Kommentar zu "Anforderungen an Lüftungskonzeptionen in Gebäuden, Teil 1: Bildungseinrichtungen. Empfehlung des Arbeitskreis Lüftung am Umweltbundesamt (2017)"

Frank Helleis, Thomas Klimach Max-Planck-Institut für Chemie, Hahn-Meitner-Weg 1, 55131 Mainz, Deutschland Kontakt: frank.helleis@mpic.de

Version 1.3, 13. April 2023

Zusammenfassung

Das vom Arbeitskreis Lüftung am Umweltbundesamt vorgelegte Dokument empfiehlt maschinelle Grundlüftung mit ca. 25 m³/(h P) kombiniert mit Stoßlüften in den Unterrichtspausen und "Fensterlüften so oft wie möglich" außerhalb der Heizperiode als hybrides Lüftungskonzept für Neubau- und Sanierungsprojekte (Umweltbundesamt, 2017). Für Bestandsbauten wird Stoßlüften auch während des Unterrichts gefordert, um "die Innenraumluftqualität in Unterrichtsgebäuden so gut wie gegenwärtig möglich zu halten" (Umweltbundesamt, 2017).

Detaillierte Monitoring-Studien an sanierten bzw. neugebauten Schulgebäuden sowie eine großangelegte Metastudie des Fraunhofer Instituts für Bauphysik zeigen jedoch in der Praxis, dass die Kombination von Raumlufttechnik (RLT) mit Stoßlüftung in den Pausen die Nachteile natürlicher Lüftung mit denen von unterdimensionierter RLT vereinigt, ohne die laut Arbeitsschutzregeln geforderte Luftqualität ganzjährig sicherzustellen (Peper *et al.*, 2007; Jagnow and Gebhardt, 2017; Reiß *et al.*, 2017; Anlauft and Schwede, 2018; Knaus *et al.*, 2019; Müller *et al.*, 2020). Dies lässt sich auch mit einfachen Rechnungen nachvollziehen.

Mit diesem Kommentar möchten wir darauf hinweisen, dass das vorgeschlagene Stoßlüftungskonzept die Innenraumluftqualität nicht wirklich "so gut wie gegenwärtig möglich" hält. In Übereinstimmung mit gültigen Arbeitsschutzregeln und lüftungstechnischem Lehrbuchwissen zeigen wir, dass zur Belüftung von Schulen und anderen Bildungseinrichtungen deutlich wirksamere, energetisch und wirtschaftlich sparsamere, und nachhaltige Alternativen zur Verfügung stehen – insbesondere kontinuierliches Lüften mit Kippfenstern unter Nutzung von Quelllufteffekten.

Zentrale Aspekte und Perspektiven

- (1) Lufthygiene CO₂-Konzentration: Die Arbeitsschutzregeln A3.6, einschlägige Normen und die Empfehlungen des UBA von 2008 fordern auf Basis zahlreicher wissenschaftlicher Studien die Einhaltung eines Maximalwertes der CO₂ Konzentration von 1000 ppm (Umweltbundesamt, 2008b; BAUA ASR A3.6, 2012). Das kommentierte Dokument reduziert diese Anforderung ohne wissenschaftliche Begründung.
- (2) Lufthygiene Fensteröffnungsflächen: Zielführendes Dauerlüften wird ohne wissenschaftliche Begründung abgetan, obwohl in einseitig belüfteten Klassenräumen die Fensteröffnungsflächen nach Stand der Wissenschaft meist nur für kontinuierliches Lüften ausreichend vorhanden sind (BAUA ASR A3.6, 2012; Fitzner and Finke, 2012; von Grabe, Svoboda and Bäumler, 2014; Erhart et al., 2015; Siebler et al., 2021; Ostmann et al., 2022).
- (3) Lufthygiene Quelllüftung: Bei kontinuierlichem Quelllüften durch Fenster- oder Außenwandluftdurchlässe können gemäß Lehrbuchwissen und experimentellen Studien bei Zuluftvolumenströmen von ca. 25m³/(h P) bis zu 2-mal niedrigere Schadstoff-konzentrationen im Atembereich einer sitzenden Person erzielt werden als bei Mischlüftungs-RLT (Skistad et al., 2004; Fitzner, 2008; Schaub et al., 2021; Viessmann Climate Solutions SE, 2021).
- (4) Thermische Behaglichkeit Fensterlüftung: Die Heizkörper in Klassenräumen werden typisch so ausgelegt, dass die Heizleistung ausreicht, um auch bei geringen Außentemperaturen Lüftungsverluste auszugleichen (DIN EN 12831, 2017). Das funktioniert ohne erhebliche Zuglufterscheinungen nach (FGK, 2004; ISO 7730, 2006) nur durch kontinuierliches Erwärmen und bodennahes Einbringen der Zuluft (Quelllüftung) (Sodec, F., 2003). Dabei kommt es nicht per se zu einem größeren Energieverlust gegenüber Stoßlüften, da der Energieverlust in erster Näherung nur von der im zeitlichen Mittel ausgetauschten Luftmenge abhängt (Fitzner and Finke, 2012). Stoßlüften bei niedrigen Außentemperaturen führt gegenüber Dauerlüften zu starken zeitlichen Schwankungen der Raumlufttemperatur, weil die Luftgeschwindigkeiten und die momentanen Kältelasten wesentlich höher und die Kontaktzeiten wesentlich kürzer sind ca. 5-fach bei 20/5 Stoßlüften (Umweltbundesamt, 2021; Ostmann et al., 2022). Stoßlüften kann so nach geltenden Normen zu erheblichen, wenn nicht unzumutbaren Behaglichkeitsdefiziten führen (Knaus et al., 2019).
- (5) Thermische Behaglichkeit RLT: Bei bestehenden zentralen RLT/WRG-Anlagen ohne raumweise Zuluft-Temperaturregelung können direkte Sonneneinstrahlung oder Außentemperaturen größer ca. 10-12°C zu vielfach dokumentierten Überhitzungen einzelner Klassenräume führen (Jagnow and Gebhardt, 2017; Reiß et al., 2017). Dadurch kann es zu erheblicher thermischer Unbehaglichkeit und Austrocknung der Raumluft in der Übergangszeit kommen, verbunden mit geringerer kognitiver Leistung der Schüler (Haverinen-Shaughnessy and Shaughnessy, 2015; Park, 2017; Knaus et al., 2019; Wargocki, Porras-Salazar and Contreras-Espinoza, 2019).
- (6) Luftfeuchte: Laut umfassender Literaturstudien gibt es kein nachgewiesenes Problem durch zu niedrige Raumluftfeuchte an Arbeitsstätten in Mitteleuropa (DGUV, 2016; Bux and

von Hahn, 2020). Studien des Fraunhofer IAO und des Fachverbandes Gebäude-Klima suggerieren lediglich Zusammenhänge, Nachweise werden nicht geliefert (Fraunhofer, 2014; FGK, 2019). Die von letzteren zitierten Referenzen machen teilweise gegenteilige Aussagen (Arundel *et al.*, 1986; DGUV, 2016). Gemäß theoretischer und praktischer Untersuchungen ist Quelllüftung wegen erheblich geringerer Turbulenz und damit geringer Austrocknung der körpernahen Luftschichten einer Standard-Mischlüftung klar überlegen (Zeidler, Kriegel and Fitzner, 1999; ISO 7730, 2006).

- (7) Nachhaltigkeit: Anhand vorliegender Branchenstudien und einfacher Rechnungen lässt sich zeigen, dass RLT mit den geforderten Luftvolumenströmen und geringer Nutzungszeit für den Klimaschutz kontraproduktiv ist (Helleis and Klimach, 2021; Kremer, Rewitz and Müller, 2021; Kaup, 2022). Die in Spezialfällen rechnerisch nachweisbaren Reduktionen von CO₂-Emissionen sind um ein Vielfaches geringer als die durch energetische Sanierung der Gebäude oder alternative Wärmeträger erreichbaren Reduktionen bei gleichzeitig geringeren Investitionskosten (AHULife, 2021; Helleis, Klimach and Pöschl, 2023).
- (8) Wirtschaftlichkeit: Anhand vorliegender Studien und einfacher Rechnungen lässt sich zeigen, dass Raumlufttechnik mit den geforderten spezifischen Luftvolumenströmen in Gebäuden mit hoher, aber zeitlich begrenzter Belegung gegenüber Fensterlüften ökonomisch nicht zielführend sein kann (Kremer, Rewitz and Müller, 2021; Kaup, 2022). Eine "passgenaue Dimensionierung" der Anlagen führt folglich in der Realität häufig zu einer Minimierung der Nennvolumenströme (Reiß et al., 2017). Die Einhaltung der Hygieneanforderungen ist dann nur durch hybride Lüftungskonzepte möglich (Umweltbundesamt, 2017; Knaus et al., 2019).
- (9) Nutzerbeteiligung während der Planung: Forderungen nach Nutzerbeteiligung während der Planungsphase sollten differenziert betrachtet werden, da die Planung nach komplexen Regelwerken und Normen erfolgen muss (ISO 7730, 2006; BAUA ASR A3.6, 2012; DIN EN 16798, 2019). Ein potentieller Nachteil davon wäre, dass Laien bzw. die Öffentlichkeit einfacher durch Werbekampagnen der Branche (www.fgk.de) beeinflussbar sind als branchenerfahrene und kostenbewusste Schulträger und Stadtkämmerer, wie auch am Beispiel der Luftreiniger in der Pandemie zu erkennen.
- (10) Nutzerbeteiligung während des Betriebs: Die Notwendigkeit von Lüftungsanlagen wurde ursprünglich mit der mangelnden Lüftungsdisziplin der Nutzer begründet (Umweltbundesamt, 2008b). Im Gegensatz dazu wird bei hybriden Lüftungskonzepten die Verantwortung für die Innenraumlufthygiene von planenden, ausführenden und wartenden Firmen weg wieder hin zu den Nutzern übertragen, da prinzipbedingt die Arbeitsschutzregeln in der Praxis durch die RLT allein nicht eingehalten werden können (Reiß et al., 2017). Solche Lüftungsanlagen als "Komfort-Lüftungstechnik" zu bezeichnen weckt beim Nutzer Erwartungen die in der Praxis nicht eingehalten werden und schließlich zu eher niedriger Nutzerzufriedenheit führt (Reiß et al., 2017).
- (11) Nutzerzufriedenheit durch Selbstbestimmung: Hybride Lüftungskonzepte versprechen hohen Komfort, Wohlbefinden und Zufriedenheit durch "die Möglichkeit zur persönlichen Einflussnahme auf das Innenraumklima" (Umweltbundesamt, 2017). Die detaillierte Auswertung der Messergebnisse an real ausgeführten Anlagen zeigt jedoch, dass die

Unzufriedenheit und Frustration der Nutzer durchaus durch nachgewiesene Fehlauslegungen, insbesondere zentrale Temperaturregelung, fehlerhafte oder nicht vorhandene Zonierung, fehlerhafte Parametrierungen, mangelhafte Sorgfalt bei Abnahme und Inbetriebnahme und vor allen Dingen teilweise jahrelange Reaktionszeiten der betreuenden Planer und Fachfirmen ausgelöst worden sein könnten (Peper *et al.*, 2007; Jagnow and Gebhardt, 2017; Reiß *et al.*, 2017).

(12) Kontinuierliches Fensterlüften: Die zuvor genannten Punkte und unabhängige Studien weisen auf Dauer-Fensterlüften mit CO₂-Monitor als lufthygienisch, behaglich, energetisch und nachhaltig tragfähiges Konzept hin. Auch in der ASR3.6 wird kontinuierliches Lüften als Alternative zum Stoßlüften empfohlen: "Ist die Verstellbarkeit der Öffnungsfläche fein justierbar, ist auch bei Außenlufttemperaturen unter +5 °C eine kontinuierliche Lüftung erreichbar" (BAUA ASR A3.6, 2012). Hybride Systeme aus Dauer-Fensterlüften kombiniert mit geregelten Ventilatoren können effizientes Lüften ganzjährig sicherstellen und helfen einen unzureichenden Luftaustausch ebenso zu vermeiden wie ein unnötig starkes Stoßlüften bei kalten Außentemperaturen (Klimach et al., 2021; Helleis, Klimach and Pöschl, 2023).

Auf die oben genannten Punkte sowie auf einzelne Abschnitte und Aussagen des UBA-Dokumentes gehen wir im Anhang nach den Referenzen nochmals detailliert ein.

Referenzen

AHULife (2021). Available at: https://ahulife.eonerc.rwth-aachen.de/ (Accessed: 2 October 2021).

Altbausanierung » Kosten-Tabellen, Preisbeispiele und mehr (2019) Kostencheck. Available at: https://kostencheck.de/altbausanierung-kosten-tabelle (Accessed: 31 March 2022).

Anlauft, E. and Schwede, D. (2018) 'Präsentation WABOLU CO2 Messungen in Schulen', Forschungsbericht [Preprint].

Arundel, A. et al. (1986) 'Indirect Health Effects of Relative Humidity in Indoor Environments', Environmental Health Perspectives, 65(6543), pp. 352–361.

BAUA ASR A3.6 (2012) Technische Regel für Arbeitsstätten. Available at:

https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/ASR/pdf/ASR-A3-6.pdf?__blob=publicationFile (Accessed: 17 May 2021).

Bux, K. and von Hahn, N. (2020) "Trockene Luft" - Literaturstudie zu den Auswirkungen auf die Gesundheit'. Available at: https://doi.org/10.21934/BAUA:BERICHT20200624.

DGUV (2016) 'DGUV Information 215-510 "Beurteilung des Raumklimas – Handlungshilfe für kleine und mittlere Unternehmen", p. 32.

DIN EN 12831 (2017) DIN EN 12831-1:2017-09 Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 1: Raumheizlast, Modul M3-3; Deutsche Fassung EN 12831-1:2017. Beuth Verlag, p. 19.

DIN EN 13779 (2007) DIN EN 13779. Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme. (Wurde mit Veröffentlichung der DIN EN 16798-3 im Nov. 2017 zurückgezogen.). Beuth Verlag, p. 19.

DIN EN 16798 (2019) 'Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden

bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik'. Beuth Verlag. Available at: https://www.beuth.de/de/norm/din-en-16798-1/264630492.

Erhart, T. et al. (2015) 'Experimental Validation of Basic Natural Ventilation Air Flow Calculations for different Flow Path and Window Configurations', *Energy Procedia*, 78, pp. 2838–2843. Available at: https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.644.

EU 1253/2014 (2014) 'VERORDNUNG (EU) Nr. 1253 • / • 2014 DER KOMMISSION - vom 7. Juli 2014 - zur Durchführung der Richtlinie 2009 / • 125 / • EG des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Lüftungsanlagen - ', p. 19.

EU 1253/2014 Review (2020) *Ventilation Units TASK 5 Final Report 2020-09-10.pdf*. Available at: https://ecoventilation-review.eu/downloads/Ventilation%20Units%20TASK%205%20Final%20Report%202020-09-10.pdf (Accessed: 17 October 2021).

FGK, e. V. (2003) *Die Umsetzung der Richtlinie VDI 6022-Hinweise für Anwender der VDI Richtlinie 60*. Available at: https://downloads.fgk.de/84_Umsetzung_VDI6022_MGV2003.pdf (Accessed: 4 July 2021).

FGK, e. V. (2004) 'FGK Statusreport 22 - Lüftung von Schulen'. Available at: https://downloads.fgk.de/174_SR_22_Schullueftung_V4_Internet_010611.pdf (Accessed: 5 July 2021).

FGK, e. V. (2019) 'FGK Statusreport 8 - Fragen und Antworten zur Raumluftfeuchte'. Available at: https://downloads.fgk.de/139_SR8_Fragen_u_Antworten_Raumluftfeuchte_V9_190923.pdf (Accessed: 29 October 2021).

Fitzner, K. (2008) 'Luftströmung in belüfteten Räumen', in Raumklimatechnik-Band 2. Springer, pp. 117-203.

Fitzner, K. and Finke, U. (2012) Lüftungsregeln für freie Lüftung: Projekt F 2072. Dortmund: BAuA (Forschung).

Fraunhofer, I. (2014) 'LUFTFEUCHTIGKEIT AM BÜROARBEITSPLATZ Studie zur Bedeutung der Luftfeuchtigkeit im Büro', Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, 193.

von Grabe, J., Svoboda, P. and Bäumler, A. (2014) 'Window ventilation efficiency in the case of buoyancy ventilation', *Energy and Buildings*, 72, pp. 203–211. Available at: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.006.

Haverinen-Shaughnessy, U. and Shaughnessy, R.J. (2015) 'Effects of Classroom Ventilation Rate and Temperature on Students' Test Scores', *PLOS ONE*. Edited by J. Shaman, 10(8), p. e0136165. Available at: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136165.

Helleis, F. and Klimach, T. (2021) 'Kommentar zur "Bewertung der Wärmerückgewinnung für die maschinelle Belüftung von Klassenräumen" von M. Kremer, K. Rewitz und D. Müller (2021)'. Available at: https://doi.org/10.5281/zenodo.5638176.

Helleis, F., Klimach, T. and Pöschl, U. (2023) Wirksamkeit, Energieeffizienz und Nachhaltigkeit verschiedener Lüftungsmethoden hinsichtlich Luftqualität und Infektionsschutz in Innenräumen: Fensterlüften, Abluftventilatoren, Raumlufttechnik und Luftreiniger. Zenodo. Available at: https://doi.org/10.5281/zenodo.5070421.

ISO 7730 (2006) 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. Available at: https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/naerg/veroeffentlichungen/wdc-beuth:din21:89417255 (Accessed: 25 August 2021).

Jagnow, K. and Gebhardt, K. (2017) 'Energieoptimiertes Bauen – EnEff:Schule Neubau der St. Franziskus-Grundschule in Halle (Saale) als Nullenergiehaus in Holzbauweise, Abschlussbericht', Forschungsbericht [Preprint].

Kaup, C. (2022) 'Bewertung der Wärmerückgewinnung mit raumlufttechnischen Geräten in Schulen und vergleichbaren Räumen versus Fensterlüftung', *HLH vdi Fachmedien*, 73(01–02).

Klimach, T. *et al.* (2021) 'The Max Planck Institute for Chemistry mechanical extract ventilation (MPIC-MEV) system against aerosol transmission of COVID-19'. Available at: https://doi.org/10.5281/zenodo.5802049.

Knaus, C. *et al.* (2019) 'Entwicklung von Handlungsempfehlungen für praxisgerechte Lüftungskonzepte und Entwicklung eines CO2-Berechnungstools'. BBSR.

Kremer, M.T., Rewitz, K. and Müller, D. (2021) *Bewertung der Wärmerückgewinnung für die maschinelle Belüftung von Klassenräumen, Aachen : RWTH Aachen University*. RWTH Aachen University, p. pages 14 Seiten: Diagramme. Available at: https://doi.org/10.18154/RWTH-2021-07252.

Müller, D. (2017) 'Auswertung und Bewertung von Messungen zur Raumluftqualität bzgl. der CO2-Konzentration und Raumluftfeuchte in verschiedenen Schulen in Deutschland'.

Müller, D. et al. (2020) Empfehlung zum erforderlichen Luftwechsel in Schulen, Großraumbüros, Hörsälen und Turnhallen zur Reduzierung eines aerosolgebundenen Infektionsrisikos. RWTH-2020-10366. Institut für Arbeitsund Sozialmedizin. Available at: https://doi.org/10.18154/RWTH-2020-10366.

