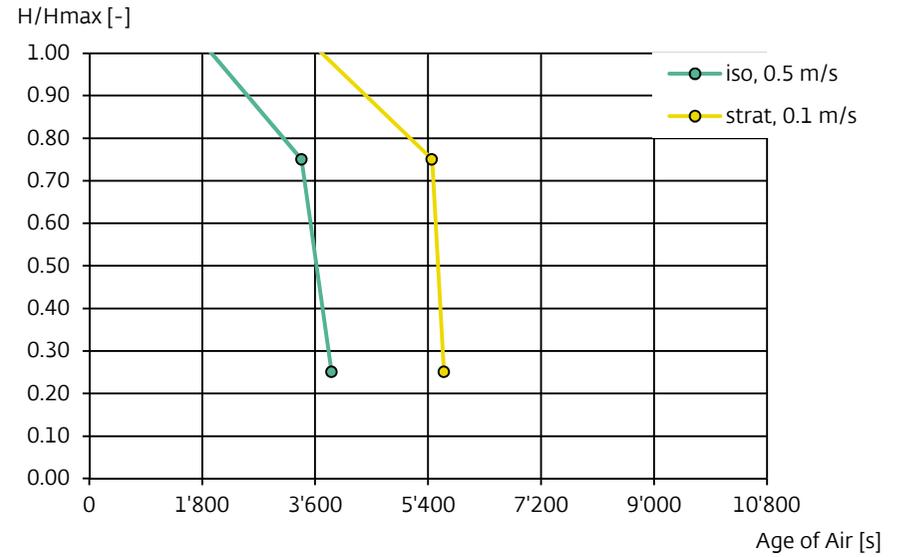


Abb. 355: Age of Air – vertikaler Verlauf zentral im IH (V1)

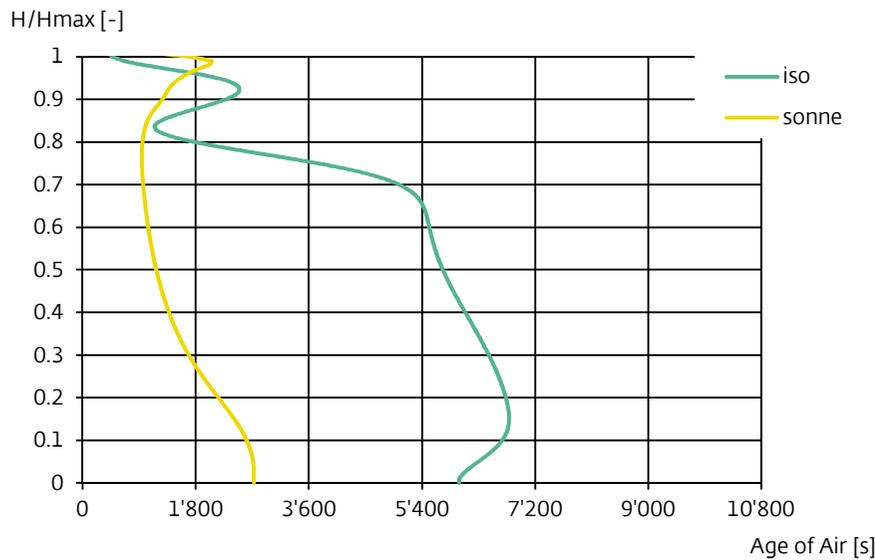
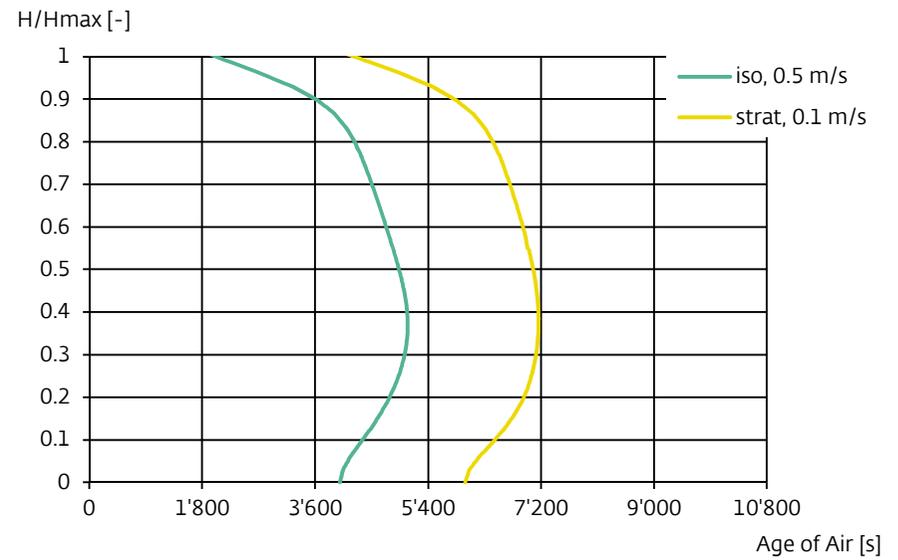
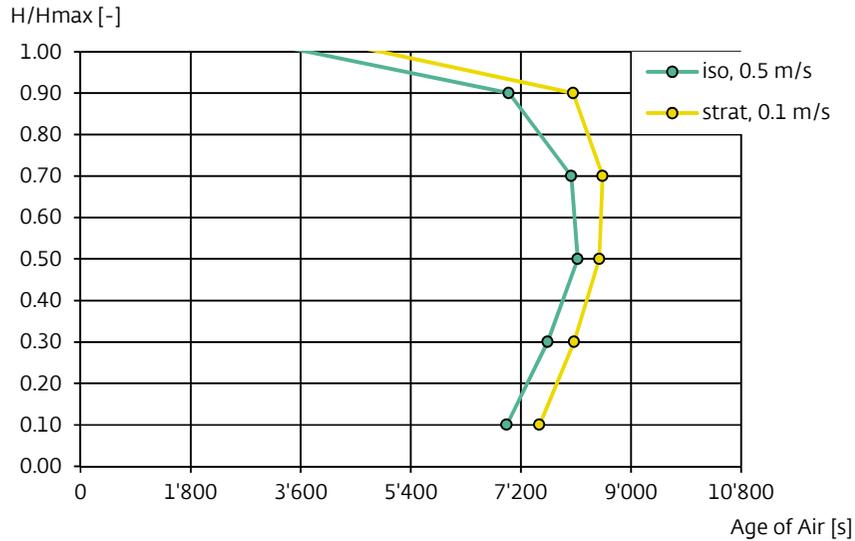


