Kommentar zu „Leitfaden zur Raumluftkonditionierung in Schulen bei Neubau und Sanierung unter Beachtung ökonomischer, ökologischer und soziokultureller Aspekte“ von B. Müller et al., HTW und Senatsverwaltung Berlin

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

Version 1.2, 18.04.2023

Zusammenfassung

Der kommentierte Leitfaden von Müller et al. (Müller *et al.*, 2014) enthält Referenzen auf Informationen, die weder öffentlich zugänglich sind noch auf Nachfrage bei Erstautorin B. Müller zur Verfügung gestellt wurden, weshalb eine direkte Überprüfung der wissenschaftlichen Qualität und Belastbarkeit der im Leitfaden präsentierten Simulationsergebnisse nicht möglich war. Daher wurden bei Erstellung dieses Kommentars die relevanten Größen mit öffentlich zugänglichen Rechenwerkzeugen berechnet und dann mit den in dem Leitfaden zitierten Daten und Schlussfolgerungen verglichen.

Der Vergleich zeigt, dass die Simulationsergebnisse von Müller et al. für bedarfsgesteuerte Fensterlüftung (Stoßlüftung oder CO2-geführte Dauerlüftung) einen 10 mal höheren Heizwärmebedarf ermitteln als eine Berechnung mit realistischen Eingangsparameter eigentlich erwarten lässt (siehe Anhang).

Die Simulationen in Müller et al. 2014 ergeben bei vergleichbarer Ventilationsrate keine wesentlichen wirtschaftlichen Vorteile für RLT/WRG, durch Abschätzung der luftqualitätsbedingten Minderleistung der Lehrkräfte belegen Müller et al. 2014 einen vermeintlichen deutlichen wirtschaftlichen Vorteil für RLT/WRG. Diese Abschätzung basiert jedoch auf den Ergebnissen einer begrenzten Auswahl von Veröffentlichungen.

Nach unserer Literaturstudie der letzten 25+ Jahre zur Assoziation von Ventilationsrate und schulischer Leistung sowie einer wissenschaftlich nachvollziehbare Analyse der von Müller et al. 2014 zitierten Studien fällt die Leistungssteigerungen bei erhöhter Lüftungsrate wesentlich geringere aus als von Müller et al. für ihre Abschätzung angenommen, so dass sich das Ergebnis von Müller et al. ins Gegenteil verkehrt und der durch RLT/WRG generierte wirtschaftliche „Schaden“ (Begriff aus Müller et al.) rechnerisch um ein Vielfaches höher liegt als der durch CO2-geführte Fenster-Dauerlüftung (siehe Anhang *„Experimentelle Studien zu Assoziationen von Leistungsfähigkeit von Schülern, Lehrern und Büroarbeitern mit Innenraumparametern (Temperatur und Ventilationsrate)“*).

Auch bei ganzheitlicher Betrachtung einschließlich sonstiger „luftqualitätsabhängiger“ finanzieller Effekte ergäbe sich rechnerisch für CO2-geführte Fenster-Dauerlüftung unter Berücksichtigung von Quellluftteffekten ein 62-mal geringerer finanzieller Aufwand als für die im Fallbeispiel des Leitfadens berechneten RLT Anlagen mit Mischlüftung.

Berücksichtigte man weiter die durch zu hohe Temperaturen verursachte rechnerische Minderleistung des Lehrpersonals, ergäben sich durch RLT/WRG rechnerisch verursachte

„Schäden“ (Begriff aus Müller et al.), die ca. 100-mal höher lägen, als die bei CO2-geführter Fenster-Dauerlüftung. Die Kosten lägen im Bereich 250 €/(a p) – ca. 5-mal höher als die gesamten Heizkosten des Gebäudes. Insgesamt zeigt sich, dass für belastbare Ergebnisse die wissenschaftliche Evidenz zur Einschätzung der Assoziationen der Leistungsfähigkeit zu Ventilationsrate und Temperatur möglichst umfassend betrachtet werden sollte.

Müller et al. können somit keinen wissenschaftlich nachvollziehbaren Nachweis erbringen, dass der Einsatz von zentralen oder dezentralen RLT-Anlagen in Schulen wirtschaftlich sinnvoll ist. Neuere Untersuchungen zeigen das Gegenteil (Kremer, Rewitz and Müller, 2021; Kaup, 2022).

Ebenso wenig konnten bisher ökologische Vorteile von RLT-Anlagen für Schulen im Vergleich zu CO2-geführter Fensterlüftung wissenschaftlich nachvollziehbar nachgewiesen werden, siehe die Kommentierung des Papiers „Lüftung unter Pandemiebedingungen“ des AK Klimatechnik und begleitende Studien (Helleis and Klimach, 2022; Helleis, Klimach and Pöschl, 2023a). Das Gegenteil ist anhand von Feldstudien belegbar (Peper *et al.*, 2007; Greml *et al.*, 2008; Jagnow and Gebhardt, 2017; Reiß *et al.*, 2017).

Dass mit kontinuierlicher Fensterlüftung unbedenkliche CO2-Konzentrationen in Klassenräumen eingehalten werden können, ist durch Modellrechnungen, Laborexperimente, Feldstudien und geltende Arbeitsschutzregeln hinlänglich belegt (BAUA ASR A3.6, 2012; El Fouih *et al.*, 2012; Fitzner and Finke, 2012; von Grabe, Svoboda and Bäumler, 2014; Erhart *et al.*, 2015; Knaus *et al.*, 2019; Umweltbundesamt, 2020; Ostmann *et al.*, 2022; Schwarzbauer, 2022; Helleis, Klimach and Pöschl, 2023a).

Vor dem Hintergrund der nicht nachvollziehbaren Simulationsergebnisse sind die Schlussfolgerungen und Empfehlungen von Müller et al. zu den wirtschaftlichen Vorteilen von RLT-Anlagen mit Wärmerückgewinnung (WRG) bis auf Weiteres als nicht wissenschaftlich begründet aufzufassen.

Auf Basis einer wissenschaftlich nachvollziehbaren Analyse der von den Autoren zur Verfügung gestellten Daten erscheint eine Ausstattung öffentlicher Gebäude mit RLT/WRG aufgrund des für die öffentliche Hand geltenden Wirtschaftlichkeitsgebotes im Allgemeinen nicht zulässig und nur bei besonderen Bedarfen angemessen (Extremlagen bezüglich Kälte, Lärm oder Schadstoffbelastung der Außenluft).

