

### Kurzbericht zur Ausführung des Referenzgebäudes hinsichtlich der Lüftungsart

#### Lüftungsstandard im Referenzgebäude

In Wohngebäuden wird eine hygienische Be- und Entlüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung im Referenzgebäude vorgesehen. Dadurch reduzieren sich die Lüftungswärmeverluste auf ein Minimum. Es besteht keine direkte Anforderung eine Lüftungsanlage in neuen Wohngebäuden einzubauen, aufgrund der Berücksichtigung im Referenzgebäude führt das aber indirekt dazu, da der Unterschied im Lüftungswärmeverlust im Fall einer Fensterlüftung in der Regel nicht durch mehr Dämmstoff in der Gebäudehülle kompensiert werden kann. Da Lüftungsanlagen üblich während der gesamten Heizperiode betrieben werden, wird eine kontinuierliche Betriebsweise und Energieeinsparung erreicht und die Anlagen können wirtschaftlich betrieben werden. Neben den energetischen Aspekten hat der Einsatz einer kontrollierten hygienischen Lüftung zudem auch Vorteile hinsichtlich der Reduzierung von bauphysikalisch bedingten Feuchteschäden und dient zur Gewährleistung einer guten Raumluftqualität, wie sie insbesondere in luftdichten und manuell gelüfteten Gebäuden oft nicht vorhanden ist. In Nichtwohngebäuden werden RLT-Anlagen oft auch nicht energiemotiviert und nutzungsbezogen eingeplant. Dies ist zum Beispiel für innenliegende Räume oder für Räume mit hohem Frischluftbedarf erforderlich. Die Betriebszeit von RLT-Anlagen beschränkt sich allerdings meist auf den Nutzungszeitraum eines Gebäudes. Die Betriebszeit und die damit verbundene Energieeinsparung sind mit dem Nutzungszeitfenster von Gebäuden in Bezug zu setzen.

2010 wurde die Verordnung über die Gesamt-Energieeffizienz von Nichtwohngebäuden (RGD-2010) eingeführt. Dabei wird das geplante Gebäude mit vom Gesetzgeber vorgegebenen Ausstattungsmerkmalen (U-Werte, Heizungssystem, Beleuchtungssystem, ...) berechnet, welches als *Referenzgebäude* bezeichnet wird. Die Ergebnisse dieser Berechnung markieren den jeweiligen Anforderungswert an den Heizwärmebedarf (Wärmeschutz), den Primärenergiebedarf (Gesamt-Energieeffizienz) und die CO<sub>2</sub>-Emissionen (Umweltauswirkungen). Das *Referenzgebäude* für Nichtwohngebäude sieht vor, dass im Fall einer geplanten Fensterlüftung der Anforderungswert für den Heizwärme- und Primärenergiebedarf ebenfalls mit einer Fensterlüftung bewertet wird. Der sich daraus ergebene Berechnungswert für den Heizwärme- und Primärenergiebedarf entspricht dann der Effizienzklasse D.

Mit der überarbeiteten Verordnung im Jahre 2015 (RGD-2015) liegen die Anforderung an die Effizienzklassen auf dem Standard C und soll 2018 – im Rahmen der schrittweisen Einführung des nZEB (nearly zero-energy building) – auf B angehoben werden. Die Effizienzklassen entsprechen hierbei einer jeweils prozentualen Unterschreitung des Berechnungswerts des Referenzgebäudes D (RGD-2010). Dies führt dazu, dass über Fenster gelüftete Gebäude den C-Standard nur dann erreichen können, wenn der Wärmeschutz der Gebäudehülle entsprechen erhöht wird, da hier im Vergleich zum Referenzgebäude keine energetische Verbesserung umgesetzt wird. Wird der Standard B als Neubauanforderung angesetzt, kann das unter Umständen dazu führen, dass eine RLT-Anlage mit Wärmerückgewinnung oder eine luftqualitätsgeführte Fensterlüftung umgesetzt werden muss, wenn die prozentuale Unterschreitung der Wärmeschutzklasse von D auf B (-55 %) nicht alleine über eine Erhöhung der Dämmstoffdicke erreicht werden kann.

## Luftqualität und Lüftungsart

Neben diesen Aspekten wird in Luxemburg für öffentliche Schulen (Lyzeen) oft das Konzept der zeitlich gesteuerten Pausenfensterlüftung über vertikale motorisch öffnensbare Fensterlüftungsflügel angewendet<sup>1</sup>. Die Fenster in einem Klassenraum bleiben während der Nutzung geschlossen und werden in der Pause geöffnet und der Raum mit Frischluft versorgt. Vorausgesetzt die Fensteröffnungsfläche ist ausreichend dimensioniert, wird in diesem Zeitfenster ein Luftaustausch sichergestellt. Vor dem Beginn des Unterrichts werden die Fenster wieder geschlossen. Dadurch ergibt sich ein über die Nutzungszeit geringerer gemittelter Außenluftvolumenstrom und ein entsprechend geringerer Energiebedarf zum Heizen. Gegenüber einer kontrollierten hygienischen und kontinuierlichen Raumlüftung ergibt sich dadurch aber auch eine nicht gleichbleibende Raumlufqualität.

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration kann als verlässlicher und wissenschaftlich begründeter Leitindikator für die Luftqualität in Räumen herangezogen werden.<sup>2,3,4,5</sup> Die Wirkungen von hohen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Raum auf den Menschen sind gut erforscht. Mehrere wissenschaftliche Studien belegen, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumlufqualität unter anderem einen wesentlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit<sup>6</sup>, die Denkleistung und die Gedächtnisfunktionen hat und dies ist insbesondere im Hinblick auf Schulen ein wichtiger und kritischer Indikator.<sup>2,7,8</sup> Auch reagieren Kinder möglicherweise empfindlicher auf Umgebungsbedingungen als Erwachsene.<sup>9</sup> Der Grenzwert für hygienisch unbedenkliche CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Raumlufqualität liegt bei unter 1.000 ppm.<sup>10</sup> Zum Beispiel zeigen Untersuchungen an 251 und 363 Klassenräumen in Deutschland, dass in Schulen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von über 2.000 ppm bis 5.000 ppm keine Seltenheit sind<sup>2,7</sup>. Dabei ist auch zu beachten, dass es sich bei der Analyse um bestehende Gebäude handelt, die in der Regel nicht den energetischen Anforderungen von nZEB-Gebäuden entsprechen – insbesondere ist das Relevant für den Einfluss der ungewollten Eigenlüftung infolge von Undichtigkeiten der Gebäudehülle. In energieeffizienten und luftdichten Gebäuden werden sich die Effekte tendenziell verstärken.