Abb. 357: Age of Air – vertikaler Verlauf zentral im IH (V1)



Wind 0.1 m/s oder 0.5 m/s, AR 1.4, WR 0

Abb. 358: Age of Air - Mittelwert pro Geschoss



10.3.4. Einfluss des Parameters: Windrichtung

Isotherm, AR 1.1, Wind 1.5 m/s

Abb. 360: Age of Air - Mittelwert pro Geschoss

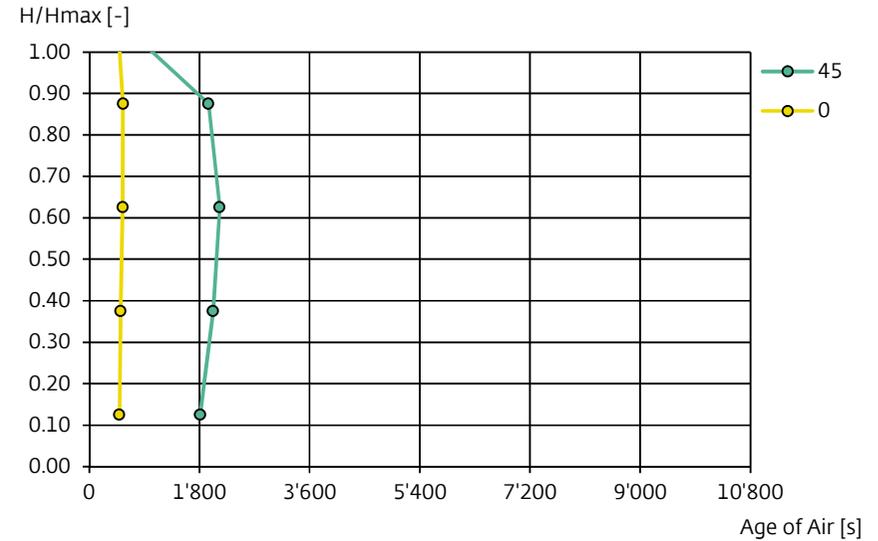


Abb. 359: Age of Air - vertikaler Verlauf zentral im IH (V1)

