Kommentar zur „Bewertung der Wärmerückgewinnung für die maschinelle Belüftung von Klassenräumen“ von M. Kremer, K. Rewitz und D. Müller (2021)

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

Version 1.1, 02. November 2021

Zusammenfassung

Bei der Belüftung von Klassenräumen während und jenseits der COVID-19-Pandemie (Pöschl et al. 2021) stellt sich die Frage, welchen Nutzen konventionelle Raumlufttechnik mit Wärmerückgewinnung (RLT/WRG) bringt. Nach unseren bisherigen Untersuchungen erscheint der Nutzen von RLT/WRG hinsichtlich der Energieeffizienz und Nachhaltigkeit des Schullüftens gering bis negativ (Helleis et al. 2021a, 2021b), wohingegen (Kremer et al. 2021) einen hohen Nutzen feststellen. Zur Klärung des Sachverhalts haben wir die Studie analysiert und den Einfluss verschiedener Annahmen und Eingabeparameter mit der Online-Version des AHULife-Berechnungsprogramms(„AHULife“ 2021) von Kremer et al. (2021) untersucht.

Bei Berücksichtigung praxisnaher Umweltbedingungen und Betriebsparameter (Solargewinne, Belegungszeiten, Volumenflüsse, Druckverluste) zeigt sich auch an dem von Kremer et al. (2021) untersuchten Beispiel eines perfekt gedämmten Klassenraums, dass Raumlufttechnik mit Wärmerückgewinnung (RLT/WRG) nach dem Stand der Technik und einschlägigen Lüftungsempfehlungen eher kontraproduktiv wäre, da der potentiell rückgewinnbaren Primärenergie von ca. 300 kWh/a elektrischer Mehraufwand äquivalent zu ca. 600 kWh/a Primärenergie gegenüberstünde. Grundsätzlich hochwirksame WRG-Anlagen würden selbst im Winter meist im Bypass arbeiten, die Gesamtenergiebilanz und damit der Beitrag zum Klimaschutz wäre negativ, selbst ohne Berücksichtigung grauer Energie für Herstellung und Wartung.

Demgegenüber kann das Energieeinsparungspotential durch Fassadensanierung eines schlecht gedämmten Klassenraums bis zu ca. 3300 kWh/a betragen (Fenster, Abdichtung, Dämmung, Wärmebrücken), wodurch insbesondere die durch WRG nicht kompensierbaren Energieverluste während des Leerstands minimiert werden können. Investitionen in Fassadensanierungen können mit sinnvollen Ergänzungen für effizientes und sparsames Fensterlüften und für die zunehmend wichtige Kühlung ergänzt werden (Abschattung, Quelllufteinlässe, Ventilatoren) (Helleis et al. 2021a). Nach unserer Einschätzung wäre dies mit vergleichbarem finanziellem Aufwand realisierbar, würde aber im Unterschied zu RLT/WRG tatsächlich zu substantiellen Energieeinsparungen führen.

Analyse von Kremer et al. (2021) mit der Online-Version von AHULife

Die Studie von Kremer et al. (2021) bezieht sich auf einen Klassenraum mit einer Belegung von 29 Personen, stündlichen Wetterdaten für den Standort Aachen und einer Frischluftzufuhr von 36 m³/h/p (Minimalanforderung nach (DIN EN 16798-3 2017) für Kat1 Räume, 1044m³/h total).

Laut Kremer et al. (2021) stammen die präsentierten Ergebnisse aus dem AHULife Berechnungsprogramm für raumlufttechnische Anlagen, welches im E.ON Energy Research Center der RWTH Aachen entwickelt wurde (https://www.ebc.eonerc.rwth-aachen.de/cms/E-ON-ERC-EBC/Forschung/OPEN-SOURCE/~sbmy/AHULife/).

Der Computercode dieses Berechnungsprogramms wurde von den Autoren nicht offengelegt, aber sie stellen eine webbasierte Online-Version zur Verfügung (https://ahulife.eonerc.rwth-aachen.de/). Wir nutzten diese Online-Version (nachfolgend AHULife genannt), um die Ergebnisse von Kremer et al. (2021) zu analysieren. Analog zu den Autoren führten wir die Berechnungen mit AHULife Online für Klimazone 5 und Testreferenzjahr 2010 durch. Daraus ergeben sich folgende Resultate und Feststellungen:

