



Universität Stuttgart



IGTE

INSTITUT FÜR GEBÄUDEENERGETIK
THERMOTECHNIK UND ENERGIESPEICHERUNG

Pilotprojekt: Experimentelle Untersuchung zum Infektionsrisiko in Klassenräumen in Stuttgarter Schulen

Abschlussbericht vom 05.07.2021

Lukas Siebler, M.Sc.

Torben Rathje, M.Sc.

Maurizio Calandri, M.Sc

Matthias Eydner, M.Sc.

Dr.-Ing. Ulrich Vogt

Dr.-Ing. Tobias Henzler

Prof. Dr.-Ing. Konstantinos Stergiaropoulos

Kurzfassung

Im Hinblick auf die derzeit anhaltende SARS-CoV-2-Pandemie wurden von Januar bis Juni 2021 jeweils ein bzw. zwei Klassenräume in zehn Schulen (Schwabschule, Gewerbliche Schule für Farbe und Gestaltung, Steigschule Bau 1, Steinbeisschule Hauptbau, Uhlandschule Neubau, Wilhelms-Gymnasium, Wilhelmsschule Wangen, Zeppelin-Gymnasium, Solitude-Gymnasium und Filderschule) der Stadt Stuttgart raumlufttechnisch untersucht.

Ziel dieser Untersuchung ist die Abschätzung eines Infektionsrisikos während des Unterrichts und die Identifikation geeigneter Maßnahmen zur Verringerung dieses Risikos sowohl für LehrerInnen als auch SchülerInnen. Neben einer Fensterlüftung werden auch RLT-Anlagen und mobile Luftreinigungsgeräte (ohne Außenluftanteil) analysiert.

Die konkrete Bewertung des Infektionsrisikos erfolgt durch quantitative Messungen der Stoffausbreitung. Hierfür werden stichprobenartig an einem thermischen Personendummy Stoffe freigesetzt, welcher eine infektiöse Person repräsentieren soll. An den umliegenden Personendummies werden die zeitlichen Verläufe der Konzentrationen dieses Stoffs erfasst.

Die beschriebenen Messungen in Kombination mit der Auswertung relevanter Studien zur luftgetragenen Infektionsausbreitung ermöglichen eine Abschätzung des Infektionsrisikos bei einer bestimmten Personen-Belegungsdichte und bei verschiedenen Maßnahmen (Fensterlüftung, Luftreinigungsgeräte und RLT-Anlagen).

In dieser Messkampagne werden nur Luftreinigungsgeräte mit Hochleistungsschwebstofffilter eingesetzt und getestet, da nicht ausreichend geklärt ist, welche Dosis an UV-C zur Inaktivierung der Viren benötigt wird und der Einsatz von Ozon schädliche Sekundärprodukte hervorrufen kann.

Jede der in diesem Bericht aufgeführten Maßnahmen kann einen Beitrag zur Senkung des Infektionsrisikos leisten. Im Folgenden werden allgemeine Erkenntnisse in den Kategorien **Fensterlüftung**, **Luftreinigungsgeräte**, **RLT-Anlagen** festgehalten:

Fensterlüftung

- Sowohl die Lüftungsstrategie 20/5/20, als auch 10/2,5/10 können das Infektionsrisiko erheblich senken.
- Die Dauerkippplüftung trägt zwar zur Verringerung der Wahrscheinlichkeit einer Infektion bei, jedoch fällt dies geringfügiger aus als bei den Stoßlüftungsvarianten. Sie ist deshalb und aus energetischer Sicht nicht empfehlenswert.
- Das Lüften in den Pausen ist zwingend erforderlich, um die Aerosolkonzentration für den darauffolgenden Unterricht weitestgehend gegen null zu senken. Bei ausreichender Fensterfläche ist dies bei Pausen um die 15-20 Minuten möglich.

Luftreinigungsgeräte

- Je höher der geförderte Volumenstrom des Luftreinigungsgerätes ist, desto geringer der PIRA-Wert über eine bestimmte Expositionszeit (z.B. 90 Minuten). Der Einsatz von Luftreinigungsgeräten in Kombination mit einer Fensterlüftung wirkt sich positiv auf das Infektionsgeschehen aus.
- Luftreinigungsgeräte können das Senken der Aerosolkonzentration bei schlecht belüftbaren Räumen unterstützen bzw. verbessern. Meist sind sie dabei wirksamer als die Stoßlüftung. Sie können das Lüften bzw. eine RLT-Anlage jedoch nicht ersetzen, da kein CO₂- und Feuchteabtransport stattfindet.
- Die vermessenen Luftreinigungsgeräte weisen bei Luftwechseln im Bereich $n_{\text{sekundär}} \approx 5 \dots 6$ 1/h höhere Schallwerte auf als nach VDI 2081 zulässig. Bei Senkung auf ca. $n_{\text{sekundär}} \approx 3$ 1/h kann der Schalldruckpegel bei vereinzelt Geräten zwar in die Nähe des Grenzwertes bringen, allerdings steigt das Infektionsrisiko in Klassenräumen an.
- Die Luftreinigungsgeräte zeigen sowohl bei hohen als auch bei geringeren Volumenströmen Zuglufterscheinungen an den jeweiligen Messpositionen, welche die Akzeptanz der SchülerInnen und LehrerInnen gefährden könnten.
- Ein Luftreinigungsgerät mit einem Volumenstrom von 500-1.250 m³/h kann in den Pausen die Aerosolkonzentration nicht gegen null senken. Es ist zusätzlich zwingend eine Fensterlüftung notwendig.

RLT-Anlagen

- Auch bei RLT-Anlagen gilt, je höher der geförderte Volumenstrom der RLT-Anlage ist, desto geringer der PIRA-Wert über die Expositionszeit (90 Minuten).
- Die Klassenräume mit RLT-Anlagen weisen aufgrund der kontinuierlichen Betriebsweise bei einem Volumenstrom von 915 m³/h ein geringeres Infektionsrisiko gegenüber der Fensterlüftung auf.
- Die RLT-Anlagen weisen ein ähnliches Zugluftisiko auf wie die Luftreinigungsgeräte. Dies ist jedoch wesentlich darauf zurückzuführen, dass der Zuluftquerschnitt dieser Anlagen in diesen Räumlichkeiten sehr klein gewählt ist. Hier könnte eine nachträgliche Querschnittvergrößerung am Luftdurchlass Abhilfe schaffen.
- Eine RLT-Anlage mit einem Volumenstrom von ca. 900 m³/h kann den Ausgangszustand ohne zusätzliche Fensterlüftung in der Pause nahezu wiederherstellen.
- Für die zukünftige Planung von RLT-Anlagen sollten die Luftströme höher dimensioniert werden, um die höchste Raumluftqualität in Klassenräumen zu erreichen.

Eine Reduzierung der Personenanzahl in einem Klassenraum ermöglicht selbst bei gleichbleibender mittlerer Infektionswahrscheinlichkeit einen nahezu proportional ver-

ringerten Erwartungswert an Neuinfektionen. Der Einsatz von FFP2-Masken im Unterricht reduziert deutlich das Infektionsrisiko und ist eine sehr wirksame Maßnahme zum präventiven Schutz.

Abschließend lässt sich festhalten, dass der Luftaustausch über Fenster eine sehr geeignete, einfach umzusetzende und kostengünstige Maßnahme ist, um Aerosolkonzentrationen im Klassenraum zu verringern. Hierbei sollte darauf geachtet werden, dass Klassenräume über eine ausreichende nutzbare Fensterfläche verfügen.

Bei schlecht belüftbaren Räumen bieten sich Luftreinigungsgeräte mit Sekundärluftvolumenströmen ab 1.200 m³/h als unterstützende Maßnahme an.

Nachhaltige Lösungen sind raumluftechnische Anlagen (RLT-Anlagen) mit analogen Außenluftvolumenströmen (um 1.200 m³/h) und mit Wärmerückgewinnung, welche bei richtiger Dimensionierung die Innenraumluftqualität (CO₂, Feuchte, etc.) unabhängig von den äußeren Bedingungen sicherstellen und die Lüftungswärmeverluste deutlich reduzieren können.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Bildverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis.....	XIII
Abkürzungen.....	XVI
Formelzeichen	XVII
1 Einleitung und Ziel	1
2 Grundlagen und Messmethodik.....	3
2.1 Theorie des Infektionsgeschehens	3
2.2 Fensterlüftung.....	4
2.3 Luftreinigungsgeräte	6
2.4 RLT-Anlagen	10
2.5 Stoffausbreitung und -belastung im Raum bei verschiedenen Maßnahmen 12	
2.6 Behaglichkeit in Räumen	15
2.6.1 Temperatur	15
2.6.2 Luftgeschwindigkeit und Zugluftrisiko	15
2.6.3 Feuchte.....	16
2.6.4 CO ₂ -Gehalt	16
2.7 Schallmessungen	17
2.7.1 Frequenzbänder	17
2.7.2 Schalleistungspegel.....	18
2.7.3 Schalldruckpegel	18
2.7.4 Nachhallzeit.....	18
2.8 Spurengas-Messprinzip	18
2.9 Testaerosol-Messprinzip	20
3 Methodisches Vorgehen bei den Messungen und Auswertungen.....	22
3.1 Randbedingungen	22
3.2 Ermittlung der Außenluftwechsel bei Fensterlüftung in den Klassenräumen 28	
3.3 Visualisierung der Raumluftrömung.....	31
3.4 Messen der Stoffausbreitung.....	31
3.5 Messen der Spurengasausbreitung.....	34
3.6 Messen der Testaerosolpartikel ausbreitung	36

3.7	Ermittlung der Infektionsrisiken.....	38
3.8	Behaglichkeitsmessung	39
3.8.1	Temperaturen	39
3.8.2	Zugluftrisiko	39
3.9	Schallmessungen	40
3.10	Umfragen bei SchülerInnen und Lehrkräften	42
4	Ergebnisse	44
4.1	Ergebnisse der Luftmarkierung mit Kaltnebel	44
4.2	Stoffausbreitung und resultierende Infektionswahrscheinlichkeit.....	47
4.2.1	Allgemeine Erkenntnisse zur Stoffausbreitung	47
4.2.2	Pausenlüftung.....	49
4.2.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	54
4.3	Behaglichkeitsmessungen	60
4.3.1	Temperaturverläufe	60
4.3.2	Zugluftrisiko	61
4.4	Ergebnisse der Schallmessungen	66
4.5	Ergebnisse der CO ₂ -Messungen während Präsenzunterrichtsstunden.....	70
4.6	Ergebnisse der Umfrage.....	72
4.7	Leitfaden zur Auswahl geeigneter Maßnahmen	75
5	Zusammenfassung, Diskussion und Handlungsempfehlungen	76
6	Anhang	80
6.1	Solitude-Gymnasium	80
6.1.1	Daten des Klassenraums.....	80
6.1.2	Daten des Lüftungsgeräts.....	81
6.1.3	Berechnung des Außenluftwechsels bei Fensterlüftung	82
6.2	Wilhelms-Gymnasium.....	85
6.2.1	Daten Klassenraum	85
6.2.2	Daten Luftreinigungsgerät	86
6.2.3	Berechnung des Außenluftwechsels bei Fensterlüftung	89
6.3	Schwabschule	92
6.3.1	Daten des Klassenraums.....	92
6.3.2	Daten Luftreinigungsgerät	93
6.3.3	Berechnung des Außenluftwechsels bei Fensterlüftung	94
6.4	Wilhelmsschule Wangen	98

6.4.1	Daten Klassenraum	98
6.4.2	Daten Luftreinigungsgerät	99
6.4.3	Berechnung des Außenluftwechsels bei Fensterlüftung	100
6.5	Steigschule Bau 1	104
6.5.1	Daten Klassenräume	104
6.5.2	Daten Luftreinigungsgerät	105
6.5.3	Berechnung des Außenluftwechsels bei Fensterlüftung	105
6.6	Steinbeisschule Hauptbau	109
6.6.1	Daten des Klassenraums	109
6.6.2	Daten Luftreinigungsgerät	110
6.6.3	Berechnung des Außenluftwechsels bei Fensterlüftung	110
6.7	Uhlandschule Neubau	114
6.7.1	Daten Klassenraum	114
6.7.2	Daten Luftreinigungsgerät	115
6.7.3	Berechnung des Außenluftwechsels bei Fensterlüftung	116
6.8	Zeppelin Gymnasium	120
6.8.1	Daten Klassenräume	120
6.8.2	Daten Luftreinigungsgerät	122
6.8.3	Berechnung des Außenluftwechsels bei Fensterlüftung	123
6.9	Filderschule	129
6.9.1	Daten Klassenräume	129
6.9.2	Daten Lüftungsgerät	130
6.9.3	Berechnung des Außenluftwechsels bei Fensterlüftung	131
6.10	Gewerbliche Schule für Farbe und Gestaltung	134
6.10.1	Daten des Klassenraums	134
6.10.2	Daten Luftreinigungsgerät	135
6.10.3	Berechnung des Außenluftwechsels bei Fensterlüftung	135
6.11	Ergebnisse der Stoffausbreitung in den Klassenräumen	139
6.11.1	Aufbereitete Ergebnisse Solitude-Gymnasium	139
6.11.2	Aufbereitete Ergebnisse Wilhelms-Gymnasium	140
6.11.3	Aufbereitete Ergebnisse Schwabschule	143
6.11.4	Aufbereitete Ergebnisse Wilhelmsschule Wangen	145
6.11.5	Aufbereitete Ergebnisse Steigschule Bau 1	147
6.11.6	Aufbereitete Ergebnisse Steinbeisschule Hauptbau	148
6.11.7	Aufbereitete Ergebnisse Uhlandschule Neubau	150
6.11.8	Aufbereitete Ergebnisse Zeppelin-Gymnasium Referenzraum	151
6.11.9	Aufbereitete Ergebnisse Zeppelin-Gymnasium Klausurraum	152
6.11.10	Aufbereitete Ergebnisse Filderschule	154

6.12	Ergebnisse der Behaglichkeitsmessung in den Klassenräumen	155
6.12.1	Temperaturverläufe individueller Klassenräume.....	155
6.12.2	Infektionswahrscheinlichkeiten bei einzelnen Maßnahmen	160
6.12.3	Zugluftrisiko individueller Klassenräume	161
6.13	Übersicht der Fenstergeometrien	165
6.14	Fragebögen	167
6.15	Ergebnisse der Umfragen.....	171
6.15.1	Luftreinigungsgeräte Leistungsstufe 1	171
6.15.2	Luftreinigungsgeräte Leistungsstufe 2.....	172
6.15.3	RLT-Anlage Leistungsstufe 1	173
6.15.4	RLT-Anlage Leistungsstufe 2	174
7	Literatur	175

Bildverzeichnis

Bild 2-1: Infektionswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit inhalierter Quanta	4
Bild 2-2: Lüftungsarten bei freier Lüftung: Einseitige Lüftung, Querlüftung, Schachtlüftung.....	4
Bild 2-3: Prinzip der einseitigen Lüftung	5
Bild 2-4: Wirkprinzip eines idealisierten Luftreinigungsgerätes.....	6
Bild 2-5: Raumluftechnische Anlagen.....	11
Bild 2-6: RLT-Anlagenschema (Vollklimaanlage) [22]	11
Bild 2-7: Partikel- und CO ₂ -Bilanz (links: Fensterlüftung, Mitte: Luftreinigungsgerät, rechts: RLT-Anlage)	12
Bild 2-8: Idealisierter zeitlicher Verlauf der Partikelraten, -konzentration und Inhalationsraten.....	13
Bild 2-9: Sinkgeschwindigkeit bei verschiedenen Partikelgrößen	19
Bild 3-1: Exemplarische Messstellenanordnung am Beispiel der Uhlandschule Neubau.....	26
Bild 3-2: Definition der Flächen A_i und A_s [12].....	30
Bild 3-3: Steigschule Bau 1 - Partikelanzahlkonzentration der DEHS-Emission und der Außenluft.....	33
Bild 3-4: Wilhelmschule - Partikelanzahlkonzentration der DEHS-Emission und der Außenluft.....	33
Bild 3-5: Schematisches Prinzip der Messstellenumschaltung.....	34
Bild 3-6: Schematische Darstellung der Messstellen für die Behaglichkeitsmessung	40
Bild 3-7: Schematische Darstellung des Messkonzepts (Schallmessungen).....	41
Bild 3-8: Beispiel einer Schallmessung in einem Klassenraum	41
Bild 4-1: Thermischer Auftrieb an einem Dummy	44
Bild 4-2: Raumluftströmung an Heizkörper und Fenster, Steinbeisschule Hauptbau	45
Bild 4-3: Raumluftströmung an der Zuluftöffnung, im Raum und an der Abluftöffnung	45

Bild 4-4: Raumluftrömung infolge des Luftreinigungsgerätes, Zeppelin-Gymnasium	46
Bild 4-5: Raumluftrömung infolge des Luftreinigungsgerätes, Wilhelms-Gymnasium	46
Bild 4-6: Spurengaskonzentrationsverläufe bei Stoßlüftung 20/5/20 und Pausenlüftung	49
Bild 4-7: Spurengaskonzentrationsverläufe bei RLT-Betrieb mit 600 m³/h	51
Bild 4-8: Spurengaskonzentrationsverläufe bei RLT-Betrieb mit 915 m³/h	51
Bild 4-9: Partikelanzahlkonzentrationsverläufe bei Betrieb des Luftreinigungsgerätes mit 1.000 m³/h	52
Bild 4-10: Partikelanzahlkonzentrationsverläufe bei Betrieb des Luftreinigungsgerätes mit 500 m³/h	52
Bild 4-11: Partikelanzahlkonzentrationsverläufe bei Betrieb des Luftreinigungsgerätes mit 1.200 m³/h	53
Bild 4-12: Partikelanzahlkonzentrationsverläufe bei Betrieb des Luftreinigungsgerätes mit 690 m³/h	53
Bild 4-13: Infektionswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit verschiedener Maßnahmen (V0-V6) ohne FFP2-Maske.....	54
Bild 4-14: Infektionswahrscheinlichkeit beim Tragen einer FFP2-Maske in Abhängigkeit verschiedener Maßnahmen (V0 bis V6)	56
Bild 4-15: Infektionswahrscheinlichkeit bei Stoßlüftung (V1, V2) in Abhängigkeit der Fensteröffnungsfläche und der Außentemperatur	57
Bild 4-16: Infektionswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit des Volumenstroms bei Stoßlüftung 20/5/20 und 10/2,5/10, ohne FFP2-Maske	58
Bild 4-17: Infektionswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit des maschinell geförderten Volumenstroms bei Luftreinigungsgeräten und RLT-Anlagen ohne FFP2-Maske	58
Bild 4-18: Temperaturverläufe über eine Doppelstunde, Steigschule Bau 1.....	60
Bild 4-19: Temperaturverläufe über eine Doppelstunde, Filderschule	61
Bild 4-20: Zugluftrisiko (DR) Wilhelmsschule Wangen bei $n_{\text{Sekundär}} = 5,2 \text{ 1/h}$ bzw. $3,0 \text{ 1/h}$	63

Bild 4-21: Zugluftrisiko (DR) Steigschule Bau 1 bei $n_{\text{Sekundär}} = 5,4 \text{ 1/h}$ bzw. $2,7 \text{ 1/h}$..	64
Bild 4-22: Zugluftrisiko (DR) Filderschule bei $n_{\text{Primär}} = 4,9 \text{ 1/h}$ bzw. $3,3 \text{ 1/h}$	65
Bild 4-23: Gemessene maximale A-Schalldruckpegel in den betrachteten Schulen.	67
Bild 4-24: CO ₂ -Konzentrationsverläufe für die Fensterlüftungsstrategie 20/5/20	71
Bild 4-25: CO ₂ -Konzentrationsverläufe für die Fensterlüftungsstrategie 10/2,5/10 ...	71
Bild 4-26: CO ₂ -Konzentrationsverlauf für eine CO ₂ -abhängige Fensterlüftung	72
Bild 6-1: Raumansicht (links) und Fensterfront (rechts)	80
Bild 6-2: RLT-Anlage und Montageort des Solitude-Gymnasiums	81
Bild 6-3: Fenstertypen im Solitude-Gymnasium	82
Bild 6-4: Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Solitude-Gymnasium	83
Bild 6-5: Benötigte Lüftungsdauer verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Solitude-Gymnasium	84
Bild 6-6: Fensterfront (Wilhelms-Gymnasium)	85
Bild 6-7: Raumansicht (Wilhelms-Gymnasium)	86
Bild 6-8: Luftreinigungsgerät (TK 850) und Aufstellort im Klassenraum des Wilhelms- Gymnasiums	86
Bild 6-9: Luftreinigungsgerät (SQ 2500) und Aufstellort im Klassenraum des Wilhelms-Gymnasiums	87
Bild 6-10: Fenstertypen im Wilhelms-Gymnasium	89
Bild 6-11: Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Wilhelms-Gymnasium	90
Bild 6-12: Benötigte Lüftungsdauer verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Wilhelms-Gymnasium	91
Bild 6-13: Raumansicht (links) und Fensterfront (rechts)	93
Bild 6-14: Luftreinigungsgerät und Aufstellort in der Schwabschule	93
Bild 6-15: Fenstertypen in der Schwabschule-Schloss Realschule	95

Bild 6-16: Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Schwabschule-Schloss Realschule	96
Bild 6-17: Benötigte Lüftungsdauer verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Schwabschule-Schloss Realschule	97
Bild 6-18: Raumansicht (links) und Fensterfront (rechts).....	98
Bild 6-19: Luftreinigungsgerät und Aufstellort im Klassenraum der Wilhelmsschule Wangen	99
Bild 6-20: Fenstertypen in der Wilhelmsschule Wangen.....	100
Bild 6-21: Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Wilhelmsschule Wangen.....	102
Bild 6-22: Benötigte Lüftungsdauer verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Wilhelmsschule Wangen	103
Bild 6-23: Raumansicht des Klassenraums	105
Bild 6-24: Drehfensterfront (links) und Kippfensterfront (rechts).....	105
Bild 6-25: Luftreinigungsgerät und Aufstellort im Klassenraum der Steigschule Bau 1	105
Bild 6-26: Fenstertypen in der Steigschule Bau 1, große Fensterfront	106
Bild 6-27: Fenstertypen in der Steigschule Bau 1, kleine Fensterfront	106
Bild 6-28: Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Steigschule Bau 1	107
Bild 6-29: Benötigte Lüftungsdauer verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Steigschule Bau 1	108
Bild 6-30: Raumansicht des Klassenraums in der Steinbeisschule	109
Bild 6-31: Position der Fensterfront im Klassenraum (links) und Fensterfront (rechts)	110
Bild 6-32: Luftreinigungsgerät und Aufstellort in der Steinbeisschule Hauptbau 1..	110
Bild 6-33: Fenstertypen in der Steinbeisschule Hauptbau	111
Bild 6-34: Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Steinbeisschule Hauptbau	112

Bild 6-35: Benötigte Lüftungsdauer verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Steinbeisschule Hauptbau	113
Bild 6-36: Raumansicht (Uhlandschule Neubau)	114
Bild 6-37: Fensterfront des Klassenraums (Uhlandschule Neubau)	115
Bild 6-38: Luftreinigungsgerät und Aufstellort im Klassenraum der Uhlandschule Neubau	115
Bild 6-39: Fenstertypen in der Uhlandschule Neubau	117
Bild 6-40: Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Uhlandschule Neubau	118
Bild 6-41: Benötigte Lüftungsdauer verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Uhlandschule Neubau	119
Bild 6-42: Raumansicht des Klausurraums (Zeppelin Gymnasium)	120
Bild 6-43: Raumansicht des Referenzraum (links) und der zugehörigen Fensterfront (rechts) des Zeppelin Gymnasiums	121
Bild 6-44: Luftreinigungsgerät (links) und Aufstellort (rechts) im Klausurraum des Zeppelin Gymnasiums	122
Bild 6-45: Luftreinigungsgerät (links) und Aufstellort (rechts) im Referenzraum des Zeppelin Gymnasiums	122
Bild 6-46: Fenstertypen im Klausurraum, Zeppelin Gymnasium	123
Bild 6-47: Fenstertypen im Referenzraum, Zeppelin Gymnasium	123
Bild 6-48: Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Klausurraum, Zeppelin Gymnasium	125
Bild 6-49: Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Referenzraum, Zeppelin Gymnasium	126
Bild 6-50: Benötigte Lüftungsdauer verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Klausurraum, Zeppelin Gymnasium	127
Bild 6-51: Benötigte Lüftungsdauer verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Referenzraum, Zeppelin Gymnasium	128
Bild 6-52: Raumansicht des Klassenraums (Filderschule)	129
Bild 6-53: Fensterfront des Klassenraums (Filderschule)	130

Bild 6-54: Dezentrales Lüftungsgerät und Montageort im Klassenraum (Filderschule)	130
Bild 6-55: Fenstertypen in der Filderschule	131
Bild 6-56: Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Filderschule	132
Bild 6-57: Benötigte Lüftungsdauer verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Filderschule	133
Bild 6-58: Raumansicht (links) und Fensterfront (rechts) in der Gewerblichen Schule für Farbe und Gestaltung	135
Bild 6-59: Luftreinigungsgerät und Aufstellort in der Gewerblichen Schule für Farbe und Gestaltung	135
Bild 6-60: Fenstertypen in der gewerblichen Schule für Farbe und Gestaltung	136
Bild 6-61 Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, gewerbliche Schule für Farbe und Gestaltung	137
Bild 6-62: Benötigte Lüftungsdauer verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, gewerbliche Schule für Farbe und Gestaltung	137
Bild 6-63: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung ohne FFP2-Maske, Solitude-Gymnasium	139
Bild 6-64: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung mit FFP2-Maske, Solitude-Gymnasium	140
Bild 6-65: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung ohne FFP2-Maske, Wilhelms-Gymnasium	141
Bild 6-66: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung mit FFP2-Maske, Wilhelms-Gymnasium	141
Bild 6-67: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 50% Belegung ohne FFP2-Maske, Wilhelms-Gymnasium	142
Bild 6-68: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 50% Belegung mit FFP2-Maske, Wilhelms-Gymnasium	142
Bild 6-69: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung ohne FFP2-Maske, Schwabschule	143

Bild 6-70: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung mit FFP2-Maske, Schwabschule	144
Bild 6-71: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung ohne FFP2-Maske, Wilhelmsschule Wangen	145
Bild 6-72: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung mit FFP2-Maske, Wilhelmsschule Wangen	146
Bild 6-73: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung ohne FFP2-Maske, Steigschule Bau 1	147
Bild 6-74: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung mit FFP2-Maske, Steigschule Bau 1	148
Bild 6-75: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung ohne FFP2-Maske, Steinbeisschule Hauptbau.....	149
Bild 6-76: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung mit FFP2-Maske, Steinbeisschule Hauptbau.....	149
Bild 6-77: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung ohne FFP2-Maske, Uhlandschule	150
Bild 6-78: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung mit FFP2-Maske, Uhlandschule Neubau	151
Bild 6-79: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung ohne FFP2-Maske, Zeppelin-Gymnasium (Referenzraum) ..	152
Bild 6-80: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung mit FFP2-Maske, Zeppelin-Gymnasium (Referenzraum)	152
Bild 6-81: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung ohne FFP2-Maske, Zeppelin-Gymnasium (Klausurraum).....	153
Bild 6-82: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung mit FFP2-Maske, Zeppelin-Gymnasium (Klausurraum).....	153
Bild 6-83: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung ohne FFP2-Maske, Filderschule	154
Bild 6-84: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung mit FFP2-Maske, Filderschule	155
Bild 6-85: Temperaturverläufe über eine Doppelstunde, Solitude-Gymnasium	155

Bild 6-86: Temperaturverläufe über eine Doppelstunde, Steigschule Bau 1.....	157
Bild 6-87: Temperaturverläufe über eine Doppelstunde, Uhlandschule Neubau	157
Bild 6-88: Temperaturverläufe über eine Doppelstunde, Wilhelmsschule Wangen	158
Bild 6-89: Temperaturverläufe über eine Doppelstunde, Filderschule	159
Bild 6-90: Infektionswahrscheinlichkeit bei Stoßlüftung 10/2,5/10 (V2) in Abhängigkeit der Fensteröffnungsfläche und der Außentemperatur	160
Bild 6-91: Infektionswahrscheinlichkeit bei Stoßlüftung 20/5/20 (V1) in Abhängigkeit der Fensteröffnungsfläche und der Außentemperatur	160
Bild 6-92: Zugluftrisiko (DR) Wilhelmsschule Wangen bei $n_{\text{Sekundär}} = 5,2$ 1/h bzw. 3,0 1/h	161
Bild 6-93: Zugluftrisiko (DR) Steigschule Bau 1 bei $n_{\text{Sekundär}} = 5,4$ 1/h bzw. 2,7 1/h	162
Bild 6-94: Zugluftrisiko (DR) Uhlandschule Neubau bei $n_{\text{Sekundär}} = 5,2$ 1/h und Solitude-Gymnasium bei $n_{\text{Primär}} = 3,1$ 1/h	163
Bild 6-95: Zugluftrisiko (DR) Filderschule bei $n_{\text{Primär}} = 4,9$ 1/h bzw. 3,3 1/h	164
Bild 6-96: Umfrageergebnisse: Luftreinigungsgeräte, Leistungsstufe 1.....	171
Bild 6-97: Umfrageergebnisse: Luftreinigungsgeräte, Leistungsstufe 2.....	172
Bild 6-98: Umfrageergebnisse: RLT-Anlage, Leistungsstufe 1	173
Bild 6-99: Umfrageergebnisse: RLT-Anlage, Leistungsstufe 2	174

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Hauptkomponenten eines Luftreinigungsgerät [15]	8
Tabelle 2-2: Klassifikation von EPA, HEPA und ULPA-Filtern nach DIN EN 1822-1 [10]	9
Tabelle 2-3: Definition des Abscheidegrades, ePMx [19]	10
Tabelle 2-4: Filtergruppen nach DIN EN ISO 16890-1 [19].....	10
Tabelle 3-1: Geometrieübersicht Schulen.....	23
Tabelle 3-2: Allgemeine Variantenübersicht	24
Tabelle 3-3: Übersicht der Varianten in den jeweiligen Schulen.....	25
Tabelle 4-1: Erwartungswerte an Neuinfektionen in Abhängigkeit der Schüleranzahl und des mittleren PIRA-Wertes	47
Tabelle 4-2: Messergebnisse der Schallmessungen für die untersuchten Schule mit Luftreinigungsgerät und RLT-Anlage.....	68
Tabelle 4-3: Messergebnisse der Nachhallzeit in allen Schulen.....	69
Tabelle 4-4: Anzahl an SchülerInnen während den CO ₂ -Messungen.....	70
Tabelle 6-1: Zusammenstellung der Raumdaten (Solitude-Gymnasium)	80
Tabelle 6-2: Geräteeigenschaften (Herstellerangaben) der RLT-Anlage des Solitude- Gymnasiums [40]	81
Tabelle 6-3: Lüftungsvarianten und Fenstertypen, Solitude-Gymnasium	82
Tabelle 6-4: Zusammenstellung der Raumdaten (Wilhelms-Gymnasium).....	85
Tabelle 6-5: Geräteeigenschaften (Herstellerangaben) des Luftreinigungsgerätes (OurAir TK850) im Wilhelms-Gymnasium [42].....	87
Tabelle 6-6: Geräteeigenschaften (Herstellerangaben) des Luftreinigungsgerätes (OurAir SQ2500) im Wilhelms-Gymnasium [43]	88
Tabelle 6-7: Lüftungsvarianten und Fenstertypen, Wilhelms-Gymnasium.....	89
Tabelle 6-8: Zusammenstellung der Raumdaten (Schwabschule)	92
Tabelle 6-9: Geräteeigenschaften (Herstellerangaben) des Luftreinigungsgerätes in der Schwabschule [44]	94

Tabelle 6-10: Lüftungsvarianten und Fenstertypen, Schwabschule-Schloss Realschule.....	95
Tabelle 6-11: Zusammenstellung der Raumdaten (Wilhelmsschule Wangen)	98
Tabelle 6-12: Geräteeigenschaften des Luftreinigungsgerätes in der Wilhelmsschule Wangen [45]	99
Tabelle 6-13: Lüftungsvarianten und Fenstertypen, Wilhelmsschule Wangen	101
Tabelle 6-14: Zusammenstellung der Raumdaten (Steigschule Bau 1).....	104
Tabelle 6-15: Lüftungsvarianten und Fenstertypen, Steigschule Bau 1	106
Tabelle 6-16: Zusammenstellung der Raumdaten (Steinbeisschule Hauptbau).....	109
Tabelle 6-17: Lüftungsvarianten und Fenstertypen, Steinbeisschule Hauptbau	111
Tabelle 6-18: Zusammenstellung der Raumdaten (Uhlandschule Neubau)	114
Tabelle 6-19: Geräteeigenschaften (Herstellerangaben) des Luftreinigungsgerätes in der Uhlandschule Neubau [44]	116
Tabelle 6-20: Lüftungsvarianten und Fenstertypen, Uhlandschule Neubau	117
Tabelle 6-21: Zusammenstellung der Raumdaten (Zeppelin Gymnasium - Klausurraum).....	120
Tabelle 6-22: Zusammenstellung der Raumdaten (Zeppelin Gymnasium - Referenzraum)	121
Tabelle 6-23: Lüftungsvarianten und Fenstertypen, Klausurraum, Zeppelin Gymnasium	124
Tabelle 6-24: Lüftungsvarianten und Fenstertypen, Referenzraum, Zeppelin Gymnasium	124
Tabelle 6-25: Zusammenstellung der Raumdaten (Filderschule)	129
Tabelle 6-26: Geräteeigenschaften des dezentralen Lüftungsgeräts [46]	131
Tabelle 6-27: Lüftungsvarianten und Fenstertypen, Filderschule	132
Tabelle 6-28: Zusammenstellung der Raumdaten (Gewerbliche Schule für Farbe und Gestaltung).....	134
Tabelle 6-29: Lüftungsvarianten und Fenstertypen, gewerbliche Schule für Farbe und Gestaltung	136

Tabelle 6-30: Relevante Daten des Klassenraums, Solitude-Gymnasium	139
Tabelle 6-31: Relevante Daten des Klassenraums, Wilhelms-Gymnasium	140
Tabelle 6-32: Relevante Daten des Klassenraums, Schwabschule.....	143
Tabelle 6-33: Relevante Daten des Klassenraums, Wilhelmsschule Wangen.....	145
Tabelle 6-34: Relevante Daten des Klassenraums, Steigschule Bau 1	147
Tabelle 6-35: Relevante Daten des Klassenraums, Steinbeisschule Hauptbau	148
Tabelle 6-36: Relevante Daten des Klassenraums, Uhlandschule Neubau.....	150
Tabelle 6-37: Relevante Daten des Klassenraums (Referenzraum), Zeppelin- Gymnasium	151
Tabelle 6-38: Relevante Daten des Klassenraums (Klausur.-Raum), Zeppelin- Gymnasium	152
Tabelle 6-39: Relevante Daten des Klassenraums in der Filderschule	154
Tabelle 6-40: Übersicht der Kippfenster, aller Klassenräume.....	165
Tabelle 6-41: Übersicht der Drehfenster, aller Klassenräume	166

Abkürzungen

Symbol	Beschreibung
AG	Aerosolgenerator
ASR	Arbeitsstättenrichtlinie
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DEHS	Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat
EPA	Efficient Particulate Air
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer
HEPA	High efficiency particulate air/arrestance
ppm	Parts per Million (Teilchen pro Millionen)
PIRA	Predicted infection risk via aerosols
RLT	Raumluftechnisch(e)
SF ₆	Schwefelhexafluorid
ULPA	Ultra Low Penetration Air

Formelzeichen

Symbol	Beschreibung	Einheit
$A_{\text{eq } 90^\circ}$	Äquivalente Öffnungsfläche bei Öffnungswinkel 90°	m^2
A_{eq}	Äquivalente Öffnungsfläche	m^2
A_s	Summe der seitlichen Öffnungsflächen	m^2
A_{Fe}	Öffnungsfläche des Fensters	m^2
A_R	Grundfläche	m^2
b_{Fe}	Öffnungsbreite des Fensters	m
$C_{1 \text{ Maas}}$	Windkonstante nach Maas	-
$C_{2 \text{ Maas}}$	Auftriebskonstante nach Maas	$\text{m}/(\text{s}^2\text{K})$
$C_{3 \text{ Maas}}$	Windturbulenzkonstante nach Maas	m^2/s^2
C_d	Widerstandsbeiwert	-
c_{DEHS}	Anzahlkonzentration an DEHS	$1/\text{m}^3$
$c_{\text{Im,DEHS}}(t)$	Gemessene (zeitabhängige) DEHS Konzentration	$1/\text{m}^3$
$c_{\text{Im,SF}_6}(t)$	Gemessene (zeitabhängige) SF_6 -Konzentration	ppm
C_p	Druckbeiwert	-
DR_t	Zugluftrisiko (Draft Risk)	%
f_o	Obere Frequenzgrenze	Hz
f_u	Untere Frequenzgrenze	Hz
f_m	Bandmittelfrequenz	Hz
g	Fallbeschleunigung; 9,81	m/s^2
h_{Fe}	Öffnungshöhe des Fensters	m
i	Anzahl	-
q_B	Lüftungsrate für Gebäudeemissionen	$\text{l}/(\text{sm}^2)$

q_p	Lüftungsrate für die Nutzung je Person	l/(s Person)
q_{tot}	Gesamtlüftungsrate für den Atmungsbereich	l/s
L_w	Schallleistung	W
L_p	Schalldruckpegel	dB
L_m	Zeitlicher Mittelwert aus mehreren gemessenen Pegeln einer Schallquelle	dB
$\dot{n}_{Em,SF_6}$	Emittierter Stoffstrom SF ₆	mol/h
$\dot{n}_{Em,DEHS}$	Emittierter Partikelstrom DEHS	1/h
$\dot{n}_{Em,P}$	Emittierter Partikelstrom	1/h
$\dot{n}_{Em,Quanta}$	Quanta-Emissionsrate	1/h
$\dot{n}_{Im,DEHS}(t)$	Immittierter Partikelstrom DEHS	1/h
$\dot{n}_{Im,P}(t)$	Immittierter Partikelstrom	1/h
$\dot{n}_{Im,Quanta}(t)$	(zeitabhängige) Quanta-Immissionsrate	1/h
n	Luftwechsel	1/h
M_{SF_6}	Molmasse von SF ₆	kg/mol
M_{Luft}	Molmasse von Luft	kg/mol
Δp	Druckdifferenz	Pa
<i>PIRA</i>	Predicted infection risk via aerosols	-
P	Akustische Leistung	W
P_o	Bezugsleistung	W
p	Effektivwert des Schalldrucks	N/m ²
p_o	Bezugsschalldruck	N/m ²
Q	Inhalierte kumulierte Quanta	-
$T_{Soll,A3}$	Nachhallzeit	s

T	Temperatur	K
TU	Lokaler Turbulenzgrad	%
ΔT	Differenz der Innen- und Außenlufttemperatur	K
t	Zeit	s
$\dot{V}_{SF_6}$	Volumenstrom an SF_6	m ³ /h
$\dot{V}_{Einatmen}$	Einatemvolumenstrom	m ³ /h
$\dot{V}_{Luft_AG}$	Volumenstrom des Aerosolgenerators	m ³ /h
V_R	Raumvolumen	m ³
$v_{wind\ 10}$	Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe	m/s
v_{wind}	Windgeschwindigkeit	m/s
v	Lokale Raumlufthgeschwindigkeit	m/s
ρ_{SF_6}	Dichte von SF_6	kg/m ³
ρ_a, ρ_i	Dichte (a: Außenluft, i: Innenluft)	kg/m ³
ρ_{Luft}	Dichte der Luft	kg/m ³
ρ	Dichte	kg/m ³
Θ	Durchflussverhältnis	-
θ_a	Lokale Raumlufthtemperatur	°C
θ_p	Mittlere Körperoberflächentemperatur der Person	°C
γ	Fensteröffnungswinkel	°

1 Einleitung und Ziel

Im Hinblick auf die anhaltende SARS-CoV-2-Pandemie wurden von Januar bis Juni 2021 jeweils ein oder zwei Klassenräume in zehn Schulen der Stadt Stuttgart hinsichtlich des Infektionsrisikos vermessen. Hintergrund ist die als überwiegend luftgetragen eingestufte Infektionsausbreitung über Aerosolpartikel, an denen ein Virus anhaftet.

Mit dem Ziel, die Infektionswahrscheinlichkeit in Räumen mit Fensterlüftung, mit und ohne Luftreinigungsgerät oder mit RLT-Anlage in Klassenräumen zu bestimmen, werden in den unterschiedlichen Klassenräumen Spurengas- und Testpartikelkonzentrationsmessungen durchgeführt.

Die betrachteten Schulen bzw. Klassenräume wurden so gewählt, dass eine große Bandbreite unterschiedlicher geometrischer und Lüftungstechnischer Randbedingungen sowie Belegungsdichte der Stuttgarter Schulen abgebildet wird. Es soll untersucht werden, inwieweit Luftreinigungsgeräte und RLT-Anlagen im Unterrichtsalltag eine wirksame Ergänzung zum regelmäßigen Stoßlüften darstellen, sowie ob Luftreinigungsgeräte den Anforderungen des Dauereinsatzes im Schulunterricht gerecht werden. Die Erkenntnisse sollen in einem Leitfaden zusammengeführt werden, anhand dessen die Belüftungssituation von Klassenräumen bewertet werden kann.

Im Vorfeld der Messungen erfolgte eine Begehung und Dokumentation der Klassenräume. Dabei werden die Eigenschaften der Luftreinigungsgeräte und RLT-Anlagen dokumentiert sowie die Raumgeometrie und freien Lüftungsquerschnitte der Fenster aufgenommen. Anschließend wird der Messumfang und die Messpositionen festgelegt. Die Vorort-Begehung sowie die Messkampagne werden mit Fotos dokumentiert. In einem Workshop mit dem Auftraggeber werden die Anforderungen der Betreiber und Nutzer hinsichtlich Umfang, Wartung und Betrieb aufgearbeitet und geklärt.

Untersucht werden Luftreinigungsgeräte mit Filterelementen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Leistungsstufen, Einstellmöglichkeiten und Zuluftcharakteristiken. Luftreinigungsgeräte, die eine mögliche Desinfektion bzw. Inaktivierung der SARS-CoV-2 durch UV-Strahlung, Ozonbehandlung oder andere Technologien sicherstellen sollen, werden in dieser Studie nicht weiter berücksichtigt. Die Wirksamkeit dieser Technologien gegenüber SARS-CoV-2 ist wissenschaftlich nicht abschließend nachgewiesen. Folglich sind in dieser praxisnahen Studie nur Luftreinigungsgeräte eingesetzt worden, die auf der Filtration von Aerosolpartikel basieren.

Aufgrund des Lockdowns wurde die Untersuchung überwiegend ohne Beisein von SchülerInnen und LehrerInnen durchgeführt. Als Personenersatz wurden Personendummies eingesetzt.

Über eine Luftmarkierung durch Kaltnebel wird die Raumluchtströmung in den Klassenräumen visualisiert. Durch die Visualisierung von Raumluchtströmungen sollen Schwachstellen, wie beispielsweise Bereiche mit sehr geringer Luftbewegung, identifiziert werden, welche anschließend messtechnisch, z.B. anhand einer Spurengasmessung, quantitativ untersucht werden. Da zum Zeitpunkt der Messungen aufgrund

der Schutzmaßnahmen nur vereinzelt SchülerInnen und LehrerInnen anwesend sind, diese aber aufgrund ihrer Wärmeabgabe einen signifikanten Einfluss auf die Raumluftströmung haben, werden hierfür entsprechende Personen-Dummies eingesetzt, welche über eine innenliegende Glühbirne 75 W Wärme über eine Oberfläche von 1,8 m² abgeben, was nach DIN EN 16798 einer sitzenden leichten Tätigkeit einer Person und somit der üblichen Betätigung in einem Klassenraum entspricht. [2]

Die konkrete Bewertung des Infektionsrisikos erfolgt durch quantitative Messungen der Stoffausbreitung. Hierfür werden zwei Messmethoden eingesetzt: Zur Beurteilung der Wirksamkeit der Fensterlüftung und der maschinellen Be- und Entlüftung über RLT-Anlagen wird ein kontrollierter gleichmäßiger Stoffstrom des Spurengases Schwefelhexafluorid (SF₆) an einem Dummy freigesetzt, welcher eine infektiöse Person repräsentieren soll. Das Spurengas sowie die luftgetragenen Aerosole sind Bestandteile der Luft und folgen somit der vorherrschenden Raumluftströmung. An den umliegenden Dummies werden die zeitlichen Verläufe der Konzentrationen dieses Stoffs erfasst. Durch eine Fensterlüftung wird z.B. dieses Spurengas in gleichem Maß abtransportiert wie potentiell virenbeladene Partikel in der Luft, wodurch diese Maßnahme zur Reduzierung des Infektionsrisikos bewertet werden kann.

Zur Beurteilung der Wirksamkeit von Luftreinigungsgeräten werden bei der zweiten Messmethode Testaerosolpartikel freigesetzt und an verschiedenen Orten im Klassenraum deren Konzentration gemessen. Dies geschieht mit mehreren mobilen Partikelspektrometern. Diese können die zeitlichen Verläufe der Anzahlkonzentrationen an den umliegenden Dummies messen. Treten Aerosolpartikel in das Luftreinigungsgerät ein, so werden sie gemäß dessen Abscheidegrads in seinem Filter abgeschieden bzw. gespeichert. Anhand von Konzentrationsmessungen werden anschließend Aussagen über die Wirksamkeit der Luftreinigungsgeräte zur Reduzierung des Infektionsrisikos und ggf. über deren geeignete Positionierung getroffen.

Die beschriebenen Messungen in Kombination mit der Auswertung relevanter Studien zum Infektionsgeschehen bzw. zur Infektionsausbreitung über luftgetragene Viren ermöglichen eine Abschätzung des Infektionsrisikos bei einer bestimmten Personen-Belugungsdichte und bei verschiedenen Lüftungsmaßnahmen in Innenräumen.

Abschließend wird ein Leitfaden in Form eines Berechnungstools zur Bewertung der Belüftungssituation in Klassenräumen erstellt. Dabei wird die erforderliche Intensität verschiedener Maßnahmen herausgearbeitet, d.h. es werden die erforderliche Fensterfläche bzw. Volumenströme zur Einhaltung eines definierten Erwartungswertes an Neuinfektionen ermittelt.

2 Grundlagen und Messmethodik

In diesem Kapitel werden zum einen bisherige Erkenntnisse der Infektionsausbreitung und zum anderen die in diesem Vorhaben eingesetzten Messprinzipien erläutert.

2.1 Theorie des Infektionsgeschehens

Im Folgenden wird der Ansatz zur Abschätzung der Infektionswahrscheinlichkeit vorgestellt. Dieser Ansatz ist empirisch auf Basis verschiedener Fallstudien von Infektionsausbrüchen abgeleitet. Nach *Wells et al.* [3] und *Riley et al.* [4] führt eine bestimmte Menge eingeatmeter Viren mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zu einer Infektion. Ein Quantum beschreibt hierbei die Menge an Viren, die mit einer Wahrscheinlichkeit von 63% zu einer Infektion führen. Hierbei spielt es eine große Rolle, wie viele Quanta von einer Person ausgestoßen werden. Hierfür wurden verschiedene Ausbrüche weltweit untersucht und daraus empirisch die Quanta-Emissionsrate mit der Basisreproduktionszahl ermittelt. Derzeit existiert eine Vielzahl an Studien zur Identifikation dieser Werte. Bei einer angenommenen Basisreproduktionszahl (R-Wert) von 3,35 resultiert nach *Kriegel et al.* eine Quanta-Emissionsrate von 139 1/h [5]. Dieser Wert entspricht einer derzeitigen Abschätzung der Infektiosität der Basis-Variante des SARS-CoV-2-Viruses. Obwohl bereits der Großteil der Viren, die zu einer Neuinfektion führen, Mutanten dieser Variante angehören, wird in dieser Studie das Infektionsrisiko noch mit dieser Quanta-Emissionsrate ermittelt, da zum Zeitpunkt der Auswertung noch keine wissenschaftlich belastbaren Werte für die Mutationen vorliegen.

Ausschlaggebend für das tatsächliche Infektionsrisiko ist die Menge an Quanta, die eine Person über einen bestimmten Zeitraum inhaliert. Das Infektionsrisiko wird PIRA (Predicted infection risk via aerosols) bezeichnet. PIRA steigt exponentiell in Abhängigkeit der inhalierten Quanta an und wird mit folgender Formel berechnet:

$$PIRA = 1 - e^{-Q} \quad (2-1)$$

PIRA Predicted infection risk via aerosols (Infektionswahrscheinlichkeit)

Q Inhalierte kumulierte Quanta

Das Bild 2-1 zeigt den Verlauf von PIRA über die inhalierte kumulierte Quanta.

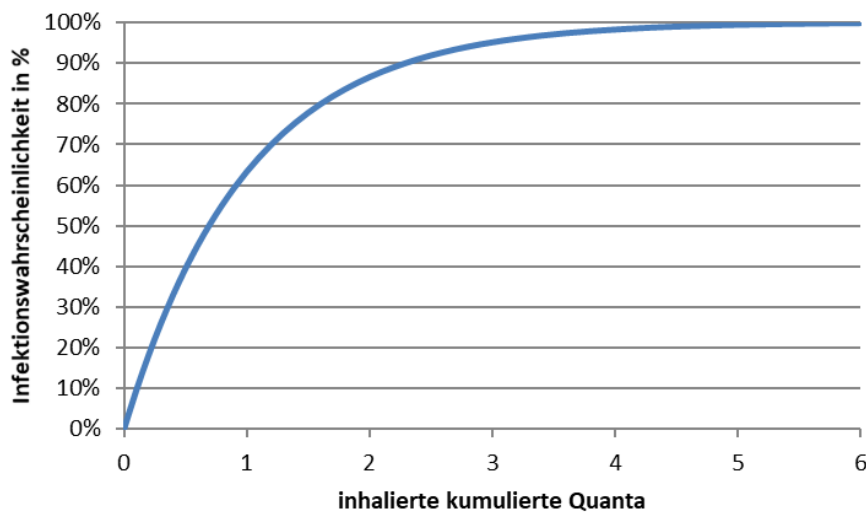


Bild 2-1: Infektionswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit inhalierter Quanta

2.2 Fensterlüftung

Unter dem Begriff Lüftung wird nach VDI 4700 Blatt 1:2015-10 [6] eine „Maßnahme zur konvektiven Lastabfuhr“ verstanden. Dabei werden die Zustandsgrößen der Raumluft wie Temperatur, Druck, Geschwindigkeit sowie Wasser- und Schadstoffgehalt beeinflusst. Es findet eine Unterscheidung nach freier und maschineller Lüftung statt. Während bei einer maschinellen Lüftung eine Strömungsmaschine (Ventilator) eingesetzt wird, erfolgt bei freier Lüftung der Luftaustausch zwischen Innen und Außen durch thermische und windinduzierte Druckdifferenzen [6]. Die freie Lüftung kann in die Schacht- und Fensterlüftung unterteilt werden, siehe Bild 2-2.

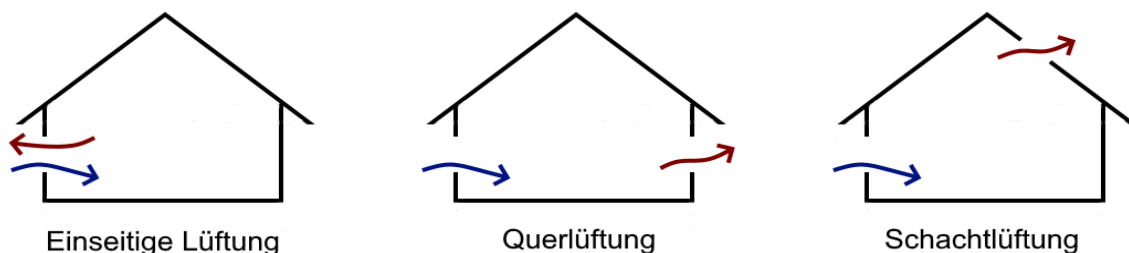


Bild 2-2: Lüftungsarten bei freier Lüftung: Einseitige Lüftung, Querlüftung, Schachtlüftung

Bei der Schachtlüftung strömt die Zuluft in den Raum ein und verlässt diesen durch einen Schacht. Dieser erhöht aufgrund des Kamineffekts den Luftwechsel im Raum. Bei der Fensterlüftung strömen die Zu- und Abluft durch ein oder mehrere Fenster. Im Falle der Querlüftung sind diese an zwei gegenüberliegenden Seiten eines Raumes angeordnet. Bei einseitiger Fensterlüftung befinden sich die Fenster an nur einer Außenwandseite. Unter der Voraussetzung, dass nicht mehrere Fenster übereinander angeordnet sind, strömen die Zu- und Abluft durch jeweils einen Teil desselben Fens-

ters [7, 8]. Da Fenster in Klassenräumen überwiegend an einer Außenwandseite angeordnet sind, fokussieren sich weitergehende Betrachtungen auf die einseitige Fensterlüftung. Falls ein Klassenraum bspw. über einen Flur quergelüftet werden kann, sollte darauf geachtet werden, dass die im Flur vorhandenen Fenster geöffnet sind. Zu den Antriebsfaktoren der einseitigen Fensterlüftung zählen Temperatur- und Windeinflüsse. Diese führen zu thermisch- und windinduzierten Druckdifferenzen. In Bild 2-3 sind exemplarisch die Druckverläufe der Innen- und Außenluft abgebildet. Dabei wird angenommen, dass die Raumlufttemperatur höher als die Außenlufttemperatur ist (Winterfall).

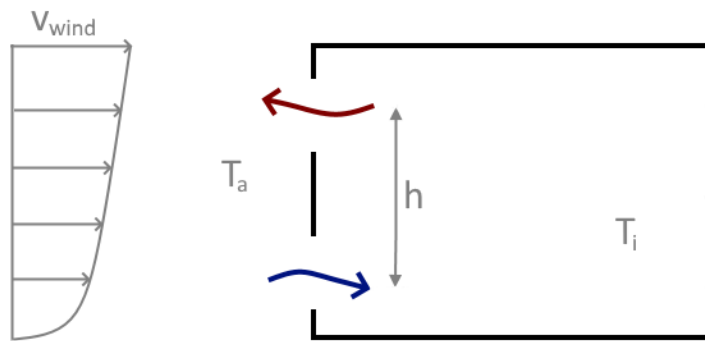


Bild 2-3: Prinzip der einseitigen Lüftung

An der Gebäudehülle werden durch den Einfluss von Wind und Temperatur lokale Druckdifferenzen hervorgerufen. In den Bereichen, in denen der Innenluftdruck geringer als der Außenluftdruck ist, entsteht ein Unterdruck. Ein Überdruck entsteht in Bereichen höheren Innenluftdrucks. Die Ebene, in dem der Innenluftdruck dem Außenluftdruck gleicht, wird als neutrale Druckebene bezeichnet. Eine Strömung, welche grundsätzlich vom Bereich höheren Drucks zum Bereich niedrigeren Drucks gerichtet ist, stellt sich ein. Somit führen die thermisch- und windinduzierten Druckdifferenzen zu einem Luftwechsel [9].

Um die Emissionen an Schad- und Geruchsstoffen sowie CO_2 aus Baumaterialien und menschlichen Aktivitäten aus der Raumluft abzuführen bzw. deren Konzentration zu begrenzen, müssen Innenräume mit Außenluft versorgt werden. Hierbei wird in der Raumlufttechnik der Außenluftbedarf pro Person als Größe in der Planung oder der Begriff des Luftwechsels verwendet. Der Luftwechsel ist das Verhältnis des Außenluftstroms zum Raumvolumen. Bei der freien Lüftung entstehen dabei während der Heizperiode Lüftungswärmeverluste aufgrund fehlender Wärmerückgewinnung (im Vergleich zu RLT-Anlagen), die vom Heizsystem ausgeglichen werden müssen. [10, 11]

Die freie Lüftung unterliegt einer Vielzahl an Einflussfaktoren. Darunter sind die Wetterbedingungen durch meteorologische Verhältnisse (Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft, Windgeschwindigkeit, -richtung und -fluktuation) und die Topografie der näheren Umgebung (beispielsweise durch Bebauung) zu nennen. Zudem machen sich Effekte durch Diffusion und lokale Turbulenzen bemerkbar, sodass auch

ohne wirksame Temperaturdifferenz ein Luftwechsel stattfinden kann. Zusätzlich wirken sich die Baukonstruktion und Bauausführung (Fugen, Luftdurchlässigkeit) sowie Anzahl, Art, Anordnung, Größe und Laibung der Fenster aus. Genauso wichtig ist es, dass Lüftungsverhalten der NutzerInnen (Nutzungsart, zeitliches Profil, Gewohnheiten) zu berücksichtigen. Die freie Lüftung ist somit abhängig von vielen Randbedingungen. Bei bestimmten Randbedingungen kann der erforderliche Außenluftwechsel ggf. nicht sichergestellt werden. Nur durch den Einsatz einer maschinellen Lüftung kann jederzeit ein definierter Volumenstrom bzw. Luftwechsel sichergestellt werden [12, 13].

2.3 Luftreinigungsgeräte

Luftreinigungsgeräte werden im Raum aufgestellt und saugen Raumluft an und geben sie wieder an den Raum ab. Somit führen sie im Gegensatz zu raumlufttechnischen Anlagen dem Raum keine Außenluft zu. Sie wirken im so genannten Umluftmodus und werden auch oftmals als Sekundärlüftungsgeräte bezeichnet. Das bedeutet, es wird im Raum Luft über Gerätedurchlässe angesaugt, deren enthaltene Aerosolpartikel über mehrere Filterstufen abgeschieden und anschließend wieder über weitere Gerätedurchlässe in den Raum zurückgeführt (siehe Bild 2-4). Dabei kann der Zuluftstrom bspw. senkrecht, waagrecht oder diagonal in den Raum strömen. Die Raumwirkung der Geräte auf Aerosole und Partikel ist im Wesentlichen vom Volumenstrom und dem Abscheidegrad der Filterstufen abhängig, wobei der Volumenstrom und dessen Luftgeschwindigkeit insgesamt einen größeren Einfluss hat. Dieser bestimmt maßgebend, welches Luftvolumen in einer Zeiteinheit über die Filterstufen geführt werden kann.

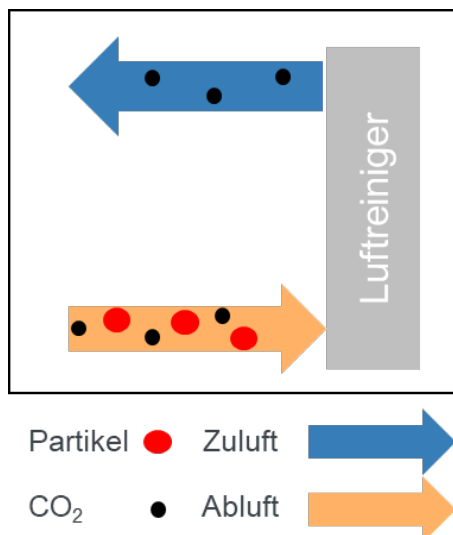


Bild 2-4: Wirkprinzip eines idealisierten Luftreinigungsgerätes

Sekundärluftwechsel

Der Sekundärluftwechsel $n_{\text{Sekundär}}$ ist eine im Rahmen der Studie entwickelte Kennzahl zur Bewertung eines Luftreinigungsgerätes für einen bestimmten Raum. Er gibt an, wie groß der Volumenstrom der gefilterten Luft bezogen auf das Gesamtvolumen des Raumes ist.

Volumenstrom

Der Volumenstrom kann bei einem Luftreinigungsgerät z.B. über ein Potentiometer eingestellt werden. In der Regel weisen die Luftreinigungsgeräte 1...5 Leistungsstufen auf. Der Volumenstrom wird in Abhängigkeit der jeweiligen Raumsituation nach den Empfehlungen des Herstellers eingestellt.

Es wird zugrunde gelegt, dass für den Betrieb der Luftreinigungsgeräte die gleichen Volumenströme wie bei maschinell belüfteten Räumen zur Partikelabfuhr erforderlich sind. Aus diesem Grund werden die Sekundärluftwechsel, die für das Luftreinigungsgerät vorgegeben werden, analog zur maschinellen Lüftung (Primärluftwechsel) ermittelt.

Die Raumluftqualität wird üblicherweise anhand des Indikators CO₂-Konzentration definiert. Zur Einhaltung der angestrebten CO₂-Konzentration der Raumluft von 800 ppm wird aus diesem Grund gemäß DIN EN 15251 [14] bzw. DIN EN 16798-1 [2] die Kategorie 1 „hohes Maß an Anforderungen“ gewählt. Hierzu wird ein personenbezogener Volumenstrom von 10 l/ (s Person) bzw. 36 m³/ (h Person) (Lüftung zum Verdünnen/Entfernen der Verunreinigung durch Nutzer (biologische Ausdünstungen)) und unter Berücksichtigung eines schadstoffarmen Gebäudes ein flächenbezogener Volumenstrom von 1l/(sm²) bzw. 3,6 m³/(hm²) (Lüftung zum Verdünnen/Entfernen der Verunreinigung durch das Gebäude und dessen Anlagen) angesetzt.

Die Berechnung des erforderlichen gesamten Außenluftvolumenstroms erfolgt nach Gleichung (2-2):

$$q_{\text{tot}} = i \cdot q_p + A_R \cdot q_B \quad (2-2)$$

q_{tot} Gesamtauslegungsvolumenstrom in l/s

i Auslegungswert für die Anzahl von Personen im Raum

q_p Auslegungsvolumenstrom für die Nutzung je Person in l/(s Person)

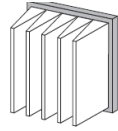
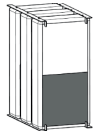
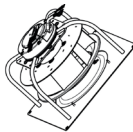
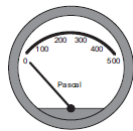
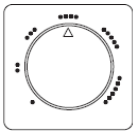
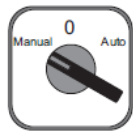
A_R Grundfläche in m²

q_B Auslegungsvolumenstrom für Gebäudeemissionen in l/(sm²)

Wesentliche Hauptkomponenten eines Luftreinigungsgerätes

In Tabelle 2-1 werden die Hauptkomponenten eines Luftreinigungsgerätes dargestellt.

Tabelle 2-1: Hauptkomponenten eines Luftreinigungsgerät [15]

Ein oder mehrere Filterstufen/-elemente	
Schalldämpfer	
Ventilator-Motoreinheit	
Differenzdruckmanometer	
Potentiometer	
Betriebsschalter	

Technologien

Zur Reduzierung von virusbeladenen Partikeln werden unterschiedliche Technologien in Luftreinigungsgeräten eingesetzt:

- Hochleistungsschwebstofffilter (HEPA-Filter)
- Elektrostatische Filter
- Ozon, Plasma oder Ionisation
- UV-C Bestrahlung
- Kombination mehrerer Verfahren [16].

In dieser Messkampagne werden nur Luftreinigungsgeräte mit Hochleistungsschwebstofffilter eingesetzt und getestet. Es ist nicht ausreichend geklärt, welche Dosis an UV-C zur Inaktivierung der Viren benötigt wird [16–18]. Der Einsatz von Ozon kann schädliche Sekundärprodukte hervorrufen. Daher sollte bei der Beschaffung von Luftreinigungsgeräten zu der eingesetzten Technologie ein Wirksamkeitsnachweis seitens der Hersteller vorliegen. Zu Beginn der Studie sind derartige Wirksamkeitsnachweise

gegenüber SARS-CoV-2 nicht verfügbar gewesen. Somit werden im Folgenden nur Hochleistungsschwebstofffilter beschrieben. [19]

Hochleistungsschwebstofffilter

Diese Filterelemente finden im Bereich der Raum- und Prozesslufttechnik, z.B. in der Reinraumtechnik, der pharmazeutischen Industrie oder in medizinischen Bereichen (Krankenhäuser, Reinräume) Anwendung. EN ISO 14644 [20] gibt hierzu verschiedene Reinraumklassen an.

DIN EN 1822-1:2019 [21] gibt eine Klassifizierung von Filtern in Gruppen und Klassen vor. Die Filterelemente werden entsprechend ihrer Filtrationsleistung in Abscheide- oder Durchlassgrade eingeteilt. Je höher die Filterklassen desto höher der Abscheidegrad.

Filterelemente werden entsprechend in Hochleistungs-Partikelfilter (EPA=Efficient Particulate Air), Schwebstofffilter (HEPA=High-Efficiency Particulate Air/Arrestance) und Hochleistungs-Schwebstofffilter (ULPA=Ultra-Low Penetration Air) unterteilt (siehe Tabelle 2-2).

Tabelle 2-2: Klassifikation von EPA, HEPA und ULPA-Filtern nach DIN EN 1822-1 [10]

Gruppe	Filterklassen	Integralwert		Lokalwert	
		Abscheidegrad	Durchlassgrad	Abscheidegrad	Durchlassgrad
		%			
E= EPA	E10	≥85	≤ 15	-	-
	E11	≥ 95	≤ 5	-	-
	E12	≥ 99,5	≤ 0,5	-	-
H= HEPA	H13	≥ 99,95	≤ 0,05	≥ 99,75	≤ 0,25
	H14	≥ 99,995	≤ 0,005	≥ 99,975	≤ 0,025
U= ULPA	U15	≥ 99,9995	≤ 0,0005	≥ 99,997 5	≤ 0,002 5
	U16	≥ 99,999 95	≤ 0,00005	≥ 99,999 75	≤ 0,000 25
	U17	≥ 99,999 995	≤ 0,000005	≥ 99,999 9	≤ 0,000 1

Die in Tabelle 2-3 dargestellten Partikelgrößenbereiche werden in der Normenreihe DIN EN ISO 16890 für die aufgeführten Abscheidegradwerte verwendet.

Tabelle 2-3: Definition des Abscheidegrades, ePMx [19]

Abscheidegrad	Größenbereich in μm
ePM10	$0,3 \leq x \leq 10$
ePM2,5	$0,3 \leq x \leq 2,5$
ePM1	$0,3 \leq x \leq 1$

Die Filterklassen werden als Klassenangabewert in Verbindung mit der Bezeichnung der Gruppe angegeben. Bei der Angabe der ePM-Klassen werden die Klassenangabewerte auf das nächste Vielfache von 5% abgerundet. Werte von über 95% werden als „> 95%“ aufgeführt. Beispiele für die Angabe von Klassen sind ISO Coarse 60%, ISO ePM10 60%, ISO ePM2,5 80%, ISO ePM1 85% oder ISO ePM1 >95%.

Tabelle 2-4: Filtergruppen nach DIN EN ISO 16890-1 [19]

Gruppenbezeichnung	Anforderung			Klassenangabewert
	ePM1, min	ePM2,5, min	ePM10	
ISO Coarse	-	-	$\leq 50\%$	gravimetrischer Anfangsabscheidegrad
ISO ePM10	-	-	$\geq 50\%$	ePM10
ISO ePM10	-	$\geq 50\%$	-	ePM2,5
ISO ePM1	$\geq 50\%$	-	-	ePM1

2.4 RLT-Anlagen

Raumluftechnische Anlagen (RLT) können je nach Anwendungsfall einen unterschiedlichen Aufbau aufweisen. Grundsätzlich kann zwischen Anlagen mit und ohne Lüftungsfunktion unterschieden werden. Daneben werden RLT-Anlagen nach der Anzahl möglicher Luftbehandlungsfunktionen wie Heizen, Kühlen, Befeuchten oder Entfeuchten unterteilt. Bei Anlagen mit Lüftungsfunktion wird Außenluft im Außenbereich des Gebäudes angesaugt. Hierbei wird zwischen Lüftungs-, Teilklima- und Vollklimaanlagen differenziert. Bei Geräten ohne Lüftungsfunktion hingegen, erfolgt die Aufbereitung der Luft ohne Außenluft. Diese werden demnach in Umluft-, Umluft-Teil, und Umluft-Vollklimaanlagen eingeteilt (Bild 2-5).

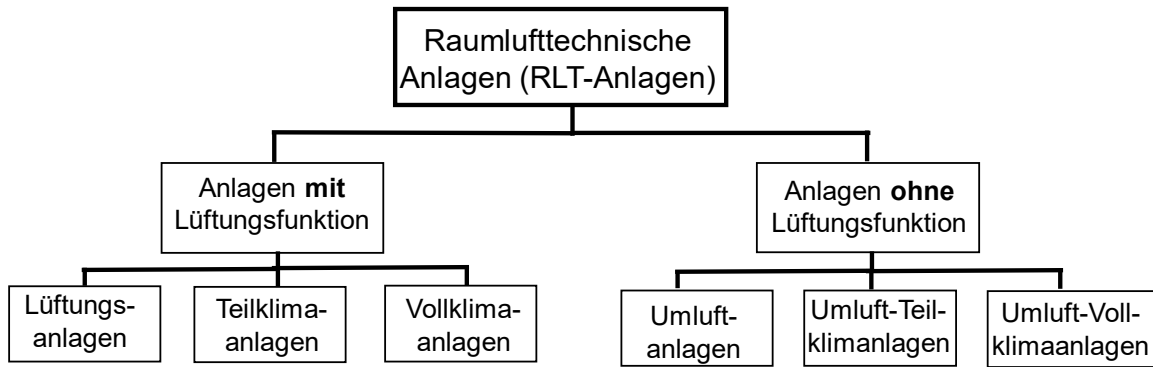


Bild 2-5: Raumlufttechnische Anlagen

Bild 2-6 zeigt eine Vollklimaanlage und die Luftwege von der Außenluft (AU), über die Raumluft (RA), bis zur Fortluft (FO). Die Zuluft (ZU) kann ausgehend von der Außenluft durch die nachfolgend aufgeführten Luftbehandlungsfunktionen aufbereitet werden:

- Wärmerückgewinnung (WRG)
- Vorerwärmer (VE)
- Kühlregister (KÜ)
- Luftbefeuchter (BE)
- Nacherwärmer (NE)
- Zuluftventilator (V, ZU)

Durch Luftleitungen wird die aufbereitete Luft zu den Räumen gefördert und durch Luftdurchlässe in den Raum eingebracht. Durch entsprechende Gestaltung der Luftdurchlässe kann die Strömung und damit die Lüftungseffektivität im Raum wesentlich beeinflusst werden. Die Abluft (AB) wird mittels Ventilators (V, AB) aus dem Raum abgeführt und fördert diese über den Wärmerückgewinner (WRG) als Fortluft (FO) in die Umgebung.

