

Technische Hochschule Rosenheim

Labor für Raumluftechnik und Raumklimasysteme

Natürlich kontrollierte Schullüftung

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem AZ 39142/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt
von

Ferdinand Sigg M.Sc.
Markus Wirnsberger M.Sc.
Prof. Dr. Harald Krause
Prof. Dipl.Ing Arthur Schankula
Prof. Dr. Madjid Madjidi (IB-Madjidi)

Rosenheim, Mai 2025

Inhalt

1. Zusammenfassung	5
2. Einleitung	6
3. Hauptteil	9
3.1. Luftbedarf in Klassenräumen	10
3.2. Beispielklassenraum und -erschließungsarten	12
3.1. Schachtlüftung und Solarkamin	19
3.1.1. Strömungssimulation	19
3.1.2. Wintersituation	23
3.1.3. Sommerfall	25
3.1.4. Bedeutung der Schachtlüftung und Solarkamin für das Projekt	29
3.2. Windeinfluss auf Druckverhältnisse	30
3.2.1. Windgeschwindigkeit und -druck auf dem Dach	32
3.2.2. Bedeutung der Platzierung von Außen- und Fortluftdurchlässen	36
3.2.3. Windgeschwindigkeit und -richtung	37
3.2.4. Bedeutung der Windgeschwindigkeit für das Projekt	41
3.2.5. Bedeutung der Windrichtung für das Projekt	46
3.2.6. Kombinierte Bewertung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung	46
3.3. Notwendigkeit Lüftungstechnischer Komponenten	48
3.3.1. Lüftungsklappen	48
3.3.2. Schalldämpfer	51
3.3.3. Zusatzventilatoren	52
3.3.4. Luftfilterung	53
3.3.5. Wärmerückgewinnung	53
3.4. Energetische Bewertung	53
3.5. Zusammenfassung und Empfehlungen	55
4. Literaturverweise	57

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Beispielhafte Darstellung verschiedener Arten von Solarkaminen [4]	8
Abb. 2 Prinzipschema des untersuchten Konzeptes: Luftansaugung über Erdkollektor, zentrale Luftvorkonditionierung (über Taupunkttemperatur, Zuluft- und Abluftschächte getrennt je Klassenraum, solaraktivierter Fortluftkamin	10
Abb. 3 CO ₂ -Abgabe, je nach Altersklasse und Geschlecht [9]	11
Abb. 4 CO ₂ -Konzentrationsverlauf einer Schulklasse. Unterschiedliche Stundenpläne und Alter beeinflussen die Konzentration	12
Abb. 5 Höhenabhängige Druckdifferenz (therm. Auftrieb) im Gebäude, beispielhafte Momentanaufnahme	13
Abb. 6 Druckverlustberechnung für Beispielklasse	15
Abb. 7: Erschließung über Erdkollektor, Verteilung im Keller, Schacht je Klasse an Innenwand	16
Abb. 8: : Erschließung über Windfänger am Dach, Schacht je Klasse an Innenwand	17
Abb. 9: Erschließung über Erdkollektor, begehbare Keller als Teil des gemeinsamen Zuluftkanals	18
Abb. 10 3D- sowie Schnittansicht des untersuchten Klassenraumes	20
Abb. 11: Beispielbilder von großflächigen, druckverlustarmen Zuluft- und Abluftelementen im Raum Cavazzen Lindau (li), MoMA New York (re))	21
Abb. 12: Volumenstrom der Schachtlüftung (stark Außenlufttemperaturabhängig)	22
Abb. 13: Volumenstrom der Schachtlüftung ist höhenabhängig	23
Abb. 14: Strömungsgeschwindigkeit im Raum, wichtig für Behaglichkeit und Akzeptanz	24
Abb. 15: Temperaturerhöhung im Erdkollektor, zentrale Vorerwärmung, homogene Temperaturverteilung im Raum.....	25
Abb. 16: Solarstrahlung sorgt für Temperaturerhöhung im Solarkamin	26
Abb. 17: Solarkamin, Prototyp im Labor (Hochschule München)[6].....	26
Abb. 18: Solarkamin unterstützt thermischen Antrieb bei hoher Außenlufttemperatur	27
Abb. 19: UBA-Leitwert werden eingehalten während der Heizperiode. Deutlicher Einfluss des Solarkamins außerhalb der Heizperiode	28
Abb. 20: Solarkamin: negativer Einfluss im Winter, positiver in (kritischen) Sommersituationen. "Lücken" im Verlauf sind Schulferien.	29
Abb. 21: Höhenabhängige Windprofile bis 20 m Höhe, für Windgeschwindigkeiten 1 - 6 m/s in 10 m Höhe.....	31
Abb. 22: CFD Simulation, Schnittebene parallel zur Strömungsrichtung, 2,5m von der Hauskante entfernt. Beispielhaft Druck bei einer Windgeschwindigkeit von 3m/s auf einer Höhe von 10m dargestellt	32
Abb. 23: CFD Simulation Geschwindigkeitsvektorfeld bei einer Windgeschwindigkeit von 3m/s auf 10m Höhe. Überströmung der Haus-Geometrie.....	32
Abb. 24: CFD Simulation, Schnittebene parallel zur Strömungsrichtung, 2,5m von der Hauskante entfernt, Geschwindigkeit bei Windgeschwindigkeit von 3m/s auf einer Höhe von 10m.	33
Abb. 25: CFD Simulation, Geschwindigkeiten auf einem Schnitt, 2,5m von der Hauskante entfernt für Windgeschwindigkeiten von 1m/s bis 6m/s.	34
Abb. 26: CFD Simulation, statischer Druck auf einer Schnittebene, 2,5m von der Hauskante entfernt für Windgeschwindigkeiten von 1m/s bis 6m/s.....	35
Abb. 27: CFD Simulation, gesamt Druck auf einer Schnittebene, 2,5m von der Hauskante entfernt für Windgeschwindigkeiten von 1m/s bis 6m/s. Referenzdruck 1013 hPa.....	36

Abb. 28: Untersuchte Standorte in Deutschland.....	38
Abb. 29: Windgeschwindigkeitsverteilung für alle Standorte für 00 - 24 Uhr (eigene Darstellung)	39
Abb. 30: Windgeschwindigkeit zu Schulzeiten (eigene Darstellung).....	40
Abb. 31: Windrichtungsverteilung je Standort 0:00 – 24:00 (eigene Darstellung)	43
Abb. 32: Windrichtungsverteilung je Standort 8:00 - 17:00 (eigene Darstellung).....	43
Abb. 33: Beispielhafte Lüftungsklappe Copyright: Trox SE	49
Abb. 34: Prinzipschema Bild 1.3 (M-LüAR, Ausgabe 30.04.21)	50
Abb. 35: Bild 1.4 (M-LüAR)	50
Abb. 36: Beispielhafte Schalldämpferauslegung Copyright: Trox SE	51
Abb. 37: windangetriebener Ventilator als Kaminhaube	52

1. Zusammenfassung

Ziel dieses Projektes war die Bestimmung des Potenzials der freien, natürlichen Lüftung von Schulklassen. Die Schullüftung wurde hierbei gewählt, weil diese meist umfangreich (viel Luftbedarf), normiert (Altersklassen, Schulformen), in hoher Anzahl verfügbar (Ergebnisse gut multiplizierbar) und die Anwendung dringlich ist.

Unter natürlicher Lüftung versteht man die Belüftung eines Raumes durch den natürlichen Luftaustausch, der ohne den Einsatz von mechanischen Lüftungssystemen erfolgt. Bei der natürlichen Lüftung kann entweder der Druckunterschied infolge von Wind (Winddruck) oder die Temperaturdifferenz zwischen der Luft im Gebäude und der Umgebung und dem daraus resultierende Auftrieb/Kamineffekt genutzt werden. Aufgrund der jahreszeitlich wechselhaften außenklimatischen Verhältnisse in Deutschland sind die natürlichen Antriebskräfte von Wind und Temperaturdifferenz begrenzt. Im Projekt wurde der prinzipielle Bedarf an frischer Luft in Abhängigkeit vom Alter der Schüler und Schülerinnen aus der Literatur ermittelt. Daraus folgend wurde ein Grundkonzept entwickelt, wie dieser Luftbedarf durch die Ausnutzung des thermischen Auftriebs sichergestellt werden kann. In den Sommermonaten an heißen Tagen, bei kleiner Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen, stößt die klassische Schachtlüftung an ihre Grenzen. Deswegen wurden unterstützende Maßnahmen, wie die gezielte Ausnutzung von Winddruck (Positionierung der Außenluftventile) sowie von Solarenergie (Solarkamin), mittels Simulationsrechnungen untersucht. So konnte im Projekt die prinzipielle Tauglichkeit der natürlichen Schullüftung aufgezeigt werden. Es ist prinzipiell möglich, Schulklassen in Deutschland mit diesen Maßnahmen zu be- und entlüften und eine kontrollierte Luftqualität sicherzustellen, welche sonst durch freie Lüftung (Fensterlüftung) bisher nicht erreicht wird. In den allermeisten Zeiträumen des Jahres ist die Innenraumluftqualität in den Schulklassen mit maschinell belüfteten Schulklassen vergleichbar. Da die Tauglichkeitsprüfung innerhalb dieses Projekts auf vielen Simulationsmodellen und Annahmen (insbesondere der realen Nutzung) basiert, ebenso in der Fachliteratur, empfehlen wir zukünftig ein technisches Monitoring der spezifischen Komponenten (Schachtlüftung, Luftdrücke am Dach, Windfänger, Solarkamin) an einem ausgeführten Beispiel.

Dieses Projekt wurde dankenswerterweise von der DBU (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) unter dem Aktenzeichen AZ 39142/01 gefördert.

2. Einleitung

Das Lüften von Schulklassen ist von großer Bedeutung, um die Luftqualität zu verbessern und die Gesundheit der Schüler und Lehrer zu schützen. In geschlossenen Räumen steigt die CO₂-Konzentration durch das Atmen der Personen an, was zu Müdigkeit, Konzentrationsschwierigkeiten und Unwohlsein führen kann. Regelmäßiges Lüften sorgt dafür, dass frische Luft zugeführt wird und die CO₂ Werte gesenkt werden. Zudem hilft das Lüften, die Luftfeuchtigkeit zu regulieren, da eine hohe Luftfeuchtigkeit das Wachstum von Schimmel und anderen Allergenen begünstigen kann. Ein gesundes Raumklima wird durch das regelmäßige Lüften gefördert.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Reduzierung von Viren und Bakterien. In geschlossenen Räumen können sich diese Krankheitserreger schneller verbreiten, und durch regelmäßiges Lüften kann die Anzahl der Erreger in der Luft verringert werden, was das Risiko von Infektionen senkt. Auch Gerüche und Schadstoffe, die sich in Klassenräumen ansammeln können, werden durch das Lüften entfernt, was zu einem angenehmeren Lernumfeld beiträgt.

Allerdings reicht eine einfache Fensterlüftung nicht immer aus. In großen oder schlecht belüfteten Räumen kann sie unzureichende Luftzirkulation zur Folge haben, weshalb zusätzliche Maßnahmen wie Querlüftung oder mechanische Belüftungssysteme notwendig sein können. Zudem können extreme Wetterbedingungen, wie sehr kaltes oder heißes Wetter, das Öffnen der Fenster unpraktisch machen, da es den Komfort der Schüler beeinträchtigen könnte. In städtischen Gebieten kann auch die Luftqualität im Freien durch Schadstoffe beeinträchtigt sein, was den Einsatz kontrollierter Belüftungssysteme sinnvoll macht, die die Luft filtern und die Qualität verbessern. Durch den Einsatz von Lüftungsgeräten wird in Schulen gute Luftqualität sichergestellt.

Durch die Verwendung von Wärmetauschern wird hierbei ein Großteil der Lüftungswärmeverluste eingespart unter Zuhilfenahme von elektrischer Energie für Steuerungs- und Ventilationstechnik. Im Gebäudesektor kann der Energieverbrauch durch die Einsparung von elektrischer Förderenergie zur maschinellen Lüftung erheblich reduziert werden. Neben der Wirkungsgradsteigerung der häufig verwendeten mechanischen Ventilationssysteme, können effektive natürliche Lüftungskonzepte die Ventilation ohne elektrische Leistung bereitstellen.

Die natürliche Lüftung nutzt physikalische Prinzipien wie Temperaturunterschiede (thermische Auftriebe) und Winddruck, um den Luftaustausch zu fördern. Wenn die Luft im Raum wärmer ist als die Außenluft, steigt sie auf und zieht kühlere Luft von außen nach. Auch bei Wind kann der Druckunterschied zwischen der windzugewandten und der windabgewandten Seite eines Gebäudes den Luftaustausch unterstützen.

Diese Art der Lüftung ist einfach und kostengünstig, erfordert jedoch eine bewusste Regelung, um eine ausreichende Luftqualität und insbesondere thermische Behaglichkeit zu gewährleisten.

Die Innovation des beantragten Forschungsvorhabens war die Prüfung der möglichen Anwendbarkeit alternativer Lüftungstechniken zur Einsparung von elektrischer Energie durch die Ausnützung des Kamineffekts in Schulgebäuden. Hierbei wird versucht möglichst ohne elektrische Antriebsenergie eine gute Luftqualität in Klassenräumen sicherzustellen. Bisher war unklar, ob die Lüftung durch die Ausnützung solcher Effekte im mitteleuropäischen Klima ausreicht, um ausreichende Luftqualität in Schulen sicherstellen zu können.

Trotz der bereits durchgeführten Forschung im Bereich der hybrider Lüftung und von Solarkaminen, sowie von bereit gebauten Projekten in Deutschland und insbesondere Skandinavien, konnten bisher keine möglichst allgemeingültigen, einfachen Planungshinweise für die Anwendung in Schulgebäude in Deutschland entwickelt werden. Viele Projekte wurden bisher infolge Erfahrungswerte, enormen planerischer Aufwand in der Konzeption (individuelle CFD Simulationen) oder aus reinem Bauchgefühl projektiert. Oftmals wird der Kamineffekt auch ausschließlich zur unterstützenden Nachtlüftung zur Gebäudeauskühlung im Sommer verwenden, was generell sehr gut funktioniert.

Die Schullüftung wurde hierbei gewählt, weil diese meist sehr normiert (Schulklassen), in hoher Anzahl (Ergebnisse gut multiplizierbar) und die Anwendung dringlich ist. Die Ergebnisse, sind jedoch genauso auf anderen Nutzungen, beispielsweise Büro- oder Wohnnutzung, übertragbar.

Schachtlüftung, hybride Lüftungssysteme und auch Solarkamine wurden in der Vergangenheit schon erforscht, projektiert und auch gebaut. Diese Effekte wurden bereits bei traditionellen Bauten im Nahen Osten in Form von Windtürmen und Solarkaminen genutzt. In den letzten Jahren wurden Solarkamine international auch in der modernen Architektur berücksichtigt. Die reine Schachtlüftung fand in Deutschland historisch gesehen vergleichsweise breite Anwendung. Unter dem Begriff „Kölner Lüftung“, „Dortmunder Lüftung“ und „Berliner Lüftung“ wurden in Deutschland viele Schachtlüftungssysteme, insbesondere zur Entlüftung von Sanitärräumen, gebaut.

Einige wissenschaftlichen Veröffentlichungen beschäftigen sich mit Schachtlüftung, hybriden Lüftungssystemen sowie Solarkaminen zur natürlichen Lüftung [1,2,3,4,5] .

Bei hybriden Lüftungssystemen handelt es sich um herkömmliche Lüftungssysteme, bei denen ein natürlichen Kamineffekt das Lüftungssystem unterstützt und so weniger Ventilatorstrom aufgebracht werden muss. In [1][2] wurden hybride und natürliche Lüftungssysteme untersucht. Solch natürliche Kamine und Schachtsysteme können durch Wärmeeinflüsse (Kamineffekt) zusätzlich unterstützt werden. Durch Solarstrahlung werden Flächen oder Teilflächen des Lüftungssystems durch Solarabsorber erwärmt.

Der dadurch entstehende thermische Auftrieb kann so im Lüftungssystem genutzt werden. In Abb. 2 werden verschiedene Solarkaminarten dargestellt, bei denen jedoch das Grundprinzip immer dasselbe ist. In [3][4][5] werden insbesondere Solarkamine untersucht und bewertet.

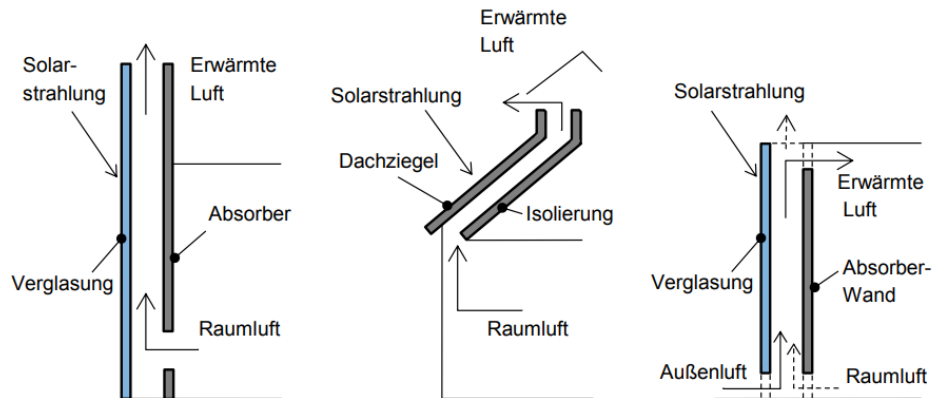


Abb. 1: Beispielhafte Darstellung verschiedener Arten von Solarkaminen [4]

Insgesamt zielte das Forschungsvorhaben darauf ab, umfassende Lösungen für die Schullüftung zu entwickeln, die sowohl die Luftqualität verbessern als auch den Energieverbrauch bewerten. Die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes zeigen die prinzipielle Tauglichkeit und sollen als Grundlage für zukünftige Planungen und Implementierungen von Lüftungssystemen in Schulen dienen.

3. Hauptteil

Das Forschungsvorhaben gliederte sich in vier zentrale Aspekte, die sich mit der Sicherstellung einer optimalen Luftqualität in Schulräumen befassen. Zuerst wurde der Frischluftbedarf untersucht, welcher notwendig ist, um eine gute Luftqualität zu gewährleisten. Hierbei werden verschiedene Faktoren wie die Anzahl der Schüler, Alter und Geschlecht berücksichtigt. Ziel ist es, präzise, jedoch für verschiedene Schultypen möglichst allgemeingültige Werte zu ermitteln, die als Grundlage für die Planung von Lüftungssystemen dienen können.

Mit diesen Ergebnissen wurde ein Vorschlag zur Dimensionierung von Lüftungskaminen, die für Schulklassen erforderlich sind, entwickelt. In diesem Kontext wurden verschiedene Erschließungsformen an einer synthetischen, beispielhaften Schule getestet, um mehrere Varianten bei der Umsetzung an einer realen Schule zu Verfügung zu haben. Hierbei wurde auch die Effizienz der Luftzirkulation, Behaglichkeit, und Strömungsgeschwindigkeit in den Klassenräumen berücksichtigt, um sicherzustellen, dass die Frischluft gleichmäßig verteilt wird und an allen Sitzplätzen die Behaglichkeit gewährleistet werden kann.

Kern aller Varianten war hierbei die Ausnutzung des Kamineffekts durch die Nutzung von Schächten zur Be- und Entlüftung. Hierbei wurden die Möglichkeiten sowie auch die Grenzen zur Sicherstellung der Luftqualität in Klassenräumen bei der reinen Schachtlüftung aufgezeigt.

Anschließend wird untersucht, ob unterstützende Maßnahmen wie thermische Aktivierung der Schächte durch Solarkamine Verbesserung der Lüftung beitragen können. Ebenso können Windfänger zur Unterstützung eingesetzt werden, insbesondere bei geeigneten Standorten. Diese innovativen Ansätze konnten helfen, die natürliche Luftwechselraten in den Klassen zu optimieren. Zum Schluss befasst sich das Forschungsprojekt mit Notwendigkeit zusätzlicher Technikkomponenten wie Klappen, Schalldämpfer oder Stützventilatoren.

Die Auslegung dieser Technik wird ebenfalls thematisiert, um sicherzustellen, dass sie optimal auf die spezifischen Anforderungen der Schulräume abgestimmt ist. Im vereinfachten dargestellten Schema in Abb. 3 wird die grundsätzliche Idee des Konzept aufgezeigt.

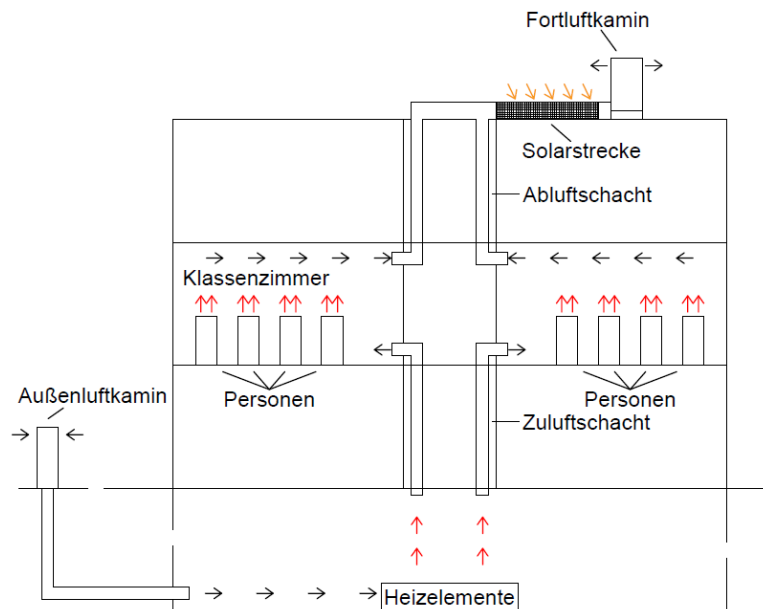


Abb. 2 Prinzipschema des untersuchten Konzeptes: Luftansaugung über Erdkolektor, zentrale Luftvorkonditionierung (über Taupunkttemperatur, Zuluft- und Abluftschächte getrennt je Klassenraum, solaraktiver Fortluftkamin)

3.1. Luftbedarf in Klassenräumen

Der Frischluftbedarf von Personen kann geschlechts- und altersabhängig sein. Verschiedene Faktoren beeinflussen den individuellen Luftbedarf, darunter:

Kinder und Jugendliche haben in der Regel einen höheren Stoffwechsel und benötigen daher mehr Frischluft pro Körpergewicht im Vergleich zu Erwachsenen. Auf das Schulalter (hier grob gefasst zwischen 6 und 30 Jahre) steigt das durchschnittliche Körpergewicht von Schülern und Schülerinnen jedoch kontinuierlich an und somit auch Grundumsatz und Stoffwechsel. Schüler haben, bei gleichem Alter, meist etwas erhöhte CO_2 Abgabe als Schülerinnen.

Der Stoffwechsel ist direkt an die CO_2 -Abgabe der Atemluft gekoppelt, welches uns hierbei als Mess- und Bewertungsgröße dient. Unabhängig von Geschlecht und Alter beeinflusst das Aktivitätsniveau den Frischluftbedarf. Bei körperlicher Aktivität steigt der Bedarf an Sauerstoff, was eine höhere Frischluftzufuhr erforderlich macht. Hierbei wurde eine körperliche Aktivität von 1,2 met (Metabolic Equivalent of Tasks) angenommen für typischen Schulunterricht. Insgesamt ist es wichtig, diese Faktoren zu berücksichtigen, um eine angemessene Luftqualität in geschlossenen Räumen, wie beispielsweise Schulen, sicherzustellen.