Schlussfolgerungen und Empfehlungen des Leitfadens

Anhand der detaillierten Analysen im Anhang können einzelne Annahmen und Aussagen von Müller et al. 2014 überprüft werden. Dieser Abschnitt ist fokussiert auf die zentralen Schlussfolgerungen und Empfehlungen in der Zusammenfassung des Leitfadens (blau kursiv gedruckt).

„Bei Neubau und Sanierung ist es notwendig maschinelle Lüftung einzusetzen, da die für die geistige Leistungsfähigkeit und aus gesundheitlich-hygienischen Anforderungen erforderliche Luftqualität (CO2 ≤ 1000 ppm) vor allem in der Heizperiode mit Fensterlüftung nicht sichergestellt werden kann.

Diese Aussage ist in mehrfacher Hinsicht wissenschaftlich nicht nachvollziehbar:

- Die Luftqualität in Innenräumen ist nicht durch die CO2 Konzentration definierbar, da sowohl Emissionen des Gebäudes – z.B. TVOC oder Radon – als auch die

Außenluftqualität eine entscheidende Rolle spielen (Seifert, 1999; Hutter *et al.*, 2013). Die WHO listet CO2 nicht als Schadstoff – vgl. Anhang in (DIN EN 16798, 2019) und (Seifert, 1999). Die CO2 Konzentration sagt lediglich etwas über den veratmeten Anteil der Raumluft aus.

- Uns ist kein wissenschaftlicher Nachweis für den kausalen Zusammenhang zwischen „geistiger Leistungsfähigkeit“ und moderaten CO2 Konzentration (unterhalb von ca. 2000 ppm bekannt), es handelt sich lediglich um Assoziationen (Mishra *et al.*, 2021). Darüber hinaus ist die „geistige Leistungsfähigkeit“ nicht nur zum CO2 Anteil assoziiert, sondern insbesondere auch zur Raumtemperatur. Die Effekte sind antikorreliert und von vergleichbarer Größenordnung, sodass man für maschinelle Lüftung mit WRG im Vergleich zu CO2-geführter Fenster-Dauerlüftung eher negative Effekte berechnet (siehe Anhang).
- Die gesundheitlich-hygienische Grenze (Kat. III) liegt nach der geltenden Norm bei (4+1) l/(s p) = 18 m³/(h p), entsprechend einer maximalen CO2 Konzentration von ca. 17 l/h / 18 m³/h + 400 ppm = 1344 ppm (Persily, 2017; DIN EN 16798, 2019; Sakamoto *et al.*, 2022). Dass CO2-geführte Dauer-Fensterlüftung nicht nur die erforderlichen (18 m³/(h p)), sondern selbstverständlich auch die empfohlenen Ventilationsraten (30 m³/(h p)) „sicherstellen kann“, kann anhand aller uns zugänglichen Studien, Lehrbüchern und Verordnungen nachgewiesen werden, z.B. (Rietschel and Fitzner, 2008; 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; Schwarzbauer, 2022; Helleis, Klimach and Pöschl, 2023b).
- Tatsächlich kann Stoßlüften in den Pausen die empfohlenen Ventilationsraten nicht sicherstellen, und 20/5 Stoßlüften nach UBA Empfehlungen lediglich im Winter (BAUA ASR A3.6, 2012; Umweltbundesamt, 2017; Ostmann *et al.*, 2022; Schwarzbauer, 2022). Für CO2-geführtes Dauerlüften gilt diese Aussage bei typischen Fensteröffnungsflächen in Klassenräumen nicht – und damit wäre kein hygienischer Vorteil von RLT/WRG mehr nachweisbar (siehe obige Referenzen). In Simulations- und Feldstudien wird bei Vergleichen mit RLT oft Stoßlüften simuliert bzw. angewandt, obwohl die Methode zusätzliche vermeidbare Innenraumklima-Probleme mit sich bringt – Überhitzung, trockene Raumluft und unzureichende Lüftung sind in stoßgelüfteten Klassenräumen hochkorreliert (Anlauft and Schwede, 2018; Knaus *et al.*, 2019; Ostmann *et al.*, 2022).

„Die Forderung nach guter Luftqualität in Innenräumen ist in der Arbeitsstättenverordnung verankert.

Diese Aussage ist wissenschaftlich nicht nachvollziehbar. Der Begriff „gute Raumluftqualität“ wird weder in der Arbeitsstättenverordnung noch in gültigen Normen definiert (DIN EN 16798, 2019). Die Zitate aus (BAUA ASR A3.6, 2012):

„Diese ASR (3.6) konkretisiert die Anforderungen an die Lüftung in § 3a Abs. 1 und § 4 Abs. 3 sowie in Punkt 3.6 des Anhanges der Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV)…. In umschlossenen Arbeitsräumen muss ***gesundheitlich zuträgliche*** *Atemluft in* ***ausreichender*** *Menge vorhanden sein. In der Regel entspricht dies der Außenluftqualität.“*

„Einschlägige Normen, Richtlinien und Vorschriften geben Empfehlungen zur Planung und praktischer Umsetzung maschineller und freier Lüftung…. Es sind Anforderungen an thermische Behaglichkeit und Luftqualität beschrieben, die unabhängig vom Lüftungskonzept (frei oder maschinell) einzuhalten sind.“

Diese Aussage ist in jeder Hinsicht wissenschaftlich nicht nachvollziehbar. Die gültigen Normen definieren unterschiedliche Behaglichkeits- und Luftqualitätskriterien für freie und

maschinelle Lüftung und für unterschiedliche, a priori frei wählbare Kategorien (DIN EN 16798, 2019). Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass z.B. thermische Behaglichkeit auch im Kontext der zu erwartenden Lehr- und Lernleistungen zu sehen ist. Nach Studienlage ergibt sich die optimale Raumtemperatur im leicht kühlen Bereich (PMV ~ -0.6) nach ISO 7730 zu ca. 18.6°C bei Luftgeschwindigkeiten < 0.1 m/s und 1 clo Bekleidungsstärke, u.v.a (Humphreys and Nicol, 2002; ISO 7730, 2006).