Die Frischluftmenge von RLT-Anlagen kann auch in Abhängigkeit der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Raum angepasst werden. Dabei wird ein Sensor im Raum installiert, der die CO<sub>2</sub>-Konzentration als Indikator für die Luftqualität misst. In Abhängigkeit des gemessenen Wertes wird der Volumenstrom der RLT-Anlage angepasst. Ähnlich kann dies auch über Fensterelemente realisiert werden. Es stellt sich diesbezüglich die Frage, inwieweit in einem nZEB-Gebäude eine geregelte manuelle oder zeitlich gesteuerte Fensterlüftung aus energetischen und Komfortaspekten und zur Bestimmung der energetischen Anforderungen an neue Gebäude akzeptiert werden kann.

---

<sup>1</sup> Administration des bâtiments publics, Komfort- und energieoptimierte Lycées, Planungsvorgaben für Architekten und Gebäudetechnik, 2014.

<sup>2</sup> Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumlufqualität – Mitteilung der Ad-hoc-Arbeitsgruppe der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden. Bekanntmachung des Umweltbundesamtes, Bundesgesundheitsbl – Gesundheitsforsch - Gesundheitsschutz 11, 2008, 51: 1358-1369, Springer Medizin Verlag 2008.

<sup>3</sup> Anerkanntes Maß für die Bewertung der Raumlufqualität für Räume deren bestimmende Ursache für Stofflasten Personen sind, nach 10.

<sup>4</sup> A. Greml, Et al., Evaluierung von mechanischen Klassenzimmerlüftungen in Österreich und Erstellung eines Planungsleitfadens, Berichte aus Energie- und Umweltforschung, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2008.

<sup>5</sup> P. Tappler, Et al., Richtlinie zur Bewertung der Innenraumlufqualität, Kohlenstoffdioxid als Lüftungsparameter Aktualisierte Fassung 11/2017, Arbeitskreis Innenraumlufqualität am Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW), Wien.

<sup>6</sup> Die Leistungssteigerung bei mechanischer Belüftung liegt bei etwa 4% gegenüber einer Fensterlüftung, siehe <sup>8</sup>

<sup>7</sup> Neumann, Buxtrup, Beurteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassenräumen, Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft, 74, 06/2014, Nr.7, S.235-244

<sup>8</sup> Pawel Wargocki, David P. Wyon, Et al., The Effects of Outdoor Air Supply Rate in an Office on Perceived Air Quality, Sick Building Syndrome (SBS) Symptoms and Productivity, IndoorAir Vol 10, No. 4:222-2 (2000)

<sup>9</sup> Pawel Wargocki, David P. Wyon, Research Report on Effects of HVAC on student performance, ASHRAE Journal, Vol. 48, Oct. 2006, S.24-28.

<sup>10</sup> Arbeitsstättenrichtlinie: Lüftung (ASR A3.6). Ausgabe 1/2012; zuletzt geändert GMBI 2018, S. 474.

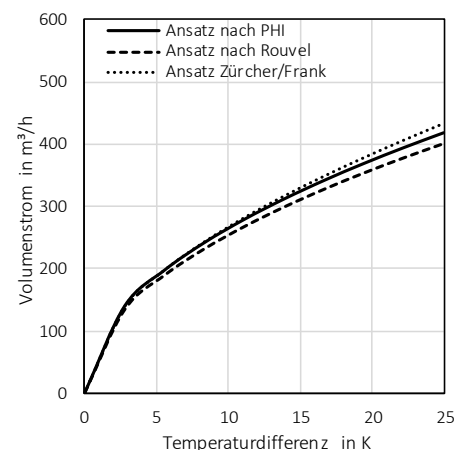
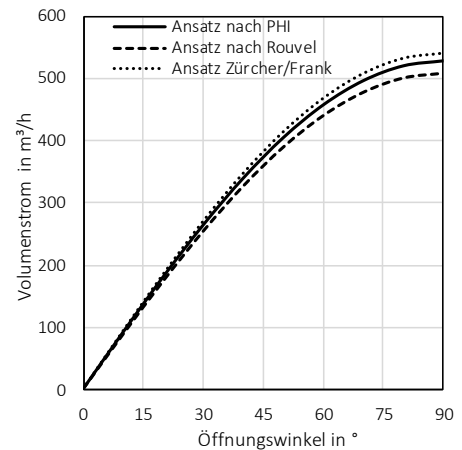
## Fensterlüftungspotential

Das Lüftungspotential von Fenstern hängt im Wesentlichen vom Temperaturunterschied zwischen Raum- und Außenluft ab. Weiter wirken der Windeinfluss und in sehr geringem Umfang Diffusionsvorgänge. Nebenstehendes Bild zeigt den Fensterluftwechsel bei einer Raumtemperatur von 21°C und einer Außentemperatur von 2°C (Ø Außenlufttemperatur in der Heizperiode) für ein Drehfenster<sup>11</sup> mit 2,5 m x 0,3 m lichter Öffnung<sup>12</sup> für verschiedene Öffnungswinkel – ohne Windeinfluss<sup>13</sup>. Mit dem Öffnungswinkel steigt auch der Fensterluftvolumenstrom quasilinear an. Ab einem Öffnungswinkel von 45° wirkt sich ein größerer Öffnungswinkel nicht mehr so stark auf den resultierenden Fensterluftvolumenstrom aus. Der realisierbare Öffnungswinkel liegt konstruktionsbedingt oft auch unterhalb von 45°, was einem guten Kompromiss aus baulicher Integrierbarkeit und Lüftungseffektivität entspricht. Wichtig ist in dem Zusammenhang auch, dass die Fenstergeometrie bei einem Drehfenster thermodynamisch möglichst hoch sein sollte, damit ein maximales Druckgefälle und damit die erforderliche Antriebskraft für den Luftaustausch vorherrscht.

Basierend auf einem Öffnungswinkel von 45° zeigt das nebenstehende Bild den Fensterluftvolumenstrom für einen einseitig belüfteten Raum für unterschiedliche Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen. Liegt die Innenraumtemperatur gleich mit der Außenlufttemperatur ist der induzierte Luftwechsel gering, es wirkt dann im Wesentlichen der Windeinfluss. Man erkennt, dass bei großen Unterschieden zwischen der Raumlufttemperatur und der Außenlufttemperatur der Fensterluftvolumenstrom am größten ist. Das ist im Winter und im Sommer insbesondere bei der Nachtauskühlung der Fall.

