

Nr. 9

Veröffentlicht: 05/2022
Bestell-Nr.: 405

Planungsleitfaden zur maschinellen Luftführung in Klassenräumen

Anders Berg, M.Sc.
Torben Rathje, M.Sc.
Dr.-Ing. Tobias Henzler
Prof. Dr.-Ing. Konstantinos Stergiaropoulos
Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE),
Universität Stuttgart

Dipl.-Ing. Michael Schwarz
Dipl.-Ing. Ralf Wagner
LTG AG, Stuttgart



Vorwort

Neben den Interessen seiner Mitglieder bezüglich Wirtschaft, Politik und Normung, werden durch den Fachverband Gebäude-Klima e. V. auch insbesondere wissenschaftliche Arbeiten motiviert, um hier neue Erkenntnisse zu gewinnen und weiterhin bei der Verteilung der Informationen zu unterstützen.

Die Themen Luftqualität und richtiges Lüften in Schulen werden bereits seit Jahren diskutiert. In den vergangenen zwei Jahren wurde das Thema in den Fokus der breiten Öffentlichkeit gerückt. Der vorliegende Bericht zeigt umfassende Untersuchungen zur Luftführung in Klassenräumen.

Für eine gute Raumluftqualität ist eine ausreichende Frischluftzufuhr von essentieller Bedeutung. Ist die Lüftung unzureichend, können erhöhte CO₂-Konzentrationen die Folge sein. Dies wiederum kann Kopfschmerzen, Müdigkeit oder mangelnde Konzentrationsfähigkeit zur Folge haben.

Mithilfe der maschinellen Lüftung ist es möglich, die erforderliche Raumluftqualität in Klassenräumen über das gesamte Jahr einzuhalten. Bei Fensterlüftung hingegen ist es eigentlich nur mit geeigneten CO₂-Messgeräten möglich. Außerdem ist eine manuelle Umsetzung und hohe Disziplin der Nutzer erforderlich und die Wirkung hängt stark von Wind und Temperaturdifferenzen ab. Unschlagbarer Vorteil der maschinellen Belüftung ist die Unabhängigkeit von meteorologischen Randbedingungen. Der Einsatz einer Wärmerückgewinnung ermöglicht es, den Heizenergieaufwand zu senken und unterstützt ein behagliches Raumklima.

Claus Händel und Dr.-Ing. Claudia Kandzia

Technisches Referat Fachverband Gebäude-Klima e. V.

Planungsleitfaden zur maschinellen Luftführung in Klassenräumen

1 Einleitung

SchülerInnen und Lehrkräfte verbringen mehr als 30% ihrer Tageszeit in Schulen, wodurch eine gute Raumluftqualität besonders wichtig ist [1]. Um diese zu erreichen, ist ein ausreichender Außenluftwechsel in Klassenräumen essenziell. Dieser muss stoffliche Lasten durch Personen und Einbauten in der Raumluft abführen, ein behagliches Innenraumklima herstellen und Wärmelasten abführen [2]. Findet keine ausreichende Lüftung statt, können erhöhte Schadstoffkonzentrationen von CO₂, VOC (engl.: Volatile Organic Compounds), biologischen Stoffen, Staub und Gerüche auftreten [2]. Erhöhte CO₂-Konzentrationen oberhalb von 1.000 ppm können bei längerem Aufenthalt zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen wie z.B. Kopfschmerz, Müdigkeit oder mangelnder Konzentrationsfähigkeit führen [3, 4]. Die CO₂-Konzentration in der Raumluft ist darüber hinaus von der Anzahl der Personen, deren Aufenthaltsdauer und Aktivitätsgrad abhängig.

Eine maschinelle Lüftung ist verglichen mit einer Fensterlüftung in der Lage, die erforderliche Raumluftqualität in Klassenräumen über das gesamte Jahr bereitzustellen. Eine Wärmerückgewinnung (WRG) unterstützt ein behagliches Raumklima und führt zu einem niedrigeren Heizenergieaufwand sowie zu einem niedrigeren CO₂-Fußabdruck für die Beheizung in Vergleich zu einer Fensterlüftung [4].

Für die maschinelle Lüftung gibt es eine Vielzahl an Lösungsvarianten wie zentrale oder dezentrale Anordnungen der Lüftungsanlage sowie unterschiedliche Strömungsformen, welche einen wesentlichen Einfluss auf die Luftführung im Raum aufweisen. Im Forschungsvorhaben *Untersuchungen zur Optimierung maschineller Luftführungskonzepte in Schulen zwecks Verbesserung der Innenraumluftqualität, Behaglichkeit und Energieeffizienz (OLIS)* [5] werden die Lüftungseffektivitäten von zwölf häufig eingesetzten maschinellen Schullüftungskonzepten für einen Referenzklassenraum ermittelt. Das dabei verwendete Strömungssimulationsmodell wird exemplarisch für ausgewählte Luftführungsvarianten in einem Raumluftströmungslabor validiert. Mit den Strömungssimulationen wird nicht nur die Raumluftqualität, sondern auch die thermische Behaglichkeit für die einzelnen Personen im Klassenraum erfasst und optimiert. Anhand gekoppelter Gebäude- und Anlagensimulationen wird das Energieeinsparpotential durch eine verbesserte Lüftungseffektivität, Wärmerückgewinnung und Bedarfslüftung ermittelt. Die Erkenntnisse des Forschungsvorhabens sind in diesem Leitfaden mit Anforderungen an die Belüftung von Klassenräumen und Auslegungshinweisen zusammengeführt.

2 Auslegungsgrundlagen

Zur Bewertung der Raumzustände nach thermischen und lufthygienischen Gesichtspunkten werden die Anforderungen nach DIN EN 16798-3:2017-11 [6] herangezogen. In DIN EN 16798-1:2022-03 [7] werden vier Kategorien (Kategorie I bis IV) definiert, die jeweils unterschiedliche Erwartungen an die Behaglichkeit stellen (siehe Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: Kategorien der Behaglichkeitsanforderungen [7]

Kategorie	Beschreibung
I	Hohes Maß an Erwartungen
II	Normales Maß an Erwartungen¹
III	Annehmbares, moderates Maß an Erwartungen
IV	Geringes Maß an Erwartungen

Die zu erfüllenden Erwartungen an die Behaglichkeit sind innerhalb des Bereichs mit Personenaufenthalt, dem sogenannten Aufenthaltsbereich, nach DIN EN 16798-3:2017-11 [6] einzuhalten. Die Maße dieses Aufenthaltsbereichs in Räumen bzw. Abstände von den jeweiligen Innenflächen der Bauteile sind in Tabelle 2-2 beschrieben.

Tabelle 2-2: Maße für den Aufenthaltsbereich [6]

Abstand von der folgenden Innenfläche	Üblicher Bereich in m	Standardwert in m
Böden (untere Begrenzung)	0,00 ... 0,20	0,05
Böden (obere Begrenzung)	1,30 ... 2,00	1,80
Außenfenster und -türen	0,50 ... 1,50	1,00
Außenwände	0,15 ... 0,75	0,50
Innenwände	0,15 ... 0,75	0,50

2.1 Raumluftqualität

Nach den Vorgaben der VDI-Richtlinie 6040 Blatt 1 [3] sowie den „Anforderungen an Lüftungskonzeptionen in Gebäuden“ des Arbeitskreises Lüftung am Umweltbundesamt [4] sollte eine mittlere CO₂-Konzentration von 1.000 ppm_v während einer Nutzungseinheit (Unterrichtsstunde) nicht überschritten werden, um eine hygienisch unbedenkliche Luftqualität zu gewährleisten. Die CO₂-Konzentration wird als Leitindikator für die erforderliche Raumluftqualität angesetzt.

2.1.1 Bewertung der Raumluftqualität

Kohlenstoffdioxid ist ein natürlicher Bestandteil der Außenluft mit einem standortabhängigen Anteil von ca. 400 ppm bezogen auf das Volumen [8]. In DIN EN 16798-1:2022-03 [7] sind für die einzelnen Kategorien der Raumluftqualität Anforderungen festgelegt, siehe Tabelle 2-3. Es ist zu beachten, dass diese Werte nicht absolut, sondern oberhalb der Außenluftkonzentration angegeben sind.

Tabelle 2-3: Anforderungen an die CO₂-Konzentration [7]

Kategorie	CO ₂ -Konzentration oberhalb der Außenluftkonzentration in ppm _v
I	350
II	550
III	900
IV	1.350

¹ In allen folgenden Tabellen sind die für Klassenräume empfohlenen Kategorien/Werte blau markiert.

2.1.2 Lüftungseffektivität

Schadstofflasten stellen konvektive Lasten dar und können daher nur über einen Luftstrom aus dem Raum abgeführt werden [9]. Die Lüftungseffektivität ε_v ², siehe Gleichung (2-1), ist ein Maß dafür, wie Schadstoffe aus dem Raum abgeführt werden. Sie resultiert aus dem Verhältnis der Verunreinigungskonzentrationen in der Abluft C_e zur Verunreinigungskonzentration in Atmungshöhe C_i , jeweils abzüglich der Verunreinigungskonzentrationen in der Zuluft C_s [6].

$$\varepsilon_v = \frac{C_e - C_s}{C_i - C_s} \quad (2-1)$$

mit:

ε_v	Lüftungseffektivität
C_e	Verunreinigungskonzentration in der Abluft in ppm _v
C_i	Verunreinigungskonzentration in Atmungshöhe in ppm _v
C_s	Verunreinigungskonzentration in der Zuluft in ppm _v

Die Lüftungseffektivität ist wesentlich von der Luftführung bzw. Strömungsform im Raum abhängig (siehe auch Abschnitt 2.5). Bei einer idealen Mischlüftung ist die Verunreinigungs- bzw. Schadstoffkonzentration im Raum örtlich gleichmäßig verteilt, sodass die Lüftungseffektivität bei 1 liegt. Bei einer Quelllüftung führt die gegenüber dem Aufenthaltsbereich erhöhte Schadstoffkonzentration im Abluftbereich zu einer Lüftungseffektivität größer 1. Liegt die Lüftungseffektivität deutlich unter 1, ist dies ein Indiz für eine Kurzschlussströmung zwischen Zu- und Abluft.

2.1.3 Normative Berechnung der Außenluftvolumenströme

DIN EN 16798-1:2022-03 [7] beinhaltet empfohlene Außenluftvolumenströme für Nichtwohngebäude, die auf Gesundheits- und Behaglichkeitskriterien beruhen. Der Außenluftvolumenstrom in Gleichung (2-2) resultiert aus dem erforderlichen Außenluftvolumenstrom aufgrund der Verunreinigung durch die NutzerInnen, das Gebäude selbst und dessen Anlagen.

$$q_{tot} = n \cdot q_P + A_R \cdot q_B \quad (2-2)$$

mit:

q_{tot}	Gesamt-Außenluftvolumenstrom für den Atembereich in l/s
n	Anzahl der Personen im Raum
q_P	Außenluftvolumenstrom für die Nutzung je Person in l/(s·Person)
A_R	Fußbodenfläche in m ²
q_B	Außenluftvolumenstrom für Gebäudeemissionen in l/(s·m ²)

Tabelle 2-4 beinhaltet die erforderlichen Außenluftvolumenströme bezogen auf die Personenanzahl und die Gebäudeemissionen. Für Klassenräume (Kategorie II) setzt sich der Außenluftvolumenstrom aus 7 l/(s·Person) und 0,7 l/(s·m²) (schadstoffarmes Gebäude) zusammen.

Die Norm empfiehlt bei Neubauten und saniertem Bestand die Kategorie „schadstoffarmes Gebäude“ anzuwenden und unsanierte Bestandsgebäude als „nicht schadstoffarmes Gebäude“ einzustufen.

² Die Lüftungseffektivität wird in diesem Zusammenhang auch als Lüftungswirksamkeit bezeichnet.

Tabelle 2-4: Auslegungs-Außenluftvolumenströme für die Verdünnung von menschlichen Emissionen und Gebäudeemissionen [7]

Kategorie	Außenluftvolumenstrom je Person in l/(s·Person)	Außenluftvolumenstrom für Gebäudeemissionen in l/(s·m ²)		
		Sehr schadstoff- armes Gebäude	Schadstoff- armes Gebäude	Nicht-schadstoff- armes Gebäude
I	10	0,50	1,00	2,00
II	7	0,35	0,70	1,40
III	4	0,20	0,40	0,80
IV	2,5	0,15	0,30	0,60

2.2 Thermische Behaglichkeit

DIN EN 16798-1:2022-03 [7] enthält Vorgaben zur Auslegung und Bewertung des thermischen Raumklimas. Für die Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit werden im normativen nationalen Anhang [10] teilweise angepasste Werte angegeben, die von der Einteilung der DIN EN ISO 7730:2006-05 [11] und den Standardkriterien der DIN EN 16798-1:2022-03 [7] abweichen.

2.2.1 PMV- und PPD-Index

Die thermische Behaglichkeit für den gesamten Aufenthaltsbereich wird nach DIN EN ISO 7730:2006-05 [11] durch die Indizes „Predicted Mean Vote“ (PMV) und „Predicted Percentage of Dissatisfied“ (PPD) quantifiziert. Der PMV-Index beschreibt die durchschnittliche Beurteilung des Raumklimas einer großen Gruppe von Personen, siehe Tabelle 2-5. Der PPD-Index gibt zusätzlich Aufschluss über die Streuung des Mittelwerts. Dieser besagt, welcher Prozentsatz der RaumnutzerInnen mit dem Raumklima voraussichtlich unzufrieden sein wird.

Tabelle 2-5: Klimabeurteilungsskala des PMV-Index [11]

PMV-Index	-3	-2	-1	0	1	2	3
Beurteilung	kalt	kühl	etwas kühl	neutral	etwas warm	warm	heiß

Für den thermischen Zustand des Körpers insgesamt definiert DIN EN 16798-1:2022-03 [7] die in Tabelle 2-6 aufgelisteten einzuhaltenden Bereiche des PMV- und PPD-Index für die einzelnen Behaglichkeitskategorien.

Tabelle 2-6: Einzuhaltende Bereiche des PMV- und PPD-Index [7]

Kategorie	PMV-Index	PPD-Index in %
I	$-0,2 < \text{PMV} < 0,2$	< 6
II	$-0,5 < \text{PMV} < 0,5$	< 10
III	$-0,7 < \text{PMV} < 0,7$	< 15
IV	$-1,0 < \text{PMV} < 1,0$	< 25

Für Klassenräume (Kategorie II) soll ein PMV-Index im Bereich von -0,5...0,5 eingehalten werden – dies entspricht einem PPD-Index von unter 10%.