Empfehlungen sind nicht per se mandatorisch einzuhalten. Die Zitate aus BGH Az. VII ZR 45/06, NJW 2007 Az. V ZR 182/12, NJW 2013:

*„DIN-Normen sind Empfehlungen und können, müssen aber nicht benutzt werden. Grundsätzlich handelt es sich um **„private Regelwerke mit Empfehlungscharakter“.** Als solche können sie **hinter** dem Stand der Technik **zurückbleiben**, haben aber die Vermutung für sich, dass sie den Stand der Technik abbilden.“*

„Ferner sind Simulationsergebnisse und ein Beispiel wirtschaftlicher Analyse maschineller und freier Lüftung beschrieben. Trotz zusätzlicher investiver Kosten für maschinelle Lüftung zeigen die Berechnungen, dass allein aufgrund der möglichen Wärmerückgewinnung im Winter eine Amortisation gegeben ist.“

Beide Aussagen sind wissenschaftlich nicht nachvollziehbar. Die Simulationsergebnisse zu Fensterlüftung sind nicht nachvollziehbar, verglichen mit realistischen Szenarien erscheinen sie mehr als einen Faktor 10 zu hoch – der rechnerische Nachweis dafür wurde auf Basis von Heizgradtagzahlen mit Hilfe des IWU online Rechners oder dem online-Tool der RWTH Aachen durchgeführt (IWU, 2021; *AHULife*, 2021). Damit wäre keine Amortisation durch WRG gegeben, was grundsätzlich auch durch andere Studien bestätigt wird (Kremer, Rewitz and Müller, 2021; Kaup, 2022).

Nur mit einer RLT-Anlage ist es möglich, gute Raumluftqualität und thermische Behaglichkeit sicherzustellen.

Diese Aussage ist begrifflich und inhaltlich nicht nachvollziehbar und wird durch einschlägige Normen, Verordnungen, den Stand der Technik und Praxisstudien in jeder Hinsicht widerlegt (Peper *et al.*, 2007; Greml *et al.*, 2008; BAUA ASR A3.6, 2012; Jagnow and Gebhardt, 2017; DIN EN 16798, 2019; Schwarzbauer, 2022).

„Wird die eingeschränkte Leistungsfähigkeit von Lehrern und Schülern in Gebäuden ohne RLT-Anlage berücksichtigt, zeigt sich, dass allein die Leistungsminderung des Lehrpersonals aufgrund schlechter Luftqualität zu einem finanziellen Schaden führt, der sechsmal höher ist als die Investition in maschinelle Lüftung.“

Diese Aussage ist wissenschaftlich nicht nachvollziehbar. Die Ergebnisse wurden auf Basis von Ergebnissen erzielt, die selektiv Veröffentlichungen entnommen wurden. Wir haben diese Studien geprüft und können auf Basis aller zugänglichen Literatur der letzten 25+ Jahre rechnerisch nachweisen, dass der finanzielle „Schaden“ durch RLT größer ist, als der durch Stoßlüften nur in den Pausen, und dass er 62-mal höher ist als der durch CO2 geführte Fenster-Dauerlüftung (siehe Anhang). Berücksichtigt man zusätzlich die positiven Effekte von Quelllüftungseffekten bei Fenster-Dauerlüftung verglichen mit RLT-Mischlüftung, verdoppelt sich der durch RLT verursachte „Schaden“ noch einmal.

„Unter Einbeziehung des höheren Lehrerfolges amortisiert sich eine maschinelle Lüftungsanlage innerhalb weniger Jahre. Aspekte wie Leistungssteigerung der Schüler, weniger Krankenstände des Lehrpersonals und der Schüler und gesteigertes allgemeines Wohlbefinden sind zusätzliche positive Effekte.“

Diese Aussage ist wissenschaftlich nicht nachvollziehbar. Da der durch RLT verursachte finanzielle „Schaden“ auf Basis einer nachvollziehbaren wissenschaftlichen Analyse

mindestens 50-mal höher berechnet wird als der für CO2-geführte Fenster-Dauerlüftung und der hygienische Nutzen geringer berechnet wird, ist eine Amortisation nicht zu erwarten.

Anhang

Anwesenheitsbedingte Heizwärmebedarfe und Kosten für Zuluftrate 30 m³/(h p) bei CO2 geführter Dauer-Fensterlüftung

Für die typische Wärmelast aufgrund der Anwesenheit eines „mittleren“ Schülers (1.60 m, 55 kg, 17.5 lCO2/h) im Klassenraum ergibt sich nutzungsbedingt konservativ folgender Wert (Persily, 2017; Reiß *et al.*, 2017):

Wärmelast (Schüler + LED Licht + Apps) = 87W + 5W + ca. 3W = ca. 95W

Solare Gewinne sowie Transmissionsverluste über die Fassade werden hier nicht berücksichtigt, sie treten unabhängig von der Nutzung auf und sollten somit nicht als nutzungsbedingt gelten. Für den spezifischen nutzungsbedingten Wärmeverlust ergibt sich bei 30 m³/(h p):

Wärmeverlust (Lüftung) = 0.0083m³/(s p) * 1.2 kWs/(m³ K) = 10 W/(K p)

Für eine angestrebte operative Temperatur im Raum > 20°C (in diesem Beispiel 20.75°C) und typischen bei Fensterdauerlüftung entstehenden Temperaturunterschieden zwischen Wand (~22°C) und Luft (~19.5°C) ergibt sich die Heizgrenze ohne Sonne und Transmissionsverluste zu:

Heizgrenze = 19.5°C – 95 W / 10K/W = 10°C

Der IWU Gradtagzahl Rechner gibt für Berlin Buch basierend auf den DWD Daten für das Jahr 2020 mit einer Höhenkorrektur um 60 m und der Heizgrenze von 10°C folgende Heizgradtage (HGT) und Heiztage (HT) (IWU, 2021):

HGT 10 = 805 Kd, HT 10 = 173 d

Für den Korrekturfaktor zur Kompensation des Leerstandes (Wochenende, Ferien (15 d/Heizperiode)) wird mit Hilfe der Heiztage folgender Faktor berechnet:

Heizschultage = 173 d * 5d/7d – 15 = 109 d

Korrektur = 109 d / 173 d = 0.63

Mit einer mittleren Nutzungszeit von 7 Zeitstunden pro Tag ergeben sich

Heizgradschulstunden = 805 Kd/a * 7 h/d * 0.63 = 3550 Kh/a

Damit ergibt sich der nutzungsbedingte Heizwärmebedarf pro Schüler zu:

Heizwärmebedarf = 3550 Kh/a * 10 W/(K p)

= **36 kWh/(a p)**

Setzt man einen Gas-Brennwert Wärmeerzeuger an (Gesamtwirkungsgrad incl. Verteilung 90%) und nimmt für den Gaspreis 2014 ca. 6 ct/kWh Endenergie an, ergibt sich für den nutzungsbedingten finanziellen Aufwand für „gute Raumluftqualität“ pro Schüler Kosten von ca:

