

Lüftung für Schulen

Nachhaltigkeit von Raumluft-technischen Anlagen mit und ohne Wärmerückgewinnung aus ökologischer Sicht

Die Lüftung in Schulen und vergleichbaren Gebäuden spielte in der Pandemie eine große Rolle. Dieser Fachartikel zeigt welchen Einfluss der Einsatz von Wärmerückgewinnungs-Systemen unter anderem auf die Nachhaltigkeit von RLT-Anlagen hat. Verglichen werden der Einfluss der Fensterlüftung und weitere Arten der mechanischen Belüftung anhand interessanter Berechnungsbeispiele aus der Praxis. Das Ergebnis ist nicht nur im Hinblick auf die Versorgungssicherheit wegweisend.

Um virenbehaftete Aerosole in der Raumluft zu verringern, wurde nicht nur die Fensterlüftung genutzt, sondern auch verschiedene Arten der mechanischen Belüftung. Einfache Abluftventilatoren im Zusammenwirken mit einer Zuströmung von Außenluft über geöffnete Fenster bis hin zu Ab- und Zuluftanlagen mit Wärmerückgewinnung (WRG) wurden dabei neben der klassischen Fensterlüftung eingesetzt. Der Vorteil der mechanischen Lüftung gegenüber der klassischen Fensterlüftung ist der von Dichteunterschieden weitgehend unabhängige Luftaustausch. Damit entfällt die hohe Temperatur-, aber auch die Winddruckabhängigkeit, die bei der klassischen Fensterlüftung ausgeprägt vorhanden ist. **Bild 1** verdeutlicht diese Abhängigkeit.

Anlagen auf Basis von Abluftventilatoren haben den Vorteil einer sehr einfachen und kostengünstigen hybriden Lüftung, bei der die Nachströmung der Außenluft über zu öffnende Fenster – meist gekippte Fenster – erfolgt. Daher müssen in diesem Fall keine Filter oder WRG-Systeme eingesetzt werden. Einschlägige Normen und Richtlinien, die für Zuluftanlagen gelten, müssen dann nicht eingehalten werden. Allerdings kann mit dieser Art Lüftung auch keine Luftaufbereitung erfolgen, sodass die zuströmende Außenluft die jeweils vorherrschenden

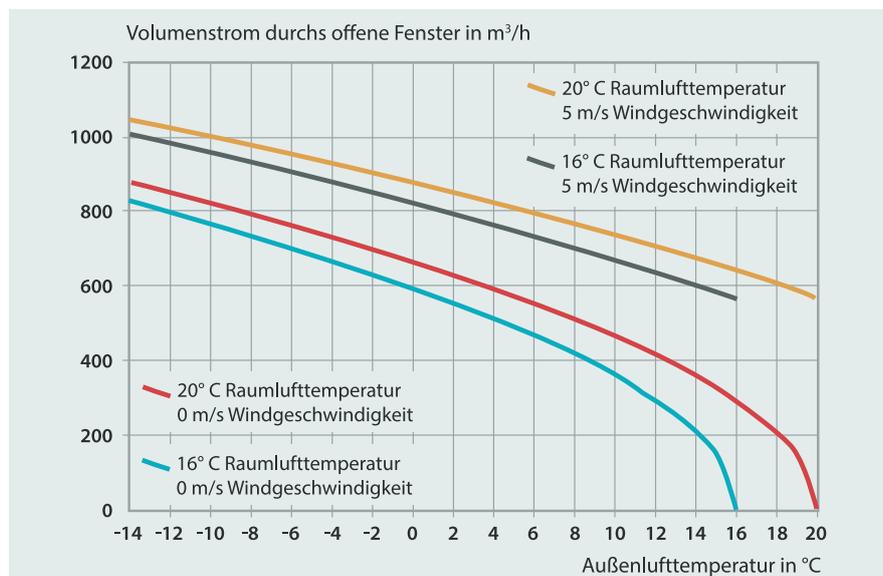


Bild 1: Beispiel einer Fensterlüftung (voll geöffnet) nach DIN SPEC 4108-8 für ein Fenster mit 1,12 m² (2,74 m Höhe Lüftungszone, 0,25 m Rauheitsparameter)¹⁾ Grafik: TGA-Fachplaner, Gentner Verlag

Außenluftkonditionen (zum Beispiel von -12 °C bis 32 °C) aufweist. Weder erfolgt eine Filterung der Außenluft noch wird die zuströmende Luft temperiert. Die Temperierung kann demnach nur durch statische Heizelemente oder Wärmequellen im Raum erfolgen. Zugserscheinungen, insbesondere bei tiefen Temperaturen, lassen sich mit diesen Anlagen nicht verringern.