1. Endenergiebedarf Kremer et al. (2021) vs. AHULife

Kremer et al. (2021) weisen in ihrem Papier für das Abluftsystem und das Zu-Abluftsystem (beide ohne WRG) einen Endenergiebedarf Wärme von ca. 6000 kWh/a aus. Gibt man jedoch die Vorgabewerte von Kremer et al. (2021) in AHULife ein, so erhält man einen Wert von lediglich 2551 kWh/a (siehe Tabelle mit Daten-ID OV4QP6XX9T8EHEMO8BN4WTEJ3GYOMF). Abweichend von den Angaben in Kremer et al. (2021), konnten wir die ca. 6000 kWh/a mit AHULife nur durch eine 100% Belegung von 6 bis 18 Uhr reproduzieren, da die Einstellung Teillastminimum keine Auswirkung zeigte, zusätzlich mussten wir die personenbezogenen Wärmelasten von ca. 2.7 kW auf ca. 1.6 kW reduzieren.

Daten-ID: OV4QP6XX9T8EHEMO8BN4WTEJ3GYOMF

Mit der hier abgebildeten Data-ID können Sie über die Load-Funktion zu Beginn des Tools Ihre berechnete Konfiguration wiederherstellen, um einzelne Parametrierungen zu verändern. Die Data-ID wird in der csv-Datei gespeichert, welche Sie über den Button „Ergebnisse herunterladen" herunterladen können.

Energiebedarf

	Nutzenergiebedarf (kWh/a)	Endenergiebedarf (kWh/a)	Brennstoffbedarf (m³/a)
Kälteerzeuger	0	0	0
Wärmeerzeuger	2500	2551	240
Befeuchtung	0	0	0
Pumpen	0	0	0
Ventilatoren	592	592	0
Wärmerückgewinnung	0	0	0
Feuchterückgewinnung	0	0	0

2. Einfluss der mittleren Belegung auf den Endenergiebedarf

Kremer et al. (2021) nehmen an, dass die RLT mit 100% Volumenstrom über einen Zeitraum von 12 h pro Tag betrieben wird, aber nur eine mittlere Belegung aller Räume mit 70% (reduzierte Wärmegewinne) vorliegt. Schulen arbeiten aber typischerweise mit ganzen Klassen (Räume voll belegt), nicht benötigte Räume stehen leer und werden von moderner

bedarfsgeregelter RLT während dieser Zeit höchstens minimal belüftet. Die Korrektur lässt sich durch Reduktion der Betriebszeit und Erhöhung auf 100% Belegung implementieren (0.7 * 12 h = 8.4 h). Der mit AHULife ermittelte Endenergiebedarf der Heizung reduziert sich bei einer Belegung von 8-16 Uhr auf ca. 2377 kWh/a (Daten-ID V9FNKIU2FZ0UPWX693RT5OTC7W7N6B).

Daten-ID: V9FNKIU2FZ0UPWX693RT5OTC7W7N6B

Mit der hier abgebildeten Data-ID können Sie über die Load-Funktion zu Beginn des Tools Ihre berechnete Konfiguration wiederherstellen, um einzelne Parametrierungen zu verändern. Die Data-ID wird in der csv-Datei gespeichert, welche Sie über den Button „Ergebnisse herunterladen" herunterladen können.

Energiebedarf

	Nutzenergiebedarf (kWh/a)	Endenergiebedarf (kWh/a)	Brennstoffbedarf (m^3/a)
Kälteerzeuger	0	0	0
Wärmeerzeuger	2330	2377	224
Befeuchtung	0	0	0
Pumpen	0	0	0
Ventilatoren	678	678	0
Wärmerückgewinnung	0	0	0
Feuchterückgewinnung	0	0	0

3. Einfluss von Schulferien und Feiertagen auf den Endenergiebedarf

Kremer et al. (2021) berücksichtigen keine Schulferien und Feiertage. Dies entsprechende Anpassung wird durch eine weitere Reduktion der täglichen Betriebszeit implementiert ((1 – 13 w / 52 w) * 8 h = 6 h). Der mit AHULife ermittelte Endenergiebedarf reduziert sich bei einer Belegung von 9-15 Uhr auf ca. 1740 kWh/a (Daten-ID ND72VMAOQM4R5V69YOR3NHUTPXA1A2).

Daten-ID: ND72VMAOQM4R5V69YOR3NHUTPXA1A2

Mit der hier abgebildeten Data-ID können Sie über die Load-Funktion zu Beginn des Tools Ihre berechnete Konfiguration wiederherstellen, um einzelne Parametrierungen zu verändern. Die Data-ID wird in der csv-Datei gespeichert, welche Sie über den Button „Ergebnisse herunterladen" herunterladen können.

