

Energiesparende Lüftung für ein gesünderes Lernumfeld und bessere Lernbedingungen in Schulen

Dr.-Ing Gerd Schaal,

Dr.-Ing. Hans Werner Roth, Stuttgart

In fensterbelüfteten Schulen ist das Raumklima häufig nicht für Gesundheit und schulische Leistung förderlich. Bei kaltem Wetter ist das Fensterlüften durch Zugluftbeeinträchtigungen stark eingeschränkt. An warmen, windstillen Tagen fehlt der Antrieb für eine ausreichende freie Lüftung. Häufig sind Fenster aus Sicherheitsgründen nur eingeschränkt oder mittels Schlüssel öffnbar. Nach Erfahrungen der Schulträger und Lehrer, die auch vom Umweltamt veröffentlicht wurden [1], reicht eine dauerhafte „Kipplüftung“ nicht aus. Die Stoßlüftung lässt sich nur wirksam einsetzen, wenn die Temperaturunterschiede zwischen außen und innen groß genug sind oder mit Windunterstützung durch offene Türen und Fenster quer gelüftet werden kann. Nach Unterrichtsende werden die Klassenräume verschlossen, d.h. die verbrauchte Raumluft wird nicht erneuert. Die „eingeschlossene“ Raumfeuchte kann an schlecht isolierten Bauteilen (Wärmebrücken) zu Schimmelbildung führen. Messungen der LTG zeigen, dass der CO₂-Pegel bei einem dichten Schulraum erst nach 48h (Wochenende) von 750 auf 500ppm abgefallen ist.

Bei Fenstern ohne motorische Antriebe an den Lüftungsflügeln kann man die sommerliche Nachtauskühlung nicht nutzen und muss tagsüber erhöhte Raumtemperaturen in Kauf nehmen. Mechanische Lüftungsanlagen betreiben die Nachtauskühlung selbsttätig, solange die thermischen Bedingungen günstig sind. Steht eine Kaltwasserquelle zur Verfügung (z. B. Erdkälte) kann der Schulraum über die Zuluft gekühlt werden.

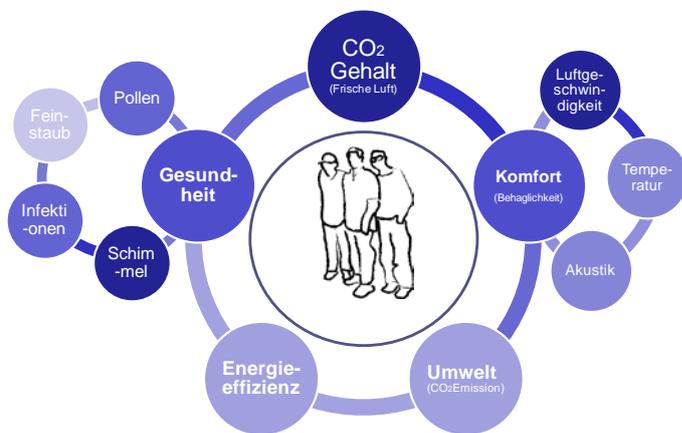


Abbildung 1: Raumklima von Klassenräumen, Kriterien und Bewertung

Hygienische Grundlagen und Qualitätsansprüche für das Innenraumklima

Zur hygienischen Bewertung des Innenraumklimas werden folgende Stoffkonzentrationen herangezogen:

- Kohlendioxid als Leitwert der Luftqualität in dicht besetzten Räumen
- Raumluftfeuchte mit unterem Grenzwert für mögliche Irritationen der Schleimhäute und mit oberem Grenzwert für mögliches Wachstum für Schimmelpilze (Auslöser für Allergien)

- Konzentrationen für einatembaren Feinstaub mit Partikelfractionen PM_{10} und $PM_{2,5}$
- Gesamtgehalt für flüchtige organische Verbindungen (TVOC) als Maß für Emissionen aus Gebäudeoberflächen, Tätigkeiten (z.B. chemische versuche) und Emissionen von Menschen

Die Leitsubstanz zur Bewertung der Raumluftqualität ist das Kohlendioxid. Neben dem ausgeatmeten Kohlendioxid sind es die Begleitstoffe menschlicher Emissionen und Tätigkeiten, wie über die Atmung und Hautoberfläche abgegebene flüchtige Kohlenwasserstoffe (VOC), Partikel als Hautschuppen, Kleidungsabrieb und Keime, die Gesundheit (Fehlzeiten) und Leistungsvermögen der Schüler belasten können. Das Umweltbundesamt stuft CO_2 -Konzentrationen oberhalb von 1000ppm als auffällig, oberhalb von 2000ppm, wie sie unter eingeschränkter Fensterlüftung häufiger auftreten, als hygienisch inakzeptabel ein [1].

