



Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung

im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung



Handlungsempfehlungen für praxismgerechte Lüftungskonzepte

Fallstudien für
Fensterlüftung und
mechanische Lüftung in
Aufenthaltsräumen mit
hoher Belegdichte



IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Wissenschaftliche Begleitung

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
Referat WB 7 „Energieoptimiertes Bauen“
Dr. Olaf Böttcher
olaf.boettcher@bbr.bund.de
Bahar Saeb Gilani
bahar.saebgilani@bbr.bund.de

Auftragnehmer

MHS. Ingenieurbüro für Energie Bauphysik Projekte
Prof. Dr. Martin H. Spitzner

ITG Dresden
Christine Knaus
Prof. Dr. Thomas Hartmann

ILK Dresden
Ronny Mai
Dr. Sabine Döge
Dr. Ralph Krause

Stand

März 2022

Satz und Layout

ORCA Affairs GmbH, Berlin

Druck

Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn
Gedruckt auf Recyclingpapier

Bestellungen

WB7@bbr.bund.de; Stichwort: Praxisgerechte Lüftung

Bildnachweis

Titelbild: Gina Sanders – stock.adobe.com
Maridav – stock.adobe.com: S. 7 (links); kasto – stock.adobe.com: S. 7 (rechts); aerogondo – stock.adobe.com: S. 8;
BillionPhotos.com – stock.adobe.com: S. 10; Girts – stock.adobe.com: S. 12; Vitaliy Hrabar – stock.adobe.com: S. 17 (links);
Zdena Venclik – stock.adobe.com: S. 17 (rechts); Andrey Popov – stock.adobe.com: S. 22; Chinnapong – stock.adobe.com: S. 30;
IRStone – stock.adobe.com: S. 33; Shawn Hempel – stock.adobe.com: S. 35

Nachdruck und Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten
Nachdruck nur mit genauer Quellenangabe gestattet.
Bitte senden Sie uns zwei Belegexemplare zu.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

ISBN 978-3-98655-022-6

Bonn 2022

Handlungsempfehlungen für praxismgerechte Lüftungskonzepte

Fallstudien für Fensterlüftung und mechanische Lüftung
in Aufenthaltsräumen mit hoher Belegungsdichte

Das Projekt des Forschungsprogramms „Zukunft Bau“ wurde vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) durchgeführt.

Inhaltsverzeichnis

Vorbemerkung	7
Zusammenfassung	8
Summary	10
Grundlagen	12
Lüftungsarten	13
Leitwerte und hygienische Bewertung der CO ₂ -Konzentration in der Innenraumluft	13
Einflussgrößen mit direkter oder indirekter Auswirkung auf die Innenraumluftqualität bzw. die CO ₂ -Konzentration	15
Fallbeispiele	17
Fallbeispiele Klassenzimmer	18
Einfluss des Lüftungsverhaltens	22
Einfluss der Fensterfläche	25
Einfluss der Fensterart	27
Einfluss der Lüftungsart	28
Einfluss der Belegungsichte	30
Fallbeispiele Büroräume	32
Handlungsempfehlungen	35
Lüftungskonzept	36
Literatur	39
Anhang	40
A - Tabelle Einflussfaktoren zur Berücksichtigung in der Lüftungskonzeption	40
B - Berechnung der CO ₂ -Konzentrationen im Innenraum	41
C - Einfluss der Außenlufttemperatur	43
D - Einfluss der Querlüftung	45

Vorbemerkung

Diese Broschüre widmet sich den Grundlagen zum Thema Lüftung von Aufenthaltsräumen, insbesondere den Rahmenbedingungen und Wirkweisen praxisgerechter Fensterlüftung und hybrider Lüftung in Räumen mit erhöhter Belegungsdichte (z. B. Klassenzimmer, Mehrpersonbüros, Besprechungsräume). Sie wendet sich an alle Baubeteiligten wie Planer, Architekten und Ausführende, die die Funktionalität von Lüftungskonzepten einschätzen und bewerten möchten, aber auch an BNB-Anwender, z. B. Bauverwaltungen, BNB-Koordinatoren und Konformitätsprüfstellen. Darüber hinaus können auch Gebäudenutzer die Informationen in dieser Broschüre zur Erhaltung eines gesunden und angenehmen Arbeits- bzw. Unterrichtsumfeldes anwenden.

Anhand von Fallbeispielen wird die Wirksamkeit verschiedener Lüftungskonzepte in Räumen mit hoher Belegungsdichte untersucht. Hierzu werden u. a. Parameter

wie bspw. die Belegungsdichte, die Fenstergröße und die Fensterart in Kombination mit dem Lüftungsverhalten in einem Beispielklassenzimmer analysiert. Mit der gleichen Vorgehensweise werden auch Aussagen über zweckmäßiges Lüftungsverhalten in Büroräumen getroffen. Aus den gewonnenen Erkenntnissen werden Empfehlungen zur Verbesserung der Lüftung abgeleitet.

Zur Durchführung der Fallstudien wurde ein Excel-basiertes Tool eingesetzt. Dieses Instrument wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „Entwicklung von Handlungsempfehlungen für praxisgerechte Lüftungskonzepte und Entwicklung eines CO₂-Berechnungstools“ (Aktenzeichen 10.08.17.7-17.24) von den Auftragnehmern ITG Dresden, ILK Dresden und MHS. Ingenieurbüro für Energie, Bauphysik, Projekte entwickelt. Finanziert wurde es durch die Forschungsinitiative Zukunft Bau.





Foto: aerogondo – stock.adobe.com

Zusammenfassung

Menschen verbringen den größten Teil ihrer Lebenszeit in Innenräumen. Zahlreiche Studien weltweit zeigen, dass sich die Qualität der Innenraumluft direkt auf die Gesundheit, den Komfort und die Leistungsfähigkeit der anwesenden Personen auswirkt. Die durch das Coronavirus (COVID-19) ausgelöste Pandemie hat zusätzlich viel Aufmerksamkeit auf die richtige Belüftung von Innenräumen gelenkt, insbesondere von Räumen, in denen sich mehrere Personen gleichzeitig aufhalten. Als Indikator für die von Personen verursachten Luftbelastungen inkl. Gerüchen gilt die Kohlendioxidkonzentration (CO_2 -Konzentration) der Raumlufte. Sie wird häufig als wichtigstes Kennzeichen für die Raumluftequalität und die Wirksamkeit der Lüftung in Räumen mit hohen Belegungsdichten wie bspw. Klassenräumen oder Mehrpersonnenbüros herangezogen. Hier kommt es bei unzureichender Lüftung schnell zu einem starken Anstieg der CO_2 -Konzentration gegenüber dem natürlichen Kohlendioxidgehalt in der Außenluft, verbunden mit einem Überschreiten der hygienischen Leitwerte für gute Innenraumluftequalität.

Der Ausschuss für Innenraumrichtwerte (AIR) im Umweltbundesamt (UBA) hat Leitwerte zur hygienischen Bewertung der CO_2 -Konzentration in der Innenraumlufte festgelegt und drei Qualitätsstufen definiert: „hygienisch unbedenklich“ (unter 1.000 ppm), „hygienisch auffällig“ (1.000 bis 2.000 ppm) und „hygienisch inakzeptabel“ (über 2.000 ppm). Der Arbeitskreis Lüftung am UBA hat 2017 eine mittlere CO_2 -Konzentration von 1.000 ppm als Richtwert für alle Arten von Bildungseinrichtungen empfohlen. Dieser Richtwert bezieht sich auf die Dauer einer Nutzungseinheit, also i.d.R. eine Unterrichtsstunde an der Schule oder eine Vorlesungseinheit an der Universität. Dabei gelten kurzzeitig erhöhte CO_2 -Momentanwerte von z. B. 1.500 ppm als akzeptabel, wenn der Mittelwert von 1.000 ppm CO_2 während der Unterrichtseinheit eingehalten wird. Das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) interpretiert die UBA-Leitwerte ebenfalls nicht als Momentanwert, sondern als Mittelwert innerhalb eines Lüftungsintervalls (z. B. 45 Minuten in Unterrichtsräumen, 60 Minuten in Büroräumen).

Die grundsätzliche planerische Aufgabe ist es somit, jeweils ein auf den konkreten Fall bezogenes Lüftungskonzept zu entwickeln, das ganzjährig eine ausreichende Begrenzung oder Verminderung der CO₂-Konzentration im Innenraum während der Nutzung gewährleistet. Bei Aufenthaltsräumen, die teilweise oder ganz über Fenster gelüftet werden, besteht die besondere Herausforderung darin, dass der zur Belüftung real zur Verfügung stehende Außenluftvolumenstrom von vielen mehr oder weniger beeinflussbaren Parametern wie z. B. den klimatischen Verhältnissen abhängt. Bei hybrider Lüftung, also der Kombination von mechanischer Lüftung und Fensterlüftung, kommt vor allem die Frage hinzu, wie hoch der Anlagenluftvolumenstrom sein muss.

Die Broschüre gibt Handlungsempfehlungen im Kontext des Aufstellens solcher Lüftungskonzepte. So geht sie bspw. darauf ein, wer an der Aufstellung beteiligt sein sollte und welche Rahmenbedingungen festgelegt werden sollten. Bezüglich der von uns empfohlenen raumbezogenen Lüftungskonzepte werden die aus unserer Sicht wichtigen Bestandteile und Anforderungen benannt. Das BBSR empfiehlt das Aufstellen von Lüftungskonzepten unter Beteiligung der Fachplaner, der Bauherren und der Nutzer. Nur so können die Bedürfnisse und Anforderungen aller Beteiligten in der Planungsphase ausreichend berücksichtigt werden. Hinsichtlich der Vorgabe eines Zielwertes für die CO₂-bezogene Innenraumluftqualität schließen wir uns den Erkenntnissen des UBA an und empfehlen auch, eine hygienisch unbedenkliche CO₂-Konzentration unterhalb von 1.000 ppm als Mittelwert innerhalb eines Lüftungsintervalls anzustreben.

In Bezug auf die Funktionalität bzw. Wirksamkeit der möglichen Lüftungsarten bleibt festzustellen, dass es insbesondere im Fall der Fensterlüftung wegen der sehr vielfältigen Einflussparameter einer

sehr sorgfältigen Betrachtung bedarf. Die Praxistauglichkeit der Fensterlüftung, allein oder in Kombination mit mechanischer Lüftung, hängt stark von der angestrebten Innenraumluftqualität, den baulichen und räumlichen Gegebenheiten, den organisatorischen Möglichkeiten sowie der Raumnutzung ab. Ein Ableiten von klaren, immer erfolgreich funktionierenden Praxislösungen ist durch diese Komplexität im Grunde nicht möglich. Gleichwohl werden aus den durchgeführten Untersuchungen folgende Thesen abgeleitet, die eine erste, grundsätzliche Einschätzung der Praxistauglichkeit von Lüftungskonzepten ermöglichen sollen:

- Eine ausschließliche Fensterlüftung zur Gewährleistung einer hygienisch unbedenklichen CO₂-Konzentration ist nur sehr bedingt empfehlenswert, da ihre Funktionalität nur bei geringen Belegungsdichten (z. B. 2-Personen-Büro) und kurzen Lüftungsintervallen, also häufigem Lüften, gegeben ist. Für Klassenräume, die ggf. nur in den Pausen gelüftet werden sollen, ist eine ausschließliche Fensterlüftung nicht geeignet.
- Eine mechanische Lüftung bietet eine große planerische Sicherheit in Bezug auf das Erreichen einer gewünschten Raumluftqualität. Sie ist jedoch mit einem höheren technischen Aufwand und den damit einhergehenden Kosten verbunden.
- Eine hybride Lüftung verknüpft die Vorteile von Fensterlüftung und mechanischer Lüftung und stellt eine gute Alternative zur rein mechanischen Lüftung dar. Sie ist grundsätzlich auch gut geeignet, eine gewünschte Raumluftqualität zu erreichen. Der mechanisch geförderte Außenluftvolumenstrom zum Erreichen einer bestimmten Raumluftqualität kann gegenüber der rein mechanischen Lüftung deutlich reduziert werden – in den berechneten Fallbeispielen bspw. um etwa ein Drittel.



Foto: BillionPhotos.com – stock.adobe.com

Summary

Human beings spend the majority of their lifetime indoors. Multiple studies show that their health, comfort, and performance is directly impacted by indoor air quality. The pandemic caused by the novel coronavirus (COVID-19) has drawn further attention to the proper ventilation of indoor spaces; especially spaces where several people are present at the same time. The carbon dioxide concentration (CO₂ concentration) of indoor air is considered as an indicator of the air pollution caused by present people, including odors. It is often used as the most important measure for indoor air quality and the effectiveness of ventilation in highly occupied rooms, such as classrooms or multi-person offices. In such spaces, insufficient ventilation quickly leads to a sharp increase of the CO₂ concentration, compared to the natural carbon dioxide content of the outside air and consequently an exceeding of the hygienic guideline levels for good indoor air quality.

The German Committee on Indoor Air Guide Values (AIR) at the UBA, established guideline values for the hygienic evaluation of CO₂ concentration in indoor air and defined three quality levels based on these guideline values; „hygienically harmless“ (CO₂ concentration < 1.000 ppm), „hygienically conspicuous“ (CO₂ concentration < 2.000 ppm) and „hygienically unacceptable“ (CO₂ concentration > 2.000 ppm). In 2017, the working group on ventilation at UBA recommended a CO₂ concentration of 1.000 ppm in the indoor air as a mean value over the duration of a session (in schools usually one lesson, at universities one lecture unit) as a guideline for all types of educational institutions. In this context, briefly elevated sporadic CO₂ concentration values of, for example, 1.500 ppm are considered acceptable if the average value of 1.000 ppm is maintained during the session. The Assessment System for Sustainable Building also interprets the

UBA guideline values not in terms of peak values, but as mean values within a ventilation interval (e.g. 45 minutes in classrooms, 60 minutes in offices).

The fundamental planning task is thus to develop an individual ventilation concept for each specific case, ensuring sufficient year-round limitation or reduction of indoor CO₂ concentration during use. In the case of densely occupied rooms that are partially or completely ventilated by means of windows, the particular challenge is that the outdoor air flow rate available for ventilation depends on several parameters, some of which may not be influenced, such as predominant climatic conditions. In the case of hybrid ventilation, i. e. the combination of mechanical ventilation and natural ventilation, there is the additional issue of determining correctly the necessary air volume flow of the mechanical systems.

This brochure provides recommendations for action in the context of developing such ventilation concepts. For example, it discusses who should be involved in the development of the concept and the definition of its framework. With regard to the recommended room-related ventilation concepts BBSR aims to specify the key aspects and requirements from our point of view. We recommend drawing up ventilation concepts with the participation of specialist planners, building owners and occupants/users. This way, all relevant needs and requirements of the concerned parties may be adequately taken into account during the planning phase. Regarding the specification of a target value for CO₂ concentration, in compliance with the findings of the UBA we also recommend aiming for a hygienically safe CO₂ concentration below 1.000 ppm as an average value within a ventilation interval.

With regard to functionality and effectiveness of different types of ventilation it should be noted that careful consideration is required, particularly

in the case of natural ventilation and its several different kinds of influencing parameters. The practical suitability of natural ventilation, by itself or in combination with mechanical ventilation, depends strongly on the desired indoor air quality, the structural and spatial conditions, the organizational aspects and the actual usage of the room. Due to this level of complexity, it is not possible to determine clear-cut practical solutions that work successfully at any given instant. Nevertheless, the following conclusions, drawn from the investigations carried out, may provide an initial, basic assessment of the practical suitability of ventilation concepts:

- Exclusive natural ventilation by means of windows to ensure a hygienically safe CO₂ concentration is only recommended to a very limited extent, as is only effective at low occupancy rates (e. g. 2-person office) and short ventilation intervals, i. e. frequent ventilation. For classrooms which may only be ventilated during breaks, natural ventilation as an only means of ventilation is not suitable.
- Mechanical ventilation offers high reliability in terms of achieving a desired indoor air quality. However, along with it come higher technical requirements and equipment usage, which come at a cost.
- Hybrid ventilation combines the advantages of window ventilation and mechanical ventilation; it is a good alternative to mechanical ventilation. In general, it is also well suited for achieving the desired indoor air quality. The necessary volume of mechanically moved outdoor air in order to achieve a certain indoor air quality may be significantly reduced compared to purely mechanical ventilation – in the exemplary case studies presented here by about one third.