Energiebedarf

	Nutzenergiebedarf (kWh/a)	Endenergiebedarf (kWh/a)	Brennstoffbedarf (m^3/a)
Kälteerzeuger	0	0	0
Wärmeerzeuger	1705	1740	164
Befeuchtung	0	0	0
Pumpen	0	0	0
Ventilatoren	509	509	0
Wärmerückgewinnung	0	0	0
Feuchterückgewinnung	0	0	0

4. Einfluss von Sonneneinstrahlung und Beleuchtung auf den Endenergiebedarf

Kremer et al. (2021) berücksichtigen keine Wärmegewinne durch Sonneneinstrahlung (diffuse Globalstrahlung). Sie beträgt gemittelt in den Monaten November – Februar während der Nutzungszeit ca. 400 W bzw. 50 kWh/Monat, außerhalb der Nutzungszeit 64 W (siehe Anhang). Zudem berücksichtigen Kremer et al. (2021) keine Wärmegewinne durch elektrische Beleuchtung. Eine realistische Annahme dafür beträgt ca. 570 W während der Nutzungszeit (siehe Anhang). Unter Berücksichtigung dieser Punkte reduziert sich der mit

AHULife ermittelte Endenergiebedarf auf 961 kWh/a (Daten-ID U9MF5QU3PDOXTYVTWA68ZJC242XQHW).

Daten-ID: U9MF5QU3PDOXTYVTWA68ZJC242XQHW

Mit der hier abgebildeten Data-ID können Sie über die Load-Funktion zu Beginn des Tools Ihre berechnete Konfiguration wiederherstellen, um einzelne Parametrierungen zu verändern. Die Data-ID wird in der csv-Datei gespeichert, welche Sie über den Button „Ergebnisse herunterladen" herunterladen können.

Energiebedarf

	Nutzenergiebedarf (kWh/a)	Endenergiebedarf (kWh/a)	Brennstoffbedarf (m^3/a)
Kälteerzeuger	0	0	0
Wärmeerzeuger	941	961	90
Befeuchtung	0	0	0
Pumpen	0	0	0
Ventilatoren	509	509	0
Wärmerückgewinnung	0	0	0
Feuchterückgewinnung	0	0	0

5. Einfluss des personenbezogenen Volumenstroms auf den Endenergiebedarf

Anstelle des personenbezogenen Volumenstroms von 36 $m^3/h/p$, der von Kremer et al. (2021) angenommen wird, sehen einschlägige Empfehlungen und Normen für Schulen nur 25 $m^3/h/p$ vor (1000 ppm Zeitmittel, UBA, IRK, DIN EN 16798 Kat 2, typische professionelle Parametrierung von RLT für Zielwert 1000-1200 ppm). Dies lässt sich durch Reduktion des Volumenstroms auf 29 p * 25 $m^3/(h\ p)$ = 725 m^3/h berücksichtigen. Der mit AHULife ermittelte Endenergiebedarf reduziert sich dadurch auf 233 kWh/a (Daten ID LZ06S5IWX3J6HATZYBHIHC61MII8F2).

Daten-ID: LZ06S5IWX3J6HATZYBHIHC61MII8F2

Mit der hier abgebildeten Data-ID können Sie über die Load-Funktion zu Beginn des Tools Ihre berechnete Konfiguration wiederherstellen, um einzelne Parametrierungen zu verändern. Die Data-ID wird in der csv-Datei gespeichert, welche Sie über den Button „Ergebnisse herunterladen" herunterladen können.

Energiebedarf

	Nutzenergiebedarf (kWh/a)	Endenergiebedarf (kWh/a)	Brennstoffbedarf (m^3/a)
Kälteerzeuger	0	0	0
Wärmeerzeuger	228	233	22
Befeuchtung	0	0	0
Pumpen	0	0	0
Ventilatoren	298	298	0
Wärmerückgewinnung	0	0	0
Feuchterückgewinnung	0	0	0