Kohlendioxid ist ein guter Indikator für das Ansteckungsrisiko in dicht besetzten, schlecht belüfteten Räumen. Über die Atemwege werden virale Keime, wie z.B. Schnupfenviren in der Raumluft verteilt, wo sie über Stunden in Schwebelag bleiben und Gesunde infizieren können. Das Infektionsrisiko lässt sich nur durch Lüften über die Verdünnung der Keimkonzentration vermindern. Damit steigt die Infektionsbelastung mit dem Anteil der Atemluft in der Raumluft, mit der CO_2 -Konzentration. Die folgende Abbildung 2 zeigt an einem Beispiel die Anzahl angesteckter Personen aus einer Gruppe von 30 Schülern, die sich über 4h im gleichen Raum aufhalten. Ein Schüler ist der Infektionsherd. Das mathematische Modell wurde von Rodnick und Milton von der Wells-Riley-Rechnung für luftübertragene Ansteckung für CO_2 abgeleitet und experimentell verifiziert [4].

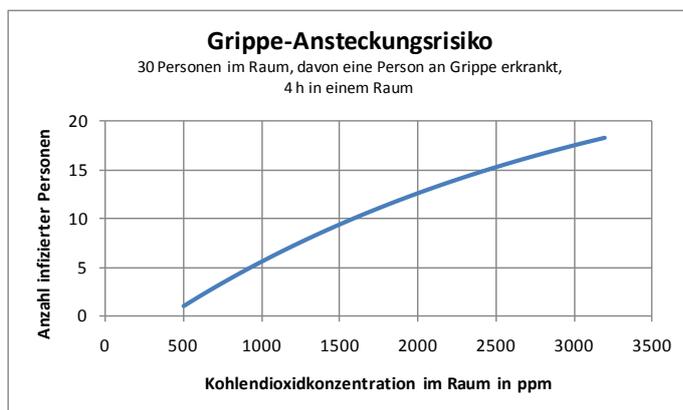


Abbildung 2: Modell für Grippe-Infektionsrisiko nach [4]

Beim Feinstaub unterscheidet man zwischen einatembarem Staub, der über den Kehlkopf in die Atemwege vordringt, mit einer Partikelfraction PM_{10} (50% der Masse ist kleiner als $10\mu m$) und alveolengängigem, d. h. bis in die Lungenbläschen vordringenden $PM_{2,5}$ -Staub. $PM_{2,5}$ -Staub (z. B. Rußpartikel) stammt überwiegend aus der Außenluft und kann nur durch Feinfilter in einem Lüftungsgerät zurückgehalten werden. Die größeren PM_{10} -Partikel werden in Schulräumen von den Schülern selbst abgeschrieben. Man stuft diese Partikel, von den viralen Keimen abgesehen, als weniger gefährlich ein als $PM_{2,5}$ -Feinstaub der Außenluft. Die Konzentration des PM_{10} -Staubes, wie auch die des Kohlendioxids und der Keime kann nur durch Lüften verdünnt werden.

Aus hygienischer Sicht sind folgende Grenzkonzentrationen (Mittel über Unterrichtseinheit) anzustreben:

- CO_2 -Konzentration < 1000 – 1200 ppm

- alveolengängiger PM_{2,5}-Feinstaub < 10µg/m³
(Grenzwert Außenluft < 50µg/m³)
- PM₁₀-Konzentration < 50µg/m³
- rel. Raumluftfeuchte 25 % > rF > 70%
- TVOC < 0,3 mg/m³

Diese Ziele sind nur mit einer maschinellen Lüftung zu erreichen. Um eine gute thermische Behaglichkeit einzuhalten, sind Luftauslässe einzusetzen, die eine zugluftarme Raumströmung und gute Lüftungseffektivität in allen Lastfällen gewährleisten können.

Energetische Grundlagen und Qualitätsanspruch an Jahresenergiebedarf

Legt man den in der Energieeinsparverordnung definierten Mindest-Wärmeschutz zugrunde, so bestimmen die Lüftungswärmeverluste den Energiebedarf von Schulen. Der geforderte Außenluftbedarf von 10m³/(h m²) kann nur durch eine maschinelle Lüftung mit Wärmerückgewinnung energieeffizient bereitgestellt werden. Durch nutzungsabhängiges Lüften, hohe Rückwärmzahl und niedrigen Stromverbrauch der Ventilatoren (SFP-Wert in W/(m³/s)) kann der Lüftungswärmebedarf auf ein Minimum des gesamten Heizwärmebedarfs verringert werden.

