

RWTH-EBC 2021-005

Bewertung der Wärmerückgewinnung für die maschinelle Belüftung von Klassenräumen

¹Martin Kremer, ¹Kai Rewitz, ¹Dirk Müller

¹ Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik (EBC), RWTH Aachen University



This work is licensed under a
[Creative Commons Attribution 3.0 Germany License](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/de/).

Please cite this article as:

M. Kremer, K. Rewitz, D. Müller, *Bewertung der Wärmerückgewinnung für die maschinelle Belüftung von Klassenräumen*, White Paper
RWTH-EBC 2021-005, Aachen, 2021, DOI: [10.18154/RWTH-2021-07252](https://doi.org/10.18154/RWTH-2021-07252)

RWTH Aachen University
E.ON Energy Research Center
Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate (EBC)
Mathieustr. 10, 52074 Aachen

T +49 241 80-49760, F +49 241 80-49769

ebc-office@eonerc.rwth-aachen.de, www.eonerc.rwth-aachen.de/ebc

Bewertung der Wärmerückgewinnung für die maschinelle Belüftung von Klassenräumen

Martin Kremer¹, Kai Rewitz¹, Dirk Müller¹

¹Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, E.ON Energieforschungszentrum, RWTH Aachen

Zusammenfassung

Im Rahmen der durch COVID-19 verursachten Pandemie wird in vielen Bundesländern über Nachrüstung von Schulen mit Lüftungstechnik diskutiert. Dabei werden am Markt unterschiedliche Systeme angeboten, die sich von einem sehr einfachen Abluftsystem bis hin zu Zu- und Abluftanlagen mit Filtern, Schalldämpfern und Optionen zur Wärmerückgewinnung erstrecken. In diesem Beitrag wird auf Basis eines Berechnungsmodells untersucht, wie sich der Einsatz einer Wärmerückgewinnung in einem Klassenraum energetisch und wirtschaftlich auswirkt. Zusätzlich werden die CO₂-Vermeidungskosten einer Wärmerückgewinnung ermittelt, so dass eine Investition in diese Technik im Kontext der Energiewende bewertet werden kann. Es zeigt sich, dass durch eine Wärmerückgewinnung der Endenergiebedarf für die Wärme um mehr als 80% reduziert werden kann. Die CO₂-Vermeidungskosten sind zu vernachlässigen beziehungsweise negativ, obwohl die Randbedingungen durch die geringeren Betriebsstundenzahlen ungünstiger als bei vielen anderen Anwendungen der Lüftungs- und Klimatechnik sind. Reine Abluftanlagen führen unter den gemachten Annahmen zu den geringsten Kosten über den Lebenszyklus, allerdings sind hier sowohl im Komfort als auch in der Akustik Nachteile zu erwarten. Wie bei allen Lösungen ohne Wärmerückgewinnung muss bei tieferen Außentemperaturen von Zugluftproblemen ausgegangen werden, da die Zuluft nahezu mit der Außentemperatur in den Raum eingebracht werden muss und reine Abluftanlagen außerdem über kein Luftverteilungssystem verfügen. Weiterhin können ohne Verwendung von Schalldämpfern sowohl das Ventilatorgeräusch als auch Geräusche der äußeren Umgebung (Straßenverkehr, Sportplatz etc.) in den Klassenraum übertragen werden. In dieser Studie wurden weder die Transmissionswärmeverluste noch die Gewinne durch solare Einstrahlung in einem Klassenraum berücksichtigt, da diese Effekte von der baulichen Ausführung der Schule, der Verwendung eines Sonnenschutzes und der Ausrichtung des Klassenraums abhängen. Aus den Daten der Studie kann auch ermittelt werden, dass durch die Nachrüstung einer Lüftungsanlage mit Zu- und Abluft sowie einer Wärmerückgewinnung Mehrkosten von ca. 30 €/a/Schüler entstehen.

Schlagwörter

Corona — Schullüftung — Wärmerückgewinnung — Wirtschaftlichkeit — CO₂-Vermeidungskosten

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Berechnungsgrundlage der Studie	2
2.1	Berechnung der Energiebedarfe	2
2.2	Randbedingungen der Studie	4
3	Ergebnisse	7
3.1	Voll-Belegung des Klassenraums	7
3.2	Halbe Belegung des Klassenraums	11
4	Diskussion	12
5	Zusammenfassung	12
	Danksagung	13

1 Einleitung

Die anhaltende Pandemie, verursacht durch den Coronavirus SARS-CoV-2, führt zu einer intensiven Diskussion über die Nachrüstung von Lüftungstechnik in Schulen, welche die Belastung

der Raumluft mit möglicherweise virenbelasteten Aerosolen verringern kann. Aufgrund der Ausbreitung der Delta-Variante und der eingeschränkten Impfmöglichkeiten für Kinder und Jugendliche hat die Lüftung in Klassenräumen zum Schutz der Schüler und Schülerinnen weiterhin eine große Bedeutung. Eine Studie der Universität Stuttgart hat gezeigt, dass die Zufuhr von Außenluft das Infektionsrisiko in Klassenräumen deutlich senkt [1].

Auch die Nutzung von Luftreinigern (Sekundärluftgeräte mit geeigneten Filtern) ist für eine Minderung des Infektionsrisikos sinnvoll, allerdings leisten diese Geräte keinen Beitrag zu einer immer notwendigen Außenluftversorgung eines Raums und können daher nur als additive Maßnahme eingesetzt werden. Da diese Geräte in der Regel nur einen geringen Energiebedarf für den Betrieb eines Ventilators aufweisen, werden Luftreiniger in dieser Analyse nicht betrachtet.

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) hat eine „Richtlinie für die Bundesförderung: Corona-gerechte, stationäre raumlufttechnische Anlagen“ veröffentlicht [2]. Hiermit wird die Grundlage geschaffen, um den Einbau von raumlufttechnischen (RLT-) Anlagen in Schulen zur kontrollierten Lüftung zu fördern. Die Förderung bezieht sich dabei auf RLT-Anlagen, welche stationär verbaut sind, über eine Wärmerückgewinnung verfügen, sowie einen maximalen Umluftanteil von 50% aufweisen.

In dieser simulationsbasierten Studie wird das energetische und wirtschaftliche Potential der Wärmerückgewinnung für die Versorgung eines Klassenraums mit Außenluft untersucht. Hierzu werden unter gleichen Randbedingungen verschiedene Lüftungssysteme für einen Klassenraums hinsichtlich ihres jährlichen Energiebedarf und der annualisierten Kosten bewertet. Zusätzlich werden die CO₂-Vermeidungskosten für die Wärmerückgewinnung berechnet.

2 Berechnungsgrundlage der Studie

Grundlage der hier vorgestellten Studie bildet ein am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik entwickeltes Berechnungswerkzeug für RLT-Anlagen (AHULife) [3, 4, 5]. AHULife ermittelt auf Basis der Konfiguration der RLT-Anlage, den klimatischen Randbedingungen sowie dem Nutzungsprofil des Gebäudes den jährlichen Energiebedarf zur Konditionierung und Bereitstellung der Zuluft durch die RLT-Anlage. Hierbei werden Teillastzustände, welche bei vielen Anlagen häufig über das Jahr auftreten, berücksichtigt. Die Nutzenergiebedarfe der RLT-Anlage werden stündlich aufgelöst ermittelt und über das Jahr integriert. Durch eine integrierte Modellierung der Energieversorgungssysteme für Wärme und Kälte werden die benötigten Endenergiebedarfe parallel zu den Nutzenergiebedarfen ermittelt. Diese Endenergiebedarfe dienen der Berechnung der jährlichen bedarfsgebundenen Kosten der RLT-Anlage und erlauben so eine wirtschaftliche Bewertung der eingesetzten An-

lagentechnik. Zusammen mit Annahmen für die notwendige Investition für eine Nachrüstung einer Anlage, sowie den Wartungs- und den Instandhaltungskosten, können die jährlichen Gesamtkosten und die daraus resultierenden Lebenszykluskosten einer projektierten RLT-Anlage bestimmt werden.