6. Einfluss des Ventilator-Energiebedarfs auf den Endenergiebedarf

Für einfache Abluftanlagen berechnen Kremer et al. (2021) einen hohen Ventilator-Energiebedarf von ca. 300 bis 500 kWh/a, der auf Widerstände von Leitungsnetz, Filtern, Wärmetauschern und Schalldämpfern zurückzuführen sein dürfte. Der tatsächlich gemessene Leistungsbedarf für einfache Abluftanlagen bzw. Ventilator-Fensterlüftungssysteme mit verteilten Abluftleitungen und Abzugshauben, wie von Helleis et al. (2021) entwickelt und

angewandt, beträgt jedoch lediglich ca. 40 kWh/a @ 800 m³/h bzw. 80 kWh/a @ 1000 m³/h (Betriebszeit 1400 h/a). Noch geringere Energiebedarfe von ca. 20 kWh/a @ 1000m³/h wurden von (Bodenschatz 2021) für einfache Abluftventilatoren ohne Rohrleitungssystem gemessen. Für die Option „Abluftventilator“ errechnete AHULife fehlerhafte Werte. Nimmt man ein äquivalentes Zu-Abluftsystem ohne Verluste im Zuluftbereich an, so reduziert sich der mit AHULife ermittelte Endenergieverbrauch für elektrische Energie auf realitätsnahe 39 kWh/a (Bild unten, L77AOIFS1DZ0LMUYPZZ0X2XSVDQNZF).

Daten-ID: L77AOIFS1DZ0LMUYPZZ0X2XSVDQNZF

Mit der hier abgebildeten Data-ID können Sie über die Load-Funktion zu Beginn des Tools Ihre berechnete Konfiguration wiederherstellen, um einzelne Parametrierungen zu verändern. Die Data-ID wird in der csv-Datei gespeichert, welche Sie über den Button „Ergebnisse herunterladen“ herunterladen können.

Energiebedarf

	Nutzenergiebedarf (kWh/a)	Endenergiebedarf (kWh/a)	Brennstoffbedarf (m³/a)
Kälteerzeuger	0	0	0
Wärmeerzeuger	262	267	25
Befeuchtung	0	0	0
Pumpen	0	0	0
Ventilatoren	39	39	0
Wärmerückgewinnung	0	0	0
Feuchterückgewinnung	0	0	0

Die Resultate des systematischen Vergleichs der Berechnungen von Kremer et al. (2021) mit unseren Berechnungen unter Verwendung praxisnaher Eingabeparameter für AHULife lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Verwendet man praxisnahe Eingabeparameter für Nutzungszeiten (ohne Teilbelegung, mit Ferien) und berücksichtigt solare Gewinne und Beleuchtung, berechnet AHULife die Endenergiebedarfe für Wärme ~ 6-mal kleiner als die in Kremer et al. gezeigten.

- Berücksichtigt man zusätzlich die gängigen Normen und Empfehlungen zum Lüftungsbedarf an Schulen, werden die Endenergiebedarfe für Wärme ~20-mal kleiner berechnet (Abb. 1).

- Die Bedarfe für Elektroenergie werden ~10-mal kleiner berechnet, wenn man von dezentralen Systemen mit geringen Druckverlusten ausgeht (Klimach und Helleis 2021; MPIC-Mainz 2021).

- Die AHULife-Ergebnisse mit praxisnahen Annahmen stimmen überein mit einfachen mittelwertbasierten Abschätzungen des lüftungsbedingten Energiebedarfs (siehe Anhang) sowie mit den Ergebnissen eines detaillierten dynamischen Modells von (Helleis 2021).

- Mit praxisnahen Eingabeparametern liegt der Endenergiebedarf optimierter Abluftanlagen mit geringen Druckverlusten um 300 kWh/a und damit leicht unter dem Niveau von RLT/WRG (siehe Abb. 1). Hinsichtlich des Primärenergiebedarfs ergeben sich für einfache Anlagen mit geringen Druckverlusten deutliche Vorteile

(bis zu Faktor ~2). Bei einer konservativ angenommenen grauen Energie von ca. 0.5 kWh/€ würde mit der von Kremer et al. (2021) angegebenen nicht bedarfsgebundenen Annuität von >1000 €/a RLT/WRG etwa dreimal so viel Primärenergie verbrauchen wie einfache Abluftanlagen (ca. 214€/a).

- Besonders interessant ist der Vergleich verschiedener Wärmerückgewinnungsgrade, nachfolgend beispielhaft für 79%, 55% und 30% dargestellt (Abb.1). Tatsächlich steigt die Energieeffizienz mit sinkendem WRG-Wirkungsgrad, eine simple Folge abnehmender elektrischer Verluste und nicht nutzbarer Wärmegewinne.

