RWTH-EBC 2022-003

Bewertung der Wärmerückgewinnung für die maschinelle Belüftung von Klassenräumen mittels dynamischer Simulationsmodelle

Martin Kremer[1], Kai Rewitz[1], Dirk Müller[1]

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

Dieses Werk ist lizenziert unter einer
Creative Commons Namensnennung 3.0 Deutschland Lizenz.

Please cite this article as:

M. Kremer, K. Rewitz, D. Müller, *Bewertung der Wärmerückgewinnung für die maschinelle Belüftung von Klassenräumen mittels dynamischer Simulationsmodelle*, White Paper RWTH-EBC 2022-003, Aachen, 2022, DOI: 10.18154/RWTH-2022-01613

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 mittels dynamischer Simulationsmodelle

Martin Kremer[1], Kai Rewitz[1], Dirk Müller[1]

[1]*Lehrstuhl 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 Lüftungstechnik in Schulen 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 dynamischer Simulationsmodelle für unterschiedliche Szenarien untersucht, wie sich der Einsatz einer Wärmerückgewinnung in einem Klassenraum energetisch, wirtschaftlich und ökologisch auswirkt. Es zeigt sich, dass durch eine Wärmerückgewinnung der Endenergiebedarf zwischen 37 und 53 % reduziert werden kann, was zu einer Reduktion der CO_2-Emissionen von 0,7 bis 1,5 t CO_2/a für einen einzelnen Klassenraum führt. 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. Diese können durch integrierte Heizregister zwar vermieden werden, ziehen in diesem Fall aber erhöhte Druckverluste und folglich erhöhte Strombedarfe nach sich. Zur Erreichung der Klimaschutz-Ziele und Steigerung des thermischen Komforts empfiehlt sich der Einsatz einer Wärmerückgewinnung für die maschinelle Belüftung von Klassenräumen. Darüber hinaus wird die Integration einer Bypass-Klappe über die Wärmerückgewinnung empfohlen, um in Zeiten ohne Heizbedarf eine Überhitzung des Klassenraums zu vermeiden und gleichzeitig die Druckverluste zu diesen Betriebspunkten zu reduzieren.

Schlagwörter
Corona — Schullüftung — Wärmerückgewinnung — Wirtschaftlichkeit — CO_2-Vermeidungskosten

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**
2 Berechnungsgrundlage der Studie **2**
2.1 Aufbau des Klassenraum-Modells 2
2.2 Aufbau des Modells für die RLT-Anlage . . . 4
2.3 Interne Lasten und Belegungsprofil 4
2.4 Energieversorgungssystem 5
2.5 Wirtschaftliche Kennzahlen und Investition 5
3 Ergebnisse **6**
3.1 Energiebedarf des Klassenraums 6
3.2 Thermischer Komfort und Luftqualität . . . 8
3.3 Wirtschaftliche Analyse 10
3.4 CO_2-Emissionsreduktion und -Vermeidungskosten 11
3.5 Nutzung einfacher Abluftanlagen 12
4 Zusammenfassung **13**
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. Eine Studie der Universität Stuttgart hat gezeigt, dass die Zufuhr von Außenluft das Infektionsrisiko in Klassenräumen deutlich senkt [16]. Das Infektionsrisiko hängt wesentlich von dem personenbezogenen Außenluftvolumenstrom ab und kann beispielsweise mit der RisiCo-App `https://risico.eonerc.rwth-aachen.de/` abgeschätzt werden.

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) hat eine „Richtlinie für die Bundesförderung: Corona-gerechte, stationäre raumlufttechnische Anlagen“ veröffentlicht [3]. Hiermit wird die Grundlage geschaffen, um den Einbau von raumlufttechnischen (RLT-) Anlagen in Schulen zur kontrollierten Lüftung zu för-

dern. Die Förderung bezieht sich dabei auf RLT-Anlagen, welche stationär verbaut sind, über eine Wärmerückgewinnung (WRG) verfügen, sowie einen maximalen Umluftanteil von 50 % aufweisen.

In einer bereits veröffentlichten Studie [11] wurde der Einsatz einer WRG mittels des Planungstools AHULife untersucht. Hierbei konnten Transmissionsverluste des Gebäudes und solare Strahlungsgewinne nicht abgebildet werden. In dieser Studie wird das energetische und wirtschaftliche Potenzial der WRG für die Versorgung eines Klassenraums mit Außenluft basierend auf dynamischen Simulationsmodellen, welche ebenfalls das Gebäude thermisch abbilden, untersucht. Hierzu werden unter gleichen Randbedingungen verschiedene Lüftungssysteme für einen Klassenraum hinsichtlich ihres jährlichen Energiebedarfs und der annualisierten Kosten bewertet. Zusätzlich werden die CO_2-Vermeidungskosten für die WRG berechnet.

2 Berechnungsgrundlage der Studie

Die hier vorgestellte Studie wird mittels dynamischer Gebäude- und Anlagensimulationen durchgeführt. Basis der Simulationen bildet die am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik entwickelte Modellbibliothek AixLib [12]. Für die Abbildung des Klassenraums wird das High-Order-Modell [4] der Bibliothek verwendet, welches eine wandaufgelöste Modellierung ermöglicht. Dabei ist das Modell nach dem ASHRAE-Standard 140 und empirisch validiert [18]. Die raumlufttechnische Anlage wird mittels eines Systems aus Modellen für die Sub-Komponenten abgebildet. In der AixLib stehen hierfür Modelle für Ventilatoren, Wärmeübertrager, Klappen zur Modellierung des Bypasses über den Wärmeübertrager und ein Druckverlust-Modell zur Abbildung passiver Komponenten wie Filter und Schalldämpfer zur Verfügung.

Die Simulationsmodelle, die im Rahmen der Studie genutzt wurden, sind OpenSource verfügbar unter `https://github.com/RWTH-EBC/AixLib`.