Ostmann, P. et al. (2022) Wirksamkeit der einseitigen Fensterlüftung in Klassenräumen: Stoßlüfung, 12 Seiten (2022). doi:10.18154/RWTH-2022-01310. RWTH Aachen University, p. pages 12 Seiten. Available at: https://doi.org/10.18154/RWTH-2022-01310.

Park, J. (2017) 'Temperature, Test Scores, and Human Capital Production'. Harvard University.

Peper, S. et al. (2007) 'Passivhausschule Frankfurt Riedberg'. PASSIVHAUS INSTITUT. Available at: https://passiv.de/downloads/05_passivhaus-schule_riedberg.pdf (Accessed: 10 February 2021).

Persily, A.K. (2017) 'Carbon Dioxide Generation Rates for Building Occupants'. Available at: https://www.nist.gov/publications/carbon-dioxide-generation-rates-building-occupants-1 (Accessed: 20 February 2022).

Reiß, J. et al. (2017) 'Wissenschaftliche Begleitforschung zum Forschungsvorhaben "Energieeffiziente Schulen" Abschlussbericht Phase 2'. Available at: https://edocs.tib.eu/files/e01fb18/1010951262.pdf (Accessed: 10 February 2022).

Rietschel, H. and Fitzner, K. (eds) (2008) *Raumklimatechnik: Band 2: Raumluft- und Raumkühltechnik*. 16th edn. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag (VDI-Buch, Rietschel, H. (Hgs): Raumklimatechnik). Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-540-68267-7.

Schaub, M. et al. (2021) 'Relatives aerogenes Infektionsrisiko Infektionsschutz durch Lüftungsgeräte und Luftreiniger (Teil 3)', HLH vdi Fachmedien, 72(07–08).

Siebler, L. *et al.* (2021) 'Pilotprojekt: Experimentelle Untersuchung zum Infektionsrisiko in Klassenräumen in Stuttgarter Schulen', p. 201.

Skistad, S. et al. (2004) 'Displacement Ventilation in Non-Industrial Premises, REHVA Guidebook Nr.1'. REHVA.

Sodec, F. (2003) 'Quelllüftung und ihre Anwendungsbereiche'. Klima/Lüftung Fachjournal 2003/03.

Umweltbundesamt (2008a) 'Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft: Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden', Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz, 51(11), pp. 1358–1369. Available at: https://doi.org/10.1007/s00103-008-0707-2.

Umweltbundesamt (2008b) *Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden*. Umweltbundesamt. Available at: https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/leitfaden-fuer-innenraumhygiene-inschulgebaeuden (Accessed: 17 May 2021).

Umweltbundesamt (2017) 'Anforderungen an Lüftungskonzeptionen in Gebäuden, Teil 1: Bildungsgebäude'.

Umweltbundesamt (2021) *Lüftung, Lüftungsanlagen und mobile Luftreiniger an Schulen, Umweltbundesamt.* Umweltbundesamt. Available at: https://www.umweltbundesamt.de/themen/lueftung-lueftungsanlagen-mobile-luftreiniger-an (Accessed: 19 August 2021).

Viessmann Climate Solutions SE (2021) *Vitovent 200-P für Kitas & Schulen, Viessmann*. Available at: https://www.viessmann.de/de/aktionen/aufatmen.html (Accessed: 28 June 2021).

Wargocki, P., Porras-Salazar, J.A. and Contreras-Espinoza, S. (2019) 'The relationship between classroom temperature and children's performance in school', *Building and Environment*, 157, pp. 197–204. Available at: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.046.

WOLF GMBH (2017) Wolf COMFORT-GROSSRAUMLÜFTUNGSGERÄT tech. Dokumentation. Available at: https://www.wolf.eu/fileadmin/Wolf_Daten/Dokumente/Technische_Dokus/Ventilation/4800620_201704_Comfort_Grossraumlueftung_CGL_DE.pdf (Accessed: 4 July 2021).

Zeidler, O., Kriegel, K. and Fitzner, K. (1999) 'Unterschiede der Feuchtigkeitsübertragung einer Person in Quell-und Mischlüftung', *Luft- und Kältetechnik*, AIVC 12,413.

Anhang

Das vorliegende Dokument (Umweltbundesamt, 2017) haben wir ausführlich kommentiert und geben im Folgenden die aus unserer Sicht wichtigsten Kommentare. Zitats aus dem Original Dokument sind in *blau kursiv* wiedergegeben.

Kernbotschaften

• Die Konzentration von Kohlendioxid (CO₂) in der Innenraumluft von Unterrichtsräumen darf im Mittel einer Unterrichtseinheit eine Konzentration von 1000 ppm nicht überschreiten.

Diese Anforderung entspricht nicht den Arbeitsschutzregeln des BAUA ASR A3.6, die auch bei Momentanwerten $CO_2 > 1000$ ppm Handlungsbedarf sehen (Umweltbundesamt, 2008a, 2008b; BAUA ASR A3.6, 2012). Daher schlagen wir vor, die wohldefinierten und wissenschaftliche fundierten Anforderungen von BAUA ASR A3.6 zu übernehmen. Da ein "Überlüften" nur bei niedrigen Außentemperaturen ein Problem darstellt und ansonsten die Luftqualität steigern, Infektionsrisiken senken und einem Überhitzen entgegenwirken kann, erscheint eine "Überdimensionierung", also das Auslegen der Lüftungsmöglichkeiten auf einen niedrigeren Zielwert und dessen Lockerung bei niedrigen Temperaturen, als sinnvoll.

• Eine Lüftung über Fenster allein reicht zum Erreichen einer guten Innenraumluftqualität während des Unterrichts in Schulgebäuden nicht aus. Eine Konzeption bestehend aus Grundlüftung über mechanische Lüftungsanlagen und Zusatzlüftungsmöglichkeit über Fenster in den Pausen (hybride Lüftung) wird vom AK Lüftung dringend empfohlen.

In den uns bekannten Studien wurde lediglich nachgewiesen, dass **Stoßlüften über Fenster nur in den Pausen** nicht ausreicht. Mithilfe der gleichen Studien kann allerdings direkt gezeigt werden, dass **Dauerlüften sogar die Anforderungen des Arbeitsschutzes** erfüllen kann, wenn die nach A3.6 geforderten Fensteröffnungsflächen vorhanden sind und genutzt werden (Fitzner and Finke, 2012; von Grabe, Svoboda and Bäumler, 2014; Erhart *et al.*, 2015; Knaus *et al.*, 2019; Müller *et al.*, 2020; Ostmann *et al.*, 2022).

Hybride Lüftung vereint die Nachteile von Fensterlüftung und unterdimensionierter RLT: mäßig bis niedrige Luftqualität, insbesondere im Winter und im Sommer, Schadstoffeintrag und Wärmeverlust durch Umgehung der RLT, Lärmeintrag durch die Empfehlung der Nutzung natürlicher Lüftung im Sommer, genau dann, wenn Stoßlüftung nur in den Pausen aufgrund niedriger Temperaturunterschiede und wenig Wind zu wenig Luftaustausch erreicht (Reiß et al., 2017; Knaus et al., 2019; Ostmann et al., 2022).

Für jedes Unterrichtsgebäude (Schulen, Kitas, Universitäten) ist ein Lüftungskonzept zu erstellen, das sowohl Aspekte für die Planung und Ausführung von Neubauten und Sanierungsarbeiten im Bestand als auch für den täglichen Betrieb umfasst.

Lüftungskonzepte sind raumweise – unabhängig von der Lüftungsart (mechanische Lüftung oder über Fenster) – für den Sommer- und den Winterbetrieb getrennt zu erstellen.

Entscheidend für den Lüftungserfolg von Lüftung über Fenster und damit auch hybrider Lüftung ist die Anpassung der Lüftungsöffnungen an Außentemperaturen und Windgeschwindigkeiten, nicht an die Jahreszeit (von Grabe, Svoboda and Bäumler, 2014; Erhart *et al.*, 2015; Knaus *et al.*, 2019). Die Nutzung von CO₂-Monitoren und Ventilatoren führt zu reproduzierbaren Volumenströmen und reduziert die Anforderungen an Lüftungskonzept und Nutzerbeteiligung entscheidend.

• Lüftung muss funktional, bedarfsgerecht und wirtschaftlich (Investition und Betrieb) sein. Die Planung hierzu ist zwischen den beteiligten Fachplanern und ingenieuren, Bauherrn und Nutzern abzustimmen.

Mit dem online Tool der AHULife der RWTH Aachen kann einfach nachgewiesen werden, dass RLT mit Wärmerückgewinnung nach Stand der Technik im Vergleich zu Ventilator-Fensterlüften keine Primärenergie einspart, sondern zusätzliche verbraucht (*AHULife*, 2021).

Die nicht vorhandene Wirtschaftlichkeit von hybrider RLT ergibt sich direkt aus Studien der Branche und wissenschaftliche Vergleichsstudien (Helleis and Klimach, 2021; Kremer, Rewitz and Müller, 2021; Kaup, 2022).

Sofern also keine zwingenden Gründe vorliegen (thermische, akustische oder luftqualitative Extremlagen), sollte vom Einsatz von RLT, insbesondere von RLT-Hybridsystemen abgesehen werden, da ihr Einsatz eben diesen Nutzen über längere Zeiträume neutralisieren würde (Lüftung an WRG, Schalldämpfern und Filtern vorbei).

Die Gründe für die Forderungen nach Nutzerbeteiligung während der Planungsphase sind in der Sache schwer nachvollziehbar, da die Planung nach komplexen Regelwerken und Normen erfolgen muss (ISO 7730, 2006; BAUA ASR A3.6, 2012; DIN EN 16798, 2019).

• Die Lüftungssysteme sollen über Wärme- und Feuchterückgewinnung verfügen und bedarfsgerecht regelbar sein. Neben der CO₂-Konzentration stellt die relative Feuchte der Luft ein weiteres Kriterium für gute bzw. angemessene Innenraumluftqualität dar. Sie soll vorzugsweise im Bereich zwischen 30 bis 60 Prozent liegen.

Für eine pauschale Forderung nach Wärme- und Feuchterückgewinnung wäre der allgemeine Nutzen mit entsprechenden Studien und Erfahrungswerten zu belegen. Es ist nicht nachvollziehbar, warum die Lüftungssysteme "bedarfsgerecht regelbar" sein und nicht "selbstständig bedarfsgerecht regeln" sollen.

Die typischerweise durch hybride Lüftung generierten mäßigen bis niedrigen Luftqualitäten (~IDA3) fordern nur minimale Feuchten von 20% r.h. (DIN EN 13779, 2007; DGUV, 2016; DIN EN 16798, 2019), die aufgrund der Feuchtelasten durch Schüler bei den geringen Luftvolumenströmen praktisch ganzjährig erreicht werden (Peper *et al.*, 2007). In der WABOLU Studie wird festgestellt, dass RLT tendenziell zu trockenerer Raumluft als Fensterlüftung führt (Anlauft and Schwede, 2018). Zeidler und Fitzner stellten fest, dass Mischlüftung aufgrund höherer Turbulenz zu trockenerer Luft in Körpernähe führt als Quelllüftung (Verbesserung durch Quelllüftung um ca. 5% r.F.) (Zeidler, Kriegel and Fitzner, 1999).

Die DGUV definiert 20% r.F. als noch behaglich, das Bux/v.Hahn (BAUA 2020) sehen in einer großangelegten Literaturstudie keinen Zusammenhang zu Behaglichkeitsproblemen oder gesundheitlichen Beeinträchtigungen (DGUV, 2016).

Hier fehlt zudem eine Kernbotschaft bezüglich der Raumlufttemperatur. So sinkt mit zunehmender Raumlufttemperatur die Leistungsfähigkeit von Personen (Wargocki, Porras-Salazar and Contreras-Espinoza, 2019). Gerade in gut gedämmten Gebäuden wird die Raumlufttemperatur aber im Wesentlichen über das Zusammenspiel der ausgetauschten Luftmasse als Haupt-Wärmesenke und den Wärmequellen, wie Personen, Sonneneinstrahlung und elektrische Geräte, bestimmt. Die Auswertung von Studien zu Neubau- und Totalsanierungen zeigt hier eindeutigen Handlungsbedarf (Reiß *et al.*, 2017).

• Eine sorgfältige Inbetriebnahme ist Voraussetzung für den Betrieb. Den Nutzern ist eine Einweisung in das jeweilige Lüftungskonzept mit klar verständlichen schriftlichen Handlungsempfehlungen zu übergeben.

Diese Anforderung ist nicht ausreichend. Nach VDI 6022 sind Planung, Ausführung, Inbetriebnahme und Wartung entscheidend für den Betrieb von RLT (FGK, 2003). Messungen in der Schulpraxis zeigen, dass der nutzerabhängige Teil hybrider Konzepte von den Nutzern nicht zielgerecht umgesetzt wird (werden kann), insbesondere bei hohen Temperaturen im Sommer und bei tiefen Temperaturen im Winter (Reiß *et al.*, 2017).

• In Schulbestandsbauten, die nicht sogleich mit einer Lüftungstechnik versehen werden können, ist auch während einer Unterrichtseinheit eine Lüftung über die Fenster unbedingt erforderlich. Die Verwendung eines CO₂-Sensors (Lüftungsampel) kann Hilfestellung geben, um eine Verbesserung der Fensterlüftung zu erreichen.

Dies gilt auch für neuere Bestandsbauten mit Lüftungstechnik. Da die zu niedrigen Volumenströme hybrider Bestandsanlagen von teilweise unter 15m³/(h P) eine Versorgung mit den hier geforderten 25m³/(h P) nicht zulässt, empfiehlt sich auch bei diesen der Einsatz von CO₂ Geräten, da gegebenenfalls sogar Stoßlüften während des Unterrichts zwingend erforderlich sein kann (Peper *et al.*, 2007; Müller, 2017; Reiß *et al.*, 2017).

Messungen in Schulen mit hybriden Lüftungskonzepten mit Raumlufttechnik haben ergeben, dass CO₂ Ampeln zu größerer Unzufriedenheit der Nutzer mit RLT und schlechterer Bewertung führt und werden deswegen von der Branche nicht empfohlen (Reiß *et al.*, 2017). Viessmann führt in der Dokumentation zum Vitovent 200-P aus, dass bei Betrieb dieses Gerätes "die Bewertung des aktuellen Lüftungsbedarf durch mobile CO₂ Messgeräte nur eingeschränkt möglich ist" (Viessmann Climate Solutions SE, 2021).

• In der Betriebsphase sind vorhandene technische Anlagen regelmäßig zu überprüfen und zu reinigen, um ihre ordnungsgemäße Funktionsfähigkeit zu - gewährleisten. Dazu gehört auch der Nachweis auf die Einhaltung des o. g. CO2-Leitwertes unter realen Nutzungsbedingungen.

Bei hybrider Lüftung liegt die Verantwortung über die Einhaltung des CO₂-Leitwerts letztendlich beim Nutzer, ein Nachweis unter realen Bedingungen überprüft daher im

Wesentlichen die Benutzer und nicht die technischen Anlagen selbst. Zudem ist es nicht trivial, einen Leitwert zu überprüfen, der als Stundenmittelwert definiert ist.

Infobox 1: Lüftungskonzept

Mit dem Begriff "Lüftungskonzept" ist im Folgenden ein anwenderorientiertes Konzept gemeint. Dieses ist unter Beteiligung der relevanten Fachplaner, der Bauherrnvertreter und der Nutzer aufzustellen, um die erforderliche Abstimmung mit dem Sicherheits- und Unfallverhütungskonzept, dem Energiekonzept, dem

Akustikkonzept, dem Brandschutzkonzept und dem Nutzungskonzept zu erzielen. Es beschreibt für jeden Raum:

- *die Anforderung an die Innenraumlufthygiene (hier insbesondere CO₂-Konzentration),*
- die Rahmenbedingungen,
- die Festlegung der erforderlichen lüftungstechnischen Maßnahmen und
- die Auswahl der Lüftungsart für die einzelnen Räume.

Mit dem Lüftungskonzept ist die Praxistauglichkeit der Lüftung für die einzelnen Räume rechnerisch nachzuweisen. Für gleichartige Räume kann dieser Nachweis an einem repräsentativen Raum geführt werden. Das Lüftungskonzept soll bereits in einer frühen Planungsphase erstellt und planungsbegleitend verwendet werden. Zudem ist es auf den jeweiligen Planungsstand fortzuschreiben. Das Konzept beinhaltet keine detaillierte Bemessung und Berechnung von lüftungstechnischen Anlagen, sondern lediglich die aus hygienischer Sicht erforderlichen Parameter und Angaben, um:

- eine ausreichende Be- und Entlüftung zu gewährleisten und diese nachvollziehbar prüfen zu können.
- den Nutzern eine Handreichung zur praktischen Umsetzung des Konzeptes (z. B. Regelbarkeit einer mechanischen Lüftungsanlage, ggf. erforderliche Lüftungsintervalle über Fensteröffnungen) zu geben.
- Hinweise zur Wartung und Instandhaltung für den Betrieb einer raumlufttechnischen Anlage zu dokumentieren.
- als Basis für eine Erfolgskontrolle (Monitoring) in der Nutzungsphase herangezogen werden zu können.

Allgemeine Parameter

Da im Fokus des anwendungsorientierten Lüftungskonzeptes die raumweise Betrachtung steht, sind darin – für jede Lüftungsart – folgende Angaben zu dokumentieren:

- der erforderliche Außenluftvolumenstrom pro Raum,
- die jeweilige Lüftungsart (mechanische Lüftung und/oder in Kombination mit Fensterlüftung),
- die Anzahl der Räume mit den entsprechenden Raumabmessungen,
- die jeweilige Personenanzahl und Altersstufe, für die die Räume konzipiert sind,
- die geplanten täglichen Unterrichts- und Pausenzeiten,
- die Zeit und Dauer der Luftzufuhr
- die CO₂-Außenluftkonzentration am Standort
- der Nachweis der Einhaltung der Anforderungen an die CO₂-Konzentration bspw. mit Hilfe des CO₂-Online-Modells des Niedersächsischen Landesgesundheitsamtes (https://www.nlga.niedersachsen. de/umweltmedizin/luft/projekt_lufthygiene_ schulen/co2modellsoftware/co2-modellsoftware-19316.html).

Einsatz der Fensterlüftung

Ist für Aufenthaltsräume eine Fensterlüftung oder eine unterstützende Fensterlüftung geplant (hybrides Lüftungskonzept), ist der vorgesehene personenbezogene Außenluftvolumenstrom pro Raum sowohl für den Sommer- als auch für den Winterfall durch Berechnung nachzuweisen. Für die Berechnung können die VDI 6040 (siehe Rechentoll der VDI 6040) oder die DIN 15242 herangezogen werden.

Für die Dokumentation der Berechnungsergebnisse sind – zusätzlich zu den im Abschnitt "Allgemeine Parameter" aufgeführten Punkten – alle weiteren erforderlichen Planungsparameter anzugeben. Insbesondere zählen hierzu: ▶ die Anzahl der öffenbaren Fensterflügel mit den geplanten und für die Nutzung geeigneten Öffnungsweiten,

- die Lüftungsintervalle (z. B. 1 x nach 45 Minuten),
- die entsprechende Lüftungsdauer,
- die angenommene Temperaturdifferenz innen/ außen für den Sommer- und den Winterfall
- die mittlere Windgeschwindigkeit am Standort sowie

- Angaben zur Organisation der Verantwortlichkeit zur Fensteröffnung.
- Weiterhin ist darzustellen, ob es sich um eine einseitige Fensterlüftung oder um eine Querlüftung handelt.