Hinzu kommt, dass die Fenster immer geöffnet sein müssen, wenn die Lüftung

in Betrieb ist. Damit wird die Schallschutzwirkung eines Fensters zwingend aufgehoben.

Besonders bedenklich ist jedoch, dass die Funktion der Lüftung sofort unterbrochen wird, wenn die Fenster zum Beispiel

F U ß N O T E

1) DIN SPEC 4108-8: Lüftungskonzept mit Fensterlüftung erstellen, TGA-Fachplaner 2021

wegen Komforteinbußen durch den Nutzer geschlossen werden. Zwar dreht sich dann der Abluftventilator weiter, jedoch wird durch die fehlende Nachströmung die Funktion der Lüftung augenblicklich unterbunden. Der Nutzer wiegt sich dann in einer falschen Sicherheit, weil der drehende Abluftventilator eine weitere Funktion der Anlage suggeriert. Durch den dann entstehenden Unterdruck im Raum kann ein Öffnen der Tür erschwert werden, was im Brandfall lebensgefährlich werden kann oder es kann sogar zum Beispiel durch eine geöffnete Tür zu einer Querkontamination von Schadstoffen oder im Brandfall zu einer Übertragung von Rauch zwischen verschiedenen Räumen kommen.

Und last but not least ist die Nutzung einer Wärmerückgewinnung nur mit einer kontrollierten Ab- und Zuluftanlage und nicht mit einer Abluft unterstützten Fensterlüftung möglich. Auch die Nutzung von weiteren Luftaufbereitungsfunktionen einschließlich integrierter Schalldämpfungsmaßnahmen sind nur mit der Nutzung einer kontrollierten Zuluft möglich.

Energetische und ökologische Betrachtungen

Um die Alternative mit und ohne WRG vergleichen zu können, werden Simulationen des Heizfalles durchgeführt, da die Kühlung in Schulen meist nicht genutzt wird. Dazu wird folgendes angenommen:

- Es wird ein Klassenraum im Winterfall betrachtet (Heizfall von -12 °C bis maximal 20 °C)
- als mittlerer Standort Kassel (Zone 7 nach DIN 4710)
- Betriebszeiten nach DIN 18599 T. 10 mit 1 400 h/a (7 h/d bei 5 d/w). Hieraus ergibt sich eine Heizperiode von 1 238 h/a (-12 bis 20 °C)
- Vorlaufzeit 2 h/d (nach DIN 18.599 Teil 10 A.8) mit 400 h/a und 200 m³/h (2,5 m³/h/m² bei 80 m²)
- eine Luftmenge von 780 m³/h (mit 30 m³/h/Person bei 26 Personen)
- zulässige Raumtemperatur am Tag 21 °C (maximal 24 °C) (DIN 18599 T. 10 A.8)
- zulässige Raumtemperatur in der Nacht 17 °C (abgesenkter Betrieb 4 K)
- Transmissionsverluste maximal 825 W (AL: -12 °C / RL: 21 °C) mit $u \cdot A = 25 \text{ W/K}$ (zum Beispiel mit $k = 0,5 \text{ W/m}^2/\text{K}$ bei $A = 50 \text{ m}^2$ Fläche)