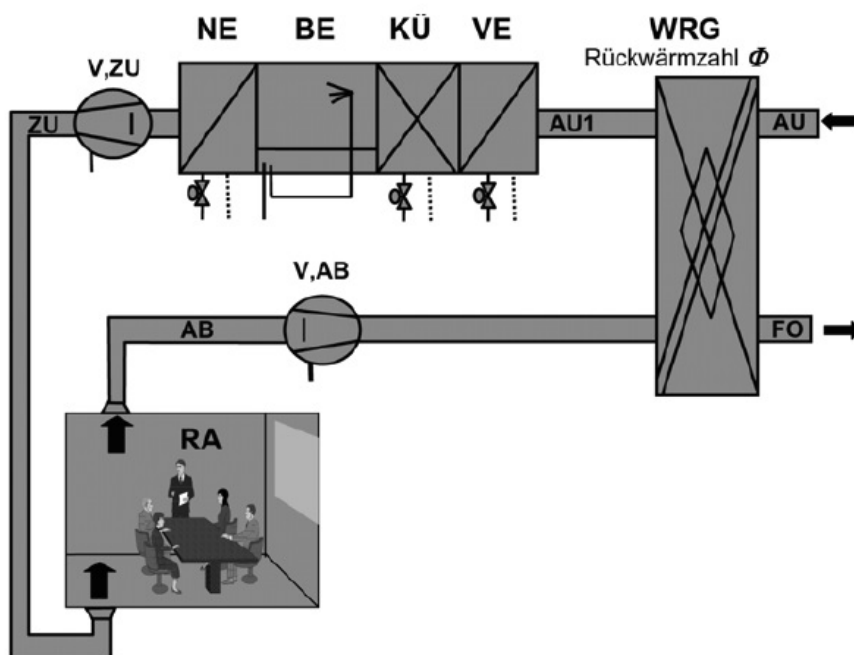


Bild 2-6: RLT-Anlagenschema (Vollklimaanlage) [22]

Grundsätzlich wird hinsichtlich der Anordnung raumluftechnischer Anlagen zwischen einer zentralen und dezentralen Konzeptionierung unterschieden. Dezentrale RLT-Anlagen sind raumweise in der Fassade, im Fußboden bzw. der Decke installiert und haben eine direkte Außenluftanbindung. Zentrale RLT-Anlagen hingegen sind an einem zentralen Ort (z.B. Technikraum oder Dach) aufgestellt und fördern die Zuluft durch ein Luftverteilsystem in die einzelnen Räume des Gebäudes.

2.5 Stoffausbreitung und -belastung im Raum bei verschiedenen Maßnahmen

Die Theorie zur Partikel- und CO₂-Bilanzierung in einem Klassenraum soll anhand von Bild 2-7 erläutert werden.

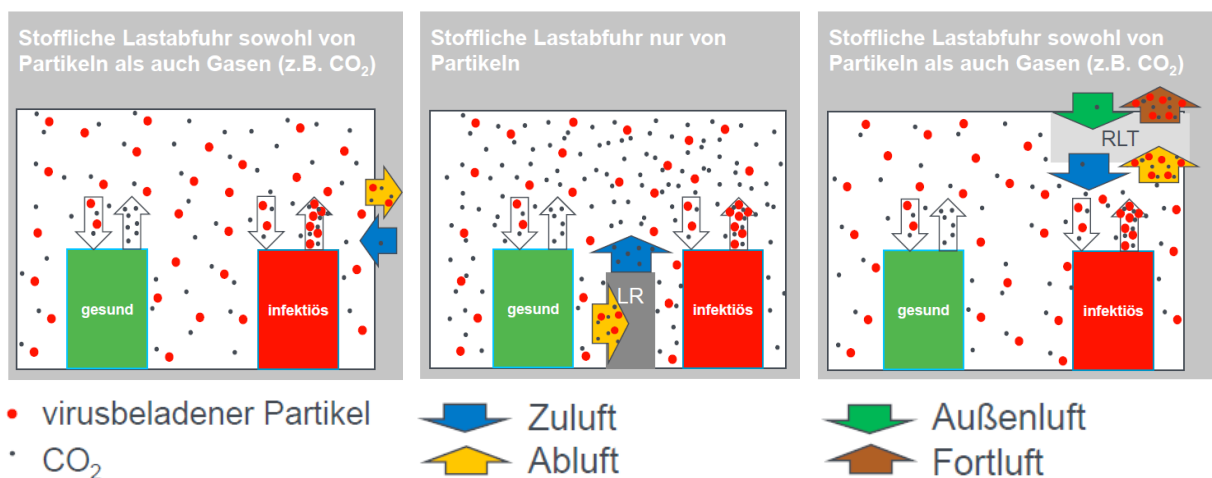


Bild 2-7: Partikel- und CO₂-Bilanz (links: Fensterlüftung, Mitte: Luftreinigungsgerät, rechts: RLT-Anlage)

Fensterlüftungen und RLT-Anlagen sind neben dem Abtransport von Partikeln auch in der Lage, gasförmige Stofflasten abzuführen. Luftreinigungsgeräte hingegen haben keinerlei Auswirkung auf den CO₂- und Luftfeuchtehaushalt, obwohl von SchülerInnen und LehrerInnen beide Stoffe kontinuierlich in den Raum eingebracht werden. Zu hohe Luftfeuchten sorgen für einen unbehaglichen Raumzustand und langfristig besteht vor allem im Winter die Gefahr einer Schimmelbildung in kälteren Wandbereichen des Raumes.

Für das Infektionsgeschehen ist eine kumuliert inhalede virenbeladene Partikel- oder Quanta-Anzahl entscheidend (vgl. Kapitel 2.1). In Bild 2-8 ist die instationäre zeitliche Entwicklung dieser entscheidenden Größe in einem Diagramm dargestellt. Zugrunde liegen die Annahmen einer idealen Mischlüftung, gleichmäßiger Volumenströme und der Anwesenheit einer infektiösen Person, welche einen kontinuierlich gleichmäßigen virenbeladenen Partikelstrom abgibt, sowie mindestens einer gesunden Person von Beginn an. [23]

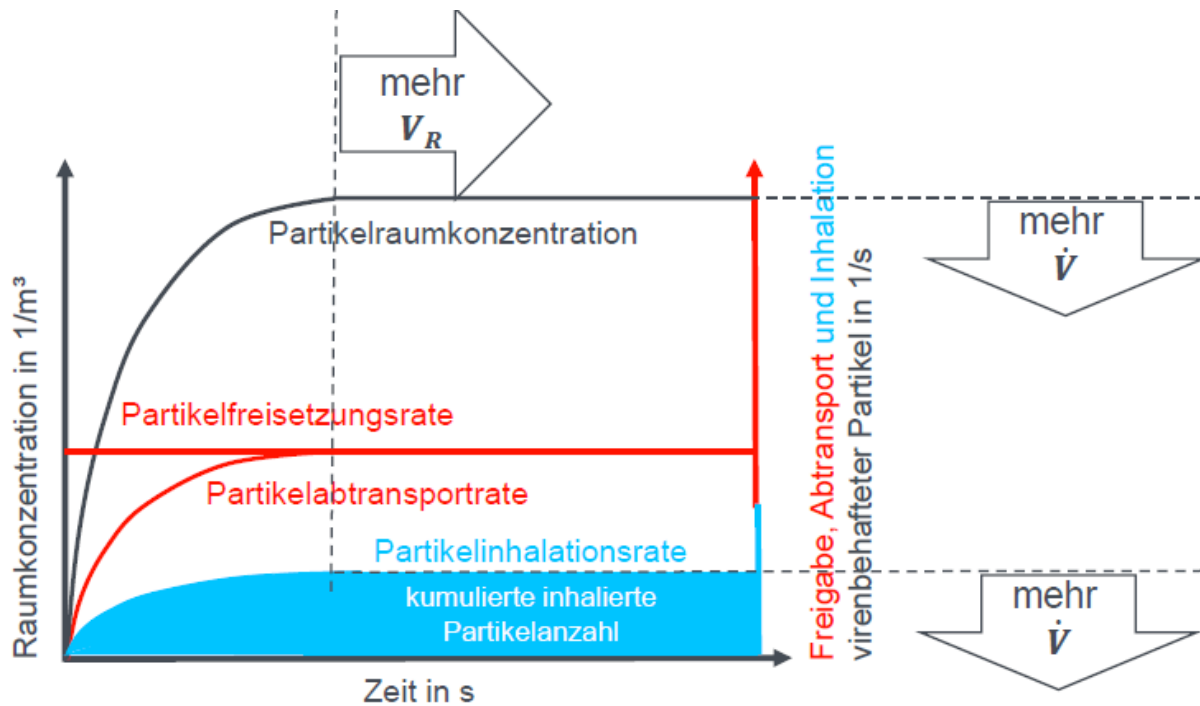


Bild 2-8: Idealisierter zeitlicher Verlauf der Partikelraten, -konzentration und Inhalationsraten

Den zeitlichen Verläufen des Diagramms aus Bild 2-8 liegt eine inhomogene Differentialgleichung erster Ordnung zugrunde. Diese und die zeitlichen Entwicklungen der relevanten Größen werden im Folgenden erläutert. Durch die kontinuierliche virenbeladene Partikelabgabe der infektiösen Person steigt die Konzentration an. Mit dieser zunehmenden virenbeladenen Partikelkonzentration nimmt gleichzeitig die Abtransportrate dieser Partikel zu, da ein gleichbleibender Luftstrom nun folglich mehr virenbeladene Partikel je Zeiteinheit beinhaltet. Diese steigende Abtransportrate hemmt wiederum das weitere Wachstum der Partikelkonzentration im Raum, weswegen sich diese asymptotisch einem Gleichgewichtszustand annähert. Folglich entwickelt sich auch die Abtransportrate asymptotisch gegen die Freisetzungsrates, was dann wiederum den Gleichgewichtszustand festigt. [23]

Die obere Grenzlinie der blau eingefärbten Fläche stellt dabei die theoretische Partikelinhalationsrate dar. Die Fläche selbst beschreibt die kumuliert inhalierte, virenbeladene Partikelanzahl. Je größer diese Fläche ist, desto größer ist die Gefahr einer Infektion einer „gesunden“ Person. [23]

Aktive Maßnahmen zur Senkung des Infektionsrisikos

Verschiedene Parameter können das Infektionsrisiko beeinflussen. Je größer bspw. ein Raum ist, desto später wird der Theorie zu Grunde ein Quasi-Gleichgewichtszustand der Konzentration und der Partikelinhalationsrate erreicht, was bei einer gegebenen Expositionszeit einer Senkung des Risikos einer Infektion entspricht. Lüftungstechnische Maßnahmen können durch einen gesteigerten Volumenstrom eine Senkung der Gleichgewichtskonzentration und der Partikelinhalationsrate bewirken und somit eine wirksame Maßnahme zur Senkung des Infektionsrisikos.

An dieser Stelle sollte betont werden, dass ein 5...6-facher Außenluftwechsel zwar gemäß der Auslegung nach DIN EN 15251 bzw. DIN EN 16798-1 zu einer Kategorie I verhilft [2, 14].

Das Infektionsrisiko lässt sich allerdings nur bedingt über einen Luftwechsel kontrollieren. Die Berücksichtigung von einer einzigen infektiösen Person im Raum hätte bspw. zur Folge, dass bei einem kleinen Raum zur Erreichung eines Außenluftwechsels von 5...6 ein geringerer Volumenstrom resultiert. Dadurch würde der virusbeladenen Emissionsrate dieser Person nur ein geringer Volumenstrom zur Verdünnung entgegengesetzt. Die stoffliche Gleichgewichtskonzentration (auch die der Viren) ist vom anliegenden Volumenstrom einer Maßnahme und nicht vom Raumvolumen abhängig. Daher wird empfohlen in kleinen Räumen die Luftvolumenströme, die bei großen Räumen Wirkung zeigen, beizubehalten und nicht aufgrund eines einheitlichen Luftwechsels zu reduzieren (siehe Bild 2-8).

FFP2-Maske und seine Wirksamkeit

Eine weitere wirksame Maßnahme zur Senkung der Infektionswahrscheinlichkeiten ist das Tragen einer wirksamen FFP2-Maske aufgrund seiner abscheidenden Eigenschaft von Partikeln.

Der Masken-Exhalations-Abscheidegrad besagt dabei, welcher relative Anteil an Partikeln beim Ausatmen in der Maske durch die Filterwirkung abgeschieden bzw. im Material eingelagert wird. Der Wert bewertet also nicht nur die reinen Filtereigenschaften des Materials, sondern auch die Wirksamkeit der Abdichtung und damit die Leckageströme zwischen Maske und Gesicht. Dieser Abscheidevorgang sorgt also für eine entsprechend geringere Gleichgewichtskonzentration im Raum bzw. dafür, dass sich die in schwarz dargestellte horizontale Asymptote im Diagramm bei geringeren Werten einstellt. Nach *Asadi et al.* kann bei konservativer Betrachtung für eine gewöhnlich getragene FFP-2-Maske (KN-95) der Wert $\eta_{\text{Maske,Exhalation}} = 74\%$ angesetzt werden. [24]

Der Masken-Inhalations-Abscheidegrad besagt hingegen, welcher relative Anteil an Partikeln beim Einatmen in der Maske durch die Filterwirkung abgeschieden bzw. im Material eingelagert wird. Zum anderen wird zusätzlich die eingeatmete Partikel- und damit Virenanzahl gemäß des Abscheidegrads reduziert. Die Partikelinhalationsrate (obere Grenzlinie der blau eingefärbten Fläche) würde bereits bei unveränderter

Gleichgewichtskonzentration um den Faktor des Abscheidegrads verringert werden. Nach *Hill et al.* lässt sich für eine gewöhnlich getragene FFP2-Maske (KN-95) ein Masken-Inhalations-Abscheidegrad von $\eta_{\text{Maske,Inhalation}} = 20\%$ ansetzen. [25]

Dass dieser Wert sehr viel geringer ausfällt als der der Exhalation, lässt sich darauf zurückführen, dass *Hill et al.* bei ihren Untersuchungen Abscheidegrade für Partikel in Virengröße herangezogen haben. Die Tatsache, dass Viren sich allerdings auch an größere Partikel anhaften und damit sehr viel wirksamer abgeschieden werden können, wird somit nicht betrachtet. Der Abscheidegrad für alle vorkommenden Viren wird daher unterschätzt, was für eine Infektionsrisikobewertung eine Unschärfe in die konservative Richtung darstellt.

Die simultane Wirkung beider Abscheide-Effekte resultiert im Faktor $(1 - \eta_{\text{Maske,Exhalation}}) \cdot (1 - \eta_{\text{Maske,Inhalation}})$ der ursprünglichen Virenbelastung für gesunde Personen, was einer Senkung um ca. 79% gegenüber dem Szenario ohne Masken entspricht. [24, 25]

2.6 Behaglichkeit in Räumen

Eine Umgebung gilt als behaglich, wenn diese den Erwartungen anwesender Personen entspricht [26]. Dabei müssen unabhängig von der Bewertungsmethode u. a. folgende Einflüsse berücksichtigt werden:

- Körperliche Tätigkeit
- Bekleidung
- Lufttemperatur
- Mittlere Strahlungstemperatur
- Luftgeschwindigkeit
- Luftfeuchte

2.6.1 Temperatur

Nach der Arbeitsstättenrichtlinie ASR 3.5 [27] und DIN EN 16798 [1] liegt die Solltemperatur der Raumluft bei sitzenden Tätigkeiten mit leichter körperlicher Arbeit bei 20°C. Die Maximaltemperatur liegt bei 26°C.

2.6.2 Luftgeschwindigkeit und Zugluftrisiko

Für die Luftgeschwindigkeit sollten Werte von maximal 0,2 m/s eingehalten werden [28]. Wie oben beschrieben, kann dies je nach Randbedingungen unterschiedlich empfunden werden. Bis zu diesem Grenzwert wird jedoch davon ausgegangen, dass keine Zuglufterscheinungen auftreten. Allerdings hängt das Auftreten von Zugluft von weiteren Faktoren ab. Das Zugluftrisiko (Draft Risk) wird nach DIN EN ISO 7730 [28] wie folgt in Gleichung (2-3) beschrieben:

$$DR = (\theta_p - \theta_a) * (v - 0,05)^{0,62} * (0,37 * v * TU + 3,14) \quad (2-3)$$

DR_t Zugluftrisiko (Draft Risk) in %

θ_p Mittlere Körperoberflächentemperatur der Person in °C (gültig im Bereich von 30 ... 34°C)

θ_a Lokale Raumlufthtemperatur in °C (gültig im Bereich von 19 ... 27°C)

v Lokale Raumlufthgeschwindigkeit in m/s

TU Lokaler Turbulenzgrad in % (kann über Standardabweichung der gemessenen Luftgeschwindigkeit ermittelt werden)

Hiermit ist es möglich, eine objektive Bewertung der Behaglichkeitsfaktoren zu erhalten. Laut SIA-382/1 [29] sind dabei Werte bis 15% als behaglich einzustufen.

DIN EN ISO 7730 [28] gibt gestaffelte Kategorien basierend auf der Anzahl an Unzufriedenen an. Kategorie A ist mit einem maximalen Zugluftrisiko von 10% definiert und weist hierfür 6% an Unzufriedenen aus. Das Zugluftrisiko von maximal 20% ist der Kategorie B zuzuordnen und entspricht somit einem Maximalwert von 10% an Unzufriedenen. 15% an unzufriedenen Nutzern bei einem Zugluftrisiko von 30% ist der Kategorie C zuzuschreiben. Weitere Kategorien sind nicht genannt. Ein Zugluftrisiko von über 30% ist als nicht mehr tragbar einzuschätzen, da eine hohe Zahl an Personen unzufrieden ist.

2.6.3 Feuchte

Für die relative Feuchte gelten Werte zwischen 25...60% r.F. als akzeptabel [1]. Die relative Feuchte der Luft ist abhängig von der Raumlufthtemperatur; wärmere Luft kann mehr Wasser aufnehmen. Ebenso gelten Behaglichkeitsgrenzwerte für die relative Feuchte, deren Nichteinhaltung bei einem zu geringen Wert zur Austrocknung der Schleimhäute oder bei einem erhöhten Wert zu Schwüle führen kann.

2.6.4 CO₂-Gehalt

Der CO₂-Gehalt der Luft dient als Beurteilungsäquivalent der Luftqualität. Zu hohe CO₂-Konzentrationen können zu Konzentrationsschwierigkeiten und zu gesundheitlichen Beschwerden führen. Die CO₂-Konzentration der Außenluft beträgt ca. 400 ppm. Als hygienisch unbedenklich gelten Konzentrationen bis 1.000 ppm (Pettenkofer-Zahl) [2, 7]. Gemäß DIN EN 15251 [14] bzw. DIN EN 16798 [2] wird die Raumlufthqualität über den Indikator CO₂-Konzentration definiert. Dabei werden keine Absolutwerte, sondern je nach Kategorie Konzentrationsdifferenzen zur Außenluft angegeben. Zur Einhaltung der Kategorie 1 beträgt der CO₂-Grenzwert der Raumlufth je nach Norm unter Berücksichtigung einer CO₂ Außenluftkonzentration von 400 ppm zwischen 750 und 950 ppm. Gemäß der Stellungnahme des Expertenkreis Aerosole BW wird in Pandemie-Zeiten ein Richtwert von 800 ppm in Innenräumen empfohlen [30].

2.7 Schallmessungen

Lüftungsgeräte, wozu auch Luftreinigungsgeräte gezählt werden, stellen Schallquellen dar, die Geräusche erzeugen und an die Umgebung abgeben. Wie viel von einer Schallquelle emittiert wird, hängt von der Art und Betriebsweise des Geräts ab und ist abhängig von der Entfernung zur Schallquelle (Schallleistung). Der Schalldruck, welcher in unterschiedlichen Abständen und Umgebungsbedingungen gemessen wird, kann im Einzelfall sehr unterschiedlich sein. Beispielsweise wird in einem vergleichsweise kleinen Raum mit schallharten, stark reflektierenden Wänden ein deutlich höherer Schalldruckpegel gemessen als in einem großen Raum mit teilweise schallabsorbierenden Wänden oder Decken. Aus diesem Grund ist der Schalldruckpegel zweckmäßig, um zu bewerten, wie laut die emittierte Schallquelle vom menschlichen Gehör wahrgenommen wird. Als Anforderungsgröße zum Schallschutz in Räumen für gleichmäßige Schallquellen wie Lüftungsgeräte bzw. Luftreinigungsgerät wird hier der äquivalente Dauerschallpegel (A-Bewertung) herangezogen [1]. Da das menschliche Ohr Töne mit gleichem Schalldruck in unterschiedlichen Tonhöhen unterschiedlich laut empfindet, werden so genannte Frequenzbewertungskurven berücksichtigt. Der Krümmungsverlauf dieser Kurven gleicher Lautstärkepegel und damit der Frequenzgang des Gehörs ist vom Schalldruckpegel abhängig, weswegen für unterschiedlich hohe Schalldruckpegel entsprechende Bewertungskurven definiert sind. Die A-Bewertung wird überwiegend in der technischen Akustik und der Bestimmung des Beurteilungspegels auf dem Gebiet des Lärmschutzes nach DIN EN ISO 9612 [31] zusammen mit der C-Bewertung verwendet. Diese entspricht den Kurven gleicher Lautstärkepegel im Bereich von 20...40 Phon. Der Wert in Phon gibt an, welchen Schalldruckpegel ein Sinuston mit einer Frequenz von 1.000 Hz besitzt, der für das menschliche Gehör gleich laut empfunden wird, wie die betrachtete Schallquelle bei einer anderen Frequenz.

Nachfolgend werden die grundlegend relevanten Größen für die Schallmessung beschrieben [1].

2.7.1 Frequenzbänder

Zur Charakterisierung eines Geräusches wird eine Unterteilung des relevanten Frequenzbereichs in Bänder vorgenommen. Dabei wird eine Unterteilung in Bänder mit der Breite einer Oktave in der Raumluftechnik üblicherweise bevorzugt. Bei Oktavbändern bestehen zwischen der unteren Frequenzgrenze f_u , der oberen f_o und der Bandmittenfrequenz f_m folgende Beziehungen (Gl. 2-4 und Gl. 2-5):

$$f_o = 2 \cdot f_u \quad (2-4)$$

$$f_m = \sqrt{f_u \cdot f_o} = \sqrt{2 \cdot f_u} = \frac{f_o}{\sqrt{2}} \quad (2-5)$$

Die jeweiligen Mittenfrequenzen für die in der Raumluftechnik hauptsächlich relevanten acht Oktavbänder liegen zwischen 63 Hz und 8 kHz [1].

2.7.2 Schalleistungspegel

Die Schalleistung L_w beschreibt die akustische Energie, die von einer Schallquelle abgegeben wird und ist gemäß Gleichung 2-6 definiert.

$$L_w = 10 \cdot \log\left(\frac{P}{P_o}\right) \quad (2-6)$$

Dabei stellt P die akustische Leistung und P_o die Bezugsleistung dar, welche auf $1 \cdot 10^{-12} \text{ W}$ festgelegt ist [1].

2.7.3 Schalldruckpegel

Der Schalldruckpegel L_p ist durch Gleichung 2-7 definiert [1].

$$L_p = 10 \cdot \log\left(\frac{p}{p_o}\right)^2 = 20 \cdot \log\left(\frac{p}{p_o}\right) \quad (2-7)$$

Dabei stellt p den Effektivwert des Schalldrucks an einem bestimmten Raumpunkt dar und p_o den Bezugsschalldruck, der mit $p_o = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$ festgelegt ist. Der zeitliche Mittelwert L_m aus mehreren gemessenen Pegeln einer Schallquelle wird mit Gleichung 2-8 gebildet.

$$L_m = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^t 10^{0,1 \cdot L_{pi}} \cdot t_i\right) \quad (2-8)$$

2.7.4 Nachhallzeit

Die Nachhallzeit T ist nach DIN 18041 [32] die Zeitspanne, in der der Schalldruckpegel in einem Raum nach dem Beenden der Schallfeldanregung um 60 dB abfällt. Die optimale Nachhallzeit richtet sich nach der jeweiligen Raumnutzung und sollte daher einen entsprechenden Richtwert aufweisen. Für einen Raum der Klasse A3 (Klassenzimmer, Besprechungsräume) mit einem Raumvolumen von bis zu 1.000 m^3 liegt der Richtwert für die Soll-Nachhallzeit zum Zweck einer guten Sprachverständlichkeit über weitere Entfernung im Bereich von $T_{\text{Soll}}=0,5 \dots 0,8 \text{ s}$ (Gl. 2-9).

$$T_{\text{Soll},A3} = (0,32 \cdot \log(V) - 0,17) \quad (2-9)$$

2.8 Spurengas-Messprinzip

Grundlage der Infektionsübertragung über die Luft sind virenbeladene Aerosolpartikel. Mit Hilfe von Schwefelhexafluorid (SF_6) lässt sich die Ausbreitung von Partikeln äquivalent nachstellen. SF_6 ist ein inertes, farb- und geruchsloses Gas, das mithilfe eines Fourier-Transformations-Infrarotspektrometers (FTIR Spektrometer) nachgewiesen werden kann. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist, dass im Gegensatz zu Aerosolen keine nennenswerten Konzentrationen von SF_6 in der Atmosphärenluft vorhanden sind, die die Messung beeinträchtigen können.

Bei Messungen erfolgt eine kontrollierte, meist gleichmäßige Stofffreisetzung und eine Konzentrationsmessung an relevanten Positionen im Raum. Anhand der Konzentrationen bzw. deren zeitlicher Verläufe lassen sich Aussagen über die Ausbreitung der Luft und in diesem Fall auch der luftgetragenen Aerosolpartikel treffen.

Voraussetzung für diese Anwendung ist, dass sich das Spurengas (SF_6) in der Luft ähnlich verhält wie ein Aerosol. Die nach *Hartmann et al.* für die Infektionsausbreitung relevanten Partikel liegen im submikronen Bereich (Durchmesser unter $1\text{ }\mu\text{m}$) [33]. Selbst mit einem hoch angesetzten maximalen Durchmesser von $10\text{ }\mu\text{m}$ beträgt nach Bild 2-9 die Sinkgeschwindigkeit eines solchen Aerosol-Partikels nur wenige mm/s. Dieser vernachlässigbare Wert zeigt, dass die relevanten Partikel als ideal luftgetragen angesehen werden können. Das bedeutet, dass ihre Bewegung von der Raumluftrömung und nicht von der Gravitation bestimmt wird.



Bild 2-9: Sinkgeschwindigkeit bei verschiedenen Partikelgrößen

Zudem verhält sich SF_6 bis zu einer Anzahlkonzentration von 80 ppm wie eine ideale Gaskomponente und verteilt sich homogen in der Luft [34]. Auch *Ai et al.* [35] zeigen auf, dass Spurengas ein geeignetes Äquivalent für die Partikelausbreitung darstellt.

Die Kombination dieser Aspekte lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Ausbreitung von SF_6 und einem Aerosol vergleichbar sind. Bei der Freisetzung des Spurengases wird zudem darauf geachtet, dass die Emissionsgeschwindigkeit ähnlich der Luftgeschwindigkeit eines Ausatemvorgangs ausfällt, damit die Eindringtiefe in den Raum als repräsentativ bewertet werden kann.

2.9 Testaerosol-Messprinzip

Dieses Prinzip ist in einigen Punkten ähnlich zur Spurengas-Messmethode. Auch hier wird ein Stoffstrom freigesetzt und im Umfeld die Konzentration gemessen. Die Besonderheit ist, dass die Freisetzung in Form von Partikeln, also kleinsten Schwebeteilchen, erfolgt.

Gelingt es, die Freisetzung hinsichtlich der Partikelgrößenverteilung analog zu den vom Menschen freigesetzten Partikeln zu realisieren, so wird der Transportmechanismus noch treffender nachgebildet. Um dies zu erreichen, wird in der Wissenschaft häufig Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat (DEHS) als langzeitstabiles Aerosol eingesetzt, da es sich mit seiner Dichte von $0,91 \text{ g/cm}^3$ in der Nähe von Wasser bewegt und damit auch den menschlichen Speichel nachbilden kann. Eine weitere positive Eigenschaft ist die Langzeitstabilität der Tropfen aufgrund sehr kleiner Verdampfungsraten in Luft. Partikel im Größenbereich von $0,3 \mu\text{m}$ benötigen ca. 4 h für eine Verdampfung und gelten daher als besonders geeignet für Versuche über längere Zeiträume. [36]

Mit Aerosolgeneratoren nach dem Zerstäubungsprinzip lassen sich Partikelgrößenverteilungen erzeugen, die in etwa denen entsprechen, welche der Mensch emittiert. Die Partikelanzahl, die pro Zeiteinheit freigesetzt wird, sollte dabei wesentlich über der vom Menschen emittierten liegen, um auf Immissionsseite in Konzentrationsbereiche zu gelangen, die eine höhere Messgenauigkeit zulassen. Bei den Immissionsmessungen in der Nähe der Aerosolfreisetzung können mit optischen Partikelspektrometern die Anzahlkonzentrationen sowie eine Unterteilung in diverse Partikelgrößenfraktionen bestimmt werden.

Der wesentliche Vorteil dieser Messmethode gegenüber des Spurengasmessprinzips ist die Möglichkeit der Untersuchung der Wirksamkeit der Luftreinigungsgeräte. In diesen werden Gase unverändert durchgeleitet, weswegen die Spurengasmessungen hierüber keine Aussage zulassen. Die DEHS-Partikel hingegen werden wie alle Partikel gemäß des Abscheidegrads abgeschieden, sobald sie von dem Luftreinigungsgerät erfasst werden.

Ein weiterer Vorteil ist die zusätzliche Information über die Größenfraktionen. Dadurch lassen sich bei der Übertragung der Ergebnisse auf die nachgestellte Infektionsausbreitung genauere Rückschlüsse auf die Wahrscheinlichkeit schließen, wie viele Viren statistisch in den jeweiligen Partikelgrößenfraktionen enthalten sind.

Ein Nachteil hingegen ist die Anfälligkeit der Messtechnik auf Störeinflüsse der Umgebung. Werden durch äußere Einflüsse, wie beispielsweise durch Personen, die die Messungen durchführen, Partikel freigesetzt, lassen sich diese in den Partikelspektrometern von den Testaerosolpartikeln nicht unterscheiden und können Ergebnisse verfälschen. Außerdem liegt zu jedem Zeitpunkt bereits ohnehin ein Partikelbestand in der Luft vor, der sich ebenfalls über die Zeit ändern kann. Diesen Wert gilt es vor den

Messungen als Referenz zu identifizieren oder ihn durch den Betrieb des Luftreinigungsgerätes vor der Messung gegen null zu senken, wodurch der Störeinfluss jedoch nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann.

Aufgrund dieser Vor- und Nachteile werden bei den Messungen in den Schulen beide Messtechniken (Spurengas und Testaerosole) eingesetzt. Auch bei der Testaerosolfreisetzung wird beachtet, dass die Aerosol- bzw. Partikelgeschwindigkeit ähnlich der Luftgeschwindigkeit eines Ausatemvorgangs ist, damit die Eindringtiefe in den Raum als repräsentativ bewertet werden kann.

3 Methodisches Vorgehen bei den Messungen und Auswertungen

In diesem Kapitel wird das in den Schulen angewandte Vorgehen bei den Messungen vorgestellt.

3.1 Randbedingungen

Mit dem Ziel, die Infektionswahrscheinlichkeit in Räumen mit Fensterlüftung, mit und ohne Luftreinigungsgerät oder mit RLT-Anlage in Klassenräumen zu bestimmen, werden in den unterschiedlichen Klassenräumen Spurengaskonzentrations- und Testpartikelmessungen durchgeführt.

Die Messungen zur Bestimmung der Infektionswahrscheinlichkeit an unterschiedlichen Positionen sowie die Beurteilung der Wirksamkeit von Luftreinigungsgeräten und RLT-Anlagen im Klassenraum wurden größtenteils ohne anwesende SchülerInnen durchgeführt. Hintergrund hierbei ist, den virusbeladenen Partikelstrom ausgehend von einer anwesenden infektiösen Person im Raum an unterschiedlichen Positionen im Klassenraum messtechnisch zu erfassen bzw. bestimmen zu können. Bei Anwesenheit von SchülerInnen im realen Betrieb, die kontinuierlich an ihrem Platz Partikel emittieren, kann aktuell messtechnisch nicht unterschieden werden, ob die Partikel von einer gesunden oder infektiösen Person stammen.

Die anstatt der SchülerInnen eingesetzten Dummies haben jeweils eine Oberfläche von $1,8 \text{ m}^2$ und eine im Inneren installierte Glühbirne mit 75 W , die die Wärmeabgabe einer Person simuliert. Die eingesetzten Dummies geben nur Wärme ab, so dass eine CO_2 - bzw. Feuchtabgabe bei der Messung nicht berücksichtigt wird.

Es wird zugrunde gelegt, dass für den Betrieb der Luftreinigungsgeräte die gleichen Volumenströme wie bei maschinell belüfteten Räumen zur Partikelabfuhr und Einhaltung einer entsprechenden Luftqualität erforderlich sind. Aus diesem Grund werden die Sekundärluftwechsel für das Luftreinigungsgerät, analog zur maschinellen Lüftung (Primärluftwechsel) eingestellt (siehe Kapitel 2.3). Daher werden die Luftwechsel anhand der erforderlichen Luftvolumenströme zur Erreichung von Kategorie 1 ermittelt. Für die Luftreinigungsgeräte wird davon ausgegangen, dass bei Betrachtung eines Klassenraums als Systemgrenze für die Aerosolbelastung die Partikelabfuhr analog zur einer RLT-Anlage angenommen und damit dieselben erforderlichen Sekundär- wie Primärluftwechsel angesetzt werden können.

Die in Tabelle 3-1 dargestellten Raumvolumina und Raumgrundflächen wurden bei der Vor-Ortbegehung ermittelt. Die Anzahl an Personen je Klassenraum basiert auf Aussagen der jeweiligen Schulleitung oder den für den Raum verantwortlichen LehrerInnen bzw. wurde anhand der vorliegenden Sitzplätze im Klassenraum ermittelt.

Tabelle 3-1: Geometrieübersicht Schulen

Nr.:	Schulen	Raum- volumen	Raum- grundflä- che	Anzahl an Per- sonen	Erforderlicher Luftwechsel zur Erreichung der Kategorie 1
-		m ³	m ²	-	1/h
01	Solitude-Gymnasium	194	65	30	6,7
02	Wilhelms-Gymnasium	216	65	26	5,4
03	Schwabschule	234	61	23	4,5
04	Wilhelmsschule Wangen	230	67	24	4,8
05	Steigschule Bau 1	184	53	21	5,1
06	Steinbeisschule Haupt- bau	180	75	17	4,9
07	Uhlandschule Neubau	210	66	24	5,2
08	Zeppelin-Gymnasium Klausurraum	403	115	28	3,5
09	Zeppelin-Gymnasium Referenzraum	189	54	28	6,3
10	Filderschule	186	62	23	5,7
11	Gewerbliche Schule für Farbe und Gestaltung	460	96	19	2,3

Die Anzahl an unterschiedlichen Klassenräumen und die Vielzahl an Freiheitsgraden bei den Messparametern resultiert in einer umfangreichen Kombinatorik mit vielen Varianten. Ziel dieser Messkampagne ist es, möglichst gleichmäßig verteilte Messungen durchzuführen, damit über viele Klassenräume und den jeweiligen eingesetzten Luftreinigungsgeräten eine Aussage getroffen werden kann. Daher werden die unten aufgeführten Varianten in den jeweiligen Schulen untersucht (siehe Tabelle 3-2 und Tabelle 3-3).

Tabelle 3-2: Allgemeine Variantenübersicht

Fensterlüftung		
V0	Fenster geschlossen	
V1	Stoßlüftung mit Lüftungsintervall 20/5/20 ¹⁾	
V2	Stoßlüftung mit Lüftungsintervall 10/2,5/10 ²⁾	
V3	Dauerkipplüftung ³⁾	
RLT-Anlage		
V4	$\dot{V}_1$: 600...915 m³/h	n _{Primär,1} : 3,1...4,9 1/h
Luftreinigungsgerät		
V5	$\dot{V}_1$: 1.000...1.250 m³/h	n _{Sekundär,1} : 5,0...6,9 1/h
V6	$\dot{V}_2$: 500...690 m³/h	n _{Sekundär,2} : 2,7...3,7 1/h
V7	Kombination Stoßlüftung und Betrieb von Luftreinigungsgerät	
Messungen mit Anwesenheit von SchülerInnen		
V8	CO ₂ -Messung bei Stoßlüftungsvarianten V1, V2 und Grenzwertbetrachtung 800 ppm ⁴⁾	
1) 20/5/20 beschreibt folgende Abfolge: 20 Minuten Unterricht, 5 Minuten Lüften, 20 Minuten Unterricht 2) 10/2,5/10 beschreibt folgende Abfolge: 10 Minuten Unterricht, 2,5 Minuten Lüften, 10 Minuten Unterricht 3) Die Oberlichter im Klassenraum sind über 90 Minuten in Kippstellung 4) Fensterlüftung wenn der CO₂-Grenzwert von 800 ppm in der Raumluft überschritten wird		

Tabelle 3-3: Übersicht der Varianten in den jeweiligen Schulen

Nr.:	Schulen	Varianten								
		V0	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
01	Solitude-Gymnasium		X			X				
02	Wilhelms-Gymnasium	X	X							
03	Schwabschule	X	X							X
04	Wilhelmsschule Wangen	X	X	X	X		X	X	X	X
05	Steigschule Bau 1	X	X	X			X	X	X	X
06	Steinbeisschule Hauptbau	X	X		X		X	X		
07	Uhlandschule Neubau		X	X	X		X	X		
08	Zeppelin-Gymnasium Klausur- raum							X		
09	Zeppelin-Gymnasium Referenz- raum	X	X	X			X	X		
10	Filderschule	X	X	X		X				
11	Gewerbliche Schule für Farbe und Gestaltung									X

Für alle Schulen wird eine Messstellenanordnung gemäß den örtlichen Gegebenheiten gewählt. Beispielhaft wird in Bild 3-1 die Anordnung der Messstellen 1 bis 6 aufgezeigt. Die rote Fläche stellt den Sitzplatz der so genannten infektiösen Person (Emittent) dar, die kontinuierlich einen SF₆- bzw. Testpartikelatemstrom abgibt. An den orangen hinterlegten Flächen wird die immissionsseitige Konzentration gemessen. Die blau hinterlegte Fläche zeigt den Aufstellort des fest installierten Luftreinigungsgerätes.

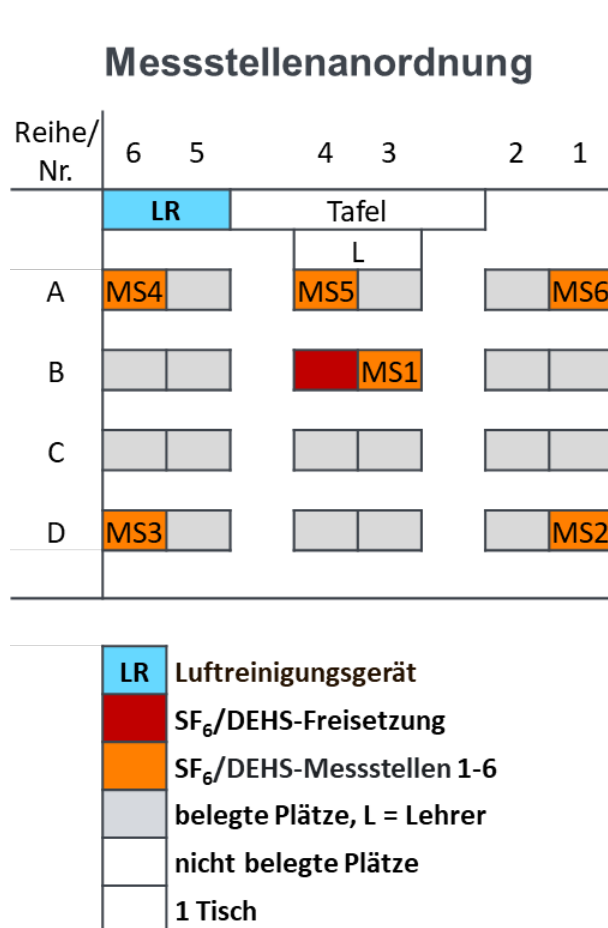


Bild 3-1: Exemplarische Messstellenanordnung am Beispiel der Uhlandschule Neubau

Im Gegensatz zu numerischen Simulationen sind In-Situ-Messergebnisse nur als bedingt reproduzierbar zu bewerten. Vor allem die Außenbedingungen haben einen großen Einfluss auf die Messergebnisse. Nicht nur die Außenlufttemperatur, welche im Winter einen Kaltluftabfall an der Innenseite der Gebäudehülle, insbesondere bei hohen Fensterflächen, zur Folge haben kann, welcher sich in der gesamten Raumluftströmung auswirkt, beeinflussen die Messungen. Windeinflüsse und solare Wärmeeinträge sind nicht zu vernachlässigende Störgrößen, welche die Reproduzierbarkeit einschränken. Daher gelten die Messergebnisse streng genommen nur für die jeweils vorliegenden äußeren Randbedingungen. Da die Untersuchungen allerdings eine Abschätzung des Infektionsrisikos in Klassenräumen ermöglichen sollen, kann deren Aussagekraft als hilfreiche Orientierung herangezogen werden.

Im Folgenden werden weitere grundlegende Messrandbedingungen für die Varianten aufgelistet:

- Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, werden für alle Varianten die Luftreinigungsgeräte für einen Sekundärluftwechsel zwischen 5...6 1/h betrieben.
- Der Volumenausatemstrom des Emittenten beträgt 0,54 m³/h bzw. 9 l/min.
- Der Betrachtungs- bzw. Messzeitraum einer Variante beläuft sich auf 90 Minuten (eine Doppelstunde) mit einer anschließenden 20-minütigen Pause.

- Die Sitzplatzbelegung bzw. Anordnung der Tische wird in Absprache mit den Verantwortlichen bzw. vor Ort mit den Lehrkräften festgelegt.
- Für die Varianten mit Fensterstoßlüftung und in den 20-minütigen Pausen zwischen den Doppelstunden wird die maximal nutzbare Öffnungsfläche der Fenster, die im Klassenraum vorliegt, eingesetzt.
- Die Freisetzung von SF_6 und der Testpartikel erfolgt innerhalb der 90 Minuten. In der 20-minütigen Pause liegt keine Freisetzung vor, die Türe ist geschlossen und die Dummies und Beleuchtung sind ausgeschaltet.
- Vor Beginn jeder Messung wird sichergestellt, dass die Konzentration von SF_6 und der Testpartikel nahezu null beträgt (Herstellung des Ausgangszustandes).
- Die Heizkörper werden gemäß den vorliegenden voreingestellten Betriebszeiten und Solltemperaturen betrieben. Die Beleuchtung ist bei allen Messungen eingeschaltet.

Alle Messergebnisse sind daher nur für diese Randbedingungen gültig.

Messungen mit Anwesenheit von SchülerInnen

Bei den Messungen mit Anwesenheit von SchülerInnen bzw. im eingeschränkten Unterrichtsbetrieb (aufgrund der Covid19-Einschränkung) werden in ausgewählten Klassenräumen die CO_2 -Konzentrationsverläufe über 45 bzw. 90 Minuten bei vorliegender Personenbelegung gemessen. Betrachtet wird hierbei:

- Fensterlüftungsstrategien 20/5/20 und 10/2,5/10
- Fensterlüftungsstrategie, wenn der CO_2 -Grenzwert von 800 ppm überschritten wird

3.2 Ermittlung der Außenluftwechsel bei Fensterlüftung in den Klassenräumen

Der Außenluftwechsel eines Klassenraums ist abhängig von Druckdifferenzen, welche sich aus Temperatur- und Windeinflüssen oder aufgrund einer Strömungsmaschine (bei Vorliegen einer maschinellen Lüftung) ergeben. Eine allgemeine Gleichung für den Luftwechsel eines Fensters, die aus der bernoullischen Druckgleichung und der Kontinuitätsgleichung folgt, lautet [9]:

$$n = C_d \cdot \frac{A_{Fe}}{V_R} \cdot \sqrt{2 \Delta p / \rho} \quad (3-1)$$

n Luftwechsel in 1/h

A_{Fe} Öffnungsfläche des Fensters in m^2

C_d Widerstandsbeiwert

Δp Druckdifferenz in Pa, mit $\Delta p = \Delta p_{therm} + \Delta p_{wind} + \Delta p_{masch}$

V_R Raumvolumen in m^3

ρ Dichte in kg/m^3

Diese allgemeine Form berücksichtigt die auftretenden Druckdifferenzen Δp durch Temperatur- und Windeffekte sowie maschinelle Lüftung. Der Druckabfall, der sich beim Durchströmen des Fensters einstellt, wird mit C_d (Druckverlustbeiwert) berücksichtigt [9].

Da in diesem Abschnitt der Außenluftwechsel bei einseitiger Fensterlüftung vorgestellt wird, entfallen die Druckdifferenzen einer maschinellen Lüftung Δp_{masch} . Nachfolgend werden die thermischen und windinduzierten Druckdifferenzen betrachtet. Der durch den Temperatureinfluss hervorgerufene Luftwechsel bzw. dessen Druckdifferenz, resultierend aus den Dichteunterschieden zwischen der Außen- und Innenluft (ρ_a, ρ_i), berechnet sich nach Gleichung (3-2) [7, 37].

$$\Delta p_{therm} = (\rho_a - \rho_i) \cdot g \cdot h_{Fe} \quad (3-2)$$

g Fallbeschleunigung; $9,81 \text{ m/s}^2$

h_{Fe} Öffnungshöhe des Fensters in m

ρ_a, ρ_i Dichte (a: Außenluft, i: Innenluft) in kg/m^3

Die obenstehende Gleichung gilt nur bei konstanter Temperatur über die gesamte Geschosshöhe. Ist eine Änderung der Innenlufttemperatur über die Höhe vorhanden bzw. nicht vernachlässigbar, müssen die Dichtedifferenzen über die Höhe integriert werden.

Antriebsfaktor für den windinduzierten Luftwechsel sind Druckdifferenzen zwischen Luv- und Lee-Seite (luv: windangeströmt, lee: windabgewandt) des Gebäudes. Die Strömung und mit ihr die Druckverteilung auf der Gebäudefassade sind eine komplexe Funktion aus Windgeschwindigkeit, -richtung, Gebäudegeometrie und Topografie [10, 37].

$$\Delta p_{\text{wind}} = 1/2 \cdot C_p \cdot \rho \cdot v_{\text{wind}}^2 \quad (3-3)$$

C_p Druckbeiwert

v_{wind} Windgeschwindigkeit in m/s

Für die Berechnung windinduzierter Druckdifferenzen kann Gleichung (3-3) verwendet werden. Der Druckbeiwert C_p (engl. ‚pressure coefficient‘) beschreibt das Verhältnis des statischen Drucks zum dynamischen Druck [10].

In der Realität sind nicht alle aufgeführten Rechengrößen zur Berechnung des Luftwechsels bekannt. Darüber hinaus gibt es Wechselwirkungen zwischen Windgeschwindigkeit/-richtung, Außen-/Innenlufttemperatur sowie Turbulenzeffekte. Aufgrund dieser Komplexität finden sich in der Literatur eine Vielzahl an Modellansätzen. Für die Ausarbeitung wird auf den Modellansatz von *Maas* [12], siehe Gleichung (3-4), zurückgegriffen, welcher den Einfluss der Thermik, des Winds und der Turbulenz berücksichtigt. Somit können alle relevanten Teilaspekte abgebildet werden. Der Modellansatz basiert auf Messungen eines Realraums unter natürlichen meteorologischen Bedingungen.

$$n_{\text{Maas}} = 1/2 \cdot \theta \cdot \frac{A_{\text{Fe}}}{V_{\text{R}}} \cdot \sqrt{C_{1 \text{ Maas}} \cdot v_{\text{wind } 10}^2 + C_{2 \text{ Maas}} \cdot h_{\text{Fe}} \cdot \Delta T + C_{3 \text{ Maas}}} \quad (3-4)$$

θ Durchflussverhältnis

$C_{1 \text{ Maas}}$ Windkonstante nach Maas

$C_{2 \text{ Maas}}$ Auftriebskonstante nach Maas in m/(s² K)

$C_{3 \text{ Maas}}$ Windturbulenzkonstante nach Maas in m²/s²

ΔT Differenz zwischen Innen- und Außenlufttemperatur in K

$v_{\text{wind } 10}$ Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe

Die Koeffizienten $C_{1 \text{ Maas}}$, $C_{2 \text{ Maas}}$ und $C_{3 \text{ Maas}}$ stellen den Einfluss von Temperatur, Wind und Turbulenz dar. Das Durchflussverhältnis θ berücksichtigt den Fensteröffnungswinkel und setzt sich aus dem Flächenverhältnis von geöffnetem Fenster zu vollständig durchströmtem Fenster (Öffnungswinkel $\gamma = 90^\circ$) zusammen. Das Durchflussver-

hältnis wird geometrisch ermittelt, siehe Gleichung (3-5). Dieser Ansatz kann auf sämtliche Fenstergeometrien eines Dreh-/Kippfensters ($\gamma = 0 \dots 90^\circ$) angewendet werden [12].

$$\Theta = \frac{A_{\text{eq}}}{A_{\text{eq } 90^\circ}} \quad (3-5)$$

A_{eq} Äquivalente Öffnungsfläche in m^2

$A_{\text{eq } 90^\circ}$ Äquivalente Öffnungsfläche bei Öffnungswinkel 90° in m^2

Die Fläche A_{eq} setzt sich aus den seitlichen Öffnungsflächen nach Bild 3-2 zusammen und kann über Gleichung (3-6) bestimmt werden.

$$A_{\text{eq}} = (1/A_{Fe}^2 + 1/A_s^2)^{-0,5} \quad (3-6)$$

A_{Fe} Fensteröffnungsfläche in m^2

A_s Summe der seitlichen Öffnungsflächen in m^2

Die bei vollständiger Fensteröffnung durchströmte Fläche $A_{\text{eq } 90^\circ}$ wird nach Gleichung (3-7) ermittelt.

$$A_{\text{eq } 90^\circ} = 2 b_{Fe} \cdot \sin(\gamma/2) \cdot [b_{Fe} \cdot \cos(\gamma/2) + h_{Fe}] \quad (3-7)$$

b_{Fe} Öffnungsbreite des Fensters in m

γ Kipp-/Drehwinkel in $^\circ$

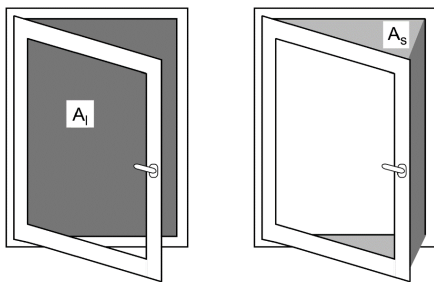


Bild 3-2: Definition der Flächen A_l und A_s [12]

Mithilfe des Modellansatzes nach Maas (3-4) und des geometrisch ermittelten Durchflussverhältnisses (3-5) werden die im Anhang in den Kapiteln 6.X.3 angegebenen Außenluftwechsel bei Fensterlüftung der jeweiligen Schule berechnet.

3.3 Visualisierung der Raumluchtströmung

Zur Visualisierung der Raumluchtströmung wird Kaltnebel, der durch Nebelmaschinen erzeugt wird, eingesetzt. Die feinen Nebelpartikel werden von der Luftströmung mitgetragen und können diese so sichtbar machen. Dabei werden sowohl mit Hilfe von Handnebelgeräten interessante Stellen wie z. B. Dummies, Wände, Zu- und Abluftströmungen am Luftreinigungsgerät sowie allgemein auftretende Strömungen im Raum lokal sichtbar gemacht. Dabei wird insbesondere bei der lokalen Nebelfreisetzung darauf geachtet, dass der Nebel bereits mit einem gewissen Eigenimpuls aus dem Gerät strömt und erst nach einem entsprechenden Weg von der Luftströmung mitgetragen wird. Hierdurch mögliche Fehler lassen sich vermeiden, wenn die Nebelfreisetzung quer zur Richtung der nachzuweisenden Luftströmung erfolgt, oder wenn eine feste Oberfläche angesprüht wird, um den Impuls des Nebels abzubauen. Es ist anzumerken, dass dieses ein qualitatives Verfahren ist und nur Aussagen über die ungefähre Richtung des Strömungsverlaufs zulässt. Mit diesem Verfahren lassen sich allerdings kritische Zonen identifizieren, die anschließend mit quantitativer Messtechnik untersucht werden.

3.4 Messen der Stoffausbreitung

Wie bereits in den Vor- und Nachteilen der Methoden in Kapitel 2.8 und 2.9 angemerkt, eignet sich die Spurengasmessmethode nur zur Beurteilung der Wirksamkeit einer Lüftungsmaßnahme mit Außenluftanteil. In den Stuttgarter Schulen kommt es daher zur Beurteilung der Wirksamkeit aller Fensterlüftungen und der dezentralen RLT-Anlagen im Solitude-Gymnasium und der Filderschule zum Einsatz. Die Wirksamkeit der Luftreinigungsgeräte lässt sich hingegen nur mit dem Testaerosol-Messprinzip beurteilen.

Da Luftreinigungsgeräte aufgrund des fehlenden Außenluftanteils keine gasförmige Stoffabfuhr (z.B. CO_2) gewährleisten können und somit nicht in der Lage sind, einen Außenluftwechsel zu ersetzen, werden in der Steig- und in der Wilhelmsschule Wangen die simultane Fensterlüftung bei laufendem Luftreinigungsgerät vermessen und anschließend bewertet.

Das Luftreinigungsgerät scheidet kontinuierlich alle Partikel durch seine Filterwirkung ab. Allerdings erlaubt nur die Messung der Konzentrationen der künstlich erzeugten DEHS-Partikel eine Aussage zur Infektionswahrscheinlichkeit. Beim Öffnen der Fenster gelangen allerdings Partikel von außen in den Raum, welche nicht aus DEHS bestehen. Dies ist allerdings für die Partikelmessstechnik so nicht identifizierbar. Es werden lediglich neue Partikel registriert, welche die Beurteilung des Infektionsrisikos verfälschen.

Aus diesem Grund wird bei der Vermessung der simultanen Wirkung eines Luftreinigungsgerätes und einer Fensterlüftung ergänzend die Partikelgrößenverteilung der

Außenluft über den Messzeitraum aufgenommen. Die Partikel der Außenluft sind in den meisten Fällen verhältnismäßig kleiner als die künstlich emittierten DEHS-Partikel.

Um den entstehenden Messfehler bei einer Fensteröffnung durch von außen eintretende, für eine Infektion aber irrelevante, Partikel minimal zu halten, werden für die Bewertung des Infektionsrisikos nur die Partikelgrößen betrachtet, welche **nicht** in der Außenluft enthalten sind. Je nach Außenluftzustand kann diese Grenzpartikelgröße je Messung individuell gewählt werden. Wichtig ist allerdings, dass sowohl auf Partikelemission- als auch auf -immissionsseite erst die Partikel ab diesem Grenzwert berücksichtigt werden. Bei der Umrechnung auf Quanta-Werte und damit auf das Infektionsrisiko PIRA wird dieser Zuschnitt der Messwerte berücksichtigt.

In den nachfolgenden Bildern wird exemplarisch der Unterschied (DEHS und Außenluft) beider Größenverteilungen bei den Messungen in zwei Schulen deutlich. Über die hellblaue Fläche wird zudem der für die Beurteilung des Infektionsrisikos herangezogene Partikelgrößenbereich in der jeweiligen Schule dargestellt.

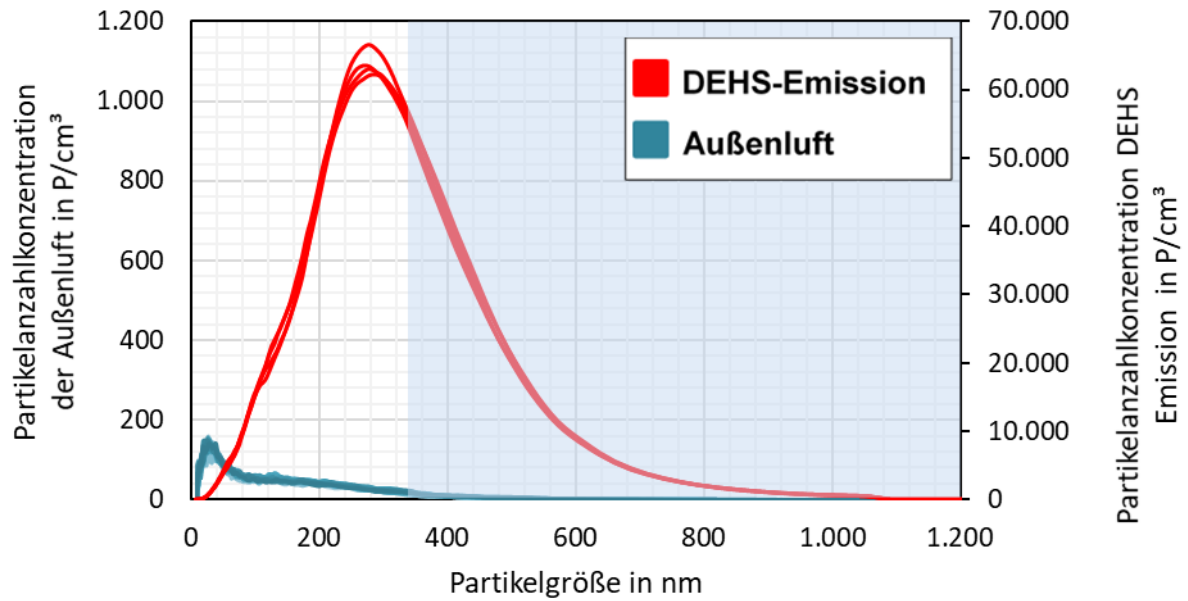


Bild 3-3: Steigschule Bau 1 - Partikelanzahlkonzentration der DEHS-Emission und der Außenluft

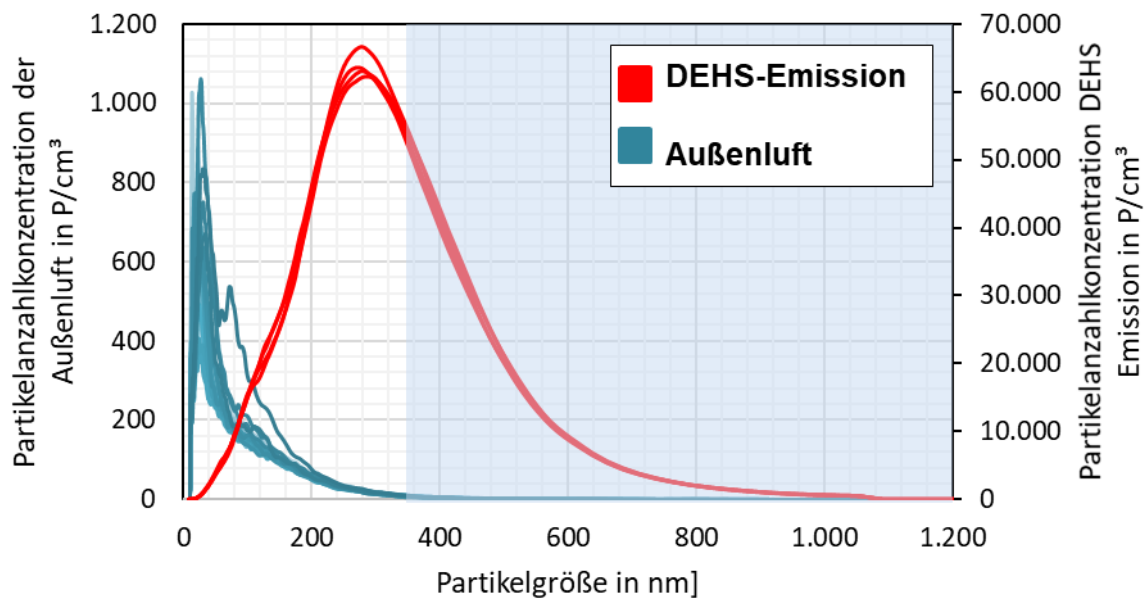


Bild 3-4: Wilhelmschule - Partikelanzahlkonzentration der DEHS-Emission und der Außenluft

3.5 Messen der Spurengasausbreitung

Zur Messung der Spurengasausbreitung wird ein Messwagen verwendet, der mit einem Gasanalysator (FTIR), einem Verdichter und einem Messstellenumschalter ausgestattet ist. An jeder Messstelle wird jeweils ein Pneumatik-Schlauch angebracht und mit dem Messwagen verbunden. Mithilfe des Verdichters wird die Luft an der aktiven Messstelle eingesogen und durch das System gefördert. Die gemessenen SF₆-Konzentrationen werden jeweils über einige Minuten gemittelt. Beim Umschalten der Messstellen wird berücksichtigt, dass das Durchspülen der Leitungen und Geräte etwas Zeit benötigt. Der Gasstrom wird nach erfolgter Messung außerhalb des Gebäudes wieder freigesetzt, um keine lokal verfälschten Stoffkonzentrationen zu verursachen. Bild 3-5 zeigt schematisch das Prinzip der Messstellenumschaltung.



Bild 3-5: Schematisches Prinzip der Messstellenumschaltung

Mit den beheizten Dummies wird eine Belegung der Klassenräume mit Personen simuliert. Ein zentral im Klassenraum positionierter Dummy stellt eine infektiöse Person dar und setzt SF₆ frei. Die Freisetzung erfolgt mit einem konstanten Volumenstrom und die Messstellen werden dabei an den jeweils umliegenden und bei Bedarf an weiter entfernten Dummies angebracht.

Die Freisetzung von SF₆ kann als ein Äquivalent zum Ausatmen (Emission) von Partikeln einer Person gesehen werden (siehe Kapitel 2.8). Die Annahme, dass die für ein Infektionsgeschehen relevanten Partikel vollständig luftgetragen sind resultiert in nachfolgendem Grundsatz, welches besagt, dass ein Verhältnis aus immissions- zu emissionsseitigen Stoffströmen an Spurengas gleich dem Verhältnis an Quanta für SARS-CoV-2 (siehe Kapitel 2.8) entspricht:

$$\frac{\dot{n}_{Im,SF_6}(t)}{\dot{n}_{Em,SF_6}} = \frac{\dot{n}_{Im,Quanta}(t)}{\dot{n}_{Em,Quanta}} \quad (3-8)$$

$\dot{n}_{Im,SF_6}(t)$ (zeitabhängige) SF₆-Immissionsrate in mol/h

$\dot{n}_{Em,SF_6}$ SF₆-Emissionsrate in mol/h

$\dot{n}_{Im,Quanta}(t)$ (zeitabhängige) Quanta-Immissionsrate in 1/h

$\dot{n}_{Em,Quanta}$ Quanta-Emissionsrate in 1/h

t Zeit in s

Die Immissions- werden im Gegensatz zu den Emissionsströmen als zeitlich variabel und damit von der Zeit t abhängig beschrieben. Die messtechnische Möglichkeit zur Erfassung des zeitlichen Konzentrationsverlaufs an SF_6 ermöglicht schließlich auch eine Ermittlung des zeitlichen Immissionsstroms.

Bei den Untersuchungen wird ein konstanter Volumenstrom von $0,001 \text{ m}^3/\text{h}$ SF_6 freigesetzt. Das entspricht nach Gleichung (3-9) folgender SF_6 Emissionsrate bzw. Stoffmengenstrom.

$$\dot{n}_{Em, \text{SF}_6} = \frac{\rho_{\text{SF}_6} \cdot \dot{V}_{\text{SF}_6}}{M_{\text{SF}_6}} = \frac{6,63 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,001 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{0,146 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}} = 0,045 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \quad (3-9)$$

$\dot{V}_{\text{SF}_6}$ Volumenstrom an SF_6 in m^3/h

ρ_{SF_6} Dichte von SF_6 in kg/m^3

M_{SF_6} Molmasse von SF_6 in kg/mol

Die gemessenen (zeitabhängigen) Konzentrationen an einem benachbarten Dummy unter Berücksichtigung eines statistischen Einatemvolumenstrom eines Menschen bei ruhiger sitzender Tätigkeit von $0,54 \text{ m}^3/\text{h}$ [24] beträgt nach Gleichung (3-10):

$$\dot{n}_{Im, \text{SF}_6}(t) = c_{Im, \text{SF}_6}(t) \cdot \dot{n}_{Einatmen} = \frac{c_{Im, \text{SF}_6}(t)}{1.000.000 \frac{\text{ppm}}{1}} \cdot \frac{\rho_{Luft} \cdot \dot{V}_{Einatmen}}{M_{Luft}} \quad (3-10)$$

$c_{Im, \text{SF}_6}(t)$ Gemessene (zeitabhängige) SF_6 -Konzentration in ppm

$\dot{V}_{Einatmen}$ Einatemvolumenstrom in m^3/h

ρ_{Luft} Dichte von Luft in kg/m^3

M_{Luft} Molmasse von Luft in kg/mol

Zur Bewertung des Infektionsrisikos muss die Anzahl kumulierter inhalierter Quanta während eines Expositionszeitraums ermittelt werden:

$$Q = \int_0^t \dot{n}_{Im, Quanta}(t) dt = \int_0^t \frac{\dot{n}_{Im, \text{SF}_6}(t)}{\dot{n}_{Em, \text{SF}_6}} \cdot \dot{n}_{Em, Quanta} dt$$

$$Q = \int_0^t \dot{n}_{Im, Quanta}(t) dt = \frac{\dot{n}_{Em, Quanta}}{\dot{n}_{Em, \text{SF}_6}} \int_0^t \dot{n}_{Im, \text{SF}_6}(t) \cdot dt \quad (3-11)$$

Gleichung (3-12) resultiert aus dem Einsetzen von Gleichung (3-10) in (3-11). Es gilt:

$$\begin{aligned}
Q &= \int_0^t \dot{n}_{Im,Quanta}(t) dt = \frac{\dot{n}_{Em,Quanta}}{\dot{n}_{Em,SF_6}} \int_0^t c_{Im,SF_6}(t) \cdot \dot{n}_{Einatmen} \cdot dt \\
Q &= \int_0^t \dot{n}_{Im,Quanta}(t) dt = \frac{\dot{n}_{Em,Quanta}}{\dot{n}_{Em,SF_6}} \cdot \dot{n}_{Einatmen} \int_0^t c_{Im,SF_6}(t) \cdot dt \quad (3-12) \\
Q &= \int_0^t \dot{n}_{Im,Quanta}(t) dt = \frac{\dot{n}_{Em,Quanta}}{\dot{n}_{Em,SF_6}} \cdot \frac{\rho_{Luft} \cdot \dot{V}_{Einatmen}}{M_{Luft} \cdot 1.000.000 \frac{ppm}{1}} \int_0^t c_{Im,SF_6}(t) \cdot dt
\end{aligned}$$

Durch die Erfassung des zeitlichen Verlaufs der Spurengaskonzentration an einem konkreten Platz lässt sich das zeitliche Integral mit dem numerischen Trapezverfahren berechnen. Unter Berücksichtigung der Vorfaktoren lassen sich somit spezifische Werte für die kumulierten inhalierten Quanta am jeweiligen Platz bestimmen.

Die in Kapitel 2.1 erläuterte Halbwertszeit der Aktivität von luftgetragenen Viren wird in dieser Studie nicht berücksichtigt, da das Alter der Luft an bestimmten Raumpositionen vor allem unter instationären Raumluftbedingungen messtechnisch quasi nicht bestimmt werden kann. Dadurch stellen die Ergebnisse der Stoffausbreitung (sowohl von Spurengas als auch von Testaerosolpartikeln) und damit auch die des Infektionsrisikos eine konservative Betrachtung (mit höherer Sicherheit) dar.

3.6 Messen der Testaerosolpartikelausbreitung

Mit einem Aerosolgenerator (AG) wird DEHS durch Druckluft in einer Zweistoffdüse zerstäubt. Die Druckluft wird dabei so eingestellt, dass ein dem Ausatemstrom angepasste Volumenstrom des Aerosols (Gemisch aus Luft und DEHS-Tropfen) von 0,54 m³/h resultiert [38]. Die in der Luft enthaltenen Partikel liegen dabei in einer kontrollierten hohen Anzahlkonzentration vor.

Für den emittierten Partikelstrom an DEHS gilt nach (3-13):

$$\dot{n}_{Em,DEHS} = c_{DEHS} \cdot \dot{V}_{Luft_AG} \quad (3-13)$$

$\dot{n}_{Em,DEHS}$ Emittierter Partikelstrom DEHS in 1/h

$\dot{V}_{Luft_AG}$ Volumenstrom des Aerosolgenerators in m³/h

c_{DEHS} Anzahlkonzentration an DEHS in 1/m³

Analog zu (3-8) gilt auch bei den Testaerosolen der folgende Zusammenhang:

$$\frac{\dot{n}_{Im,DEHS}(t)}{\dot{n}_{Em,DEHS}} = \frac{\dot{n}_{Im,Quanta}(t)}{\dot{n}_{Em,Quanta}} \quad (3-14)$$

$\dot{n}_{Im,DEHS}(t)$ (zeitabhängige) DEHS-Immissionsrate in mol/h

$\dot{n}_{Em,DEHS}$ SF₆-Emissionsrate in mol/h

$\dot{n}_{Im,Quanta}(t)$ (zeitabhängige) Quanta-Immissionsrate in 1/h

$\dot{n}_{Em,Quanta}$ Quanta-Emissionsrate in 1/h

t Zeit in s

Der immittierte DEHS-Partikelstrom eines benachbarten Dummies berechnet sich nach Gleichung (3-15).

$$\dot{n}_{Im,DEHS}(t) = c_{Im,DEHS}(t) \cdot \dot{V}_{Einatmen} \quad (3-15)$$

$c_{Im,DEHS}(t)$ Gemessene (zeitabhängige) DEHS Konzentration in 1/m³

$\dot{V}_{Einatmen}$ Einatemvolumenstrom in m³/h

Auch hier wird zur Bewertung des Infektionsrisikos die Anzahl kumulierter inhalierter Quanta während eines Expositionszeitraums ermittelt (3-16):

$$\begin{aligned} Q &= \int_0^t \dot{n}_{Im,Quanta}(t) dt = \int_0^t \frac{\dot{n}_{Im,DEHS}(t)}{\dot{n}_{Em,DEHS}} \cdot \dot{n}_{Em,Quanta} dt \\ Q &= \int_0^t \dot{n}_{Im,Quanta}(t) dt = \frac{\dot{n}_{Em,Quanta}}{\dot{n}_{Em,DEHS}} \int_0^t \dot{n}_{Im,DEHS}(t) \cdot dt \end{aligned} \quad (3-16)$$

Gleichung (3-17) resultiert aus dem Einsetzen von Gleichung (3-15) in (3-16). Es gilt:

$$\begin{aligned} Q &= \int_0^t \dot{n}_{Im,Quanta}(t) dt = \frac{\dot{n}_{Em,Quanta}}{\dot{n}_{Em,DEHS}} \int_0^t c_{Im,DEHS}(t) \cdot \dot{V}_{Einatmen} \cdot dt \\ Q &= \int_0^t \dot{n}_{Im,Quanta}(t) dt = \frac{\dot{n}_{Em,Quanta}}{\dot{n}_{Em,DEHS}} \cdot \dot{V}_{Einatmen} \int_0^t c_{Im,DEHS}(t) \cdot dt \end{aligned} \quad (3-17)$$

Durch die Erfassung des zeitlichen Verlaufs der Partikelkonzentration an einem konkreten Platz, lässt sich analog zur Spurengasmethode das zeitliche Integral mit dem numerischen Trapezverfahren berechnen. Unter Berücksichtigung der Vorfaktoren lassen sich auch hier spezifische Werte für die kumulierten inhalierten Quanta am jeweiligen Platz ermitteln.

Dabei wird die in Kapitel 2.1 erläuterte Halbwertszeit der Aktivität von luftgetragenen Viren nicht berücksichtigt, wodurch die ermittelten Infektionsrisiken überschätzt werden (konservative Betrachtung) und damit die tatsächlichen Infektionswahrscheinlichkeiten etwas niedriger ausfallen.