Handlungsempfehlungen für den Nutzer

Insbesondere für Räume, denen ein hybrides Lüftungskonzept zugrunde liegt, müssen die Raumnutzer über die Funktionsweise und das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten informiert werden. Dazu zählen beispielsweise:

- der Anteil der Grundlüftung über die mechanische Lüftungsanlage ggf. mit den Regelungsmöglichkeiten
- die erforderlichen Maßnahmen für die unterstützende freie Lüftung über die Fenster mit den geplanten Lüftungszeiten und -intervallen und die Funktionsweise und Handhabung eines etwaigen CO2-Sensors.

Diese Ausführungen sind durch Referenzen und Rechnungen nachzuweisen. Der Sinn eines für jeden einzelnen Raum zu erstellenden letztlich vom Anwender in der Schulpraxis umzusetzenden Lüftungskonzepts mit derart vielen Parametern und Anforderungen ist im Kern weder nachvollziehbar noch dem Nutzer zumutbar.

- es wird die Dokumentation von einer ganzen Reihe von pauschalen Parametern, noch dazu raumspezifisch, gefordert, die letztlich mit den Anforderungen an die tatsächlichen Raumluftqualität, charakterisiert lediglich durch die CO₂ Konzentration, nur mittelbar und für Laien schwer nachvollziehbar etwas zu tun haben.
- allein die tägliche Dynamik der Umweltbedingungen (Tagesgänge von Temperatur, Lärm, Außenluftbelastung, Belegung, Sonneneinstrahlung) machen eine pauschale Festlegung von Öffnungsweiten, Lüftungsintervallen, mittleren Windgeschwindigkeiten, Außenluftvolumenströme und Sommer-Winter-Grenzen für die Praxis wertlos.
- Dass die technische Ausrüstung (Anlagen und Fenster) überhaupt eine hygienekonforme oder besser arbeitsschutzgerechte Frischluftzufuhr ermöglicht (also z.B. 30m² weit zu öffnende Fensterfläche bei projektierter einseitiger Stoßlüftung), ist durch die Fachplaner und Bauherrenvertreter sicherzustellen, nicht durch die Nutzer, die mit den normgerechten Lösungen leben müssen.

Nach der einzigen quantitativ fassbaren, in den Kernthesen dieses Papiers gegebenen Anforderungen nach einer Frischluftzufuhr von 25m³/(h P) muss ein anwenderorientiertes Konzept lediglich die Nutzung eines vom Nutzer gut ablesbaren CO₂ Monitors im Klassenraum vorschreiben.

Damit kann die Lüftungspraxis vom Nutzer dynamisch an die Umweltbedingungen angepasst werden, insbesondere bei hybrider Lüftung, Anlagenstörungen und allfälligen groben Komfortbeeinträchtigungen durch Planungs-, Ausführungs-, Inbetriebnahme- und Wartungsmängel.

Infobox 2: Lüftungstechnik energieeffizient und nutzerfreundlich

Ein hohes interdisziplinäres Fachwissen ist erforderlich, um Lüftungskonzepte (vgl. INFOBOX 1) fachgerecht zu realisieren. Der ausgeführte Wärmerückgewinnungsgrad und die spezifische Ventilatorleistung der Anlagentechnik wirken sich auf den Wärme- und Stromverbrauch und damit Energiekosten im Betrieb aus. Der Wärmebereitstellungsgrad der Anlagen sollte deshalb mindestens im Bereich von 80 bis 85 % liegen. Die Ventilatorleistung inkl. Regelung der Anlage sollte unter 0,3 Wh/m³ betragen. Es sollten Filter der Energieklasse A oder B nach EN 779-2012 (Eurovent-Zertifizierung) zum Einsatz kommen. Ineffiziente Lüftungsgeräte dürfen seit 2016 nicht mehr in der EU in Verkehr gebracht werden; ab 2018 gelten noch strengere Effizienzanforderungen, und es muss eine Filterwechselanzeige vorhanden sein (Verordnung 2014/1253/EU).

Einsparung von Heizenergie

Durch Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung werden die Lüftungswärmeverluste gegenüber Fensterlüftung um rechnerisch 40 bis 50 kWh/(m²a) gesenkt. In der Realität liegen die Werte oft niedriger, weil der Luftwechsel ohne Lüftungsanlage meist geringer ist bei gleichzeitig schlechterer Innenraumluftqualität.

Die angegeben Zahlenwerte sind nicht nachvollziehbar und können mit einfachen Rechnungen z.B. anhand von durch EU Richtlinien vorgegebene Algorithmen widerlegt werden (EU 1253/2014, 2014).

Grundsätzlich ist eine isolierte Betrachtung der Lüftungswärmeverluste nicht aussagekräftig, weil betriebs-, bedarfs- und investitionsbezogene (graue Energie) Aufwendungen gegenzurechnen sind (VDI 4701, DIN V 18599) (Kremer, Rewitz and Müller, 2021; Kaup, 2022).

Mit dem AHUlife online Programm der RWTH Aachen lässt sich nachweisen, dass mit den hier empfohlenen Luftvolumenströmen von $25m^3/(h P)$ keine Primärenergie gegenüber Ventilator-Fensterlüftung eingespart wird, sondern im Gegenteil ein Mehrverbrauch vorliegt. Eine Schritt-für-Schritt Anleitung dazu haben wir veröffentlicht (Helleis and Klimach, 2021; Kremer, Rewitz and Müller, 2021).

Bei 25m³/(h P) ergibt sich pro Schuljahr in der Heizperiode ein Lüftungswärmeverlust von ca. 95kWh/(a P). Mit einer mittleren Belegungsfläche von ca. 9.5m²/P (Reiß *et al.*, 2017) ergeben sich also ca. 10kWh/(m² a) Lüftungswärmeverlust, von dem ca. 8 kWh/(m² a) rückgewinnbar sind, also 5-6 mal weniger als im Dokument angegeben. Davon sind wegen der Solareinträge, Abwärme von Schülern und Geräten ca. 2 Drittel erneuerbar, also müssten selbst ohne Wärmerückgewinnung nur ca. 3 kWh/(m² a) durch zusätzliche Heizung aufgebracht werden, 15-mal weniger als im Dokument angegeben. Akzeptiert man in der Heizperiode einen CO₂-Grenzwert von 1200 ppm halbiert sich die theoretisch aufzuwendende Heizenergie nochmals.

Berechnet man die möglichen Einsparungen mit dem Formalismus der Ecodesign Richtlinie 1253, erhält man für den Schulbetrieb mit CO_2 geführter Fensterlüftung in mittlerem Klima eine Einsparung von ca. 5-6 kWh(m^2 a), 8-mal weniger als im Dokument angegeben, der Unterschied zur vorangegangenen Rechnung lässt sich leicht mit geringer angesetzten internen Lasten erklären (EU 1253/2014, 2014).

Neben einer hochwertigen Gebäudehülle stellt die Wärmerückgewinnung den zweiten wichtigen Aspekt zukunftsorientierter Gebäudestandards dar.

Diese Aussage ist für Schulen wissenschaftlich nicht haltbar (direkter Nachweis z.b. durch Formalismus der Ecodesign 1253/2014, realistische eta_h Werte für Wärmepumpe oder Holzheizung einsetzen).

RLT/WRG kann also in Schulen weder auf dem Papier noch in der Praxis einen den Investitionsaufwand rechtfertigenden Beitrag zu zukunftsorientierten Gebäudestandards erbringen. Wärmepumpen, erneuerbare Wärmeträger, Abschattung, Nachtkühlung und die Gebäudehülle sind die zielführenden und flächendeckend umgesetzten Konzepte (Reiß *et al.*, 2017).

Tatsächlich liegen die Hauptgründe für die in der Praxis nicht nachweisbare Energieeinsparung durch WRG/RLT in der nicht auf den Schulbetrieb optimierten Auslegung der Anlagen, viel zu hohen Druckverlusten, teilweise nicht vorhandener Bedarfsregelung, nicht vorhandener oder unzweckmäßiger Zonierung und die zur maximalen Nutzung des Potentials der WRG nicht geeigneter Topologie (Peper *et al.*, 2007; Jagnow and Gebhardt, 2017; Reiß *et al.*, 2017).

Als Ergebnis kann ein Heizwärmebedarf von 15 kWh/(m²a) im Bereich des Passivhaus-, Null- oder Plusenergiestandards mit guter Luftqualität erreicht werden, wie mittlerweile zahlreiche gebaute Gebäude zeigen.

Deswegen sollte der energetischen Sanierung der Gebäude oberste Priorität eingeräumt werden. Eine Investition in die Gebäudehülle kann bis zu 80% Energie einsparen, während eine Investition in RLT/WRG in der Praxis meist Verluste einfährt – lufthygienisch, wirtschaftlich, nachhaltig und emissionsbezogen (Peper *et al.*, 2007; Reiß *et al.*, 2017).

Reiß et al. haben 13 Neubau- und Sanierungsprojekte untersucht, die durch Branchenvertreter messtechnisch begleitet wurden. Uns ist kein Projekt bekannt, bei dem ganzjährig eine gute Luftqualität (ca. $30m^3/(h\ P)$, < $1000\ ppm\ CO_2$) erreicht wurde. Grund waren im wesentlichen unterdimensionierte RLT Anlagen (Peper *et al.*, 2007; Jagnow and Gebhardt, 2017; Reiß *et al.*, 2017; Anlauft and Schwede, 2018).

Luftdichtheit des Gebäudes

Beim Einsatz von Lüftungsanlagen ist ein Dichtheitskonzept für die Gebäudehülle von zentraler Bedeutung, weil erwärmte Luft und auch Feuchte über Leckagen verloren gehen statt über den Wärmetauscher geleitet zu werden, um die Energie auf die einströmende Außenluft zu übertragen. Als Zielwert der Luftdichtheitsmessung gilt $n50 \le 0.6 \ h-1$.

Hier sollte durch Referenzen oder rechnerisch nachgewiesen werden, warum ein derartig dichtes Gebäude gerade beim Einsatz einer korrekt eingestellten Lüftungsanlage so bedeutsam sein soll. Die Luftvolumenströme einer Anlage liegen im Betrieb bis zu einem Faktor 20 über den natürlichen Leckraten normal sanierter Gebäude, die nicht zurückgewonnenen Potentiale erscheinen daher vernachlässigbar, zumal Undichtigkeiten im Betrieb (ständige Türbewegungen) unvermeidlich sind (Peper *et al.*, 2007).

In einem Fall von nicht korrekt eingestellten Anlagen sind Differenzen von Zuluft- und Abluftströmen von ca. 20% dokumentiert (Jagnow and Gebhardt, 2017), so dass eine sehr dichte Gebäudehülle oberflächlich betrachtet als work-around hilfreich sein könnte. Im zitierten Fall waren die beteiligten Fachleute nicht in der Lage, das Problem innerhalb von zwei Jahren zu beheben.

Das zentrale auslegungstechnische Problem bidirektionaler Lüftungsanlagen besteht darin, dass Zu- und Abluftvolumenstrom und nicht Zuluftvolumenstrom und Raumdruck geregelt wird. Dadurch können geringe Toleranzen in der Volumenstrommessung zu Run-Away-Bedingungen führen, also Unter- oder Überdruck im Raum und Ausgleich der Volumenströme durch Infiltration, die eigentlich durch RLT minimiert werden sollte.

Bedienfreundlichkeit

Zur Bedienfreundlichkeit und bezüglich Toleranz gegenüber Fehlern im Betrieb gilt: Die Gebäudetechnik sollte inkl. Regelung so einfach wie möglich ausgeführt werden und von den Nutzern nachvollziehbar sein, Funktion und Bedienung sollte jeder Lehrende und die Schüler intuitiv verstehen können. Die Standard-Wartung inkl. Filterwechsel muss mit geringem Aufwand von einem Hausmeister leistbar sein.

Die Ausführungen sind rechtlich und haftungstechnisch nicht nachvollziehbar. Moderne, nach einschlägigen Verordnungen normgerecht betriebene Lüftungsanlagen müssen ohne Eingriff durch den Nutzer funktional sein und aus Haftungsgründen durch Fachleute gewartet werden. Auf für die Luftqualität entscheidende Parameter darf der Nutzer nur beschränkt (verbessernd) Einfluss nehmen können.

Investitionskosten

Die Kosten zahlreicher ausgeführter Lüftungsanlagen sind teilweise erheblich.

Mittlerweile kann jedoch von Planern verlangt werden, eine hochwertige

Lüftungsanlage mit Wärme- und Feuchterückgewinnung für etwa 10.000 bis 15.000 €

pro Klassenraum ausführen zu lassen. Bei einer Kosten-Nutzenbetrachtung müssen

neben Effizienzgründen vor allem die Erzielung guter innenraumlufthygienischer

Bedingungen angeführt werden, Faktoren, die monetär schwer bewertet werden

können. Die Planungen für solche Anlagen müssen mit der nötigen Fachkompetenz,

Sorgfalt und Sparsamkeitsprinzipien im Sinne des Nutzers/Bauherren/Investors

erfolgen.

Hier wären Referenzen wünschenswert, die durch Rechnungen oder Praxisbeispiele nachweisen, wie die Kosten-Nutzen-Betrachtung auszuführen ist, damit sich in der Praxis ein

Gesamtnutzen von RLT/WRG bzw. hybrider Lüftung gegenüber Ventilator-gestützter Fensterlüftung nachweisen lässt.

Alle von uns ausgewerteten Praxisbeispiele betreffen unterdimensionierte Anlagen, die in der Praxis zu mäßigen/niedrigen Luftqualitäten über längere Zeiträume bei gleichzeitig überhöhtem Gesamtenergieaufwand und erhöhten CO₂ Emissionen führen (Peper *et al.*, 2007; Jagnow and Gebhardt, 2017; Reiß *et al.*, 2017; Anlauft and Schwede, 2018).

Infobox 3: Lüftungstechnik und sommerlicher Wärmeschutz

Zum Wohlbefinden in Innenräumen gehört nicht nur eine Komforttemperatur im Winter, sondern auch im Sommer gilt es, einer übermäßigen Überhitzung der Räume entgegenzutreten. Grundsätzlich ist es nicht Aufgabe von Lüftungsanlagen, den sommerlichen Wärmeschutz zu gewährleisten. In erster Linie muss dies durch bauliche Lösungen erzielt werden. Das sind vor allem:

- eine außenliegende Verschattung der Fenster (mit Rollläden, vorstehenden Gebäudeteilen oder Pflanzen), die verhindert, dass einfallendes Sonnenlicht die Räume aufheizt,
- guter Wärmeschutz an Wänden und Fenstern, die den Wärmeeintrag über die Außenflächen verringern, und
- eine hohe Bauteilmasse, die tagsüber eintretende Wärmelasten 'abpuffern' kann, die nachts mittels Lüftung wieder nach draußen abgeführt werden.
- Lüftungsanlagen können jedoch flankierend helfen und über das Konzept der Nachtlüftung in den sommerlichen Wärmeschutz eingebunden werden. Eine einfache Lösung mit geringem Energiebedarf ist z. B. die Ansaugung der kühlen Außenluft über Fenster / Nachtlüftungs-öffnungen (ggf. gesteuert motorisch zu öffnen) in den Klassenräumen und die Abführung der Abluft über die Lüftungsanlage (Abluftschaltung).

In den uns bekannten Projekten wird versucht, die Nachtkühlung passiv zu realisieren, da der Betrieb der Lüftungsanlage auch im Bypass zu viel Energie verbraucht (Filter, Schalldämpfer, Brandschutzklappen und Rohrnetz verbleiben im Strömungspfad (Peper *et al.*, 2007).

Nicht empfohlen werden Erdreichwärmetauscher aufgrund des geringen Kühleffekts in Verbindung mit hohem Investitionsaufwand. Zudem besteht bei Luft-Erdreichwärmetauschern die Gefahr mikrobieller Belastungen.

Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung müssen seit 2016 einen "Sommer-Bypass" haben, der den Wärmetauscher umgeht, so dass nachts die Raumluft gegen kühle Außenluft ausgetauscht werden kann (Verordnung 2014/1253/EU).

Hauptgründe gegen Nachtlüftung über RLT siehe oben. Hauptgrund für die Notwendigkeit des "Sommer-Bypass" in Schulen ist selbstverständlich die hohe Wärmelast durch Schüler

und Sonneneinstrahlung. Die im Klassenraum freigesetzte Wärme darf aus Behaglichkeitsgründen gar nicht rückgewonnen werden, besonders auch während der Übergangszeit - siehe z.B. Messdaten bei 13°C Außentemperatur (Knaus *et al.*, 2019).

Infobox 4: Sachgerechtes Lüften in Bestandsbauten mit Fensterlüftung (ohne Lüftungstechnik)

Bei Schulgebäuden im Bestand, die noch nicht über lüftungstechnische Einrichtungen verfügen, muss unbedingt regelmäßig vor und während des Unterrichts gelüftet werden. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die folgenden Empfehlungen keine Alternative zur zukünftigen Verwendung mechanischer Lüftungen in Kombination mit manuellem Lüften über Fenster (Hybrid-Lüftung) darstellen.

Dass das unten für Bestandsgebäude "empfohlene" Stoßlüften keine Alternative zu Lüftungskonzepten darstellt, die die geforderte Raumluftqualität ganzjährig sicherstellen, wird durch alle uns bekannten Studien der Branche nachgewiesen.

Allerdings wird sowohl durch die BAUA ASR A3.6 als auch durch weitere Studien (Fitzner 2012, von Grabe 2014, Erhart 2016, Ostmann 2022) direkt oder indirekt nachgewiesen, dass Fenster bei Quell-Dauerlüftung weitaus höhere Raumluftqualität als Mischlüftung generiert, insbesondere wenn im Winter aus Bequemlichkeit oder Behaglichkeit bei hybriden Varianten die Fenster geschlossen bleiben.

Damit steht außer Frage, dass Hybrid-Lüftung lufthygienisch keine Alternative zu Fenster-Dauerlüften sein kann.

Es handelt sich um Maßnahmen, die im Regelfall nicht dazu führen, dass die geforderten CO₂-Werte (1000 ppm im Unterrichtsstundenmittel) eingehalten werden, jedoch im Rahmen der Lüftungsmöglichkeiten der meisten Bestandsbauten die Innenraumluftqualität in Unterrichtsgebäuden so gut wie gegenwärtig möglich halten sollen.

Dauerlüften ist offensichtlich nach den in den ASR A3.6 gegebenen Daten die einzige gegenwärtige realisierbare Möglichkeit, die geforderten CO₂ Grenzwerte einzuhalten (BAUA ASR A3.6, 2012).

Wichtig ist, dass beim Lüften alle Fenster regelmäßig – auch in der Heizperiode – kurzzeitig weit geöffnet werden (Stoßlüftung). Ein Lüften zum Flur hin ist ebenso unzweckmäßig wie ein Lüften über Kippstellung der Fenster (Ausnahme: dauerhaft gekippte Fenster im Sommer)

Hier sollten Referenzen oder rechnerische Nachweise vorgelegt werden, diese Aussagen sind aus den von uns genutzten Referenzen weder theoretisch noch praktisch ableitbar.

