



Lüftungs- konzepte in Schulen

**Einfluss auf Raumluftqualität,
thermischen Komfort und
Gesundheit in Praxis und Simulation**

Susanna Bordin
Prof. Dr.-Ing. Arno Dentel
Sebastian Hummel
Jonathan Griener
Christina Betzold
Tim Lorenz

**Gute Luft in Klassenräumen
mit Lüftungstechnik**

**Auf den richtigen Betrieb
kommt es an**

**Umfassende medizinische
und technische Feldstudie
in Schulen**

Gute Luft und ein angenehmes Raumklima in Klassenräumen sind von zentraler Bedeutung, sie können die Leistungsfähigkeit, das Wohlbefinden und die Gesundheit von Schülerinnen und Schülern sowie Lehrkräften fördern. Die Covid-19-Pandemie hat dabei deutlich gemacht, wie wichtig eine gute Belüftung von Innenräumen ist, um ein Ansteckungsrisiko von über die Luft übertragbaren Infektionen zu senken. Dennoch zeigen aktuelle Studien, dass die Luftqualität in vielen Schulen häufig noch unzureichend ist (Jendrossek et al. 2023; Knaus/Hartmann/Spitzner 2017). Wenn keine maschinellen Lüftungsanlagen vorhanden sind, ist regelmäßiges Lüften über die Fenster im Klassenraum unverzichtbar. Das lässt sich im Schulalltag jedoch oft nur schwer konsequent umsetzen – vor allem dann, wenn draußen sehr kalte oder sehr warme Temperaturen herrschen, was den thermischen Komfort im Raum stark beeinträchtigen kann. Maschinelle Lüftungsanlagen bieten gegenüber der Fensterlüftung den großen Vorteil einer kontrollierten Lüftung unabhängig von den Umgebungsbedingungen (wie z. B. Außentemperatur, Wind, Lärm) und vom Nutzerverhalten. In der Anwendung können jedoch Fehler auftreten. Neben Komfort- und gesundheitlichen Aspekten sollte auch darauf geachtet werden, Lüftungskonzepte möglichst energieeffizient umzusetzen.

Hier knüpft das interdisziplinäre Forschungsprojekt der TH Nürnberg und der Wolf GmbH mit Unterstützung der Paracelsus Medizinischen Privatuniversität (PMU) Salzburg an. Es untersucht folgende primäre Fragestellungen:

- Wie kann eine gute und gesunde Raumluft in Klassenräumen erreicht werden?
- Wie kann ein möglichst energieeffizienter Betrieb von Lüftungsanlagen gewährleistet werden?
- Welche Potenziale und Fehlerquellen können in der Praxis auftreten?

Der Schwerpunkt liegt auf der Anwendung dezentraler Lüftungstechnik mit Außenluftwechsel, da diese gut für die Nachrüstung von Räumen in Bildungseinrichtungen geeignet ist. Für eine ganzheitliche Betrachtung werden eine zentrale raumluftechnische Anlage und eine reine Fensterlüftung in Kombination mit CO₂-Ampeln in die Untersuchungen eingeschlossen. Es wird der Einfluss auf physikalische Parameter auf der einen Seite und den Menschen auf der anderen Seite analysiert. Dabei wer-

den die Aspekte Raumlufqualität, thermischer Komfort, Gesundheit und Energie betrachtet. Zur umfassenden Bewertung von Lüftungsstrategien verbindet das Projekt Simulationsstudien und eine empirische Feldstudie. In einer siebenmonatigen, kontrollierten Studie wurden drei Lüftungskonzepte in der Praxis an drei Grundschulen über die Winterinfektionssaison 2023/24 detailliert untersucht:

- reine Fensterlüftung in Kombination mit CO₂-Ampeln
- Lüftung über dezentrale Lüftungsgeräte
- Lüftung über eine zentrale Lüftungsanlage

Im Rahmen eines umfangreichen Langzeit-Monitorings wurden Parameter zur Luftqualität und des thermischen Raumklimas sowie Fensteröffnungszustände in acht Klassenräumen und Wetterdaten erfasst. Während der Studie kamen Fragebögen zu Raumkomfort und Wohlbefinden der Schulkinder sowie zu Erkältungssymptomen zum Einsatz. Ergänzend wurden Speichelproben der Schulkinder auf Infektionsparameter ausgewertet. In numerischen Strömungssimulationen wurden Lüftungskonzepte für ein dezentrales Lüftungsgerät untersucht. Zusätzlich wurden Jahressimulationen sechs verschiedener Lüftungskonzepte in einer gekoppelten thermisch-energetischen Gebäudesimulation durchgeführt.

Praktische Relevanz

Auf Basis der Ergebnisse aus Simulation und Feldstudie wurden praxisnahe Handlungsempfehlungen für gute und effiziente Lüftungskonzepte für Schulen formuliert und potenzielle Fehlerquellen im Umgang mit maschinellen Lüftungsanlagen identifiziert. Fachgerecht geplante und gut betriebene Lüftungstechnik – idealerweise mit Wärmerückgewinnung und bedarfsabhängiger Regelung – kann dazu beitragen, eine hohe Raumlufqualität in Klassenräumen zu gewährleisten, das Infektionsrisiko zu senken, den thermischen Komfort zu erhalten und Energie einzusparen.

Ergebnisse

1.1 Feldstudie

Bei der Feldstudie handelt es sich um eine kontrollierte Beobachtungsstudie mit drei Gruppen, an der Schulkinder der Jahrgangsstufen zwei bis vier an drei Grundschulen teilnahmen. Es wurden drei Lüftungskonzepte miteinander verglichen und acht Schulklassen und Klassenräume detailliert untersucht. Abbildung 1 zeigt die Verteilung der Klassenräume auf die drei Gruppen:

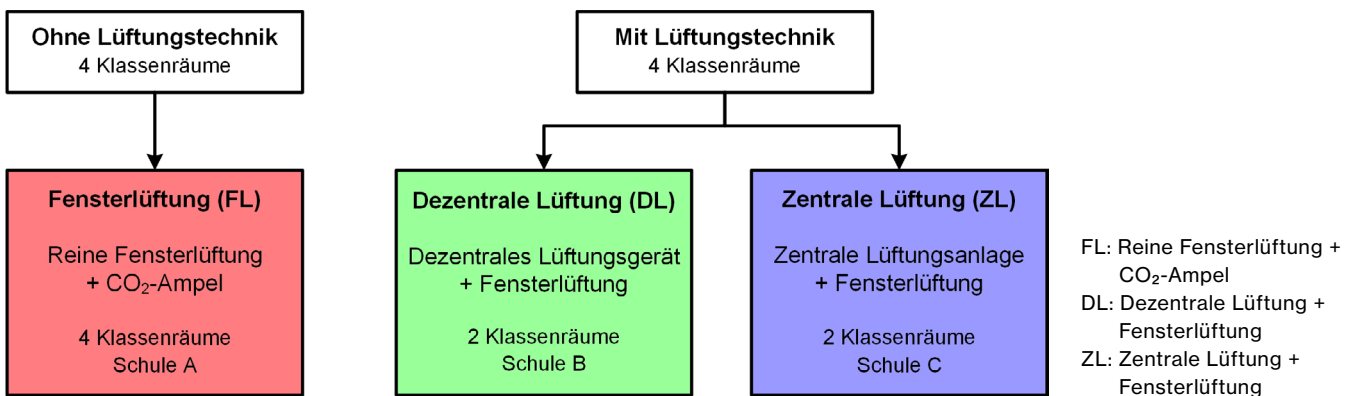
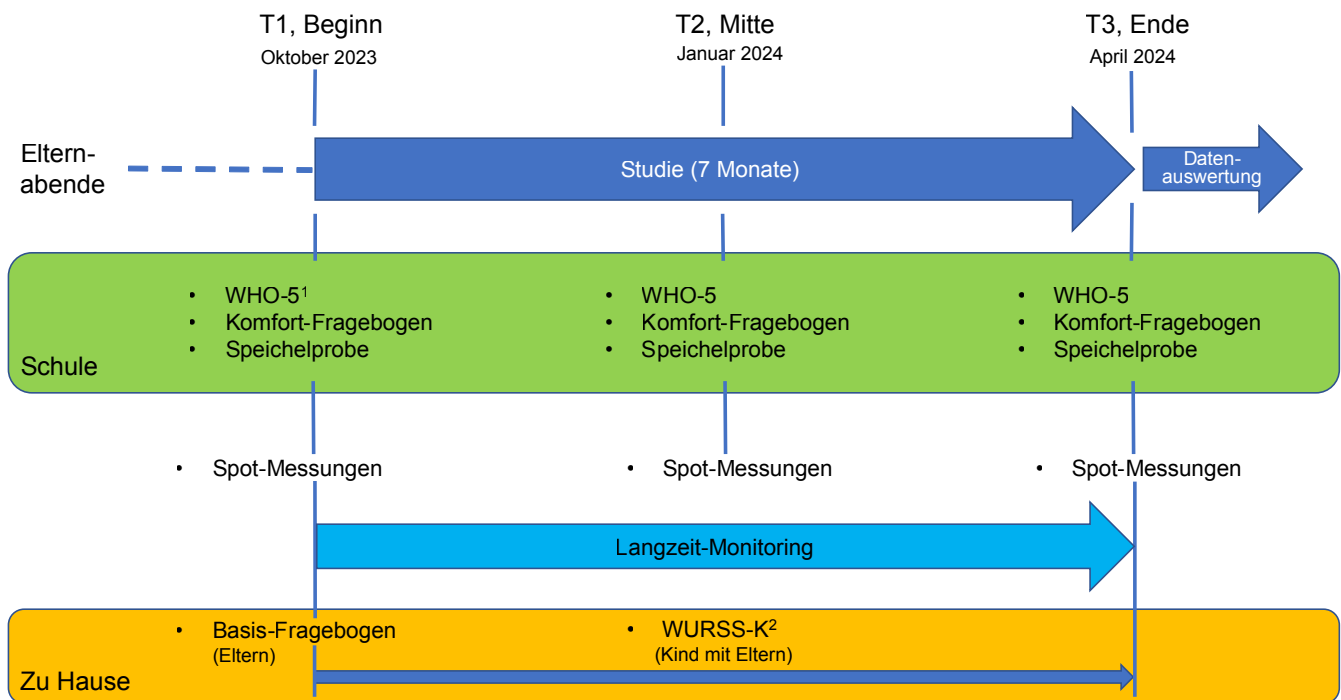