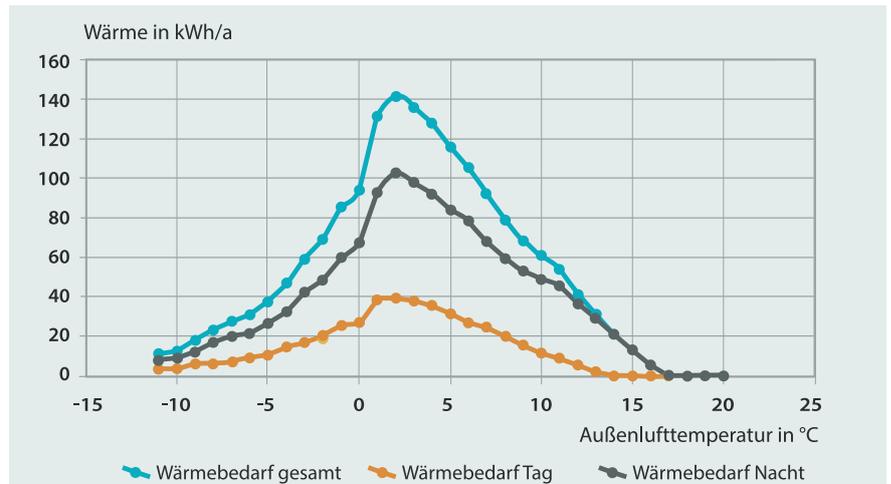


Bild 2: Energiemengen in Leerstandzeiten (in Summe 1765 kWh/a). Grafik: Howatherm GmbH



Bild 3: Wärmeleistungsbedarf bei Vollbelegung mit und ohne WRG. Grafik: Howatherm GmbH

- Strahlungsgewinn maximal 250 W (diffuse Strahlung im Winter)
- innere Last maximal 1 560 W (26 Personen mit 60 W gemäß DIN 18599 T. 10 A.8) bei 5 h/d Vollnutzungsstunden und 7 h/d Nutzungszeit
- innere Last durch Licht (LED) von 160 W, wenn der Raum belegt ist
- Teillastfall mit 13 Personen mit voller und angepasster Luftmenge
- Berücksichtigung Vereisungsschutz der WRG bei -12 °C bis -5 °C

Wärmebedarf in Zeiten ohne Belegung

Wenn der Klassenraum nicht belegt ist, ergibt sich folgender Energiebedarf, der sich im Wesentlichen durch die Transmissionsverluste ergibt, da interne Lasten (Personen und Licht) fehlen. Lediglich die solare Einstrahlung kann am Tag als

Wärmegewinn genutzt werden (Bild 2). Nachts besteht bei einer Dauer von 3 804 h/a und einer Raumtemperatur von 17 °C ein Wärmebedarf von 1 309 kWh/a. Am Tag ist durch die geringeren Leerstandzeiten (1 636 h/a) für 21 °C Raumtemperatur ein Wärmebedarf von nur 456 kWh/a erforderlich.

Vollbelegung mit und ohne Wärmerückgewinnung

Ist der Klassenraum mit 26 Personen voll belegt, stellt sich nachfolgende Situation ein. Ohne WRG wird eine Wärmeleistung maximal von 7,5 kW (bei -12 °C) benötigt. Diese Leistung ergibt sich aus der Bilanz der Lüftungswärmeverluste von 8,7 kW und des Transmissionswärmeverlusts von rund 0,8 kW, die durch die internen Lasten wie die Personenabwärme von 1,6 kW sowie durch Licht von rund 0,2 kW und durch solare diffuse