Messungen bei gleichzeitigem Betrieb eines Luftreinigungsgerätes und der Fensterlüftung erfolgen ebenfalls über das Testaerosol-Messprinzip. Ein Zuschnitt der betrachteten Partikelgrößen gemäß einer in Kapitel 3.4 beschriebenen Partikelmessung der Außenluft ermöglicht es, den dabei entstehenden Messfehler minimal zu halten und dennoch einen simultanen Einsatz beider Maßnahmen bewerten zu können.

3.7 Ermittlung der Infektionsrisiken

Um abschließend aus den in Kapitel 3.4 und 3.6 ermittelten kumuliert inhalierten Quanta auf ein Infektionsrisiko schließen zu können, erfolgt eine Umrechnung in die Infektionswahrscheinlichkeit PIRA (vgl. Kapitel 2.1).

Gleichung (3-18) zeigt die Rechenoperation.

$$PIRA = (1 - e^{-Q}) \cdot 100\% \quad (3-18)$$

PIRA Predicted Infections Risk via Aerosols (Infektionswahrscheinlichkeit) in %

Da die Messtechnik zur Stoffausbreitung begrenzt ist, werden je Klassenraum nur an 6 bis 7 der jeweils über zwanzig Sitzplätzen (Messstellen) die Infektionswahrscheinlichkeit PIRA ermittelt. Der Erwartungswert an Neuinfektionen und die Wahrscheinlichkeit für mindestens eine Neuinfektion im gesamten Klassenraum kann allerdings nach folgenden Ansätzen abgeschätzt werden.

Der Erwartungswert stellt den Wert an Neuinfektionen dar, der sich im Mittel einstellen wird. Er lässt sich nach Gleichung (3-19) berechnen:

$$\mu = n \cdot \frac{\sum_{i=1}^k PIRA_i}{k} \quad (3-19)$$

μ Erwartungswert an Neuinfektionen

n Anzahl an Personen im Klassenraum

$PIRA_i$ Infektionswahrscheinlichkeit an der Messstelle i in %

k Anzahl an Messpunkten

Die Wahrscheinlichkeit für mindestens eine Neuinfektion ist die Gegenwahrscheinlichkeit zum Ereignis, dass sich keine einzige Person im Klassenraum ansteckt. Da auch hier nur k (6...7) Messstellen simultan vermessen werden, kann ein ermittelter PIRA-Wert an einer Position vereinfachend stellvertretend $\frac{n}{k}$ Personen zugewiesen werden.

Die näherungsweise Wahrscheinlichkeit für mindestens eine Neuinfektion lässt sich daher nach Gleichung (3-20) berechnen.

$$\begin{aligned}
 P_{min.1} &= 1 - \prod_{i=1}^k (1 - PIRA_i)^{\frac{n}{k}} \\
 &= 1 - ((1 - PIRA_1)^{\frac{n}{k}} \cdot (1 - PIRA_2)^{\frac{n}{k}} \cdot \dots \cdot (1 - PIRA_k)^{\frac{n}{k}})
 \end{aligned}
 \tag{3-20}$$

$P_{min.1}$ Wahrscheinlichkeit für mindestens eine Neuinfektion

3.8 Behaglichkeitsmessung

3.8.1 Temperaturen

Zur Ermittlung der Temperatur im Klassenraum wird lokal an den jeweiligen Messstellen die Lufttemperatur über einen Betrachtungszeitraum von 90 Minuten gemessen. Die mittlere Raumlufttemperatur berechnet sich aus dem Mittelwert der sechs Messstellen.

3.8.2 Zugluftisiko

In diesem Kapitel wird das in den Schulen angewandte Vorgehen zur Behaglichkeitsmessung vorgestellt und einzelne Aspekte detaillierter erläutert. Dabei werden Luftreinigungsgeräte und RLT-Anlagen bei unterschiedlichen Leistungsstufen untersucht. Die Fensterlüftung wird hierbei aufgrund zeitlicher Fluktuation und der hohen Sensitivität bezüglich der meteorologischen Randbedingungen nicht betrachtet.

Bei der Behaglichkeitsmessung wird zur Abschätzung des Zuglufttrisikos die Lufttemperatur sowie die Luftgeschwindigkeit mittels eines Behaglichkeitsbaums in vier unterschiedlichen Höhen für jeden Messpunkt fünf Minuten lang erfasst. Die Berechnung erfolgt gemäß der in Kapitel 2.6 angegebenen Gleichung (2-2).

Hierzu wird für jeden Klassenraum zunächst der so genannte Aufenthaltsbereich definiert. Dabei sind die Abstände zu den äußeren und inneren Oberflächen des Raumes und zum installierten Luftreinigungsgerät bzw. zur RLT-Anlage festzulegen. Gemäß SIA 382/1:2007 [29] wird der Abstand zu Außenwänden mit 1 m und zu Innenwänden mit 0,5 m gewählt. Außerdem wird der Abstand zum Luftreinigungsgerät mit 1 m festgelegt. Die Anzahl an Messpunkten richtet sich nach der Länge und Breite des Raums. In den Schulen werden daher jeweils zwischen 9 und 15 Positionen vermessen (siehe Bild 3-6).

Die Messwertaufnehmer werden in vier unterschiedlichen Höhen installiert. Dabei wird davon ausgegangen, dass die SchülerInnen einer sitzenden Tätigkeit nachgehen, sodass in Kopfhöhe (1,1 m), Unterleibhöhe (0,6 m) und Fußknöchelhöhe (0,1 m) sowie zusätzlich in 1,7 m die örtliche Lufttemperatur und Luftgeschwindigkeit gemessen wird.

Bild 3-6 zeigt eine schematische Darstellung des Messkonzepts zur Bestimmung des Zugluftrisikos.

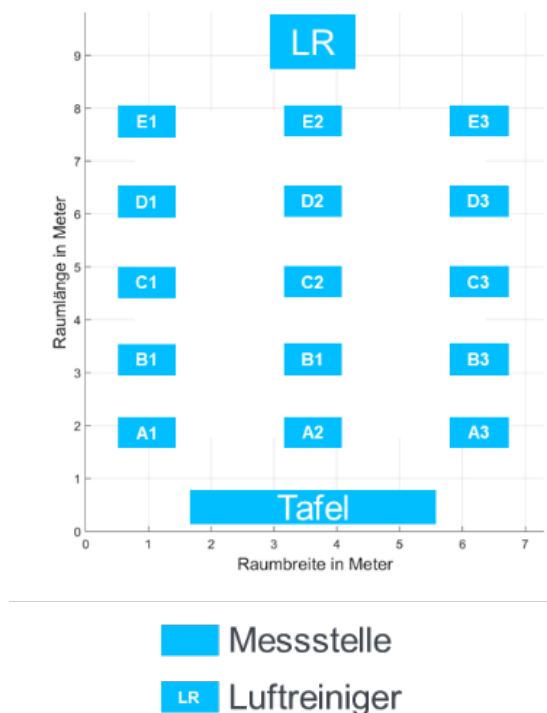


Bild 3-6: Schematische Darstellung der Messstellen für die Behaglichkeitsmessung

3.9 Schallmessungen

Die Messung des Schalldruckpegels wird in einem Raster durchgeführt. Hierzu wird an insgesamt neun Punkten der Schalldruckpegel im Raum während des Betriebs des Luftreinigungsgerätes bzw. der raumluftechnischen Anlage gemessen. In Bild 3-7 ist hierzu eine schematische Prinzipskizze eines Klassenraums dargestellt. Zudem wird eine Grundschallmessung durchgeführt (ohne Betrieb des Luftreinigungsgerätes/ der RLT-Anlage). Die Messungen des Schalldruckpegels erfolgen jeweils auf einer Höhe von 1,1 m nach DIN EN 14240 [25] mit einem Mikrofon (Bild 3-8). Das hierzu eingesetzte Messgerät hat eine Zertifizierung gemäß dem IEC/ISO 17025 Standard. Bei den Messungen der Schalldruckpegel werden jeweils gemäß VDI 2081 [19] die Schalldruckpegel für die Frequenzen im Bereich von 63 Hz bis 8 kHz ausgewertet. Die Messung bzw. Mittelung des A-bewerteten Schalldruckpegels erfolgt über eine Messdauer von jeweils 15 s mit einer Auflösung der Frequenzbänder von einer 1/3 Oktave.

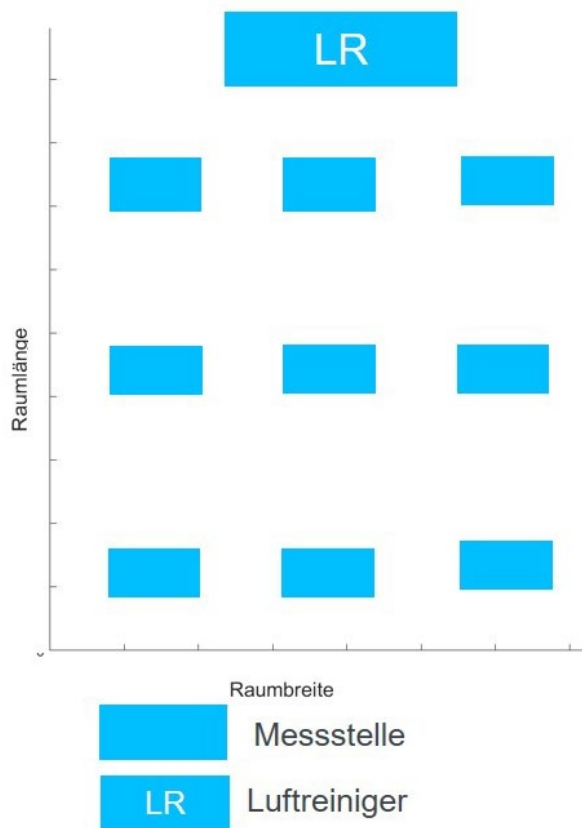


Bild 3-7: Schematische Darstellung des Messkonzepts (Schallmessungen)

Bild 3-8: Beispiel einer Schallmessung in einem Klassenraum

Für jeden Raum wird darüber hinaus die Nachhallzeit gemessen und ausgewertet. Zur Messung der Nachhallzeit wird eine Schallquelle mit homogener Charakteristik (rosa Rauschen) genutzt [39], welche mittels eines Lautsprechers im Raum erzeugt wird. Die gemessene Nachhallzeit für den unbelegten Raum wird mit zwei Personen (Messpersonal) im Raum ermittelt. Damit die Schallabsorption von Personen berücksichtigt werden kann, beschreibt DIN 18041 [32] ein Verfahren zur Umrechnung der Nachhallzeit von einem unbelegten in einen mit Personen belegten Raum. Die wesentlichen Einflussgrößen stellen hierbei die zusätzliche äquivalente Schallabsorptionsfläche der Personen und das Raumvolumen dar. Für die Umrechnung werden im belegten Fall jeweils 25 SchülerInnen (sitzend) und einer Lehrkraft (stehend) angenommen.

3.10 Umfragen bei SchülerInnen und Lehrkräften

Zur Einschätzung der Behaglichkeit sowie evtl. Einschränkungen beim Betrieb der Luftreinigungsgeräte oder RLT-Anlagen werden Umfragen bei SchülerInnen und Lehrkräften in der Testphase (kein Regelbetrieb) durchgeführt. Die Umfragen in den einzelnen Schulen werden während des Betriebs mit den Einstellungen aus der Messkampagne durchgeführt. Die Umfragen geben einerseits ein direktes Bild aus der Perspektive des Nutzers, andererseits können die Umfrageergebnisse den Messergebnissen gegenübergestellt werden.

Die Nutzer der untersuchten Klassenräume werden in unterschiedlicher Ausführung des Kurzfragebogens für SchülerInnen und Lehrkräfte zur Bewertung gebeten. Die Unterteilung erfolgt auf der Annahme, dass SchülerInnen im Raum gleichmäßig verteilt sitzen und Lehrkräfte sich meist stehend im vorderen Tafelbereich aufhalten. Lehrkräfte können außerdem den Gesamteindruck und die Auswirkungen auf die komplette Klasse über weitere Fragen wiedergegeben. Die Fragebögen sind im Anhang Kapitel 6.14 beigefügt.

Der Fragebogen erfasst in beiden Ausführungen zunächst Angaben zur Schule, Datum und personenspezifische Angaben wie Alter und Geschlecht. Diese Informationen dienen zur Einordnung der Ergebnisse und Identifikation des im jeweiligen Raum vorhandenen Luftreinigungsgerätes. Das Empfinden der Nutzer ist abhängig von der getragenen Kleidung, welche anhand der Außentemperatur am Befragungsdatum mit zu berücksichtigen ist. Die Angabe der Schulstunden im Klassenraum je Woche wird ebenfalls abgefragt. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass im Beantwortungszeitraum der „normale“ Schulbetrieb aufgrund der Covid-19-Verordnung des Landes BW eingeschränkt sein kann.

Der Hauptteil der Befragung besteht aus vier Aussagen, denen jeweils nach dem persönlichen Empfinden ein Zustimmungsgrad zuzuordnen ist. Dieser Zustimmungsbereich unterteilt sich in sechs Bereichen von „Stimme voll zu“ bis „Stimme gar nicht zu“. Die erste Aussage bezieht sich auf die subjektive Beurteilung des Schalls. Bei der Auswertung ist nicht nur die Schallintensität, sondern auch die Tonfrequenz von Bedeutung. Hohe und tiefe Frequenzen nimmt das menschliche Gehör sensibler wahr. Mit einer weiteren Aussage zur Verständlichkeit von Lehrkräften und MitschülerInnen wird indirekt die Lautstärke im Raum geprüft.

Zu hohe Strömungsgeschwindigkeiten, insbesondere zusammen mit geringeren Temperaturen, bergen die Gefahr, dass Zugerscheinungen bei den Nutzern auftreten. Dazu ist eine subjektive Beurteilung in der zweiten Aussage vorgesehen. Einen persönlichen Gesamteindruck der Einschränkungen ist durch die Bewertung der Konzentrationsfähigkeit bei SchülerInnen bzw. nach Beeinträchtigungen bei der Durchführung des Unterrichts bei Lehrkräften gegeben.

Lehrkräfte erhalten einen erweiterten Fragebogen. Dabei handelt es sich um eine Beurteilung des Gesamteindrucks der SchülerInnen aus der Perspektive der Lehrkraft.

Des Weiteren werden generelle Fragen bzgl. des Luftreinigungsgerätes gestellt, u.a. ob der Aufstellungsort zu Einschränkungen führt. Bedeutend ist auch die Frage, inwiefern Luftreinigungsgeräte ausgeschaltet oder in ihrer Leistung während des Schulbetriebs reduziert werden. Der Umgang der Klassen mit den Luftreinigungsgeräten stellt die abschließende Frage dar; Beschädigungen durch Vandalismus am Luftreinigungsgerät beeinflussen die Filterleistung und können den Luftreinigungsgerät ggf. außer Betrieb setzen.

In beiden Ausführungen kann am Ende des Fragebogens eine Anmerkung/Kritik verfasst werden.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aller Messungen vorgestellt.

4.1 Ergebnisse der Luftmarkierung mit Kaltnebel

Zur Visualisierung der Raumluchtströmung wird durch Nebelmaschinen erzeugter Kaltnebel eingesetzt. Die feinen Nebelpartikel werden von der Luftströmung mitgetragen und können diese so sichtbar machen. Oberflächen von Heizkörpern, Leuchten, technischen Geräten oder von im Raum anwesenden Personen geben in Form von Konvektion, die zu thermischen Auftrieb führt und Strahlung Wärme an die Raumlucht bzw. an die Raumumfassungsflächen ab. Im Folgenden werden ausgewählte Aufnahmen zu charakteristischen Raumluchtströmungen in Klassenräumen exemplarisch aufgezeigt. Bild 4-1 zeigt den durch einen Dummy verursachten thermischen Auftrieb.



Bild 4-1: Thermischer Auftrieb an einem Dummy

In Bild 4-2 a) ist zu erkennen, dass sich die Raumlucht in Heizkörpernähe erwärmt und aufgrund geringerer Dichte nach oben steigt. Die erwärmte Raumlucht bewegt sich entlang der Decke bis hin zur gegenüberliegenden Wandseite (Bild 4-2 b). Während dieses Vorgangs gibt der Luftstrahl kontinuierlich Wärme an die Umfassungsflächen des Raums und an die Raumlucht ab und sinkt Richtung Boden. Die abgekühlte Raumlucht strömt dann zurück zum Heizkörper.

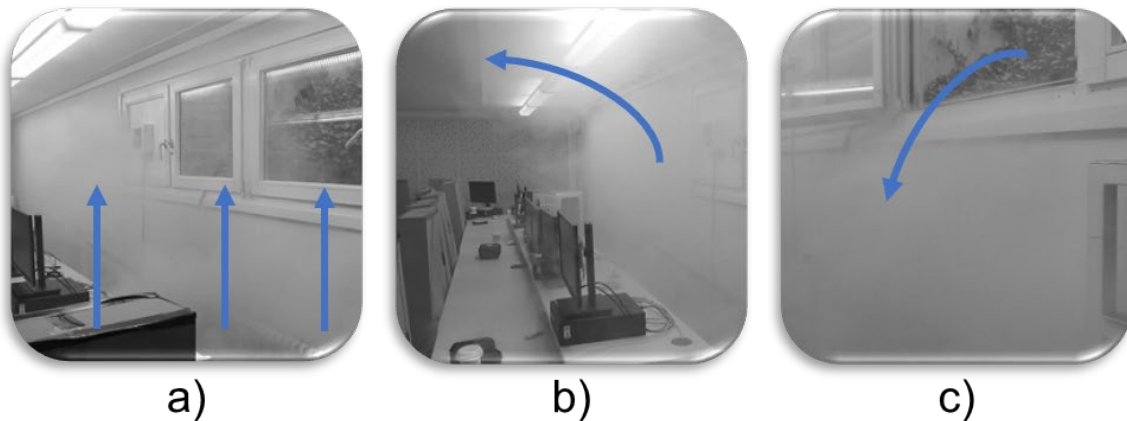


Bild 4-2: Raumluftrömung an Heizkörper und Fenster, Steinbeisschule Hauptbau

In Fensternähe tritt bei kalter Außenlufttemperatur infolge der kälteren Fensteroberfläche ein Kaltluftabfall auf. Dieser bewirkt, dass eine Luftströmung in Richtung des Bodens erfolgt. Die nach unten strömende Luft kann unter Umständen als unbehaglich wahrgenommen werden, weshalb in der Regel unterhalb der Fenster Heizkörper installiert werden, um diesem Kaltluftabfall entgegenzuwirken. In Bild 4-2 c) ist die Raumluftrömung bei geöffnetem Fenster zu sehen. Es lässt sich damit feststellen, dass im Vergleich zu Bild 4-2 a) die Raumluftrömung durch das geöffnete Fenster stärker als die Auftriebsströmung am Heizkörper ist und tendenziell Richtung Boden strömt.

Auch eine in Klassenräumen verbaute RLT-Anlage hat maßgeblichen Einfluss auf die Raumluftrömung. Bild 4-3 zeigt die Raumluftrömung in einem Klassenraum des Solitude-Gymnasiums, die durch die Zuluftströmung der RLT-Anlage dominiert wird. Die Zuluft (Bild 4-3 a)) strömt zunächst über den Köpfen der Dummies hinweg in Richtung Tafel und sinkt schließlich zu Boden (vgl. Bild 4-3 b)). Nach der Durchmischung mit Raumluftrömung strömt diese zur RLT-Anlage und wird am Ablufteinlass eingesaugt.

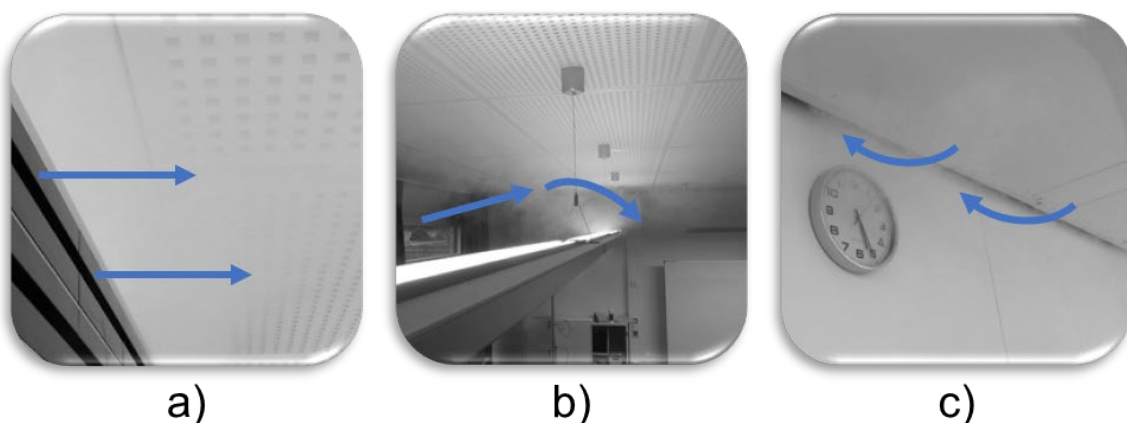


Bild 4-3: Raumluftrömung an der Zuluftöffnung, im Raum und an der Abluftöffnung

Die in den Klassenräumen betriebenen Luftreinigungsgeräte haben einen Einfluss auf die Raumluftrömung. Bild 4-4 a) zeigt die Raumluftrömung dominiert durch den Auslass und Bild 4-4 c) die Ansaugwirkung des Einlasses des Luftreinigungsgerätes AirPurifier der Firma Wolf im Zeppelin-Gymnasium. Die Geräte der Fa. Trox und Fa.

Wolf sind nahezu baugleich, wodurch auch das Strömungsverhalten ähnlich ist. Es ergibt sich ein vergleichbares Gesamtbild wie bei der RLT-Anlage im Solitude-Gymnasium: Am Auslass des Geräts wird die Raumluft mit hohem Impuls dem Raum zugeführt. Der Kaltnebel strömt oberhalb der Kopfhöhe der Dummies nach vorne in Richtung Tafel (Bild 4-4 b). Ein Großteil des Kaltnebels bewegt sich entlang der Decke in Richtung der Raummitte. Der am Boden befindliche Kaltnebel strömt über den Einlass des Luftreinigungsgerätes zurück ins Gerät.

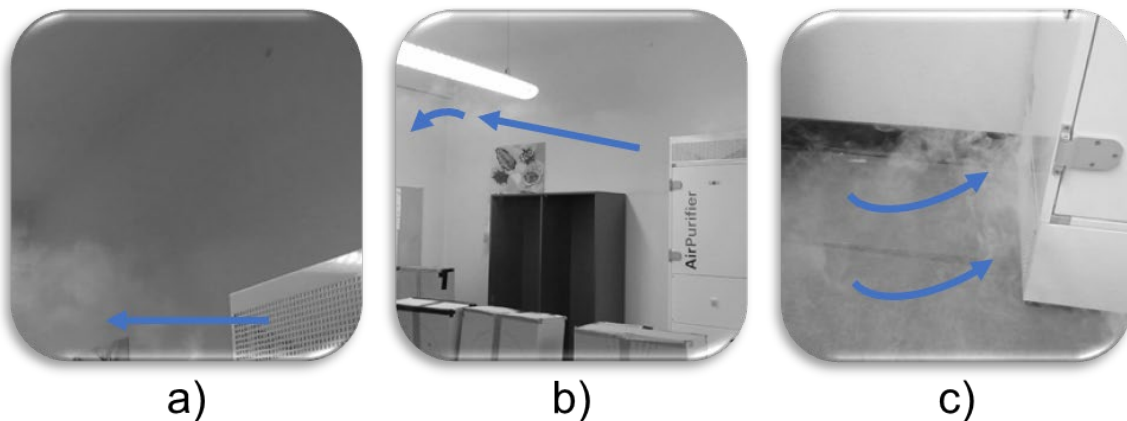


Bild 4-4: Raumluftrichtung infolge des Luftreinigungsgerätes, Zeppelin-Gymnasium

Bild 4-5 zeigt eine Visualisierung der Raumluftrichtung im Umfeld des Luftreinigungsgerätes OurAir SQ 2500 der Mann+Hummel GmbH bei Aufstellung im hinteren Teil eines Klassenraums im Wilhelms-Gymnasium. Hier finden sowohl Ansaugung als auch Auslass in Boden- bis Sitzhöhe statt. Bild 4-5 a) zeigt die Ansaugung der Raumluft, Bild 4-5 b) und c) den Auslass ohne bzw. mit Blende. Aufgrund der Blende (Normalfall) strömt die Luft nicht mit hohem Impuls von hinten nach vorne, sondern wird nach links und rechts abgelenkt. Über die Eindringtiefe in den Raum kann deshalb auf Grundlage der Kaltnebelausbringung keine detaillierte Aussage getroffen werden.

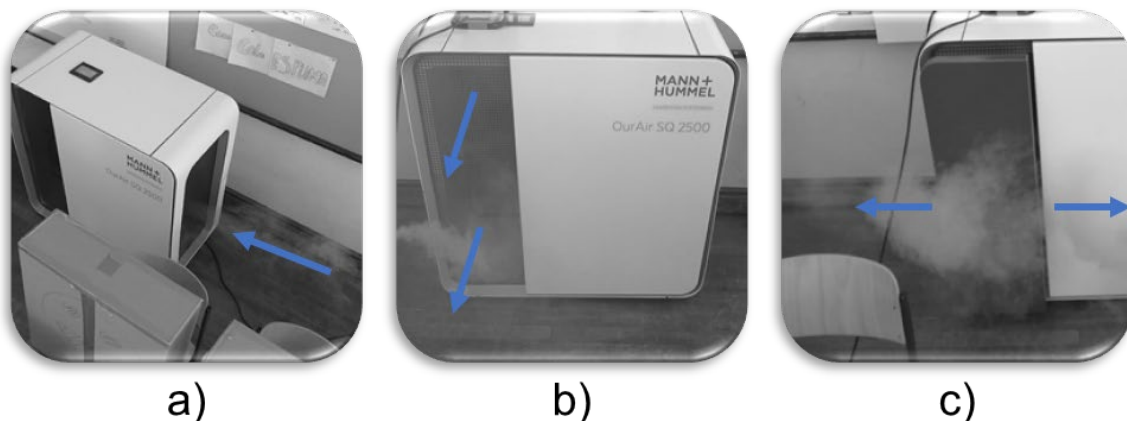


Bild 4-5: Raumluftrichtung infolge des Luftreinigungsgerätes, Wilhelms-Gymnasium

4.2 Stoffausbreitung und resultierende Infektionswahrscheinlichkeit

4.2.1 Allgemeine Erkenntnisse zur Stoffausbreitung

- Zunächst wird nochmals darauf hingewiesen, dass die bestimmten Infektionswahrscheinlichkeiten für eine Exposition von einer Doppelstunde (90 Minuten) gelten. Für die Beurteilung einer längeren Exposition müssen die Werte der kumuliert inhalierten Quanta über die Aufenthaltszeit aufaddiert werden, um wie in Kapitel 2.1 bzw. Bild 2-1 beschrieben, die dafür vorliegende Infektionswahrscheinlichkeit zu ermitteln.
- Es wird auf Kapitel 3.7 Bezug genommen. Selbst wenn PIRA-Werte an vereinzelten Messstellen beispielsweise nur 10% aufweisen, hat dieser Wert für die kollektive Betrachtung aller beispielsweise 20 anwesenden Personen im Klassenraum einen Erwartungswert von zwei Neuinfektionen zur Folge. Die nachfolgende Tabelle verdeutlicht diesen Aspekt.

Tabelle 4-1: Erwartungswerte an Neuinfektionen in Abhängigkeit der Schüleranzahl und des mittleren PIRA-Wertes

Schüleranzahl	15	20	25	30
Erwartungswert an Neuinfektion für ein mittleres PIRA = 5%	0,75	1	1,25	1,5
Erwartungswert an Neuinfektion für ein mittleres PIRA = 10%	1,5	2	2,5	3
Erwartungswert an Neuinfektion für ein mittleres PIRA = 15%	2,25	3	3,75	4,5

- Die für das Infektionsgeschehen relevanten Partikelgrößenfraktionen werden als ideal luftgetragen angesehen (vgl. Kapitel 2.1). Gemäß den Erwartungen kann in vorab durchgeführten Untersuchungen gezeigt werden, dass sich verschiedene Größenfraktionen tatsächlich quasi gleich schnell im Raum ausbreiten und somit alle gleichermaßen der Luftbewegung unterliegen. Verschiedene Größenfraktionen müssen daher nicht klassifiziert betrachtet werden, sodass eine kollektive Betrachtung in Form der Gesamtanzahlkonzentration zielführend ist.
- Beim Betrieb eines Luftreinigungsgerätes im Klassenraum kann generell aufgezeigt werden, dass nach einer gewissen Zeit eine örtlich homogene Partikelverteilung im Raum vorliegt. Dieses Phänomen ist auf ein wirksames Umwälzen der Sekundärluft und eine vereinzelt hohe Eindringtiefe des gefilterten Luftstroms zurückzuführen. Die Tatsache einer örtlich homogenen Partikelverteilung erlaubt ein Messen der Partikelkonzentrationen an weniger Messstellen als bei der Fensterlüftung (Spurengasmessungen).

- Beim Einsatz von Luftreinigungsgeräten sollte generell beachtet werden, dass diese keine Alternative zu einem Außenluftwechsel darstellen, sondern diese lediglich als Unterstützung zur Partikelreduktion eingesetzt werden sollten. Für die Abfuhr des von SchülerInnen und LehrerInnen freigesetzten CO₂ und Wasserdampfs muss weiterhin mit bestimmten Strategien gelüftet oder eine maschinelle Lüftungsanlage eingesetzt werden. Eine CO₂-Ampel kann hier ein geeignetes Mittel sein, um die Lüftungszyklen sinnvoll zu wählen. Im Rahmen der Pandemie sollte zur Einhaltung der Kategorie 1 gemäß DIN EN 15251 bzw. DIN EN16798 ein CO₂-Grenzwert von 800 ppm angestrebt werden [14].

4.2.2 Pausenlüftung

Die Messreihen werden über 90 Minuten durchgeführt. Da im Rahmen der gesamten Messkampagne allerdings ganze Schultage für die Bewertung des Infektionsrisikos herangezogen werden sollten, ist eine Betrachtung der Pausenlüftung unerlässlich. Nur wenn die Spurengas- und Partikelkonzentrationen wieder nahezu gegen null gehen, lässt sich daraus ableiten, dass dies auch für die Virenkonzentration im Raum gilt.

In diesem Fall ist zum einen gewährleistet, dass bei einem Klassenwechsel in einem Raum die nachfolgende Klasse keiner möglichen Virenbelastung durch die vorherige Klasse ausgesetzt ist und zum anderen ist dadurch eine Addition der kumulierten inhalierten Quanta bei einer Exposition über mehrere Doppelstunden möglich.

In Bild 4-6 sind die zeitlichen Spurengaskonzentrationsverläufe anhand der Klassenräume in der Steig- und Steinbeisschule Hauptbau für eine Fensterstoßlüftung mit den Intervallen 20/5/20 und eine 20-minütige Lüftungspause nach einer Doppelstunde (90 min) dargestellt. Das Luftreinigungsgerät ist bei allen Messreihen (über zwei Doppelstunden) nicht in Betrieb.

Hinweis: Bei diesen Diagrammen stehen die qualitativen Verläufe im Vordergrund. Die exakten Werte der Kurven sind an dieser Stelle nicht aussagekräftig.

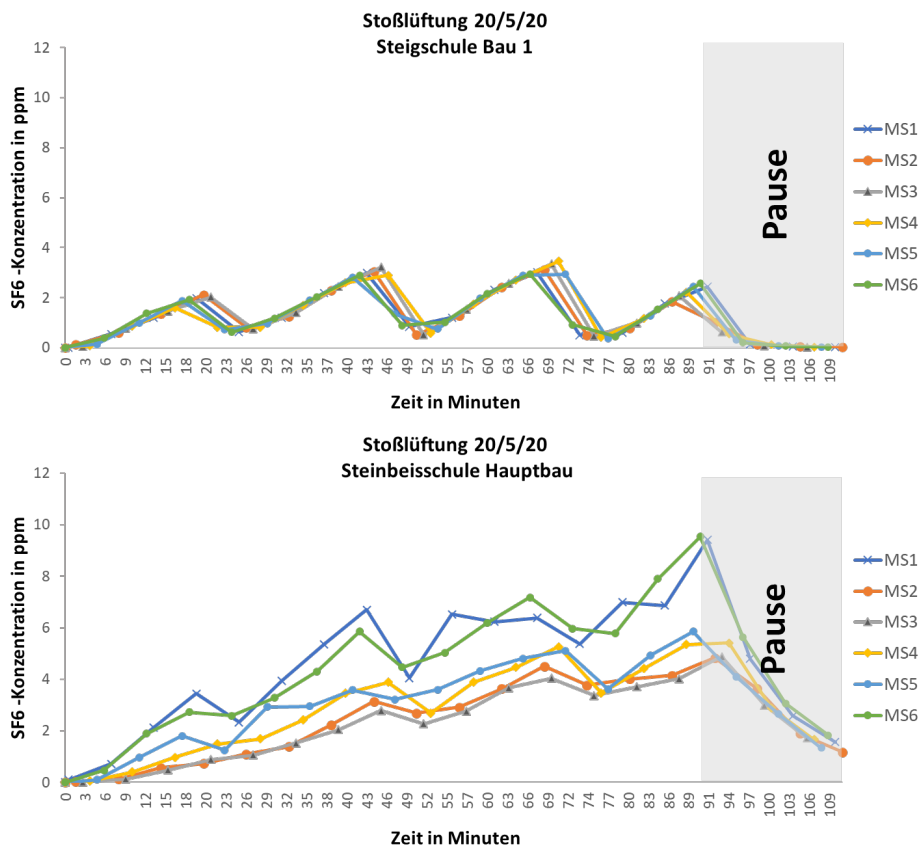


Bild 4-6: Spurengaskonzentrationsverläufe bei Stoßlüftung 20/5/20 und Pausenlüftung

In der oberen Darstellung (Steigschule Bau 1) zeichnen sich äquivalente Verläufe aller sechs örtlich verteilten Messstellen ab. Es ist ersichtlich, dass eine 20-minütige Fensterstoßlüftung in der Pause ausreicht, um die Stoffkonzentration quasi auf null herabzusenken. Daraus lässt sich ableiten, dass in dieser Schule der nutzbare Anteil an Öffnungsfläche der Fenster ausreichend ist, um bei den hier gegebenen Wetterbedingungen die Virenkonzentration während der Pause quasi auf null zu senken. Hieraus lässt sich allerdings noch keine Information zum Infektionsrisiko während einer Doppelstunde ableiten.

Im unteren Diagramm (Steinbeisschule Hauptbau) hingegen reicht die sehr geringe Gesamtöffnungsfläche nicht aus, um in einer 20-minütigen Lüftungspause die Spurengas-Konzentration gegen null zu senken. Stattdessen würde eine zweite Doppelstunde nun bereits auf einem höheren Konzentrationsniveau beginnen. Dies hätte für eine Klasse, die beide Doppelstunden in dem Klassenraum verbringt und in der sich eine infektiöse Person befindet, zur Folge, dass innerhalb der zweiten gegenüber der ersten Doppelstunde die kumulierte inhalierten Quanta jeder Schülerin/jedes Schülers für diese 90 Minuten zusätzlich ansteigen. Eine Klasse, die keinerlei infektiösen Personen ausgesetzt ist, aber nach einer Doppelstunde der erst genannten Klasse und der Lüftungspause in dem Raum unterrichtet wird, ist allerdings noch einer Restvirenkonzentration exponiert, welche sich erst im Laufe weiterer Fensterlüftungen abbauen würde. Beide Fälle sind im Hinblick auf ein potentiell Infektionsgeschehen inakzeptabel, weswegen in einem Klassenraum mit unzureichender Fensterfläche entweder eine Vergrößerung der Gesamtöffnungsfläche der Fenster vorgenommen oder eine raumluftechnische Maßnahme (Lüftungsanlage oder mobiles Luftreinigungsgerät) in Betracht gezogen werden sollte.

Bild 4-7 und Bild 4-8 zeigen die zeitlichen Spurengaskonzentrationsverläufe anhand der Klassenräume im Solitude-Gymnasium und in der Filderschule bei Betrieb der installierten RLT-Anlage. Dabei wird nach einer Doppelstunde (90 min) in der Pause keine 20-minütige Fensterstoßlüftung durchgeführt. Die Konzentration wird während der Pause über die RLT-Anlage abgeführt. Die RLT-Anlage in der Filderschule fördert nach Herstellerangabe einen Außenluftvolumenstrom von $915 \text{ m}^3/\text{h}$ und im Solitude-Gymnasium $600 \text{ m}^3/\text{h}$. Es zeigt sich, dass der Außenluftvolumenstrom im Solitude-Gymnasium nicht ausreichend ist um die Konzentration quasi auf null herabzusenken. Hingegen ist die RLT-Anlage in der Filderschule mit $900 \text{ m}^3/\text{h}$ ausreichend dimensioniert, um am Ende der Pause den Ausgangszustand wiederherzustellen.

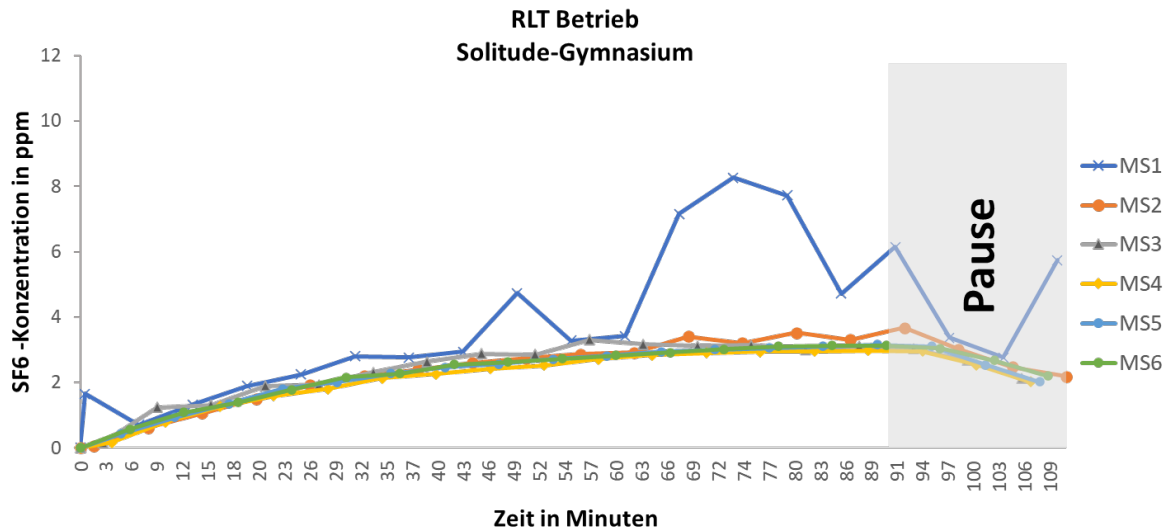


Bild 4-7: Spurengaskonzentrationsverläufe bei RLT-Betrieb mit 600 m³/h

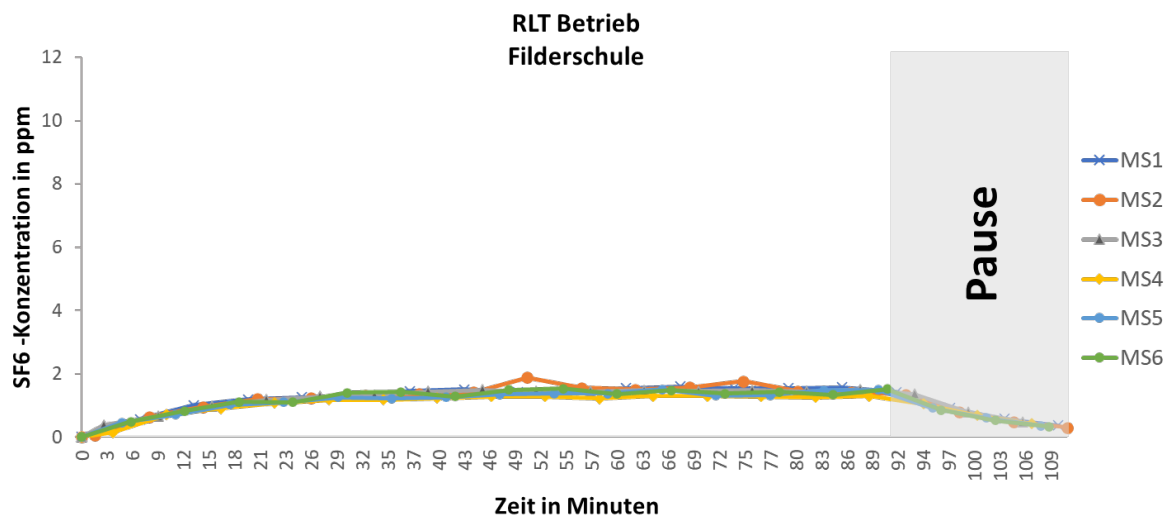


Bild 4-8: Spurengaskonzentrationsverläufe bei RLT-Betrieb mit 915 m³/h

In den folgenden Diagrammen (Bild 4-9 bis Bild 4-12) werden Partikelanzahl-Konzentrationsverläufe in den Räumen der Steigschule Bau 1 sowie der Wilhelmsschule Wangen dargestellt. In beiden Schulen reicht der Sekundär volumenstrom der Luftreinigungsgeräte in beiden betrachteten Leistungsstufen nicht aus, um in einer 20-minütigen Pause ohne Belegung die Partikelanzahl-Konzentration gegen null zu senken. Stattdessen würde eine zweite Doppelstunde nun bereits auf einem höheren Konzentrationsniveau beginnen. Dies hätte für eine Klasse, die beide Doppelstunden in dem Klassenraum verbringt und in der sich eine infektiöse Person befindet, zur Folge, dass innerhalb der zweiten gegenüber der ersten Doppelstunde die kumulierte inhalierten Quanta jeder Schülerin/jedes Schülers für diese 90 Minuten zusätzlich ansteigen. Im Hinblick auf ein potientiell es Infektionsgeschehen ist dies als kritisch zu bewerten, weswegen in einem Klassenraum zusätzlich weitere Lüftungsmaßnahmen getroffen werden müssen oder eine raumluftechnische Maßnahme (Lüftungsanlage) in Betracht gezogen werden sollte. Im Vergleich dazu zeigt Bild 4-8 auf, dass eine RLT-Anlage

trotz geringerem Volumenstrom gegenüber den Luftreinigungsgeräten (Bild 4-9 und Bild 4-11) nahezu den Ausgangszustand erreicht.

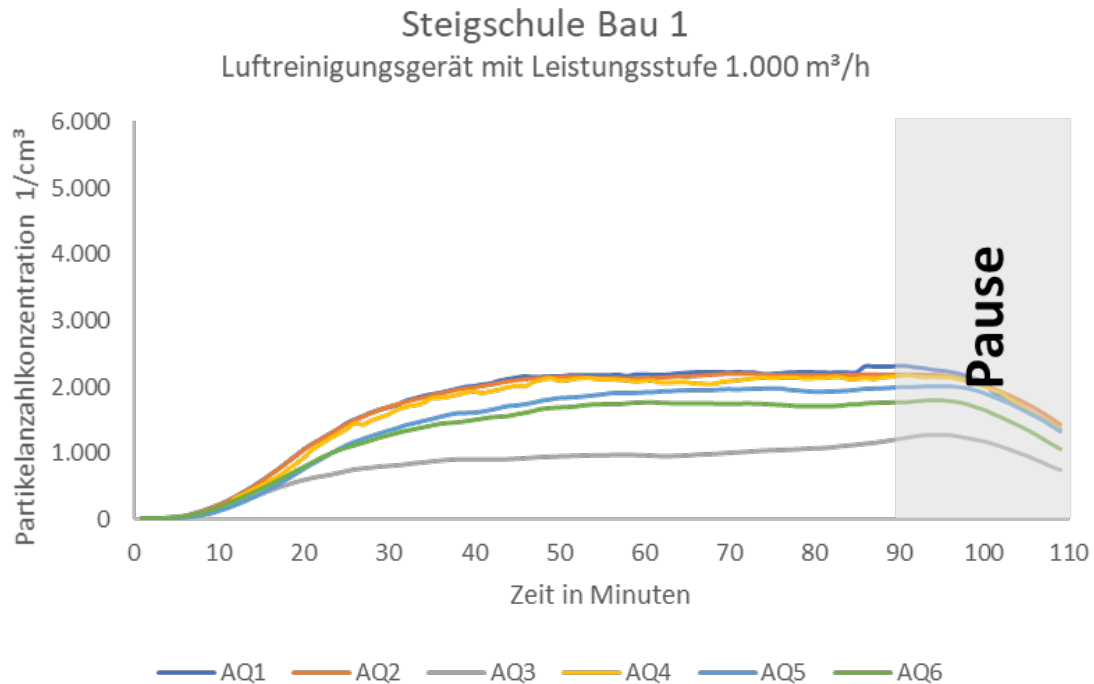


Bild 4-9: Partikelanzahlkonzentrationsverläufe bei Betrieb des Luftreinigungsgerätes mit 1.000 m³/h

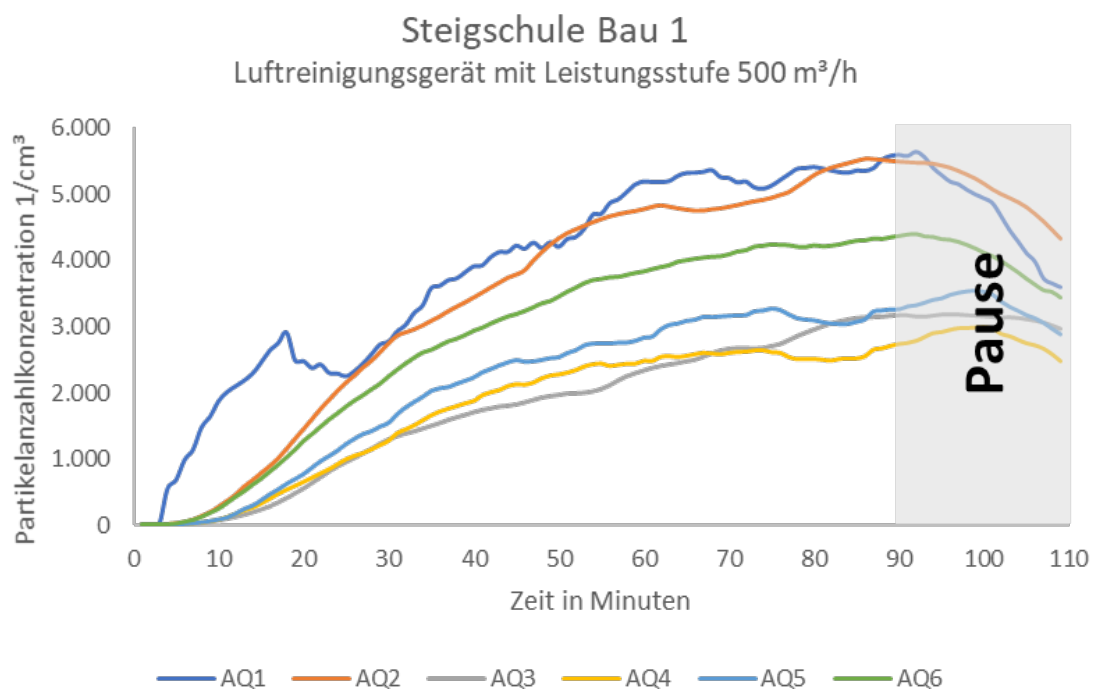


Bild 4-10: Partikelanzahlkonzentrationsverläufe bei Betrieb des Luftreinigungsgerätes mit 500 m³/h

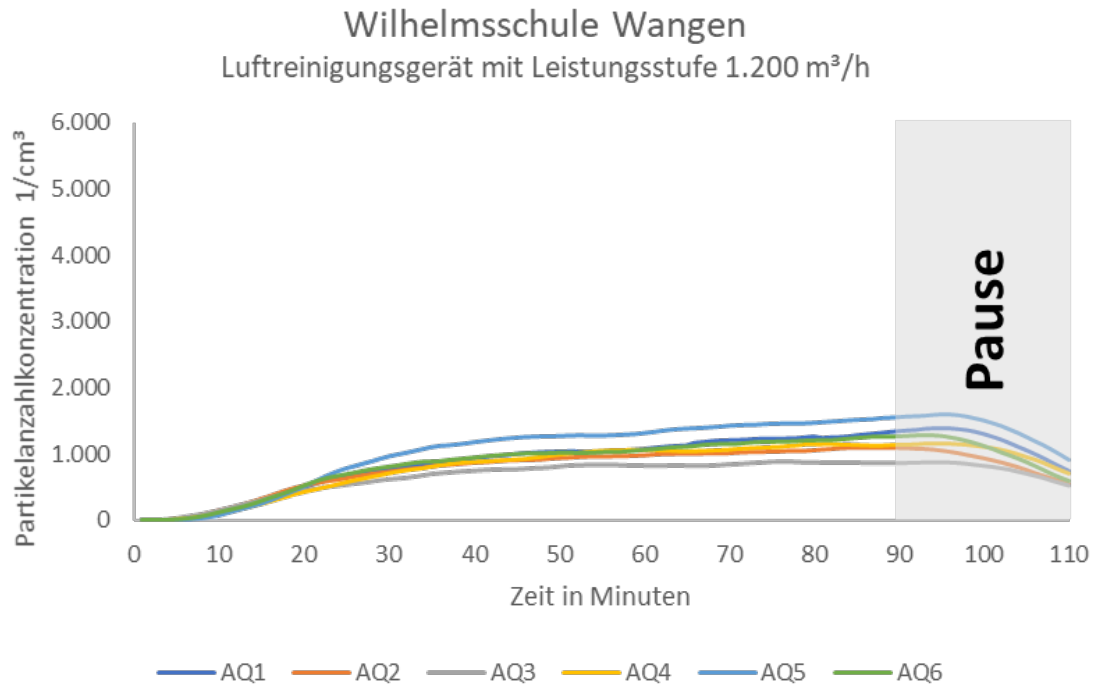


Bild 4-11: Partikelanzahlkonzentrationsverläufe bei Betrieb des Luftreinigungsgerätes mit 1.200 m³/h

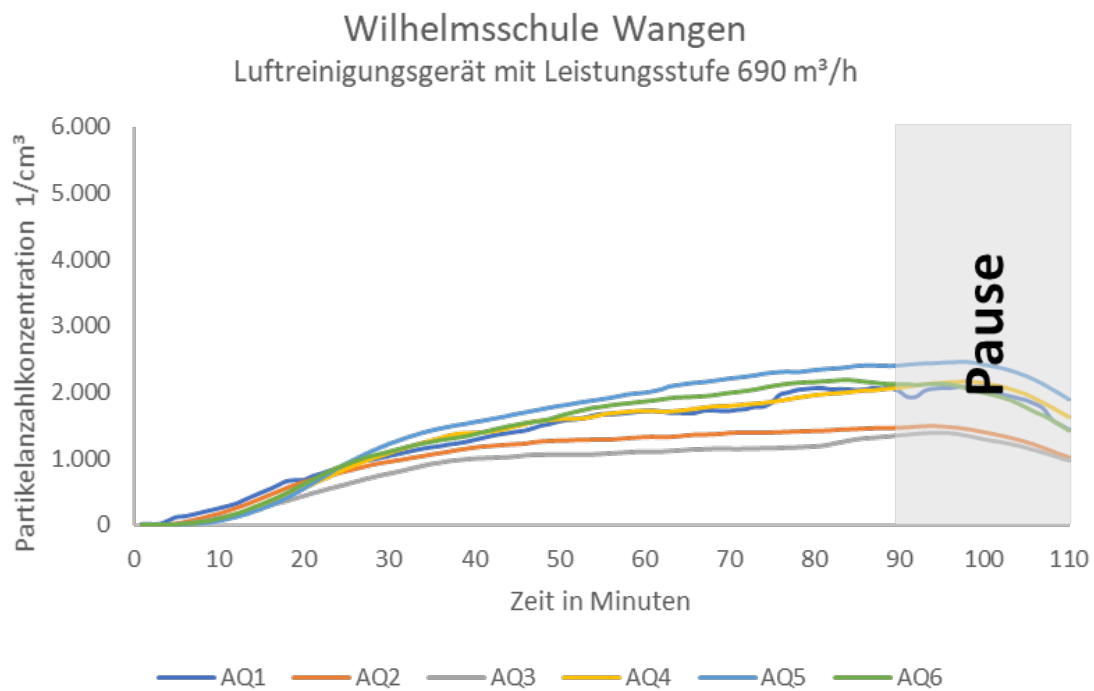


Bild 4-12: Partikelanzahlkonzentrationsverläufe bei Betrieb des Luftreinigungsgerätes mit 690 m³/h

4.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Um die verschiedenen Maßnahmen zur Verringerung der Infektionswahrscheinlichkeit vergleichen zu können, werden alle Ergebnisse jeder Maßnahme (V0-V6) zusammengefasst und in einem Boxplot Diagramm (siehe Bild 4-13) dargestellt. In jeder Schule werden hierzu die PIRA-Werte der einzelnen Messstellen gemittelt. Das Diagramm zeigt für jede Maßnahme die durchschnittliche, minimale und maximale Infektionswahrscheinlichkeit der je Klassenraum gemittelten Werte (Betrachtungszeitraum 90 Minuten). Hierbei wird zwischen den unterschiedlichen Lüftungsarten unterschieden. Außerdem werden die Luftreinigungsgeräte und die RLT-Anlage mit verschiedenen Stufen bzw. Volumenströmen sowie einer FFP2-Maske berücksichtigt.

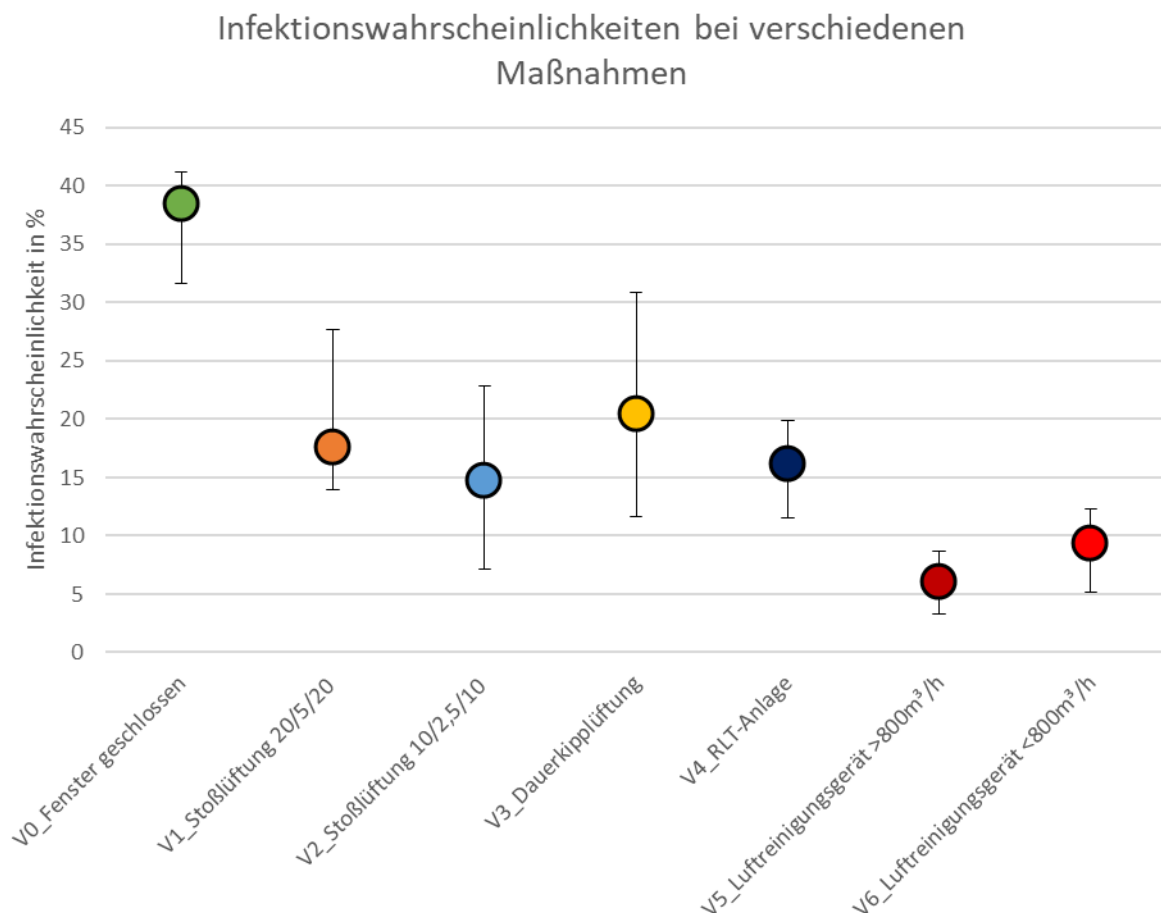


Bild 4-13: Infektionswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit verschiedener Maßnahmen (V0-V6) ohne FFP2-Maske

Im oberen Diagramm sind die unterschiedlichen Infektionswahrscheinlichkeiten der verschiedenen Maßnahmen zu erkennen. Es zeigt sich, dass bei geschlossenen Fenstern das Infektionsrisiko mit durchschnittlich ca. 38% am höchsten ist. Die geringste Infektionswahrscheinlichkeit von ca. 6% wird durch das Luftreinigungsgerät bei großen Volumenströmen erreicht. Hierbei werden jedoch die Behaglichkeitskriterien bezüglich Akustik und Zugluftrisiko überwiegend nicht eingehalten. Es erfolgt zudem kein CO₂- und Feuchteabtransport. Eine Volumenstromreduzierung des Luftreinigungsgerätes, welches zwar eine Verringerung des Zugluftrisikos und des Schalldruckpegels bewirkt,

hat aber zur Folge, dass die mittlere Infektionswahrscheinlichkeit auf ca. 10% ansteigt. Der Maximalwert liegt bei ca. 12% (Steinbeisschule Hauptbau) und der Minimalwert bei ca. 5% (Wilhelmsschule Wangen). Bei Messungen der Variante V7 „Luftreinigungsgerät und Stoßlüftung 20/5/20“ zeigt sich auf Basis von zwei Schulen (Steigschule Bau 1 und Wilhelmsschule Wangen), dass eine zusätzliche mittlere Reduzierung von bis zu ca. 40% im Vergleich zu V5 (hoher Volumenstrom) des Luftreinigungsgerätes erreicht werden kann.

Der Mittelwert der Stoßlüftungsvarianten V1 liegt bei 17,5% und V2 bei 15%. Es ist anzumerken, dass die Mittelwerte der Varianten V1 und V2 durch die Ausreißer in der Steinbeisschule Hauptbau (V1=28%) und Filderschule (V1=23%, V2=23%) erhöht werden; diese sind bedingt durch die dortigen geringen Fensterflächen. Ohne Berücksichtigung dieser zwei Werte liegt der Mittelwert bei ca. 15% (V1) bzw. 12,5% (V2). Bei den verschiedenen Lüftungsvarianten schneidet die 10/2,5/10-Strategie am besten ab und senkt die Infektionswahrscheinlichkeit auf ca. 15%. Die Strategie 20/5/20 weist eine mittlere Infektionswahrscheinlichkeit von ca. 17,5% auf. Diese Unterschiede sind zum einen auf die kürzeren und dafür häufiger anfallenden Lüftungsintervalle der 10/2,5/10-Strategie zurückzuführen. Zum anderen treten Beeinflussungen durch abweichende meteorologische Randbedingungen auf (vor allem im Zeppelin-Gymnasium bei der Stoßlüftung 20/5/20 und 10/2,5/10). Die Dauerkipplüftung ist im Vergleich weniger wirksam. Bei dem in der Darstellung aufgezeigten Minimalwert der Maßnahme sollte beachtet werden, dass bei der Uhlandschule eine verhältnismäßig große Kippöffnungsfläche zur Verfügung steht. Beim Betrieb einer RLT-Anlage hängt die Infektionswahrscheinlichkeit maßgeblich von deren Luftvolumenstrom ab. Bei Volumenströmen von ca. 600 m³/h sinkt die Wahrscheinlichkeit einer Infektion auf ca. 18,5%, bei einem Volumenstrom von 915 m³/h auf ca. 11,5%. Hier ist anzumerken, dass der Vergleich zwischen RLT-Anlagen und Luftreinigungsgeräten nur bedingt darstellbar ist, da zum einen in dieser Untersuchung nur eine geringe Anzahl an RLT-Anlagen berücksichtigt werden und diese in Bezug auf das Infektionsrisiko nur bedingt ausreichend dimensioniert sind.

Das Tragen einer FFP2-Maske trägt wesentlich zur Verringerung der Infektionswahrscheinlichkeit bei, da der Aerosolausstoß beim Aus- und Einatmen verringert wird (vgl. Kapitel 2.4). Bild 4-14 zeigt die Infektionswahrscheinlichkeiten unter Berücksichtigung einer FFP2-Maske für die jeweiligen Maßnahmen.

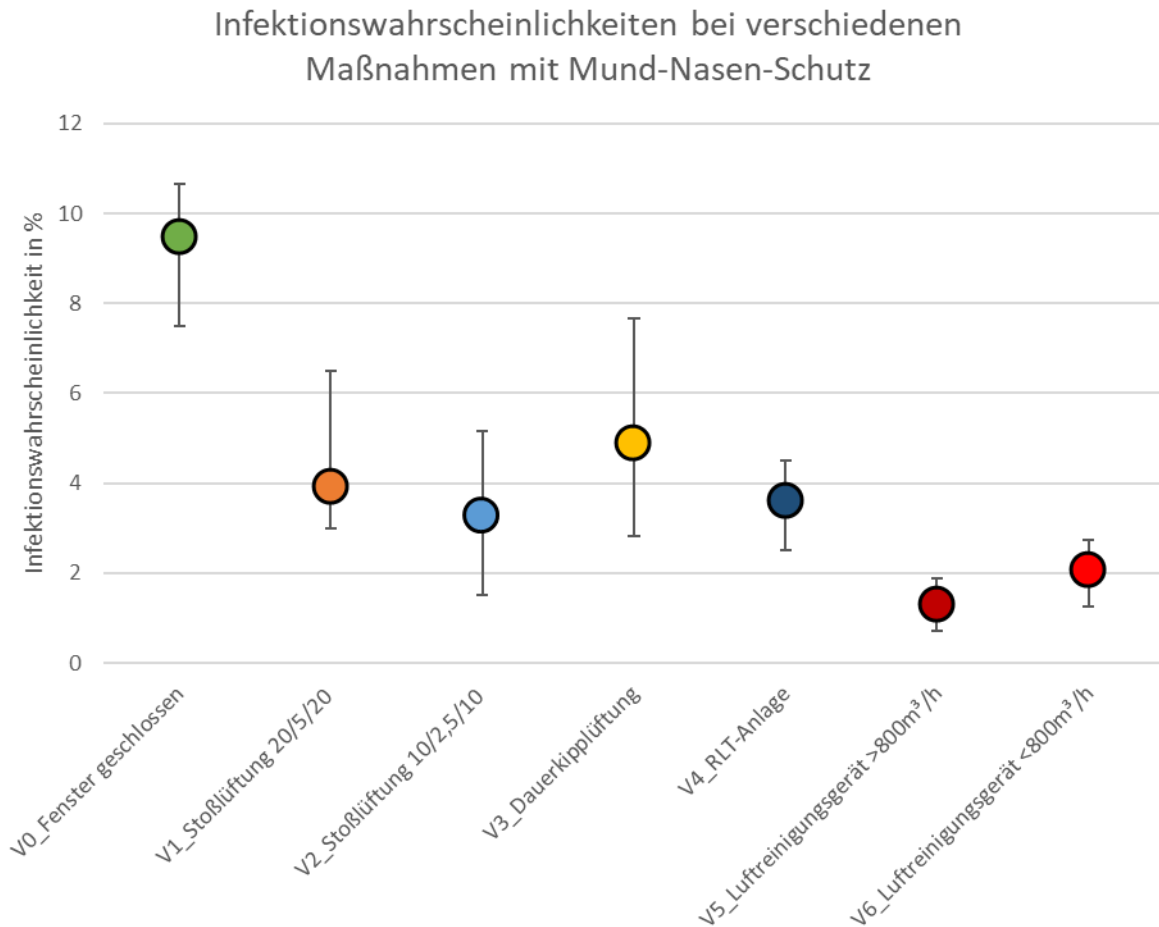


Bild 4-14: Infektionswahrscheinlichkeit beim Tragen einer FFP2-Maske in Abhängigkeit verschiedener Maßnahmen (V0 bis V6)

Im Diagramm ist ersichtlich, dass die Infektionswahrscheinlichkeit durch das Tragen einer FFP2-Maske deutlich geringer ausfällt. Bei der Fensterlüftungsstrategie 10/2,5/10 liegt das Risiko einer Infektion noch bei etwas mehr als 3%. Im Gegensatz dazu beträgt dieses 15% beim Unterrichten ohne Maske. Auch beim Tragen von Masken ist die Infektionswahrscheinlichkeit bei geschlossenen Fenstern am höchsten und bei der Stoßlüftungsstrategie 10/2,5/10 am geringsten.

Da die Infektionswahrscheinlichkeiten auch innerhalb einer Maßnahme variieren, werden die verschiedenen Maßnahmen genauer untersucht und einzeln dargestellt. Bei einer Stoßlüftung hat die maximal nutzbare Fensteröffnungsfläche, sowie die Außentemperatur einen Einfluss auf den Verlauf der Aerosolkonzentration innerhalb des Klassenraums. Die untersuchten Räume in den Schulen haben alle unterschiedliche Fensteröffnungsflächen. Sie variieren zwischen 1,4 m² und 8,7 m². Da der Mittelwert der nutzbaren Fensteröffnungsfläche etwa 5 m² beträgt, wird im folgenden Boxplot-Diagramm zwischen einer Fensterfläche größer und kleiner als 5 m² unterschieden. Bei der Ermittlung des Mittelwertes werden die Fensterflächen der Gewerblichen Schule für Farbe und Gestaltung und der Klausorraum im Zeppelin-Gymnasium nicht berücksichtigt, da diese keine typischen Klassenräume darstellen.

Die Ergebnisse der beiden Stoßlüftungsvarianten V1 (20/5/20) und V2 (10/2,5/10) sind in Bild 4-15 zusammengefasst dargestellt.

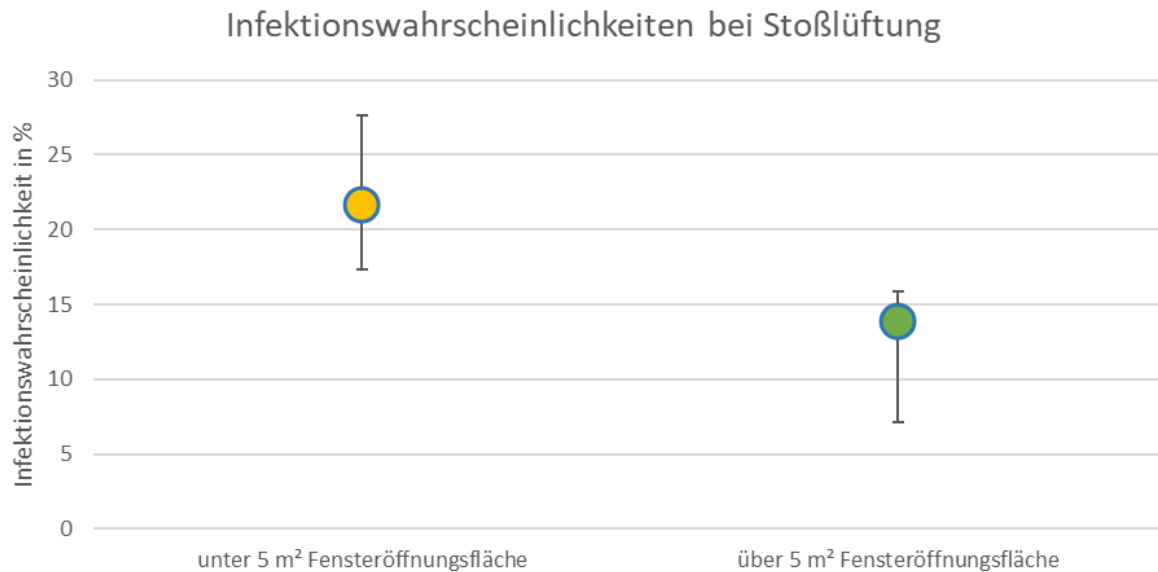


Bild 4-15: Infektionswahrscheinlichkeit bei Stoßlüftung (V1, V2) in Abhängigkeit der Fensteröffnungsfläche und der Außentemperatur

Aus dem Diagramm geht hervor, dass bei der Verwendung größerer Fensteröffnungsflächen eine geringere Infektionswahrscheinlichkeit resultiert. Dies lässt sich dadurch erklären, dass bei einer größeren Fensteröffnungsfläche der Außenluftwechsel entsprechend höher ausfällt und damit auch die Aerosolkonzentration im Innenraum innerhalb der Lüftungszeit schneller sinkt. Am Beispiel der Steinbeisschule Hauptbau mit 1,5 m² Fensterfläche (PIRA: 28%) und der Filderschule mit Fensterfläche von 1,4 m² (PIRA: 23%) zeigt sich, dass bei einer geringen Fensterfläche eine erhöhte Infektionswahrscheinlichkeit resultiert. Die Erhöhung der möglichen Fensteröffnungsfläche wäre diesbezüglich eine sinnvolle Maßnahme zur Verringerung der Infektionswahrscheinlichkeit. So könnte in der Schwabschule, die eine große potentiell offenbare Fensterfläche besitzt, die jedoch nicht genutzt werden konnte (verschlossen bzw. keine Fenstergriffe), durch eine Erhöhung der nutzbaren Fensteröffnungsfläche das Infektionsrisiko reduziert werden. Am Beispiel der Steinbeisschule Hauptbau zeigt sich, dass Klassenräume, die eine geringe Fensterfläche besitzen, ein hohes Infektionsrisiko aufweisen. Wenn keine Möglichkeit der Fensterflächenoptimierung besteht, wird empfohlen, eine dezentrale RLT-Anlage bzw. ein Luftreinigungsgerät zu installieren.

Bereits in Bild 4-15 wird anhand der Fensterlüftung ersichtlich, dass der Volumenstrom der Lüftungsmaßnahme mit der Infektionswahrscheinlichkeit korreliert. Der genaue Zusammenhang wird in Bild 4-16 verdeutlicht. Es ist zu erkennen, dass die Messwerte der Stoßlüftungen 20/5/20 und 10/2,5/10 nahe am theoretischen Verlauf liegen. Die Volumenströme stellen die bei geöffneten Fenstern auftretenden Volumenströme dar. Je höher der Volumenstrom bzw. Außenluftwechsel, desto geringer fällt die Infektionswahrscheinlichkeit aus.