Abb. 1: Studiendesign mit drei Gruppen; Quelle: Susanna Bordin

Die drei untersuchten Grundschulen unterscheiden sich hinsichtlich des sozialen Umfelds. Die Schulen A und B liegen in bildungsnahen, sozioökonomisch stabilen Wohngebieten. Schule C weist einen erhöhten Unterstützungsbedarf und ein niedrigeres soziales Milieu im Einzugsgebiet auf. Im Gegensatz zu den anderen beiden Schulen liegt Schule C an einer stark befahrenen Hauptverkehrsstraße. Die Belegung der Klassenräume erstreckt sich von 19 bis 25 Kindern/Klasse und variiert auch innerhalb der einzelnen Gruppen. Die Fläche der Klassenräume reicht von circa 60 m² (DL), über circa 63 m² (ZL) bis circa 72 m² (FL). Die drei Schulgebäude sind in Massivbauweise ausgeführt und unterscheiden sich hinsichtlich des Baujahrs und Dämmstandards: Gruppe FL nutzt das älteste Gebäude (Baujahr 1974) mit dem geringsten Dämmstandard. Das Schulgebäude der Gruppe DL stammt aus dem Jahr 1994. Gruppe ZL verfügt über ein modernes Schulgebäude von 2016 in Passivhausbauweise mit dem höchsten Dämmstandard in der Studie. Die Räume der Gruppe ZL werden über eine Fußbodenheizung beheizt, im Gegensatz zu den anderen beiden Schulgebäuden, die mit Wandheizkörpern ausgerüstet sind. Die Klassenräume der Gruppe FL sind mit drei großen Schiebefenstern Richtung Süden aus-

gestattet und einem baulichen Sonnenschutz. Die Klassenräume der anderen beiden Gruppen verfügen über 4–6 Dreh-Kippfenster und einen außenliegenden Sonnenschutz, die Richtung Osten (DL, zusätzlich baulicher Sonnenschutz) beziehungsweise Nordnordost (ZL) orientiert sind.

Der Studienablauf ist in Abbildung 2 dargestellt. Die siebenmonatige Studie startete im Oktober 2023 und erstreckte sich über die Winterinfektionssaison bis Ende April 2024. Im gesamten Zeitraum fand eine kontinuierliche Datenaufzeichnung des Raumklimas in den Klassenräumen sowie von Wetter- und Feinstaubdaten an den Schulstandorten statt (Langzeit-Monitoring). An drei Zeitpunkten erfolgten Erhebungen mit Fragebögen und Speichelproben in den Schulen. Zusätzlich kam ein fortlaufender Erkältungsfragebogen zum Einsatz. Die Erhebungen in den Schulen erfolgten Mitte November 2023, Ende Januar 2024 und Ende April 2024 mit einem Abstand von jeweils 10-13 Wochen. An der Studie nahmen insgesamt 109 Kinder teil. Der Gesamtanteil an Mädchen (47,7 %) und Jungen (53,3 %) war nahezu gleich.



1: © Psychiatric Research Unit, WHO Collaborating Center for Mental Health, Frederiksberg General Hospital, DK-3400 Hillerød
 2: WURSS-K© (Wisconsin Upper Respiratory Symptom Survey) 2014. Created by Bruce Barrett MD PhD et al., UW Department of Family Medicine, Madison, WI 53715, USA

Abb. 2: Ablauf der Feldstudie; Quelle: Susanna Bordin

Kohlenstoffdioxid (CO₂)

CO₂ ist ein geruch- und farbloses Gas, das beim Ausatmen entsteht. In Innenräumen steigt der CO₂-Gehalt bei schlechter Lüftung. Hohe Werte sind ein Anzeichen für verbrauchte Luft und können zu Müdigkeit und Konzentrationsproblemen führen.

Typische Bewertung in Innenräumen (in ppm = parts per million):

- unter 1.000 ppm: gute Luftqualität
- 1.000–2.000 ppm: wahrnehmbar schlechte Luft, Lüften empfohlen
- über 2.000 ppm: schlechte Luftqualität, kann gesundheitlich belastend sein

men gemessen. Zusätzlich wurden die Öffnungszustände der Fenster erfasst und der elektrische Energiebedarf der dezentralen Lüftungsgeräte. An den drei Schulstandorten wurden meteorologische Messgrößen und Feinstaubkonzentrationen der Außenluft aufgezeichnet (PM_{2,5} und PM₁₀).

Feinstaub

Feinstaub (particulate matter, PM) bezeichnet winzige feste oder flüssige Partikel in der Luft. Sie entstehen zum Beispiel bei Verbrennungsprozessen, durch Reifenabrieb im Verkehr oder können natürlichen Ursprungs sein – etwa durch Pollen. PM_{2,5} umfasst Partikel mit einem Durchmesser von höchstens 2,5 Mikrometern, die bis in die Bronchien und Lungenbläschen gelangen können. In der Außen- und Raumluft sollte die Feinstaubbelastung möglichst gering sein, um die Gesundheit zu schützen.

1.1.1 Ergebnisse des Langzeit-Monitorings

Um den Einfluss unterschiedlicher Lüftungskonzepte auf die Luftqualität und den thermischen Komfort in den Klassenräumen bewerten zu können, wurden raumlufttechnische Messgrößen im zeitlichen Verlauf erfasst. Es wurden die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit, die CO₂-Konzentration, die Feinstaubkonzentration in der Größe PM_{2,5} (particulate matter) und leicht-flüchtige organische Verbindungen (VOC) in acht Klassenräumen

Der Studienzeitraum umfasst 213 Tage, unter Berücksichtigung der Schulzeiten wurden 720 Schulstunden (à 45 Minuten) ausgewertet. Für einen Vergleich der drei Lüftungskonzepte wurden die Schulstunden-Mittelwerte während des Belegungszeitraums gebildet und die Klassenräume einer Gruppe zusammengefasst. Die

Messwerte liegen alle in der Heizperiode (1. Oktober bis 30. April). Abbildung 3 zeigt die Schulstunden-Mittelwerte für die fünf Messparameter im Klassenraum für jedes Lüftungskonzept mittels Boxplots. Es sind große Unterschiede zwischen den drei Lüftungskonzepten erkennbar. Es werden folgende Abkürzungen und Grenzwerte verwendet:

- Raumlufttemperatur: T , in $^{\circ}\text{C}$, mit $T_{\min} = 20^{\circ}\text{C}$, $T_{\max} = 26^{\circ}\text{C}$
- Relative Luftfeuchte: $r.F.$, in %, mit $r.F._{\min} = 40\%$, $r.F._{\max} = 60\%$
- Feinstaub $\text{PM}_{2,5}$: $\text{PM}_{2,5}$ in $\mu\text{g} / \text{m}^3$
- Flüchtige organische Verbindungen: VOC in %
- Kohlenstoffdioxid: CO_2 in ppm, mit $\text{CO}_{2, \max 1} = 1.000 \text{ ppm}$, $\text{CO}_{2, \max 2} = 2.000 \text{ ppm}$