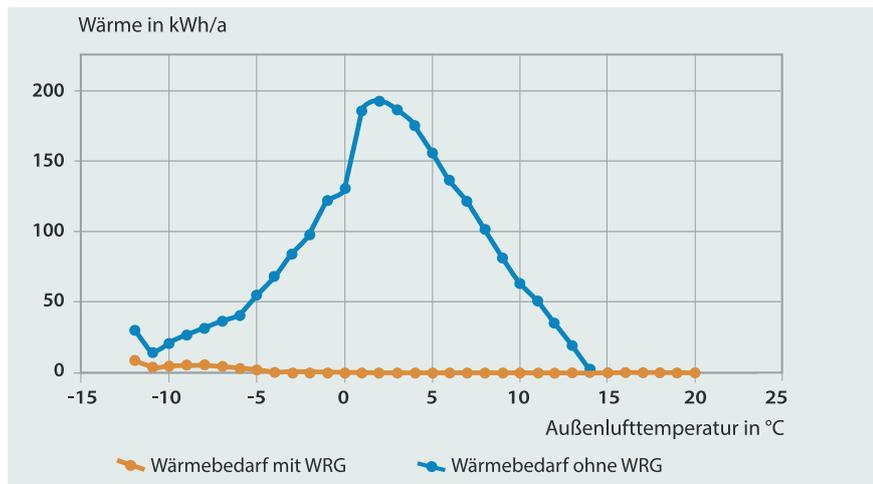


Bild 4: Wärmebedarf mit und ohne WRG. Grafik: Howatherm GmbH

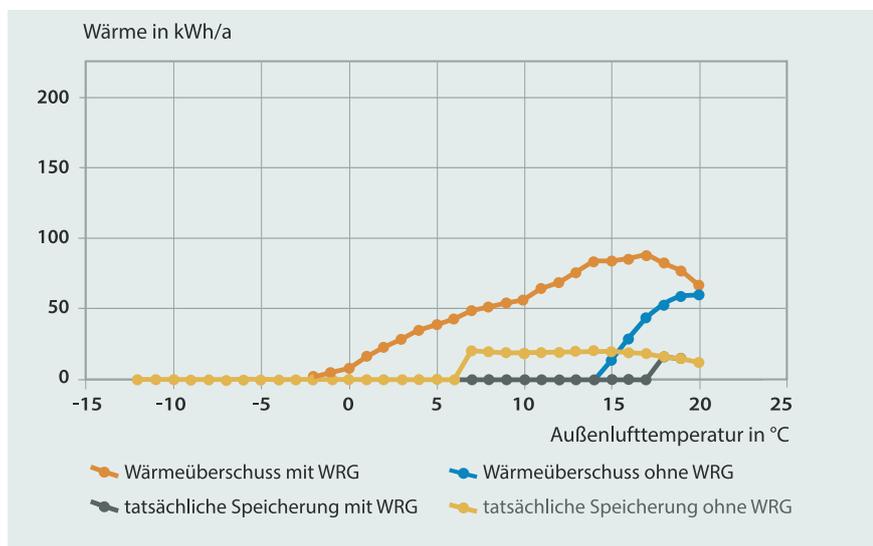


Bild 5: Wärmespeicherfähigkeit des Raumes. Grafik: Howatherm GmbH

Einstrahlung während der Wintermonate mit rund 0,3 kW reduziert werden.

Mit Wärmerückgewinnung wird dagegen eine maximale Wärmeleistung von rund 2,2 kW benötigt, wenn die Anlage mit Vereisungsschutz betrieben wird. Ohne Vereisungsschutz beträgt die Leistung nur 0,7 kW. Die Heizgrenze verschiebt sich von +14 °C (ohne WRG) auf -4 °C (mit WRG). Dies bedeutet, dass mit Nutzung einer WRG erst unterhalb einer Temperatur von -4 °C zusätzlich Wärme zugeführt werden muss (Bild 3).

Aus diesen Leistungen ergeben sich 2 261 kWh/a für die Anlage ohne Wärmerückgewinnung mit 945 h/a Heizungs-nutzungsstunden, während die Anlage mit WRG noch zusätzlich 38 kWh/a an primärer Wärme in 54 h/a (mit Vereisungsschutz berechnet) benötigt. Mit der WRG werden damit 2 223 kWh pro Jahr eingespart.

Durch die inneren Lasten wird im Betrieb – ohne WRG über 14 °C und mit WRG über -4 °C – dem Raum mehr Wärme zugeführt als benötigt wird, um die Raumtemperatur auf 21 °C zu halten (Bild 4). Dieser Überschuss an Wärme führt entweder zu einer weiteren Erhöhung der Raumtemperatur, die abgeführt werden muss, oder es muss die Leistung der WRG abgeregelt werden.

Wenn eine begrenzte Erhöhung der Raumtemperatur akzeptiert wird (zum Beispiel bis maximal 24 °C), erwärmen sich die Massen des Raumes und ein Teil der Überschusswärme wird gespeichert. In den Leerstandzeiten wird diese Wärme wieder abgegeben. Sie muss nicht mehr durch die Heizung erzeugt werden.

Damit könnte eine Wärmemenge mit Nutzung einer WRG von 940 kWh/a gegenüber der Anlage ohne WRG (orange Linie abzüglich blaue Linie in Bild 5) ge-

speichert werden. Durch eine Begrenzung der zulässigen Raumtemperatur auf 24 °C und Nutzung einer abgesenkten Raumtemperatur von 17 °C während der Nacht können bei einem angenommenen Speicherwirkungsgrad von 0,9 aber nur 220 kWh/a tatsächlich genutzt werden (gelbe Linie minus graue Linie in Bild 5).

Teilbelegung mit und ohne Wärmerückgewinnung

Mit einer halben Belegungsdichte von 13 Personen wird ein weiterer Fall betrachtet.