2.1 Berechnung der Energiebedarfe

Die Ermittlung der Energiebedarfe basiert auf der VDI-Richtlinie 2067 [6]. Für die Raumluftbedingungen wird dabei ein Komfort-Bereich bezüglich Temperatur und Feuchte definiert. Ausgehend von den Luftbehandlungsstufen einer RLT-Anlage können die Außenluftbedingungen in unterschiedliche Zonen eingeteilt werden, welche die nötigen Konditionierungsprozesse beschreiben. In Abb. 1 ist exemplarisch für eine Vollklimaanlage die Einteilung der Außenluftgebiete in einem HX-Diagramm dargestellt. In grün ist hierbei die Komfort-Zone für den Raum hinterlegt. Anhand dieser Zonierung wird zu jeder Stunde des Jahres bestimmt, welche Prozessschritte zur Konditionierung der Außenluft in der RLT-Anlage durchgeführt werden müssen. In der Berechnung wird anschließend der Energiebedarf für alle Komponenten der RLT-Anlage unter exakter Einhaltung der Komfortbedingungen im Raum berechnet. Hierbei werden interne Lasten sowie die Wärme- und Feuchteabgabe von Personen berücksichtigt. Die Soll-Zulufttemperatur ergibt sich somit aus dem Komfortbereich der Raumluftzustände abzüglich der internen Lasten.

Ist in der RLT-Anlagenkonfiguration eine Komponente zur Luftkonditionierung nicht vorgesehen, so wird diese Prozessstufe bei der Zonierung ausgelassen. In diesem Fall können die Komfortbedingungen im Raum nicht mehr zu allen Zeitpunkten des Jahres alleine durch den Betrieb der RLT-Anlage eingehalten werden und müssen daher durch andere technische Systeme bereitgestellt werden. Wird beispielsweise in einem Klassenraum nur ein Abluftventilator betrieben, der einen definierten Volumenstrom an Luft aus dem

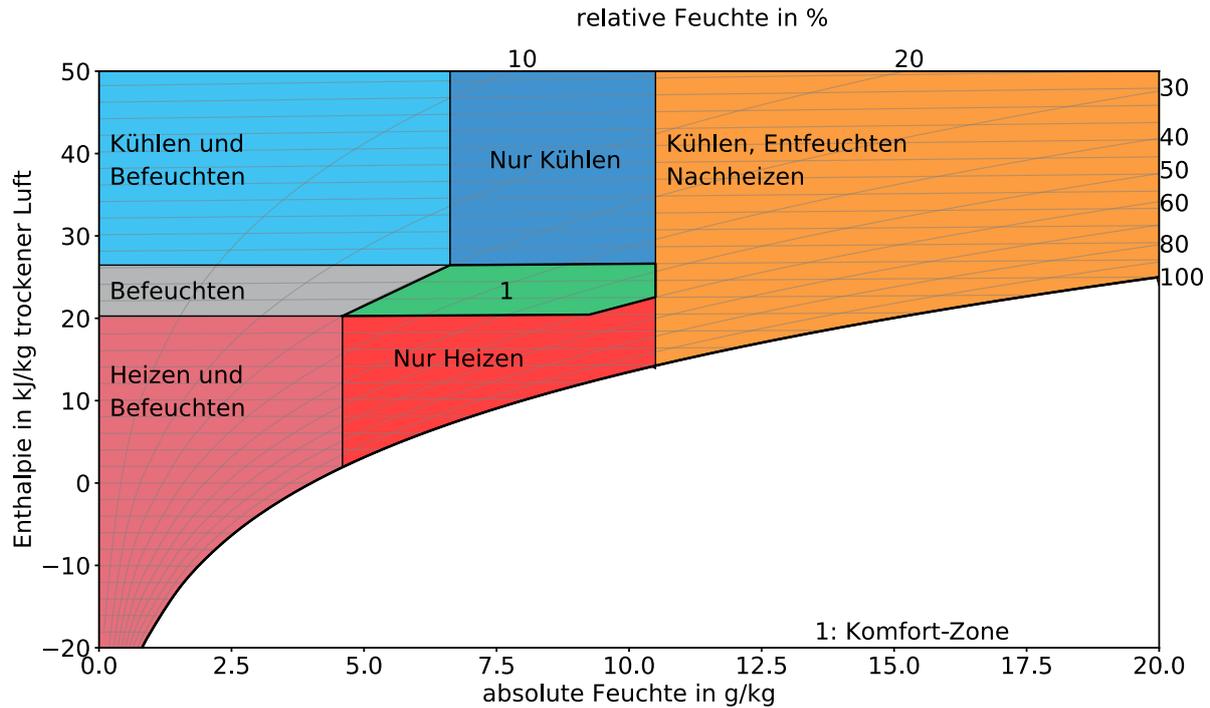


Abbildung 1 – Exemplarische Zonierung nach VDI 2067 [6]

Raum entfernt, wird dieser extrahierte Luftvolumenstrom durch Außenluft ersetzt. Diese Außenluft strömt durch Undichtigkeiten in der Fassade oder durch definierte Öffnungen in den Klassenraum. Bei tieferen Außentemperaturen entsteht ein zusätzlicher Heizenergiebedarf, der üblicherweise durch die im Klassenraum installierten Heizkörper gedeckt wird. Ohne den Einsatz der Heizkörper würden sich zu geringe Raumlufttemperaturen in dem Klassenraum einstellen. Eine Wärmerückgewinnung in einer RLT-Anlage senkt den Energiebedarf des Raums, da die warme Abluft direkt für die Erwärmung der Außenluft genutzt wird.

In dieser Studie werden keine Wärmeverluste durch Transmission im Klassenraum berücksichtigt. Es handelt sich damit um einen „optimal“ gedämmten Raum, in dem nur die Lüftungswärmeverluste bilanziert werden müssen. Gleichzeitig wird ein Eintrag von solarer Strahlung in den Klassenraum durch transparente Flächen nicht berücksichtigt, obwohl diese Wärmegewinne insbesondere in der Übergangszeit zu geringeren Heizenergiebedarfen führen. Die positiven

Auswirkungen einer Wärmerückgewinnung steigen mit zunehmenden Transmissionswärmeverlusten und sinkenden solaren Wärmegewinnen, da mit beiden Effekten die Betriebsstundenanzahl der Wärmerückgewinnung über das Jahr zunimmt. Der Einfluss dieser beiden Aspekte kann allerdings nur gebäudebezogen bewertet werden und ist daher nicht Teil dieser Studie.

Außerdem werden in diesem Beitrag nur Fälle einer maschinellen Lüftung betrachtet. Bei einer freien Lüftung wird die Raumluft durch Öffnung der Fenster mit Außenluft verdünnt. Freie Lüftung kann über einen definierten Zeitraum als sogenannte Stoßlüftung oder bei durchgehend geöffneten Fenstern als Dauerlüftung genutzt werden. Der sich einstellende Außenluftvolumenstrom in einem Klassenraum ist von den Öffnungsgeometrien und Orientierungen der eingesetzten Fenster, der Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Innenraumluft und den Windverhältnissen abhängig. Eine genaue Berechnung dieses Volumenstroms ist daher nur mit sehr aufwändigen Modellen möglich, die hier nicht behandelt werden. Sollten die Nut-

zer die Fenster so verwenden, dass sich der in dieser Studie angesetzte Luftvolumenstrom einstellt, entsprechen die Heizenergiebedarfe dem Fall „Abluft ohne WRG“. Die Strombedarfe entfallen vollständig. In der Praxis können bei der freien Lüftung über Fenster aufgrund der vielen Einflussfaktoren exakte Volumenströme kaum sichergestellt werden, so dass bei ausreichender Lüftung im Mittel von höheren Volumenströmen und damit auch höheren Heizenergiebedarfen ausgegangen werden muss.