Foto: Girts – stock.adobe.com

Grundlagen

Die vom Menschen abgegebenen CO_2 -Emissionen sind ein wichtiger Faktor für die Raumluftqualität. Für diese wird daher die CO_2 -Konzentration als Indikator genutzt. Sie beschreibt die Exposition einer Person gegenüber der durch sie selbst und andere Personen verursachten Luftbelastung. Da Menschen heutzutage den größten Teil ihrer Lebenszeit in Innenräumen verbringen, ist eine gute Luftqualität in diesen Räumen besonders wichtig, denn sie hat nachweisbare Auswirkungen auf den Komfort, die Leistungsfähigkeit und die Gesundheit, wie zahlreiche Studien aus der ganzen Welt belegen. Ebenfalls Einfluss auf die Raumluftqualität haben Stoffemissionen von Baumaterialien und Einrichtungsgegenständen. Im Hinblick auf diese Einflussgruppe werden die sogenannten TVOC (engl.: Total Volatile Organic Compounds, deutsch: Summe

der flüchtigen organischen Verbindungen) verwendet. Der Gehalt an CO_2 ist nicht mit dem Gehalt an TVOC in der Raumluft verknüpft. Beide steigen allerdings, wenn CO_2 und VOC im Raum freigesetzt werden, und müssen dann durch Lüften wieder reduziert werden.

Beim Lüften wird die Raumluft durch frische Außenluft teilweise oder ganz ersetzt. Es ist wichtig, das gewählte Lüftungskonzept bereits in einer frühen Phase des Planungsprozesses eines Gebäudes zu integrieren. Das Lüftungssystem beeinflusst nämlich das Gebäudedesign selbst, insbesondere, wenn auf Fensterlüftung gesetzt wird. Fehler im Design wirken sich auf die Funktionalität des Lüftungskonzeptes und damit auch direkt auf die Gesundheit, die Produktivität und den Komfort der Gebäudenutzer aus.

Sie können auch die Lebensdauer und die Kosten des Gebäudes beeinträchtigen.

Im Rahmen dieser Broschüre werden ausschließlich die durch Personen verursachten Emissionen – also die CO₂-Konzentration im Innenraum – als Indikator betrachtet.

Lüftungsarten

Für die Belüftung von Innenräumen stehen grundsätzlich folgende drei Lüftungsarten zur Auswahl:

- Fensterlüftung (freie Lüftung): Lüftung über hand- oder motorbetätigte Fenster
- mechanische Lüftung: Luftförderung mittels Ventilator(en), Öffnen der Fenster zum Lüften ist nicht erforderlich
- hybride Lüftung: gesteuerte Kombination aus Fensterlüftung und mechanischer Lüftung

Bei allen drei Lüftungsarten kann die CO₂-Konzentration der Raumluft mittels Sensoren gemessen und überwacht werden, um so grundsätzlich die Möglichkeit zu haben, auf den tatsächlichen Lüftungsbedarf zu reagieren. Bei Fensterlüftung und hybrider Lüftung bietet sich hierfür als einfaches Instrument z. B. eine sogenannte Lüftungsampel an, welche bei unerwünscht hohen CO₂-Werten die Raumnutzer über optische Signale zum Handeln wie bspw. zum zusätzlichen Fensteröffnen auffordert. Die mechanische Lüftung geht mit entsprechendem Geräte- und Steuerungsaufwand einher. Die Konzeptionierung von Lüftungsanlagen erfordert eine Fachplanung. Bei der mechanischen Lüftung wird die Einhaltung der Luftqualitätskriterien über die Auslegung und einen planungsgemäßen Betrieb sichergestellt. Auch die hybride Lüftung erfordert Fachplanung und bringt einen gewissen Geräte- und Steuerungsaufwand mit sich,

der jedoch geringer ausfällt als bei der rein mechanischen Lüftung. Als Kombination aus Fensterlüftung und mechanischer Lüftung kann sie gegenüber einer rein mechanischen Lüftungsanlage bei geringerem Investitionsaufwand eine ausreichende Raumlufthygiene sicherstellen. Andererseits ist die hybride Lüftung empfehlenswert, wenn reine Fensterlüftung oder organisatorische Maßnahmen nicht genügen, um eine ausreichende Raumlufthygiene zu garantieren. Wesentlicher Vorteil einer hybriden Lüftung gegenüber der Fensterlüftung ist, dass dem Raum während der Nutzungszeiten kontinuierlich Außenluft zugeführt wird, ohne dass dafür Fenster geöffnet werden müssen. Damit erfolgt eine kontrollierte Außenluftzufuhr unabhängig von etwaiger akustischer Belastung bei hohem Außenlärm und ohne Sicherheitsbedenken bezüglich offener Fenster. Der anlagentechnische Teil bietet zudem die Möglichkeiten einer zugscheinungsfreien Lufteinbringung und der Nutzung von Wärmerückgewinnung zur Energieeinsparung.

Leitwerte und hygienische Bewertung der CO₂-Konzentration in der Innenraumluft

Die Literaturangaben zu gemessenen typischen Spannen und Maximalwerten für die CO₂-Konzentration in fenstergelüfteten Räumen schwanken stark, für Unterrichtsräume sind Werte „von über 2.000 ppm bis in den Bereich von 5.000 ppm nicht selten“ (UBA 2008).

Der Ausschuss für Innenraumrichtwerte (AIR) im Umweltbundesamt (UBA) hat sogenannte Leitwerte zur hygienischen Bewertung der CO₂-Konzentration in der Innenraumluft festgelegt und definiert anhand dieser Leitwerte die Stufen „hygienisch unbedenklich“, „hygienisch auffällig“ und „hygienisch inakzeptabel“ (UBA 2021: 1) (s. Tabelle 1).

Tabelle 1:
Leitwerte und hygienische Bewertung der CO₂-Konzentration in der Innenraumluft (UBA 2008)

CO ₂ -Konzentration	Hygienische Bewertung	Empfehlungen
< 1.000 ppm	Hygienisch unbedenklich	Keine weiteren Maßnahmen
1.000 – 2.000 ppm	Hygienisch auffällig	Lüftungsmaßnahme (Außenvolumenstrom bzw. Luftwechsel erhöhen) Lüftungsverhalten überprüfen und verbessern
> 2.000 ppm	Hygienisch inakzeptabel	Belüftbarkeit des Raumes und ggf. weitergehende Maßnahmen prüfen

Quelle: UBA 2008

Die vom UBA bekanntgegebenen Leitwerte beziehen sich auf die aktuell vorliegende CO₂-Konzentration der Innenraumluft (sog. Momentanwert). Diese Leitwerte sind gesundheitlich-hygienisch abgeleitet, sie sind jedoch keine toxikologisch begründeten Richtwerte oder gar Grenzwerte. Hierzu heißt es in der UBA-Bekanntmachung: „Gesundheitlich-hygienische Leitwerte sind systematisch entwickelte Hilfen zur Entscheidungsfindung über eine angemessene Vorgehensweise bei speziellen gesundheitlichen oder hygienischen Problemen. Sie sind eine Orientierungshilfe im Sinne von Handlungswerten und Entscheidungsoptionen, von denen nur in begründeten Fällen abgewichen werden sollte. Die Leitwerte für Kohlendioxid in der Raumluft sind wissenschaftlich begründete, praxisorientierte Handlungsempfehlungen. Leitwerte begrenzen einen Konzentrationsbereich (...) in der Innenraumluft, für den systematische praktische Erfahrungen vorliegen, dass mit steigender Konzentration die Wahrscheinlichkeit für Beschwerden und nachteilige gesundheitliche Auswirkungen zunimmt...“ (UBA 2008).

Die vorgenannten Leitwerte bilden die Basis für die Formulierung von Anforderungen oder die Bewertung der CO₂-Konzentration in Innenräumen bspw. in der Arbeitsstättenrichtlinie ASR A3.6 (BAuA 2018) oder im Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). Auch die Empfehlungen des Arbeitskreises Lüftung am UBA zu Lüftungskonzeptionen in Ge-

bäuden (Teil I: Bildungseinrichtungen) (UBA 2017) beziehen sich auf diese Leitwerte. Dort heißt es: „Für alle Arten von Bildungseinrichtungen gilt als Richtwert eine CO₂-Konzentration der Innenraumluft als Mittelwert von 1.000 ppm über die Dauer einer Nutzungseinheit (in Schulen i. d. R. eine Schulunterrichtsstunde, an Universitäten eine Vorlesungseinheit). Kurzzeitig erhöhte CO₂-Momentanwerte von z. B. 1.500 ppm sind akzeptabel, wenn der Mittelwert von 1.000 ppm CO₂ während der Unterrichtseinheit eingehalten wird.“

Sowohl im BNB-System als auch bei den Ausführungen des Arbeitskreises Lüftung wird nicht der Momentanwert der CO₂-Konzentration in Bezug genommen, sondern deren Mittelwert im jeweiligen Betrachtungszeitraum. Gleichwohl dürfte im praktischen Betrieb auch ein mittlerer CO₂-Gehalt von 1.000 ppm in vielen Objekten mit der derzeitigen Nutzung, Ausstattung und Lüftungsstrategie trotzdem nicht eingehalten werden, u. a. aus Komfortgründen (so ist z. B. im Winter Dauerlüften aus Behaglichkeitsgründen nicht möglich). Bei Überschreitung von 2.000 ppm muss nach UBA 2017 gelüftet werden. Wenn auch dieser Wert nicht haltbar oder die Lüftung nicht durchführbar ist, dann sind weitergehende Maßnahmen erforderlich. Diese können organisatorisch, lüftungstechnisch und/oder baulich sein.

Seit 2013 liegen im Rahmen des BNB konkrete Bewertungsansätze zur Innenraum-

Tabelle 2:

Übersicht der Kategorien, entsprechend den CO₂-Konzentrationen und des personenbezogenen Außenluftvolumenstroms, BNB-Kriteriensteckbrief 3.1.3 bzw. DIN EN 16798-1 2022

BNB-Bewertung nach BNB-Kriteriensteckbrief 3.1.3			DIN EN 16798-1 2022	
Kategorie	CO ₂ -Konzentration in der Innenraumluft (bei Außenluft mit 400 ppm) / Mittelwert des Zeitintervalls (45 min), in ppm	Personenbezogener Außenluftvolumenstrom, in m ³ /h/Person	Kategorie	CO ₂ -Konzentration oberhalb der Konzentration in Außenluft, in ppm
IDA 1	≤ 800	≥ 54	I	350
IDA 2	≤ 1.000	≥ 36	II	550
IDA 3	≤ 1.400	≥ 21,6 (BNB-Zertifizierung bedingt möglich)	III	900
IDA 4	> 1.400 (keine BNB-Zertifizierung möglich)	< 21,6 (keine BNB-Zertifizierung möglich)	IV	1.350

Quelle: BBSR 2022

lufthygiene vor. Die Bewertung nach dem BNB-Kriteriensteckbrief 3.1.3 „Innenraumlufthygiene“ (BMWSB 2017) interpretiert die Leitwerte als Mittelwerte innerhalb eines betrachteten Lüftungsintervalls (45 Minuten in Unterrichtsräumen und 60 Minuten in Büros und Besprechungsräumen). Unter Bezugnahme auf die DIN EN 13779 2007 kann alternativ zur CO₂-Konzentration auch der personenbezogene Außenluftvolumenstrom für die Bewertung der Innenraumlufthqualität herangezogen werden. Die vorgenannte Norm wurde inzwischen durch die DIN EN 16798-1 2022 ersetzt. Diese enthält keine IDA-Klassifizierung mehr (s. Tabelle 2).

Einflussgrößen mit direkter oder indirekter Auswirkung auf die Innenraumlufthqualität bzw. die CO₂-Konzentration

Wie eingangs bereits erwähnt, wird beim Lüften die Raumluft durch Außenluft teilweise oder ganz ersetzt. Im Falle einer mechanischen Lüftung wird der in den Raum eingebrachte Außenluftvolumenstrom von der Auslegung und Betriebsweise der raumlufthtechnischen Anlage bestimmt. Bei der Fensterlüftung hängen der erzielbare Außenluftvolumenstrom und die

daraus resultierende CO₂-Konzentration von einer Vielzahl einzelner Parameter ab. Manche von ihnen beeinflussen die Innenraumlufthqualität direkt, andere wirken eher mittelbar (siehe Anhang A). Um ein hygienisches und behagliches Raumklima zu erreichen, sind alle diese Parameter und ihr Zusammenwirken im Lüftungskonzept entsprechend zu berücksichtigen.

Manche Parameter wie Wetter, CO₂-Konzentration der Außenluft und Außenlärmpegel sind weder in der Planungs- noch in der Betriebsphase beeinflussbar. Lediglich die üblichen bzw. durchschnittlichen Wetterverhältnisse sind zum Zeitpunkt der Planung im Prinzip bekannt. Die Auswirkungen konkreter Einzelergebnisse für den resultierenden Außenluftvolumenstrom bei Fensterlüftung sind eingeschränkt bzw. gar nicht vorhersagbar. Hingegen sind die mittleren Lärm-, Staub- und Geruchsbelastungen in der Umgebung ermittel- und bewertbar, so dass sie im Lüftungskonzept berücksichtigt werden können.

Einige Parameter sind Grundlage oder Gegenstand der Planung, z. B. die (angenommene) Belegung und der (angenommene) Belegungsplan als Zielgröße des Planungsauftrags. Hinzu kommen die Raumsituation, die Raumgeometrie, die

Anlagenbetrieb
Belegung
Raumgeometrie
Anlagenstellung

Belegungsplan
Lüftungsplan
Raumsituation

Blendung durch Sonne
Lärmbelastung Zugluftrisiko
Geruchsbelastung
Staubbelastung

Querlüftung
CO₂-Gehalt der Außenluft
Schachtlüftung

Wetter
Außentemperatur
Innentemperatur

Klima
Verschattung
Anzahl geöffneter Fenster
Bauart der Fenster Sonnenschutz
Fensterorientierung

Eine Auswahl von Einflussgrößen mit direkter oder indirekter Auswirkung auf die Innenraumluftqualität

Quelle: BBSR 2022

Anzahl, Größe und Bauart der öffnbaren Fenster, die Möglichkeit zur Querlüftung und bei einer hybriden oder mechanischen Lüftungsanlage die Anlagenauslegung und der (angenommene) Anlagenbetrieb.

Andere Parameter können mittels organisatorischer Maßnahmen beeinflusst werden, z. B. die Belegungsdichte des Raumes, die zeitliche Abfolge der Belegung oder die Betriebsweise der mechanischen Lüftung. Die Anlagenregelung bei hybrider und bei mechanischer Lüftung sollte bedarfsgerecht sein – entweder sensorgesteuert oder direkt beeinflussbar.

Während mechanische Lüftung weitgehend vom individuellen Nutzerverhalten abgekoppelt ist, ist die Effektivität der Fensterlüftung hiervon stark abhängig, z. B. von der Anzahl der geöffneten Fenster, Art der Fensteröffnung, der Lüftungsdauer und der Lüftungsfrequenz. Einige Parameter beeinflussen das Nutzerverhalten deutlich, wie z. B. Lärmbelastungen aus der Umgebung, Zuglufterscheinungen oder die Temperatur der einströmenden Außenluft. Kommt es z. B. zu Zuglufterscheinungen durch geöffnete Fenster, wird dies die Akzeptanz der Lüftung reduzieren und gegebenenfalls zur Schließung der Fenster führen.