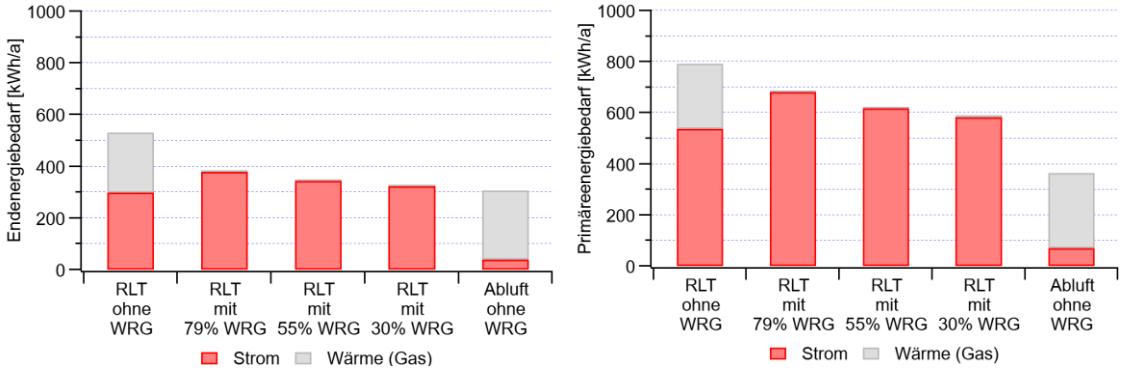

Abbildung 1: *End- und Primärenergiebedarfe für maschinelle Belüftung eines Klassenraums mit und ohne Wärmerückgewinnung (WRG) berechnet mit AHULife für praxisnahe Eingabeparameter. Potentiell rückgewinnbare Primärenergie ca. 300 kWh/a (vgl. grauer Balken in Abluft ohne WRG), elektrischer Mehraufwand für RLT/WRG äquivalent zu ca. 600 kWh/a Primärenergie (roter Balken RLT mit 79% WRG).*

Schlussfolgerungen

Die Heizenergiebedarfe für das Lüften von Klassenräumen werden von Kremer et al. (2021) viel zu hoch berechnet werden, was zu einer Verzerrung bzw. Umkehrung der entsprechenden Bilanzen führt. Daher können wir die von Kremer et al. (2021) dargestellten Zusammenhänge und Bewertungen nicht bestätigen.

Die von Kremer et al. (2021) für Zu-/Abluftanlagen angegebenen elektrischen Energiebedarfe mögen für konventionelle RLT ohne WRG zutreffen. Bei dezentralen Ventilator-Lüftungssystemen liegen die erreichbaren Werte hingegen etwa eine Größenordnung niedriger (Helleis et al. 2021). Daher sind Aussagen von Kremer et al. (2021) über den elektrischen Energieverbrauch und damit verbundene Kenngrößen nicht auf energieoptimierte Zu-/Abluftanlagen übertragbar.

Die vergleichenden Aussagen von Kremer et al. (2021) zu CO_2-Emissionen sind daher auf solche Anlagen ebenfalls nicht anwendbar. Dasselbe gilt für die Wirtschaftlichkeitsanalyse.

Die Berücksichtigung von solaren Gewinnen, Beleuchtung, Ferien, realistischen täglichen Betriebszeiten und Lüftungsbedarfen führen zu einer gegenteiligen Bewertung des Energiesparpotentials von RLT/WRG.

Die durch AHUlife berechneten größeren Energieeffizienzen bei kleineren Rückwärmezahlen (< 50%) zeigen, dass RLT/WRG nach Stand der Technik gerade im Schulneubau mit nahezu optimal gedämmten Räumen eher Verluste einfahren würde (Abb.1). Angesichts der hohen elektrischen Energiebedarfe würde sich stattdessen entweder Fensterlüften oder eine speziell auf die Anwendung „Schule“ abgestimmte Optimierung von RLT/WRG empfehlen – mit viel geringeren Druckverlusten durch größere Rohrquerschnitten, minimale Rohrlängen (dezentral), niedrige Rückwärmezahlen, größere Filter und reduzierte Schalldämpfung.

Die Ecodesign-Richtlinien (EU-Kommision 2014) scheinen hier durch ihre Anreize und Boni für RLT/WRG mit höheren Rückwärmezahlen, aber damit auch höheren Druckverlusten, in die falsche Richtung zu steuern – zumindest für durchschnittliche deutsche Witterungsverhältnisse und Wetter- bzw. Klimadaten.