2.2.2 Operative Raumtemperatur

In Tabelle 2-7 sind die empfohlenen Auslegungswerte nach DIN EN 16798-1:2022-03 [7] bezüglich der operativen Raumtemperatur für den Winter- und Sommerfall aufgelistet. Dabei werden eine sitzende Tätigkeit, eine durchschnittliche Bekleidung sowie Luftgeschwindigkeiten unter 0,1 m/s angenommen. Für Klassenräume (Kategorie II) wird eine operative Raumtemperatur von 20 ... 26°C empfohlen.³

Tabelle 2-7: Anforderungen an die operative Raumtemperatur [7]

Kategorie	Operative Raumtemperatur in °C	
	Mindestwert in der Heizperiode	Höchstwert in der Kühlperiode
I	21,0	25,5
II	20,0	26,0
III	19,0	27,0
IV	18,0	28,0

2.2.3 Zugluft und vertikaler Temperaturgradient

Zugluft und ein zu hoher vertikaler Temperaturgradient zwischen Kopf und Fußgelenken sind mögliche Ursachen für eine lokale thermische Unbehaglichkeit, welche durch Abkühlen (oder Erwärmen) eines Körperteils entsteht [11]. Eine lokale thermische Unbehaglichkeit empfinden insbesondere Personen mit leichter sitzender Tätigkeit – wie in Klassenräumen. Die Anforderungen zur Vermeidung von Zugluft und zu hohen vertikalen Temperaturgradienten für die verschiedenen Kategorien sind in Tabelle 2-8 aufgelistet. Es sei angemerkt, dass der Temperaturunterschied für den Bereich zwischen 0,1 m und 1,1 m über dem Boden gilt. Für Klassenräume (Kategorie II) wird ein vertikaler Temperaturunterschied unter 3 K und eine Zugluft unter 15% empfohlen. Bei Lufttemperaturen über 26°C sind höhere maximale Luftgeschwindigkeiten zulässig, wenn die GebäudenutzerInnen die Luftgeschwindigkeit direkt regeln können [7].

Tabelle 2-8: Vorgaben zur maximalen Zugluft und dem vertikalen Temperaturunterschied [7]

Kategorie	Zugluft			Vertikaler Temperaturunterschied (zwischen Kopf und Knöchel)	
	DR in %	Maximale Luftgeschwindigkeit in m/s		PD in %	ΔT in K
		Winter	Sommer		
I	< 10	0,10	0,15	< 3	< 2
II	< 15	0,13	0,20	< 5	< 3
III	< 30	0,21	0,34	<10	< 4

³ Für Gebäude ohne maschinelle Kühlung gilt ein in DIN EN 16798-1:2022-03 unter Abschnitt 6.2.2 beschriebenes Verfahren zur Berücksichtigung der Anpassungseffekte.

2.3 Raumakustik

2.3.1 Anforderungen an die akustische Raumqualität

In Klassenräumen hat der akustische Komfort den gleichen Stellenwert wie gute Raumluftqualität und guter thermischer Komfort. So ist die Sprachverständlichkeit insbesondere wichtig für den Fremdsprachenunterricht und für SchülerInnen, bei denen Deutsch nicht die Muttersprache ist. Laute Klassenräume mit geringer Dämpfung des Lärms erhöhen die Belastung für Sprechende und mindern die Aufmerksamkeit und Konzentration der Zuhörenden.

DIN 18041:2016-03 [12] enthält Anforderungen und Hinweise für die Planung bezüglich der Hörsamkeit in Räumen⁴. So liegt exemplarisch die mittlere Raumdämpfung im Nachhallfeld des Referenzraums, d.h. bei genügend großem Abstand zur Schallquelle, mit 205 m³ Raumvolumen, ausgestattet z.B. mit einer Akustikdecke und mittleren Nachhallzeiten um 0,5 s, bei ca. 10 dB(A). Bei einem für die akustische Auslegung nach VDI 2081 Blatt1:2022-04 [13] maßgeblichem Abstand von z.B. 2 m muss der Direktschall berücksichtigt werden, wodurch die Differenz zwischen Schallleistung⁵ und Schalldruck auf 8 dB und bei schallharten Räumen und größeren Nachhallzeiten bis auf 6 dB abnehmen kann. Für genaue Werte muss die Schallausbreitung im Raum nach [13] berechnet werden. Weitere Hinweise zu akustischen Anforderungen gibt eine Studie des Fraunhofer-Instituts IBP [14].

Die Anforderungen an die Raumbelüftung lassen sich in drei Gruppen aufteilen:

1. Bei der freien Lüftung über Fenster bestimmt der Außenlärmpegel, abhängig von der Öffnungsfläche den Störpegel im Raum. So können niedrige Schalldruckpegel von 35 dB(A) in Schulräumen an verkehrsreichen Straßen bei offenen Fenstern nicht sicher eingehalten werden.
2. Bei der zentralen maschinellen Lüftung bestimmen im Wesentlichen tieffrequenter Ventilator-schall sowie Strömungsgeräusche raumnaher Volumenstromregler und die Luftdurchlässe selbst den TGA-Störpegel. Bei fachgerechter Auslegung können Schalldruckpegel von 30 bis 35 dB(A), die nach DIN 4109 [15] und VDI 2081 Blatt 1:2022-04 [13] gefordert sind, eingehalten werden.
3. Bei der dezentralen maschinellen Lüftung ist das RLT-Gerät im Klassenraum eingebaut und an der Fassade über ein Wetterschutzgitter oder entsprechende Fassadenelemente angeschlossen. Neben den Schallwegen von Zu- und Abluft müssen Gehäuseschall und die Schallabstrahlung am Wetterschutzgitter berücksichtigt werden. Die Schallleistung des Gehäuseschalls wird durch den Einbau in eine geschlossene Trockenbaukonstruktion gedämmt (3 bis 12 dB(A)) und über die Raumdämpfung (6 bis 8 dB(A)) reduziert. Bei Flachräumen könnte die Raumdämpfung geringer sein (siehe [16]) und sollte daher genauer untersucht werden. Die in die Nachbarschaft abgestrahlte Schallleistung der Ventilatoren wird mit dem Summenpegel aller Geräte in der gleichen Fassade zusammengefasst und über die Abstandsregeln in einen Schalldruck am kritischen Aufpunkt umgerechnet. Nach TA Lärm [17] darf ein Höchstwert von 40 dB(A) nachts und 55 dB(A) tagsüber in allgemeinen Wohngebieten nicht überschritten werden.

Weiterhin ist insbesondere bei dezentralen Anlagen darauf zu achten, dass die Angaben der RLT-Geräte mit Filter ermittelt worden sind und sich eine Verschmutzung der Filter nachteilig auf die Akustik auswirkt (siehe Vorgaben zur Filterwartung in VDI 6022 [18]).

Mit zentralen und dezentralen maschinellen Lüftungssystemen sind Schallpegel von 35 dB(A) im Raum erreichbar. Wichtig ist der NutzerInneneinfluss auf den Volumenstrom, um einen sehr leisen Betrieb

⁴ Die Nachhallzeiten können beispielsweise mit dem Tool www.reverberate.de überschlägig berechnet werden.

⁵ Die Schallleistung bezeichnet die pro Zeiteinheit von einer Schallquelle abgegebene Schallenergie und somit die Quellstärke eines Schallerzeugers. Im Gegensatz dazu stellt der Schalldruck eine Größe zur Kennzeichnung des Schallfeldes abhängig von Ort und Entfernung zur Schallquelle dar.

(30 dB(A)) für konzentriertes Arbeiten einstellen zu können. In den Pausen wird eine maschinelle Intensivlüftung mit höheren Schallpegeln akzeptiert. Kombiniert mit einer Stoßlüftung über Fenster lässt sich die empfundene Raumluftqualität zusätzlich verbessern. Eine CO₂-geregelter stetige Bedarfslüftung ist nicht nur energetisch, sondern auch aus akustischen Gründen zu empfehlen.

2.4 Lüftungsstrategien zur Minderung von Infektionsrisiken über Aerosole

Die SARS-CoV-2-Pandemie und die schwierige freie Belüftung (Fensterlüftung) von Klassenräumen mit hoher Belegungsdichte im Winter hat den Zusammenhang von viralen Infektionen und schlechter Raumluftqualität bewusst gemacht und Versäumnisse bei der Belüftung, insbesondere von Klassenzimmern, offengelegt. Die Mischung virenfreier Außenluft mit belasteter Raumluft verdünnt die Konzentration von Virenkopien und verringert damit das Ansteckungsrisiko. Neben einem ausreichend großen Außenluftstrom spielen die Luftführung, lokale Lüftungseffektivität und Lüftungswirksamkeit eine große Rolle.

Die Partikelausbreitung einer infizierten Person wurde **nicht** im OLIS-Projekt simuliert. Da die Luftführung (Maß ist die Lüftungseffektivität) im Raum nicht gleichzusetzen ist mit der Partikelemission einzelner Personen (Maß ist die Lüftungswirksamkeit), werden in diesem Leitfaden die wichtigsten Ergebnisse aus der Fachliteratur kurz zusammengefasst. Für weitergehende Informationen sei auf folgende Literatur verwiesen: [19–23].

Die Raumlüftung allein kann eine direkte Infektion nicht verhindern, wie z. B. beim Ausstoß von virenbehafteten Aerosolen beim Sprechen über eine Entfernung von 1 bis 2 m. Daher ist in dicht besetzten Innenräumen eine medizinische Mund-Nasen-Bedeckung eine notwendige Voraussetzung des Infektionsschutzes. So können FFP2-Masken das Infektionsrisiko wesentlich reduzieren, da sie beim Ausatmen die Emissionsrate einer infizierten Person mindern und bei der gesunden Person beim Einatmen Viren im Filter abscheiden [24].

Kriegel [21] beschreibt nach einigen Vereinfachungen einen situationsbedingten R-Wert R_s , mit dem sich die Ansteckungswahrscheinlichkeit für eine ideale Mischlüftung abschätzen lässt.

$$R_s = \frac{S_v}{N_0} \cdot \frac{t}{q_{Pers}} \cdot Q_b \cdot f_M$$

mit:

S_v	Virenemissionsrate in 1/s
N_0	Notwendige Anzahl der Virenkopien für eine Ansteckung
t	Verweilzeit im Raum t in s
q_{Pers}	Personenbezogene Außenluftvolumenstrom in l/(s·Person)
Q_b	Atemvolumenstrom in l/s
f_M	Gesamteffizienz der Maske

Durch den Bezug auf den Außenluftvolumenstrom q_{Pers} kann die Zunahme der CO₂-Konzentration ΔC_{CO_2} von 350 bis 550 ppm als Maß für den Gesundheitsschutz herangezogen werden. Dieser Wert wird in DIN EN 16798-1:2022-03 in der Kategorie II für Klassen- und Büroräume empfohlen. Die exemplarisch in Bild 9-2 angegebenen CO₂-Werte der in OLIS untersuchten Varianten zeigen die Durchmischung und

Verdünnung aller personenbezogenen CO₂-Emissionen und geben die lokale personenbezogene CO₂-Konzentrationen an.

Die Vorteile der Absaugung virenbeladener Abluft an der Decke kommen bei der Schicht- bzw. Quelllüftung nicht voll zum Tragen, da der Thermikluftstrom an Personen um den Faktor 3 bis 4 höher ist als die einer Person zugeordnete Abluftmenge. Das bedeutet, dass der größere Teil dieses Thermikluftstroms mit den Virenkopien wieder in den Aufenthaltsbereich zurückströmen muss.

Folgende Empfehlungen zum Betrieb und zur Ausstattung von RLT-Anlagen können zusammengefasst werden, um Infektionsrisiken mindern zu können:

Zentrale RLT-Anlagen

- Beimischung von Sekundärluftanteilen (Umluft) in der Regelung sperren
- Gute Filterwartung, Außenluftfilter müssen jährlich erneuert werden (siehe VDI 6022 [18])
- Falls nicht möglich, Sekundärluft mit ausreichender Filterqualität ISO ePM1 > 60% reinigen oder mit UV-C-Bestrahlung (nach DIN/TS 67506 [25]) bzw. ähnlichen zertifizierten Verfahren desinfizieren
- Außenluftvolumenströme erhöhen, soweit es die Nacherwärmung zulässt; bei bedarfsgeregelter Lüftung aufgrund der Gleichzeitigkeit besser umsetzbar. Sollte die Heizleistung nicht ausreichen, können geringere Raumtemperaturen auftreten.

Ergänzungen zu dezentralen RLT-Anlagen, die nur einen Klassenraum belüften

- Hybride Lüftung, d.h. solange es die Außentemperaturen zulassen, Fenster zusätzlich öffnen
- Im Betrieb ist eine Erhöhung der maximalen Volumenströme einfacher zu lösen und kann lokal beeinflusst werden, sofern ein höherer Schallpegel akzeptiert wird.
- Geräte mit CO₂-Regelung passen sich selbsttätig an, Absenken des CO₂-Sollwerts (z. B. auf 800 ppm) wird empfohlen
- Ist kein Nacherwärmer verbaut, ist ein Sekundärluftbetrieb im dezentralen RLT-Gerät zur Sicherstellung einer minimalen Zulufttemperatur zulässig, da eine Verteilung über mehrere Räume ausgeschlossen ist; dies reduziert allerdings den Außenluftstrom. Eine Nacherwärmung im dezentralen RLT-Gerät sichert 100%igen Außenluftanteil auch bei niedrigen Außenlufttemperaturen.

2.5 Raumströmung in Klassenräumen

In Abhängigkeit von der Positionierung und der Art der Zuluftdurchlässe, den Austrittsgeschwindigkeiten sowie der Zulufttemperatur stellen sich in maschinell belüfteten Räumen unterschiedliche Raumluftströmungen ein. Für Klassenräume sind die Luftführungskonzepte der Misch-, Quell- sowie Misch-/Quelllüftung relevant.

In Bild 2-1 ist das Prinzip der Mischlüftung, der Quelllüftung (auch als Schichtlüftung bezeichnet) und der Misch-/Quelllüftung dargestellt.

