

Möglichkeiten und Potenzial der Schullüftung mit automatisierter und manueller Fensterlüftung mit dem Fokus auf die Minimierung der SARS-CoV-2-Belastung

Stellungnahme



Bildquelle: D+H Mechatronic AG

Stellungnahme

Möglichkeiten und Potenzial der Schullüftung mit automatisierter und manueller Fensterlüftung mit dem Fokus auf die Minimierung der SARS-CoV-2-Belastung

Datum

17. Dezember 2020

Auftraggeber



Verband Fensterautomation und Entrauchung e.V.
Walter-Kolb-Straße 1-7
60594 Frankfurt am Main

Auftragnehmer



Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden
Forschung und Anwendung GmbH
Tiergartenstraße 54
01219 Dresden

Prof. Dr.-Ing. Thomas Hartmann
Dipl.-Ing. Christine Knaus

Ansprechpartner

Prof. Dr.-Ing. Thomas Hartmann
hartmann@itg-dresden.de
0351 / 469 254 73
0176 / 208 198 93

Inhaltsverzeichnis

1	Übersicht über Übertragungswege und Zusammenhang mit Lüftung.....	2
1.1	Allgemeines	2
1.2	Übertragungsweg Kontakt / Kontaktflächen (Kontaktinfektion).....	3
1.3	Übertragungsweg Tröpfchen (Tröpfcheninfektion)	3
1.4	Übertragungsweg Aerosole (Tröpfcheninfektion)	3
1.5	Kohlendioxid (CO ₂) als Ersatzindikator	3
2	Möglichkeiten der Raumlüftung	6
2.1	Lüftungssysteme.....	6
2.2	Freie Lüftung	6
2.3	Mechanische Lüftung.....	8
2.4	Hybridlüftung	9
3	Außenluft vs. Umluft.....	10
4	Potenzial der natürlichen Fensterlüftung.....	12
4.1	Allgemeines	12
4.2	Untersuchungsgegenstand	12
4.3	Berechnungsgrundlage.....	15
4.4	Berechnungsergebnisse	16
5	Fazit und Empfehlung	23
6	Literaturverzeichnis.....	25

1 Übersicht über Übertragungswege und Zusammenhang mit Lüftung

1.1 Allgemeines

Das Robert-Koch-Institut (RKI) gibt zum Coronavirus-Erreger folgende Informationen: „SARS-CoV-2 (severe acute respiratory syndrome coronavirus type 2 [- deutsch: schweres akutes respiratorisches Syndrom“-Coronavirus-2¹]) ist ein neues Beta-Coronavirus, das Anfang 2020 als Auslöser von COVID-19 identifiziert wurde. Zu den Beta-Coronaviren gehören u.a. auch SARS-CoV und MERS-CoV. Coronaviren sind unter Säugetieren und Vögeln weit verbreitet. Sie verursachen beim Menschen vorwiegend milde Erkältungskrankheiten, können aber mitunter schwere Lungenentzündungen hervorrufen.“²

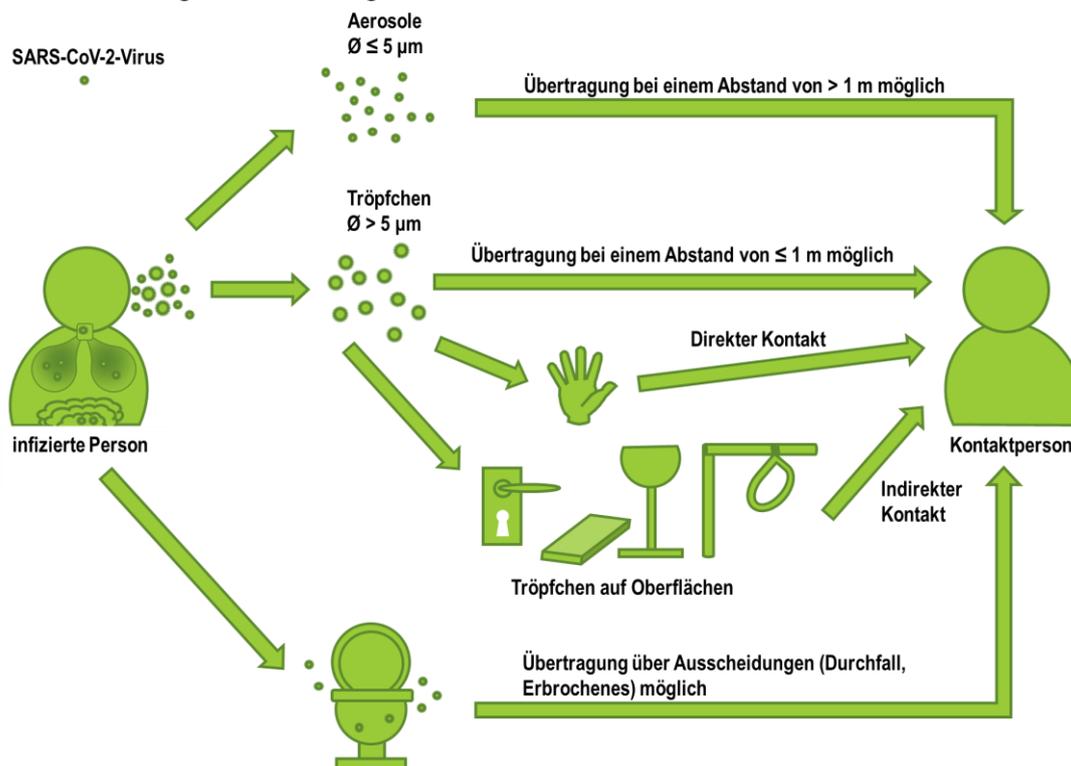


Abbildung 1: Schematische Übersicht der Übertragungswege von SARS-CoV-2-Viren gemäß Beschreibungen in Trends in Immunology³, WHO⁴, RKI⁵

¹ Sebastian Thaler, et al.: *Bedeutung der Hornhautorgankultur bei Spendern mit möglicher SARS-CoV-2-Infektion*. In: *Der Ophthalmologe*. 2020, <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00347-020-01152-z>

² Robert Koch-Institut: *Epidemiologischer Steckbrief zu SARS-CoV-2 und COVID-19*, Stand 13.11.2020, https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Steckbrief.html;jsessionid=5CF8BCE1966010CC1B50C9D2A655B172.internet052#doc13776792bodyText19

³ Trends in Immunology, Andrew G. Harrison, Tao Lin, Penghua Wang. *Mechanisms of SARS-CoV-2 Transmissions and Pathogenesis*. 14.10.2020, [https://www.cell.com/trends/immunology/fulltext/S1471-4906\(20\)30233-7?returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS1471490620302337%3Fshowall%3Dtrue](https://www.cell.com/trends/immunology/fulltext/S1471-4906(20)30233-7?returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS1471490620302337%3Fshowall%3Dtrue)

⁴ World Health Organization (WHO), *Coronavirus disease (COVID-19): How is it transmitted?*, Stand 09.07.2020. <https://www.who.int/news-room/q-a-detail/q-a-how-is-covid-19-transmitted>
World Health Organization (WHO), *Transmission of SARS-CoV-2: implications for infection prevention precautions*, Stand 09.07.2020. <https://www.who.int/news-room/commentaries/detail/transmission-of-sars-cov-2-implications-for-infection-prevention-precautions>

⁵ Robert Koch-Institut: *Epidemiologischer Steckbrief zu SARS-CoV-2 und COVID-19*, Stand 13.11.2020, https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Steckbrief.html;jsessionid=5CF8BCE1966010CC1B50C9D2A655B172.internet052#doc13776792bodyText19

Grundsätzlich ist eine Übertragung von SARS-CoV-2-Viren auf drei Wegen möglich. Diese werden im Folgenden näher beschrieben. Die SARS-CoV-2-Viren werden bei allen drei Übertragungswegen beim Atmen, Niesen, Husten, Sprechen oder Singen über winzige Speichel-Tröpfchen an die Luft abgegeben und verweilen je nach Partikelgröße bzw. den physikalischen Eigenschaften eine Zeitlang in der Raumluft.

Abbildung 1 zeigt schematisch die Übertragungswege von SARS-CoV-2-Viren. Auf eine nähere Beschreibung des ebenfalls möglichen fäkal-oralen Übertragungsweges wird in den folgenden Abschnitten verzichtet.

1.2 Übertragungsweg Kontakt / Kontaktflächen (Kontaktinfektion)

Über direkten Kontakt (z.B. Händeschütteln mit einer SARS-CoV-2-infizierten Person, deren Handflächen SARS-CoV-2-Viren aufweisen) bzw. indirekten Kontakt (kontaminierte Oberflächen) können SARS-CoV-2-Viren übertragen werden.

Dieser Übertragungsweg kann durch regelmäßiges hygienegerechtes Händewaschen, desinfizieren der Hände und Oberflächen unterbunden werden.

1.3 Übertragungsweg Tröpfchen (Tröpfcheninfektion)

Die Übertragung von SARS-CoV-2-Viren durch Tröpfcheninfektion ist ebenfalls möglich. Als Tröpfchen werden dabei Teilchen mit einem Durchmesser von mehr als 5 µm bezeichnet. Tröpfchen sinken im Gegensatz zu Aerosolen i.d.R. durch ihre Größe und damit verbunden ihr Gewicht schnell zu Boden

Eine Tröpfcheninfektion mit SARS-CoV-2-Viren lässt sich gut durch Abstand halten (mind. 1,5 m) und einer Mund-Nasen-Bedeckung vermeiden.

1.4 Übertragungsweg Aerosole (Tröpfcheninfektion)

Ein weiterer Übertragungsweg von SARS-CoV-2-Viren erfolgt über Aerosole. Aerosole sind im Vergleich zu Tröpfchen Teilchen mit einem Durchmesser von weniger als 5 µm. Anders als Tröpfchen können Aerosole länger durch ihr deutlich geringeres Gewicht in der Luft schweben und sich damit gut in geschlossenen, nicht durchlüfteten Räumen verteilen.

Eine Ansteckung durch Aerosole, die mit SARS-CoV-2-Viren kontaminiert sind, lässt sich durch die Minimierung dieser in der Raumluft vermeiden. Dafür kommt die Verdünnung durch Lüftung oder die Filterung in Betracht.

1.5 Kohlendioxid (CO₂) als Ersatzindikator

Momentan wird weltweit an Möglichkeiten geforscht, um die SARS-CoV-2-Viren in der Raumluft zu detektieren⁶. Da diese Forschungsansätze teilweise noch am Anfang stehen und noch

⁶ u. a. Forschungsprojekte wie TU Dresden. *Entwicklung einer elektronischen Biosensorplattform zur schnellen und zuverlässigen Detektion von Coronaviren*. 2020 – 2022. <https://www.medienservice.sachsen.de/mediendienst/news/239270>
Leibniz-Institut für Analytische Wissenschaften und TU Dortmund. *PAMONO Virensensor*. 04.05.2020. https://www.isas.de/files/redaktion/presse/pm/PM%202020/PM_PAMONO%20Virensensor_20200504.pdf
Guangyu Qiu, Zhibo Gai, Yile Tao, Jean Schmitt, Gerd A. Kullak-Ublick, and Jing Wang. *Dual-Functional Plasmonic Photothermal Biosensors for Highly Accurate Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 Detection*. 13.04.2020. <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acsnano.0c02439>

keine Messmethode vorhanden ist, wird häufig Kohlendioxid als Ersatzindikator genannt. Kohlendioxid ist dabei gut geeignet, die Personenanwesenheit und die Personenanzahl zu detektieren, ohne jedoch die Anzahl der an Covid-19-erkrankten Personen erfassen zu können. Allerdings steigt mit der Anzahl an Personen in einem Raum das Risiko, dass sich darunter auch erkrankte Personen befinden. Mit zunehmender CO₂-Konzentration in der Raumluft kann damit auch die potenzielle Belastung mit SARS-CoV-2-Viren ansteigen. Gesunde Menschen könnten dann diese virenbelasteten Aerosole einatmen und ebenfalls erkranken. Die ansteigende CO₂-Konzentration kann daher als indirekte Messung für eine mögliche Exposition mit bspw. SARS-CoV-2-Viren verstanden werden.⁷ CO₂-Sensoren können somit helfen die Innenraumluftqualität bezüglich CO₂ abzuschätzen und durch gezieltes Lüften Ansteckungen mit SARS-CoV-2-Viren zu vermeiden.