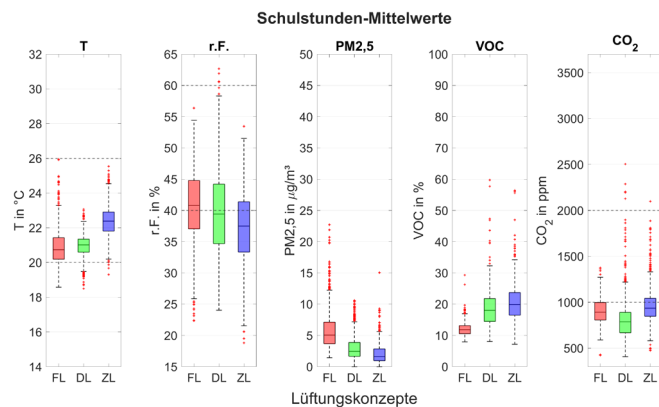


Abb. 3: Lüftungskonzepte – Boxplots mit Schulstunden-Mittelwerten für die Parameter im Klassenraum während des gesamten Belegungszeitraums; Quelle: Susanna Bordin

Eine Temperatur von 26°C wird bei keinem der drei Konzepte überschritten. Die niedrigsten Temperaturen treten bei der Fensterlüftung auf, in knapp einem Fünftel der Zeit liegt die Temperatur unter 20°C . Dort ergibt sich auch die größte Temperaturspreizung. Die geringste Temperaturspreizung zeigt die dezentrale Lüftung, bei dieser wird eine Temperatur von 20°C in knapp 11 % der Schulstunden unterschritten. Bei der zentralen Lüftung sind die Temperaturen insgesamt höher, 20°C werden kaum unterschritten.

Es kann ein Zusammenhang zwischen den Schulstunden, an welchen ein zu kühles Raumklima vorliegt und der Art der Raumbelüftung festgestellt werden. Im Vergleich zu den maschinell belüfteten Klassenräumen, liegt die Raumtemperatur in der Gruppe der reinen Fensterlüftung deutlich häufiger unter 20°C . Dies kann neben den Lüftungskonzepten auch mit dem Dämmstandard der Schulgebäude oder der Regelung der Heizungsanlage zusammenhängen. Die Auswertung der Fensteröffnungszeiten

(deutlich höher bei der reinen Fensterlüftung) unterstützt diese These jedoch.

Dezentrale Lüftungstechnik

Dezentrale Lüftungsgeräte versorgen einzelne Räume direkt mit frischer Außenluft und führen verbrauchte Luft nach außen ab. Sie benötigen meist einen Wanddurchbruch, kommen aber mit kurzen Luftkanälen aus und lassen sich flexibel im Raum integrieren – zum Beispiel als Stand-, Decken- oder Fassaden-geräte. Sie verbessern die Luftqualität und können meist auch Wärme zurückgewinnen.

Die Werte für die relative Luftfeuchte sind, gemessen an einem empfohlenen Mindestwert von 40 % (FGK 2022), tendenziell für alle drei Konzepte zu niedrig, insbesondere für die maschinellen Lüftungskonzepte. Bei den mechanisch belüfteten Klassenräumen liegt die relative Luftfeuchte in mehr als der Hälfte der Zeit unter 40 %.

Die Feinstaubkonzentration $\text{PM}_{2,5}$ im Klassenraum fällt bei der reinen Fensterlüftung unter Betrachtung der Mediane über doppelt so hoch aus wie bei den maschinellen Lüftungskonzepten.

Auch bei den VOC-Werten ist ein deutlicher Unterschied zwischen der Fensterlüftung und den maschinellen Lüftungskonzepten zu sehen. Die geringsten VOC-Werte treten bei der Fensterlüftung auf. Jedoch wird in dieser Studie eine kumulierte VOC-Konzentration gemessen, die keine Rückschlüsse auf einzelne Luftschadstoffe zulässt. Da es sich bei der Gruppe der Fensterlüftung um das älteste Schulgebäude handelt, könnten die Emissionen aus Baumaterialien und Möbeln niedriger sein als in den beiden anderen Schulgebäuden.

Bei der CO_2 -Konzentration zeigt die dezentrale Lüftung meist die geringsten Konzentrationen. In circa 89 % der Zeit liegt die CO_2 -Konzentration unter einem Grenzwert von 1.000 ppm. Es ist jedoch auffällig, dass einige wenige Ausreißer von über 2.000 ppm auftreten. Im Gegensatz dazu ergeben sich bei der Gruppe der zentralen Lüftung die höchsten CO_2 -Konzentrationen. Eine gemittelte CO_2 -Konzentration größer 1.000 ppm liegt in 34 % der Zeit vor und auch Werte größer 2.000 ppm treten auf. Bei der Fensterlüftung gibt es keine Überschreitung von 2.000 ppm, in circa 25 % der Zeit wird jedoch ein Wert von 1.000 ppm überschritten.

Fensteröffnungen

Die Auswertung der Fensterkontaktsensoren ergibt eine durchschnittliche Fenster-Lüftungsdauer je Schulstunde von 28 Minuten in der Gruppe der reinen Fensterlüftung, von 14 Minuten bei der dezentralen Lüftung und von 11 Minuten bei der zentralen Lüftung. In den beiden Gruppen mit Lüftungsgeräten beziehungsweise -anlagen findet also nur halb so oft eine Fensterlüftung während der Schulstunde statt wie in der Gruppe ohne maschinelle Lüftung.

In der Gruppe der reinen Fensterlüftung wird während einer Schulstunde überwiegend ein einzelnes Fenster geöffnet (in ca. 63 % der Fälle). Kippzustände sind aufgrund von Schiebefenstern nicht möglich. Auch bei der dezentralen Lüftung wird in circa 70 % der Lüftungsfälle ein einzelnes Fenster geöffnet. In nur insgesamt 7 % der Lüftungsfälle findet eine natürliche Belüftung der Räume über gekippte Fenster statt. Im Gegensatz dazu wird in der Gruppe der zentralen Lüftung meist über ein gekipptes Fenster (45 %) oder ein geöffnetes Fenster (24 %) gelüftet.

Zusammenhang der Lüftungskonzepte zu Außentemperatur und Feinstaub in der Außenluft

Zwischen der mittleren Umgebungstemperatur und der Raumtemperatur beziehungsweise der relativen Raumluftfeuchtigkeit kann ein näherungsweiser linearer Zusammenhang identifiziert werden. Mit steigender Umgebungstemperatur erscheint eine Erhöhung der Raumtemperatur plausibel. Es ist jedoch festzustellen, dass in der Gruppe der Fensterlüftung, in der die Fensteröffnungszeiten deutlich höher sind, dieser Zusammenhang deutlich stärker ausgeprägt ist als in den beiden anderen Gruppen.

Die unterschiedlich hohen Feinstaubbelastungen im Vergleich der drei Schulen können einen Rückschluss auf die Lüftungskonzepte ermöglichen. Bei der reinen Fensterlüftung kann ein erhöhter Anteil an Feinstaub ungefiltert aus der Außenluft in die Räume einströmen. Die maschinellen Lüftungsanlagen (dezentral oder zentral) besitzen Filter, welche einen gewissen Anteil an Feinstaub PM_{2,5} aus der Frischluft filtern und so die Feinstaubwerte im Vergleich zur reinen Fensterlüftung niedriger halten können.

Betriebsverhalten der dezentralen Lüftungsgeräte

Während der Studie erfolgte in einem der Klassenräume mit einem dezentralen Lüftungsgerät eine Umstellung der Betriebsführung von einer konstanten Ventilator-drehzahl auf eine bedarfsgeführte, CO₂-abhängige Regelung. Die Regelung des Lüftungsgerätes im anderen Klassenraum

(konstante Ventilator-drehzahl) blieb während des gesamten Studienzeitraums unverändert. Eine Auswertung von je 30 Schulstunden vor und nach der Umstellung auf einen CO₂-geführten Betrieb ergibt, dass die elektrische Leistungsaufnahme des Gerätes um 44 % gesunken ist. Die mittleren CO₂-Konzentrationen in den beiden Klassenräumen haben sich nach der Umstellung nur marginal verändert. Die beiden Geräte arbeiteten sowohl ohne als auch mit CO₂-geführter Regelung so, dass die CO₂-Konzentration in den beiden Klassenräumen nur selten im Mittel über 1.000 ppm betrug. Durch die CO₂-geführte Regelung arbeitete das dezentrale Lüftungsgerät daher wesentlich effizienter ohne Nachteile an die raumluft-technischen Anforderungen zu zeigen.