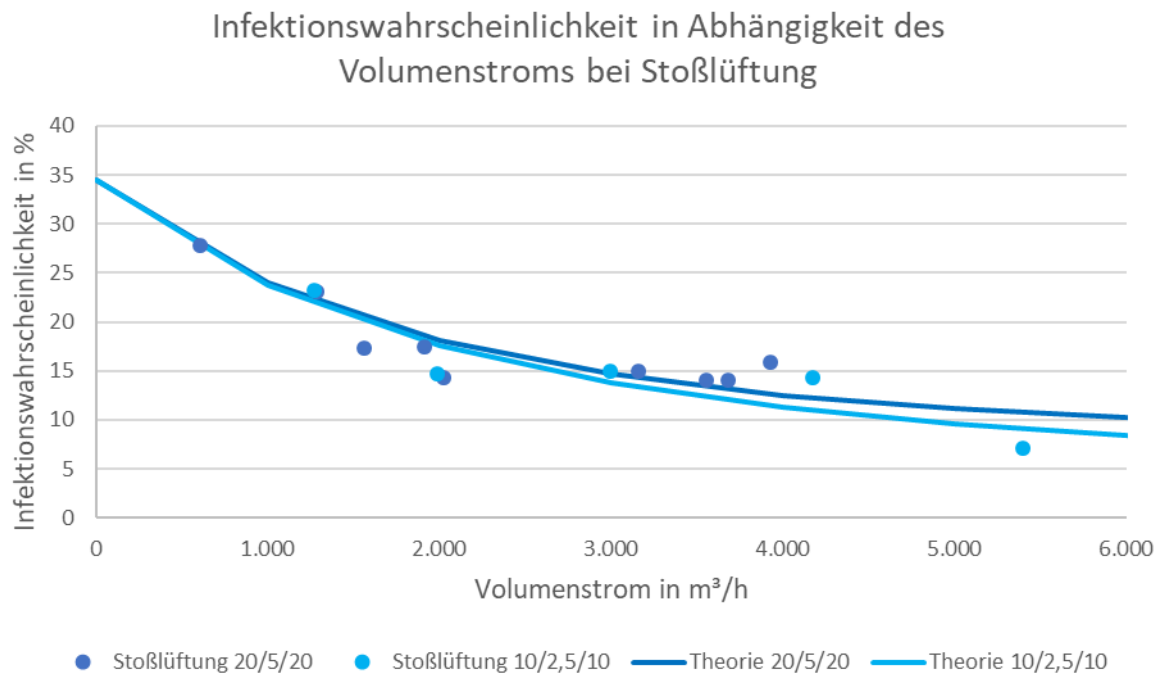


Bild 4-16: Infektionswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit des Volumenstroms bei Stoßlüftung 20/5/20 und 10/2,5/10, **ohne** FFP2-Maske

Auch bei Maßnahmen maschinell geförderter Luft (Luftreinigungsgerät und RLT-Anlage) ist zu beobachten, dass mit steigendem Volumenstrom das Infektionsrisiko sinkt (siehe Bild 4-17).

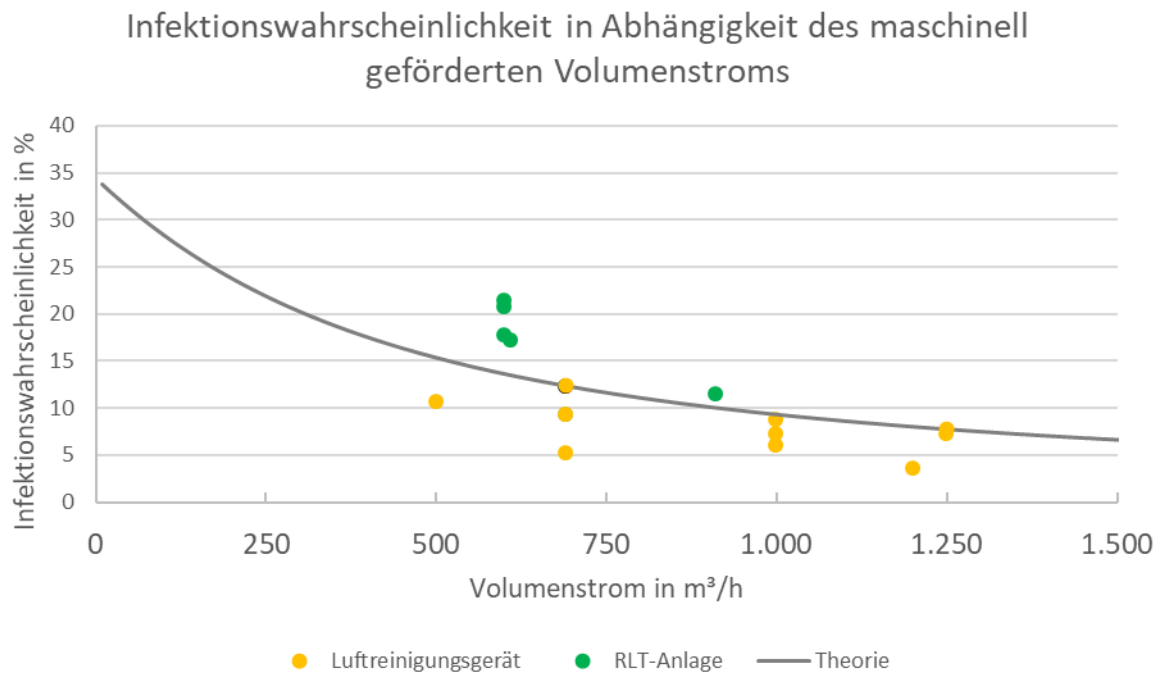


Bild 4-17: Infektionswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit des maschinell geförderten Volumenstroms bei Luftreinigungsgeräten und RLT-Anlagen **ohne** FFP2-Maske

Die aus der Messung resultierenden Infektionswahrscheinlichkeiten der RLT-Anlagen liegen im Gegensatz zu den Werten der Luftreinigungsgeräte oberhalb der theoretisch ermittelten. Dadurch wird nicht das gesamte Potential des Infektionsschutzes durch die RLT-Anlage ausgeschöpft. Eine mögliche Ursache könnte in einem zusätzlichen Fort-/Außenluftübertrag aufgrund der Einbausituation (geringer Abstand zwischen Fort- und Außenluft) der gemessenen RLT-Anlagen liegen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Aerosolkonzentration und letztlich die Infektionswahrscheinlichkeit mit der Höhe des Luftstroms, der entweder als Außenluft in den Raum über Fenster oder RLT-Anlagen geführt wird oder über ein Luftreinigungsgerät als Umluft im Raum gefiltert wird, korreliert. In der Studie erzielten die Luftreinigungsgeräte beim Betrieb mit den höchsten Volumenströmen auch die niedrigsten Aerosolkonzentrationen. Wie bereits erläutert sind dabei die Luftreinigungsgeräte zu laut und die Luftgeschwindigkeiten und Turbulenzgrade der Raumluchtströmung sind nicht behaglich. Es liegt nahe, dass diese Betriebsweise von SchülerInnen und LehrerInnen für den normalen Unterricht nicht akzeptiert werden. Die Infektionswahrscheinlichkeit in den Klassenzimmern mit RLT-Anlagen ist aufgrund der gegenüber den eingesetzten Luftreinigungsgeräten geringeren Luftvolumenströmen etwas höher. Dies liegt daran, dass die untersuchten RLT-Anlagen geringere Volumenströme fördern als die Luftreinigungsgeräte. Für die zukünftige Planung von RLT-Anlagen sollten die Luftströme höher dimensioniert werden, um die bereits erläuterte Kategorie höchster Raumluchtqualität in Klassenräumen zu erreichen. Auch das Stoßlüften hat einen großen Einfluss auf die Infektionswahrscheinlichkeit, hierbei ist die Stoßlüftungsstrategie 10/2,5/10 am wirksamsten. Die Dauerkippplüftung trägt zwar zur Verringerung der Wahrscheinlichkeit einer Infektion bei, jedoch geringer als die Stoßlüftungsvarianten und ist deshalb und aus energetischer Sicht nicht empfehlenswert. Um die Infektionswahrscheinlichkeit durch das Stoßlüften weiter zu senken, sollte eine Vergrößerung der maximal möglichen Fensteröffnungsfläche angestrebt werden.

4.3 Behaglichkeitsmessungen

4.3.1 Temperaturverläufe

Im Folgenden werden die Temperaturverläufe der Steigschule Bau 1 und der Filderschule für unterschiedliche Maßnahmen aufgezeigt. Der Betrachtungszeitraum ist eine 90-minütige Unterrichtsstunde sowie eine anschließende Pause von 20 Minuten. Zur Beurteilung des gesamten Klassenraumes sind die erhobenen Temperaturen über alle Messstellen gemittelt.

In Bild 4-18 ist der jeweilige Temperaturverlauf für die Stoßlüftung 20/5/20 und 10/2,5/10 sowie bei Betrieb des Luftreinigungsgerätes für den Klassenraum in der Steigschule Bau 1 bei einer Außentemperatur zwischen 7 und 9°C dargestellt. Der Verlauf für beide Stoßlüftungsvarianten zeigt, dass die Temperaturabnahme durch die Stoßlüftung gering ausfällt. Die anfängliche kältere Raumlufthtemperatur bei Variante 20/5/20 von ca. 17°C resultiert aus der vorherigen Pausenlüftung (Herstellung der Ausgangsbedingung). Hierbei zeigt sich, dass die Raumlufthtemperatur in kurzer Zeit mit den installierten Heizkörpern die Raumsolltemperatur von 20°C wieder erreicht.

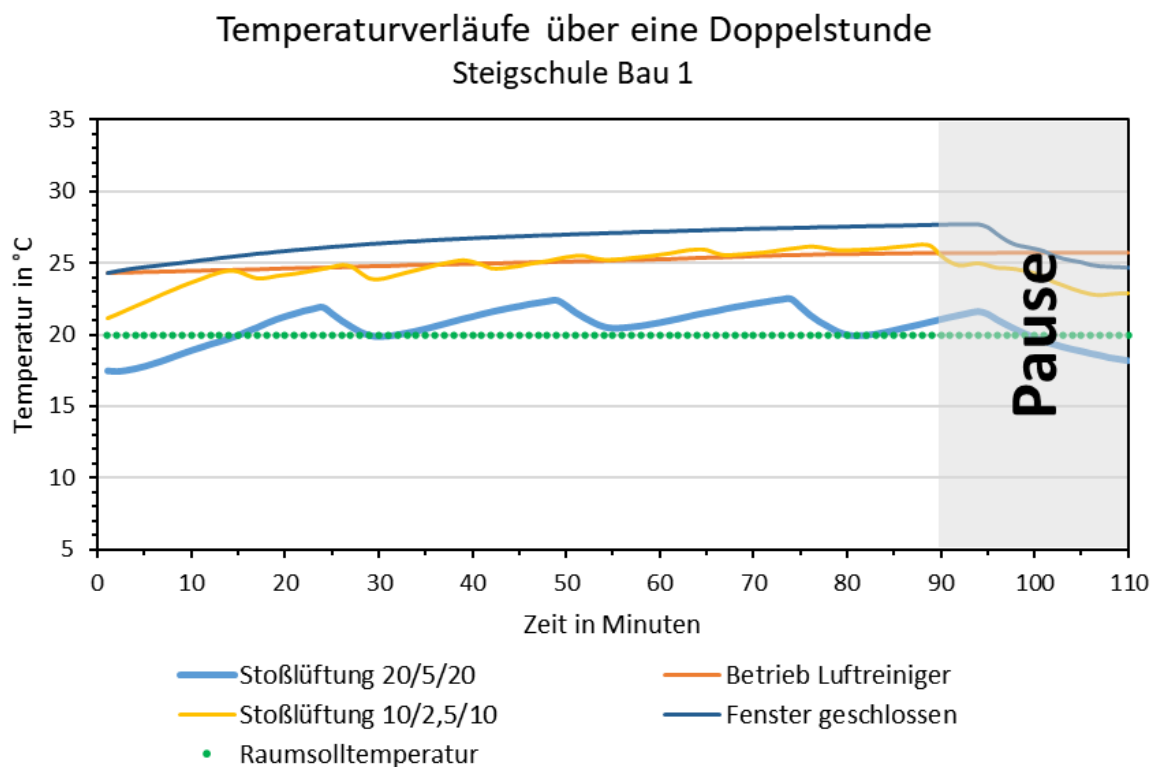


Bild 4-18: Temperaturverläufe über eine Doppelstunde, Steigschule Bau 1

Die in Bild 4-19 dargestellten Temperaturverläufe des Klassenraums in der Filderschule bei einer Außentemperatur von 1,5...9,5°C unterschreiten während der gesamten Doppelstunde die Raumsolltemperatur nicht. Zur Wiederherstellung der Ausgangsbedingungen nach der Unterrichtsstunde ist in der Pause die maximal nutzbare Öffnungsfläche zur Lüftung genutzt worden. Dabei zeigt sich, dass die Temperatur in diesem Klassenraum nach 20 Minuten auf minimal 20°C absinkt.

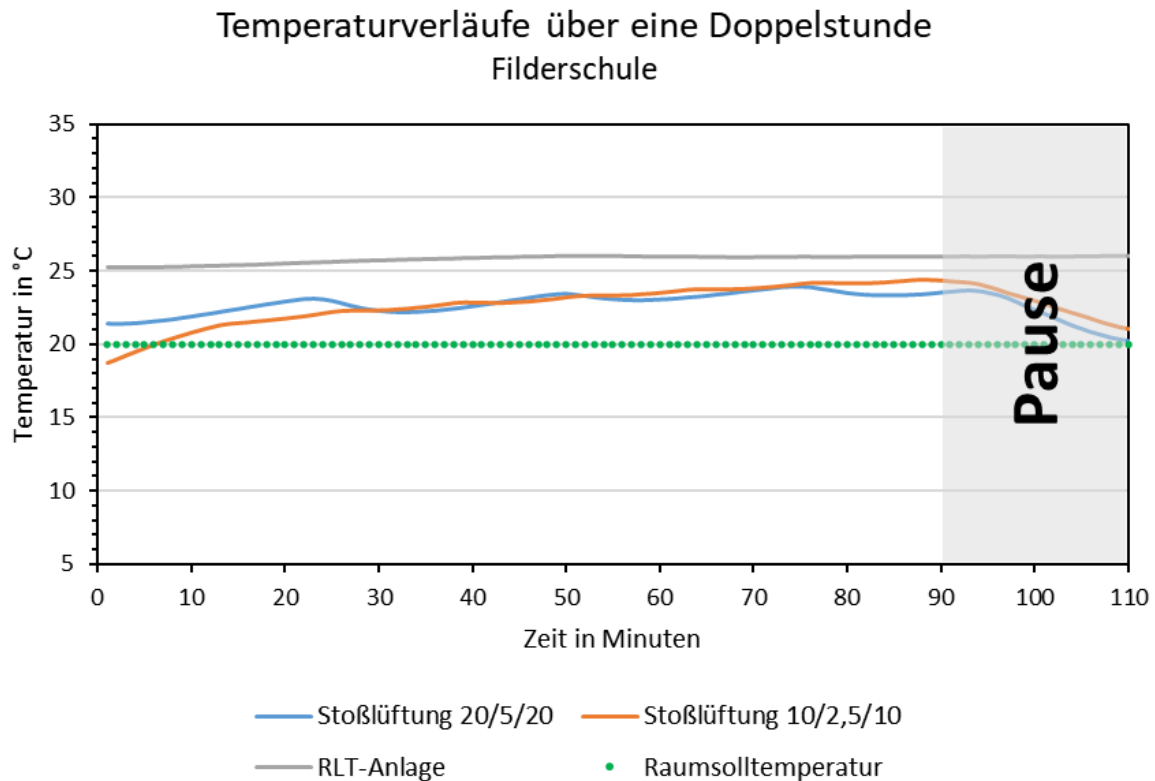


Bild 4-19: Temperaturverläufe über eine Doppelstunde, Filderschule

Zusammenfassend kann bemerkt werden, dass die Fensterlüftungsmaßnahme an diesen Tagen unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingungen (Außenlufttemperatur, Wind und solarer Wärmeeintrag) einen Einfluss auf die Raumlufttemperatur hat. Die Raumsolltemperatur kann jedoch über den gesamten Betrachtungszeitraum überwiegend eingehalten werden. Es treten im Vergleich zur Steigschule Bau 1 trotz niedrigerer Außentemperatur nur geringere Temperaturabnahmen während des Stoßlüftens auf. Dies ist auf die geringe Fensterfläche und dem damit verbundenen geringeren Lüftungswärmeverlust zurückzuführen. Trotz der Temperaturabnahme während der Pause (Unterschreitung der Raumsolltemperatur) wird empfohlen, die maximal mögliche Öffnungsfläche zu verwenden, um den Ausgangszustand wiederherzustellen.

4.3.2 Zugluftrisiko

Für die Bestimmung des Zugluftrisikos werden die installierten Luftreinigungsgeräte und RLT-Anlagen gemäß den Einstellungen in Kapitel 3.1 in Betrieb genommen. Das gemäß SIA 382/1 [29] ermittelte Zugluftrisiko ist für die untersuchten Höhen und Positionen im Raum in Bild 4-20, Bild 4-21 und Bild 4-22 dargestellt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse zwischen den einzelnen Messpunkten interpoliert sind.

Das Zugluftrisiko, welches in den betreffenden Räumen der Wilhelmsschule Wangen und Steigschule Bau 1 durch das Luftreinigungsgerät hervorgerufen wird, liegt mehrheitlich außerhalb der definierten Kategorien [28] und ist somit als nicht behaglich zu bewerten. Eine Reduzierung des Volumenstroms – beispielhaft in der Steigschule Bau 1 untersucht - minimiert das Zugluftrisiko, und unterschreitet vereinzelt an gewissen

Positionen im Raum die 30%. Bei einem Zugluftrisiko von 30% wird die Kategorie C eingehalten mit 15% an unzufriedenen Nutzern.

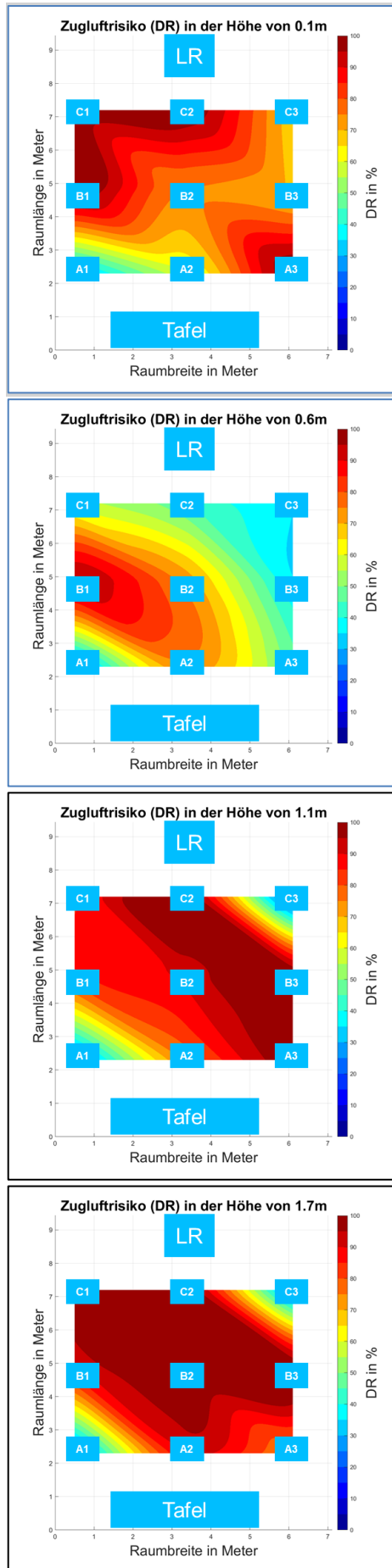
Für das mehrheitlich geringere Zugluftrisiko in der Steigschule Bau 1 ist die Zuluftführung/-strömung in den Raum verantwortlich. Im Gegensatz zum frontalen/diagonalen Zuluftdurchlass – bspw. in der Wilhelmsschule Wangen – wird in der Steigschule Bau 1 die Zuluft über seitliche Zuluftdurchlässe eingebracht, sodass eine direkte Anströmung an den Sitzplatz verhindert wird.

Die in Bild 4-22 dargestellten Zuglufterscheinungen bei RLT-Betrieb in der Filderschule weisen in beiden Leistungsstufen überwiegend ein hohes Zugluftrisiko auf. Dies ist zurückzuführen auf den zu kleinen Zuluftquerschnitt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Luftreinigungsgeräte sowohl bei hohen als auch bei geringeren Volumenströmen Zuglufterscheinungen an den jeweiligen Messpositionen hervorrufen. Lediglich das Gerät mit seitlichen Zuluftdurchlässen, das eine direkte Anströmung verhindert, weist an einzelnen Positionen ein geringeres Risiko auf.

Die Messungen bei RLT-Betrieb weisen ein ähnliches Zugluftrisiko auf wie bei den Luftreinigungsgeräten. Dies ist jedoch wesentlich darauf zurückzuführen, dass der Zuluftquerschnitt dieser Anlagen in diesen Räumlichkeiten sehr klein gewählt ist. Hier könnte eine nachträgliche Querschnittvergrößerung am Luftdurchlass Abhilfe schaffen.

Wilhelmsschule Wangen: $n_{\text{sekundär}} = 5,2 \text{ 1/h}$



Wilhelmsschule Wangen: $n_{\text{sekundär}} = 3,0 \text{ 1/h}$

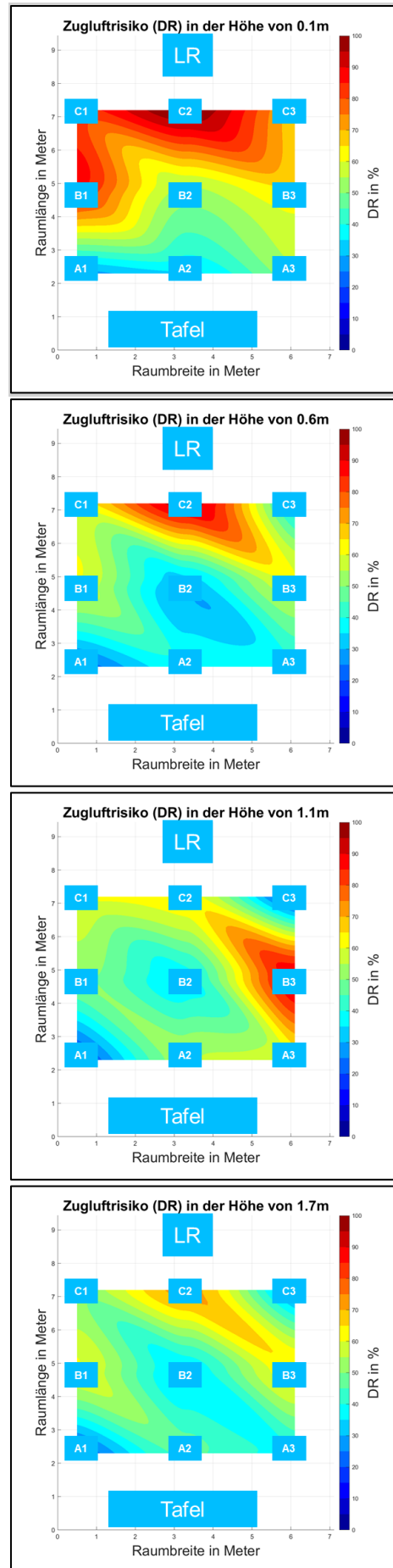
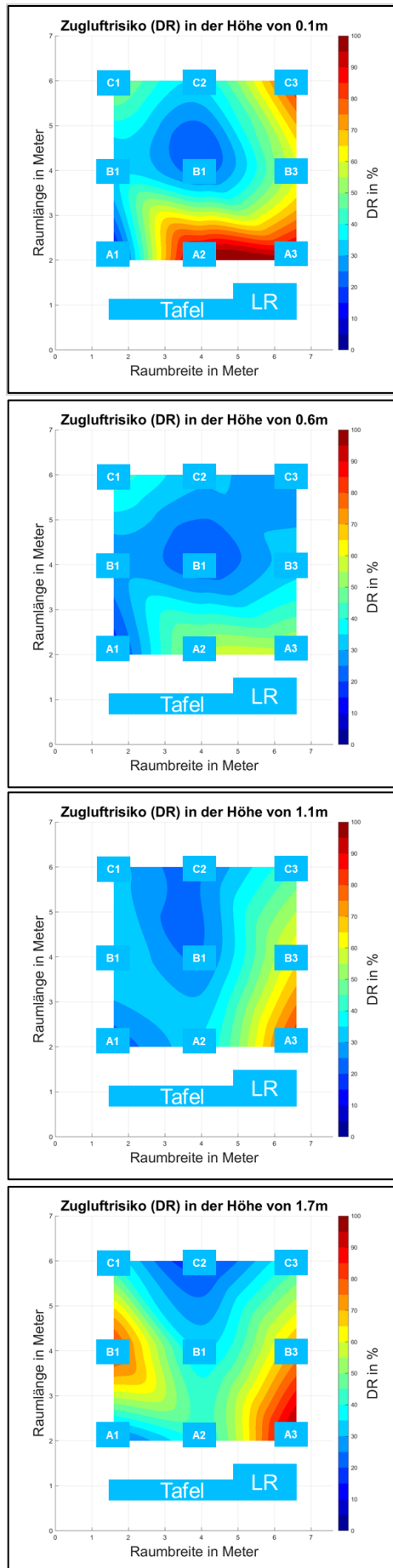
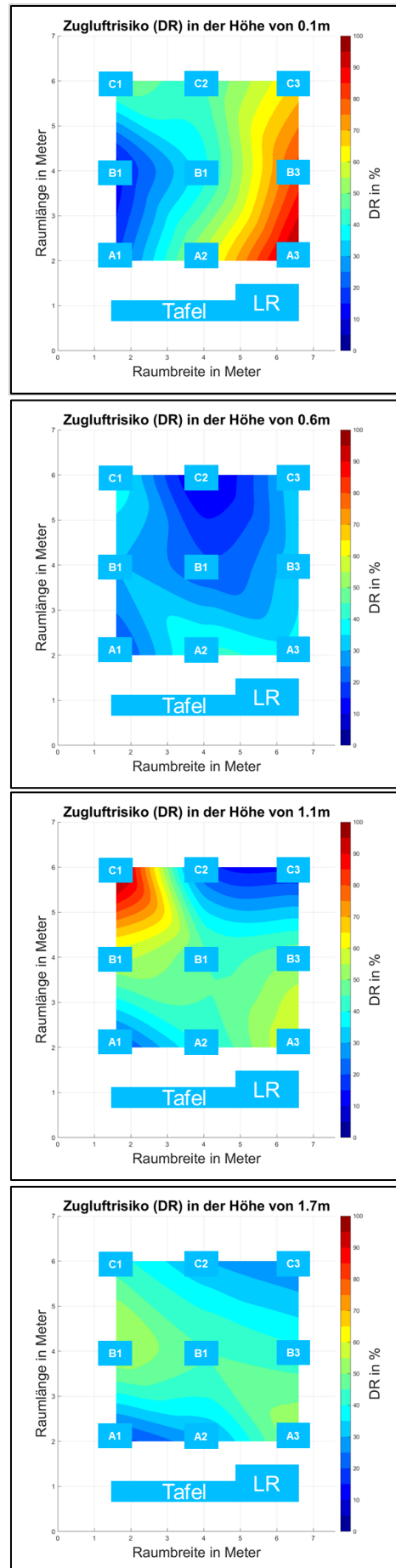


Bild 4-20: Zugluftrisiko (DR) Wilhelmsschule Wangen bei $n_{\text{sekundär}} = 5,2 \text{ 1/h}$ bzw. $3,0 \text{ 1/h}$

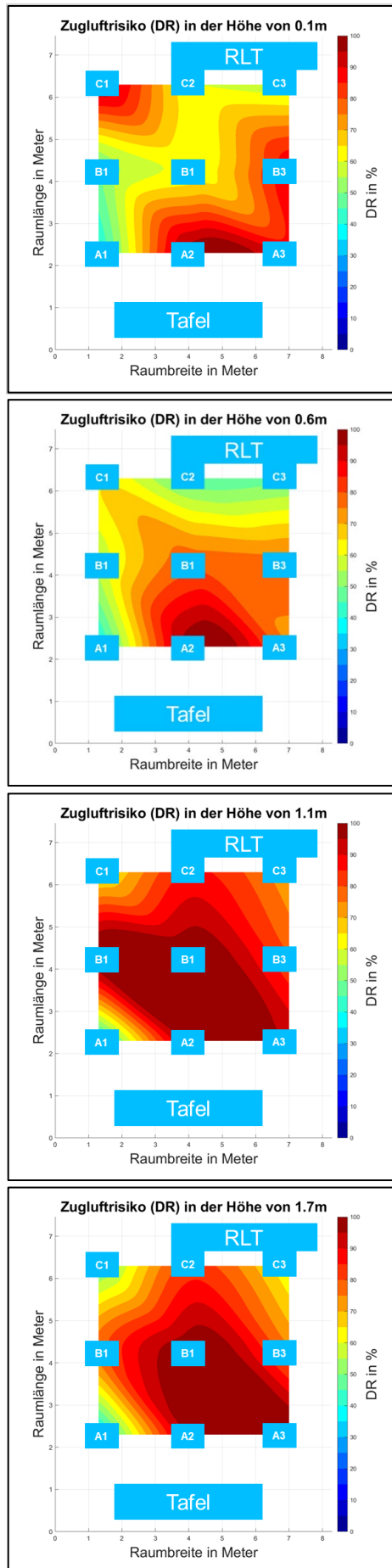
Steigschule Bau 1: $n_{\text{sekundär}} = 5,4 \text{ 1/h}$



Steigschule Bau 1: $n_{\text{sekundär}} = 2,7 \text{ 1/h}$



Filderschule: $n_{\text{primär}} = 4,9 \text{ 1/h}$



Filderschule: $n_{\text{primär}} = 3,3 \text{ 1/h}$

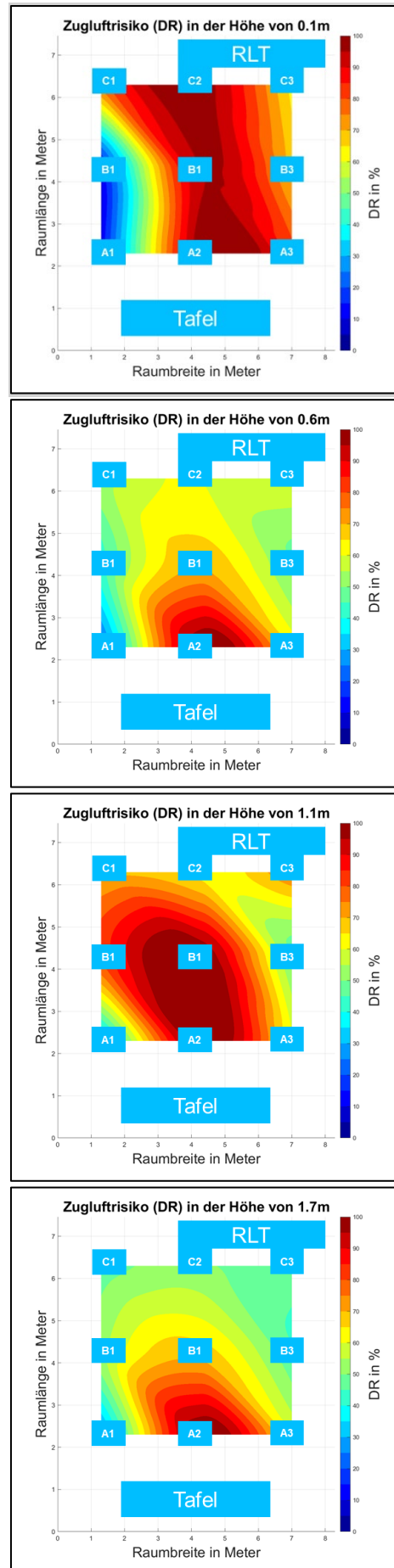


Bild 4-22: Zugluftrisiko (DR) Filderschule bei $n_{\text{primär}} = 4,9 \text{ 1/h}$ bzw. $3,3 \text{ 1/h}$

4.4 Ergebnisse der Schallmessungen

In insgesamt zehn Klassenräumen wird der Schalldruckpegel an jeweils neun Messpunkten im Raum (siehe Kapitel 3.9) gemessen. Für zwei Klassenräume (Filderschule und Solitude-Gymnasium) wird die Messung mit der vorhandenen RLT-Anlage anstatt einem Luftreinigungsgerät durchgeführt. Ferner wird in jedem Klassenraum eine Messung ohne Luftreinigungsgerät (Grundsall) durchgeführt und die Nachhallzeit des Raums gemessen.

In Bild 4-23 sind die gemessenen, zeitlich gemittelten Schalldruckpegel der untersuchten Klassenräume (Balken) sowie der Richtwert nach VDI 2081 [1] (waagrechte rote Linie) grafisch dargestellt. Der Richtwert nach VDI 2081 [1] für den A-bewerteten Schalldruckpegel in Klassenräumen sollte beim Einsatz von raumluftechnischen Anlagen grundsätzlich nicht überschritten werden.

Bei der Darstellung wird zwischen zwei Messvarianten unterschieden. Dabei stellt die erste Messvariante (Sekundärluftstrom 1), die Messung für die Einstellung des Luftreinigungsgerätes mit den Leistungsstufen, welche auf Basis der Auslegung für den Klassenraum festgelegt ist. Die zweite Messvariante (Sekundärluftstrom 2) zeigt jeweils eine Variation der Leistungsstufe auf. Dabei wird für die Klassenräume bei ausgewählten Luftreinigungsgeräten ein Teillastbetrieb eingestellt. Im Falle einer stufenlosen Einstellmöglichkeit wird in der Messvariante 2 der Sekundärluftstrom in etwa so eingestellt, dass der Richtwert eingehalten werden kann. Dies betrifft konkret die Geräte im Wilhelms-Gymnasium, der Steinbeisschule Hauptbau und der Steigschule Bau 1.

Die aus den Messvarianten jeweils resultierenden Luftwechsel sind für die einzelnen Klassenräume in Tabelle 4-1 angegeben. Bezüglich der Messvarianten in den beiden Klassenräumen mit RLT-Anlage wird im Solitude-Gymnasium lediglich eine Variante für den Dauerbetrieb mit dem Nennluftstrom untersucht, da dieses Gerät üblicherweise im Schulbetrieb CO₂-geregelt betrieben wird. In der Filderschule wird für die Messvariante 1 ein Nennluftstrom (100%) und für die Messvariante 2 ein reduzierter Zuluftstrom (60%) untersucht.

In den Klassenräumen mit Luftreinigungsgerät wird deutlich, dass mit der Leistungsstufe gemäß Auslegung (Sekundärluftstrom 1) der Richtwert in allen Klassenräumen überschritten wird. Die Überschreitung des maximalen Schalldruckpegels liegt zwischen 6 und 14 dB. Die zwei untersuchten Klassenräume mit der dezentralen RLT-Anlage weisen eine geringere Überschreitung in Bezug auf den Richtwert auf. Im Solitude-Gymnasium liegt im Betrieb mit Nennluftstrom hinsichtlich des maximal gemessenen Schalldruckpegels lediglich eine Überschreitung um etwa 2 dB vor. In der Filderschule liegt der minimale und maximale Messwert geringfügig über dem Richtwert und überschreitet diesen um etwa 4 dB. Mit einem reduzierten Luftstrom wird in der Filderschule der Richtwert deutlich unterschritten.

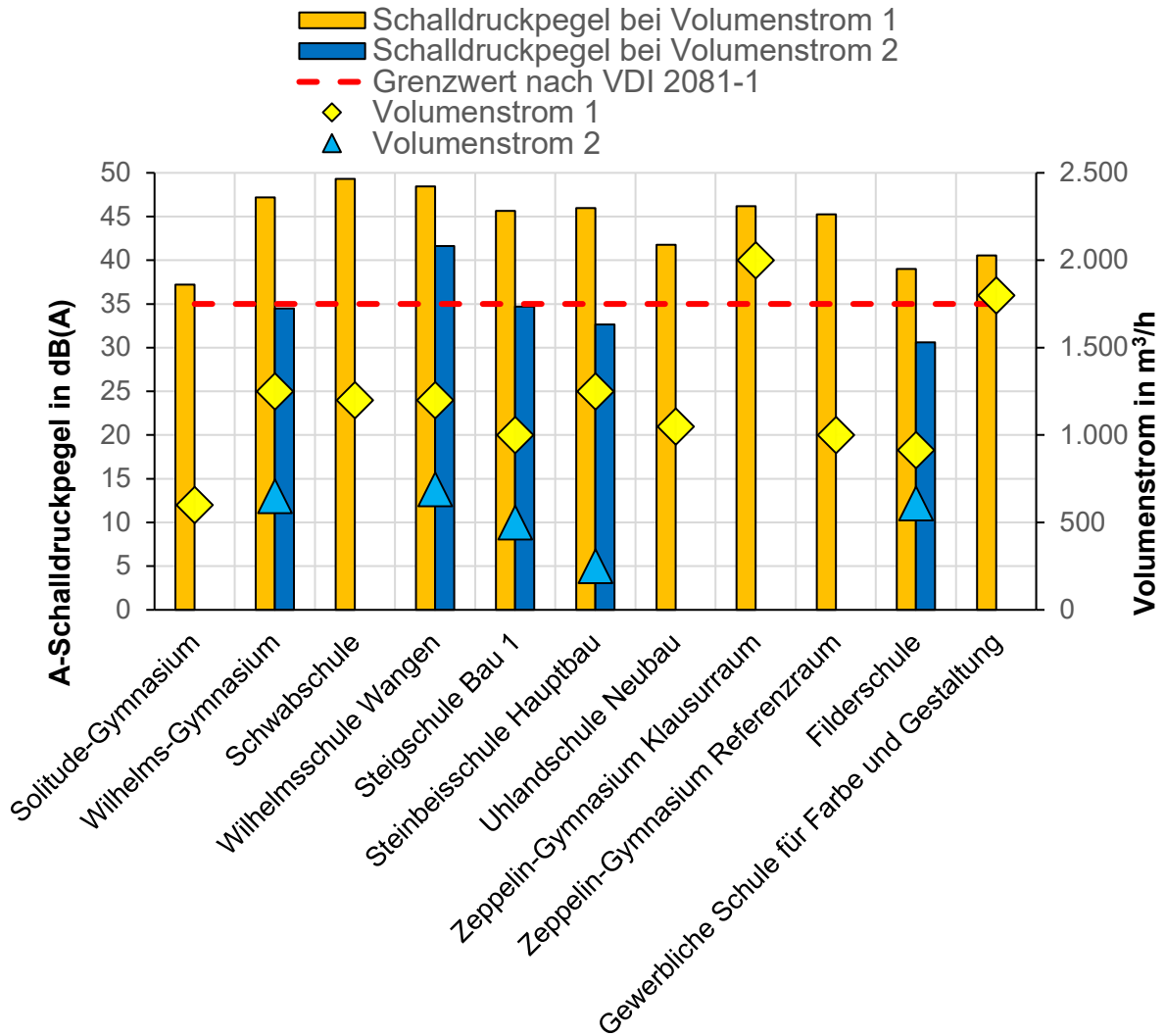


Bild 4-23: Gemessene maximale A-Schalldruckpegel in den betrachteten Schulen

Die minimalen und maximalen gemessenen A-Schalldruckpegel sind in Tabelle 4-2 aufgeführt, wobei zudem auch die jeweiligen Abstände vom Messort zum Luftreinigungsgerät (Schallquelle), der Grundsall sowie der jeweils vorliegende Primär- bzw. Sekundärluftwechsel mit angegeben sind.

Tabelle 4-2: Messergebnisse der Schallmessungen für die untersuchten Schule mit Luftreinigungsgerät und RLT-Anlage

Nr.:	Schule	Messung	Min. Schall-druck-pegel	Ab-stand	Max. Schall-druck-pegel	Ab-stand	Grund-schall	nPrimär/ nSekundär
		-	in dB(A)	in m	in dB(A)	in m	in dB(A)	in 1/h
01	Solitude-Gymnasium	S1	34,3	9,6	37,2	0,0	21,1	3,1
02	Wilhelms-Gymnasium	S1	43,0	5,8	47,2	1,0	24,2	5,8
		S2	33,0		34,5			3,0
03	Schwabschule	S1	46,4	7,4	49,3	0,9	29,4	5,1
04	Wilhelmsschule Wangen	S1	46,9	8,2	48,5	1,5	32,9	5,2
		S2	39,3		41,6			3,0
05	Steigschule Bau 1	S1	43,1	7,4	45,7	1,2	27,6	5,4
		S2	31,4		34,7			2,7
06	Steinbeisschule Hauptbau	S1	41,7	8,5	46,0	5,8	23,3	6,9
		S2	29,2		32,7			2,8
07	Uhlandschule Neubau	S1	39,8	7,5	41,8	6,1	25,8	5,0
08	Zeppelin-Gymnasium Klausurraum	S1	43,6	5,5	46,2	1,3	30,6	5,0
09	Zeppelin-Gymnasium Referenzraum	S1	41,8	2,4	45,3	1,6	33,2	5,3
10	Filderschule	S1	35,8	8,9	39,0	0,0	27,6	4,9
		S2	27,9		30,6			3,3
11	Gewerbliche Schule für Farbe und Gestaltung	S1	37,6	9,1	40,5	2,0	26,5	3,9

Sofern zwei Luftreinigungsgeräte im Raum aufgestellt sind, wird der Abstand von der Messstelle zum jeweils näherliegenden Gerät berücksichtigt. Höhenunterschiede zwischen Kopfhöhe und der Schallquelle, welche bspw. bei den in die Zwischendecke integrierten dezentralen RLT-Anlagen vorliegen, bleiben hierbei unberücksichtigt.

Bei allen Messungen wird der maximale Schalldruckpegel grundsätzlich an einer Messposition aus der Sitzreihe, welche sich am nächsten zum Luftreinigungsgerät bzw. RLT-Anlage befindet, gemessen. Umgekehrt werden die minimalen Schallpegel

in der Sitzreihe gemessen, welche von der Schallquelle die größte Distanz aufweisen. In den meisten Klassenräumen befindet sich das Luftreinigungsgerät im hinteren Bereich des Raums, sodass hier tendenziell die hinterste Sitzreihe dem höchsten und die vorderste Sitzreihe dem geringsten Lärmpegel ausgesetzt ist, wobei die Differenzen im Bereich von 2 und 4 dB liegen. In Klassenräumen, wo sich mehrere Geräte befinden (bspw. Wilhelms-Gymnasium und Zeppelin-Gymnasium), variieren die Aufstellorte entsprechend und es liegt eine gleichmäßigere Verteilung des Schalldruckpegels im Raum vor. Dies wird bei den Messungen insofern festgestellt, da hier die Abstände der gemessenen minimalen Schalldruckpegel vergleichsweise geringer ausfallen.

In Tabelle 4-3 sind die jeweils gemessenen Nachhallzeiten für die Klassenräume für den unbelegten Raum aufgeführt. Dabei wird die gemessene Nachhallzeit der Soll-Nachhallzeit nach DIN 18041 [32] gegenübergestellt. Zudem wird die auf einen belegten Raum umgerechnete Nachhallzeit angegeben (siehe Kapitel 3.9). Durch Personen im Raum erhöht sich die Schallabsorption im Raum, weshalb sich die berechnete Nachhallzeit für den belegten geringfügig gegenüber dem unbelegten Raum verringert.

Tabelle 4-3: Messergebnisse der Nachhallzeit in allen Schulen

Nr.:	Schule	Soll-Nachhallzeit des Raums gemäß DIN 18041	Nachhallzeit in s für den unbelegten Raum	Nachhallzeit in s für den belegten Raum
01	Solitude-Gymnasium	0,56	0,48	0,43
02	Wilhelms-Gymnasium	0,58	0,81	0,66
03	Schwabschule	0,59	0,86	0,76
04	Wilhelmsschule Wangen	0,58	0,48	0,44
05	Steigschule Bau 1	0,55	0,63	0,53
06	Steinbeisschule Hauptbau	0,55	0,75	0,63
07	Uhlandschule Neubau	0,57	0,82	0,68
08	Zeppelin-Gymnasium Klausurraum	0,66	0,82	0,70
09	Zeppelin-Gymnasium Referenzraum	0,56	0,71	0,58
10	Filderschule	0,56	0,52	0,47
11	Gewerbliche Schule für Farbe und Gestaltung	0,68	0,86	0,78

Die Nachhallzeiten zeigen lediglich geringe Abweichungen zwischen den nach DIN 18041 ermittelten Sollwerten und den tatsächlich gemessenen Werten.

4.5 Ergebnisse der CO₂-Messungen während Präsenzunterrichtsstunden

In der Wilhelmsschule Wangen, der Steigschule Bau 1, der Schwabschule und der Gewerblichen Schule für Farbe und Gestaltung werden die CO₂-Konzentrationsverläufe für die Fensterlüftungsstrategien 20/5/20 und 10/2,5/10 gemessen. Die Ergebnisse sind in Bild 4-24 (20/5/20) und Bild 4-25 (10/2,5/10) unter Berücksichtigung der in Tabelle 4-4 beschriebenen Anzahl an Personen im jeweiligen Klassenraum dargestellt. Die geringe Belegung in den Schulen ist auf die Beschränkungen der Pandemie zurückzuführen. Die CO₂-Messungen sind dadurch nur bedingt aussagekräftig. Dass die Verläufe nicht alle über 90 Minuten dargestellt sind, ist den besonderen Umständen geschuldet, dass entweder SchülerInnen den Raum für einen Covid-Schnelltest verlassen, die Schulstunde nur 45 Minuten andauert oder anderweitige Störeinflüsse vorhanden sind.

Tabelle 4-4: Anzahl an SchülerInnen während den CO₂-Messungen

Schulen	Anzahl an Personen	
	20/5/20	10/2,5/10
Wilhelmsschule Wangen	19	11
Steigschule Bau 1	11	11
Schwabschule	21	22
Gewerbliche Schule für Farbe und Gestaltung	14	16

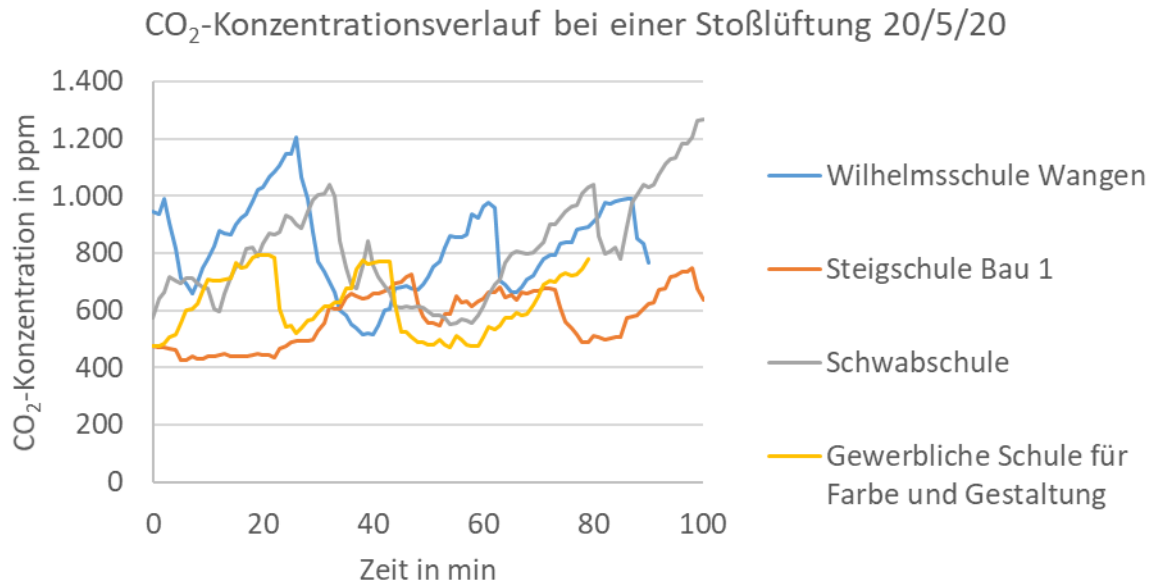


Bild 4-24: CO₂-Konzentrationsverläufe für die Fensterlüftungsstrategie 20/5/20

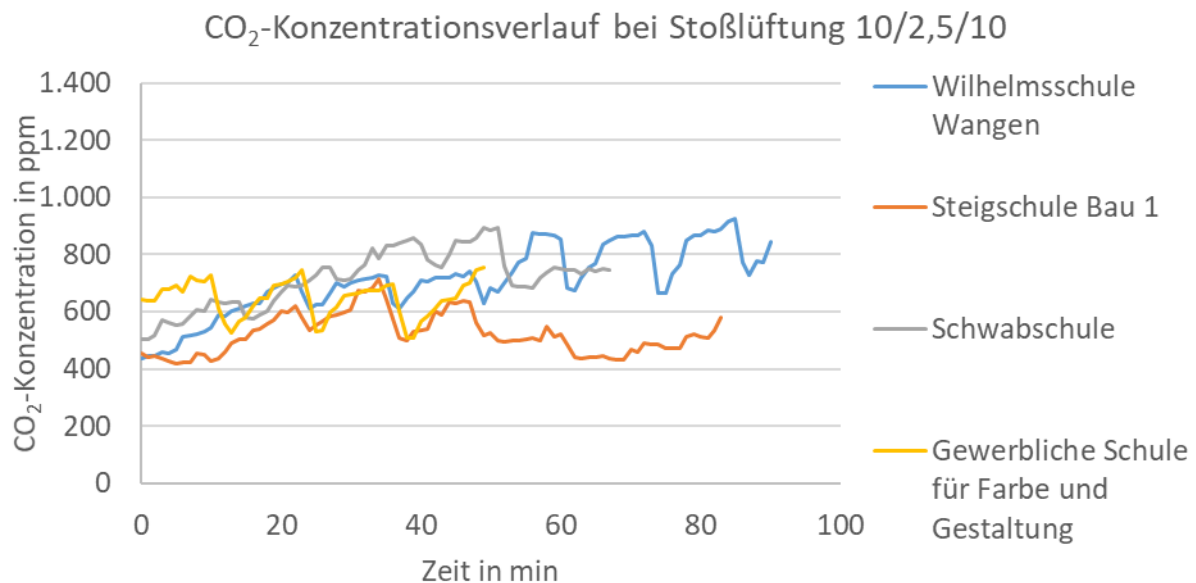


Bild 4-25: CO₂-Konzentrationsverläufe für die Fensterlüftungsstrategie 10/2,5/10

Im direkten Vergleich beider Diagramme ist zu erkennen, dass die Lüftungsstrategie 10/2,5/10 die Konzentration in den vier Schulen durchgehend unterhalb von 900 ppm halten kann, wohingegen bei der 20/5/20 Strategie dieser Grenzwert eher bei 1200 ppm liegt. Aufgrund der kürzeren Turnusse und der Tatsache, dass die wirksame Anfangszeit einer Lüftungsphase in einem Zeitraum häufiger wirksam wird, können die Konzentrationen allgemein niedriger gehalten werden.

Auf Basis dieser Erkenntnis und den Aufrufen in verschiedenen Fachkreisen über eine CO₂-Grenzwertsenkung für eine Fensterlüftung bei Schulen während der Pandemie von 1.000 auf 800 ppm, wird in der Wilhelmsschule Wangen ein derartiger Versuch

durchgeführt. Die Fenster werden geöffnet, wenn der 800 ppm-Grenzwert überschritten wird und beim Unterschreiten von 600 ppm wieder geschlossen. In Bild 4-26 ist der zeitliche CO₂-Konzentrationsverlauf bei 19 anwesenden Personen aufgetragen.

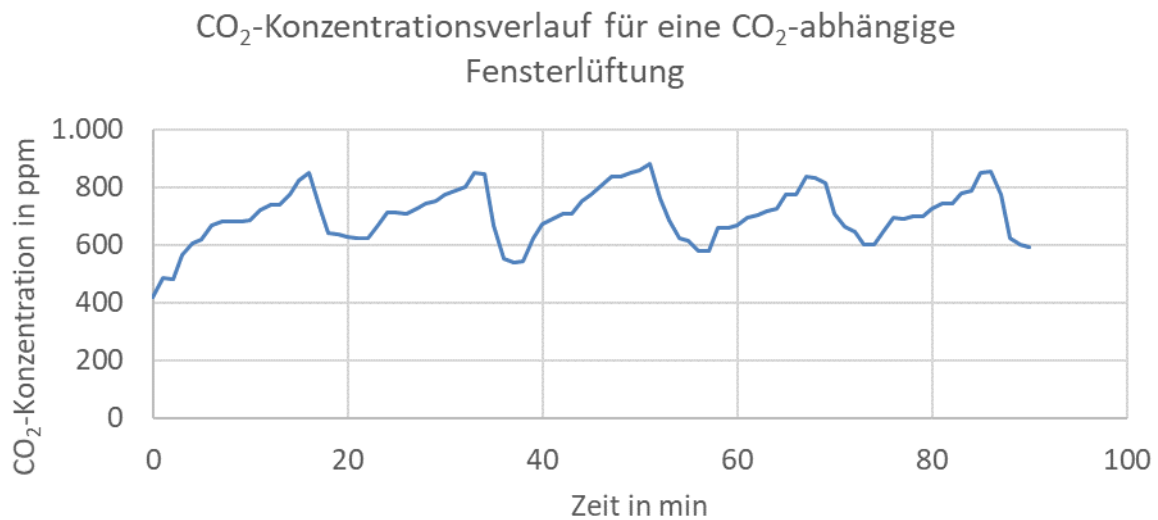


Bild 4-26: CO₂-Konzentrationsverlauf für eine CO₂-abhängige Fensterlüftung

Die daraus resultierenden Lüftungszyklen bewegen sich zwischen 12...14 Minuten Fenster geschlossen und 3...6 Minuten geöffnetem Fenster. Durch eine Absenkung des einzuhaltenden CO₂-Grenzwertes könnten die Lüftungsintervalle noch weiter gekürzt werden. Bei Vollbelegung des Klassenraumes würde sich ein ähnlicher Verlauf einstellen, sofern ab 800 ppm die Fenster geöffnet würden. Allerdings müssten hierzu die Lüftungszyklen verkürzt und die Lüftungsdauer leicht erhöht werden.

4.6 Ergebnisse der Umfrage

Mitte Juni wurden im Rahmen der Studie in allen im Projekt untersuchten Klassenräumen eine Umfrage mit insgesamt 178 SchülerInnen und LehrerInnen durchgeführt, um die Akzeptanz von Luftreinigungsgeräten und RLT-Anlagen einzuschätzen. Dabei wurden die Teilnehmenden nach einem ca. 15-minütigem Betrieb der Geräte zu Aspekten der Behaglichkeit und des Komforts befragt. Die Leistungsstufen (LS) wurden dabei gemäß der Varianten V4 (RLT-Anlage) sowie V5 und V6 (Luftreinigungsgeräte) eingestellt. Bei den Luftreinigungsgeräten sind das für LS 1 ca. 1000...1250 m³/h und für LS 2 500...690 m³/h. Bei der RLT-Anlage entspricht LS 1 ca. 915 m³/h und LS 2 ca. 600 m³/h.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Luftreinigungsgeräte von SchülerInnen und LehrerInnen weitestgehend akzeptiert werden. Die Akustik wurde als weniger kritisch beurteilt, als nach VDI 2081 angenommen. Vor allem bei erhöhtem Vo-

lumenstrom (LS 1) kommt es vereinzelt zu ersten Komforteinbußen. Bereits 13% stimmen einer überhöhten Lautstärke eher bis voll zu, wohingegen dieser Wert bei LS 2 bei 6 % liegt.

Bei RLT-Anlagen wird die Akustik noch unkritischer bewertet. Bei LS 1 stimmen 7% einem zu hohen Geräuschpegel der RLT-Anlage eher bis voll zu und 3% bei LS 2.

Die Luftreinigungsgeräte scheinen die Konzentration nicht erheblich zu beeinträchtigen. Bei beiden LS sind es 7%, die einer Konzentrationsbeeinträchtigung eher bis voll zustimmen.

Bei RLT-Anlagen sind es bei LS1 14% bzw. bei LS2 6%, deren Konzentration eher bis voll beeinträchtigt wird.

Hinsichtlich der Zuglufterscheinung wurden die Luftreinigungsgeräte als eher unbedenklich eingestuft. Bei Leistungsstufe 1 sind es 9% der TeilnehmerInnen, welche einer Zuglufterscheinung eher bis voll zustimmen. 7% der Stimmen sind es bei Leistungsstufe 2.

Bei RLT-Anlagen stimmen 3% Zuglufterscheinungen bei Leistungsstufe 1 eher bis voll zu. Bei Leistungsstufe 2 sind es trotz reduziertem Volumenstrom 8%.

Der Zeitpunkt der Umfrage (Mitte Juni) könnte aufgrund hoher Außentemperaturen allerdings zur Folge haben, dass Zuglufterscheinungen in einem Klassenraum, dessen Raumlufttemperatur oberhalb der Raumsolltemperatur liegt als kühlend bzw. angenehm empfunden werden.

Bei der Durchführung des Unterrichts sahen sich 11% der befragten LehrerInnen bei Luftreinigungsgeräten auf LS 1 voll und bei LS 2 nicht mehr beeinträchtigt. Bei RLT-Anlagen wurden beide LS als nicht beeinträchtigend empfunden.

Im speziell dafür vorgesehenen Kommentarfeld hinterließen die Teilnehmenden einige konstruktive Kritikpunkte und Anregungen. Besonders relevant waren folgende Anmerkungen in den Kommentarfeldern sortiert nach positiven und negativen:

Positiv:

- „Der Wind muss höher eingestellt werden“
- „Mich stört das Geräusch gar nicht. Ich finde es entspannend“
- 4 x „Beruhigend“
- „Gut, dass wir so etwas haben. Stört mich persönlich nicht. Bei Leistungsstufe 1 (hoher Volumenstrom) beim Arbeiten möglicherweise.“
- „Effektiv, kann aber für Leute mit Konzentrationsproblemen nervig sein.“
- „Ich bemerke den Luftreiniger gar nicht, Baustelle ist lauter, Ich bemerke keine Veränderung durch den Luftreiniger“

Negativ:

- „Durch das Geräusch der Luftreiniger bekomme ich Kopfschmerzen“
- „Man muss immer darum herumlaufen und Rücksicht auf das Gerät nehmen, weil ich groß bin
- „Unnötig, nimmt Platz weg, ist nie an“
- „Meiner Meinung nach ist der Luftreiniger nicht notwendig, man kann einfach das Fenster aufmachen, ich bekomme Kopfschmerzen“
- „Man versteht manchmal den Lehrer nicht“

Problematisch an der Umfrage ist die kurze Laufzeit der Geräte (ca. 15 Minuten je Leistungsstufe), bis zur Befragung und, dass damit Langzeitbetrachtungen außen vor bleiben. Auch wird nur exemplarisch eine bestimmte Unterrichtssituation betrachtet und nicht bspw. eine Klausursituation. Sowohl die Umfragebögen, als auch die Umfrageergebnisse befinden sich im Anhang.

4.7 Leitfaden zur Auswahl geeigneter Maßnahmen

Zur Erhöhung des Infektionsschutzes können verschiedene Maßnahmen ergriffen werden. Neben einer primär anzustrebenden Vergrößerung der maximal möglichen Fensteröffnungsfläche, bieten sich bei schlecht belüftbaren Räumen Luftreinigungsgeräte als kurzfristige unterstützende Maßnahme an. Die Geräte sind aber nicht in der Lage, CO₂ und Feuchte aus dem Raum abzuführen, weswegen sie keine Lüftung ersetzen können. Als mittelfristiges Ideal werden RLT-Anlagen aufgrund der Sicherstellung der Raumluftqualität (auch hinsichtlich der CO₂- und Feuchte-Belastung) sowie der Reduzierung der Lüftungswärmeverluste (aufgrund der Wärmerückgewinnung) gesehen.

Neben dieser mittel- bis langfristigen Empfehlung ermöglicht ein im Pilotprojekt entwickeltes Berechnungstool, Klassenräume kurzfristig hinsichtlich der jeweiligen Infektionsgefahr zu bewerten und individuell geeignete Maßnahmen abzuleiten und damit als Leitfaden zu fungieren.

Dem Tool liegen dazu die relevanten physikalischen Gleichungen der Stoffbilanzierung zugrunde. Als Ergebnis liefert das Berechnungstool über einen Farbcode gemäß einer Ampelschaltung, die Information, ob die bestehende oder die potentiell mögliche Fensteröffnungsfläche ausreicht, um den Erwartungswert an Neuinfektionen (Anzahl an Neuinfektionen, die mit der höchsten Wahrscheinlichkeit eintreten) einzuhalten, oder ob ein Luftreinigungsgerät eine geeignete Übergangsmaßnahme darstellt und welchen Volumenstrom dieser liefern muss.

Zudem sollte die Auswahl eines Luftreinigungsgerätes für jeden Raum und dessen Nutzung individuell ermittelt werden. Die Untersuchungen zeigen, dass der Aufstellungsort des Geräts aufgrund der Durchmischung der Raumluft als zweitrangig anzusehen ist. Bezüglich der Schallemissionen ist zu berücksichtigen, dass bei Anwesenheit der Personen die maximale Leistungsstufe in der Regel den Richtwert überschreitet, weswegen im Sinne des Schallschutzes eine entsprechende Leistungsstufe nicht überschritten werden sollte.

Auf Basis der zuvor genannten Aspekte sind im Wesentlichen folgende Merkmale bei der Auswahl der Luftreinigungsgeräte zu berücksichtigen:

- Raumvolumen
- Nutzerbelegung
- Aufstellort
- Leistungsstufe
- Schallschutz
- Wartung und Instandhaltung

Weitere Kriterien können dem Protokoll des Workshops vom 04.05.2021 entnommen werden.

5 Zusammenfassung, Diskussion und Handlungsempfehlungen

Im Hinblick auf die derzeit anhaltende SARS-CoV-2-Pandemie wurden von Januar bis Juni 2021 jeweils ein bzw. zwei Klassenräume in zehn Schulen (Schwabschule, Gewerbliche Schule für Farbe und Gestaltung, Steigschule Bau 1, Steinbeisschule Hauptbau, Uhlandschule Neubau, Wilhelms-Gymnasium, Wilhelmsschule Wangen, Zeppelin-Gymnasium, Solitude-Gymnasium und Filderschule) der Stadt Stuttgart raumlufttechnisch untersucht.

Ziel dieser Untersuchung ist die Abschätzung eines Infektionsrisikos während des Unterrichts und die Identifikation geeigneter Maßnahmen zur Verringerung dieses Risikos sowohl für LehrerInnen als auch SchülerInnen. Neben einer Fensterlüftung werden auch RLT-Anlagen und mobile Luftreinigungsgeräte (ohne Außenluftanteil) analysiert.

Über eine Luftmarkierung durch Kaltnebel können Aussagen zur Raumluchtströmung in den Klassenräumen getroffen werden. Durch diese Art der Visualisierung von Raumluchtströmungen sollen Schwachstellen, wie beispielsweise Bereiche mit sehr geringer Luftbewegung, identifiziert werden, welche anschließend, z.B. anhand einer Spurengasmessung, quantitativ untersucht werden können. Da zum Zeitpunkt der Messungen aufgrund der Covid-19-Schutzmaßnahmen nur vereinzelt SchülerInnen und LehrerInnen anwesend sein können, diese aber aufgrund ihrer Wärmeabgabe einen signifikanten Einfluss auf die Raumluchtströmung haben, werden hierfür entsprechende Personendummies eingesetzt.

Die konkrete Bewertung des Infektionsrisikos erfolgt durch quantitative Messungen der Stoffausbreitung. Hierfür werden zwei Messmethoden eingesetzt: Zum einen wird ein kontrollierter gleichmäßiger Stoffstrom des Spurengases Schwefelhexafluorid (SF_6) stichprobenartig an einem thermischen Personendummy freigesetzt, welcher eine infektiöse Person repräsentieren soll. Das Spurengas sowie die luftgetragenen Aerosole sind Bestandteile der Luft und folgen somit der vorherrschenden Raumluchtströmung. An den umliegenden Personendummies werden die zeitlichen Verläufe der Konzentrationen dieses Stoffs erfasst. Durch eine Fensterlüftung wird z.B. dieses Spurengas in gleichem Maß abtransportiert wie potentiell virenbeladene Partikel in der Luft, wodurch auch diese Maßnahme zur Reduzierung des Infektionsrisikos bewertet werden kann.

Zur Beurteilung der Wirksamkeit von Luftreinigungsgeräten werden bei der zweiten Messmethode Testaerosolpartikel freigesetzt. Mit mehreren mobilen Partikelspektrometern werden die zeitlichen Verläufe der Anzahlkonzentrationen an den umliegenden Personendummies gemessen. Treten Aerosolpartikel in das Luftreinigungsgerät ein, so werden sie gemäß dessen Abscheidegrads in seinem Filter abgeschieden bzw. gespeichert. Durch erfolgte Konzentrationsmessungen und deren Verrechnung lassen sich anschließend Aussagen über die Wirksamkeit der Luftreinigungsgeräte zur Reduzierung des Infektionsrisikos und ggf. über deren geeignete Positionierung treffen.

Die beschriebenen Messungen in Kombination mit der Auswertung relevanter Studien zur luftgetragenen Infektionsausbreitung ermöglichen eine Abschätzung des Infektionsrisikos bei einer bestimmten Personen-Belegungsdichte und bei verschiedenen Maßnahmen.

In dieser Messkampagne werden nur Luftreinigungsgeräte mit Hochleistungsschwebstofffilter eingesetzt und getestet. Es ist nicht ausreichend geklärt, welche Dosis an UV-C zur Inaktivierung der Viren benötigt wird [17, 18, 19]. Der Einsatz von Ozon kann schädliche Sekundärprodukte hervorrufen. Daher sollte bei der Beschaffung von Luftreinigungsgeräten zu der eingesetzten Technologie ein Wirksamkeitsnachweis seitens der Hersteller vorliegen. Während der Studie waren derartige Wirksamkeitsnachweise gegenüber SARS-CoV-2 nicht verfügbar. Somit wurden in der Messkampagne nur Luftreinigungsgeräte mit Hochleistungsschwebstofffilter eingesetzt. [20]

Jede der in diesem Bericht aufgeführten Maßnahmen kann einen Beitrag zur Senkung des Infektionsrisikos leisten. Im Folgenden werden allgemeine Erkenntnisse in den Kategorien **Fensterlüftung**, **Luftreinigungsgeräte**, **RLT-Anlagen** festgehalten:

Fensterlüftung

- Sowohl die Lüftungsstrategie 20/5/20, als auch 10/2,5/10 können das Infektionsrisiko erheblich senken. Unter Berücksichtigung aller Klassenräume und der wetterbedingten Randbedingungen kann der Unterschied zwischen den Strategien allerdings als geringfügig bewertet werden. Die Raumtemperatur nimmt bei den vorliegenden Außentemperaturen durch die Stoßlüftung nur leicht ab.
- Der Außenluftwechsel infolge der Fensterlüftung ist stark abhängig von den meteorologischen Randbedingungen und dem NutzerInnenverhalten.
- Die Dauerkipp Lüftung trägt zwar zur Verringerung der Wahrscheinlichkeit einer Infektion bei, jedoch fällt dies geringfügiger aus als bei den Stoßlüftungsvarianten. Sie ist deshalb und aus energetischer Sicht nicht empfehlenswert.
- Das Lüften in den Pausen ist zwingend erforderlich, um die Aerosolkonzentration für den darauffolgenden Unterricht weitestgehend gegen null zu senken. Bei ausreichender Fensterfläche ist dies bei Pausen um die 15-20 Minuten möglich.

Luftreinigungsgeräte

- Die untersuchten Klassenräume zeigen, dass je höher der Volumenstrom des Luftreinigungsgerätes ist, desto geringer ist der PIRA-Wert über eine bestimmte Expositionszeit (z.B. 90 Minuten). Der Einsatz von Luftreinigungsgeräten in Kombination mit einer Fensterlüftung wirkt sich positiv auf das Infektionsgeschehen aus.
- Luftreinigungsgeräte können das Senken der Aerosolkonzentration bei schlecht belüftbaren Räumen unterstützen bzw. verbessern. Meist sind sie dabei wirksamer als die Stoßlüftung. Sie können das Lüften bzw. eine RLT-Anlage jedoch nicht ersetzen, da kein CO₂- und Feuchteabtransport stattfindet.

- Die vermessenen Luftreinigungsgeräte weisen bei Luftwechseln im Bereich $n_{\text{sekundär}} \approx 5 \dots 6$ 1/h höhere Schallwerte auf als nach VDI 2081 zulässig. Bei Senkung auf ca. $n_{\text{sekundär}} \approx 3$ 1/h kann der Schalldruckpegel bei vereinzelt Geräten zwar in die Nähe des Grenzwertes gebracht werden, allerdings steigt dann das Infektionsrisiko in Klassenräumen an.
- Die Luftreinigungsgeräte zeigen sowohl bei hohen als auch bei geringeren Volumenströmen Zuglufterscheinungen an den jeweiligen Messpositionen, welche die Akzeptanz der SchülerInnen und LehrerInnen gefährden könnten.
- Das Lüften in den Pausen ist zwingend erforderlich, um die Aerosolkonzentration für den darauffolgenden Unterricht weitestgehend gegen null zu senken. Ein Luftreinigungsgerät mit einem Volumenstrom von 500-1.250 m³/h kann in den Pausen die Aerosolkonzentration nicht gegen null senken. Es ist zusätzlich zwingend eine Fensterlüftung notwendig.

RLT-Anlagen

- Die untersuchten Klassenräume zeigen, dass je höher der Volumenstrom der RLT-Anlage, desto geringer der PIRA-Wert über die Expositionszeit (90 Minuten).
- Die Klassenräume mit RLT-Anlagen weisen aufgrund der kontinuierlichen Betriebsweise bei einem Volumenstrom von 915 m³/h ein geringeres Infektionsrisiko gegenüber der Fensterlüftung auf.
- Die RLT-Anlagen weisen ein ähnliches Zugluftisiko auf wie die Luftreinigungsgeräte. Dies ist jedoch wesentlich darauf zurückzuführen, dass der Zuluftquerschnitt dieser Anlagen in diesen Räumlichkeiten sehr klein gewählt ist. Hier könnte eine nachträgliche Querschnittvergrößerung am Luftdurchlass Abhilfe schaffen.
- Das Lüften in den Pausen ist zwingend erforderlich, um die Aerosolkonzentration für den darauffolgenden Unterricht weitestgehend gegen null zu senken. Eine RLT-Anlage mit einem Volumenstrom von ca. 900 m³/h kann den Ausgangszustand ohne zusätzliche Fensterlüftung in der Pause nahezu wiederherstellen.
- Gemäß der Stellungnahme des Expertenkreis Aerosole BW wird in Pandemiezeiten ein Richtwert von 800 ppm in Innenräumen empfohlen [30]. Demnach sollten CO₂-geregelter raumluftechnische Anlagen auf diesen Wert ausgelegt werden.
- Bei der Planung sollte darauf geachtet werden, dass bei hohen Zuluftvolumenströmen ein großer Zuluftquerschnitt zur Vermeidung eines Zuglufttrisikos gewählt wird.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Aerosolkonzentration und letztlich die Infektionswahrscheinlichkeit mit der Höhe des Luftstroms, der entweder als Außenluft in den Raum über Fenster oder RLT-Anlagen geführt wird oder über ein Luftreinigungsgerät als Umluft im Raum gefiltert wird, korreliert. In der Studie erzielten die Luftreinigungsgeräte

beim Betrieb mit den höchsten Volumenströmen auch die niedrigsten Aerosolkonzentrationen. Wie bereits erläutert sind dabei die Luftreinigungsgeräte zu laut und die Luftgeschwindigkeiten und Turbulenzgrade der Raumluftströmung sind nicht behaglich. Es liegt nahe, dass diese Betriebsweise von SchülerInnen und LehrerInnen für den normalen Unterricht nicht akzeptiert werden. Die Infektionswahrscheinlichkeit in den Klassenzimmern mit RLT-Anlagen ist nicht zuletzt aufgrund der gegenüber den eingesetzten Luftreinigungsgeräten geringeren Luftvolumenströmen etwas höher. Dies liegt daran, dass die untersuchten RLT-Anlagen geringere Volumenströme fördern als die Luftreinigungsgeräte. Für die zukünftige Planung von RLT-Anlagen sollten die Luftströme höher dimensioniert werden, um die bereits erläuterte Kategorie höchster Raumluftqualität in Klassenräumen zu erreichen. Auch das Stoßlüften hat einen großen Einfluss auf die Infektionswahrscheinlichkeit. Um die Infektionswahrscheinlichkeit durch das Stoßlüften weiter zu senken, sollte eine Vergrößerung der maximal möglichen Fensteröffnungsfläche angestrebt werden.