Im ersten Ansatz wird dabei die Luftmenge mit 780 m³/h konstant belassen (ungeregelter Betrieb der Anlage). Lediglich die inneren Lasten ändern sich jetzt von rund 1,6 kW auf 0,8 kW. Damit verschiebt sich die Heizgrenze ohne WRG von 14 °C auf rund 17 °C, beziehungsweise mit WRG von -4 °C auf +7 °C. Durch die geringere interne Last werden jetzt ohne WRG rund 3 107 kWh/a in 1 111 h/a beziehungsweise mit WRG 246 kWh/a in 550 h/a an Primärenergie zum Heizen des Raumes benötigt. Das maximal mögliche Potenzial zur Wärmespeicherung sinkt damit auf 302 kWh/a. Durch die Begrenzung der Raumtemperatur auf maximal 24 °C können von diesen 302 kWh/a nur rund 103 kWh/a tatsächlich genutzt werden.

Es ist offensichtlich, dass die fehlenden inneren Lasten einen erheblichen Einfluss auf den Nutzen der WRG haben. Er steigt um rund 29 % von 2 223 kWh/a auf 2 861 kWh/a (Bild 6), wobei die Möglichkeit der Wärmespeicherung von 220 kWh/a auf 103 kWh/a etwa halbiert wird.

Wird die Luftmenge auf den tatsächlichen Bedarf der 13 Personen reduziert – halbe Luftmenge –, halbiert sich erwartungsgemäß die Wärmeleistung etwa von 8,4 kW auf 4,0 kW (ohne WRG) und von 3,0 kW auf 1,4 kW (mit WRG). Die Heizgrenze liegt dann bei rund 14 °C (ohne WRG) mit einer Nutzungszeit von 885 h/a und bei etwa 0 °C (mit WRG) mit 120 h/a. Die eingesparte Wärmemenge reduziert sich damit auf 1 175 kWh/a (ohne WRG) abzüglich 35 kWh/a (mit WRG).

Die mögliche Wärmespeicherung bleibt auf dem Niveau von rund 100 kWh/a etwa konstant. Somit spart eine angepasste Luftmenge nicht nur elektrische Energie ein, sondern auch Wärmeenergie.

Vorlaufzeiten mit Teilluftmenge

Vor dem Unterricht berücksichtigt die DIN 18.599 eine zweistündige Vorlaufzeit. Während dieser Zeit wird der Raum mit Frischluft gespült, um im Raum noch vorhandene Schadstoffe abzuführen. Mit einem flächenbezogenem Wert von 2,5 m³/h je Quadratmeter ergibt sich bei angenommenen 80 m² Raumfläche eine Luftmenge von 200 m³/h. Hieraus leitet sich eine Wärmemenge von 321 kWh/a (ohne WRG) beziehungsweise 96 kWh/a (mit WRG) ab. Die Einsparung der WRG beträgt demnach 226 kWh/a.

Mittlere CO₂-Emissionen in Deutschland

Zur Berücksichtigung der CO₂-Emissionen für die Wärmebereitstellung wurde ein mittlerer Wert von gerundet 300 g CO₂ eq./kWh gewählt. Dieser ergibt sich aus Emissionen von 202 g CO₂ eq./kWh für Gas (Anteil 44,3 %), 315 g CO₂ eq./kWh für Öl (Anteil 25 %), rund 30 g CO₂ eq./kWh für Pellets (Anteil 18 %), 341 g CO₂ eq./kWh für Fernwärme (Anteil 10,2 %) sowie 435 g CO₂ eq./kWh für Strom (1,6 %) und 429 g CO₂ eq./kWh für Kohle (0,9 %) ²⁾ (Bild 7). Daraus resultiert ein Mittelwert in Deutschland von rund 220 g CO₂ eq./kWh ³⁾.

Zusätzlich müssen dabei Verteil- und Erzeugungsverluste berücksichtigt werden. Diese liegen nach DIN SPEC 15240 Tabelle 13 ⁴⁾ bei 35 % (70 °C Vorlauf-temperatur). Unter Beachtung dieser Verteilverluste ergibt sich daher ein mittlerer Wert von rund 300 g CO₂ eq./kWh.

Für Strom in Deutschland wurde der Strommix von aktuell 435 g CO₂ eq./kWh ⁵⁾ angesetzt. In den letzten Jahren haben sich insbesondere die CO₂-Äquivalente für Strom verringert.