In dieser Studie wird keine Kühlung der Zuluft vorgesehen. Obwohl es durch die Wärmeabgabe der Personen zu einer Überhitzung der Räume kommen kann, wird dieser Aspekt bei der Bewertung der unterschiedlichen Lösungen nicht betrachtet. In der Praxis kann davon ausgegangen werden, dass bei einer Überhitzung der Räume zusätzlich Fenster geöffnet werden, falls es die äußeren Umstände (Wetter, Schall, etc.) zulassen.

Das Planungstool AHULife ist online zur freien, nicht-kommerziellen Nutzung verfügbar unter: <https://ahulife.eonerc.rwth-aachen.de/>. Alle Berechnungen können nachvollzogen und durch eigene Berechnungen ergänzt werden.

2.2 Randbedingungen der Studie und Anlagenkonfigurationen

Zunächst sollen die Randbedingungen für den zu untersuchenden Klassenraum vorgestellt werden. Diese bilden die Grundlage für die internen Lasten, sowie die Auslegung der zu vergleichenden Lüftungskonzepte. Anschließend werden die unterschiedlichen Vergleichsszenarien erläutert.

2.2.1 Interne Lasten und Belegungsprofil

Im Rahmen der Studie wird ein Klassenzimmer mit einer Belegung von 28 Schülern und einem Lehrer am Standort Aachen zu Grunde gelegt. Hieraus ergeben sich mit Hilfe der Schweizer Richtlinie SIA 2024 [7] die in Tab. 1 dargestellten internen Lasten.

Tabelle 1 – Interne Lasten im Klassenraum bei Voll-Belegung

	Thermische Lasten	Feuchtelasten
belegungsabhängig	2697 W	2,3 kg/h
konstant	24,8 W	0,04 kg/h

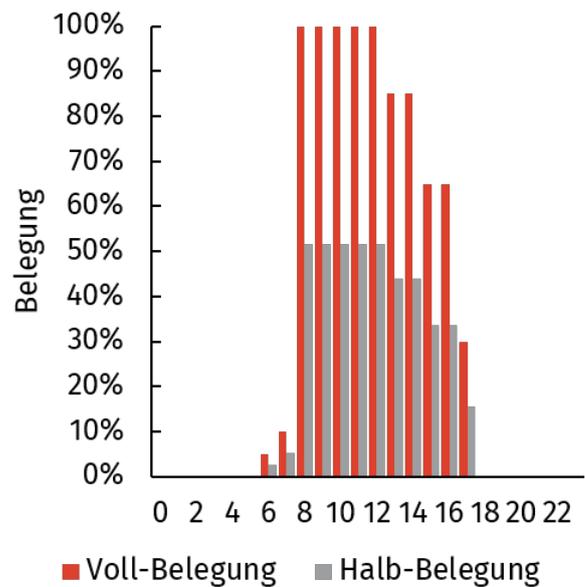


Abbildung 2 – Belegungsprofil des Klassenraums

Für das Belegungsprofil wird angenommen, dass es sich um eine weiterführende Schule mit einem anteiligen Unterricht am Nachmittag handelt. Ein Betrieb am Wochenende ist nicht vorgesehen. Das Belegungsprofil ist in Abb. 2 dargestellt. Bei einer Belegung von 100% befinden sich alle Schüler sowie der Lehrer im Raum. Zu allen anderen Zeitpunkten wird die Belegung anhand des Profils anteilig reduziert. Entsprechend liegen anteilig reduzierte, interne Lasten im Klassenraum an.

Die Komfortbedingungen werden für den Klassenraum wie folgt definiert.

- minimale Raumlufttemperatur: 20 °C
- maximale Raumlufttemperatur: 26 °C
- minimale Raumluftfeuchte: 40% relative Feuchte (r. F.)
- maximale Raumluftfeuchte: 60% relative Feuchte (r. F.)

Sofern mit der RLT-Anlagenkonfiguration möglich, werden die Raumbedingungen innerhalb dieses Grenzes gehalten. Eine Be- und Entfeuchtung der Luft wird in dieser Studie nicht betrachtet.

2.2.2 Auslegung der RLT-Anlagen

Zur Vergleichbarkeit der Energiebedarfe und Kosten werden für alle Vergleichsfälle die Volumenströme der RLT-Anlagen gleich dimensioniert. Nach DIN EN 16798 [8] wird ein Luftvolumenstrom von $36 \text{ m}^3/\text{h}$ pro Person (Kategorie 1) für den Nenn-Volumenstrom der RLT-Anlagen angenommen. Der Volumenstrom wird dabei für alle Vergleichsfälle konstant auf dem Nenn-Volumenstrom gehalten, sofern eine Belegung im Raum vorliegt. Ohne Belegung wird die RLT-Anlage abgeschaltet.

Für eine gute Vergleichbarkeit werden wesentliche technische Merkmale der RLT-Anlagen als identisch angenommen. Neben den Ventilatoren verfügen alle zu vergleichenden RLT-Anlagen über Schalldämpfer auf der Raumseite zur Minderung der Schallbelastung durch die Ventilatoren und äußere Einflüsse. Konfigurationen von Anlagen, welche über eine maschinelle Einbringung der Luft verfügen, sind mit einem Vor- und einem Endfilter im Zuluftstrang ausgestattet. Der Abluftstrang verfügt lediglich über einen Vorfilter zum Schutz des Ventilators. Die Nenn-Daten der Komponenten sind in Tab. 2 dargestellt und werden für alle Variationen im Rahmen der Studie gleich angenommen.

2.2.3 Anlagenkonfigurationen

Nachfolgend werden die einzelnen Varianten der RLT-Anlagen vorgestellt und erläutert. Eine Übersicht über alle Varianten ist in Tab. 3 dargestellt. Eine genauere Erläuterung des Lüftungskonzeptes wird im jeweiligen Abschnitt vorgestellt. Alle Varianten werden für einen voll belegten Klassenraum, wie oben dargestellt, und

einen zu 50% belegten Klassenraum (14 Schüler und ein Lehrer) untersucht. Hierbei reduzieren sich die internen Lasten (Tab. 1). Die Auslegungsdaten wurden nicht verändert und der Nenn-Volumenstrom konstant beibehalten.

Zu/Ab ohne WRG

Diese Variante stellt eine RLT-Anlage mit Zu- und Abluft dar. Die frische Außenluft wird über einen Zuluftventilator dem Raum zugeführt und die Raumluft über einen Abluftventilator abgeführt. Eine Wärmerückgewinnung ist nicht implementiert. Die Gewährleistung der minimalen Raumtemperatur erfolgt über Heizkörper im Klassenraum und der Heizenergiebedarf wird mit stündlicher Auflösung über das Jahr integriert.

Zu/Ab mit WRG

Im Vergleich zur Variante Zu/Ab ohne WRG wird die in dieser Variante konfigurierte RLT-Anlage mit einer Wärmerückgewinnung ausgestattet. Die Wärmerückgewinnung wird durch einen Platten-Wärmeübertrager realisiert. Mit Hilfe der Auslegungssoftware WinPoly der Firma Polybloc [9] wird ein Platten-Wärmeübertrager (Kreuzstrom) für den Nenn-Volumenstrom ausgelegt, sodass dieser die ErP-Richtlinie 2018 erfüllt und einen Druckverlust unter 100 Pa aufweist. Die Nenn-Daten des Wärmeübertragers (W1515.100350-CA) sind in Tab. 4 gelistet. Ein zusätzlicher Heizwärmebedarf wird wieder über Heizkörper bereitgestellt, da in der Anlage kein Nacherhitzer vorgesehen ist.