Eine Reduzierung der Personenanzahl in einem Klassenraum ermöglicht selbst bei gleichbleibender mittlerer Infektionswahrscheinlichkeit einen nahezu proportional verringerten Erwartungswert an Neuinfektionen. Der Einsatz von FFP2-Masken im Unterricht reduziert deutlich das Infektionsrisiko und ist eine sehr wirksame Maßnahme zum präventiven Schutz.

Abschließend lässt sich festhalten, dass der Luftaustausch über Fenster eine sehr geeignete, einfach umzusetzende und kostengünstige Maßnahme ist, um Aerosolkonzentrationen im Klassenraum zu verringern. Hierbei sollte darauf geachtet werden, dass Klassenräume über eine ausreichende nutzbare Fensterfläche verfügen.

Bei schlecht belüftbaren Räumen bieten sich Luftreinigungsgeräte mit Sekundärluftvolumenströmen ab $1.200 \text{ m}^3/\text{h}$ als unterstützende Maßnahme an.

Nachhaltige Lösungen sind raumluftechnische Anlagen (RLT-Anlagen) mit analogen Außenluftvolumenströmen (um $1.200 \text{ m}^3/\text{h}$) und mit Wärmerückgewinnung, welche bei richtiger Dimensionierung die Innenraumluftqualität (CO_2 , Feuchte, etc.) unabhängig von den äußeren Bedingungen sicherstellen und die Lüftungswärmeverluste deutlich reduzieren können.

6 Anhang

Vorstellung der Klassenräume

6.1 Solitude-Gymnasium

Das Solitude-Gymnasium befindet sich im Spechtweg 40 in Stuttgart.

6.1.1 Daten des Klassenraums

Der Referenzraum des Solitude-Gymnasiums besitzt einen Ein- bzw. Ausgang. In Tabelle 6-1 ist eine Zusammenstellung der Raumdaten aufgeführt. Dabei sind die Raummaße des Klassenraums, die Gesamtöffnungsfläche sowie das Übergabesystem zur Beheizung dargestellt.

Tabelle 6-1: Zusammenstellung der Raumdaten (Solitude-Gymnasium)

Raumeigenschaft	Daten
Abmessungen (LxBxH) in m	8,0 x 8,1 x 3,0
Grundfläche in m ²	65
Raumvolumen in m ³	ca. 194
Gesamtfensterfläche in m ²	8,63
Gesamtöffnungsfläche der Fenster in m ²	3,31
Nutzbarer Anteil in %	38
Übergabesystem zur Beheizung	3x Heizkörper: 1,9 x 0,3 (LxH) in m

Der Raum besitzt eine Außenwand, worin die Fenster integriert sind. Bei den Fenstern handelt es sich um dreifach verglaste Fenster, welche mit einem Kunststoffrahmen ausgeführt sind. In Summe verfügt der Raum über fünf öffnbare Fenster, drei davon sind drehbar und zwei sind ausschließlich im gekippten Zustand öffnbar. Die Beleuchtung des Raums erfolgt mittels 14 Leuchtstoffröhren. In Bild 6-1 ist die Fensterfront sowie eine Raumansicht mit üblicher Sitzanordnung abgebildet. Als Übergabesystem zur Beheizung sind drei Heizkörper unterhalb der Fensterfront installiert.

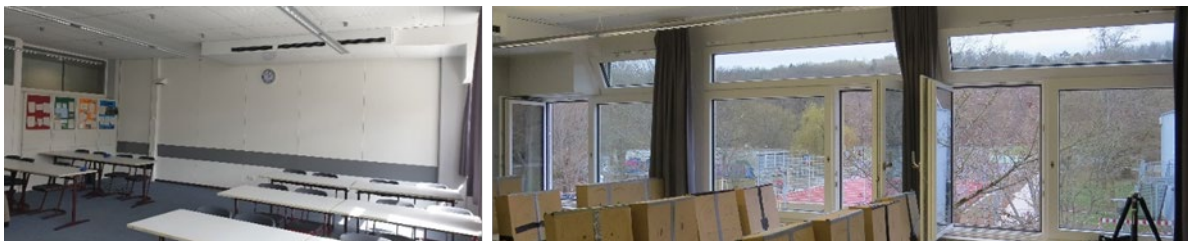


Bild 6-1: Raumansicht (links) und Fensterfront (rechts)

6.1.2 Daten des Lüftungsgeräts

Die RLT-Anlage der Klarluft GmbH & Co. KG (LH40-4334Z80F) ist, von der Tafel aus betrachtet, an der Decke rechts mit einer Außenluftanbindung installiert (Bild 6-2).



Bild 6-2: RLT-Anlage und Montageort des Solitude-Gymnasiums

Die Eigenschaften des Geräts sind in Tabelle 6-2 angegeben. Das Gerät ermöglicht einen einstellbaren Außenluftstrom bis maximal 600 m³/h. Die Außenluft wird fassadenseitig angesaugt und durch die Zuluftdurchlässe dem Raum zugeführt. Der Betrieb (Auslegung) liegt bei etwa 600 m³/h pro Gerät, womit für den Klassenraum ein Luftwechsel von $n=3,1$ 1/h erzielt wird.

Tabelle 6-2: Geräteeigenschaften (Herstellerangaben) der RLT-Anlage des Solitude-Gymnasiums [40]

Geräteeigenschaft	Wert
Außenluftstrom (Nennbetrieb) in m ³ /h	600
Außenluftstrom (Auslegung) in m ³ /h	600
n (Auslegung) in 1/h	3,1
Stromaufnahme bei Nennleistung in W	100
Schallleistungspegel in dB	25...72
Abmessungen (BxTxH) in m	3,3 x 1,02 x 0,38
Gewicht in kg	409

Bei Nenn-Außenluftstrom hat das Gerät eine Stromaufnahme von 100 Watt. Der Schalldruckpegel liegt für dieses Gerät nicht vor. Der Schallleistungspegel liegt zwischen 25 dB und 72 dB.

6.1.3 Berechnung des Außenluftwechsels bei Fensterlüftung

Ein Überblick über die Dreh- und Kippfenster der untersuchten Schulen mit Angabe der nutzbaren Fensteröffnungsfläche befindet sich in Tabelle 6-41. Bild 6-3 veranschaulicht die Fensterfront des Solitude-Gymnasiums. Dabei werden die Fenstertypen mit A, B, C und D (grün: Fenster nutzbar, rot Fenster nicht nutzbar) gekennzeichnet. In dem vorliegenden Klassenraum lassen sich drei Drehfenster von Typ A und jeweils ein Kippfenster von Typ C und Typ D öffnen. Damit lassen sich insgesamt fünf der neun Fenstern öffnen (Soll $\neq$ Ist).

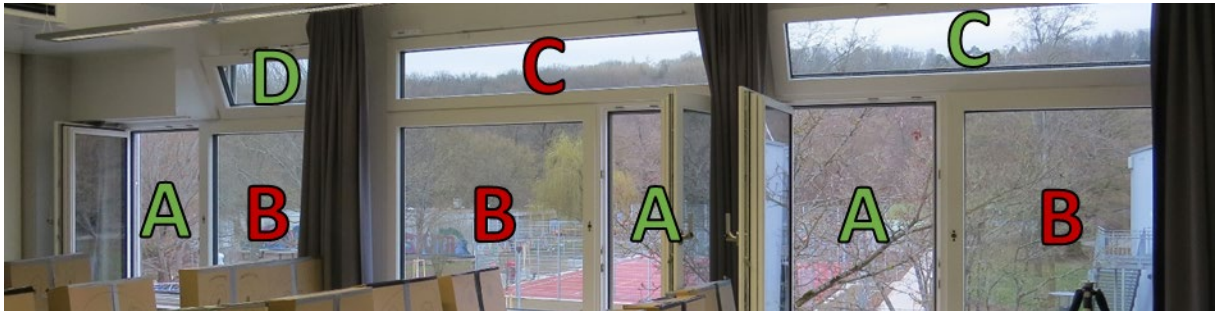


Bild 6-3: Fenstertypen im Solitude-Gymnasium

Für die Berechnung des Außenluftwechsels werden folgende Fallunterscheidungen getroffen, siehe Tabelle 6-3.

Tabelle 6-3: Lüftungsvarianten und Fenstertypen, Solitude-Gymnasium

	Soll		Ist	
Fenstertyp	i	A _{Fe} in m²	i	A _{Fe} in m²
Fall I: Stoßlüftung Gesamtöffnungsfläche Soll				
Fall II: Stoßlüftung Gesamtöffnungsfläche Ist				
A Drehfenster klein	3	2,79	3	2,79
B Drehfenster groß	3	4,98	0	0,00
C Kippfenster groß	2	0,67	1	0,33
D Kippfenster klein	1	0,19	1	0,19
	Σ = 8,63		Σ = 3,31	
Fall III: Stoßlüftung kleine Drehfenster Soll = Ist				
A Drehfenster klein	3	2,79	3	2,79
Fall IV: Dauerkipplüftung Soll, Fall V: Dauerkipplüftung Ist				
C Kippfenster groß	2	0,67	1	0,33
D Kippfenster klein	1	0,19	1	0,19
	Σ = 0,86		Σ = 0,52	

Fall I/II *Stoßlüftung Gesamtöffnungsfläche Soll/Ist* berücksichtigt alle derzeit nutzbaren Dreh- und Kippfenster (Soll/Ist). Dadurch ergibt sich eine Gesamtöffnungsfläche von 8,63 m² (Soll) bzw. 3,31 m² (Ist). Werden nach Fall III *Stoßlüftung kleine Drehfenster* ausschließlich die kleinen Drehfenster (Typ A) geöffnet, beträgt die Gesamtöffnungsfläche 2,79 m² (Soll = Ist). Fall IV/V *Dauerkippplüftung* Soll/Ist betrachtet ausschließlich die Kippfenster (Typ: C und D) mit einer Gesamtöffnungsfläche von 0,86 m² (Soll) bzw. 0,52 m² (Ist). Diese könnten alternativ als Maßnahme zur kontinuierlichen Lüftung eingesetzt werden.

Die berechneten Volumenströme und die benötigte Lüftungsdauer, siehe Kapitel 3.2, können Bild 6-4 und Bild 6-5 entnommen werden. In Bild 6-4 ist der Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten aus Tabelle 6-3 gegenüber der Außenlufttemperatur abgebildet. Es wird eine Raumlufttemperatur von 20°C und eine Windgeschwindigkeit von 2 m/s angenommen. Letztere entspricht der durchschnittlichen jährlichen Windgeschwindigkeit in Stuttgart [41].

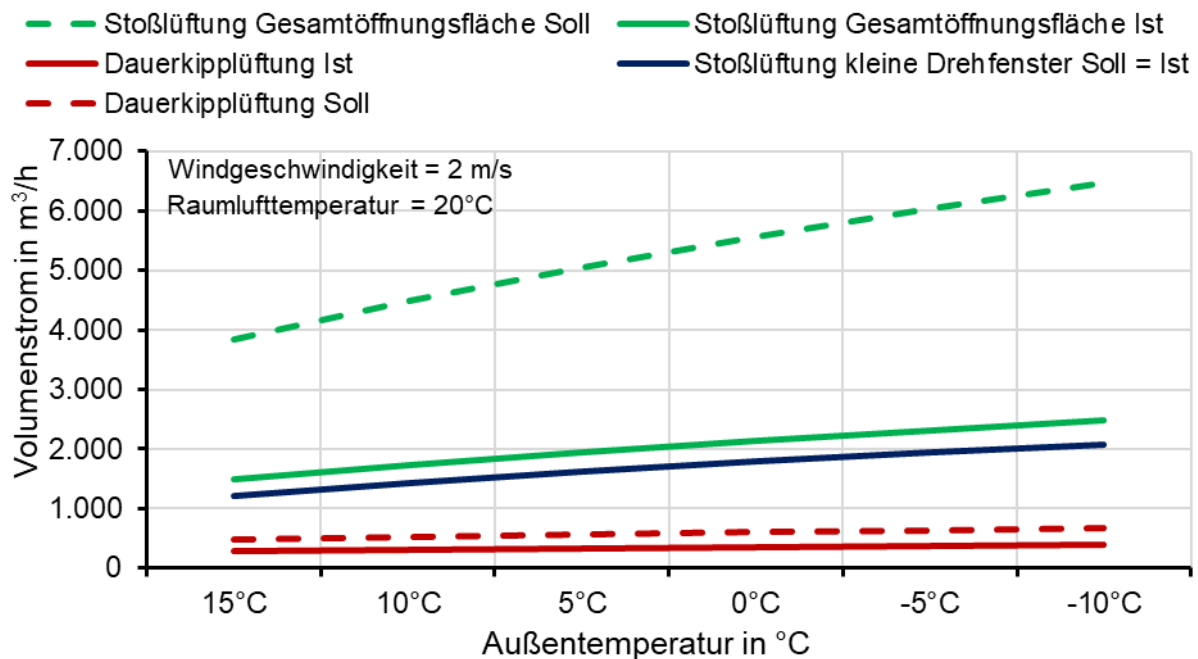


Bild 6-4: Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Solitude-Gymnasium

Bei Stoßlüften aller Fenster (Fall I/II) resultieren Volumenströme von $\dot{V} = 3.800 \dots 6.500 \text{ m}^3/\text{h}$ (Soll) bzw. $\dot{V} = 1.500 \dots 2.500 \text{ m}^3/\text{h}$ (Ist). Für das Stoßlüften mit den Drehfenstern (Fall III) werden Volumenströme von $\dot{V} = 1.200 \dots 2.100 \text{ m}^3/\text{h}$ (Soll) berechnet. Die Volumenströme bei Dauerkippplüftung (Fall IV/V) fallen mit $\dot{V} = 480 \dots 660 \text{ m}^3/\text{h}$ (Soll) bzw. $\dot{V} = 290 \dots 400 \text{ m}^3/\text{h}$ (Ist) am geringsten aus. Der Soll-Ist-Vergleich zeigt, dass insbesondere durch das Öffnen der großen Drehfenster (Typ B) vielfach höhere Luftwechsel zu erwarten sind.

Bild 6-5 stellt die benötigte Lüftungsdauer der betrachteten Lüftungsvarianten dar. Es ist die benötigte Lüftungsdauer bei unterschiedlicher Außenlufttemperatur zur Erreichung eines einfachen Luftwechsels aufgetragen. Die Raumlufttemperatur ist mit 20°C und die Windgeschwindigkeit mit 2 m/s angenommen.

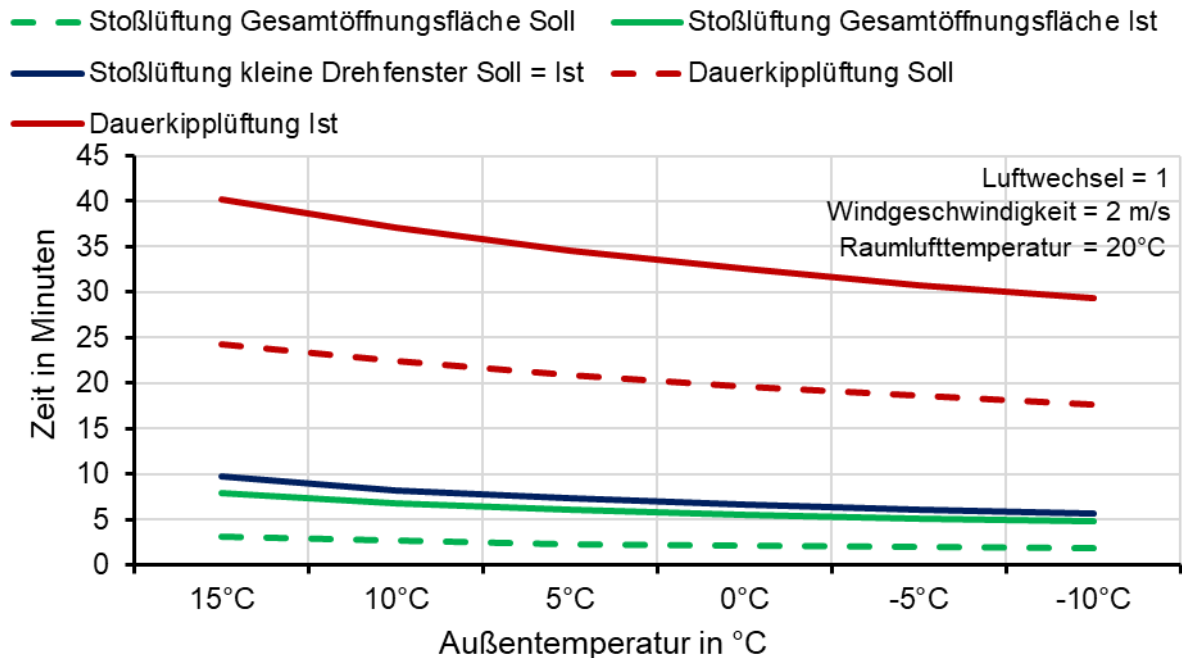


Bild 6-5: Benötigte Lüftungsdauer verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Solitude-Gymnasium

Für den Fall I/II wird eine Lüftungsdauer von 1,8 ... 3,1 min. (Soll) bzw. 4,7 ... 7,9 min. (Ist) berechnet. Damit eignet sich das Öffnen aller Fenster dieses Klassenraums nur im Soll-Zustand für das Stoßlüften nach dem vom Umweltbundesamt [16] vorgeschlagenen Lüftungsintervall von 20/5/20 min. Die benötigte Lüftungsdauer bei Öffnen der kleinen Drehfenster (Fall III) beträgt 5,6 ... 9,8 min (Soll = Ist). Somit ist diese Variante nicht geeignet, um in einer Lüftungspause von 5 Minuten die gesamte Raumluft mitsamt der Stofflasten auszutauschen. Die Dauerkipplüftung (Fall IV) benötigt für einen einfachen Luftwechsel eine Lüftungsdauer von 17,7 ... 24,3 min. (Soll) bzw. 29,3 ... 40,3 min. Damit wird die Anforderung einer Luftwechselrate von 5 ... 6 1/h (vgl. DIN EN 16798 [2]) in beiden Fällen nicht erfüllt. Die Lüftungsvariante III wäre jedoch eine Alternative zur Stoßlüftung aller Fenster (Fall I/II), wenn diese nach dem 20/5/20-Lüftungsintervall geöffnet würden. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass durch eventuelles Auskühlen des Raumes eine geringere Temperaturdifferenz für den Luftaustausch zur Verfügung stünde und sich der Außenluftvolumenstrom demzufolge verringert. Der Soll-Ist-Vergleich zeigt, dass geringere Lüftungsdauern bezüglich aller Varianten zu erwarten sind, sofern sämtliche Fenster der großen Fensterfront nutzbar gemacht werden.

6.2 Wilhelms-Gymnasium

Das Wilhelms-Gymnasium befindet sich in der Albstraße 80 in Stuttgart.

6.2.1 Daten Klassenraum

Der Klassenraum verfügt über einen Ein- bzw. Ausgang und befindet sich im Erdgeschoss des Schulgebäudes. In Tabelle 6-4 ist in gleicher Weise wie zuvor eine Zusammenstellung der Raumdaten aufgeführt. Als Übergabesystem zur Beheizung dienen zwei Heizkörper, welche unterhalb der großen Fensterfront angebracht sind.

Tabelle 6-4: Zusammenstellung der Raumdaten (Wilhelms-Gymnasium)

Raumeigenschaft	Daten
Abmessungen (LxBxH) in m	8,9 x 7,3 x 3,3
Grundfläche in m ²	65
Raumvolumen in m ³	ca. 216
Gesamtfensterfläche in m ²	15,75
Gesamtöffnungsfläche der Fenster in m ²	5,18
Nutzbarer Anteil in %	33
Übergabesystem zur Beheizung	2x Heizkörper: 2,9 x 0,42 (LxH) in m

Der Raum besitzt eine Außenwand, worin die Fenster integriert sind. Bei den Fenstern handelt es sich um dreifach verglaste Fenster, welche mit einem Kunststoffrahmen ausgeführt sind. In Summe verfügt der Raum über sechzehn Fenster, vier davon sind drehbar, vier sind ausschließlich kippbar und acht sind nicht öffnenbar. Die Beleuchtung des Raums erfolgt mittels Leuchtstoffröhren. In Bild 6-6 ist die Fensterfront des Raums und in Bild 6-7 die übliche Sitzanordnung im Klassenraum dargestellt.



Bild 6-6: Fensterfront (Wilhelms-Gymnasium)



Bild 6-7: Raumansicht (Wilhelms-Gymnasium)

6.2.2 Daten Luftreinigungsgerät

Die zwei Luftreinigungsgeräte der Fa. Mann+Hummel GmbH mit den Typ-Bezeichnungen OurAir SQ 2500 und OurAir TK 850 sind von der Tafel aus betrachtet im Raum, an der hinteren Wand auf der linken Seite aufgestellt (SQ 2500) und an der Außenwand vor der ersten Sitzreihe (TK 850) aufgestellt (Bild 6-8 und Bild 6-9).



Bild 6-8: Luftreinigungsgerät (TK 850) und Aufstellort im Klassenraum des Wilhelms-Gymnasiums



Bild 6-9: Luftreinigungsgerät (SQ 2500) und Aufstellort im Klassenraum des Wilhelms-Gymnasiums

Die Eigenschaften der Geräte sind in Tabelle 6-5 und Tabelle 6-6 angegeben. Das Gerät OurAir TK850 verfügt über einen einstellbaren Sekundärluftstrom im Bereich von 100 bis maximal 950 m³/h (zehn-stufig). Die Luft wird an der Unterseite des Geräts angesaugt und seitlich im oberen Bereich dem Raum zugeführt. Die zwei seitlichen Zuluftdurchlässe werden durch das Schalldämpferelement (schwarzes Plattenelement) gewährleistet. Bei einer Demontage des Schalldämpferelements erfolgt die Zuluft frontal in den Raum. Der standardmäßige Betrieb (Auslegung) liegt bei dem Gerät in Bezug auf den Klassenraum bei etwa 400 m³/h. Das Gerät ist mit einem zweistufigen Filterkonzept ausgestattet. Die erste Filterstufe setzt sich aus einem ePM10-Filter zusammen, wodurch 80% der Partikel abgeschieden werden. Dieser kann optional mit einer Aktivkohleschicht zur Beseitigung von Gerüchen ausgestattet werden. Mit der zweiten und letzten Filterstufe (HEPA H14) können in Summe theoretisch über 99% der Partikel abgeschieden werden.

Tabelle 6-5: Geräteeigenschaften (Herstellerangaben) des Luftreinigungsgerätes (OurAir TK850) im Wilhelms-Gymnasium [42]

Geräteeigenschaft	Wert
Sekundärluftstrom (Nennbetrieb) in m ³ /h	950
Sekundärluftstrom (Auslegung) in m ³ /h	400
Abscheidegrad in %	≥99,9
Stromaufnahme bei 950 m ³ /h in W	220
A-Schalldruckpegel in dB	30...57
Abmessungen (BxTxH) in m	0,63 x 0,51 x 0,77
Gewicht in kg	60

Bei Bedarf kann eine UV-C-Stufe, vor der zweiten Filterstufe genutzt werden. Bei einem Luftstrom von $950 \text{ m}^3/\text{h}$ weist das Gerät im Betrieb eine Stromaufnahme von 220 W auf. Der Schalldruckpegel (1 m-Umkreis) liegt laut Hersteller bei minimaler Leistungsstufe bei 30 dB und bei maximaler Leistungsstufe bei 57 dB. Das Gerät OurAir SQ2500 verfügt über einen einstellbaren Sekundärluftstrom im Bereich von 250 bis maximal $2.500 \text{ m}^3/\text{h}$ (zehn-stufig). Die Luft wird in Anlehnung an Bild 6-9 auf der rechten Seite angesaugt und an der Vorderseite des Geräts unterhalb der Abdeckplatte (grau) dem Raum wieder zugeführt. Der Betrieb (Auslegung) liegt mit dem Gerät für diesen Klassenraum bei etwa $1.250 \text{ m}^3/\text{h}$. Das Gerät ist mit einem zweistufigen Filterkonzept ausgestattet. Die erste Filterstufe setzt sich aus einem ePM1-Filter zusammen, wodurch 55% der Partikel abgeschieden werden. Dieser kann optional mit einer Aktivkohleschicht zur Beseitigung von Gerüchen ausgestattet werden. Mit der zweiten und letzten Filterstufe (HEPA H14) können in Summe theoretisch über 99% der Partikel abgeschieden werden. Bei Bedarf kann eine UV-C-Stufe, vor der zweiten Filterstufe eingeschaltet werden. Bei einem Luftstrom von $2.500 \text{ m}^3/\text{h}$ weist das Gerät im Betrieb laut Hersteller eine Stromaufnahme von 460 W auf. Der Schalldruckpegel (1 m-Umkreis) liegt bei minimaler Leistungsstufe bei 26 dB und bei maximaler Leistungsstufe bei 63 dB.

Tabelle 6-6: Geräteeigenschaften (Herstellerangaben) des Luftreinigungsgerätes (OurAir SQ2500) im Wilhelms-Gymnasium [43]

Geräteeigenschaft	Wert
Sekundärluftstrom (Nennbetrieb) in m^3/h	2.500
Sekundärluftstrom (Auslegung) in m^3/h	1.250
Abscheidegrad in %	$\geq 99,9$
Stromaufnahme bei $2500 \text{ m}^3/\text{h}$ in W	460
A-Schalldruckpegel in dB	26...63
Abmessungen (BxTxH) in m	0,523 x1,004x1,051
Gewicht in kg	150

In der Gesamtbetrachtung liegt der Sekundärluftstrom (Auslegung) mit beiden Geräten im Betrieb für diesen Klassenraum bei etwa $1.650 \text{ m}^3/\text{h}$, womit ein Luftwechsel von $n_{\text{Sekundär}} = 7,7 \text{ 1/h}$ erzielt wird.

6.2.3 Berechnung des Außenluftwechsels bei Fensterlüftung

Ein Überblick über die Dreh- und Kippfenster der untersuchten Schulen mit Angabe der nutzbaren Fensteröffnungsfläche befindet sich in Tabelle 6-41. Bild 6-10 veranschaulicht die Fensterfront des Wilhelms-Gymnasiums. Dabei werden die Fenstertypen mit A, B, C und D (grün: Fenster nutzbar, rot Fenster nicht nutzbar) gekennzeichnet. In dem vorliegenden Klassenraum lassen sich acht von insgesamt sechzehn Fenstern öffnen (Soll $\neq$ Ist).

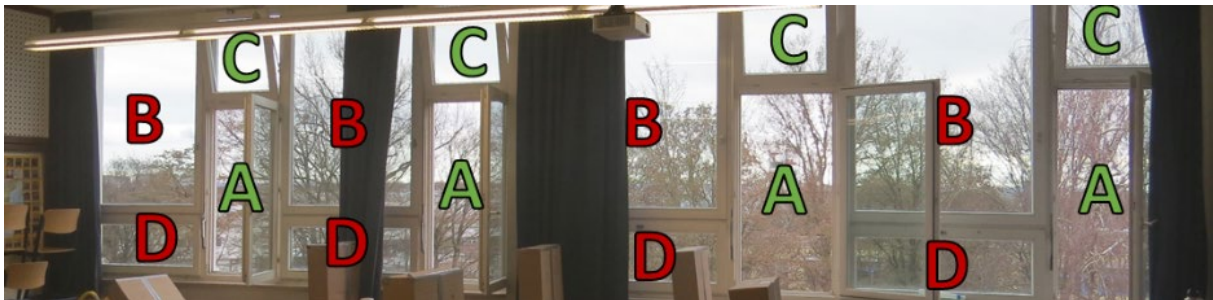


Bild 6-10: Fenstertypen im Wilhelms-Gymnasium

Für die Berechnung des Außenluftwechsels werden folgende Fallunterscheidungen getroffen, siehe Tabelle 6-7.

Tabelle 6-7: Lüftungsvarianten und Fenstertypen, Wilhelms-Gymnasium

	Soll		Ist	
Fenstertyp	i	A _{Fe} in m²	i	A _{Fe} in m²
Fall I: Stoßlüftung Gesamtöffnungsfläche Soll				
Fall II: Stoßlüftung Gesamtöffnungsfläche Ist				
A Drehfenster klein	4	3,93	4	3,93
B Drehfenster groß	4	8,92	0	0,00
C Kippfenster oben	4	1,25	4	1,25
D Kippfenster unten	4	1,65	0	0,00
	Σ = 15,75		Σ = 5,18	
Fall III: Stoßlüftung kleine Drehfenster Soll = Ist				
A Drehfenster klein	4	3,93	4	3,93
Fall IV: Dauerkipplüftung Soll, Fall V: Dauerkipplüftung Ist				
C Kippfenster oben	4	1,25	4	1,25
D Kippfenster unten	4	1,65	0	0,00
	Σ = 2,90		Σ = 1,25	

Fall I/II *Stoßlüftung Gesamtöffnungsfläche Soll/Ist* berücksichtigt alle derzeit nutzbaren Dreh- und Kippfenster (Soll/Ist). Dadurch ergibt sich eine Gesamtöffnungsfläche von 15,75 m² (Soll) bzw. 5,18 m² (Ist). Werden nach Fall III *Stoßlüftung kleine Drehfenster* die kleinen Drehfenster (Typ A) geöffnet, beträgt die Gesamtöffnungsfläche 3,93 m² (Soll=Ist). Fall IV/V *Dauerkipplüftung Soll/Ist* betrachtet ausschließlich die Kippfenster (Typ: C und D) mit einer Gesamtöffnungsfläche von 2,90 m² (Soll) bzw. 1,25 m² (Ist). Diese könnten alternativ als Maßnahme zur kontinuierlichen Lüftung eingesetzt werden.

Die berechneten Volumenströme und die benötigte Lüftungsdauer, siehe Kapitel 3.2, können Bild 6-11 und Bild 6-12 entnommen werden.

In Bild 6-11 ist der Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten aus Tabelle 6-7 gegenüber der Außenlufttemperatur abgebildet. Es wird eine Raumlufthtemperatur von 20°C und eine Windgeschwindigkeit von 2 m/s angenommen. Letztere entspricht der durchschnittlichen jährlichen Windgeschwindigkeit in Stuttgart [41].

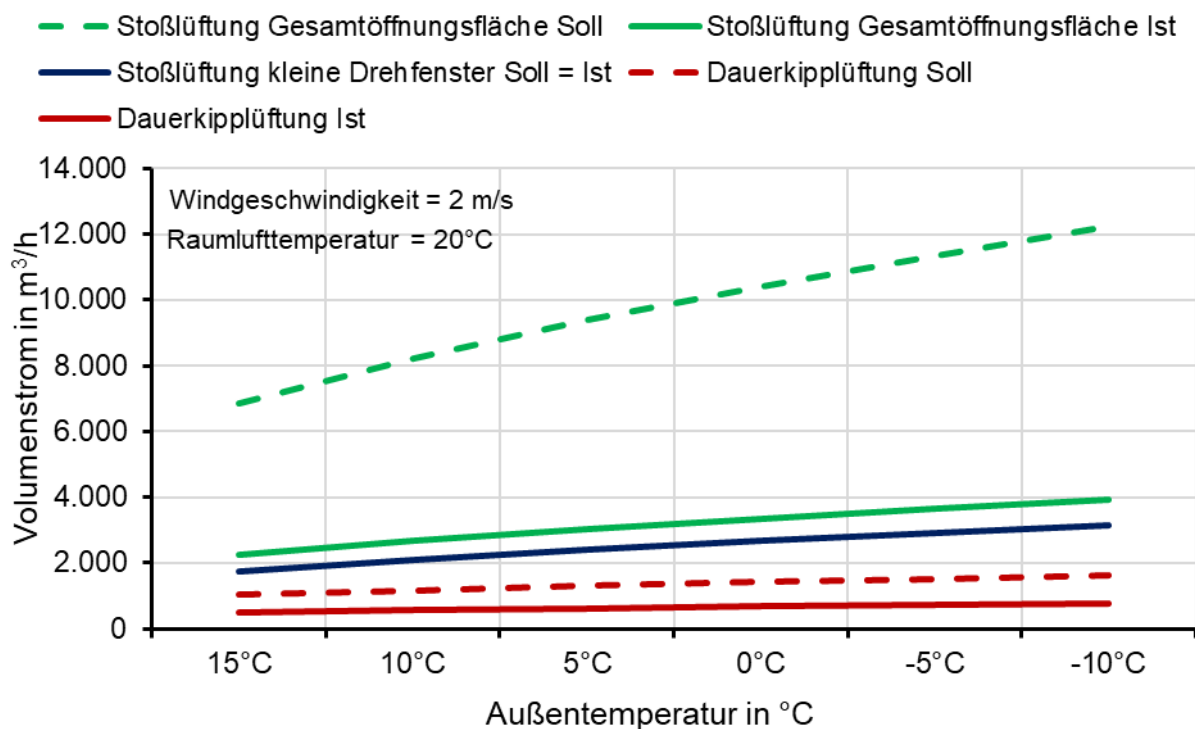


Bild 6-11: Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Wilhelms-Gymnasium

Bei Stoßlüften aller Fenster (Fall I/II) resultieren Volumenströme von $\dot{V} = 6.900 \dots 12.200 \text{ m}^3/\text{h}$ (Soll) bzw. $\dot{V} = 2.200 \dots 3.900 \text{ m}^3/\text{h}$ (Ist). Für das Stoßlüften mit den kleinen Drehfenstern (Fall III) werden Volumenströme von $\dot{V} = 1.750 \dots 3.100 \text{ m}^3/\text{h}$ (Soll=Ist) berechnet. Die Volumenströme bei Dauerkipplüftung (Fall IV/V) fallen mit $\dot{V} = 1.000 \dots 1.600 \text{ m}^3/\text{h}$ (Soll) bzw. $\dot{V} = 500 \dots 800 \text{ m}^3/\text{h}$ (Ist) am

geringsten aus. Der Soll-Ist-Vergleich zeigt, dass vielfach höhere Luftwechsel insbesondere bezüglich der Varianten I/II zu erwarten sind, sofern die nicht-öffenbaren Fenster der Fensterfront (Bild 6-10) nutzbar gemacht werden.

Bild 6-12 stellt die benötigte Lüftungsdauer der betrachteten Lüftungsvarianten dar. Es ist die benötigte Lüftungsdauer bei unterschiedlicher Außenlufttemperatur zur Erreichung eines einfachen Luftwechsels aufgetragen. Die Raumlufttemperatur ist mit 20°C und die Windgeschwindigkeit mit 2 m/s angenommen.

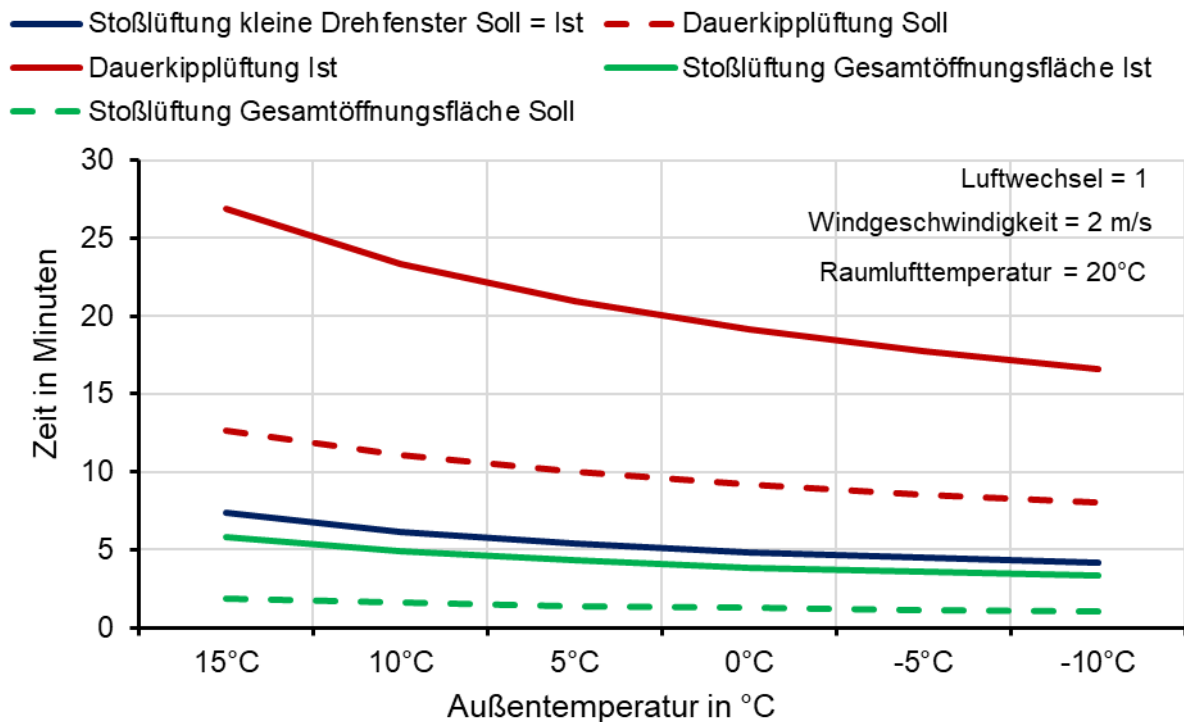


Bild 6-12: Benötigte Lüftungsdauer verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Wilhelms-Gymnasium

Für den Fall I/II wird eine Lüftungsdauer von 1,1 ... 1,9 min (Soll) bzw. 3,3 ... 5,8 min (Ist) berechnet. Damit eignet sich das Öffnen aller Fenster dieses Klassenraums im Soll-Zustand für das Stoßlüften nach dem vom Umweltbundesamt [16] vorgeschlagenen Lüftungsintervall von 20/5/20 min. Das Öffnen aller Fenster im Soll-Zustand eignet sich für dieses Lüftungsintervall nur für Außentemperaturen unter 10°C. Die benötigte Lüftungsdauer bei Öffnen der kleinen Drehfenster (Fall III) beträgt 4,1 ... 7,4 min (Soll=Ist). Somit ist es bei einer Außentemperatur über 0°C nicht möglich, in einer Lüftungspause von 5 Minuten die gesamte Raumluft mitsamt den Stofflasten auszutauschen. Die Dauerkipplüftung (Fall IV/V) benötigt für einen einfachen Luftwechsel eine Lüftungsdauer von 8,0 ... 12,6 min (Soll) bzw. 16,6 ... 26,9 min (Ist). Damit wird die Anforderung eines Luftwechsels von 5 ... 6 1/h (vgl. DIN EN 16798 [2]) lediglich im Soll-Zustand für Außentemperaturen unter 15°C erfüllt. Die Lüftungsvariante IV (Soll) wäre jedoch eine Alternative zur Stoßlüftung aller Fenster (Fall I/II), wenn diese nach dem 20/5/20-Lüftungsintervall geöffnet würden. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass durch eventuelles Auskühlen des Raumes eine geringere Temperaturdifferenz für den

Luftaustausch zur Verfügung stände und sich der Außenluftvolumenstrom demzufolge verringert. Der Soll-Ist-Vergleich zeigt, dass sich die Lüftungsdauern bezüglich der Varianten I/II und IV/V mindestens halbieren, sofern sämtliche Fenster der großen Fensterfront nutzbar gemacht werden.

6.3 Schwabschule

Die Schwabschule-Schloss Realschule befindet sich in der Bismarckstraße 30 in Stuttgart.

6.3.1 Daten des Klassenraums

Der Klassenraum in der Schwabschule- besitzt einen Ein- bzw. Ausgang. In Tabelle 6-8 ist, wie zuvor bei den vorangehenden Raumbeschreibungen, eine Zusammenstellung der Raumdaten aufgeführt.

Tabelle 6-8: Zusammenstellung der Raumdaten (Schwabschule)

Raumeigenschaft	Daten
Abmessungen (LxBxH) in m	8,9 x 6,8 x 3,9
Grundfläche in m ²	61
Raumvolumen in m ³	ca. 234
Gesamtfensterfläche in m ²	11,64
Gesamtöffnungsfläche der Fenster in m ²	2,08
Nutzbarer Anteil in %	18
Übergabesystem zur Beheizung	3x Heizkörper: 1,8 x 0,7 (LxH) in m

Der Raum besitzt eine Außenwand, in der die Fenster integriert sind. Bei den Fenstern handelt es sich um zweifach verglaste Fenster, welche mit einem Kunststoffrahmen ausgeführt sind. In Summe verfügt der Raum über zwölf Fenster, zwei davon sind drehbar und zehn sind nicht öffnenbar. Die Beleuchtung des Raums erfolgt mittels Leuchtstoffröhren. In Bild 6-13 ist die Fensterfront sowie eine Raumansicht mit der üblichen Sitzanordnung des Klassenraums abgebildet. Als Übergabesystem zur Beheizung sind drei Heizkörper unterhalb der Fensterfront installiert.



Bild 6-13: Raumansicht (links) und Fensterfront (rechts)

6.3.2 Daten Luftreinigungsgerät

Die zwei baugleichen Luftreinigungsgeräte der Trox GmbH (Typ TAP-M) sind, von der Tafel aus betrachtet, an der hinteren Wand links und rechts neben den Whiteboards im Klassenraum aufgestellt (Bild 6-14).



Bild 6-14: Luftreinigungsgerät und Aufstellort in der Schwabschule

Die Eigenschaften eines Geräts sind in Tabelle 6-9 angegeben. Das Gerät ermöglicht einen stufenlos einstellbaren Sekundärluftstrom im Bereich von 200 bis maximal 1.200 m³/h. Die Luft wird im unteren Bereich des Geräts angesaugt und über das Zu-
luftgitter an der Oberkante des Geräts dem Raum zugeführt. Der Betrieb (Auslegung) liegt bei etwa 600 m³/h pro Gerät, womit für den Klassenraum bei Betrieb beider Luft-
reinigungsgeräte ein Luftwechsel von $n_{\text{Sekundär}}=5,1$ 1/h erzielt wird.

Tabelle 6-9: Geräteigenschaften (Herstellerangaben) des Luftreinigungsgerätes in der Schwabschule [44]

Geräteeigenschaften eines Geräts	Wert
Sekundärluftstrom (Nennbetrieb) in m ³ /h	1.200
Sekundärluftstrom (Auslegung) in m ³ /h	600
n _{Sekundär} in 1/h (mit beiden Geräten)	5,1
Abscheidegrad in %	>99
Stromaufnahme bei Nennleistung in W	386
A-Schalldruckpegel in dB	30...52
Abmessungen (BxTxH) in m	0,64 x 0,44 x 2,31
Gewicht in kg	137

Das Gerät ist mit einem zweistufigen Filterkonzept ausgestattet. Die ersten Filterstufen setzen sich aus einem ePM1-Filter zusammen, wodurch 85% der Partikel abgeschieden werden. Mit der zweiten Filterstufe (HEPA H13) können in Summe theoretisch über 99% der Partikel abgeschieden werden. Bei Nenn-Sekundärluftstrom hat ein Gerät laut Hersteller eine Stromaufnahme von 386 Watt und weist einen A-bewerteten Schalldruckpegel (1 m-Umkreis) bei minimaler von 30 dB(A) und bei maximaler Leistungsstufe von 52 dB(A) auf.

6.3.3 Berechnung des Außenluftwechsels bei Fensterlüftung

Ein Überblick über die Dreh- und Kippfenster der untersuchten Schulen mit Angabe der nutzbaren Fensteröffnungsfläche befindet sich in Tabelle 6-41. Bild 6-15 veranschaulicht die Fensterfront der Schwabschule-Schloss Realschule. Dabei werden die Fenstertypen mit A, B, C und D (grün: Fenster nutzbar, rot Fenster nicht nutzbar) gekennzeichnet. Hierbei beschreiben nicht nutzbare Fenster solche, die prinzipiell offenbar eingebaut sind, jedoch aus verschiedenen Gründen (Fenster defekt, keine Fenstergriffe vorhanden, etc.) nicht genutzt werden können. In dem vorliegenden Klassenraum lassen sich zwei Fenster (Typ A) von insgesamt zwölf Fenstern öffnen (Soll ≠ Ist). Bei den nicht nutzbaren Fenstern vom Typ B handelt es sich um Schwingfenster mit horizontaler, mittiger Drehachse, so dass der untere Fensterteil nach außen schwingt und der obere Fensterteil nach innen.

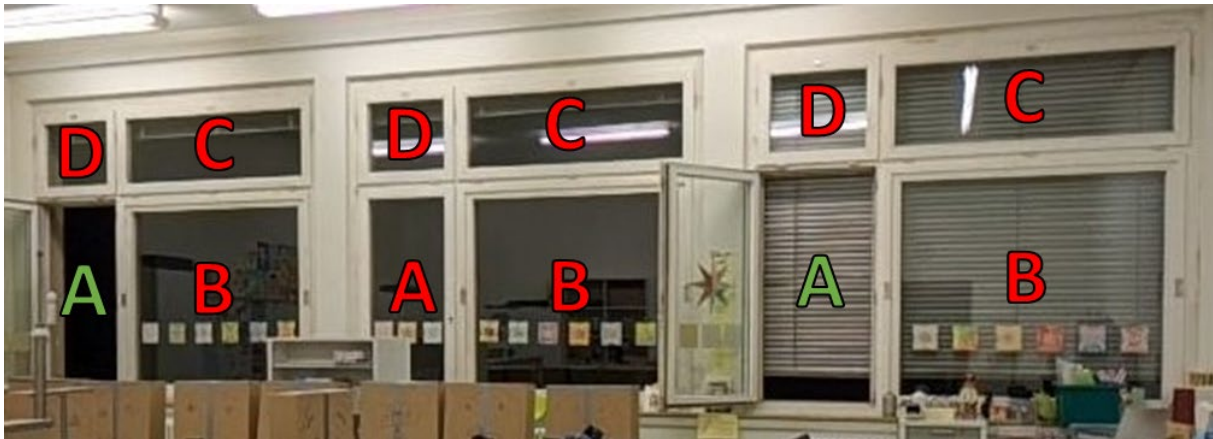


Bild 6-15: Fenstertypen in der Schwabschule-Schloss Realschule

Für die Berechnung des Außenluftwechsels werden folgende Fallunterscheidungen getroffen, siehe Tabelle 6-10.

Tabelle 6-10: Lüftungsvarianten und Fenstertypen, Schwabschule-Schloss Realschule

	Soll		Ist	
Fenstertyp	i	A _{Fe} in m²	i	A _{Fe} in m²
Fall I: Stoßlüftung Gesamtöffnungsfläche Soll				
Fall II: Stoßlüftung Gesamtöffnungsfläche Ist				
A Drehfenster klein	3	3,12	2	2,08
B Schwingfenster	3	6,57	0	0,00
C Kippfenster groß	3	1,19	0	0,00
D Kippfenster klein	3	0,76	0	0,00
	Σ = 11,64		Σ = 2,08	
Fall III: Stoßlüftung Schwingfenster Soll				
B Schwingfenster	3	6,57	0	0,00
Fall IV: Dauerkipplüftung Soll				
C Kippfenster groß	3	1,19	0	0,00
D Kippfenster klein	3	0,76	0	0,00
	Σ = 1,95		Σ = 0,0	

Fall I/II *Stoßlüftung Gesamtöffnungsfläche Soll/Ist* berücksichtigt alle derzeit nutzbaren Fenster (Soll/Ist). Dadurch ergibt sich eine Gesamtöffnungsfläche von 11,64 m² (Soll) bzw. 2,08 m² (Ist). Werden nach Fall III *Stoßlüftung Schwingfenster* die Schwingfenster (Typ B) geöffnet, beträgt die Gesamtöffnungsfläche 6,57 m² (Soll). In der Praxis hat

dies den Vorteil, dass die am Fenster sitzenden SchülerInnen nicht durch die Fensterflügel der Drehfenster (Typ A) beeinträchtigt werden. Fall IV *Dauerkipplüftung Soll* betrachtet ausschließlich die Kippfenster (Typ C und D) mit einer Gesamtöffnungsfläche von 1,95 m² (Soll). Diese könnten alternativ als Maßnahme zur kontinuierlichen Lüftung eingesetzt werden.

Die berechneten Volumenströme und die benötigte Lüftungsdauer, siehe Kapitel 3.2, können Bild 6-16 und Bild 6-17 entnommen werden. In Bild 6-16 ist der Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten aus Tabelle 6-10 gegenüber der Außenlufttemperatur abgebildet. Es wird eine Raumlufthtemperatur von 20°C und eine Windgeschwindigkeit von 2 m/s angenommen. Letztere entspricht der durchschnittlichen jährlichen Windgeschwindigkeit in Stuttgart [41].

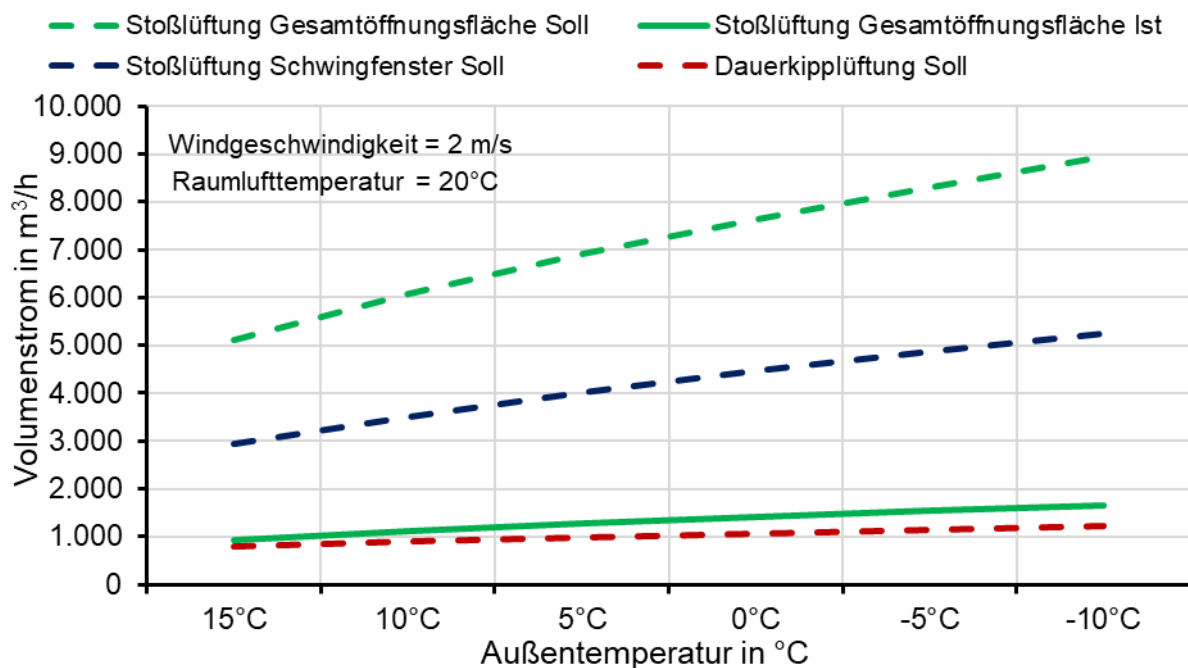


Bild 6-16: Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Schwabschule-Schloss Realschule

Bei Stoßlüften aller Fenster (Fall I/II) resultieren Volumenströme von $\dot{V} = 5.000 \dots 9.000 \text{ m}^3/\text{h}$ (Soll) bzw. $\dot{V} = 900 \dots 1.700 \text{ m}^3/\text{h}$ (Ist). Für das Stoßlüften mit den Schwingfenstern (Fall III) werden Volumenströme von $\dot{V} = 2.900 \dots 5.200 \text{ m}^3/\text{h}$ (Soll) berechnet. Die Volumenströme bei Dauerkippplüftung (Fall IV) fallen mit $\dot{V} = 800 \dots 1.200 \text{ m}^3/\text{h}$ (Soll) am geringsten aus. Der Soll-Ist-Vergleich zeigt, dass vielfach höhere Luftwechsel bezüglich aller Varianten zu erwarten sind, sofern die nicht-öffenbaren Fenster der Fensterfront (Bild 6-15) nutzbar gemacht werden.

Bild 6-17 stellt die benötigte Lüftungsdauer der betrachteten Lüftungsvarianten dar. Es ist die benötigte Lüftungsdauer bei unterschiedlicher Außenlufttemperatur zur Erreichung eines einfachen Luftwechsels aufgetragen. Die Raumlufthtemperatur ist mit 20°C und die Windgeschwindigkeit mit 2 m/s angenommen.

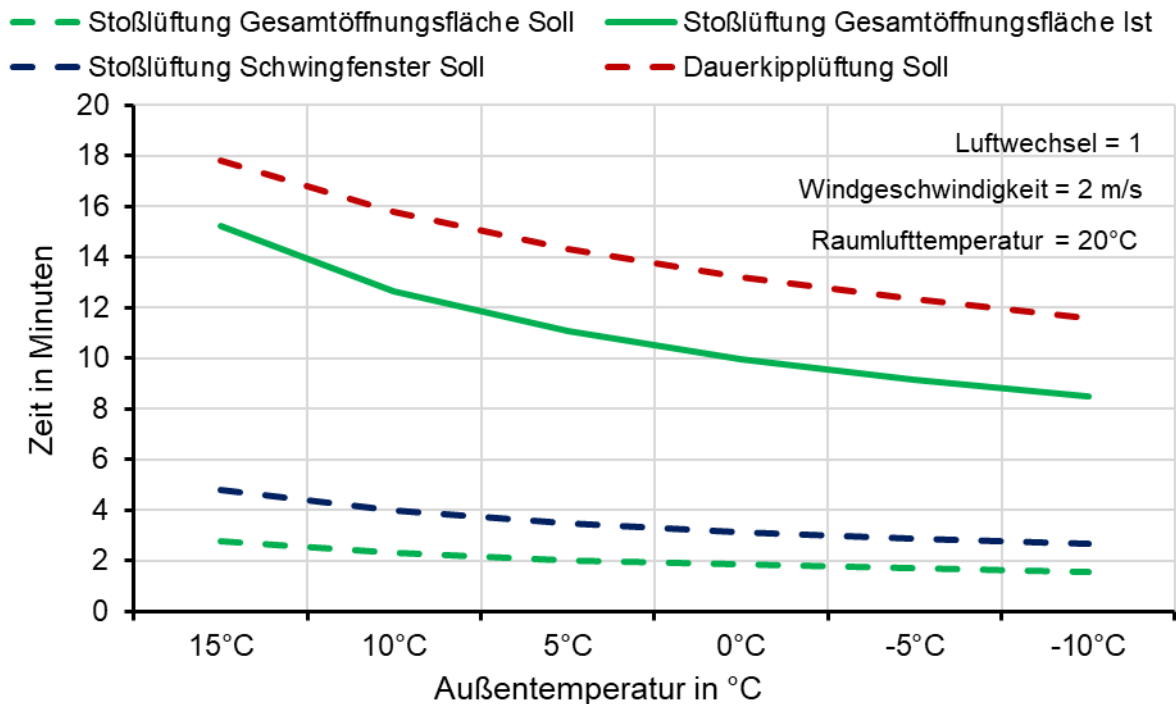


Bild 6-17: Benötigte Lüftungsdauer verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Schwabschule-Schloss Realschule

Für den Fall I/II wird eine Lüftungsdauer von 1,6 ... 2,7 min (Soll) bzw. 8,5 ... 15,2 min (Ist) berechnet. Damit eignet sich das Öffnen aller Fenster dieses Klassenraums nur im Soll-Zustand für das Stoßlüften nach dem vom Umweltbundesamt [16] vorgeschlagenen Lüftungsintervall von 20/5/20 min. Die benötigte Lüftungsdauer bei Öffnen der Schwingfenster (Fall III) beträgt 2,7 ... 4,8 min (Soll). Somit ist diese Variante geeignet, um in einer Lüftungspause von 5 Minuten die gesamte Raumluft mitsamt der Stofflasten auszutauschen. Die Dauerkipplüftung (Fall IV) benötigt für einen einfachen Luftwechsel eine Lüftungsdauer von 11,6 ... 18 min (Soll). Damit wird die Anforderung eines Luftwechsels von 5 ... 6 1/h (vgl. DIN EN 16798 [2]) nicht erfüllt. Die Lüftungsvariante IV wäre jedoch eine Alternative zur Stoßlüftung aller Fenster (Fall I/II), wenn diese nach dem 20/5/20-Lüftungsintervall geöffnet würden. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass durch eventuelles Auskühlen des Raumes eine geringere Temperaturdifferenz für den Luftaustausch zur Verfügung stünde und sich der Außenluftvolumenstrom demzufolge verringert. Energetische Aspekte und Behaglichkeitskriterien werden bei den Berechnungen nicht betrachtet. Der Soll-Ist-Vergleich zeigt, dass geringere Lüftungsdauern bezüglich aller Varianten zu erwarten sind, sofern sämtliche Fenster der großen Fensterfront nutzbar gemacht werden.

6.4 Wilhelmsschule Wangen

Die Wilhelmsschule Wangen befindet sich in der Hedelfinger Straße 9 in Stuttgart.

6.4.1 Daten Klassenraum

Der Klassenraum verfügt über einen Ein- bzw. Ausgang. In Tabelle 6-11 ist in gleicher Weise wie zuvor eine Zusammenstellung der Raumdaten aufgeführt. Als Übergabesystem zur Beheizung dienen vier Heizkörper, welche unterhalb der Fenster angebracht sind.

Tabelle 6-11: Zusammenstellung der Raumdaten (Wilhelmsschule Wangen)

Raumeigenschaft	Daten
Abmessungen (LxBxH) in m	9,4 x 7,1 x 3,4
Grundfläche in m ²	67
Raumvolumen in m ³	ca. 230
Gesamtfensterfläche in m ²	16,27
Gesamtöffnungsfläche der Fenster in m ²	8,04
Nutzbarer Anteil in %	49
Übergabesystem zur Beheizung	4x Heizkörper: 1,63 x 0,68 (LxH) in m

Der Raum besitzt eine Außenwand, worin die Fenster integriert sind. Bei den Fenstern handelt es sich um zweifach verglaste Fenster, welche mit einem Kunststoffrahmen ausgeführt sind. In Summe verfügt der Raum über acht öffnbare Fenster, vier davon sind drehbar, vier sind ausschließlich im gekippten Zustand öffnbar. Die Beleuchtung des Raums erfolgt mittels elf Leuchtstoffröhren. In Bild 6-18 ist die Fensterfront des Raums sowie die Räumlichkeit mit der üblichen Sitzanordnung im Klassenraum dargestellt.



Bild 6-18: Raumansicht (links) und Fensterfront (rechts)

6.4.2 Daten Luftreinigungsgerät

Das Luftreinigungsgerät der Firma Wolf GmbH (Typ Air Purifier AP) ist von der Tafel aus betrachtet mittig an der hinteren Wand im Klassenraum aufgestellt (Bild 6-19).



Bild 6-19: Luftreinigungsgerät und Aufstellort im Klassenraum der Wilhelmsschule Wangen

Die Eigenschaften des Geräts sind in Tabelle 6-12 angegeben. Das Gerät ermöglicht einen stufenlos einstellbaren Sekundärluftstrom im Bereich von 400 bis maximal 1.200 m³/h. Die Luft wird im unteren Bereich des Geräts angesaugt und über das Zuluftgitter an der Oberkante des Geräts dem Raum zugeführt. Der Betrieb (Auslegung) des Geräts liegt bei etwa 1.200 m³/h, womit für den Klassenraum ein Luftwechsel von $n_{\text{Sekundär}}=5,2$ 1/h erzielt wird.

Tabelle 6-12: Geräteeigenschaften des Luftreinigungsgerätes in der Wilhelmsschule Wangen [45]

Geräteeigenschaft	Wert
Sekundärluftstrom (Nennbetrieb) in m ³ /h je Gerät	1.200
Sekundärluftstrom (Auslegung) in m ³ /h je Gerät	1.200
$n_{\text{Sekundär}}$ (Auslegung) in 1/h	5,2
Abscheidegrad in %	>99
Stromaufnahme bei Nennleistung in W	275
A-Schalldruckpegel in dB	28...42
Abmessungen (BxTxH) in m	0,71 x 0,51 x 2,354
Gewicht in kg	195

Durch Betätigung eines Knopfes lässt sich der Sekundärluftstrom kurzfristig auf den Nennluftstrom erhöhen. Das Gerät ist mit einem zweistufigen Filterkonzept ausgestattet. Die erste Filterstufe setzt sich aus einem ePM1-Filter zusammen, wodurch 65% der Partikel abgeschieden werden. Mit der zweiten Filterstufe (HEPA H14) können in Summe theoretisch über 99% der Partikel abgeschieden werden. Bei Nenn-Sekundärluftstrom hat ein Gerät eine Stromaufnahme von 275 Watt und weist einen A-bewerteten Schalldruckpegel (1 m-Umkreis) bei minimaler von 28 dB(A) und bei maximaler Leistungsstufe von 42 dB(A) auf.

6.4.3 Berechnung des Außenluftwechsels bei Fensterlüftung

Ein Überblick über die Dreh- und Kippfenster der untersuchten Schulen mit Angabe der nutzbaren Fensteröffnungsfläche befindet sich in Tabelle 6-41 im Anhang. Bild 6-20 veranschaulicht die Fensterfront in der Wilhelmsschule Wangen. Dabei werden die Fenstertypen mit A, B, C und D (grün: Fenster nutzbar, rot Fenster nicht nutzbar) gekennzeichnet. In dem vorliegenden Klassenraum lassen sich insgesamt acht von zwölf Fenstern öffnen (Soll $\neq$ Ist). Dabei können die Fenster vom Typ B/C sowohl gedreht als auch gekippt werden. In der Praxis empfiehlt sich die Verwendung als Drehfenster nicht, da die am Fenster sitzenden SchülerInnen durch die großen Fensterflügel beeinträchtigt würden. Aus diesem Grund werden die großen Drehfenster (Typ B) als nicht nutzbar gekennzeichnet.



Bild 6-20: Fenstertypen in der Wilhelmsschule Wangen

Für die Berechnung des Außenluftwechsels werden folgende Fallunterscheidungen getroffen, siehe Tabelle 6-13.

Tabelle 6-13: Lüftungsvarianten und Fenstertypen, Wilhelmsschule Wangen

	Soll		Ist	
Fenstertyp	i	A _{Fe} in m²	i	A _{Fe} in m²
Fall I: Stoßlüftung Gesamtöffnungsfläche Soll				
Fall II: Stoßlüftung Gesamtöffnungsfläche Ist				
A Drehfenster klein	4	4,18	4	4,18
B Drehfenster groß	4	11,23	0	0,00
C Kippfenster groß	0	0,00	4	3,86
D Kippfenster klein	4	0,86	0	0,00
	Σ = 16,27		Σ = 8,04	
Fall III: Stoßlüftung kleine Drehfenster Soll = Ist				
A Drehfenster klein	4	4,18	4	4,18
Fall IV: Dauerkipplüftung Soll, Fall V: Dauerkipplüftung Ist				
C Kippfenster groß	4	3,86	4	3,86
D Kippfenster klein	4	0,86	0	0,00
	Σ = 4,72		Σ = 3,86	

Fall I/II *Stoßlüftung Gesamtöffnungsfläche* Soll/Ist berücksichtigt alle derzeit nutzbaren Fenster (Soll/Ist). Dadurch ergibt sich eine Gesamtöffnungsfläche von 16,27 m² (Soll) bzw. 8,04 m² (Ist). Werden nach Fall III *Stoßlüftung kleine Drehfenster* Soll = Ist lediglich die kleinen Drehfenster (Typ: A) geöffnet, beträgt die Gesamtöffnungsfläche 4,18 m² (Soll = Ist). In der Praxis hat dies gegenüber Fall I den Vorteil, dass die am Fenster sitzenden SchülerInnen nicht durch die Fensterflügel der großen Drehfenster (Typ B) beeinträchtigt werden. Fall IV/V *Dauerkipplüftung* Soll/Ist betrachtet ausschließlich die Kippfenster (Typ: C und D) mit einer Gesamtöffnungsfläche von 4,72 m² (Soll) bzw. 3,86 m² (Ist). Diese könnten alternativ als Maßnahme zur kontinuierlichen Lüftung eingesetzt werden.

Die berechneten Volumenströme und die benötigte Lüftungsdauer, siehe Kapitel 3.2, können Bild 6-21 und Bild 6-22 entnommen werden. In Bild 6-21 ist der Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten aus Tabelle 6-13 gegenüber der Außenlufttemperatur abgebildet. Es wird eine Raumlufttemperatur von 20°C und eine Windgeschwindigkeit von 2 m/s angenommen. Letztere entspricht der durchschnittlichen jährlichen Windgeschwindigkeit in Stuttgart [41].

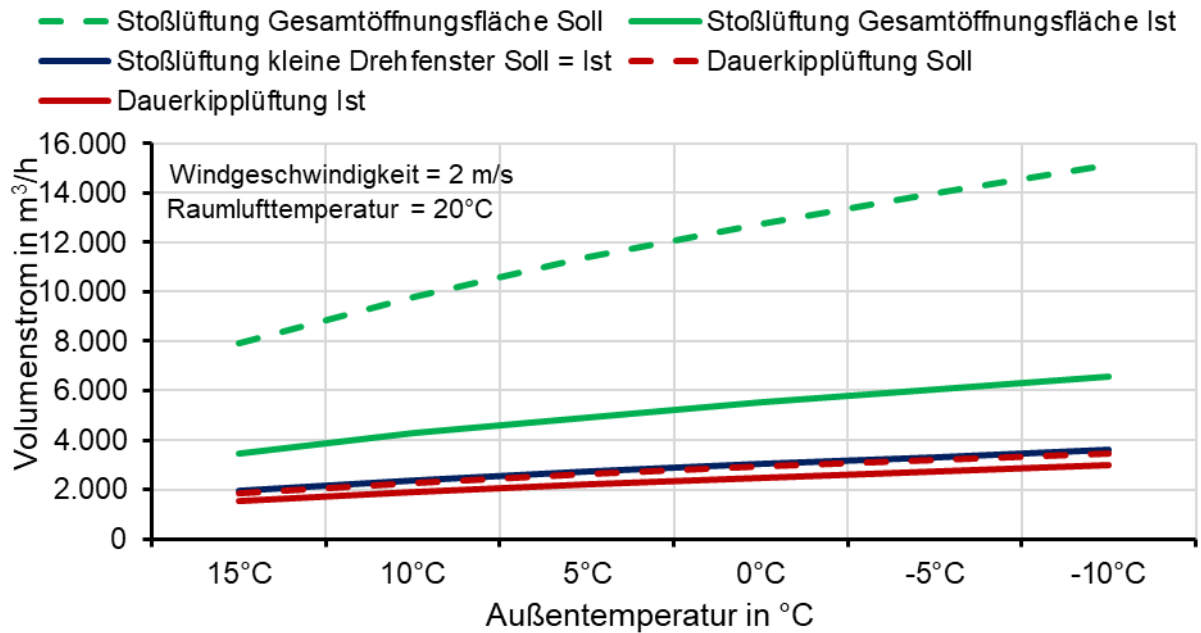


Bild 6-21: Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Wilhelmsschule Wangen

Bei Stoßlüften aller Fenster (Fall I/II) resultieren Volumenströme von $\dot{V} = 7.900 \dots 15.200 \text{ m}^3/\text{h}$ (Soll) bzw. $\dot{V} = 3.500 \dots 6.600 \text{ m}^3/\text{h}$ (Ist). Für das Stoßlüften mit den kleinen Drehfenstern (Fall III) werden Volumenströme von $\dot{V} = 1.900 \dots 3.600 \text{ m}^3/\text{h}$ (Soll = Ist) berechnet. Ähnlich gering fallen die Volumenströme bei Dauerkipplüftung (Fall IV/V) mit $\dot{V} = 1.800 \dots 3.450 \text{ m}^3/\text{h}$ (Soll) bzw. $\dot{V} = 1.500 \dots 3.000 \text{ m}^3/\text{h}$ (Soll) aus. Der Soll-Ist-Vergleich zeigt eine erhebliche Erhöhung des Luftwechsels bezüglich der Varianten I/II. Der Unterschied bezüglich der Dauerkipplüftung (Fall IV/V) fällt dagegen gering aus.

Bild 6-22 stellt die benötigte Lüftungsdauer der betrachteten Lüftungsvarianten dar. Es ist die benötigte Lüftungsdauer bei unterschiedlicher Außenlufttemperatur zur Erreichung eines einfachen Luftwechsels aufgetragen. Die Raumlufttemperatur ist mit 20°C und die Windgeschwindigkeit mit 2 m/s angenommen.

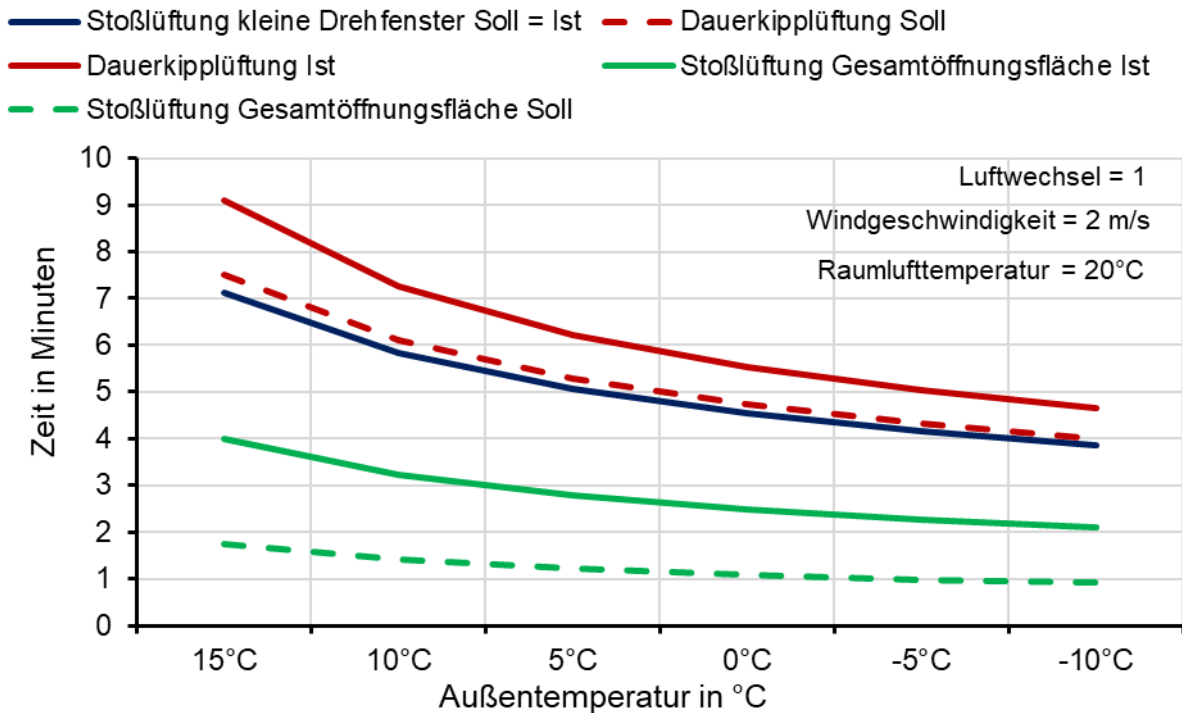


Bild 6-22: Benötigte Lüftungsdauer verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Wilhelmsschule Wangen

Für den Fall I/II wird eine Lüftungsdauer von 0,9 ... 1,7 min. (Soll) bzw. 2,1 ... 4,0 min. (Ist) berechnet. Damit eignet sich das Öffnen aller Fenster dieses Klassenraums im Soll- und im Ist-Zustand für das Stoßlüften nach dem vom Umweltbundesamt [16] vorgeschlagenen Lüftungsintervall von 20/5/20 min. Die benötigte Lüftungsdauer bei Öffnen der kleinen Drehfenster (Fall III) beträgt 3,8 ... 7,1 min (Soll = Ist). Somit ist diese Variante nicht (bzw. nur für niedrige Außentemperaturen) geeignet, um in einer Lüftungspause von 5 Minuten die gesamte Raumluft mitsamt der Stofflasten auszutauschen. Die Dauerkipplüftung (Fall IV/V) benötigt für einen einfachen Luftwechsel eine Lüftungsdauer von 4,0 ... 7,5 min. (Soll) bzw. 4,7 ... 9,1 min. Damit wird die Anforderung einer Luftwechselrate von 5 ... 6 1/h (vgl. DIN EN 16798 [2]) in beiden Fällen erfüllt.