Bereits 1858 veröffentlichte Max von Pettenkofer seine Forschungsergebnisse in „Über den Luftwechsel in Wohngebäuden“. Aus seinen Forschungsergebnissen leitete er im Wesentlichen die Erkenntnis ab, dass Kohlendioxid (CO₂) als Luftqualitätsindikator (bzw. als Ersatzindikator für die Personenanwesenheit) gut geeignet ist.

„Die wesentlichen Ausscheidungsstoffe unserer Lungen und unserer Haut, soweit sie in die Luft übergehen, sind Kohlensäure und Wasser. [...] Der Kohlensäuregehalt allein macht die Luftverderbnis nicht aus, wir benützen ihn bloß als Maßstab, wonach wir auch noch auf den größeren oder geringeren Gehalt an andern Stoffen schließen, welche zur Menge der ausgeschiedenen Kohlensäure sich proportional verhalten.“⁸



Abbildung 2: Denkmal für Max von Pettenkofer (Maximiliansplatz in München)

Pettenkofer legte zudem für Aufenthaltsräume eine zulässige CO₂-Konzentration von 1 ‰ = 1000 ppm fest. Dieser Leitwert wird auch vom Umweltbundesamt bzw. in der Arbeitsstättenrichtlinie 3.6 aufgegriffen, siehe Tabelle 1.

⁷ Rudnick SN, Milton DK. *Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration*. 2003. *Indoor Air* 13:327-245

⁸ Max von Pettenkofer: *Über den Luftwechsel in Wohngebäuden*. 1858, https://reader.digitale-sammlungen.de/de/fs1/object/display/bsb10767804_00001.htm

Tabelle 1: Hygienische Bewertung der CO₂-Konzentration in der Raumluft

CO ₂ -Konzentration (ppm)	Umweltbundesamt ⁹		ASR A3.6 „Lüftung“ ¹⁰
	Hygienische Bewertung	Empfehlungen	Maßnahmen
< 1000	Hygienisch unbedenklich	- Keine weiteren Maßnahmen	- Keine weiteren Maßnahmen (sofern durch die Raumnutzung kein Konzentrationsanstieg über 1000 ppm zu erwarten ist)
1000 – 2000	Hygienisch auffällig	- Lüftungsmaßnahme (Außenluftvolumenstrom bzw. Luftwechsel erhöhen) - Lüftungsverhalten überprüfen und verbessern	- Lüftungsverhalten überprüfen und verbessern - Lüftungsplan aufstellen (z.B. Verantwortlichkeiten festlegen) - Lüftungsmaßnahme (z.B. Außenluftvolumenstrom oder Luftwechsel erhöhen)
> 2000	Hygienisch inakzeptabel	- Belüftbarkeit des Raums prüfen ggf. weitergehende Maßnahmen prüfen	- Weitergehende Maßnahmen erforderlich (z.B. verstärkte Lüftung, Reduzierung der Personenzahl im Raum)

⁹ Bekanntmachung des Umweltbundesamtes, Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz 11 – 2008. *Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft – Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumluftthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden.* https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/kohlendioxiid_2008.pdf

¹⁰ Technische Regeln für Arbeitsstätten ASR A3.6 „Lüftung“, Ausgabe: Januar 2012, https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/ASR/pdf/ASR-A3-6.pdf?__blob=publicationFile

2 Möglichkeiten der Raumlüftung

2.1 Lüftungssysteme

Lüftungssysteme werden grundsätzlich in Prozesslufttechnik und Raumlüftungstechnik unterschieden. Luft, die für die Durchführung von technischen Prozessen benötigt wird (wie z.B. für Trocknungsprozesse), wird in der Prozesslufttechnik beschrieben. Im Gegensatz dazu beschreibt die Raumlüftungstechnik die Lüftungssysteme, die zum Lüften/Klimatisieren von Räumen eingesetzt werden. Die Raumlüftungstechnik lässt sich weiter einteilen in Raumlüftungstechnische Anlagen, freie Lüftungssysteme und deren Kombination „Hybride Lüftungssysteme“.

Abbildung 3 zeigt übersichtlich die generelle Einteilung der Lufttechnik. In Abbildung 3 sind des Weiteren die Systeme gekennzeichnet, die in dieser Stellungnahme näher betrachtet werden.

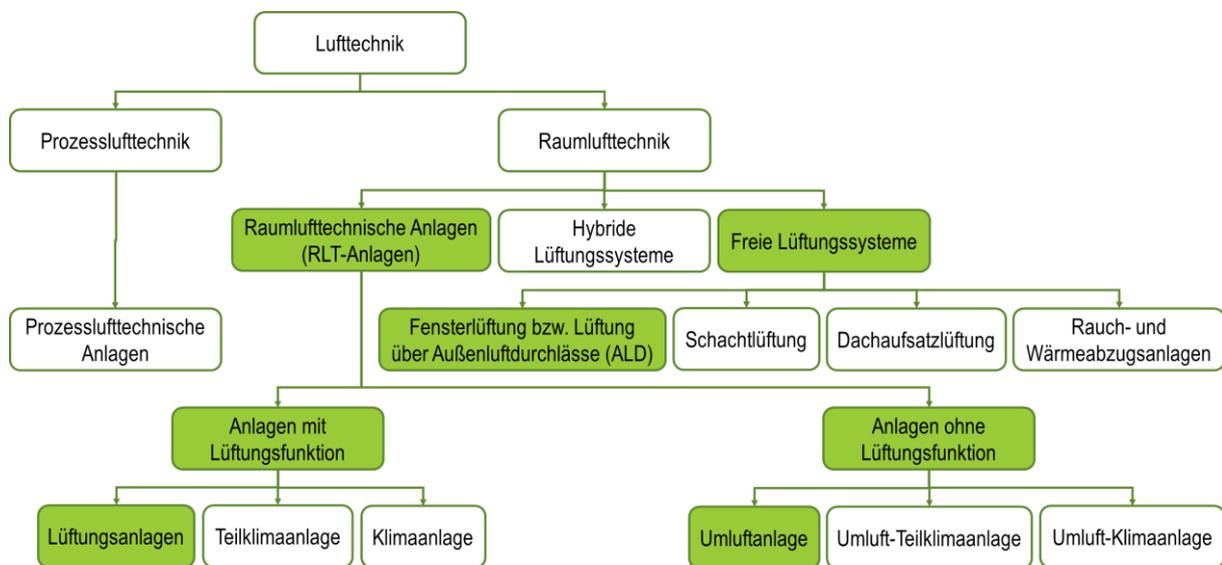


Abbildung 3: Einteilung der Lufttechnik nach Recknagel¹¹ - mit Kennzeichnung der näher betrachteten Systeme

2.2 Freie Lüftung

Der Luftaustausch durch Öffnungen im Gebäude wird als freie Lüftung bezeichnet. Diese Öffnungen im Gebäude können:

- Undichtigkeiten in der Gebäudehülle (Fugen),
- Manuell oder automatisiert geöffnete Fenster,
- Lüftungsöffnungen wie Außenbauteil- Luftdurchlässe (ALD),
- Lüftungsschächte,
- Dachaufsätze oder
- Rauch- und Wärmeabzugsanlagen

sein. Abbildung 4 zeigt zusammenfassend die Einteilung der freien Lüftungssysteme.

¹¹ RECKNAGEL: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte. Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Albers Hochschule Esslingen. 79. Auflage, ITM InnoTech Medien GmbH, 2018

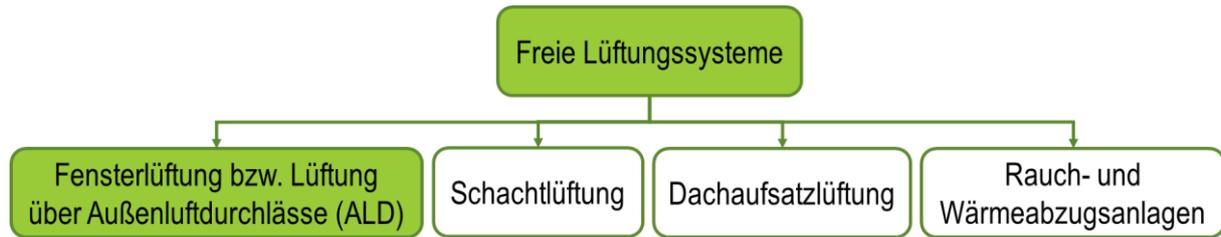


Abbildung 4: Einteilung der freien Lüftungssysteme - mit Kennzeichnung der näher betrachteten Systeme

Die antreibenden Kräfte der freien Lüftung basieren ausschließlich auf natürliche Druckdifferenzen, die hervorgerufen werden durch Dichteunterschiede infolge von Temperaturdifferenzen (z.B. zwischen innen und außen) und/oder windbedingt (Winddruck unter Beachtung von Windströmung und Anströmung (Anströmseite mit Überdruck – Luv, Abströmseite mit Unterdruck - Lee) sind.

Die einfachste, bekannteste und von Allen genutzte Form der freien Lüftung ist die Fensterlüftung. Diese kann manuell durch den Nutzer oder bei mit elektrischen Stellantrieben ausgestatteten Fenstern automatisiert erfolgen. Die Wirksamkeit der Fensterlüftung und damit der erreichbare Luftaustausch ist von mehreren Faktoren abhängig, insbesondere von:

- Temperaturdifferenz Raumluft – Außenluft,
- Windverhältnisse (Windgeschwindigkeit und Windrichtung),
- Fensterform (z.B. Drehflügel Fenster, Schwingfenster, Klappfenster, ...),
- Effektive freie Öffnungsfläche der Fenster,
- Räumliche Anordnung der Fenster (z.B. Höhendifferenz zwischen zwei Lüftungsöffnungen).

Teilweise unterliegen diese Faktoren großen Schwankungen, daher ist der Luftaustausch über Fensterlüftung nur bedingt beeinflussbar. Mit Stoßlüftung wird ein kurzzeitiges Lüften über (meist weit geöffnete) Fenster verstanden, wohingegen Dauerlüftung ständig geöffneten Fenstern zugeordnet wird. Bei der Fensterlüftung können zudem zwei Lüftungsarten unterschieden werden:

- Einseitige Lüftung (Anordnung der Fenster an einer Gebäudeseite, der gelüftete Raum wird i.d.R. eingeschränkt durchlüftet)
- Querlüftung (Anordnung der Fenster an zwei gegenüberliegenden Gebäudeseiten, der gelüftete Raum wird nahezu vollständig durchlüftet)

Tabelle 2 fasst die Vor- und Nachteile der Fensterlüftung kurz zusammen.