Beim Dauerlüften werden gegenüber Stoßlüften naturgemäß 3-5mal kleinere Öffnungsquerschnitte als bei Stoßlüftung benötigt, dazu kommen die größere Lüftungseffektivität, geringere Zuglufterscheinungen und Energieeinsparung (BAUA ASR A3.6, 2012; Fitzner and Finke, 2012; Schaub *et al.*, 2021; Ostmann *et al.*, 2022).

Alle Studien, die ausschließlich Stoßlüften betrachten, zeigen, dass Stoßlüften die Anforderungen bei den typisch vorhandenen Öffnungsquerschnitten bei Temperaturen über ca. 10°C nur bei weit zu öffnenden Fenstern erfüllen kann, die nicht in allen Klassenräumen in ausreichender Anzahl vorhanden sind (Knaus *et al.*, 2019; Müller *et al.*, 2020; Ostmann *et al.*, 2022).

Allerdings lassen diese Studien eine Abschätzung der Luftwechselraten zu, die bei Dauerlüftung erreichbar wären. Fitzner hat nachgewiesen, dass Dauerlüften das Mittel der Wahl ist, um bei eben diesen Bedingungen ausreichende Luftwechselraten bei angemessener Behaglichkeit zu erzielen (Fitzner and Finke, 2012).

Es bleibt schleierhaft, warum durch die Vorgabe von Stoßlüften, einer bei höheren Temperaturen untauglichen Lüftungsstrategie, das volle Potential der Fensterlüftung ungenutzt bleibt und stattdessen der Verbreitung von unterdimensionierter RLT/WRG Vorschub geleistet wird.

Das Lüften zum Flur hin wird in einigen Passiv- bzw. Nullenergiehäusern wegen nicht vorhandener oder funktionierender Zonierung der RLT routinemäßig eingesetzt, um die Raumlufttemperaturen zwischen Nord- und Süd-orientierten Räumen auszugleichen und die Raumluftqualität auch ohne zusätzliche Fensterlüftung im mäßigen Bereich zu halten, da die Flure als zusätzliches Puffervolumen fungieren und teilweise auch belüftet werden (Peper *et al.*, 2007; Jagnow and Gebhardt, 2017). Warum diese in der Praxis wissenschaftlich als wirkungsvoll nachgewiesene Maßnahme hier ohne wissenschaftlichen Gegenbeweis als "unzweckmäßig" dargestellt wird, ist nicht nachvollziehbar.

Die Stoßlüftung soll erfolgen:

- Vor Unterrichtsbeginn sollen alle Fenster in einem Klassenraum 5 bis 10 Minuten so weit wie möglich geöffnet werden. Das gilt auch und besonders nach Wochenenden und wenn die Räume längere Zeit nicht genutzt wurden.
- In jeder kurzen Pause sollen alle Fenster im Klassenraum ebenfalls soweit wie möglich für die gesamte Dauer der Unterrichtspause weit geöffnet werden. Die Heizkörperthermostaten können dabei während der Heizperiode heruntergedreht werden.
- In jeder langen Pause (Hofpause) soll die Lüftungsdauer vorzugsweise ebenfalls über die ganze Pause erfolgen. Im Winter bei sehr niedrigen Temperaturen unter dem Gefrierpunkt, reicht es, die Fenster in der langen Pause circa 5–10 Minuten geöffnet zu halten. Vorhandene Heizkörperthermostaten können zuvor gedrosselt werden.
- Während des Unterrichts muss bei üblicher Raumbelegung zusätzlich gelüftet werden. Eine generelle Vorgabe gibt es hier nicht. Eine CO₂-Ampel (siehe Bild) kann helfen, die notwendigen Lüftungsintervalle während des Unterrichts anzuzeigen. Eine zusätzliche "Kipplüftung" kann während des Unterrichtes den Luftaustausch unterstützen, sofern keine unzumutbaren Bedingungen hinsichtlich Temperatur und Zugerscheinungen sowie durch Lärm oder Einwirkung von

Immissionen von außen entstehen. Im Sommer können die Fenster auch dauerhaft auf Kippstellung bleiben, sofern Lärmaspekte oder zusätzliche Raumaufheizungen von außen dem nicht entgegenstehen.

Bestehen Sicherheitsbedenken gegen ein Lüften, weil z. B. kleine Kinder während der Pausen in den Klassenräumen verbleiben, und man Sorge hat, dass Kinder aus dem Fenster stürzen könnten, muss das Lüften dennoch erfolgen, dann jedoch unter Anwesenheit einer Aufsichtsperson. Alternativ sollen die Kinder den Raum während der Pause verlassen. Es gelten die gängigen Unfallverhütungsvorschriften.

Die Handlungsanweisungen und Ausführungen zum Stoßlüften sind obsolet, da nach den typischen Gegebenheiten in Klassenräumen nur CO₂ geführtes Dauerlüften zu reproduzierbaren und angemessen behaglichen Ergebnissen führen kann.

Infobox 5: Untersuchungsergebnisse

Um die Vorgaben für verschiedenen Lüftungsszenarien und -empfehlungen zu überprüfen, fanden im Zeitraum von Oktober 2016 bis Januar 2017 in sieben Städten in Deutschland Messungen der CO₂-Raumluftkonzentrationen in verschiedenen Schultypen, wie Grund-, Real-, Berufsschulen, Gymnasien, etc. mit unterschiedlichen baulichen und anlagentechnischen Rahmenbedingungen statt. Diese reichten von neu gebauten Schulen mit mechanischen Lüftungsanlagen, über sanierte Schulen mit dezentralen Lüftungsanlagen, hybriden Lüftungssystemen bzw. motorisch gesteuerter Fensterlüftung sowie unsanierten Schulen mit ausschließlicher Fensterlüftung, teils unterstützt durch Lüftungsampeln. Insgesamt wurde die Raumluftqualität anhand der CO₂-Bilanzen in 35 Unterrichtsräumen gemessen. Die Auswertungen zeigen, dass alleinige manuelle Fensterlüftung nicht ausreichend ist, den gesundheitlichhygienischen Leitwert der CO₂-Raumluftkonzentration (1000 ppm) zu gewährleisten.

Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse erfolgt erst nach Drucklegung dieser Empfehlungen und wird unter anderem in der Schriftenreihe des Vereins für Wasser-, Boden- und Lufthygiene im Verlauf des Sommer 2018 erscheinen.

Wir haben die Studienergebnisse überprüft, soweit es anhand der Präsentation von Frau Anlauft und Herrn Schwede möglich war. Die Masterarbeit von Herrn Rosin wurden uns kurzfristig zur Verfügung gestellt und muss erst noch begutachtet werden. Die Ergebnisse soweit in Kürze:

 die gezeigten Konzentrationsverläufe zur Leitwertüberschreitung werden durch Stoßlüften nur in den großen Pausen, also alle 90min, verursacht. Diese Praxis stellt eine grobe Missachtung aller einschlägigen Empfehlungen der IRK und selbstverständlich auch den ASR dar. Aus der Studie kann also nur abgeleitet werden, dass der hygienische Leitwert nicht eingehalten werden kann, wenn völlig unzureichend gelüftet wird. Die pauschale Schlussfolgerung zu "alleiniger manueller Fensterlüftung" ist nicht zulässig. Selbstverständlich darf auf die unzureichende Wirkung von "Ab und An Stoßlüften" (s.o.) bzw. des Stoßlüftens nur in Pausen geschlossen werden.

- die Messungen mit Raumlufttechnik ohne Fensterlüftung zeigen erstaunlicherweise eine hohe Variabilität und Spitzenwerte der CO₂ Stundenwerte, die bei Annahme funktionierender Anlagen durch die angegebenen Betriebsparameter rechnerisch nicht nachvollziehbar sind. Eine Erklärung durch Ausfallzeiten oder Funktionsstörungen der Anlage in über 50% der Unterrichtsstunden ist nicht möglich, da laut der Autoren Stundenmittel während der Ausfallzeiten der Anlagen nicht berücksichtigt wurden.
- Die Parameterangaben und Ergebnisse der Simulationsrechnungen der Universität Stuttgart sind zwar ebenfalls rechnerisch grob inkonsistent (Faktor 10 bei CO₂ Emission, Faktor 1.4 bei Ergebnissen), aber anhand der relativen Änderungen je nach Dauerlüftungskonzept (Quell- vs. Mischlüftung) können die großen Vorteile der Quell-Dauerlüftung direkt abgelesen werden.
- Dauer-Fensterlüftung wurde nicht experimentell untersucht.

Die Studie kann also schon aufgrund der handwerklichen Fehler und sachlichen Inkonsistenzen nicht als gültige wissenschaftliche Referenz zum Nachweis der pauschalen Untauglichkeit von manueller Fensterlüftung angeführt werden, tatsächlich kann sie zwanglos zum Gegenbeweis genutzt werden.

Infobox 6: Lüftung im Klassenraum, Berechnungsbeispiele

Wie verschiedene Lüftungsmöglichkeiten sich unmittelbar auf die CO₂-Konzentrationen in Unterrichtsräumen auswirken, zeigen die folgenden Beispiele.

Ohne Lüftung steigt die CO₂-Konzentration im betrachteten Beispielraum innerhalb einer 45-minütigen Unterrichtseinheit um etwa 60 ppm/Person. Bei den niedrigen Jahrgangsstufen ist dieser Anstieg etwas geringer, bei den höheren Jahrgangsstufen entsprechend stärker. Am Ende der Unterrichtseinheit ergibt sich somit, selbst bei besten Ausgangsbedingungen (Außenluftkonzentration etwa 400 ppm), eine CO₂-Konzentration deutlich über 2.000 ppm. Mit üblichen CO₂-Konzentrationen zu Beginn des Unterrichts werden sogar Werte von etwa 3.000 ppm erreicht. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit einer Lüftung während des Unterrichts.

Es liegt nahe, das nach den ASR A3.6 zugelassene und bewährte Dauerlüftungskonzept zu nutzen, das die Anforderungen nach Lüftung während des Unterrichts trivialerweise erfüllt.

Das Lüften während des Unterrichts kann grundsätzlich kontinuierlich (mechanische Lüftung) oder punktuell (Stoßlüftung über Fenster) erfolgen.

Die dritte noch wirksamere Alternative ist kontinuierliche (Dauer-) Lüftung über Fenster o.ä..

Da punktuelles Lüften immer eine Störung des Unterrichts darstellt, wird in der Praxis im Regelfall kontinuierlich gelüftet. Die kontinuierliche Lüftung sorgt für eine

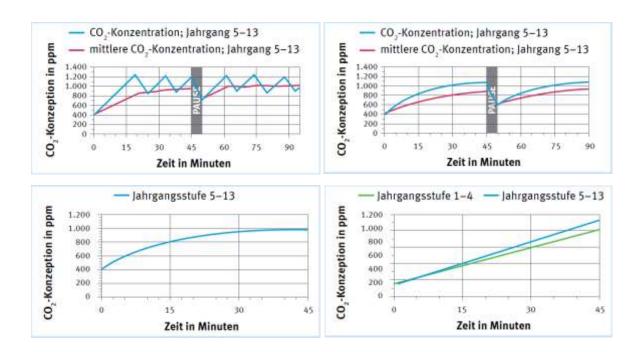
stetige Verdünnung der CO₂-Emissionen und wirkt damit dem Anstieg der CO₂-Konzentration entgegen. Für eine Begrenzung der CO₂-Konzentration auf 1.000 ppm ist im betrachteten Fall ein Volumenstrom von mindestens 30 m³/(h·Person) erforderlich. Für eine gemittelte CO₂-Konzentration von 1.000 ppm in der Unterrichtseinheit genügt eine kontinuierliche Lüftung mit ca. 25 m³/(h·Person), wenn diese in der Pause durch eine Stoßlüftung über die Fenster ergänzt wird (hybride Lüftung).

Das hängt von Randbedingungen bei der Stoßlüftung ab, von deren konsequenten Durchführung im Winter aus Behaglichkeitsgründen nicht zwangsläufig ausgegangen werden kann. Daher wäre es sinnvoll, die fehlenden 5m³/(h P) auch noch durch die kontinuierliche Lüftung darzustellen (weniger Zugluft, keine Temperaturschwankungen, weniger Aufwand und Störungen, behaglicher). Warum man nach Anschaffung einer RLT/WRG wegen 5m³/(h P) den Aufwand von detaillierten Lüftungskonzepten, regelmäßigen Nutzer-Einweisungen und Überprüfungen und der flächendeckenden Nutzung von CO₂ Geräte bei gleichzeitig nicht auszuschließenden "Gesundheitsrisiken" treiben sollte, ist nicht nachvollziehbar.

Da Fensterlüftung auf der temperatur-, feuchte- und windbedingten Druckdifferenz zwischen Innen- und Außenraum basiert, ist sie stark von den klimatischen Bedingungen abhängig. Der Luftaustausch wird zudem durch die baulichen Gegebenheiten, bspw. Fenstergeometrie, beeinflusst. Bei einseitiger Stoßlüftung eines Raumes während einer Unterrichtspause (5–10 min.) kann ein Volumenstrom realisiert werden, der einem Luftwechsel von 1,0 bis 2,0 h-1 entspricht. Die CO₂-Konzentration im Raum kann so, abhängig vom Ausgangswert, um bis zu 70 % gesenkt werden, sofern während der Lüftung keine Personen im Unterrichtsraum anwesend sind. Für ein Absinken der CO₂-Konzentration im Raum auf das Niveau der Außenluft sind längere Lüftungszeiten bzw. eine höhere Lüftungseffektivität, bspw. durch Querlüftung, erforderlich.

Die Relevanz der hier gegebenen Informationen ist nicht klar. CO₂-geführte Dauerlüftung über Fenster macht derartige Betrachtungen überflüssig. Einfach so viele Fenster kippen, bis es passt.





Bitte Graphiken zum Text zuordnen und korrekt beschriften. Was genau gezeigt wird, ist nicht klar.

Bitte Referenzen zur Eingabeparametern angeben, um die gezeigten Konzeptions-bzw. Konzentrationsverläufe überprüfen zu können.

Infobox 7: Rechentools zur Planungsunterstützung von Lüftung in Schulen

Bezüglich der planerischen Umsetzung von Konzepten zur mechanischen Belüftung von Innenräumen existieren diverse softwaretechnische Instrumente (Tools). Anders sieht es im Bereich der natürlichen Lüftung aus. Die hier verfügbaren wenigen Rechentools fokussieren sich jeweils nur auf Teilaspekte und betrachten das Zusammenspiel aus Raumgeometrie, Raumbelegung, Luftwechselrate, thermischer Komfort und CO₂-Konzentration nicht ganzheitlich. Für eine umfassende Betrachtung der raumrelevanten Aspekte müssen daher mehrere Rechentools miteinander verschaltet werden, beispielsweise das Rechentool zur VDI 6040 und das CO₂-Online-Modell des Niedersächsischen Landesgesundheitsamtes (https://www.nlga.niedersachsen.de/umweltmedizin/luft/projekt_lufthygiene_schulen/co2modellsoftware/co2-modellsoftware-19316.html).

Da nutzerabhängige Stoßlüftung keinen Mindestluftvolumenstrom garantieren kann, sollte sie bei der Auslegung einer Anlage, die durchgängig eine gute Raumluftqualität gewährleisten soll, nach unserer Auffassung keine Berücksichtigung finden.

Um Planern und Entscheidern eine verlässliche Information zur raumlufthygienischen Wirkung eines vorgesehenen Lüftungs- bzw. Raumkonzeptes zu geben, erarbeitet das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) derzeit ein vereinfachtes

Rechenwerkzeug, das für die ganzheitliche planerische Betrachtung von Konzepten sowohl der reinen natürlichen, als auch der hybriden Belüftung genutzt werden kann.

Das Rechenwerkzeug des BBSR soll anhand weniger Eingabewerte zur Raumgeometrie, zur Raumbelegung und zur vorgesehenen Lüftungsstrategie die sich einstellenden Luftwechselraten und hierauf basierend die relevanten Parameter hinsichtlich des thermischen Komforts und der CO₂-Konzentration (einschließlich des zeitlichen Verlaufes) ermitteln. Anhand dieser Werte sind Vergleiche unterschiedlicher Lüftungsstrategien schnell und einfach durchzuführen. Perspektivisch ist das Rechenwerkzeug auch als Nachweisinstrument im Rahmen der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden gemäß dem BNB-Bewertungssystem (www.bnb-nachhaltigesbauen.de) vorgesehen.

Weitere Informationen sind direkt beim BBSR und den anderen genannten Institutionen erhältlich.

Nach Rücksprache mit dem BBSR war es nicht möglich, das Rechentool zu erhalten und damit wissenschaftliche Untersuchungen anzustellen. Der Grund liegt darin, dass die dem Algorithmus zugrundeliegende Norm DIN SPEC 4108-8 derzeit noch nicht einmal im Weißdruck vorliegen soll. Die angeführte Referenz ist nicht öffentlich zugänglich.

Anhand des herunterladbaren Endberichts lässt sich zeigen, dass Stoßlüften in den Pausen nicht zu akzeptabler Raumluftqualität führt. Andererseits lässt sich aus den ermittelten Luftwechselraten der stationären Versuche direkt ableiten, wie gut Dauerlüften mit Standard Fensterfassaden in Schulen funktionieren würde, wenn man sie denn in instationären Experimenten untersucht hätte (Knaus *et al.*, 2019).

Einleitung

Wir halten uns in Mitteleuropa den weitaus überwiegenden Teil des Tages in geschlossenen Räumen auf, zu Hause, in Bahnen, Bussen, Pkw oder am Arbeitsplatz. Gute Innenraumluftqualität ist daher für unser Wohlbefinden und unsere Gesundheit unerlässlich. Die Innenraumluftgüte wird neben baulichen Einflüssen wesentlich durch das Verhalten der Nutzer bestimmt, unter anderem durch das Einbringen von Stoffen durch Inventar und Reinigungsmittel sowie das Heiz- und Lüftungsverhalten. Moderne Heizungsanlagen nehmen den Nutzern weitgehend die individuelle Regelungsnotwendigkeit beim Heizen ab. Beim Lüften ist es anders. Mittlerweile gibt es zwar in Deutschland und anderen Ländern der EU ausgereifte und in der Praxis vielfach erprobte technische Lüftungseinrichtungen, die dem Verbraucher/Nutzer das "aktive" und eigenverantwortliche Lüften über die Fenster abnehmen oder dies zumindest ergänzen. Die Verbreitung war lange Zeit vor allem auf größere Büro- und Verwaltungsgebäude sowie auf spezielle Einrichtungen mit hohem Anspruch an die Raumluftgüte beschränkt. Erst in den letzten Jahren setzt sich Lüftungstechnik zunehmend auch in weiteren Bereichen wie dem Wohnungsbau durch.

Lüften ist aufgrund der langen Aufenthaltszeiten im Innenraum und den vielfältig eingebrachten chemischen und biologischen Stoffen, gleich ob bei Bestandsgebäuden oder Neubauten, mehr denn je wichtig, um eine gute Raumluftqualität aufrechtzuerhalten – häufig sogar, um eine gute Raumluftqualität überhaupt erst zu erreichen.