6.5 Steigschule Bau 1

Das Steigschule Bau 1 befindet sich auf der Altenburg 8 in Stuttgart.

6.5.1 Daten Klassenräume

Der Klassenraum verfügt über einen Ein- bzw. Ausgang. In Tabelle 6-14 ist in gleicher Weise wie bei der Beschreibung der vorherigen Klassenräume eine Zusammenstellung der Raumdaten aufgeführt.

Tabelle 6-14: Zusammenstellung der Raumdaten (Steigschule Bau 1)

Raumeigenschaft	Daten
Abmessungen (LxBxH) in m	7,6 x 7,0 x 2,7-4,2
Grundfläche in m ²	53
Raumvolumen in m ³	ca. 184
Gesamtfensterfläche in m ²	10,15
Gesamtöffnungsfläche der Fenster in m ²	5,62
Nutzbarer Anteil in %	55
Übergabesystem zur Beheizung	2x Heizkörper: 2,9 x 0,55 (LxH) in m

Der Raum hat zwei nach außen orientierte Wandflächen, worin jeweils Fenster integriert sind. Bei den Fenstern handelt es sich um zweifach verglaste Fenster, welche mit einem Kunststoffrahmen ausgeführt sind. In Summe verfügt der Raum über acht öffenbare Fenster, drei davon sind drehbar und fünf sind ausschließlich im gekippten Zustand öffenbar. Die Beleuchtung des Raums erfolgt mittels zwölf Leuchtstoffröhren. In Bild 6-23 und Bild 6-24 sind eine Raumansicht mit der üblichen Sitzanordnung und die beiden Fensterflächen des Raums dargestellt.



Bild 6-23: Raumansicht des Klassenraums

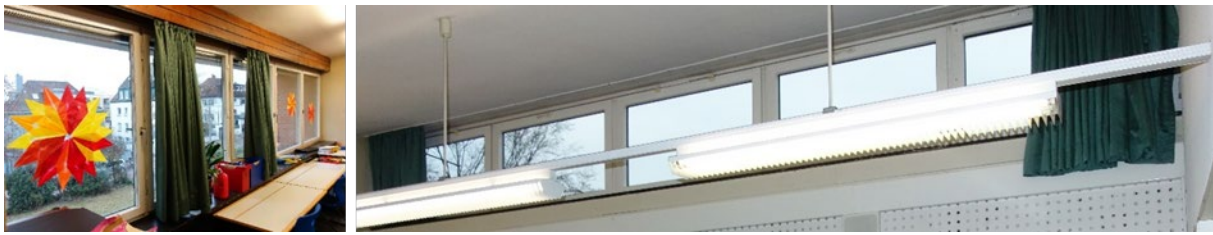


Bild 6-24: Drehfensterfront (links) und Kippfensterfront (rechts)

Als Übergabesystem zur Beheizung sind insgesamt zwei Heizkörper unterhalb der Drehfensterfront installiert

6.5.2 Daten Luftreinigungsgerät

Das Luftreinigungsgerät der Firma Mann+Hummel GmbH (Typ SQ2500) ist im Klassenraum von der Tafel aus gesehen rechts neben der Tafel vor den Fenstern aufgestellt (Bild 6-25) und baugleich mit dem Gerät im Wilhelms-Gymnasiums (siehe Kapitel 6.2 und Tabelle 6-6).



Bild 6-25: Luftreinigungsgerät und Aufstellort im Klassenraum der Steigschule Bau 1

Der standardmäßige Betrieb (Auslegung) liegt für diesen Klassenraum bei etwa $1.000 \text{ m}^3/\text{h}$, womit ein Luftwechsel von $n_{\text{Sekundär}}=5,4 \text{ 1/h}$ erzielt wird.

6.5.3 Berechnung des Außenluftwechsels bei Fensterlüftung

Ein Überblick über die Dreh- und Kippfenster der untersuchten Schulen mit Angabe der nutzbaren Fensteröffnungsfläche befindet sich in Tabelle 6-41 i. Bild 6-26 und Bild 6-27 veranschaulichen die Fensterfront der Steigschule Bau 1. Dabei werden die Fenstertypen mit A/C, B/D sowie E (grün: Fenster nutzbar, rot Fenster nicht nutzbar) gekennzeichnet. In dem vorliegenden Klassenraum lassen sich die drei Fenster von Typ A/C öffnen. An den Fenstern von Typ B/D sind keine Griffe montiert, sodass ein Öffnen nicht möglich ist. Gegenüberliegend gibt es fünf elektrisch öffnende Fenster von Typ E, die während der Messung nicht nutzbar waren. Insgesamt sind damit drei von zehn Fenstern nutzbar.



Bild 6-26: Fenstertypen in der Steigschule Bau 1, große Fensterfront



Bild 6-27: Fenstertypen in der Steigschule Bau 1, kleine Fensterfront

Für die Berechnung des Außenluftwechsels werden folgende Fallunterscheidungen getroffen, siehe Tabelle 6-15. Die Fenster vom Typ E werden nicht betrachtet, da der Modellansatz nur für einseitige Fensterlüftung gültig ist.

Tabelle 6-15: Lüftungsvarianten und Fenstertypen, Steigschule Bau 1

	Soll		Ist	
Fenstertyp	i	A _{Fe} in m²	i	A _{Fe} in m²
Fall I: Stoßlüftung Gesamtöffnungsfläche Soll				
Fall II: Stoßlüftung Gesamtöffnungsfläche Ist				
A Drehfenster 1	3	5,62	3	5,62
B Drehfenster 2	2	4,53	0	0,00
	Σ = 10,15		Σ = 5,62	
Fall III: Dauerkipplüftung Soll, Fall IV: Dauerkipplüftung Ist				
C Drehfenster 1 gekippt	3	3,24	3	3,24
D Drehfenster 2 gekippt	2	2,37	0	0,00
	Σ = 5,61		Σ = 3,24	

Fall I/II *Stoßlüftung Gesamtöffnungsfläche Soll/Ist* berücksichtigt alle derzeit nutzbaren Fenster (Soll/Ist). Dadurch ergibt sich eine Gesamtöffnungsfläche von 10,15 m² (Soll) bzw. 5,62 m² (Ist). In den Fällen III/IV *Dauerkipplüftung Soll/Ist* werden alle Drehfenster gekippt, sodass die Gesamtöffnungsfläche 5,61 m² (Soll) bzw. 3,24 m² (Ist) beträgt. Diese könnten alternativ als Maßnahme zur kontinuierlichen Lüftung eingesetzt werden.

Die berechneten Volumenströme und die benötigte Lüftungsdauer, siehe Kapitel 3.2, können Bild 6-28 und Bild 6-29 entnommen werden. In Bild 6-28 ist der Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten aus Tabelle 6-15 gegenüber der Außenlufttemperatur abgebildet. Es wird eine Raumlufthtemperatur von 20°C und eine Windgeschwindigkeit von 2 m/s angenommen. Letztere entspricht der durchschnittlichen jährlichen Windgeschwindigkeit in Stuttgart [41].

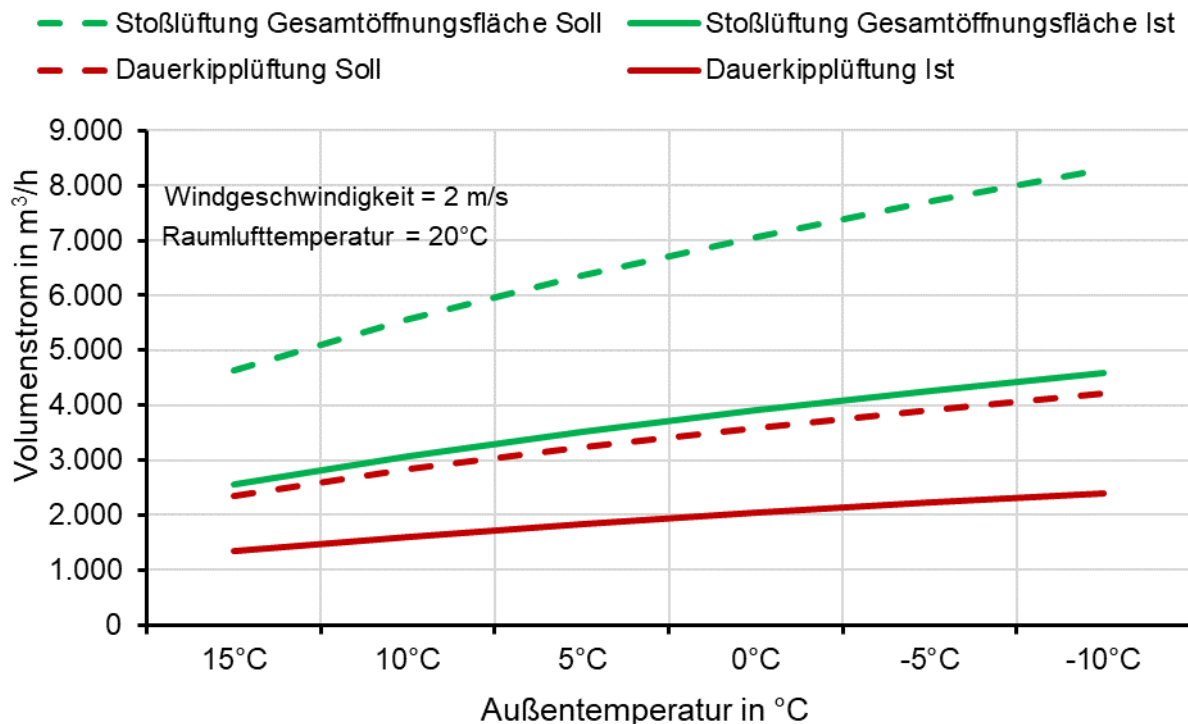


Bild 6-28: Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Steigschule Bau 1

Bei Stoßlüften aller Fenster (Fall I/II) resultieren Volumenströme von $\dot{V} = 4.600 \dots 8.300 \text{ m}^3/\text{h}$ (Soll) bzw. $\dot{V} = 2.600 \dots 4.600 \text{ m}^3/\text{h}$ (Ist). Die Volumenströme bei Dauerkipplüftung (Fall III/IV) fallen mit $\dot{V} = 2.350 \dots 4.200 \text{ m}^3/\text{h}$ (Soll) bzw. $\dot{V} = 1.350 \dots 2.400 \text{ m}^3/\text{h}$ geringer aus. Der Soll-Ist-Vergleich zeigt, dass höhere Luftwechsel bezüglich aller Varianten zu erwarten sind, sofern die nicht-öffenbaren Fenster der Fensterfront (Bild 6-26) nutzbar gemacht werden.

Bild 6-29 stellt die benötigte Lüftungsdauer der betrachteten Lüftungsvarianten dar. Es ist die benötigte Lüftungsdauer bei unterschiedlicher Außenlufttemperatur zur Erreichung eines einfachen Luftwechsels aufgetragen. Die Raumlufttemperatur ist mit 20°C und die Windgeschwindigkeit mit 2 m/s angenommen.

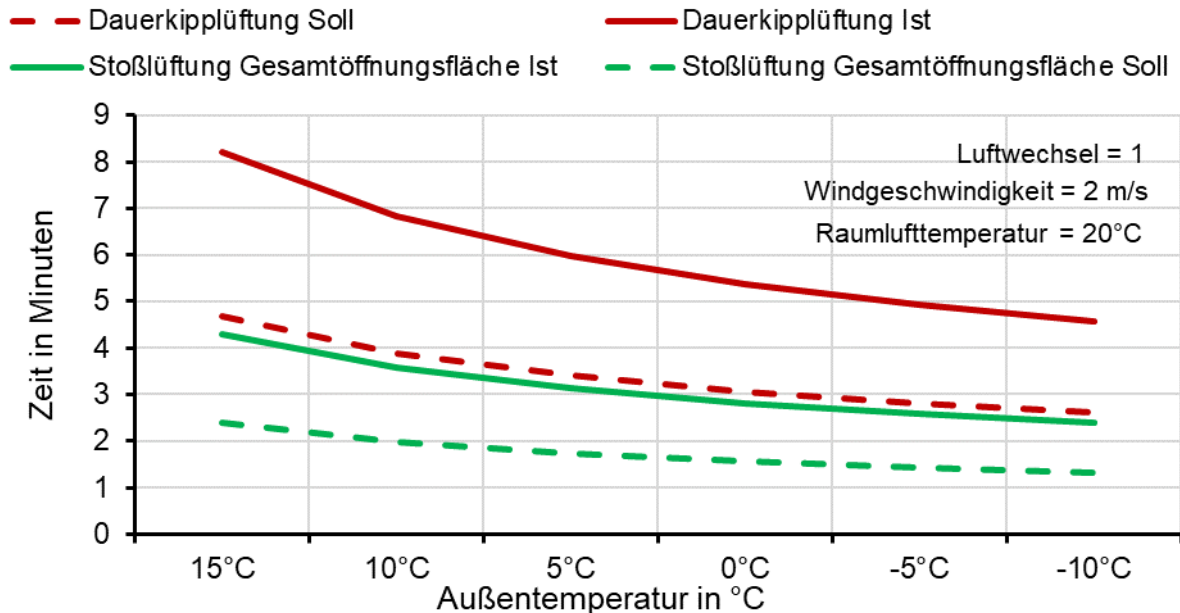


Bild 6-29: Benötigte Lüftungsdauer verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Steigschule Bau 1

Für den Fall I/II wird eine Lüftungsdauer von 1,3 ... 2,4 min. (Soll) bzw. 2,4 ... 4,3 min. (Ist) berechnet. Damit eignet sich das Öffnen aller Fenster dieses Klassenraums im Soll- und im Ist-Zustand für das Stoßlüften nach dem vom Umweltbundesamt [16] vorgeschlagenen Lüftungsintervall von 20/5/20 min. Somit ist diese Variante geeignet, um in einer Lüftungspause von 5 Minuten die gesamte Raumluft mitsamt der Stofflasten auszutauschen. Die Dauerkippplüftung (Fall IV/V) benötigt für einen einfachen Luftwechsel eine Lüftungsdauer von 2,6 ... 4,7 min. (Soll) bzw. 4,6 ... 8,2 min. Damit eignet sich selbst die Kippplüftung im Soll-Zustand für ein Lüftungsintervall von 20/5/20. Im Ist-Zustand ist die benötigte Lüftungsdauer allerdings zu hoch. Für beide Fälle (III/IV) wird die Anforderung einer Luftwechselrate von 5 ... 6 1/h (vgl. DIN EN 16798 [2]) erfüllt.

6.6 Steinbeisschule Hauptbau

Die Steinbeisschule Hauptbau befindet sich in der Steinbeisstraße 5 in Stuttgart.

6.6.1 Daten des Klassenraums

Der Klassenraum in der Steinbeisschule Hauptbau besitzt einen Ein- bzw. Ausgang und befindet sich im Untergeschoss des Schulgebäudes. In Tabelle 6-16 ist eine Zusammenstellung der Raumdaten aufgeführt. Dabei sind in gleicher Weise wie bei den Beschreibungen der vorherigen Klassenräume die Raummaße des Klassenraums, die Gesamtöffnungsfläche sowie das Übergabesystem zur Beheizung dargestellt.

Tabelle 6-16: Zusammenstellung der Raumdaten (Steinbeisschule Hauptbau)

Raumeigenschaft	Daten
Abmessungen (LxBxH) in m	10,3 x 7,3 x 2,4
Grundfläche in m ²	75
Raumvolumen in m ³	ca. 180
Gesamtfensterfläche in m ²	1,51
Gesamtöffnungsfläche der Fenster in m ²	1,51
Nutzbarer Anteil in %	100
Übergabesystem zur Beheizung	1x Heizkörper: 1,5 x 0,57 (LxH) in m

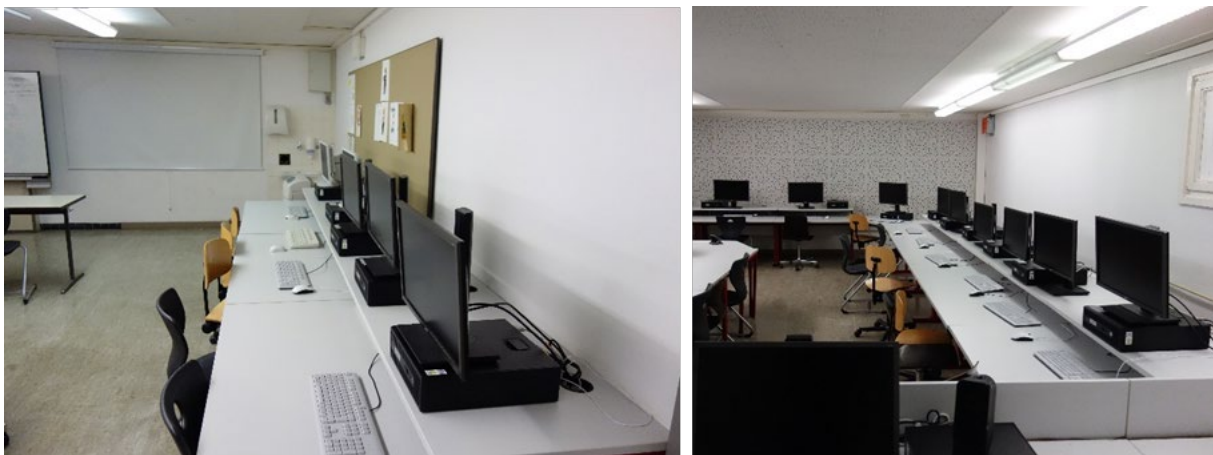


Bild 6-30: Raumansicht des Klassenraums in der Steinbeisschule

Der Raum besitzt eine Außenwand, worin die Fenster integriert sind. Bei den Fenstern handelt es sich um zweifach verglaste Fenster, welche mit einem Kunststoffrahmen ausgeführt sind. In Summe verfügt der Raum über drei öffnbare Fenster, die sich entweder drehbar oder im gekippten Zustand öffnen lassen. Die Beleuchtung des Raums erfolgt mittels zwanzig Leuchtstoffröhren. In Bild 6-30 ist eine Raumansicht mit

der üblichen Sitzordnung des Klassenraums und in Bild 6-31 die Fensterfront abgebildet. Als Übergabesystem zur Beheizung ist ein Heizkörper unterhalb der Fensterfront installiert.



Bild 6-31: Position der Fensterfront im Klassenraum (links) und Fensterfront (rechts)

6.6.2 Daten Luftreinigungsgerät

Das Luftreinigungsgerät der Fa. Mann+Hummel GmbH (Typ SQ2500) ist im Klassenraum von der Tafel aus gesehen in der rechten hinteren Ecke aufgestellt (Bild 6-32) und ist ebenfalls baugleich mit dem Gerät des Wilhelms-Gymnasiums bzw. der Steigschule Bau 1. Eine detaillierte Beschreibung ist dementsprechend in Kapitel 6.2.2 enthalten.



Bild 6-32: Luftreinigungsgerät und Aufstellort in der Steinbeisschule Hauptbau 1

Der standardmäßige Betrieb (Auslegung) liegt für diesen Klassenraum bei etwa $1.250 \text{ m}^3/\text{h}$, womit ein Luftwechsel von $n_{\text{Sekundär}}=6,9 \text{ 1/h}$ erzielt wird.

6.6.3 Berechnung des Außenluftwechsels bei Fensterlüftung

Ein Überblick über die Dreh- und Kippfenster der untersuchten Schulen mit Angabe der nutzbaren Fensteröffnungsfläche befindet sich in Tabelle 6-41 im Anhang. Bild

6-33 veranschaulicht die Fensterfront der Steinbeisschule. Bei den drei Fenstern handelt es sich um Dreh-Kipp-Fenster (Typ A/B), die vollständig nutzbar sind (Soll = Ist).



Bild 6-33: Fenstertypen in der Steinbeisschule Hauptbau

Für die Berechnung des Außenluftwechsels werden folgende Fallunterscheidungen getroffen, siehe Tabelle 6-17.

Tabelle 6-17: Lüftungsvarianten und Fenstertypen, Steinbeisschule Hauptbau

Fenstertyp	i	A_{Fe} in m^2
Fall I: <i>Stoßlüftung Gesamtöffnungsfläche</i>		
A Drehfenster	3	1,51
Fall II: <i>Stoßlüftung einzelnes Drehfenster</i>		
A Drehfenster	1	0,50
Fall II: <i>Dauerkipplüftung</i>		
B Kippfenster	3	0,51

Fall I *Stoßlüftung Gesamtöffnungsfläche* berücksichtigt alle drei Fenster als Drehfenster. Dadurch ergibt sich eine Gesamtöffnungsfläche von 1,51 m^2 . Wird nach Fall II *Stoßlüftung einzelnes Drehfenster* lediglich eines der drei Drehfenster geöffnet, beträgt die Gesamtöffnungsfläche 0,50 m^2 . Fall III *Dauerkipplüftung* betrachtet die Fenster als Kippfenster (Typ B), woraus sich eine Gesamtöffnungsfläche von 0,51 m^2 ergibt. Diese könnten alternativ als Maßnahme zur kontinuierlichen Lüftung eingesetzt werden.

Die berechneten Volumenströme und die benötigte Lüftungsdauer, siehe Kapitel 3.2, können Bild 6-34 und Bild 6-35 entnommen werden. In Bild 6-34 ist der Volumenstrom

verschiedener Lüftungsvarianten aus Tabelle 6-17 gegenüber der Außenlufttemperatur abgebildet. Es wird eine Raumlufthtemperatur von 20°C und eine Windgeschwindigkeit von 2 m/s angenommen. Letztere entspricht der durchschnittlichen jährlichen Windgeschwindigkeit in Stuttgart [41].

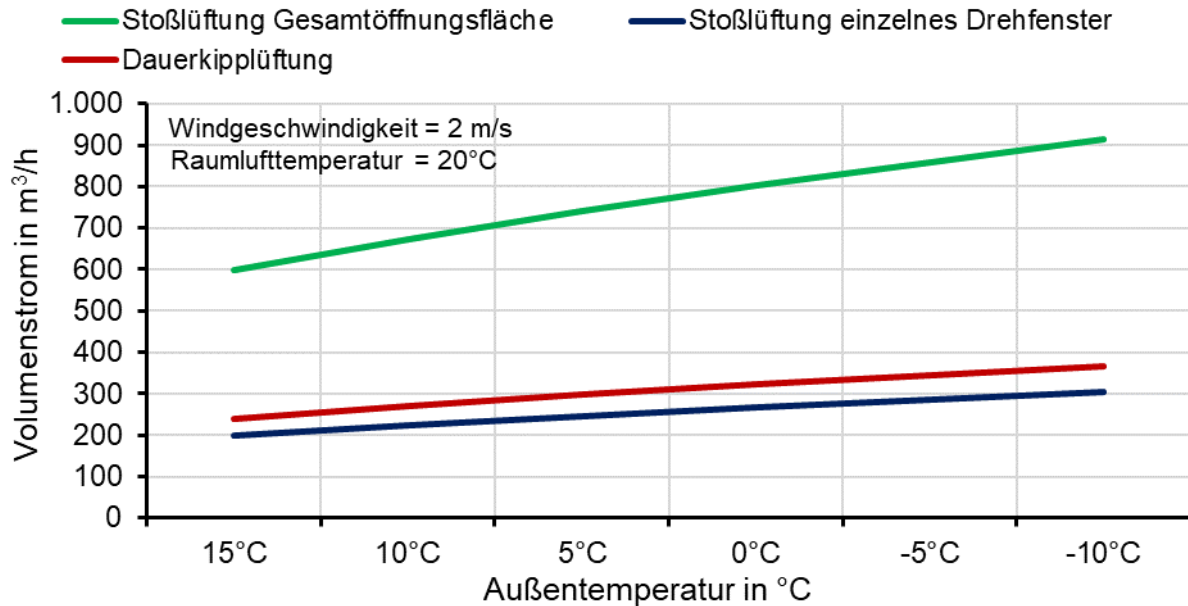


Bild 6-34: Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Steinbeisschule Hauptbau

Bei Stoßlüften aller Drehfenster (Fall I) resultieren Volumenströme von $\dot{V} = 600 \dots 910 \text{ m}^3/\text{h}$. Für das Stoßlüften mit einem einzelnen Fenster werden Volumenströme von $\dot{V} = 200 \dots 300 \text{ m}^3/\text{h}$ berechnet. Geringfügig höher sind die Volumenströme bei Dauerkippplüftung (Fall III) mit $\dot{V} = 240 \dots 370 \text{ m}^3/\text{h}$.

Bild 6-35 stellt die benötigte Lüftungsdauer der betrachteten Lüftungsvarianten dar. Es ist die benötigte Lüftungsdauer bei unterschiedlicher Außenlufttemperatur zur Erreichung eines einfachen Luftwechsels aufgetragen. Die Raumlufthtemperatur ist mit 20°C und die Windgeschwindigkeit mit 2 m/s angenommen.

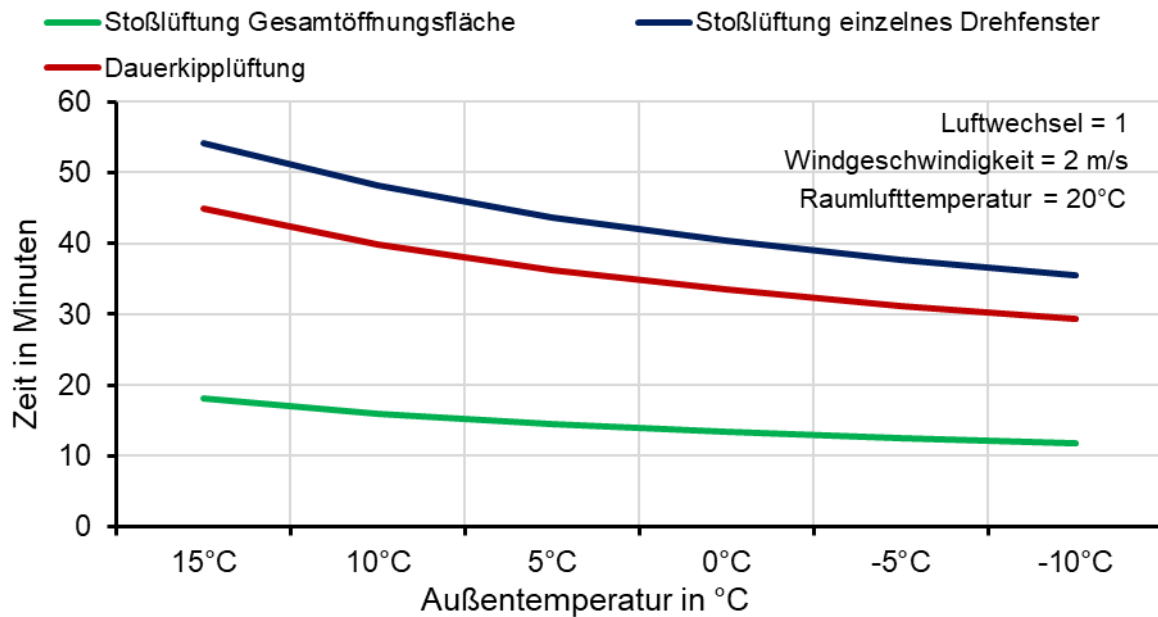


Bild 6-35: Benötigte Lüftungsdauer verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Steinbeisschule Hauptbau

Für den Fall I wird eine Lüftungsdauer von 11,8 ... 18,1 min. berechnet. Damit eignet sich das Öffnen aller Fenster dieses Klassenraums nicht für das Stoßlüften nach dem vom Umweltbundesamt [16] vorgeschlagenen Lüftungsintervall von 20/5/20 min. Die benötigte Lüftungsdauer bei Öffnen eines einzelnen Fensters (Fall II) ist mit 35,4 ... 54 min. ebenfalls zu hoch. Beide Varianten sind daher nicht geeignet, um in einer Lüftungspause von 5 Minuten die gesamte Raumlufth mitsamt der Stofflasten auszutauschen. Die Dauerkippplüftung (Fall III) benötigt für einen einfachen Luftwechsel eine Lüftungsdauer von 29,4 ... 44,9 min. Damit wird die Anforderung einer Luftwechselrate von 5 ... 6 1/h (vgl. DIN EN 16798 [2]) nicht erfüllt. Es ist zu erwarten, dass sich hygienisch inakzeptable Raumlufthzustände einstellen und somit eine CO₂-Raumlufthkonzentration von 1000 ppm deutlich überschritten wird.

6.7 Uhlandschule Neubau

Das Uhlandschule Neubau befindet sich in der Tapachstraße 4 in Stuttgart.

6.7.1 Daten Klassenraum

Tabelle 6-18: Zusammenstellung der Raumdaten (Uhlandschule Neubau)

Der Klassenraum verfügt über einen Ein- bzw. Ausgang. In Tabelle 6-18 ist eine Zusammenstellung der Raumdaten aufgeführt. Als Übergabesystem zur Beheizung dienen vier Heizkörper, welche unterhalb der großen Fensterfront angebracht sind.

Raumeigenschaft	Daten
Abmessungen (LxBxH) in m	9 x 7,3 x 3,2
Grundfläche in m ²	66
Raumvolumen in m ³	ca. 210
Gesamtfensterfläche in m ²	5,55
Gesamtöffnungsfläche der Fenster in m ²	5,55
Nutzbarer Anteil in %	100
Übergabesystem zur Beheizung	4x Heizkörper: 2,8 x 0,15 (LxH) in m

Der Raum besitzt eine Außenwand, worin die Fenster integriert sind. Bei den Fenstern handelt es sich um zweifach verglaste Fenster, welche mit einem Holz-Aluminiumrahmen ausgeführt sind.



Bild 6-36: Raumansicht (Uhlandschule Neubau)

In Summe verfügt der Raum über acht öffnenbare Fenster, zwei davon sind drehbar und sechs sind ausschließlich im gekippten Zustand öffnenbar.



Bild 6-37: Fensterfront des Klassenraums (Uhlandschule Neubau)

Die Beleuchtung des Raums erfolgt mittels zehn Leuchtstoffröhren. In Bild 6-36 ist die Raumansicht und in Bild 6-37 die Fensterfront Klassenraums dargestellt.

6.7.2 Daten Luftreinigungsgerät

Das Luftreinigungsgerät der Trox GmbH (Typ TAP-L) ist, von der Tafel aus betrachtet, rechts neben der Tafel bei den Fenstern aufgestellt (Bild 6-38) und ist ähnlich mit dem Gerät in der Schwabschule (siehe Kapitel 6.3).



Bild 6-38: Luftreinigungsgerät und Aufstellort im Klassenraum der Uhlandschule Neubau

Die Geräteeigenschaften sind für diesen Gerätetyp in Tabelle 6-19 angegeben.

Tabelle 6-19: Geräteigenschaften (Herstellerangaben) des Luftreinigungsgerätes in der Uhlandschule Neubau [44]

Geräteigenschaften eines Geräts	Wert
Sekundärluftstrom (Nennbetrieb) in m ³ /h	1.600
Sekundärluftstrom (Auslegung) in m ³ /h	1.050
n _{Sekundär} in 1/h (mit beiden Geräten)	5,0
Abscheidegrad in %	>99
Stromaufnahme bei Nennleistung in W	310
A-Schalldruckpegel in dB	24...53
Abmessungen (BxTxH) in m	0,64 x 0,7 x 2,31
Gewicht in kg	177

Für diesen Raum liegt der ausgelegte Sekundärluftstrom bei etwa 1.050 m³/h, womit für den Klassenraum ein Luftwechsel von n_{Sekundär}=5 1/h erzielt wird.

6.7.3 Berechnung des Außenluftwechsels bei Fensterlüftung

Ein Überblick über die Dreh- und Kippfenster der untersuchten Schulen mit Angabe der nutzbaren Fensteröffnungsfläche befindet sich in Tabelle 6-41 im Anhang. Bild 6-39 veranschaulicht die Fensterfront der Uhlandschule Neubau. Dabei werden die Fenstertypen mit A und B (grün: Fenster nutzbar, rot Fenster nicht nutzbar) gekennzeichnet. In dem vorliegenden Klassenraum lassen sich zwei Drehfenster (Typ A) und sechs Kippfenster von insgesamt acht Fenstern öffnen (Soll = Ist).



Bild 6-39: Fenstertypen in der Uhlandschule Neubau

Für die Berechnung des Außenluftwechsels werden folgende Fallunterscheidungen getroffen, siehe Tabelle 6-20. Da der Modellansatz für die Berechnung des Außenluftwechsels nur für einseitige Fensterlüftung gültig ist, wurden die hinteren drei Fenster vom Typ B, siehe Bild 6-39 links, so berechnet, als würden sie sich in der seitlichen Fensterfront befinden. Die Ergebnisse dieser einseitigen Betrachtung stellen Minimumwerte dar, während in der Realität bei zweiseitiger Fensterlüftung höhere Werte zu erwarten sind.

Tabelle 6-20: Lüftungsvarianten und Fenstertypen, Uhlandschule Neubau

Fenstertyp	i	A _{Fe} in m²
Fall I: <i>Stoßlüftung Gesamtöffnungsfläche Soll = Ist</i>		
A Drehfenster	2	3,24
B Kippfenster	6	2,31
	Σ = 5,55	
Fall II: <i>Stoßlüftung Drehfenster</i>		
A Drehfenster	2	3,24
Fall III: <i>Dauerkipplüftung</i>		
B Kippfenster	6	2,31

Fall I *Stoßlüftung Gesamtöffnungsfläche* berücksichtigt alle derzeit nutzbaren Fenster (Soll = Ist). Dadurch ergibt sich eine Gesamtöffnungsfläche von 5,55 m^2 . Werden nach Fall II *Stoßlüftung Drehfenster* ausschließlich die Drehfenster (Typ: A) geöffnet, beträgt die Gesamtöffnungsfläche 3,24 m^2 . Fall III *Dauerkipplüftung* betrachtet ausschließlich die Kippfenster (Typ: B) mit einer Gesamtöffnungsfläche von 2,31 m^2 . Diese könnten alternativ als Maßnahme zur kontinuierlichen Lüftung eingesetzt werden.

Die berechneten Volumenströme und die benötigte Lüftungsdauer, siehe Kapitel 3.2, können Bild 6-40 und Bild 6-41 entnommen werden. In Bild 6-40 ist der Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten aus Tabelle 6-20 gegenüber der Außenlufttemperatur abgebildet. Es wird eine Raumlufthtemperatur von 20°C und eine Windgeschwindigkeit von 2 m/s angenommen. Letztere entspricht der durchschnittlichen jährlichen Windgeschwindigkeit in Stuttgart [41].

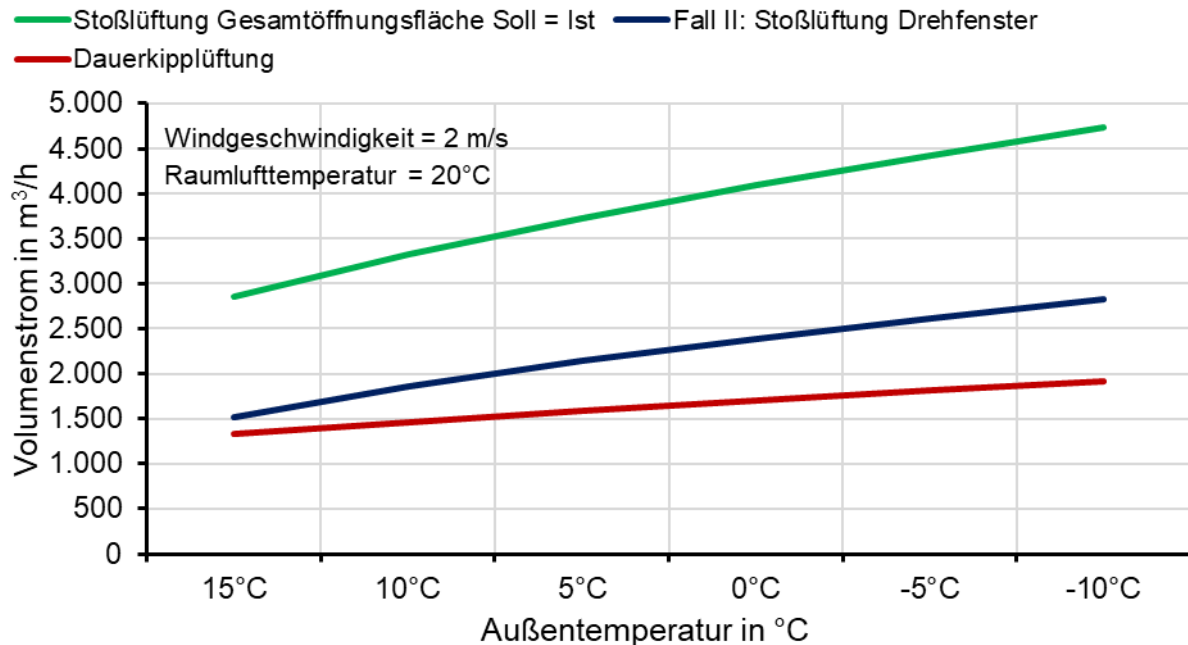


Bild 6-40: Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Uhlandschule Neubau

Bei Stoßlüften aller Fenster (Fall I) resultieren Volumenströme von $\dot{V} = 2.850 \dots 4.700 \text{ m}^3/\text{h}$. Für das Stoßlüften mit den Drehfenstern (Fall II) werden Volumenströme von $\dot{V} = 1.500 \dots 2.800 \text{ m}^3/\text{h}$ berechnet. Die Volumenströme bei Dauerkipplüftung (Fall III) fallen mit $\dot{V} = 1.300 \dots 1.900 \text{ m}^3/\text{h}$ (Soll) am geringsten aus.

Bild 6-41 stellt die benötigte Lüftungsdauer der betrachteten Lüftungsvarianten dar. Es ist die benötigte Lüftungsdauer bei unterschiedlicher Außenlufttemperatur zur Erreichung eines einfachen Luftwechsels aufgetragen. Die Raumlufthtemperatur ist mit 20°C und die Windgeschwindigkeit mit 2 m/s angenommen.

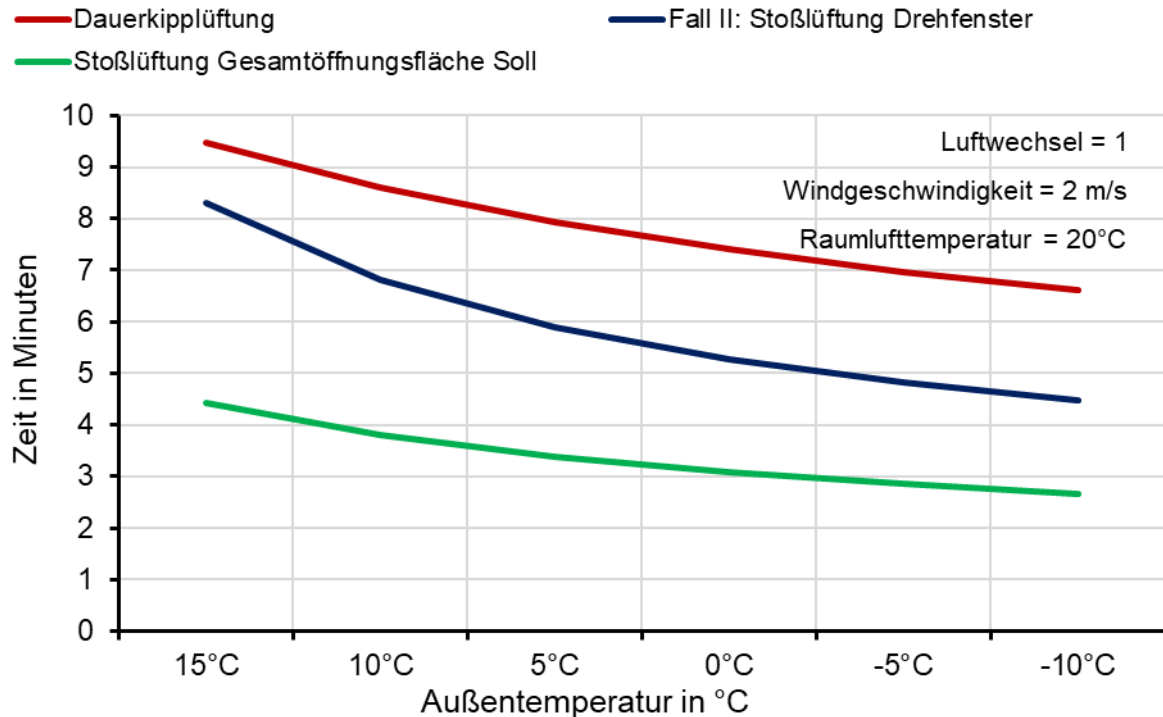


Bild 6-41: Benötigte Lüftungsdauer verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Uhlandschule Neubau

Für den ersten Fall wird eine Lüftungsdauer von 2,7 ... 4,4 min. berechnet. Damit eignet sich das Öffnen aller Fenster dieses Klassenraums für das Stoßlüften nach dem vom Umweltbundesamt [16] vorgeschlagenen Lüftungsintervall von 20/5/20 min. Somit ist diese Variante geeignet, um in einer Lüftungspause von 5 Minuten die gesamte Raumluft mitsamt der Stofflasten auszutauschen. Die benötigte Lüftungsdauer bei Öffnen der Drehfenster (Fall II) beträgt 4,5 ... 8,3 min. Die Dauerkippplüftung (Fall III) benötigt für einen einfachen Luftwechsel eine Lüftungsdauer von 6,6 ... 9,5 min. Fall II und Fall III sind somit nicht für das Stoßlüften mit einer Lüftungspause von 5 Minuten geeignet, erfüllen aber die Anforderung einer Luftwechselrate von 5 ... 6 1/h (vgl. DIN EN 16798 [2]). Damit wären die Lüftungsvarianten II und III mit dauerhaft geöffneten Fenstern Alternativen zur Stoßlüftung aller Fenster (Fall I). Dabei muss jedoch beachtet werden, dass durch eventuelles Auskühlen des Raumes eine geringere Temperaturdifferenz für den Luftaustausch zur Verfügung stünde und sich der Außenluftvolumenstrom demzufolge verringert. Energetische Aspekte und Behaglichkeitskriterien werden bei den Berechnungen nicht betrachtet.

6.8 Zeppelin Gymnasium

Das Zeppelin Gymnasium befindet sich in der Neckarstraße 149 in Stuttgart.

6.8.1 Daten Klassenräume

Es werden die Räume Klausurraum und Referenzraum untersucht. Der Klausurraum verfügt über zwei Ein- bzw. Ausgänge sowie eine Verbindung zu einem Nebenraum. In Tabelle 6-21 ist in gleicher Weise wie bei der Beschreibung der vorherigen Klassenräume eine Zusammenstellung der Raumdaten aufgeführt.

Tabelle 6-21: Zusammenstellung der Raumdaten (Zeppelin Gymnasium - Klausurraum)

Raumeigenschaft	Daten
Abmessungen (LxBxH) in m	16,7 x 6,9 x 3,5
Grundfläche in m ²	115
Raumvolumen in m ³	ca. 403
Gesamtfensterfläche in m ²	17,33
Gesamtöffnungsfläche der Fenster in m ²	17,33
Nutzbarer Anteil in %	100
Übergabesystem zur Beheizung	6x Heizkörper: 1,0 x 0,6 (LxH) in m

Der Raum hat eine Außenwand, worin die Fenster integriert sind. Bei den Fenstern handelt es sich um zweifach verglaste Fenster, welche mit einem Holzrahmen ausgeführt sind. In Summe verfügt der Raum über 24 öffnbare Fenster, zwölf davon sind drehbar und zwölf sind ausschließlich im gekippten Zustand öffnbar. Die Beleuchtung des Raums erfolgt mittels zwölf Leuchtstoffröhren. In Bild 6-42 ist die Fensterfront des Raums sowie eine Raumansicht mit der üblichen Sitzanordnung dargestellt.



Bild 6-42: Raumansicht des Klausurraums (Zeppelin Gymnasium)

Als Übergabesystem zur Beheizung sind insgesamt sechs Heizkörper unterhalb der Fensterfront installiert.

Der Referenzraum verfügt über einen Ein- bzw. Ausgang. In Tabelle 6-22 ist eine Zusammenstellung der Raumdaten aufgeführt.

Tabelle 6-22: Zusammenstellung der Raumdaten (Zeppelin Gymnasium - Referenzraum)

Raumeigenschaft	Daten
Abmessungen (LxBxH) in m	7,8 x 6,9 x 3,5
Grundfläche in m ²	54
Raumvolumen in m ³	ca.189
Gesamtfensterfläche in m ²	8,66
Gesamtöffnungsfläche der Fenster in m ²	8,66
Nutzbarer Anteil in %	100
Übergabesystem zur Beheizung	3x Heizkörper: 1,0 x 0,6 (LxH) in m

Der Raum hat eine Außenwand, worin die Fenster integriert sind, welche die gleiche Bauweise wie im Klausurraum aufweisen. In Summe verfügt der Raum über zwölf öffenbare Fenster, sechs davon sind drehbar und sechs sind ausschließlich im gekippten Zustand öffenbar. Die Beleuchtung des Raums erfolgt mittels zehn Leuchtstoffröhren. In Bild 6-43 bis ist die Fensterfront des Raums sowie eine Raumansicht mit der üblichen Sitzanordnung dargestellt.



Bild 6-43: Raumansicht des Referenzraum (links) und der zugehörigen Fensterfront (rechts) des Zeppelin Gymnasiums

Als Übergabesystem zur Beheizung sind insgesamt drei Heizkörper unterhalb der Fensterfront installiert.

6.8.2 Daten Luftreinigungsgerät

Die baugleichen Luftreinigungsgeräte der Firma Wolf GmbH (Typ Air Purifier) sind im Klausurraum zweimal und im Referenzraum einmal aufgestellt (siehe Bild 6-44 und Bild 6-45).



Bild 6-44: Luftreinigungsgerät (links) und Aufstellort (rechts) im Klausurraum des Zeppelin Gymnasiums



Bild 6-45: Luftreinigungsgerät (links) und Aufstellort (rechts) im Referenzraum des Zeppelin Gymnasiums

Die Eigenschaften der Geräte sind baugleich mit dem Gerät in der Wilhelmsschule (siehe Kapitel 6.4). Der standardmäßige Betrieb (Auslegung) liegt bei etwa $1.000 \text{ m}^3/\text{h}$ pro Gerät, womit für den Klausurraum (zwei Geräte) ein Luftwechsel von $n_{\text{Sekundär}}=5,0 \text{ 1/h}$ und für den Referenzraum (ein Gerät) ein Luftwechsel von $n_{\text{Sekundär}}=5,3 \text{ 1/h}$ erzielt wird.

6.8.3 Berechnung des Außenluftwechsels bei Fensterlüftung

Ein Überblick über die Dreh- und Kippfenster der untersuchten Schulen mit Angabe der nutzbaren Fensteröffnungsfläche befindet sich in Tabelle 6-41. Bild 6-46 veranschaulicht die Fensterfront des Klausurraums im Zeppelin Gymnasium. Dabei werden die Fenstertypen mit A und B (grün: Fenster nutzbar, rot Fenster nicht nutzbar) gekennzeichnet. Im Klausurraum lassen sich alle vierundzwanzig Fenster (Typ A und B) öffnen (Soll = Ist).



Bild 6-46: Fenstertypen im Klausurraum, Zeppelin Gymnasium

Bild 6-47 veranschaulicht die Fensterfront des Referenzraums im Zeppelin Gymnasium. Die Fenstertypen A und B gleichen den Fenstertypen im Klausurraum. Im Referenzraum lassen sich alle zwölf Fenster öffnen (Soll = Ist).



Bild 6-47: Fenstertypen im Referenzraum, Zeppelin Gymnasium

Für die Berechnung des Außenluftwechsels im Klausurraum werden folgende Fallunterscheidungen getroffen, siehe Tabelle 6-23.

Tabelle 6-23: Lüftungsvarianten und Fenstertypen, Klausurraum, Zeppelin Gymnasium

Fenstertyp	i	A _{Fe} in m²
Fall I: <i>Stoßlüftung Gesamtöffnungsfläche</i>		
A Drehfenster	12	10,85
B Kippfenster	12	6,48
$\Sigma = 17,33$		
Fall II: <i>Stoßlüftung Drehfenster</i>		
A Drehfenster	12	10,85
Fall III: <i>Dauerkipplüftung</i>		
B Kippfenster	12	6,48

Der erste Fall *Stoßlüftung Gesamtöffnungsfläche* berücksichtigt alle Dreh- und Kippfenster. Dadurch ergibt sich eine Gesamtöffnungsfläche von 17,33 m². Fall II *Stoßlüftung Drehfenster* betrachtet alle Drehfenster (Typ A) mit einer Gesamtöffnungsfläche von 10,85 m², während Fall III ausschließlich die Kippfenster (Typ B) mit einer Gesamtöffnungsfläche von 6,48 m² betrachtet.

Für die Berechnung des Außenluftwechsels im Referenzraum werden folgende Fallunterscheidungen getroffen, siehe Tabelle 6-24.

Tabelle 6-24: Lüftungsvarianten und Fenstertypen, Referenzraum, Zeppelin Gymnasium

Fenstertyp	i	A _{Fe} in m²
Fall I: <i>Stoßlüftung Gesamtöffnungsfläche</i>		
A Drehfenster	6	5,42
B Kippfenster	6	3,24
$\Sigma = 8,66$		
Fall II: <i>Stoßlüftung Drehfenster</i>		
A Drehfenster	6	5,42
Fall III: <i>Dauerkipplüftung</i>		
B Kippfenster	6	3,24

Analog zum Klausurraum werden in Fall I *Stoßlüftung Gesamtöffnungsfläche* alle Dreh- und Kippfenster berücksichtigt. Dadurch ergibt sich eine Gesamtöffnungsfläche

von 8,66 m². Fall II *Stoßlüftung Drehfenster* betrachtet alle Drehfenster (Typ A) mit einer Gesamtöffnungsfläche von 5,42 m², während Fall III ausschließlich die Kippfenster (Typ B) mit einer Gesamtöffnungsfläche von 3,24 m² betrachtet.

Die berechneten Volumenströme können

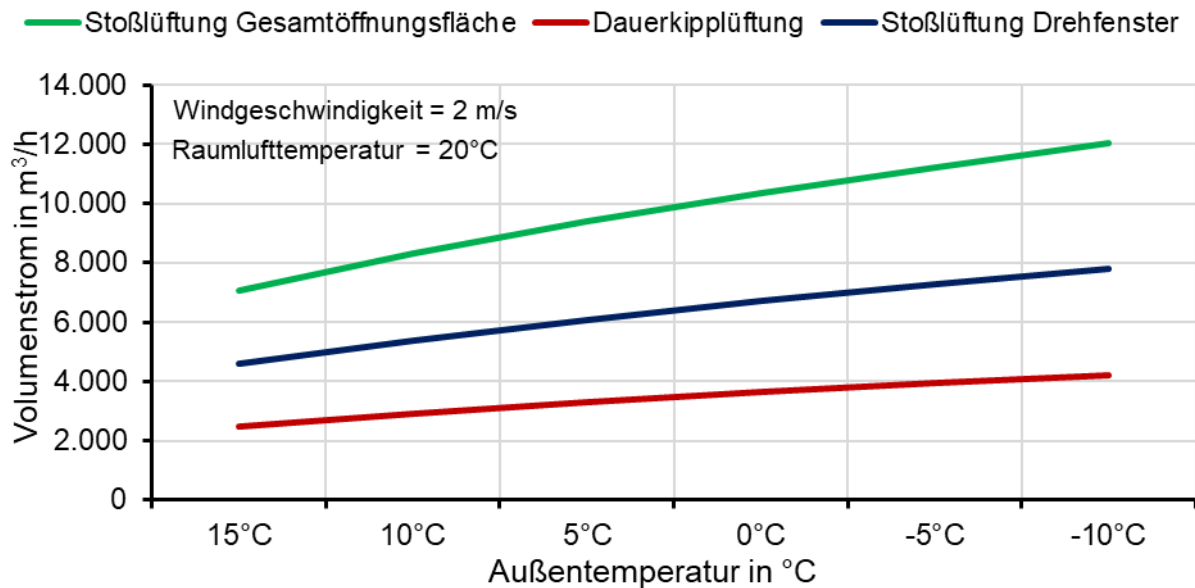


Bild 6-48 und Bild 6-49 entnommen werden. Abgebildet ist der Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten aus Tabelle 6-23 bzw. Tabelle 6-24. Es wird eine Raumlufttemperatur von 20°C und eine Windgeschwindigkeit von 2 m/s angenommen. Letztere entspricht der durchschnittlichen jährlichen Windgeschwindigkeit in Stuttgart [41].

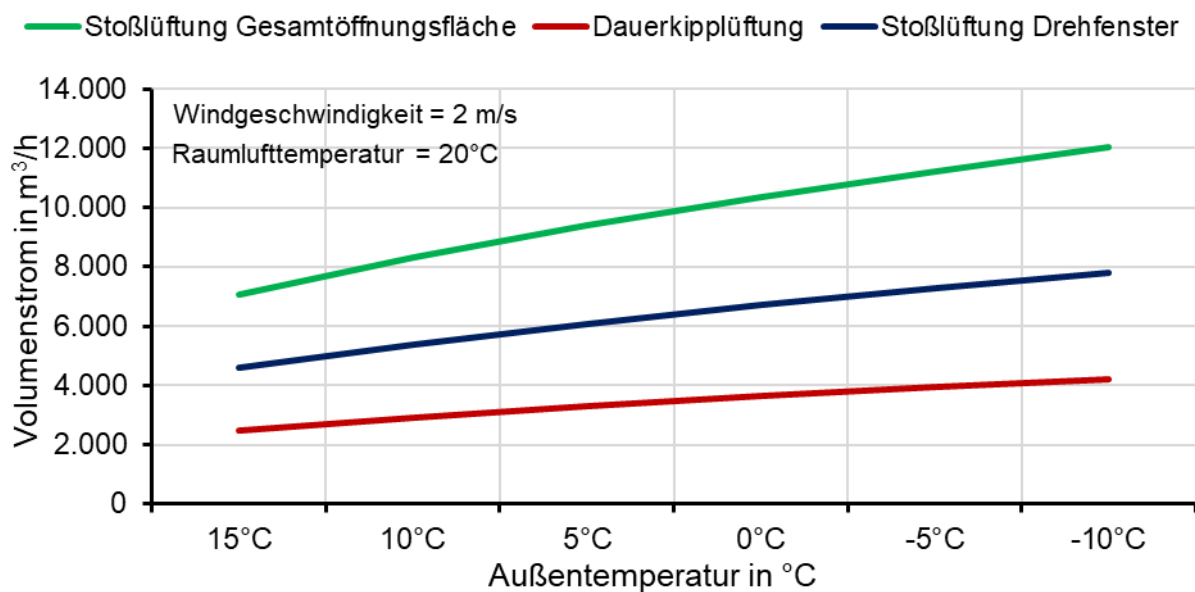


Bild 6-48: Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außentemperatur, Klausurraum, Zeppelin Gymnasium

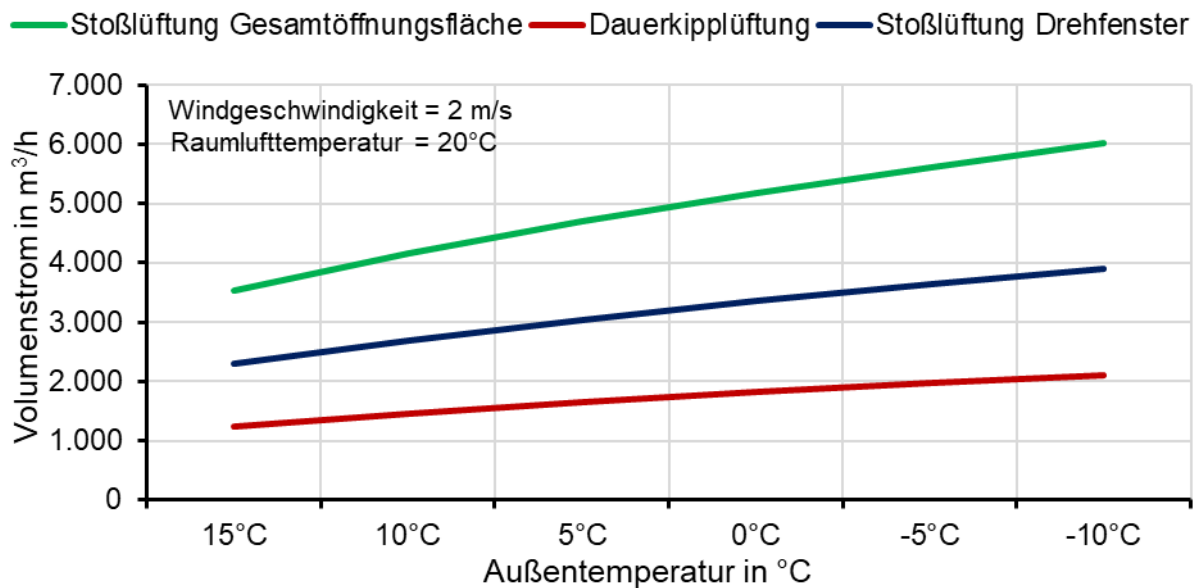


Bild 6-49: Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Referenzraum, Zeppelin Gymnasium

Bei Stoßlüften aller Fenster (Fall I) resultieren Volumenströme von $\dot{V} = 7.000 \dots 12.000 \text{ m}^3/\text{h}$ (Klausurraum) bzw. $\dot{V} = 3.500 \dots 6.000 \text{ m}^3/\text{h}$ (Referenzraum).

Beim Stoßlüften mit den Drehfenstern (Fall II) werden Volumenströme von $\dot{V} = 4.600 \dots 7.800 \text{ m}^3/\text{h}$ (Klausurraum) bzw. $\dot{V} = 2.300 \dots 3.900 \text{ m}^3/\text{h}$ (Referenzraum) erreicht. Die Volumenströme bei Dauerkipplüftung (Fall III) fallen mit $\dot{V} = 2.500 \dots 4.200 \text{ m}^3/\text{h}$ (Klausurraum) bzw. $\dot{V} = 1.200 \dots 2.100 \text{ m}^3/\text{h}$ (Referenzraum) am geringsten aus. Die benötigte Lüftungsdauer, siehe Kapitel 3.2, können Bild 6-50 und Bild 6-51 entnommen werden. Es ist die benötigte Lüftungsdauer bei unterschiedlicher Außenlufttemperatur zur Erreichung eines einfachen Luftwechsels aufgetragen. Die

Raumlufttemperatur ist mit 20°C und die Windgeschwindigkeit mit 2 m/s angenommen.

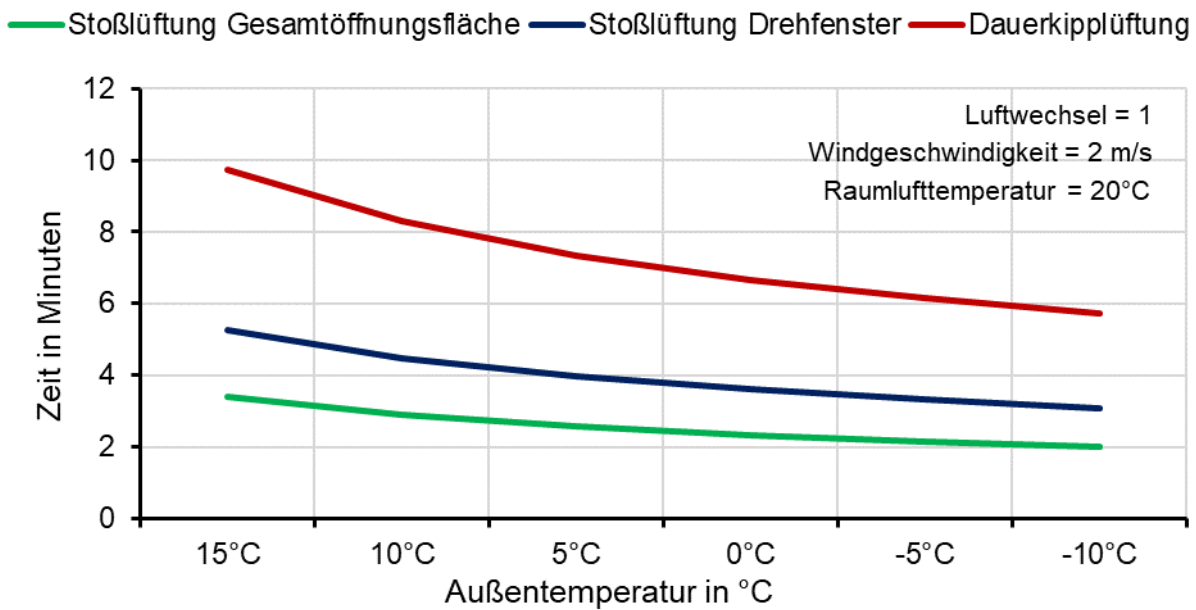


Bild 6-50: Benötigte Lüftungsdauer verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Klausurraum, Zeppelin Gymnasium

Für den ersten Fall wird eine Lüftungsdauer von 2,0...3,4 min berechnet. Damit eignet sich das Öffnen aller Fenster im Klausurraum für das Stoßlüften nach dem vom Umweltbundesamt [16] vorgeschlagenen Lüftungsintervall von 20/5/20 min. Fall II eignet sich für Außentemperaturen von unter 15°C ebenfalls für dieses Lüftungsintervall. Demnach eignet sich Fall I bzw. eingeschränkt auch Fall II, um in einer Lüftungspause von 5 Minuten die gesamte Raumluft mitsamt den Stofflasten auszutauschen. Die Dauerkippplüftung (Fall III) benötigt für einen einfachen Luftwechsel eine Lüftungsdauer von 5,7 ... 9,7 min. Damit wird die Anforderung eines Luftwechsels von 5 ... 6 1/h (vgl. DIN EN 16798 [2]) erfüllt.

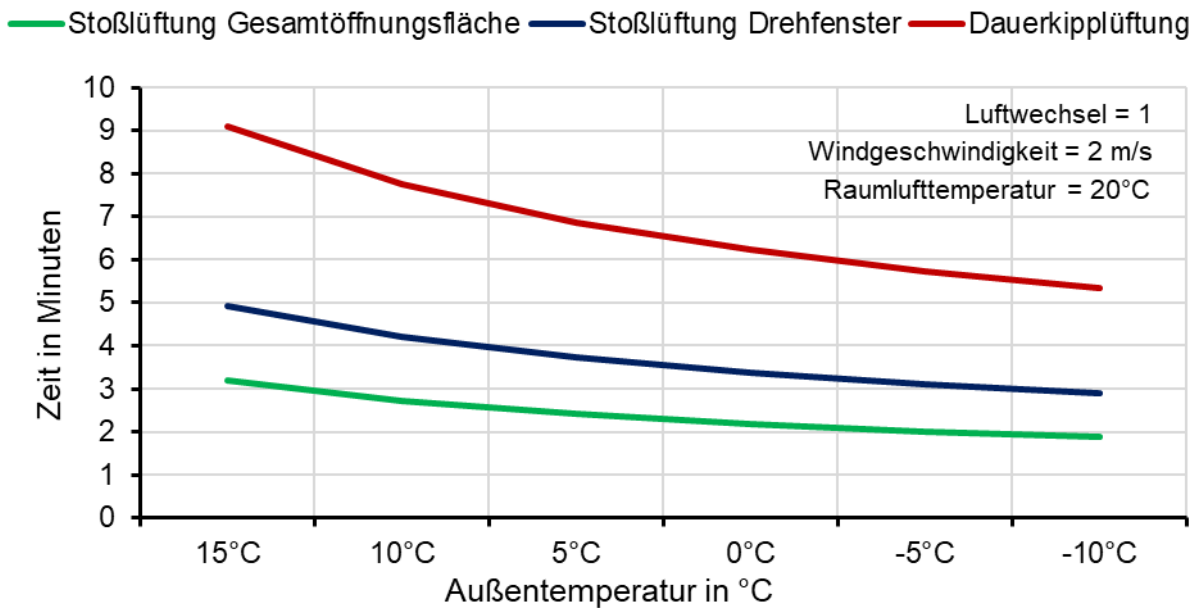


Bild 6-51: Benötigte Lüftungsdauer verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Referenzraum, Zeppelin Gymnasium

Im Referenzraum verhalten sich die benötigten Lüftungsdauern ähnlich. Für den ersten Fall wird eine Lüftungsdauer von 1,9 ... 3,2 min berechnet. Damit eignet sich das Öffnen aller Fenster im Referenzraum für das Stoßlüften nach dem vom Umweltbundesamt [16] vorgeschlagenen Lüftungsintervall von 20/5/20 min. Das Öffnen der Drehfenster in Fall II ergibt Lüftungsdauern von 3,1 ... 5,3 min. und eignet sich demnach ebenfalls für das Stoßlüften nach dem Lüftungsintervall von 20/5/20 min. Die Dauerkipplüftung (Fall III) benötigt für einen einfachen Luftwechsel eine Lüftungsdauer von 5,4 ... 9,1 min und erfüllt damit die Anforderung eines Luftwechsels von 5 ... 6 1/h (vgl. DIN EN 16798 [2]).

6.9 Filderschule

Die Filderschule befindet sich in der Leinfeldener Straße 61 in Stuttgart.

6.9.1 Daten Klassenräume

Der Klassenraum verfügt über einen Ein- bzw. Ausgang. In Tabelle 6-25 eine Zusammenstellung der Raumdaten aufgeführt.

Tabelle 6-25: Zusammenstellung der Raumdaten (Filderschule)

Raumeigenschaft	Daten
Abmessungen (LxBxH) in m	7,5 x 8,3 x 3,0
Grundfläche in m ²	62
Raumvolumen in m ³	ca. 186
Gesamtfensterfläche in m ²	1,39
Gesamtöffnungsfläche der Fenster in m ²	1,39
Nutzbarer Anteil in %	100
Übergabesystem zur Beheizung	2x Heizkörper: 1,3 x 2,6 (LxH) in m

Der Raum hat eine Außenwand, worin die Fenster integriert sind. In Summe verfügt der Raum über zwei öffentbare Fenster, die ausschließlich drehbar öffenbar sind. Die Beleuchtung des Raums erfolgt mittels acht Leuchtstoffröhren. In Bild 6-52 und Bild 6-53 ist die Fensterfront des Raums sowie eine Raumansicht mit der üblichen Sitzanordnung dargestellt.



Bild 6-52: Raumansicht des Klassenraums (Filderschule)



Bild 6-53: Fensterfront des Klassenraums (Filderschule)

Als Übergabesystem zur Beheizung sind insgesamt zwei Heizkörper unterhalb der Fensterfront installiert.

6.9.2 Daten Lüftungsgerät

Das dezentrale Lüftungsgerät der Firma Airflow Lufttechnik GmbH (Typ DUPLEX Vent S 1000) ist im Klassenraum von der Tafel aus hinten an der Decke montiert (Bild 6-54).



Bild 6-54: Dezentrales Lüftungsgerät und Montageort im Klassenraum (Filderschule)

Die Eigenschaften des Geräts sind in Tabelle 6-26 aufgeführt. Das Gerät ermöglicht einen stufenlos einstellbaren Außenluftstrom bis maximal $1.100 \text{ m}^3/\text{h}$. Die Außenluft wird fassadenseitig angesaugt und durch die Wärmerückgewinnungseinheit vorerwärmt. Durch die Luftdurchlässe wird die Luft dem Klassenraum zugeführt. Der standardmäßige Betrieb (Auslegung) liegt bei etwa $915 \text{ m}^3/\text{h}$, womit für den Klassenraum ein Luftwechsel von $n=4,9 \text{ 1/h}$ erzielt wird. Das Gerät ist mit einem Außenluftfilterkonzept ausgestattet. Durch dieses Konzept können zwischen 55 und 80% der Außenluftpartikel abgeschieden werden. Zur Auswahl stehen ein ePM1-Filter, der entweder eine Abscheidung von über 55 oder 80% erzielen, oder ein ePM10-Filter, der ca. 75% der Außenluftpartikel abscheiden kann. Bei Nenn-Außenluftstrom hat das Gerät eine Stromaufnahme von 305 Watt und weist einen A-bewerteten Schalldruckpegel (1 m-Umkreis) bei Nennbetrieb von 35 dB(A) auf.

Tabelle 6-26: Geräteeigenschaften des dezentralen Lüftungsgeräts [46]

Geräteeigenschaft	Wert
Außenluftstrom (Nennbetrieb) in m ³ /h	1.100
Außenluftstrom (Auslegung) in m ³ /h	915
n (Auslegung) in 1/h	4,9
Leistungsaufnahme im Nennbetrieb in W	305
A-Schalldruckpegel in dB bei 1100 m ³ /h	35
Abmessungen (BxTxH) in m	2,32 x 0,56 x 1,24
Gewicht in kg	287

6.9.3 Berechnung des Außenluftwechsels bei Fensterlüftung

Ein Überblick über die Dreh- und Kippfenster der untersuchten Schulen mit Angabe der nutzbaren Fensteröffnungsfläche befindet sich in Tabelle 6-41 im Anhang. Bild 6-55 veranschaulicht die Fensterfront der Filderschule. Dabei werden die Fenstertypen mit A (grün: Fenster nutzbar, rot Fenster nicht nutzbar) gekennzeichnet. In dem vorliegenden Klassenraum lassen sich zwei Fenster (Typ A) öffnen (Soll = Ist).



Bild 6-55: Fenstertypen in der Filderschule

Für die Berechnung des Außenluftwechsels werden folgende Fallunterscheidungen getroffen, siehe Tabelle 6-27.