Zu/Ab mit reduzierter WRG

Die Konfiguration der RLT-Anlage ist analog zum Fall Zu/Ab mit WRG aufgebaut. Lediglich die Auslegung des Platten-Wärmeübertragers (neu: W3030.060350-CA) wurde verändert, um einen reduzierten Temperaturübertragungsgrad zu erreichen. Die veränderten Nenn-Daten sind in

Tabelle 2 – Nenn-Daten der untersuchten RLT-Anlagen

Komponente	Größe	Wert
Ventilator	Nenn-Volumenstrom	1044 m ³ /h
	Nenn-Wirkungsgrad	66%
	externe Pressung	200 Pa
Vorfilter (G4)	Nenn-Druckverlust	40 Pa
Endfilter (F7)	Nenn-Druckverlust	120 Pa
Schalldämpfer	Nenn-Druckverlust	10 Pa

Tabelle 3 – Aufstellung der Varianten

Fallbezeichnung	Kurzbeschreibung
Zu/Ab ohne WRG	kombinierte Zu- und Abluftanlage ohne Wärmerückgewinnung
Zu/Ab mit WRG	kombinierte Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung
Zu/Ab mit red. WRG	kombinierte Zu- und Abluftanlage mit reduzierter Wärmerückgewinnung
Ab ohne WRG	reine Abluftanlage ohne Wärmerückgewinnung

Tabelle 4 – Nenn-Daten des Plattenwärmeübertragers Fall 1 (Zu/Ab mit WRG)

Größe	Wert
Temperaturübertragungsgrad	79%
Nenn-Druckverlust	90 Pa
Länge/Breite	1,005 m
Plattenabstand	3 mm

Tabelle 5 – Nenn-Daten des Plattenwärmeübertragers (Zu/Ab mit red. WRG)

Größe	Wert
Temperaturübertragungsgrad	54,5%
Nenn-Druckverlust	50 Pa
Länge/Breite	0,605 m
Plattenabstand	4,5 mm

Tab. 5 dargestellt. Durch den verringerten Übertragungsgrad kann der Wärmeübertrager kleiner dimensioniert werden. Zudem wird der Nenn-Druckverlust durch einen erhöhten Plattenabstand gesenkt. Dieser Wärmeübertrager erfüllt nicht mehr die Anforderungen der ErP-Richtlinie 2018. Ob der reduzierte Druckverlust und die damit verbundenen Energieeinsparungen zum Betrieb der Ventilatoren gegenüber eventuell auftretendem höherem Wärmebedarf lohnenswert sind, wird im Rahmen der Auswertungen untersucht. Ebenfalls werden geringere Investitionen durch die kleinere Dimensionierung bei der Lebenszykluskostenanalyse mitberücksichtigt.

Ab ohne WRG

Diese Variante ist analog zur RLT-Anlage mit Zu- und Abluft ohne Wärmerückgewinnung aufge-

baut, wobei auf einen Zuluft-Strang verzichtet wird. Lediglich ein Abluftventilator mit Schalldämpfer und Vorfilter wird verbaut. Eine Zuluftzufuhr wird für solche Konfigurationen in der Regel über Schlitzdurchlässe in den Außenwänden und Überströmventile realisiert. Im Sinne der BMWi-Richtlinie [2] wird angenommen, dass die Zuluftzufuhr lediglich über die Außenluft erfolgt, sodass analog zu den anderen untersuchten Varianten ein Frischluftanteil von 100% ermöglicht wird. Für die Zuluftzufuhr werden in dieser Studie Schlitzdurchlässe angenommen, welche einen Gesamt-Druckverlust von 20 Pa erzeugen. Dieser Druckverlust wird zur externen Pressung des Abluftstranges addiert. Druckverluste des Zuluftstranges entfallen.

2.2.4 Energieversorgungssystem

Alle untersuchten Varianten der Schullüftung verfügen lediglich über eine Heizfunktion. Eine Raumkühlung wird in dieser Studie nicht betrachtet. Neben dem Strombedarf der Ventilatoren zur Luftförderung wird der Wärmebedarf über einen erdgasbetriebenen Brennwertkessel bereitgestellt. Es wird davon ausgegangen, dass die Wärmeversorgung bereits installiert ist und daher keine Investitionen für die Wärmeversorgung in der wirtschaftlichen Analyse betrachtet werden müssen. Die Nenn-Daten für den Brennwertkessel sind in Tab. 6 gelistet. Die Annahmen orientieren sich an marktüblichen Geräten. Im Rahmen der Studie wird nur der Wärmebedarf des Klassenraums berücksichtigt, Wärmeverluste von Speichern und Leitungen sowie Übergabeverluste werden nicht bilanziert.

Tabelle 6 – Nenn-Daten des Brennwertkessels

Größe	Wert
Norm-Nutzungsgrad	98%
Vorlauftemperatur	50 °C
Rücklauftemperatur	30 °C

2.2.5 Wirtschaftliche Kennzahlen und Investition

Die wirtschaftliche Analyse erfolgt in Form der Annuitäten-Methode nach der VDI-Richtlinie 2067 [10]. Entscheidend für diese Methode sind die Investitionen sowie Strompreise, Preisänderungsraten und jährliche Wartung. In Tab. 7 sind die Investitionen der untersuchten RLT-Anlagen aufgeführt. Diese berücksichtigen neben dem Kaufpreis der Anlage auch die Montage des Systems und sind anhand der aktuellen Marktsituation abgeschätzt. In der Praxis können sich aufgrund der örtlichen Installationsbedingungen und Marktverfügbarkeit der Geräte erhebliche Abweichungen zu den hier getroffenen Annahmen ergeben. Daher sind diese Werte für die Investitionen nur als Orientierungswerte zu verstehen. In Tab. 8 sind

alle weiteren Kennzahlen für die wirtschaftliche Analyse dargestellt. Diese Kennzahlen gelten für alle untersuchten Varianten.

Tabelle 7 – Investitionen der Varianten

Variante	Investition
Zu/Ab ohne WRG	8000 €
Zu/Ab mit WRG	11 000 €
Zu/Ab mit red. WRG	10 500 €
Ab ohne WRG	2500 €

Tabelle 8 – Wirtschaftliche Kennzahlen

Kennzahl	Wert
kalkulatorischer Zinssatz	3%
Strompreis	0,22 €/kWh
Gaspreis	0,055 €/kWh
Preisänderungsrate	+ 2%
jährliche Wartung und Betrieb	2% von Investition
Lebenszyklus	15 a

3 Ergebnisse

3.1 Voll-Belegung des Klassenraums

Energiebedarf

Wird der Klassenraum voll belegt, so fallen hohe interne Lasten im Raum an. Aus diesem Grund sind die Wärmebedarfe des Klassenraums im Betrieb gering im Vergleich zu vielen anderen Gebäudenutzungen. In Abb. 3 ist der jährliche Endenergiebedarf aller untersuchten RLT-Anlagen-Varianten vergleichend dargestellt. Es wird deutlich, dass für Anlagen ohne Wärmerückgewinnung die Wärmebedarfe im Vergleich zu den Strombedarfen deutlich überwiegen. Sämtliche Lüftungswärmeverluste müssen über die interne Heizung ausgeglichen werden. In der Folge werden ca. 6000 kWh/a zusätzlich benötigt. Beim Strombedarf zeigt sich im Vergleich zwischen einer reinen Abluftanlage und einer Zu- und Abluftanlage ein Vorteil für die einfachere Abluft-