2.1 Aufbau des Klassenraum-Modells

Der Klassenraum wird mit einer Grundfläche von 87 m² und einer Raumhöhe von 3 m modelliert, wodurch sich ein Raumvolumen von 261 m³ ergibt. Hierbei wird die Grundfläche so gewählt, dass sich bei einer Belegung mit 28 Schülerinnen und Schülern und einem Lehrer eine Belegungsdichte von 3 m² pro Person nach der Schweizer Richtlinie SIA 2024 [15] ergibt. Der Klassenraum besitzt eine Außenfassade, welche nach Westen orientiert ist und eine Länge von 14,5 m aufweist. Für die Außenfassade wird eine transparente Fensterfläche von 7,84 m² angenommen. Komplettiert wird der Raum durch drei Innenwände, eine innenliegende Decke und einen innenliegenden Boden. Alle Innenwände, Decke und Boden werden als adiabat angenommen, sodass kein Wärmetransfer mit angrenzenden Räumen berücksichtigt wird. Die Parameter für die Wandaufbauten werden mittels des am Lehrstuhl entwickelten Tools TEASER [13] in Form von Typ-Elementen für eine schwere Baukonstruktion angenommen, die für ein bestimmtes Baualter charakteristische Wandaufbauten beschreiben. Betrachtet werden in der Studie zwei unterschiedliche Baualtersklassen, 1979-1983 (BK 1) und 1995-2015 (BK 2) deren zugehörige Wandparameter in Tab. 1 und Tab. 2 gelistet sind. Die Reihenfolge der Layer ist von außen (Layer 1) nach innen zum Raum orientiert. Hierbei sind Decke und Boden gleich aufgebaut, aber umgekehrt ausgerichtet (Boden: innen = Layer 1, außen = Layer 3). Die Infiltrationsrate wird als konstant zu 0,5/h (BK 1) bzw. 0,2/h (BK 2) angenommen. Allerdings wird innerhalb der Studei keine Fensterlüftung betrachtet. Eine Fensteröffnung kann im Sommer zur Senkung der Innenraumtemperaturen genutzt werden, wobei standortbedingte akustische und stoffliche Belastungen der Umgebung berücksichtigt werden müssen. Folglich kann Fensterlüftung in einzelnen Fällen für das Komfort-Empfinden der Schülerinnen und Schüler sowie der Lehrkräfte kontraproduktiv sein. Aus diesem Grund und für eine gute Vergleichbarkeit wird keine Fensterlüftung in dieser Studie betrachtet.

Tabelle 1 – Parameter der Wandaufbauten (BK 1)

Wand		Dicke in mm	Dichte in kg/m³	Wärmeleitfähigkeit in W/(m K)	spezifische Wärmekapazität in J/(kg K)
Außenwand	Layer 1	80	1800	1,6	850
	Layer 2	40	15	0,04	1500
	Layer 3	175	2420	2,1	1000
Innenwand	Layer 1	10	1600	0,7	850
	Layer 2	150	695	0,13	850
	Layer 3	10	1600	0,7	850
Decke/Boden	Layer 1	40	1990	1,4	1000
	Layer 2	30	15	0,04	1500
	Layer 3	150	2420	2,1	1000

Tabelle 2 – Parameter der Wandaufbauten (BK 2)

Wand		Dicke in mm	Dichte in kg/m³	Wärmeleitfähigkeit in W/(m K)	spezifische Wärmekapazität in J/(kg K)
Außenwand	Layer 1	70	15	0,04	1500
	Layer 2	175	2420	2,1	1000
Innenwand	Layer 1	10	1600	0,7	850
	Layer 2	150	695	0,13	850
	Layer 3	10	1600	0,7	850
Decke/Boden	Layer 1	40	1990	1,4	1000
	Layer 2	60	15	0,04	1500
	Layer 3	160	2420	2,1	1000

Tabelle 3 – Nenn-Daten der untersuchten RLT-Anlagen

Komponente	Größe	Wert
Ventilator	Nenn-Volumenstrom	1044 m^3/h
	Nenn-Wirkungsgrad	66 %
	externe Pressung	200 Pa
Vorfilter (ISO Coarse 75 %)	Nenn-Druckverlust	40 Pa
Endfilter (ISO ePM1 60 %)	Nenn-Druckverlust	120 Pa
Schalldämpfer	Nenn-Druckverlust	10 Pa

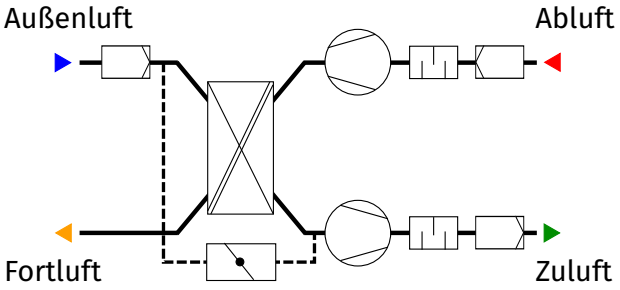

Abbildung 1 – Aufbau der RLT-Anlage mit Wärmerückgewinnung

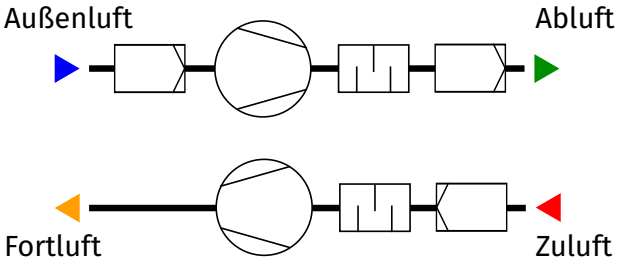

Abbildung 2 – Aufbau der RLT-Anlage ohne Wärmerückgewinnung

2.2 Aufbau des Modells für die RLT-Anlage

Um den Einfluss der WRG auf den Energiebedarf zur Versorgung des Klassenraums zu untersuchen, werden zwei Konfigurationen der RLT-Anlage untersucht. Für eine gute Vergleichbarkeit unterscheiden sich die RLT-Anlagen nur durch die WRG, sodass der restliche Aufbau identisch ist. Die Konfigurationen sind in Abb. 1 und 2 dargestellt. Die RLT-Anlage mit WRG ist zusätzlich mit einem Bypass über den Wärmeübertrager ausgestattet. Dies ermöglicht die Regelung der WRG, sodass diese bei zu hohen Außentemperaturen umgangen werden kann.

Nach DIN EN 16798 [5] wird ein Luftvolumenstrom von 36 m^3/h pro Person (Kategorie 1) für den Nenn-Volumenstrom der RLT-Anlagen angenommen. Die Auslegungsdaten der Komponenten der RLT-Anlage sind in Tab. 3 gelistet. Die Druckverluste aller Komponenten werden abhängig vom Volumenstrom berechnet. Die angegebenen Nenn-Druckverluste entstehen bei dem in Tab. 3 angegebenen Nenn-Volumenstrom. Die Auslegungsdaten des Wärmeübertragers sind in Tab. 4 aufgeführt. Das Modell des Wärmeübertragers nutzt einen konstanten Temperaturübertragungsgrad.

Tabelle 4 – Nenn-Daten des Plattenwärmeübertragers

Größe	Wert
Temperaturübertragungsgrad	79 %
Nenn-Druckverlust	90 Pa
Druckverlust Bypass	2 Pa

2.3 Interne Lasten und Belegungsprofil

Im Rahmen der Studie wird ein Klassenzimmer am Standort Aachen zu Grunde gelegt. Die Wärmeabgabe der Personen im Klassenraum werden über ein empirisches, temperaturabhängiges und aktivitätsbasiertes Modell [15] abgebildet. Mit zunehmender Innenraumtemperatur sinkt die sensible Wärmeabgabe, wohingegen die latente Wärmeabgabe (Schwitzen) zunimmt. Dabei wird im Raum ebenfalls entsprechend der latenten Wärmeabgabe der Feuchtegehalt erhöht. Eine genauere Darstellung der Modelle kann Kremer u. a. [10] und Finkbeiner u. a. [7] entnommen werden. Neben Personen wird die Wärmeabgabe von Geräten und der Beleuchtung berücksichtigt. Diese werden über die spezifische Wärmeabgabe pro m^2 Fläche mit Angaben aus der SIA 2024 [15] abgebildet.