Tabelle 2: Zusammenstellung der Vor- und Nachteile der Fensterlüftung

Vorteile der Fensterlüftung		Nachteile der Fensterlüftung	
manuell	automatisiert	manuell	automatisiert
<ul style="list-style-type: none"> - Keine / kaum zusätzliche Investitionskosten - Kein zusätzlicher Platzbedarf 		<ul style="list-style-type: none"> - erhöhte Energieverluste möglich (z.B. bei Dauerlüften statt Stoßlüften im Winter) - Baulich bedingt Querlüftung nicht immer möglich - Negative Effekte auf thermische Behaglichkeit (z.B. Zugerscheinungen) - Keine Filterung der Außenluft - Geräuschimmission von außen 	
<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Verbreitung - Hohe Akzeptanz - Vollständige Kontrolle beim Nutzer 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensorgesteuerte Fensterlüftung (nutzerunabhängig und energetisch vorteilhaft) - Einbruchschutz 	<ul style="list-style-type: none"> - Abhängigkeit vom Nutzer - Einbruchschutz 	<ul style="list-style-type: none"> - Zusätzlicher Hilfsenergieaufwand

2.3 Mechanische Lüftung

Raumlufttechnische Anlagen (RLT-Anlagen) werden in Anlagen unterschieden, die

- Außenluft fördern (Anlagen mit Lüftungsfunktion) oder
- Umluft fördern (Anlagen ohne Lüftungsfunktion)

sowie anhand der Anzahl der thermodynamischen Luftbehandlungsfunktionen (Heizen, Kühlen, Entfeuchten, Befeuchten):

- Lüftungsanlage (ohne oder eine thermodynamische Luftbehandlungsfunktion)
- Teilklimaanlage (zwei bis drei thermodynamischen Luftbehandlungsfunktionen),
- Klimaanlage (vier thermodynamische Luftbehandlungsfunktionen).

Abbildung 5 zeigt zusammenfassend die Einteilung der raumlufttechnischen Anlagen.

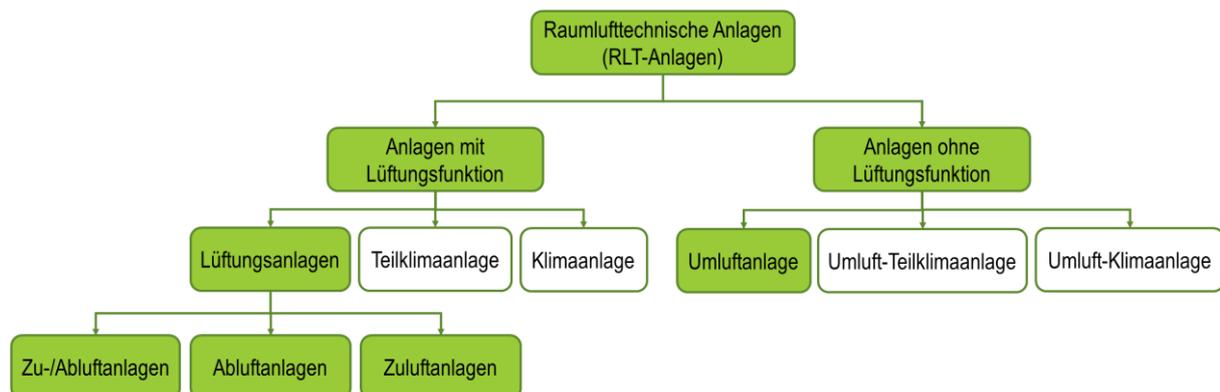


Abbildung 5: Einteilung der raumlufttechnischen Anlagen - mit Kennzeichnung der näher betrachteten Systeme

Anders als bei der freien Lüftung basiert die mechanische Lüftung auf einer mit Ventilatoren erzeugten Druckdifferenz, die i. d. R. daher keinen bzw. nur geringen Schwankungen unterliegt.

Die RLT-Anlagen können weiterhin eingeteilt werden in:

- Zentrale Anlagen (Lüftung mehrerer Räume durch ein zentrales Gerät) und
- Dezentrale Anlagen (Lüftung eines Raumes durch ein dezentrales Gerät).

Bei den reinen Lüftungsanlagen mit Lüftungsfunktion wird weiter unterschieden in:

- Zu-/Abluftanlagen (ventilatorgestützt geförderte Abluft und ventilatorgestützt geförderte Zuluft)
- Abluftanlagen (ventilatorgestützt geförderte Abluft) und
- Zuluftanlagen (ventilatorgestützt geförderte Zuluft).

Tabelle 3 fasst die Vor- und Nachteile der mechanischen Lüftung kurz zusammen.

Tabelle 3: Zusammenstellung der Vor- und Nachteile mechanischer Lüftung

Vorteile der mechanischen Lüftung	Nachteile der mechanischen Lüftung
<ul style="list-style-type: none">- Schalldämmung und Außenluftfilterung möglich- Nutzerunabhängig / sensorgeregt- sinkende Heizkosten durch Wärmerückgewinnung möglich	<ul style="list-style-type: none">- Geräuschemission der Anlage- Hilfsenergieverbrauch- Hohe Investitionskosten- aufwendige Installation im Altbau- zusätzlicher Platzbedarf notwendig

2.4 Hybridlüftung

Unter Hybridlüftung werden alle Kombinationen aus freier und mechanischer Lüftung verstanden. Häufig trägt dabei die mechanische Lüftung zu einer Grundlüftung bei und die freie Lüftung wird zusätzlich zur „Spitzen“-Lüftung genutzt. Beispielfhaft können hier Klassenräume genannt werden, deren Grundlüftung mit einer mechanischen Lüftungsanlage bspw. mit 15 m³/h pro Person realisiert wird und die zusätzlich nach Bedarf durch Fensterlüftung belüftet werden.

3 Außenluft vs. Umluft

Die Minimierung der SARS-CoV-2-Belastung kann im Allgemeinen durch zwei Verfahren reduziert werden: Verdünnung durch Lüftung und Filterung. Für eine bessere Einordnung zeigt Abbildung 6 schematisch die in der Raumlufttechnik vorkommenden Luftarten.

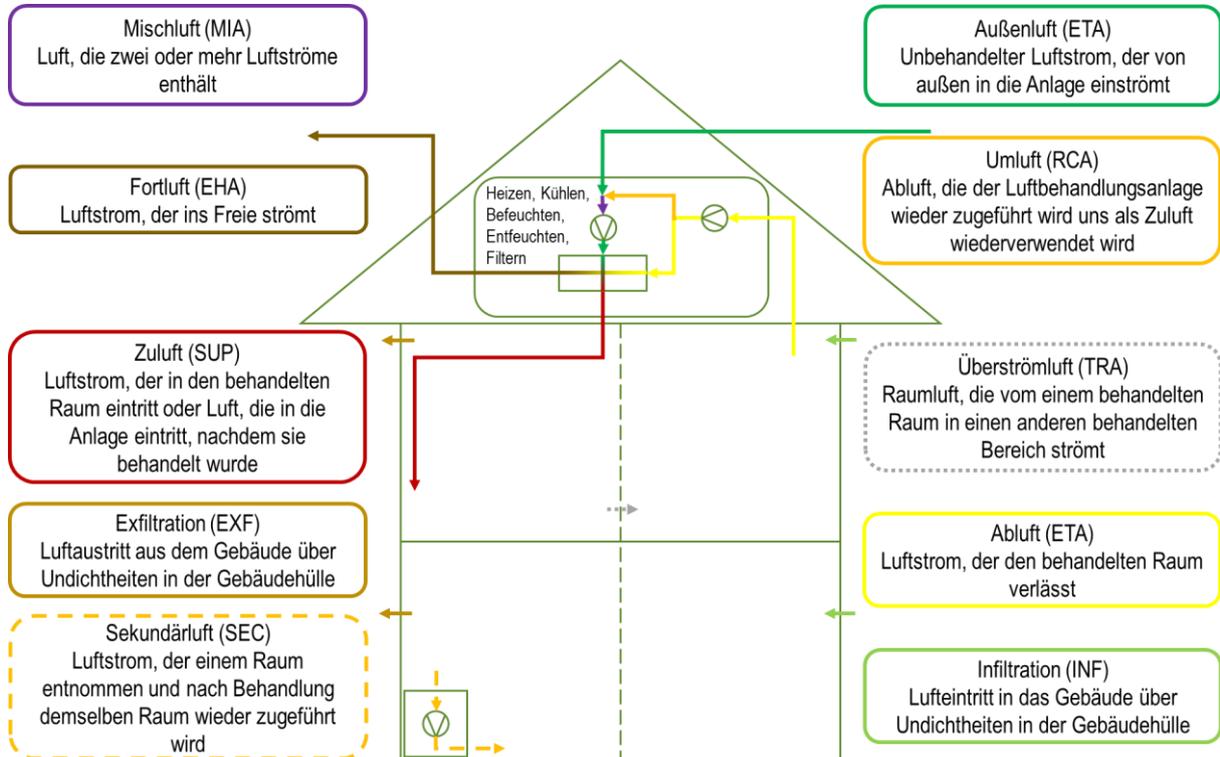


Abbildung 6: Darstellung von Luftarten in der Raumlufttechnik (Bezeichnung nach DIN EN 13779¹²)

Verdünnung durch Lüftung

Durch einen möglichst großen Außenluftvolumenstrom kann die Viruskonzentration von SARS-CoV-2-Viren in der Raumluft verringert werden, dabei wird durch Lüftung die potenziell mit SARS-CoV-2-Viren kontaminierte Raumluft durch Außenluft ausgetauscht. Dabei wird nach aktuellem Kenntnisstand vorausgesetzt, dass die Außenluft keine kritische SARS-CoV-2-Konzentration aufweist.

Tabelle 4 fasst die Vor- und Nachteile der Verdünnung kurz zusammen.

Tabelle 4: Zusammenstellung der Vor- und Nachteile der Verdünnung durch Lüftung

Vorteile der Verdünnung durch Lüftung	Nachteile der Verdünnung durch Lüftung
<ul style="list-style-type: none"> - Reduzierung der SARS-CoV-2-Viren durch Verdünnung - „Frischluff“ ersetzt belastete Raumluft - CO₂-Konzentration und damit Geruchsbelastung wird reduziert - Reduzierung anderer luftgetragener Schadstoffe - Feuchteabfuhr im Sommer mit Vermeidung von Feuchteschäden und Schimmelpilzbefall - Verbesserung der Luftqualität 	<ul style="list-style-type: none"> - Lüftungswärmeverluste (abgemildert durch Wärmerückgewinnung) - Feuchteabfuhr im Winter evtl. mit zu geringer Raumluftfeuchte - Energiebedarf für RLT-Gerät (Ventilatoren)

¹² DIN EN 13779:2007-09 zurückgezogen, *Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme*

Filterung

Die Filterung der Raumluft ist insbesondere bei Umluft- und Sekundärluftsystemen zu beachten.

Bei (zentralen) Umluftanlagen würde ohne geeignete Filterung die potenziell mit SARS-CoV-2-Viren kontaminierte Abluft von einzelnen Räumen auch auf andere (ggf. unbelastete) Räume übertragen werden.

Bei (dezentralen) Sekundärluftsystemen ist i.d.R. keine Lüftungsfunktion vorgesehen, die Luft verbleibt damit immer im gleichen Raum.

Tabelle 5 fasst die Vor- und Nachteile der Filterung kurz zusammen.