Zur Bestimmung der „grauen“ CO₂-Emissionen wurde als Referenz gemäß der ÖKOBAUDAT ⁶⁾ ein Klimagerät und ein Lüfter (1000 m³/h) mit WRG gewählt. Diese Datensätze wurden nach dem European Standard EN 15804 A2 für Nachhaltiges Bauen modelliert. Die Ergebnisse werden in Modulen abgebildet, die den strukturierten Ausdruck von Ergebnissen über den gesamten Lebenszyklus zulassen. Die Datensätze repräsentieren eine „Cradle-to-Gate“-Betrachtung für das Jahr 2021. Sie können verwendet werden, um die Lieferkette der jeweiligen

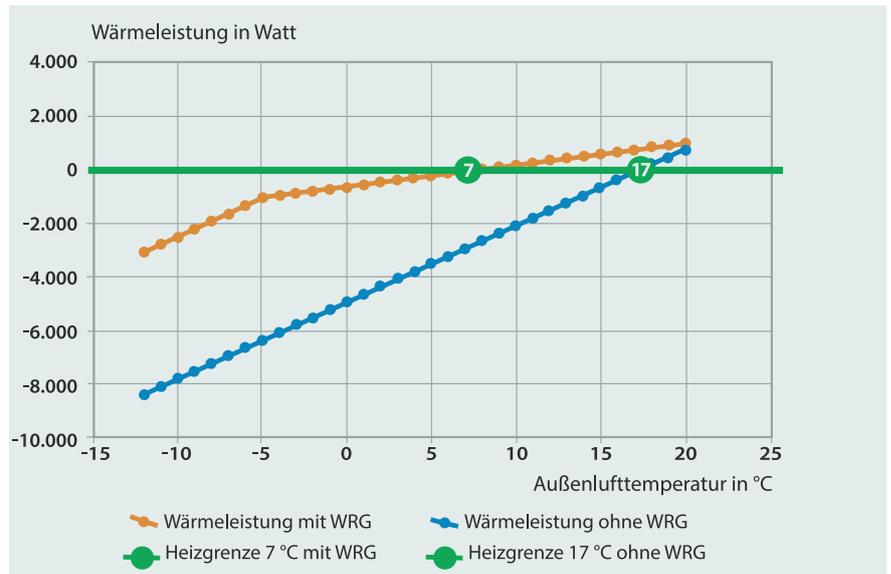


Bild 6: Wärmeleistungsbedarf bei Teilbelegung mit und ohne WRG. Grafik: Howatherm GmbH

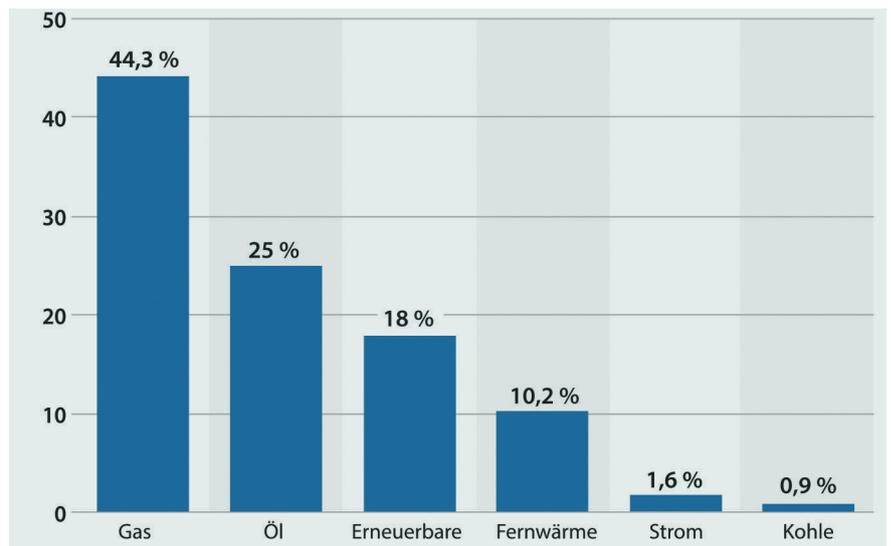


Bild 7: Energieträger zur Wärmebereitstellung in Deutschland. Quelle: Statista 2021 ²⁾, Grafik: Howatherm GmbH

Produkte in einer repräsentativen Weise aufzuzeigen. Die Kombination mit anderen Prozessen und diesem Produkt ermöglicht die Erstellung von anwenderspezifischen LCAs (Life cycle assessments).