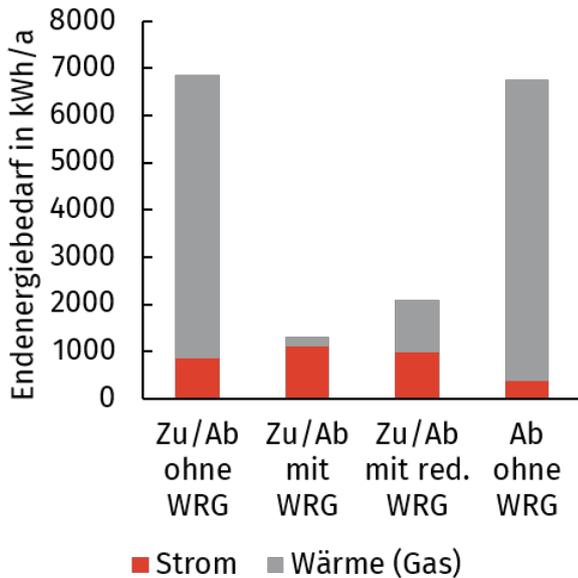


Abbildung 3 – jährlicher Endenergiebedarf der RLT-Anlagen im Vergleich

Anlage. Hierbei halbiert sich der Strombedarf allerdings nicht, da der Abluftventilator die Druckverluste der Überströmöffnungen ebenfalls ausgleichen muss. Da die Ventilatoren eine Temperaturerhöhung im Luftkanal durch Reibung und Abwärme erzeugen, steigt beim Abluftsystem der Wärmebedarf um ca. 400 kWh/a gegenüber der kombinierten Zu- und Abluftanlage. Bei der Untersuchung der Varianten mit Wärmerückgewinnung wird deutlich, dass der Wärmebedarf erheblich durch die Nutzung der Energie in der Abluft reduziert werden kann. Für den Fall einer hohen Wärmerückgewinnung (Zu/Ab mit WRG), kann der Wärmebedarf auf ca. 4% der Wärmebedarfe ohne Wärmerückgewinnung (Zu/Ab ohne WRG) gesenkt werden, da die hohen internen Wärmegegewinne durch die Wärmerückgewinnung effizient ausgenutzt werden. Mit verringerter Wärmerückgewinnung kann der Wärmebedarf auf ca. 18% des Ausgangswertes abgesenkt werden. Der Strombedarf ist bei Nutzung einer Wärmerückgewinnung höher, da die Druckverluste im Zu- und Abluftstrang kompensiert werden müssen. Der erhöhte Wärmebedarf bei den Varianten ohne Wärmerückgewinnung überwiegt dem erhöhten Strombedarf der Anlagen mit Wärmerückgewinnung deutlich.

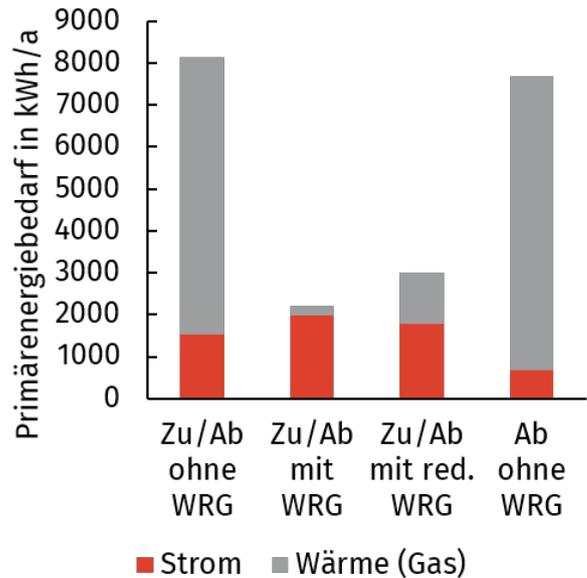


Abbildung 4 – jährlicher Primärenergiebedarf der RLT-Anlagen im Vergleich

Auch bei Betrachtung des Primärenergiebedarfs (vgl. Abb. 4) überwiegen die erhöhten Wärmebedarfe für die RLT-Anlagen ohne Wärmerückgewinnung. Für die Berechnung des Primärenergiebedarfs wurden die Primärenergiefaktoren des deutschen Strom-Mixes (1,8) und für Erdgasnutzung (1,1) verwendet [11]. Es wird deutlich, dass durch die Nutzung einer Wärmerückgewinnung eine signifikante Primärenergieeinsparung erzielt werden kann.

Wirtschaftlichkeit

In Abb. 5 sind die jährlichen Kosten der RLT-Anlagen in Form der Annuitäten dargestellt. Die Kosten teilen sich auf in bedarfsgebundene Kosten (Einsatz der Energieträger), betriebsgebundene Kosten (Betrieb, Wartung und Instandhaltung) und kapitalgebundene Kosten (Investition). Es zeigt sich, dass die RLT-Anlagen mit Wärmerückgewinnung gleiche Gesamt-Annuitäten verursachen wie die kombinierte Zu- und Abluftanlage ohne Wärmerückgewinnung. Die erhöhten Investitionen werden durch geringere bedarfsgebundene Kosten ausgeglichen. Durch den Einsatz einer Wärmerückgewinnung mit geringerem Übertragungsgrad ergibt sich nur ein

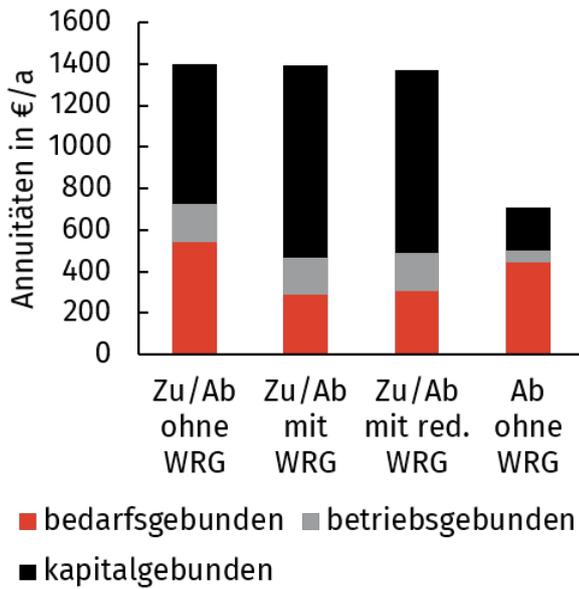


Abbildung 5 – Annuitäten der RLT-Anlagen im Vergleich

geringer Effekt (ca. 20 €/a), da die Investitionen nur geringfügig reduziert werden können. Die bedarfsgebundenen Kosten sind für beide RLT-Anlagen mit Wärmerückgewinnung fast identisch. Der Einsatz einer reinen Abluftanlage führt zu den geringsten Gesamt-Annuitäten, da die Investition sowohl durch den entfallenden Zu- und Abluftventilator mit Schalldämpfer und Filtern, als auch durch die geringere System-Komplexität gesenkt werden. Darüber hinaus fallen die Wartungskosten durch die reduzierte Anzahl an Filtern, welche ca. halbjährlich ersetzt werden müssen, geringer aus.

Durch die Nachrüstung einer Lüftungsanlage mit Zu- und Abluft sowie einer Wärmerückgewinnung entstehen Kosten von ca. 30 €/a/Schüler. Diese im Vergleich zum Betrieb des Schulsystems insgesamt geringen jährlichen Mehrkosten umfassen die Investition in das Lüftungsgerät, die Installation des Geräts im Klassenraum sowie alle verbrauchsgebundenen Kosten. Die Minderung der Wärmebedarfe durch die Wärmerückgewinnung gegenüber einer Fensterlüftung wurden unter Annahme eines gleichen Volumenstroms ebenfalls berücksichtigt.