	Alter	durchschnittliches Körpergewicht	körpereigener Grundumsatz [MJ pro Tag]	Aktivität 1,2 met (Schule)	
				CO ₂ Abgabe [L/s]	CO ₂ Abgabe [L/h]
männlich	<1	8	1,86	0,00110	4,0
	1 bis <3	12,8	3,05	0,00180	6,5
	3 bis <6	18,8	3,9	0,00230	8,3
	6 bis <11	31,9	5,14	0,00300	10,8
	11 bis <16	57,6	7,02	0,00410	14,8
	16 bis <21	77,3	7,77	0,00450	16,2
	21 bis <30	84,9	8,24	0,00480	17,3
	30 bis <40	87	7,83	0,00460	16,6
	40 bis <50	90,5	8	0,00460	16,6
	50 bis <60	89,5	7,95	0,00460	16,6
	60 bis <70	89,5	6,84	0,00400	14,4
	70 bis <80	83,9	6,57	0,00380	13,7
	≥80	76,1	6,19	0,00360	13,0

	Alter	durchschnittliches Körpergewicht	körpereigener Grundumsatz [MJ pro Tag]	Aktivität 1,2 met (Schule)	
				CO ₂ Abgabe [L/s]	CO ₂ Abgabe [L/h]
weiblich	<1	7,7	1,75	0,00100	3,6
	1 bis <3	12,3	2,88	0,00170	6,1
	3 bis <6	18,3	3,59	0,00210	7,6
	6 bis <11	31,7	4,73	0,00270	9,7
	11 bis <16	55,9	6,03	0,00350	12,6
	16 bis <21	65,9	6,12	0,00360	13,0
	21 bis <30	71,9	6,49	0,00380	13,7
	30 bis <40	74,8	6,08	0,00350	12,6
	40 bis <50	77,1	6,16	0,00360	13,0
	50 bis <60	77,5	6,17	0,00360	13,0
	60 bis <70	76,8	5,67	0,00330	11,9
	70 bis <80	70,8	5,45	0,00320	11,5
	≥80	64,1	5,19	0,00300	10,8

Abb. 3 CO₂-Abgabe, je nach Altersklasse und Geschlecht [9]

Der CO₂ Verlauf eines typischen Klassenzimmers (6 m³/Person, 25 Personen, 400 m³ Außenluft pro Stunde) ist in folgender Grafik dargestellt.

Je nach Altersklasse der Schüler und Schülerinnen stellt sich bei einem beispielhaften Volumenstrom von 400 m³ pro Stunde eine unterschiedliche Luftqualität ein.

Hierbei ist zu sehen, dass die Luftqualität ganztätig im Bereich von unter 1400 ppm liegt. Dies entspricht der Luftqualität Kategorie III nach DIN EN 16798, Kategorie IV würde hier Werte bis 1750 ppm erlauben (jeweils bei einer Außenluftkonzentration von 400 ppm).

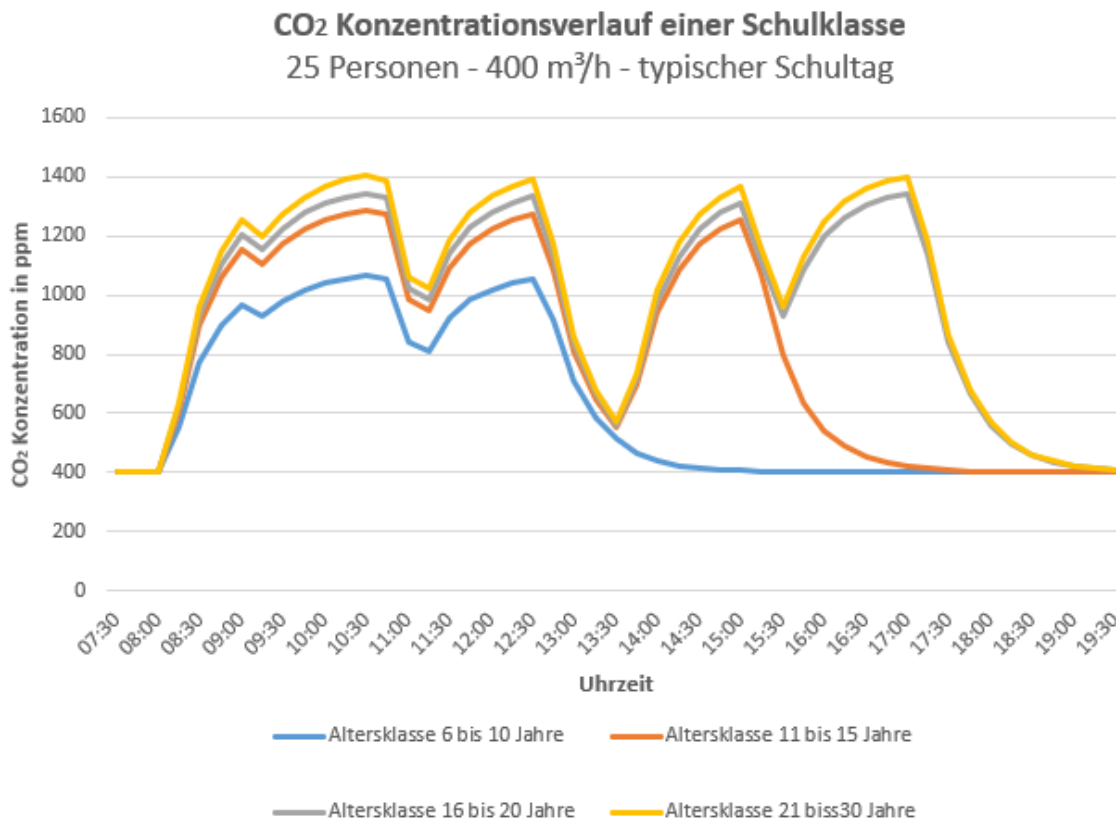


Abb. 4 CO₂-Konzentrationsverlauf einer Schulklasse. Unterschiedliche Stundenpläne und Alter beeinflussen die Konzentration

Das UBA (Umweltbundesamt) empfiehlt hierbei Mittelwerte während einer Unterrichtseinheit zu bilden und keine Momentanwerte zu betrachten. Bei Werten von über 2000 ppm (als Leitwert) wird hierbei andere zusätzliche Maßnahmen zur Reduzierung von CO₂-Konzentrations zu ergreifen, z.B. zusätzliche Fensterlüftung.

In den folgenden Untersuchungen wird meist als Randbedingung die oben genannte Beispielklasse verwendet mit dem typischen Klassenzimmers (6 m³/Person, 25 Personen).

3.2. Beispielklassenraum und -erschließungsarten

Grundüberlegungen

Wird die Raumluft nicht über Fenster ausgetauscht, besteht die Möglichkeit die Zuluft vorzuwärmen, um die thermische Behaglichkeit im Winter anzuheben. Das kann mit ein Zuluftsystem bestehend aus einem Erdkanal und einer nachgeschalteten Luftheizung erreicht werden.

Soll dabei auf eine maschinellen Lüftung verzichtet werden, ist die Luftansaugung in Windrichtung auszurichten und so gut wie möglich gleichzeitig der Abluftkanal solarthermisch zu aktivieren. Idealerweise wird die Fortluftöffnung nach außen entgegen der Windrichtung ausgerichtet und sich oberhalb der Dachkante befinden (siehe Kap 3.2.1) Aus

wirtschaftlicher und ästhetischer Sicht ist es besser, einen Solarkamin aufzuteilen in einer horizontal verlaufenden und einer vertikal verlaufenden Teilstrecke.

Bei gleicher Gesamtlänge wäre zwar ein nur vertikal verlaufender Kamin besser für den thermisch bedingten Auftrieb. Erfahrungsgemäß ist es auch städtebaulich bedingt nur selten möglich, für hohe (deutlich auskragende) Türme eine Baugenehmigung zu bekommen.

Stattdessen kann nahezu die gesamte Raumtiefe der Modellklasse ausgenutzt, um zunächst den Abluftstrom durch einen horizontal verlaufenden Kanal zu leiten, der dann in eine deutlich kürzere vertikale Kaminstrecke mündet.

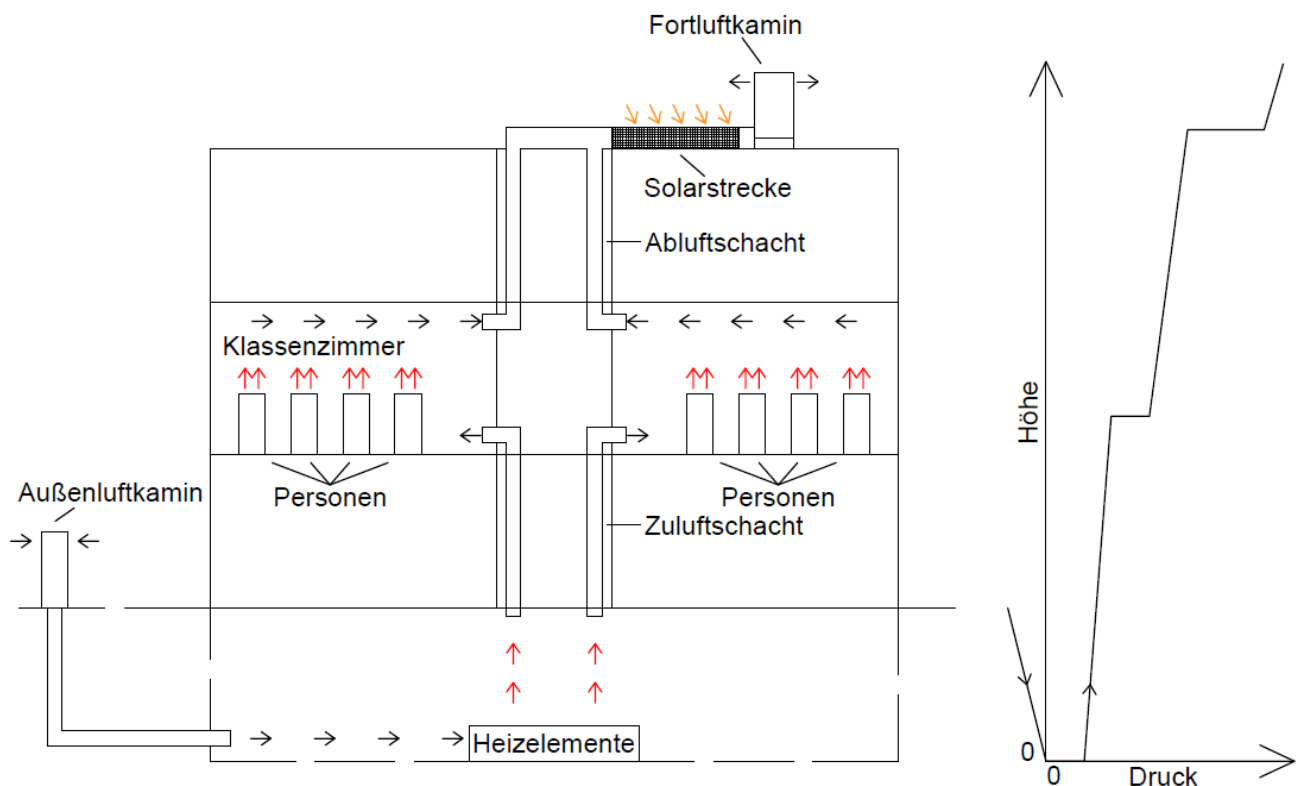


Abb. 5 Höhenabhängige Druckdifferenz (therm. Auftrieb) im Gebäude, beispielhafte Momentanaufnahme

Abbildung 6 zeigt ein schematisches Beispiel für die Luftführung entlang der Gebäudehöhe bei Verwendung einer Solarstrecke zur natürlichen Abluftführung. Die Frischluft strömt über einen Außenluftkamin und Erdkollektor (Erwärmung oder Abkühlung) in das System ein. An diesem Punkt liegt die Druckdifferenz (thermischer Auftrieb) meist auf dem niedrigsten Niveau.

Mit jeder Temperaturerhöhung entlang des Systems, sei es durch Heizelemente, interne Wärmequellen oder solare Gewinne, steigt auch die Druckdifferenz, sodass sich typischerweise ein Druckanstieg von unten nach oben einstellt. Dieses Druckgefälle begünstigt den natürlichen Auftrieb und damit die Luftbewegung durch das Gebäude.

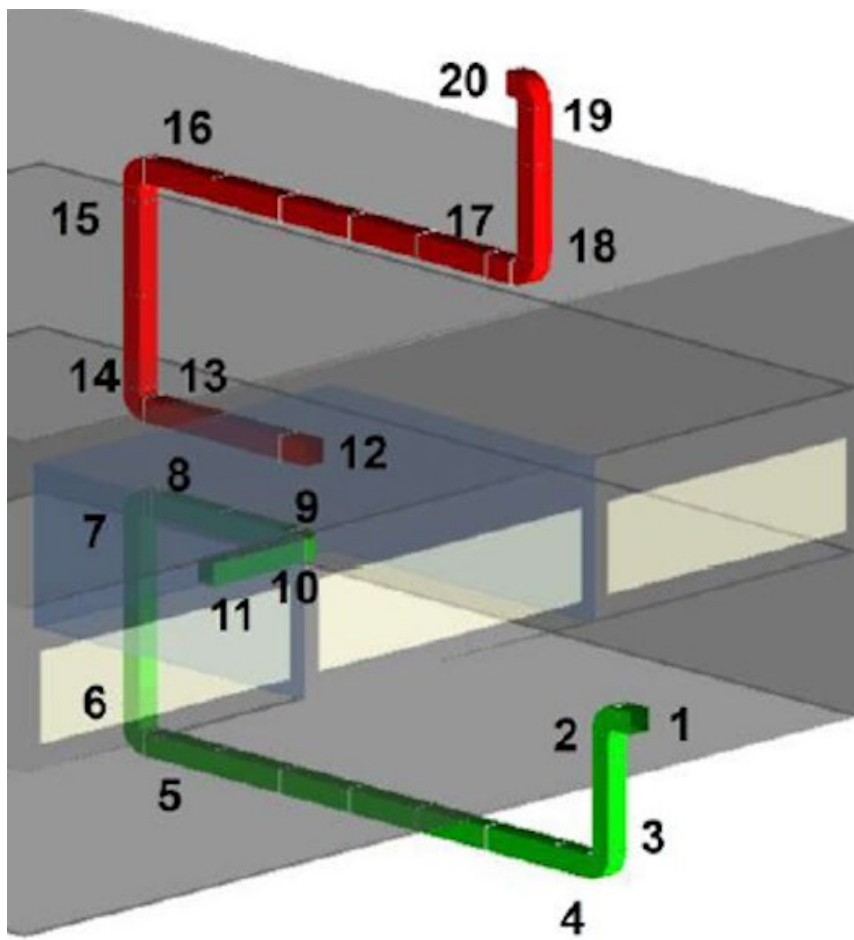
Wo genau im System positive, negative oder neutrale Drücke (Nullpunkt des Drucksystems) auftreten, hängt maßgeblich von den jeweiligen Randbedingungen ab – insbesondere von der Außen- und Innenlufttemperatur, den internen Lasten (z. B. Personen, Geräte) und der Jahreszeit. Diese Faktoren verändern das Druckfeld kontinuierlich im Verlauf des Jahres.

Die Analyse von Druckverhältnissen innerhalb eines Gebäudes spielt eine zentrale Rolle bei der Auslegung einer natürlichen Lüftung. Denn nur durch ein gezieltes Verständnis der Druckverteilungen lässt sich sicherstellen, dass Frischluft zuverlässig einströmt und verbrauchte Luft effizient abgeführt wird – ohne mechanische Unterstützung.

Eine wichtige Voraussetzung der Funktionstüchtigkeit der Lüftung ist die Unabhängigkeit des Betriebes der Klassenräume voneinander. Deshalb sind für jeden Raum eigene Zu- und Abluftkanäle vorzusehen, wie sie auch im betrachteten Strömungsmodell abgebildet worden sind. Es wäre jedoch aus bautechnischen und wirtschaftlichen Gründen denkbar, die äußeren Teilstrecken der Kanäle wie Ansaugung, vertikale Schächte, den Erdkanal und den horizontal verlaufenden Teil des Solarkamins für mehrere Räume zusammenzulegen, ohne jedoch dabei die Strömungsquerschnitte der Luftströme für die einzelnen Räume zu reduzieren.

Da der Druckverlust in den Kanälen mit steigender Luftgeschwindigkeit quadratisch zunimmt, sind generell größtmögliche Kanalquerschnitte anzustreben. Voruntersuchungen zeigten, dass ein wirtschaftlich noch vertretbarer Strömungsquerschnitt pro Schulkasse in Höhe von ca. 0.25 m^2 noch zu ausreichend geringen und deshalb vertretbaren Druckverlusten führt. Im Modell wird dieser Querschnitt einfachheits-halber und numerisch bedingt quadratisch realisiert mit $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$. Rechnerisch wäre aber auch eine Umsetzung mit $0.4 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ oder $0.3 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ möglich, ohne dass sich der Druckverlust nennenswert weil strömungsrelevant vergrößert.

In folgender Abbildung ist die (manuelle) Druckverlustberechnung für einen Beispielkanal (Zuluft sowie Fortluft) für eine Beispielsklasse dargestellt. Mit einem Summen Zeta-Wert von 31. Bei oben genannten Rohrquerschnitten und den gewünschten Volumenströmen von $300 - 400 \text{ m}^3/\text{h}$ ergeben sich Druckverluste von unter 10 Pa . Bei solch niedrigen Druckverlusten ist es nun möglich, den Kamineffekt der Schachtlüftung aktiv auszunutzen. Die Fehlertoleranz im System ist natürlich äußerst gering, äußere Einflüsse wie Wind (siehe Kap. 3.2) oder falsche Positionierungen der Luftansaugung (siehe Kap 3.2.1) und Auslässe im Außenraum haben hierbei direkten Einfluss und sind sehr sensibel.



Nr.	Typ	ζ
1	Einlass	0,5
2	Bogen	1,5
3	Kanal	2,0
4	Bogen	1,5
5	Kanal	2,0
6	Bogen	1,5
7	Kanal	2,0
8	Bogen	1,5
9	Bogen	1,5
10	Kanal	2,0
11	Auslass	1,0
12	Einlass	0,5
13	Kanal	2,0
14	Bogen	1,5
15	Kanal	2,0
16	Bogen	1,5
17	Kanal	2,0
18	Bogen	1,5
19	Kanal	2,0
20	Auslass	1,0

Abb. 6 Druckverlustberechnung für Beispielklasse

Wie verlässt die Luft das Gebäude?

Die Fortluftführung erfolgt in allen Varianten über vertikale Schächte Richtung Dach. Die reine Schachtlüftung kann (optional) auch mit einem Solarabsorber (siehe Kap 3.1.3) verbessert werden. Der Solarkamin kann hierbei durch Sonneneinstrahlung einen zusätzlichen thermischen Auftrieb erzeugen.

Wie gelangt Luft in das Gebäude?

Der Luftzutritt kann auf erdenklich viele Weisen erfolgen. Hier wurden exemplarisch besonders geeignete Varianten dargestellt.

Es kann nicht allgemein aufgezeigt werden, welche Variante die beste ist. Dies hängt sehr stark von dem lokalen Standort und Umgebungsbedingungen ab.

Erdkanal mit Kamin am Boden

Frischlufte wird über einen unterirdischen Kanal vorgewärmt und gelangt durch einen bodennahen Kamin ins Gebäude.

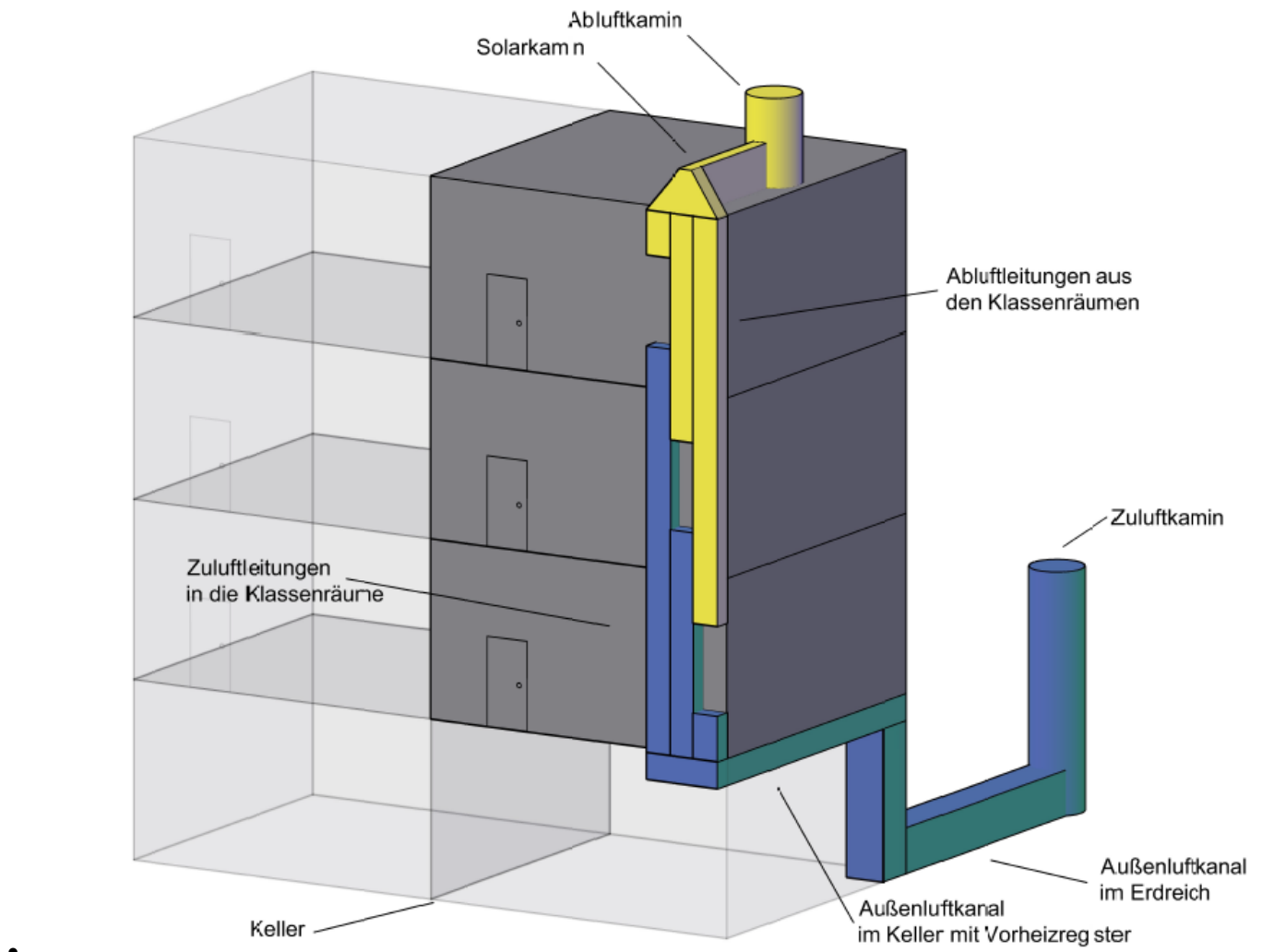


Abb. 7: Erschließung über Erdkollektor, Verteilung im Keller, Schacht je Klasse an Innenwand

Windfänger auf dem Dach

Diese leiten Außenluft durch den natürlichen Winddruck ins Innere. Besonders geeignet bei Standorten mit ausgeprägter Hauptwindrichtung (siehe Kap. 3.2.2)