Für das Belegungsprofil wird angenommen, dass es sich um eine weiterführende Schule mit einem anteiligen Unterricht am Nachmittag handelt (Pr. 1). Ein Betrieb am Wochenende ist nicht vorgesehen. Zusätzlich wird ein weiteres Belegungsprofil untersucht, welches eine Voll-Belegung zwischen 8 und 16 Uhr annimmt (Pr. 2). Die Belegungsprofile sind in Abb. 3 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. Das Lastprofil der Geräte ist an das Belegungsprofil gekoppelt. Es wird angenommen,

dass das Licht eingeschaltet ist, sobald eine Belegung im Raum vorliegt. Zu allen anderen Zeitpunkten ist das Licht ausgeschaltet.

Der Volumenstrom wird dabei für alle Vergleichsfälle konstant gehalten, sofern eine Belegung im Raum vorliegt. Ohne Belegung wird die RLT-Anlage abgeschaltet. Neben dem Nenn-Volumenstrom, welcher Kategorie I nach DIN EN 16798 entspricht, wird ebenfalls die Kategorie II (25 m^3/h pro Person) nach DIN EN 16798 analysiert, um den Einfluss des zugeführten Frischluft-Volumenstroms zu bewerten.

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 dieser Grenzen gehalten. Eine Be- und Entfeuchtung der Luft wird in dieser Studie nicht betrachtet. Die Feuchtegrenzen werden lediglich für die Analysen des Komforts genutzt.

2.4 Energieversorgungssystem

Alle untersuchten Varianten der Schullüftung verfügen lediglich über eine Heizfunktion. Die Heizung erfolgt hierbei im Raummodell in Form eines idealisierten Heizers, welcher keine Verluste bei der Nutzenübergabe in den Raum berücksichtigt und keine Trägheit in der Bereitstellung der Leistung aufweist. 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. 5 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 5 – Nenn-Daten des Brennwertkessels

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

2.5 Wirtschaftliche Kennzahlen und Investition

Die wirtschaftliche Analyse erfolgt in Form der Annuitäten-Methode nach der VDI-Richtlinie 2067 [17]. Entscheidend für diese Methode sind die Investitionen sowie Strom- und Gaspreise, Preisänderungsraten und jährliche Wartung. In Tab. 6 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 worden. 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. 7 sind alle weiteren Kennzahlen für die wirtschaftliche Analyse dargestellt. Diese Kennzahlen gelten für alle untersuchten Varianten.

Tabelle 6 – Investitionen der Varianten

Variante	Investition
RLT-Anlage ohne WRG	8000 €
RLT-Anlage mit WRG	11 000 €

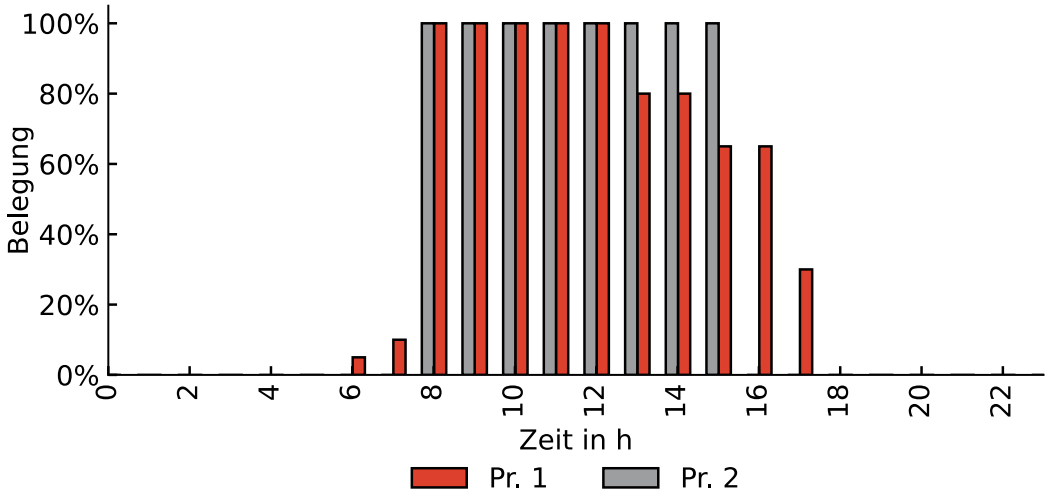

Abbildung 3 – Belegungsprofil des Klassenraums

Tabelle 7 – 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

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Ganzjahressimulationen für die unterschiedlichen Randbedingungen dargestellt. Hierbei wird zunächst der Energiebedarf adressiert und der thermische Komfort im Klassenraum auf Basis der sich ergebenen Temperaturen und relativen Raumluftfeuchte analysiert.

3.1 Energiebedarf des Klassenraums

Die Raumtemperatur wird ganzjährig auf einer minimalen Raumtemperatur von 20 °C durch die idealisierte Raumheizung gehalten. Fällt die Temperatur unter den Sollwert, so wird dies durch die Heizung ausgeglichen. Hieraus ergeben sich ganzjährig Heizbedarfe sowohl in den Zeiten der Belegung, in denen die Lüftungsanlage im Betrieb ist, als auch in den Zeiten ohne Belegung zum Ausgleich von Infiltrations- und Transmissionsverlusten. Die Ventilatoren der Lüftungsanlage benötigen zusätzlich elektrische Energie. Weitere Hilfsenergien wie Pumpenenergie werden nicht berücksichtigt.

Einfluss des Luftvolumenstroms und der Belegung

Der Nutzenergiebedarf des Klassenraums ist in Abb. 4 für die Baualtersklasse 1 (BK 1: 1979-1983) für die beiden Belegungsprofile (Pr. 1 und Pr. 2) und die beiden Nenn-Luftvolumenströme (Kat. 1 und Kat. 2 nach DIN EN 16798) sowie beide Varianten der RLT-Anlagen (mit und ohne WRG) dargestellt. Es wird deutlich, dass durch eine Reduktion des Frischluftvolumenstroms ein erheblicher Anteil des Heizenergiebedarfs eingespart werden kann. Darüber hinaus wirkt sich eine Voll-Belegung des Klassenraums ebenfalls positiv auf den Heizenergiebedarf aus, da der Luftvolumenstrom nicht bedarfsgerecht an die Belegung angepasst wird, sondern konstant gehalten wird. Somit bleiben die Lüftungsverluste konstant, während die internen Wärmegewinne bei einer zeitweisen Minderbelegung (Pr. 1) kleiner ausfallen im Vergleich zur Vollbelegung (Pr. 2). Durch den Einsatz einer WRG in der RLT-Anlage