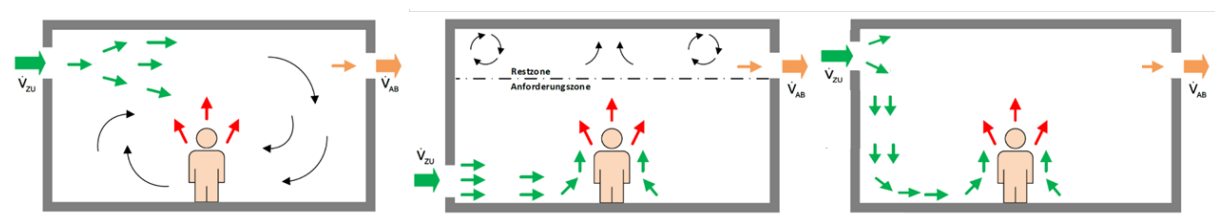


Bild 2-1: Prinzip der Mischlüftung (links), Quelllüftung (Mitte) und Misch-/Quelllüftung (rechts) [26]

Bei der **Mischlüftung** wird die Zuluft mit hohem Impuls in den Raum eingebracht, damit durch eine hohe Induktionswirkung eine möglichst vollständige Vermischung der Raumluft mit der Zuluft erreicht wird. Bei einer vollständigen Durchmischung der Raumluft mit der Zuluft entstehen überall im Raum die gleichen Temperaturen und Schadstoffkonzentrationen. Dabei ist die Positionierung der Zu- und Abluftdurchlässe beliebig gestaltbar, solange keine Kurzschlussströmung entsteht, bei der die Zuluft direkt und ohne Durchmischung mit der Raumluft zum Abluftdurchlass strömt [9]. Wichtig dabei ist es auch, dass die Zuluft außerhalb der Anforderungszone zugeführt wird, sodass Geschwindigkeits- und Temperaturgradienten sich abbauen können, bevor sie die Personen in der Anforderungszone erreicht.

Bei der **Quelllüftung** muss die Zuluft mit geringem Impuls und geringerer Untertemperatur gegenüber der Raumluft in den Raum eingebracht werden. Die Eintrittsgeschwindigkeiten in den Raum liegen bei etwa 0,15 bis 0,25 m/s. Durch die geringen Geschwindigkeiten wird sichergestellt, dass in diesem Fall die thermischen Auftriebskräfte größer als die dynamischen Kräfte sind.

Der Zuluftdurchlass wird in der Regel in Bodennähe angebracht, sodass sich am Boden eine kühlere Luftschicht bildet. Dafür muss die Luft immer mit Untertemperatur gegenüber der Raumluft eintreten. Diese Luftschicht erwärmt sich an den Wärme- und Stoffquellen im Raum (Personen, Geräte, Beleuchtung usw.) und wird durch den thermischen Auftrieb zusammen mit den Schadstoffen nach oben in Richtung Decke gefördert. Dort sammelt sich eine Luftschicht, die höhere Temperaturen und eine höhere Schadstoffkonzentration aufweist, weshalb dort folglich die Abluftdurchlässe angebracht werden sollten. Dadurch entstehen mehrere Luftschichten mit von unten nach oben ansteigendem Temperaturniveau und Schadstoffgehalt. Der Raum wird dabei in eine Anforderungs- und eine Restzone aufgeteilt [27]. Erstere ist der Bereich, in dem Sollwerte eingehalten werden müssen; letztere der verbleibende Bereich des Raumes ohne einzuhaltende Anforderungen.

Durch die Kombination einer lokalen Mischluftzone außerhalb des Aufenthaltsbereichs und einer bodennahen Quelllüftung gelingt es, die Vorteile beider Strömungsformen als **Misch-/Quelllüftung** zusammenzuführen. Eine lokal begrenzte, hochinduktive Mischlüftung durchströmt die Aufenthaltszone ähnlich einer Quelllüftung und wird dort nur noch durch die Thermik der Wärmequellen im Raum beeinflusst. Die Lüftungseffektivität liegt mit $\epsilon = 1 \dots 1,2$ zwischen den Werten der Misch- und der Quelllüftung. Aus energetischer und lufthygienischer Sicht sollte der Klassenraum bei der Quell- und Misch-/Quelllüftung über sekundäre Systeme wie Fußbodenheizung oder Niedertemperatur-Heizflächen temperiert werden.

Ein Vergleich der Misch-, Quell- und Misch-/Quelllüftung mit den jeweiligen Vor- und Nachteilen befindet sich in Tabelle 2-9.

Tabelle 2-9: Vor- und Nachteile von Misch-, Quell- sowie Misch-/Quelllüftung nach [5]

	Vorteile	Nachteile
Mischlüftung	<ul style="list-style-type: none"> • Platzierung der Luftdurchlässe außerhalb des Aufenthaltsbereichs • Geringer Platzbedarf für Zuluftdurchlässe • Homogene Temperaturverteilung, geringer vertikaler Temperaturgradient • Platzierung von Sensoren für CO₂- und Temperaturregelung aufgrund Homogenität flexibel • Heizen und Kühlen über Zuluft ist aus Sicht der thermischen Behaglichkeit möglich • Temperaturdifferenzen zwischen Zuluft und Raum -10 K bis + 5 K möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Strömungskurzschlüsse zwischen Zuluft- und Abluftdurchlässen bei nicht fachgerechter Planung möglich • Freistrahlen mit zu hohen Untertemperaturen und Geschwindigkeiten können zu früh in die Anforderungszone eindringen • Höheres Niveau der Zugluftraten • Potenziell höhere Querkontamination im Raum • Mäßige Lüftungseffektivität, nahe 1, mit Strömungskurzschlüssen < 1
Quelllüftung	<ul style="list-style-type: none"> • Höhere Luftqualität im Aufenthaltsbereich, Lüftungseffektivität >1 • Geringe Luftgeschwindigkeiten im Aufenthaltsbereich (DR) • Potenziell niedrigere Querkontamination im Raum 	<ul style="list-style-type: none"> • Größerer Platzbedarf für Zuluftdurchlässe aufgrund der kleineren Luftgeschwindigkeiten • Erhöhte Temperaturgradienten zwischen Kopf- und Knöchelbereich für die Personen in der Nähe der Zuluftdurchlässe • Kühlleistung begrenzt durch Zuluftuntertemperaturen bis -4 K gegenüber Raumtemperatur im Aufenthaltsbereich (h= 1,2 m) • Eingeschränkte Möglichkeit eines luftseitigen Heizbetriebs, Mischlüftung durch aufsteigende Zuluft (Untertemperatur für Zuluft benötigt)
Misch-/Quelllüftung	<ul style="list-style-type: none"> • Platzierung der Luftdurchlässe außerhalb des Aufenthaltsbereichs, geringer Platzbedarf für Zuluftdurchlässe • Geringere Luftgeschwindigkeiten und damit Zugluftrate (DR) außerhalb der Mischzone • Stabile Quelllüftung auch bei Teillast mit kleinerem Volumenstrom durch den gesamten Raum • Temperaturdifferenzen zwischen Zuluft und Raum -7 K bis 0 K insbesondere zur Kühllastabfuhr möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Strömungskurzschlüsse zwischen Zuluft- und Abluftdurchlässen bei nicht fachgerechter Planung möglich • Lüftungseffektivität leicht oberhalb von 1, mit Strömungskurzschlüssen < 1 • Fehlende Möglichkeit eines luftseitigen Heizbetriebs bei Zuluftführung von der Decke, kein vollständiges Durchströmen des Aufenthaltsbereichs

3 Untersuchung und Bewertung von Luftführungskonzepten

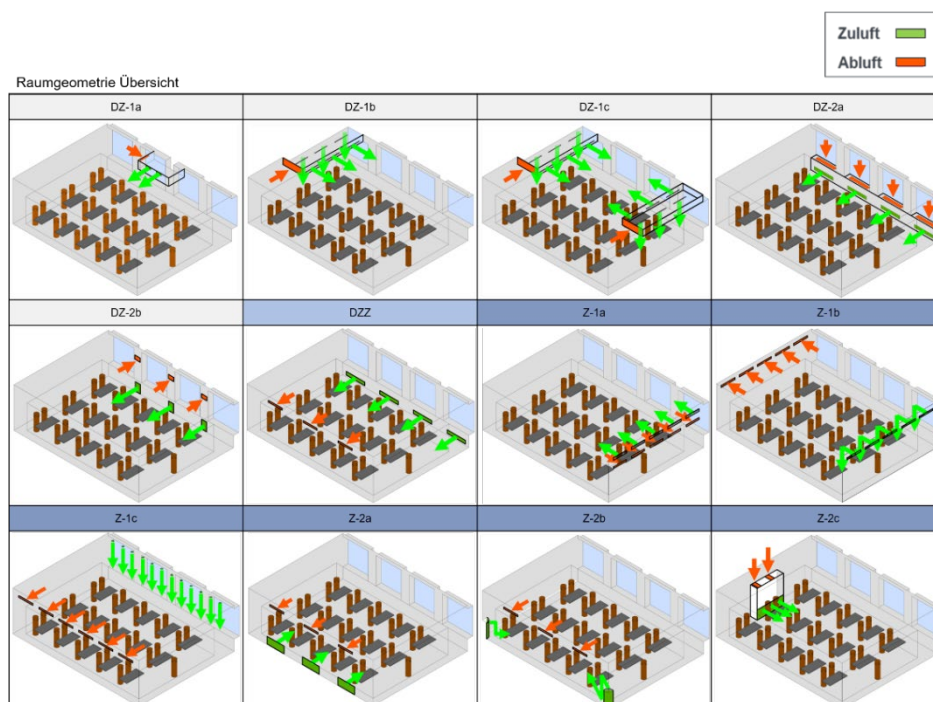
3.1 Referenzklassenraum und untersuchte Varianten

Im Forschungsvorhaben OLIS [5] wurden die in Tabelle 3-1 zusammengefassten zwölf Luftführungskonzepte für Klassenräume anhand von Strömungssimulationen und exemplarischen Laborversuchen mit je einer der genannten Luftführungsarten untersucht. Anhang 8.1 enthält den Grundriss des hierfür definierten Referenzklassenraums mit 30 SchülerInnen und einer Lehrkraft sowie die Simulationsrandbedingungen. Daneben finden sich in Anhang 8.2 Steckbriefe zu den zwölf untersuchten Luftführungskonzepten, für die Belegungsvarianten (Frontalunterricht und Inselbelegung jeweils in Voll- und Teilbelegung) bei unterschiedlichen Außenbedingungen (Winterfall, Sommerfall, siehe Bild 9-1) untersucht wurden. Der Außenluftvolumenstrom beträgt bei Vollbelegung 954 m³/h und bei Teilbelegung 500 m³/h.

Tabelle 3-1: Übersicht der untersuchten Luftführungsvarianten

	Name	Anordnung Zuluft	Anordnung Abluft	Luftführungskonzept	Anzahl Durchlässe
Dezentrale Lüftungssysteme	DZ-1a	Decke (Fensterseite)	Decke (Fensterseite)	Mischlüftung, entlang der Decke	2
	DZ-1b	Decke	Decke	Misch-/Quelllüftung	6
	DZ-1c	Decke	Decke	Misch-/Quelllüftung	12
	DZ-2a	Brüstung (Seite)	Brüstung (oben)	Quelllüftung	4
	DZ-2b	Brüstungsgerät (Fensterseite, unten)	Brüstungsgerät (Fensterseite, oben)	Quelllüftung	3
1)	DZZ	Brüstung (Seite)	Wand (oben)	Quelllüftung	4
Zentrale Lüftungssysteme	Z-1a	Wand (oben)	Wand (oben)	Mischlüftung, horizontale Luftführung entlang der Decke	5
	Z-1b	Wand (oben)	Wand (oben)	Misch-/Quelllüftung	5
	Z-1c	Decke (Fensterseite)	Wand (oben)	Misch-/Quelllüftung	12
	Z-2a	Wand (unten)	Wand (oben)	Quelllüftung	3
	Z-2b	Ecke (unten)	Wand (oben)	Quelllüftung	2
	Z-2c	Standgerät (unten)	Standgerät (oben)	Quelllüftung	1

¹⁾ Dezentrale und Zentrale Lüftungssysteme



3.2 Auswertemethodik

3.2.1 CFD-Berechnung der Raumströmung und Beispielauswertung

Zur Bewertung der Raumzustände nach thermischen und lufthygienischen Gesichtspunkten werden die Vorgaben nach DIN EN 16798-1:2021-04⁶ (Standardkriterien) [28] herangezogen, sodass für Klassenräume die Kategorie II (normales Maß an Erwartungen) eingehalten werden soll. Hierzu werden die entsprechenden Behaglichkeitsparameter mittels dreidimensionalen numerischen Strömungssimulationen entweder global (zonenweise Betrachtung) oder lokal (örtliche Betrachtung) aufgelöst ermittelt. So werden neben den globalen Parametern wie CO₂-Konzentration im Aufenthaltsbereich und Predicted Mean Vote (PMV, erwartete mittlere Beurteilung des thermischen Raumklimas durch eine größere Personengruppe) auch die Zugluftrate (Draught Rating, DR) sowie der vertikale Temperaturunterschied ΔT_{K-F} (zwischen Fuß- und Kopfbereich) für alle Personen im Raum als lokale Parameter ermittelt. Daraus lässt sich – wie in Bild 9-2 (Anhang) exemplarisch für die dezentrale Lüftungsvariante DZ-2a dargestellt – für jeden Sitzplatz bzw. jede Person eine individuelle Bewertung und Einordnung in die jeweilige Kategorie (I...>IV) nach DIN EN 16798-1:2021-04 vornehmen, die dem Schlechtwert der genannten Kriterien entspricht. Mit dieser Vorgehensweise werden die in Tabelle 3-1 aufgeführten Luftführungskonzepte verglichen.

3.2.2 Raumströmungsversuche

Im Raumluftrömungslabor der OLIS-Projektpartnerin LTG AG wurde ein Klassenraum in Anlehnung an den Referenzklassenraum aufgebaut. Mit dem Aufbau wurden sowohl Behaglichkeits- als auch Spurengasmessungen durchgeführt und anhand der Messungen die numerischen Strömungsberechnungen für exemplarische Luftführungsvarianten und Belegungen validiert. Betrachtete Parameter waren hierbei u. a. die Luftgeschwindigkeiten, Raumlufthtemperaturen und Spurengaskonzentrationen. Die Messungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Strömungssimulationen [5].

3.3 Zusammenfassung wesentlicher Ergebnisse für Luftqualität und thermische Behaglichkeit

In den folgenden Darstellungen werden die Ergebnisse der Strömungssimulationen am Beispiel des Frontalunterrichts für eine Voll- bzw. Teilbelegung dargestellt. Die zwölf Varianten für die Luftführung sind in Tabelle 3-1 als Übersicht zusammengestellt. In der Abbildung repräsentiert jeder Balken die Einordnung der einzelnen Personen bzw. der Anzahl an Sitzplätzen in der jeweils erreichten Behaglichkeitskategorie. Der in den Ergebnisdiagrammen dargestellte Kreis sowie die dazu angegebene Ziffer beschreiben die Lüftungseffektivität des Luftführungskonzepts (siehe Sekundärachse rechts). Da Misch- und Misch-/Quelllüftung ähnliche Lüftungseffektivitäten aufweisen, werden diese in der folgenden Auswertung gemeinsam betrachtet.