Tabelle 5: Zusammenstellung der Vor- und Nachteile der Filterung

Vorteile der Filterung	Nachteile der Filterung
<ul style="list-style-type: none">- Reduzierung der SARS-CoV-2-Viren durch Filterung- Keine Lüftungswärmeverluste- Keine Feuchteabfuhr im Winter	<ul style="list-style-type: none">- keine „Frischlufte“- CO₂-Konzentration und damit Geruchsbelastung wird nicht reduziert- Keine Reduzierung anderer luftgetragener Schadstoffe- Keine Feuchteabfuhr im Sommer- Energiebedarf durch Umluftventilator

4 Potenzial der natürlichen Fensterlüftung

4.1 Allgemeines

Um das Potenzial der natürlichen Fensterlüftung (automatisiert oder manuell) mit dem Fokus auf die Minimierung der SARS-CoV-2-Belastung in der Innenraumluft von Klassenräumen abzuschätzen, werden im Folgenden Abschätzungen mit Hilfe von normativen Berechnungsansätzen ermittelt.

4.2 Untersuchungsgegenstand

Alle Varianten werden für einen typischen Klassenraum mit folgenden Randbedingungen betrachtet:

- Außenklima:
 - Winter (November bis Februar; 7 Uhr bis 17 Uhr; jeweils Medianwert):
 - Außentemperatur 1,7°C
 - Meteorologische Windgeschwindigkeit 4 m/s
 - Übergangszeit (März bis Mai, September und Oktober; 7 Uhr bis 17 Uhr; jeweils Medianwert):
 - Außentemperatur 12,3°C
 - Meteorologische Windgeschwindigkeit 4 m/s
 - Kohlendioxid-Konzentration 400 ppm

- Raumklima:
 - Raumtemperatur 20°C
 - Kohlendioxid-Emission 18,9 l/h je SchülerIn (5. bis 13. Jahrgang), 22 l/h je Lehrkraft¹³

- Klassenraum, siehe Abbildung 7:
 - L x B x H = 11 m x 7 m x 3 m
 - Fußbodenhöhe über Erdreich 1m
 - 6 Dreh-/Kippfenster (B x H = 1,2 m x 1,6 m, Brüstungshöhe ca. 1 m)
 - Fensteröffnungsweite angekippt x=100mm, in Sicherheitsstellung x=140mm
 - Öffnungswinkel bei angekippten Fenster nach DIN EN 15242 berechnet
 - Einbausituation normal
 - Einseitige Fensterlüftung
 - Infiltrationsluftvolumenstrom 16,17 m³/h (in dichten Gebäuden vernachlässigbar)
 - Luftwechsel bei 50 Pa Druckdifferenz: $n_{50} = 1 \text{ h}^{-1}$
 - Mittlere Abschirmung

- Belegung:
 - 30 SchülerInnen und 1 Lehrkraft (ca. 2,5m² pro Person)
 - Belegung im Unterricht: 100% (30 SchülerInnen + 1 Lehrkraft)
 - Belegung in der 5-Min-Pause: 50% (15 SchülerInnen),
 - Belegung in den großen Pausen: 50% (15 SchülerInnen)
 - Belegung in der Mittagspause: 0% (0 Personen)

¹³ VDI 6040 Blatt 2:2015-09, *Raumlufttechnik – Schulen – Ausführungshinweise (VDI-Lüftungsregeln, VDI-Schulbaurichtlinien)*, Tabelle 1

○ Stundenplan:

08:00 Uhr	08:45 Uhr	1. Unterrichtsstunde
08:45 Uhr	09:30 Uhr	2. Unterrichtsstunde
09:30 Uhr	09:45 Uhr	1. Große Pause
09:45 Uhr	10:30 Uhr	3. Unterrichtsstunde
10:30 Uhr	10:35 Uhr	5-Min-Pause
10:35 Uhr	11:20 Uhr	4. Unterrichtsstunde
11:20 Uhr	11:40 Uhr	2. Große Pause
11:40 Uhr	12:20 Uhr	5. Unterrichtsstunde
12:20 Uhr	12:25 Uhr	5-Min-Pause
12:25 Uhr	13:10 Uhr	6. Unterrichtsstunde
13:10 Uhr	14:05 Uhr	Mittagspause
14:05 Uhr	14:45 Uhr	7. Unterrichtsstunde
14:45 Uhr	14:50 Uhr	5-Min-Pause
14:50 Uhr	15:30 Uhr	8. Unterrichtsstunde
15:30 Uhr	15:35 Uhr	5-Min-Pause
15:35 Uhr	16:15 Uhr	9. Unterrichtsstunde

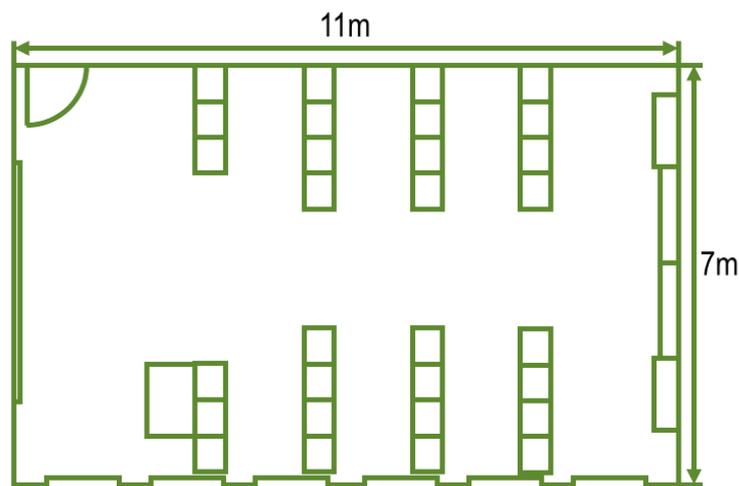


Abbildung 7: Schematische Darstellung des betrachteten Klassenraums

Neben der Variation der Klimaverhältnisse wird auch die Fensterstellung (geschlossen, angekippt, geöffnet in Sicherheitsstellung zur Gewährleistung des Unfallschutzes, ganz geöffnet) sowie das Lüftungsszenario (ohne Lüftung, Lüftung in den Pausen und/oder Lüftung während des Unterrichts) variiert. Tabelle 6 zeigt die betrachteten Varianten mit den entsprechend berücksichtigten Randbedingungen.

Die Öffnungsflächen der Fenster für die Stoßlüftung und die Raumtiefe des betrachteten Klassenraums sind im Einklang mit ASR A.3.6 „Lüftung“ gewählt worden.

Tabelle 6: Übersicht zu den betrachteten Fällen

Fallnummer	Betrachtungszeitraum	Anzahl geöffneter Fenster			Fensterstellung				Klima	
		0	3	6	geschlossen	angekippt	Geöffnet in Sicherheitsstellung	Ganz geöffnet	Übergangszeit	Winter
1	Unterricht	x			x					
	Pausen	x			x					
2	Unterricht			x				x	x	
	Pausen			x				x		
3	Unterricht			x		x			x	
	Pausen			x		x				
4	Unterricht	x			x				x	
	Pausen			x			x			
5	Unterricht	x			x				x	
	Pausen			x		x				
6	Unterricht			x		x			x	
	Pausen			x			x			
7	Unterricht		x			x			x	
	Pausen		x				x			
8	Unterricht			x				x*	x	
	Pausen			x				x		
9	Unterricht		x					x*	x	
	Pausen		x					x		
10	Unterricht			x				x*	x	
	Pausen			x				x		
11	Unterricht		x					x*	x	
	Pausen		x					x		
12	Unterricht			x		x				x
	Pausen			x		x				
13	Unterricht			x		x				x
	Pausen			x			x			
14	Unterricht			x				x*		x
	Pausen			x				x		

* Nach 20 Minuten für 5 Minuten

4.3 Berechnungsgrundlage

Die Berechnung des Luftvolumenstroms erfolgt mit Hilfe der KNL-Planungshilfe¹⁴. Der Planungshilfe liegt wiederum der Berechnungsalgorithmus des Entwurfs zur DIN/TS 4108-8¹⁵ zugrunde, der sowohl den thermisch induzierten als auch den windinduzierten Luftaustausch berücksichtigt.

Die Berechnung der CO₂-Konzentration erfolgt gemäß VDI 6040 Blatt 2¹⁶. Die VDI 6040 Blatt 2 hilft Planern und Architekten, die Raumluftqualität in Schulen durch konkrete Anforderungen und Ausführungshinweise zu verbessern. Die Berechnungsgleichung für den zeitlichen CO₂-Konzentrationsverlauf lautet gemäß VDI 6040 Blatt 2 wie folgt:

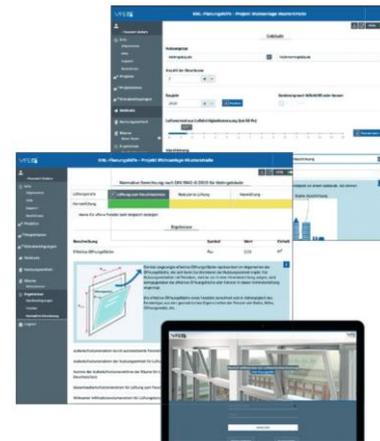


Abbildung 8: KNL-Planungshilfe des Verbands Fensterautomation und Entrauchung e.V. (VFE)¹²

$$c_{RAL}(t) = c_{AUL} + \left(\frac{N(t) \cdot \dot{V}_{m,E}}{\dot{V}_{AUL}(t)} \right) \cdot 10^6 - \left(c_{AUL} - c_{RAL}(t_0) + \left(\frac{N(t) \cdot \dot{V}_{m,E}}{\dot{V}_{AUL}(t)} \right) \cdot 10^6 \right) \cdot e^{\left(-\frac{\dot{V}_{AUL}(t)(t-t_0)}{V_R} \frac{1}{3600} \right)} \quad (1)$$

Dabei ist

$c_{RAL}(t)$	CO ₂ -Konzentration im Raum am Ende des betrachteten Zeitintervalls in ppm
c_{AUL}	CO ₂ -Konzentration der Außenluft in ppm
$N(t)$	Anzahl der Personen im Raum zum Zeitpunkt t
$\dot{V}_{m,E}$	personenbezogener CO ₂ -Volumenstrom in l/(h·Person)
$\dot{V}_{AUL}(t)$	Außenluftvolumenstrom in l/h
$c_{RAL}(t_0)$	CO ₂ -Konzentration im Raum zu Beginn des betrachteten Zeitintervalls in ppm
V_R	Raumvolumen in m ³
t	Zeitpunkt am Ende des betrachteten Zeitintervalls in s
t_0	Zeitpunkt zu Beginn des betrachteten Zeitintervalls in s

¹⁴ <https://www.zentrum-fuer-luft.de/>

¹⁵ DIN/TS 4108-8 (Entwurf), *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 8: Vermeidung von Schimmelwachstum in Wohngebäuden*

¹⁶ VDI 6040 Blatt 2:2015-09, *Raumlufttechnik – Schulen – Ausführungshinweise (VDI-Lüftungsregeln, VDI-Schulbaurichtlinien)*

4.4 Berechnungsergebnisse

Die nachfolgende Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse der durchgeführten Variantenrechnungen für den betrachteten Klassenraum bezüglich des Außenluftvolumenstroms und des Luftwechsels.