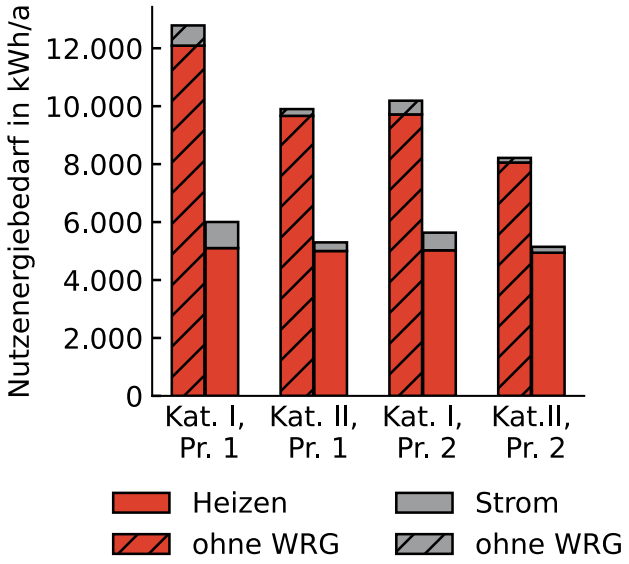

Abbildung 4 – Nutzenergiebedarf (BK 1) im Vergleich

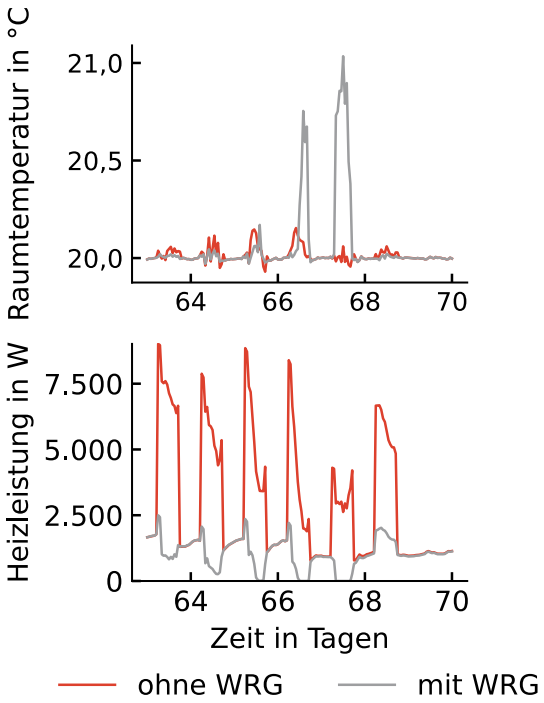

Abbildung 5 – Vergleich der Raumtemperatur und Heizleistung (BK 1, Kat. I, Pr. 1)

zeigt sich ein erhebliches Einsparpotenzial im Nutzenergiebedarf des Klassenraums.

Die erhebliche Reduktion des Heizenergiebedarfs wird bei der Analyse der zeitlich aufgelösten Raumtemperaturen und Heizleistungen deutlich. In Abb. 5 sind exemplarisch für eine Märzwoche die Raumtemperatur und Heizleistung für einen Luftvolumenstrom nach Kat. I und das Belegungsprofil Pr. 1 dargestellt. In den Zeiten mit Belegung wird der Heizenergiebedarf durch die WRG stark reduziert. Die Absenkung der Heizleistung entspricht dabei nicht nur den reduzierten Lüftungsverlusten. Gemeinsam mit den internen und solaren Gewinnen können durch die WRG sowohl die Lüftungsverluste als auch die Transmissionsverluste bilanziell reduziert bzw. ab einer gewissen Außentemperatur sogar ausgeglichen werden. In der Folge steigt die Raumtemperatur über 20 °C und die Heizleistung sinkt auf 0 W ab (z. B. Tag 67).

Abb. 6 zeigt die Aufgliederung des Heizenergiebedarfs in die Bestandteile Transmissionsverluste, Lüftungswärmeverluste, interne und solare Gewinne (durch transparente Flächen). Es ist erkennbar, dass ein großer Anteil des Heizenergiebedarfs durch Transmissionsverluste verursacht wird, da durch die Abschaltung der RLT-Anlage in unbelegten Zeiten keine Lüftungswärmeverluste entstehen. In der dynamischen Simulation wird die Gleichzeitigkeit der Anteile berücksichtigt. Übersteigen die Wärmegewinne die Wärmeverluste, reduziert sich der Heizbedarf auf Null. Aus diesem Grund sind die Heizenergiebedarfe über das gesamte Jahr größer als die Summe der in Abb. 6 dargestellten Anteile. Insbesondere im Sommer , wo kein Heizbedarf mehr vorhanden ist, sind die solaren Gewinne höher. Im Winter hingegen, wo der Heizbedarf besonders hoch ist, sind die solaren Gewinne gering.

Für die bedarfsgebundenen Kosten und CO_2-Emissionen ist der Endenergiebedarf entscheidend. Dieser ist in Tab. 8 für BK 1 und alle vier Randbedingungen gelistet, wobei die Bedarfe mit dem in Abschnitt 2 beschriebenen Energieversorgungssystem berechnet werden. Es zeigt sich, dass durch den Einsatz einer WRG in der RLT-Anlage zwischen 37 und 53% Endenergiebedarf eingespart werden kann. Hierbei verursachen die zusätzlichen Druckverluste durch die WRG erhöhte Strombedarfe. Allerdings sind

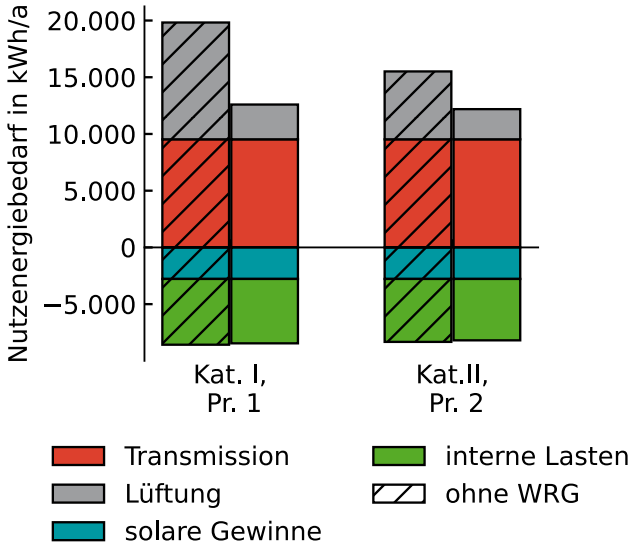

Abbildung 6 – Zusammensetzung des Heizenergiebedarfs (BK 1)

deutlich höhere Einsparungen im Heizenergiebedarf zu erkennen, sodass sich der Einsatz einer WRG insgesamt positiv auswirkt.