Foto: Vitaliy Hrabar – stock.adobe.com (links), Zdena Venclik – stock.adobe.com (rechts)

Fallbeispiele

In diesem Abschnitt soll die Wirksamkeit von Lüftungskonzepten anhand von Fallbeispielen betrachtet werden. Wie oben bereits erwähnt, stehen für die Belüftung von Innenräumen grundsätzlich die Fensterlüftung, die mechanische Lüftung oder die hybride Lüftung zur Auswahl. Da sich das Problem einer unzureichenden Belüftung in der Praxis insbesondere bei Fensterlüftungskonzepten in Räumen mit hoher Belegungsdichte, also mit einer hohen Anzahl an Personen pro Quadratmeter Grundfläche, zeigt, wird der Fokus auf diese Fallkonstellation gelegt. Repräsentativ für hohe Belegungsdichten sind Schulen und Mehrpersonenbüros.

In den folgenden Fallbeispielen werden zum einen die Auswirkungen unterschiedlicher Lüftungskonzepte auf die CO_2 -Konzentration der Innenraumluft unter sonst gleichen Randbedingungen untersucht. Zum anderen werden aber auch die Auswirkungen verschiedener Randbedingungen auf die CO_2 -Konzentration der

Innenraumluft für ein und dasselbe Lüftungskonzept betrachtet. Die Ergebnisse lassen sich auf andere Raumnutzungsarten mit vergleichbaren Rahmenbedingungen sinngemäß übertragen.

Für die Berechnungen wurde ein Excel-basiertes Tool genutzt, das den resultierenden Außenluftvolumenstrom für verschiedene Fenstertypen und Fensteröffnungsarten ermitteln und auf Basis dieser ermittelten Werte oder vorgegebener Volumenströme minutenweise den Momentanwert der CO_2 -Konzentration im Raum für benutzerdefinierte Randbedingungen bestimmen kann. Es lässt sich somit der zeitliche Verlauf der CO_2 -Konzentration der Innenraumluft abbilden, sowohl als Momentanwert als auch in Form des Mittelwertes. Auf dieser Grundlage kann die Wirksamkeit und Zweckmäßigkeit verschiedener Lüftungskonzepte interpretiert und verglichen werden. Anhang B enthält nähere Informationen über das Tool.

Fallbeispiele Klassenzimmer

Die nachfolgend dargestellten Fallbeispiele beziehen sich aus Gründen der Vergleichbarkeit jeweils auf denselben Raum in einem Schulgebäude. Es gelten folgende Randbedingungen:

- Gebäude:
4 Geschosse
5.000 m² Gebäudefläche
normale Lage (mittlere Abschirmung durch Nachbarbebauung)
Luftdichtheit $n_{50} = 1 \text{ h}^{-1}$
(Druckexponent 0,67)
- Raumgeometrie:
L x B x H = 10 m x 7 m x 3 m
Grundfläche 70 m²
Raumvolumen 210 m³
- Außenfassade:
alle Fenster an einer Fassade
(Fassadenfläche 30 m²)
Fensterflächenanteil 30 %
- Fenster:
6 Dreh-/Kipp-Fenster
B x H = 1,20 m x 1,25 m
Brüstungshöhe 0,90 m
- Innenklima:
Temperatur 20 °C
- Außenklima:
Temperatur 13 °C
meteorologische Windgeschwindigkeit 3 m/s
CO₂-Konzentration 400 ppm
- Belegung:
27 Schüler und 1 Lehrer
Belegungsichte 2,5 m² pro Person
Kohlendioxid-Emission: 20 l/h pro Person

Es wird angenommen, dass zu Beginn der ersten Unterrichtsstunde eine Raumluftqualität vorliegt, die den mittleren Außenluftverhältnissen (CO₂-Konzentration 400 ppm) entspricht. Hierzu bedarf es einer ausreichenden Lüftung vor Unterrichtsbeginn, also ohne Anwesenheit von Raumnutzern. Die Fensterlüftung wurde im Referenzfall auf die Pausen beschränkt, um etwaige Störungen des Unterrichts

durch ein Fensteröffnen bzw. -schließen zu vermeiden und die thermische Behaglichkeit, auch bei für die Übergangszeit typischen Außentemperaturen, zu gewährleisten. Die Drehflügel der Fenster werden in den Pausen nicht voll geöffnet, sofern sich Schüler im Raum befinden. Die Öffnungsweite beträgt 14 cm. Das Tagesprofil der Raumnutzung im Referenzfall wurde wie folgt festgelegt:

Tabelle 3:
Tagesprofil Klassenzimmer – Referenzfall

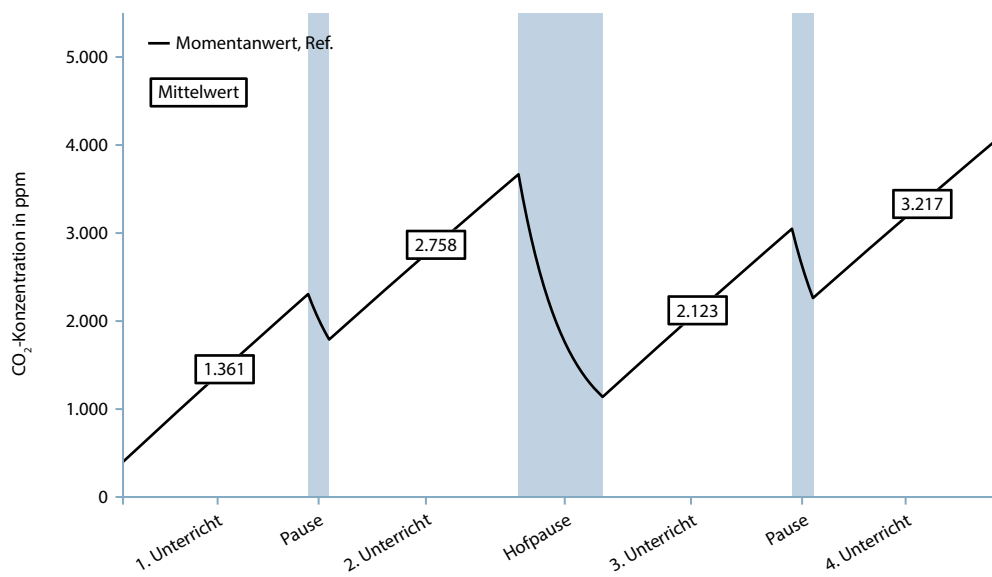
Beginn	Nutzung	Belegung*	Fensteröffnung
1 08:00–08:45 Uhr	1. Unterrichtsstunde	100 %	Keine
2 08:45–08:50 Uhr	5-Min. Pause	100 %	Alle Fenster mit 14 cm geöffnetem Drehflügel
3 08:50–09:35 Uhr	2. Unterrichtsstunde	100 %	Keine
4 09:35–09:55 Uhr	20-Min. Hofpause	50 %	Alle Fenster mit 14 cm geöffnetem Drehflügel
5 09:50–10:40 Uhr	3. Unterrichtsstunde	100 %	Keine
6 10:40–10:45 Uhr	5-Min. Pause	100 %	Alle Fenster mit 14 cm geöffnetem Drehflügel
7 10:45–11:30 Uhr	4. Unterrichtsstunde	100 %	Keine
8 11:30–12:00 Uhr	30-Min. Mittagspause	0 %	Fenster vollgeöffnet

* 100 % Belegung = alle Personen anwesend; 50 % Belegung = 13 Schüler + Lehrkraft anwesend

Quelle: BBSR 2022

Abbildung 1:

Verlauf der CO₂-Konzentration bei Fensterlüftung während der Pausen – Referenzfall



Quelle: BBSR 2022

Abbildung 1 zeigt für den Referenzfall den Verlauf der CO₂-Konzentration. Die durchgezogene Linie bildet den Momentanwert ab. Für jede Unterrichtsstunde wird zudem der zeitlich gewichtete Mittelwert aufgezeigt.

Während des Unterrichtes (bei geschlossenen Fenstern) steigt die CO₂-Konzentration in der ersten Schulstunde stark an und erreicht nach ca. 25 Minuten bereits einen Wert von 1.500 ppm. Nach 45 Minuten beträgt die CO₂-Konzentration ca. 2.200 ppm im Maximum und ca. 1.360 ppm im Mittel. Diese Werte bedeuten gemäß der UBA-Leitwerte eine Raumluftqualität, die als „hygienisch unzureichend“ einzustufen ist. Auch der vom Arbeitskreis Lüftung am UBA vorgeschlagene Richtwert von 1.000 ppm CO₂ als Mittelwert während der Unterrichtseinheit wird mit dem betrachteten Lüftungskonzept nicht eingehalten. In den nachfolgenden Unterrichtsstunden ist keine Verbesserung der Luftqualität im Klassenraum erkennbar. Im Gegenteil, durch die unzureichende

Fensterlüftung in den Pausen gelingt es noch nicht einmal, das CO₂-Niveau zu Beginn der jeweiligen Unterrichtsstunde auf den Wert der Außenluftkonzentration zu bringen. Die Stunden beginnen also mit einem deutlichen höheren Ausgangswert der CO₂-Konzentration. Dies führt zu Maximalwerten in den Unterrichtsstunden, die deutlich über 2.000 ppm bis hin zu ca. 4.100 ppm liegen, also Werten, die aus Messungen in Schulen durchaus bekannt sind. Um 11:30 Uhr beginnt in unserem Tagesprofil die Mittagspause. Da während der Mittagspause in dem Referenz-Klassenzimmer niemand anwesend ist (0 % Belegung), besteht die Möglichkeit, die Luftqualität bspw. durch Stoßlüftung auf das Niveau des Tagesbeginns bzw. der Außenluftkonzentration zurückzubringen. Die Unterrichtsstunden am Nachmittag weisen analoge Konzentrationsverläufe auf. Daher zeigen die Abbildungen zu den Ergebnissen der Fallbeispiele nur die CO₂-Konzentrationsprofile für den Zeitraum zwischen 8:00 und 11:30 Uhr.

Die für den Referenzfall zugrunde gelegten Nutzungsverhältnisse mit geöffneten Fenstern (mit 14 cm geöffnetem Drehflügel) in kurzen 5- bis 20-Minuten-Pausen erweisen sich bei mittleren klimatischen Verhältnissen als ungeeignet, um die CO₂-Konzentration auf einem hygienisch unbedenklichen Niveau zu halten und damit eine geeignete Lernumgebung sicherzustellen. Der übliche Leitwert für eine CO₂-Konzentration von max. 1.000 ppm wird deutlich verfehlt. In der längeren Mittagspause (30 Minuten), insbesondere mit ganz geöffneten Fenstern und abwesenden Personen, kann wieder Außenluftqualität erreicht werden.

Das Lüftungskonzept im vorgestellten Referenzfall ist offensichtlich nicht geeignet, eine hygienisch unbedenkliche Raumluftqualität im betrachteten Klassenraum zu gewährleisten. Es stellt sich somit die Frage nach alternativen Konzepten. Hierzu wurden verschiedene Varianten betrachtet, die den nachfolgend genannten Parametern/Parametergruppen zugeordnet werden können:

- **Lüftungsverhalten**
Zum Lüftungsverhalten zählen die Dauer, die Häufigkeit und der Zeitpunkt der Fensterlüftung, aber auch die Öffnungsweite der Fenster. Die Festlegungen zu den vorgenannten Punkten gehören zu den organisatorischen Maßnahmen im Rahmen eines Lüftungskonzeptes. Da die Umsetzung der Festlegungen in der Praxis den Nutzenden obliegt, ist insbesondere ihre Zustimmung in diesen Punkten gefragt.
- **Öffnungsfläche der Fenster**
Die zur Verfügung stehende Öffnungsfläche ist ein wichtiger Parameter für

die Wirksamkeit der Fensterlüftung. Sie wird durch die Anzahl, die Größe und die Art der Fenster bestimmt. Die Festlegungen hierzu gehören zu den baulichen Maßnahmen. Da sie entwurfsrelevant sind, ist hier natürlich insbesondere die Architektin oder der Architekt gefragt.

- **Lüftungsart**
Bei der Entwicklung eines Vorschlags für die zukünftige Lüftungsart (Fensterlüftung, mechanische Lüftung, hybride Lüftung) sind sowohl organisatorische als auch bauliche Aspekte zu berücksichtigen. Somit sind mindestens Architektin/Architekt, TGA-Planerin/TGA-Planer und Nutzende an der Entscheidung zu beteiligen.

Neben den vorgenannten Parametern wurden bei den Variantenbetrachtungen auch Änderungen bei der Außentemperatur und der Belegungsdichte sowie der Effekt einer Querlüftung betrachtet. Tabelle 4 zeigt die Liste der untersuchten Varianten für das Klassenzimmer.

Tabelle 4:

Die Liste der untersuchten Varianten für das Klassenzimmer

Parameter/Maßnahme/Einflussgröße	Varianten
Lüftungsverhalten (Fensteröffnung)	<p>Referenzfall: Nur in den Pausen alle Fenster mit 14 cm geöffnetem Drehflügel</p> <p>Nur in den Pausen alle Fenster mit ganz geöffnetem Drehflügel</p> <p>Während der Unterrichtsstunden 4 von 6 Fenstern mit 14 cm geöffnetem Drehflügel</p> <p>In den kurzen Pausen 5 Minuten alle Fenster mit ganz geöffnetem Drehflügel</p> <p>In der Hofpause alle Fenster mit 14 cm geöffnetem Drehflügel</p> <p>Nach 19 Minuten Unterricht 7 Minuten alle Fenster mit ganz geöffnetem Drehflügel</p> <p>In den kurzen Pausen 5 Minuten alle Fenster mit ganz geöffnetem Drehflügel</p> <p>In der Hofpause 5 Minuten alle Fenster mit ganz geöffnetem Drehflügel + 15 Minuten mit 14 cm geöffnetem Drehflügel</p>
Fensterfläche (Verhältnis zwischen der Fensterfläche und der Außenwandfläche)	<p>Referenzfall: 30 %</p> <p>50 %</p> <p>70 %</p>
Fensterart	<p>Referenzfall: Dreh-/Kippfenster</p> <p>Schwingfenster</p> <p>Lamellenfenster</p>
Lüftungsart	<p>Mechanische Lüftung</p> <p>Kontinuierliche Lüftung mit 36 m³/h Volumenstrom</p> <p>Hybride Lüftung</p> <p>Mechanische Lüftung mit 36 m³/h Volumenstrom, kombiniert mit 14 cm geöffnetem Drehflügel in langen Pausen</p> <p>Hybride Lüftung</p> <p>Mechanische Lüftung mit 23 m³/h Volumenstrom, kombiniert mit 5-minütiger Stoßlüftung in kurzen Pausen und 14 cm geöffnetem Drehflügel in langen Pausen</p>
Belegungsdichte	7 bis 27 Schülerinnen und Schüler und eine Lehrkraft
Außentemperatur (Anhang)	<p>Referenzfall: Übergangszeit (13 °C)</p> <p>Winter (0 °C)</p> <p>Sommer (26 °C)</p>
Querlüftung (Anhang)	Fensterlüftung über Fenster in zwei gegenüberliegenden Fassaden

Quelle: BBSR 2022



Foto: Andrey Popov – stock.adobe.com

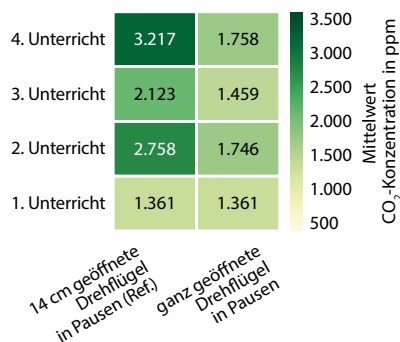
Einfluss des Lüftungsverhaltens

Das Lüftungsverhalten in den vorliegenden Versuchsvarianten sagt aus, wie weit, wie oft und wie lange die Raumnutzer die Fenster im Laufe eines Schultages öffnen. In der ersten Variante zum Lüftungsverhalten wird die Fensterlüftung weiterhin auf die Pausenzeiten beschränkt. Allerdings soll nun – trotz Anwesenheit von Schülerinnen und Schülern im Raum – eine volle Öffnung der Drehflügel gestattet werden. Der Unfallschutz ist in diesem Fall durch andere geeignete Maßnahmen zu gewährleisten.