Die Aussage von Kremer et al. (2021), dass WRG den Endenergiebedarf für Wärme um über 80% reduzieren kann, täuscht über die Tatsache hinweg, dass letztlich nur die insgesamt aufgewendete Endenergie- bzw. Primärenergiemenge relevant ist – wirtschaftlich ebenso wie bezogen auf CO_2-Emissionen und Klimaschutz. Laut AHULife liegt das Einsparpotential durch WRG für nicht optimierte RLT bei rund 30% Endenergie bzw. 14% Primärenergie. Für optimierte Abluftanlagen hingegen ergibt sich ein Einsparpotential von rund 54% Primärenergie (Abb. 1).

Grundsätzlich erscheint WRG in Räumen mit geringen Wärmelasten, aber hohen Stofflasten und langen Nutzungszeiten sinnvoll. Die Implementierung sollte daher eher auf dazu passende Anwendungen fokussiert werden (z.B. Krankenhäuser und Produktionsstätten).

Nach unseren Ergebnissen scheint der Einsatz von handelsüblicher RLT/WRG in Klassenräumen keinen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz in Deutschland leisten zu können. Die AHULife-Rechnungen zeigen aber auch, dass nicht die WRG an sich, sondern die Auslegung der RLT nach dem Stand der Technik und gängigen Normen ein Problem darstellt (Abb. 1).

Danksagung

Wir danken M. Kremer für Auskünfte zu der in Kremer et al. (2021) genutzten Modellkonfiguration von AHULife, sowie D. Müller und U. Pöschl für anregende Diskussionen.

Anhang

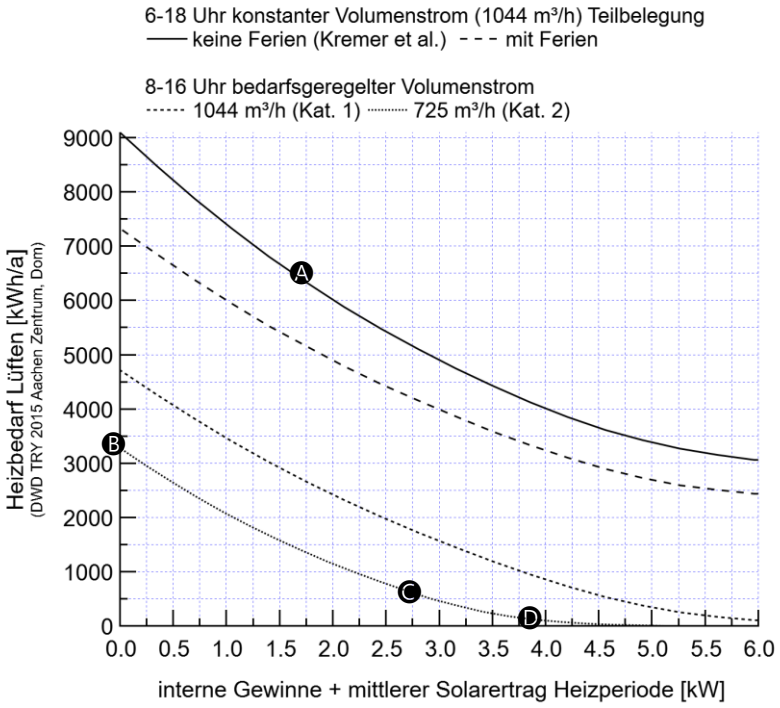

Abbildung A1: *Jährlicher Heizbedarf für die Zuluft in Abhängigkeit interner Wärmegewinne basierend auf den Lufttemperaturen des DWD Testreferenzjahres 2015 im Zentrum von Aachen (DWD 2021a). Das Lüften von teilbelegten Schulklassen mit einem Volumenstrom von 1044 m³/h wie in Kremer et al. (2021) beschrieben führt zu einem sehr hohen Wärmebedarf von ~6500 kWh (Ⓐ bei ~1,7 kW Personengewinn). Bei einer Lüftung mit 25m³/p (DIN EN 16798 Kat 2) und einer realistisch erscheinenden Lüftungsdauer von 8-16 Uhr sinkt der gesamte Wärmebedarf, ohne Berücksichtigung interner Gewinne, zur Erwärmung der Zuluft auf etwa 3200 kWh (Ⓑ). Die Abwärme der Personen, ca. 2,7 kW (Kremer et al. 2021), senkt den Energiebedarf auf ca. 600 kWh (Ⓒ). Die Berücksichtigung weiterer vorherrschender Wärmequellen wie Beleuchtung (~500 W) und Sonneneinstrahlung (~400 W) lässt die benötigte Energie unter 200 kWh (Ⓓ) sinken. Die hier gezeigten Daten wurden mit einem online zugänglichen Tabellenkalkulationsprogramm berechnet (https://bit.ly/WRG2SCL).*