Einfluss der Baualtersklasse

Neben dem Luftvolumenstrom und der Belegung ist die energetische Qualität der Gebäudehülle, in der sich der Klassenraum befindet, für den Endenergiebedarf entscheidend, da diese die Transmissionsverluste und solaren Gewinne beeinflusst. In dieser Untersuchung werden zwei Baualtersklassen als Referenz für die energetische Qualität der Gebäudehülle verwendet. Dabei ist zu beachten, dass ältere Gebäude oft durch bereits erfolgte Sanierungsmaßnahmen, zum Beispiel durch einen Austausch der Fenster, eine bereits verbesserte thermische Qualität der Gebäudehülle aufweisen. Die Baualtersklassen sind somit nur als Orientierung für die thermische Qualität der Gebäudehülle zu verstehen. Für eine bessere Übersichtlichkeit werden nachfolgend nicht alle vier Randbedingungen für Luftvolumenstrom und Belegung dargestellt, sondern nur die Randbedingungen, welche in der BK 1 die höchsten (Kat. I, Pr. 1) und niedrigsten (Kat. II, Pr. 2) Einsparpotenziale für die WRG aufgezeigt

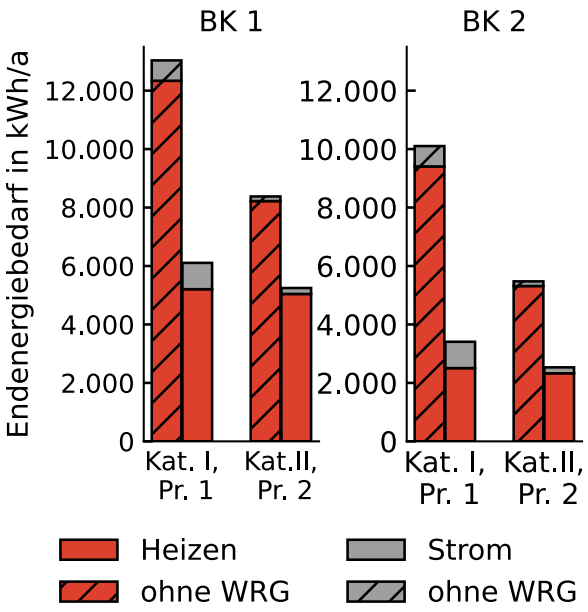

Abbildung 7 – Endenergiebedarf des Klassenraums für unterschiedliche Baualtersklassen

haben. Hierdurch ist die komplette Bandbreite des Einsparpotenzials abgedeckt.

In Abb. 7 ist der Endenergiebedarf für die beiden untersuchten Baualtersklassen dargestellt. Wie zu erwarten, zeigt sich eine Reduktion des Heizenergiebedarfs bei dem jüngeren Gebäudetyp, da hier die Transmissionswärmeverluste geringer ausfallen. Der Einfluss einer besseren thermischen Hülle ist dabei größer bei geringeren Außenluftmengen und höheren internen Gewinne (Kat. II, Pr. 2). Auch für die jüngere Baualtersklasse (BK 2: 1995-2015) zeigt sich eine deutliche Reduktion des Endenergiebedarfs bei Nutzung einer WRG in der RLT-Anlage. Wie in Tab. 9 zu erkennen, sind die prozentualen Einsparungen im Endenergiebedarf dabei sogar deutlich höher für BK 2, auch wenn die absoluten Einsparungen geringer im Vergleich zu BK 1 (vgl. Tab. 8) ausfallen.

3.2 Thermischer Komfort und Luftqualität

Durch die als ideal betrachtete Raumheizung kann die minimale Raumtemperatur von 20 °C

Tabelle 8 – Endenergiebedarf (BK 1) im Vergleich

Rand-bedingung	ohne WRG Heizenergie-bedarf	ohne WRG Strom-bedarf	mit WRG Heizenergie-bedarf	mit WRG Strom-bedarf	Einsparung WRG absolut	Einsparung WRG prozentual
Kat. I, Pr. 1	12 337 kWh/a	697 kWh/a	5206 kWh/a	901 kWh/a	6922 kWh/a	53%
Kat. II, Pr. 1	9865 kWh/a	233 kWh/a	5103 kWh/a	298 kWh/a	4697 kWh/a	47%
Kat. I, Pr. 2	9914 kWh/a	474 kWh/a	5129 kWh/a	609 kWh/a	4650 kWh/a	45%
Kat. II, Pr. 2	8220 kWh/a	160 kWh/a	5043 kWh/a	204 kWh/a	3133 kWh/a	37%

Tabelle 9 – Endenergiebedarf (BK 2) im Vergleich

Rand-bedingung	ohne WRG Heizenergie-bedarf	ohne WRG Strom-bedarf	mit WRG Heizenergie-bedarf	mit WRG Strom-bedarf	Einsparung WRG absolut	Einsparung WRG prozentual
Kat. I, Pr. 1	9406 kWh/a	697 kWh/a	2506 kWh/a	901 kWh/a	6696 kWh/a	66%
Kat. II, Pr. 2	5315 kWh/a	160 kWh/a	2328 kWh/a	204 kWh/a	2943 kWh/a	54%

im Raum mit einer Toleranz von ±0,3 K eingehalten werden. Eine Einhaltung der maximal zulässigen Raumtemperatur von 26 °C kann durch die fehlende aktive Kühlung nicht gewährleistet werden. Da ebenfalls keine Befeuchtung in der RLT-Anlage verbaut ist, kann die relative Feuchte im Raum nicht kontrolliert innerhalb der Komfortgrenzen gehalten werden.

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. 8 ist die Verteilung der Untertemperaturen der Zuluft unterhalb der Raumluft in den prozentualen Anteilen der Betriebsstunden exemplarisch für einen Luftvolumenstrom nach Kat. I, das Belegungsprofil 1 und die Baualtersklasse 1 dargestellt. Gleichzeitig ist die Grenze für das Risiko erhöhter Unzufriedenheit durch Zugerscheinungen (draught rating DR) nach DIN EN ISO 7730 [6] eingezeichnet. Es wird deutlich, dass durch den Einsatz einer WRG die Untertemperatur nicht unter 6 K fällt. Dahingegen treten ohne den Einsatz einer WRG Untertemperaturen von über 20 K auf. Daher ist für diesen Fall mit erhöhtem lokalen thermischen Diskomfort zu rechnen. Die hohen Untertemperaturen (ohne WRG) sind dabei unbeeinflusst von Belegungsprofil, Volumenstrom oder Baualter, da diese in den Stunden mit hohem Heizenergiebedarf auftreten und folglich die Raumtemperatur an der unteren Grenze der geforderten Raumtemperatur (20 °C) durch die Raumheizung gehalten wird. Bei gleichen Außenluftbedingungen ist also grundsätzlich der gleiche Anteil hoher Untertemperaturen (ohne WRG) zu beobachten.