## Luftqualität in Klassenräumen

Für einen Klassenraum mit 60 m<sup>2</sup> und 17 Personen sowie einem Frischluftbedarf von 425 m<sup>3</sup>/h (bei 25 m<sup>3</sup>/(h·P)) wird die Fensterlüftung mit einer Temperaturdifferenz von 2-3 K ausgelegt, um auch in der Übergangszeit noch einen Luftwechsel zu erzeugen. Bei etwa 150 m<sup>3</sup>/h pro Fenster sind für das Beispiel 3 Fensterelemente mit einer lichten Öffnungsmaßen von 2,5 x 0,3 m erforderlich. Der auf die Grundfläche bezogene Fensterflächenbedarf liegt hier bei 0,038 m<sup>2</sup> Fensterfläche je m<sup>2</sup> Grundfläche. Der reale Luftwechsel hängt, wie bereits beschrieben, wesentlich von den äußeren Bedingungen ab. Im Folgenden wird die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Konzentration für einen Tag in der Heizperiode mit einer Temperaturdifferenz zwischen innen und außen von 20 K berechnet. Die Fensterlüftung erfolgt hierbei nur in den Pausen. Während dem Unterricht sind die Fenster geschlossen. Die gleiche Bewertung wird auch für die Nutzung einer kontrollierten hygienischen Lüftung mit Betrieb bei Anwesenheit durchgeführt.



<sup>11</sup> Der schmale und in der Vertikalen möglichst hohe Fenstertyp wird beim Bau von Lyzeen in Luxemburg von der Administration des bâtiments publics aufgrund der Lüftungseigenschaften bevorzugt verwendet. Diese Fenster dienen gleichzeitig auch zur passiven Nachtauskühlung.

<sup>12</sup> Rahmenbreiten sind abgezogen. Zusätzlich wird in der Berechnung eine Reduktion des wirksamen Querschnitts um 15 % für Einbruchschutz (bei Nachtlüftung), Fliegengitter, Vorbauten und sonstige Reduktionen berücksichtigt.

<sup>13</sup> Zürcher/Frank: Bauphysik Bau & Energie, EMPA | vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich, 5. Auflage, 2018, S 102

PHI: Protokollband 22 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Lüftungsstrategien für den Sommer

Rouvel: Näherungsformeln für den Luftaustausch über Fenster (aufgenommene Näherungsformeln in der VDI-2078), 2012

Zur hygienischen Beurteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in einem Raum können die Werte gemäß folgender Tabelle angesetzt werden.<sup>10</sup>

| CO <sub>2</sub> -Konzentration in ppm | Hygienische Bewertung nach ASR A3.6 |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| < 1.000                               | hygienisch unbedenklich             |
| 1.000 – 2.000                         | hygienisch auffällig                |
| > 2.000                               | hygienisch inakzeptabel             |

Der Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration in einem Raum gehorcht vereinfacht folgender Differenzialgleichung; ohne Berücksichtigung von Ad- und Desorptionseffekten, unter der Annahme einer idealen Durchmischung und ohne Berücksichtigung weiterer chemischer Reaktionen die CO<sub>2</sub> erzeugen oder umwandeln.

$$V \cdot \frac{\partial C_t}{\partial t} = S - (n \cdot V) \cdot (C_t - C_a)$$

Deren Lösung kann wie folgt angegeben werden, unter der Annahme, dass sich die Randbedingungen im Berechnungszeitraum nicht ändern. Der Berechnungszeitschritt beträgt für den folgend durchgeführten Vergleich 300 Sekunden (5 Minuten).

$$C_t = C_a + (C_{t=0} - C_a) \cdot e^{-n \cdot t} + \left(\frac{S}{n \cdot V}\right) \cdot (1 - e^{-n \cdot t})$$

mit

|                  |                |   |
|------------------|----------------|---|
| V                | m <sup>3</sup> |   |
| C                | ppm            | CO <sub>2</sub> -Konzentration in der Raumluft  |
| t                | s              | Zeit  |
| n                | 1/h            | Luftwechselrate   |
| C <sub>a</sub>   | ppm            | CO <sub>2</sub> -Konzentration in der Außenluft   |
| S                | L/s            | Gesamtquellenstärke pro Zeiteinheit in die Raumluft abgegebenes CO <sub>2</sub>         |
| C <sub>t=0</sub> | ppm            | CO <sub>2</sub> -Konzentration in der Raumluft zum Zeitpunkt t=0 (Start der Simulation) |
| C <sub>t</sub>   | ppm            | CO <sub>2</sub> -Konzentration in der Raumluft zum Berechnungszeitpunkt t               |

Folgende Tabelle zeigt einen konkreten Belegungs- und Lüftungsplan eines Lyzeums in Junglinster. Die Berechnung des Verlaufs der CO<sub>2</sub>-Konzentration wird beispielhaft für den Montag und Dienstag durchgeführt. Der Unterschied zwischen den beiden Tagen sind drei aufeinander folgende Unterrichtsstunden von 09:55 Uhr bis 12:25 Uhr ohne geplante 15-minütige Fensterlüftung. In diesem Zeitraum wird die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft die höchsten Werte annehmen.

| Stunden                   | Montag | Dienstag | Mittwoch | Donnerstag | Freitag |
|---------------------------|--------|----------|----------|------------|---------|
| 08:00-08:50               | x      | x        | x        | x          | x       |
| 08:50-09:40               | x      | x        | x        | x          | x       |
| Lüften                    | x      | x        | x        | x          | x       |
| 09:55-10:45               | x      | x        | x        | x          | x       |
| 10:45-11:35 <sup>1)</sup> | x      | x        | x        | x          | x       |
| 11:35-12:25               | –      | x        | x        | –          | –       |
| Lüften                    | x      | x        | x        | x          | –       |
| 13:15-14:05               | x      | x        | –        | x          | –       |
| Lüften                    | x      | x        | –        | x          | –       |
| 14:20-15:10               | x      | x        | –        | x          | –       |
| 15:10-16:00               | x      | x        | –        | x          | –       |

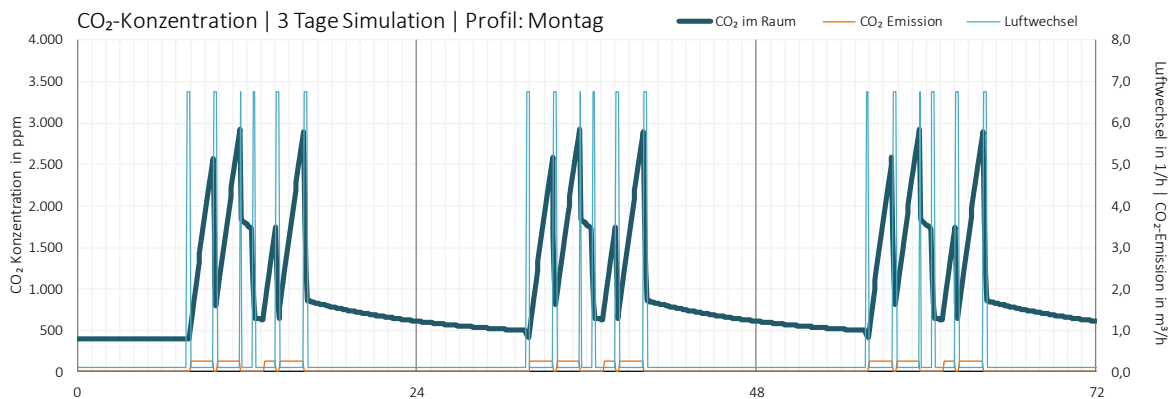
1) Bei drei aufeinanderfolgenden Unterrichtsstunden werden um 11:35 Uhr die Fenster für 5 Minuten geöffnet.