In der Hofpause wird eine Fensterlüftung unterstellt, die dazu führt, dass zu Beginn der nachfolgenden Unterrichtsstunde eine optimale CO₂-Konzentration im Klassenraum erreicht wird. Dies ist grundsätzlich sowohl durch Stoßlüftung als auch durch dauerhaftes Lüften über ein Ankippen oder eine reduzierte Drehöffnung der Fenster möglich. Die erreichbare CO₂-Konzentra-

tion im Innenraum liegt jedoch in jedem Fall über dem CO₂-Gehalt der Außenluft von 400 ppm. In Abbildung 3 werden die CO₂-Konzentrationsprofile für die ersten vier Unterrichtseinheiten für den untersuchten Fall und den Referenzfall verglichen. Es ist zu erkennen, dass die CO₂-Konzentration durch das Lüften mit weit geöffneten Fenstern während der kurzen Pausen im Vergleich zum Referenzfall deutlich gesenkt werden konnte, aber trotzdem immer noch deutlich von einer zufriedenstellenden bzw. hygienisch akzeptablen Raumluftqualität entfernt ist. Daraus lässt sich für unseren betrachteten Fall schließen, dass eine Fensterlüftung ausschließlich in den Pausen nicht ausreicht, um die gewünschte Raumluftqualität zu erhalten. Dieses Ergebnis bestätigt auch eine Kernbotschaft des Arbeitskreises Lüftung beim UBA. Für eine weitere Verbesserung der Luftqualität ist demnach eine Fensterlüftung auch während der Unterrichtsstunden erforderlich. Für die

Abbildung 2:
Mittlere CO₂-Konzentration während der Unterrichtsstunden – Einfluss der Stoßlüftung in den kurzen Pausen

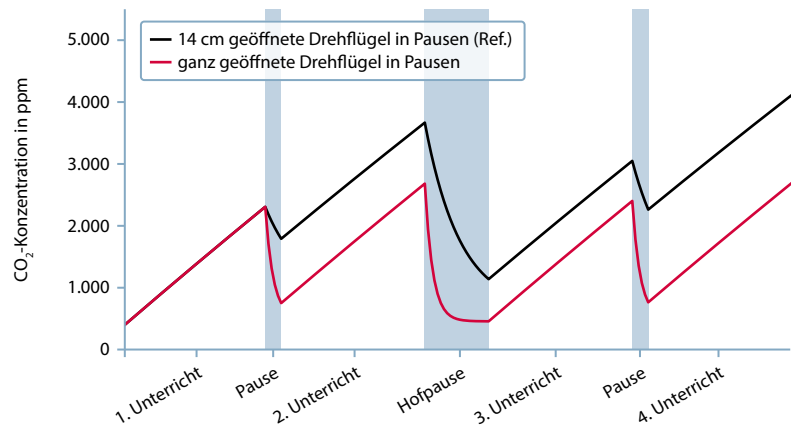


Quelle: BBSR 2022

Fensterlüftung während der Unterrichtszeit sind grundsätzlich sowohl eine kontinuierliche (Dauerlüftung) als auch eine kurzfristige Fensteröffnung (Stoßlüftung) denkbar. Beide Fälle werden im Folgenden betrachtet.

Für den Fall mit kurzfristigen Fensteröffnungen stellt sich die Frage nach der erforderlichen Häufigkeit einer Stoßlüftung. Das UBA hat sich bereits seit Jahren dem Thema der lufthygienischen Probleme in Schulen gewidmet und entsprechende Leitfäden erarbeitet, die auch fortlaufend aktualisiert werden. In Bezug auf die Coronavirus-Pandemie (COVID-19) soll die Raumluft nach Empfehlungen des UBA dreimal pro Stunde komplett gegen Frischluft von außen ausgetauscht werden. Entsprechend dieser Empfehlung sollen die Klassenräume regelmäßig mindestens alle 20 Minuten bei weit geöffneten Fenstern gelüftet werden. Die vorgeschlagene Dauer der Belüftung hängt

Abbildung 3:
Verlauf der momentanen CO₂-Konzentration – Einfluss der Stoßlüftung in den kurzen Pausen



Quelle: BBSR 2022

von der Außentemperatur ab und variiert zwischen 3 bis 5 Minuten im Winter und 10 bis 20 Minuten im Sommer.

Ein dreimaliges Lüften pro Stunde scheint im Zusammenhang mit dem Coronavirus geboten und wird nicht in Frage gestellt. Es stellt jedoch einen deutlichen Eingriff in den Unterrichtsablauf dar, der aus Sicht der reinen CO₂-Konzentrationsbegrenzung ggf. so nicht erforderlich ist. Um den organisatorischen Aufwand bei der Stoßlüftung zu begrenzen, wurde daher versucht, die Anzahl an Lüftungsvorgängen zu minimieren und auf einen Lüftungsvorgang während des Unterrichtes zu begrenzen. Zusätzliche Lüftungsvorgänge verbessern die Luftqualität und können durch andere Stofflasten wie bspw. das Coronavirus begründet sein. Die Empfehlungen zur Lüftungsdauer wurden übernommen. Das untersuchte Lüftungsregime für diese Variantenbetrachtung ist in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5:
Untersuchungsvarianten für die Fensterlüftung während der Unterrichtsstunden und in den Pausen

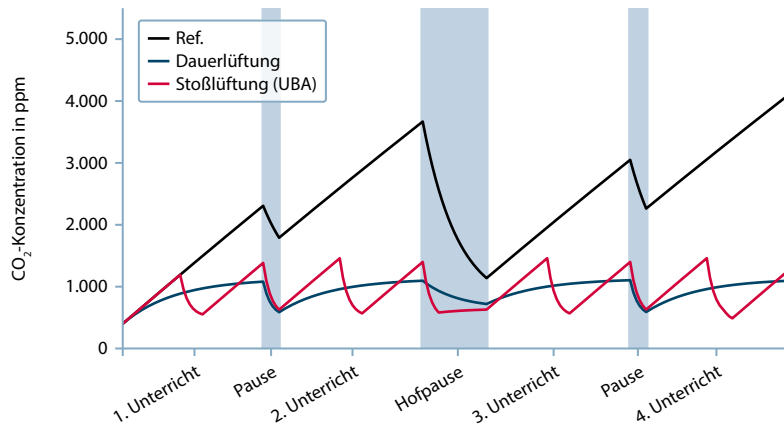
	Dauerlüftung	Stoßlüftung (Empfehlung AK Lüftung UBA)
Während des Unterrichtes	4 von 6 Fenstern mit 14 cm geöffnetem Drehflügel	6 Fenster 7 Minuten Stoßlüftung nach 19 Minuten Unterricht
Kurze Pausen	5 Minuten Stoßlüftung	5 Minuten Stoßlüftung
Hofpause	6 Fenster 14 cm geöffneter Drehflügel	6 Fenster 5 Minuten Stoßlüftung + 15 Minuten mit 14 cm geöffnetem Drehflügel

Quelle: BBSR 2022

In beiden untersuchten Fällen gelingt es durch das zusätzliche Lüften während des Unterrichtes, die durchschnittliche CO₂-Konzentration in den Unterrichtsstunden auf nahezu 1.000 ppm zu senken (s. Abbildung 4). Mit (ausschließlichem) Blick auf die Luftqualität sind damit beide untersuchten Konzepte grundsätzlich geeignet, die angestrebte

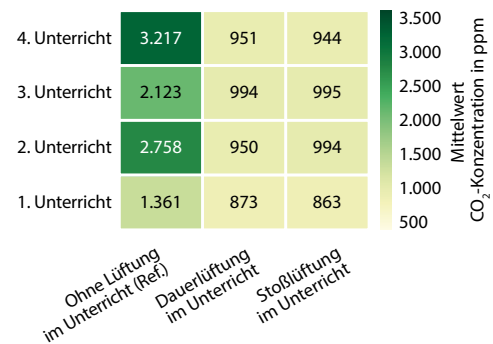
Raumluftqualität zu liefern. Allerdings ist es bspw. aus Gründen des thermischen Komforts, des Schallschutzes oder aus organisatorischen Gründen in der Praxis nicht immer möglich, einen (auch kleinen) Teil der Fenster während des Unterrichtes zu öffnen. Daher muss auch die Umsetzbarkeit dieser Lüftungskonzepte im Einzelfall geprüft werden.

Abbildung 4:
Verlauf der momentanen CO₂-Konzentration – Einfluss der Fensterlüftung während der Unterrichtsstunden



Quelle: BBSR 2022

Abbildung 5:
Mittlere CO₂-Konzentration während der Unterrichtsstunden – Einfluss der Fensterlüftung während der Unterrichtsstunden



Quelle: BBSR 2022

Das Lüftungsverhalten der Raumnutzer ist der Schlüsselfaktor für eine erfolgreiche Fensterlüftung. Durch Fensterlüftung nur in den Pausen, selbst wenn alle Fenster voll geöffnet sind, ist eine Senkung der durchschnittlichen CO₂-Konzentration auf 1.000 ppm in unserem Fallbeispiel nicht zu realisieren. Ist Fensterlüftung nicht nur in den Pausen, sondern auch während der Unterrichtsstunden möglich, so kann der angestrebte Leitwert von 1.000 ppm sowohl durch eine kontinuierliche als auch durch eine punktuelle Fensteröffnung eingehalten werden.

Einfluss der Fensterfläche

Eine andere Möglichkeit, die Fensterlüftung und damit die Luftqualität während des Unterrichtes gegenüber dem Referenzfall zu verbessern, liegt in der Vergrößerung der zur Verfügung stehenden Fensteröffnungsfläche. Im Referenzfall beträgt der Fensteranteil an der Außenfassade 30 %. Idealisiert ist dies in unseren Untersuchungen gleichzeitig die Fensterfläche, die geöffnet werden kann. In Abhängigkeit von architektonischen und funktionellen Erwägungen kann dieser Anteil variiert werden. Wir haben für unsere Variantenbetrachtung öffentbare Fensterflächenanteile von 30 %, 50 % und 70 % gewählt. Da der variierte öffentbare Fensterflächenanteil sich auch mit einem veränderten Lüftungsverhalten verbinden lässt, werden folgende Szenarien separat betrachtet:

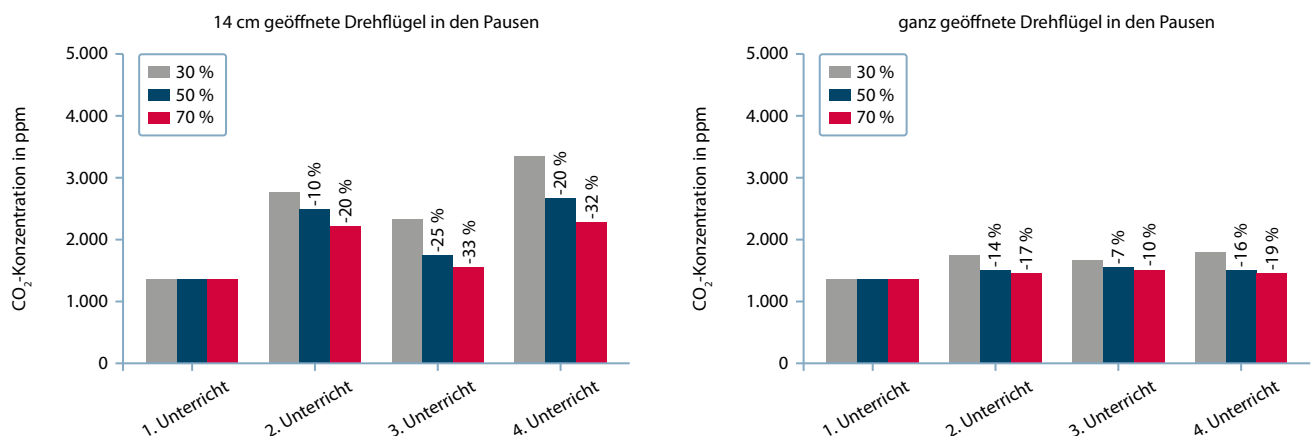
a) Die Nutzer öffnen alle Drehflügel in jeder Pause mit einer Weite von 14 cm.

b) Die Nutzer führen Stoßlüftung mit vollgeöffneten Fenstern in jeder Pause für 5 Minuten durch.

Abbildung 6 zeigt, dass der öffentbare Fensterflächenanteil bei unverändertem Lüftungsverhalten, also mit einer begrenzten Öffnungsweite der Drehflügel auf einen Spalt von 14 cm, einen deutlichen Einfluss auf den resultierenden Außenluftvolumenstrom und damit die Raumluftqualität hat. Die mittleren CO₂-Konzentrationen sinken in unserem Fall beim größten untersuchten Fensterflächenanteil um bis zu 33 %. Beim mittleren Fensterflächenanteil sind es immerhin noch bis zu 25 %. Die angestrebte Luftqualität von durchschnittlich 1.000 ppm während des Unterrichtes wird jedoch in keinem der betrachteten Fälle erreicht (s. Abbildung 7).

Abbildung 6:

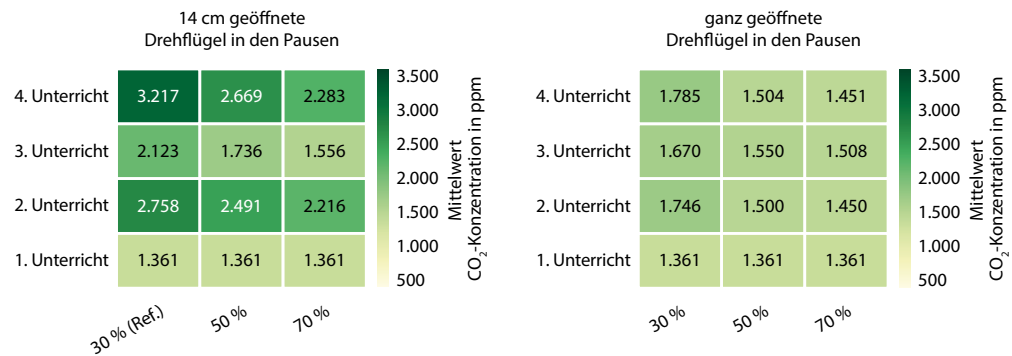
Vergleich der mittleren CO₂-Konzentration – Einfluss des Fensterflächenanteils in Kombination mit dem Lüftungsverhalten



Quelle: BBSR 2022

Abbildung 7:

Mittlere CO₂-Konzentration während der Unterrichtsstunden – Einfluss des Fensterflächenanteils in Kombination mit dem Lüftungsverhalten



Quelle: BBSR 2022

Die Vergrößerung der Fensteröffnungsfläche hat auch einen positiven Einfluss auf die Effektivität der Stoßlüftung. Die mittlere CO₂-Konzentration reduziert sich mit ganz geöffneten Fenstern in allen Pausen weiter auf maximal ca. 1.500 ppm. Der Leitwert von 1.000 ppm wird in unserem Fall jedoch auch in dieser Variante nicht erreicht.