Tabelle 7: Ergebnisübersicht zu den betrachteten Fällen

Variante	Betrachtungszeitraum	Anzahl geöffneter Fenster	Fensterstellung	Klima	Außenluftvolumenstrom m³/h	Luftwechsel h⁻¹
1	Unterricht	0	geschlossen		16	0,07
	Pausen	0	geschlossen		16	0,07
2	Unterricht	6	Ganz geöffnet	Übergangszeit	7.114	30,8
	Pausen	6	Ganz geöffnet		7.114	30,8
3	Unterricht	6	angekippt	Übergangszeit	478	2,07
	Pausen	6	angekippt		478	2,07
4	Unterricht	0	geschlossen	Übergangszeit	16	0,07
	Pausen	6	Geöffnet in Sicherheitsstellung		1.946	8,4
5	Unterricht	0	geschlossen	Übergangszeit	16	0,07
	Pausen	6	angekippt		478	2,07
6	Unterricht	6	angekippt	Übergangszeit	478	2,07
	Pausen	6	Geöffnet in Sicherheitsstellung		1.946	8,4
7	Unterricht	3	angekippt	Übergangszeit	247	1,07
	Pausen	3	Geöffnet in Sicherheitsstellung		981	4,2
8	Unterricht	6	Geöffnet in Sicherheitsstellung *	Übergangszeit	(16) 1.946 (16)	(0,07) 8,4 (0,07)
	Pausen	6	Geöffnet in Sicherheitsstellung		1.946	8,4
9	Unterricht	3	Geöffnet in Sicherheitsstellung *	Übergangszeit	(16) 981 (16)	(0,07) 4,2 (0,07)
	Pausen	3	Geöffnet in Sicherheitsstellung		981	4,2
10	Unterricht	6	Geöffnet in Sicherheitsstellung *	Übergangszeit	(16) 1.946 (16)	(0,07) 8,4 (0,07)
	Pausen	6	Ganz geöffnet		7.114	30,8
11	Unterricht	3	Geöffnet in Sicherheitsstellung *	Übergangszeit	(16) 981 (16)	(0,07) 4,2 (0,07)
	Pausen	3	Ganz geöffnet		3.565	15,4
12	Unterricht	6	angekippt	Winter	650	2,8
	Pausen	6	angekippt		650	2,8
13	Unterricht	6	angekippt	Winter	650	2,8
	Pausen	6	Geöffnet in Sicherheitsstellung		2.660	11,5
14	Unterricht	6	Geöffnet in Sicherheitsstellung *	Winter	(16) 2.660 (16)	(0,07) 11,5 (0,07)
	Pausen	6	Geöffnet in Sicherheitsstellung		2.660	11,5

* Nach 20 Minuten für 5 Minuten

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen den resultierenden CO₂-Konzentrationsverlauf als Momentanwert im betrachteten Klassenraum für die einzelnen betrachteten Varianten mit den entsprechenden Randbedingungen. Die Beschreibung und Bewertung der betrachteten Lüftungsvarianten werden dabei ausschließlich auf den Verlauf der CO₂-Konzentration bezogen, andere Betrachtungspunkte wie Realisierbarkeit, Thermische Behaglichkeit oder energetische Aspekte werden nicht mit einbezogen, sollten allerdings nicht außer Acht gelassen werden. Außerdem sind die Luftvolumenströme über Fensterlüftung unter stationären Bedingungen berechnet worden, d.h. bspw. das der Luftvolumenstrom über Fensterlüftung als konstant angenommen wird, obwohl es zu einer Temperaturangleichung zwischen innen und außen kommen kann und daher der Luftvolumenstrom insbesondere bei langen Lüftungsvorgängen zeitlich betrachtet kleiner wird.

Abbildung 9 zeigt den sich einstellenden CO₂-Konzentrationsverlauf im betrachteten Klassenraum, wenn weder während des Unterrichts noch in den Pausen gelüftet wird (Variante 1). Mit diesem Lüftungsverhalten wird nach dem betrachteten Unterrichtstag eine CO₂-Konzentration von bis zu 13.500 ppm erreicht. Nur während der längeren Mittagspause ist eine geringe Abnahme der CO₂-Konzentration zu erkennen, diese ist einerseits auf die Abwesenheit der Personen und andererseits auf die Infiltration zurückzuführen.

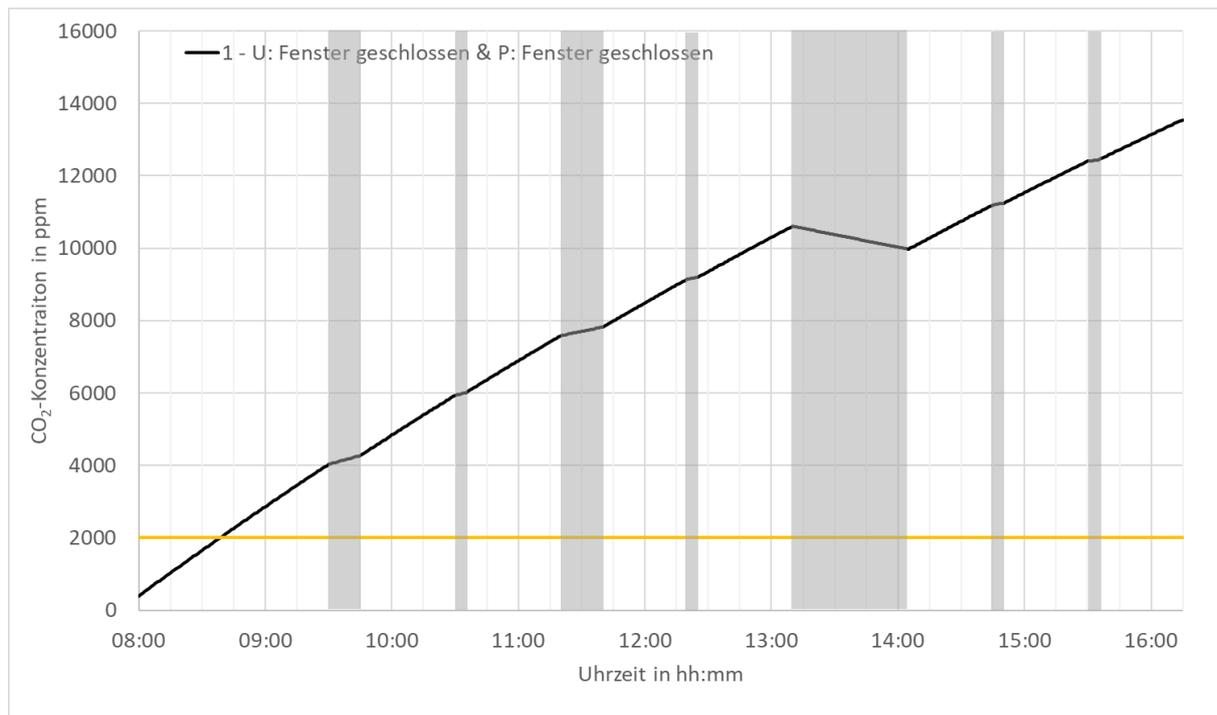


Abbildung 9: CO₂-Konzentrationsverlauf unter den betrachteten Randbedingungen für Variante 1 (Unterricht: Fenster geschlossen & Pausen: Fenster geschlossen)

Eine vergleichende Darstellung der Varianten 2, 3, 4 und 5 für die Übergangszeit zeigt Abbildung 10. Die beiden Varianten 4 (Unterricht: Fenster geschlossen & Pausen: 6 Fenster geöffnet in Sicherheitsstellung) und 5 (Unterricht: Fenster geschlossen & Pausen: 6 Fenster angekippt) liegen mit maximalen CO₂-Konzentrationen von ca. 3.500ppm für Variante 4 bzw. ca. 6.800 ppm für Variante 5 deutlich über den anzustrebenden Orientierungswert von 2000ppm des Umweltbundesamtes bzw. der Arbeitsstättenrichtlinie ASR, siehe Tabelle 1. Im Vergleich dazu kann durch Lüftungsverhalten wie in Variante 2 (Unterricht: 6 Fenster ganz geöffnet & Pausen: 6 Fenster ganz geöffnet) und Variante 3 (Unterricht: 6 Fenster angekippt & Pausen: 6 Fenster angekippt) dieser Orientierungswert gut eingehalten werden. Es werden maximale

CO₂-Konzentrationen von ca. 500ppm für Variante 2 bzw. ca. 1.600ppm für Variante 3 während des Unterrichtstages erreicht.

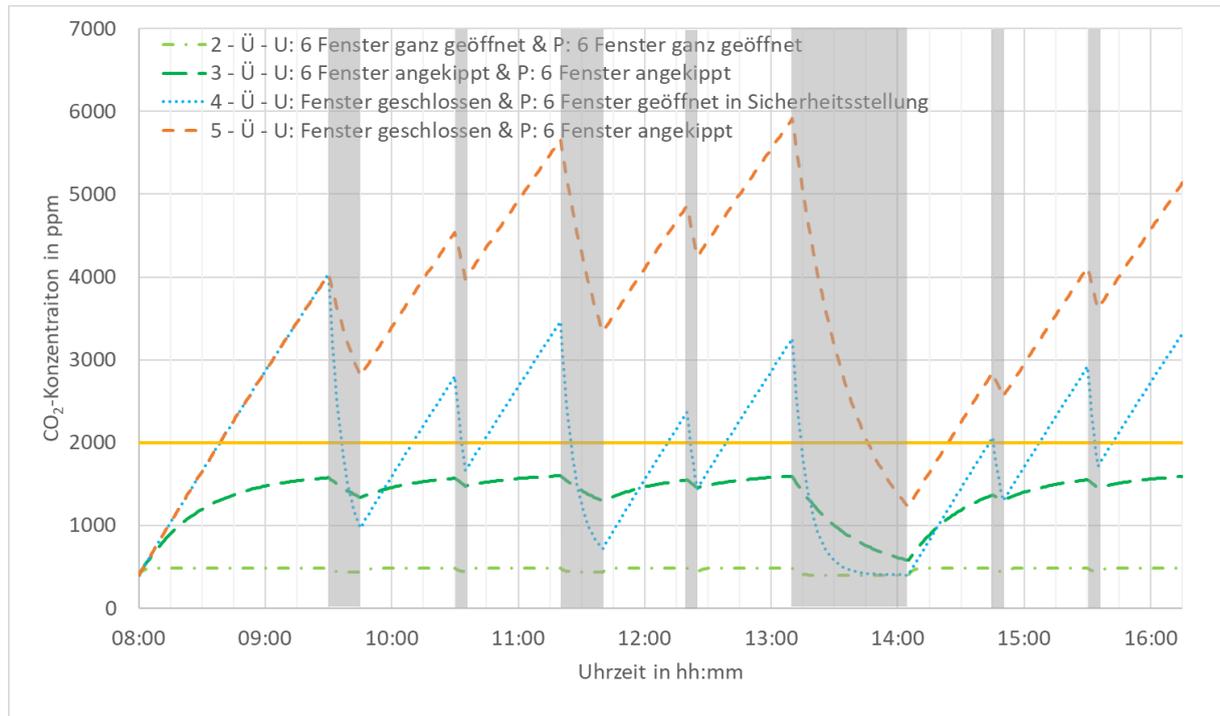


Abbildung 10: Vergleichender CO₂- Konzentrationsverlauf unter den betrachteten Randbedingungen für Variante 2 (Übergangszeit - Unterricht: 6 Fenster ganz geöffnet & Pausen: 6 Fenster ganz geöffnet), Variante 3 (Übergangszeit – Unterricht: 6 Fenster angekippt & Pausen: 6 Fenster angekippt), Variante 4 (Übergangszeit – Unterricht: Fenster geschlossen & Pausen: 6 Fenster geöffnet in Sicherheitsstellung) und Variante 5 (Übergangszeit – Unterricht: Fenster geschlossen & Pausen: 6 Fenster angekippt)