Die dynamische Berechnung der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Raum erfolgt für die gemäß vorstehender Tabelle angenommene Belegung mit folgenden Randbedingungen und wird zur Berücksichtigung von Einschwingvorgängen für 3 Tage durchgeführt. Der Berechnungszeitschritt ist 5 Minuten (300 Sekunden).

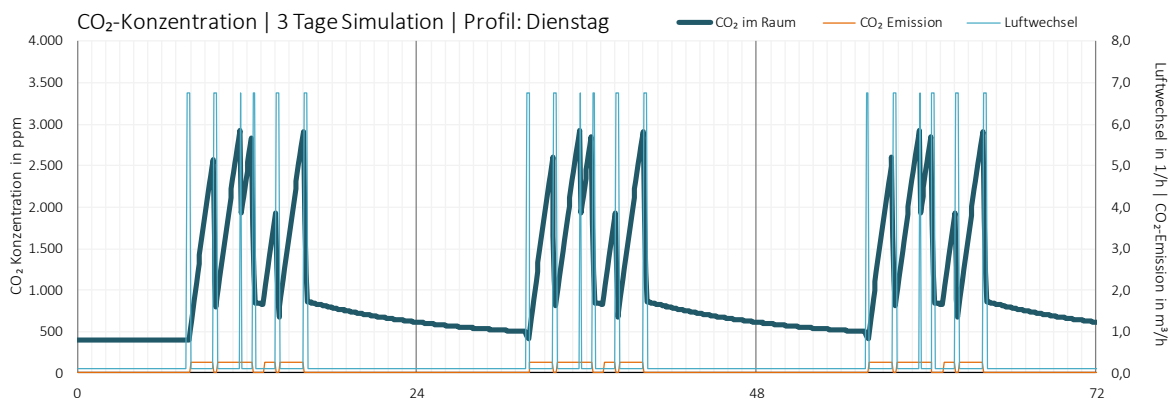
| Parameter                            | Wert   |
|--------------------------------------|--|
| Fensterlüftung                       | 15 Minuten vor/nach Schulbetrieb   |
| Raumluftvolumen                      | 180 m <sup>3</sup>   |
| Raumfläche                           | 60 m <sup>2</sup>  |
| Belegung                             | 3,5 m <sup>2</sup> /Person   17 Personen   |
| Luftdichtheit des Gebäudes           | n <sub>50</sub> = 1,0 h <sup>-1</sup> , res. Eigenluftwechsel n <sub>inf</sub> = 0,1 h <sup>-1</sup> |
| Luftwechsel bei Fensterlüftung       | 6,7 h <sup>-1</sup> (400 m <sup>3</sup> /h pro Fenster bei Δθ=20 K)                                  |
| Luftwechsel bei hygienischer Lüftung | 2,4 h <sup>-1</sup> (25 m <sup>3</sup> /h je Person)   |
| Atemlufrate                          | 6,3 l/min (Schüler)  |
| CO <sub>2</sub> -Emissionsrate       | 15 l/(h·Person) (Schüler)  |

### Pausenfensterlüftung

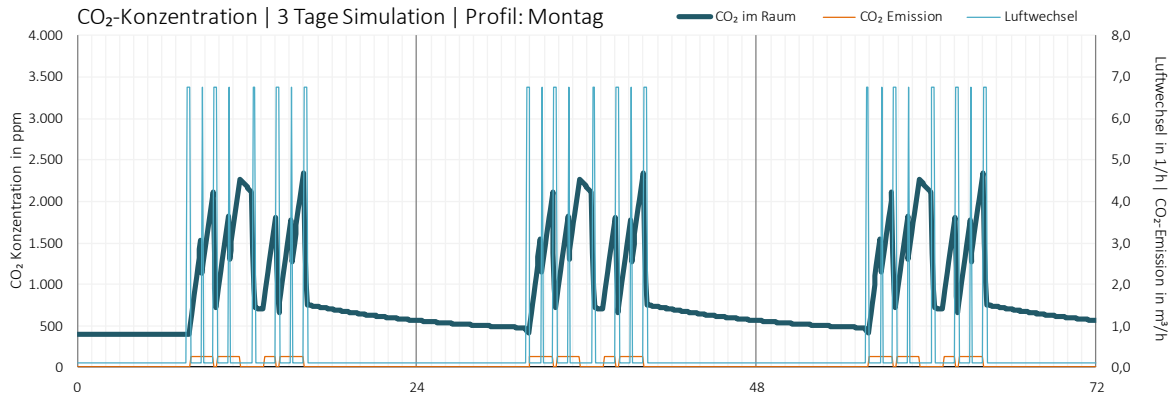
Mit einer zeitlich gesteuerten Pausenfensterlüftung, kann die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Lüftungszeitfenster für den Fall in der Heizperiode zwar nahe an die Außenluftkonzentration gebracht werden, allerdings steigt die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Raum infolge der Belegung bei geschlossenen Fenstern schnell wieder an und erreicht hygienisch inakzeptable Werte von über 2.000 ppm. Gerade bei luftdicht realisierten Gebäuden reicht die Eigenlüftung über Undichtigkeiten in der Gebäudehülle nicht mehr aus, um in Räumen für eine ausreichende Luftqualität zu sorgen. Das ist auch mit einer der Gründe warum für Wohngebäude mit Fensterlüftung ein Nachweis eines Lüftungskonzeptes nach DIN 1946-6 eingefordert wird. Der für Schulen mit Pausenlüftung typische sägezahnartige Verlauf kann gut nachgebildet werden.<sup>2</sup> Folgende Grafik zeigt den Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Raumluft für das Belegungs- und Lüftungsprofil Montag. Die maximale Zeitspanne ohne Pausenlüftung entspricht hier zwei aufeinanderfolgende Unterrichtsstunden. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration steigt auf über 2.500 ppm an.