Abbildung 6 beinhaltet noch einen weiteren interessanten Aspekt. Betrachtet man die prozentualen Veränderungen in den Diagrammen, so fällt auf, dass sich die größeren Fensterflächen bei der Fensterlüftung mit vollgeöffneten Fenstern (Stoßlüftung) weniger stark auf die Verbesserung der CO₂-Konzentration auswirken. In den untersuchten Fällen der Stoßlüftung wird die minimal mög-

liche CO₂-Konzentration im Innenraum von 400 ppm – entspricht dem CO₂-Gehalt in der Außenluft – bereits bei einer Fensteröffnungsfläche von 50 % und einer Lüftungsdauer von 5 Minuten erreicht. Eine weitere Vergrößerung der Fensteröffnungsfläche hat somit bei gleicher Lüftungsdauer keinen zusätzlichen positiven Effekt auf die Innenraumluftqualität. Die größere Öffnungsfläche bietet lediglich die Möglichkeit, die Lüftungsdauer ohne negative Auswirkung für die Raumluftqualität zu reduzieren. Gegebenenfalls hilft dies dabei, Probleme bei der Gewährleistung des thermischen Komforts zu lösen. Das zeigt, dass mit der Vergrößerung der Fensterfläche ggf. ein Punkt erreicht wird, ab dem das Potenzial zur Verbesserung der CO₂-Konzentration durch diese Maßnahme ausgeschöpft ist.

Ein größerer Fensteröffnungsflächenanteil führt zu einem besseren Luftaustausch und kann damit die CO₂-Konzentration im Innenraum deutlich reduzieren. Es kann jedoch ein Punkt erreicht werden, ab dem keine weitere Verbesserung der Lüftungseffektivität möglich ist. Der bessere Luftaustausch kann ggf. für eine kürzere Lüftungsdauer, also für ein verändertes Lüftungsverhalten genutzt werden, um so etwaige Vorteile beim thermischen Komfort zu erzielen.

Einfluss der Fensterart

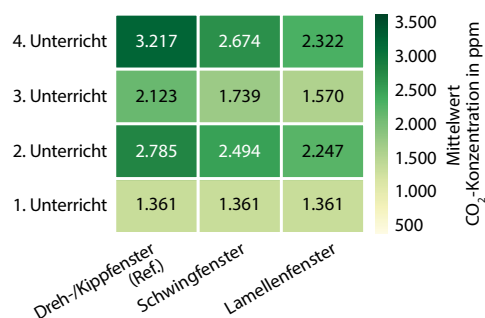
Im betrachteten Referenzfall kommen Dreh-/Kippfenster zum Einsatz. Alternativ hierzu wird die Wirksamkeit der Fensterlüftung mit Schwingfenstern oder Lamellenfenstern untersucht. In beiden Fällen werden die Abmessungen der Fenster so angepasst, dass die geometrische Öffnungsfläche 1,5 m² in voll geöffneter Stellung der Öffnungsfläche der Dreh-/Kippfenster vom Referenzfall entspricht. Bei voller Öffnung sind die Ergebnisse für den resultierenden Außenluftvolumenstrom und die damit erreichbare CO₂-Konzentration im Raum vergleichbar. Daher wird auf diesen Vergleich nicht gesondert eingegangen. Interessanter ist das Ergebnis für Teilöffnungen bei den betrachteten Fensterarten. Die Variante mit 14 cm geöffneten Drehflügeln des Dreh-/Kippfensters (entspricht einer geometrischen Öffnungsfläche von 0,33 m²) wird daher mit der Teilöffnung

der alternativen Fenstertypen verglichen. Für die Schwingfenster wird, ähnlich dem Referenzfenster, eine Öffnungsweite von 14 cm angenommen. Die geometrische Öffnungsfläche beträgt dann bei dieser Fensterart 0,51 m². Als Öffnungsvarianten für die Lamellenfenster mit jeweils vier Lamellen werden die Öffnungsstellung mit 14 cm Lamellenabstand (ca. 30° vertikaler Drehwinkel der Lamellen, geometrische Öffnungsfläche 0,70 m²) untersucht. Analog zum Referenzfall sollen die Fenster nur in den Pausen geöffnet werden.

Sowohl mit Schwingfenstern als auch mit Lamellenfenstern kann die mittlere CO₂-Konzentration gegenüber dem Referenzfall deutlich (um ca. 600 ppm) gesenkt werden. Gleichwohl wird auch mit diesen Fensterarten bei einem gegenüber dem Referenzfall unveränderten Lüftungsverhalten keine hygienisch unbedenkliche Innenraumlufthqualität erzielt (Abbildung 9).

Abbildung 8:

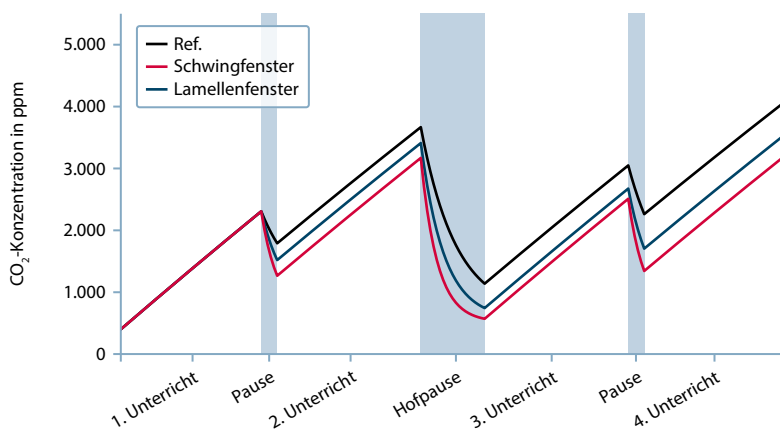
Mittlere CO₂-Konzentration während der Unterrichtsstunden – Einfluss der Fensterart



Quelle: BBSR 2022

Abbildung 9:

Verlauf der CO₂-Konzentration – Einfluss der Fensterart



Quelle: BBSR 2022

Durch Einsatz von Schwingfenstern bzw. Lamellenfenstern lässt sich die Raumluftqualität bei unveränderten Lüftungsgewohnheiten im Vergleich zu den üblichen Dreh-/Kippfenstern verbessern. In Anbetracht der Belange des Wärme- bzw. Schallschutzes bieten diese Fenstertypen jedoch keine Vorteile.

Einfluss der Lüftungsart

Im betrachteten Referenzfall wurde ausschließlich über die offenbaren Fenster gelüftet. In diesem Abschnitt wird nun die Funktionalität der mechanischen Lüftung betrachtet – als Ergänzung oder Alternative zur Fensterlüftung.

Die mechanische Lüftung fördert kontinuierlich einen gewissen Außenluftvolumenstrom in den betrachteten Raum und sorgt so für eine stetige Verdünnung des von den Raumnutzern ausgeatmeten Kohlendioxids. Dadurch ergibt sich im Vergleich zur Stoßlüftung mittels Fenstern ein gänzlich anderer Konzentrationsverlauf. Typisch für fenstergelüftete Räume (Stoßlüftung), wie aus den bisherigen Fallstudien hervorgeht, ist ein sägezahnartiger Verlauf der CO₂-Konzentration mit einem kontinuierlichen Anstieg in den Phasen ohne Lüftung und einem mehr oder weniger stark ausgeprägten Abfall während der Lüftungsphase. Bei mechanischer Lüftung kommt es hingegen zu einem gedämpften Anstieg der CO₂-Konzentration bis zu einem bestimmten Niveau, das im weiteren zeitlichen Verlauf nicht überschritten wird, sofern Kohlendioxidausstoß und Außenluftvolumenstrom nicht verändert werden. Das

Verhältnis aus Emission und Verdünnung ist also entscheidend für die Lage dieses Niveaus. Tabelle 6 gibt einen Überblick über die untersuchten Szenarien.

Für einen angestrebten CO₂-Gehalt von 1.000 ppm in der Raumluft wird in dicht besetzten Räumen häufig eine spezifische Außenluftfrate von 36 m³/(h*Person) angesetzt. Diesen Wert haben wir auch für den Fall der rein mechanischen Lüftung in unserer Variantenbetrachtung verwendet. In den Fällen der hybriden Lüftung haben wir uns entschieden, zwei mögliche Betriebsweisen darzustellen. Eine Betriebsweise setzt mehr auf den mechanisch geförderten Luftanteil, die andere legt den Fokus auf die Fensterlüftung. Hier ist die mechanische Lüftung darauf ausgerichtet, den Anstieg der CO₂-Konzentration in der Unterrichtsstunde so zu begrenzen, dass der gewünschte Mittelwert nicht überschritten wird.

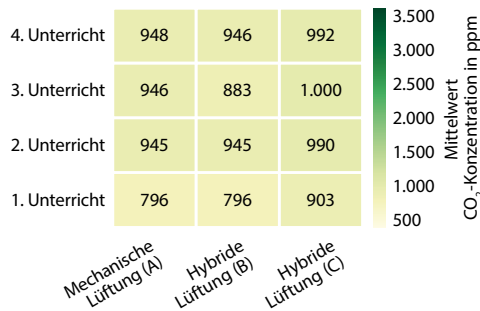
Abbildung 11 zeigt die Wirksamkeit der Lüftungsarten hinsichtlich der Reduzierung der CO₂-Konzentration für den Fall des Klassenzimmers. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass alle betrachteten Varianten die angestrebte Innenraumluftqualität von 1.000 ppm sicherstellen können.

Tabelle 6:
Beschreibung der untersuchten Szenarien

	Unterrichtsstunden		Kurze Pausen		Hofpause	
	Ventilator m ³ /h/Pers.	Fenster- öffnung	Ventilator m ³ /h/Pers.	Fenster- öffnung	Ventilator m ³ /h/Pers.	Fenster- öffnung
Mechanische Lüftung (A)	36	–	36	–	36	–
Hybride Lüftung (B)	36	–	36	–	–	20 Minuten mit 14 cm geöffneten Drehflügeln
Hybride Lüftung (C)	24	–	–	5 Minuten Stoßlüftung	–	5 Minuten Stoßlüftung + 15 Minuten mit 14 cm geöffneten Drehflügeln

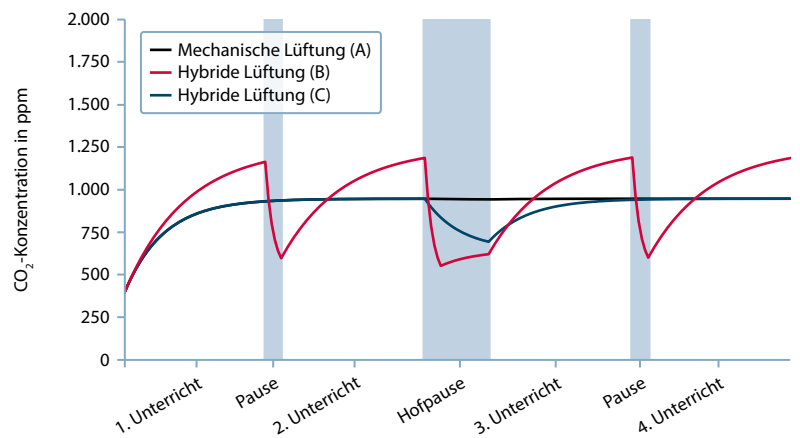
Quelle: BBSR 2022

Abbildung 10:
Mittlere CO₂-Konzentration während der Unterrichtsstunden – Einfluss der Lüftungsart



Quelle: BBSR 2022

Abbildung 11:
Verlauf der CO₂-Konzentration – Einfluss der Lüftungsart



Quelle: BBSR 2022

Durch rein mechanische Lüftung mit $36 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{Person})$ und durchgängig geschlossenen Fenstern kann in unserem Fallbeispiel die angestrebte mittlere CO₂-Konzentration von 1.000 ppm erreicht werden. Dieses Ergebnis lässt sich ebenfalls erzielen, wenn die mechanische Lüftung in der Hofpause ausgeschaltet und

stattdessen mittels leicht geöffneter Drehflügel (Öffnungsweite 14 cm) gelüftet wird.

Wird zudem in den kleinen Pausen 5 Minuten mit weit geöffneten Fenstern gelüftet, kann der erforderliche Volumenstrom der Lüftungsanlage in unserer Betrachtung sogar auf $24 \text{ m}^3/\text{h}$ pro Person reduziert werden.

Aus technischer Sicht kann eine mechanische Lüftung als Ergänzung bzw. Alternative zur Fensterlüftung empfohlen werden, um so die Raumluftqualität nachhaltig zu verbessern und auch dauerhaft eine CO₂-Konzentration unter 1.000 ppm zu erreichen.

Eine mechanische Lüftung kann die Raumluftqualität sicherstellen, ohne dass die Mitwirkung der Nutzer durch Fensterlüften erforderlich wird.

Durch eine hybride Lüftung lässt sich gegenüber der rein mechanischen Lüftung der Anlagenluftvolumenstrom bei vergleichbarer Raumluftqualität deutlich reduzieren.



Foto: Chinnapong – stock.adobe.com

Einfluss der Belegungsdichte

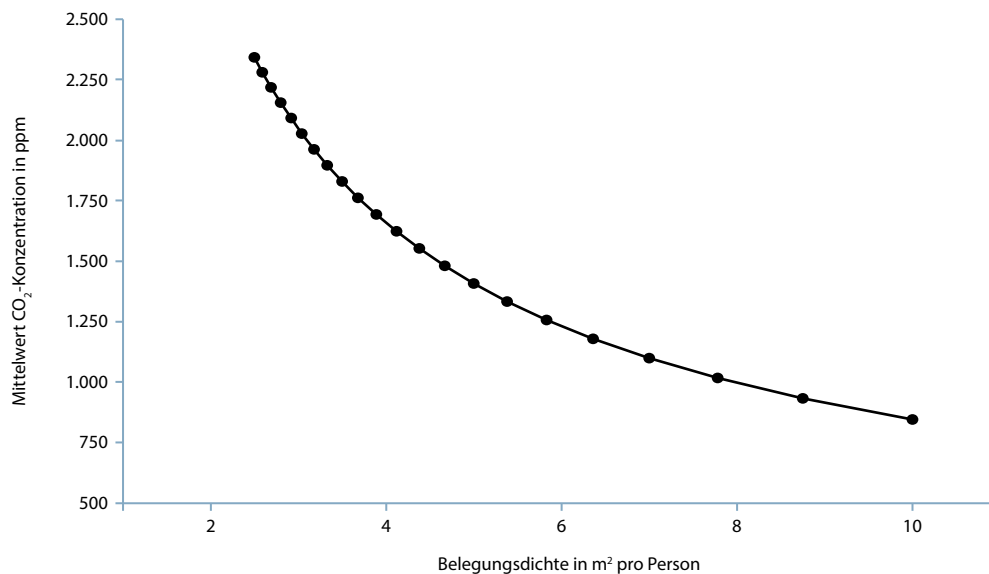
Die bislang betrachteten Varianten beziehen sich überwiegend auf bauliche Maßnahmen (Anzahl und Art der Fenster, Größe der Öffnungsfläche, Lüftungsart) zur Verbesserung der Lüftungssituation im Referenz-Klassenzimmer. Lediglich die untersuchten Änderungen im Lüftungsverhalten sind zu den organisatorischen Maßnahmen zu zählen. Eine weitere organisatorische Maßnahme wäre grundsätzlich auch die Reduzierung der Belegungsdichte im Raum, also eine Begrenzung der Klassenstärke. In Abbildung 12 ist der Einfluss der Belegungsdichte auf die CO_2 -Konzentration in unserem betrachteten Klassenraum dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die Reduzierung der Anzahl der anwesenden Personen im Raum natürlich einen positiven Einfluss

auf die resultierende Innenraumluftqualität hat. Gleichwohl ist diese Maßnahme für unseren betrachteten Fall allein nicht geeignet, die gewünschte Güte der Raumluft herbeizuführen. Mit einer realistischen, aber vergleichsweise geringen Reduzierung der Schülerzahl von 27 auf 20 (entspricht einer Belegungsdichte von $3,3 \text{ m}^2$ pro Person) wird keine ausreichende Verringerung der CO_2 -Konzentration erreicht. Erst ab einer Belegungsdichte von 10 m^2 pro Person (und höher) sind mit dem gewählten Lüftungskonzept des Referenzfalles hygienisch unbedenkliche Innenraumluftzustände erzielbar. Dies entspricht einer Verringerung der Anzahl anwesender Schüler und Schülerinnen auf ca. sieben. Die Reduzierung der Belegungsdichte kann in unserem untersuchten Fall eines Klassenzimmers also nur im Zusammenspiel mit anderen Maßnahmen zu einer deutlichen Verbesserung der Innenraumluftqualität beitragen.