CO₂-Emissionen

Mit Hilfe der Angaben zu durchschnittlichen CO₂-Emissionen des deutschen Strom-Mixes (505 g/kWh) und der Erdgasnutzung (231 g/kWh) [12] werden im Post-Processing die jährlichen Emissionen pro RLT-Anlage berechnet. Wie in Abb. 6 zu erkennen, zeigt sich ein ähnliches Bild zum Energiebedarf der RLT-Anlagen. Durch die höhere Gewichtung des Strombedarfs rücken die Anlagenvarianten hinsichtlich ihrer CO₂-Emissionen näher zusammen. Die tatsächlichen CO₂-Emissionen hängen stark von der Energieversorgung der Schule ab. Durch eine Wärmeversorgung mit geringen Emissionen, wie Holz-Heizungen oder Solarthermie, können die Emissionen für die Wärmeversorgung stark gesenkt werden. Ebenso können durch den Einsatz regenerativer Stromerzeugungsquellen, wie Photovoltaik oder Windkraft, die CO₂-Emissionen des Strombedarfs reduziert werden. Wir weisen an dieser Stelle darauf hin, dass die Darstellung der CO₂-Emissionen hier nur exemplarisch für die untersuchte Versorgungsstruktur ist. Die Unterschiede in den anzusetzenden Emissionsfaktoren schwankt stark je nach Energieträgern, sodass absolute Unterschiede der Anlagenvarianten deutlich variieren können. Prozentuale Unterschiede der Anlagenvarianten lassen sich aber allgemein übertragen, da die Emissionsfaktoren lediglich einen Skalierungsfaktor darstellen.

Durch die Nutzung einer Wärmerückgewinnung werden die CO₂-Emissionen um ca. 67% (Zu/Ab mit WRG) bzw. 58% (Zu/Ab mit red. WRG) gegenüber der kombinierten Zu- und Abluftanlage ohne Wärmerückgewinnung gesenkt. Mit Hilfe der Annuitäten (Abb. 5) und der CO₂-Emissionen (Abb. 6) können die CO₂-Vermeidungskosten berechnet werden. Diese sind in Tab. 9 (bezogen auf die kombinierte Zu- und Abluftanlage ohne WRG) und in Tab. 10 (bezogen auf die reine Abluftanlage) für beide RLT-Anlagen mit Wärmerückgewinnung dargestellt.

Es zeigt sich, dass durch den Einsatz der Wärmerückgewinnung im Vergleich mit Zu- und Ab-

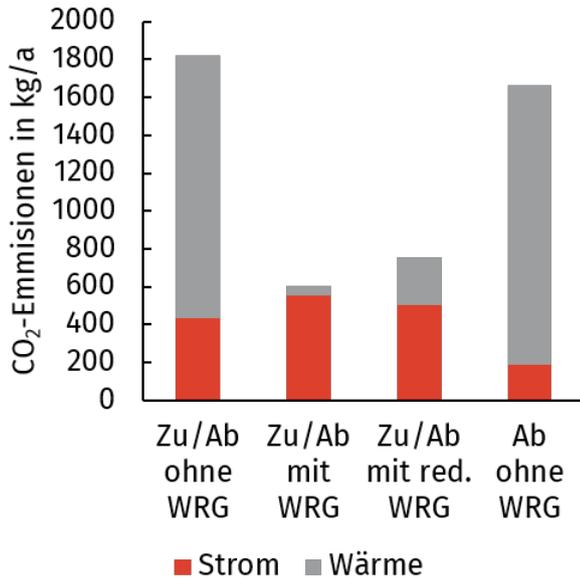


Abbildung 6 – jährliche CO₂-Emissionen der RLT-Anlagen im Vergleich

luftanlagen keine beziehungsweise sogar negative CO₂-Vermeidungskosten für einen typischen Lebenszyklus einer RLT-Anlage von 15 a [10] entstehen. Durch die eingesparten bedarfsgebundenen Kosten entsteht kein wirtschaftlicher Mehraufwand durch den Einsatz einer Wärmerückgewinnung, welche eine Reduktion der CO₂-Emissionen im Betrieb ermöglicht.

Tabelle 10 – CO₂-Vermeidungskosten der Wärmerückgewinnung bezogen auf Ab ohne WRG

Variante	CO ₂ -Vermeidungskosten
Zu/Ab mit WRG	645 €/t CO ₂
Zu/Ab mit red. WRG	729 €/t CO ₂

Der Vergleich einer Zu- und Abluftanlage mit einer Wärmerückgewinnung und einer einfachen Abluftanlage zeigt, dass hier hohe CO₂-Vermeidungskosten entstehen, die allerdings nicht nur auf die Wärmerückgewinnung zurückgeführt werden können. Bei einer reinen Abluftanlage fehlen Komponenten für die Luftverteilung im Raum, die Filterung der Zuluft und der Dämpfung des Ventilator- und Umgebungsgeräusches. In der Bewertung der CO₂-Vermeidungskosten ist dieser Wert nur mit diesen Einschränkungen aussagekräftig, da Einbußen hinsichtlich des Komforts, der Luftqualität (Partikelbelastung in der Außenluft) und der Akustik nicht berücksichtigt werden.

Komfort

Tabelle 9 – CO₂-Vermeidungskosten der Wärmerückgewinnung bezogen auf Zu/Ab ohne WRG

Variante	CO ₂ -Vermeidungskosten
Zu/Ab mit WRG	- 4,68 €/t CO ₂
Zu/Ab mit red. WRG	- 0,02 €/t CO ₂

Durch den Ausgleich der Wärmebedarfe über die Heizkörper im Klassenraum können die Raumtemperaturen stets oberhalb von 20 °C gehalten werden. Eine Überhitzung des Raumes im Sommer kann durch die in dieser Studie untersuchten RLT-Anlagen nicht verhindert werden. Hierbei ergeben sich keine signifikanten Unterschiede in den untersuchten Varianten der RLT-Anlagen. Für alle Varianten wird bei 15% der Betriebsstunden (= Stunden mit Personenbelegung) die maximale Raumlufttemperatur von 26 °C überschritten. Ebenso kann die Einhaltung der nötigen

Komfortgrenzen der relativen Raumluftfeuchte nicht durch die untersuchten Varianten gewährleistet werden. Eine Unterschreitung der minimalen relativen Raumluftfeuchte (40% r.F.) tritt bei allen Varianten in 44% der Betriebsstunden auf. Eine Überschreitung der maximalen relativen Raumluftfeuchte (60% r.F.) tritt hingegen nur in 4% der Betriebsstunden auf. Hierfür gibt es im Wesentlichen zwei Gründe. Zum einen werden kontinuierlich hohe Volumenströme bereitgestellt. Bei einer Teilbelegung, z. B. am Nachmittag, wird dadurch die relative Feuchte abgesenkt. Zum anderen führt die hohe Wärmeabgabe in den Übergangsmonaten zu erhöhten, aber komfortablen Raumlufttemperaturen. Mit der Erhöhung der Raumlufttemperatur sinkt die relative Feuchte bei gleichbleibender absoluter Feuchte in der Raumluft.

Für das Komfortempfinden der Personen im Raum sind neben der Einhaltung der Raumlufttemperaturen und relativen Raumluftfeuchten auch Faktoren wie Zugerscheinungen zu beachten. Zugerscheinungen werden durch höhere Luftgeschwindigkeiten und niedrige Lufttemperaturen begünstigt. Für Luftdurchlässe mit einer sehr hohen Einmischung von Raumluft - wie beispielsweise bei Dralldurchlässen - haben sich in der Praxis maximale Temperaturdifferenzen zwischen Zu- und Raumluft von bis zu 12 K bewährt. In Abb. 7 sind die Zulufttemperaturen der RLT-Anlagen mit kombinierter Zu- und Abluft mit und ohne Wärmerückgewinnung dargestellt. Die Abluftanlage verhält sich in dieser Darstellung identisch zur Zu- und Abluftanlage ohne Wärmerückgewinnung und ist deshalb nicht dargestellt. Die Betriebsstunden, in denen die RLT-Anlage ausgeschaltet ist, sind durch graue Balken im Diagramm markiert. Hier wird kein Volumenstrom gefördert, sodass diese Stunden für die Komfortbewertung keine Bedeutung haben. Es wird deutlich, dass durch den Einsatz einer Wärmerückgewinnung die Zulufttemperatur deutlich angehoben wird, sodass die Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Zuluft kleiner als 12 K ausfällt. Ohne Wärmerückgewinnung wird dieser Wert deutlich überschritten, was sich

unter Berücksichtigung der notwendigen hohen Luftvolumenströme von $1044 \text{ m}^3/\text{h}$ negativ auf den Komfort auswirken würde.