Für das Klimagerät ⁷⁾ wird eine CO₂-Emission von 47,1 kg CO₂ eq./kW beziehungsweise bezogen auf das Gerätegewicht von 3,51 kg CO₂ eq./kg für die Herstellung und 16,0 kg CO₂ eq./kW beziehungsweise 1,19 kg CO₂ eq./kg für das Recycling angegeben. Dies ergibt eine Nettobelastung von 31,2 kg CO₂ eq./kW beziehungsweise 2,33 kg CO₂ eq./kg, berechnet mit einem spezifischen Gewicht von 13,4 kg/kW. Für einen zentralen Lüfter mit einer Luftmenge von 1000 m³/h und WRG ⁸⁾ (Gerätegewicht 100 kg) wird ►

F U ß N O T E N

- <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/250403/umfrage/raumwaermebereitstellung-nachenergietraeger-in-deutschen-haushalten/>
- <https://www.kea-bw.de/service/emissionsfaktoren/>
- DIN SPEC 15240: 2018-08 – Entwurf: Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Energetische Inspektion von Klimaanlage, Ausgabedatum 2018-08
- <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/stromwaermeversorgung-in-zahlen#Strommix>
- Vereinheitlichte Datenbasis für die Ökobilanzierung von Bauwerken, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB)
- https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=9da0974d-cd0c-402f-a72ee07f2da68d6&version=20.21.060&stock=OBD_2021_II&lang=de

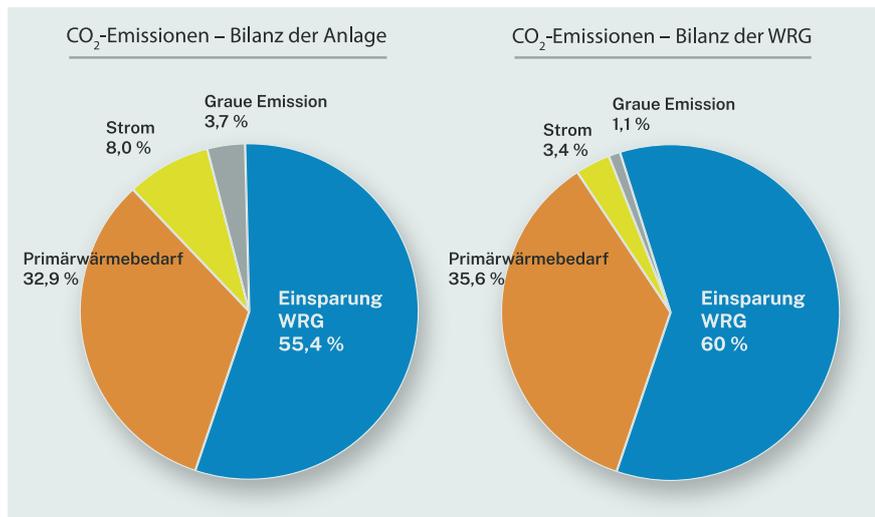


Bild 8: Anteile der CO₂-Emissionen nach Bereichen. Grafik: Howatherm GmbH

die CO₂-Emission mit 376,4 kg CO₂ eq. beziehungsweise 3,76 kg CO₂ eq./kg (Herstellung) und 169,5 kg CO₂ eq. beziehungsweise 1,69 kg eq.CO₂/kg (Recycling) bilanziert. Dies ergibt eine Nettobelastung von 207,9 kg CO₂ eq. beziehungsweise 2,08 kg CO₂ eq./kg.

Beide Angaben ergeben für die Nettoumweltbelastung einen Mittelwert von letztlich 2,20 kg CO₂ eq./kg (Herstellung abzüglich Recycling).

Ökologische Bewertung

Die Alternativen mit und ohne WRG werden auf Basis der Simulationen des Heizfalles für den Auslegungsfall und den Gebäudespeichereffekten bewertet. Dabei werden die CO₂-Emissionen im Betrieb (Wärme und Strom) sowie die grauen Emissionen zur Herstellung der Komponenten im Rahmen einer Lebenszyklusbeurteilung (LCA) berechnet.

Unter den gegebenen Rahmenbedingungen ergeben sich während des Schulbetriebs Einsparungen von 2 223 kWh/a im Auslegungsfall. Weiterhin werden während der Vorlaufzeiten durch die WRG 226 kWh/a eingespart. Und durch die mögliche Speicherung der Wärme im Gebäude kann die WRG zusätzlich 220 kWh/a nutzen. Diese Gesamtwärmeeinsparung von 2 669 kWh/a entspricht einer CO₂-Minderung von 801 kg CO₂ eq./a.