Das gilt maßgeblich auch für die Innenraumluft in Bildungseinrichtungen wie Schulen, Hochschulen oder Universitäten, aber auch für Kindertagesstätten. In Bildungseinrichtungen erfordert die Lüftungssituation besondere Aufmerksamkeit. Die vergleichsweise große Zahl an Personen auf oft engem Raum macht schon allein aufgrund des vom Menschen ausgeatmeten Kohlendioxids ein regelmäßiges Lüften unerlässlich, um die gesundheitlich-hygienischen Vorgaben der Innenraumluftgüte zu erreichen. Bloßes Lüften – ab und an – über die Fenster reicht dann nicht mehr aus. Neben Stoffparametern wie Kohlendioxid (CO₂) und anderen chemischen Stoffen ist die kognitive Leistungsfähigkeit und die Behaglichkeit während des Unterrichts für Schüler und Lehrer ein wichtiges Kriterium, um den Lernerfolg zu unterstützen und Unwohlsein oder gar Ausfall durch Erkrankungen, die durch den Aufenthalt im Innenraum bedingt sind, vorzubeugen.

Wissenschaftliche Untersuchungen zeigen ebenso wie einfache Rechnungen, dass weder "Ab und An Lüften" (vermutlich ist unregelmäßiges Stoßlüften gemeint), noch das regelmäßige Stoßlüften während der Pausen ausreicht, um die "gesundheitlich-hygienischen Vorgaben der Innenraumluftgüte" ganzjährig zu erfüllen (Knaus *et al.*, 2019). Nach DIN EN 16798 gibt es auch erhebliche Unterschiede zwischen allgemeinen gesundheitlichen (Minimum 14.4m³/(h P)) und typischen hygienischen Empfehlungen für Schulen (Kat 2: Minimum 25m³/(h P)) (DIN EN 16798, 2019). Hier wäre eine differenzierte Betrachtung wissenschaftlich angeraten.

Studien zu natürlicher Lüftung über Fenster weisen aber auch nach, dass dies durch "bloßes" Dauerlüften über Fenster praktisch ganzjährig möglich ist (BAUA ASR A3.6, 2012; Fitzner and Finke, 2012; von Grabe, Svoboda and Bäumler, 2014; Erhart *et al.*, 2015; Knaus *et al.*, 2019; Ostmann *et al.*, 2022).

Lüftungsplanung in Unterrichtsgebäuden ist eine integrale Aufgabe, die bereits in der Vorentwurfsphase beginnt, die gesamte Bauausführung begleitet und ein umfassendes Betriebs- und Wartungskonzept erfordert. Sie umfasst zahlreiche interdisziplinäre Aspekte. Dazu gehören neben der Innenraumlufthygiene u. a. die Behaglichkeit, Raumluftfeuchte, Praktikabilität und Energieeffizienz. Sowohl im Neubau als auch im sanierten und unsanierten Altbau zeigen Messungen, dass Fensterlüftung bei den gegenwärtigen Randbedingungen hinsichtlich der Personenbelegung und Raumgrößen in Bildungseinrichtungen allein nicht geeignet ist, während der Nutzungszeiten gute Innenraumluftqualitäten sowie ein gutes und behagliches Innenraumklima zu gewährleisten.

Wie schon des Öfteren nachgewiesen, trifft diese Aussage im Allgemeinen nur für das Stoßlüften zu.

Akzeptable lufthygienische Bedingungen insbesondere beim Betrieb von unterdimensionierter Raumlufttechnik ergeben sich in allen von uns ausgewerteten Untersuchungen nur durch Kombination mit Stoßlüftungskonzepten (Peper *et al.*, 2007; Knaus *et al.*, 2019; Müller *et al.*, 2020; Ostmann *et al.*, 2022). Dauerlüftungskonzepte, die deutlich gleichmäßigere Bedingungen herstellen würden, werden im vorliegenden Dokument aus unbekannten Gründen konsequent ignoriert.

Das Umweltbundesamt hat dem bereits 2009 in seinem Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden (www.umweltbundesamt.de) Rechnung getragen und empfiehlt bei Neubau von Unterrichtsgebäuden den Einbau technischer Lüftungssysteme.

Auch hier fehlen Referenzen oder rechnerische Nachweise. Dauerlüftungskonzepte wurden auch in diesen Veröffentlichungen nicht berücksichtigt (Umweltbundesamt, 2008b, 2008a).

Die CO₂-Konzentration in der Innenraumluft von Klassenräumen stellt dabei den Leitwert für die Beurteilung dar.

Es bleibt wissenschaftlich zu klären, warum das UBA 2008 analog zu den später erschienenen ASR A3.6 1000ppm als gesundheitlich zuträglichen Grenzwert definiert hat und jetzt nur noch als Zeitmittelwert über eine Unterrichtseinheit definiert (Umweltbundesamt, 2008b, 2008a, 2017; BAUA ASR A3.6, 2012).

Voraussetzungen für eine gute Innenraumluftqualität in Bildungseinrichtungen sind:

Hier fehlt eine Referenz für diesen Begriff, z.B. definiert die aktuell gültige DIN EN 16798 "hohes, normales, moderates, niedriges Maß an Erwartungen an das Raumklima".

Eine Festlegung der Innenraumluftqualität erfolgt in neueren Normen nicht mehr, da Zuluftvolumenströme nicht per se die Innenraumluftqualität unmittelbar kontrollieren können.

Die genutzten Begriffe sollten festgelegt und wissenschaftlich oder zumindest normativ begründet werden.

• niedriger CO₂-Gehalt der Innenraumluft

Dieser neue Begriff sollte zumindest normativ definiert werden.

• Behaglichkeit bezüglich Raumlufttemperatur, relativer Luftfeuchte, Luftbewegung (Zugluftfreiheit, Luftschichtung) und Schallpegel

Behaglichkeit beinhaltet die Luftqualität als Teilbereich, nicht umgekehrt. Die angesprochenen Punkte sind Teilbereiche des Behaglichkeitsbegriffs. "Gute" Luftqualität hängt offensichtlich nicht von den angesprochenen Punkten ab – triviales Beispiel: typische Außenluftqualität.

- Verwendung emissionsarmer Bauprodukte und Einrichtungsgegenstände zur Verringerung des Eintrags chemischer Stoffe
- geringer Gehalt nutzer- und nutzungsbedingter Luftverunreinigungen

 Bedienfreundlichkeit l\u00fcftungstechnischer Einrichtungen und Beachtung der Fehlertoleranz im Betrieb

Dieser Punkt ist nicht nachvollziehbar. Beachtet werden muss nicht die "Fehlertoleranz", sondern die "fehlende Fehlertoleranz".

- einfache und kostengünstige regelmäßige technische und hygienische Wartung von Lüftungs- und Heizungsanlagen
- robuste, zuverlässige und wenig störanfällige Anlagen
- Einflussmöglichkeiten und Pflichten der Nutzenden.

Die genannten Aspekte sind als Zielvorgaben in den Planungsprozess bei Sanierung und Neubau von Bildungseinrichtungen einzubeziehen. Sie stellen eine Grundlage für das Erreichen einer angemessenen Innenraumluftqualität dar und zeigen die hohen Anforderungen auf, die bei der Lüftungsplanung bedacht werden müssen.

Nach den gegebenen Kernbotschaften bestehen die "hohen Anforderungen" darin, einen Grenzwert von 1000ppm durch Frischluftzufuhr im Quelllüftungsprinzip (geringstes Zugluftrisiko, geringste Austrocknungserscheinungen, geringste Temperaturschwankungen) von ca. 30m³/(h P) einzuhalten und nur schadstoffarme Bauprodukte für Schulen anzuschaffen.

Benötigt werden dazu mehrere zu öffnende Fenster mit einer Gesamtöffnungsfläche von $0.35 \text{m}^2/\text{P}$, ein CO_2 Gerät pro Raum und die Anweisung an die Lehrer, so viele Fenster so zu öffnen, dass die Grenzwert eingehalten wird (BAUA ASR A3.6, 2012).

Zur Einhaltung einer hygienisch unbedenklichen Innenraumluft ist gemäß Ausschuss für Innenraumrichtwerte (AIR) beim Umweltbundesamt ein gesundheitlichhygienischer Leitwert von 1.000 ppm CO₂ einzuhalten. Dies sichert gleichzeitig die Aufrechterhaltung leistungsfördernder Umgebungsbedingungen beim Lernen.

Hier ist wissenschaftlich zu begründen, warum geringere Anforderungen gestellt werden als die, die für den Arbeitsschutz wissenschaftlich begründet verordnet sind (BAUA ASR A3.6, 2012).

Hinsichtlich der Anforderungen an die Lüftung gemäß Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV), konkretisiert mit der ASR A3.6, dient ebenfalls die Einhaltung einer CO₂-Konzentration von 1.000 ppm als Maß zur Einhaltung des Schutzzieles einer "gesundheitlich zuträglichen Atemluft".

Der Begriff "ebenfalls" ist nicht gerechtfertigt. Während es sich bei dem Leitwert des AIR um einen zeitlichen Mittelwert handelt, spezifiziert das BAUA für den Arbeitsschutz einen Grenzwert von 1000ppm (BAUA ASR A3.6, 2012). Während die Anforderungen des AIR durch Stoßlüften realisierbar sind, wird es bei den ASR A3.6 Anforderungen in Schulen schwierig, da ca. alle 15min gelüftet werden müsste und erhebliche Komforteinbußen bei beträchtlichem manuellem Aufwand hingenommen werden müssen.

Gemäß ASR A3.6 sind Raumlufttechnische Anlagen (RLT) erforderlich, wenn eine freie Lüftung bei Einhaltung der dort beschriebenen Lüftungsquerschnitte nicht ausreicht.

Die ASR A3.6 werden hier nicht korrekt zitiert. Die ASR A3.6 definieren minimale Öffnungsquerschnitte, die die Funktionsfähigkeit der Fensterlüftung sicherstellen. Bei Einhaltung der entsprechenden Lüftungsquerschnitte ist davon auszugehen, das freie Lüftung ausreichend und damit keine RLT erforderlich ist.

Für die Normklassenstärke von 25 Personen ergeben sich Mindestöffnungsflächen für einseitige Lüftung von 8.75m² bei Dauerlüftung und 26.25m² bei Stoßlüftung (BAUA ASR A3.6, 2012).

Die für Stoßlüften erforderlichen Öffnungsflächen übersteigen also die typisch in Klassenräumen vorhandenen Fensterflächen (~8-10m²) um ca. das 3-fache, Arbeitsschutzkonformes Lüften ist also in Klassenräumen im Allgemeinen nur durch Dauerlüften möglich (Knaus *et al.*, 2019).

Erst bei Temperaturen unter ~6°C kann mit Stoßlüften bei erheblichen Komforteinbußen annehmbare Raumluftqualität erzielt werden (Fitzner and Finke, 2012).

Zielvorgaben

Zunächst gilt es, die grundlegenden Zielvorgaben hinsichtlich der Innenraumluftqualität miteinander zu kombinieren und zu optimieren. Sie dienen als Richtschnur für die Planung und Nutzung und müssen bei jedem individuellen Projekt auf möglichst sinnvolle und effiziente Weise zusammengeführt werden.

Kohlendioxid-Konzentration in der Innenraumluft

Die Kohlendioxid (CO₂)-Konzentration in der Innenraumluft ist das zentrale Kriterium für gute bzw. angemessene Innenraumluftqualität in Unterrichtsräumen. Die Einhaltung definierter Ziel- bzw. Maximalwerte der CO₂-Konzentration kann darüber hinaus als Indikator für die Einhaltung weiterer Luftqualitätsrichtwerte, z. B. für flüchtige organische Verbindungen (VOC) und andere Stoffe, angesehen werden.

Diese Aussage gilt im Allgemeinen nur dann, wenn es um die Emissionen von Menschen geht. Emissionen des Gebäudes und der Einrichtung sind nicht erfasst, deswegen fordert die DIN EN 16798 auch einen flächenbezogenen Anteil, und RLT wird typisch so parametriert, dass die Lüftung bereits vor Unterrichtsbeginn aktiviert wird, um über Nacht akkumulierte Gebäudeemissionen zu reduzieren.

Für Fensterlüftung ergibt sich der Bedarf einer kurzen Stoßlüftungsphase zu Unterrichtsbeginn vor dem Beginn des reduzierten Dauerlüftens.

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).

Hier sollte eine Begründung angegeben werden, warum nicht der durch die ASR A3.6 wissenschaftlich begründete und legitimierte Wert gewählt wird.

Kurzzeitig erhöhte CO₂-Momentanwerte von z. B. 1500 ppm sind akzeptabel, wenn der Mittelwert von 1000 ppm CO₂ während der Unterrichtseinheit eingehalten wird.

Hier sollte eine Begründung angegeben werden, warum gegenüber den A3.6 fast zweimal höhere CO₂ Zuwächse akzeptabel sein sollen.

Die Einhaltung eines Mittelwertes von 1000pm führt zu einem Maximalwert von ca. 1100ppm bei Dauerlüftung mit $25m^3/(h P)$, $8m^3/P$, 17 l $CO_2(h P)$.

Momentanwerte um 1500ppm werden ohne Lüftung nach etwa 32 Minuten und bei sachgerechter Lüftung theoretisch gar nicht erreicht, bei Einhaltung der ASR A3.6 sind sie sowieso völlig ausgeschlossen.

Im Gegensatz zur relativen Feuchte spielt für die Konzentrationsfähigkeit von Schülern die Raumtemperatur eine entscheidende Rolle. Die optimale Temperatur liegt unterhalb von 22°C, zudem scheinen Kindern und Jugendlichen stärker durch zu hohe Temperaturen beeinträchtigt zu sein als Erwachsene (Wargocki, Porras-Salazar and Contreras-Espinoza, 2019).

Relative Feuchte

Neben der CO₂-Konzentration stellt die relative Feuchte der Luft ein weiteres Kriterium für gute bzw. angemessene Innenraumluftqualität dar. Die relative Raumluftfeuchte sollte idealerweise im Bereich zwischen 30 bis 60 Prozent liegen (allgemeiner Behaglichkeitsbereich). Im Winter sind kurzzeitige Unterschreitungen bis auf etwa 20 bis 25 % möglich. Weitere Unterschreitungen (unter 20 %) werden mit vermehrten Reizerscheinungen in Verbindung gebracht, dauerhaft erhöhte Werte (oberhalb von 60 %) erhöhen das Schimmelrisiko.

Hier fehlen Referenzen, umfangreiche Literaturstudien sehen keine signifikante Kausalität bzw. Handlungsbedarf (DGUV, 2016; Bux and von Hahn, 2020). Studien des Fraunhofer IAO und des Fachverbandes Gebäude-Klima suggerieren lediglich Zusammenhänge, Nachweise werden nicht geliefert (Fraunhofer, 2014; FGK, 2019). Die von letzteren zitierten Referenzen machen teilweise gegenteilige Aussagen (Arundel *et al.*, 1986; DGUV, 2016).

Auswertungen von DWD Wetterdaten zeigen direkt, dass für Raumlufttemperaturen von 20°C zuzüglich der Feuchtelast durch Schüler von ca. 1.5g/kg eine Feuchte von 20% praktisch ganzjährig nicht unterschritten wird. Hohe Raumtemperaturen, wie sie durch ungeregelte Wärmerückgewinnung und/oder direkte Sonneneinstrahlung verursachte werden, können allerdings insbesondere in der Übergangszeit zu weiterer erheblicher Reduktion der relativen Feuchte führen und sollten vermieden werden (Knaus *et al.*, 2019).

Dies gilt insbesondere bei hybrider Lüftung, weil eine etwaige vorhandene Feuchterückgewinnung während der Pausenlüftung bzw. zur Kühlung des Klassenraumes sogar während des Unterrichts umgangen werden muss. Die relative Feuchte hängt direkt von der Raumtemperatur ab, wobei sie bei niedrigeren Temperaturen höher ist. Wie sich die Raumtemperatur verhält, hängt von der Heizenergiebilanz ab. Neben dem Heizbedarf für die Lüftung (ca. 270 W/K bei 800m³/h) verliert der Raum über die Wände und Fenster Energie an Bereiche mit niedrigerer Temperatur (insgesamt je nach Sanierungsstand ca. 20-60 W/K) und gewinnt Energie durch die Wärmeabgabe der Schüler (typisch 2 kW) und weitere Wärmequellen wie Sonneneinstrahlung (0-2 kW) und/oder Lampen bzw. andere elektrische Verbraucher (ca. 0-400W).

Eine adäquat temperierte Lernumgebung ist insbesondere auf Grund der wechselhaften internen Wärmequellen nur mit einer raumbasierten Temperatursteuerung möglich, was mit zentraler Stellung/Regelung der Zulufttemperatur praktisch nicht umsetzbar ist (Peper et al., 2007; Jagnow and Gebhardt, 2017; Reiß et al., 2017). Liegt die Zulufttemperatur 8 - 10 °C niedriger als die Raumtemperatur, besteht ein Energiedefizit und die Heizung muss betrieben werden, ist der Temperaturunterschied wesentlich kleiner, besteht die Gefahr einer Überhitzung, der durch Abschatten der Sonneneinstrahlung und erhöhte Lüftung entgegengewirkt werden kann.

Zugluftfreiheit

Zugluftfreiheit gibt es in der Realität nicht, jede Lüftung insbesondere mit hohen Lüftungsraten braucht zwangsläufig zweckentsprechende Luftgeschwindigkeiten, wesentlich höher als z.B. im Wohnbereich.

Die Luftgeschwindigkeit soll im genutzten Unterrichtsaum einen Wert von 0,15 m/s nicht überschreiten. Die Zuluft der Lüftungsanlage sollte eine Temperatur von mindestens 17 °C aufweisen. Die Temperaturdifferenz von einströmender Luft zur Raumluft beträgt im optimalen Fall 2 K bis max. 4 K.

Diese Anforderung ist nur bei Einbringen der Zuluft durch Deckeneinlässe nötig, um drohende Zuglufterscheinungen im Kopfbereich abzumildern. Die DIN EN ISO 7730 definiert nur Zielwerte für Mischlüftung anhand raumgemittelter Luftgeschwindigkeiten und Turbulenzgrade und ist daher offensichtlich nicht direkt auf Quelllüftung anwendbar (ISO 7730, 2006).

Bei bodennahen Einlässen sind lediglich in einem Bereich von wenigen cm über dem Boden nennenswerte Luftgeschwindigkeiten gegeben, im übrigen Raum liegen sie zwischen 0.04-0.08 m/s (Sodec, F., 2003). Eine Mittelung über den Raum führt daher dazu, dass erheblich niedrigere Zulufttemperaturen und wesentlich höhere Luftgeschwindigkeiten direkt über dem Boden akzeptabel sind, insbesondere mit saisonal an Außenbedingungen angepasstem Straßenschuhwerk.

Aufgrund der hohen Wärmelasten durch Personen befindet sich ein Klassenraum bei Normbelegung bei 8°C Untertemperatur im thermischen Gleichgewicht.

Liegt die Außentemperatur bzw. die Zulufttemperatur weniger als die 8°C unter der Raumtemperatur oder gibt es weitere Wärmequellen wie z.B. Sonneneinstrahlung steigt die Temperatur im Klassenraum, was vermieden werden sollte (s.o.).

Diese Anforderungen an Arbeits- bzw. übliche Aufenthaltsräume können allein mittels Fensterlüftung oder lediglich mit mechanischen Abluftanlagen bei winterlichen Außentemperaturen in der Regel nicht erreicht werden.