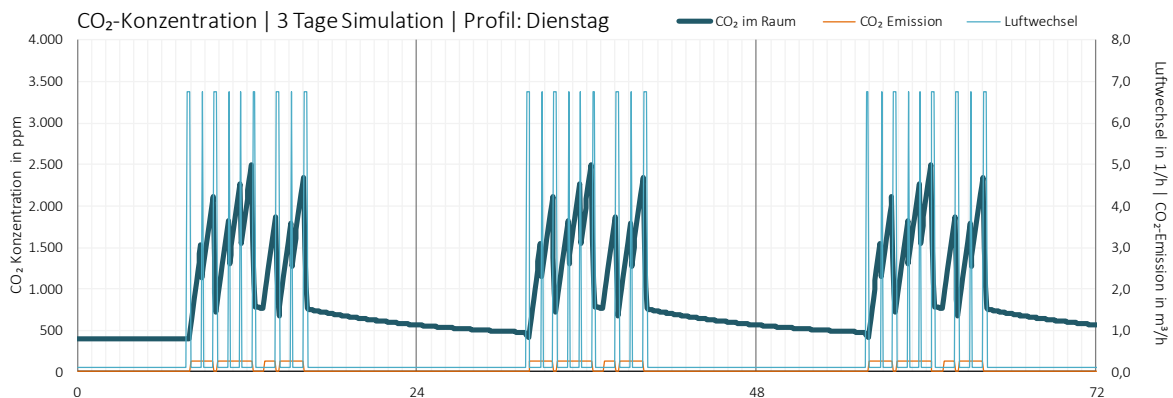
Legt man das Belegungs- und Lüftungsprofil für den Dienstag an, so zeigt sich, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration ebenfalls Werte über 2.500 ppm annehmen. Ohne die 5-minütige Pausenlüftung während des aktiven Schulbetriebs bei den drei aufeinander folgenden Unterrichtsstunden (09:55 Uhr bis 12:25 Uhr) würde die CO<sub>2</sub>-Konzentration sogar deutlich höhere Werte annehmen.



Fügt man zwischen den Doppelstunden beziehungsweise nach jeder Unterrichtsstunde – auch wenn Personen anwesend sind – jeweils eine 5-minütige Fensterlüftung ein, so kann die CO<sub>2</sub>-Konzentration zwar gesenkt werden, allerdings werden auch in dem Fall CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von über 2.000 ppm erreicht. Folgendes Bild zeigt den Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft für das Belegungsprofil am Montag.



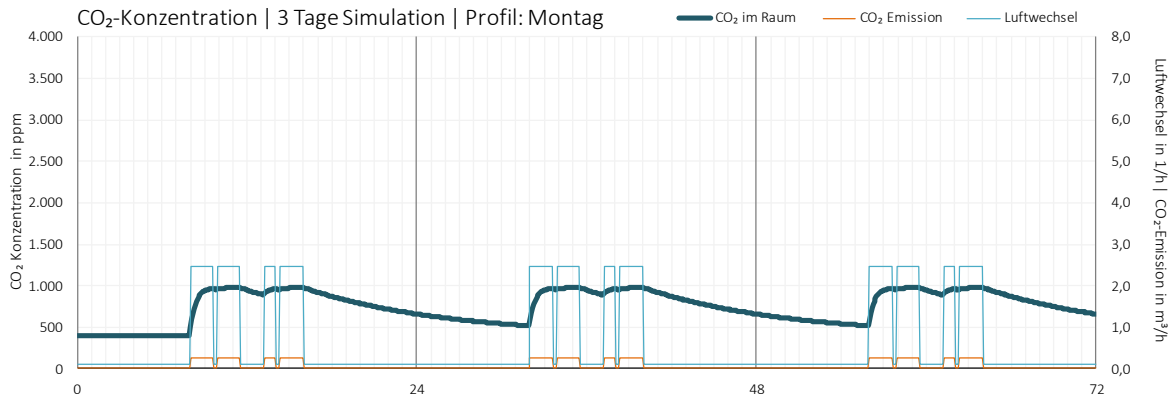
Setzt man die zusätzliche 5-minütige Fensterlüftung auch für das Belegungsprofil am Dienstag an, so verbessert sich der Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft. Es werden jedoch Werte immer noch inakzeptable Werte von 2.500 ppm erreicht.



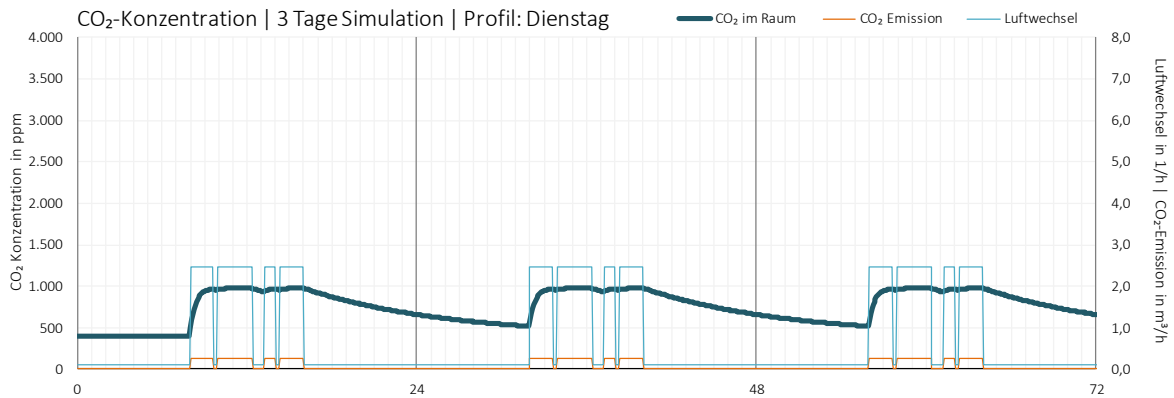
Zur Sicherstellung einer ausreichenden Luftqualität wäre zur Pausenfensterlüftung eine kontinuierliche Kippfensterlüftung während des Unterrichts notwendig – was sich auch mit Erkenntnissen anderer Untersuchungen deckt.<sup>7</sup>

### Lüftung über eine RLT-Anlage

Im Fall der Nutzung einer hygienischen mechanischen Lüftung steigt die CO<sub>2</sub>-Konzentration mit einem Auslegungsvolumenstrom von 25 m<sup>3</sup>/h je Schüler auf etwa 1.000 ppm an und liegt durchgängig im hygienisch unkritischen Bereich. Eine zusätzliche Fensterlüftung in der Pause würde das weiter verbessern, ist aber aus lufthygienischer Sicht nicht erforderlich. Folgendes Bild zeigt den Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration für den Montag. Die Lüftung wird nur dann als aktiviert angenommen, wenn auch eine Belegung im Raum vorliegt. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration erreicht Werte von etwa 1.000 ppm.