Einfache Abschätzung des lüftungsbedingten Heizbedarfs

Die Gewinne aus diffuser Globalstrahlung wurden aus Mittelwerten der Monate November bis Februar für den Einfall auf senkrechte Flächen Ost / West berechnet, (24 + 17 + 20 + 33) / 4 = ca. 24 kWh/(m² m) (DWD 2021b; IWU 2021). Für 8 m² Fensterfläche mit einem Transmissionskoeffizienten von 50% (Neubau) ergeben sich 24 kWh/(m² m) * 8 m² * 0.5 = 96 kWh/m. Da die Gewinne tagsüber anfallen, ergibt sich eine mittlere Leistung von (96 kWh/m) / (8 h * 30 d/m) = 400 W. Während der Nutzungszeit von ca. 6 h/d und 21 d/m betragen die Gewinne 400W * 6 h/d * 21 d = 50.4 kWh. Der Rest wird als mittlere kontinuierliche Leistung zu (96 – 50.4) kWh/m / (24 h/d * 30 d/m) = 64 W angesetzt.

Die Beleuchtungsgewinne werden im Winter während der Nutzung mit 16 Leuchtstoffröhren je 36 W, abgerundet ca. 500 W angenommen.

Für alle DWD Stationen in Deutschland ergeben sich für eine Heizgrenze von 15°C (VDI 3807 2013, S. 38) für das Jahr 2020 Mediane von 261 Tage Heizperiode und 3280 Kelvintage, also ca. 12.57 K Differenz zur Außentemperatur (DWD 2021b; IWU 2021).

Für den mittleren Lüftungsverlust ergibt sich:

$$P_vent \ = 0.34 Wh/(m^3\ K) * (1044\ m^3)/h * \ 12.57\ K = 4460\ W$$

Die Anzahl der Heizschultage bzw. Heizschulstunden (8h/d) während der Heizperiode betragen:

$$t\ [h/a] = 261\ hd/a\ \ /\ 365\ d/a * \ 195\ sd = 139\ hsd/a = 1116\ hsh/a,$$

wobei hd Heiztage, sd Schultage, hsd Heizschultage und hsh Heizschulstunden sind.

Für die Wärmelasten nehmen wir analog zu Kremer et al. ca. 2700 W (Personen), aber zusätzlich 400 W Globalstrahlung und 500 W Beleuchtung (s.o.). Damit folgt für die Wärmelast:

$$P_{load} \ \sim 3600\ W$$

Die Bilanz bzw. der lüftungsbedingte Heizenergiebedarf ohne WRG beläuft sich damit auf

$$Q_{heat} \ \sim (4460 - \ 3600) W * 1116\ hsh/a = 960\ kWh/a$$

Dieser Wert stimmt gut überein mit dem von AHULife berechneten Wert von 961 kWh (36m³/(p h)) nach Korrektur für solare Gewinne und realistische Belegungszeiten.

Einfache Abschätzung des Energieeinsparpotentials durch Fassadensanierung im Altbau

Mit den Daten in (Thiel und Riedel 2011) lässt sich für die Fassade eines Klassenraums (8 m x 3 m = 24 m², ½ Isolierverglasung, ½ 2-Schaliges-Mauerwerk) im Altbau (1980; Stahl/Alufensterrahmen) ein Wärmeverlust von ca. 2.5 W/(m² K) und im sanierten Gebäude (nach 2007; Kunststofffensterrahmen) von 0.75 W/(m² K) annehmen. Der mittlere Wärmeverlust über die Fassade ergibt sich:

$$Q_{trans,alt} \ \sim 2.5 \mathrm{W/(m^2\ K)} \ * \ 3280\ \mathrm{K\ d/a} \ * \ 24\ \mathrm{h/d} \ * \ 24\ \mathrm{m^2} = 4723\ kWh/a$$

$$Q_{trans,neu} \ \sim 0.75 \mathrm{W/(m^2\ K)} \ * \ 3280\ \mathrm{K\ d/a} \ * \ 24\ \mathrm{h/d} \ * \ 24\ \mathrm{m^2} = 1417\ kWh/a$$

Es ergibt sich ein Einsparpotential von ca. 3306 kWh/a.