Hier sollte durch Referenzen oder Rechnungen nachgewiesen werden, warum hybride Lüftung mit nennenswertem Stoßlüftungsanteil dieses Problem lösen könnte. Es ist lange bekannt, dass die Erwärmung der Zuluft durch die aus gutem Grund am Fenster angeordnete Wasser-Luft-Wärmetauscher ("Heizkörper") möglich ist. Voraussetzung ist allerdings Dauerlüftung und die Luftführung an den Heizkörpern vorbei.

Fensterfassaden im Bestand sollten mit einfachen Abdeckungen optimiert werden, die in Neubauten mit Außenwanddurchlässen hinter den Heizkörpern oder Brüstungsdurchlässen mit Abdeckungen direkt unter den Fenstern ausgestattet werden.

Hygieneanforderungen und Wartung von Lüftungsanlagen

Die Anlagen sind so auszuführen, dass die Innenraumlufthygiene nicht beeinträchtigt wird. Insbesondere müssen die Bereiche der Außenluftansaugung und der Lüftungsleitungen über Revisionsöffnungen zugänglich und ohne hohen Aufwand zu reinigen sein. Bei Planung und Montage gilt es, den Hygieneanforderungen besondere Sorgfalt zukommen zu lassen. Ein regelmäßiger Filterwechsel muss auf einfache Art und Weise sichergestellt sein. Um einen technisch und hygienisch einwandfreien Betrieb der Anlage sicherzustellen und somit negativen gesundheitlichen Auswirkungen vorzubeugen, sind bei Inbetriebnahme eine technische und hygienische Abnahme sowie regelmäßige technische und hygienische Inspektionen, Wartungen und Instandsetzungen notwendig. Die zeitlichen Intervalle hängen vom Anlagentyp ab (vgl. u. a. VDI Reihe 6022 – siehe Abschnitt Normen).

Die Anforderung der VDI 6022 definiert lediglich, dass "die Zuluftqualität durch den Anlagenbetrieb nicht schlechter sein darf als die der Außenluft".

Da die Innenraumlufthygiene nur mittelbar durch Verdünnung beeinflusst werden kann und Filterschäden schon nach wenigen Tagen zu hoher Luftfeuchte eintreten kann, kann eine Beeinträchtigung trotz regelmäßiger Wartungen – 3 Jahre ohne Befeuchtung - nach VDI 6022 nicht ausgeschlossen werden (FGK, 2003; Viessmann Climate Solutions SE, 2021).

Ein "technisch und hygienisch einwandfreier Betrieb" kann durch die einschlägigen Normen und die empfohlenen Wartungsintervalle also offensichtlich nicht sichergestellt werden, siehe allfällige Mängel (TÜV Bericht Mängel bei raumlufttechnischen Anlagen 2021).

Insbesondere bei hybriden Lösungen sind die hygienischen Anforderungen dieses Papiers, soweit sie definiert sind, wegen der Nutzerabhängigkeit prinzipbedingt im Allgemeinen nicht erfüllbar.

Hier bleibt nachzuweisen, wie die Innenraumlufthygiene durch hybriden Anlagenbetrieb nach Stand der Technik gebauten Anlagen unter wirtschaftlichem Druck in der Schulpraxis ganzjährig garantiert werden kann.

Schallschutz.

Lüftungsanlagen ermöglichen es, Fenster geschlossen zu halten und insbesondere in Gebäuden an Hauptverkehrsstraßen, in Flughafennähe oder bei sonstigen äußeren Lärmquellen einen guten Schutz gegenüber Außenlärm zu erzielen. Andererseits verursachen auch mechanische Lüftungsanlagen auf Grund ihrer Wirkungsweise Geräusche, die in den Aufenthalts- bzw. Unterrichtsräumen begrenzt werden müssen. Messbar sind diese als Schalldruckpegel im Raum. Richtwerte für den Auslegungsschalldruckpegel liegen z. B. für Unterrichts-, Fach-, Mehrzweckräume und Lehrerzimmer bei maximal 35 dB(A), bei Sporthallen bei maximal 40 dB(A). Gegebenenfalls können auch höhere Anforderungen erforderlich werden.

Hier ist wissenschaftlich nachzuweisen, wie der Schallschutz – gegenüber Außenlärm, ein zentrales Argument der Branche - durch hybriden Anlagenbetrieb, Zitat: "Fensterlüftung so oft wie möglich außerhalb der Heizperiode" bzw. bei ganz abgeschalteten Anlagen außerhalb der Heizperiode (Reiß *et al.*, 2017) ganzjährig garantiert werden kann. Auch bei dezentralen Anlagen können die hier genannten Anforderungen meist nur durch drastische Reduktion der Zuluftvolumenströme und damit der Raumluftqualität erreicht werden (WOLF GMBH, 2017).

Bewahrung der Eigenverantwortlichkeit & hoher Komfort für die Nutzer

Zahlreiche Untersuchungen zeigen im Ergebnis immer wieder, dass die Möglichkeit zur persönlichen Einflussnahme auf das Innenraumklima, wie Fenster öffnen oder Temperaturregelung, von entscheidender Bedeutung für das Wohlbefinden und die Zufriedenheit der Nutzer in Aufenthaltsräumen ist. Zentral gesteuerte Lüftungsanlagen ohne diese Einflussmöglichkeiten erhöhen die Anonymität und können zu Unwohlsein führen. Die integrale Betrachtung physiologischer und psychologischer Einflüsse auf die Befindlichkeit des Menschen ist daher wichtig für angenehmes Lernen und Arbeiten in Unterrichtsgebäuden. Dabei sind also nicht nur Qualität und Quantität von Raumklimafaktoren, sondern auch die Interaktion zwischen Nutzer, räumlichen Gegebenheiten und gebäudetechnischer Ausstattung von Bedeutung.

Die detaillierte Auswertung der Messergebnisse an real ausgeführten Anlagen zeigt, dass die Unzufriedenheit und Frustration der Nutzer durchaus durch nachgewiesene Fehlauslegungen, insbesondere zentrale Temperaturregelung, fehlerhafte oder nicht vorhandene Zonierung, fehlerhafte Parametrierungen, mangelhafte Sorgfalt bei Abnahme und Inbetriebnahme und vor allen Dingen teilweise jahrelange Reaktionszeiten der betreuenden Planer und Fachfirmen ausgelöst worden sein könnten (Peper *et al.*, 2007; Jagnow and Gebhardt, 2017; Reiß *et al.*, 2017).

Den Nutzern angesichts der durch Branchenvertreter und das Fraunhofer IBP theoretisch und messtechnisch eindeutig festgestellten Planungs-, Ausführungs-, Parametrierungs- und Wartungsmängel hier mehr oder minder direkt Befindlichkeiten zu unterstellen, ist äußerst bemerkenswert und dürfte dem Vertrauen in die Branche und den AK Lüftung nicht unbedingt förderlich sein.

Es empfiehlt sich, die vorliegenden Studienergebnisse neutral zu bewerten.

Die verschiedenen Nutzergruppen in Bildungseinrichtungen sollen die Möglichkeit erhalten, aktiv Einfluss nehmen zu können. Hierbei kommen hybride Lüftungskonzepte dem Bedürfnis nach eigenständigem Handeln und Wohlbefinden am besten entgegen. Dabei wird die Grundlüftung über eine mechanische Lüftungsanlage durchgeführt; zusätzlich kann über Fensterlüftung eine individuelle Zusatzlüftung geschehen. Beides zusammen sorgt für eine angemessene Innenraumluftqualität und vom Nutzer akzeptierte Lüftungsform. Damit solche Konzepte in der Praxis funktionieren, müssen Lehrkräfte und Schüler in die entsprechenden Lüftungsintervalle und -zeiten eingewiesen werden. Eine sensorgesteuerte CO2-Ampel, die es bereits preiswert gibt, zeigt an, wann die CO2-Konzentrationen in einen kritischen Bereich kommen, und unterstützt das eigenverantwortliche Handeln der Nutzenden.

Diese Aussagen sollten durch Referenzen oder Rechnungen nachgewiesen werden; dieser Absatz ist im Lichte der oben definierten Anforderungen und der unten gegebenen Anforderungen an die Grundlüftung von 25m³(h P) nicht nachvollziehbar.

Eine Grund-(Dauer-) Lüftung mit 25m³/(h P) und 8m³/P im Normszenario 200m³ / 25 P (Persily 2017, altersgemittelt) führt zwanglos zur Einhaltung eines Mittelwertes von 1000pm und zu einem Maximalwert während der Unterrichtseinheit von ca. 1100ppm.

Bei entsprechend ausgelegter und betriebener RLT kann der oben gegebene Grenzwert von 1500ppm CO₂ also gar nicht überschritten werden, der "kritische Bereich" ist nicht erreichbar, ein Bedarf an individueller Zusatzlüftung existiert bei normalen Erwartungen nach DIN EN 16798 nicht. Kein Nutzer braucht bei diesen Vorgaben ein hybrides Lüftungskonzept, eine Einweisung in individuelle Zusatzlüftung ist also nicht erforderlich.

Warum sollte ein Lehrer oder Schüler ohne Not eine Lüftungsampel beobachten oder eine Menge von Fenstern bewegen, wenn die Lüftungsanlage die Raumtemperatur behaglich regelt und die hygienisch erforderliche Luftmenge zuführt?

Hybride Lüftungskonzepte werden folglich sicher nicht von Nutzern, sondern eher von Betreibern aus offensichtlichen wirtschaftlichen Gründen favorisiert.

Warum dieser Punkt nicht in aller Klarheit angesprochen wird, und stattdessen dem komfortgewohnten Nutzer, der auch nicht gerne ständig an Heizkörperthermostaten herumdreht, ein "Bedürfnis nach eigenständigem Handeln" ausgerechnet beim laut Branchenaussagen unkomfortablen Fensterlüften (Lärm, Zugluft, Kälte, Luftverschmutzung) unterstellt wird, ist nicht nachvollziehbar.

Eine mögliche Erklärung für den in der Praxis oft beobachteten Nutzerwunsch nach manuellem Eingreifen ist vermutlich weniger eine zu hohe CO₂ Konzentration – für die der Mensch keinen Sensor hat - sondern eher zu hohe Raumtemperaturen, die bei zentralen RLT/WRG Anlagen fast zwangsläufig bei direkter Sonneneinstrahlung und/oder Außentemperaturen von oberhalb 12°C auftreten.

Planungsparameter

Generell soll bei allen Neubau- und Sanierungsprojekten, aber auch für bestehende Schulgebäude ohne anstehende Sanierungen immer ein Lüftungskonzept (vgl. Infobox 1) für alle Lüftungsarten, für den Winter und Sommer getrennt, erarbeitet werden.

Diese Anforderung ist durch normgerechte Fenster- bzw. Anlagenplanung im modernen Schulbau automatisch gegeben. Eine Trennung Sommer-Winter ist nicht nachvollziehbar, s.o.

Die Anforderung, einen ausreichenden Luftwechsel zu gewährleisten, ist dabei Grundvoraussetzung, um hygienische Innenraumluftverhältnisse erreichen zu können. Lüftungsanlagen müssen so ausgeführt und betrieben werden, dass die relative Feuchte der Innenraumluft bei kaltem und trockenem Außenklima im Winter nicht zu niedrig wird (vgl. Zielvorgaben). Trockene Innenraumluft wird oft mit Lüftungstechnik in Verbindung gebracht, ist jedoch kein anlagenspezifisches Problem, sondern tritt ebenso auf, wenn durch intensive Fensterlüftung ein ausreichend hoher Luftwechsel erreicht werden soll.

Hybride Lüftung kann diese Anforderung prinzipbedingt nicht einhalten, da nur ein Teil der Zuluft durch die Anlage eingebracht wird.

Die Ausführungen stehen im Widerspruch zu der in diesem Papier zitierten WABOLU Studie, die eindeutig nachweist, dass RLT in der Praxis zu trockenerer Raumluft führt als Fensterlüften, vermutlich durch WRG-bedingte höhere Raumtemperaturen (Anlauft and Schwede, 2018).

Trockene Raumluft wird durch Mischlüftung befördert (Zeidler, Kriegel and Fitzner, 1999).

Nach BAUA ASR und DGUV Papieren gibt es in Deutschland praktisch unabhängig von den Lüftungsraten höchstens an einzelnen Tagen des Jahres Unterschreitungen des Komfortbereichs von 20% r.F. (BAUA ASR A3.6, 2012; DGUV, 2016)

RLT mit typischen Luftvolumenströmen von unter 20m³/(h P) ist in diesem Punkt ohne weiteres unauffällig (Peper et al., 2007; Jagnow and Gebhardt, 2017).

Vor anlagentechnischen Auslegungen und Berechnungen sind bauliche und organisatorische Möglichkeiten (z. B. Raumvolumen, Fensterdimensionierung, Klassenstärke) zu prüfen. So sollten beim Einsatz einer mechanischen Lüftungsanlage alle Aufenthaltsbereiche (ausgenommen innen liegende Räume) über zu öffnende Fenster verfügen, um die Möglichkeit der Fensterlüftung weitgehend auszunutzen und um beim Ausfall der Anlage (gilt auch bei kombinierten Lüftungskonzepten) hygienisch annähernd zuträgliche Innenraumluftverhältnisse gewährleisten zu können. Außerhalb der Heizperiode sollte Fensterlüftung so oft wie möglich genutzt werden.

Hier sollte durch Referenzen oder Rechnungen nachgewiesen werden, warum gerade außerhalb der Heizperiode, wo Stoß- und Kipplüften mit steigenden Temperaturen weniger

wirksam wird, diese genutzt werden soll (Fitzner, 2008; von Grabe, Svoboda and Bäumler, 2014; Erhart et al., 2015; Knaus et al., 2019; Ostmann et al., 2022).

Es sind wissenschaftliche Kriterien für das Attribut "so oft wie möglich" anzugeben.

Neubau und Sanierung

Bereits im Vorentwurfsstadium eines Neubaus oder einer Schulsanierung muss eine integrale Planung mit den beteiligten Fachingenieuren und Nutzern durchgeführt werden. Innenraumlufthygiene, Emissionsverhalten der Baustoffe, Brandschutz, Schallschutz sowie funktionale Anforderungen müssen miteinander und zueinander optimiert werden. Sowohl beim Neubau als auch bei umfänglichen Sanierungen ist grundsätzlich der Einbau von lüftungstechnischen Systemen mit Wärme- und Feuchterückgewinnung zu fordern.

Diese Forderung ist mit Referenzen und Rechnungen zu belegen.

Nicht nur die Rechnungen von Branchenvertretern zeigen, dass nach dem Stand der Technik projektierte Systeme noch nicht einmal bei wesentlich höheren Luftvolumenströmen als 25m³/(h P) wirtschaftlich sind (Kremer, Rewitz and Müller, 2021; Kaup, 2022).

Allein das Wirtschaftlichkeitsgebot verbietet also nach dem Stand der Technik bzw. Branchenwissenschaft den Einbau in Schulgebäuden, wenn nicht besondere Umgebungsbedingungen dies rechtfertigen.

Hybride Konzepte sind in diesem Bereich noch weitaus nutzloser, weil WRG, FRG, Filter, Schalldämpfer und Brandschutzklappen umgangen werden müssen, um eine akzeptable Raumluftqualität zu erreichen (Reiß et al., 2017; Knaus et al., 2019).

Als gesundheitlich-hygienische Anforderung für die planerische Auslegung gilt eine CO_2 -Konzentration der Innenraumluft als arithmetischer Mittelwert von 1.000 ppm über die Dauer einer Nutzungseinheit (siehe Zielvorgaben). Die CO_2 -Momentanwerte können dabei, wie Erfahrungswerte und Rechenmodelle zeigen, bis auf etwa 1.500 ppm steigen. Kurzzeitige CO_2 -Spitzen sind weder ein Planungsfehler noch hygienisch ein Risiko, solange der CO_2 -Mittelwert über die Unterrichtsstunde eingehalten wird.

Hier sind Referenzen oder Rechnungen vorzulegen, die Aussage ist physikalisch unhaltbar. Ein Erreichen der 1500ppm ist bei einer in Dauerlüftung betriebenen Anlage, die einen Mittelwert von 1000ppm einhält, weder rechnerisch noch in der Praxis möglich.

Tatsächlich wird dieser Wert in der Praxis durch typische RLT Installationen aber durchaus häufig überschritten.

Planungsgrößen ausgeführter Anlagen belegen durchweg, dass es sich dabei eher nicht um Planungsfehler, sondern um geplante Unterdimensionierung handelt (Reiß et al., 2017).

Die zentrale Planungsaufgabe besteht darin, die Lüftungsanlage mit ihren Komponenten bedarfsgerecht und möglichst wirtschaftlich zu dimensionieren. Neben dem Außenluftvolumenstrom haben auch das Lüftungssystem, die Lufteinbringung und -absaugung (z. B. Misch- oder Quellluft), die Art der Luftauslässe, die Größe des

Lüftungskanalnetzes und des Lüftungsgerätes sowie die Mess- und Regelungstechnik Einfluss auf das Ergebnis der Luftqualität und auch auf die Investitions- und Betriebskosten.

Hier ist insbesondere der enorme Effekt der Quelllüftung hervorzuheben, die zu erheblichen Luftqualitätsverbesserungen bei moderaten Luftvolumenströmen sorgt (Skistad *et al.*, 2004; Rietschel and Fitzner, 2008; Anlauft and Schwede, 2018; Schaub *et al.*, 2021; Ostmann *et al.*, 2022).

In Ergänzung zur üblichen Pausenlüftung wird als Richtwert für die Auslegung von zentralen und dezentralen Lüftungsanlagen eine Geräteauslegung auf einen Außenvolumenstrom von etwa 25 m³/h pro Person empfohlen. Das Ziel des Erreichens der 1000 ppm CO2 im Mittel über die Unterrichtseinheit ist bei der rechnerischen Auslegung jedoch unbedingt zu beachten. Dies ist als mittlere Berechnungsgröße anzusehen, die im Einzelfall und bei besonderen Situationen (siehe unten) nach oben und unten entsprechend variieren kann.

Diese Zielgröße wird bei $25m^3/(h\ P)$ im mittleren Altersbereich der Schüler (13J) immer erreicht (17 ICO₂/(h P) (Persily, 2017).

Pausenlüftung erhöht den Energieverbrauch signifikant, führt zu Lärm und Feinstaubeintrag und bringt kaum hygienische Vorteile, weil die Lüftung dann gebraucht wird, wenn die Nutzer anwesend sind.

Abweichungen können sich u. a. durch das Alter und die Aktivitäten der Raumnutzer, aufgrund örtlicher Bedingungen (z. B. Verkehr, Lärm) sowie durch besondere Nutzungsarten (z. B. Kindertagesstätten) ergeben. In Kitas wird man in der Regel mit niedrigeren Außenluftvolumenströmen auskommen, während man z. B. für Räume von Oberstufen und für Erwachsene oder falls eine Pausenlüftung aufgrund von Umgebungsbedingungen nicht möglich sein sollte, höhere Außenluftvolumenströme benötigt.

So wie eine Unterdimensionierung des Außenluftvolumenstromes aus hygienischgesundheitlicher Sicht zu vermeiden ist, ist eine Überdimensionierung schon aus Gründen erhöhter Investitions- und Betriebskosten zu vermeiden (vgl. Infobox 2). Praktische Beispiele zeigen, dass durch optimierte Planung des Lüftungskonzepts der CO₂-Zielwertkorridor unter Vermeidung einer Überdimensionierung der Lüftungsanlagen auch mit geringerem Außenluftvolumenstrom eingehalten werden kann. Das Erreichen der Zielvorgaben ist planerisch und rechnerisch in jedem Einzelfall zu belegen (vgl. auch Berechnungsbeispiele in Infobox 6).