Für den Belegungstag Dienstag erreicht die maximale CO<sub>2</sub>-Konzentration ebenfalls Werte bis zu 1.000 ppm, was unter Berücksichtigung der personenbezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen und der Frischluftzufuhr der Sättigungsgrenze entspricht. Ein weiterer Betrieb der Lüftungsanlage nach Betriebsende würde die morgendliche Ausgangssituation etwas verbessern, da die Eigenlüftung infolge der Undichtigkeiten des Gebäudes (effektiver Eigenluftwechsel = 0,1 h<sup>-1</sup>) nicht ganz ausreicht, um die CO<sub>2</sub>-Konzentration über Nacht wieder auf Außenluftqualität zu bringen.



### Energiebedarf eines Klassenraums

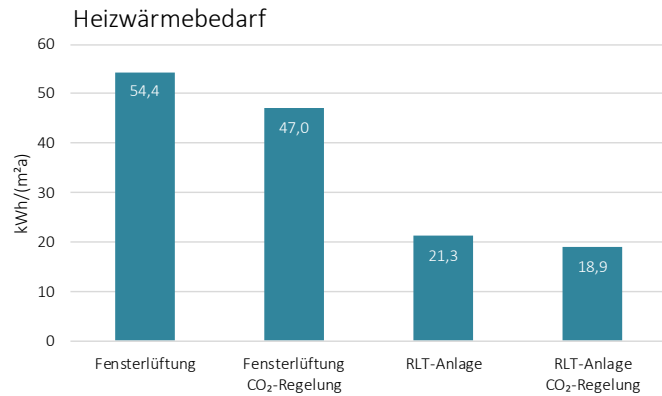
| Parameter                     | Einheit   | Wert            |
|-------------------------------|---|-----------------|
| Gebäudegrundriss              | m   | 30 x 15         |
| Geschosshöhe   Etagen         | m   | 3,4   3         |
| Energiebezugsfläche           | m <sup>2</sup>  | 1.215           |
| U-Wert Wand                   | W/(m <sup>2</sup> ·K)                                 | 0,15            |
| U-Wert Dach                   | W/(m <sup>2</sup> ·K)                                 | 0,11            |
| U-Wert Boden                  | W/(m <sup>2</sup> ·K)                                 | 0,17            |
| U-Wert Fenster                | W/(m <sup>2</sup> ·K)                                 | 0,92            |
| Fensterflächenanteil          | N/S/O/W   | 35 %            |
| Energiedurchlass Glas   + SS  | -   | 0,50   0,08     |
| Rahmenverbundwert             | W/(m·K)   | 0,045           |
| U-Wert Rahmen                 | W/(m <sup>2</sup> ·K)                                 | 1,32            |
| Bauschwere                    | Wh/(m <sup>2</sup> ·K)                                | 90              |
| Luftdichtheit                 | 1/h   | 0,45            |
| Wärmebrücken                  | W/(m <sup>2</sup> ·K)                                 | 0,05            |
| SFP-Wert Lüftung              | Wh/(m <sup>2</sup> ·h)                                | 0,55            |
| WRG Lüftung                   | -   | 70 %            |
| Hygienischer Frischluftbedarf | m <sup>3</sup> /(h·m <sup>2</sup> )   h <sup>-1</sup> | 10   3,3        |
| Beleuchtung                   | W/m <sup>2</sup> in LED                               | 5               |
| Wärmeerzeuger                 | -   | Brennwertkessel |

Die Lüftung in Abhängigkeit der CO<sub>2</sub>-Konzentration kann mit dem Berechnungsalgorithmus der DIN V 18599 einbezogen werden. Für alle Nutzungen werden die Parameter *gebäudebezogener Grundluftwechsel* zur Schadstoffabfuhr, die *relative Abwesenheit* und der *Teilbetriebsfaktor* berücksichtigt, um den effektiv wirksamen Luftvolumenstrom zu bestimmen. Es werden die Auswirkungen der unterschiedlichen Lüftungskonzepte auf den Heizwärme- und Primärenergiebedarf einer Zone bewertet. Die Randbedingungen für die Berechnung der Zonenenergiebedarfe sind in nebenstehender Tabelle aufgeführt und die Berechnung erfolgt mit der Software *EnerCalc*<sup>14</sup>.

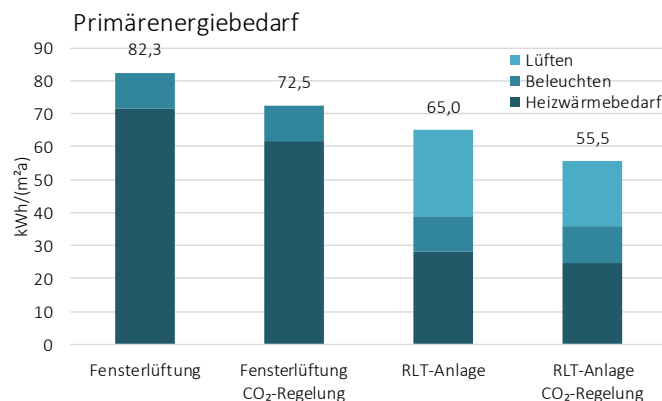
<sup>14</sup> Dr. Markus Lichtmeß, EnerCalc Version 6, Werkzeug für vereinfachte Energiebilanzen in Anlehnung an DIN V 18599, Energieweide Bauen, Forschung für energieoptimierte Gebäude und Quartiere, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2018

Folgende Diagramme zeigen den Heizwärme- (Nutzenergie) und den Primärenergiebedarf (Heizen, Lüften, Beleuchtung, Hilfsenergie) beispielhaft für einen Klassenraum der über Fenster und über eine RLT-Anlage mit Frischluft versorgt wird. Der spezifische Heizwärmebedarf wird zur Festlegung der Wärmeschutzklasse im Energiepass herangezogen und ist ein Effizienzmaß für den winterlichen Wärmeschutz des Gebäudes.

Für die Variante *Fensterlüftung* liegt der Heizwärmebedarf mit 54,4 kWh/(m<sup>2</sup>a) etwa auf dem doppelten Niveau wie einer RLT-Anlage 21,3 kWh/(m<sup>2</sup>a). Setzt man eine Luftmengenregelung in Abhängigkeit der CO<sub>2</sub>-Konzentration an reduziert sich der Heizwärmebedarf im Fall der Fensterlüftung um etwa 15 % auf 47,0 kWh/(m<sup>2</sup>a). Im Fall der RLT-Anlage liegt die Einsparung im Heizwärmebedarf mit knapp 10 % von 21,3 kWh/(m<sup>2</sup>a) auf 18,9 kWh/(m<sup>2</sup>a) erwartungsgemäß etwas darunter, da eine Wärmerückgewinnung vorhanden ist.