Eine Analyse des Betriebsverhaltens der beiden dezentralen Lüftungsgeräte zeigt, dass es zu Anwendungsfehlern bei der Einstellung des Zeitprogramms kam. Zu Studienbeginn war das Zeitprogramm falsch eingestellt (Betriebszeiten während der Nacht und nicht während der Unterrichtszeit). Weiter konnte festgestellt werden, dass nach dem Ende/vor dem Beginn von Schulferien die Lüftungsgeräte nicht immer passend ein-/abgeschaltet wurden und die manuelle Zeitumstellung auf Winterzeit zwei Wochen zu spät erfolgte. In diesen Fehlzeiten ergaben sich hohe CO₂-Konzentrationen während der Unterrichtszeit, worauf sich die Ausreißer der CO₂-Konzentration in Abbildung 3 zurückführen lassen.

Betriebsverhalten der zentralen Lüftungsanlage

Das Betriebsverhalten der zentralen Lüftungsanlage wurde mittels der Monitoringdaten und Daten eines zentralen Gebäudeleittechnik (GLT)-Systems analysiert. Es konnte festgestellt werden, dass der Zuluftvolumenstrom für den jeweiligen Klassenraum nicht nur präsenz- und CO₂-geführt geregelt wird, sondern auch in Abhängigkeit eines Fensterkontaktsignals. Wird eine Fensteröffnung im GLT-System registriert, wird der Zuluftvolumenstrom für diesen Klassenraum von der zentralen Regelung deaktiviert. Da eine aktive Fensterkontaktmeldung auch nur ein gekipptes oder ein geöffnetes Fenster bedeuten kann, kann sich während der Fensterlüftung aufgrund der deutlich geringeren Luftwechselrate eine wesentlich höhere CO₂-Konzentration einstellen, als es mit mechanischer Lüftungsanlage der Fall wäre. Und wie die Auswertung der Fensterkontaktsensoren zeigt, wird in den zwei Klassenräumen der zentralen Lüftung überwiegend über nur ein gekipptes oder ein geöffnetes Fenster gelüftet, was einen Grund für die hohen gemessenen CO₂-Konzentrationen darstellt (Abbildung 3).

Betriebszustände der Luftreiniger in der Gruppe der zentralen Lüftung

Die zwei Klassenräume in der Gruppe der zentralen Lüftung sind zusätzlich mit einem Luftreiniger mit mechanischen Filtern ausgestattet. Auf den Betriebszustand (an/aus) konnte vom Studienteam kein Einfluss genommen werden, auch wurde der Betriebszustand nicht erfasst. Es wurde jedoch eine Analyse der Feinstaubkonzentrationen von PM_{2,5} in den Klassenräumen und der Außenluft durchgeführt, anhand derer die Betriebszustände sehr grob ermittelt wurden. In den Zeiträumen, in denen die Luftreiniger vermutlich eingeschaltet waren, sind die Feinstaubwerte geringer als in den Zeiträumen, in denen sie vermutlich deaktiviert waren. Insgesamt treten in der Gruppe der zentralen Lüftung die geringsten PM_{2,5} Werte auf (Abbildung 3).

1.1.2 Ergebnisse der Erhebungen

Die Bewertung des thermischen Komforts und anderer Parameter wurde mittels eines im Projekt entwickelten Fragebogens erfasst. Die Luftqualität wird von den Schulkindern in allen drei Gruppen zwischen „gut“ und „in Ordnung“ bewertet. Es werden keine Geräusche genannt, die auf ein Lüftungsgerät oder Lüftungskanäle zurückgeführt werden können. Der größte Unterschied zwischen den drei Gruppen zeigt sich beim Temperaturempfinden. Die Temperaturen werden in der Gruppe der Fensterlüftung als eher kühl empfunden, in der Gruppe der dezentralen Lüftung als eher gut und in der Gruppe der zentralen Lüftung als eher warm. Auch im Langzeit-Monitoring zeigen sich die im Schnitt höchsten Raumtemperaturen in der Gruppe der zentralen Lüftung (Abbildung 3). Diese Gruppe verfügt über ein modernes Schulgebäude mit dem in der Studie höchsten Dämmstandard. Die geringsten Raumtemperaturen werden in den rein über die Fenster belüfteten Klassenräumen gemessen. Die Studie lief von Oktober 2023 bis April 2024 und deckt die kühleren Übergangszeit und den Winter ab.

In der Studie kann mittels des WHO-5-Fragebogens (WHO-5, 1998) kein Zusammenhang zwischen dem subjektiven psychologischen Wohlbefinden der Kinder und dem Lüftungskonzept geschlossen werden.

Die Auswertung des fortlaufenden Erkältungsfragebogens WURSS-K (Barrett et al. 2014) erfolgte für die Gruppe der Fensterlüftung und der dezentralen Lüftung. Aufgrund von einer geringen Beteiligung wurde die Gruppe der zentralen Lüftung nicht berücksichtigt. Der Vergleich zeigt, dass im Mittel die erhobenen Parameter in der Gruppe der dezentralen Lüftung alle geringer ausfallen als in der Gruppe der Fensterlüftung – bis auf die

Symptomschwere, die nahezu gleich ist. Dabei umfasst die Symptomschwere den Einfluss auf Krankheitssymptome wie „Laufende Nase“, „Niesen“ oder „Husten“. Bei der dezentralen Lüftung ist der relative Anteil erkrankter Kinder circa 8 % geringer und die durchschnittliche Anzahl der Krankheitstage pro Kind weniger (5,2 vs. 7,9 Krankheitstage/Kind). Auch die Gesamtbewertung der Erkältung (Gesamt-Index des Fragebogens) sowie die Bewertung der allgemeinen Krankheitsschwere und der funktionellen Auswirkung sind niedriger. Dabei umfasst der Parameter „funktionelle Auswirkung“ den Einfluss der Krankheit auf Faktoren wie „Denken“, „Schlafen“ oder „mit Freunden spielen“.

Anhand der Speichelproben wurden die Biomarker saliväres C-reaktives Protein (sCRP) und saliväres Immunglobulin A (sIgA) im Labor analysiert, die unter anderem auf mögliche Atemwegsinfekte im Körper hinweisen können. Aufgrund der geringen Beteiligung wurde die Gruppe der zentralen Lüftung in der Auswertung nicht berücksichtigt. CRP gehört zu den akute-Phase-Proteinen. Seine Konzentration steigt innerhalb weniger Stunden als Reaktion auf eine Entzündung an und sinkt nach Abklingen der Infektion wieder relativ schnell ab. Die CRP-Konzentration ist jedoch insbesondere bei einer bakteriellen Infektion erhöht, weniger bei einer viralen Infektion. IgA ist ein Antikörper, der sowohl bei viralen als auch bakteriellen Infektionen gebildet wird und zeitlich beständiger ist. Erkrankungen der oberen Atemwege werden meist durch Viren ausgelöst. Für den Entzündungsparameter sCRP kann an keinem der drei Erhebungszeitpunkte ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Gruppen festgestellt werden. Hingegen ist der Antikörper sIgA an jedem der drei Erhebungszeitpunkte in der Gruppe der dezentralen Lüftung signifikant niedriger im Vergleich zur Gruppe der Fensterlüftung.

Die Ergebnisse des fortlaufenden Erkältungsfragebogens WURSS-K und die Analyse des im Vergleich zu sCRP zeitlich beständigeren Biomarkers sIgA, der auch bei viralen Infektionen erhöht ist, lassen darauf schließen, dass in der Gruppe der dezentralen Lüftung weniger Erkältungen auftreten als in der Gruppe der Fensterlüftung. Da es sich um eine Beobachtungsstudie handelt, können jedoch keine kausalen Schlüsse gezogen werden; potenzielle Störfaktoren (z. B. Klassengröße, saisonale Effekte) könnten die Ergebnisse beeinflussen.