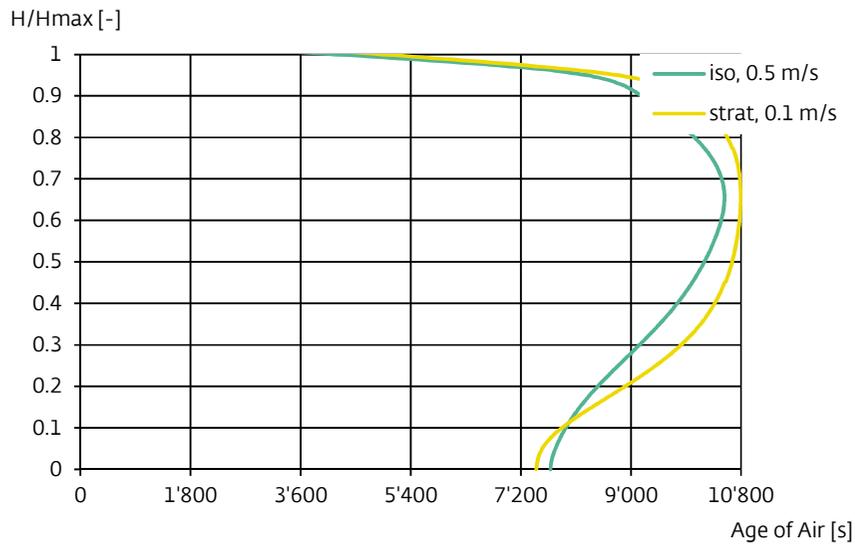
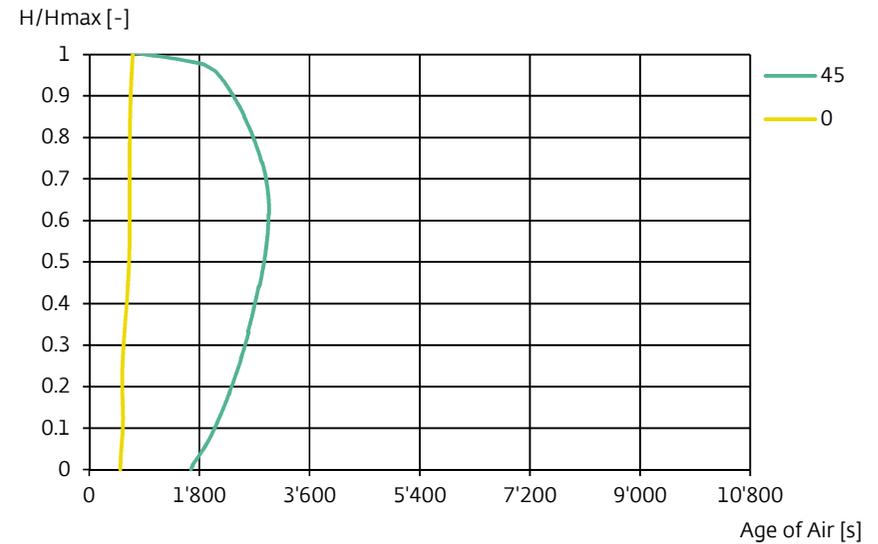
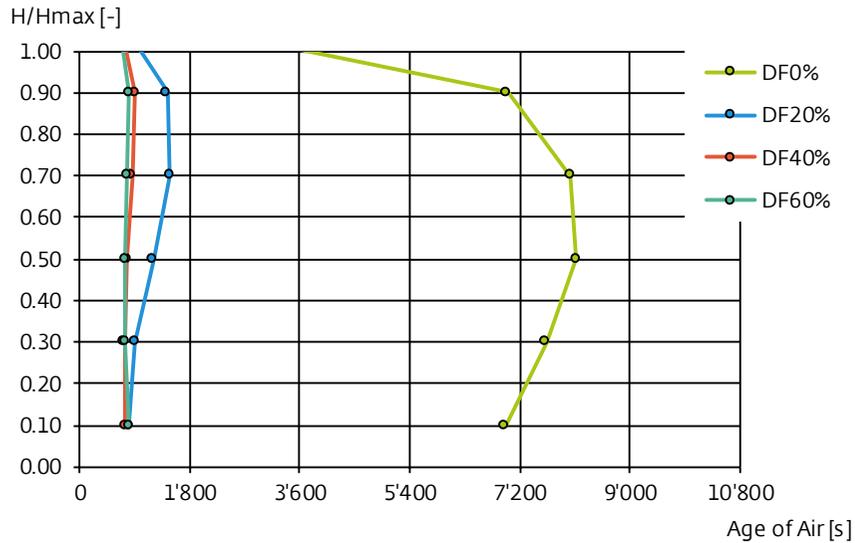