Alternativ zur einer WRG könnte die RLT-Anlage mit einem Heizregister ausgestattet werden und anstelle der freien Heizflächen im Raum die Beheizung des Klassenraums übernehmen. Dadurch wird die notwendige Heizenergie direkt an die Zuluft übertragen, die dann während der Zeiten mit Heizungsbetrieb höhere Zulufttemperaturen bereitstellt. Eine Auswertung der dann auftretenden Zulufttemperaturen ergibt die in Abb. 9 gezeigten Untertemperaturen. Die Untertemperaturen liegen in einem ähnlichen Bereich wie bei Nutzung einer WRG, wobei das Risiko erhöhter Untertemperaturen mit abnehmendem Heizbedarf steigt. Es ist allerdings zu beachten, dass bei der Verwendung eines Heizregisters der

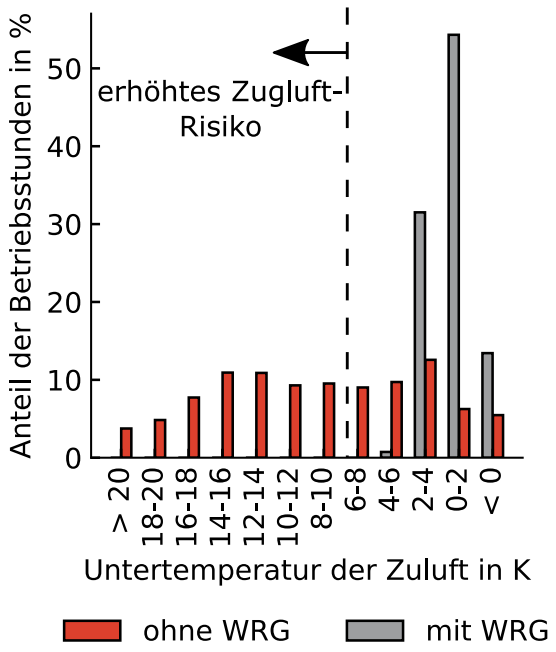

Abbildung 8 – Vergleich der Untertemperaturen für BK1, Kat. I, Pr. 1

Endenergiebedarf für das Heizen analog zur Variante mit Raumheizung deutlich höher ausfällt als bei Nutzung einer WRG. Zudem ist ebenfalls mit erhöhten Druckverlusten und folglich höheren Stromverbräuchen der RLT-Anlage zu rechnen, was hier nicht näher analysiert wird. Darüber hinaus müsste neben dem Heizregister ein zusätzlicher Heizkörper im Raum installiert sein, um den Heizbedarf in den unbelegten Zeiten, in denen die RLT-Anlage ausgeschaltet ist, zu decken. Alternativ müsste die RLT-Anlage um eine Umluftfunktion erweitert werden, welche in den unbelegten Zeiten Raumluft ansaugt und diese über das Heizregister führt, um so den Wärmebedarf zu decken. Dies würde wiederum den Strombedarf der RLT-Anlage deutlich erhöhen, da die RLT-Anlage auch in unbelegten Zeiten betrieben werden müsste.

3.3 Wirtschaftliche Analyse

Die Endenergieeinsparungen, die durch den Einsatz einer WRG in der RLT-Anlage erzielt werden, wirken sich positiv auf die jährlichen Energiekos-

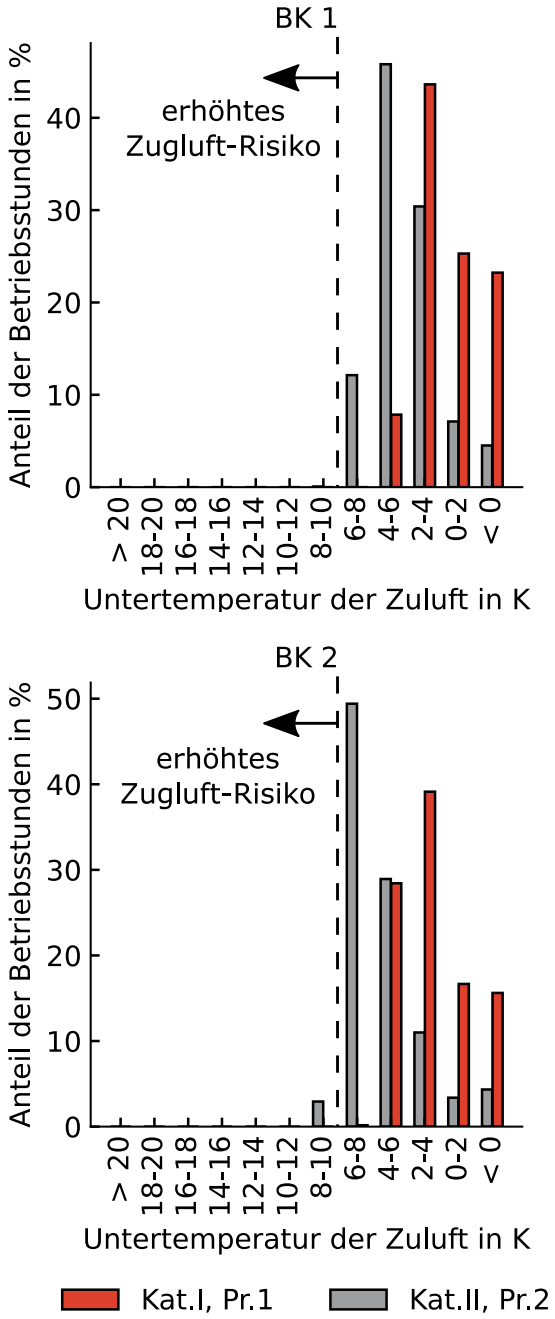

Abbildung 9 – Untertemperaturen bei Nutzung eines Heizregisters anstelle einer WRG

ten aus. Dahingegen steigen die Investitionen für die RLT-Anlage (vgl. Tab. 6). Mit Hilfe der Kennzahlen aus Tab. 7 werden die Annuitäten für den Lebenszyklus der RLT-Anlagen berechnet. Diese sind in Tab. 10 inklusive ihrer Anteile (kapitalgebunden, betriebsgebunden und bedarfsgebunden) dargestellt. Für hohe Luftwechsel und ein Teilzeitbelegungsprofil zeigen sich jährliche Kosteneinsparungen durch den Einsatz der Wärmerückgewinnung. Bei geringeren Volumenströmen mit einer Vollzeitbelegung während der kompletten Betriebszeit, sind hingegen höhere jährliche Kosten zu erwarten. Die Kostensteigerung beträgt hier zwischen 132 und 143 € pro Jahr. Auf die Anzahl der Personen im Raum heruntergebrochen, sind dies lediglich ca. 5 € pro Person und Jahr bei der betrachteten Belegung (29 Personen), welche für eine Komfortsteigerung durch niedrigere Untertemperaturen investiert werden müssen. Hierbei ist zu beachten, dass geringere Belegungen zu verringerten internen Gewinnen führen, sodass der Heizenergiebedarf steigt und eine Reduktion der Lüftungswärmeverluste durch eine WRG an Bedeutung gewinnt. Hier ist also mit geringeren Kostensteigerungen als im hier betrachteten Fall zu rechnen.

In Tab. 11 sind alle Kosteneinsparungen (negative Werte) bzw. Kostensteigerungen (positive Werte) durch die WRG für beide Volumenströme, Belegungsprofile und Baualtersklassen aufgeführt.