1.2 Ergebnisse der Simulationen

In einer stationären numerischen Strömungssimulation wurden neun Szenarien für ein dezentrales Lüftungs-

gerät betrachtet, die sich aus drei Einbauvarianten und drei verschiedenen großen Luftvolumenströmen ergeben. Die europäische Norm DIN EN 16798-1 definiert vier Kategorien an die Innenraumqualität. Mittels eines Verfahrens auf Grundlage der wahrgenommenen Luftqualität, das Emissionen der Personen im Raum und des Gebäudes berücksichtigt, kann der erforderliche Außenluftvolumenstrom für die entsprechende Kategorie berechnet werden (DIN EN 16798-1, 2022). Für die Simulation wurden drei Zuluftvolumenströme nach den Kategorien I bis III gewählt. Insgesamt zeigt sich, dass mit steigendem Zuluftvolumenstrom die Luftqualität verbessert wird, aber der thermische Komfort etwas sinkt. In der VDI 6040 wird für Klassenräume die Auslegung nach Kategorie II (7 l/(s*Person)) empfohlen (VDI 6040 Blatt 1, 2011). Auch in der Strömungssimulation ist mindestens ein Zuluftvolumenstrom der Kategorie II erforderlich, um einen Grenzwert von 1.000 ppm näherungsweise einzuhalten. Das Zugluftrisiko ist bei allen betrachteten Einbauvarianten und Zuluftvolumenströmen niedrig. Die gleichmäßige Einbringung der Zuluft über ein Zuluftrohr an der Rückseite des Klassenraums liefert in Bezug auf die Raumluftqualität etwas bessere Werte, als wenn die Zuluft direkt am Auslass des dezentralen Lüftungsgeräts in den Klassenraum eingeblasen wird. Ist dies der Fall, hat die Position des Lüftungsgeräts (mittig oder in der Ecke) keinen großen Einfluss auf die Luftqualität und Luftverteilung. Jedoch fällt die Bewertung des thermischen Komforts bei einer mittigen Position des Geräts an der Rückwand des Klassenraums deutlich besser aus als bei einer Positionierung in der Ecke. Für die Bewertung des thermischen Komforts wurde mittels der Simulationsergebnisse der PMV-Index an den Positionen der Schülerinnen und Schüler bestimmt.

PMV-Index

Der PMV-Index (Predicted Mean Vote) ist ein international anerkannter Kennwert zur Bewertung des thermischen Komforts in Innenräumen nach der Norm DIN EN ISO 7730. Er sagt die durchschnittliche Bewertung des Raumklimas durch eine große Personengruppe vorher, auf einer Skala von -3 (kalt) über 0 (neutral) zu +3 (heiß). Der PMV-Index berücksichtigt unter anderem die Faktoren Lufttemperatur, Strahlungstemperatur, relative Luftfeuchte, Luftgeschwindigkeit, Bekleidung und Aktivitätsniveau.

In einer gekoppelten thermisch-energetischen Gebäude- und Durchströmungssimulation über den Zeitraum eines Jahres wurden sechs verschiedene Lüftungskonzepte für einen Klassenraum untersucht. Es wurden maschinelle Lüftungskonzepte mit Wärmerückgewinnung (WRG), Fensterlüftung und die Kombination von beidem simuliert. Insgesamt zeigen sich eine hohe Luftqualität und guter thermischer Komfort sowie ein niedriger Energieverbrauch bei einer CO₂-geführten maschinellen Lüftung.

Thermischer Komfort

Thermischer Komfort beschreibt, wie behaglich das thermische Umgebungsklima in einem Raum empfunden wird. Dabei spielen Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Zugluft, Wärmestrahlung, Kleidung und Aktivität eine Rolle. Ziel ist ein zufriedener Zustand mit dem thermischen Raumklima, das weder als kühl noch als warm empfunden wird. Die Anforderungen sind in der Norm DIN EN ISO 7730 beschrieben (DIN EN ISO 7730, 2006).

Eine zusätzliche Fensterlüftung führt hauptsächlich zu einem höheren Heizenergieverbrauch. Bei reiner Fensterlüftung führt die Berücksichtigung einer CO₂-Ampel zu deutlich niedrigeren CO₂-Konzentrationen als eine Lüftungsstrategie, bei der die Fenster lediglich während der Pausen und alle 20 Minuten für fünf Minuten geöffnet werden. Allerdings gehen häufiges Fensterlüften beziehungsweise hohe Luftwechselraten mit Einschränkungen im thermischen Komfort sowie einem erhöhten Heizenergiebedarf einher. Der Gesamtenergiebedarf kann in der Simulation durch eine CO₂-geführte maschinelle Lüftung mit WRG im Vergleich zu einer reinen Fensterlüftung in Kombination mit einer CO₂-Ampel um circa ein Drittel gesenkt werden. Die größten Temperaturspreizungen treten bei den Varianten der Fensterlüftung auf. Hier werden die niedrigsten Temperaturen im Winter und höchsten Temperaturen im Sommer erreicht. Insbesondere in der Heizperiode treten bei Fensterlüftung im Vergleich zur maschinellen Lüftung deutlich häufiger Schulstunden auf, in denen die Raumtemperatur unterhalb des behaglichen Bereichs liegt. Im Sommer treten Temperaturüberschreitungen seltener auf und die Unterschiede zu den maschinellen Lüftungskonzepten sind weniger ausgeprägt. Bei allen simulierten Varianten ergeben sich Schulstunden mit überhöhten Raumtemperaturen. Es ist zu beachten, dass bei den maschinellen Lüftungskon-

zepten die WRG bei den entsprechenden Umgebungsbedingungen durch einen Bypass umgangen wurde, um sommerliche Temperaturanstiege im Raum zu reduzieren. Jedoch wurde keine Nachtlüftung berücksichtigt, die ebenfalls zur Absenkung der Raumtemperatur in den Sommermonaten beitragen könnte. Aus den Simulationsergebnissen wird weiter deutlich, dass bei der Fensterlüftung der Luftwechsel mit zunehmender Außentemperatur abnimmt und die CO₂-Konzentration im Klassenraum ansteigt. Insbesondere im Sommer kann es schwierig sein, eine akzeptable CO₂-Konzentration über eine reine Fensterlüftung zu gewährleisten.

Wärmerückgewinnung

In der Lüftungstechnik bezeichnet Wärmerückgewinnung (WRG) die Übertragung von Wärmeenergie aus der Abluft, die aus dem Raum abgeführt wird, auf die frische Außenluft, bevor sie in den Raum gelangt. Dadurch wird die frische Außenluft vorgewärmt. Dies erhöht die Energieeffizienz des Lüftungssystems und reduziert den Heizenergiebedarf, insbesondere in der kalten Jahreszeit.

1.3 Weiterer Forschungsbedarf

Im Rahmen der Feldstudie wurden insgesamt acht Schulklassen und Klassenräume an drei Grundschulen untersucht. Die Auswertung des Langzeit-Monitorings sowie die Analyse der Fragebögen und Speichelproben weisen auf Unterschiede zwischen den untersuchten Lüftungskonzepten mit und ohne maschinelle Lüftungstechnik hin. Aufgrund der begrenzten Fallzahl ist die Aussagekraft hinsichtlich einer breiteren Übertragbarkeit jedoch eingeschränkt. Für eine fundiertere Bewertung und höhere Repräsentativität erscheint eine Ausweitung der Untersuchung auf eine größere Stichprobe zielführend. Dabei kann das bestehende Studiendesign einschließlich der eingesetzten empirischen und messtechnischen Methoden übertragen und entsprechend angepasst werden. Auch eine Untersuchung an weiterführenden Schulen wie Realschulen, Gymnasien oder Gesamtschulen mit älteren Schülerinnen und Schülern wäre sinnvoll, um mögliche alters- und schulformspezifische Unterschiede in der Wirkung und Akzeptanz verschiedener Lüftungskonzepte zu untersuchen.

Nutzen für die Praxis

In Deutschland erfolgt die Belüftung von Klassenräumen überwiegend rein über die Fenster. Der Einsatz maschineller Lüftungssysteme steigt jedoch zunehmend. Während zentrale Lüftungsanlagen vor allem in Neubauten integriert werden, kommen bei Nachrüstungen in Bestandsgebäuden meist dezentrale Lüftungsgeräte zum Einsatz. Dabei bieten Lüftungsgerätehersteller mit Stand-, Decken- und Brüstungsgeräten vielfältige Integrationsmöglichkeiten an.

Entscheidend für eine gute Luftqualität ist ein ausreichend großer Zuluftvolumenstrom (mindestens Kategorie II der DIN EN 16798-1). Maschinelle Lüftungsanlagen bieten gegenüber der Fensterlüftung den großen Vorteil einer kontrollierten Lüftung unabhängig von den Umgebungsbedingungen (wie z. B. Außentemperatur, Wind, Lärm) und dem Nutzerverhalten.

2.1 Energieeffizienz

Dezentrale Geräte und zentrale Lüftungsanlagen bieten zusätzlich Vorteile bei Energieeffizienz und thermischem Komfort. Durch Wärmerückgewinnung, die bei modernen Lüftungsgeräten den aktuellen Stand der Technik darstellt, kann Heizenergie gespart werden. Im Sommer ist zudem bei vielen Geräten eine Nachtlüftung möglich, um den Raum für den folgenden Tag vor zu kühlen. Die Regelung maschineller Lüftungsanlagen sollte bedarfsgeführt in Abhängigkeit der Luftqualität (häufig der CO₂-Konzentration) erfolgen. Dabei wird der Volumenstrom dem tatsächlichen Bedarf angepasst, wodurch der elektrische Energieverbrauch der Geräte gesenkt wird und auch der Heizenergieverbrauch reduziert werden kann. Eine gute Luftqualität bleibt erhalten. Zusätzlich kann eine zeitgesteuerte Regelung genutzt werden, um zum Beispiel eine reduzierte Lüftung außerhalb der Nutzungszeiten zu berücksichtigen.