Der Primärenergiebedarf berücksichtigt auch die Effizienz des Wärmeerzeugers, den Stromaufwand für die Lüftungsanlage, die Beleuchtung und Hilfsenergie. Bei dieser Betrachtung liegen die Variante mit RLT-Anlage 17,3 kWh/(m<sup>2</sup>a) unterhalb Fensterlüftung. Der primärenergetische Unterschied ist nicht so deutlich wie beim Heizwärmebedarf, was durch die Einbeziehung des Lüfterstrombedarfs begründet ist. Vergleicht man die beiden Variante der CO<sub>2</sub>-Regelung miteinander, so liegen die RLT-Anlage 17 kWh/(m<sup>2</sup>a) unterhalb der Fensterlüftung.

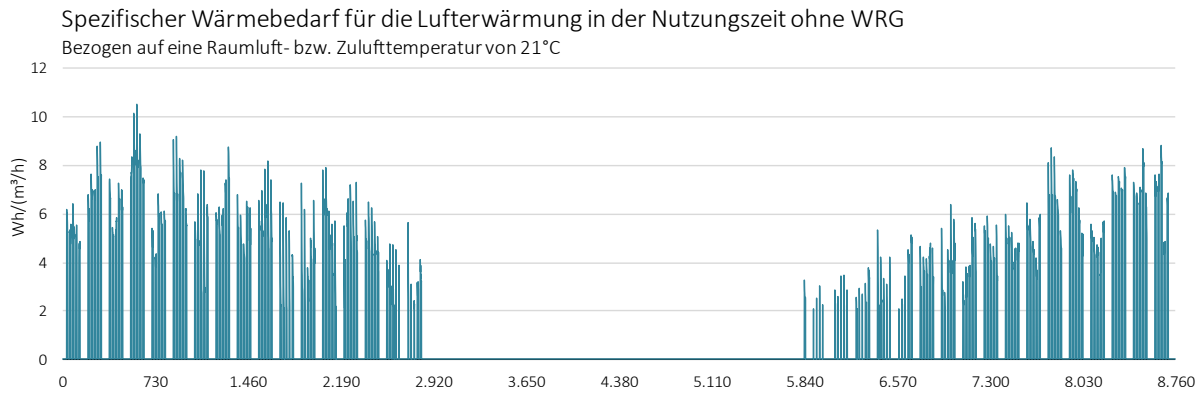


### Wirtschaftlichkeit

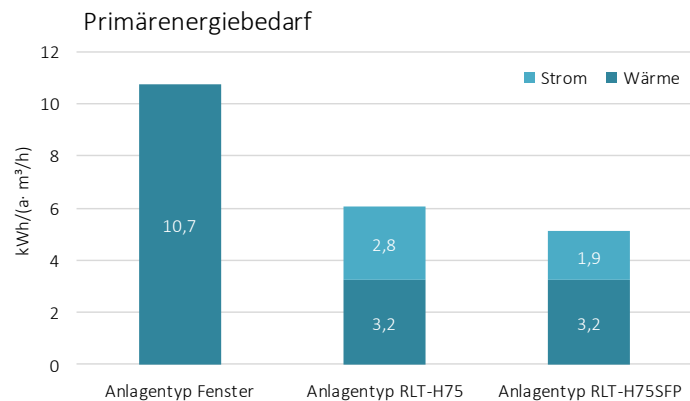
Neben energetischen und Umweltaspekten spielt die Wirtschaftlichkeit ebenfalls eine Rolle bei der Wahl des Konzeptes. Zur Bestimmung der Investitionskosten werden Kostenfunktionen aus der Luxemburger Studie<sup>15</sup> zur Kostenoptimalität herangezogen. Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit sind die realen Betriebsstunden der Lüftungsanlage maßgebend, denn nur in diesem Zeitraum treten hygienisch bedingte Lüftungswärmeverluste auf, die infolge der Nutzung einer RLT-Anlage mit Wärmerückgewinnung geringer ausfallen. Zur Bewertung der möglichen Energieeinsparung wird ein stundenbasiertes Simulationsmodell genutzt. Dabei wird nur das Nutzungszeitfenster (Wochentag und Tagesbetriebszeit) und das Zeitfenster im Heizbetrieb (September bis April) ausgewertet und der Energiebedarf bestimmt, der zur Lufterwärmung der Außenluft erforderlich ist. Folgendes Diagramm zeigt den stündlichen Energiebedarf.

<sup>15</sup> Markus Lichtmeß, Sven Viktor, Berechnung kostenoptimaler Niveaus von Mindestanforderungen an die Gesamt-Energieeffizienz für neue und bestehende Wohn- und Nichtwohngebäude, Luxemburg, April 2014, im Auftrag des Ministère de l'Economie, Direction générale de l'Energie, Luxemburg.





Es wird eine *Fensterlüftung* mit zwei verschiedenen Anlagentypen verglichen – unter Berücksichtigung, dass die geförderten Außenluftmengen die gleichen sind. Der *Anlagentyp RLT-H75* entspricht einer Lüftungsanlage mit Heizregister und einem Temperaturänderungsgrad der Wärmerückgewinnung von 75 % sowie einem Standardwert für den spezifischen Strombedarf des Lüftungsgerätes mit  $SFP = 0,80 \text{ Wh}/(\text{m}^3/\text{h})$ . Die zweite *Anlagentyp RLT-H75SFP* entspricht einem Gerät mit gleichen wärmetechnischen Eigenschaften, jedoch mit einer optimierten Stromaufnahme  $SFP = 0,55 \text{ Wh}/(\text{m}^3/\text{h})$ . Das folgende Diagramm zeigt den auf den Volumenstrom bezogenen Primärenergiebedarf für Wärme und Strom.<sup>16</sup> Der auf einen Kubikmeter Volumenstrom pro Stunde bezogene Primärenergiebedarf liegt bei der Fensterlüftung bei  $10,7 \text{ kWh}/(\text{a} \cdot \text{m}^3/\text{h})$ .<sup>17</sup> Durch den Einsatz einer Lüftungsanlage des Typs *RLT-H75* kann der Primärenergiebedarf auf  $6,0 \text{ kWh}/(\text{a} \cdot \text{m}^3/\text{h})$  reduziert werden. Infolge einer besseren Stromeffizienz reduziert sich der volumenstrombezogene Primärenergieaufwand beim Anlagentyp *RLT-H75SFP* auf  $5,1 \text{ kWh}/(\text{a} \cdot \text{m}^3/\text{h})$ .