Heizkosten = 36 kWh/(a p) / 0.9 * 0.06 €/kWh

= **2.4 €/(a p)**

Der Heizwärmebedarf für eine 25-köpfige Klasse ergibt sich dann zu

Heizkosten (Klasse, 2014) = 2.4 €/(a p) * 25 p = **60 €/a**

Bei den derzeitigen Gaspreisen von 12 ct/kWh ergäben sich ein Aufwand von

Heizkosten (2023) = 36 kWh/(a p) / 0.9 * 0.12 €/kWh

= **5 €/(a p)**

Analyse der kapital-, betriebs- und bedarfsgebundenen Kosten

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse wird im Leitfaden anhand von Simulationsrechnungen bzw. anhand einschlägiger Normen VDI2067 berechnet. Da die SK Schule in dem Leitfaden nicht weiter bezeichnet ist, können weitere Daten nicht anderen Quellen entnommen werden. Für die betrachtete Schule wird eine Schülerzahl von 475 Schüler und 28 maschinell belüfteten Klassenräumen angegeben. Eine Energiebezugsfläche ist nicht angegeben, unter der Annahme einer Belegungsfläche von 9 m²/Schüler – in Übereinstimmung mit (Reiß *et al.*, 2017) – ergäben sich 4275 m².

Die kapitalgebundenen Kosten der RLT Anlagen werden mit im Mittel ca. 7300 €/Klassenraum angegeben, so dass sich ein Gesamtinvestitionsvolumen von ca. 205.000 € ergibt, weitgehend unabhängig davon, ob es sich um zentrale oder dezentrale Anlagen handelt (wahrscheinlich für das Jahr 2012 gültig). Warum sich daraus mit einem Betrachtungszeitraum von 20 Jahren eine Annuität von 19.000…18.000 € ergibt, ist nicht klar. In anderen Veröffentlichungen aus ca. 2017…2020 werden die Kosten typischer dezentraler Anlagen mit ca. 10.000…15.000 €/Raum angegeben (Umweltbundesamt, 2017; WOLF GMBH, 2017; Kremer, Rewitz and Müller, 2021; Viessmann Climate Solutions SE, 2021; Kaup, 2022). Die Differenz ist kaum durch Inflation zu erklären. In Abbildung 6 des Leitfadens werden die kapitalgebundenen Kosten mit 40…38 €/(a p) angegeben, diese werden für die Analyse benutzt.

In den Abbildungen 7 und 8 sind die betriebs- und verbrauchsgebundenen Kosten maschineller und freier Lüftung dargestellt. Nimmt man an, dass die Lüftungsanlagen bedarfsgesteuert waren, also im Wesentlichen nur während der Anwesenheit der Schüler in Betrieb waren (das Lüften leerer Räume ist nutzlose Energieverschwendung) erscheinen die angegebenen Kosten für den Wärmebedarf der raumlufttechnischen Systeme weit überhöht, da mit diesen Anlagen bei 30 m³/(h p) in Mitteleuropa während der Nutzungszeit kaum noch Heizwärmebedarf besteht – der Nachweis dazu kann mit dem online Tool AHULife der RWTH Aachen durchgeführt werden (*AHULife*, 2021).

Mit ca. 40 €/(a p) und 0.06 €/kWh (Gas) ergäben sich trotz Wärmerückgewinnung ein

Heizwärmebedarf = 40 €/(a p) / 0.06 €/kWh = **667 kWh/(a p)**

Dieser Wert liegt ca. einen Faktor 18 über dem lüftungsbedingten Heizwärmebedarf bei Fensterlüftung ohne Wärmerückgewinnung (siehe oben). Berechnet man daraus mit der Belegungsfläche von 9 m²/Schüler den flächenspezifischen Heizwärmebedarf, ergäbe sich

Heizwärmebedarf = 667 kWh/(a p) / 9 m²/p = **74 kWh/(m² a)**

Diesen Wert kann man direkt mit der Klassifizierung der EnEV vergleichen, der Verbrauch entspräche der Kategorie C.

Es ist also davon auszugehen, dass die Angaben der bedarfsgebundenen Kosten sich nicht auf den Vergleich von Lüftungssystemen, sondern auf den gesamter Gebäude beziehen. Geht man davon aus, dass in den RLT/WRG gelüfteten Gebäuden praktisch kein nutzungsbedingter Heizwärmebedarf entsteht (geschätzt 90% transmissions- und infiltrationsbedingt), kann der lüftungsbedingte Teil des Heizwärmebedarfs des Gebäudes separiert betrachtet und damit die betrachteten Lüftungssysteme realistisch verglichen werden:

Heizwärmebedarf Transmission/Infiltration = 38 €/(a p) * 0.9 ~ **34 €/(a p)**

Dieser Wert ist von allen Wärmekosten abzuziehen, da er durch die RLT/WRG nicht positiv beeinflussbar ist.

Die folgende Tabelle zeigt die jährlichen Kosten pro Schüler für die verschiedenen Varianten unter Berücksichtigung der gegeben Zahlen aus den Abbildungen 6 und 8, 20 Jahre Nutzungszeit, den angesprochenen Korrekturen (grün für Transmissions- und Infiltrationskorrektur), zusammen mit den oben berechneten Annuitäten (in rot) für den lüftungsbedingten Wärmebedarf bei CO2 geführter Fensterlüftung (siehe oben). Da der Leitfaden keine Angaben zur Luftwechselrate für die Kategorie „Fensterlüftung nicht ausreichendes Lüftungsverhalten“ angibt, werden hier die Luftwechselraten von Stoßlüften nur in den Pausen wie vom UBA empfohlen angenommen – im Zeitmittel ca. 15 l/(s p) (Umweltbundesamt, 2008).

Tabelle 1. Jährliche Kosten pro Schüler für die im Leitfaden betrachteten Lüftungsvarianten, inklusive der Korrekturen (siehe Text). Grün: ohne Transmission, Infiltration und Solargewinne. Rot: tatsächliche nutzungs- und lüftungsbedingter Heizwärmebedarf.