Abb. 361: Age of Air - vertikaler Verlauf zentral im IH (V1)



10.3.5. Einfluss des Parameters: Durchfahrt
Isotherm, AR 1.4, Wind 0.5 m/s, WR 0°

Abb. 362: Age of Air - Mittelwert pro Geschoss



Isotherm, AR 1.4, Wind 0.5 m/s, WR 180°

Abb. 364: Age of Air - Mittelwert pro Geschoss

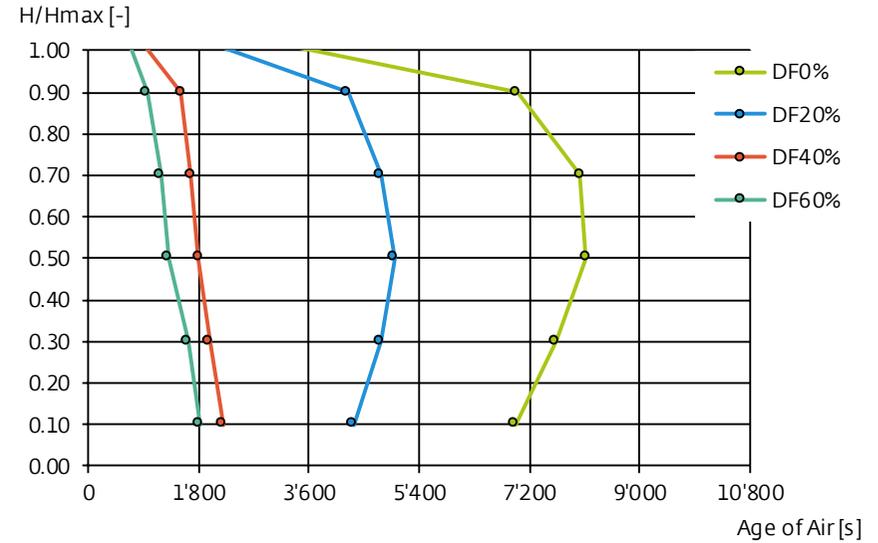


Abb. 363: Age of Air - vertikaler Verlauf zentral im IH (V1)

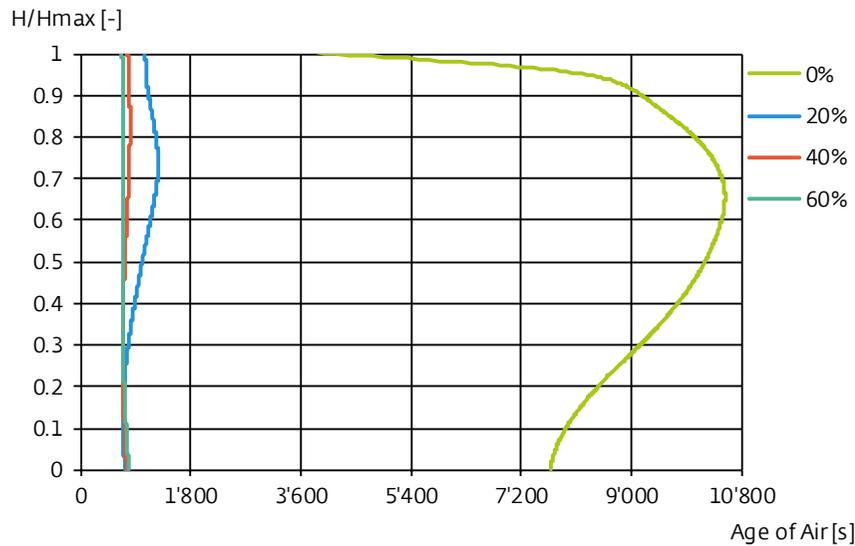


Abb. 365: Age of Air - vertikaler Verlauf zentral im IH (V1)