Tabelle 6-27: Lüftungsvarianten und Fenstertypen, Filderschule

Fenstertyp	i	A _{Fe} in m ²
Fall I: Stoßlüftung Gesamtöffnungsfläche		
A Drehfenster	2	1,39
Fall II: Stoßlüftung einzelnes Fenster		
A Drehfenster	1	0,70

Der erste Fall *Stoßlüftung Gesamtöffnungsfläche* berücksichtigt beide nutzbaren Drehfenster mit einer Gesamtöffnungsfläche von 1,39 m². In Fall II wird dagegen nur eines der beiden Fenster geöffnet. Dadurch ergibt sich eine Öffnungsfläche von 0,70 m². Da die Fenster lediglich gedreht und nicht gekippt werden können, werden keine weiteren Lüftungsvarianten betrachtet.

Die berechneten Volumenströme und die benötigte Lüftungsdauer, siehe Kapitel 3.2, können Bild 6-56 und Bild 6-57 entnommen werden. In Bild 6-56 ist der Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten aus Tabelle 6-27 gegenüber der Außenlufttemperatur abgebildet. Es wird eine Raumlufttemperatur von 20°C und eine Windgeschwindigkeit von 2 m/s angenommen. Letztere entspricht der durchschnittlichen jährlichen Windgeschwindigkeit in Stuttgart [41].

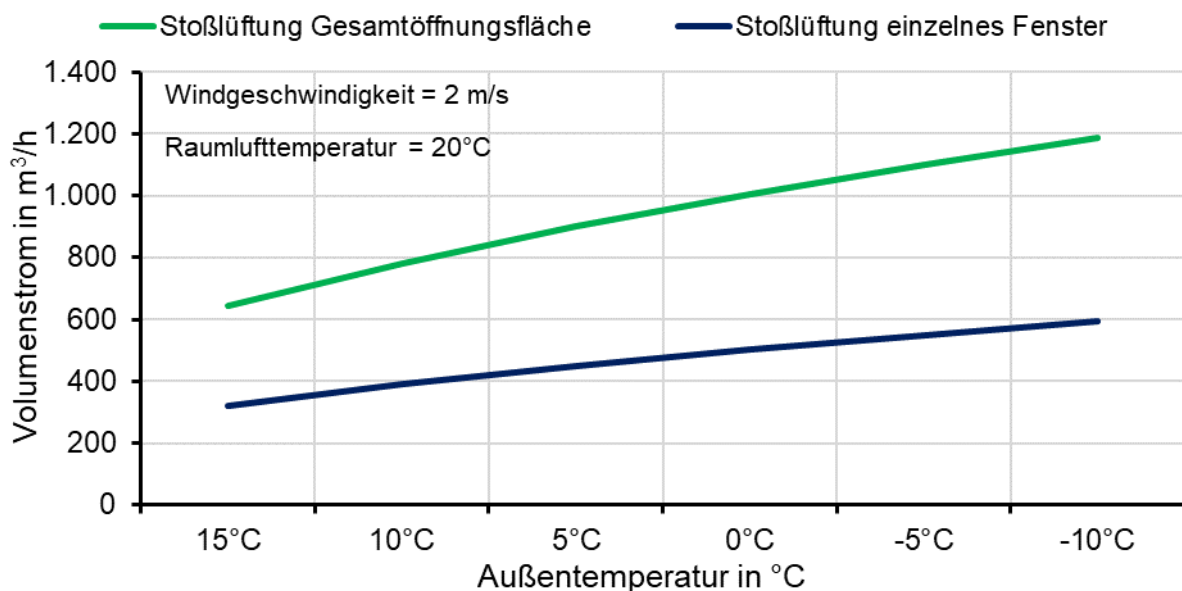


Bild 6-56: Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Filderschule

Bei Stoßlüften mit zwei Fenstern (Fall I) resultieren Volumenströme von $\dot{V} = 640 \dots 1.200 \text{ m}^3/\text{h}$. Für das Stoßlüften mit einem Fenster (Fall II) werden Volumenströme von $\dot{V} = 320 \dots 600 \text{ m}^3/\text{h}$ berechnet.

Bild 6-57 stellt die benötigte Lüftungsdauer der betrachteten Lüftungsvarianten dar. Es ist die benötigte Lüftungsdauer bei unterschiedlicher Außenlufttemperatur zur Erreichung eines einfachen Luftwechsels aufgetragen. Die Raumlufthtemperatur ist mit 20°C und die Windgeschwindigkeit mit 2 m/s angenommen.

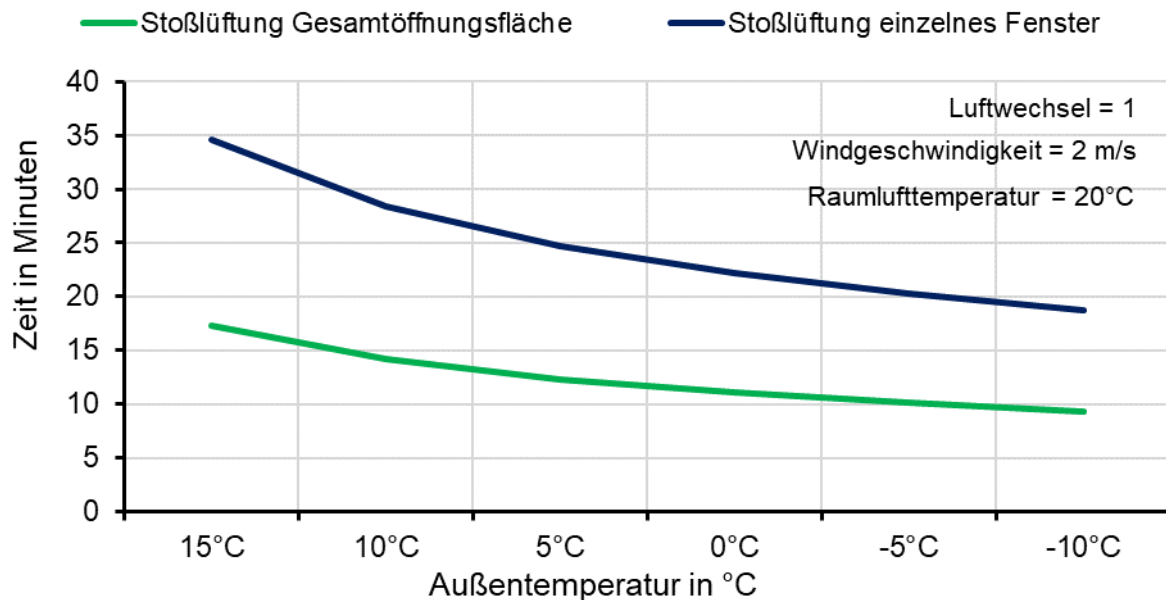


Bild 6-57: Benötigte Lüftungsdauer verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, Filderschule

Für den Fall I wird eine Lüftungsdauer von 9,4 ... 17,3 min. berechnet. Die benötigte Lüftungsdauer bei Öffnen eines einzelnen Drehfensters (Fall II) beträgt 19 ... 35 min. Damit eignen sich beide Lüftungsvarianten nicht für das Stoßlüften nach dem vom Umweltbundesamt [16] vorgeschlagenen Lüftungsintervall von 20/5/20. Es ist nicht möglich, in einer Lüftungspause von 5 Minuten die gesamte Raumlufthtemperatur samt den Stofflasten auszutauschen. Des Weiteren wird die Anforderung einer Luftwechselrate von 5 ... 6 1/h (vgl. DIN EN 16798 [2]) nicht (bzw. für Fall I nur eingeschränkt an kalten Tagen) erfüllt. Es ist zu erwarten, dass sich ohne den Einsatz des Lüftungsgeräts hygienisch inakzeptable Raumlufthzustände einstellen und somit eine CO₂-Raumlufthkonzentration von 1000 ppm deutlich überschritten wird.

6.10 Gewerbliche Schule für Farbe und Gestaltung

Die Gewerbliche Schule für Farbe und Gestaltung befindet sich in der Leobener Straße 97 in Stuttgart.

6.10.1 Daten des Klassenraums

Der Klassenraum in der gewerblichen Schule für Farbe und Gestaltung besitzt einen Ein- bzw. Ausgang, sowie einer Verbindung zu einem Nebenraum. In Tabelle 6-28 ist eine Zusammenstellung der Raumdaten aufgeführt. Dabei sind die Raummaße des Klassenraums, die Gesamtöffnungsfläche sowie das Übergabesystem zur Beheizung dargestellt.

Tabelle 6-28: Zusammenstellung der Raumdaten (Gewerbliche Schule für Farbe und Gestaltung)

Raumeigenschaft	Daten
Abmessungen (LxBxH) in m	12,2 x 7,9 x 3,6-6
Grundfläche in m ²	96
Raumvolumen in m ³	ca. 460
Gesamtfensterfläche in m ²	3,6
Gesamtöffnungsfläche der Fenster in m ²	3,6
Nutzbarer Anteil in %	100
Übergabesystem zur Beheizung	6x Heizkörper: 5x: 1,7 x 0,4 und 1x 1,8 x 0,7 in m

Der Raum besitzt eine Außenwand, worin die Fenster integriert sind. Bei den Fenstern handelt es sich um zweifach verglaste Fenster, welche mit einem Aluminiumrahmen ausgeführt sind. In Summe verfügt der Raum über zwei öffnbare Fenster, die ausschließlich drehbar öffenbar sind. Die Beleuchtung des Raums erfolgt mittels 20 Leuchtstoffröhren. In Bild 6-58 ist die Fensterfront sowie eine Raumansicht mit der üblichen Sitzanordnung des Klassenraums abgebildet. Als Übergabesystem zur Beheizung sind sechs Heizkörper im Klassenraum installiert.



Bild 6-58: Rauman­sicht (links) und Fensterfront (rechts) in der Gewerblichen Schule für Farbe und Gestaltung

6.10.2 Daten Luftreinigungsgerät

Die zwei baugleichen Luftreinigungsgeräte der Trox GmbH (Typ TAP-M) sind, von der Tafel aus betrachtet, an der hinteren Wand links neben Eingang im Klassenraum aufgestellt (Bild 6-59) und baugleich mit dem Gerät in der Schwabschule (siehe Kapitel 6.3)



Bild 6-59: Luftreinigungsgerät und Aufstellort in der Gewerblichen Schule für Farbe und Gestaltung

Die Geräte sind auf einen Sekundärluftstrom von jeweils $900 \text{ m}^3/\text{h}$ eingestellt, womit für den Raum in Summe ein Luftwechsel von etwa $3,9 \text{ 1/h}$ resultiert.

6.10.3 Berechnung des Außenluftwechsels bei Fensterlüftung

Ein Überblick über die Dreh- und Kippfenster der untersuchten Schulen mit Angabe der nutzbaren Fensteröffnungsfläche befindet sich in Tabelle 6-41 im Anhang. Bild 6-60 veranschaulicht die Fensterfront der gewerblichen Schule für Farbe und Gestaltung. Dabei werden die Fenstertypen mit A (grün: Fenster nutzbar, rot: Fenster nicht nutzbar) gekennzeichnet. In dem vorliegenden Klassenraum lassen sich alle Fenster öffnen (Soll = Ist).



Bild 6-60: Fenstertypen in der gewerblichen Schule für Farbe und Gestaltung

Für die Berechnung des Außenluftwechsels werden folgende Fallunterscheidungen getroffen, siehe Tabelle 6-29.

Tabelle 6-29: Lüftungsvarianten und Fenstertypen, gewerbliche Schule für Farbe und Gestaltung

Fenstertyp	i	A_{Fe} in m^2
Fall I: <i>Stoßlüftung Gesamtöffnungsfläche</i>		
A Drehfenster	2	3,60
Fall II: <i>Stoßlüftung mit einem Drehfenster</i>		
A Drehfenster	1	1,80

Der erste Fall *Stoßlüftung Gesamtöffnungsfläche* berücksichtigt beide nutzbaren Drehfenster mit einer Gesamtöffnungsfläche von $3,60 m^2$. In Fall II wird dagegen nur eines der beiden Fenster geöffnet. Dadurch ergibt sich eine Öffnungsfläche von $1,80 m^2$. Da die Fenster lediglich gedreht und nicht gekippt werden können, werden keine weiteren Lüftungsvarianten betrachtet.

Die berechneten Volumenströme und die benötigte Lüftungsdauer, siehe Kapitel 3.2, können Bild 6-61 und Bild 6-62 entnommen werden. In Bild 6-61 ist der Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten aus Tabelle 6-29 gegenüber der Außenlufttemperatur abgebildet. Es wird eine Raumlufttemperatur von $20^\circ C$ und eine Windgeschwindigkeit von $2 m/s$ angenommen. Letztere entspricht der durchschnittlichen jährlichen Windgeschwindigkeit in Stuttgart [41].

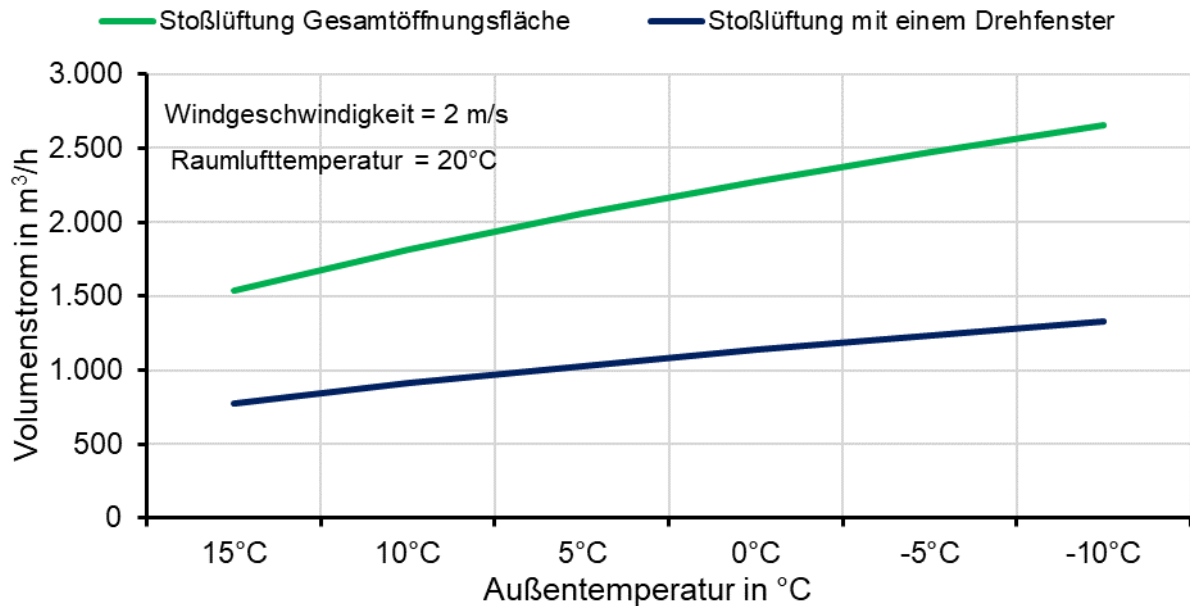


Bild 6-61 Volumenstrom verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, gewerbliche Schule für Farbe und Gestaltung

Bei Stoßlüften mit zwei Fenstern (Fall I) resultieren Volumenströme von $\dot{V} = 1.500 \dots 2.650 \text{ m}^3/\text{h}$. Für das Stoßlüften mit einem Fenster (Fall II) werden Volumenströme von $\dot{V} = 770 \dots 1.300 \text{ m}^3/\text{h}$ berechnet.

Bild 6-62 stellt die benötigte Lüftungsdauer der betrachteten Lüftungsvarianten dar.

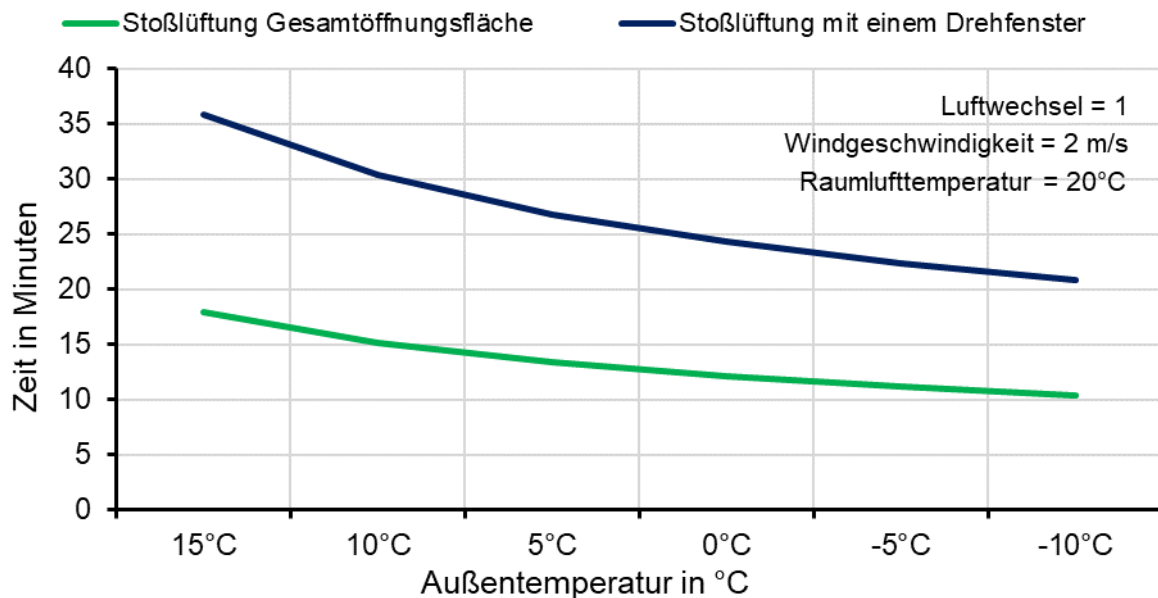


Bild 6-62: Benötigte Lüftungsdauer verschiedener Lüftungsvarianten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur, gewerbliche Schule für Farbe und Gestaltung

Es ist die benötigte Lüftungsdauer bei unterschiedlicher Außenlufttemperatur zur Erreichung eines einfachen Luftwechsels aufgetragen. Die Raumlufthtemperatur ist mit

20°C und die Windgeschwindigkeit mit 2 m/s angenommen. Für den Fall I wird eine Lüftungsdauer von 10,4 ... 17,9 min. berechnet. Die benötigte Lüftungsdauer bei Öffnen eines einzelnen Drehfensters (Fall II) beträgt 21 ... 36 min. Damit eignen sich beide Lüftungsvarianten nicht für das Stoßlüften nach dem vom Umweltbundesamt [16] vorgeschlagenen Lüftungsintervall von 20/5/20. Es ist nicht möglich, in einer Lüftungspause von 5 Minuten die gesamte Raumlufte mitsamt den Stofflasten auszutauschen. Des Weiteren wird die Anforderung einer Luftwechselrate von 5 ... 6 1/h (vgl. DIN EN 16798 [2]) nicht erfüllt. Es ist zu erwarten, dass sich hygienisch inakzeptable Raumluftezustände einstellen und somit eine CO₂-Raumluftekonzentration von 1000 ppm deutlich überschritten wird.

6.11 Ergebnisse der Stoffausbreitung in den Klassenräumen

Die weiteren Ergebnisse zur Stoffausbreitung zeigen die anhand der Messungen und anschließenden Berechnungen abgeleiteten inhalierten kumulierten Quanta und die daraus resultierenden Infektionsrisiken für die jeweilige Messstelle über eine Doppelstunde in PIRA (vgl. Kapitel 2.1). Zum einfacheren Vergleich der untersuchten Klassenräume werden die relevanten Daten jeweils vorab zusammengefasst. Der angegebene Fensterflächen-Raumvolumen-Anteil bezieht sich auf die Ist-Gesamtöffnungsfläche, d.h. die Fläche, die während den Messungen genutzt werden kann. Die angegebene Außentemperatur und Windgeschwindigkeit stellt einen Tagesmittelwert dar.

6.11.1 Aufbereitete Ergebnisse Solitude-Gymnasium

Tabelle 6-30: Relevante Daten des Klassenraums, Solitude-Gymnasium

Kriterium	Wert	Einheit
Raumvolumen V_{Raum}	194	m^3
Gesamtöffnungsfläche der Fenster	3,3	m^2
Fensterfläche-Raumvolumen-Anteil	0,017	1/m
Betrieb 1 der raumluftechnischen Anlage	600	m^3/h

Nachfolgend wird in Bild 6-63 der Messstellenplan und das Infektionsrisiko PIRA je Messstelle bei verschiedenen Maßnahmen zur Partikelkonzentrationssenkung dargestellt.

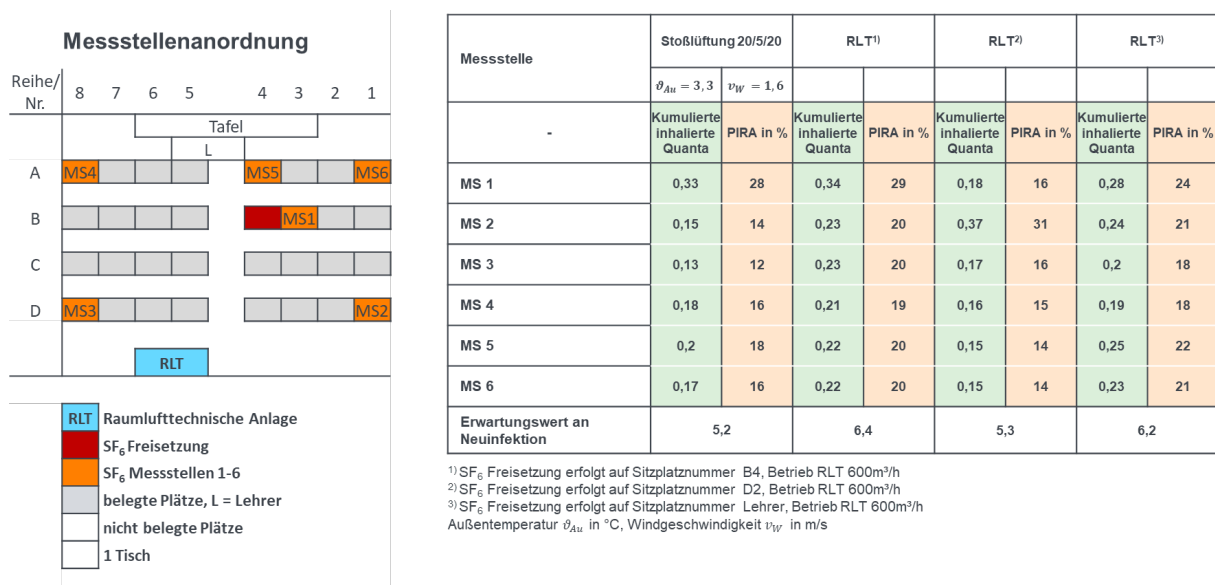


Bild 6-63: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung **ohne** FFP2-Maske, Solitude-Gymnasium

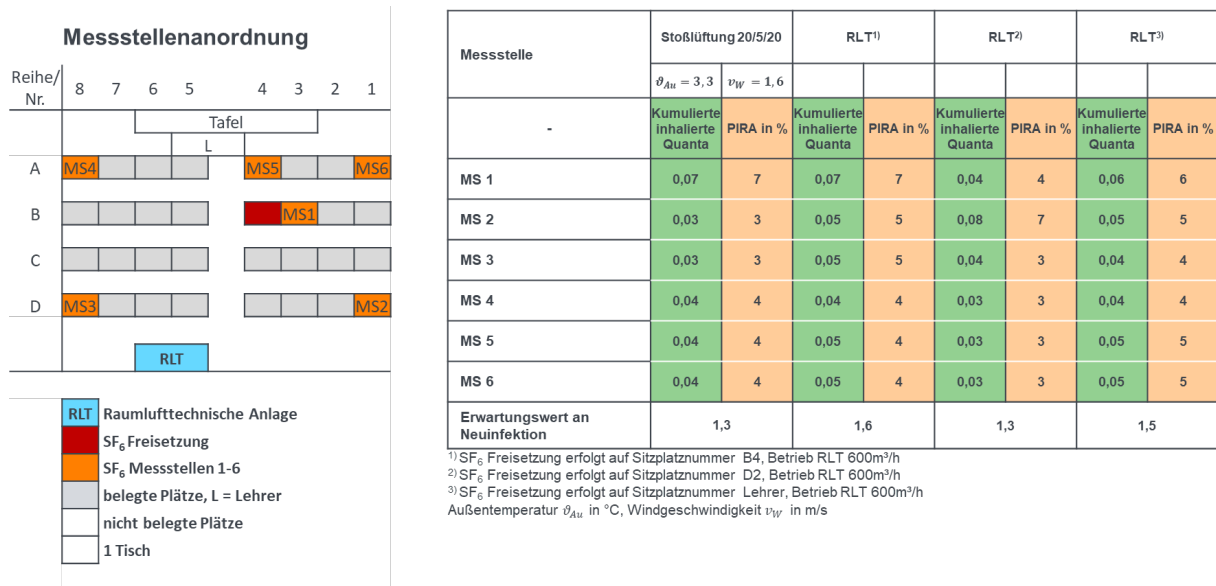


Bild 6-64: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung **mit** FFP2-Maske, Solitude-Gymnasium

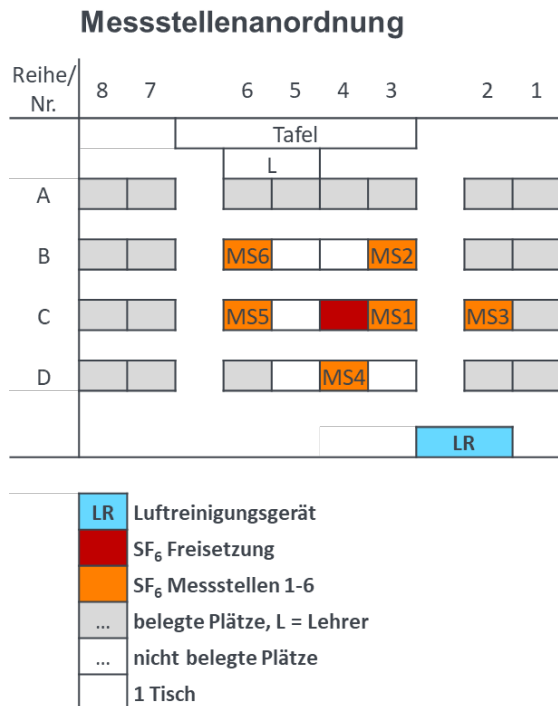
6.11.2 Aufbereitete Ergebnisse Wilhelms-Gymnasium

In Tabelle 6-31 sind die relevanten Daten für den Klassenraum im Wilhelms-Gymnasium dargestellt.

Tabelle 6-31: Relevante Daten des Klassenraums, Wilhelms-Gymnasium

Kriterium	Wert	Einheit
Raumvolumen V_{Raum}	216	m ³
Gesamtöffnungsfläche der Fenster	5,2	m ²
Fensterfläche-Raumvolumen-Anteil	0,024	1/m

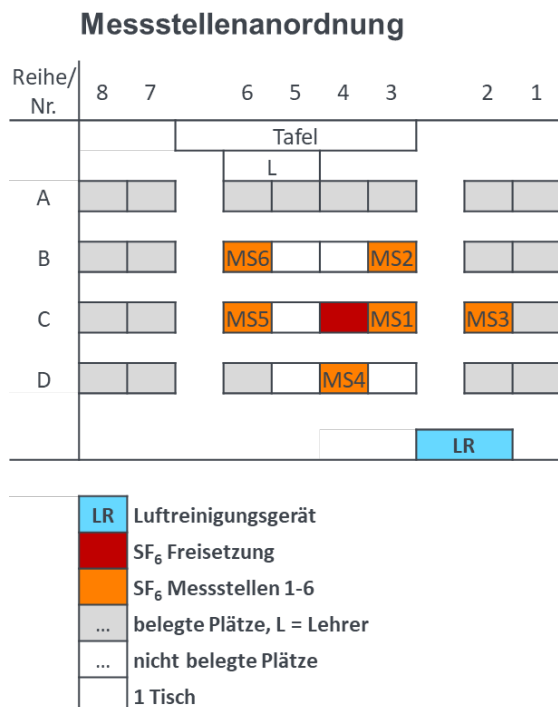
Nachfolgend wird in Bild 6-65 bis Bild 6-68 der Messstellenplan und das Infektionsrisiko PIRA je Messstelle bei verschiedenen Maßnahmen zur Partikelkonzentrationssenkung dargestellt.



Messstelle	Fenster geschlossen		Stoßlüftung 20/5/20	
	$\vartheta_{Au} = 10,2$	$v_W = 4,3$	$\vartheta_{Au} = 10,2$	$v_W = 4,3$
-	Kumulierte inhalierte Quanta	PIRA in %	Kumulierte inhalierte Quanta	PIRA in %
MS 1	0,73	52	0,15	14
MS 2	0,43	35	0,12	11
MS 3	0,45	37	0,14	13
MS 4	0,47	38	0,21	19
MS 5	0,38	32	0,18	17
MS 6	0,38	32	0,10	10
Erwartungswert an Neuinfektion	9,8		3,6	

Außentemperatur ϑ_{Au} in °C, Windgeschwindigkeit v_W in m/s

Bild 6-65: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung **ohne** FFP2-Maske, Wilhelms-Gymnasium



Messstelle	Fenster geschlossen		Stoßlüftung 20/5/20	
	$\vartheta_{Au} = 10,2$	$v_W = 4,3$	$\vartheta_{Au} = 10,2$	$v_W = 4,3$
-	Kumulierte inhalierte Quanta	PIRA in %	Kumulierte inhalierte Quanta	PIRA in %
MS 1	0,15	14	0,03	3
MS 2	0,09	8	0,02	2
MS 3	0,09	9	0,03	3
MS 4	0,10	9	0,04	4
MS 5	0,08	8	0,04	4
MS 6	0,08	8	0,02	2
Erwartungswert an Neuinfektion	2,5		0,8	

Außentemperatur ϑ_{Au} in °C, Windgeschwindigkeit v_W in m/s

Bild 6-66: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung **mit** FFP2-Maske, Wilhelms-Gymnasium

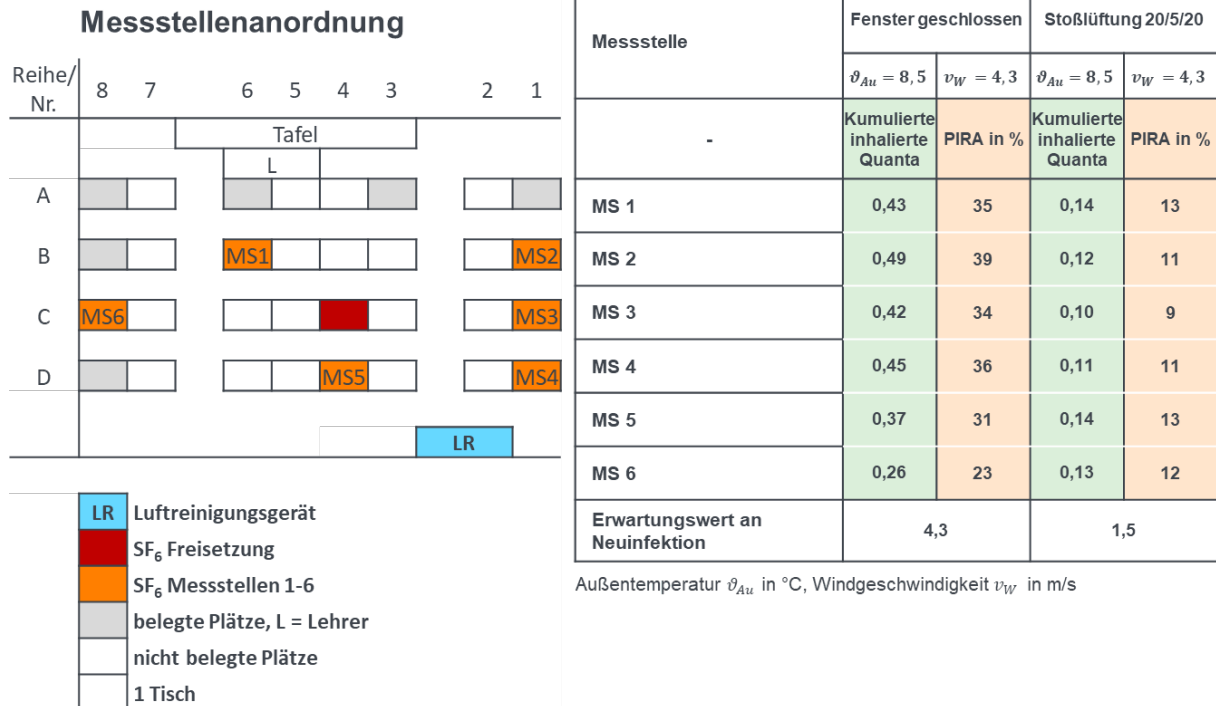


Bild 6-67: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 50% Belegung **ohne** FFP2-Maske, Wilhelms-Gymnasium

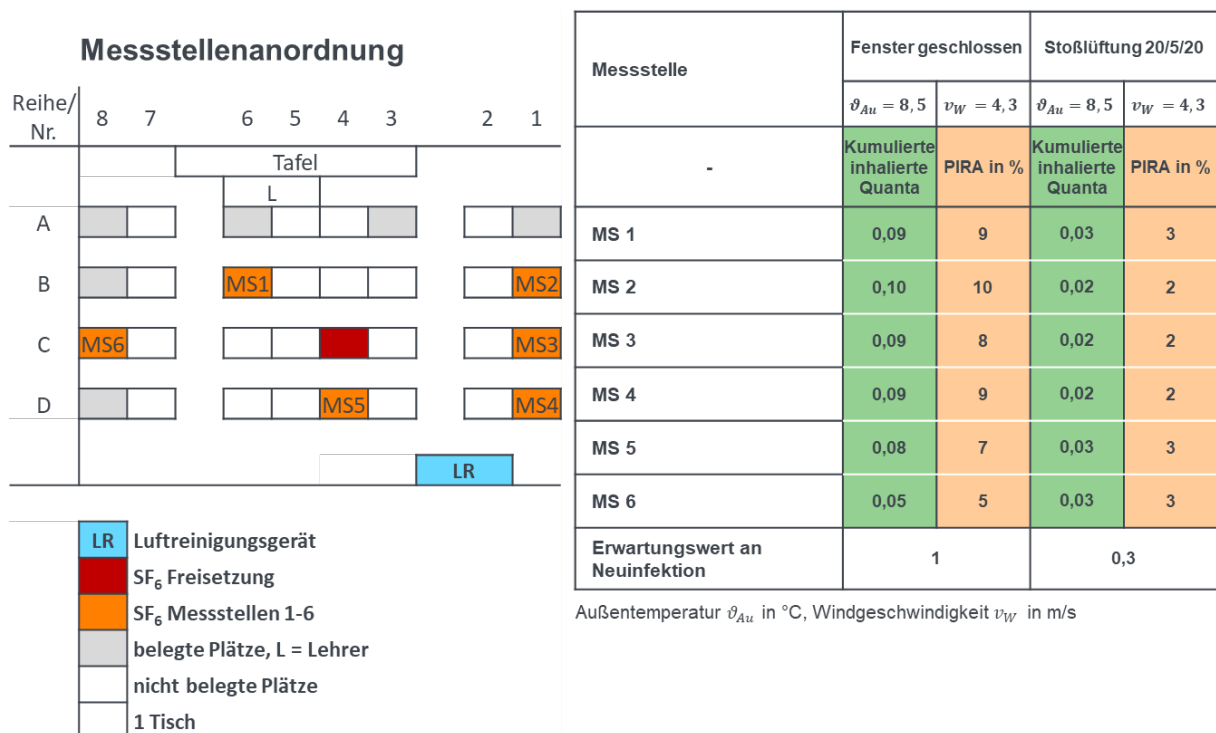


Bild 6-68: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 50% Belegung **mit** FFP2-Maske, Wilhelms-Gymnasium

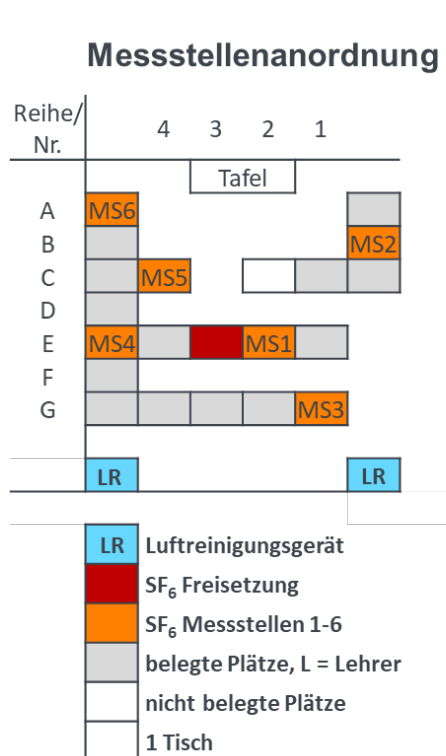
6.11.3 Aufbereitete Ergebnisse Schwabschule

In Tabelle 6-32 sind die relevanten Daten für den Klassenraum in der Schwabschule dargestellt.

Tabelle 6-32: Relevante Daten des Klassenraums, Schwabschule

Kriterium	Wert	Einheit
Raumvolumen V_{Raum}	234	m ³
Gesamtöffnungsfläche der Fenster	2,1	m ²
Fensterfläche-Raumvolumen-Anteil	0,009	1/m

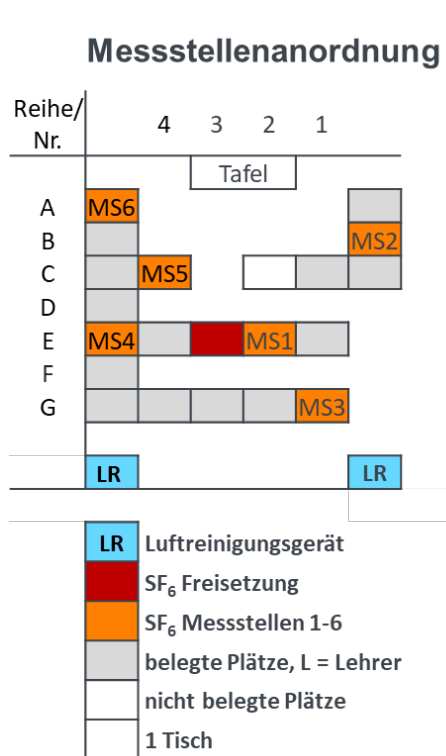
Nachfolgend wird in Bild 6-69 der Messstellenplan und das Infektionsrisiko PIRA je Messstelle bei verschiedenen Maßnahmen zur Partikelkonzentrationssenkung vorgestellt.



Messstelle	Fenster geschlossen		Stoßlüftung 20/5/20	
	$\vartheta_{Au} = 1,4$	$v_W = 2,1$	$\vartheta_{Au} = 1,4$	$v_W = 2,1$
-	Kumulierte inhalierte Quanta	PIRA in %	Kumulierte inhalierte Quanta	PIRA in %
MS 1	0,45	36	0,20	18
MS 2	0,40	33	0,16	15
MS 3	0,59	44	0,22	20
MS 4	0,50	40	0,27	23
MS 5	0,37	31	0,16	15
MS 6	0,37	31	0,14	13
Erwartungswert an Neuinfektion	8,2		4,0	

Außentemperatur ϑ_{Au} in °C, Windgeschwindigkeit v_W in m/s

Bild 6-69: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung **ohne** FFP2-Maske, Schwabschule



Messstelle	Fenster geschlossen		Stoßlüftung 20/5/20	
	$\vartheta_{Au} = 1,4$	$v_W = 2,1$	$\vartheta_{Au} = 1,4$	$v_W = 2,1$
-	Kumulierte inhalierte Quanta	PIRA in %	Kumulierte inhalierte Quanta	PIRA in %
MS 1	0,09	9	0,04	4
MS 2	0,08	8	0,03	3
MS 3	0,12	11	0,05	4
MS 4	0,10	10	0,06	5
MS 5	0,08	8	0,03	3
MS 6	0,08	8	0,03	3
Erwartungswert an Neuinfektion	2,1		0,9	

Außentemperatur ϑ_{Au} in °C, Windgeschwindigkeit v_W in m/s

Bild 6-70: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung **mit** FFP2-Maske, Schwabschule

Bild 6-71: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung **ohne** FFP2-Maske, Wilhelmsschule Wangen

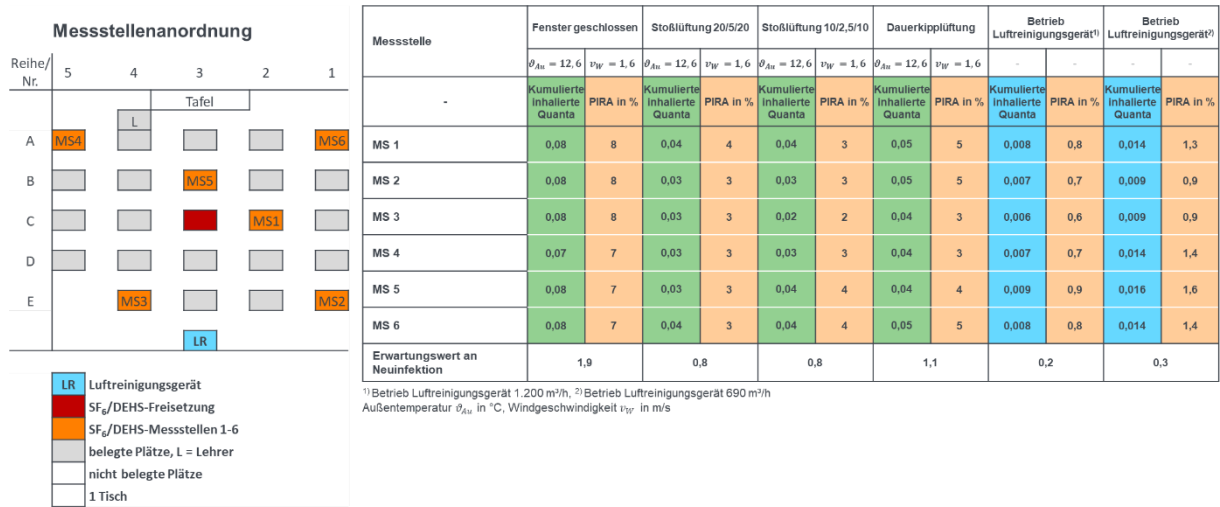


Bild 6-72: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung **mit** FFP2-Maske, Wilhelmsschule Wangen

6.11.5 Aufbereitete Ergebnisse Steigschule Bau 1

In Tabelle 6-34 sind die relevanten Daten für den Klassenraum in der Steigschule Bau 1 dargestellt.

Tabelle 6-34: Relevante Daten des Klassenraums, Steigschule Bau 1

Kriterium	Wert	Einheit
Raumvolumen V_{Raum}	184	m^3
Gesamtöffnungsfläche der Fenster	5,6	m^2
Fensterfläche-Raumvolumen-Anteil	0,03	1/m
Betrieb 1 Luftreinigungsgerät	1.000	m^3/h
Betrieb 2 Luftreinigungsgerät	500	m^3/h

Nachfolgend wird in Bild 6-73 der Messstellenplan und das Infektionsrisiko PIRA je Messstelle bei verschiedenen Maßnahmen zur Partikelkonzentrationssenkung dargestellt.

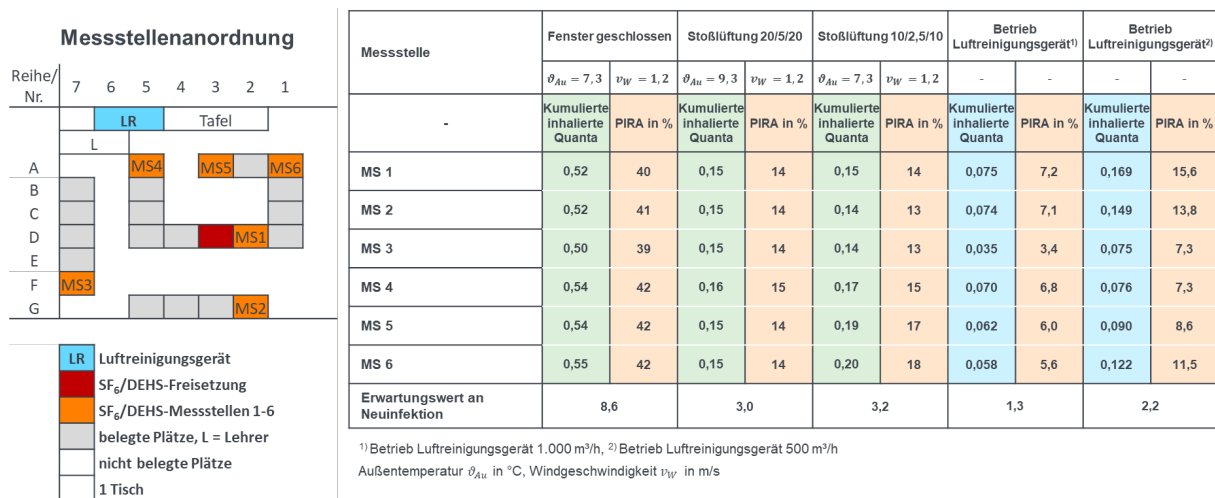


Bild 6-73: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung **ohne** FFP2-Maske, Steigschule Bau 1

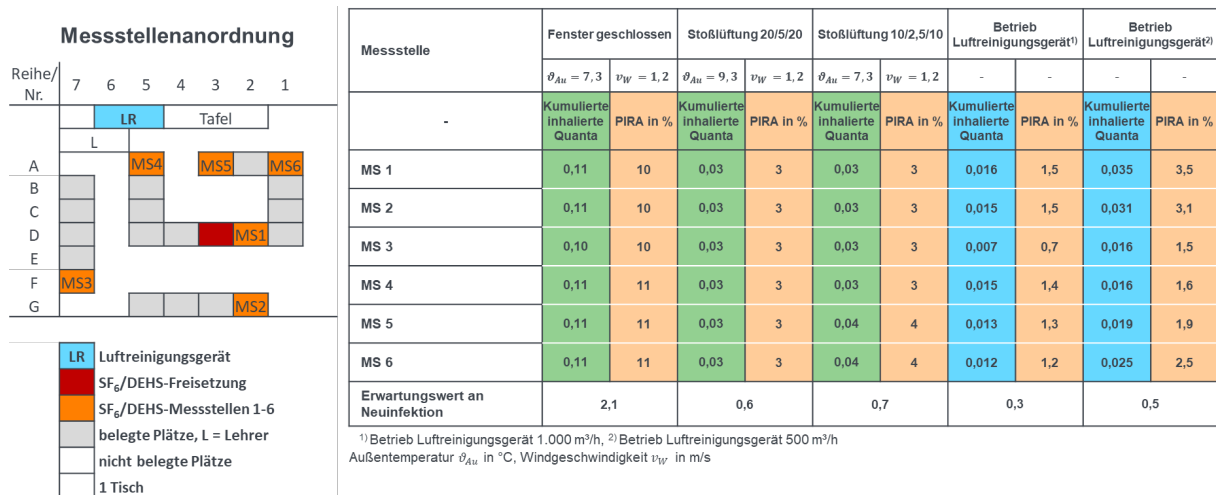


Bild 6-74: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung **mit** FFP2-Maske, Steigschule Bau 1

6.11.6 Aufbereitete Ergebnisse Steinbeisschule Hauptbau

In Tabelle 6-35 sind die relevanten Daten für den Klassenraum in der Steinbeisschule Hauptbau dargestellt.

Tabelle 6-35: Relevante Daten des Klassenraums, Steinbeisschule Hauptbau

Kriterium	Wert	Einheit
Raumvolumen V_{Raum}	180	m³
Gesamtöffnungsfläche der Fenster	1,5	m²
Fensterfläche-Raumvolumen-Anteil	0,008	1/m
Betrieb 1 Luftreinigungsgerät	1.250	m³/h
Betrieb 2 Luftreinigungsgerät	1.000	m³/h
Betrieb 3 Luftreinigungsgerät	690	m³/h

Nachfolgend wird in Bild 6-75 der Messstellenplan und das Infektionsrisiko PIRA je Messstelle bei verschiedenen Maßnahmen zur Partikelkonzentrationssenkung dargestellt.

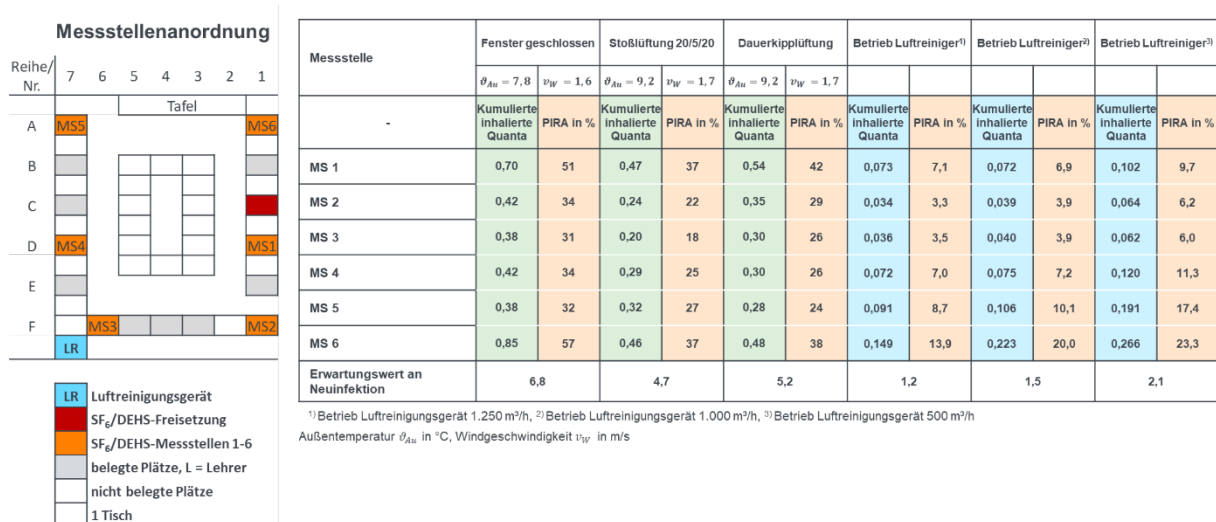


Bild 6-75: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung **ohne** FFP2-Maske, Steinbeisschule Hauptbau

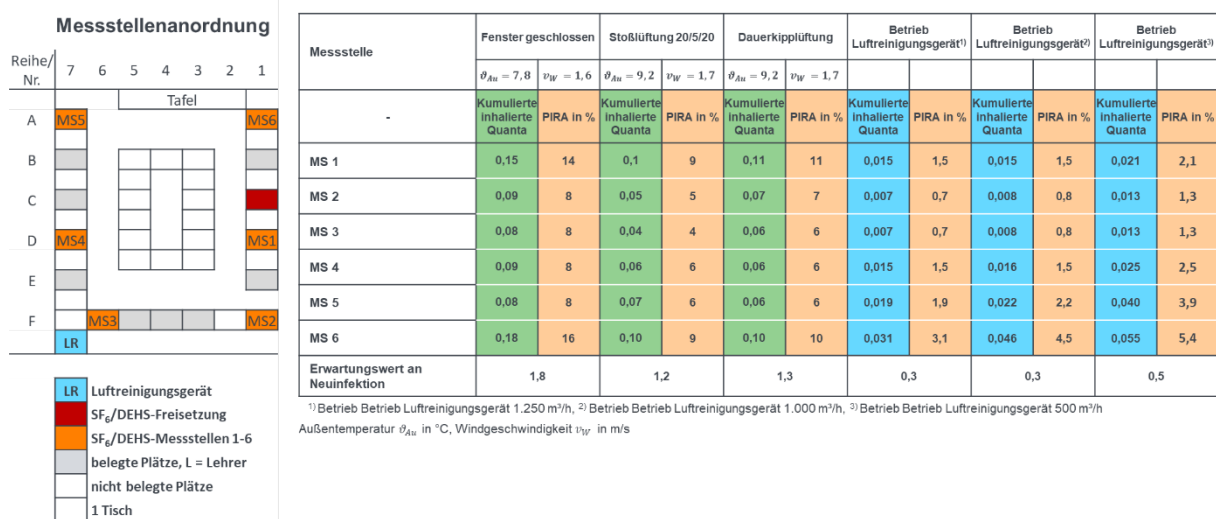


Bild 6-76: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung **mit** FFP2-Maske, Steinbeisschule Hauptbau

6.11.7 Aufbereitete Ergebnisse Uhlandschule Neubau

In Tabelle 6-36 sind die relevanten Daten für den Klassenraum in der Uhlandschule Neubau dargestellt.

Tabelle 6-36: Relevante Daten des Klassenraums, Uhlandschule Neubau

Kriterium	Wert	Einheit
Raumvolumen V_{Raum}	210	m^3
Gesamtöffnungsfläche der Fenster	5,5	m^2
Fensterfläche-Raumvolumen-Anteil	0,026	1/m
Betrieb 1 Luftreinigungsgerät	1.050	m^3/h
Betrieb 2 Luftreinigungsgerät	630	m^3/h

Nachfolgend wird in Bild 6-77 der Messstellenplan und das Infektionsrisiko PIRA je Messstelle bei verschiedenen Maßnahmen zur Partikelkonzentrationssenkung dargestellt.

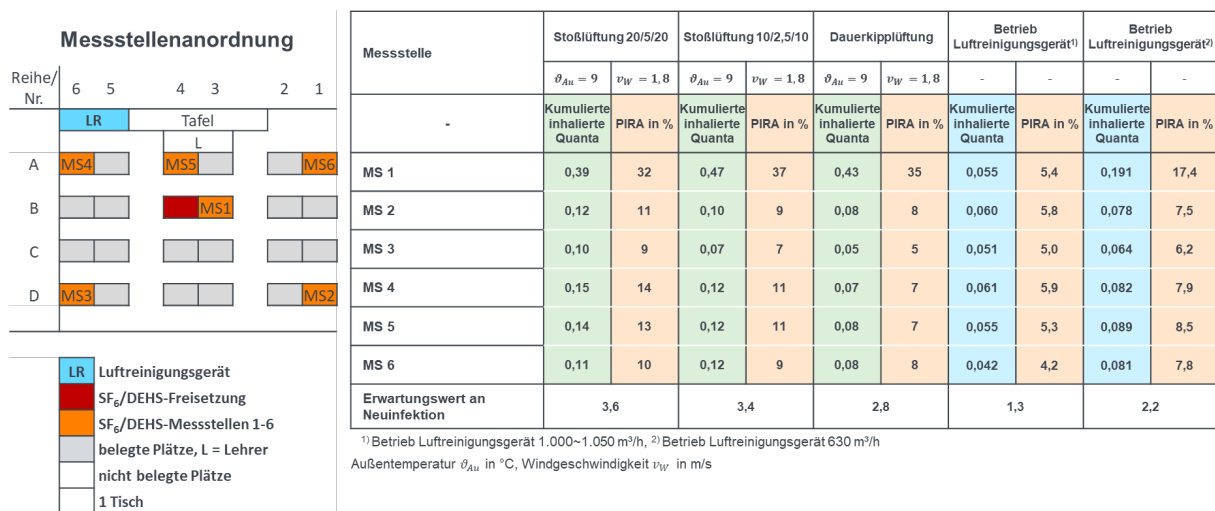


Bild 6-77: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung **ohne** FFP2-Maske, Uhlandschule

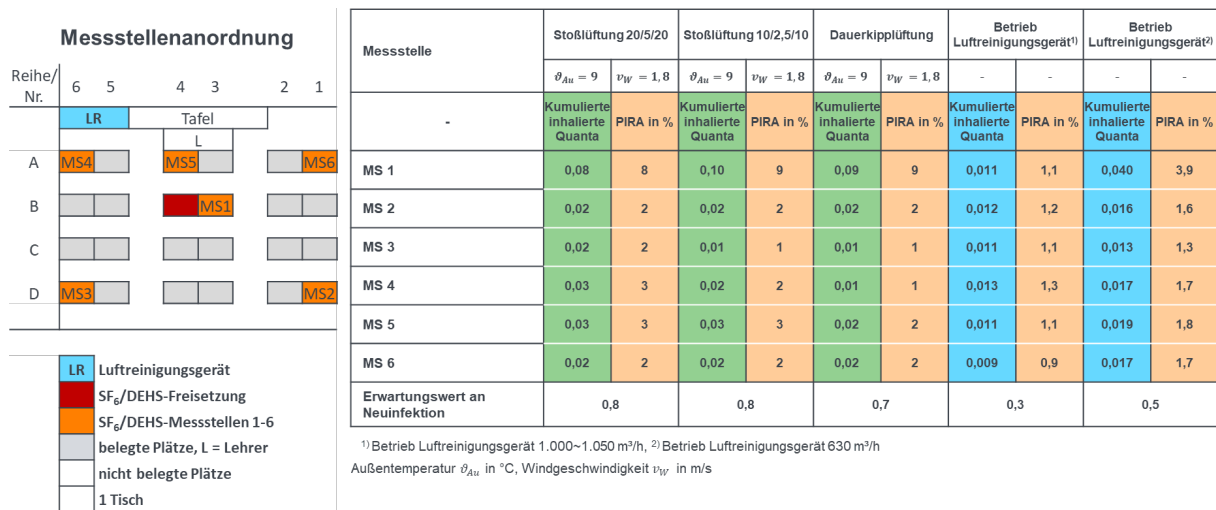


Bild 6-78: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung mit FFP2-Maske, Uhlandschule Neubau

6.11.8 Aufbereitete Ergebnisse Zeppelin-Gymnasium Referenzraum

In Tabelle 6-37 sind die relevanten Daten für den Klassenraum (Referenzraum) im Zeppelin-Gymnasium dargestellt.

Tabelle 6-37: Relevante Daten des Klassenraums (Referenzraum), Zeppelin-Gymnasium

Kriterium	Wert	Einheit
Raumvolumen V_{Raum}	189	m³
Gesamtöffnungsfläche der Fenster	8,7	m²
Fensterfläche-Raumvolumen-Anteil	0,046	1/m
Betrieb 1 Luftreinigungsgerät	1.000	m³/h
Betrieb 2 Luftreinigungsgerät	690	m³/h

Nachfolgend wird in Bild 6-79 der Messstellenplan und das Infektionsrisiko PIRA je Messstelle bei verschiedenen Maßnahmen zur Partikelkonzentrationssenkung dargestellt.

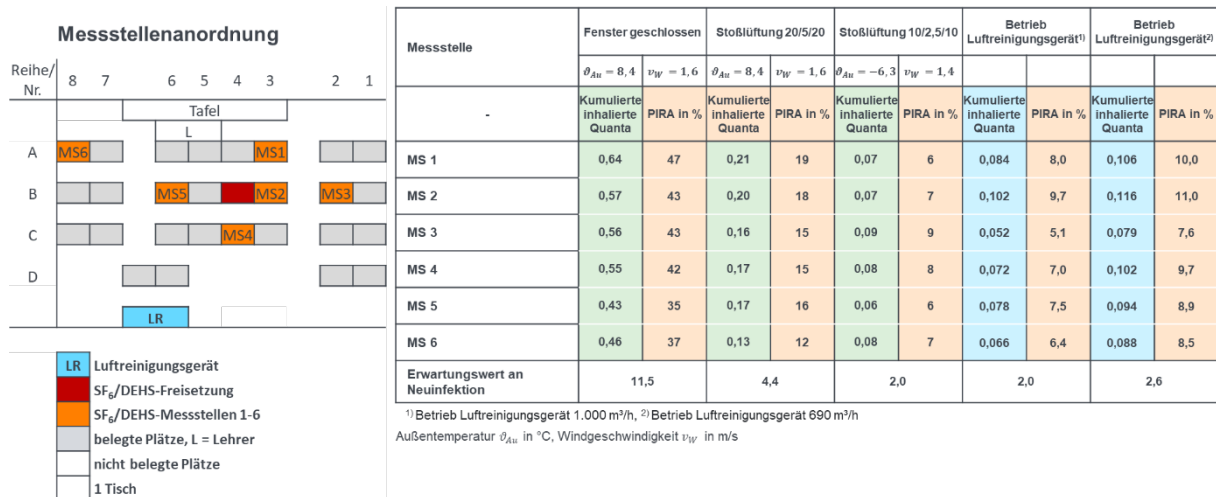


Bild 6-79: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung **ohne** FFP2-Maske, Zeppelin-Gymnasium (Referenzraum)

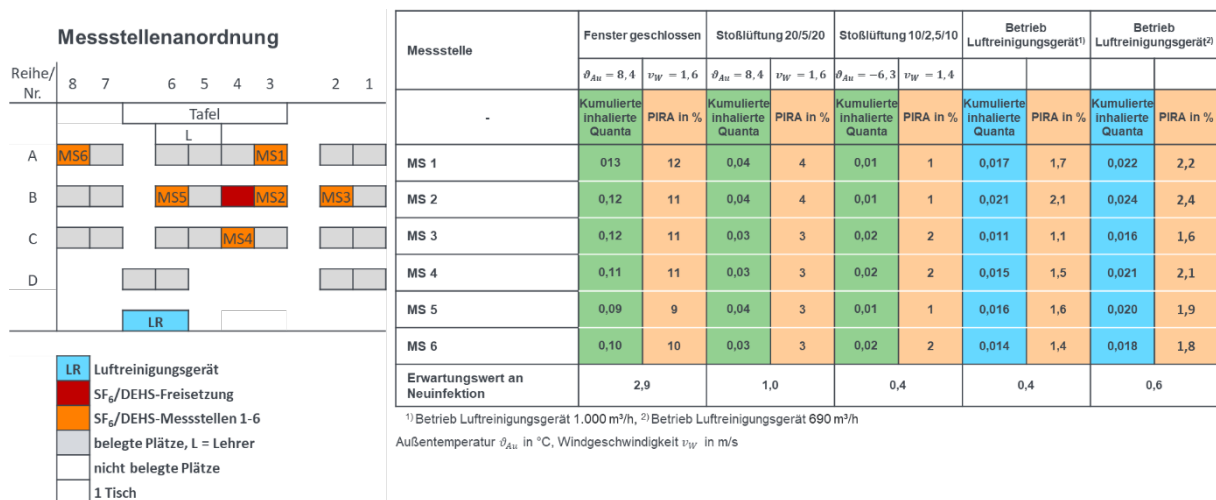


Bild 6-80: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung **mit** FFP2-Maske, Zeppelin-Gymnasium (Referenzraum)

6.11.9 Aufbereitete Ergebnisse Zeppelin-Gymnasium Klausurraum

In Tabelle 6-37 sind die relevanten Daten für den Klassenraum (Klausurraum) im Zeppelin-Gymnasium dargestellt.

Tabelle 6-38: Relevante Daten des Klassenraums (Klausur.-Raum), Zeppelin-Gymnasium

Kriterium	Wert	Einheit
Raumvolumen V_{Raum}	403	m ³
Gesamtöffnungsfläche der Fenster	17,33	m ²
Fensterfläche-Raumvolumen-Anteil	0,043	1/m
Betrieb 1 Luftreinigungsgerät	2 x 690	m ³ /h

Nachfolgend wird in Bild 6-79 der Messstellenplan und das Infektionsrisiko PIRA je Messstelle bei verschiedenen Maßnahmen zur Partikelkonzentrationsenkung dargestellt.

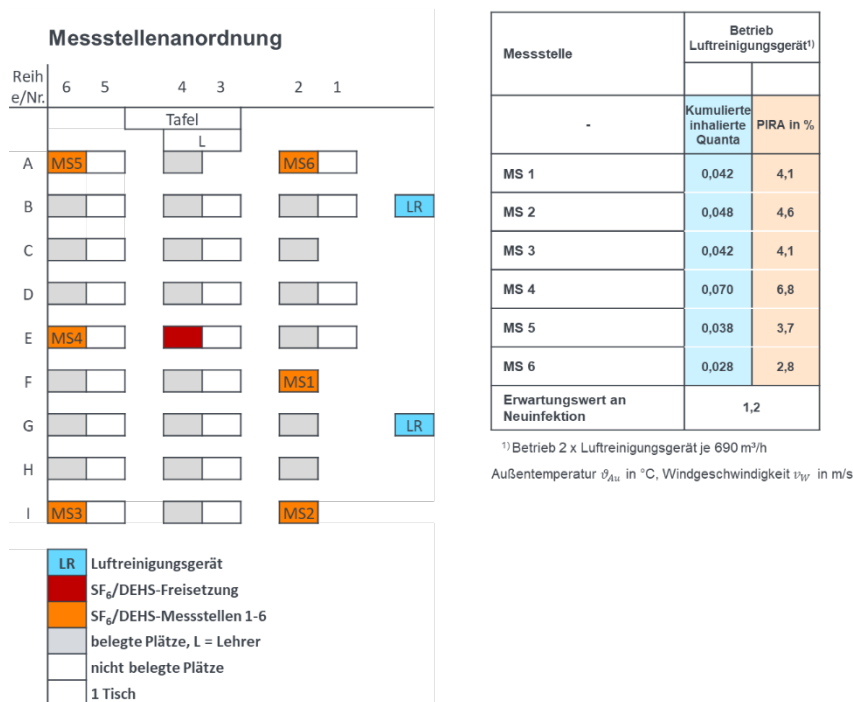


Bild 6-81: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung **ohne** FFP2-Maske, Zeppelin-Gymnasium (Klausurraum)

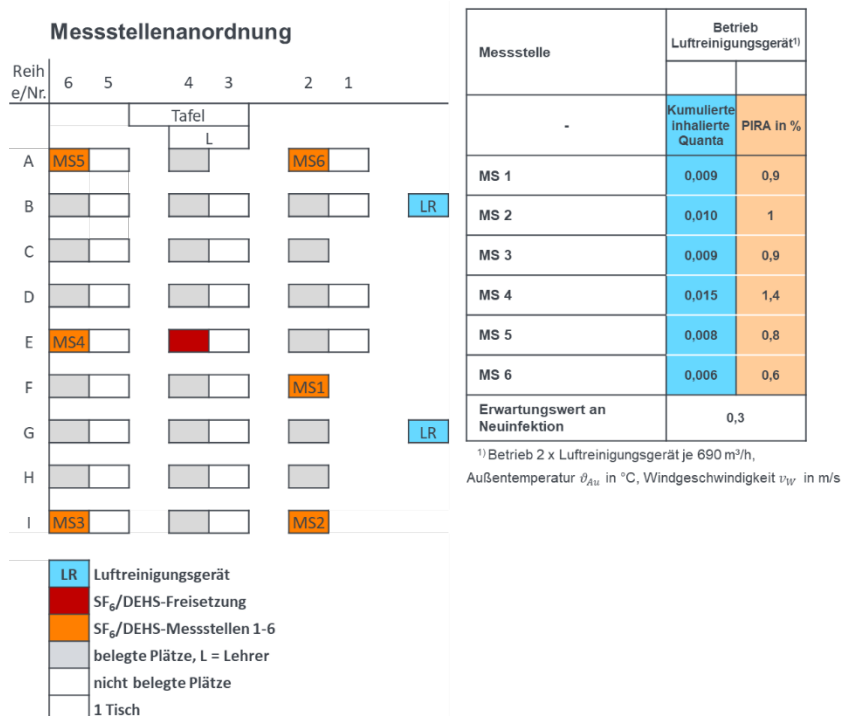


Bild 6-82: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung **mit** FFP2-Maske, Zeppelin-Gymnasium (Klausurraum)

6.11.10 Aufbereitete Ergebnisse Filderschule

In Tabelle 6-39 sind die relevanten Daten für den Klassenraum in der Filderschule dargestellt.

Tabelle 6-39: Relevante Daten des Klassenraums in der Filderschule

Kriterium	Wert	Einheit
Raumvolumen V_{Raum}	186	m^3
Gesamtöffnungsfläche der Fenster	1,4	m^2
Fensterfläche-Raumvolumen-Anteil	0,008	1/m
Betrieb 1 der raumluftechnischen Anlage	915	m^3/h
Betrieb 2 der raumluftechnischen Anlage	610	m^3/h

Nachfolgend wird in Bild 6-83 der Messstellenplan und das Infektionsrisiko PIRA je Messstelle bei verschiedenen Maßnahmen zur Partikelkonzentrationsenkung dargestellt.

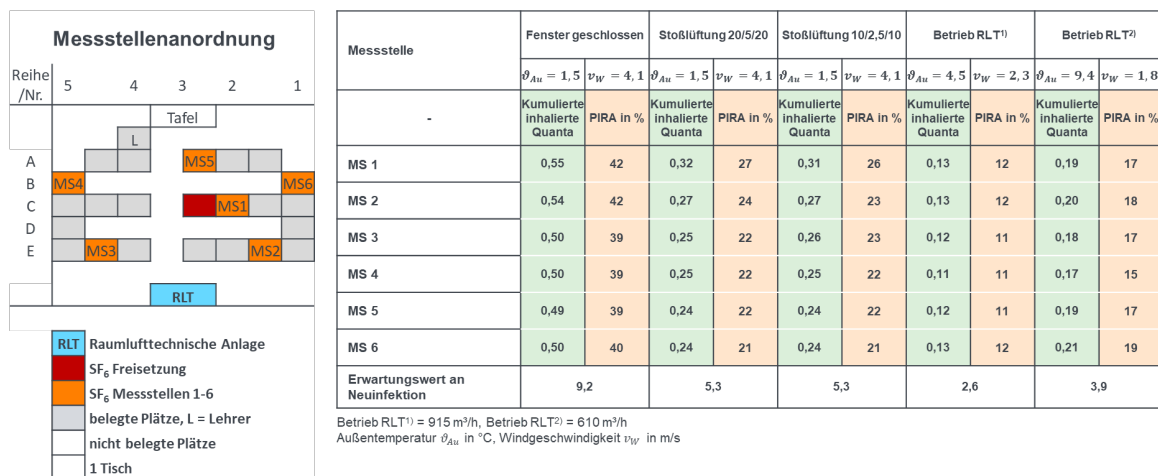


Bild 6-83: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung **ohne** FFP2-Maske, Filderschule

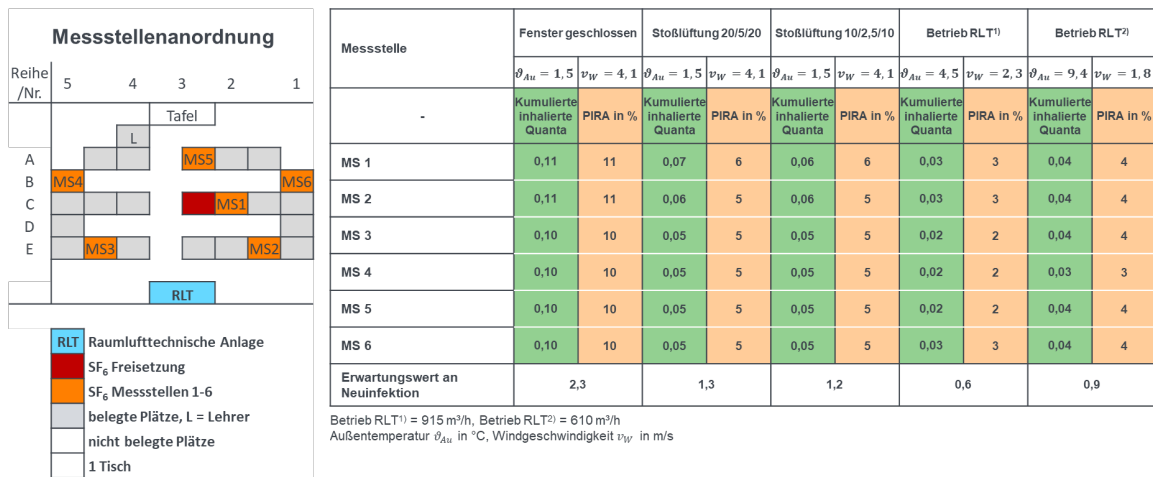


Bild 6-84: Messstellen und Infektionsrisiko bei verschiedenen Maßnahmen bei 100% Belegung mit FFP2-Maske, Filderschule

6.12 Ergebnisse der Behaglichkeitsmessung in den Klassenräumen

6.12.1 Temperaturverläufe individueller Klassenräume

Bild 6-85 stellt die Temperaturverläufe im Klassenraum des Solitude-Gymnasiums für eine Stoßlüftung 20/5/20 sowie für den Betrieb einer raumluftechnischen Anlage dar. Die Außentemperatur liegt während der Messungen bei ca. 3°C.