	RLT zentral	RLT dezentral	Dauerlüftung	Stoßlüftung
Kapital	40	38	0	0
Strom	4	5	0	0
Wärme	39/**5**	42/**8**	66/**32** **2.4**	47/13 **1.2**
Wartung	15	19	0	0
Summe	**98/64**	**104/70**	**66/32** **2.4**	**47/13** **1.2**

Wie man sieht, wurden die bedarfsgebundenen Kosten für Wärme für das Dauerlüften nach Korrektur um ca. einen Faktor 32/2.4 ~ 13 zu hoch angesetzt. Da die Simulationseingangsdaten von den Autoren nicht zur von Verfügung gestellt wurden, kann nicht im Detail überprüft werden, wie diese abnorm hohen Zahlen zustande kommen.

Vergleicht man nur die kapital- betriebs- und bedarfsgebundenen Kosten der Lüftungssysteme untereinander, sind die jährlichen Kosten von RLT/WRG in diesem Fallbeispiel im Vergleich zu Stoßlüften in den Pausen um ca. einen Faktor 67/1.2 ~ **56**, die im Vergleich zu CO2 geführtem Dauerlüften um ca. einen Faktor 67/2.4 ~ **28** höher.

Experimentelle Studien zu Assoziationen von Leistungsfähigkeit von Schülern, Lehrern und Büroarbeitern mit Innenraumparametern (Temperatur und Ventilationsrate).

Für die Bereiche Ventilationsrate bzw. Temperatur erhält man die im folgenden tabellierten Ergebnisse.

Ventilationsrate

Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2. Vorläufige Zusammenfassung der Ergebnisse einer Literaturrecherche der letzten 25+ Jahre. Alle Daten wurden ohne Rücksicht auf ihre Signifikanz berücksichtigt. VR ist Ventilationsrate.

Autoren	Studiendesign	Studienumfang	Effektgröße $\%/\Delta\ln(\mathrm{VR})$
(Seppänen, W. J. Fisk and Lei, 2006)	Auswertung Studien 1997 – 2004	Ca. 900 Schüler und Büroangestellte	2.5
(Mendell *et al.*, 2016)	Longitudinal	Ca. 3500 Schüler	1.5
(Bakó-Biró *et al.*, 2012)	Intervention, Computertests	Ca. 200 Schüler	1.3
(Bakó-Biró *et al.*, 2007)	Intervention, Computertests	Ca. 50 Schüler / Exp	1.5
(Haverinen-Shaughnessy and Shaughnessy, 2015)	Schüler spezifische Daten, Querschnitt	Ca. 3100 Schüler Noten von zentralen Tests	1.6
(Coley, Greeves and Saxby, 2007)	Intervention, Geschwindigkeitstests	Keine Angabe, nur Abstract zugänglich	2.7
(Haverinen-Shaughnessy, Moschandreas and Shaughnessy, 2011)	Schulspezifische Daten, Querschnitt	2500 Schüler, Noten > „befriedigend“	3.5
(Petersen *et al.*, 2016)	Intervention, Geschwindigkeitstest	80 Schüler	4.0
(Wargocki and Wyon, 2006, 2007a, 2007b; Wargocki *et al.*, 2020)	Intervention, Geschwindigkeitstest	Ca. 44 Schüler	11.2 ... 3.3
(Ribic, 2008)	Intervention, d2 Test,	Ca. 75 Schüler, 2 Tests	4.2 ... 0.9

In der Studie von Ribic 2008 im HLH VDI Fachmedien wurden zwei Interventions-Experimente durchgeführt, die um ca. einen Faktor 5 unterschiedliche Ergebnisse liefern, aber beide signifikant sein sollen. Da die Originaldaten nicht zur Verfügung gestellt wurden, die Ergebnisse der Varianzanalysen nicht angegeben wurden und keine Quantifizierung der verzerrenden Effekte von anderen Einflussgrößen durchgeführt wurde (z.b. Temperatur und Lerneffekt), ist eine tiefergehende Analyse nicht möglich (Ribic, 2008).

Besonders hohe Effekte werden in den Interventionsstudien von Wargocki et al. 2006 im ASHRAE Journal berichtet (Wargocki and Wyon, 2006). Durch selektive Berücksichtigung nur solcher Tests, deren Ergebnisse durch Zusammenfassung der Daten verschiedener Bedingungen erst signifikant wurden, berechnen die Autoren die häufig in der Literatur wie auch von Müller et al. 2014 zitierten 14 %/ln(2) = 20.3 $\%/\Delta\ln(\mathrm{VR})$ – 9-mal höher als der aus den großen Querschnittsstudien ermittelte Mittelwert.

Analysiert man die Aussagen von Wargocki et al. 2006 und 2007 lediglich anhand der in den Originalstudien tabellierten Werte, ergeben sich ca. 3-mal niedrigere Effekte - $ca.$ 6.2 $\%/\Delta\ln(\mathrm{VR})$. Ignoriert man zusätzlich das dann erkennbare Ausreißer Experiment (1 von 9), reduziert sich die Effektgröße weiter auf ca. 3.3 $\%/\Delta\ln(\mathrm{VR})$. In beiden Studien sind keine Angaben zu dem Einfluss der durchgeführten Korrekturen für Übungseffekte dokumentiert.

Die Problematik von Übungseffekten bei Interventionsstudien werden von Petersen et al. als systematische Problematik auch in den Studien von Wargocki et al. thematisiert (Petersen et al., 2016). In der Studie von Petersen et al wurde auf Korrekturen von Übungseffekten verzichtet, um zu verhindern, dass korrelierte Effekte unter die Signifikanzgrenze rutschen. Dass dies allerdings zu systematisch zu hoch geschätzten Nutzeffekten führen könnte, wird von den Autoren in Kauf genommen.

Einige weitere Studien von Wargocki et al. wurden bei der Berechnung studienübergreifender Mittelwerte nicht benutzt, weil sie lediglich bereits vorhandene Daten nutzen (Wargocki, Porras-Salazar and Bahnfleth, 2017; Wargocki *et al.*, 2020; Sadrizadeh *et al.*, 2022). Interessant wäre, durch welche Wichtung Wargocki et al. 2020 unter Berücksichtigung der Ergebnisse aller auch hier analysierten Interventionsstudien einen Wert von 9.6 $\%/\ln(\Delta VR)$ berechnen (12%/ln((2100-400)/(900-400) = 3.4). Die Gewichtungsparameter sind in der Veröffentlichung selbst nicht angegeben (Wargocki *et al.*, 2020).

Nimmt man den ungewichteten Mittelwert aller Studien und setzt für die Wertebereiche der Daten von Wargocki und Ribic konservativ die Mittelwerte der gegebenen Bereiche an, ergibt sich ein Mittelwert von 2.8 $\%/\Delta\ln(VR)$.