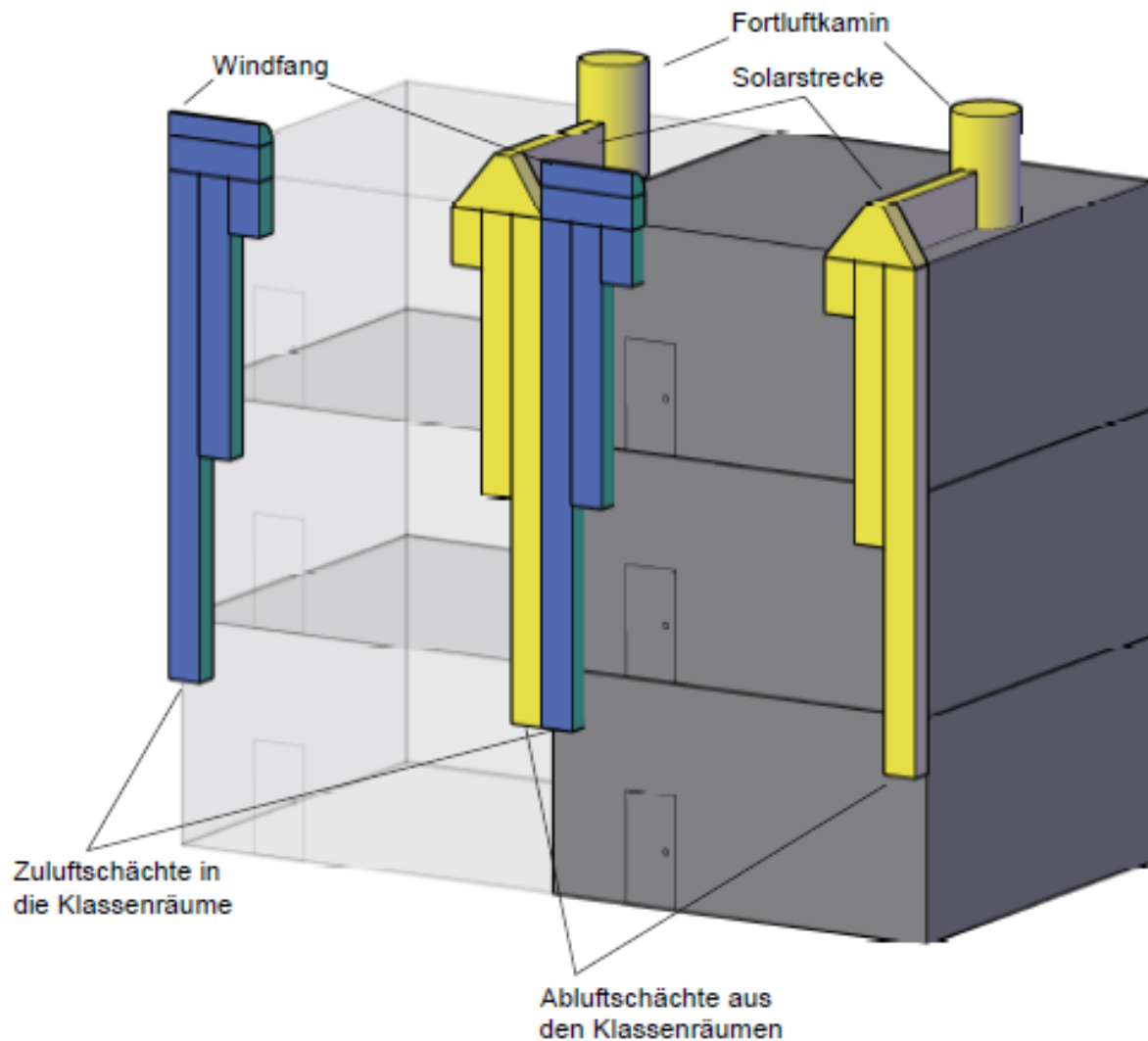


Abb. 8: : Erschließung über Windfänger am Dach, Schacht je Klasse an Innenwand

Direkte Einleitung in die Klassenzimmer:

Frischluft wird ohne Umwege in Aufenthaltsräume geführt. Dies ist prinzipiell die einfachste Lösung. Hierbei ist die Lage der Klasse (Luv/Lee-seitig), thermischer Komfort neben den Fenstern und die Sensibilität gegenüber äußeren Einflüssen wie sehr kritisch zu sehen.

Indirekte Einleitung über Vorwärmung im Keller

Luft wird zunächst im Keller (ggf. begehbar) temperiert, bevor sie in die Nutzräume geleitet wird.

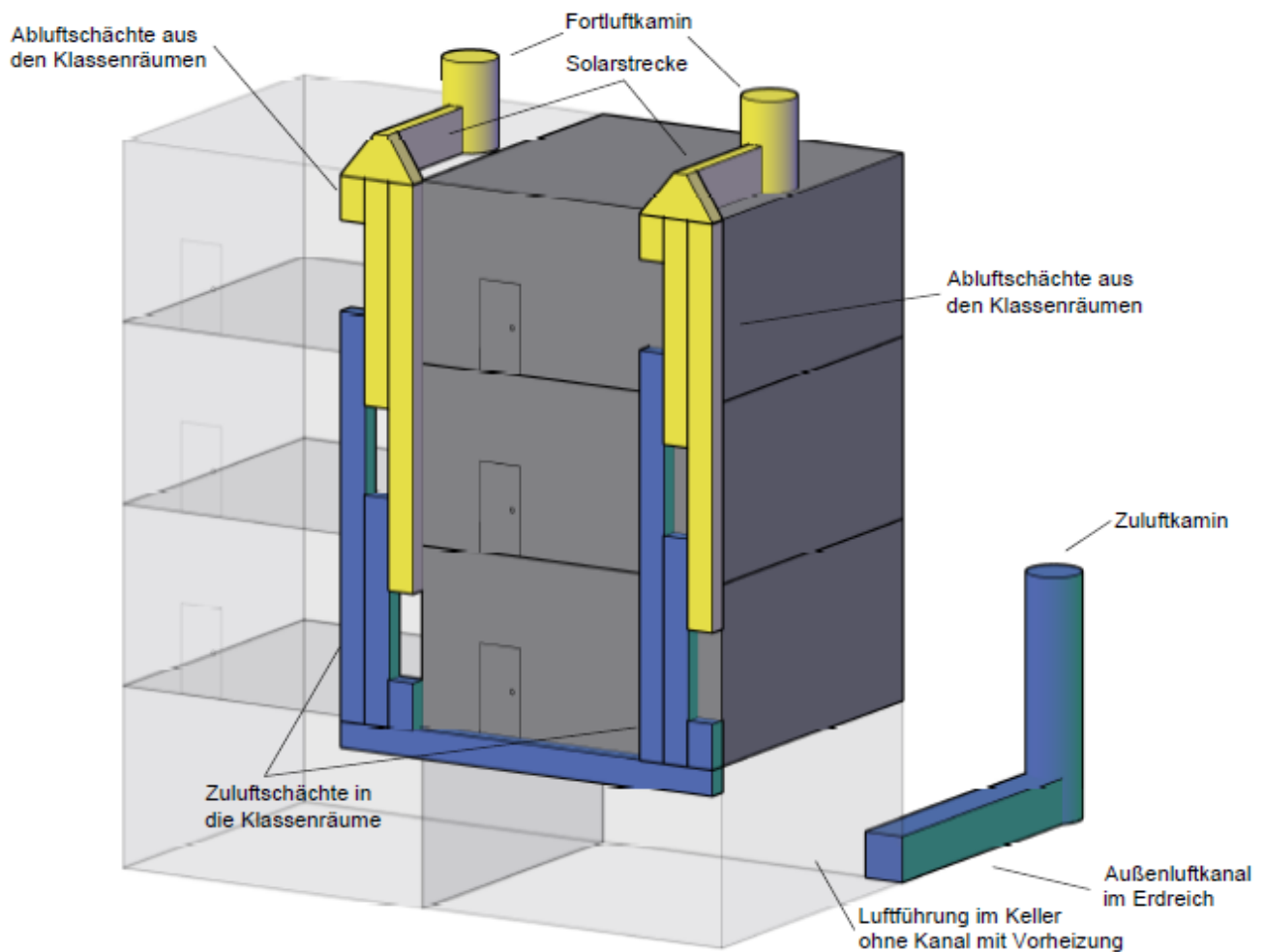


Abb. 9: Erschließung über Erdkollektor, begehbarer Keller als Teil des gemeinsamen Zuluftkanals

Wo werden welche Druckverhältnisse benötigt?

Für ein funktionierendes Lüftungskonzept ist es entscheidend, die Druckverteilung im Gebäude zu verstehen:

- **Positive Drücke** sind erforderlich, um die Frischluft ins Gebäude zu fördern (z. B. an den Zuluftöffnungen).
- **Negative Drücke** entstehen im Solarkamin durch den thermischen Auftrieb und unterstützen die Abluftbewegung.

Daraus folgt: Die Positionierung und die Art des Luftdurchlasses muss so gewählt werden, dass die natürlichen Druckverhältnisse optimal genutzt werden – sie sollten entweder die gewünschten Strömungsrichtungen unterstützen oder zumindest nicht entgegenwirken.

3.1. Schachtlüftung und Solarkamin

3.1.1. Strömungssimulation

Ziel ist die Bestimmung des Potenzials der freien Lüftung von Schulklassen. Aufgrund der jahreszeitlich wechselhaften außenklimatischen Verhältnisse in Deutschland sind die unterstützenden Kräfte von Wind und Sonne, sowie heiztechnische Maßnahmen mit zu berücksichtigen. Hierfür gelingt eine theoretische Betrachtung nur mit Hilfe der gleichzeitigen Anwendung der Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie unter Einbeziehung der Gasgesetze und Ansätze zur Berücksichtigung von Reibung aufgrund der Zähigkeit des strömenden Mediums Luft. Dabei entsteht ein System von partiellen Differenzialgleichungen, die in der Literatur als die Navier-Stokes-Gleichungen bekannt sind.

Bei der sogenannten CFD-Methode (Computational Fluid Dynamics) werden diese Gleichungen mit Hilfe des Finite-Volumen-Verfahrens numerisch gelöst. Hierfür wird der gesamte Strömungsraum in viele kleine Volumenelemente aufgeteilt, die zusammen ein Berechnungsnetz ergeben. Um hier den rechnerischen Aufwand nicht zu hoch zu treiben, wird in der Regel auf eine instationäre CFD-Strömungssimulation verzichtet.

Da es sich jedoch bei der Raumlüftungsströmung stets um turbulente Strömung und damit um ein instationäres Phänomen handelt, werden zusätzlich zu den oben genannten Gleichungen Erhaltungssätze für die kinetische Turbulenzenergie hinzugezogen, die auch eine Vielzahl empirisch bestimmter Parameter erhalten. Für die nachfolgend beschriebenen Modellierungs- und Simulationsarbeiten wird das Modul CFX aus dem Programmpaket ANSYS eingesetzt. Dort stehen die Turbulenzmodelle k-Epsilon und k-Omega zur Verfügung, welche idealerweise, wie in dieser Studie nachfolgend beschrieben, in Kombination als sogenanntes SST-Modell eingesetzt werden.

Es wird exemplarisch eine nach Süden ausgerichtete Modell-Schulklasse betrachtet und um Lüftungstechnische Komponenten ergänzt.

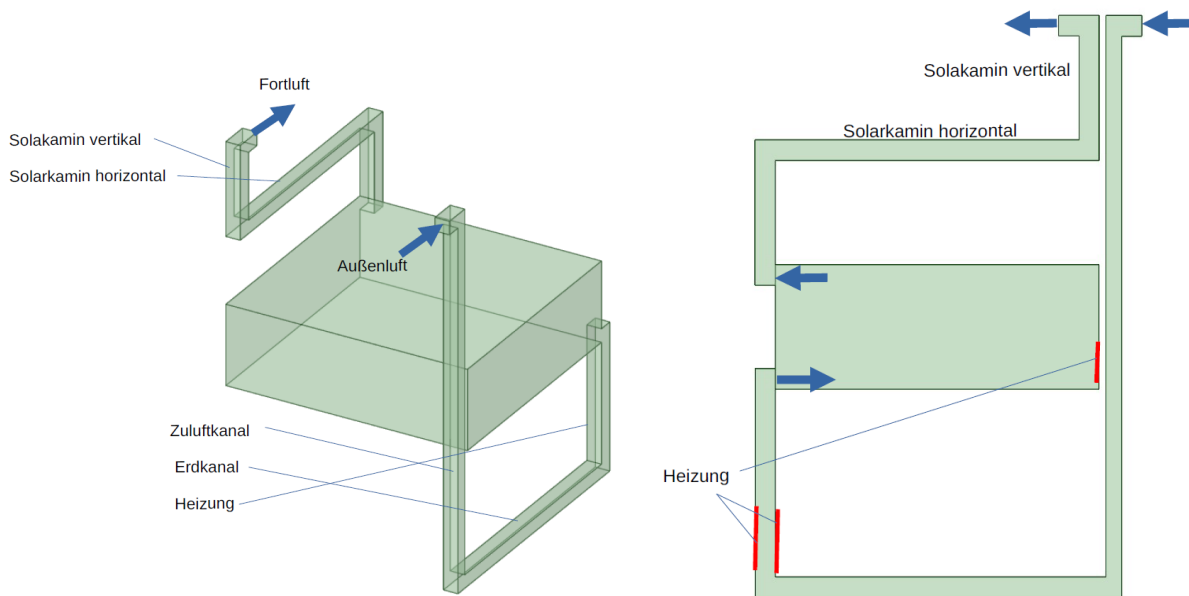


Abb. 10 3D- sowie Schnittansicht des untersuchten Klassenraumes

Abbildung 10 zeigt verschiedene Ansichten des auf der Grundlage der oben genannten Überlegungen konfigurierten Simulationsmodells. Der Modellraum hat einen quadratischen Grundriss mit 8 m x 8 m und einer lichten Raumhöhe von 3 m. Es wird angenommen, dass jeweils unter und über dem Raum ein weiteres Stockwerk existiert. Der Erdkanal führt unterhalb des untersten Stockwerks und der horizontale Teil des Solarkamins liegt direkt auf der Dachfläche des Gebäudes. Einfachheitshalber wird angenommen, dass die Zuluftöffnung gegen die Richtung der Windströmung ausgerichtet ist und die Fortluftöffnung in Richtung der Windströmung.

Teilstrecken des Strömungswegs werden im Modell thermisch aktiviert. Diese sind der Erdkanal, Heizflächen im vertikalen Zuluftschacht, eine Heizung unterhalb des Fensters (siehe Abb. 10), die Fensterfläche oberhalb der Heizfläche, der auf der Dachfläche direkt liegende Teil des horizontalen Solarkamins sowie zwei gegenüberliegende Seiten der insgesamt vier Seiten des vertikalen Solarkamins. Außerdem wird der Fußboden des Raums thermisch aktiviert, um die Wärmeabgabe von 20 Personen sowie solare Wärmeeinträge im Sommer zu berücksichtigen. Details zu den Angaben werden im nachfolgenden Abschnitt erläutert, da sie sich saisonal unterscheiden. Dass nicht alle Seiten des Erdkanals oder des Solarkamins thermisch aktiviert werden, ist der Tatsache geschuldet, dass, wie auch im letzten Abschnitt erläutert, die Kanäle für mehrere Räume aus bautechnischen Gründen ggf. auch zusammengelegt werden können, wodurch sich dann in der Praxis die mit der vorbeiströmenden Luft wärmeaustauschenden Kanalfächen verringern.

Für den Solarkamin wird angenommen, dass die nach Süden ausgerichtete Seite des vertikalen Teils und Richtung Himmel ausgerichtete Seite des horizontalen Teils einfach verglast sind. Die dem Glas gegenüberliegenden Seiten bestehen aus schwarz gefärbte Flächen zur höchstmöglichen Absorption der Solarstrahlung. Die Flächen, die nicht thermisch aktiviert werden, werden als adiabat betrachtet. Mögliche Wärmeeinflüsse durch Nachbarräume werden vernachlässigt.

Ebenfalls nicht berücksichtigt werden Leckagen durch Türen oder das Öffnen des Fensters. Für das Berechnungsgitter wird eine kartesische Struktur mit einer Maschenweite von 5 cm in jede Raumrichtung gewählt, wodurch sich eine gesamte Anzahl von ca. 1.5 Millionen Berechnungszellen (finite Volumina) ergeben. Auf eine Variation der Raumauswahl wird verzichtet. Denn durch eine Verschiebung des Modellraums in der Höhe verlagert sich lediglich der Druckverlust in den vertikalen Kanälen, die direkt an den Raum anschließen. Die Länge der gesamten Druckverluststrecke bleibt unverändert und damit auch der Druckverlust in Folge der Wandreibung im Kanal. Der vertikale Kanal, der aus dem Dachbereich Luft ansaugt, ist von der Position des Modellraums unberührt, da er in allen Fällen unterhalb des Erdgeschosses münden soll, um dort den Erdkanal zu erreichen.

Für die Durchströmung des Raumvolumens ist es von Vorteil, die Zu- und Abluftöffnung möglichst weit entfernt voneinander zu positionieren.

Die Zuluft sollte unten im Raum nahe des Bodens eingebracht werden und die Abluft oben unterhalb der Raumdecke. Um zu hohe Druckverluste am Luftaustritt und Zugerscheinungen im Raum zu verhindern, ist eine große Zuluftöffnung zu wählen. Eine zu große Zuluftöffnung kann jedoch zu einer reduzierten Eindringtiefe im Klassenraum führen.



Abb. 11: Beispielbilder von großflächigen, druckverlustarmen Zuluft- und Abluftelementen im Raum Cavazzen Lindau (li), MoMA New York (re)

Im folgenden Diagramm sind die Außenluftabhängigen Volumenströme der reinen Schachtlüftung (Kamineffekt) ohne thermisch aktivierten Solarkamin dargestellt. Man sieht, dass die Volumenströme direkt proportional mit der Außenlufttemperatur korrelieren. In der kalten Jahreszeit, funktioniert diese Lüftungsart somit vergleichsweise verlässlich und robust.

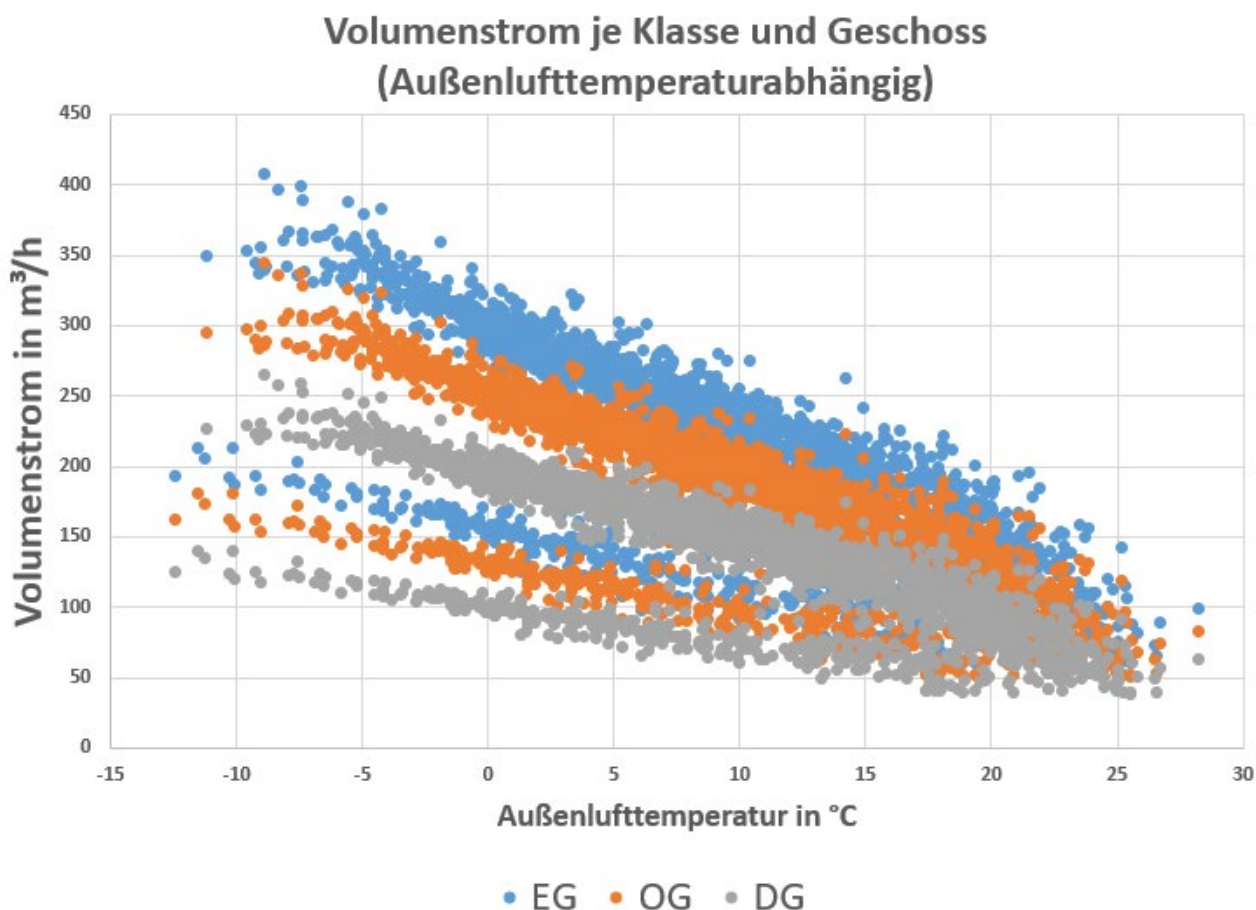


Abb. 12: Volumenstrom der Schachtlüftung (stark Außenlufttemperaturabhängig)

Nicht zu unterschätzen ist hierbei jedoch auch die Höhenabhängigkeit (Erdgeschossklasse, Obergeschossklasse, Dachgeschossklasse) der Schulklassen. Die unterschiedlich langen Schachtleitungen zwischen Schulklasse und Dachauslass haben hierbei einen deutlichen Einfluss. In Abb. 13 ist dieser über den Verlauf einer Winterwoche gut zu erkennen.