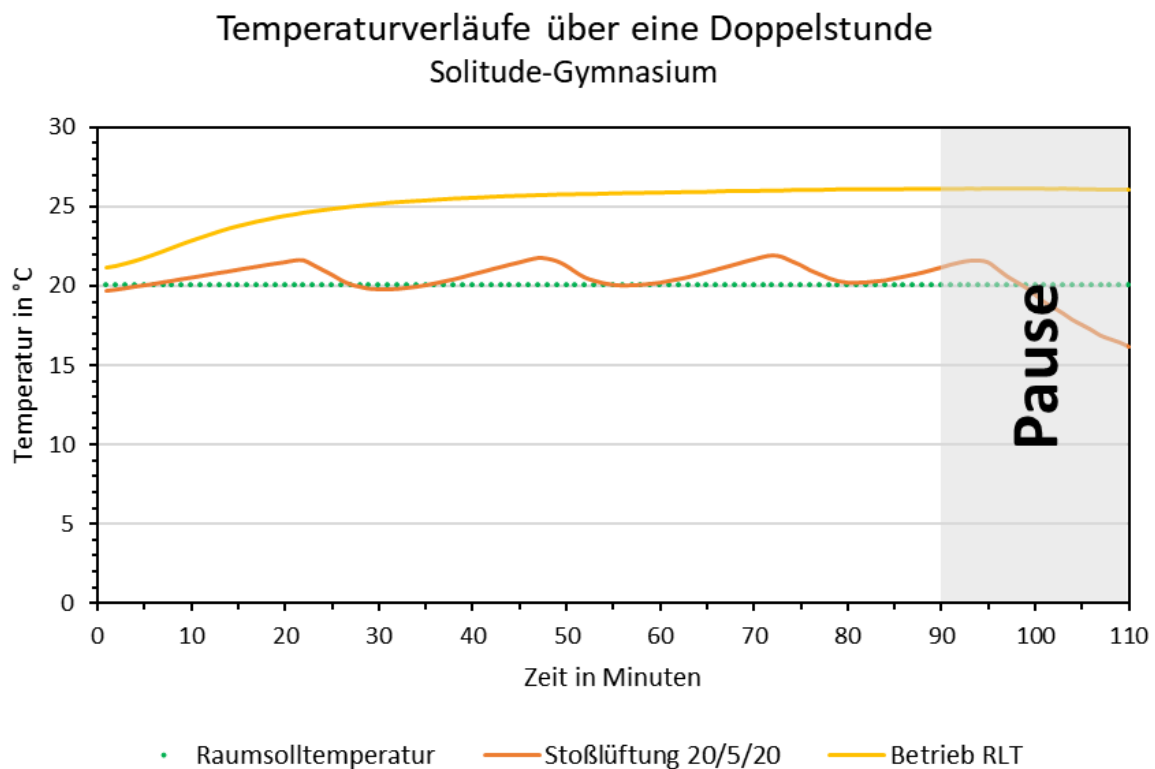


Bild 6-85: Temperaturverläufe über eine Doppelstunde, Solitude-Gymnasium

Temperaturverläufe über eine Doppelstunde Steigschule Bau 1

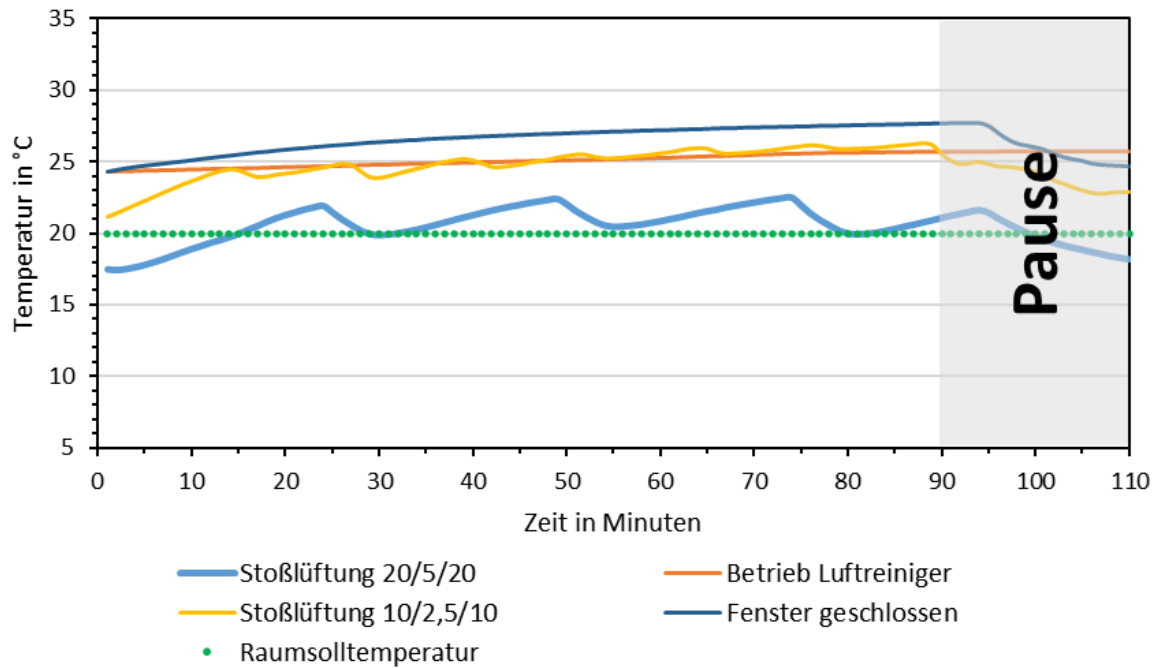


Bild 6-86 zeigt einerseits die Temperaturverläufe im Klassenraum der Steigschule Bau 1 bei geschlossenen Fenstern, andererseits für eine Stoßlüftung 20/5/20 und 10/2,5/10 sowie für den Betrieb eines Luftreinigungsgerätes. Die Außentemperatur liegt während der Messung bei 7...9°C.

Temperaturverläufe über eine Doppelstunde Steigschule Bau 1

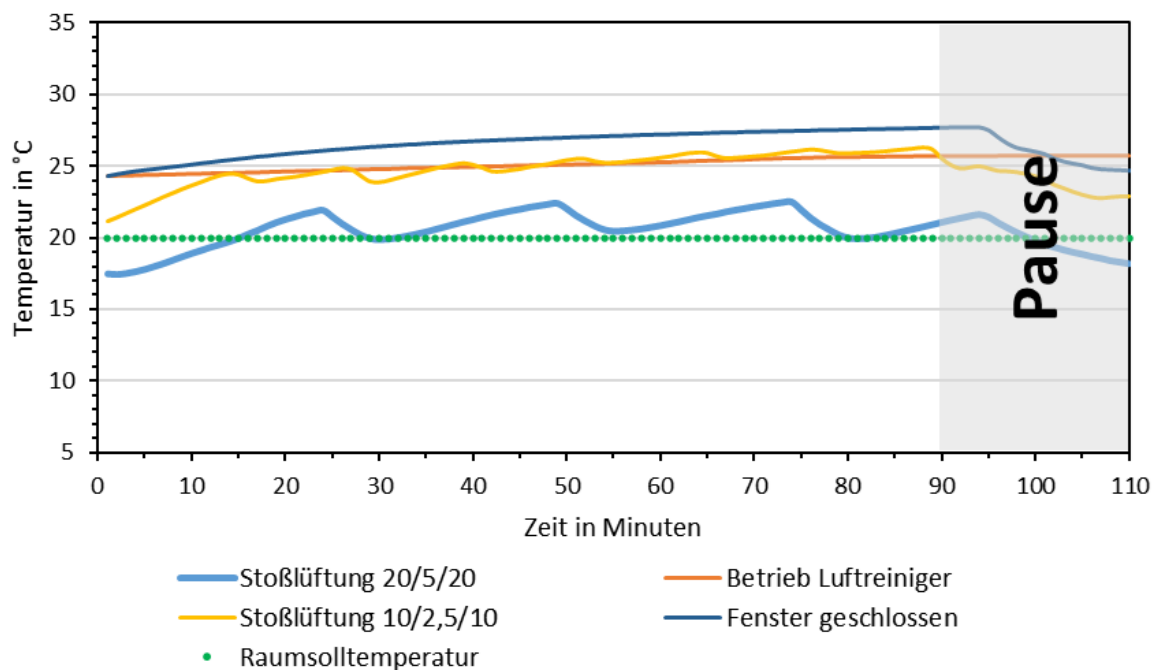


Bild 6-86: Temperaturverläufe über eine Doppelstunde, Steigschule Bau 1

Bild 6-87 stellt die Temperaturverläufe im Klassenraum der Uhlandschule Neubau bei einer Stoßlüftung 20/5/20 und 10/2,5/10 sowie bei einer Dauerkipplüftung dar. Ein weiterer Temperaturverlauf ist während dem Betrieb eines Luftreinigers aufgenommen. Die Außentemperatur liegt während der Messung bei ca. 9°C.

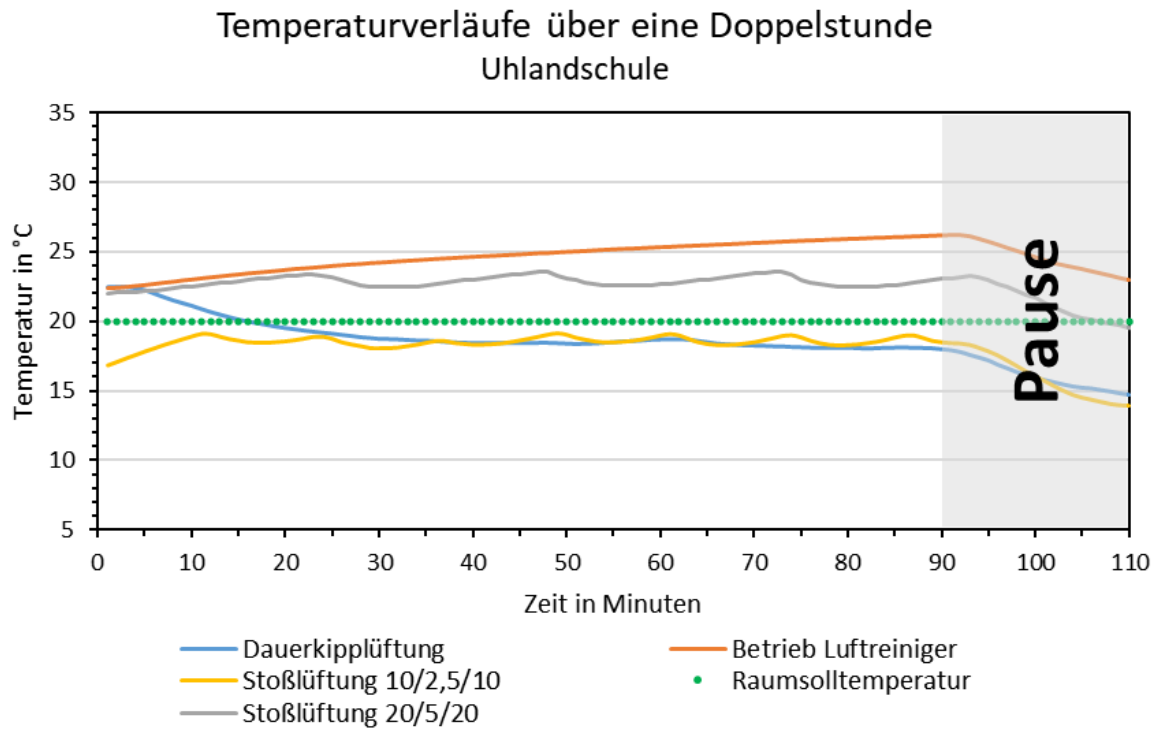


Bild 6-87: Temperaturverläufe über eine Doppelstunde, Uhlandschule Neubau

Bild 6-88 stellt die Temperaturverläufe im Klassenraum der Wilhelmsschule Wangen bei einer Stoßlüftung 20/5/20 und 10/2,5/10 sowie bei einer Dauerkipplüftung dar. Ein weiterer Temperaturverlauf ist während dem Betrieb eines Luftreinigungsgerätes aufgenommen. Die Außentemperatur liegt während der Messung bei ca. 13°C.

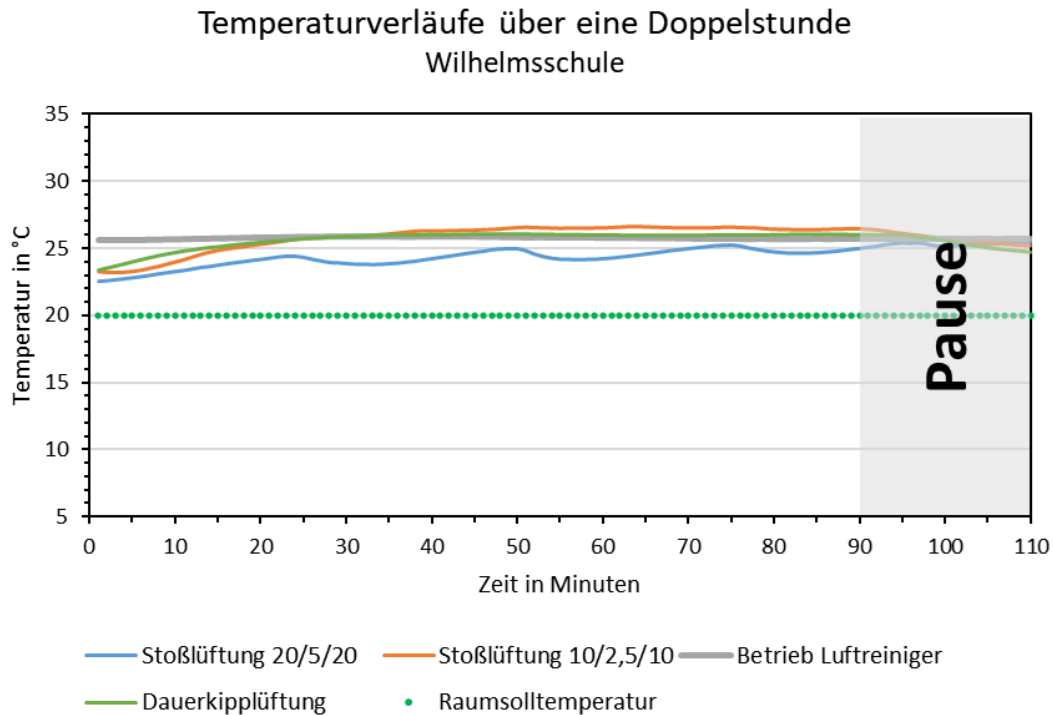


Bild 6-88: Temperaturverläufe über eine Doppelstunde, Wilhelmsschule Wangen

Bild 6-89 stellt die Temperaturverläufe im Klassenraum der Filderschule bei einer Stoßlüftung 20/5/20 und 10/2,5/10 dar. Ein weiterer Temperaturverlauf ist während des Betriebs der RLT-Anlage aufgenommen. Die Außentemperatur liegt während den Messungen bei 1,5...9,5°C.

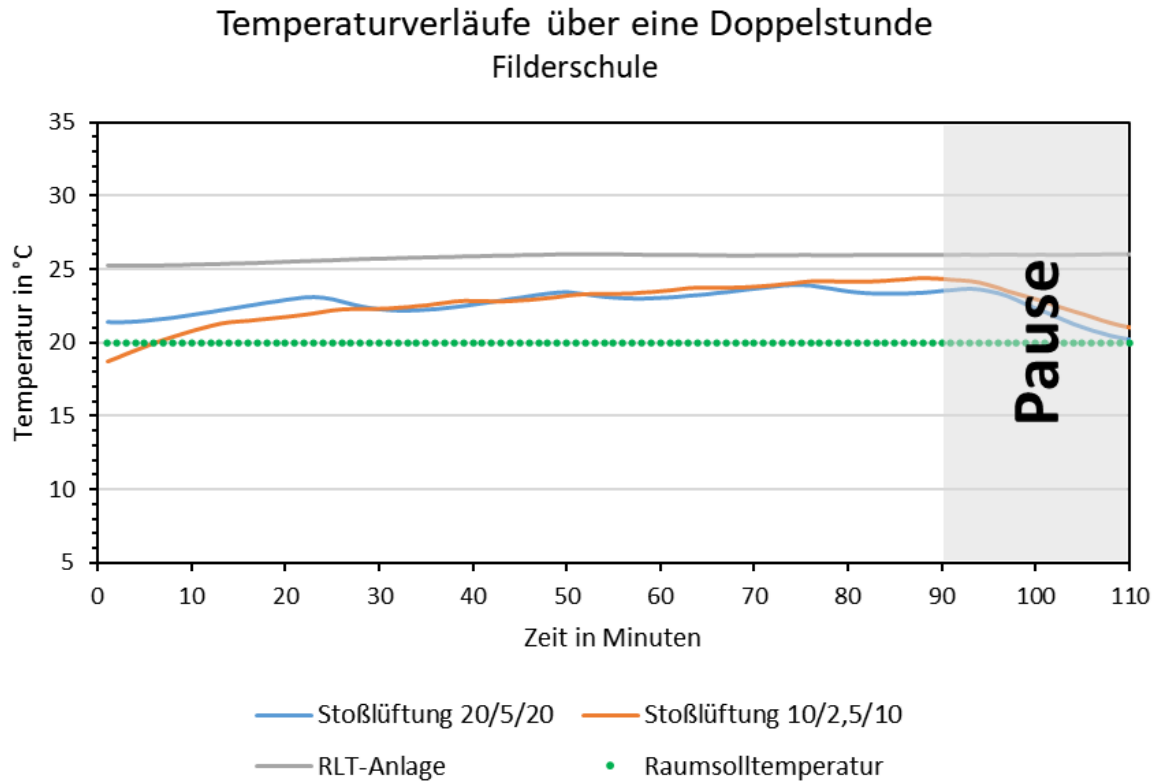


Bild 6-89: Temperaturverläufe über eine Doppelstunde, Filderschule

6.12.2 Infektionswahrscheinlichkeiten bei einzelnen Maßnahmen

Für die Berechnung des Mittelwertes der Fensteröffnungsfläche wird der Klausurraum im Zeppelin-Gymnasium nicht berücksichtigt.

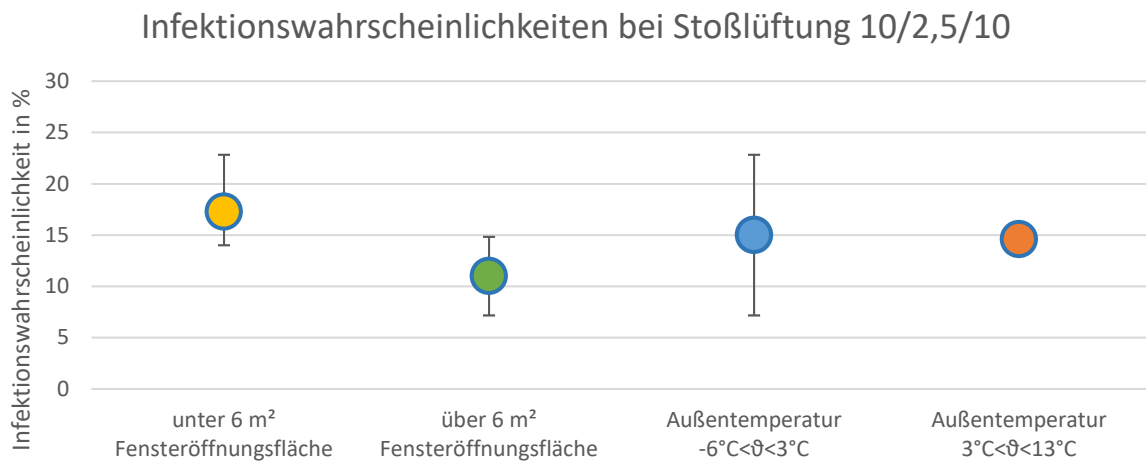


Bild 6-90: Infektionswahrscheinlichkeit bei Stoßlüftung 10/2,5/10 (V2) in Abhängigkeit der Fensteröffnungsfläche und der Außentemperatur

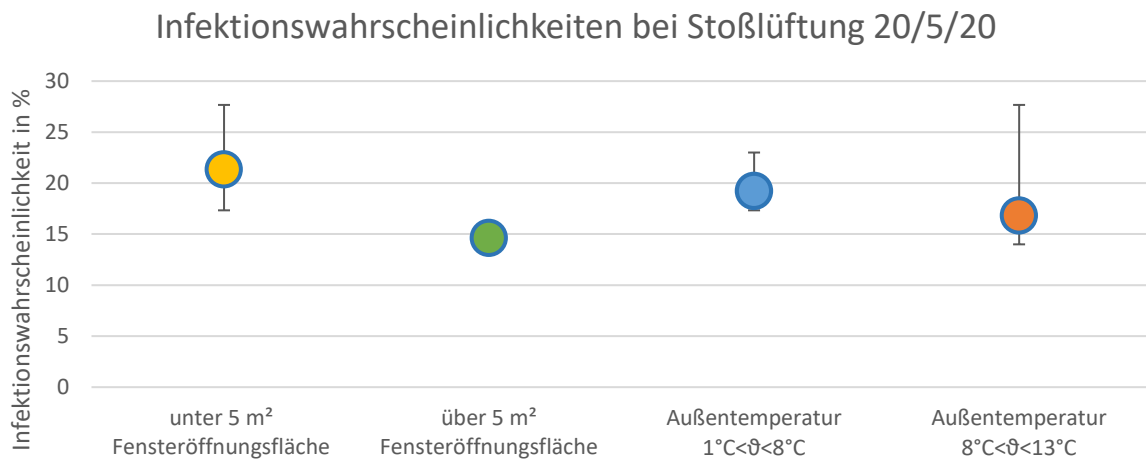
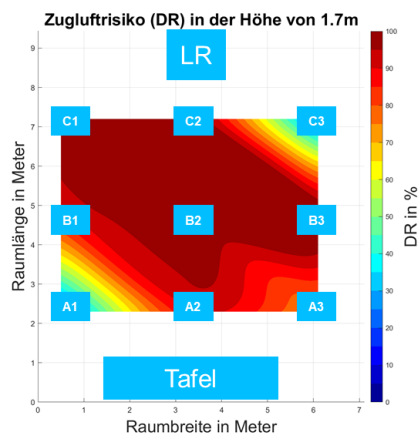
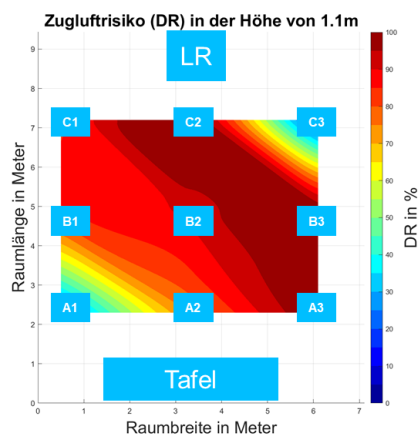
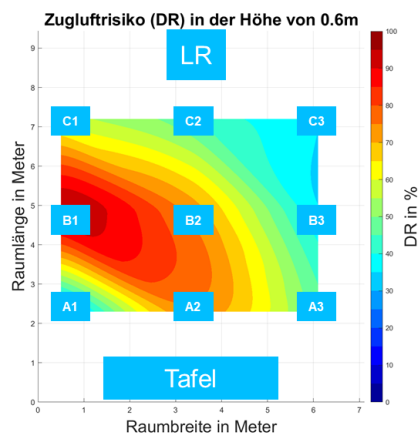
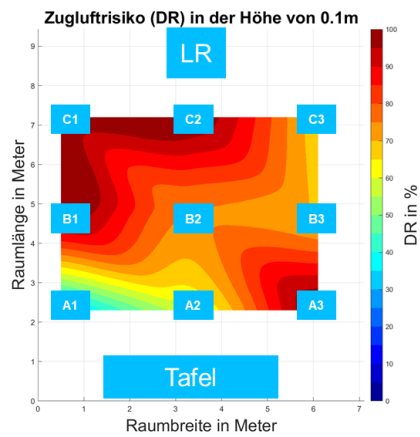


Bild 6-91: Infektionswahrscheinlichkeit bei Stoßlüftung 20/5/20 (V1) in Abhängigkeit der Fensteröffnungsfläche und der Außentemperatur

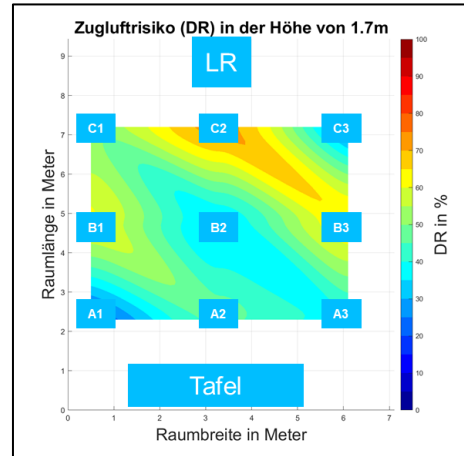
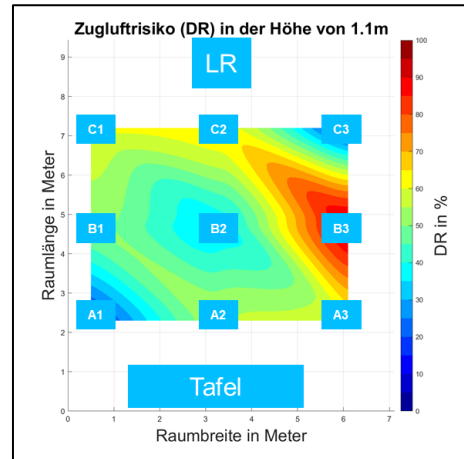
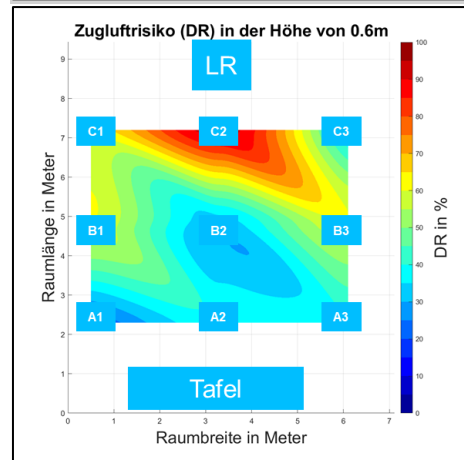
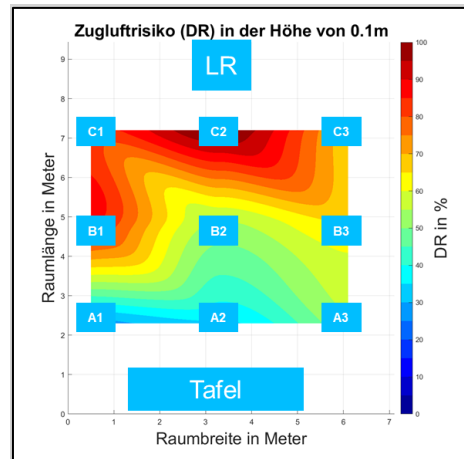
6.12.3

Zugluftrisiko individueller Klassenräume

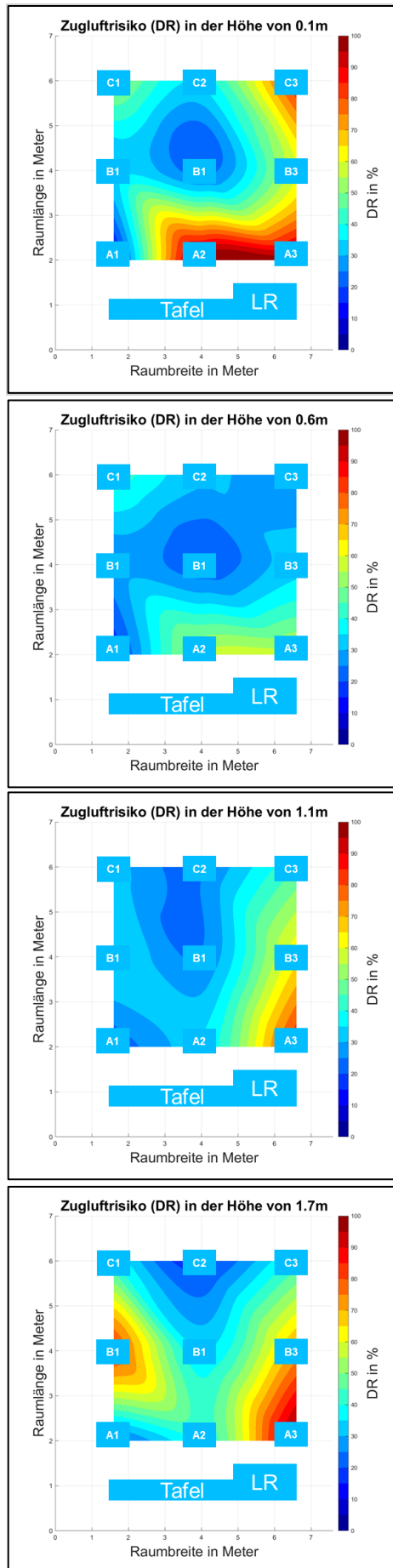
Wilhelmsschule Wangen: nsekundär = 5,2 1/h



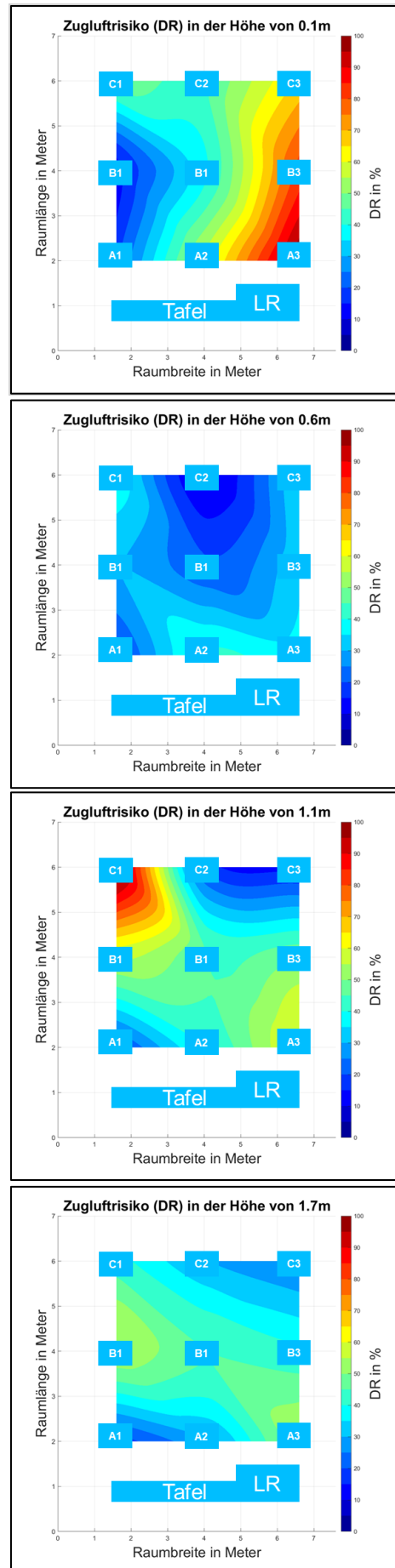
Wilhelmsschule Wangen: nsekundär = 3,0 1/h



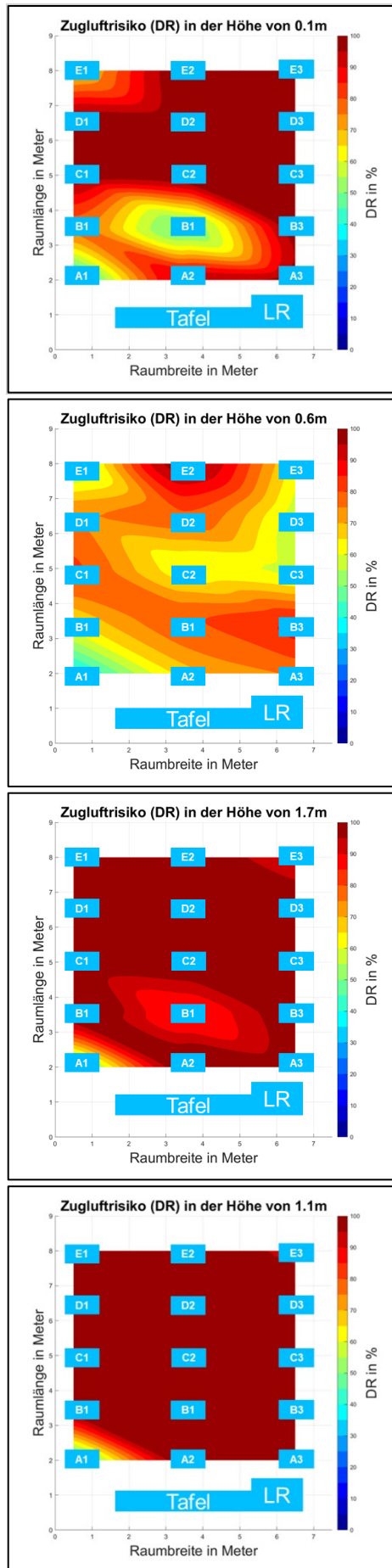
Steigschule Bau 1: $n_{\text{sekundär}} = 5,4 \text{ 1/h}$



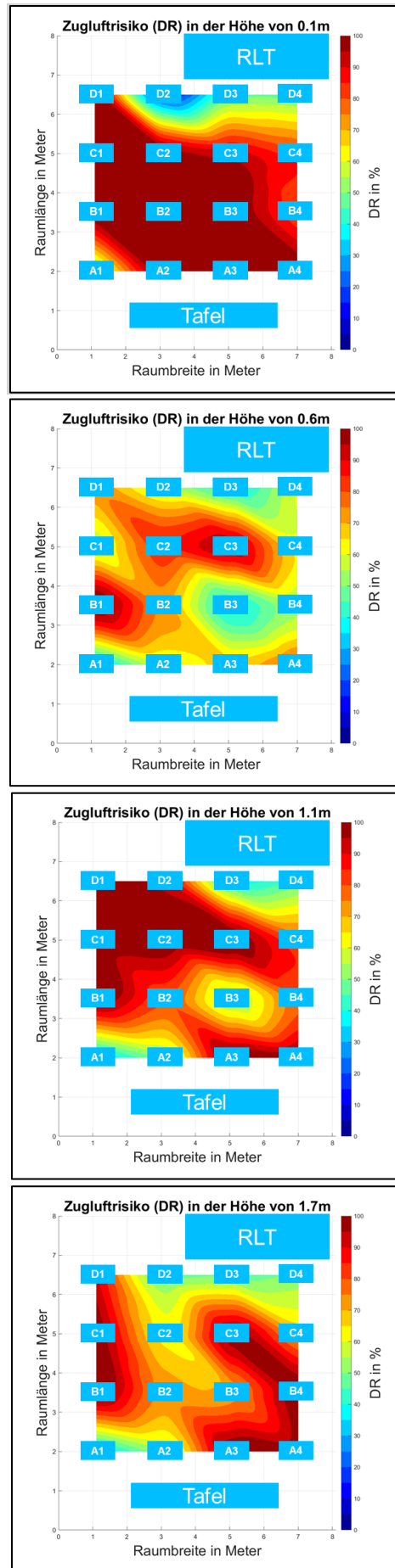
Steigschule Bau 1: $n_{\text{sekundär}} = 2,7 \text{ 1/h}$



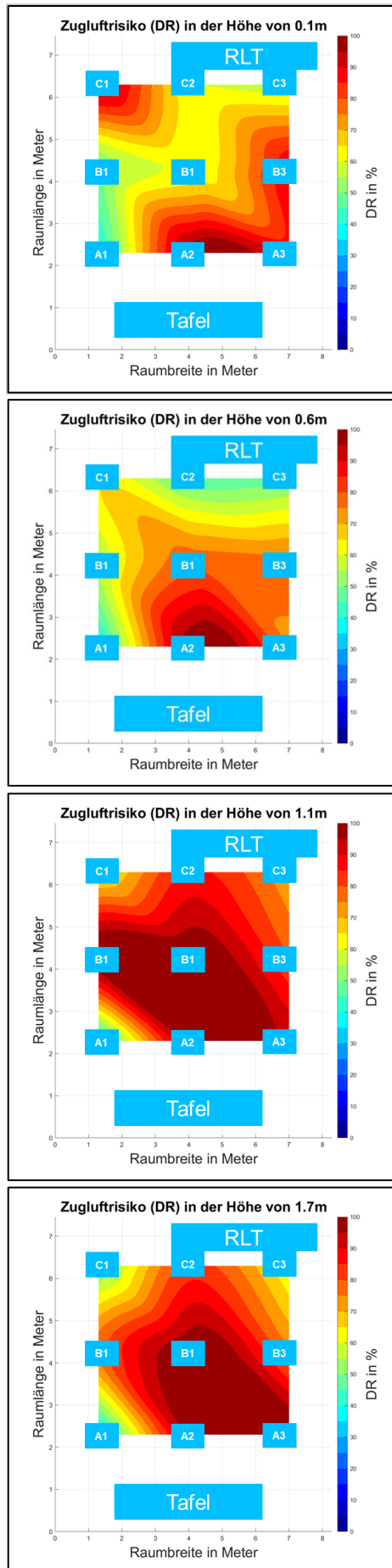
Uhlandschule Neubau: $n_{\text{sekundär}} = 5,2 \text{ 1/h}$



Solitude-Gymnasium: $n_{\text{primär}} = 3,1 \text{ 1/h}$



Filderschule: $n_{\text{primär}} = 4,9 \text{ 1/h}$



Filderschule: $n_{\text{primär}} = 3,3 \text{ 1/h}$

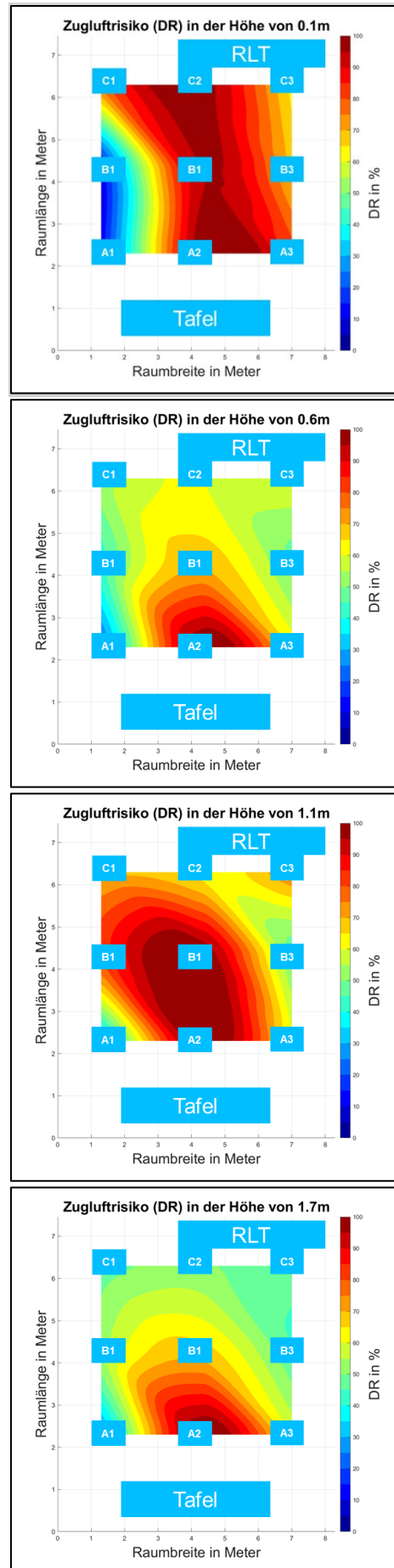


Bild 6-95: Zugluftrisiko (DR) Filderschule bei $n_{\text{primär}} = 4,9 \text{ 1/h}$ bzw. $3,3 \text{ 1/h}$

6.13 Übersicht der Fenstergeometrien

Tabelle 6-40: Übersicht der Kippfenster, aller Klassenräume

Standort	Typ	Anzahl	bFe	hFe	AFe	γ	s
	-	-	m	m	m ²	°	m
Schulen	Kippfenster						
Schwabschule	C	0	1,50	0,70	0,00	15	0,18
	D	0	0,71	0,70	0,00	15	0,18
Wilhelms-Gymnasium	C	4	0,68	0,89	1,25	13	0,20
	D	0	1,36	0,70	0,00	13	0,20
Zeppelin-Gymnasium Klausurraum	B	12	0,80	1,13	6,48	14,2	0,28
Zeppelin-Gymnasium Re- ferenzraum	B	6	0,80	1,13	3,24	14,2	0,28
Solitude-Gymnasium	C	1	2,38	0,40	0,33	26	0,12
	D	1	1,19	0,40	0,19	24,5	0,12
Wilhelmsschule Wangen	C	4	1,17	2,40	3,86	5	0,27
	D	0	0,60	0,66	0,00	15	0,17
Steigschule Bau 1	C	3	1,29	1,48	3,24	15	0,39
	D	2	1,56	1,48	2,37	15	0,39
	E	0	1,20	1,00	0,00	9,5	0,20
Steinbeisschule Hauptbau	B	3	0,75	0,68	0,51	12	0,12
Uhlandschule Neubau	B	6	3,00	0,50	2,31	17,4	0,11
Filderschule	-	-	-	-	-	-	-
Gewerbliche Schule für Farbe und Gestaltung	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 6-41: Übersicht der Drehfenster, aller Klassenräume

Standort	Typ	Anzahl	b _{Fe}	h _{Fe}	A _{Fe}	γ	s
	-	-	m	m	m ²	°	m
Schulen	Drehfenster						
Schwabschule	A	2	0,71	1,46	2,08	90	-
	B	0	1,50	1,46	0,00	90	-
Wilhelms-Gymnasium	A	4	0,68	1,45	3,93	90	-
	B	0	1,36	1,64	0,00	90	-
Zeppelin-Gymnasium Klausurraum	A	12	0,80	1,13	10,85	90	-
Zeppelin-Gymnasium Re- ferenzraum	A	6	0,80	1,13	5,42	90	-
Solitude-Gymnasium	A	3	0,75	1,24	2,79	90	-
	B	0	1,34	1,24	0,00	90	-
Wilhelmsschule Wangen	A	4	0,60	1,74	4,18	90	-
	B	0	1,17	2,40	0,00	90	-
Steigschule Bau 1	A	3	1,29	1,48	5,62	75	-
	B	2	1,56	1,48	4,53	75	-
Steinbeisschule Hauptbau	A	3	0,75	0,68	1,51	90	-
Uhlandschule Neubau	A	2	0,90	1,80	3,24	90	-
Filderschule	A	2	0,41	1,70	1,39	90	-
Gewerbliche Schule für Farbe und Gestaltung	A	2	1,50	1,20	3,60	90	-

6.14 Fragebögen



Universität Stuttgart

Institut für Gebäudeenergetik,
Thermotechnik und
Energiespeicherung

Lehrstuhl für Heiz und Raumluftechnik
Prof. Dr.-Ing. Konstantinos Stergiaropoulos



Kurzfragebogen – Luftreiniger (LehrerInnen)

Schule: _____

Datum: _____

Fragen zur Person:

Geschlecht: ☐ männlich ☐ weiblich ☐ divers

Alter: ☐ 21- 30 ☐ 31-40 ☐ 41-50 ☐ 51-60 ☐ >60

Anzahl der unterrichteten Schulstunden je Woche in diesem Raum: _____

Antwortmöglichkeiten:

1	2	3	4	5	6
Stimme voll zu	Stimme zu	Stimme eher zu	Stimme weniger zu	Stimme nicht zu	Stimme gar nicht zu

Das Geräusch des Luftreinigers an meinem Platz empfinde ich als zu laut.

☐	☐	☐	☐	☐	☐
1	2	3	4	5	6

Durch den Luftreiniger ist es an meinem Platz zugig/windig.

☐	☐	☐	☐	☐	☐
1	2	3	4	5	6

Der Betrieb des Luftreinigers beeinträchtigt mich bei der Durchführung meines Unterrichts.

☐	☐	☐	☐	☐	☐
1	2	3	4	5	6

Der Aufstellort des Luftreinigers beeinträchtigt den Unterrichtsbetrieb im Klassenraum.

☐	☐	☐	☐	☐	☐
1	2	3	4	5	6

Weitere Fragen:

Wird der Luftreiniger (aufgrund eventuellem Lärm oder Zugluft) zeitweise oder durchgehend ausgeschaltet? Falls ja, in welchem Zeitraum und auf welcher Stufe läuft der Luftreiniger?

Werden aus Ihrer Sicht die SchülerInnen bei Betrieb des Luftreinigers beeinträchtigt (evtl. zusätzliche Unruhe, Konzentrationsschwäche)?

Wie wird der Luftreiniger von der Klassengemeinschaft angenommen? Gibt es Versuche an den Knöpfen rumzudrehen, Vandalismus etc.?

Weitere Anmerkungen/Kritik:



Universität Stuttgart

Institut für Gebäudeenergetik,
Thermotechnik und
Energiespeicherung

Lehrstuhl für Heiz und Raumluftechnik
Prof. Dr.-Ing. Konstantinos Stergiaropoulos



Kurzfragebogen – Luftreiniger (SchülerInnen)

Schule: _____

Datum: _____

Einige Fragen zur Person:

Geschlecht: ☐ männlich ☐ weiblich ☐ divers

Alter: ☐ 6-11 ☐ 12-17 ☐ 18-30

Klassenstufe: _____

Anzahl an Schulstunden je Woche in diesem Raum: _____

Antwortmöglichkeiten:

1	2	3	4	5	6
Stimme voll zu	Stimme zu	Stimme eher zu	Stimme weniger zu	Stimme nicht zu	Stimme gar nicht zu

Das Geräusch des Luftreinigers an meinem Platz empfinde ich als zu laut.

☐	☐	☐	☐	☐	☐
1	2	3	4	5	6

Durch den Luftreiniger ist es an meinem Platz zugig/windig.

☐	☐	☐	☐	☐	☐
1	2	3	4	5	6

Durch den Luftreiniger kann ich mich während des Unterrichts nicht konzentrieren.

☐	☐	☐	☐	☐	☐
1	2	3	4	5	6

Ich kann die Lehrkraft und meine MitschülerInnen während des Unterrichts gut verstehen.

☐	☐	☐	☐	☐	☐
1	2	3	4	5	6

Anmerkungen/Kritik:

A large, empty rectangular box with a thin blue border, intended for handwritten or typed notes and criticism.

6.15 Ergebnisse der Umfragen

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Umfragen als Kreisdiagramme dargestellt.

6.15.1 Luftreinigungsgeräte Leistungsstufe 1

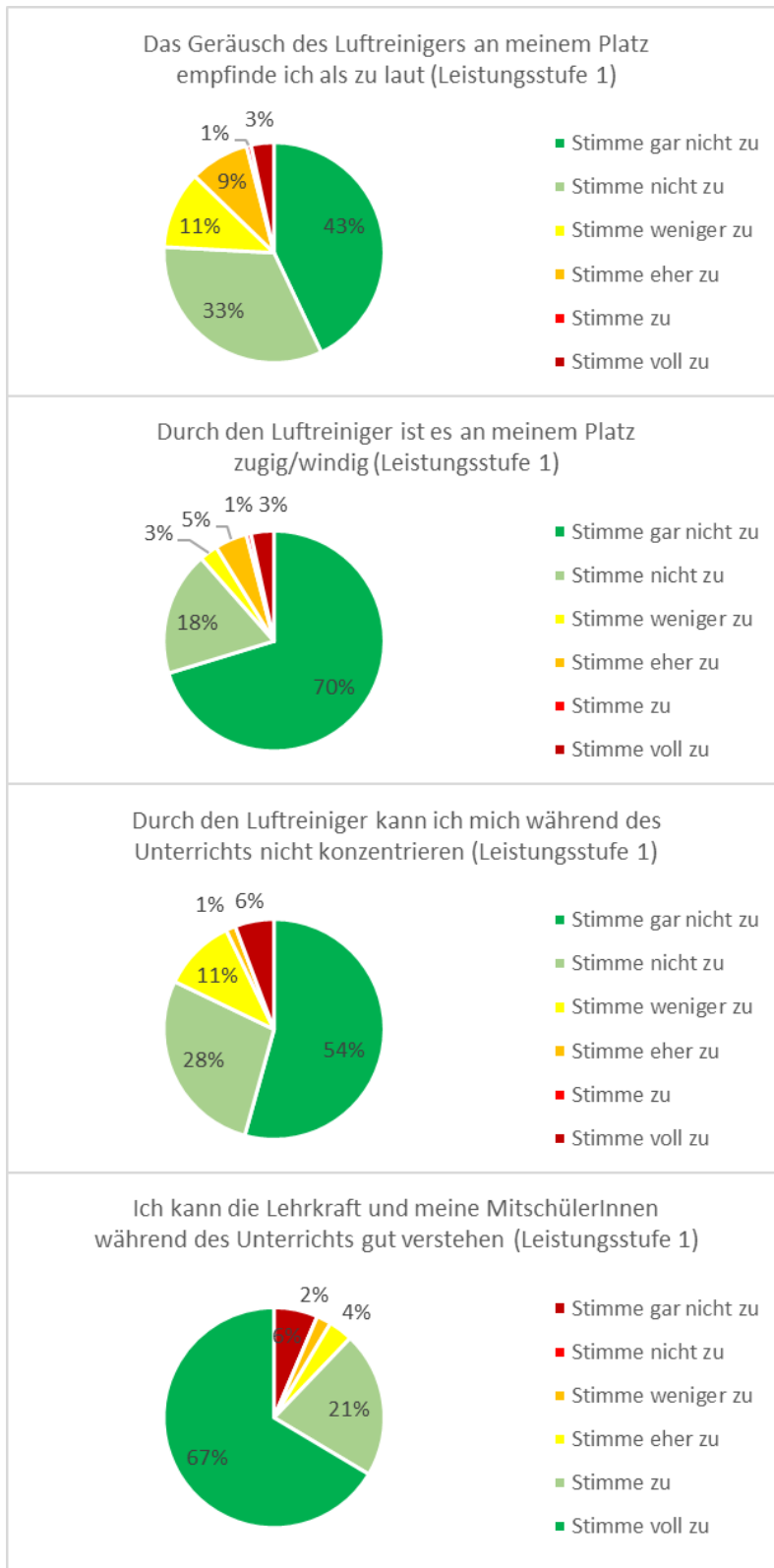


Bild 6-96: Umfrageergebnisse: Luftreinigungsgeräte, Leistungsstufe 1

6.15.2 Luftreinigungsgeräte Leistungsstufe 2

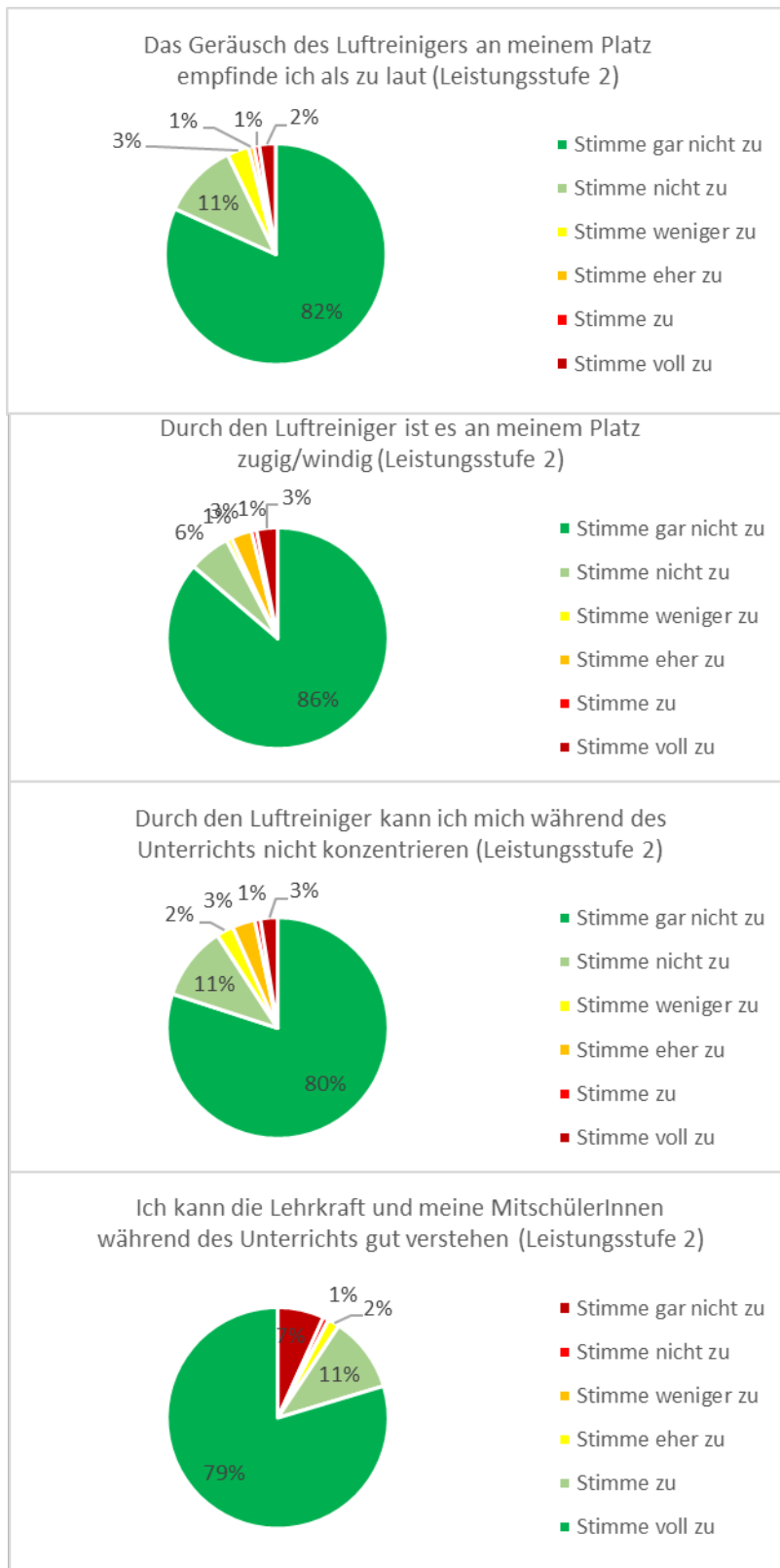


Bild 6-97: Umfrageergebnisse: Luftreinigungsgeräte, Leistungsstufe 2

6.15.3 RLT-Anlage Leistungsstufe 1

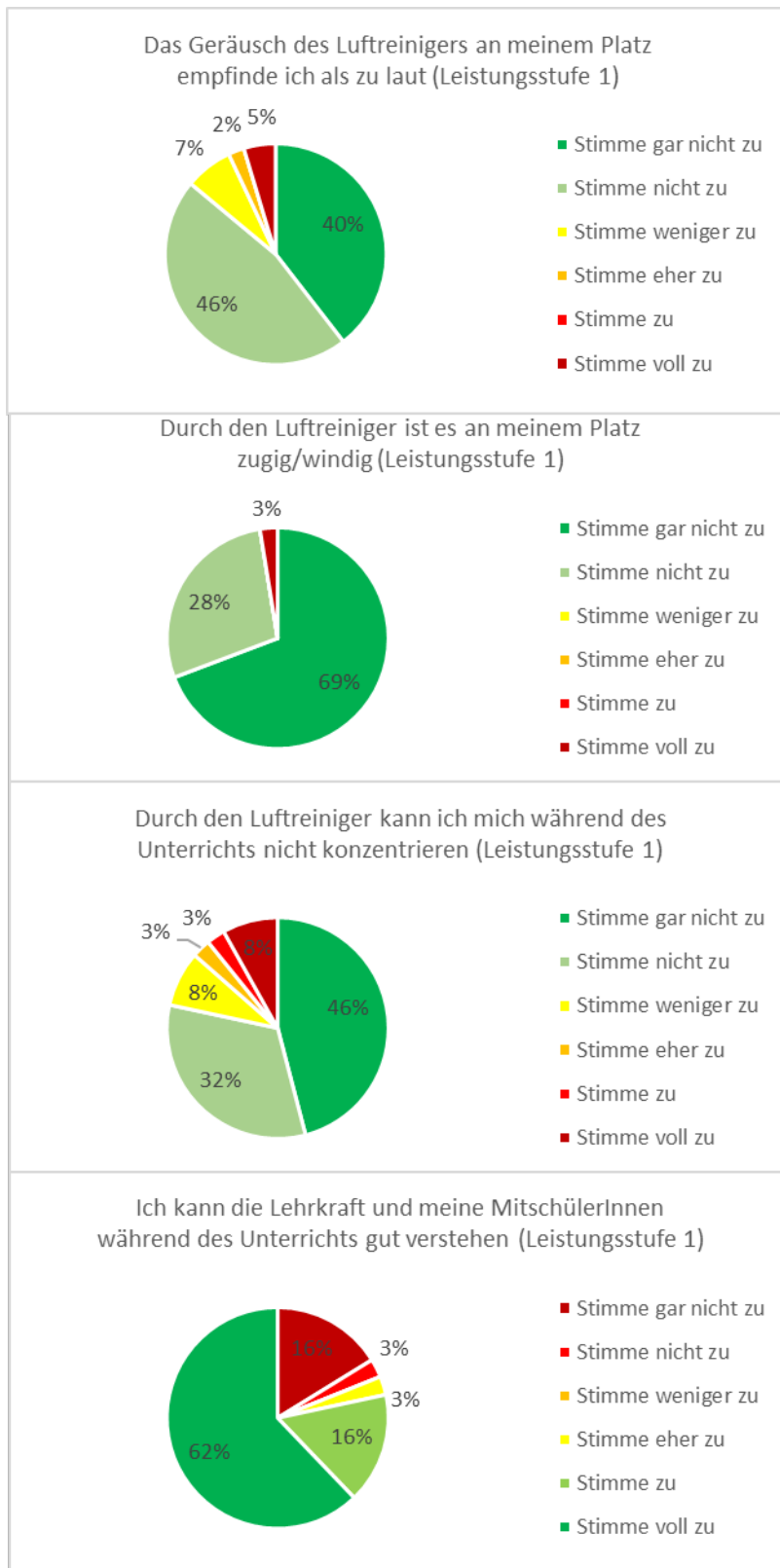


Bild 6-98: Umfrageergebnisse: RLT-Anlage, Leistungsstufe 1

6.15.4 RLT-Anlage Leistungsstufe 2

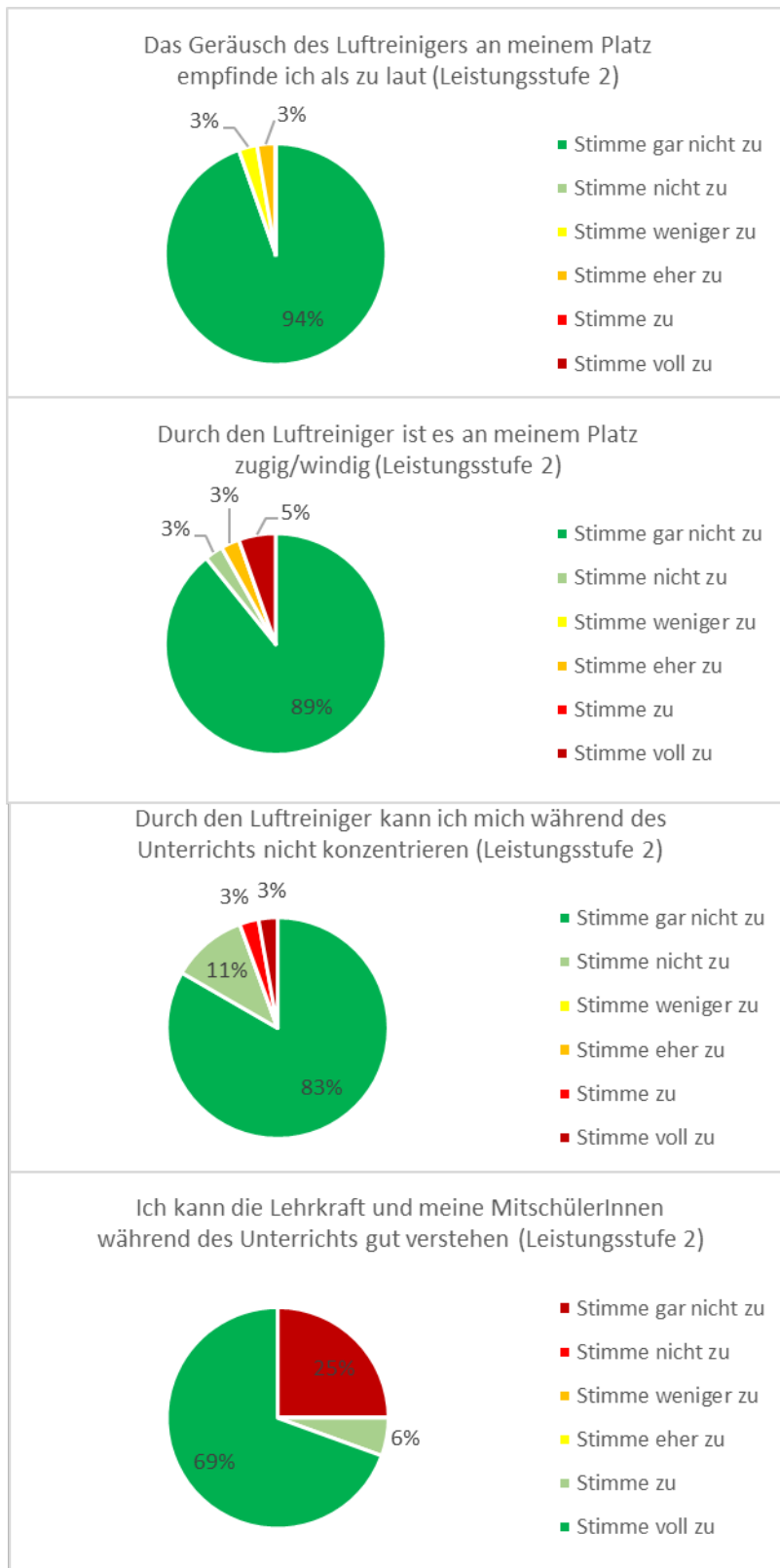


Bild 6-99: Umfrageergebnisse: RLT-Anlage, Leistungsstufe 2

7 Literatur

- [1] VDI 2081: *Geräuscherzeugung und Lärminderung*, VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG), Belrin, Mrz. 2019.
- [2] DIN EN 16798, Deutsches Institut für Normung e. V., Jul. 2015.
- [3] W. Wells, *Airborne Contagion and Air Hygiene: An Ecological Study of Droplet Infections* (Zugriff am: 19. April 2021).
- [4] E. C. Riley, G. Murphy und R. L. Riley, „Airborne spread of measles in a suburban elementary school“ (eng), *American journal of epidemiology*, Jg. 107, Nr. 5, S. 421–432, 1978, doi: 10.1093/oxfordjournals.aje.a112560.
- [5] M. Kriegel, U. Buchholz, P. Gastmeier, P. Bischoff, I. Abdelgawad und A. Hartmann, *Predicted Infection Risk for Aerosol Transmission of SARS-CoV-2*, 2020.
- [6] *Begriffe der Bau- und Gebäudetechnik*, VDI 4700 Blatt 1:2015-10, Verein Deutscher Ingenieure, Berlin, Okt. 2015.
- [7] K.-J. Albers, Hg., *Recknagel - Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 79. Ausgabe 2019/2020 - Basisversion: PDF-eBook auf CD-ROM*, 79. Aufl. Essen: Vulkan, 2018.
- [8] T. Schulze und U. Eicker, „Methodik zur vereinfachten Berechnung kontrollierter natürlicher Lüftung“, *Bauphysik*, Jg. 35, Nr. 2, S. 99–106, 2013, doi: 10.1002/bapi.201310059.
- [9] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Hg., *Handbook-Fundamentals, ASHRAE (Edition SI)*. Atlanta, 2009.
- [10] A. Bäuml, „Experimentelle Quantifizierung des thermisch induzierten Luftwechsels in Abhängigkeit von der Fensteröffnungsart sowie Beurteilung der Potenziale der Nachtlüftung“. Dissertation, Bauphysik, Universität Kassel, Kassel, 2016.
- [11] J. Pfafferott, *Passive Kühlung mit Nachtlüftung*. Karlsruhe, 2003.
- [12] A. Maas, „Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung“. Dissertation, Bauphysik, Universität Gesamthochschule Kassel, Kassel, 1995.
- [13] M. Hall, „Untersuchungen zum thermisch induzierten Luftwechsellpotential von Kippfenstern“. Dissertation, Bauphysik, Universität Kassel, Kassel, 2004.
- [14] *Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik*, 15251, Berlin, 2007.
- [15] WOLF GmbH, „Betriebsanleitung: LUFTREINIGER - AIRPURIFIER AP“.
- [16] Umweltbundesamt, „Einsatz mobiler Luftreiniger als Lüftungsunterstützende Maßnahme in Schulen während der SARS-CoV-2 Pandemie: Stellungnahme der Kommission Innenraumlufthygiene (IRK) am Umweltbundesamt“.

- [17] *Messung und Beurteilung von personenbezogenen Expositionen gegenüber in-kohärenter optischer Strahlung - Teil 1: Von künstlichen Quellen am Arbeitsplatz emittierte ultraviolette Strahlung*, 14255, Berlin.
- [18] M. Abuhegazy, K. Talaat, O. Anderoglu und S. V. Poroseva, „Numerical investigation of aerosol transport in a classroom with relevance to COVID-19“ (eng), *Physics of fluids (Woodbury, N.Y. : 1994)*, Jg. 32, Nr. 10, S. 103311, 2020, doi: 10.1063/5.0029118.
- [19] *Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik - Teil 1: Technische Bestimmungen, Anforderungen und Effizienzklassifizierungssystem, basierend auf dem Feinstaubabscheidegrad (ePM)*, 16890, Berlin.
- [20] *Reinräume und zugehörige Reinraumbereiche: Teil_1: Klassifizierung der Luftreinheit anhand der Partikelkonzentration (ISO_14644-1:2015)*, 14644, Berlin, 2016.
- [21] *DIN EN 1822-1: Schwebstofffilter (EPA, HEPA und ULPA) - Teil 1: Klassifikation, Leistungsprüfung, Kennzeichnung*, Deutsches Institut für Normung e. V.
- [22] *VDI 2067 Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen: Energieaufwand der Nutzenübergabe*, VDI 2067, Verein Deutscher Ingenieure, 2002.
- [23] D. Müller et al., „Abschätzung des Infektionsrisikos durch aerosolgebundene Viren in belüfteten Räumen“, 2020.
- [24] S. Asadi, C. D. Cappa, S. Barreda, A. S. Wexler, N. M. Bouvier und W. D. Ristenpart, „Efficacy of masks and face coverings in controlling outward aerosol particle emission from expiratory activities“ (eng), *Scientific reports*, Jg. 10, Nr. 1, S. 15665, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-72798-7.
- [25] W. C. Hill, M. S. Hull und R. I. MacCuspie, „Testing of Commercial Masks and Respirators and Cotton Mask Insert Materials using SARS-CoV-2 Virion-Sized Particulates: Comparison of Ideal Aerosol Filtration Efficiency versus Fitted Filtration Efficiency“ (eng), *Nano letters*, Jg. 20, Nr. 10, S. 7642–7647, 2020, doi: 10.1021/acs.nanolett.0c03182.
- [26] N. Nadler, „Auslegungskriterien für Heiz- und Kühllastberechnungen“, 2010.
- [27] *ASR A3.5 Raumtemperatur*, Ausschuss für Arbeitsstätten, Jun. 2010.
- [28] *DIN EN ISO 7730 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)*, DIN EN ISO 7730, Normenausschuss Ergonomie (NAErg) im DIN.
- [29] *SIA 382/1: Lüftungs- und Klimaanlageanlagen - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen*, 2014.

- [30] Expertenkreis Aerosole, „Stellungnahme: Aerosole & SARS CoV2 – Entstehung, Infektiosität, Ausbreitung & Minderung luftgetragener, virenhaltiger Teilchen in der Atemluft“, Dez. 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://mwk.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mwk/intern/dateien/Anlagen_PM/20201204_Stellungnahme_Aerosole_SARS_CoV2.pdf.
- [31] *DIN EN ISO 9612: Akustik - Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz - Verfahren der Genauigkeitsklasse 2*, Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Sep. 2009.
- [32] *DIN 18041: Hörsamkeit in Räumen - Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung*, Deutsches Institut für Normung e. V., Mrz. 2016.
- [33] A. Hartmann, J. Lange, H. Rotheudt und M. Kriegel, „Emissionsrate und Partikelgröße von Bioaerosolen beim Atmen, Sprechen und Husten“ (de), doi: 10.14279/DEPOSITONCE-10332.
- [34] N. von Hahn, „Lufttechnik in Industriehallen: Zusammenfassung der Vorträge anlässlich des BGIA-Seminars G 3 Technische Schutzmaßnahmen am 16./17. September 2003 in Dresden“ (ger), Jg. 2005,5, 2005.
- [35] Z. Ai, C. M. Mak, N. Gao und J. Niu, „Tracer gas is a suitable surrogate of exhaled droplet nuclei for studying airborne transmission in the built environment“ (eng), *Building simulation*, S. 1–8, 2020, doi: 10.1007/s12273-020-0614-5.
- [36] Palas GmbH, *Produktdaten DEHS*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.palas.de/product/dehs> (Zugriff am: 17. Februar 2021).
- [37] E. Fiedler, „Natürliche Lüftung großer Gebäude: Die Auslegung unter Berücksichtigung von Wettereinflüssen“, *TAB*, 7-8, S. 42–48, 2010.
- [38] G. Buonanno, L. Morawska und L. Stabile, „Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: Prospective and retrospective applications“ (eng), *Environment international*, Jg. 145, S. 106112, 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.106112.
- [39] *DIN EN ISO 3382: Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik*, Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Sep. 2008.
- [40] Klarluft GmbH & Co. KG, „Produktdatenblatt“.
- [41] Deutscher Wetterdienst, „Handbuch - Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse“, Offenbach, 2017.
- [42] Mann+Hummer GmbH, „Produktdatenblatt OurAir TK 850“.
- [43] Mann+Hummer GmbH, „Produktdatenblatt OurAir SQ2500“.
- [44] TROX GmbH, „Produktdatenblatt TAP“.
- [45] WOLF GmbH, „Produktdatenblatt Wolf Air Purifier“.

[46] Airflow Lufttechnik GmbH, „Produktdatenblatt DUPLEX Vent S 1000“.