Der Einsparung stehen allerdings Aufwendungen in Form von Elektroenergie gegenüber. Bei einer Laufzeit der Anlagen von 1 400 h/a ergibt sich bei einer Leis-

tung für die RLT-Anlage von 190 W und mit reduzierter Luftmenge während der Vorlaufzeit mit 400 h/a ein Elektroenergiebedarf von 267 kWh/a. Wird die Bilanzgrenze um die WRG gezogen, ergibt sich ein Elektroenergiebedarf von 103 kWh/a. Die Jahresarbeitszahl beträgt mit der gezogenen Bilanzgrenze um die RLT-Anlage dann 10, während die gezogene Bilanzgrenze um die WRG eine Jahresarbeitszahl von 26 ergibt. Die CO₂-Emissionen für die RLT-Anlage betragen beim aktuellen Strommix 116 kg CO₂ eq./a, während für den Betrieb der WRG die CO₂-Emissionen 45 kg CO₂ eq./a anfallen.

Die betriebsgebundenen CO₂-Emissionen für die gesamte raumlufttechnische Anlage betragen dann 685 kg CO₂ eq./a, während die CO₂-Emissionen für die WRG bei 756 kg CO₂ eq./a liegen.

Bei einer angenehmen Lebensdauer der Anlagen von 15 Jahren^{9),10)} ergeben sich für den Lebenszyklus der raumlufttechnischen Anlage eine Einsparung von 10 269 kg CO₂ eq. Wird die WRG für sich betrachtet, ergeben sich 11 341 kg CO₂ eq.

Unter Berücksichtigung der grauen CO₂-Emissionen für die Herstellung der Gesamtanlage beziehungsweise der WRG müssen 792 kg CO₂ eq. für die RLT-Anlage und 211 kg CO₂ eq. für die WRG angerechnet werden.

Damit ergibt sich eine Nettoeinsparung von 9 477 kg CO₂ eq., wenn die Bilanzgrenze um die RLT-Anlage gezogen wird, während bei Betrachtung der Bilanzgrenze bezogen auf die WRG, die Minderung bei 11 129 kg CO₂ eq. liegt.

Zusammenfassung

Aus den Berechnungen wird deutlich, dass die Wärmerückgewinnung einen erheblichen Einfluss auf die Ökologie von Raumlufttechnischen Anlagen hat.

Unter Berücksichtigung der mittleren CO₂-Emissionsfaktoren für Deutschland ergeben sich je nach gewählter Bilanzgrenze CO₂-Minderungen pro 1 000 m³/h von netto 878 kg CO₂ eq. (Anlage) bis 970 kg CO₂ eq. (nur WRG) pro Jahr. Zudem steigt die Versorgungssicherheit, da deutlich weniger Primärenergie benötigt wird.

Es werden außerdem bessere hygienische Bedingungen geschaffen, da RLT-Anlagen zwangsläufig und unabhängig von Nutzereingriffen den Raum mit Frischluft versorgen. Dies sorgt insbesondere im Winter für eine gesteigerte Sicherheit im Hinblick auf Erkältungskrankheiten. Zudem werden durch RLT-Anlagen auch Allergene (zum Beispiel Pollen) wirkungsvoll verringert.

Des Weiteren wird der Komfort im Raum verbessert, da durch die WRG die Außenluft temperiert und in der RLT-Anlage gefiltert wird. Auch werden Schallprobleme durch offene Fenster vermieden. ■

F U ß N O T E N

- 8) https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=466a78bc-2465-4140-b244-fdfd0fd79d84&version=20.21.060&stock=OBD_2021_II&lang=de
- 9) Bundesfinanzministerium, AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig „Heil-, Kur-, Sport- und Freizeitbäder“, BMF-Schreiben vom 10. April 1995 – IV A 8 – S 1551 – 85/95
- 10) Bundesfinanzministerium, AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter (AfA-Tabelle „AV“), IV D 2 – S 1551 – 188/00, B/2-2-337/2000 – S 1551 A, S 1551 – 88/00

**Prof. Dr.-Ing.
Dr. rer. pol.
Christoph Kaup**

ist Honorarprofessor am Umwelt-Campus Birkenfeld und Geschäftsführender Gesellschafter der Howatherm Klimatechnik GmbH, Brücken.
Foto: Nikola Krieger