2.2 Dezentrale Lüftungsgeräte

Werden dezentrale Standlüftungsgeräte genutzt, werden diese häufig an der Rückwand des Klassenraums aufgestellt. Wenn möglich sollte die Zuluft einbringung über mehrere Auslässe unterhalb der Decke erfolgen. Dies kann mit einem Zuluftkanal, der an den Auslass des dezentralen Geräts angeschlossen wird, umgesetzt wer-

den. So kann die Zuluft gleichmäßig im Raum verteilt werden. Wird die Luft direkt über den Auslass des Geräts in den Raum eingeblasen, sollte das Gerät mittig an der Rückwand positioniert werden, um einen besseren thermischen Komfort zu gewährleisten als bei einer Platzierung in der Ecke.

Dezentrale Lüftungsgeräte sollten nicht durch Gegenstände, wie zum Beispiel Möbel, verbaut werden. Wenn es möglich ist, sollten die Geräte in ein übergeordnetes Gebäudeleittechnik (GLT)-System eingebunden werden. Dies ermöglicht einen zentralen Zugriff auf die Geräte und erleichtert Überprüfungen und Anpassungen im Betrieb. Häufig ist jedoch kein zentrales GLT-System in Schulen vorhanden, sodass die Geräte einzeln manuell eingestellt werden müssen. Dies kann bei mehreren Geräten in einer Schule zu einem hohen zusätzlichen Aufwand für das Gebäudemanagement führen und auch zu Fehlern in der Bedienung.

2.3 Fehlerquellen bei der Anwendung von maschinellen Lüftungsanlagen

Bei der Einstellung von dezentralen Lüftungsgeräten und zentralen Anlagen ist unter anderem auf folgende Punkte zu achten:

- Eingabe der korrekten Betriebszeiten im Zeitprogramm des Lüftungsgeräts (z. B. ein Betrieb während der Schulwoche (Montag–Freitag) und Unterrichtszeit (7:45–13:00 Uhr) sowie gegebenenfalls einer anderweitigen Raumnutzung am Nachmittag)
- Berücksichtigung von Ferienzeiten: Während der Ferien sollten die Geräte zur Energieeinsparung ausgestellt werden, jedoch ist auf ein korrektes Abschalten und insbesondere Wiedereinschalten vor Ferienbeginn beziehungsweise nach Ferienende zu achten. Einige Hersteller bieten im Bedienmenü der Geräte zum Beispiel die Eintragung von Ferienzeiten über ein Urlaubsprogramm an.
- Berücksichtigung der Zeitumstellung im Winter und Sommer: Wenn in der Bedienung des Gerätes eine automatische Sommerzeitumschaltung vorhanden ist, sollte diese genutzt werden.

Zusätzlich ist es wichtig, dass mögliche Besonderhei-

ten bei der Regelung maschineller Lüftungsanlagen den Nutzenden, wie Mitarbeitenden des Gebäudemanagements, Lehrkräften und Schülerinnen und Schülern, verständlich mitgeteilt werden. Zum Beispiel kann es sein, dass zentrale Anlagen aus Effizienzgründen den Zu- und Abluftvolumenstrom abregeln, wenn in dem entsprechenden Klassenraum ein Fenster geöffnet wird. Dies macht aus energetischer Sicht Sinn, kann jedoch zu einer sehr schlechten Raumluftqualität führen. Wenn zum Beispiel über einen längeren Zeitraum nur ein Fenster geöffnet oder gekippt wird, kann der erforderliche Luftvolumenstrom durch die Fensteröffnung häufig nicht erreicht werden, wodurch die CO₂-Konzentration stark ansteigen und die Luftqualität erheblich abnehmen kann.

Für einen sicheren und effizienten Betrieb dezentraler Lüftungsgeräte und zentraler Lüftungsanlagen ist eine regelmäßige Wartung der technischen Komponenten (wie der Filter, Ventilatoren und Wärmeübertrager) erforderlich.

2.4 Rahmenbedingungen für die Planung maschineller Lüftungsanlagen

In einem Grundsatzpapier führender Branchenverbände der Gebäudetechnik von 2022 werden zur Planung maschineller Schullüftungssysteme für Klassenräume mit einer Grundfläche von 50 bis 90 m² und einer Belegung von circa 30 Schülerinnen und Schülern folgende Mindestanforderungen festgelegt (BTGA et al. 2022):

- Außenluftvolumenstrom > 25 m³/h pro Person im Raum
- Schallleistungspegel < 43 dB(A), Schallemission der Lüftungsanlage während der Unterrichtszeit (unter Annahme einer Raumdämpfung von 8 dB)
- verpflichtender Einsatz von Wärmerückgewinnung
- Außenluftfilter: mindestens ePM1 50 % (gemäß ISO 16890)
- verpflichtende bedarfsorientierte Einzelraumregelung, automatische Regelung der Außenluftmengen in Abhängigkeit der Luftqualität (z. B. nach CO₂, VOC), um bei geringerer Besetzung und ausreichender Luftqualität Energie einzusparen
- behagliche und vollständige Raumströmung

2.5 Reine Fensterlüftung

Ist keine maschinelle Lüftung vorhanden, findet der Luftaustausch also rein über das Öffnen der Fenster statt,

sollte regelmäßig über weit geöffnete Fenster stoßgelüftet werden. Sind Fenster an mehreren Raumseiten vorhanden, kann der Luftwechsel durch ein beidseitiges Fensteröffnen (Querlüftung) erhöht werden. Werden keine CO₂-Messgeräte genutzt, sollte im Winter alle 20 Minuten für 3–5 Minuten eine Stoßlüftung erfolgen, im Sommer häufiger und länger (UBA 2020).

Bei einer reinen Fensterlüftung wird der Einsatz von CO₂-Messgeräten mit einem visuellen Feedback empfohlen, zum Beispiel CO₂-Ampeln. Eine gut sichtbare CO₂-Ampel regt zum erforderlichen Fensteröffnen an und erhöht das Verständnis für die Luftqualität im Raum. Dabei sollte auf folgende Punkte bei der Positionierung und Kalibrierung geachtet werden (Burgholz et al. 2025):

- Anbringung auf etwa 1,5 m Höhe
- freie Platzierung ohne Abdeckung durch Gegenstände oder Möbel
- keine direkte Nähe zu Fenstern oder Türen, damit die CO₂-Konzentration im Raum nicht unterschätzt wird
- keine direkte Nähe zum Ausatembereich von Personen (Schülerinnen und Schüler oder der Lehrkraft), da die CO₂-Konzentration in der ausgeatmeten Luft sehr hoch ist (ca. 40.000 ppm)
- Bei vielen CO₂-Messgeräten findet eine Selbstkalibrierung der Sensorik statt. Die dafür erforderlichen Bedingungen sind den Herstellerangaben zu entnehmen. Falls das Messgerät keine Selbstkalibrierung unterstützt, muss eine Neukalibrierung der Sensoren innerhalb des vom Hersteller vorgegebenen Zeitraums erfolgen.

2.5.1 Hemmnisse bei der reinen Fensterlüftung

Eine ausreichende Fensterlüftung kann jedoch durch verschiedene Faktoren beeinträchtigt werden. Oft werden Fenster nicht so häufig geöffnet, wie es erforderlich wäre. Bei kalten oder heißen Außentemperaturen im Winter oder Sommer kann es bei geöffneten Fenstern im Klassenraum schnell unbehaglich werden. Es können große Temperaturschwankungen und Zugerscheinungen auftreten. Sind die Außen- und Raumtemperatur hingegen ähnlich, verringert sich der Luftaustausch deutlich, sodass die Fenster über einen längeren Zeitraum geöffnet bleiben müssen und eventuell gar nicht genug frische Luft nachströmt.

Zusätzlich kann häufiges Lüften durch die regelmäßigen Unterbrechungen den Unterricht stören und die Konzentration der Schülerinnen und Schüler beeinträchtigen.

Auch die Lärmbelastung von außen kann durch geöffnete Fenster steigen (wie z. B. Verkehrsgeräusche oder Baustellenlärm). Und mitunter kann das Lüften schlicht vergessen werden.