Abbildung 12:

Verlauf der mittleren CO₂-Konzentration – Einfluss der Belegungsichte bezogen auf zeitlich gewichteten Durchschnitt



Quelle: BBSR 2022

Die Untersuchungsergebnisse zum Einfluss der Belegungsichte auf die resultierende Innenraumluftqualität im untersuchten Klassenraum bestätigen, dass die Funktionalität eines Lüftungskonzeptes, das stark auf die Fensterlüftung setzt, eng mit der Anzahl anwesender Personen und den Möglichkeiten zur Durchführung der Fensterlüftung (Lüftungsdauer, Lüftungszeitpunkt, Fensterart, etc.) verknüpft ist. Die Entscheidung für ein solches Konzept sollte daher, insbesondere in Schulen und Bildungseinrichtungen, äußerst sorgfältig geprüft werden. Insbesondere empfehlen wir die intensive Beteiligung der späteren Nutzer an diesem Entschei-

dungsprozess, denn sie sind im Regelfall später im praktischen Betrieb für das Lüften zuständig. Die für eine hygienisch unbedenkliche Innenraumluftqualität erforderliche Beschränkung der Anzahl anwesender Personen erscheint für Schulen und Bildungseinrichtungen nicht umsetzbar. Gleichwohl können ggf. andere Raumnutzungen die Möglichkeit bieten, über eine solche Maßnahme ein erfolgversprechendes fensteröffnungsbasiertes Lüftungskonzept zu entwickeln. Im folgenden Abschnitt wird daher am Beispiel einer Büronutzung untersucht, welchen Einfluss andere Raumnutzungen auf die Erfolgsaussichten von Fensterlüftung haben.

Die Belegungsichte hat natürlich grundsätzlich einen Einfluss auf die resultierende CO₂-Konzentration in Innenräumen. Sie erweist sich im Falle von Schulen und Bildungseinrichtungen aber nicht als primärer Faktor zur praktikablen Verbesserung der Raumluftqualität in ausschließlich fenstergelüfteten Räumen. Durch eine verringerte Belegungsichte können erst dann relevante Verbesserungen bezüglich der Raumluftqualität erreicht werden, wenn gleichzeitig alternative Optionen, Modelle, Strategien oder Zeitpläne für den Betrieb von Schulen umgesetzt werden.

Fallbeispiele Büroräume

Im vorangegangenen Abschnitt wurden die Auswirkungen verschiedener Variablen auf die CO₂-Konzentration in Klassenräumen aufgezeigt. Die Untersuchungsergebnisse in diesem Abschnitt sollen darlegen, ob es unter geänderten Nutzungsbedingungen (Büronutzung) möglich ist, die durchschnittliche CO₂-Konzentration im Beispielraum durch Fensterlüftung innerhalb des hygienisch akzeptablen Bereiches zu halten. Durch die Nutzung des Raumes als Büro ist nun bspw. jederzeit eine Fensterlüftung möglich. Gleichzeitig erweitert sich der Betrachtungszeitraum auf eine volle Stunde, also auf 60 Minuten.

Die Raumgeometrie, die Art und Anzahl der Fenster sowie die klimatischen Bedingungen sind gegenüber dem vorgestellten Beispielraum „Klassenzimmer“ unverändert. Angepasst wurden lediglich die Personenanzahl bzw. die Belegungsdichte (14 Personen bzw. 5 m²/Person, 7 Personen bzw. 10 m²/Person, 5 Personen bzw. 14 m²/Person) und das Tagesprofil.

Der untersuchte Raum repräsentiert in seiner Größe und Belegung ein Mehrpersonenbüro. Durch die gewählte Variation der Belegungsdichte lassen sich die Ergebnisse jedoch auch auf Ein- oder Zweipersonenbüros übertragen.

Es werden zwei Öffnungsvarianten der Fenster untersucht:

- a) Dreh- und Kippfenster mit 14 cm geöffnetem Drehflügel
- b) Dreh- und Kippfenster mit ganz geöffnetem Drehflügel

Für beide Öffnungsvarianten werden sowohl die Belegungsdichte als auch die Dauer der Lüftung pro Arbeitsstunde (60 Minuten) variiert. Die Lüftung ist auf einen Lüftungsvorgang je Stunde begrenzt und findet am Ende jeder Arbeitsstunde statt. Abbildung 13 veranschaulicht die Wirkung der Fensterlüftung bei Drehfenstern mit 14 cm geöffneten Drehflügeln im Unterschied zur Lüftung mit ganz geöffneten Drehflügeln. Es werden jeweils alle offenbaren Fenster genutzt.

Abbildung 13 zeigt, dass der angestrebte Leitwert für die CO₂-Konzentration von 1.000 ppm für alle Arbeitsstunden in den untersuchten Fällen bei Belegungsdichten von 10 m²/Person und 14 m²/Person durch ausschließliche Fensterlüftung erreicht werden kann. Das Lüften mit ganz geöffneten Drehflügeln verkürzt dabei die notwendige Lüftungsdauer erheblich.

Bei der untersuchten Belegungsdichte von 5 m²/Person stellt eine ausschließliche

Tabelle 7:
Tagesprofil Büro

Zeitintervall	Nutzung	Belegung
08:00–09:00 Uhr	1. Arbeitsstunde	100 %
09:00–10:00 Uhr	2. Arbeitsstunde	100 %
10:00–11:00 Uhr	3. Arbeitsstunde	100 %
11:00–12:00 Uhr	4. Arbeitsstunde	100 %
12:00–13:00 Uhr	5. Arbeitsstunde und Mittagspause	50 %
13:00–14:00 Uhr	6. Arbeitsstunde	100 %
14:00–15:00 Uhr	7. Arbeitsstunde	100 %
15:00–16:00 Uhr	8. Arbeitsstunde	100 %
16:00–16:30 Uhr	9. Arbeitsstunde	100 %

Quelle: BBSR 2022



Foto: IRStone – stock.adobe.com

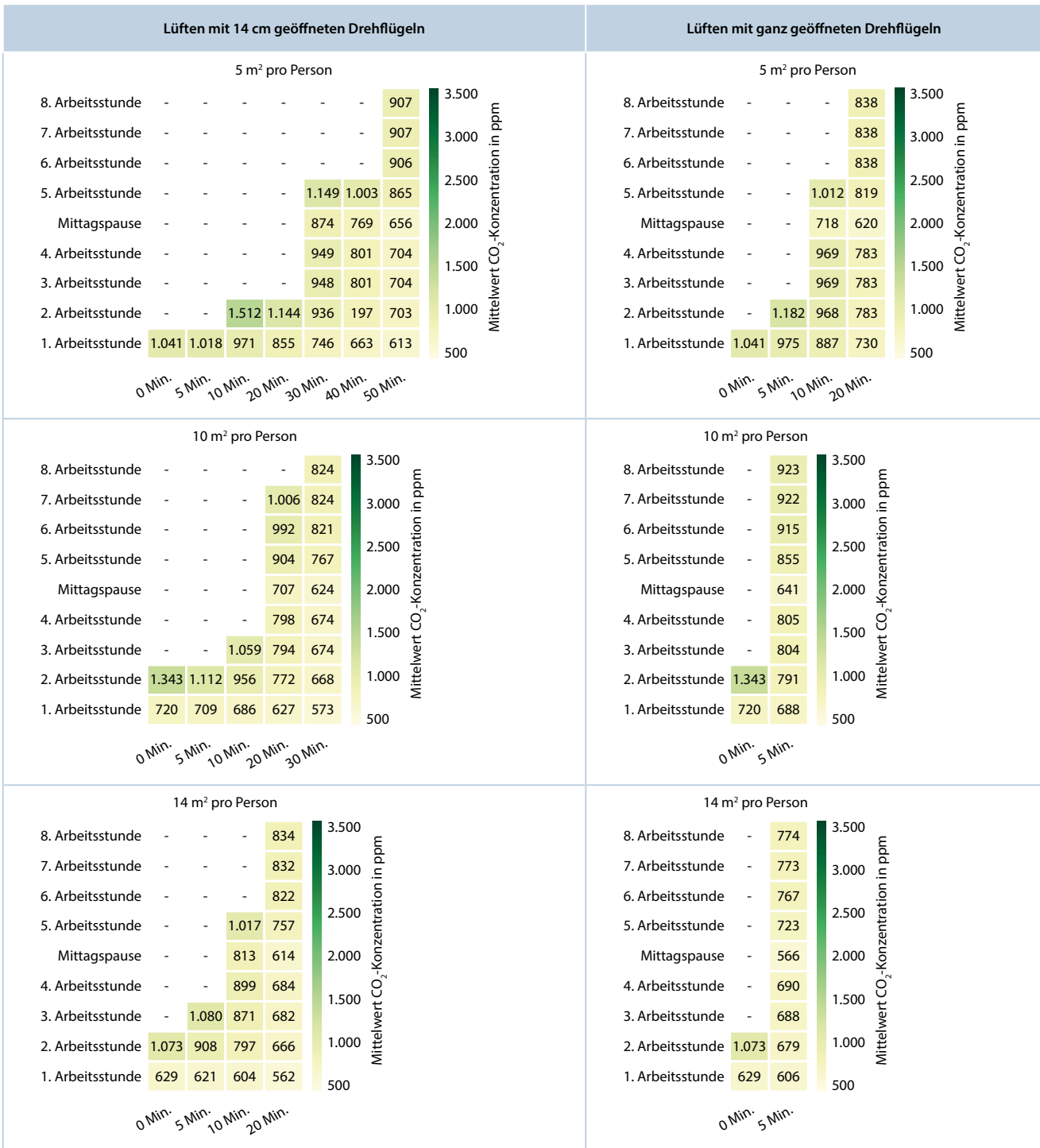
Fensterlüftung wohl nur eine theoretische Option dar. Zwar sind mittlere CO₂-Konzentrationen unter 1.000 ppm grundsätzlich erreichbar, aber die hierfür notwen-

dige Öffnungsdauer der Fenster scheint selbst bei ganz geöffneten Fensterflügeln (> 10 Minuten in der Übergangszeit) in der Praxis nicht umsetzbar.

Die Raumnutzungsart hat zwar keinen Einfluss auf die grundsätzlich wirkenden physikalischen Zusammenhänge, bietet aber im Fall einer Fensterlüftung ggf. Unterschiede bei den möglichen Lüftungszeitpunkten. So liegt der Lüftungszeitpunkt bspw. in Büroräumen immer in der Nutzungszeit, während er in Klassenräumen nach Möglichkeit außerhalb der Nutzungszeit liegen sollte.

Ein- und Zweipersonenbüros haben oftmals Belegungsdichten von mindestens 10 m²/Person. Sie sollten daher in der Regel problemlos über Fenster gelüftet werden können.

Abbildung 13:
Mittlere CO₂-Konzentration in 8 Arbeitsstunden bei verschiedener Belegungsdichte und Lüftungsdauer



Quelle: BBSR 2022



Handlungsempfehlungen

Foto: Shawn Hempel – stock.adobe.com

Unabhängig von der späteren Lüftungsart gilt es, den Zielwert für die einzuhaltende Luftqualität frühzeitig festzulegen bzw. die entsprechende Anforderung im Rahmen der Beauftragung einer baulichen Maßnahme zu formulieren. Als Zielgröße für die CO₂-Konzentration in der Innenraumluft empfehlen wir den Leitwert für eine Bewertung als „hygienisch unbedenklich“, also < 1.000 ppm. Dabei halten auch wir den Mittelwert der CO₂-Konzentration während der Nutzungszeit für die richtige Bewertungsgröße, weil sie praxisgerechter ist.

Die im Rahmen dieser Broschüre dargestellten Ergebnisse sind zwar mitnichten

allgemeingültig und daher nicht auf jeden Praxisfall übertragbar. Sie geben aber bereits wichtige Hinweise darauf, ob ein Lüftungskonzept in der Praxis erfolgversprechend sein kann bzw. welche limitierenden Faktoren es gibt. Insbesondere die Thematik „Fensterlüftung“ erfordert eine intensive Einzelfallbetrachtung. In jedem Fall sollte sich dem Thema „Lüftung“ bereits zu einem frühen Planungszeitpunkt gewidmet und ein Lüftungskonzept aufgestellt werden. Aus diesem sind die erforderlichen sowohl baulichen und technischen als auch organisatorischen Anforderungen für das Erreichen der angestrebten Innenraumluftqualität abzuleiten und in Planung, Errichtung sowie Betrieb umzusetzen.

Lüftungskonzept

Zu den Anforderungen an Lüftungskonzepte hat der Arbeitskreis Lüftung am UBA (2017) entsprechende Empfehlungen formuliert. Wir schließen uns diesen Empfehlungen vollumfänglich an. Ein Lüftungskonzept ist unter Beteiligung der Fachplaner, Bauherren und Nutzer aufzustellen. Es beschreibt raumweise, durch welche Maßnahmen während der Nutzung ausreichend hygienische Innenluftverhältnisse im Raum gewährleistet werden und listet alle für das Konzept relevanten Planungsdaten, Annahmen, Randbedingungen sowie Durchführungshinweise für die späteren Raumnutzer auf. Damit dient es der Festlegung und Dokumentation der geplanten Lüftung und wendet sich primär an die späteren Raumnutzer.

Ein solches Lüftungskonzept beinhaltet:

- die Anforderung an die Innenraumlufthygiene (hier insbesondere die CO₂-Konzentration)
- die angesetzten Randbedingungen, z. B. Nutzungsprofil, Klima, etc.
- die Lüftungsart, z. B. Fensterlüftung, hybride Lüftung, mechanische Lüftung
- die erforderlichen lüftungstechnischen Maßnahmen, z. B. Fensterstellung und Öffnungsweiten, Pausenlüftung, Lüftung über eine oder zwei Fassaden, Regelung einer Lüftungsanlage (sofern vorhanden), etc.

Das gewählte Lüftungskonzept wird während der Planungsphase unter Einbeziehung aller Beteiligten und Betroffenen und unter Berücksichtigung der relevanten, die Lüftung beeinflussenden Aspekte (Sicherheit und Unfallverhütung, Energiekonzept, Akustik und Schallschutz, Brandschutz, Raumnutzung) erstellt. Bei Planungsänderungen ist das Lüftungs-

konzept nachzuführen. Für die spätere Anwendung in der praktischen Nutzung des Raumes soll das Lüftungskonzept dokumentiert sein und

- alle Angaben enthalten, die zu einer ausreichenden Be- und Entlüftung führen und die erforderlich sind, um diese Maßnahmen nachvollziehbar prüfen zu können (auch im Sinne einer Erfolgskontrolle/des Monitorings),
- den Nutzern ausreichende Hinweise und Beschreibungen zur tatsächlichen praktischen Umsetzung des Konzeptes geben, z. B. ggf. erforderliche Lüftungsintervalle und -dauer bei Fensterlüftung, Regelung einer mechanischen Lüftungsanlage, etc.,
- vollständig erstellt werden, indem es für jeden Raum die gesamten notwendigen Informationen über die Randbedingungen, Anforderungen und die Ausführung der Lüftung enthält,
- dem Betreiber Hinweise zu den Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen mit den entsprechenden Hygieneanforderungen an RLT-Anlagen gemäß VDI 6022 zur Verfügung stellen.