Referenzen

AHULife. (2021). https://ahulife.eonerc.rwth-aachen.de/. Zugegriffen: 2. Oktober 2021

Bodenschatz, E. (2021, Januar 21). Wie wird ein Klassenraum mit wenig Kosten und Wartungssorgen Corona sicher? (privat per E-Mail)

DIN EN 16798-3. (2017). *Energetische Bewertung von Gebäuden_- Lüftung von Gebäuden_- Teil_3: Lüftung von Nichtwohngebäuden_- Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme*. Beuth Verlag GmbH. https://doi.org/10.31030/2596017

DWD. (2021a). Klimaberatungsmodul - Login. https://kunden.dwd.de/obt/. Zugegriffen: 8. Oktober 2021

DWD. (2021b). Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Leistungen - Kostenfreie Gradtagzahlen/Gradtage. https://www.dwd.de/DE/leistungen/gtz_kostenfrei/gtz_kostenfrei.html. Zugegriffen: 4. Juli 2021

EU-Kommision. (2014). Lüftungsanlagen. *EU-Kommission - European Commission*. Text. https://ec.europa.eu/info/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/energy-label-and-ecodesign/energy-efficient-products/ventilation-units_en. Zugegriffen: 6. Oktober 2021

Helleis, F. (2021). Vergleich verschiedener Sanierungsmaßnahmen zum Wärmeschutz von Klassenzimmern, Büroräumen und Privatwohnungen (in Vorbereitung).

Helleis, F., Klimach, T., & Pöschl, U. (2021a). *Vergleich von Fensterlüftungssystemen und anderen Lüftungs- bzw. Luftreinigungsansätzen gegen die Aerosolübertragung von COVID-19 und für erhöhte Luftqualität in Klassenräumen*. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.5070422

Helleis, F., Klimach, T., & Pöschl, U. (2021b, September 28). *Lüftung von Schulräumen - ein frischer Blick von draußen*. Gehalten auf der 59. Sitzung der IRK-UBA (Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamt), Online Veranstaltung. https://ventilation-mainz.de/HelleisP%C3%B6schl_VentilationWRG_MPIC_IRK-2021-09-28_print.pdf. Zugegriffen: 29. Oktober 2021

IWU. (2021). Institut Wohnen und Umwelt (IWU): Energiebilanzen für Gebäude. https://www.iwu.de/publikationen/fachinformationen/energiebilanzen/. Zugegriffen: 1. Oktober 2021

Klimach, T., & Helleis, F. (2021, Januar). Vorläufige Dokumentation Abluftanlage für Klassenräume. https://ventilation-mainz.de/Doku_L_ftung_20210121.pdf. Zugegriffen: 18. Mai 2021

Kremer, M. T., Rewitz, K., & Müller, D. (2021). *Bewertung der Wärmerückgewinnung für die maschinelle Belüftung von Klassenräumen. Aachen : RWTH Aachen University* (Bd. E.ON Energy Research Center, S. pages 14 Seiten : Diagramme). RWTH Aachen University. https://doi.org/10.18154/RWTH-2021-07252

MPIC-Mainz. (2021, Oktober 7). Merkblatt zur Dimensionierung von Ventilator-Fensterlüftungssystemen für Klassenräume entwickelt am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz. https://ventilation-mainz.de/MPIC-Merkblatt-Ventilatorfensterl%C3%BCften_V2.0_20211008.pdf. Zugegriffen: 28. Oktober 2021

Pöschl, U., Helleis, F., Klimach, T., Hopfe, C., McLeod, R., Hoffmann, B., & Witt, C. (2021, September 30). Wissenschaftliche Stellungnahme und Empfehlung für Ventilator-Fensterlüften zum Infektionsschutz gegen die Aerosolübertragung von COVID-19 und für erhöhte Luftqualität in Klassenräumen. https://www.mpic.de/5040628/statement-empfehlung-fensterlueften. Zugegriffen: 28. Oktober 2021

Thiel, D., & Riedel, D. (2011). *Typisierte Bauteilaufbauten - Präzisierung der Pauschalwerte für Wärmedurchgangskoeffizienten aus der Bekanntmachung der Regeln der Datenaufnahme im Nichtwohngebäudebestand: Endbericht*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag. https://www.irbnet.de/daten/rswb/11109001108.pdf. Zugegriffen: 12. Juli 2021

VDI 3807. (2013). *VDI 3807 Blatt 1 - Verbrauchskennwerte für Gebäude - Grundlagen*. https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3807-blatt-1-verbrauchskennwerte-fuer-gebaeude-grundlagen-1. Zugegriffen: 3. Oktober 2021