Abbildung 11 stellt vergleichend den Effekt einer unterschiedlichen Anzahl der geöffneten in der Übergangszeit für die Varianten 6, 7, 8 und 9 dar. Dabei wird bei Variante 6 und 7 während des Unterrichts mit angekippten Fenstern und in den Pausen mit geöffneten Fenstern in Sicherheitsstellung gelüftet. Bei Variante 6 mit 6 geöffneten Fenstern wird eine maximale CO₂-Konzentration während des betrachteten Schultags von ca. 1.600ppm im Vergleich zu Variante 7 mit 3 geöffneten Fenstern und einer maximalen CO₂-Konzentration von ca. 2.400ppm erreicht. Variante 8 und 9 unterscheiden sich ebenfalls in der Anzahl der geöffneten Fenster (Variante 8: 6 Fenster, Variante 9: 3 Fenster), jedoch nicht im Lüftungsverhalten an sich (Unterricht: Fenster nach 20 Min. für 5 Min. geöffnet in Sicherheitsstellung & Pausen: Fenster geöffnet in Sicherheitsstellung). Bei Variante 8 mit 6 geöffneten Fenstern wird eine maximale CO₂-Konzentration während des betrachteten Schultags von ca. 2.600ppm im Vergleich zu Variante 9 mit 3 geöffneten Fenstern und einer maximalen CO₂-Konzentration von ca. 3.000ppm erreicht. Bei den 4 vergleichend betrachteten Varianten zeigt sich, dass grundsätzlich die Einhaltung des Orientierungswertes von 2.000ppm der CO₂-Konzentration bei einem Lüftungsverhalten der Variante 7 und 8 möglich wäre, wenn konsequenterweise nach 20 Unterrichtsminuten immer für 5 Minuten gelüftet und nach jeder Unterrichtsstunde die Pausen zum Lüften genutzt werden sowie möglichst viele Fenster für die Lüftung genutzt werden. Variante 6 überschreitet schon jetzt den Orientierungswert nicht.

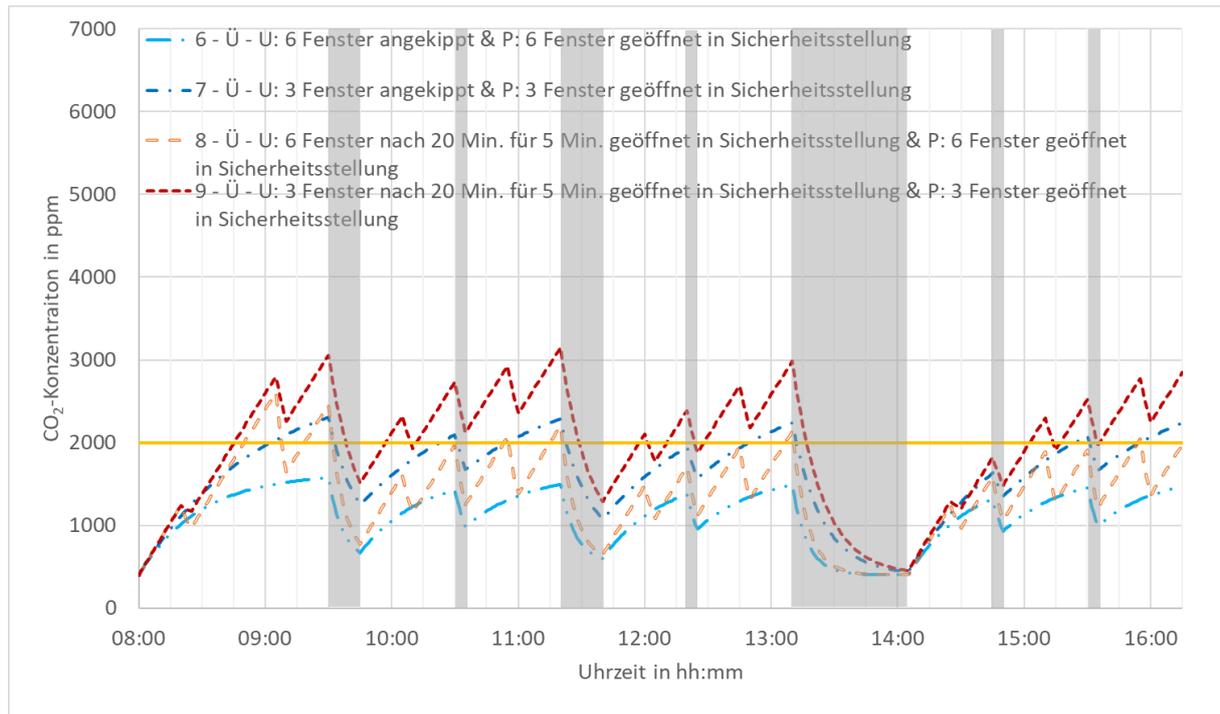


Abbildung 11: Vergleichender CO₂- Konzentrationsverlauf unter den betrachteten Randbedingungen für Variante 6 (Übergangszeit - Unterricht: 6 Fenster angekippt & Pausen: 6 Fenster geöffnet in Sicherheitsstellung), Variante 7 (Übergangszeit - Unterricht: 3 Fenster angekippt & Pausen: 3 Fenster geöffnet in Sicherheitsstellung), Variante 8 (Übergangszeit - Unterricht: 6 Fenster nach 20 Min. für 5 Min. geöffnet in Sicherheitsstellung & Pausen: 6 Fenster geöffnet in Sicherheitsstellung) und Variante 9 (Übergangszeit - Unterricht: 3 Fenster nach 20 Min. für 5 Min. geöffnet in Sicherheitsstellung & Pausen: 3 Fenster geöffnet in Sicherheitsstellung)

In Abbildung 12 wird vergleichend eine unterschiedliche Lüftungssituation in den Pausen angenommen. In allen vier betrachteten Varianten wird in der Unterrichtsstunde nach 20 Minuten für 5 Minuten gelüftet, indem die Fenster in Sicherheitsstellung geöffnet werden. Bei Variante 8 und 9 wird auch in den Pausen in Sicherheitsstellung gelüftet, anders als bei den Varianten 10 und 11, die mit ganz geöffneten Fenstern die Pausenlüftung realisieren. Eine weitere Gemeinsamkeit der Varianten ist, dass bei den Variante 8 und 10 jeweils 6 geöffnete Fenster und bei Variante 9 und 11 jeweils 3 geöffnete Fenster betrachtet werden. Es zeigt sich, dass die Pausenlüftung mit ganz geöffneten Fenstern zu einer weiteren Verbesserung der CO₂-Konzentration im Tagesverlauf (ausgenommen für die ersten beiden Unterrichtsstunden) führt. Mit 6 ganz geöffneten Fenstern in der Stunde lässt sich der Orientierungswert gut einhalten, aber auch mit 3 ganz geöffneten Fenstern wird der Orientierungswert nur knapp überschritten (Maximalwerte ca. 1.900ppm bei 6 Fenstern (Variante 10) und ca. 2.300ppm bei 3 Fenstern (Variante 11), bezogen auf den Betrachtungszeitraum nach der 2. Unterrichtsstunde).

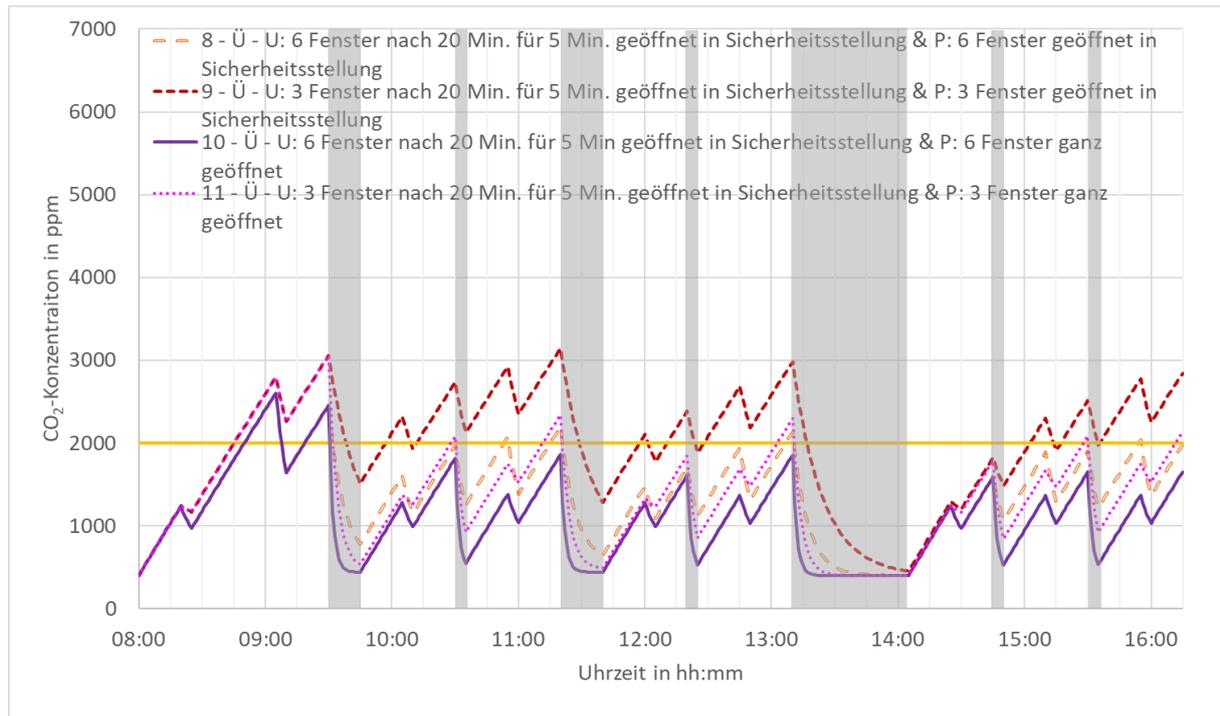


Abbildung 12: Vergleichender CO₂- Konzentrationsverlauf unter den betrachteten Randbedingungen für Variante 8 (Übergangszeit – Unterricht: 6 Fenster nach 20 Min. für 5 Min. geöffnet in Sicherheitsstellung & Pausen: 6 Fenster geöffnet in Sicherheitsstellung), Variante 9 (Übergangszeit – Unterricht: 3 Fenster nach 20 Min. für 5 Min. geöffnet in Sicherheitsstellung & Pausen: 3 Fenster geöffnet in Sicherheitsstellung), Variante 10 (Übergangszeit – Unterricht: 6 Fenster nach 20 Min. für 5 Min. geöffnet in Sicherheitsstellung & Pausen: 6 Fenster ganz geöffnet) und Variante 11 (Übergangszeit – Unterricht: 3 Fenster nach 20 Min. für 5 Min. geöffnet in Sicherheitsstellung & Pausen: 3 Fenster ganz geöffnet)

Abbildung 13 stellt vergleichend den Unterschied des Klimas für die Varianten 3, 7, 8, 12, 13 und 14 dar. Dabei unterscheiden sich die Varianten 3 und 12, 7 und 13 sowie 8 und 14 lediglich im Klima (Übergangszeit oder Winter) nicht jedoch im Lüftungsverhalten (Variante 3/12: Unterricht: 6 Fenster angekippt & Pausen: 6 Fenster angekippt, Variante 7/13: Unterricht: 3 Fenster angekippt & Pausen: 3 Fenster in Sicherheitsstellung, und Variante 8/14: Unterricht: Unterricht: 6 Fenster nach 20 Min. für 5 Min. geöffnet in Sicherheitsstellung & Pausen: 6 Fenster geöffnet in Sicherheitsstellung). Tendenziell zeigt sich, dass sich mit größerer Temperaturdifferenz zwischen innen und außen ein besserer CO₂-Konzentrationsverlauf hinsichtlich der Einhaltung des Orientierungswertes von 2.000ppm einstellt. Die Varianten 3, 12 und 13 überschreiten bspw. den Orientierungswert nicht. Die anderen drei Varianten überschreiten den Orientierungswert zwar, jedoch werden maximale CO₂-Konzentrationen während des Schultages von ca. 2.400ppm – 2.500ppm für Variante 7, 8 und 14 erreicht und liegen damit noch vergleichsweise niedrig. Während der Fensterlüftung kann insbesondere unter winterlichen Bedingungen und in Fensternähe mit unbehaglichen Verhältnissen (Zugluft) zu rechnen sein. Allerdings wird bereits kurze Zeit nach dem Lüftungsvorgang die damit verbundene Abkühlung der Raumluft wieder durch die üblichen Heizsysteme kompensiert und die Raum-Solllufttemperatur erreicht¹⁷.