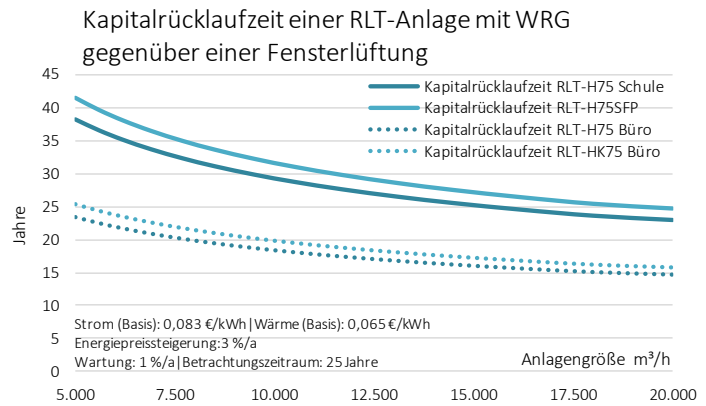


Da die Investitionskosten mit der Anlagengröße skalieren, die auf einen Kubikmeter Volumenstrom bezogene Energieeinsparung jedoch gleichbleibt, werden die Kapitalrücklaufzeiten für unterschiedliche Anlagengrößen bewertet. Dabei wird eine Betriebszeit von 25 Jahren unterstellt und der Energiepreis mit einer jährlichen Steigerung von 3 %/a angenommen. Die Betriebsführungskosten werden mit 1 %/a von den Investitionskosten angesetzt. Die Basisenergiepreise wurden aus der Luxemburger Kostenoptimalitätsstudie<sup>15</sup> entnommen. Die Wirtschaftlichkeit ist erreicht, wenn die Kapitalrücklaufzeit der typischen Anlagennutzungszeit entspricht. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist allerdings zu beachten, dass die energetischen Aspekte nur auf den Betrieb der Lüftungsanlage im Fall von vorliegendem Heizwärmebedarf bezogen sind. Außerhalb dieser Zeit wird eine natürliche Lüftung angenommen. Wird die Anlage ganzjährig genutzt erhöht sich der berechnete Strombedarf zur Luftförderung.

<sup>16</sup> Als Wärmeerzeuger wird ein Brennwertkessel unterstellt. Das entspricht der Referenzausstattung im RGD. Primärenergiefaktor Wärme 1,1 | Primärenergiefaktor Strom 2,66.

<sup>17</sup> Betrieb von 08:00 Uhr bis 17:00 Uhr an Wochentagen während den Monaten mit Heizbedarf September bis April: 1.345 h/a.

Aufgrund der im Vergleich zu Bürogebäuden (im simulierten Fall 1.933 h/a Betriebsstunden in der Heizperiode) kürzeren Anlagenbetriebszeit in Schulen (im simulierten Fall 1.345 h/a Betriebsstunden in der Heizperiode) liegt die Kapitalrücklaufzeit vergleichsweise höher. Ab einer Anlagengröße von etwa 14.000 m<sup>3</sup>/h amortisieren sich die Investitionen innerhalb der Betriebszeit für eine Schullüftungsanlage. Bei einem Bürogebäude mit einem Nutzungszeitfenster von 06:00 Uhr bis 19:00 Uhr wird der Wert schon bei kleineren Anlagen mit 5.000 m<sup>3</sup>/h erreicht. Auch bei kleineren Anlagen kann in Schulgebäuden eine etwas ungünstigere Wirtschaftlichkeit in Kauf genommen werden, da dem monetären Aspekt eine deutliche Reduzierung des Heizwärme- und Primärenergiebedarfs und vor allem eine wesentlich bessere Raumluftqualität gegenüberstehen.



Die hier abgeschätzte Wirtschaftlichkeit hängt in der Praxis allerdings von vielen Einflussfaktoren ab, die das Ergebnis nach unten und oben verändern können. So wirkt sich zum Beispiel das Konzept der mehrfachen Nutzung der Luft<sup>18</sup> positiv auf die Wirtschaftlichkeit aus, da die Anlagen signifikant kleiner dimensioniert werden können. Darüber hinaus wurde dieser Vergleich für einen Klassenraum durchgeführt und im Raumverbund unterschiedlicher Nutzungen können die Ergebnisse variieren. Wird der Vergleich für eine automatisierte Fensterlüftung durchgeführt, so müssen hier auch die Investitionskosten für Antriebe, Regelung, Verkabelung und Peripherie mitberücksichtigt werden und die Wirtschaftlichkeit der RLT-Anlage verbessert sich im Vergleich direkt.

### Anforderung im Referenzgebäude

Für die Umsetzung im RGD sollte die alleinige zeitlich geregelte Pausenfensterlüftung nicht als Referenzausstattung aufgenommen werden, da die sich daraus ergebende Energieeinsparung – infolge eines geringeren Luftaustauschs – zu deutlichen Komforteinbußen hinsichtlich der Luftqualität führt und die energetischen Aspekte somit nicht mehr vergleichbar sind. Eine Pausenfensterlüftung führt in den meisten Fällen zu deutlich zu hohen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Raum, da der Außenluftwechsel diskontinuierlich und nicht bedarfsabhängig erfolgt. Dieses Lüftungsverhalten ist in Räumen mit hoher Personenbelegung nicht meist nicht adäquat und insbesondere in Schulen, in denen bestmögliche Bedingungen zum Lernen geschaffen sein sollten, nicht vertretbar. Dieser Zusammenhang wird mit der DIN V 18599 rechnerisch auch so abgebildet, da die zeitlich gesteuerte und die manuelle Fensterlüftung zum gleichen Ergebnis führen – lediglich bei der CO<sub>2</sub>-abhängigen Lüftung ergibt sich nach DIN V 18599 eine Einsparung im Wärmebedarf aufgrund angepasster Luftmengen. Wird das Gebäude mit Fensterlüftung ausgeführt, so sollte im *Referenzgebäude* eine Fensterlüftung hinterlegt werden, die *mindestens in Abhängigkeit der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Raum agiert* und die Fenster ggf. auch außerhalb des Pausenzeitraums öffnet, damit eine entsprechende Luftqualität gegeben ist. Dadurch steigert sich die Energieeffizienz um etwa 15 % gegenüber einer manuellen Fensterlüftung und gleichzeitig ist eine gute Raumluftqualität gewährleistet. Es bleibt allerdings zu beachten, dass während der Betriebszeit geöffnete Fenster im Winterzeitraum auch zu unbehaglichen Raumtemperaturen bzw. zu Zugerscheinungen führen können und es ist fraglich ob das das richtige Konzept für eine Klassenraumlüftung ist. Das muss bei einer konkreten Realisierung eines Fensterlüftungskonzeptes berücksichtigt werden, bzw. muss der Nutzer sich dessen bewusst sein. Aus Komfortaspekten kann diese Lüftung nicht empfohlen werden.

<sup>18</sup> Einblasen der Luft in den Hauptnutzräumen, Überströmung in Verkehrsbereichen und Absaugen in Zonen mit geringeren Anforderungen an die Luftqualität (z.B. WC).