3.3.1 Winterfall

In Bild 3-1 werden die Ergebnisse der Strömungssimulationen für den Frontalunterricht im Winter für eine Voll- bzw. Teilbelegung bei einer Zulufttemperatur von 16°C, welche sich ohne Nacherwärmung nach der Wärmerückgewinnung einstellt, dargestellt. Da diese Zulufttemperatur bei Quelllüftungssystemen zu Behaglichkeitsdefiziten führt, siehe Bild 3-1, wird in einer weiteren Variante die Zulufttemperatur auf 20°C angehoben bzw. nacherwärmt, siehe Bild 3-2.

⁶ Zum Zeitpunkt der Simulation lag der nationale Anhang von DIN EN 16798-1:2021-04 als Entwurf vor, sodass die Standardkriterien herangezogen wurden. Der wesentliche Unterschied zwischen Standardkriterien und nationalem Anhang (für DIN EN 16798-1:2021-4 als auch DIN EN 16798-1:2022-03) besteht in der dort höheren zulässigen Zugluftrate (z.B. Kategorie II: DR = 20% gegenüber 15%).

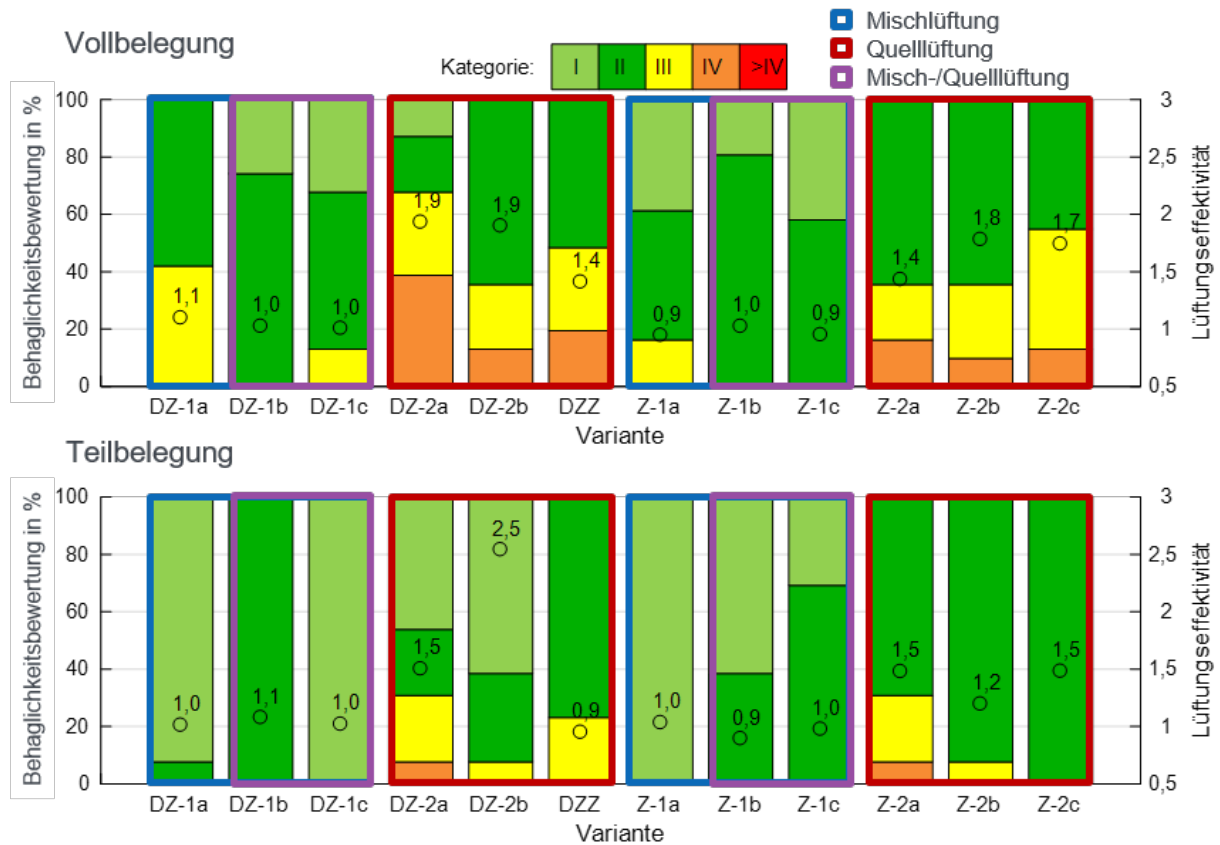


Bild 3-1: Gesamtauswertung der Luftführungskonzepte für Frontalunterricht im Winterfall bei 954 bzw. 500 m³/h

Mischlüftung und Misch-/Quelllüftung

Für die Luftführungskonzepte mit Misch- und Misch-/Quelllüftung (DZ-1a, DZ-1b, DZ-1c, Z-1a, Z-1b, und Z-1c) beträgt die Lüftungseffektivität bei **Frontalunterricht** 0,9...1,1. Die Lüftungseffektivität variiert somit nur gering zwischen Voll- und Teilbelegung sowie bei Veränderungen der Positionen und der Anzahl an Wärmequellen im Raum. Die Luftführungskonzepte sind deshalb als robust anzusehen. Bei den Varianten DZ-1a, DZ-1c und Z-1a liegt die Behaglichkeitskategorie für die einzelnen Personen im Raum immer über III bei Vollbelegung und über II bei Teilbelegung. Für die Varianten DZ-1b, Z-1b und Z-1c liegt die Behaglichkeit sowohl bei der Voll- als auch bei der Teilbelegung immer über Kategorie II.

In Bild 9-3 (Anhang) werden analog dazu die Ergebnisse der Strömungssimulationen für die **Insellösung** im Winterfall für eine Voll- bzw. Teilbelegung dargestellt. Verglichen mit dem Frontalunterricht weisen die Luftführungskonzepte DZ-1a, DZ-1b, DZ-1c, Z-1a, Z-1b, und Z-1c ähnliche Lüftungseffektivitäten von 1,0...1,1 sowie ähnliche Behaglichkeitskategorien auf. Bei der Variante Z-1c führt die Nacherwärmung der Zuluft durch eine integrierte Bauteilaktivierung (besondere Randbedingung) bei der Teilbelegung zu einer Übererwärmung im hinteren Teil des Raums (PMV-Index > 0,5). Die Zulufttemperatur dieser Variante beträgt 21°C statt 16°C bei den anderen Varianten.

Quelllüftung

Die Lüftungseffektivitäten der untersuchten Quelllüftungssysteme (DZ-2a, DZ-2b, DZZ, Z-2a, Z-2b und Z-2c) liegen bei **Frontalunterricht** mit einer Zulufttemperatur von 16°C im Bereich von 1,4 ... 1,9 (Vollbelegung). Dadurch lassen sich niedrigere CO₂-Konzentrationen im Aufenthaltsbereich gegenüber der Mischlüftung bzw. Misch-/Quelllüftung bei gleichen Volumenströmen erreichen. Bei Teilbelegung sinkt die Lüftungseffektivität in der Regel. Die Einstufung der Behaglichkeit ist überwiegend auf eine zu hohe

vertikale Temperaturdifferenz zwischen Kopf- und Knöchelbereich für die Personen im Nahbereich der Zuluftdurchlässe zurückzuführen. Bei Teilbelegung reduziert sich die Anzahl an Personen in den Kategorien III bis IV. Grund hierfür ist der zunehmende mittlere Abstand zwischen den Zuluftdurchlässen und den Personen sowie der reduzierte Zuluftvolumenstrom.

Die ohne Nacherwärmung resultierende Zulufttemperatur von 16°C führt zu Behaglichkeitsdefiziten und wird daher in weiteren Simulationen für die Quellluftsysteme auf 20°C (siehe Bild 3-2) erhöht. Daneben wird in einer weiteren Variante der Außenluftstrom gemäß der Lüftungseffektivität in Anlehnung an DIN EN 16798-3:2017-11 ohne Nacherwärmung verringert (siehe Bild 9-5). Beide Anpassungen führen zu einer leicht verbesserten thermischen Behaglichkeit im Nahbereich der Zuluftdurchlässe, zugleich liegt dadurch jedoch eine verringerte Kühlwirkung vor, sodass die Temperatur in anderen Bereichen des Raums ansteigt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Lüftungseffektivität der Luftführungskonzepte mit Quelllüftung abhängig von der Temperaturdifferenz von Zuluft und Raumluft, Position und Anzahl der Wärmequellen im Raum stärker ändert. Sie liegt bei einer Zulufttemperatur von 20°C im Mittel bei ca. 1,3 und nur dann über 1, wenn die Zuluft kälter als die Raumluft in der Aufenthaltszone ist (Mischlüftung im Heizfall).

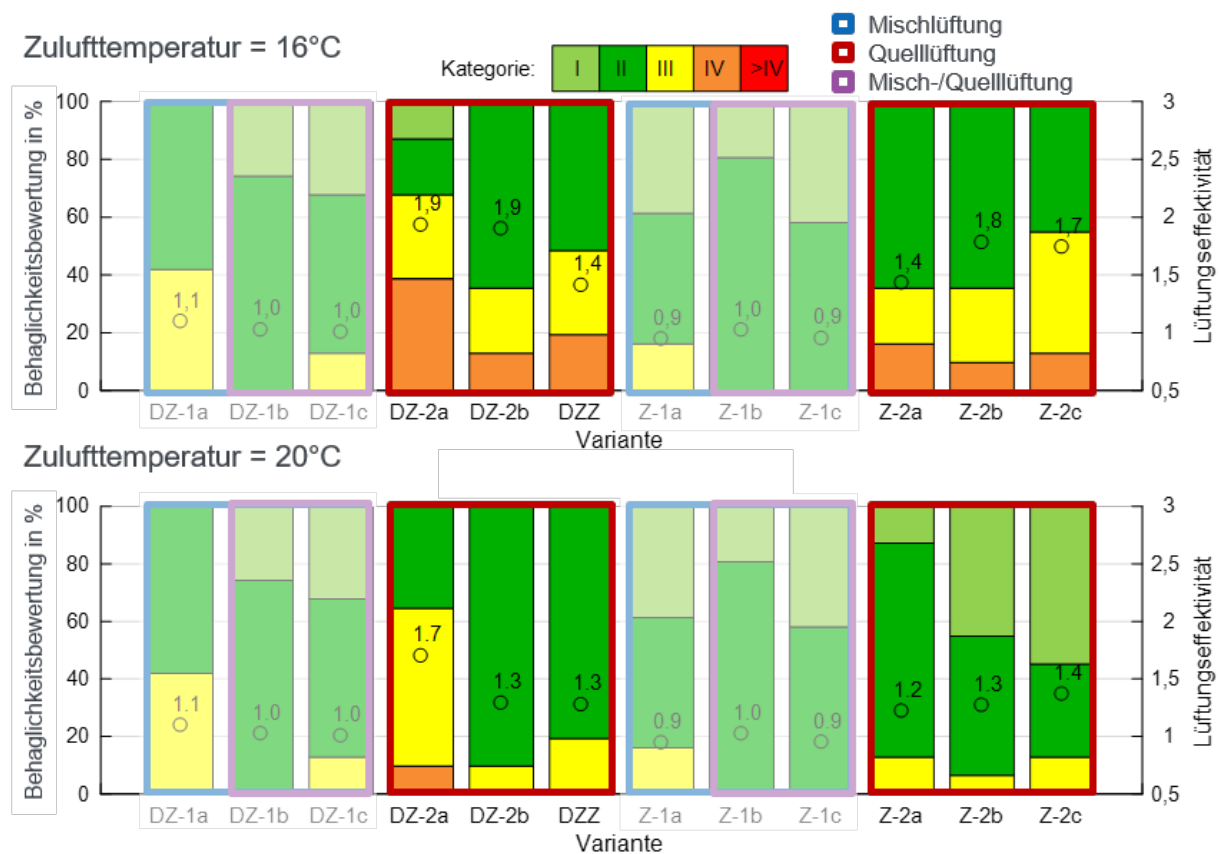


Bild 3-2: Gesamtauswertung der Luftführungskonzepte für Frontalunterricht im Winterfall, Nacherwärmung der Zuluft

Wie beim Frontalunterricht bildet sich bei der **Insellösung** (siehe Bild 9-3) mit den Varianten DZ-2a, DZ-2b, DZZ, Z-2a, Z-2b und Z-2c bei der Zulufttemperatur von 16°C eine Quelllüftung im Raum mit Lüftungseffektivitäten bis 1,9 aus. Die Lüftungseffektivität variiert jedoch zwischen Frontalunterricht und Insellösung für die einzelnen Varianten. Zum Beispiel beträgt die Lüftungseffektivität für die Variante DZ-2a in Frontalunterricht mit Vollbelegung 1,9 und bei der Insellösung mit Vollbelegung 1,1.

Die thermische Behaglichkeit für Personen in der Nähe der Zuluftdurchlässe wird auch hier mit Kategorie III und IV bewertet (siehe Frontalunterricht). Die Behaglichkeit fällt, verglichen mit der Vollbelegung, für die Teilbelegung tendenziell besser aus.

3.3.2 Sommerfall

In Bild 9-4 (Anhang) sind die Ergebnisse der Strömungssimulationen für Frontalunterricht im Sommerfall für eine Voll- bzw. Teilbelegung ohne maschinelle Kühlung dargestellt. Unabhängig vom Luftführungskonzept liegt bei allen Varianten die thermische Behaglichkeit im Raum in der Kategorie III oder IV. Das lässt sich in sämtlichen Varianten auf den zu hohen PMV-Index zurückführen. Die nicht konditionierte Zuluft von 23,5°C wird zusätzlich von den hohen Wärmequellen (Personen) im Raum erwärmt und es entsteht ein thermisch unbehaglicher Zustand im gesamten Raum infolge zu hoher Raumlufttemperaturen oberhalb von 26°C im Aufenthaltsbereich.

Die Ergebnisse der Strömungssimulationen für die Varianten DZ-1b und DZ-2b mit einer Kühlung der Zuluft im Sommer für eine Temperatur von 16°C (statt 23,5°C) bei Vollbelegung zeigen auf, dass für Variante DZ-1b die Optimierung zu einem behaglicheren Raumzustand führt, während für DZ-2b aufgrund der kühlen Zulufttemperatur die Unbehaglichkeit für die Personen im Nahbereich der Zuluftdurchlässe zunimmt.

4 Energetische Aspekte beim Betrieb maschineller Lüftung in Klassenräumen

Anhand eines Fallbeispiels [5] werden energetische Aspekte der maschinellen Lüftung mit Wärmerückgewinnung (WRG) im Vergleich zur Fensterlüftung (Öffnungswinkel $\alpha = 5^\circ$ und 7°) am Standort Stuttgart aufgezeigt. Der Referenzklassenraum wird hierfür in ein thermisch-energetisches Simulationsmodell überführt, mit dem die thermische Behaglichkeit und die Raumluftqualität über das gesamte Jahr betrachtet werden kann. Die Nutzungszeit wird zwischen 07:45 Uhr und 17:20 Uhr angenommen; entsprechende Pausen und Schulfertage werden berücksichtigt. Als Führungsgröße für die Fensteröffnung bzw. den Luftstrom der maschinellen Lüftung wird die CO₂-Konzentration im Raum verwendet.