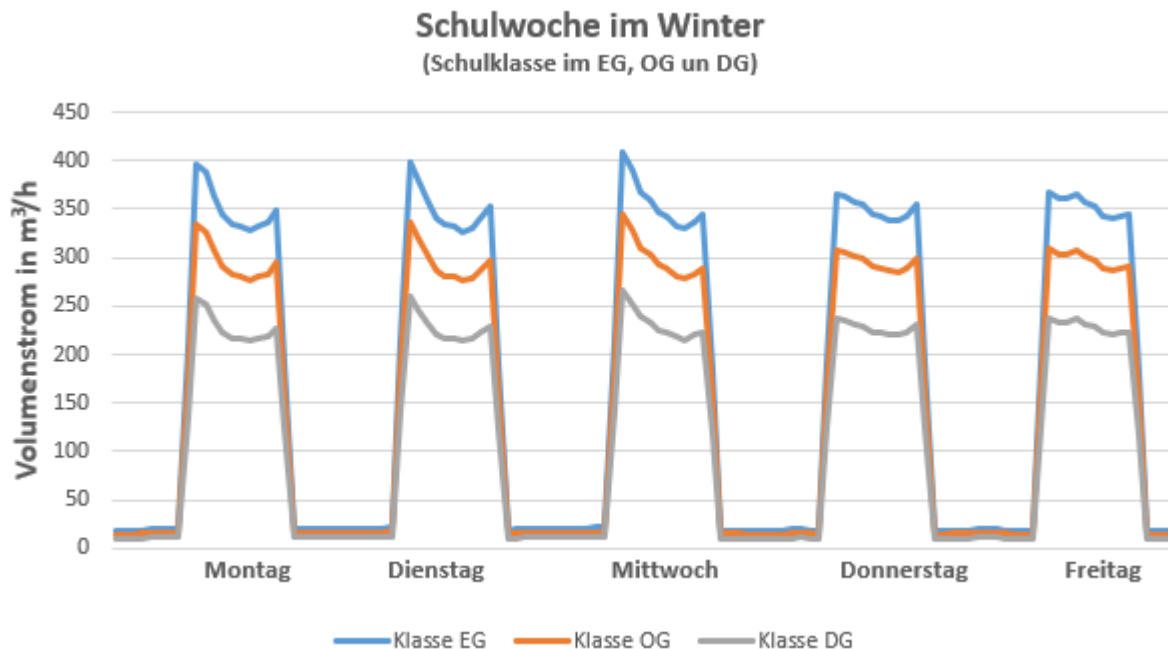


Abb. 13: Volumenstrom der Schachtlüftung ist höhenabhängig

Dieser Effekt lässt sich zum Teil auch korrigieren. Durch unterschiedliche Kanalquerschnitte wäre dies beispielsweise möglich, oder auch durch erhöhte Luftauslässe von z.B. den Dachgeschossklassen. Ob dies baurechtlich möglich ist, muss immer im Einzelfall geklärt werden

Mit folgender Formel lässt sich der Volumenstrom der Schachtlüftung (Kamineffekt) grob Abschätzen. Dieser ist gültig für die auf mittlerer Höhe liegenden Schulklasse im Obergeschoss.

$$Vol_{Schacht} \text{ in } m^3 \text{ pro } h = -8,222 * \text{Außenlufttemperatur in } ^\circ C + 301,2$$

3.1.2. Wintersituation

Die Abbildungen 14 bis 15 zeigen die Simulation einer häufigen winterlichen Situation. Für die Simulation wurde angenommen Windstille, keine Solarstrahlung, keine internen Wärmelasten und eine Außentemperatur von 5 °C. Die Wandtemperatur des Erdkanals wurde mit 10 °C angenommen. Die Heizleistung zur Vorerwärmung der Zuluft beträgt hier ca. 1,5 kW, wodurch eine Zulufttemperatur von ca. 16 °C erreicht wird. Es stellt sich eine Raumtemperatur in Höhe von ca. 20 °C ein.

Die Heizleistung des Heizkörpers an der Außenwand im Raum (6,5 m x 0,5 m) beträgt ca. 0,75 kW; sie kompensiert die Wärmeverluste durch Transmission des Fensters (6,5 m x 1,5 m) und der Außenwand (14 m²) sowie den Lüftungsverlust durch die mit Untertemperatur eingebrachte Zuluft. Das Ergebnis ist rein thermisch bedingt infolge der Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen. Es ergibt sich ein Frischluftvolumenstrom

in Höhe von $0,5 \times 0,25 \times 3600 = 450 \text{ m}^3/\text{h}$. Niedrigere Außentemperaturen oder das Auftreten interner Wärmelasten führen zu deutlich höheren Temperaturdifferenzen und somit auch höheren Luftvolumenströmen (siehe Kap 3.1.1). In Abbildung 14 ist zu sehen, dass die Austrittsgeschwindigkeiten an den Lüftungsöffnungen im Klassenraum zu keinen signifikanten Zugerscheinungen und Behaglichkeitsproblemen führen. Die Behaglichkeit ist nur unmittelbar vor dem Luftauslass eingeschränkt.

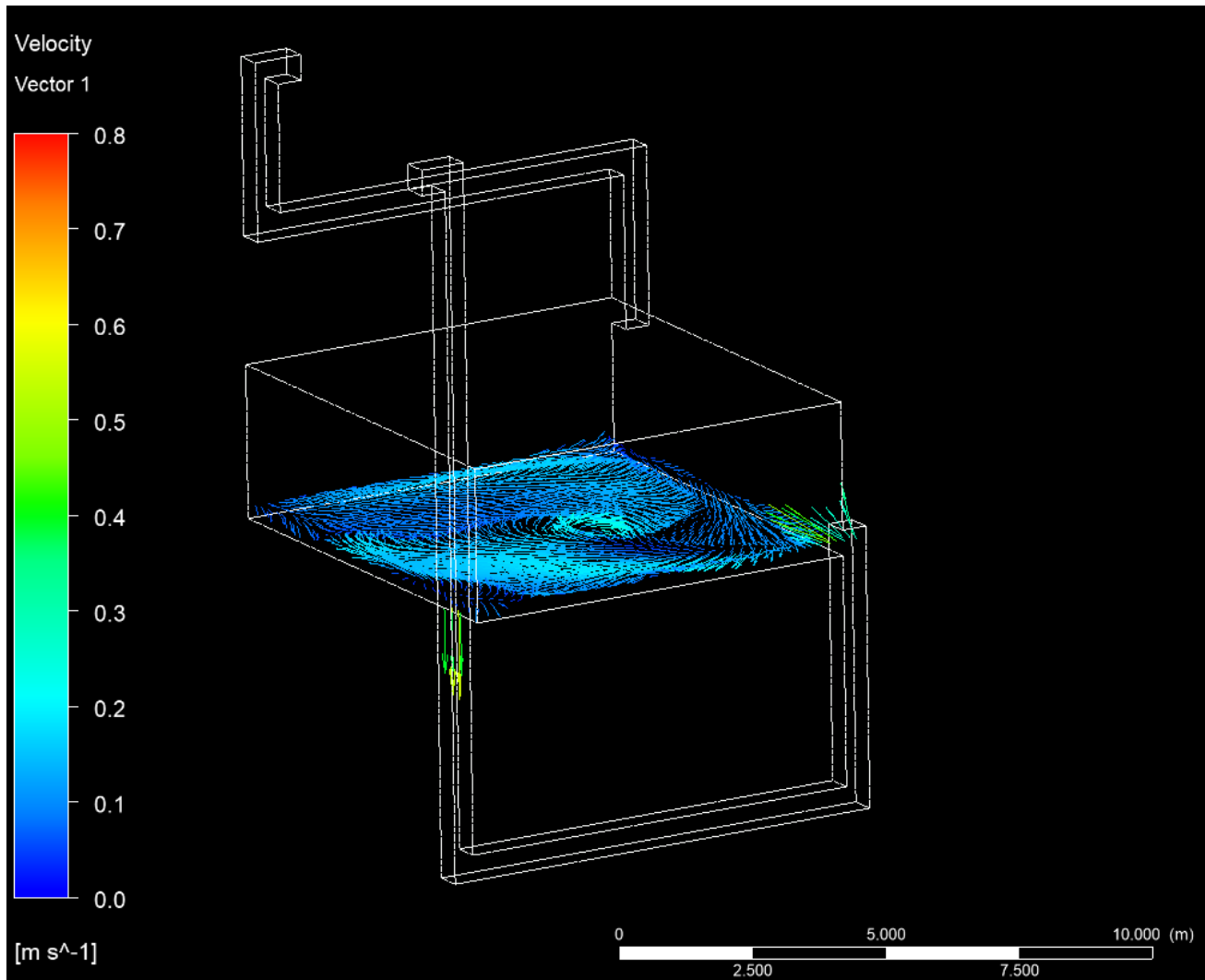


Abb. 14: Strömungsgeschwindigkeit im Raum, wichtig für Behaglichkeit und Akzeptanz

In folgender Abbildung sind die Lufttemperaturen im Zuluftkanal dargestellt. Hierbei ist die Vorerwärmung des Erdkollektors zu sehen sowie die Erwärmung der Zuluft auf etwa 16°C im vertikalen Zuluftschacht.

Die Vorerwärmung vor Eintritt in den Klassenraum wurde aus zwei Gründen gewählt:

- Reduzierung möglicher Behaglichkeitsprobleme in der Nähe der Lüftungsventile
- Tauwasserfreihaltung der Zuluftschächte, welche im Inneren des Gebäudes angeordnet sind. Dies fordert eine Vorerwärmung auf ein Temperaturniveau oberhalb der Taupunkttemperatur der Raumluft.

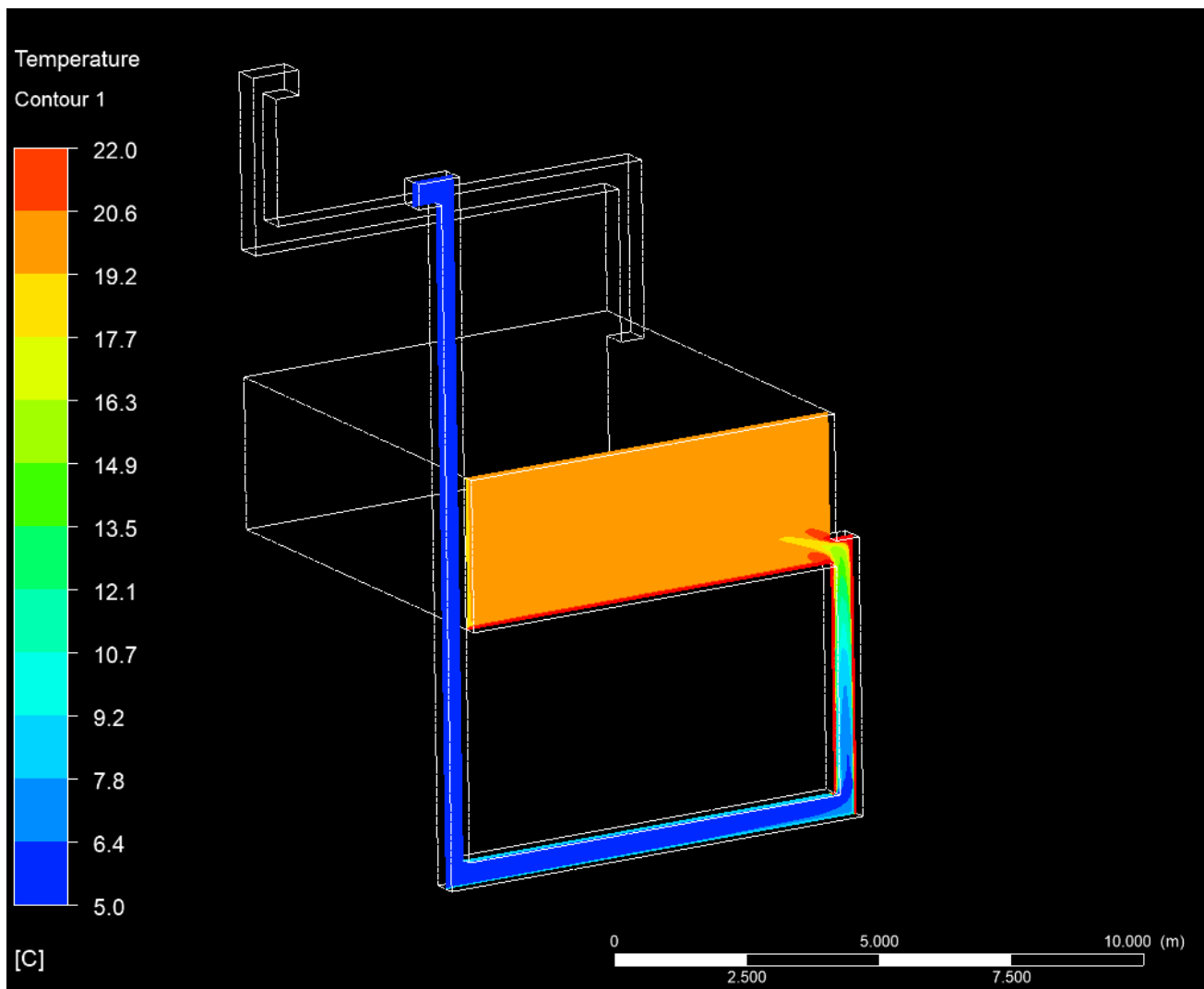


Abb. 15: Temperaturerhöhung im Erdkollektor, zentrale Vorerwärmung, homogene Temperaturverteilung im Raum

3.1.3. Sommerfall

Die Abbildung 16 zeigen die Simulation einer häufigen sommerlichen Situation. Für die Simulation wurde angenommen Windstille, 800 W/m^2 globale Solarstrahlung, internen Wärmelasten in Höhe von 80 Watt pro Person und eine Außentemperatur in Höhe von 20°C . Die Wandtemperatur des Erdkanals wurde mit 12°C angenommen. Die Heizsysteme blieben abgeschaltet. Es stellt sich eine Zulufttemperatur zum Raum in Höhe von ca. 18°C und eine Ablufttemperatur aus dem Raum in Höhe von ca. 27°C ein. Im Aufenthaltsbereich (0 bis 2 m) ist die mittlere Raumtemperatur 25°C .

Die Fortluft aus dem Solarkamin erreicht ca. 30°C .

Der Temperaturverlauf im Fortluftkanal ist in Abb. 16 zu sehen. Die Erwärmung der Fortluft auf etwa 30°C im horizontalen sowie vertikalen Solarkamin ist hierbei deutlich zu sehen. Ebenso ersichtlich ist das vergleichsweise homogene Raumtemperaturfeld im Klassenraum.

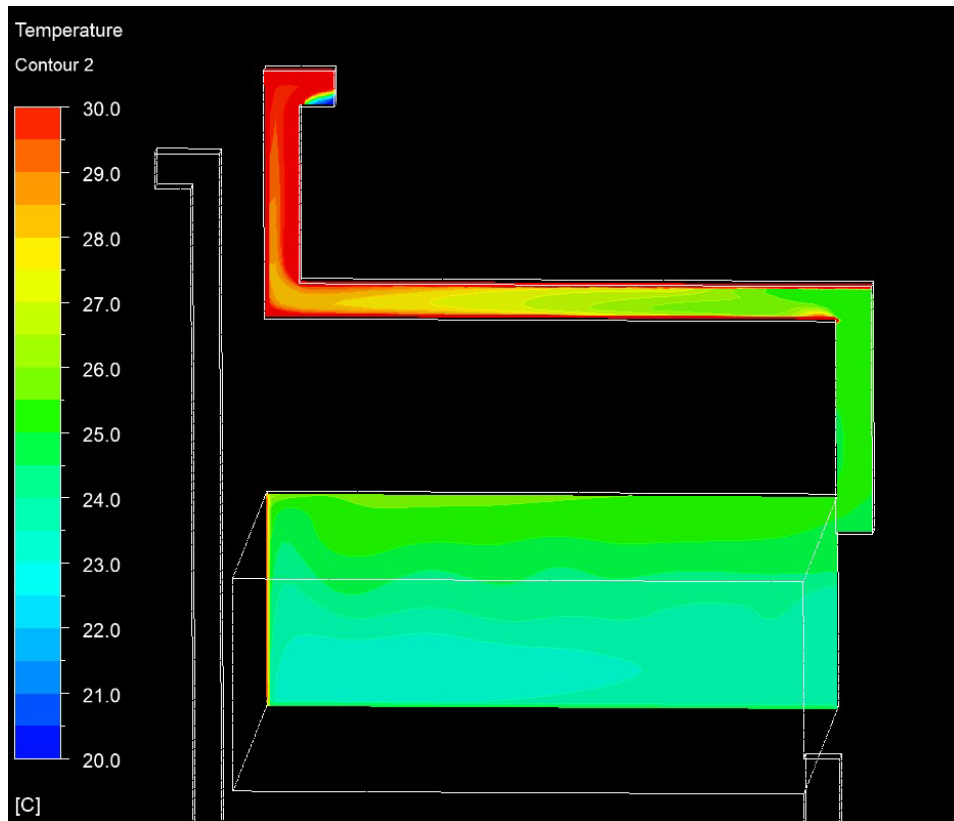


Abb. 16: Solarstrahlung sorgt für Temperaturerhöhung im Solarkamin

In Abb. 17 ist ein beispielhafter Solarkamin (vertikal) als Prototyp zu sehen. Deutlich zu erkennen sind die großen Glasflächen und der dunkle/schwarze Absorber im Inneren.



Abb. 17: Solarkamin, Prototyp im Labor (Hochschule München)[6]

In Abb 18 ist zu sehen, wie die reine Schachtlüftung im Tagesverlauf immer abnimmt. Durch die Annäherung der Außenlufttemperatur im Tagesverlauf Richtung Klassenraumlufttemperatur nimmt der thermische Antrieb immer weiter ab. Die Aktivierung im Solarkamin kann solche Situationen entschärfen und dennoch für einen kontinuierlichen Luftwechsel sorgen.

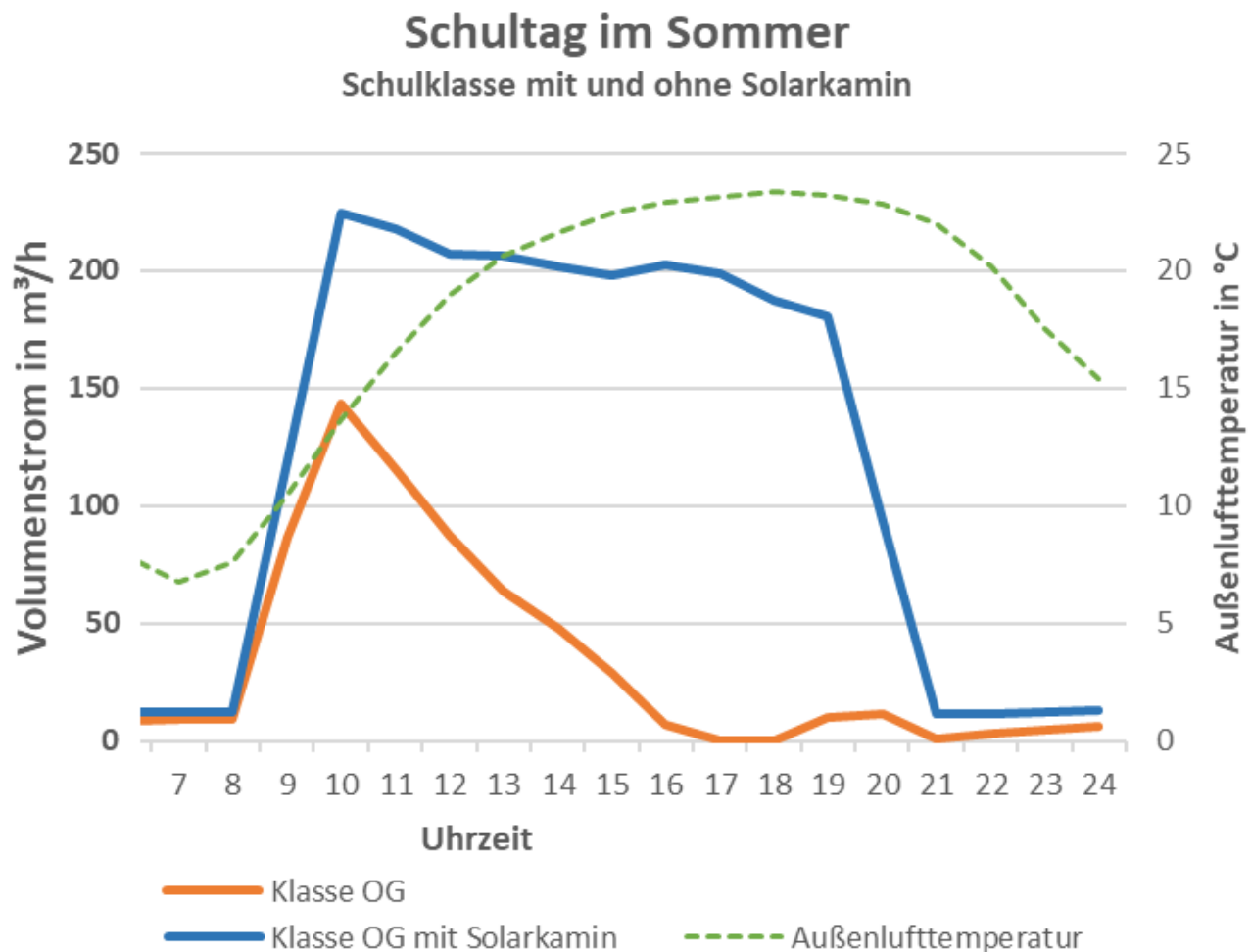


Abb. 18: Solarkamin unterstützt thermischen Antrieb bei hoher Außenlufttemperatur

Dieser Effekt ist ebenso in der Jahresbetrachtung gut erkennbar. In Abb. 19 sind die stündlichen CO₂-Konzentrationen im Klassenraum zu sehen. Hierbei ist gut erkennbar, dass die reine Schachtlüftung starke Einschränkungen bei wärmeren Temperaturen oberhalb der Heizgrenze bekommt. Der Solarkamin wirkt hierbei bei wärmeren Temperaturen entgegen, da diese meist sehr gut mit solarer Direktstrahlung korrelieren. Die dargestellten „Stundenmittelwertpunkte“ unterliegen der Randbedingung, dass die Fenster geschlossen bleiben. In der Realität ist zu erwarten, dass bei solch schlechter Luftqualität, zumindest außerhalb der Heizperiode, die Fenster geöffnet werden würden.

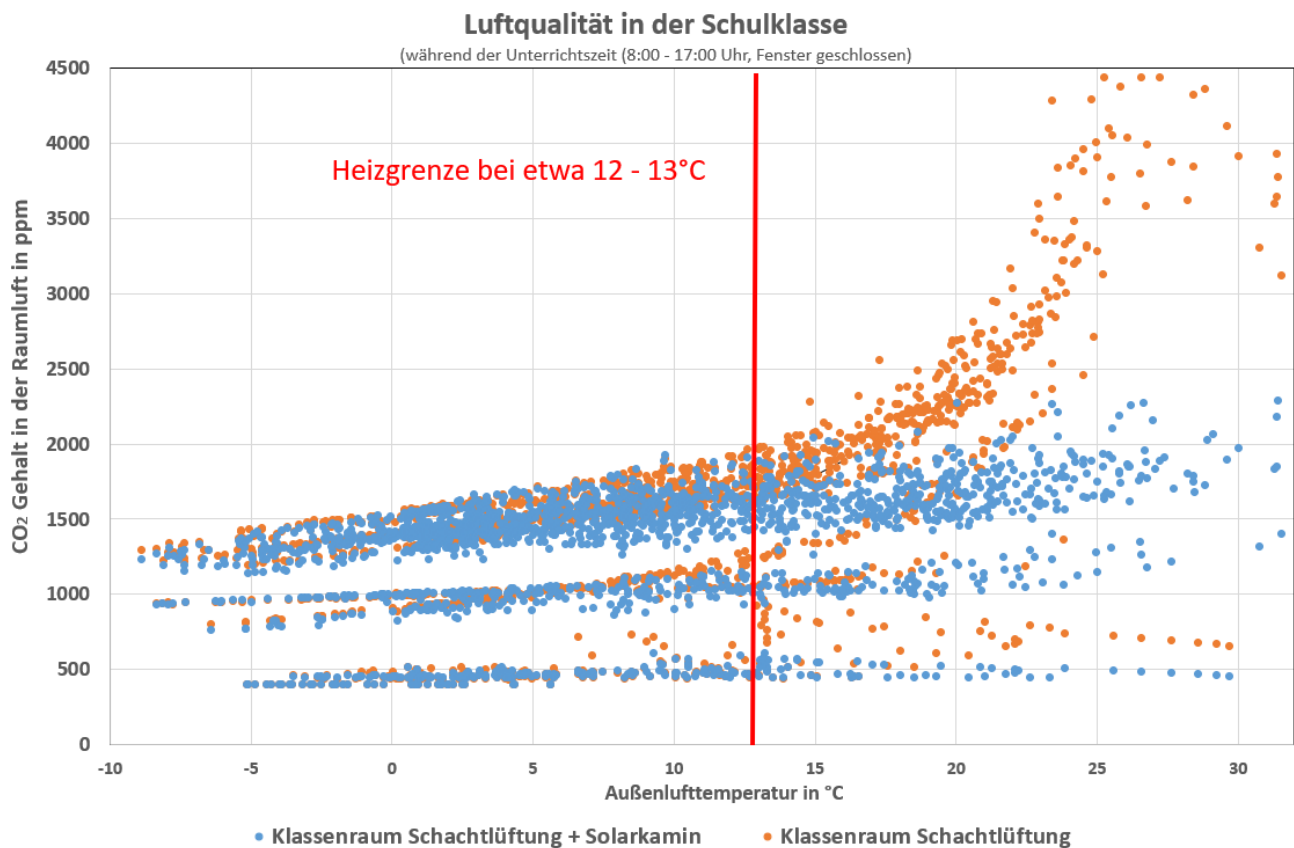


Abb. 19: UBA-Leitwert werden eingehalten während der Heizperiode. Deutlicher Einfluss des Solarkamins außerhalb der Heizperiode

Andererseits ist argumentierbar, dass man diesen Situationen auch mit klassischer Fensteröffnung begegnen kann. Während solcher Situationen sind moderne Schulen außerhalb der Heizsaison, der unmittelbare Komfort am Fenster ist wenig gefährdet und womöglich sind einzelne Fenster sowieso geöffnet.