¹⁷Technische Hochschule Mittelhessen. *Stoßlüftung um ein Vielfaches wirksamer als Luftfiltergeräte*. 23.11.2020. <https://www.thm.de/site/hochschule/campus/aktuelles/aus-lehre-und-forschung/stosslueftung-um-ein-vielfaches-wirksamer-als-luftfiltergeraete.html>

Beim Vergleich der Abbildung 10, Abbildung 11, Abbildung 12 und Abbildung 13 wird ersichtlich, dass das regelmäßige Lüften mit möglichst vielen Fenstern und großen Öffnungsflächen für eine gute Raumluftqualität bezüglich der CO₂-Konzentrationen sehr wichtig ist, um den Anstieg der CO₂-Konzentration zu bremsen. In der langen Mittagspause ohne Personenanwesenheit gelingt es mit nahezu jeder Variante die CO₂-Konzentration im betrachteten Klassenraum auf das Niveau der Außenluft abzusenken.

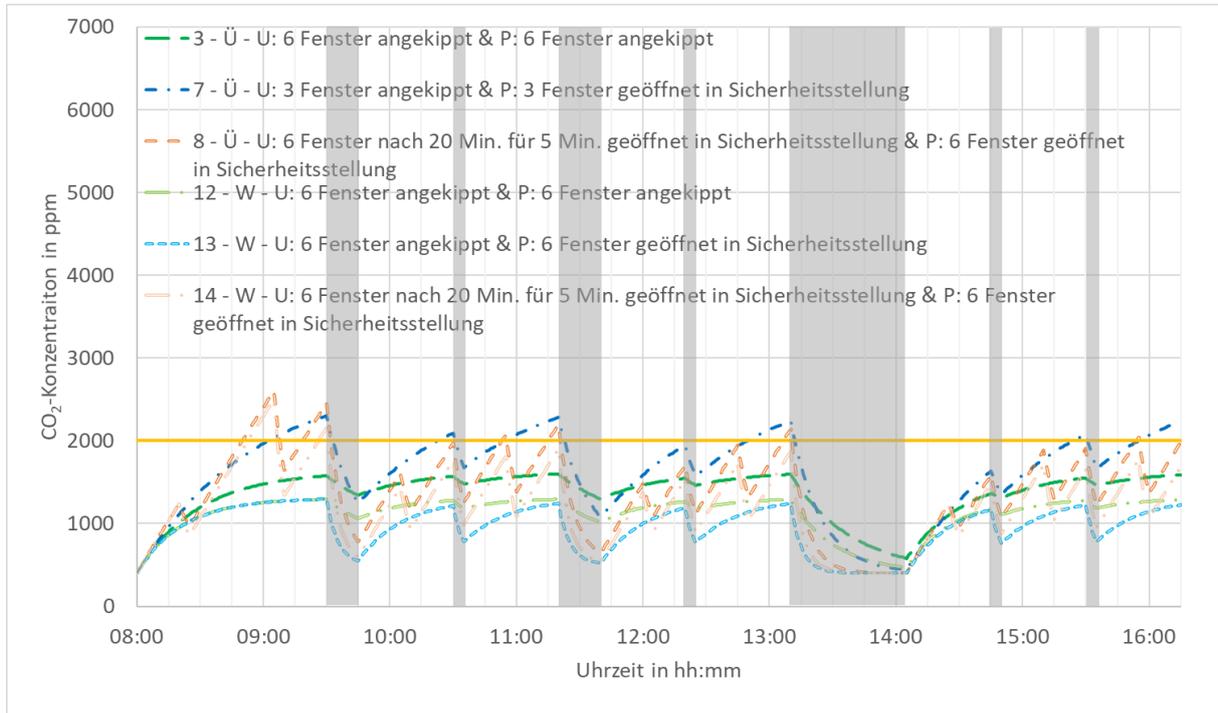


Abbildung 13: Vergleichender CO₂- Konzentrationsverlauf unter den betrachteten Randbedingungen für Variante 3 (Übergangszeit - Unterricht: 6 Fenster angekippt & Pausen: 6 Fenster angekippt), Variante 7 (Übergangszeit – Unterricht: 3 Fenster angekippt & Pausen: 3 Fenster geöffnet in Sicherheitsstellung), Variante 8 (Übergangszeit – Unterricht: 6 Fenster nach 20 Min. für 5 Min. geöffnet in Sicherheitsstellung & Pausen: 6 Fenster geöffnet in Sicherheitsstellung), Variante 12 (Winter - Unterricht: 6 Fenster angekippt & Pausen: 6 Fenster angekippt), Variante 13 (Winter – Unterricht: 3 Fenster angekippt & Pausen: 3 Fenster geöffnet in Sicherheitsstellung), Variante 14 (Winter – Unterricht: 6 Fenster nach 20 Min. für 5 Min. geöffnet in Sicherheitsstellung & Pausen: 6 Fenster geöffnet in Sicherheitsstellung)

In Abbildung 14 werden zwei weitere Varianten betrachtet, die bisher nicht näher beleuchtet wurden:

- Variante „Automatisierte Fenster“
Bei dieser Variante erfolgt die Öffnung der 6 Fenster wie in Variante 3, jedoch automatisiert. Der betrachteten Automatisierung der Kippfenster liegt eine Steuerung zu Grunde, die beim Überschreiten einer CO₂-Konzentration von 2.000ppm die Fenster automatisch ankippt und beim Unterschreiten einer CO₂-Konzentration von 1.700ppm automatisch wieder schließt. In den Pausen wird konsequent mit angekippten Fenstern gelüftet unabhängig von dieser automatisierten Steuerung.
- Variante „Hybride Lüftung“
Bei dieser Variante werden die 6 Fenster wie in Variante 3 dauerhaft angekippt, jedoch wird über eine mechanische Lüftungsanlage gleichzeitig eine Grundlüftung von ca. 15m³/h pro Person sichergestellt. Es wird dabei von einer Personenanzahl von 30 für die Grundlüftung ausgegangen.

Aus Abbildung 14 wird ersichtlich, dass sowohl die hybride Lüftung als auch die automatisierte Fensterlüftung dazu beitragen kann, den Orientierungswert von 2.000ppm in Klassenräumen einzuhalten.

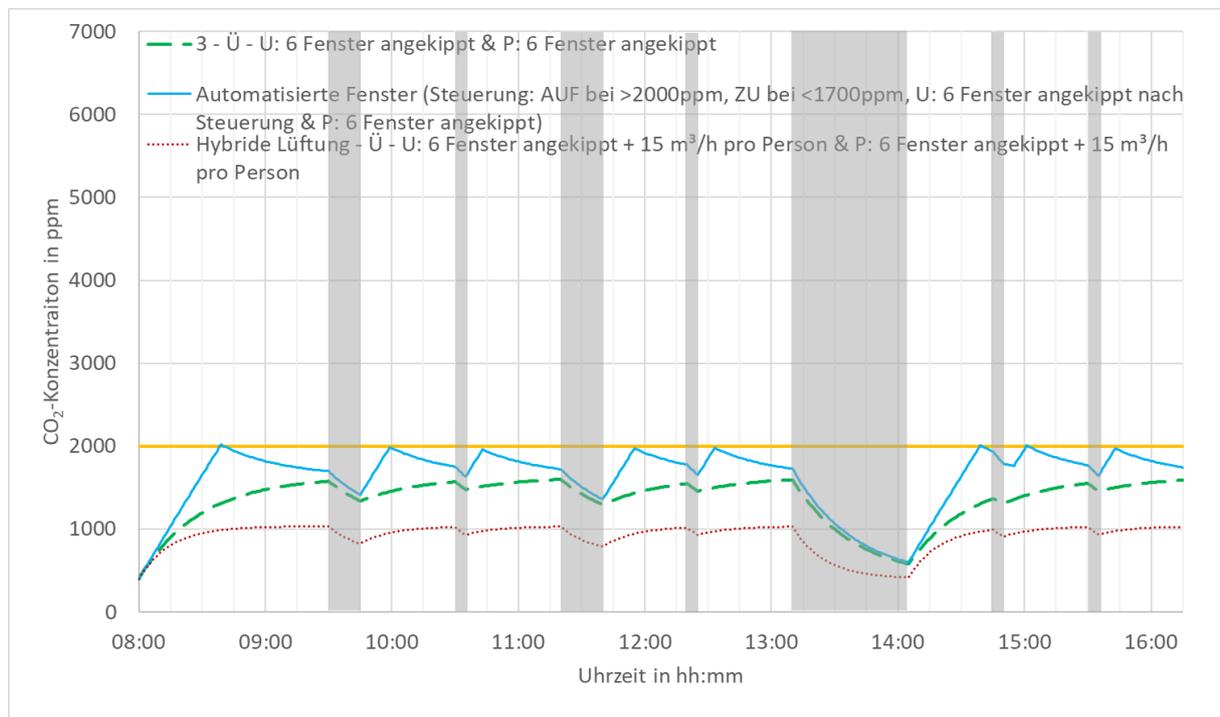


Abbildung 14: Vergleichender CO₂- Konzentrationsverlauf unter den betrachteten Randbedingungen in der Übergangszeit für Variante 3 (Übergangszeit - Unterricht: 6 Fenster angekippt & Pausen: 6 Fenster angekippt), Variante „Automatisierte Fenster“ (Steuerung: AUF bei > 2.000ppm und ZU bei < 1.700ppm, Unterricht: 6 Fenster angekippt nach Steuerung & Pausen: 6 Fenster angekippt) und Variante „Hybride Lüftung“ (Unterricht: 6 Fenster angekippt + 15 m³/h pro Person & Pausen: 6 Fenster angekippt + 15 m³/h pro Person)

5 Fazit und Empfehlung

Die Frage nach der angemessenen Lüftung von Klassenräumen ist durch die COVID-19-Pandemie verstärkt in den Blickpunkt der öffentlichen Wahrnehmung gerückt und gilt als eine der wesentlichen Maßnahmen zur wirksamen Eindämmung des Infektionsgeschehens bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung des Schulbetriebs.

Insbesondere im Gebäudebestand und unter Beachtung der Erfordernis, kurzfristig und flächendeckend Maßnahmen ergreifen zu müssen, sind auch die Optionen zur Fensterlüftung in Klassenräumen zu prüfen und einer qualifizierten Bewertung zu unterziehen.