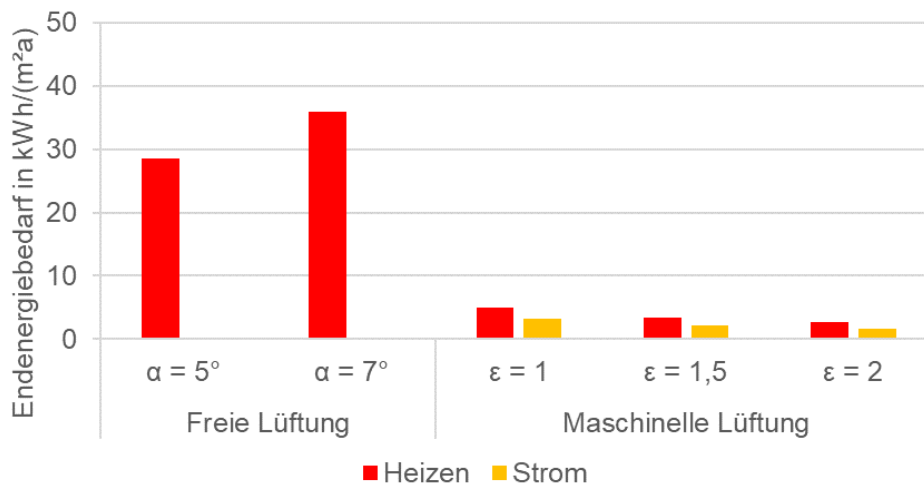
In Tabelle 4-1 ist erkennbar, dass eine Fensterlüftung zu einem wesentlich höheren Endenergiebedarf führt, der mit zunehmendem Öffnungswinkel steigt. Gleichzeitig treten bei Fensterlüftung auch kurzfristige Unterschreitungen der Solltemperatur sowie Überschreitungen der geforderten CO₂-Konzentrationen in der Raumluft bei bis zu 30% der Unterrichtszeit auf. Eine maschinelle Lüftung mit WRG führt zu einem niedrigeren Endenergiebedarf für Heizen bei vergleichsweise geringem Strombedarf.

Für die Nutzung (Heizen und Lüften) eines Klassenraums resultieren die in Tabelle 4-1 dargestellten CO₂-Emissionen für freie und maschinelle Lüftung, die über eine Gebäudenutzungsdauer von 25 Jahren ermittelt werden. Hierbei werden zwei Varianten für die eingesetzten Energieträger berücksichtigt; in der ersten Variante erfolgt die Beheizung über Erdgas, in der zweiten Variante über Strom (Wärmepumpe mit Jahresarbeitszahl von 3). Gegenüber einer freien Lüftung lassen sich die CO₂-Emissionen durch die maschinelle Lüftung mit WRG (Temperaturänderungsgrad $\Phi_T = 0,8$) bei Erdgas auf ein Viertel bzw. bei Einsatz einer Wärmepumpe um etwa die Hälfte reduzieren.

Tabelle 4-1: Endenergiebedarf und CO₂-Emissionen eines Klassenraums

	Freie Lüftung		Maschinelle Lüftung		
	$\alpha = 5^\circ$	$\alpha = 7^\circ$	mit WRG		
	Heizenergie	Heizenergie	Heizenergie	Strom	Summe
Endenergiebedarf in kWh/(m ² a)	29	36	5	3	
Endenergiebedarf in kWh/a	1.958	2.453	341	197	
Emission in kg CO ₂ Erdgas (25 Jahre) ⁷	11.748	14.717	2.045	1.002	3.048
Emission in kg CO ₂ Strom (25 Jahre) ⁸	3.329	4.170	579	1.002	1.582

In Tabelle 4-1 basieren die Ergebnisse auf einer Lüftungseffektivität von $\epsilon=1$. In Bild 4-1 sind die energetischen Auswirkungen eines in Abhängigkeit der Lüftungseffektivität ϵ ermittelten Außenluftstroms, ohne detaillierte Analyse der Raumluftzustände, einer freien Lüftung (Öffnungswinkel α) gegenübergestellt. Hierdurch kann der Einfluss der Regelungsstrategie auf die Energieeffizienz und thermische Behaglichkeit im Raum dargestellt werden.

**Bild 4-1: Vergleich des energetischen Aufwands für freie und maschinelle Lüftung**

Es ist erkennbar, dass der Strom- und Heizenergieaufwand mit zunehmender Lüftungseffektivität abnimmt. Eine maschinelle Lüftung kann aufgrund der Wärmerückgewinnung einen wesentlichen Anteil am Heizenergieaufwand ($< 5,0$ kWh/(m²a)) gegenüber einer Fensterlüftung (29...36 kWh/(m²a)) einsparen. Bei Vergleich der Varianten mit maschineller Lüftung sind entsprechende energetische Einsparungen durch Berücksichtigung der Lüftungseffektivitäten für den zuzuführenden Außenluftstrom möglich, jedoch sind die hiermit erreichbaren absoluten Energieeinsparpotentiale mit einer Differenz von 2,3 kWh/(m²a) gering.

⁷ Emissionsfaktor Erdgas: 0,24 kg CO₂/kWh nach Gebäudeenergiegesetz (GEG) 2020 [29, 29, 30].

⁸ Emissionsfaktor Strommix: 0,20 kg CO₂/kWh (Mittelwert für 25 Jahre, basierend auf Ausgangswert für 2020: 0,408 kg CO₂/kWh [31] und angenommener Klimaneutralität 2045)

5 Wichtige Aspekte für die Luftführung

Die Auswahl eines geeigneten Luftführungskonzepts für Klassenräume hängt von einer Vielzahl unterschiedlicher Randbedingungen ab, die nur teilweise von der Lüftungsplanung beeinflusst werden können. In erster Linie sind hier die geometrischen Randbedingungen zu nennen, die bei der Sanierung von Bestandgebäuden nur sehr begrenzt und bei Neubauten nur in der frühen Planungsphase von den Lüftungsplanenden beeinflusst bzw. verändert werden können. Hier sind u.a. das Raumnutzungskonzept für das Gesamtgebäude, die Deckenhöhen, der geometrische Aufbau der Brüstungsflächen, feste Raumeinbauten und die Sitzanordnung relevant. In der Entwurfsphase muss daher erörtert werden, welche Luftführungskonzepte für den Klassenraum aus geometrischer Sicht geeignet sind, sodass hierdurch eine Vorauswahl hinsichtlich zentraler oder dezentraler Lüftungssysteme sowie der Positionierung von Luftdurchlässen bzw. dezentralen Lüftungsgeräten getroffen werden kann.

Hierfür stehen unterschiedliche Varianten der Misch-, Quell- und Misch-/Quelllüftung zur Auswahl, für die folgendes grundsätzlich zu beachten ist:

- Bei einer Mischlüftung und Misch-/Quelllüftung sollte der Zuluftvolumenstrom mit ausreichendem Abstand zu Personen eingebracht werden, um Luftgeschwindigkeits- und Temperaturgradienten außerhalb der Anforderungszone abzubauen und damit die thermische Behaglichkeit zu gewährleisten.
- Bei einer Mischlüftung und Misch-/Quelllüftung muss darauf geachtet werden, dass die Zu- und Abluftdurchlässe so positioniert werden, dass Strömungskurzschlüsse zwischen Zu- und Abluft minimiert werden.
- Bei der Quelllüftung besteht die Notwendigkeit einer besonders sorgsamten Planung der Durchlassgeometrien bzw. Geräteanordnung sowie der Zuluftgeschwindigkeiten, um die thermische Behaglichkeit insbesondere im Nahbereich der Durchlässe sicherzustellen. Hierbei ist insbesondere darauf zu achten, dass im Nahbereich der Zuluftdurchlässe keine zu hohen Temperaturgradienten zwischen Kopf- und Knöchelbereich für die Personen auftreten.
- Bei Quellluftsystemen wird eine Nacherwärmung der Zuluft im Winterfall empfohlen, um zu geringe Zulufttemperaturen und damit Behaglichkeitseinbußen im Nahbereich der Durchlässe zu vermeiden. Gleichzeitig sollten die Zulufttemperaturen nicht zu hoch gewählt werden, um eine Überwärmung in anderen Raumbereichen aufgrund der hohen Wärmeabgabe der Personen zu verhindern.

Die Luftführungskonzepte führen zu unterschiedlichen Lüftungseffektivitäten, die bei den Mischlüftungssystemen sowie den Misch-/Quelllüftungssystemen bei etwa 1 und den Quelllüftungssystemen über 1 liegen. Die prinzipiell erreichbaren energetischen Vorteile durch Lüftungseffektivitäten von $\epsilon > 1$, die nach DIN EN 16798-3:2017-11 eine Verringerung der Außenluftströme ermöglichen würden, sind in den untersuchten Klassenräumen nur bedingt zu empfehlen, da sich hierdurch die Raumströmungen verändern und reduzierte Außenluftströme auch im Winterfall zu einer Raumüberwärmung führen können.

Durch die hohe flächenbezogene Wärmeabgabe der Personen sind insbesondere im Sommerfall zu hohe Raumtemperaturen und damit eine verringerte thermische Behaglichkeit zu erwarten. Mit einer zusätzlichen Regelung des Außenluftstroms nach der Raumtemperatur lässt sich die Anzahl an Stunden oberhalb des Soll-Raumtemperaturbereichs von 26°C weitgehend reduzieren, wenn die Zuluft maschinell gekühlt wird. Die Strömungssimulationen zeigen, dass mit einer Zuluftkühlung im Falle einer Misch- bzw. Misch-/Quelllüftung ein thermisch behagliches Raumklima für alle Personen erzielt werden kann. Bei der Quelllüftung kann die niedrigere Zulufttemperatur zu einem thermisch unbehaglichen Raumzustand für die Personen im Nahfeld der Zuluftdurchlässe führen.

Eine Kühlwirkung im Raum kann prinzipiell durch eine Nachtlüftung verbessert werden. Bei maschineller Lüftung muss jedoch die Temperaturdifferenz zwischen der Außenluft und dem Raum so groß sein, dass die Kühlenergieeinsparung größer als der energetische Aufwand für den Lufttransport ist. Bei freier Lüftung treten im Raum niedrigere Luftgeschwindigkeiten sowie geringe Temperaturdifferenzen zwischen der Raumluft und Wand-/Deckenoberflächen auf, so dass die Speichermassen nur bedingt abgekühlt werden können.

Bei der Auswahl und Dimensionierung von RLT-Anlagen sollte eine ausreichende Flexibilität in der Betriebsführung gewährleistet sein. Eine hohe Flexibilität kann durch eine Regelung nach CO₂ und Temperatur, sowie durch einen Intensivlüftungs-Modus in den Pausen sichergestellt werden. Die Möglichkeit der zusätzlichen Fensterlüftung ist bei moderaten Außentemperaturen zu empfehlen.

Für eine adäquate Regelung der Lüftungsanlage sollten geeignete Sensorpositionen im Raum (CO₂, Temperatur, Feuchte) definiert werden. Bei einer Mischlüftung sind die Positionen frei wählbar. Für eine Quelllüftung müssen aufgrund der inhomogenen Verteilung repräsentative Positionen im Raum bestimmt werden. Es empfiehlt sich, die RLT-Anlage nach CO₂ und bei Kühlfunktion nach Temperatur zu regeln. Eine Intensivlüftung mit höheren Volumenströmen in den Pausen ist auch bei geöffneten Fenstern sinnvoll (Hybridlüftung). Generell ist es wichtig, durch eine flexible Betriebsführung der RLT-Anlage auf die Wünsche der Raumnutzenden und die räumlichen Begebenheiten einzugehen.

Bei Planung und Umsetzung von zentralen bzw. dezentralen Anlagen müssen weiterhin Anforderungen an die Akustik im Raum und den Brandschutz (u.a. bei zentralen Anlagen: Brandschutzklappen, bei dezentralen Anlagen: Geräteabschaltung, selbsttätige Versperrung der Luftwege) eingehalten werden.

6 Zusammenfassung

Die Untersuchungen anhand von Strömungssimulationen und Laborversuchen zur Luftführung in Klassenräumen zeigen, dass eine maschinelle Lüftung – im Gegensatz zu einer Fensterlüftung – in der Lage ist, die erforderliche Raumluftqualität in Klassenräumen über das gesamte Jahr einzuhalten. Grundsätzlich lassen sich unter Voraussetzung der Einhaltung einer adäquaten Raumluftqualität (CO₂-Konzentration von maximal 1.000 ppm) deutliche energetische Einsparungen durch den Einsatz einer Wärmerückgewinnung gegenüber der Fensterlüftung erreichen. Mit einer maschinellen Mischlüftung bzw. Misch-/Quelllüftung kann sowohl die Raumluftqualität als auch die thermische Behaglichkeit unabhängig vom Raumnutzungsszenario sichergestellt werden. Mit einer maschinellen Quelllüftung kann eine hohe Raumluftqualität erreicht werden; bezüglich der thermischen Behaglichkeit ist insbesondere darauf zu achten, dass im Nahbereich der Zuluftdurchlässe keine zu hohen Temperaturgradienten zwischen Kopf- und Knöchelbereich für die Personen auftreten. Eine Nacherwärmung der Zuluft kann bei der Quelllüftung zu einer Verbesserung der thermischen Behaglichkeit nahe der Zuluftdurchlässe führen – allerdings gleichzeitig zu einer Überwärmung in anderen Raumbereichen. Die mit diesen Konzepten prinzipiell erreichbaren energetischen Vorteile durch höhere Lüftungseffektivitäten von $\epsilon > 1$, die eine Verringerung der Außenluftströme ermöglichen, sind somit im betrachteten Winterfall nur bedingt nutzbar. Für den Sommerfall liegen ohne maschinelle Kühlung bei allen Varianten thermische Behaglichkeiten der Kategorie III oder IV vor. Dies ist im Wesentlichen damit zu begründen, dass die hohen internen Wärmelasten (hohe Personenbelegungsdichte) nicht ohne eine aktive Kühlung abgeführt werden können. Darüber hinaus ist eine Untertemperatur der Zuluft gegenüber der Raumluft für das Wirkprinzip der Quelllüftung essentiell. Aus diesen Gründen sollte eine maschinelle Kühlung zur Vermeidung einer Überwärmung im Raum zukünftig in Betracht gezogen werden. Ziel hierbei muss es sein, die Wärme-, Kälte- und Lüftungsversorgung mit erneuerbaren Energien (bspw. Unterstützung durch Eigenerzeugung über PV-Anlage) für eine weitgehend CO₂-neutrale Energieversorgung der Schulgebäude zu betreiben. Die Raumbelüftung sollte bedarfsgeführt über eine maschinelle Lüftung mit Wärmerückgewinnung erfolgen.