In Abb.20 ist die Volumenstromdifferenz über das gesamte Jahr dargestellt. Bemerkenswert ist, dass es in den Wintermonaten auch zu negativen Effekten hierbei kommen kann. Der kalte, ausgekühlte Solarkollektor auf dem Dach „bremst“ den normalen thermischen Auftrieb, der durch die Schächte gegeben ist. Erst im Laufe der Zeit Richtung „kritischer Sommermonate“ zeigt sich der Nutzen im Solarkamin. Die Phasen mit wenig Differenzvolumenstrom im April, Juni, August und September sind Schulferien, bei denen die Lüftungsklappen geschlossen sind.

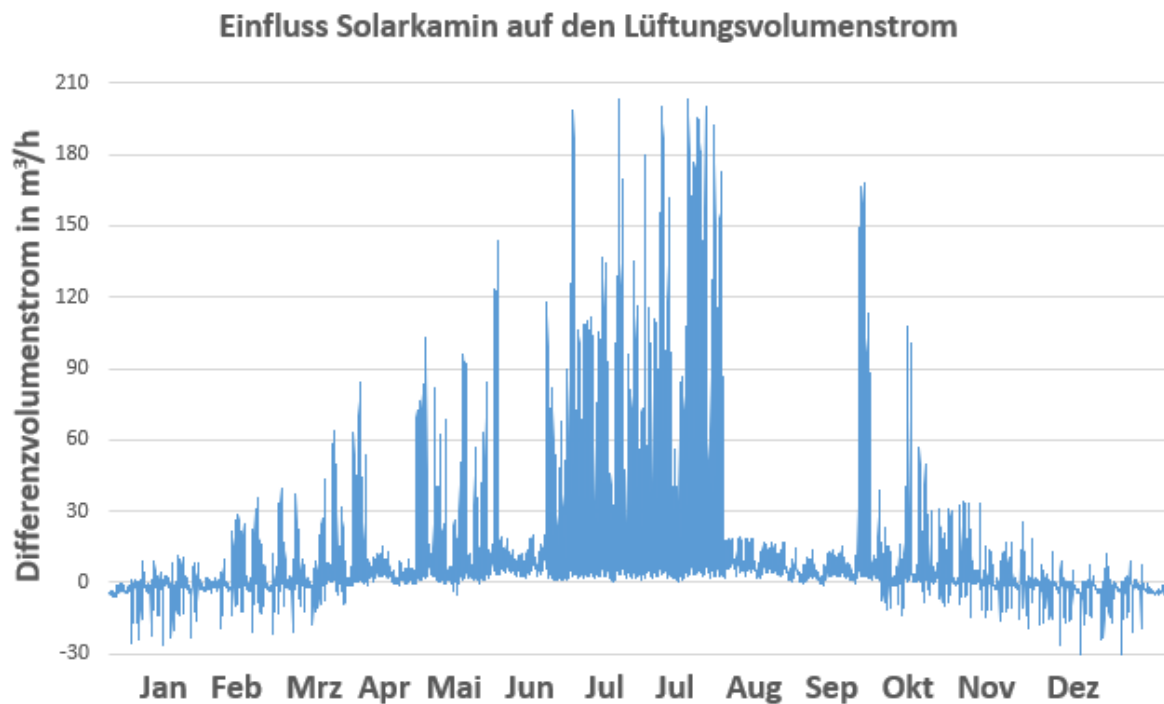


Abb. 20: Solarkamin: negativer Einfluss im Winter, positiver in (kritischen) Sommersituationen. "Lücken" im Verlauf sind Schulferien.

Über folgende Formel kann der Zusatznutzen grob abgeschätzt werden. Diese Abschätzung ersetzt ggf. keine genaue Projektierung, kann jedoch ggf. für eine Vorabschätzung und Vordimensionierung genutzt werden. Sie gilt repräsentativ für das mittlere Geschoss (Obergeschoss). Die Formel ist nur gültig in Ergänzung (Addition) zur Abschätzungsformel der reinen Schachtlüftung (siehe Kap. 3.1.1)

$$Vol_{Diff} \text{ in } m^3 \text{ pro } h = -8,19 + 2,48 * \text{Außenlufttemperatur in } ^\circ C + 0,065 * \text{Direktstrahlung in Watt pro } m^2$$

3.1.4. Bedeutung der Schachtlüftung und Solarkamin für das Projekt

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die CFD-Strömungssimulation die Funktionstüchtigkeit des oben beschriebenen Lüftungssystems bei Windstille für typische Winter- und Sommertage gut bestätigt. Im Winter führen niedrigere Außentemperaturen oder auch Wind zu höheren Luftvolumenströmen, die mit Hilfe von Lüftungsklappen beschränkt werden müssen. Im Sommer können bei höheren Außentemperaturen als hier betrachtet und bei Windstille die Fenster geöffnet werden.

3.2. Windeinfluss auf Druckverhältnisse

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde eine numerische Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamics, CFD) durchgeführt, um die Winddruckverteilung auf einem idealisierten Schulgebäude zu untersuchen. Ziel der Studie ist es, die Auswirkung unterschiedlicher Positionen der Außen- und Fortluftöffnungen vor und auf dem Gebäude zu untersuchen. Hierfür wurden zum einen die Druckverteilungen bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten untersucht, als auch die Auswirkung unterschiedlicher Windfängergeometrien untersucht.

Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse basieren auf einer systematischen CFD-Analyse unter vereinfachten, aber praxisnahen Randbedingungen.

Geometrie und Randbedingungen

Die Simulation wurde an einer idealisierten, quaderförmigen Geometrie mit den Abmessungen $22 \times 22 \times 11,5$ m durchgeführt. Diese Form wurde gewählt, da sie den Proportionen eines kompakten, dreigeschossigen Schulgebäudes entspricht. Aufgrund der geometrischen und strömungstechnischen Symmetrie konnte die Analyse auf eine halbe Gebäudegeometrie ($22 \times 11 \times 11,5$ m) reduziert werden (s. Abbildung 9), wodurch sich die Rechenzeit signifikant verringern ließ, ohne die Aussagekraft der Ergebnisse zu beeinträchtigen.

Für die numerische Domäne wurden zusätzlich ein Vorfeld von 50 m, ein Nachfeld von 138 m sowie seitliche Randabstände von je 88 m berücksichtigt. Diese erweiterten Randbereiche stellen sicher, dass die Strömung sich vor der Interaktion mit dem Gebäude ausreichend entwickeln kann und nach der Umströmung keine numerischen Artefakte auftreten.

Die Windgeschwindigkeit am Eintritt wurde auf einer Höhe von 10m im Bereich von 1 m/s bis 6 m/s variiert, um den Einfluss unterschiedlicher Windstärken auf die Druckverhältnisse an der Gebäudehülle zu analysieren.

Höhenabhängige Windgeschwindigkeit

In ungestörter Umgebung steigt die Windgeschwindigkeit mit zunehmender Höhe über dem Boden an. Dieses Phänomen lässt sich durch ein logarithmisches Profil beschreiben, das auf der Prandtl'schen Grenzschichttheorie basiert. Die entsprechende Gleichung zur Bestimmung der Windgeschwindigkeit $U(z)$ in einer bestimmten Höhe z lautet [8]:

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) \quad (1)$$

$U(z)$	Windgeschwindigkeit in Höhe z	<i>in m/s</i>
u_*	Schubspannungsgeschwindigkeit	<i>in m/s</i>
κ	Kármán-Konstante (ca. 0,42)	
z_0	Rauigkeitslänge	<i>in m</i>
z	Höhe über Boden	<i>in m</i>

Da das Gebäude in dieser Studie eine Höhe von 10 m aufweist, wurde die Windgeschwindigkeit in genau dieser Höhe als Referenzwert gewählt. Um auf Basis dieses Wertes die Schubspannungsgeschwindigkeit zu berechnen, wird Gleichung (1) nach u_* umgestellt:

$$u_* = \frac{U_{10} \cdot \kappa}{\ln\left(\frac{z + z_0}{z_0}\right)} \quad (2)$$

U_{10} Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe in m/s

Durch Einsetzen dieser Formel in Gleichung (1) ergibt sich ein Ausdruck, mit dem sich die Windgeschwindigkeit in beliebiger Höhe z in Abhängigkeit von der bekannten Geschwindigkeit in 10 m Höhe bestimmen lässt:

$$U(z) = \left(\frac{U_{10} \cdot \kappa}{\ln\left(\frac{z + z_0}{z_0}\right)} \right) \cdot \ln\left(\frac{z + z_0}{z_0}\right) \quad (3)$$

In Abbildung 10 sind die Geschwindigkeitsprofile an der Eingangsrandbedingung der Simulation abgebildet. Die Geschwindigkeiten beziehen sich dabei immer auf eine Höhe von 10 m.

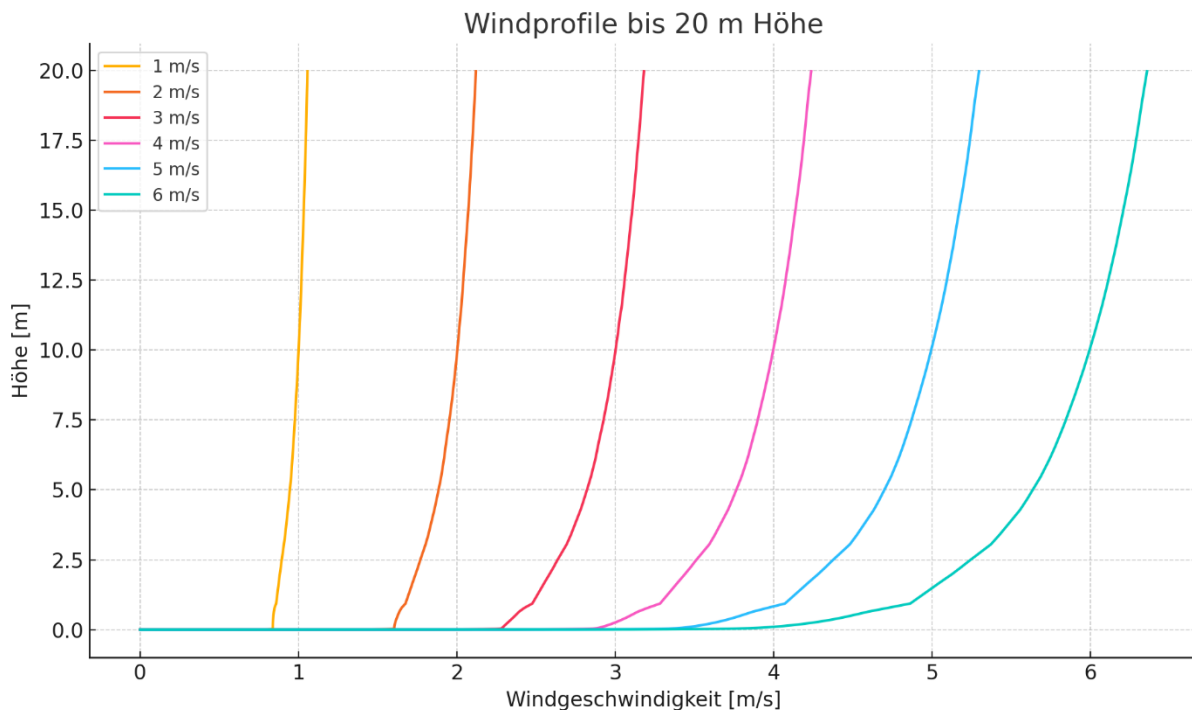


Abb. 21: Höhenabhängige Windprofile bis 20 m Höhe, für Windgeschwindigkeiten 1 - 6 m/s in 10 m Höhe

3.2.1. Windgeschwindigkeit und -druck auf dem Dach

Zur Analyse der Windgeschwindigkeiten und Druckverhältnisse auf und um das Gebäude wurde eine Schnittebene parallel zur Strömungsrichtung in einem Abstand von 2,5 m zur Hauskante gelegt. Abbildung 22 zeigt die Druckverteilung bei einer Windgeschwindigkeit von 3 m/s in 10 m Höhe auf der Schnittebene.

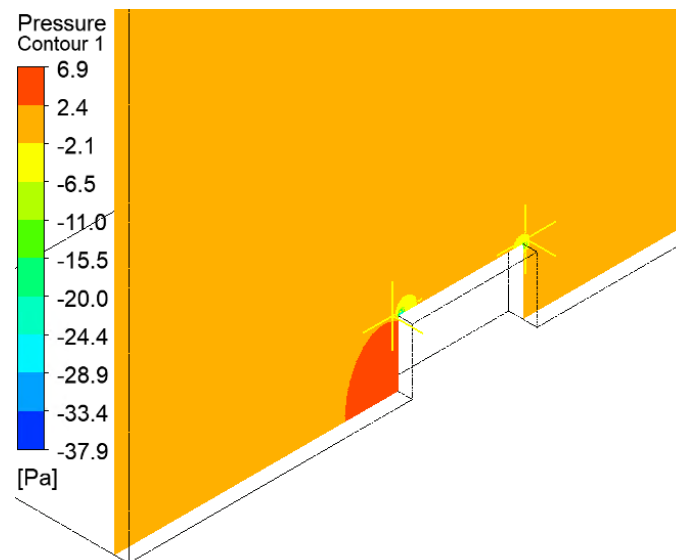


Abb. 22: CFD Simulation, Schnittebene parallel zur Strömungsrichtung, 2,5m von der Hauskante entfernt. Beispielfaht Druck bei einer Windgeschwindigkeit von 3m/s auf einer Höhe von 10m dargestellt

In Abbildung 23 ist das Strömungsfeld dargestellt, zu erkennen ist, dass die Luft von vorne auf das Haus auftrifft und dann nach oben oder seitlich (nicht erkennbar), abgelenkt wird. Das Strömungsfeld wird noch in einem Abstand zum Haus von dem Abgelenkten Luftstrom beeinflusst.

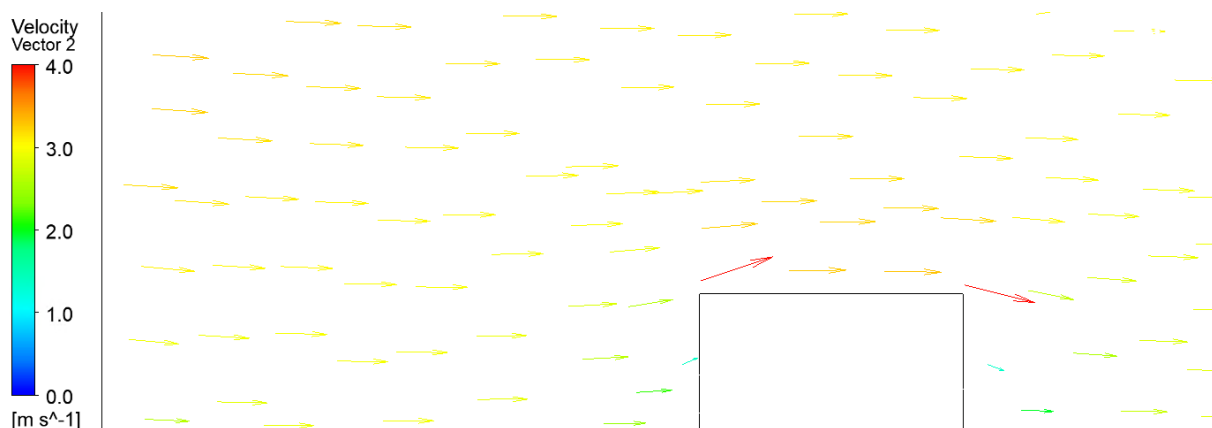


Abb. 23: CFD Simulation Geschwindigkeitsvektorfeld bei einer Windgeschwindigkeit von 3m/s auf 10m Höhe. Überströmung der Haus-Geometrie.

Abbildung 24 zeigt die Geschwindigkeitsverteilung um das Gebäude bei 3 m/s (10 m Höhe). Vor und hinter dem Gebäude ist die Luftgeschwindigkeit reduziert, während sie über dem Dach ansteigt – teilweise deutlich über die freie Anströmgeschwindigkeit.

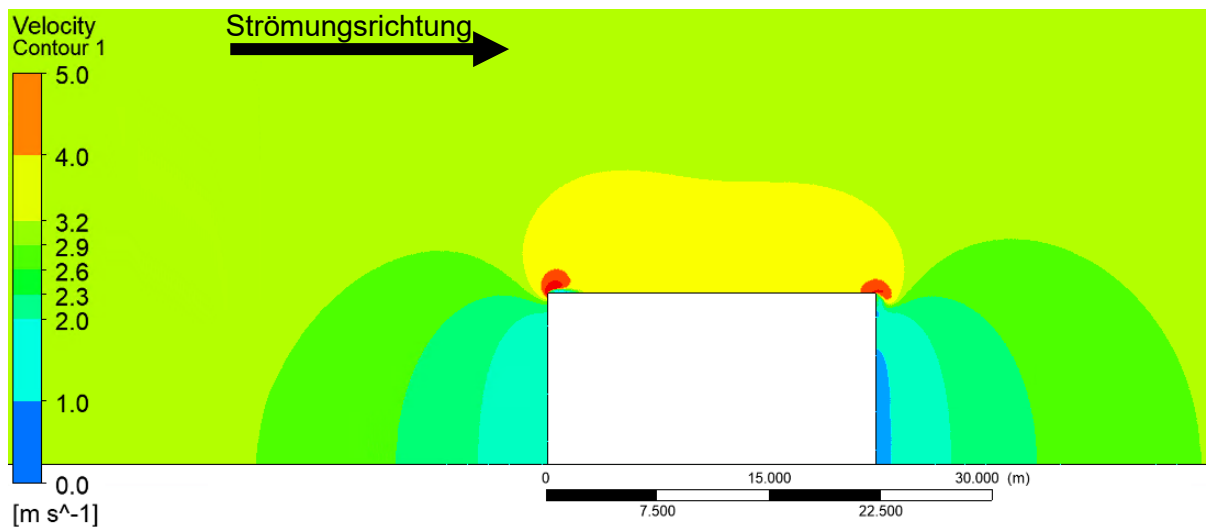


Abb. 24: CFD Simulation, Schnittebene parallel zur Strömungsrichtung, 2,5m von der Hauskante entfernt, Geschwindigkeit bei Windgeschwindigkeit von 3m/s auf einer Höhe von 10m.

Für ein Eindringen der Luft ins Gebäude ist eine Druckdifferenz erforderlich, welche von außen nach innen abnimmt. Der notwendige Überdruck kann statischer oder dynamischer Natur sein – dies beeinflusst die Auslegung des Außenluftdurchlasses maßgeblich.

Abbildung 25 verdeutlicht die Strömungsgeschwindigkeiten für Windgeschwindigkeiten von 1 m/s bis 6 m/s. Über dem Dach entspricht die Geschwindigkeit mindestens der

Anströmgeschwindigkeit. Der durch reduzierte Strömung geprägte Bereich vor und hinter dem Gebäude nimmt mit steigender Windgeschwindigkeit zu.

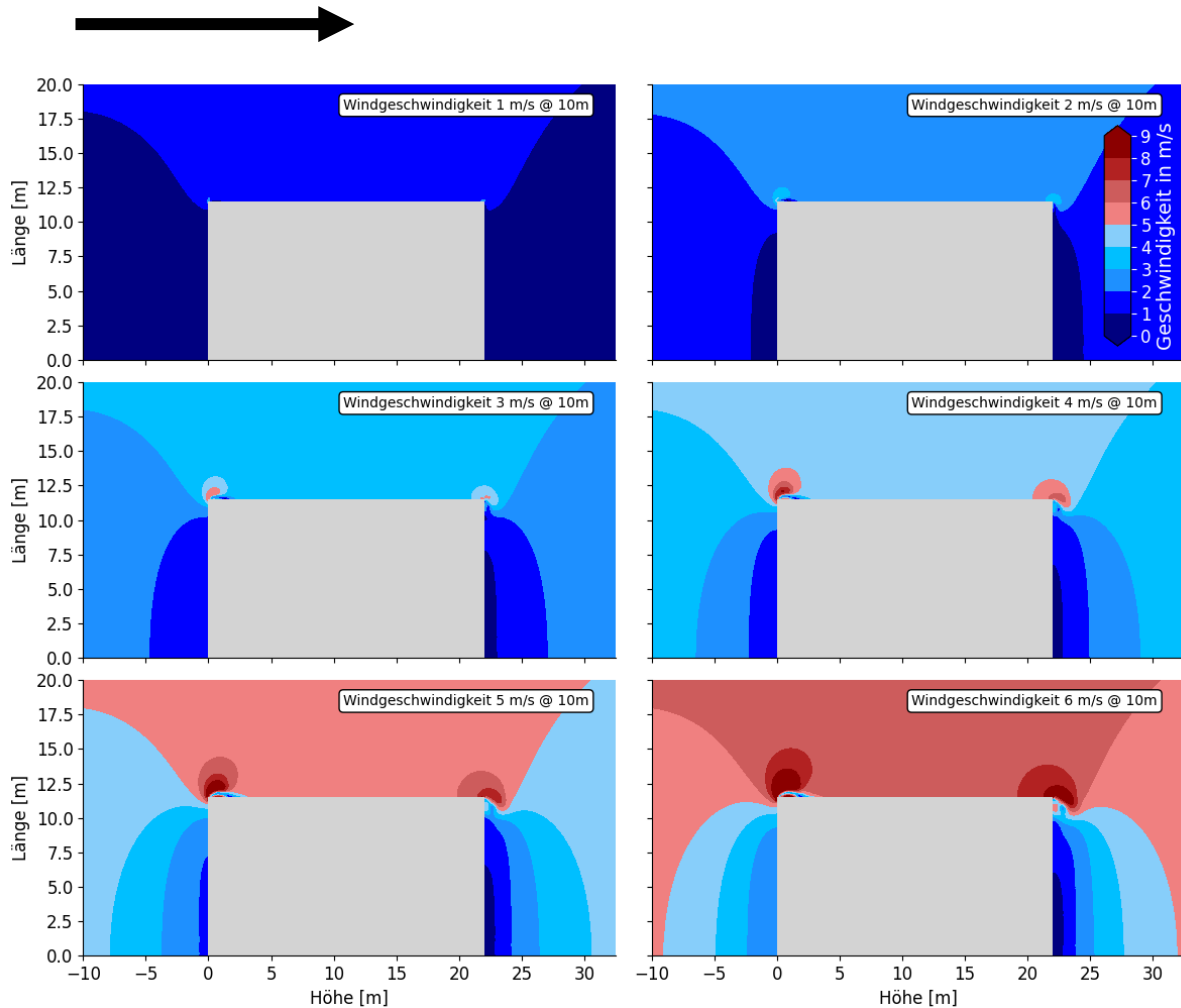


Abb. 25: CFD Simulation, Geschwindigkeiten auf einem Schnitt, 2,5m von der Hauskante entfernt für Windgeschwindigkeiten von 1m/s bis 6m/s.