Während in den Gebäudewissenschaften und TGA Wissenschaften gerne mit kurzfristig erhebbaren Interventionsdaten und Metriken anhand einfacher reproduktiver Fähigkeiten und wegen des hohen Aufwands mit relativ wenigen Probanden gearbeitet wird, wird sowohl bei der Leistungsbewertung durch offizielle akademische oder staatliche Institutionen als auch in den kognitiven und Bildungswissenschaften und in internationalen Vergleichen der Fokus eher auf die nachhaltige langzeitliche Studienerfolge insbesondere auch im Bereich kreatives Denken und Transferleistung mit großen Probandenzahlen und ohne Interventionen gelegt. Für solche Studien ergäbe sich ein ungewichteter Mittelwert von 2.2 $\%\Delta/\ln(VR)$.

Temperatur

Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3. Vorläufige Zusammenfassung der Ergebnisse einer Literaturrecherche der letzten 25+ Jahre. Alle Daten wurden ohne Rücksicht auf ihre Signifikanz berücksichtigt.

Autoren	Studiendesign	Studienumfang	Effektgröße %/K
(Seppänen, W J Fisk and Lei, 2006)	Auswertung Studien 1970 - 2004	Büro, Labor	$-0.5 \ldots -1.2$
(Bakó-Biró *et al.*, 2012)	Intervention, Computertests	Ca. 200 Schüler	-1.7
(Haverinen-Shaughnessy and Shaughnessy, 2015)	Schüler spezifische Daten, Querschnitt	Ca. 3100 Schüler Noten von zentralen Tests	-0.5
(Wargocki and Wyon, 2007a)	Intervention, Geschwindigkeitstest	Ca. 44 Schüler	-2.9
(Park, 2017)	NYC Examensnoten	Ca. 4 Mio. Schüler	-0.4

Auffallend ist, dass in den meisten Studien Ergebnisse von linearen Regressionen an die Messgrößen angegeben werden, obwohl aufgrund der bekannten thermischen Behaglichkeitsgrenzen (ISO 7730, 2006) eher das Modell einer um ca. 21°C operative Temperatur zentrierten umgekehrten Parabel physikalisch plausibel wäre. Die Studie von Seppänen et al. folgt diesem Ansatz, wird aber aufgrund dieses grundsätzlich unterschiedlichen Modellansatzes hier nur zum Vergleich aufgeführt, da sie sich im

Wesentlichen auf Büro- und Laborstudien bezieht (Seppänen, W J Fisk and Lei, 2006). Die beiden angegeben Zahlen würden den ungefähren linearisierten Abhängigkeiten im Bereich 21-25°C (ca. -0.5%/K) und 25-30°C (ca. -1.2%/K) entsprechen.

Bako-Biro et al. 2012 geben keine expliziten Regressionskoeffizienten für ihre Testergebnisse zu Temperaturabhängigkeit an, die angegebene Effektgröße wurde aus den als signifikant angegebenen Ergebnissen (nur 3 von 9 Tests) aus Fig. 4 abgelesen und gemittelt (Bakó-Biró *et al.*, 2012). Da allerdings die Resultate aller Tests genutzt werden sollen, da das Studiendesign selbst alle Tests als relevant für die zu quantifizierende Assoziation angenommen hat, werden die nicht signifikanten Ergebnisse der übrigen 6 Experimente (nicht dokumentiert) bei Bildung des Gesamtmittelwertes mit ca. 50% des Mittelwertes der signifikanten Tests geschätzt, was von ca. 3.3 %/K zu ca. 1.7 %/K führt.

Wargocki et al. 2007 geben keine expliziten Regressionskoeffizienten für ihre Testergebnisse zu Temperaturabhängigkeit an, der in der Tabelle angegebene Wert wurde als Mittelwert der in Fig.3 angegebenen Werte vom Graphen abgelesen (Wargocki and Wyon, 2007a). Nicht ausgewertete Tests (4 von 14) konnten mangels Angaben nicht berücksichtigt werden. Im ASHRAE Journal geben Wargocki et al. einen Wert von -4%/K auf Basis des gleichen Datensatzes an (Wargocki and Wyon, 2006). Wargocki et al. 2017 zeigen eine Gerade, aus der man einen Koeffizienten von (92-78)% / (25.5 – 19.5)K = -2.3%/K ablesen kann (Wargocki, Porras-Salazar and Bahnfleth, 2017). Wargocki et al. 2019 geben in Fig 3 einen Koeffizienten von -2%/K an (Wargocki, Porras-Salazar and Contreras-Espinoza, 2019). Interessant ist, dass Wargocki et al. in dieser Review Studie weder die Ergebnisse der großen Studien von Haverinen-Shaughnessy et al. und Park rechnerisch einbezieht, noch das offensichtlich physiologisch sinnvolle Modell von Seppänen et al. diskutiert oder seinen Modellansatz physikalisch plausibel zu erklären versucht (Seppänen, W J Fisk and Lei, 2006; Haverinen-Shaughnessy and Shaughnessy, 2015; Park, 2017). Da der Mittelwert der in Wargocki Studien nach 2007 angegebene Koeffizienten nicht weit von der Originalstudie abweicht und auf eben diesem Datensatz beruhen, wird bei der weiteren Auswertung -2.9%/K benutzt.

Bezüglich der Temperaturabhängigkeit unterscheiden sich die ausgewerteten Studien also erheblich, die großen, langfristigen akademischen Erfolg messenden Studien liefern im Einklang mit Büro- und Laborstudien (Seppänen, W J Fisk and Lei, 2006) um ca. einen Faktor 5 geringere Abhängigkeiten als die Interventionsstudien mit geringen Probandenzahlen, die im Wesentlichen Ausführungsgeschwindigkeit und Fehlerhäufigkeit reproduktiver Aufgaben in artifiziellen Settings messen.

Für die weiteren Betrachtungen wird ein ungewichteter Mittelwert aller angeführten Studien genutzt, womit sich für die Temperaturabhängigkeit der Leistung von Schülern ein Koeffizient von -1.3%/K ergibt.

Insgesamt zeigt der Review, dass es sehr lohnend ist, alle verfügbare wissenschaftliche Evidenz zur Einschätzung des angenommenen Zusammenhangs der Leistungsfähigkeit zu Ventilationsrate und Temperatur in die Bewertungen einzubeziehen.

Erweiterung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Lüftungssystemen um die Effekte von Temperatur und Ventilationsrate.