7 Literaturverzeichnis

- [1] KNAUS, Christine ; HARTMANN, Thomas ; SPITZNER, Martin: *Grundlagen- und Konzeptentwicklung für die Analyse von praxisgerechten Lüftungskonzepten bei mechanischer oder Fensterlüftung*. Endbericht, 10.08.17.7-16.33
- [2] WARGOCKI, Pawel ; WYON, David: *Effects of HVAC on Students Performance*. In: *ASHRAE Journal* (2006), Nr. 48, S. 23–28
- [3] *VDI 6040 Blatt 1:2011-06, Raumluftechnik - Schulen - Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln, VDI-Schulbaurichtlinien)*
- [4] BEKANNTMACHUNG DES UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): *Anforderungen an Lüftungskonzeptionen in Gebäuden : Teil I: Bildungseinrichtungen*. Empfehlungen des Arbeitskreis Lüftung (AK Lüftung) am Umweltbundesamt. 2017
- [5] BERG, Anders ; HENZLER, Tobias ; STERGIAROPOULOS, Konstantinos: *Untersuchungen zur Optimierung maschineller Luftführungskonzepte in Schulen zwecks Verbesserung der Innenraumluftqualität, Behaglichkeit und Energieeffizienz (OLiS) : Schlussbericht DBU-Forschungsprojekt*. Universität Stuttgart : Institut für Gebäudeenergetik, Thermo-technik und Energiespeicherung (IGTE), 2021
- [6] *DIN EN 16798-3:2017-11, Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 3: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme (Module M5-1, M5-4); Deutsche Fassung EN 16798-3:2017*
- [7] *DIN EN 16798-1:2022-03, Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumlufqualität, Temperatur, Licht und Akustik - Modul M1-6; Deutsche Fassung EN 16798-1:2019*
- [8] LAHRZ, Thomas ; BISCHOF, Wolfgang ; SAGUNSKI, Helmut: *Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft : Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden*. In: *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz* (2008), Nr. 11, S. 1358–1369
- [9] RIETSCHEL, H. ; FITZNER, Klaus: *Raumklimatechnik Band 2: Raumluf- und Raumkühltechnik*. 16., völlig überarb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2008 (VDI-Buch)
- [10] *DIN EN 16798-1/NA:2021-06, Nationaler Anhang - Nationale Ergänzungen und Hinweise zur Anwendung - Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumlufqualität, Temperatur, Licht und Akustik - Modul M1-6*
- [11] *DIN EN ISO 7730:2006-05, Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005*
- [12] *DIN 18041:2016-03, Hörsamkeit in Räumen - Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung*

- [13] VDI 2081 Blatt 1:2022-04: *Raumlufttechnik - Geräuscherzeugung und Lärminderung*
- [14] LEISTNER, Philip ; DROTTLEFF, Horst ; LEISTNER, Michael: *Akustik in Lebensräumen für Erziehung und Bildung*. Stuttgart : Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 2021
- [15] Norm DIN 4109-1:2018-01. 2018-01. *Schallschutz im Hochbau – Teil 1: Mindestanforderungen*
- [16] ZHOU, Xiaoru ; SPÄH, Moritz ; BAY, Karlheinz ; ZHANG, Ting: *Neues Rechenverfahren zur Berechnung der Schallpegel aus der Schalleistung in Räumen mit unterschiedlichen Raum-Geometrien und ungleichmäßigen Absorberverteilungen* : Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 2021
- [17] BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT: *Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm* (idF v. 8. 6. 2017)
- [18] Technische Regel VDI 6022 Blatt 1:2018-01. 2018-01. *Raumlufttechnik, Raumluftqualität – Hygieneanforderungen an raumlufttechnische Anlagen und Geräte (VDI-Lüftungsregeln)*
- [19] KRIEDEL, Martin ; BUCHHOLZ, Udo ; GASTMEIER, Petra ; BISCHOFF, Peter ; ABDELGAWAD, Inas ; HARTMANN, Anne: *Predicted Infection Risk for Aerosol Transmission of SARS-CoV-2*, 2020
- [20] MARTIN KRIEDEL: *Infektionsschutzgerechtes Lüften- Aussagekraft von Luftwechsel und Zuluftvolumenstrom*. 2.12.2022
- [21] KRIEDEL, Martin ; HARTMANN, Anne ; BUCHHOLZ, Udo ; SEIFRIED, Janna ; BAUMGARTE, Sigrid ; GASTMEIER, Petra: *SARS-CoV-2 Aerosol Transmission Indoors: A Closer Look at Viral Load, Infectivity, the Effectiveness of Preventive Measures and a Simple Approach for Practical Recommendations*, 2021
- [22] MÜLLER, Dirk ; REWITZ, Kai ; DERWEIN, Dennis ; BURGHOLZ, Tobias Maria ; SCHWEIKER, Marcel ; BARDEY, Janine ; TAPPLER, Peter: *Abschätzung des Infektionsrisikos durch aerosolgebundene Viren in belüfteten Räumen; 2. überarbeitete und korrigierte Auflage*. 2021
- [23] ARBEITSKREIS KLIMATECHNIK: *Lüftung unter Pandemiebedingungen : Stellungnahme vom Arbeitskreis Klimatechnik, insbesondere zu Schulen und vergleichbaren Räumen*. URL www.arbeitskreis-klimatechnik.de/lueftung/Lueftung%20unter%20Pandemiebedingungen.pdf – Überprüfungsdatum 2022-03-18
- [24] BAGHERI, Gholamhossein ; THIEDE, Birte ; HEJAZI, Bardia ; SCHLENCZEK, Oliver ; BODENSCHATZ, Eberhard: *An upper bound on one-to-one exposure to infectious human respiratory particles*. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 118 (2021), Nr. 49
- [25] Vornorm DIN/TS 67506:2022-02. *Entkeimung von Raumluft mit UV-Strahlung – UV-C-Sekundärluftgeräte*
- [26] ADILI, Mohammad Reza: *Lüftungseffektivität von Wohnungslüftungsanlagen (WLA) und ihr Potential zur Energieeinsparung*. Stuttgart : Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, 2018 (Mitteilung / IGE Institut für Gebäudeenergetik, Universität Stuttgart Nr. 29 (2018))
- [27] SCHRAMEK, Ernst-Rudolf (Hrsg.); RECKNAGEL, Hermann (Hrsg.); SPRENGER, Eberhard (Hrsg.): *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik: einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik*. 74. Aufl. München : Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2009

- [28] *DIN EN 16798-1:2021-04, Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Teil 1: Eingangparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik - Modul M1-6; Deutsche Fassung EN 16798-1:2019*
- [29] BUNDESMINISTERIUM FÜR JUSTIZ; BUNDESAMT FÜR JUSTIZ: *Bundes-Klimaschutzgesetz* (in Kraft getr. am 12. 12. 2021) (2021-12-12), S. 10
- [30] DEUTSCHER BUNDESTAG: Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze (idF v. 1). Gebäudeenergiegesetz (GEG). In: *Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020, Teil 1, Nr. 37, 2020*
- [31] ICHA, Petra: *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2020*. URL <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-der-spezifischen-kohlendioxid-7>

8 Anhang

8.1 Referenzklassenraum

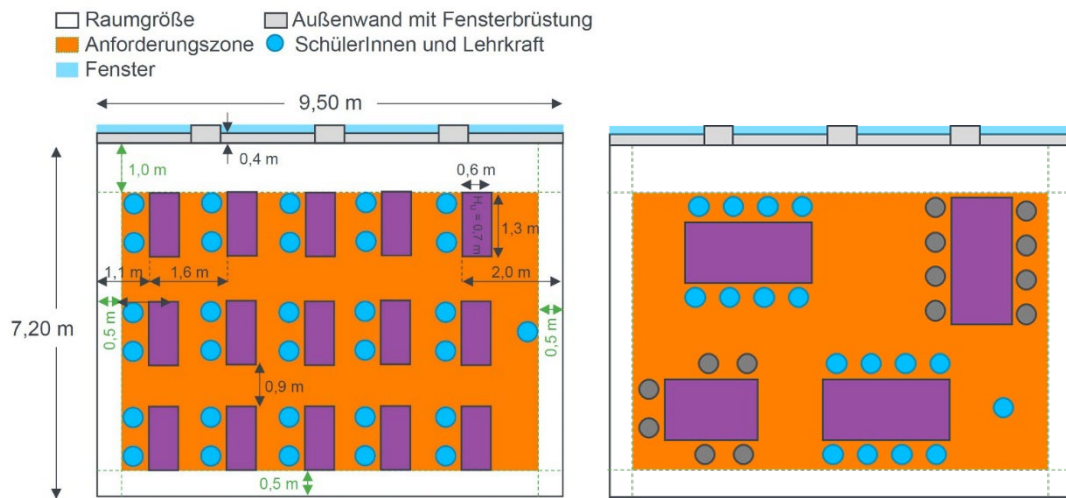


Bild 8-1: Grundriss des Referenzklassenraums (links: Frontal, rechts: Insel)

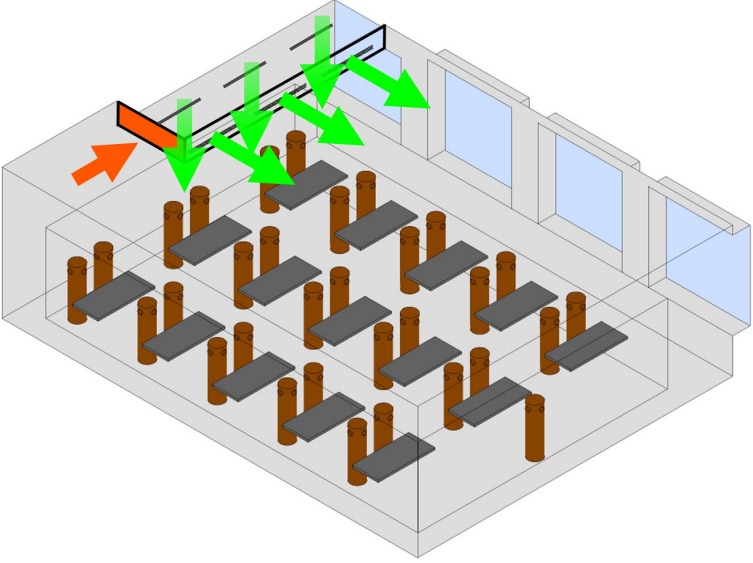
8.2 Luftführungskonzepte zur Belüftung von Klassenräumen

Tabelle 8-1: Variante DZ-1a

<u>Lüftungssystem:</u> Dezentral	<p>Schematische Darstellung</p>
<u>Anordnung Zuluft:</u> Decke (Fensterseite)	
<u>Anordnung Abluft:</u> Decke (Fensterseite)	
<u>Luftführungskonzept:</u> Mischlüftung, entlang der Decke	
<u>Durchlassgeometrie:</u> Lüftungsgitter	
<u>Anzahl der Zuluftdurchlässe:</u> 2 Stück	
<u>Volumenstrom pro Zuluftdurchlass*:</u> 477 m ³ /h	

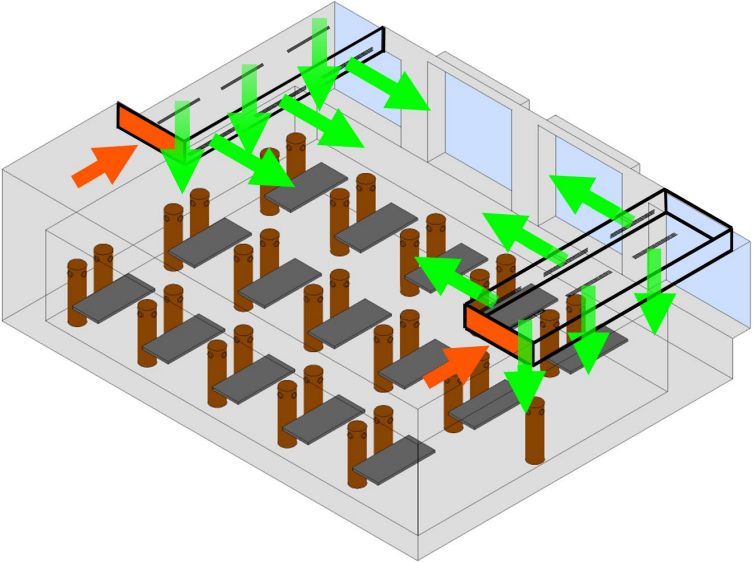
* Bei Vollbelegung ($\dot{V}_{Zu,Gesamt} = 954 \text{ m}^3/\text{h}$)

Tabelle 8-2: Variante DZ-1b

<u>Lüftungssystem</u> : Dezentral	
<u>Anordnung Zuluft</u> : Decke	
<u>Anordnung Abluft</u> : Decke	
<u>Luftführungskonzept</u> : Misch-/Quell-lüftung	
<u>Durchlassgeometrie</u> : Schlitzdurchlass	
<u>Anzahl der Zuluftdurchlässe</u> : 6 Stück	
<u>Volumenstrom pro Zuluftdurchlass*</u> : 159 m ³ /h	<u>Schematische Darstellung</u>

* Bei Vollbelegung ($\dot{V}_{Zu,Gesamt} = 954 \text{ m}^3/\text{h}$)

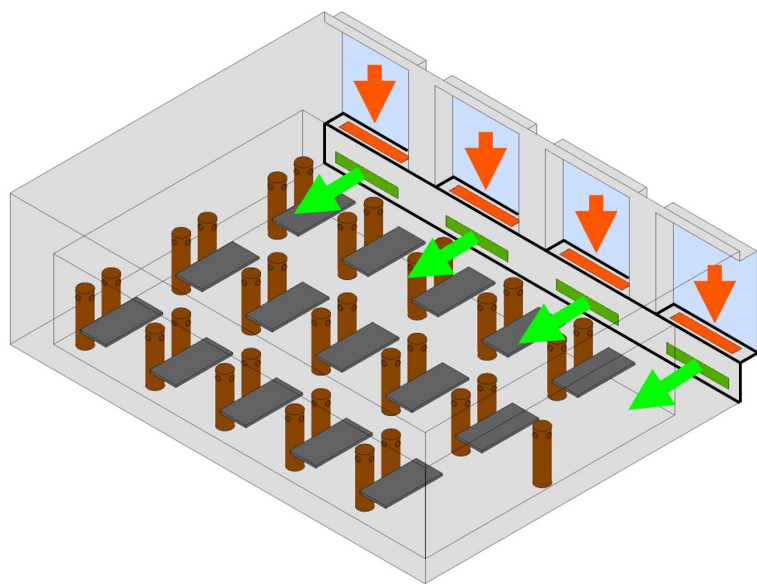
Tabelle 8-3: Variante DZ-1c

<u>Lüftungssystem</u> : Dezentral	
<u>Anordnung Zuluft</u> : Decke	
<u>Anordnung Abluft</u> : Decke	
<u>Luftführungskonzept</u> : Misch-/Quell-lüftung	
<u>Durchlassgeometrie</u> : Schlitzdurchlass	
<u>Anzahl der Zuluftdurchlässe</u> : 12 Stück	
<u>Volumenstrom pro Zuluftdurchlass*</u> : 80 m ³ /h	<u>Schematische Darstellung</u>