In Abb. 8 ist exemplarisch ein weiterer Wochenverlauf der Zulufttemperaturen im Herbst (Übergangszeit) dargestellt. Hier zeigt sich, dass bei Außenlufttemperaturen nahe von 12°C die Wärmerückgewinnung abgeschaltet wird (Bypass), da die hohen internen Lasten ausreichen, um die Lüftungswärmeverluste auszugleichen. Die Energieeinsparungen in den Übergangsmonaten sind dementsprechend vergleichsweise gering gegenüber den Wintermonaten. Ein negativer Effekt in Form einer erhöhten Raumlufttemperatur kann aber in den Übergangsmonaten durch die Abschaltung der Wärmerückgewinnung verhindert werden und kritische Temperaturdifferenzen zwischen Zu- und Raumluft sind nicht erkennbar.

3.2 Halbe Belegung des Klassenraums

Neben der vollen Belegung wird im Folgenden ein Szenario eines Wechselunterrichts untersucht, bei dem nur die Hälfte der Schüler anwesend ist (siehe Abb. 2). Exemplarisch sind die Endenergiebedarfe der RLT-Anlagenvarianten in Abb. 9 dargestellt. Es wird deutlich, dass durch die Reduktion der internen Lasten der Wärmebedarf um ca. 2000 kWh/a für die RLT-Anlagen ohne Wärmerückgewinnung ansteigt (vgl. Abb. 3). Dahingegen fällt der Anstieg im Wärmebedarf bei den RLT-Anlagen mit Wärmerückgewinnung deutlich kleiner aus. So werden lediglich ca. 80 kWh/a (Zu/Ab mit WRG) bzw. 1000 kWh/a (Zu/Ab mit red. WRG) zusätzlich benötigt, um die Raumtemperatur auf einem komfortablen Niveau zu halten. Hierdurch erhöhen sich die Unterschiede im Endenergiebedarf und folglich auch im Primärenergiebedarf. In der Konsequenz könnten die Annuitäten der RLT-Anlagen mit Wärmerückgewinnung geringer gegenüber einer RLT-Anlage ohne Wärmerückgewinnung (Zu/Ab ohne WRG) ausfallen.

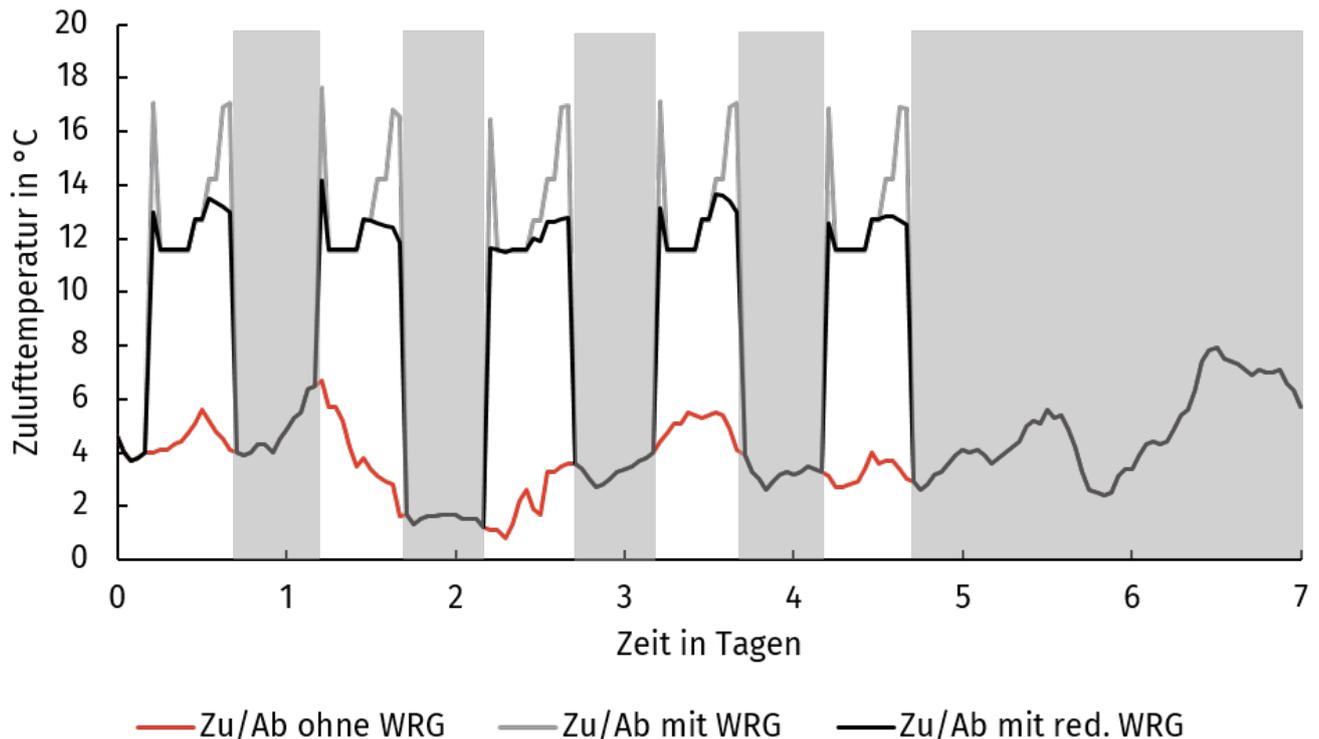


Abbildung 7 – Verlauf der Zulufttemperaturen in einer Winter-Woche - Ausgegraute Bereiche kennzeichnen die Betriebsstunden, in denen die RLT-Anlage abgeschaltet ist

4 Diskussion

Die hier vorgestellte Studie hat gezeigt, dass durch den Einsatz von Wärmerückgewinnungssystemen in einer RLT-Anlage erhebliche Energieeinsparungen im Betrieb einer Schullüftung erzielt werden können. Die höheren Investitionen werden durch Kosteneinsparungen über den Lebenszyklus der Anlage aufgewogen. Ebenso zeigt sich, dass ein nennenswerter Anteil der CO₂-Emissionen durch die Wärmerückgewinnung eingespart werden kann. Die CO₂-Vermeidungskosten sind dabei negativ im Vergleich zu gleichwertigen RLT-Anlagen ohne Wärmerückgewinnung. Im Sinne der Energiewende im Gebäudesektor ist somit ein Einbau einer Wärmerückgewinnung empfehlenswert. Zusätzlich ist anzumerken, dass durch die Nutzung einer Wärmerückgewinnung ein höherer Komfort der Schüler und Schülerinnen sowie der Lehrer und Lehrerinnen sichergestellt werden kann, da tiefe Zulufttemperaturen und damit verbundene Zugerscheinungen vermieden werden. Für

genauere Bewertungen sind weiterführende Betrachtungen zum Energiesystem der Schule und zur Raumluftströmung im Klassenraum notwendig, die nicht Teil dieser Studie waren. Auch bauphysikalische Aspekte des Gebäudes und vertiefende technische Analysen zur Kondensat- und Eisvermeidung wurden im Rahmen dieses Beitrags nicht untersucht.