Vor allem bei hybrider Lüftung muss das Lüftungskonzept laienverständliche Angaben zu Funktion und Zusammenspiel der einzelnen Komponenten enthalten, damit es im praktischen Alltag auch „gelebt“ werden kann. Dazu zählen bspw. Aufteilung der Grundlüftung auf Fenster und Lüftungsanlage, Regelungs- und Eingreifmöglichkeiten der Anlage sowie erforderliche Fensterlüftungsmaßnahmen (z. B. Lüftungszeiten, Fensterstellung, Lüftungsintervalle). Sind CO₂-Sensoren verbaut, müssen deren Funktionsweise und Bedienung sowie die Maßnahmen bei Überschreitung der Zielwerte erläutert werden. Eine Übersicht zu Bestandteilen und Anforderungen eines solchen Lüftungskonzeptes enthält Tabelle 8.

Tabelle 8:
Bestandteile und Anforderungen an ein raumbezogenes Lüftungskonzept

	Einzelaspekte (mindestens)	Bemerkungen, Beispiele, Hinweise
Randbedingungen und Parameter (je Raum)	<ul style="list-style-type: none"> - Lüftungsart - Raumabmessungen, Raumvolumen - Personenanzahl und Altersstufe - erforderlicher Außenluftvolumenstrom - tägliche Unterrichts- und Pausenzeiten - Lüftungsintervalle und Lüftungsdauer - Typ, Anzahl und Position der Fenster, Öffnungsmöglichkeiten, Öffnungsweite - Zeit, Dauer, Stellung von Fensteröffnungen - einseitige oder Querlüftung - ggf. Betriebsdauer, Stufe, geplanter Luftvolumenstrom einer Lüftungsanlage 	<ul style="list-style-type: none"> - Fenster, hybrid, RLT-Anlage - Länge x Breite x Höhe und Volumen - Schüler/Klasse - m³/h - Belegungs-/Nutzungsplan, inkl. Pausen - je Fenster bzw. Fenstertyp, ein- oder zweiachsige Öffnung, inkl. Oberlicht - je geplanter Öffnungsart, unterschieden nach Unterrichtszeiten und Pausenzeiten - bei hybrider Lüftung: Betriebszeiten, Betriebsmodi, CO₂-Steuerung, Ventilator oder automatische Fensterflügel
Nachweis und Dokumentation	<ul style="list-style-type: none"> - Nachweis z. B. mit Excel-Tool / BNB-Bewertung - alle o. g. Parameter sind zu dokumentieren - getroffene Annahmen (z. B. Temperaturdifferenz innen/außen für Sommer- und Winterfall, CO₂-Außenluftkonzentration, mittlere Windgeschwindigkeit) - nachvollziehbar und prüfbar 	<ul style="list-style-type: none"> - z. B. Ausdruck - Standardwerte - Vollständigkeit prüfen
Umsetzung	<ul style="list-style-type: none"> - Organisation der Verantwortlichkeiten festlegen - erforderliche Nutzerhinweise, Handlungsempfehlungen, Anleitungen, Wartungsempfehlungen - Überprüfung im ausgeführten Objekt vorsehen - Komfortaspekte beachten - Sicherheitsaspekte beachten 	<ul style="list-style-type: none"> - ausarbeiten, konkretisieren - Außenlärm, Zugerscheinung, thermische Behaglichkeit - Öffnungsweite, Beaufsichtigung, Sicherheitskonzept

Quelle: BBSR 2022

Neben dem Lüftungskonzept als wichtigstem planerischen Instrument zur Vermeidung schwieriger Situationen mit unzureichender Raumluftqualität tragen aber auch viele Einzelmaßnahmen zum Erreichen einer hohen Raumluftqualität bei. Aufgrund der Vielzahl an Situationen und der Komplexität der Einflüsse auf die Raumluftqualität und angesichts weiterer Behaglichkeitsaspekte wie z. B. Raumtemperatur, Zugluftrisiko oder Schutz vor Außenlärm sind die Maßnahmen zur Sicherstellung einer guten Raumluftqualität jeweils an den Einzelfall anzupassen.

Hinsichtlich der verschiedenen betrachteten Lüftungsarten bleibt festzuhalten, dass sowohl mechanische Lüftung als auch Fensterlüftung grundsätzlich geeignet sind, auch hohe Ansprüche an die Raumluftqualität zu erfüllen. Es gilt jedoch zu beachten, dass dabei Konzepte, die auf den

Einsatz mechanischer Lüftung setzen, für ihre Effektivität einen größeren Spielraum bei den Rahmenbedingungen haben, als es bei der Fensterlüftung der Fall ist. Dies gilt nicht nur für den wirksamen Außenluftvolumenstrom, der im Falle der mechanischen Lüftung sehr gut planbar ist, im Falle der Fensterlüftung jedoch überwiegend von den jeweiligen – nicht planbaren – Dichteunterschieden zwischen Innen- und Außenraum abhängig ist. Lüftungsgeräte haben bei sachgerechter Planung und Errichtung auch Vorteile beim Schallschutz, bei der Energieeffizienz (Stichwort: Wärmerückgewinnung) und der Zuluftgüte (Stichwort: Filterung der Außenluft). Hohe Belegungsdichten und Einschränkungen bzgl. des Zeitpunktes der Lüftung sind starke Hemmnisse für eine erfolgreiche Fensterlüftung. Ein hybrides Konzept der Belüftung, also eine mechanisch unterstützte Fensterlüftung,

kann ein erfolgsversprechender Weg sein, um einerseits die Vorzüge einer Fensterlüftung zu nutzen und andererseits die Anforderungen an die Innenraumluftqualität zu erfüllen. Die mechanisch geförderten Volumenströme können in diesen Konzepten im Vergleich zu einer rein mechanischen Belüftung zum Teil deutlich reduziert werden. Solche Konzepte scheinen auch sehr gut geeignet zu sein, um etwaige Lüftungstechnische Probleme in Bestandsbauten zu lösen.

Bezüglich der einzelnen Lüftungsarten können aus den durchgeführten Untersuchungen nachfolgende Empfehlungen abgeleitet werden. Bei der Fensterlüftung spielen natürlich die Anzahl und Größe der Öffnungsflächen eine wichtige Rolle für den in der Praxis erreichbaren Luftwechsel: Je mehr Öffnungsfläche zur Verfügung steht, desto größer ist der zu erwartende Luftaustausch mit der Umgebung. Sofern die Möglichkeit dazu besteht, sollte zudem eine Querlüftung angestrebt werden. Wie bereits erwähnt, sind auch die Belegungsichte und der Zeitpunkt der Fensteröffnung entscheidend für die Effektivität eines Fensterlüftungskonzeptes. Über die Belegungsichte wird Einfluss auf die im Raum vorhandenen CO₂-Emissionsquellen genommen. Dies wirkt sich direkt auf die Dynamik des CO₂-Konzentrationsanstieges aus, was wiederum über den Zeitpunkt einer notwendigen Lüftung entscheidet. Je mehr Personen im Raum sind, desto stärker ist der Anstieg der CO₂-Konzentration und desto eher ist ein Fensterlüften erforderlich. Die erforderliche Zeitdauer einer Fensterlüftung richtet sich nach dem damit verfolgten Zweck. Soll die Raumluft gegen Außenluft ausgetauscht werden, um die CO₂-Konzentration der Innenraumluft abzusenken, sollte dies durch eine kurzzeitige und möglichst maximale Öffnung der Fenster erfolgen (Stoßlüftung). Da ein Lüften auf Vorrat nicht möglich ist, kann der Lüftungsvor-

gang spätestens dann beendet werden, sobald im Innenraum die CO₂-Außenluftkonzentration erreicht ist. Dies geht aufgrund der klimatischen Bedingungen im Winter schneller als in der Übergangszeit oder im Sommer; etwa 3–7 Minuten sollten für einen Stoßlüftungsvorgang ausreichen. Durch eine andauernde und eingeschränkte Fensteröffnung (bspw. Kippstellung) kann der CO₂-Konzentrationsanstieg im Regelfall lediglich begrenzt und damit der Zeitpunkt einer erforderlichen Stoßlüftung nur hinausgezögert werden.

Da eine Fensterlüftung bei gleichzeitiger Anwesenheit der Raumnutzer ggf. zu einer Beeinträchtigung von deren thermischem bzw. akustischem Komfort führen kann, ist es in solchen Lüftungskonzepten wichtig, quasi jede Abwesenheit von Raumnutzern als Gelegenheit zur Reduzierung der CO₂-Konzentration im Innenraum zu nutzen. So sollten entsprechende intensive Lüftungsphasen bspw. vor Nutzungsbeginn oder in Mittagspausen vorgesehen werden.

Um Fensterlüftungskonzepte erfolgreich in die Praxis zu bringen, empfiehlt es sich, eine entsprechende Sensorik vorzusehen, die ein etwaig erforderliches Lüften signalisiert. Dies können bspw. Lüftungssampeln oder aber CO₂-Sensoren sein. Maßnahmen zur bedarfsgerechten Lüftung empfehlen sich natürlich auch im Falle der mechanischen oder mechanisch unterstützten Lüftung. Im Falle des Einsatzes von Lüftungsgeräten, egal ob zentral oder dezentral, hat es sich in der Praxis bewährt, die Möglichkeit von Nutzereingriffen zu schaffen, bspw. das Zulassen eines zusätzlichen Öffnens von Fenstern oder die Beeinflussung des Betriebs der Lüftungsanlage durch den Nutzer. Solche Maßnahmen erhöhen die Akzeptanz der Nutzer gegenüber dem Einsatz von Anlagentechnik und führen dadurch in der Regel zu einer höheren Zufriedenheit mit den erzielten Raumkonditionen.

Literatur

BAuA – Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Technische Regeln für Arbeitsstätten, Lüftung, ASR A3.6.

BMWSB – Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2017: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) für Unterrichtsgebäude, Kriteriensteckbrief Innenraumlufthygiene, BNB_UN 3.1.3, Version V 2017 (identisch mit BNB_BN, Version V2015).

DIN EN 13779, 2007: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme - Nationaler Anhang zu DIN EN 13779:2007-09.

DIN EN 16798-1, 2022: Energetische Bewertung von Gebäuden – Teil 1: Eingangparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik – Modul M1-6.

DIN/TS 4108-8, 2022: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 8: Vermeidung von Schimmelwachstum in Wohngebäuden.

Hartmann, T.; Knaus, C.; Mai, R.; Krause, R.; Döge, S.; Spitzner, M. H., 2019: Entwicklung von Handlungsempfehlungen für praxismgerechte Lüftungskonzepte und Entwicklung eines CO₂-Berechnungstools. BBSR Zukunft Bau Forschungsprojekt 10.08.17.7-17.24. Zugriff: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/2NachhaltigesBauenBauqualitaet/2017/lueftungskonzepte-tool/endbericht.pdf> [abgerufen am 12.04.2022].

UBA – Umweltbundesamt, 2008: Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforsch – Gesundheitsschutz 11, Heidelberg: 1358-1369. Zugriff: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/kohlendioxid_2008.pdf [abgerufen am 12.04.2022].

UBA – Umweltbundesamt, 2017: Anforderungen an Lüftungskonzeptionen in Gebäuden, Teil 1: Bildungseinrichtungen. Empfehlungen des Arbeitskreises Lüftung (AK Lüftung) am Umweltbundesamt.

UBA – Umweltbundesamt, 2021: Ausschuss für Innenraumrichtwerte. Zugriff: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/kommissionen-arbeitsgruppen/ausschuss-fuer-innenraumrichtwerte#sitzungsprotokolle-des-air> [abgerufen am 12.04.2022].

UBA – Umweltbundesamt, 2021: Richtig lüften in Schulen. Zugriff: <https://www.umweltbundesamt.de/richtig-lueften-in-schulen#warum-ist-ein-regelmassiger-luftaustausch-in-klassenzimmern-grundsatzlich-wichtig-und-in-der-pandemie-umso-mehr> [abgerufen am 12.04.2022].

Anhang

A - Tabelle Einflussfaktoren zur Berücksichtigung in der Lüftungskonzeption

Einflussfaktor, Parameter	Anmerkungen
Einflussfaktoren mit direkter Auswirkung auf die CO₂-Konzentration	
Belegung	u. a. Anzahl, Alter und Aktivität der Personen; die Belegungsdichte schlägt sich deutlich im CO ₂ -Konzentrationsverlauf nieder; die anzusetzende Belegung ergibt sich aus dem Planungsauftrag
Belegungsplan	u. a. Dauer und Abfolge der Raumnutzung
Anzahl der geöffneten Fenster	inkl. Oberlichter
Lüftungsplan	Lüftungsdauer und Lüftungsfrequenz
Querlüftung/Schachtlüftung	die Möglichkeit, über zwei oder mehrere Fensterfassaden bzw. über Schächte zu lüften
Bauart der Fenster	Größe, Öffnungsart, mögliche Öffnungsweite; Oberlicht vorhanden; Öffnungsstellung des Oberlichts
Anlagenbetrieb, Anlagenstellung	u. a. geförderter Volumenstrom der Lüftungsanlage (betrifft hybride und mechanische Lüftung)
Raumgeometrie, Raumsituation, Fensterorientierung	u. a. Lage im Gebäude, Lage und Orientierung der Fensterfassaden, Durchlüftbarkeit des Raums, ggf. solare Wärmeeinträge und/oder Blendung durch Sonnenschein
Innen- und Außenlufttemperatur, Klima, Wetter	u. a. innere Lasten, Windlast, Windgeschwindigkeit; Außenklima hat Einfluss auf die tatsächlich umsetzbaren Fensteröffnungsvorgänge
CO ₂ -Gehalt der Außenluft am Standort	die CO ₂ -Konzentration der Außenluft variiert je nach Standort. Als Standardwert gelten 400 ppm. Im ländlichen Bereich werden tendenziell geringe Werte gemessen, im städtischen Bereich tendenziell höhere Werte.
Einflussfaktoren mit eventueller indirekter Auswirkung auf die CO₂-Konzentration	
Zugluftisiko beim Fensteröffnen	ggf. Auswirkung auf Lüftungsakzeptanz und thermische Behaglichkeit
Lärmbelastung der Fassade von außen	ggf. Fenster während des Unterrichts bzw. des Gesprächs nicht offenbar; während der Pausen i. d. R. problemlos
Staub- und Geruchsbelastung der Fassade	Fenster während des Unterrichts bzw. der Arbeit und ggf. sogar während der Pausen nicht offenbar
Sonnenschutz, Verschattung, solare Einstrahlung	Sonnenscheindauer und Strahlungsintensität, thermische Behaglichkeit; ggf. Auswirkung auf Lüftungsmöglichkeit (Sonnenschutzvorrichtungen können zu einer Verringerung des Luftvolumenstroms durch geöffnete Fenster führen)
Blendung durch Sonne	innenliegender Blendschutz ggf. nur bei geschlossenem oder gekipptem Fenster wirksam: Es müsste dann zwischen Blendschutz oder CO ₂ -Reduktion durch Lüften entschieden werden
Beheizung	z. B. Heizkörperanordnung, Randbereich bei Fußbodenheizung; ggf. Auswirkung auf Lüftungsakzeptanz und thermische Behaglichkeit

Quelle: BBSR 2022

B - Berechnung der CO₂-Konzentrationen im Innenraum

Ein MS-Excel-basiertes Tool wurde im Rahmen des Zukunft Bau Projektes 17.24 entwickelt. Das Tool ist sowohl für Fensterlüftung als auch für die hybride und mechanische Lüftung anwendbar. Es ist ein Instrument zur Berechnung der Außenluftvolumenströme und der resultierenden CO₂-Konzentrationen für benutzerdefinierte Lüftungskonzepte, Nutzungs- und Raumkonstellationen. Dafür kann der Anwender freie Berechnungsrandbedingungen zur Definition des Tagesnutzungsprofils vorgeben. Das Tool ermittelt daraus den zeitlichen Verlauf der CO₂-Konzentration im Raum sowohl als Momentanwert pro Minute als auch als zeitlich gewichteten Durchschnitt im Excel-Tabellenformat. Der zeitlich gewichtete Mittelwert ist in diesem Fall gleich dem arithmetischen Mittelwert, da die Zeitintervalle für die Berechnung der CO₂-Konzentration gleich groß sind. Darüber hinaus werden CO₂-Konzentrationsprofile auch grafisch dargestellt.