* Bei Vollbelegung ($\dot{V}_{Zu,Gesamt} = 954 \text{ m}^3/\text{h}$)

Tabelle 8-4: Variante DZ-2a

<u>Lüftungssystem</u> : Dezentral
<u>Anordnung Zuluft</u> : Brüstung (Seite)
<u>Anordnung Abluft</u> : Brüstung (oben)
<u>Luftführungskonzept</u> : Quelllüftung
<u>Durchlassgeometrie</u> : Lochblech
<u>Anzahl der Zuluftdurchlässe</u> : 4 Stück
<u>Volumenstrom pro Zuluftdurchlass*</u> : 239 m ³ /h

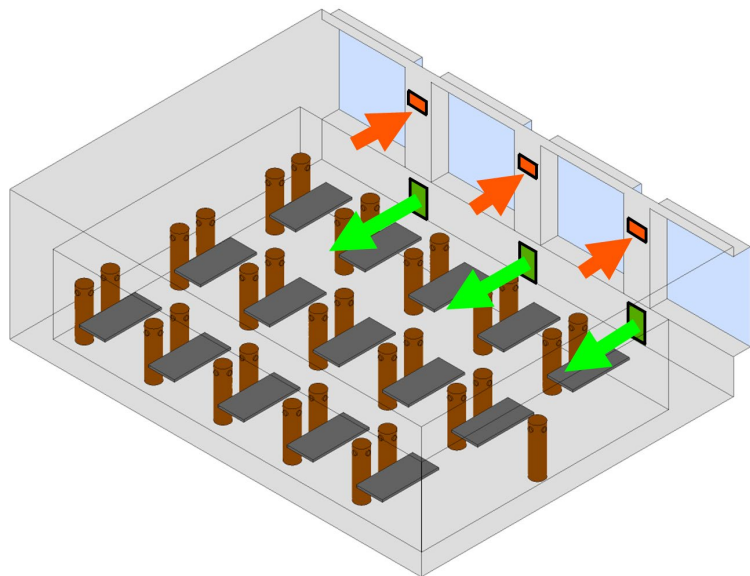


Schematische Darstellung

* Bei Vollbelegung ($\dot{V}_{\text{Zu,Gesamt}} = 954 \text{ m}^3/\text{h}$)

Tabelle 8-5: Variante DZ-2b

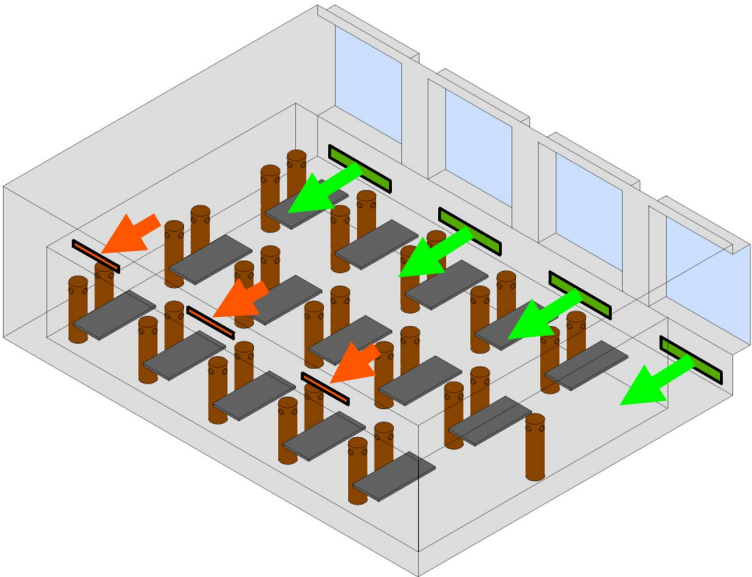
<u>Lüftungssystem</u> : Dezentral
<u>Anordnung Zuluft</u> : Brüstungsgerät (Fensterseite, unten)
<u>Anordnung Abluft</u> : Brüstungsgerät (Fensterseite, oben)
<u>Luftführungskonzept</u> : Quelllüftung
<u>Durchlassgeometrie</u> : Lochblech
<u>Anzahl der Zuluftdurchlässe</u> : 3 Stück
<u>Volumenstrom pro Zuluftdurchlass*</u> : 318 m ³ /h



Schematische Darstellung

* Bei Vollbelegung ($\dot{V}_{\text{Zu,Gesamt}} = 954 \text{ m}^3/\text{h}$)

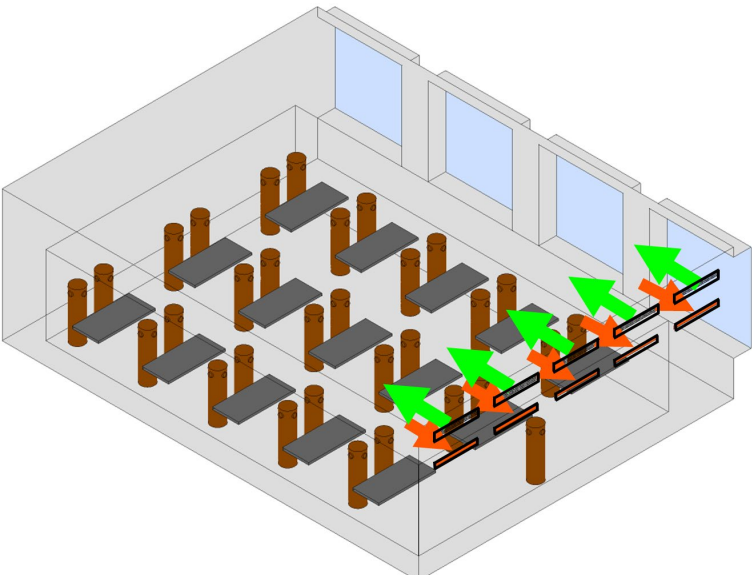
Tabelle 8-6: Variante DZZ

<u>Lüftungssystem</u> : Dezentral und zentral	
<u>Anordnung Zuluft</u> : Brüstung (Seite)	
<u>Anordnung Abluft</u> : Wand (oben)	
<u>Luftführungskonzept</u> : Quelllüftung	
<u>Durchlassgeometrie</u> : Lochblech	
<u>Anzahl der Zuluftdurchlässe</u> : 4 Stück	
<u>Volumenstrom pro Zuluftdurchlass*</u> : 239 m ³ /h	

Schematische Darstellung

* Bei Vollbelegung ($\dot{V}_{\text{Zu,Gesamt}} = 954 \text{ m}^3/\text{h}$)

Tabelle 8-7: Variante Z-1a

<u>Lüftungssystem</u> : Zentral	
<u>Anordnung Zuluft</u> : Wand (oben)	
<u>Anordnung Abluft</u> : Wand (oben)	
<u>Luftführungskonzept</u> : Mischlüftung, horizontale Luftführung entlang der Decke	
<u>Durchlassgeometrie</u> : Schlitzdurchlass	
<u>Anzahl der Zuluftdurchlässe</u> : 5 Stück	
<u>Volumenstrom pro Zuluftdurchlass*</u> : 191 m ³ /h	

Schematische Darstellung

* Bei Vollbelegung ($\dot{V}_{\text{Zu,Gesamt}} = 954 \text{ m}^3/\text{h}$)

Tabelle 8-8: Variante Z-1b

<u>Lüftungssystem</u> : Zentral	
<u>Anordnung Zuluft</u> : Wand (oben)	
<u>Anordnung Abluft</u> : Wand (oben)	
<u>Luftführungskonzept</u> : Misch-/Quelllüftung	
<u>Durchlassgeometrie</u> : Schlitzdurchlass	
<u>Anzahl der Zuluftdurchlässe</u> : 5 Stück	
<u>Volumenstrom pro Zuluftdurchlass*</u> : 191 m ³ /h	<u>Schematische Darstellung</u>

* Bei Vollbelegung ($\dot{V}_{\text{Zu,Gesamt}} = 954 \text{ m}^3/\text{h}$)

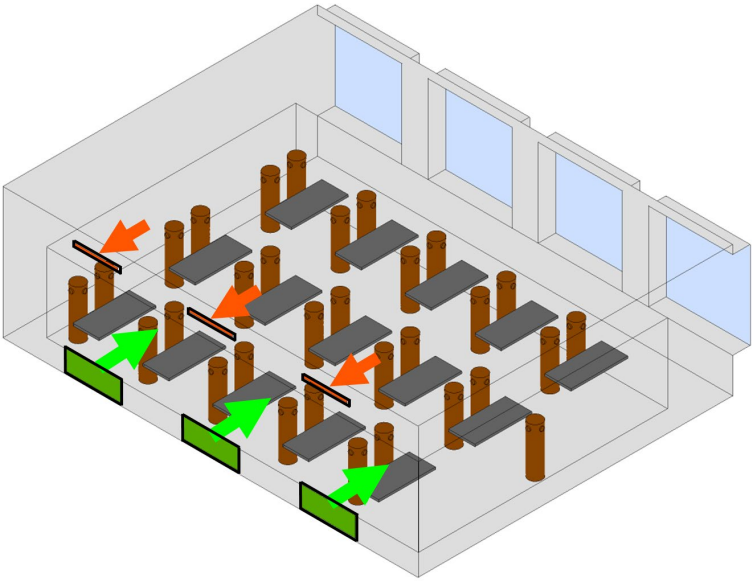
Tabelle 8-9: Variante Z-1c

<u>Lüftungssystem</u> : Zentral	
<u>Anordnung Zuluft</u> : Decke (Fensterseite)	
<u>Anordnung Abluft</u> : Wand (oben)	
<u>Luftführungskonzept</u> : Misch-/Quelllüftung	
<u>Durchlassgeometrie</u> : Runddurchlass	
<u>Anzahl der Zuluftdurchlässe</u> : 12 Stück	
<u>Volumenstrom pro Zuluftdurchlass*</u> : 80 m ³ /h	<u>Schematische Darstellung</u>

Hinweis: Bei dieser Variante strömt die Zuluft vor dem Eintritt in den Raum durch eine thermisch-aktivierte Decke und wird daher im Winterfall auf 21°C (statt 16°C, wie bei den anderen Varianten) erwärmt.

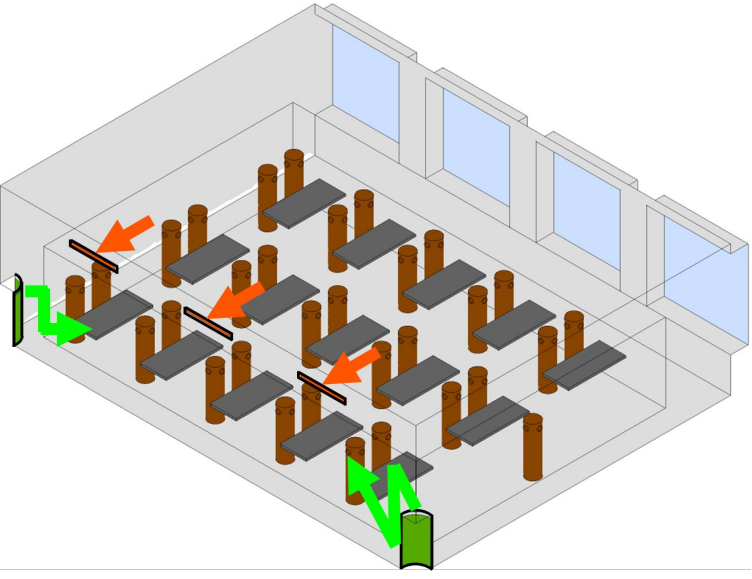
* Bei Vollbelegung ($\dot{V}_{\text{Zu,Gesamt}} = 954 \text{ m}^3/\text{h}$)

Tabelle 8-10: Variante Z-2a

<u>Lüftungssystem</u> : Zentral	
<u>Anordnung Zuluft</u> : Wand (unten)	
<u>Anordnung Abluft</u> : Wand (oben)	
<u>Luftführungskonzept</u> : Quelllüftung	
<u>Durchlassgeometrie</u> : Lochblech	
<u>Anzahl der Zuluftdurchlässe</u> : 3 Stück	
<u>Volumenstrom pro Zuluftdurchlass*</u> : 318 m ³ /h	<u>Schematische Darstellung</u>

* Bei Vollbelegung ($\dot{V}_{Zu,Gesamt} = 954 \text{ m}^3/\text{h}$)

Tabelle 8-11: Variante Z-2b

<u>Lüftungssystem</u> : Zentral	
<u>Anordnung Zuluft</u> : Ecke (unten)	
<u>Anordnung Abluft</u> : Wand (oben)	
<u>Luftführungskonzept</u> : Quelllüftung	
<u>Durchlassgeometrie</u> : Lochblech	
<u>Anzahl der Zuluftdurchlässe</u> : 2 Stück	
<u>Volumenstrom pro Zuluftdurchlass*</u> : 477 m ³ /h	<u>Schematische Darstellung</u>

* Bei Vollbelegung ($\dot{V}_{Zu,Gesamt} = 954 \text{ m}^3/\text{h}$)

Tabelle 8-12: Variante Z-2c

<u>Lüftungssystem</u> : Zentral	
<u>Anordnung Zuluft</u> : Standgerät (unten)	
<u>Anordnung Abluft</u> : Standgerät (oben)	
<u>Luftführungskonzept</u> : Quelllüftung	
<u>Durchlassgeometrie</u> : Lochblech	
<u>Anzahl der Zuluftdurchlässe</u> : 1 Stück	
<u>Volumenstrom pro Zuluftdurchlass*</u> : 954 m ³ /h	Schematische Darstellung