Reine Abluftanlagen weisen die geringsten Anuitäten in dieser Studie auf. Allerdings wird bei diesen Anlagen auf die Funktionen Luftverteilung, Filtrierung und Schalldämpfung verzichtet. Daher muss beim Einsatz dieser Anlagen überprüft werden, ob ein Verzicht auf diese Leistungen für die Anwendung im Klassenraum akzeptabel ist.

5 Zusammenfassung

Auf Basis der durchgeführten Studie kann der Einbau einer Wärmerückgewinnung in RLT-Anlagen für die Be- und Entlüftung eines

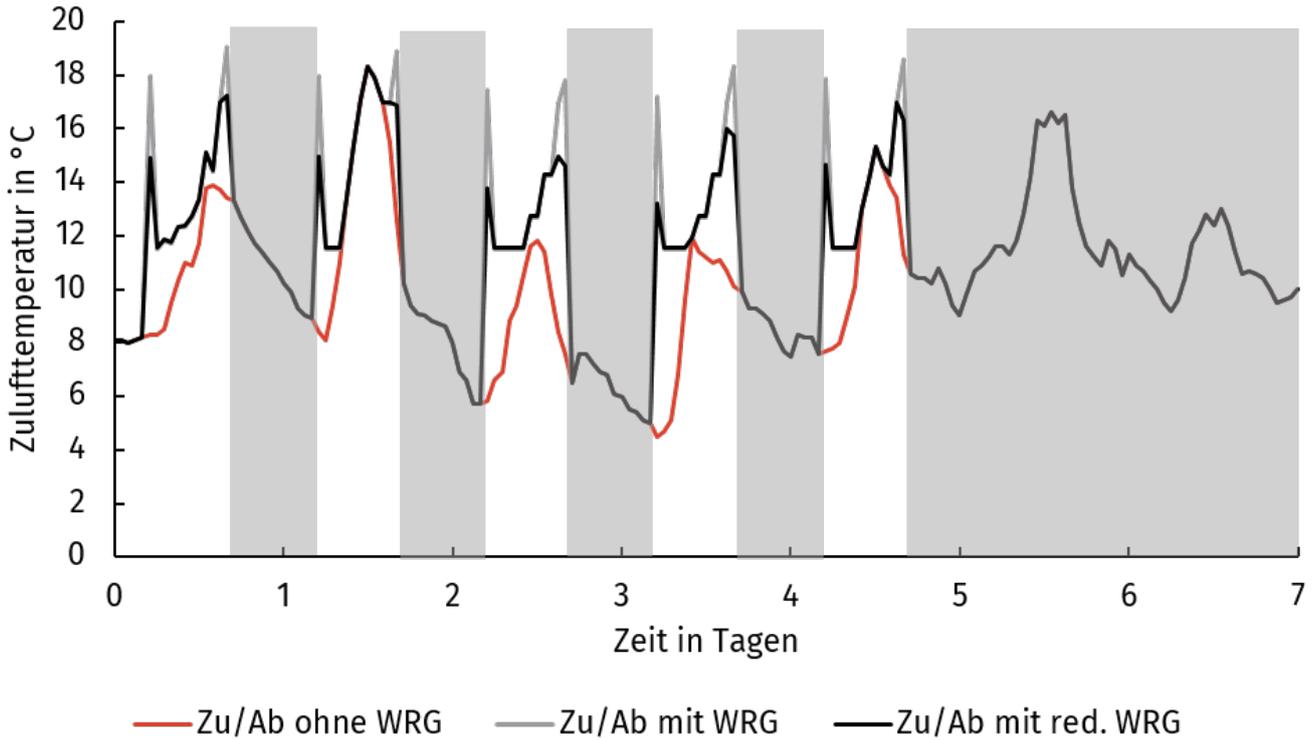


Abbildung 8 – Verlauf der Zulufttemperaturen in einer Herbst-Woche - Ausgegraute Bereiche kennzeichnen die Betriebsstunden, in denen die RLT-Anlage abgeschaltet ist

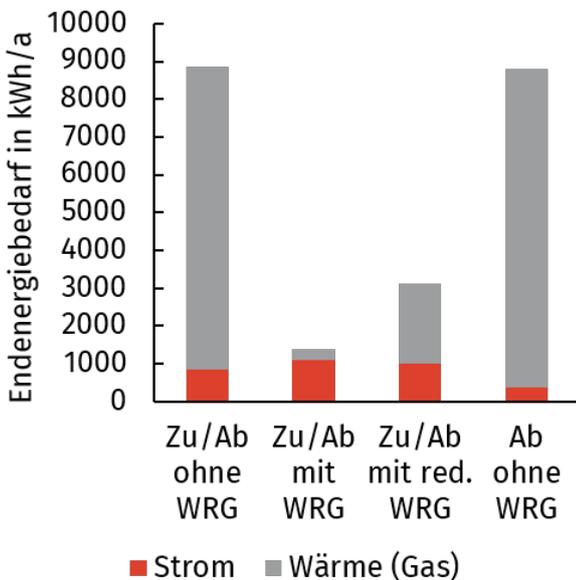


Abbildung 9 – jährlicher Endenergiebedarf der RLT-Anlagen bei halber Belegung im Vergleich

Klassenraums energetisch und hinsichtlich des zu erwartenden Komforts der Schüler und Lehrkräfte empfohlen werden. Die CO₂-Vermeidungskosten der Wärmerückgewinnung sind zu vernachlässigen, allerdings sollte immer ein Bypass zur Steuerung der Zulufttemperatur vorgesehen werden. Gegenüber einer reinen Abluftanlage ergeben sich allerdings höhere Kosten über den Lebenszyklus, die gegen Vorteile hinsichtlich des Komfort und der Luftqualität sowie der Akustik abgewogen werden müssen.

Danksagung

Wir danken für die finanzielle Unterstützung zur Entwicklung des Planungstools durch das BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie), Förderkennzeichen 03ET1223B und 03ET1298A, und der AiF (Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen), Förderkennzeichen 25EWN/1. Die Verantwortung für den Inhalt liegt alleine bei den Autoren.

Literatur

- [1] Siebler, L. and Rathje, T. and Calandri, M. and Eydner, M. and Vogt, U. and Sterigiaropoulos, K. Pilotprojekt: Experimentelle Untersuchung zum Infektionsrisiko in Klassenräumen in Stuttgarter Schulen - Abschlussbericht, 5 2021.
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Richtlinie für die Bundesförderung Corona-gerechte stationäre raumluftechnische Anlagen, 6 2021.
- [3] M. Kremer, T. Gülker, J. Teichmann, P. Mathis, and D. Müller. Energy Saving Potential of Air Handling Units Equipped with Moisture REcovery Systems in Different Climates and Use Cases. *Proceedings of the 15th ROOM-VENT Virtual Conference*, 2021.
- [4] M. Kremer, P. Mathis, and D. Müller. Energiebedarf und lebenszykluskostenanalyse im planungsprozess. *Moderne Gebäudetechnik*, pages 30–32, 5 2021.
- [5] M. Kremer, P. Mathis, and D. Müller. Rlt-anlagen teillastoptimiert planen. *IKZ Fachplaner*, pages 18–21, 6 2021.
- [6] VDI 2067 Blatt 21. Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Energieaufwand der Nutzenübergabe Raumluftechnik, 2003.
- [7] SIA 2024. Raumnutzungsdaten für Energie- und Gebäudetechnik, 2015.
- [8] DIN EN 16798 - 1. Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden, 2019.
- [9] POLYBLOC AG.
- [10] VDI 2067 Blatt 1. Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung, 2012.
- [11] DIN V 18599 - 1. Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung, 2018.
- [12] Großklos, M. Kummulierter Energieaufwand und CO₂-Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger und -versorgungen, 2020.