Die Fensterlüftung kann einen Beitrag zur Minimierung der SARS-CoV-2-Belastung in Klassenräumen leisten. Ihr Potenzial und ihre Grenzen hängen jedoch von den jeweiligen Randbedingungen ab. Grundsätzlich lassen sich folgende Erkenntnisse bzw. Empfehlungen ableiten:

- Das Öffnen aller verfügbaren Fenster ist empfehlenswert, eine Verschlechterung der Raumluftqualität ist die Folge, wenn der öffentbare Fensterflächenanteil verkleinert wird bzw. nicht alle vorhandenen Fenster geöffnet werden.
- Bei der Pausenlüftung erweist sich eine (ggf. sogar nur kurze) Stoßlüftung mit ganz geöffneten Fenstern im Vergleich mit länger andauernden Lüftungsvorgängen mit gekippten oder leicht gedrehten Fenstern in Sicherheitsstellung als effektiver, die komplette Nutzung insbesondere der kurzen Pausen für die Lüftung ist aber auf jeden Fall empfehlenswert.
- Typische Nutzungsverhältnisse mit ausschließlicher Lüftung in den Pausen erweisen sich bei mittleren klimatischen Verhältnissen (Übergangszeit) als kaum geeignet, um die CO₂-Konzentration während eines gesamten Schultages auf einem unbedenklichen Niveau zu halten und damit eine geeignete Lernumgebung sicherzustellen. Eine deutliche Verbesserung kann durch einen zusätzlichen Lüftungsvorgang im Unterricht (z.B. nach ca. 20 Minuten) erreicht werden.
- Unter winterlichen Verhältnissen kann eine vergleichbare Raumluftqualität wie in der Übergangszeit durch kürzere Lüftungsphasen erreicht werden.
- Querlüftung durch gegenüberliegende Fenster ist – sofern möglich – unbedingt empfehlenswert, da der Lüftungseffekt gegenüber einseitiger Lüftung deutlich verbessert wird.
- Insbesondere in modernen, dichten Schulgebäuden ist eine mehrere Minuten andauernde Lüftung mit möglichst weit geöffneten Fenstern abends nach der letzten und morgens vor der ersten Schulstunde zu empfehlen, um die allmähliche Verschlechterung der Luftqualität im Laufe einer Woche zu verhindern.

Die aufgezählten Erkenntnisse bzw. Empfehlungen zur Fensterlüftung können jedoch nur dann wirksam werden, wenn die Nutzer (Lehrkräfte wie SchülerInnen) für das Thema sensibilisiert sind und durch eigene Disziplin gewillt sind, eine Regelmäßigkeit beim Fensterlüftung einzuführen. CO₂- Ampeln, die die aktuelle CO₂-Konzentration messen und anzeigen, können eine gute Hilfe dabei sein, wann zu lüften ist.

Mit (zusätzlich zur Pausenlüftung) im Unterricht lang andauernd oder sogar durchgängig gekippten oder leicht gedrehten Fenstern kann eine deutliche Verringerung der Kohlendioxid-Konzentration erreicht werden, wenn keine wesentlichen Beeinträchtigungen der thermischen Behaglichkeit und des Schallschutzes sowie keine wesentliche Erhöhung des Heizenergieverbrauchs (z.B. im Sommer in verkehrsarmer Umgebung) zu befürchten sind. Außerdem kann bei winterlichen Verhältnissen auch bei kürzerer Lüftungsdauer eine vergleichbare Raumluftqualität wie in der Übergangszeit bei längerer Lüftungsdauer erreicht werden.

Neben der manuellen Fensterlüftung, die sehr nutzerabhängig ist, bietet die automatisierte Fensterlüftung eine gute Lösung, den Nutzer zu entlasten. Automatisiert bspw. in Abhängigkeit der CO₂-Konzentration werden die Fenster in Kippstellung gefahren bzw. geschlossen. Die grundsätzlich aufgeführten Empfehlungen für die Fensterlüftung gelten natürlich auch hier.

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Raumluftqualität ist die Kombination einer Fensterlüftung (manuell oder automatisiert) mit einer Lüftungsanlage, die jedoch nur den Anspruch, hat eine Grundlüftung zu realisieren.

Neben diesen technischen Möglichkeiten kann zumindest für die Minimierung der SARS-CoV-2-Belastung außerdem die Verringerung der Belegungsdichte so weit möglich in Betracht gezogen werden.

Weitere Aspekte bzw. Pro- und Kontra-Argumente sind bei der Abwägung der geeigneten Lüftungskonzepte in Klassenräumen zu beachten und in die Entscheidungen einzubeziehen. Wichtige, oft angeführte Punkte insbesondere im Hinblick auf die Fensterlüftung sind:

1. Die Umsetzung einer verbesserten Fensterlüftung ist kurzfristig und ohne aufwändige und kostenintensive Maßnahmen möglich. Erforderlich ist lediglich eine gezielte Information von Lehrkräften und SchülerInnen zum angemessenen Lüftungsverhalten, ggf. unterstützt durch die Ausstattung der Klassenräume mit Lüftungsampeln.
2. Alternativ können die Klassenräume mit Lüftungs- bzw. Klimaanlage oder mit Systemen zur Raumlufffilterung ausgestattet werden. Beide Möglichkeiten sind mit höherem technischem Aufwand und damit erheblichen zusätzlichen Investitionskosten verbunden. Mögliche „Zwischenlösungen“ können im Einsatz von automatisierten Fenstern oder im Einsatz von Hybridsystemen (kleine Lüftungsanlage in Verbindung mit Fensterlüftung in der Pause) bestehen.
3. Die Wirksamkeit der Fensterlüftung hängt maßgeblich von der Raumgeometrie (Raumtiefe und Geschoss) und der Fensterkonstellation (Größe, Anzahl und Anordnung) ab. Die in dieser Stellungnahme vorgestellten Beispiele gelten für übliche Verhältnisse (Raumabmessungen 11 x 7 x 3 m, Erdgeschoss, Fenster nur auf einer Fassade). Abweichende Randbedingungen führen zu abweichenden Lüftungserfordernissen. Günstigere Verhältnisse werden u.a. durch Fensterlüftung über verschiedene Fassaden, geringere Raumtiefen, bei Klassenzimmern in oberen Geschossen oder durch stärkeren Wind und/oder größere Temperaturunterschiede zwischen innen und außen erreicht.
4. Während der Fensterlüftung ist insbesondere unter winterlichen Bedingungen und in Fensternähe mit unbehaglichen Verhältnissen (Zugluft) zu rechnen. Die damit verbundene Abkühlung der Raumluft wird allerdings bereits kurze Zeit nach dem Lüftungsvorgang wieder durch die übliche Heizsysteme kompensiert.
5. Gelegentlich geäußerte Sicherheitsbedenken hinsichtlich der möglichen Unfallgefahr bei geöffneten Fenstern kann durch entsprechende mechanische Öffnungsbeschränkungen (Kippstellung oder Öffnungsbegrenzung bei 140 mm Öffnungsweite) oder durch die Beaufsichtigung der SchülerInnen in den Pausen begegnet werden.

6 Literaturverzeichnis

1	Sebastian Thaler, et al.: <i>Bedeutung der Hornhautorgankultur bei Spendern mit möglicher SARS-CoV-2-Infektion</i> . In: <i>Der Ophthalmologe</i> . 2020, https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00347-020-01152-z
2	Robert Koch-Institut: <i>Epidemiologischer Steckbrief zu SARS-CoV-2 und COVID-19</i> , Stand 13.11.2020, https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Steckbrief.html;jsessionid=5CF8BCE1966010CC1B50C9D2A655B172.inter-net052#doc13776792bodyText19
3	Trends in Immunology, Andrew G. Harrison, Tao Lin, Penghua Wang. <i>Mechanisms of SARS-CoV-2 Transmissions and Pathogenesis</i> . 14.10.2020, https://www.cell.com/trends/immunology/fulltext/S1471-4906(20)30233-7?returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS1471490620302337%3Fshowall%3Dtrue
4.1	World Health Organization (WHO), <i>Coronavirus disease (COVID-19): How is it transmitted?</i> , Stand 09.07.2020. https://www.who.int/news-room/q-a-detail/q-a-how-is-covid-19-transmitted
4.2	World Health Organization (WHO), <i>Transmission of SARS-CoV-2: implications for infection prevention precautions</i> , Stand 09.07.2020. https://www.who.int/news-room/commentaries/detail/transmission-of-sars-cov-2-implications-for-infection-prevention-precautions
5	Robert Koch-Institut: <i>Epidemiologischer Steckbrief zu SARS-CoV-2 und COVID-19</i> , Stand 13.11.2020, https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Steckbrief.html;jsessionid=5CF8BCE1966010CC1B50C9D2A655B172.inter-net052#doc13776792bodyText19
6.1	TU Dresden. <i>Entwicklung einer elektronischen Biosensorplattform zur schnellen und zuverlässigen Detektion von Coronaviren</i> . 2020 – 2022. https://www.medienservice.sachsen.de/medien/news/239270
6.2	Leibniz-Institut für Analytische Wissenschaften und TU Dortmund. <i>PAMONO Virensensor</i> . 04.05.2020. https://www.isas.de/files/redaktion/presse/pm/PM%202020/PM_PAMONO%20Virensensor_20200504.pdf
6.3	Guangyu Qiu, Zhibo Gai, Yile Tao, Jean Schmitt, Gerd A. Kullak-Ublick, and Jing Wang. <i>Dual-Functional Plasmonic Photothermal Biosensors for Highly Accurate Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 Detection</i> . 13.04.2020. https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acsnano.0c02439
7	Rudnick SN, Milton DK. <i>Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration</i> . 2003. <i>Indoor Air</i> 13:327-245
8	Max von Pettenkofer: <i>Über den Luftwechsel in Wohngebäuden</i> . 1858, https://reader.digitale-sammlungen.de/de/fs1/object/display/bsb10767804_00001.htm
9	Bekanntmachung des Umweltbundesamtes, Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz 11 – 2008. <i>Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft – Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden</i> . https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/kohlendioxid_2008.pdf
10	Technische Regeln für Arbeitsstätten ASR A3.6 „Lüftung“, Ausgabe: Januar 2012, https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/ASR/pdf/ASR-A3-6.pdf?blob=publicationFile
11	RECKNAGEL: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte. Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Albers Hochschule Esslingen. 79. Auflage, ITM InnoTech Medien GmbH, 2018
12	DIN EN 13779:2007-09 zurückgezogen, <i>Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlsysteme</i>
13	VDI 6040 Blatt 2:2015-09, <i>Raumlufttechnik – Schulen – Ausführungshinweise (VDI-Lüftungsregeln, VDI-Schulbaurichtlinien)</i> , Tabelle 1
14	https://www.zentrum-fuer-luft.de/
15	DIN/TS 4108-8 (Entwurf), <i>Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 8: Vermeidung von Schimmelwachstum in Wohngebäuden</i>
16	VDI 6040 Blatt 2:2015-09, <i>Raumlufttechnik – Schulen – Ausführungshinweise (VDI-Lüftungsregeln, VDI-Schulbaurichtlinien)</i>
17	Technische Hochschule Mittelhessen. <i>Stoßlüftung um ein Vielfaches wirksamer als Luftfiltergeräte</i> . 23.11.2020. https://www.thm.de/site/hochschule/campus/aktuelles/aus-lehre-und-forschung/stoessluftung-um-ein-vielfaches-wirksamer-als-luftfiltergeraete.html