2.6 Fazit

In Schulen spielt die Luftqualität eine entscheidende Rolle für das Wohlbefinden, die Gesundheit und das Lernen der Schülerinnen und Schüler. Fensterlüftung ist eine einfache und kostengünstige Lösung, die jedoch oft zu unzureichender Luftqualität, thermischen Ungleichgewichten und Heizenergieverlusten führen kann. Eine kontrollierte, maschinelle Lüftung bietet einige Vorteile gegenüber der Fensterlüftung. Fachgerecht geplante und gut betriebene

Lüftungssysteme – vorzugsweise mit Wärmerückgewinnung und bedarfsabhängiger Regelung – können dazu beitragen, eine gute Raumluftqualität in Klassenräumen sicherzustellen, Erkrankungen zu reduzieren (Anteil erkrankter Kinder ca. 8 % geringer), den thermischen Komfort zu erhalten und Energie effizient zu nutzen (ca. 30 % Energieeinsparung).



Abb. 6: Klassenraum mit einem dezentralen Lüftungsgerät, die Zuluft wird über einen Textilschlauch eingebracht;
Foto: Wolf GmbH

Methodik und Projektverlauf

3.1 Methodik

Das Projekt umfasst Simulationsstudien und eine Feldstudie, die den Schwerpunkt bildet. In der Feldstudie wurden der mögliche Einfluss von Lüftungstechnik in Klassenräumen auf Erkrankungen der oberen Atemwege, gesundheitsbezogenes Wohlbefinden und Komfort von Schülerinnen und Schülern in der Praxis untersucht sowie physikalische Parameter im Klassenraum bewertet. Das Studiendesign wird als Einführung zu den Ergebnissen unter Punkt 2.1 beschrieben. An den drei Erhebungszeitpunkten in den Schulen wurden der WHO-5-Fragebogen (WHO-5, 1998) zur Bewertung des subjektiven psychologischen Wohlbefindens sowie ein selbst erstellter Fragebogen zu thermischem Komfort und zu Geräuschen im Klassenraum eingesetzt. Zur Erfassung von Erkältungssymptomen wurde der fortlaufende Erkältungsfragebogen für Kinder WURSS-K (Barrett et al. 2014) genutzt. Die an den drei Erhebungszeitpunkten gesammelten Speichelproben wurden im Labor der PMU mittels einer ELISA Analyse auf die Biomarker C-reaktives Protein und Immunglobulin A ausgewertet. In einem über die gesamte Studie andauernden Langzeit-Monitoring wurden sowohl physikalische Parameter in den acht Klassenräumen als auch meteorologische Messwerte und Feinstaubwerte an den drei Schulstandorten kontinuierlich erfasst.

In stationären, numerischen Strömungssimulationen (Software ANSYS) wurden Lüftungskonzepte mit einem dezentralen Lüftungsgerät untersucht. Der Schwerpunkt lag auf der Zuluftfeinbringung, wobei der Einfluss der Gerätepositionierung, der Art der Luftfeinbringung und der Größe des Zuluftvolumenstroms analysiert wurden. In neun Szenarien, die sich aus drei Einbauvarianten und drei verschiedenen großen Luftvolumenströmen ergeben, wurden Behaglichkeit, Luftqualität und Lüftungseffektivität bewertet.

Ergänzend wurden in einer gekoppelten thermisch-energetischen Gebäude- und Durchströmungssimulation (Software TRNSYS) Jahressimulationen sechs verschiedener Lüftungskonzepte für einen Klassenraum durchgeführt, die eine maschinelle Lüftung, Fensterlüftung sowie die Kombination von beidem umfassen. Es erfolgte eine Bewertung der Raumluftqualität, von Behaglichkeitsparametern und des Energiebedarfs (Heizenergie und elektrische Energie für ein dezentrales Lüftungsgerät).

3.2 Projektverlauf

Der Projektablauf ist in Abbildung 4 dargestellt. In einem ersten Schritt wurden der aktuelle Stand der Normen sowie der Forschung zu Anforderungen an eine gute und gesunde Raumluft und thermischen Komfort in Schulen recherchiert. Auch aktuelle Erkenntnisse, die aus der Covid-19-Pandemie hervorgegangen sind, wurden berücksichtigt. Zu Beginn und im weiteren Verlauf des Projekts wurden Untersuchungsszenarien für die Simulationen sowie für die Feldstudie entwickelt. Das Studiendesign wurde festgelegt und in enger Zusammenarbeit mit der medizinisch-psychologischen Expertise der PMU geplant und umgesetzt. Die Durchführung der Feldstudie erforderte eine sorgfältige und umfassende Vorbereitung. Diese beinhaltete auf organisatorischer Ebene: Die Auswahl und Gewinnung von passenden Schulen; die Abstimmung mit allen Beteiligten, wie den zuständigen Schulleitungen, Schulämtern, Gemeindevertretern und Gebäudeträgern; die Einholung der Genehmigung durch die Schulaufsicht der Regierung von Mittelfranken sowie eines positiven Votums durch eine Ethikkommission. Parallel wurde ein umfangreiches Messtechnikkonzept für ein Langzeit-Monitoring in den Schulen entwickelt. Des Weiteren wurden geeignete Fragebögen zur Anwendung in der Schulstudie ausgewählt, übersetzt oder selbst erstellt. Der englische Erkältungsfragebogen WURSS-K (Barrett et al. 2014) wurde in Absprache mit dem Ersteller des Fragebogens, Bruce Barrett, und der Wisconsin Alumni Research Foundation (WARF) anhand eines standardisierten Übersetzungsprotokolls ins Deutsche übersetzt.

Parallel zu den Studienvorbereitungen wurde ein Versuchsraum an der TH Nürnberg aufgebaut, der einen Klassenraum nachbildet und die Untersuchung verschiedener Lüftungskonzepte ermöglicht (dezentrales Standlüftungsgerät, Drallluftauslässe an der Decke, Fensterlüftung). Es erfolgten Abklingversuche für verschiedene Lüftungskonzepte. In einem weiteren Schritt wurden numerische Strömungssimulationen für den Versuchsraum durchgeführt und anhand von Messungen validiert. Darauf aufbauend erfolgte die Übertragung auf eine reale Klassenraumgeometrie und eine simulative Parameterstudie. Zusätzlich wurden thermisch-energetische Jahressimulationen für maschinelle Lüftungskonzepte und Strategien mit Fensterlüftung zur Bewertung von Komfortparametern, Raumluftqualität und Energiebedarf durchgeführt.

Einige Wochen vor Beginn der Feldstudie wurde die Messtechnik in den drei Schulen installiert und getestet, um einen fehlerfreien Einsatz zu Studienbeginn zu gewährleisten. Als Einbauzeitraum wurden die Sommerferien gewählt, um den Schulalltag so wenig wie möglich zu stören. Zu Schuljahresbeginn 2023 erfolgten Informationsgespräche für Eltern und Lehrkräfte der teilnehmenden Klassen und die Einholung der Einverständniserklärung der Eltern. Im Oktober 2023 wurde die Feldstudie gestartet (Studienablauf siehe Abbildung 2). Im Verlauf der Studie wurden drei Erhebungen in den Schulen durchgeführt. Über den gesamten Studienzeitraum fand ein kontinuierliches Langzeit-Monitoring statt. Nach Studienende erfolgten die Aufbereitung und Auswertung der Monitoringdaten sowie der Daten aus den Fragebögen. Abschließend wurden die Speichelproben mit Unterstützung der PMU analysiert.

Auf Basis der kombinierten Betrachtung von Simulationsergebnissen, Erkenntnissen aus der Feldstudie und dem Stand der Forschung wurden Handlungsempfehlungen für die Praxis abgeleitet und im Forschungsbericht konsolidiert.

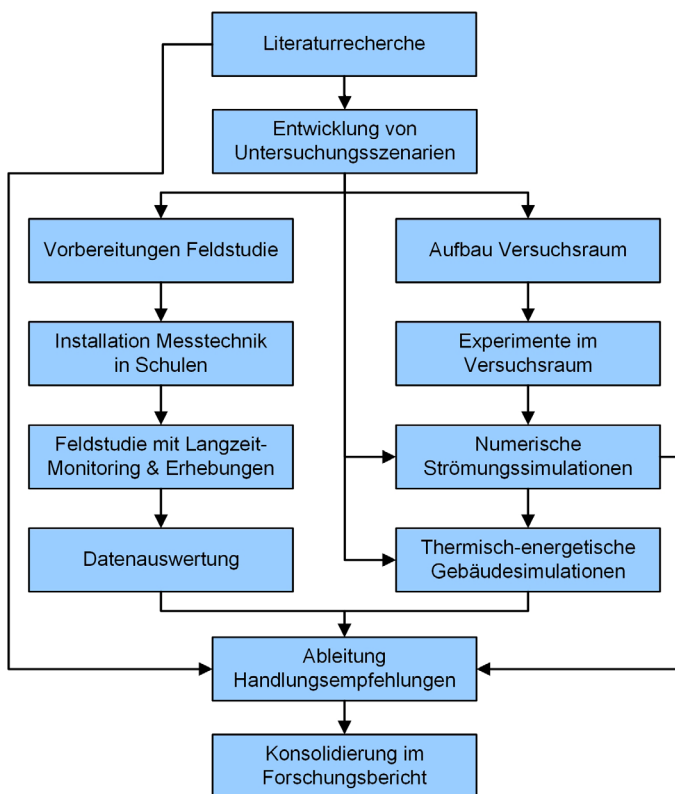


Abb. 4: Projektstrukturplan; Quelle: Susanna Bordin

Literatur

Barrett, B.; Schmit, K. M.; Brown, R.; Hayer, S.; Checovich, M. M.; Gern, J. E.; Wald, E. R., 2014: WURSS-K (Wisconsin Upper Respiratory Symptom Survey). UW Department of Family Medicine. Madison, USA.