Im vorliegenden Leitfaden werden nicht nur die direkten Kosten von Lüftungssystemen miteinander verglichen, sondern auch die indirekten, die durch Leistungsminderung von Schülern und Lehrern aufgrund zu niedriger Luftqualität und zu hoher Temperatur entstehen können (Müller *et al.*, 2014).

Die Autoren geben für die jährlichen Ausgaben für Lehrpersonal im Bundesdurchschnitt einen Wert von 4800 €/Schüler an. Legt man diese Zahlen zugrunde, ergäben sich die im Folgenden beschriebenen und in Tabelle 4 zusammengefassten Mehrausgaben für die im Leitfaden betrachteten Lüftungsvarianten.

Stoßlüften in den Pausen wurde mit 15 m³/(h p) angenommen, der Koeffizienten für Büroarbeiten wurde Seppänen et al. entnommen (Seppänen, W. J. Fisk and Lei, 2006). Diese Kosten können natürlich nur für das Winterhalbjahr reklamiert werden, im Sommerhalbjahr gibt es ja zumindest kein durch niedrige Außentemperaturen verursachtes wesentliches Ventilationsproblem (Umweltbundesamt, 2017; Ostmann *et al.*, 2022; Schwarzbauer, 2022).

Damit ergibt sich eine Leistungsminderung von 2.5 %/Δln(VR) * ln(2) = 1.7 %, und ein entsprechender Schaden von 4800 €/(a s) * 0,017 / 2 (nur Winter) = 41 €/(a s).

In Klassenräumen mit CO2-geführter Dauer-Fensterlüftung liegt die Raumlufttemperatur ca. 2-3K unter der der Wand und aufgrund der hohen Wärmelast im Zeitmittel mindestens ca. 3-4K niedriger als in durch RLT/WRG belüfteten Räumen, in denen die WRG nach Empfehlungen von TGA Experten optimiert wird (Kaup, 2019b, 2019a, 2022; Kremer, Rewitz and Müller, 2021, 2022; AK Klimatechnik, 2022). Mit dem oben abgeleiteten mittleren Koeffizienten der Temperaturabhängigkeit von -1.3%/K ergäbe sich bei 3K höherer Raumlufttemperatur bei RLT Betrieb eine Minderleistung der Lehrkräfte von ca. 3.9%, was einem finanziellen „Schaden“ von 4800 €/(a s) * 0,039 = 187 €/(a s) entspräche.

Tabelle 4. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unter Einbeziehung der Kosten durch Leistungsminderung der Lehrkräfte aufgrund zu niedriger Luftwechselrate und zu hoher Temperatur, siehe Text.

	RLT zentral	RLT dezentral	Dauerlüftung	Stoßlüftung
Kapital	40	38	0	0
Strom	4	5	0	0
Wärme	39/**5**	42/**8**	66/**32** **2.4**	47/13 **1.2**
Wartung	15	19	0	0
Personal, zusätz.	(187)	(187)	0	41
Summe	**98/64**	**104/70**	**66/32** **2.4**	**88**/55 **56.2**

Man sieht, dass die Gesamtkosten unter Einbeziehung der Leistungsminderung für Lehrpersonal (ohne Temperatureffekt!) für Stoßlüften immer noch niedriger als bei RLT, aber 23-mal höher als bei Dauerlüften mit 30 m³/(h p) liegen.

Diese zusätzlichen Kosten fallen übrigens auch bei allen uns bekannten von TGA Experten bewerteten Neubauten oder Totalsanierungen an, die nach Passivhausstandard mit Ventilationsraten von < 20 m³/(h p) ausgelegt sind und ganzjährig über RLT gelüftet werden (Peper *et al.*, 2007; Jagnow and Gebhardt, 2017; Reiß *et al.*, 2017). Für diese Lüftungsvarianten ergäben sich die doppelten Zusatzkosten von 82 €/a und Schüler, so dass sich die Gesamtkosten für die RLT mehr als verdoppeln - auf ca. 146…152 €/a und Schüler. Damit wären sie ca. 149/2.4 = 62-mal höher als bei CO2-geführter Dauer-Fensterlüftung mit 30 m³/(h p) – bei niedrigerer Raumluftqualität.

Berücksichtigt man noch die allgemein bekannte Tatsache, dass während des Sommerhalbjahres Fenster dauerhaft ganz geöffnet werden können und damit die Ventilationsraten weiter steigen, ist kein Vergleich mehr möglich, da Dauerlüften dann Personalkosten im Bereich von ca. 0.5%/(a s) = 24 €/(a s) einspart – ca. so viel wie die Heizkosten während des Leerstandes in einem gut gedämmten Gebäuden.

Berücksichtigt man zusätzlich die Erhöhung der effektiven Ventilationsrate durch Quelllüftung, kommt man selbst unter Minimalannahmen zu einer weiteren Steigerung um ca. einen Faktor 1.4…2 (Sodec, F., 2003; Skistad *et al.*, 2004; Schaub *et al.*, 2021; Ostmann *et al.*, 2022). Dies würde aufgrund der verfehlten Leistungssteigerung des Lehrpersonals zu fehlenden Einsparungen von bis zu 1.7% führen, womit die Kosten der hier bilanzierten RLT mit denen von Passivhaus RLT gleichziehen würde.

Berücksichtigt man schließlich noch die durch zu hohe Temperaturen verursachten negativen Effekte, ergeben sich durch RLT/WRG rechnerisch verursachte „Schäden“ (Begriff aus Müller et al. 2014), die ca. 100-mal höher liegen als die bei CO2-geführte Fenster-Dauerlüftung, die Kosten liegen im Bereich 250 €/(a s) – ca. 5-mal höher als die gesamten Heizkosten des Gebäudes.

Referenzen

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

AK Klimatechnik, e. V. (2022) 'Lüftung unter Pandemiebedingungen'. Available at: https://downloads.fgk.de/399_P561_Lueftung_unter_Pandemiebedingungen_AK_Klimatechnik.pdf (Accessed: 29 October 2021).

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

ASHRAE (2005) 'ANSI/ASHRAE Standard 55-2005', p. 44.

Bakó-Biró, Z. *et al.* (2007) 'Ventilation Rates in Schools and Learning Performance'.

Bakó-Biró, Zs. *et al.* (2012) 'Ventilation rates in schools and pupils' performance', *Building and Environment*, 48, pp. 215–223. Available at: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.018.

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).

Coley, D., Greeves, R. and Saxby, B.K. (2007) 'The Effect of Low Ventilation Rates on the Cognitive Function of a Primary School Class', *International Journal of Ventilation*, 6:2, pp. 107–112. Available at: https://doi.org/DOI: 10.1080/14733315.2007.11683770.