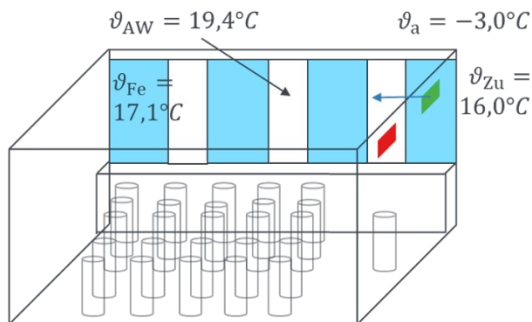
* Bei Vollbelegung ($\dot{V}_{Zu,Gesamt} = 954 \text{ m}^3/\text{h}$)

9 Numerische Strömungssimulationen

9.1 Randbedingungen und Methodik

Winterfall ❄️

- keine solaren Wärmeeinträge
- mit WRG ($\Phi=0,8$)



Sommerfall ☀️

- Randbedingungen aus thermisch-energetischen Simulationen

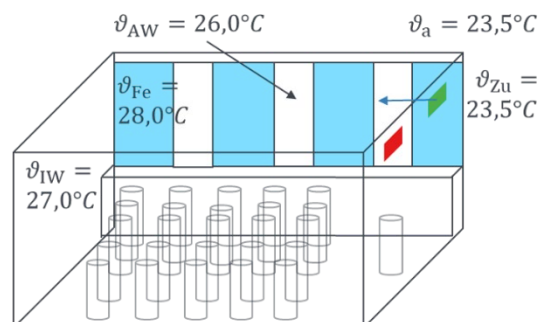


Bild 9-1: Randbedingungen der Strömungssimulation im Winter- und Sommerfall

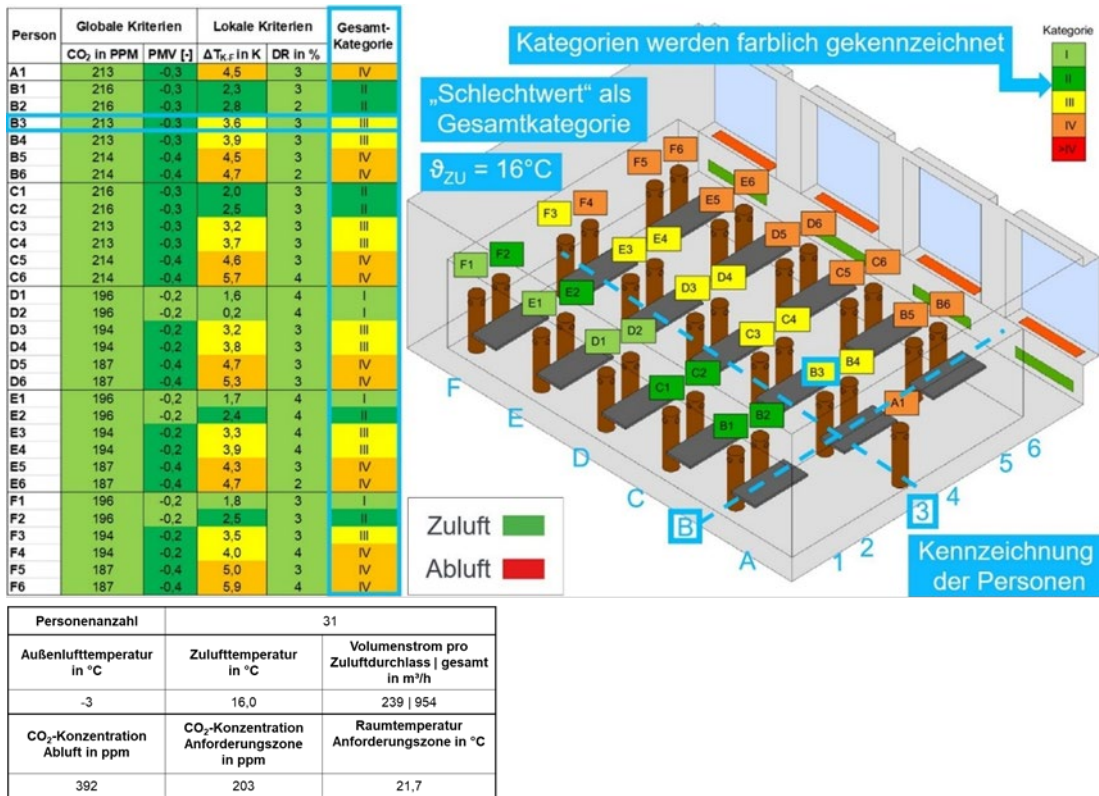


Bild 9-2: Exemplarische Darstellung der Auswertung für die Variante DZ-2a

9.2 Simulationsergebnisse

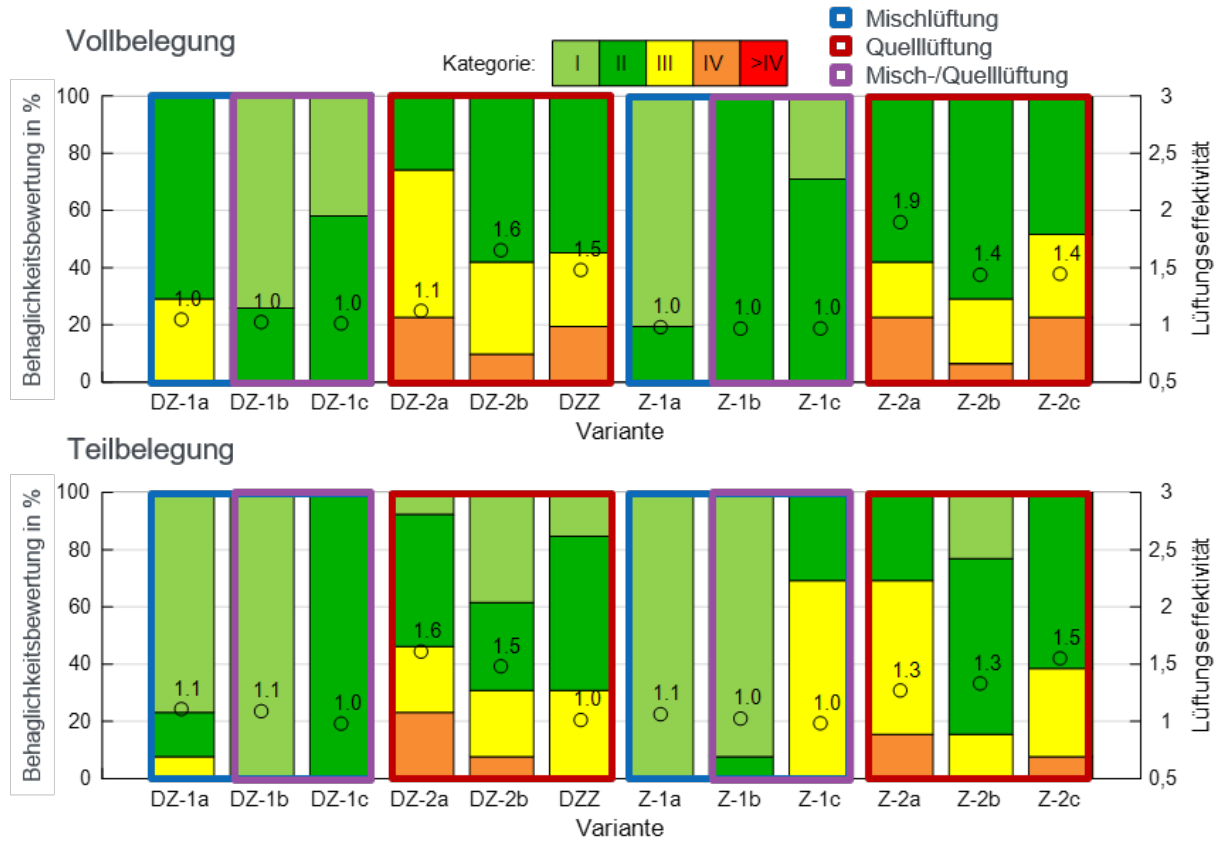


Bild 9-3: Gesamtauswertung der Luftführungskonzepte für die Insellösung im Winterfall

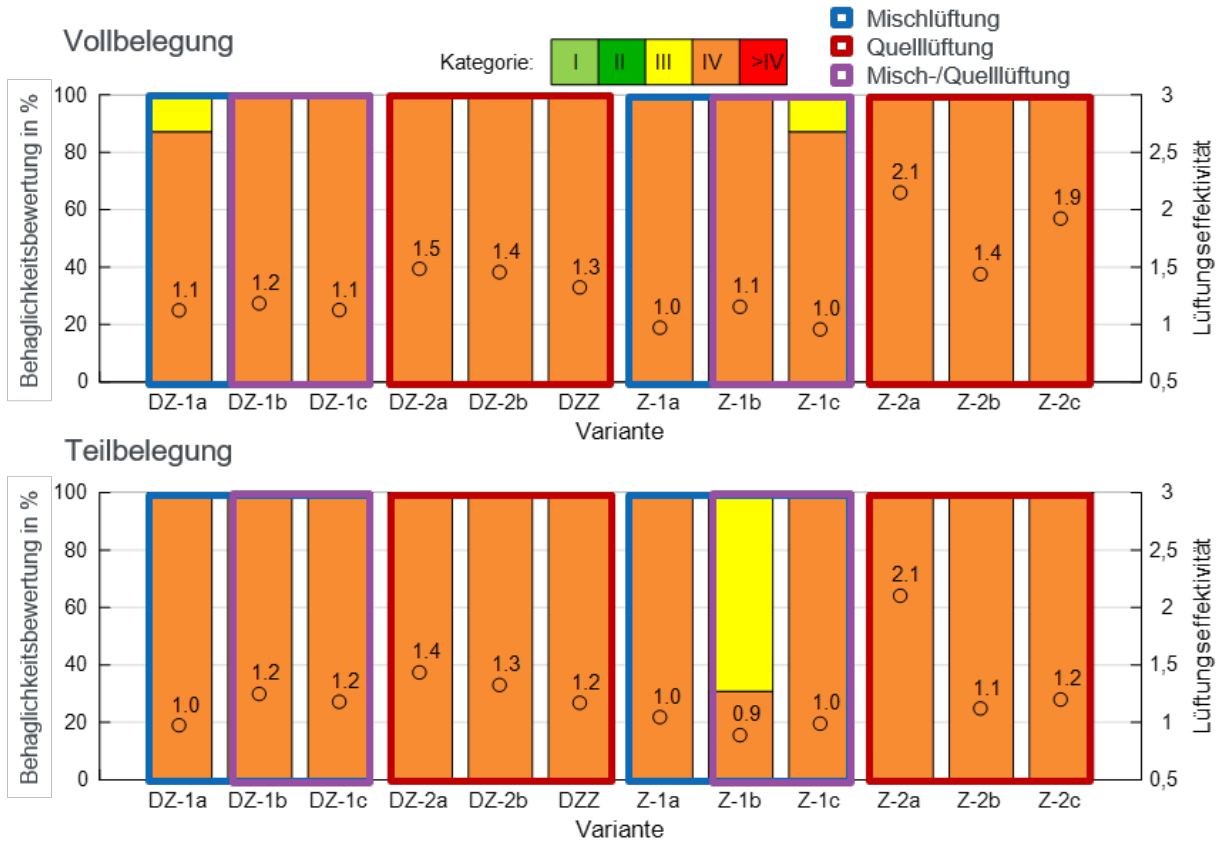


Bild 9-4: Gesamtauswertung der Lüftungskonzepte für Frontalunterricht im Sommerfall

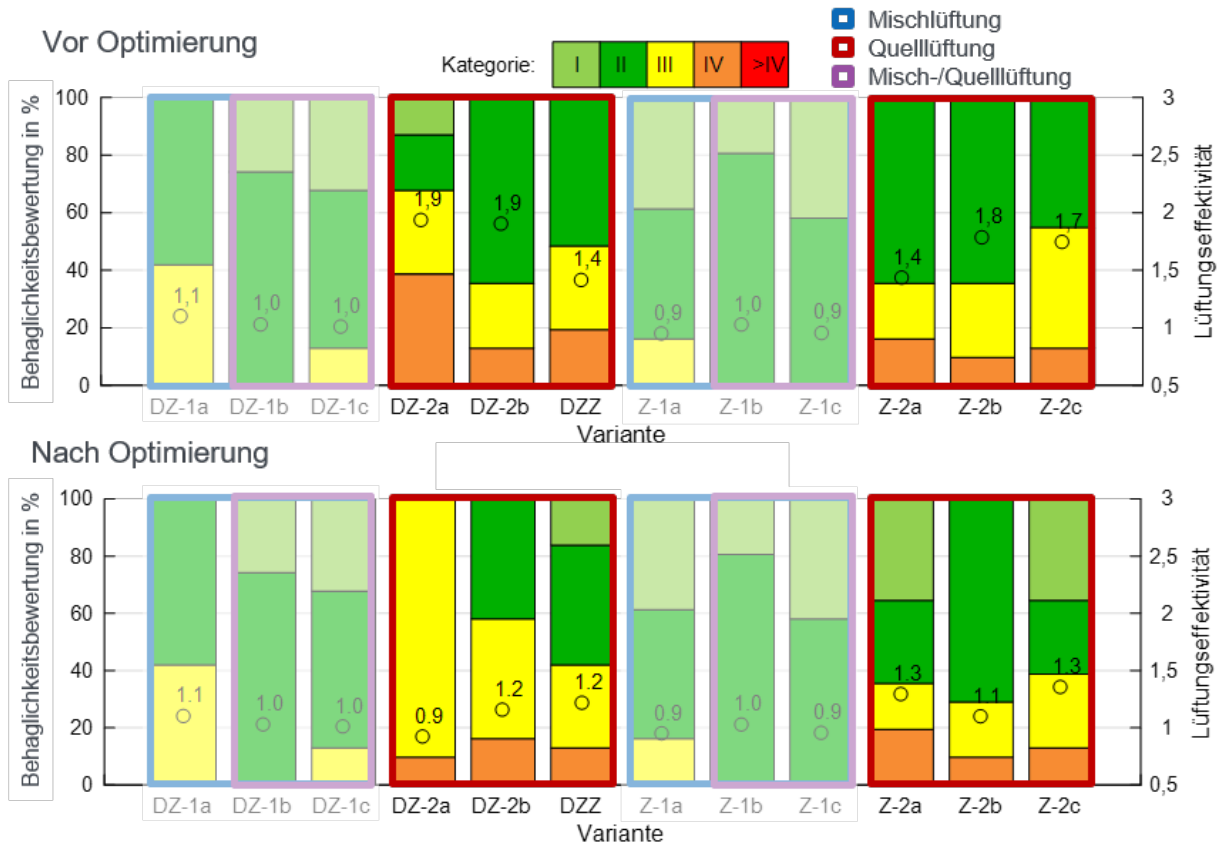


Bild 9-5: Gesamtauswertung der Lüftungskonzepte für Frontalunterricht im Winterfall, Angepasster Luftwechsel nach Lüftungseffektivität