Bundesindustrieverband Technische Gebäudeausrüstung e. V. (BTGA); Fachverband Gebäude-Klima e. V. (FGK); Herstellerverband RLT-Geräte e. V.; VDMA e. V.; TGA-Repräsentanz Berlin GbR, 2022: Mindestens zu erfüllende Rahmenbedingungen bei der Planung von maschinellen Schalllüftungssystemen. Berlin.

Burgholz, T.; Derwein, D.; Frisch, J.; Kremer, M.; Lorenz, C.-L.; Müller, D.; Ostmann, P.; Rewitz, K.; Schweiker, M.; Syndicus, M.; Treeck, C. van, 2025: Leitfaden „Klassenräume SMART sanieren“: Eine Orientierungshilfe für die modulare, integrale Sanierung an Schulen. Neukirchen-Vluyn.

FGK – Fachverband Gebäude-Klima (Hrsg.), 2022: Anforderungen an die Raumluftheuchtigkeit zur Reduktion des Infektionsrisikos über den Luftweg AHA + L + Feuchte. FGK-Status-Report 58. Bietigheim-Bissingen.

Jendrossek, S. N.; Jurk, L. A.; Remmers, K.; Cetin, Y. E.; Sunder, W.; Kriegel, M.; Gastmeier, P., 2023: The Influence of Ventilation Measures on the Airborne Risk of Infection in Schools: A Scoping Review. IJERPH 20, 3746. <https://doi.org/10.3390/ijerph20043746>

Knaus, C.; Hartmann, T.; Spitzner, M. H., 2017: Grundlagen- und Konzeptentwicklung für die Analyse von praxisgerechten Lüftungskonzepten bei mechanischer oder Fensterlüftung (Zukunft Bau Endbericht No. 10.08.17.7-16.33). im Auftrag des Bundesinstitutes für Bau, Stadt- und Raumforschung (BBSR).

UBA – Umweltbundesamt, 2020: Richtig Lüften in Schulen. Umweltbundesamt. Zugriff: <https://www.umweltbundesamt.de/richtig-lueften-in-schulen> [abgerufen am 21.10.2024].

WHO-5, 1998: The World Health Organization-Five Well-Being Index (WHO-5). Psychiatric Research Unit, WHO Collaborating Center for Mental Health, Frederiksberg General Hospital. Hillerød.

Weitere Quellen

DIN EN 16798-1:2022-03, Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftheuchtigkeit, Temperatur, Licht und Akustik – Modul M1–6; Deutsche Fassung EN 16798-1:2019. <https://doi.org/10.31030/3327351>

DIN EN ISO 7730:2006-05, Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005, 2006. Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/9720035>

VDI 6040 Blatt 1 (2011-06-00), Raumluftechnik - Schulen - Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln, VDI-Schulbaurichtlinien), 2011.

Projektbeteiligte

Technische Hochschule Nürnberg
Georg Simon Ohm
Institut für Energie und Gebäude (ieg)
www.ieg.th-nuernberg.de
Prof. Dr.-Ing. Arno Dentel
Mitwirkende:
Susanna Bordin, M. Sc.
Sebastian Hummel, M. Eng.
Christina Betzold, M. Eng.
Jonathan Griener, M. Sc.



Wolf GmbH
Industriestraße 1
D - 84048 Mainburg
www.wolf.eu/de-de
Mitwirkende:
Tim Lorenz, M. Eng.



Paracelsus Medizinische
Privatuniversität Salzburg
Institut für Ökomedizin
<https://www.pmu.ac.at/forschung-innovation/institute-zentren-und-programme/institut-fuer-oekomedizin>
a.o. Univ.-Prof. Dr. Arnulf Josef Hartl
Mitwirkende:
Renate Weisböck-Erdheim, Mag.a
phil., MBA, MIB



Praxispartner:
– Michael-Ende-Schule Nürnberg
– Adalbert-Stifter-Grundschule Fürth
– Grundschule Großenseebach

Impressum

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG



Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung
im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung



Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-22.32;
10.08.18.7-22.33
Projektlaufzeit: 09.22 bis 11.24
Bundesmittel in €: 302.622,68

Zuwendungsempfängende:
Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm; Wolf GmbH

Über Zukunft Bau

Mit dem Innovationsprogramm Zukunft Bau stärkt das BMWSB gemeinsam mit dem BBSR die Zukunfts- und Innovationsfähigkeit des Bausektors. Die Zukunft Bau Forschungsförderung schafft Vorbilder, die die Machbarkeit von neuen Ideen ausloten und die Baupraxis weiterentwickeln. Gefördert werden Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, die einen Gebäudebezug als Schwerpunkt haben und einen substantiellen Beitrag zur Bewältigung aktueller und künftiger Herausforderungen im Baubereich erwarten lassen.

zukunftbau.de

Herausgeber

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

Wissenschaftliche Begleitung

Dr.-Ing. Michael Brüggemann,
Brüggemann Kisseler Ingenieure
im Auftrag des BBSR, Referat WB 3
Forschung und Innovation im Bauwesen
zb@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Susanna Bordin 
Technische Hochschule Nürnberg
Georg Simon Ohm
susanna.bordin@th-nuernberg.de

Prof. Dr.-Ing. Arno Dentel 
Technische Hochschule Nürnberg
Georg Simon Ohm
arno.dentel@th-nuernberg.de

Sebastian Hummel 
Technische Hochschule Nürnberg
Georg Simon Ohm

Jonathan Griener
Technische Hochschule Nürnberg
Georg Simon Ohm

Christina Betzold
Technische Hochschule Nürnberg
Georg Simon Ohm

Tim Lorenz
Wolf GmbH, Mainburg

Redaktion

Susanna Bordin
Technische Hochschule Nürnberg
Georg Simon Ohm

Stand

Juli 2025

Grafisches Konzept

www.sans-serif.de

Satz und Barrierefreiheit

www.sans-serif.de
www.satzweiss.com

Bildnachweis

Titelbild: Susanna Bordin

Vervielfältigung



Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative Commons-Lizenz Attribution – Share Alike 4.0 (CC BY-SA 4.0). Diese Lizenz erlaubt unter Voraussetzung der Namensnennung des Urhebers und der Weitergabe unter gleichen Bedingungen die Bearbeitung, Vervielfältigung und Verbreitung des Materials in jedem Format oder Medium für beliebige Zwecke, auch kommerziell. Nähere Informationen zu dieser Lizenz finden sich unter: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de/>.

Die Bedingungen der Creative Commons-Lizenz gelten nur für Originalmaterial. Die Wiederverwendung von Material aus anderen Quellen erfordert ggf. weitere Nutzungsgenehmigungen durch den jeweiligen Rechteinhaber.

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.

Zitierweise

Bordin, S.; Dentel, A.; Hummel, S.; Griener, J.; Betzold, C.; Lorenz, T., 2026: Lüftungskonzepte in Schulen: Einfluss auf Raumluftqualität, thermischen Komfort und Gesundheit in Praxis und Simulation. Herausgeber: BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Zukunft Bau – Forschung KOMPAKT 11/2025. Bonn.

<https://doi.org/10.58007/mqh4-6468>



Bonn 2026
ISSN 2944-067X

Dieses Werk ging aus folgendem Forschungsbericht hervor:

Bordin, S.; Dentel, A.; Hummel, S.; Griener, J.; Betzold, C.; Lorenz, T., 2025: Untersuchung von Lüftungskonzepten in Schulen: Einfluss auf Raumluftqualität, thermischen Komfort und Gesundheit in Praxis und Simulation. Nürnberg.

Hier geht es zum kostenfreien

Forschungsbericht:

<https://doi.org/10.34646/thn/ohmdok-4303>