Abbildung 26 zeigt die statischen Drücke bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten. Über dem Dach bildet sich ein ausgeprägter Unterdruck, der mit zunehmender Geschwindigkeit stärker wird. Auf der windzugewandten Seite hingegen ist ein signifikanter Überdruck messbar, während sich auf der Rückseite ein weiteres Überdruckgebiet ausbildet.

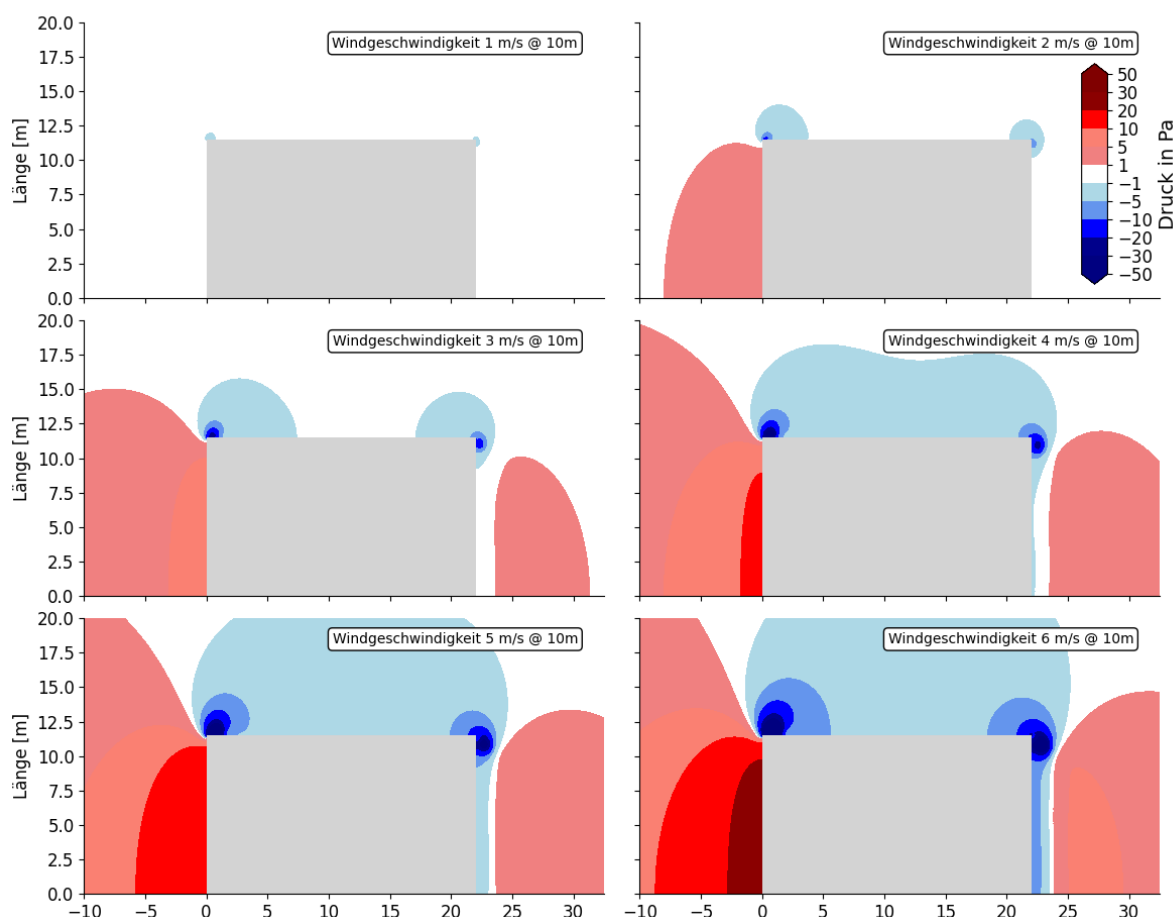


Abb. 26: CFD Simulation, statischer Druck auf einer Schnittebene, 2,5m von der Hauskante entfernt für Windgeschwindigkeiten von 1m/s bis 6m/s.

Daraus lässt sich schließen: Ein rein statisch wirkender Außenluftdurchlass (z. B. mit Öffnung orthogonal zur Strömungsrichtung) ist auf dem Dach ungeeignet, da der Unterdruck dort eher zur Absaugung führt. Auf der windzugewandten Seite hingegen kann durch den Überdruck ein Luftstrom ins Gebäude unterstützt werden.

Abbildung 27 zeigt den Gesamtdruck (Summe aus statischem und dynamischem Druck) für Windgeschwindigkeiten von 1–6 m/s, bezogen auf einen Referenzdruck von 1013 hPa. Über dem Dach entstehen dabei teils hohe positive Druckwerte – durch die hohe Luftgeschwindigkeit steigt der dynamische Druck entsprechend an. Daraus ergibt sich, dass der Einsatz eines in Windrichtung ausgerichteten Windfängers (siehe Abb. 8) sinnvoll ist. Er nutzt den Staudruck, um den niedrigen statischen Druck über dem Dach auszugleichen.

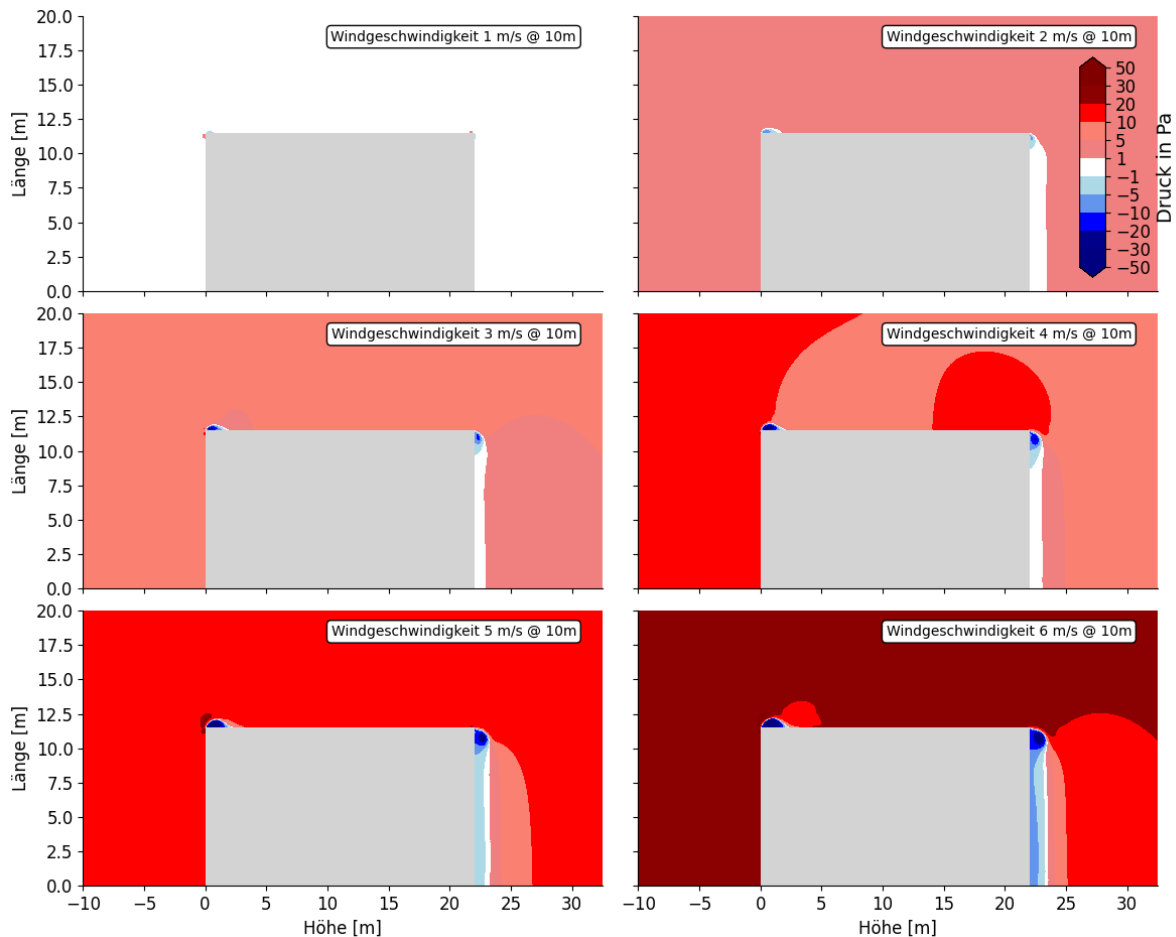


Abb. 27: CFD Simulation, gesamt Druck auf einer Schnittebene, 2,5m von der Hauskante entfernt für Windgeschwindigkeiten von 1m/s bis 6m/s. Referenzdruck 1013 hPa.

3.2.2. Bedeutung der Platzierung von Außen- und Fortluftdurchlässen

Die Positionierung und Geometrie von Außen- und Fortluftdurchlässen sind entscheidend für die Funktionalität des Belüftungssystems. Ein Außenluftdurchlass benötigt positiven Druck, um Luft ins Gebäude zu führen. Ein Fortluftdurchlass hingegen funktioniert am besten bei negativem Druck, um Luft effektiv abzuführen.

Grundsätzlich gilt:

- Ein Durchlass orthogonal oder entgegen der Strömungsrichtung ist primär vom statischen Druck abhängig.
- Ein in Strömungsrichtung ausgerichteter Durchlass nutzt hingegen vor allem den dynamischen Druck.
- Um bei großer Windstärke einen zu hohen Luftwechsel zu vermeiden und Heizenergie einzusparen, ist der Zuluftkanal mit einer vollständigen schließenden Klappe auszustatten.

Der statische Druck ist vor dem Gebäude und in einem gewissen Abstand dahinter am höchsten, über dem Dach hingegen niedrig. Der Gesamtdruck ist – außer an der windabgewandten Gebäudeseite – überwiegend positiv.

Empfehlungen zur Positionierung von Luftdurchlässen (siehe Tabelle 4):

Tabelle 1 Empfehlung Position Luftdurchlass Außen- und Fortluft

Ausrichtung zur Windrichtung	Luftdurchlass Typ	Position des Luftdurchlasses		
		Vor dem Gebäude	Auf dem Dach	Hinter dem Gebäude
orthogonal / windabgewandt	Außenluft	gut	schlecht	gut
	Fortluft	schlecht	gut	schlecht
Windzugewandt	Außenluft	gut	gut	gut
	Fortluft	schlecht	schlecht	schlecht

Die natürliche Lüftung ist maßgeblich von den äußeren Randbedingungen, wie interne Lasten und meteorologischen Einflüssen, abhängig. Im weiteren Verlauf wird analysiert, wie sich die statischen und dynamischen Drücke vor und auf dem Gebäude bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten darstellen. Dieses Wissen ist notwendig für die Positionierung und die Auswahl der Geometrie von Luftdurchlässen. Es soll zunächst ermittelt werden, welche Luftgeschwindigkeiten im jährlichen Mittel an verschiedenen Standorten zu erwarten sind. Als auch ob es eine dominierende Windrichtung in Deutschland gibt, als auch, ob diese Standort abhängig sind.

Die meteorologischen Daten stammen aus der Software Meteonorm und beziehen sich auf die aktuellen klimatischen Bedingungen an den untersuchten Standorten in Form von Test Referenz Jahren. Diese bilden den Mittelwert über mehrere Jahre ab.. Damit wird sichergestellt, dass die Analyse realitätsnahe Aussagen über das heutige Lüftungspotenzial erlaubt.

Diese Daten bilden die Grundlage für die später folgende numerische Strömungssimulation (CFD), welche das Luftstromverhalten um und in Schulgebäuden realitätsnah abbilden soll.

3.2.3. Windgeschwindigkeit und -richtung

Für die Analyse wurden 12 deutsche Städte (s. Abbildung 1) mit unterschiedlicher topografischer und klimatischer Prägung untersucht. Die Daten wurden differenziert erfasst:

- Über den Tagesverlauf (00–24 Uhr)
- Spezifisch für Schulzeiten (08–13 Uhr und 08–17 Uhr)

Diese Zeitfenster erlauben eine zielgerichtete Beurteilung der natürlichen Durchlüftung während des Unterrichts. Zusätzlich wurde durch die Auswahl von Städten in verschiedenen Windzonen Deutschlands sichergestellt, dass die Ergebnisse übertragbar sind und vielfältige planerische Szenarien abgedeckt werden können. Jedoch sind die tatsächlich vorherrschenden Windgeschwindigkeiten und -richtungen stark von lokalen Gegebenheiten wie lokalen Klima Phänomen oder der umgebenden Bebauung.

Standorte

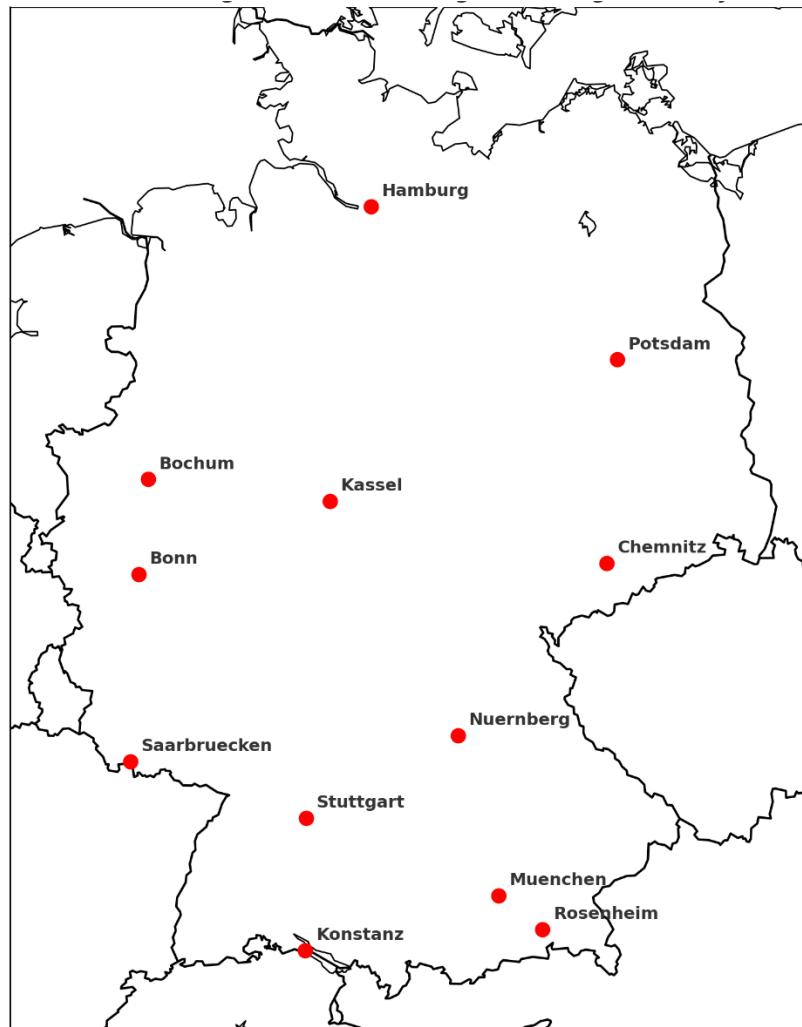


Abb. 28: Untersuchte Standorte in Deutschland

Windgeschwindigkeit

Für die Bewertung der natürlichen Lüftungspotenziale durch natürliche Lüftung über einen thermischen Kamin ist die Kenntnis der lokalen Windverhältnisse essenziell. Neben der mittleren Windgeschwindigkeit liefern insbesondere deren Verteilung und zeitliche Schwankungen wichtige Hinweise darauf, wie konstant und in welcher Intensität Windkräfte

zur Unterstützung des Luftaustauschs bei geringer Solarstrahlung in Schulgebäuden beitragen können.

Die folgenden Windgeschwindigkeitsverteilungen in Abbildung 2 zeigen die Häufigkeiten verschiedener Windgeschwindigkeitsklassen an ausgewählten Standorten. Betrachtet wurden jeweils Mittelwerte über den gesamten Tagesverlauf sowie differenziert nach den relevanten Zeiträumen während des Schulbetriebs (s. Abbildung 3 und Abbildung 4).. Diese Daten dienen als Grundlage für die Bewertung, ob und in welchem Umfang eine natürliche Durchlüftung über Kaminwirkung auch bei schwankenden Windverhältnissen möglich ist.

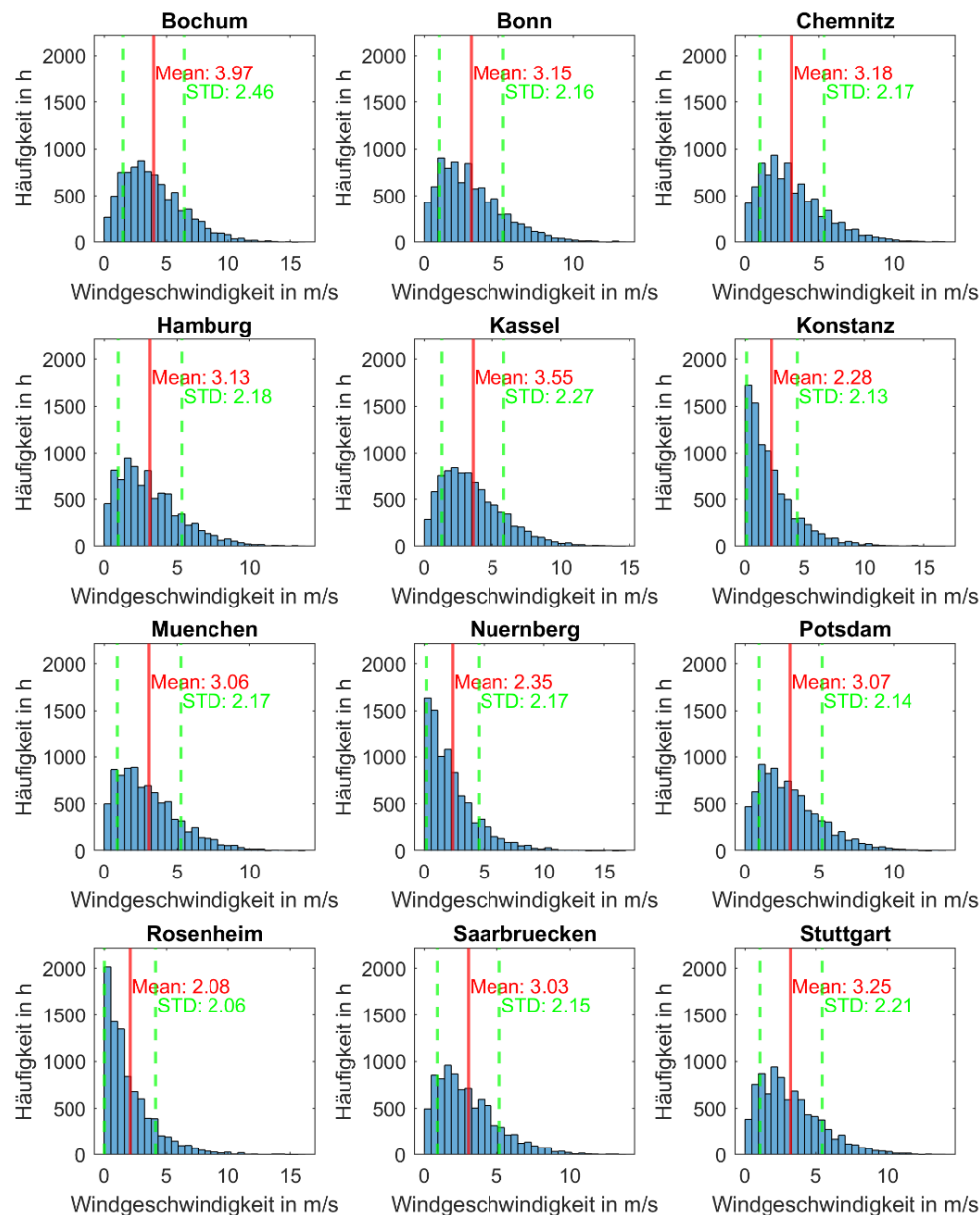


Abb. 29: Windgeschwindigkeitsverteilung für alle Standorte für 00 - 24 Uhr (eigene Darstellung)

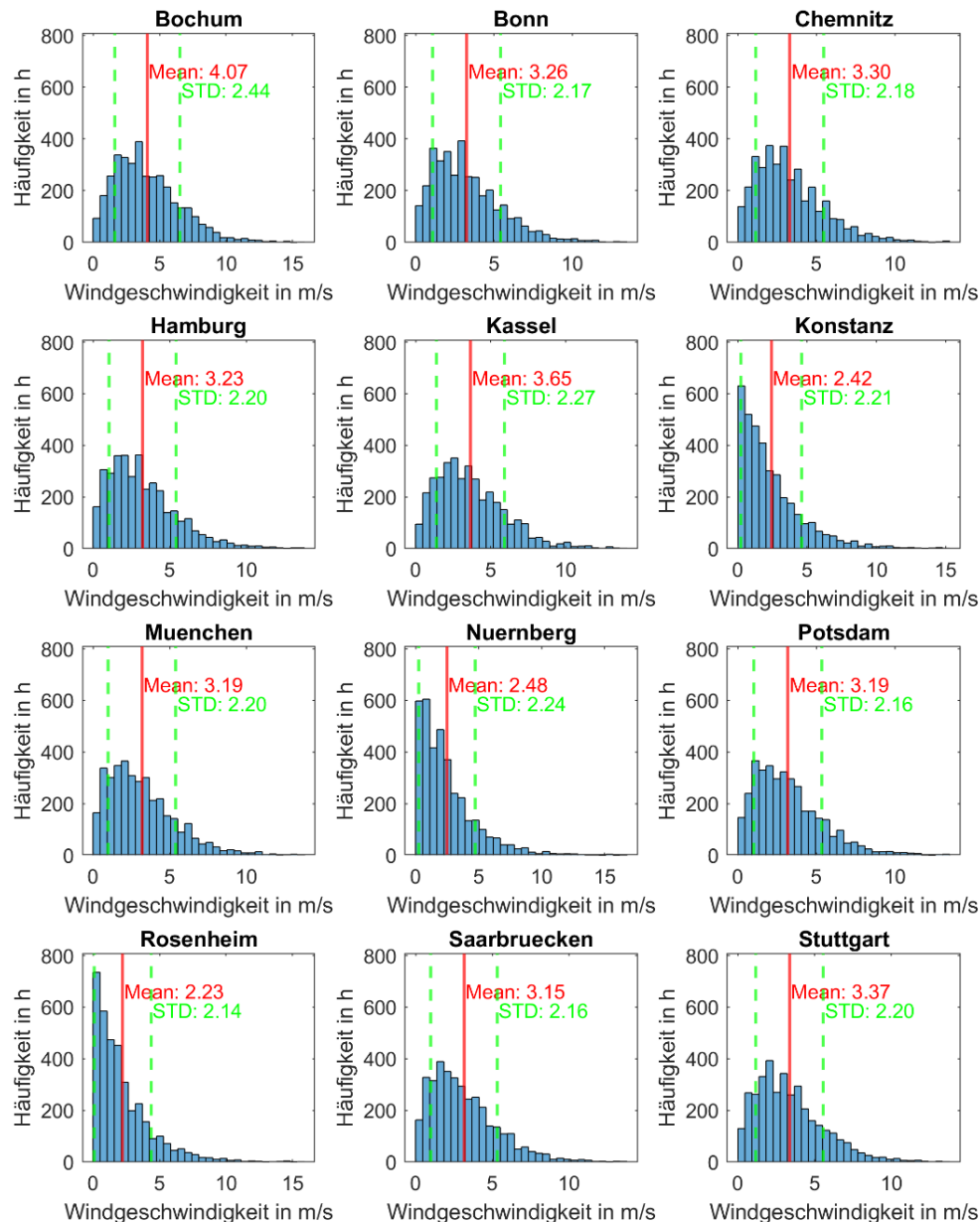


Abb. 30: Windgeschwindigkeit zu Schulzeiten (eigene Darstellung)

Analyse der mittleren Windgeschwindigkeit

Die Betrachtung der mittleren Windgeschwindigkeiten an verschiedenen deutschen Städten zeigt eine deutliche Standortabhängigkeit, die für die Auslegung natürlicher Lüftungssysteme – insbesondere im Hinblick auf solare Kaminlüftung – von großer Bedeutung ist.