Diese Aussagen sind durch Rechnungen oder Referenzen nachzuweisen. Während die Investitionskosten für Lüftungskomponenten laut VDI Wärmeatlas mit einem Exponenten von nur ca. 0.7 mit dem Nennluftvolumenstrom steigen, steigt der Energieverbrauch mit einem Exponenten zwischen 1.3 und 3 (Wolf, Trox, Viessmann). Daher kann eine leichte Überdimensionierung der Anlage zu erheblichen Energieeinsparungen während des Betriebs führen, während eine Unterdimensionierung zu deutlichen Energieverlusten führt.

Eine leicht überdimensionierte Anlage wäre also nicht nur erheblich nachhaltiger, sondern hätte auch Reserven für Pandemien o. ä und wäre bei höheren Außentemperaturen in der Lage, effizient überschüssige Wärme aus dem Raum zu entfernen.

Eine überschlägige Analyse des europäischen Marktes für Lüftungskomponenten hat ergeben, dass Lüftungskomponenten im Mittel ca. 3-mal preiswerter und entsprechend weniger graue Energie enthalten als in Deutschland (EU 1253/2014 Review, 2020).

Damit ergeben sich ganz andere Life Cycle Costs Assessments und Optimierungsansätze.

Zur Vermeidung einer Überdimensionierung von Lüftungsanlagen sind z. B. folgende Aspekte von Bedeutung:

Hier sollte durch Referenzen oder durch Rechnung nachgewiesen werden, warum eine Überdimensionierung ein Problem darstellt, ausführliche Gegenreferenzen s.o.

• durch großzügige Lüftungsquerschnitte der Fenster kann der Pausenlüftungs-Anteil erhöht werden, dazu gehört eine wirksame und sichere Anordnung der zu öffnenden Fensterflächen, im Idealfall mit Querlüftung.

Diese Aussage ist durch Referenzen und Rechnungen nachzuweisen. Sinnvoller erscheint eine Fensterfront, die effizientes Dauerlüften ermöglicht.

• größere Raumhöhe bzw. größeres Raumvolumen von z. B. über 7,5 m³ pro Person können helfen, die Lüftungssituation zu verbessern, indem der Zeitpunkt der Lüftungsnotwendigkeit dadurch um einige Minuten nach hinten verschoben werden kann.

Diese Aussage ist durch Referenzen oder Rechnungen nachzuweisen. Warum sollte die Situation in einem Dauerlüftungssystem, das im Wesentlichen durch den steady state und nicht durch Transienten bestimmt wird, durch ein Überschreiten der "Grenze" von 7.5m³/P verbessert werden? Typische Werte liegen bereits bei über 8m³/P.

• realistische Annahmen zu Raumbelegungen und Berücksichtigung der Gleichzeitigkeitsfaktoren (Reduzierung der rechnerischen Gesamtluftmenge aufgrund der nicht gleichzeitig möglichen Belegung aller belüfteten Räume mit maximaler Belegungsstärke). Der Ansatz der Gleichzeitigkeit ist auch abhängig von der Art der raumweisen Luftmengenregelung.

Ist keine bedarfsgesteuerte Volumenstromregelung implementiert, muss die Anlage für Maximalbelegung jedes einzelnen Raums einer Zone, ansonsten lediglich für die Maximalbelegung der Zone ausgelegt sein, um die Kernbotschaften zu erfüllen.

• Berücksichtigung der CO₂-Abgabe in Abhängigkeit vom Alter der Nutzer

Dies wird durch ein bedarfsgeführtes Konzept nach Kernbotschaft automatisch erzielt, widerspricht aber der Forderung nach pauschal 25m³/(h P). Auch hier kommt es bei strenger Auslegung eher zu einer Unterdimensionierung der Anlage, da die CO₂-Abgabe von Personen durch körperliche Aktivität schnell steigen kann.

• Berechnungsnachweis der Außenluftvolumenströme und der zu erwartenden CO₂-Belastung inkl. Beitrag der Fensterlüftung (vgl. Infoboxen 1 und 4 [weiter unten]).

Hier ist der Zusammenhang zu einer möglichen Überdimensionierung nicht klar.

Eine erhöhte Auslegung kann erforderlich sein bei folgenden Aspekten:

- keine Möglichkeit zur Hybridlüftung über Fenster (z. B. an lärmbelasteten Standorten)
- eingeschränkte Lüftungsquerschnitte der Fenster
- höhere CO₂-Abgabe bei erwachsenen Schülern und erhöhter Aktivität.

Bei 20l CO₂/(h P) - erwachsener Schüler - ergibt sich ein zeitlicher Mittelwert von 1100ppm, also nur unwesentlich über dem Leitwert und weit unter dem Grenzwert.

Oberstufenklassen im Kurssystem sind typischerweise kleiner, bei definierten Maximalvolumenströmen werden die Vorgaben hier also typischerweise ebenfalls erreicht.

Selbstverständlich sind in Turnhallen höhere Luftvolumenströme gefordert.

Dezentrale Lüftungsanlagen sollten so ausgelegt werden, dass sie aus Gründen des Schallschutzes und der Energieeffizienz bei 80 % ihrer Nennleistung betrieben werden.

Diese Forderung steht im Widerspruch zu der ausführlichen Diskussion zur Vermeidung von Überdimensionierung der Anlagen (s.o.) aus wirtschaftlichen Gründen, da ihre Umsetzung zu einer 20%igen Überdimensionierung führen würde. Es sollte klare Vorgaben gemacht werden, wie die verschiedenen Auswahlkriterien zu gewichten sind.

Bei zentralen Lüftungssystemen ist das Thema der Gleichzeitigkeitsfaktoren (siehe oben) und der Annahmen zur Personenbelegung von zentraler Bedeutung.

Dieser Punkt ist durch Referenz oder Rechnung nachzuweisen, er ist nicht nachvollziehbar.

Die Eigenschaft "zentral" eines Lüftungssystems sagt per se nichts über die Möglichkeit raumweiser Volumenstromregelung aus, die auch in allen uns bekannten Neubau oder totalsanierten Schulen realisiert ist.

Da die Nennzuluftvolumenströme pro Klassenraum aber durch die geforderte Luftqualität bei Maximalbelegung definiert sind, muss das gesamte Leitungsnetz für diesen Fall entsprechend ausgelegt werden.

Die zentrale Anlage selbst wird selbstverständlich für die Maximalbelegung des versorgten Gebäudeteils ausgelegt, womit dem Gleichzeitigkeits-"Problem" automatisch Rechnung getragen wird - die Luft wird also bedarfsgerecht entweder in die Fachräume oder in die Klassenräume der Zone geleitet.

Es ist Aufgabe der qualifizierten und verantwortlichen Planer, mittels realistischer Festlegung der Planungsparameter und ausgewogener Berücksichtigung der zahlreichen Planungsaspekte eine möglichst wirtschaftliche Anlage zu planen. Dazu

ist eine intensive Abstimmung mit den Bauherren und späteren Nutzern inkl. der Lehrer erforderlich. Auch den Nutzern sollte ein Wissen um die sinnvoll abgewogenen Grenzen des Lüftungssystems vermittelt werden, um die spätere Akzeptanz und eine bedarfsgerechte Nutzung (unter Einbeziehung der Nutzer) zu erhöhen. Bereits in der Planungsphase sollte auch die Betreuung der technischen Anlagen nach der Fertigstellung und in der Nutzungsphase sowie die Erfolgskontrolle des Lüftungskonzeptes unter Praxisbedingungen geregelt werden. Für die Nutzer ist eine Einweisung in das Lüftungskonzept (vgl. Infobox 1) mit entsprechenden Handlungsempfehlungen zu erstellen.

Der gesamte Abschnitt ist nicht nachvollziehbar. In Infobox 2 wurde ausgeführt, dass "ein hohes interdisziplinäres Fachwissen nötig ist, um Lüftungskonzepte fachgerecht zu realisieren.

Lehrer sind keine Lüftungsexperten, können also keinen Beitrag zur fachgerechten Planung eines Konzeptes leisten.

Eine Erfolgskontrolle kann in der Praxis insbesondere bei hybrider Lüftung nur durch CO₂ Geräte in jedem Klassenraum erreicht werden.

Wenn die Anlagen allerdings nach den Kernbotschaften 1 und 4 konzipiert sind, erübrigt sich eine Erfolgskontrolle. Es gibt keinen Handlungsbedarf durch den Nutzer, Einweisungen in das Lüftungskonzept sind obsolet.

Die Lüftungsregelung soll möglichst einfach und bedarfsgerecht sein. Bei Einzelgeräten (dezentrale Geräte) können Zeit-, Präsenz- oder auch CO₂-Regelungen realisiert werden. Das Gleiche gilt für zentrale Anlagen, bei denen die Funktionalität sowie der Aufwand für Investitions- und Betriebskosten dieser Regelparameter in der Planung unbedingt berücksichtigt werden müssen.

"Einfach und bedarfsgerecht" scheint in der Praxis ein Widerspruch in sich zu sein (Reiß et al., 2017). In der "Zusammenfassung der wesentlichen Aspekte" wird ausgeführt, dass "kognitive Leistungsfähigkeit, Wohlbefinden der Nutzer und gesundheitliche Unbedenklichkeit nicht aus Kostengründen gefährdet werden dürfen". Da CO₂ Monitoring und -Regelung offensichtlich die einzige Garantie für die Kernbotschaft 1 bei gleichzeitig optimaler Bedarfsführung und minimalem Energieverbrauch ist, sollte diese Funktionalität eigentlich selbstverständlich sein.

Lüftungsanlagen sollten zusätzlich zur Wärme- auch mit Feuchterückgewinnung geplant werden, um zu niedrige Luftfeuchte in der kalten Jahreszeit zu vermeiden.

Gegenreferenzen s. o.

Der Einsatz von Luftfiltern ist bei mechanischen Lüftungsanlagen zwingend erforderlich und richtet sich bzgl. der Qualität nach den Anforderungen im Innenraum und den Außenluftbedingungen, es sind die Mindestvorgaben der entsprechenden Lüftungsnormen zu beachten. Die Einhaltung von Austausch-

/Wartungszyklen für die Luftfilter beeinflusst maßgeblich die Zuluft- und auch die Innenraumluftqualität.

Dieser Punkt ist durch Referenzen oder Rechnung nachzuweisen.

Das Rückhaltevermögen insbesondere für den besonders lungengängigen Ultrafeinstaub steigt naturgemäß mit der Filterbelegung an (Poren setzen sich zu, Diffusionsverluste nehmen zu). Aus Sicht der Aerosolbelastung der Zuluft und damit einem wichtigen Teil der Raumluftqualität ist also ein seltener Filterwechsel oder die Nutzung gebrauchter Filter sinnvoll.

Andererseits steigt durch belegte Filter der Energieverbrauch der Anlagen erheblich, es geht also um die Abwägung Raumluftqualität – Wirtschaftlichkeit.

Da die Anlagen weder wirtschaftlich noch nachhaltig sind (Kremer, Rewitz and Müller, 2021; Kaup, 2022), sollte man der Raumluftqualität Priorität einräumen, weil nach Aussage des vorliegenden Dokuments "kognitive Leistungsfähigkeit, Wohlbefinden der Nutzer und gesundheitliche Unbedenklichkeit nicht aus Kostengründen gefährdet werden dürfen" (s.u.).

Noch sinnvoller erscheint natürlich eine auf den Schulbetrieb optimierte Anlagenauslegung.

Eine optimierte Wärmerückgewinnung, eine Bedarfsregelung und eine geringe spezifische Ventilatorleistung der Anlagentechnik senken den Wärme- und Stromverbrauch und wirken sich damit positiv auf die Gesamtenergiekosten im Betrieb aus. Bei Gebäudesanierungen gilt: Fenstertausch inkl. Einbau von z. B. motorisch zu öffnenden Fensterflügeln stellt meist keine gering investive Maßnahme dar. Zudem muss solch ein Austausch unbedingt im Rahmen eines baulichen Gesamtkonzepts durchgeführt werden, welches Dämmmaßnahmen in der Fassade in die Überlegungen einbezieht. Dies gilt vor allem dann, wenn die bestehenden Außenwände eine relativ schlechte Dämmwirkung haben und zu befürchten ist, dass mit dem Einbau neuer Fenster die Gefahr der Tauwasserbildung auf den Wandflächen bzw. in Wandecken oder Laibungen mit Folge von Schimmelbildung entsteht.

Es ist anzunehmen, dass diese seit Jahrzehnten bekannten pauschalen Zusammenhänge bei moderner Sanierungsplanung nach einschlägigen Normen durch Fachleute berücksichtigt werden.

Aus Kostengründen ist es oftmals naheliegender, dann dezentrale Lüftungsanlagen einzubauen. Ihr Vorteil liegt darin, dass sie auch sukzessive raumweise eingebaut werden können. Im Zuge der energetischen Sanierung können später auch die Fenster erneuert und die Wärmedämmung verbessert werden.

Diese Ausführungen sind durch Referenzen oder Rechnungen nachzuweisen.

Die Kosten für eine Fassadensanierung belaufen sich auf typisch 200€/m² für Wandflächen und ca. 600€/m² für die Fensterflächen.(Altbausanierung » Kosten-Tabellen, Preisbeispiele und mehr, 2019)

Daraus ergeben sich Gesamtkosten ohne Gerüst von ca. 8000€ pro Klassenraum für eine Lebensdauer von typisch 30 Jahren, mit anteiligen Gerüstkosten also eine Annuität von höchstens ca. 500€/a.

Die Kosten für eine dezentrale RLT inklusive Einbau liegt laut Infobox 2 bei ca. 13.000€ mit einer Lebensdauer von 15 Jahren, also einer Annuität von ca. 870€.

Die Energieeinsparung durch Fassadensanierung eines Altbaus (100 kWh/(m² a)) liegt bei bis zu 80%, die der Ausrüstung mit Raumlufttechnik bei rechnerisch maximal 8%, in der Praxis eher bei 0% (EU 1253/2014, 2014; Reiß *et al.*, 2017).

Offensichtlich sind nicht nur aus Kostengründen, sondern auch besonders für den Klimaschutz und zur Ressourcenschonung energetische Sanierungen mit hoher Priorität durchzuführen. Nach der energetischen Sanierung ist eine Ausrüstung mit RLT in der Praxis völlig obsolet, da das Potential bei Anlagen nach Stand der Technik nur noch teilweise genutzt werden kann – Temperaturregelung vorausgesetzt (Helleis and Klimach, 2021; *AHULife*, 2021).

Empfehlungen für Kindertagesstätten

Der Begriff Kindertagesstätten (Kitas) umfasst in der Regel Kinderkrippen (0–3 Jahre), Kindertagesstätten (2–7 Jahre), Kinderhorte (6–10/12 Jahre) sowie auch Kinder- und Jugendhäuser (etwa 7–17 Jahre).

Auch für Kitas gelten die beschriebenen Anforderungen an eine gute Innenraumluftqualität. Bei Neubau- oder umfassenden Sanierungsmaßnahmen gelten die gleichen Ziele für die CO2-Konzentration, die relative Luftfeuchte, die Zugluftfreiheit sowie den Schalldruckpegel und die zu öffnenden Fensterflächen, analog zu Schulgebäuden und Universitäten. Aufgrund der anderen Nutzungsstruktur und Randbedingungen gegenüber klassischen Schulgebäuden, den meist offenen Raumnutzungen, den meist jüngeren Kindern, dem starken Innen-Außen-Bezug, den häufig schwankenden Raumbelegungen bei meist offenen Türen und der generell individuelleren Betreuung, stellt sich die CO2-Problematik nicht in der Brisanz wie bei klassischen Schulgebäuden. Begründete Abweichungen zu den beschriebenen Auslegungsaußenluftvolumenströmen sind möglich und die dargestellten Randbedingungen zu beachten. Dezentrale Lüftungsgeräte für die Hauptaufenthaltsbereiche können beispielsweise mit einfachen Zeitsteuerungen betrieben und bei Bedarf im Sommer zur wirksamen Nachtabkühlung verwendet werden.

Bestandsgebäude

Stehen in Bestandsgebäuden keine oder keine sofortigen Investitionsmittel für eine mechanisch betriebene Lüftung zur Verfügung, muss zunächst weiterhin ein Luftaustausch mittels Fensterlüftung erfolgen. Dieser soll dann gezielt und sachgerecht erfolgen, um eine größtmögliche Annäherung an die

Luftqualitätsvorgaben für CO₂ zu erreichen (vgl. Infobox 4). Grundlage dafür ist eine fundierte Information, wann eine Fensterlüftung erfolgen muss (vgl. Infoboxen 4 und 5). Dies sollte durch eine gezielte Aufklärung erfolgen; auch Lüftungsampeln können hilfreiche Informationen liefern. In der wärmeren Jahreszeit können Fenster dauerhaft geöffnet werden. Ausnahmen gelten z. B bei erforderlichem Lärmschutz oder in Zeiten sehr hoher Immission von Abgasen und Stäuben, die von außen in die Unterrichtsräume gelangen. Bei niedrigen Außentemperaturen können dauerhaft geöffnete Fenster keine Lösung sein, weil für die Schülerinnen und Schüler eine thermische Unbehaglichkeit durch einströmende Kaltluft entsteht.

Die Ausführungen sind durch Referenzen oder Rechnungen nachzuweisen, die Ausführungen sind insbesondere bei Betrachtung von hybriden Lüftungskonzepten nicht nachvollziehbar.

Uns ist keine Referenz bekannt, die das Lüften von Bestandsgebäuden ohne RLT wegen Außenlärm oder belasteter Außenluft zurückstellt.

Der Energieverlust durch Austausch einer bestimmten Luftmenge pro Zeiteinheit mit Raumlufttemperatur ist in erster Näherung unabhängig davon, ob dauer- oder stoßgelüftet wird (Fitzner and Finke, 2012). Aufgrund des hohen Luftbedarfs sind dauerhaft geöffnete Fenster in Klassenräumen die einzige Möglichkeit, mit den gegebenen Fensterflächen die ASR A3.6 auch bei höheren Außentemperaturen einzuhalten (BAUA ASR A3.6, 2012). Ein CO₂ Monitor zeigt in Echtzeit, wie viele Fenster tatsächlich gekippt werden müssen, um die 1000ppm im Mittel oder maximal zu erzielen.

Im Gegensatz zum Stoßlüften besteht der große Vorteil der Dauerlüftung darin, dass bei Anwesenheit gelüftet wird, also genau dann, wenn Frischluft gebraucht wird.

Auch bei hybrider Lüftung müssen zum Erreichen des Mittelwertes von 1000ppm erhebliche Lüftungsanstrengungen im Winter erfolgen, nach typischen Auslegungen (Knaus *et al.*, 2019) müsste 30-50% Kaltluft an Filtern, Wärmetauschern und Schalldämpfern vorbei in den Klassenraum strömen.