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.

El Fouih, Y. *et al.* (2012) 'Adequacy of air-to-air heat recovery ventilation system applied in low energy buildings', *Energy and Buildings*, 54, pp. 29–39. Available at: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.008.

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.

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

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.

Greml, A. *et al.* (2008) 'Evaluierungen von Klassenzimmerlüftungen in Österreich und Erstellung eines Planungsleitfadens', *Berichte aus Energie und Umweltforschung*, 14.

Haverinen-Shaughnessy, U., Moschandreas, D.J. and Shaughnessy, R.J. (2011) 'Association between substandard classroom ventilation rates and students' academic achievement: Substandard classroom ventilation rates and students' academic achievement', *Indoor Air*, 21(2), pp. 121–131. Available at: https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00686.x.

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. (2022) 'Kommentar zu "Lüftung unter Pandemiebedingungen", AK Klimatechnik 2022'. Available at: https://www.ventilation-mainz.de/comments.html.

Helleis, F., Klimach, T. and Pöschl, U. (2023a) *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.7586167.

Helleis, F., Klimach, T. and Pöschl, U. (2023b) *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.

Humphreys, M.A. and Nicol, F. (2002) 'The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments', *Energy and Buildings*, 34(6), pp. 667–684. Available at: https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00018-X.

Hutter, H.-P. *et al.* (2013) 'Semivolatile compounds in schools and their influence on cognitive performance of children', *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 26(4). Available at: https://doi.org/10.2478/s13382-013-0125-z.

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).

IWU (2021) *Institut Wohnen und Umwelt (IWU): Energiebilanzen für Gebäude*. Available at: https://www.iwu.de/publikationen/fachinformationen/energiebilanzen/ (Accessed: 1 October 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. (2019a) 'Mehrdimensionale und relationale Optimierung der Wärmerückgewinnung (Teil 1)', *GI - Gebäudetechnik in Wissenschaft und Praxis*, 140(2/2019).

Kaup, C. (2019b) 'Mehrdimensionale und relationale Optimierung der Wärmerückgewinnung (Teil 2)', *GI - Gebäudetechnik in Wissenschaft und Praxis*, 140(3/2019).

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

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.

Kremer, M.T., Rewitz, K. and Müller, D. (2022) *Bewertung der Wärmerückgewinnung für die maschinelle Belüftung von Klassenräumen mittels dynamischer Simulationsmodelle*, *Aachen : RWTH Aachen University 1-14 (2022).* RWTH Aachen University, p. pages 1-14. Available at: https://doi.org/10.18154/RWTH-2022-01613.

Mendell, M.J. *et al.* (2016) 'Do classroom ventilation rates in California elementary schools influence standardized test scores? Results from a prospective study', *Indoor Air*, 26(4), pp. 546–557. Available at: https://doi.org/10.1111/ina.12241.

Mishra, A.K. *et al.* (2021) 'Respiratory performance of humans exposed to moderate levels of carbon dioxide', *Indoor Air*, 31(5), pp. 1540–1552. Available at: https://doi.org/10.1111/ina.12823.

Müller, B. *et al.* (2014) 'Leitfaden zur Raumluftkonditionierung in Schulen bei Neubau und Sanierung unter Beachtung ökonomischer, ökologischer und soziokultureller Aspekte'. Senatsverwaltung Stadtentwicklung und Wohnen, Berlin, Referat ZF V-I.

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).

Petersen, S. *et al.* (2016) ‘The effect of increased classroom ventilation rate indicated by reduced CO_2 concentration on the performance of schoolwork by children’, *Indoor Air*, 26(3), pp. 366–379. Available at: https://doi.org/10.1111/ina.12210.

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).

Ribic, W. (2008) ‘Nachweis des Zusammenhangs zwischen Leistungsfähigkeit und Luftqualität’, *Haustechnik HLH vdi Fachmedien*, 59(7).

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.

Sadrizadeh, S. *et al.* (2022) ‘Indoor air quality and health in schools: A critical review for developing the roadmap for the future school environment’, *Journal of Building Engineering*, 57, p. 104908. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104908.

Sakamoto, M. *et al.* (2022) ‘CO2 emission rates from sedentary subjects under controlled laboratory conditions’, *Building and Environment*, 211, p. 108735. Available at: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108735.

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

Schwarzbauer, C. (2022) ‘Forschungsprojekt “Sicheres Klassenzimmer”: Wirkung verschiedener Lüftungsmethoden hinsichtlich Luftqualität und Infektionsschutz im realen Schulunterricht’. Available at: https://doi.org/10.5281/zenodo.7496827.

Seifert, B. (1999) ‘Richtwerte für die Innenraumluft. Die Beurteilung der Innenraumluftqualität mit Hilfe der Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC-Wert)’. Springer-Verlag 1999, Bundesgesundheitsbl - Gesundheitsforsch - Gesundheitsschutz.

Seppänen, O., Fisk, W J and Lei, Q.H. (2006) ‘Room Temperature and Productivity in Office Work’.

Seppänen, O., Fisk, W. J. and Lei, Q.H. (2006) ‘Ventilation and performance in office work’, *Indoor Air*, 16(1), pp. 28–36. Available at: https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2005.00394.x.

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

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

Umweltbundesamt (2020) ‘Lüften in Schulen’.

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. *et al.* (2020) ‘The relationships between classroom air quality and children’s performance in school’, *Building and Environment*, 173, p. 106749. Available at: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106749.

Wargocki, P., Porras-Salazar, J.A. and Bahnfleth, W.P. (2017) 'Quantitative relationships between classroom CO2 concentration and learning in elementary schools'.

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.

Wargocki, P. and Wyon, D. (2006) 'Research report on HVAC on Student Performance'. ASHRAE journal Vol 48.

Wargocki, P. and Wyon, D. (2007a) 'The Effects of Moderately Raised Classroom Temperatures and Classroom Ventilation Rate on the Performance of Schoolwork by Children (RP-1257)', *HVAC&R Research*, 13(2), pp. 193–220. Available at: https://doi.org/10.1080/10789669.2007.10390951.

Wargocki, P. and Wyon, D. (2007b) 'The Effects of Outdoor Air Supply Rate and Supply Air Filter Condition in Classrooms on the Performance of Schoolwork by Children (RP-1257)', *HVAC&R Research*, 13(2), pp. 165–191. Available at: https://doi.org/10.1080/10789669.2007.10390950.

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).