In der Gesamtauswertung (00–24 Uhr) liegen die Mittelwerte der Windgeschwindigkeit zwischen 2,08 m/s (Rosenheim) und 3,97 m/s (Bochum). Städte wie Bochum, Kassel und Chemnitz weisen durchgehend höhere Windgeschwindigkeiten auf, was die Wirkung der Druckdifferenzen an Fassaden und Dachflächen unterstützt und somit eine günstige Voraussetzung für eine effektive natürliche Lüftung bietet.

Die Tageszeitauswertung zeigt nur geringe Unterschiede zwischen dem 24-Stunden-Mittel und den Mittelwerten während der typischen Unterrichtszeiten (08–13 Uhr bzw. 08–17 Uhr). Die Abweichungen liegen meist im Bereich von 0,00 bis 0,15 m/s, was auf eine relativ konstante Windverfügbarkeit im Tagesverlauf hinweist. Dies ist vorteilhaft für eine verlässliche Planung von Systemen, die auf kontinuierlicher natürlicher Luftbewegung basieren.

Tabelle 2 Analyse der Windgeschwindigkeiten für die Standorte für unterschiedliche Tageszeiten

Stadt	Mittelwert Windgeschwindigkeit			Abweichung von 00 - 24	
	00 - 24	08 - 13	08 - 17	08 - 13	08 - 17
Bochum	3,97	3,96	4,07	0,01	0,10
Bonn	3,15	3,14	3,26	0,01	0,11
Chemnitz	3,18	3,17	3,3	0,01	0,12
Hamburg	3,13	3,12	3,23	0,01	0,10
Kassel	3,55	3,54	3,65	0,01	0,10
Konstanz	2,28	2,28	2,42	0,00	0,14
München	3,06	3,05	3,19	0,01	0,13
Nürnberg	2,35	2,35	2,48	0,00	0,13
Potsdam	3,07	3,06	3,19	0,01	0,12
Rosenheim	2,08	2,09	2,23	0,01	0,15
Saarbrücken	3,03	3,02	3,15	0,01	0,12
Stuttgart	3,25	3,24	3,37	0,01	0,12

3.2.4. Bedeutung der Windgeschwindigkeit für das Projekt

Standorte mit geringeren mittleren Windgeschwindigkeiten, wie Rosenheim, Konstanz und Nürnberg, könnten durch windarme Lagen oder topografische Abschirmung charakterisiert sein. An solchen Orten könnte die Unterstützung durch thermische Effekte (Kamineffekt) noch stärker in den Vordergrund rücken, da die Druckdifferenzen durch Wind allein für eine ausreichende Luftförderung unter Umständen nicht ausreichen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass für viele Städte in Deutschland auch unter Alltagsbedingungen eine nutzbare Grundwindgeschwindigkeit vorhanden ist. Diese kann, kombiniert mit solaren Auftriebseffekten, die freie Lüftung über thermische Kamine maßgeblich unterstützen. Dennoch sind für eine präzise Beurteilung lokale Mikroklimaeffekte sowie Gebäudestandorte im Kontext der Umgebung (z. B. Bebauungsdichte, Vegetation, Gelände) zusätzlich zu berücksichtigen. Mit folgender Formel lässt die der durch Wind eingebrachte Volumenstrom abschätzen. Wichtig hierbei ist, dass die Formel nur gültig ist für eine perfekt in Windrichtung gedrehte Luftansaugung (z.B. durch eine selbstausrichtende

Ansaughaube). Hierbei wird der Windeinfluss perfekt genutzt und schon sehr geringe Windgeschwindigkeiten sorgen für einen hohen Volumenstrom.

$$Vol_Wind = 288 + Windgeschwindigkeit \text{ in } \frac{m}{s} \cdot \ln(2 \cdot Ansaughöhe \text{ in } m)$$

Windrichtung

Neben der Windgeschwindigkeit spielt auch die Windrichtung eine entscheidende Rolle für die Planung und Wirksamkeit natürlicher Lüftungssysteme wie der solaren Kaminlüftung. Die Windrichtung bestimmt, an welchen Fassaden Über- oder Unterdruck entsteht und beeinflusst damit maßgeblich, wie Luft durch ein Gebäude strömen kann.

In dieser Analyse wird die mittlere Windrichtung an verschiedenen Standorten in Deutschland ausgewertet. Da Windrichtungen zyklisch ($0^\circ = 360^\circ$) sind, ist eine klassische Mittelwertbildung mathematisch nicht sinnvoll. Stattdessen kommen vektorbasierte Berechnungen zum Einsatz, um einen korrekten Richtungs-Mittelwert und die Streuung zu bestimmen. Wie bei der Windgeschwindigkeit werden drei Analysen durchgeführt. Eine Betrachtung des ganzen Tages (Abb. 31) und jeweils nur für die Schulstunden (Abb. 32)

$R \in [0,1]$ ist ein Maß für die Richtungskonsistenz:

- $R=1$: Wind kam ausschließlich aus einer Richtung
- $R=0$: Windrichtungen sind gleichverteilt (keine bevorzugte Richtung)

Der Wert R ist besonders relevant für die Planung passiver Lüftung: Je höher R , desto planbarer ist der Winddruck an spezifischen Fassadenflächen.

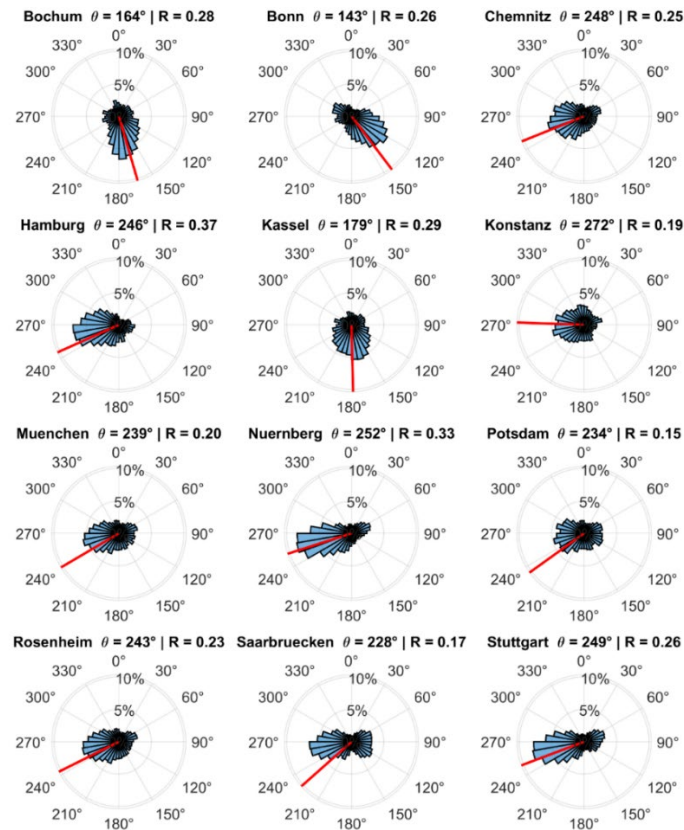


Abb. 31: Windrichtungsverteilung je Standort 0:00 – 24:00 (eigene Darstellung)

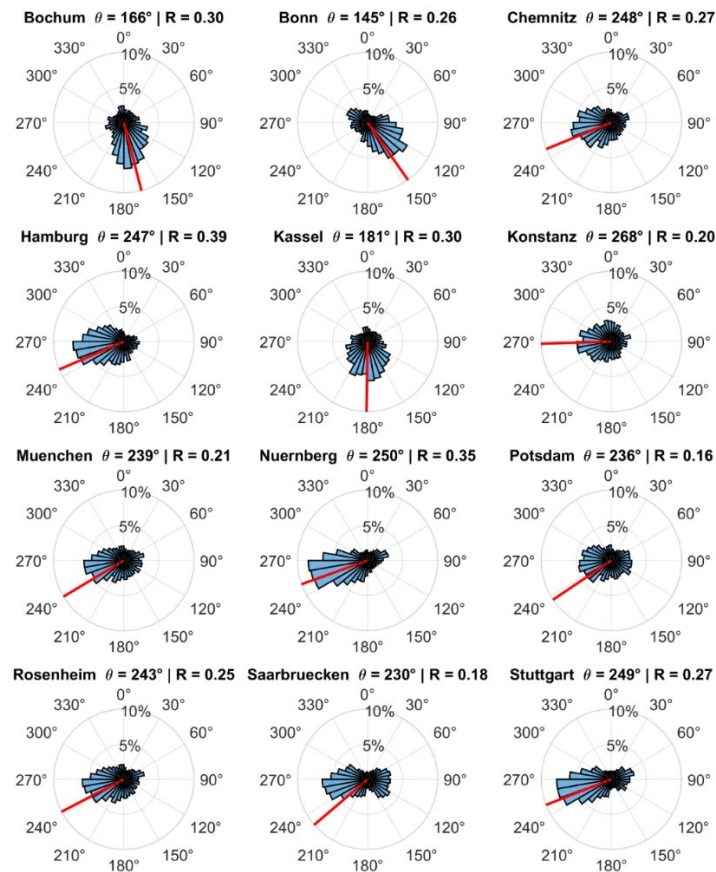


Abb. 32: Windrichtungsverteilung je Standort 8:00 - 17:00 (eigene Darstellung)

Analyse mittlere Windrichtung

Die mittlere Windrichtung variiert je nach Standort deutlich. So liegen die Hauptwindrichtungen beispielsweise bei:

- **Bochum:** ca. 164° – entspricht Südost
- **Hamburg:** ca. 246° – entspricht Westsüdwest
- **Konstanz:** ca. 272° – entspricht West
- **Saarbrücken:** ca. 228° – Südsüdwest

Diese Werte geben an, aus welcher Richtung der Wind über den betrachteten Zeitraum statistisch am häufigsten kam. Die Unterschiede zwischen Tagesmittel (00–24 Uhr) und Unterrichtszeiten (08–17 Uhr) sind größtenteils gering, liegen meist im Bereich von unter 2° bis maximal etwa $5,7^\circ$ (Konstanz). Das spricht für eine relativ konstante Windrichtung, was in Bezug auf die Planung fassadenbasierter Lufteinlässe ein Vorteil ist.

Resultierende Länge (R)

Die resultierende Länge gibt Auskunft über die Streuung der Windrichtungen:

- **R nahe 1** bedeutet eine dominante Hauptwindrichtung.
- **R nahe 0** bedeutet stark streuende, wechselhafte Windrichtungen.

Im vorliegenden Datensatz liegen die R-Werte zwischen:

- **0,15 (Potsdam)** – sehr gleichmäßig verteilte Windrichtungen
- **0,39 (Hamburg)** – deutlicher Richtungsfokus

Besonders auffällig:

- **Hamburg und Nürnberg** zeigen relativ hohe R-Werte (0,37–0,39), was auf eine klar vorherrschende Windrichtung hinweist – ideal für gezielte Fassadenlüftung.
- **Konstanz, Potsdam, Saarbrücken** dagegen haben niedrige R-Werte (0,15–0,20), was auf wechselhafte Richtungsverhältnisse hindeutet – hier ist eine symmetrische oder flexible Lüftungsgestaltung empfehlenswert.

Tabelle 3 Analyse der Windrichtungen (R-Wert) für die Standorte für unterschiedliche Tageszeiten

Stadt	R			Abweichung von 00 - 24	
	00 - 24	08 - 13	08 - 17	08 - 13	08 - 17
Bochum	0,28	0,30	0,30	0,02	0,02
Bonn	0,26	0,26	0,26	0,01	0,00
Chemnitz	0,25	0,26	0,27	0,01	0,02
Hamburg	0,37	0,39	0,39	0,01	0,02
Kassel	0,29	0,31	0,30	0,02	0,02
Konstanz	0,19	0,19	0,20	0,01	0,00
München	0,20	0,21	0,21	0,01	0,02
Nürnberg	0,33	0,35	0,35	0,02	0,02
Potsdam	0,15	0,15	0,16	0,01	0,01
Rosenheim	0,23	0,24	0,25	0,01	0,02
Saarbrücken	0,17	0,18	0,19	0,01	0,02
Stuttgart	0,26	0,27	0,27	0,01	0,02

Analyse der Veränderung über den Tagesverlauf

Die Abweichungen zwischen den Zeitfenstern (08–13 Uhr vs. 00–24 Uhr) sind für die mittleren Windrichtungen meist gering ($<2^\circ$), Ausnahme Konstanz mit über 5° Abweichung. Auch R variiert nur leicht im Tagesverlauf (max. 0,02 Differenz), was auf eine gute Übertragbarkeit der Tageswerte auf die Schulzeiten hinweist.

Tabelle 4 Analyse der Windrichtungen (mittlere Windrichtung) für die Standorte für unterschiedliche Tageszeiten

Stadt	Mittlere Windrichtung			Abweichung von 00 - 24 und	
	00 - 24	08 - 13	08 - 17	08 - 13	08 - 17
Bochum	163,8	164,2	165,5	0,43	1,74
Bonn	142,9	143,0	144,9	0,09	2,05
Chemnitz	248,0	245,2	247,8	2,87	0,19
Hamburg	245,8	244,8	246,6	0,94	0,80
Kassel	178,7	178,8	180,9	0,12	2,27
Konstanz	272,0	266,3	268,1	5,73	3,86
München	239,5	235,4	239,1	4,06	0,41
Nürnberg	252,2	248,8	250,2	3,45	2,02
Potsdam	234,3	233,0	236,1	1,24	1,83
Rosenheim	243,4	239,4	242,5	4,01	0,94
Saarbrücken	228,3	224,1	229,5	4,21	1,21
Stuttgart	249,4	246,5	248,6	2,86	0,77

3.2.5. Bedeutung der Windrichtung für das Projekt

Zusammenfassen können folgende Rückschlüsse zur Bedeutung der Windrichtung für die Auslegung von natürlichen Lüftungssystemen eruiert werden:

- Standorte mit klarer Hauptwindrichtung und hohem R (z. B. Hamburg, Nürnberg) eignen sich gut für gezielt ausgerichtete Lüftungselemente.
- Standorte mit geringer Richtungskonsistenz (niedriges R, z. B. Potsdam) benötigen bauphysikalisch flexiblere Konzepte, etwa durch zentrale Kamine mit Windunabhängigkeit.
- Richtungsstabilität während der Unterrichtszeit unterstützt die Planbarkeit der solaren Kaminlüftung.

3.2.6. Kombinierte Bewertung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung

Für eine erfolgreiche Umsetzung freier Solarlüftung in Schulgebäuden sind sowohl ausreichende Windgeschwindigkeit als auch eine klare, bevorzugte Windrichtung entscheidend. Die beiden Faktoren ergänzen sich wie folgt:

Günstige Bedingungen (hohe Windgeschwindigkeit + hohe Richtungskonsistenz)

z. B. **Hamburg, Bochum, Kassel, Nürnberg**

- Diese Standorte bieten kontinuierlichen Wind aus einer stabilen Richtung.
- Fassadenorientierte Luftführung ist hier sehr gut planbar.
- Fenster- oder Lufteinlässe können gezielt an windzugewandten Seiten positioniert werden.
- Die Kaminwirkung kann hier durch Winddruck effizient unterstützt werden → hybride Effekte.

Geringe Windgeschwindigkeit + hohe Richtungskonsistenz

z. B. **Stuttgart, Chemnitz**

- Auch bei weniger Wind ist durch die konstante Richtung eine gerichtete Luftführung möglich.
- Der thermische Auftrieb im Kamin steht hier klar im Vordergrund – Wind dient nur als sanfter Verstärker.

Hohe Windgeschwindigkeit + niedrige Richtungskonsistenz

z. B. Konstanz, Saarbrücken

- Trotz ausreichender Windmenge ist durch wechselnde Richtungen keine gezielte Fassadenlüftung planbar.
- Empfehlenswert sind hier symmetrische oder zentrale Lüftungslösungen (z. B. Kamine in Gebäudemitte), die windrichtungsunabhängig arbeiten.
- Der Wind unterstützt zwar, aber nicht richtungspezifisch – deshalb ist die Kaminwirkung dominanter.

Geringe Windgeschwindigkeit + niedrige Richtungskonsistenz

z. B. Potsdam, Rosenheim

- Hier ist die Wirkung des Windes insgesamt begrenzt.
- Thermisch getriebene Lüftungssysteme (solare Kamine, thermische Schächte) sollten alleintragend ausgelegt sein.
- Wichtig sind gebäudeseitig möglichst geringe Strömungswiderstände und ggf. aktive Unterstützung (z. B. PV-gestützte Ventilatoren als Backup).

3.3. Notwendigkeit Lüftungstechnischer Komponenten

In oben aufgezeigten Simulationen der Schachtsysteme, Druckverhältnisse und des Windeinflusses wurde meist von einem idealisierten System ausgegangen. Der Druckverlust beispielsweise am idealen Kanalquerschnitt ohne Einbauteile, Schalldämpfer, Filter, Drosselklappen etc. In der Realität erfordern Regularien, Nutzungsspezifika oder andere externe Einflüsse notwendigerweise auch zusätzliche Komponenten. In diesem Abschnitt werden typische Einbauteile auf Tauglichkeit und Grenzen der technischen Kombinierbarkeit untersucht. Hierbei sind insbesondere auf das begrenzte „Druckangebot“ der reinen Schachtlüftung mit sowie ohne Solarkamin zu achten. Die Druckdifferenzen am Gebäude bewegen sich hierbei innerhalb weniger Pascal, somit würde jede zusätzliche signifikante Druckerhöhung unausweichlich zur Reduzierung des Volumenstroms, der Vergrößerung der Kanalquerschnitte oder der Erhöhung des Luftauslasses auf dem Dach führen.

In diesem Spannungsbereich liegt hierbei jede Projektierung, auch bei einer möglichen realen Umsetzung in einem Projekt. Sollte der Schulstandort in einer windreichen Region, mit möglichst konstanter Windgeschwindigkeit bei Richtungskonsistenz befinden, können gegebenenfalls auch erhebliche Druckverluste im Kanalnetz toleriert werden. Dies bedarf jedoch immer einer genauen lokalen Prüfung.

Im folgenden Abschnitt sollen deshalb Möglichkeiten der druckverlustfreien, bzw. druckverlustarmen Umsetzung geprüft und aufgezeigt werden, welche auch die prinzipielle Tauglichkeit an windarmen Standorten zulässt.

3.3.1. Lüftungsklappen

Der Einbau von Lüftungsklappen im System ist obligatorisch. Zur Sicherstellung der „kontrollierten Drucksituation“ sowie der Vermeidung von unkontrolliertem Lüften werden Lüftungsklappen benötigt. Ebenso zur Sicherstellung des vorbeugenden Brandschutzes. Durch Lüftungsklappen wird der Volumenstrom auf die maximal ausgelegten Werte begrenzt. Durch starken Wind oder andere externe Einflüsse, könnte gegebenenfalls zu viel Wind in die Klasse strömen. Komfort, Energieverluste und Akzeptanz wären hier stark gefährdet. Ebenso kann ggf. eine Nutzungssituation in der Klasse das Zu- oder Abschalten von einzelnen Kanalabschnitten erfordern. So könnte beispielsweise ein offenes Fenster im Klassenzimmer dafür sorgen, dass die Außenluft über das Fenster einströmt, und der Zuluftkanal gesperrt werden könnte. In der realen Umsetzung gäbe es hierbei eine Vielzahl an möglichen Variantenkombinationen, welche ein Zu- oder Abschalten von Zuluft- oder Abluftkanal erfordern könnten, aber nicht müssen. Hierbei wären insbesondere offene Fenster, offene Zimmertüren, vertikal verbundene Geschosse (Treppenhäuser) oder große, zentrale Atrien beispielhaft zu nennen.

In Abbildung 33 ist ein beispielhaftes Produkt zu sehen. Durch die absolute Überdimensionierung der Luftkanäle im Vergleich zu einem herkömmlichen Ventilator gestütztem System, ergeben sich hierbei drucktechnische Vorteile. Die beispielhaft gezeigte Klappe ist in den Abmessungen für Volumenströme bis etwa 6500 m³/h ausgelegt. In unserer

Schulklasse wird diese mit maximal 400 m³/h durchströmt. Dadurch bleibt auch der Druckverlust an der Klappe bei unter einem Pascal.

TROX

Produkt Report



JZ-LL-AL/400x600/Z04

Breite	400	400
Höhe	600	600
Anbauteile	Z04	Z04 Feststellvorrichtung;-;-;-

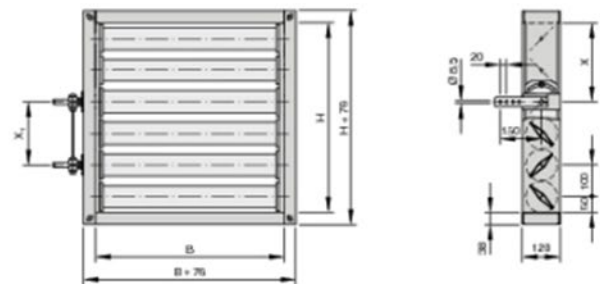
Eingabedaten

Einbauvariante installation_id	Luftleitung beidseitig (A)
Klappenwinkel α	0
Volumenstrom q_v	400m ³ /h
Statische Druckdifferenz bei geschlossener Klappe $\Delta p_{st,cd}$	300Pa
Strategie	Volumenstrom gegeben

Ergebnisse

Strömungsgeschwindigkeit	0,46m/s
Geschwindigkeit im freien Querschnitt	0,61m/s
Freier Querschnitt	0,1822m ²
Anzahl Lamellen	6
Minstdrehmoment	10Nm
Druckverlustkoeffizient	0,33
Gesamtdruckdifferenz	0Pa
Mindestgesamtdruckdifferenz (Klappe geöffnet)	0Pa

Maßbild



Gewicht m

Die Gewichtsangabe ist einschließlich Anbauteile, jedoch ohne Zubehör

Abb. 33: Beispielhafte Lüftungsklappe Copyright: Trox SE

Brandschutz

Ebenso sind im Bereich des vorbeugenden Brandschutzes Lüftungsklappen notwendig. Die genaue Ausführung muss immer objektspezifisch geklärt (Brandschutzklappen, Kaltrauchklappen, etc..) werden. Die Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Lüftungsanlagen (M-LüAR 30.04.2021) bescheinigt der angedachten Lösung zur natürlichen Be- und Entlüftung von Schulklassen mit Schacht und Solarkamin prinzipielle Abbildbarkeit und Genehmigungsfähigkeit. Hierbei kommen die Prinzipschema in Bild 1.3 (M-LüAR) und Bild 1.4 (M-LüAR) zur Anwendung. In Bild 1.3 wäre die Ausführungsvariante von getrennten Außenluftansaugungen- bzw getrennten Fortluftkaminen dargestellt. Die Schachteinheit mit getrennten Schächten (Zu- oder Abluftseitig) ist hierbei als „Lüftungszentrale“ im Sinne der (M-LüAR) zu sehen. In Bild 1.4 wiederum wäre die Variante mit gemeinsame Luftansaugung bzw. von mehreren Klassen gemeinsam genutzten Solarkamin zu sehen. Der in den Schemen dargestellt Ventilator wäre nicht vorhanden, die entsprechende Druckdifferenz jedoch aus dem Kamineffekt gegeben.