Dieses nützliche visuelle Instrument unterstützt und vereinfacht den Verständnis- und Interpretationsprozess. Mit dem resultierenden Tagesnutzungsprofil kann der Verlauf der CO₂-Konzentration über einen ganzen Schul- bzw. Arbeitstag bestimmt werden. Das Tool ermöglicht und erleichtert somit die Bewertung und Gegenüberstellung von Lüftungskonzepten insbesondere für Räume, die ausschließlich oder überwiegend durch Fensterlüftung belüftet werden.

Mit dem Tool kann die individuell geplante Raumnutzung und -belegung schrittweise verbessert werden, indem jeweils eine oder mehrere Maßnahme(n) in den Berechnungs- oder Nutzungsdaten geändert wird (werden). Anschließend kann die Berechnung erneut durchgeführt werden, um den jeweils erzielten Effekt zu beurteilen und mit den Ergebnissen der vorherigen Konstellationen zu vergleichen.

Die Grundlagen sowie die Ein- und Ausgangsgrößen für die Tagesprofilberechnung sind in Tabelle 9 zusammengestellt.

Tabelle 9:
Berechnung der CO₂-Konzentration mit dem CO₂-Berechnungstool

Berechnungsgrundlage	Freie Lüftung: DIN/TS 4108-8 (2022)
Eingangsgrößen	Klima (Temperaturdifferenz, Windgeschwindigkeit) Raumparameter (Fläche, Raumhöhe, Höhe über Grund) Fenstergeometrie (Anzahl, Größe, Öffnungsmöglichkeiten) Lüftungskonzept (frei, hybrid, mechanisch) Nutzung (Personenanzahl, Alter und Aktivität der Personen, Nutzungszeit, Tagesprofil als Zeitplan)
Ausgangsgrößen	Verlauf der CO ₂ -Konzentration (Momentanwert, zeitlich gewichtetes Mittel ab Start des Nutzungsprofils)

Quelle: BBSR 2022

Die DIN/TS 4108-8 (2022) wurde als Berechnungsgrundlage gewählt, weil im Rahmen des Forschungsprojektes festgestellt wurde, dass der Luftvolumenstrom, der auf Grundlage der in diesem Dokument vorgeschlagenen Formel berechnet wurde, im Vergleich zu anderen einschlägigen Normen am besten die Ergebnisse der experimentellen Messungen wiedergibt.

Zusätzlich zur Bewertung des Tagesprofils der CO₂-Konzentration verfügt das Tool über einen weiteren Modus zur Bewertung nach BNB-Schema. Diese Bewertung basiert auf einem vereinfachten Ansatz anhand des betrachteten Zeitintervalles (45 oder 60 Minuten). Die Vorgabewerte, Grundlagen sowie die Ein- und Aus-

gangsgrößen der Bewertung nach dem (BMWSB 2017) entsprechen den Angaben in Tabelle 10.

Anhand der Ergebnisse der CO₂-Auswertung bewertet das Tool die Innenraumluftqualität für das Teilkriterium CO₂ konform zum (BMWSB 2017). Das Tool gibt das Qualitätsniveau sowie die Bewertungspunktzahl des BNB-Bewertungsmaßstabes aus. Soll das erreichte Qualitätsniveau weiter verbessert werden, können Verbesserungsempfehlungen umgesetzt und die Berechnung des CO₂-Konzentrationsverlaufes mit anschließender Neueinstufung gemäß BNB neu gestartet werden. Nähere Informationen zum Excel-Tool siehe www.bnb-nachhaltigesbauen.de.

Tabelle 10:
Vorgegebene Parameter für die BNB-Bewertung nach Kriteriensteckbrief 3.1.3.

Parameter	Bewertung nach (BMWSB 2017)
Bezugswerte für die Berechnung	Mittelwert (zeitlich gewichtete durchschnittliche CO ₂ -Konzentration im Raum innerhalb eines betrachteten Zeitintervalles) der CO ₂ -Konzentration über ein Lüftungsintervall auf Basis einer Außenluftkonzentration von 400 ppm
Raumparameter	Fläche, Raumhöhe, Fensteranzahl, Fenstergröße
Lüftungskonzept	freie Fensterlüftung, hybride Lüftung, mechanische Lüftung
Raumnutzung	planmäßige Belegungsichte, Betrachtung für die Zeit zwischen zwei Lüftungseinheiten Personenanzahl, Alter und Aktivität der Personen, Nutzungszeit
Raumlüftung	einseitig, 5-minütige Stoßlüftung, Lüftungsintervall 1 Stunde (Büro-, Besprechungs-, Seminarräume) bzw. 45 Minuten (Unterichtsräume)
Klima	Temperaturdifferenz innen/außen: 7 K (Innentemperatur 20 °C, Außentemperatur 13 °C, Übergangszeiten: Frühjahr und Herbst), mittlere Windgeschwindigkeit 3 m/s
Weitere Kriterien in der Bewertung	Einsatz von CO ₂ -Ampel und automatischen Fensteröffnungsflügeln (führen zu Zusatzpunkten)
Sonstiges	Punktabzug bei: - Überschreitung der Raumbedarfskennwerte für Räume ab drei Personen - zusätzlichem einmaligen Lüften während eines Zeitintervalles

Quelle: BBSR 2022

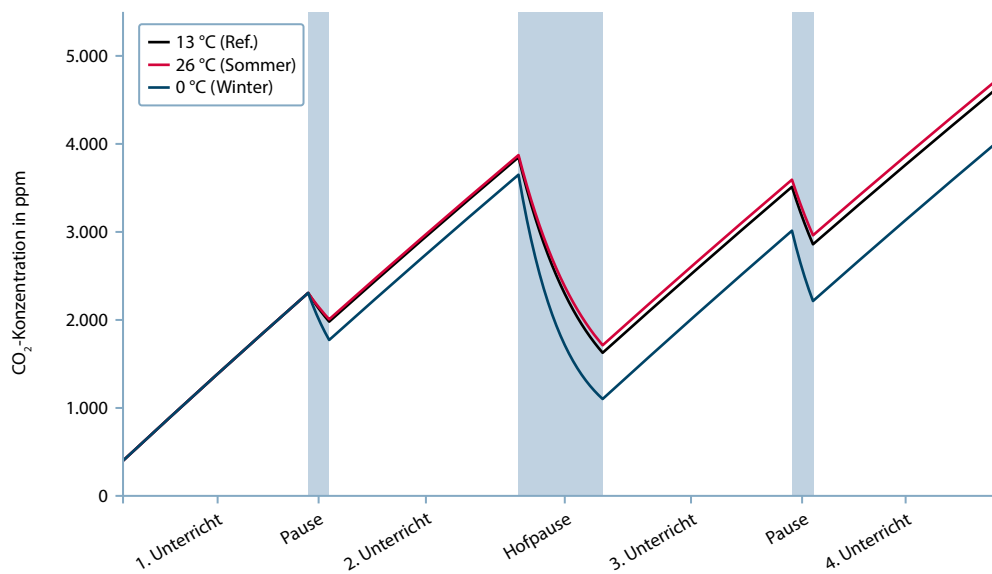
C - Einfluss der Außenlufttemperatur

Der Temperaturunterschied zwischen Innen- und Außenluft ist ein wesentlicher Treiber für die Luftbewegung bei der Fensterlüftung. Der Einfluss der Außenlufttemperatur auf die CO₂-Konzentration bei unverändertem Lüftungsverhalten für einen Winterfall (Außenlufttemperatur 0 °C) und einen Sommerfall (Außenluft-

temperatur 26 °C) wird dem Referenzfall gegenübergestellt (Abbildung 14: Verlauf der CO₂-Konzentration – Einfluss der Außentemperatur).

Erwartungsgemäß liegen die CO₂-Konzentrationsprofile für Außentemperaturen von 13 und 26 °C mit Temperaturunterschieden zwischen Innen und Außen von 7 bzw. 6 K sehr nahe beieinander.

Abbildung 14:
Verlauf der CO₂-Konzentration – Einfluss der Außentemperatur

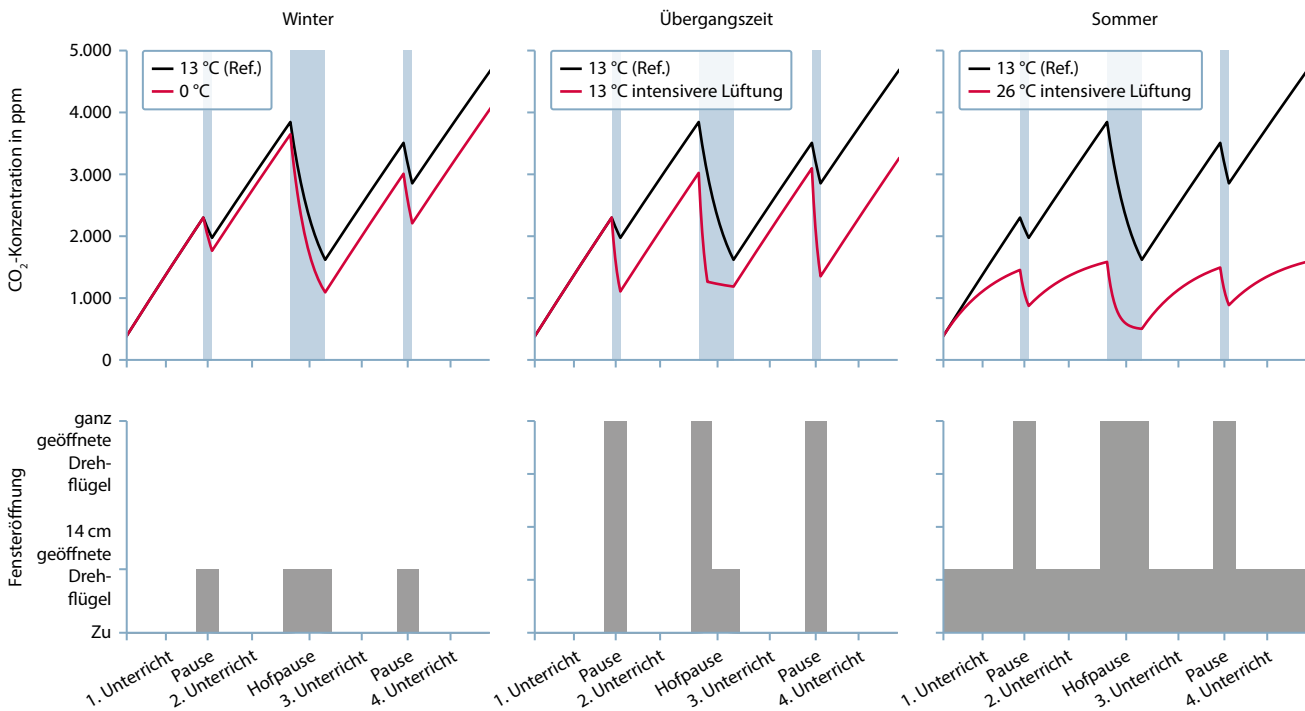


Quelle: BBSR 2022

Die Auswirkung des Temperaturunterschiedes auf die Luftströmung ist jedoch nicht der einzige entscheidende Faktor, der zu verschiedenen Jahreszeiten berücksichtigt werden sollte.

Die Außentemperatur hat wesentlichen Einfluss auf das Lüftungsverhalten der Nutzer. Folgende Szenarien stellen mögliche Nutzerverhalten entsprechend der Außentemperatur dar.

Abbildung 15:
Verlauf der CO₂-Konzentration – Einfluss der Außentemperatur und des veränderten Lüftungsverhaltens



Quelle: BBSR 2022

Bei unverändertem Lüftungsverhalten sind unter sommerlichen Bedingungen bezüglich der hygienischen Raumluftqualität ähnlich kritische Verhältnisse wie in der Übergangszeit zu verzeichnen, da die Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen in einer vergleichbaren Größenordnung liegt. Mit winterlicher Außenlufttemperatur von 0 °C erhöht sich zwar der Außenluftvolumenstrom gegenüber dem Referenzfall, allerdings ohne dass 1.000 ppm erreicht werden können.

Ist im Sommer keine Lärmbelastung zu befürchten, kann mit im Unterricht durchgängig gekippten oder mit 14 cm Öffnungsweite gedrehten Fenstern und Stoßlüftung mit ganz geöffneten Fenstern in den Pausen eine deutliche Verringerung der mittleren CO₂-Konzentration erreicht werden.

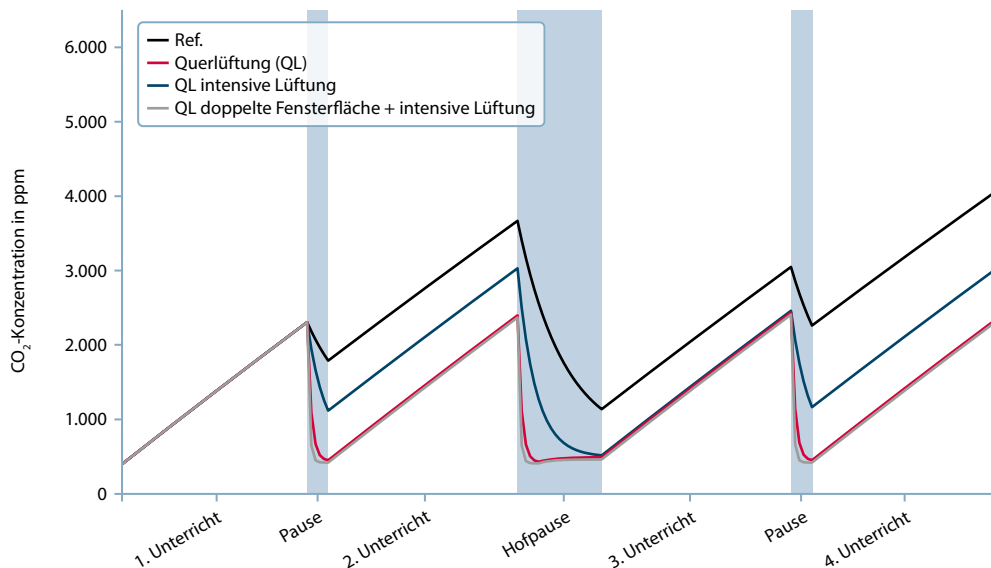
D - Einfluss der Querlüftung

Auch wenn es in bestehenden Klassenzimmern eher selten die Möglichkeit zur Querlüftung mit an gegenüberliegenden Fassaden angeordneten Fenstern gibt, soll an dieser Stelle auf den Effizienzunterschied der Querlüftung gegenüber einer einseitigen Lüftung eingegangen werden. Abbildung 16 verdeutlicht den Effekt im Vergleich mit dem Referenzfall mit Fenstern an einer Fassade, indem jeweils drei Fenster auf gegenüberliegenden Fassaden angeordnet werden. Dazu sind zwei weitere

Anpassungen – größere Fensterflächen und verstärktes Lüften – untersucht worden.

Kann Querlüftung statt einseitiger Lüftung praktiziert werden, kann die Raumluftqualität spürbar verbessert werden. Das Lüften mit weit geöffneten Fenstern bringt die durchschnittliche CO₂-Konzentration in allen Unterrichtsstunden nahe (ca. 1.300 ppm) an den gewünschten Wert von 1.000 ppm. Durch Stoßlüftung sinkt jedoch die CO₂-Konzentration so rasch, dass größere Fensterflächen keinen Vorteil mehr einbringen.

Abbildung 16:
Verlauf der CO₂-Konzentration – Einfluss der Querlüftung



Quelle: BBSR 2022

Querlüftung statt einseitiger Lüftung verbessert die Raumluftqualität deutlich. Das Potenzial der Querlüftung kann insbesondere durch Kombination von verstärktem Lüften und einer weiteren Maßnahme wie bspw. verringerte Belegungsdichte ausgeschöpft werden.