3.4 CO_2-Emissionsreduktion und -Vermeidungskosten

Für die Klimaziele ist die Dekarbonisierung des Gebäudesektors entscheidend, da ca. 35 % [1] des Energieverbrauchs in Deutschland auf den Gebäudesektor entfallen. Durch Einsparungen im Endenergiebedarf der Gebäude können CO_2-Emissionen reduziert werden. Für die Berechnung der CO_2-Emissionen werden durchschnittliche Werte für den deutschen Strom-Mix und der Erdgasnutzung nach Großklos [8] angesetzt. Die jährlichen CO_2-Emissionseinsparungen durch den Einsatz einer WRG sind in Abb. 10 dargestellt. Für einen Klassenraum unter den gegebenen Randbedingungen kann eine Einsparung zwischen ca. 0,7 und 1,5 t CO_2/a erzielt werden. Je höher der Luftwechsel im Raum und je geringer die internen Gewinne durch anwesende Personen (Teilzeitbelegung nach Pr. 1), desto höher sind die erzielbaren Reduktionen der Treibhausgasemissionen im Betrieb, da die maschinelle Belüftung in der Gesamtbilanz stärker gewichtet wird. Eine signifikante Abhängigkeit von der Baualtersklasse kann nicht festgestellt werden. Die erzielbaren Reduktionen nehmen lediglich leicht ab.

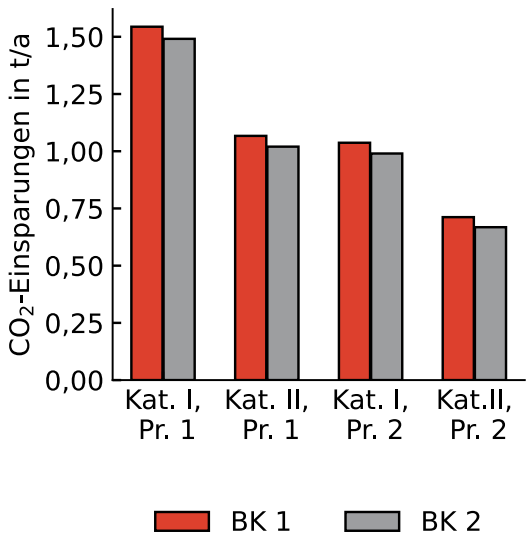

Abbildung 10 – Einsparung der CO_2-Emissionen durch den Einsatz einer WRG

Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 3.3 dargestellten Annuitäten lassen sich die CO_2-Vermeidungskosten berechnen. Diese sind für alle analysierten Randbedingungen in Tab. 12 dargestellt. Für drei von vier Randbedingungen entstehen nur geringe Kosten bis gar keine Kosten. Lediglich für den Fall einer Vollzeitbelegung und einem reduzierten Frischluftvolumenstrom nach Kat. II fallen höhere Vermeidungskosten im Bereich 185 bis 215 €/tCO_2 an. Bezogen auf die Personen im Raum, welche über die Lüftungsanlage versorgt werden, ergibt sich hieraus ein Wert von ca. 6,30 bis 7,40 €/tCO_2 pro Person.

Tabelle 10 – Annuitäten im Vergleich

Konfiguration		Baualter	kapital-gebunden	betriebs-gebunden	bedarfs-gebunden	gesamt
ohne WRG	Kat. I, Pr. 1	BK 1	670 €/a	182 €/a	932 €/a	1784 €/a
	Kat. II, Pr. 2	BK 1	670 €/a	182 €/a	556 €/a	1408 €/a
	Kat. I, Pr. 1	BK 2	670 €/a	182 €/a	765 €/a	1617 €/a
	Kat. II, Pr. 2	BK 2	670 €/a	182 €/a	374 €/a	1226 €/a
mit WRG	Kat. I, Pr. 1	BK 1	921 €/a	251 €/a	553 €/a	1725 €/a
	Kat. II, Pr. 2	BK 1	921 €/a	251 €/a	368 €/a	1540 €/a
	Kat. I, Pr. 1	BK 2	921 €/a	251 €/a	383 €/a	1555 €/a
	Kat. II, Pr. 2	BK 2	921 €/a	251 €/a	197 €/a	1369 €/a

Tabelle 11 – jährliche Kosteneinsparungen bzw. -steigerungen durch den Einsatz einer WRG

Baualter	Konfiguration	Kosteneinsparung
BK1	Kat. I, Pr. 1	59 €/a
	Kat. I, Pr. 2	-53 €/a
	Kat. II, Pr. 1	-37 €/a
	Kat. II, Pr. 2	-132 €/a
BK2	Kat. I, Pr. 1	62 €/a
	Kat. I, Pr. 2	-66 €/a
	Kat. II, Pr. 1	-50 €/a
	Kat. II, Pr. 2	-143 €/a

Tabelle 12 – CO_2-Vermeidungskosten durch den Einsatz einer WRG

Baualter	Konfiguration	CO_2-Vermeidungskosten
BK1	Kat. I, Pr. 1	-39 €/tCO_2
	Kat. I, Pr. 2	52 €/tCO_2
	Kat. II, Pr. 1	35 €/tCO_2
	Kat. II, Pr. 2	185 €/tCO_2
BK2	Kat. I, Pr. 1	-42 €/tCO_2
	Kat. I, Pr. 2	67 €/tCO_2
	Kat. II, Pr. 1	49 €/tCO_2
	Kat. II, Pr. 2	215 €/tCO_2

3.5 Nutzung einfacher Abluftanlagen

Das Konzept einer einfachen Abluftanlage wurde in der Pandemie durch das Max Planck Institut (MPI) [9] als eine schnelle Maßnnahme zur besseren Belüftung eines Klassenraums empfohlen. Zusätzlich wurde dieses Konzept um eine Absaugung von Aerosolen oberhalb der Schülerinnen und Schüler zur Steigerung der Lüftungswirksamkeit ergänzt. Einfache Abluftanlagen haben den Vorteil, dass nur sehr wenig elektrische Energie für den Lufttransport gebraucht wird. Überlicherweise werden diese Anlagen mit einem einfachen Axialventilator ausgestattet, sodass sehr geringe Investitionen notwendig sind. Die Nachströmung von Außenluft muss über geöffnete Fenster oder vorgesehene Nachströmöffnungen erfolgen, die Abluftanlage sorgt für den nötigen Unterdruck zur Umgebung im Raum.

Da bei diesen Anlagen keine Schalldämpfer für den Luftweg verwendet werden, können Geräusche aus der Umgebung fast ungehindert in den Raum eindringen. Daher eignen sich diese Anlagen nur als Dauerlösung, wenn keine störenden Geräuschquellen in der Umgebung (Straßen, Sportplatz etc.) vorhanden sind. Außerdem reagieren diese Anlagen prinzipiell empfindlich auf Änderungen der Druckverteilung an der Gebäudehülle durch Windeinflüsse, da die eingesetzten Axialventilatoren flache Differenzdruck-Volumenstrom-Kennlinien aufweisen und keine hohen Differenzdrücke aufbauen können. Daher kann kein Nennvolumenstrom für alle Wetterzustände garantiert werden. Dieser Effekt ist

auch aus dem Bereich der Wohnungslüftung bekannt [14].