Bild 1.3: Lüftungsanlagen mit getrennten Haupt- und getrennten Außenluft- oder Fortluftleitungen ohne Absperrvorrichtungen

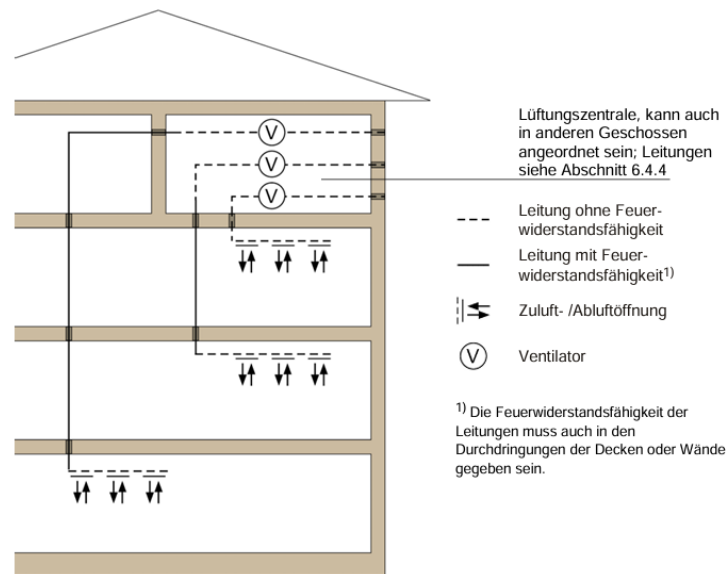


Abb. 34: Prinzipschema Bild 1.3 (M-LüAR, Ausgabe 30.04.21)

Das Zusammenführen der Kanäle innerhalb des Gebäudes (z.B. Dachelement) oder aber auch eine gemeinsame Außenluftansaugung über einen Erdkollektor oder Kellerraum wäre im Sinne der Richtlinie so zu sehen. Vor konkreter Umsetzung ist dies aber zwingend mit dem Verantwortlichen für den vorbeugenden Brandschutz zu klären. In dieser Lösung wäre auch hier der Einsatz von Lüftungsklappen zwingend notwendig.

Bild 1.4: Lüftungsanlagen mit getrennten Hauptleitungen und gemeinsamer Außenluft- oder Fortluftleitung mit Rauchschutz

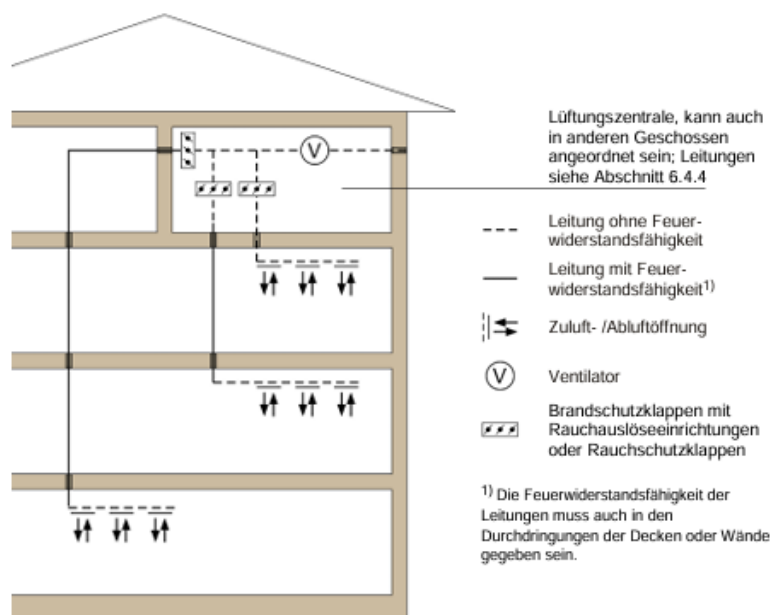


Abb. 35: Bild 1.4 (M-LüAR)

3.3.2. Schalldämpfer

Je nach Lage der Klasse, Schule, Schacht oder Kaminsituation kann gegebenenfalls der Einsatz eines Schalldämpfers erforderlich sein. Insbesondere die Schulklassen im Dachgeschoss, in vielleicht kurzer Distanz zu möglichen Glasflächen der Solarkamine könnten hierbei, je nach Planung, betroffen sein. Prinzipiell ist immer auch eine Schalldämmlösung innerhalb der großflächigen Luftansaugungen und Zuluftventilen in den Klassenräumen möglich. Verbaut in der Wand, Möblierung oder anderen Einbausituationen ergibt sich hierbei die gute Integration von Schallabsorbern.

Sollte dennoch den Schalldämpfer in den Lüftungskanälen notwendig werden, ist auch dies möglich. In folgender Grafik ist die Auslegung eines Kulissenschalldämpfers in den bisher verwendeten Kanalmaßen (600x400 mm) zu sehen. Auch bei diesem Schalldämpfer ist die Überdimensionierung der Kanalquerschnitte sehr vorteilhaft. Der Ergebende Druckverlust liegt hierbei bei unter einem Pascal, bei angenommenen Volumenstrom von 400 m³/h.



Produkt Report



MS-F/400x600x1000/1x200/P

Kulissenoberfläche	F	Glasseidengewebe
Breite	400	400
Höhe	600	600
Länge (in Luftrichtung)	1000	1000
Kulissenanzahl	1	1
Kulissendicke	200	200
Anschlußrahmen	P	Luftkanalprofil 30 mm
n_min	1	1
n_max	1	1
L_min	500	500

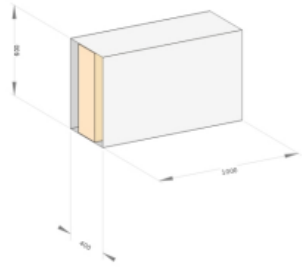
Eingabedaten

Volumenstrom q_v	400m ³ /h
Strategie	Schalldämpfer

Ergebnisse

Strömungsgeschwindigkeit im Kulissenspalt	0,9m/s
Spaltbreite	200mm
Statische Druckdifferenz	0Pa
Strömungsgeräusch	< 15dB(A)
Strömungsgeräusch	< 15dB
Strömungsgeräusch	< 15dB
Geteilter Schalldämpfer	Nein
Teil 1	1 × 400 × 600 × 1000
Teil 2	
Teil 3	
Teil 4	
Gewicht	27kg

Spezifisches Maßbild



Geteilter Schalldämpfer
State

Der Schalldämpfer wird ungeteilt ausgeliefert.

Akustische Ergebnisse

	63Hz [dB]	125Hz [dB]	250Hz [dB]	500Hz [dB]	1kHz [dB]	2kHz [dB]	4kHz [dB]	8kHz [dB]
Strömungsgeräusch, Schalleistungspegel	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15
Einfügungsdämpfung	2	6	12	11	10	8	6	5

Abb. 36: Beispielhafte Schalldämpferauslegung Copyright: Trox SE

3.3.3. Zusatzventilatoren

In diesem Forschungsvorhaben wurde gezeigt, dass der natürlich induzierte Luftwechsel zur Sicherstellung einer ausreichenden Luftqualität (UBA Leitwert) ausreichen kann. Gegebenenfalls gibt es dennoch Gründe zusätzliche Ventilatoren einzubauen, sei es aus Gründen der Redundanz, möglicher Nutzungsänderung oder Ähnlichem.

Hierbei bieten sich insbesondere Ventilatoren an, mit möglichst senkrecht gestellten Lamellen. Diese Ventilatoren sorgen für keinen merkbaren Druckverlust, sobald sie ausgeschaltet sind. Hierbei gibt's es am Markt besondere Ventilatoren zur Ertüchtigung von Schachtlüftungssysteme oder im Zusammenhang mit hybrider Lüftung. Die Regelung solcher Ventilatoren (Start/Stop, etc.) ist jedoch nicht ganz trivial und bedarf einer genauen, klassenraumabhängigen Planung. Der Einsatz ist aber generell möglich.

Ein alternative Möglichkeit ist der Einsatz „windangetriebener Ventilatoren“. Der Haupteinsatzzweck dieser Ventilatoren ist nicht primär die Erhöhung des Unterdruckes, sondern die Vermeidung von externen Windeinflüssen. Fallwinde oder Wind aus eine unangenehmen Windrichtung kann gegebenenfalls zum Kollaps das Systems führen und einen Überdruck in der Nähe des Fortluftauslassen erzeugen.



Abb. 37: windangetriebener Ventilator als Kaminhaube

Diese Systeme sind in der Lage dies zuverlässig zu vermeiden. Die durch den Ventilator zusätzlich erzeugte Unterdruck kann meist nicht direkt genutzt werden, da diese erst bei erhöhten Windgeschwindigkeiten einen direkten Effekt erzeugen. In solchen Situationen ist die natürliche Lüftung meist sowieso gegeben.

3.3.4. Luftfilterung

Luftfilter sind in herkömmlichen Lüftungssystemen ein elementarer Bestandteil und oftmals einer der Gründe für die Umsetzung einer Lüftungsanlage. Durch die sehr niedrigen sich einstellenden Druckdifferenzen bei der natürlichen Lüftung sind herkömmliche Luftfilter nicht geeignet. Der Druckverlust bei der Durchströmung sind deutlich zu groß. In Gebieten mit stetigen, hoher Windgeschwindigkeit, wäre ein Einsatz prinzipiell denkbar. Die Luftfilter sind dann dennoch deutlich überdimensioniert und bei genauer Beachtung der Druckverluste zu planen.

Gegebenenfalls können bei größerem Raumangebot, z.B. durch Nutzung von (reinigbaren) Kellerräumen als Luftkanal, auch großflächige Filter installiert werden. Besonders druckverlustarm und gegebenenfalls geeignet für Abhaltung gröbere Verschmutzungen könnten beispielsweise Kartonfilter sein.

Zur allgemeinen Diskussion in diesem Punkt stellt sich vielleicht auch die Frage mit welchem Alternativsystem hierbei verglichen werden soll. Mit der herkömmlichen Lüftungsanlage mit Filtertechnik oder alternativ mit der reinen Fensterlüftung, bei der auch keinerlei Filterung gewährleistet ist.

3.3.5. Wärmerückgewinnung

Ebenso gehört die Wärmerückgewinnung in herkömmlichen Lüftungssystemen zu einem der Hauptgründe für die Umsetzung einer Lüftungsanlage. Durch die sehr niedrigen sich einstellenden Druckdifferenzen bei der natürlichen Lüftung sind klassische Gegenstromwärmetausche nicht einsetzbar. Die Druckverluste hierbei sind deutlich zu groß. Punktuell wäre der Einsatz von klein dimensionierten KVS-Systemen als Wärmerückgewinnung denkbar. Auf den untersuchten Querschnitt eines Kanals von 600x400 mm ergeben sich hierbei jedoch schnell eine Auslegungsdruckdifferenz von über 5 Pascal je Wärmetauscher. In Gebieten mit stetigen, hoher Windgeschwindigkeit, wäre ein Einsatz prinzipiell denkbar. Zu beachten ist jedoch, dass die „Abkühlung“ im Abluftschacht ebenso zu einer Reduzierung des Kamineffektes führt.

3.4. Energetische Bewertung

Die natürlichen, kontrollierte Lüftung durch die Ausnutzung des Kamineffekts würde dies primär elektrische Antriebsenergie für Steuerungs- und Ventilationsaufwendungen einsparen.

Die graue Energie für die Herstellung von Schachtkanälen würde eingesparten Bauteilen meist dezentraler Lüftungsgeräte wie beispielsweise Ventilatoren, Steuerungsplatinen, Verkabelung und den Lüftungsgehäusen an sich, entgegenstehen. Andere Bauteile wie Lüftungsventile, Schalldämpfer oder Lüftungsklappen kommen in allen Systemen vor.

Beim Vergleich mit herkömmlichen, mechanischen, Schullüftungssystemen ist insbesondere der Stromverbrauch im Vergleich zu klassenraumzentralen (dezentral je Klasse) und gebäudezentralen Lüftungsanlagen interessant.

Typische Stromverbräuche je Klassenzimmer sind hierbei etwa (bei Randbedingung: 195 Schultage, 6h Laufzeit pro Tag, 25 Schüle je Klasse, keine Frostfreihaltung, Klassenraumgröße 60 m²):

Lüftungsgerät Klassenraumzentral:	3,0 kWh / (m ² Klassenraum * a)
Lüftungsgerät Gebäudezentral:	4,8 kWh / (m ² Klassenraum * a)

Bei natürlich belüfteten Klassen ergeben sich Werte von ca. 0 - 0,5 kWh pro m² / (m²a).

Beim thermischen Energiebedarf haben natürliche alle Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung klare energetische Vorteile. Der Wärmebereitstellungsgrad von bis zu 90% sorgt insbesondere bei hohen Luftwechselraten für große energetische Vorteile. Die in Kap. 3.3.5 potentiell einsetzbaren KVS-Systeme bei der Schachtlüftung an Standorten mit hohen Windgeschwindigkeiten liegen hierbei deutlich darunter (0% - 20%).

In Schulklassen gibt es aus thermische Sicht, im vergleich zu andern Nutzungsarten, eine Besonderheit: Hohe Belegungsdichte in Kombination mit hohem Luftwechsel. Der hohe Luftwechsel sorgt für einen hohen Anteil der Lüftungsverluste and den Gesamtverlusten. Die sehr hohen Belegungsdichten sorgen durch die internen Wärmelasten zu sehr kleinen Heizlasten- und Heizwärmeverbrauch. Dadurch verkürzt sich die Heizperiode entsprechend und die Energieeinsparung ist, absolut gesehen vergleichsweise gering, relativ gesehen jedoch umso größer.

Für den thermischen Energiebedarf ergibt sich ein spezifischer Heizwärmebedarf von:

Lüftung mit WRG (WBG 80%, Hüllqualität Passivhaus):	8,2 kWh / (m ² * a)
Natürliche Lüftung ohne WRG (Hüllqualität Passivhaus):	19,8 kWh / (m ² * a)

Der Einsparung von etwa 11,6 kWh / (m² * a) thermische Energie stehen etwa Aufwendungen von etwa 2,5 kWh / (m² * a) gegenüber. Das Verhältnis hierbei ist etwa 4,6. Bei Beheizung der Schule mit einer Wärmepumpen liegt bei einer Jahresarbeitszahl von 4,6 energetische Gleichwertigkeit vor. Da hierbei eher mit Jahresarbeitszahlen unter 4,6 zu rechnen ist, liegt der energetische Vorteil tendenziell bei Schulen mit Einsatz von Wärmerückgewinnung. Hierbei ist jedoch klar anzumerken, dass das Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung im Durchschnitt leichte Vorteile bei der Luftqualität hat sowie deutlich robuster gegenüber Fehlnutzung und Wetterverhältnisse ist. Bei oben gemachter energetischer Abschätzung wurde bei beiden Systemen von einer funktionierenden, idealen Nutzung ausgegangen.

3.5. Zusammenfassung und Empfehlungen

Dieses Forschungsvorhaben untersuchte das Potenzial der natürlichen, kontrollierten Lüftung von Schulklassen in Deutschland. Ziel ist es, durch Nutzung physikalischer Prinzipien wie den Kamineffekt, Winddruck und Solarenergie eine energieeffiziente und effektive Belüftung zu ermöglichen, die die Luftqualität sichert und den Energieverbrauch reduziert.

Dabei zeigten sich insbesondere:

- Der Luftbedarf in Klassenräumen hängt vom Alter, Geschlecht und Aktivitätsniveau der Schüler ab
- Verschiedene Lüftungskonzepte, wie Schachtlüftung, Solarkamine und hybride Systeme, wurden simuliert, um deren Wirksamkeit zu bewerten
- Die Einflussfaktoren Windgeschwindigkeit und Windrichtung wurden anhand CFD-Simulationen an deutschen Standorten untersucht, um die optimale Platzierung von Lüftungselementen zu planen
- Es wurde gezeigt, dass natürliche Lüftung in den meisten Jahreszeiten in Deutschland grundsätzlich möglich ist, wobei unterstützende Maßnahmen wie Solarabsorber (Solarkamine) die Funktionalität verbessern können, teils sogar notwendig sind
- Die Bedeutung der technischen Komponenten (z.B. Lüftungsklappen, Schalldämpfer, Ventilatoren) wurde bewertet, um eine kontrollierte und sichere Belüftung zu gewährleisten
- Die energetische Bewertung zeigt, dass die Systeme prinzipiell energetisch gleichwertig gebaut werden können

Insgesamt zeigt das Forschungsvorhaben, dass natürliche, kontrollierte Lüftung von Schulklassen in Deutschland prinzipiell möglich und umsetzbar ist. Für die Praxis wird eine Kombination aus natürlichen Prinzipien, unterstützenden technischen Komponenten und Standortanalysen empfohlen.

Zu beachten sind hierbei jedoch die enormen Anforderungen an Planung (vereinfacht oder Simulation) , bauliche Umsetzung (Erschließungsarten, Luftkanalquerschnitte) und das hochsensible Thema der Drucksituation (Windgeschwindigkeiten und Luv/Lee-Situation der Schulklassen).

In folgender Empfehlungsmatrix sind empfehlenswerte und vermeidbare Klassenraum- und Standortkombinationen aufgeführt.

Bauliche- und örtliche Gegebenheit			Außenluft/Zuluft									Fortluft/Abluft						
			Windfänger Dach gegen Windrichtung	über Dach ohne Windausrichtung	Ansaugung Luv-seitig am Gebäude	Ansaugung Lee-seitig am Gebäude	Fassade, direkt in Klassenraum	Lüftungsklappe Zuluft	Vorwärmung Erdkolektor	zentrale Zuluftvorwärmung	Luftfilter	Fortluft über Dach	über Dach in Windrichtung	über Dach windgestützter Ventilator	Schachtlüftung	SolarKamin	WRG - (KVS)	Lüftungsklappe Abluft
windschwacher Standort	Außenluftansaugung über Dach möglich	Klassenraum Luv-Seitig im Gebäude	✓✓	-	✓✓	-	✓	✓✓✓	✓	✓✓	-	✓	✓✓	✓	✓✓✓	✓✓	-	✓✓✓
		Klassenraum Lee-seitig in Gebäude	✓✓	-	✓✓	-	-	✓✓✓	✓	✓✓	-	✓	✓✓	✓	✓✓✓	✓✓	-	✓✓✓
	Außenluftansaugung über Dach nicht möglich	Klassenraum Luv-Seitig im Gebäude	-	-	✓✓✓	-	✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓	-	✓	✓✓	✓	✓✓✓	✓✓	-	✓✓✓
		Klassenraum Lee-seitig in Gebäude	-	-	✓✓✓	-	-	✓✓✓	✓✓✓	✓✓	-	✓	✓✓	✓	✓✓✓	✓✓	-	✓✓✓
windstarker Standort	Außenluftansaugung über Dach möglich	Klassenraum Luv-Seitig im Gebäude	~	-	✓	-	~	✓✓✓	✓	✓✓	✓✓	✓	✓✓	~	✓	✓	✓✓	✓✓✓
		Klassenraum Lee-seitig im Gebäude	~	-	✓	-	-	✓✓✓	✓	✓✓	✓✓	✓	✓✓	~	✓	✓	✓✓	✓✓✓
	Außenluftansaugung über Dach nicht möglich	Klassenraum Luv-Seitig im Gebäude	-	-	✓✓✓	-	~	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓	✓	✓✓	~	✓	✓	✓	✓✓✓
		Klassenraum Lee-seitig in Gebäude	-	-	✓✓✓	-	-	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓	✓	✓✓	~	✓	✓	✓	✓✓✓
	allgemein	Klassenraum allgemein, mit Filter und/oder WRG	✓✓✓	-	✓✓✓	-	-	✓✓✓	✓	✓✓	✓	✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓	✓✓✓

✓ ✓ ✓	sehr empfehlenswert
✓ ✓	empfehlenswert
✓	geeignet
~	neutral

Man sieht deutlich dass die baulichen Gegebenheiten der gesamten Schule oder einzelner Klassen die prinzipielle Umsetzung erst ermöglichen oder komplett verwerfen. Viele der in der Empfehlungsmatrix aufgeführten Randbedingungen wie Standort, Windsituation, Außen- und Fortlufterschließung können bei einem real zu bauenden Schulgebäude nicht frei gewählt werden.

Hieraus lässt sich zusammenfassend beurteilen, dass die Umsetzung an Schulen mit deutschem Klima durchaus möglich ist, jedoch sowohl Planung- als auch realer Betrieb alles andere als einfach ist. Sowohl gute Planung und auch insbesondere die Nutzung (Fensteröffnung, Türen an Treppenhäusern, etc.), welche die Drucksituationen elementar ändern, sind hochsensibel.

Als Ausblick wäre ein begleitendes Monitoring der Volumenströme an einem realen Praxisobjekt extrem hilfreich um diese Sensitivität auf externe Einflüsse (Wetter, Wind, Nutzung, Komponentenverwendung) untersuchen zu können und eine mögliche Lücke zu Theorie zu schließen.

4. Literaturverweise

[1] *Hybrid ventilation in an institutional building: Modeling and predictive control*; November 2017; DOI:10.1016/j.buildenv.2019.106405

[2] *Review of natural ventilation models: Zhiqiang (John) Zhai, Mary-Hall Johnson, Mohamed El Mankibi & Nikolaos Stathopoulos P.* 186-204; Aug 2016, DOI:10.1080/14733315.2016.1214390

[3] *Steigerung der Lüftungseffektivität von Solarkaminen durch thermische Aktivierung und Nutzung von Windeffekten*, Dissertation Lukas Schwan, TU München & Hochschule München

[4] *A review of solar chimney for natural ventilation of residential and non-residential buildings*, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, August 2022

[5] *Solar Chimneys for residential ventilation* Pavel Charvat, Miroslav Jicha and Josef Stetina

[6] Schwan, L.; Madjidi, M.; Auer, T.: *Geometric optimization of thermally activated small scale solar chimneys for natural ventilation applying CFD simulations and measurements*. In: ECOS (Hrsg.), *30th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, 2017

[7] José Carlos Frutos Dordelly. *Active Solar Chimney (ASC) : numerical and experimental study of energy storage and evaporative cooling*. Thermics [physics.class-ph]. Université de Lyon, 2018. English. ffNNT : 2018LYSET008ff. fftel-02259912f

[8] Achatz, Ulrich (2022) *Atmosphärendynamik*, Springer Spektrum

[9] Andres Persily, Lilian De Jonge; *Carbon Dioxide Generation Rates from Building Occupants*; 2017, *Indoor Air* 27, DOI:10.1111/ina.12383