In den kleinen Pausen bleiben die Schüler typisch im Raum, sind also ebenfalls kalter Zugluft ausgesetzt. In großen Pausen verlassen sie entweder den Raum und halten sich in kältestmöglicher Außenluft auf, oder sie bleiben im Raum und sind ebenfalls dem Kaltlufteinfall ausgesetzt. Ein negativer Nebeneffekt ist, dass während großer Pausen und Freistunden bei weit geöffneten Fenstern der Raum auskühlt, weil niemand da ist, der die Fenster nach 5 min wieder schließen würde.

Das Problem kann bei Dauerlüftung einfach vermieden werden, indem nur bei Anwesenheit gelüftet wird.

Die "fundierte Information, wann eine Fensterlüftung erfolgen muss", ist naturgemäß sowohl bei Fensterlüftung als auch bei hybrider Lüftung nötig, wenn die durch unterdimensionierte RLT bereitgestellten Volumenströme hygienisch nicht ausreichen (Knaus *et al.*, 2019).

Die einzige Möglichkeit, diese "fundierte Information" verlässlich zur Verfügung zu stellen, ist die Messung der CO₂ Konzentration im Klassenraum. Die dazu in diesem Abschnitt gemachten Aussagen sollten auf Selbstkonsistenz überprüft werden.

Die einzige Möglichkeit besteht dann im Stoßlüften in den Pausen und während des Unterrichts. Mithilfe der Lüftungsampel zeigt sich sehr schnell, wie oft und wie lange gelüftet werden muss. In Abhängigkeit von Klassenstärke (die sich in der Praxis kaum reduzieren lässt, um bereits darüber eine Verbesserung der CO2-Bilanzen zu erreichen), Raumgröße (ebenfalls nicht veränderbar), Witterung sowie Gestaltung der Fensteröffnungen werden zusätzlich zur Pausenlüftung mehrere Lüftungsvorgänge innerhalb einer Unterrichtsstunde nötig sein. Erfahrungsgemäß ist dies in der Praxis schwer umsetzbar, weil die Akzeptanz dafür fehlt oder weil man es schlichtweg vergisst. Diese Aufgabe muss daher in gemeinsamer Verantwortung und mit klar geregelter Zuständigkeit vom Lehrkörper mit Hilfe der Schülerinnen und Schüler übernommen werden.

Warum gerade Dauerlüften, das einzige Lüftungskonzept, das nach allen Studien und Vorgaben die einzige Option zum Erreichen arbeitsschutzgerechter Lüftung ist, konsequent ausgeblendet wird, ist wissenschaftlich nicht nachvollziehbar.

Verordnungen und Normen

Gegenwärtig existieren verschiedenartige Richtlinien, Verordnungen, technische Normen- und Regelungswerke zum Thema Lüftung bzw. Raumlufttechnik. Wesentliche, auch für Bildungseinrichtungen relevante Planungsgrundlagen sind u. a.:

Technische Regel für Arbeitsstätten – Lüftung – ASR A3.6 (in der jeweils gültigen Fassung).

Technische Regeln für Arbeitsstätten (ASR) geben den Stand der Technik, Arbeitsmedizin und Arbeitshygiene sowie sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse für das Einrichten und Betreiben von Arbeitsstätten wieder. Die ASR A3.6 konkretisiert die Anforderungen der Verordnung über Arbeitsstätten an die Lüftung.

Die ASR A3.6 werden hier zwar zitiert, aber nicht zur Grundlage der Kernbotschaften gemacht. Die Gründe bleiben wissenschaftlich zu erklären.

Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende
Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV) vom 24. Juli 2007
(BGBl. I S. 1519), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 24. Oktober 2015
(BGBl. I S. 1789) geändert worden ist: Zweck der Verordnung ist die Einsparung von Energie in Gebäuden. Es sind u. a. Forderungen nach luftdichten Gebäudehüllen bei Sicherstellung der zum Zwecke der Gesundheit und Beheizung erforderlichen
Mindestluftwechsel sowie nach energieeffizienten Lüftungsanlagen enthalten. Es gilt die jeweils aktuelle Fassung.

Die Realität der umgesetzten Projekte zeigt, warum immer weiter verschärfte Verordnungen zur Effizienz von Lüftungsanlagen erlassen werden – es ist noch ein sehr weiter Weg und viel unabhängige wissenschaftliche Forschung nötig, bis die Branche in der Lage ist, bedarfsgerechte und energieeffiziente Konzepte für Schulen anbieten zu können (Reiß *et al.*, 2017).

DIN EN 13779-2007 – Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme: Diese Europäische Norm gilt für die Planung und Ausführung von Lüftungs- und Klimaanlagen in Nichtwohngebäuden, die für den Aufenthalt von Menschen bestimmt sind. Hier ist eine Kategorisierung von Luftqualitätsklassen enthalten, die von IDA 1 bis IDA 4 (IDA 1: hohe / IDA 2: mittlere / IDA 3: mäßige / IDA 4: niedrige Raumluftqualität) reichen und zu Planungsbeginn mit dem Nutzer/Bauherr als Zielwerte zu vereinbaren sind. Die Klassifizierung sollte stets dem Typ und der vorgesehenen Nutzung des Gebäudes entsprechen. Im Wesentlichen wird dabei als zentraler Einflussfaktor auf die Raumluftqualität die Abhängigkeit von der gewünschten CO2-Raumluftkonzentration mit einer Auslegung des zu realisierenden Luftwechsels durch die Anlagentechnik festgelegt.

Die DIN EN 13779 ist unter anderem wegen nicht korrekter Berechnung von CO₂ Konzentrationen (Knaus *et al.*, 2019) zurückgezogen und durch die DIN EN 16798 ersetzt.

Die Luftqualitätsklassen existieren nicht mehr, vermutlich, weil sie aus prinzipiellen Gründen kein juristisch abgesicherter Vertragsgegenstand sein können. Die ursprüngliche Auffassung der Branche, durch Definition der Zuluftqualität die Raumluftqualität bestimmen zu können, musste der physikalischen Realität weichen.

Die derzeit gültige DIN EN 16798 definiert nur noch Außenluftvolumenströme und "Erwartungen an das Raumklima".

DIN EN 15251-2012 – Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden. Diese Norm gilt in erster Linie für nicht industrielle Gebäude (auch Schulgebäude), bei denen die Kriterien für das Innenraumklima durch die menschliche Nutzung bestimmt werden. Hier wird in Kategorien I bis III (I: hohes, II: normales und III: annehmbares Maß an Erwartungen), wiederum in Abhängigkeit von der CO₂-Raumluftkonzentartion unterteilt und die Kategorie II für neue und renovierte Gebäude empfohlen.

Auch diese Norm ist zurückgezogen, diverse Teile wurden in die DIN EN 16798 übernommen.

DIN EN 16798-2015 (Entwurf) – Energieeffizienz von Gebäuden: Diese Normenreihe soll die DIN EN 13779 und DIN EN 15251 ablösen und liegt derzeit als Entwurf vor. Die einzelnen Teile befinden sich in der Gremienabstimmung; eine Veröffentlichung stand zum Zeitpunkt der Drucklegung dieser Empfehlungen noch aus.

VDI 6040 Blatt 1, Juni 2011 – Raumlufttechnik-Schulen-Anforderungen: Hier sind Dimensionierungshinweise, vor allem für Luftmengen enthalten.

VDI 6040, Blatt 2, September 2015 – Ausführungshinweise: In der Richtlinie werden neben freier und maschineller Lüftung auch Varianten hybrider Lüftung aufgezeigt. Ausgehend von den Anforderungen an den Schulraum (Blatt 1) werden Anwendungsbeispiele (Blatt 2) dargestellt, mit denen die gestellten Anforderungen einhaltbar sind. Dazu werden personenbezogene Luftvolumenströme zur Dimensionierung in Abhängigkeit von Jahrgangsstufe und Aktivität angegeben, sowie die Auslegungsgrundsätze für freie und maschinelle Lüftung erläutert. Es werden Vorbzw. Nachteile der angegebenen Beispiele betrachtet. Die Richtlinie berücksichtigt ebenfalls die Forderungen von DIN EN 15251 und DIN EN ISO 7730.

VDI 6022 Blatt 1 – Raumlufttechnik, Raumluftqualität – Hygieneanforderungen an Raumlufttechnische Anlagen und Geräte (VDI-Lüftungsregeln): Die Richtlinie beschreibt Anforderungen an Planung, Ausführung und Betrieb von raumlufttechnischen Anlagen und Geräten aus hygienischer Sicht. Zur Sicherstellung der Qualität werden neben einer hygienischen Abnahmeuntersuchung regelmäßige Kontrollen und Inspektionen mit notwendigem Leistungsumfang festgelegt. Zusätzliche Anforderungen werden an die Qualifikation des Personals, auch des Betriebspersonals, gestellt (VDI 6022 Blatt 4).

Nach Urteilen des BGH (BGH Az. VII ZR 45/06, NJW 2007 Az. V ZR 182/12, NJW 2013), gilt sowohl für Normen des DIN als auch des VDI:

"DIN-Normen sind Empfehlungen und können, müssen aber nicht benutzt werden. Grundsätzlich handelt es sich um "private Regelwerke mit Empfehlungscharakter".[1] Als solche können sie hinter dem Stand der Technik zurückbleiben, haben aber die Vermutung für sich, dass sie den Stand der Technik abbilden. Diese Vermutung kann durch Sachverständigenbeweis widerlegt werden.[2]"

Z.B. weist eine in diesem Papier zitierte Studie nach, dass die CO₂ Berechnung nach DIN EN 13779 fehlerhaft ist (Knaus *et al.*, 2019).

Normen selbst sind also keine wissenschaftlich validen Referenzen. Wir nutzen sie nur zur vereinfachten Dokumentation von Eingabeparametern von Rechenmodellen.

Zusammenfassung der wesentlichen Aspekte

Die Qualität der Innenraumluft in Bildungseinrichtungen ist ein wichtiger Faktor zur Sicherstellung des Gesundheitsschutzes für Lernende und Lehrende sowie aller weiteren Nutzer, die sich einen großen Teil des Tages in Räumen von Bildungseinrichtungen aufhalten. Gleichzeitig sind die Anforderungen energiesparenden und nachhaltigen Bauens zu erfüllen. Zur Sicherstellung einer gesundheitlichen Unbedenklichkeit der Innenraumluft in sanierten und neu gebauten Schulen ist neben der Verwendung emissionsarmer Bauprodukte und Einrichtungsgegenstände ein ausreichender Luftwechsel zur Abfuhr belasteter und Zufuhr frischer Luft zwingend erforderlich.

Der neu eingeführte Begriff "gesundheitliche Unbedenklichkeit der Innenraumluft" ist zu definieren. Laut DIN EN 16798 beträgt der "Mindestwert der Gesamt-Lüftungsrate für Gesundheitszwecke" 14.4m³/(h P) (DIN EN 16798, 2019).

Des Weiteren ist zu klären, ob dies auch für Bestandsgebäude gilt.

Der Arbeitskreis Lüftung geht davon aus, dass die eingangs genannten Schutzziele des Ausschusses für Innenraumrichtwerte und der Arbeitsstättenverordnung eingehalten werden, wenn der arithmetische Mittelwert von 1.000 ppm CO₂ über die Dauer einer Unterrichtseinheit (in Schulen üblicherweise 45 Minuten, ohne Pausen) nicht überschritten wird.

Diese Auffassung des Arbeitskreises Lüftung ist offenbar zumindest nicht kompatibel zu den ASR A3.6. Die wissenschaftliche Begründung steht weiterhin aus.

Nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik und bestätigt durch zahlreiche Messungen und Simulationsberechnungen ist die alleinige Fensterlüftung nicht in der Lage, diese Anforderungen ganzjährig unter Gewährleistung einer angemessenen Temperatur und ohne Zuglufterscheinungen zu erfüllen.

Diese Aussage gilt nach allen Studienergebnissen der Branche nur für das "Stoßlüften" und das "Ab und An Stoßlüften"; eine Verallgemeinerung auf "alleinige Fensterlüftung" ist nicht zulässig (Referenzen siehe oben).

Zur Gewährleistung des Gesundheitsschutzes ist es aus Sicht des Arbeitskreises daher notwendig, neben optimal gestalteten Fenstern, eine zusätzliche bedarfsgeregelte technische Lüftung einzuplanen.

Da die Aussage des vorhergehenden Absatzes im Allgemeinen nicht zutrifft, sind die Folgerungen nicht alternativlos.

Eine "zusätzliche bedarfsgeregelte technische Lüftung" ist also nachweislich (s.o.) nicht notwendig, wenn mit Fenstern dauergelüftet wird.

Dies geschieht über ein detailliertes Lüftungskonzept, welches in die Planung, aber auch in die spätere Nutzung einzubeziehen ist.

Ein Konzept kann keinen Gesundheitsschutz gewährleisten, es muss zielführend umgesetzt werden. Genau hier entstehen die Probleme in der Praxis (Reiß *et al.*, 2017)

Es wird empfohlen, die erforderliche personenbezogene Lüftungsrate als sogenannte "Hybride Lüftung" (also als Kombination von mechanischer Grundlüftung und bedarfsweiser Zusatzlüftung über Fenster) auszuführen.

Diese Aussage ist nicht nachvollziehbar, siehe oben. Hybride Lüftung vereinigt alle Nachteile von Fensterlüftung und unterdimensionierter RLT: mäßig bis niedrige Luftqualität, insbesondere im Winter und im Sommer, Schadstoffeintrag und Wärmeverlust durch Umgehung der RLT, Lärmeintrag durch die Empfehlung der Nutzung natürlicher Lüftung im Sommer, genau dann, wenn Fensterlüftung aufgrund geringer Temperaturunterschiede und

wenig Wind zu wenig Luftaustausch erreicht (Peper et al., 2007; Jagnow and Gebhardt, 2017; Reiß et al., 2017).

Erfahrungen aus der Praxis haben gezeigt, dass die Möglichkeit der eigenständigen Fensteröffnung einen wesentlichen Anteil an der Akzeptanz und Zufriedenheit der Nutzer hat.

Dieser Punkt ist durch valide unabhängige Studien nachzuweisen, da hier psychologische Befindlichkeiten unterstellt werden.

Die detaillierte Betrachtung von Praxisbeispielen zeigt nämlich, dass sich die Notwendigkeit des Nutzereingriffs zwanglos durch Planungs-, Ausführungs-, Parametrierungs- und Wartungsmängel erklären ließe (Peper *et al.*, 2007; Jagnow and Gebhardt, 2017; Reiß *et al.*, 2017).

Reiß et al zeigen, dass trotz der Möglichkeit zur Lüftung über Fenster nur ca. 10% der Lehrer mit Neubau / Sanierung bezüglich Luftqualität und Temperaturregelung voll zufrieden waren (Reiß et al., 2017).

Insbesondere scheint der Wunsch nach manuellem Eingriff bei einer Überhitzung des Raums aufzukommen, ein Punkt der bei bisherigen Lüftungskonzepten kaum Beachtung findet.

Gleichzeitig wird es damit möglich, die Auslegung von Lüftungsanlagen um den durch die freie Lüftung gelieferten (Zusatz)-Außenluftvolumenstrom zu verringern.

Freie Lüftung kann keinen minimalen Außenluftvolumenstrom garantieren, es ist daher nicht erkennbar, wie sie bei der Auslegung einer Lüftungsanlage beachtet werden kann.

Wesentlich für den erfolgreichen Betrieb sanierter oder neuer Bildungsgebäude sind außerdem die Einbeziehung der Raumnutzerinnen und Raumnutzer bereits bei der Planung der Maßnahmen, die Erfolgskontrolle des Lüftungskonzeptes unter Praxisbedingungen und die professionelle Betreuung und Wartung der technischen Anlagen nach der Fertigstellung sowie in der Nutzungsphase.

Die Planung erfolgt typischerweise nach komplexen Regelwerken und Normen und wird von erfahrenen Fachleuten durchgeführt; es ist nicht nachvollziehbar, welchen Beitrag Laien dazu liefern könnten.

Diese Lüftungsanforderungen orientieren sich an den vorliegenden wissenschaftlichen Erkenntnissen zu den negativen Auswirkungen unzureichender Lüftung für die Nutzer von Bildungseinrichtungen und den gesundheitlichhygienischen Anforderungen an die Innenraumluftqualität.

Auch die ASR A3.6 basiert auf den "vorliegenden wissenschaftlichen Erkenntnissen". Es erscheint widersprüchlich, dass die vorliegenden Lüftungsanforderungen bei gleicher Datenlage von der ASR3.6 abweichen, Referenzen für neuere Erkenntnisse werden nicht gegeben.

Sowohl die Sicherstellung der kognitiven Leistungsfähigkeit und des Wohlbefindens der Nutzer als auch insbesondere die Gewährleistung der gesundheitlichen Unbedenklichkeit dürfen aus Kostengründen nicht gefährdet werden.

Wenn die "Sicherstellung" der genannten Aspekte "nicht aus Kostengründen gefährdet werden dürfen", ist nicht ersichtlich, warum hybride Lüftungskonzepte, die nach wie vor nutzerabhängig und damit "nicht sicherstellend" sind, unter anderem aus wirtschaftlichen Gründen empfohlen werden.

Des Weiteren ist nicht ersichtlich warum in diesem Argumentationsrahmen weiterhin Stoßlüften, welchen durch alle einschlägigen Branchenstudien nachgewiesenermaßen untauglich ist, für Bestandsgebäude empfohlen wird, obwohl zielführendes und gleichzeitig behaglicheres Dauerlüften möglich wäre.

Es bleibt schleierhaft warum die nachgewiesene Einschränkung der kognitiven Leistungsfähigkeit durch erhöhte Raumtemperaturen keine Beachtung findet (s.o).

Die Empfehlungen enthalten daher keine Kostenrechnung anhand Investitions- und Betriebskosten einerseits und Energieeinsparungen andererseits.

Diese Berechnungen wurden u.a. von Branchenvertreter in Theorie und Praxis durchgeführt. Für hybride Lüftung ausgelegte RLT/WRG ist auf dem Papier weder wirtschaftlich noch nachhaltig (Helleis and Klimach, 2021; Kremer, Rewitz and Müller, 2021; Kaup, 2022). In der Praxis ergeben sich noch wesentlich schlechtere Ergebnisse bei gleichzeitig mäßigen Raumluftqualitäten und geringer Nutzerzufriedenheit (Peper *et al.*, 2007; Jagnow and Gebhardt, 2017; Reiß *et al.*, 2017).

Sie berücksichtigt jedoch Aspekte wie Kosten und Nachhaltigkeit durch Beschränkung der technischen Lüftung auf das notwendige Maß durch passgenaue Dimensionierung und die Einbeziehung der unterstützenden manuellen Fensterlüftung in die Konzeption.

Gerade die Beschränkungen der technischen Lüftung auf weniger als das notwendige Maß (BAUA ASR A3.6, 2012), Standardtopologien und "passgenaue Dimensionierung" für pauschale Betriebsbedingungen verhindert Kosteneffektivität und Nachhaltigkeit. Für hybride Lüftung ausgelegte RLT/WRG ist auf dem Papier weder wirtschaftlich noch nachhaltig (Helleis and Klimach, 2021; Kremer, Rewitz and Müller, 2021; Kaup, 2022). In der Praxis ergeben sich noch wesentlich schlechtere Ergebnisse bei gleichzeitig mäßigen Raumluftqualitäten und geringer Nutzerzufriedenheit (Peper *et al.*, 2007; Jagnow and Gebhardt, 2017; Reiß *et al.*, 2017).