Im Rahmen der Pandemie haben einfache Abluftanlagen einen Beitrag zur Absenkung der Aerosolkonzentration in Klassenräumen geleistet. Insbesondere die Selbstbaulösungen des MPI haben den Einsatz dieser System kurzfristig ermöglicht. Aus den genannten Gründen und der fehlenden Integration einer WRG können diese Systeme jedoch nicht für die anstehende lüftungstechnische Sanierung von Klassenräumen empfohlen werden.

4 Zusammenfassung

Die dynamische Simulationsstudie zeigt, dass der Endenergiebedarf des Klassenraums zur Belüftung und Klimatisierung (nur Heizen) um 37 bis 53 % für ältere Baualtersklassen (1979-1983) abhängig vom gewählten Luftvolumenstrom pro Person und der Belegung gesenkt werden kann. Für jüngere Baualter steigt die prozentuale Endenergieeinsparung (54 - 66 % für 1995-2015), wobei die absoluten Einsparungen nur etwas geringer ausfallen im Vergleich zu älteren Baualtersklassen. Folglich ergeben sich hohe CO_2-Einsparpotenziale (zwischen 0,7 und 1,5 t CO_2/a für alle untersuchten Konfigurationen. Legt man die statistisch erhobenen Daten des Schulministeriums NRW [2] für beispielsweise Gymnasien zugrunde (623 Gymnasien und 501.395 Schülerinnen und Schüler), ergibt sich eine mittlere Anzahl von 804,8 Schülerinnen und Schülern pro Schule. Bei der hier zu Grunde gelegten Belegung von 28 Schülerinnen und Schüler pro Klassenraum ergibt sich eine mittlere Anzahl gleichzeitig belegter Klassenräume von 28,74. Folglich können hochgerechnet für eine Schule am Standort Aachen ca. 20 bis 43 t CO_2/a durch den Einsatz einer WRG eingespart werden.

Die wirtschaftliche Analyse mittels der Energiebedarfe und Investitionen zeigt, dass eine Kosteneinsparung durch die WRG lediglich bei einem Volumenstrom von 36 m^3/h pro Person und einer Teilzeitbelegung erzielt werden kann. Die erhöhten Investitionen und Betriebskosten (für die Wartung der Bypass-Klappe) gleichen die bedarfsgebundenen Kosteneinsparungen aus bzw. übersteigen diese. Vor dem Hintergrund des Klimawandels und den notwendigen Reduktionen der Treibhausgas-Emissionen können die aus der ökologischen und ökonomischen Analyse resultierenden CO_2-Vermeidungskosten als akzeptabel eingestuft werden.

Die Analyse der Komfort-Bedingungen im Klassenraum zeigt, dass durch den Einsatz einer WRG eine deutliche Reduktion der Untertemperaturen erzielt werden kann und so das Behaglichkeitsempfinden der Schülerinnen und Schüler und Lehrkräfte durch vermiedene Zugerscheinungen gesteigert werden kann. Obwohl die Innenraumtemperatur zu Zeiten der Belegung bei Einsatz einer WRG im Vergleich zur RLT-Anlage ohne WRG ansteigt, kann durch einen Bypass über die WRG eine Verletzung der maximal zulässigen Innenraumtemperatur verhindert werden. Es empfiehlt sich daher, einen Bypass über die WRG vorzusehen.

Betrachtet man alle analysierten Aspekte, so ist die Nutzung einer WRG in RLT-Anlagen zur Klassenraumbelüftung insgesamt sinnvoll, da mit ihr erhebliche Energieeinsparungen und damit verbundene Treibhausgas-Reduktionen sowie eine Komfortsteigerung in den kalten Jahreszeiten bei vertretbaren wirtschaftlichen Mehraufwendungen erzielt werden können.

Danksagung

Die Verantwortung für den Inhalt liegt alleine bei den Autoren. Der Beitrag wurde durch die Heinz Trox Wissenschafts gGmbH gefördert.

Literatur

[1] https://www.dena.de/themen-projekte/energieeffizienz/gebaeude/. Stand: 2022-03-02

[2] Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): *Das Schulwesen in Nordrhein-Westfalen aus quantitativer Sicht*. 2021

[3] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: *Richtlinie für die Bundesförderung Corona-gerechte stationäre raumlufttechnische Anlagen*. 6 2021

[4] Constantin, A. ; Streblow, R. ; Müller, D.: The Modelica HouseModels Library: Presentation and Evaluation of a Room Model with the ASHRAE Standard 140. In: *Proceedings of the 10th International Modlica Conference* (2014), 3, S. 293–299

[5] DIN EN 16798 - 1: *Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden*. 2019

[6] DIN EN ISO 7730: *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*. 2005

[7] Finkbeiner, K. ; Kremer, M. ; Rätz, M. ; Ying, X. ; Mathis, P. ; Müller, D.: Effect of Reduced Air Change Rates on Indoor Air Quality and Air Conditioning Energy Consumption in Retail Buildings. In: *Building Simulation 2021 Conference* (2021)

[8] Grossklos, M.: *Kummulierter Energieaufwand und CO2-Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger und -versorgungen*. 2020

[9] Helleis, F. ; Klimnach, T. ; Pöschl, U.: *Ventilator-Fensterlüften gegen COVID-19 und für gute Luft in Schulklassen*. https://www.mpic.de/5043150. Version: 2021

[10] Kremer, M. ; Mathis, P. ; Müller, D.: Moisture in thermal zones - a dynamic modelling approach. In: *1st International Conferenc on Moisture in Buildings 2021 (ICMB21)* (2021), 06

[11] Kremer, M. ; Rewitz, K. ; Müller, D.: Bewertung der Wärmerückgewinnung für die maschinelle Belüftung von Klassenräumen. (2021), 08

[12] Müller, D. ; Lauster, M. ; Constantin, A. ; Fuchs, M. ; Remmen, P.: AixLib - An Open-Source Modelica Library with the IEA-EBC Annex 60 Framework. In: *BauSim 2016* (2016), 9, S. 3–9

[13] Remmen, P. ; Lauster, M. ; Mans, M. ; Fuchs, M. ; Osterhage, T. ; Müller, D.: TEASER: an open tool for urban energy modelling of building stocks. In: *Journal of Buildng Performance Simulation* (2017), 2

[14] Röder, T. ; Mathis, P. ; Müller, D.: *EwWalt – Energetische Bewertung der dezentralen kontrollierten Wohnraumlüftung in alternierender Betriebsweise*. 2021

[15] SIA 2024: *Raumnutzungsdaten für Energie- und Gebäudetechnik*. 2015

[16] Siebler, L. ; Rathje, T. ; Calandri, M. ; Eydner, M. ; Vogt, U. ; Sterigiaropoulos, K.: *Pilotprojekt: Experimentelle Untersuchung zum Infektionsrisiko in Klassenräumen in Stuttgarter Schulen - Abschlussbericht*. 5 2021

[17] VDI 2067 Blatt 1: *Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung*. 2012

[18] Xanthopoulou, K. ; Mehrfeld, P. ; Kangowski, P. ; Lanzerath, F. ; Müller, D.: Validation of a building model as part of the AixLib Modelica library for dynamic plant and building performance simulations. In: *Energy and Buildings* 250 (2021), 11, S. 111248