Als Zielwert für den Jahresbedarf für Heizung und Lüftung eines Klassenraums mit Passivhaus-Standard ist anzustreben:

- Primärenergiebedarf < 30 kWh/m²NF

Besonders die Plus-Energie-Schulen, die man als Baustandard der Zukunft für die Jahre 2015 – 20 ankündigt, werden auf hocheffiziente Lüftungsanlagen angewiesen sein.

Vergleich zwischen Fensterlüftung und maschineller Lüftung

Das Umweltbundesamt zitiert in einer Literaturstudie[2], dass in Münchner und Erfurter Schulen im Winter an mehr als 30% des Unterrichts CO₂-Pegel oberhalb von 2000ppm gemessen wurden.

Bild 3 zeigt in einen Vergleich zwischen freier und maschineller Lüftung in einem 60m² großen Schulraum. Aufgetragen sind gerechnete CO₂-Konzentrationsverläufe über jeweils zwei Unterrichtseinheiten. Sie bestehen aus einer Doppelstunde von 2x45 Minuten, dazwischen eine 5 Minuten Pause und einer anschließenden große Pause von 15 Minuten. Während den 95 Minuten halten sich 30 Schüler im Raum auf. In der großen Pause ist der Raum leer. Im Unterricht bleiben die Fenster geschlossen. Es wird ein minimaler Außenluftaustausch von 0,1 1/h angenommen. In den Pausen wird mit einem mittleren Volumenstrom von 400m³/h über Fenster gelüftet (Mittelwert über Unterricht und Pausen 0,5 1/h). Das Ergebnis zeigt eine typische „Sägezahnkurve“ mit höheren Pegeln in der 2. Unterrichtseinheit, die durch Messungen bestätigt wird. Der über den Unterrichtszeitraum zeitlich gemittelte CO₂-Gehalt liegt im gezeigten Beispiel bei 2493 ppm. Bei maschineller Lüftung mit 600m³/h, die bei einer Einschaltsschwelle von 600ppm über den CO₂-Fühler eingeschaltet und bei 500ppm ausgeschaltet wird, sinkt der Mittelwert auf 1088 ppm. Auch hier zeigt sich, dass eine Pause von 15 Minuten nicht ausreicht, um die Ausgangskonzentration zu erreichen, da der Mischvorgang die Konzentrationsunterschiede zwischen Außen- und Raumluft abbaut und damit über der Zeit immer weniger Kohlendioxid aus dem Raum abgeführt wird (Exponentialfunktion!).

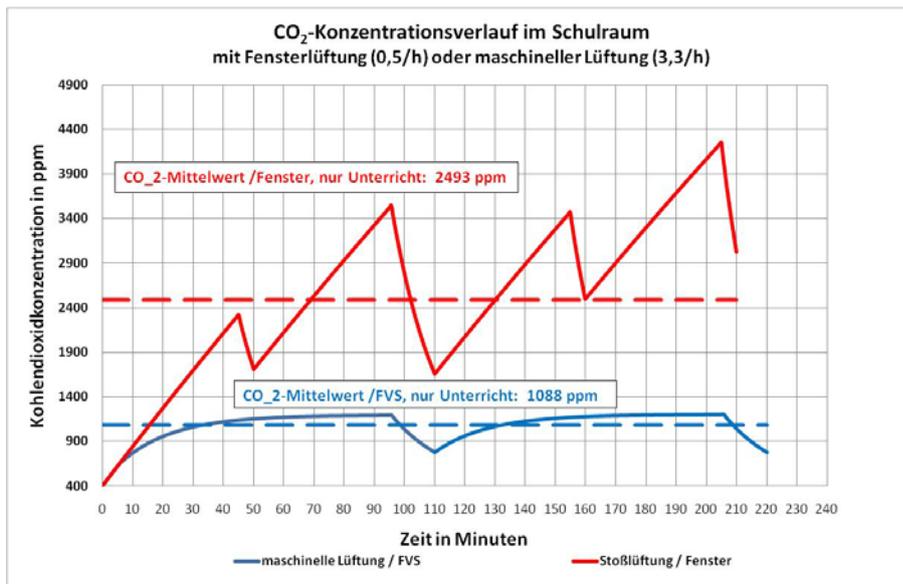


Abbildung 3 : CO₂-Konzentration in einem Schulraum mit Stoßlüftung über Fenster und mit maschineller Lüftung

Die Auswirkungen auf die schulische Leistung lassen sich in Bild 4 ablesen. Der Zusammenhang zwischen einer normierten Leistung und CO₂-Pegel wurde aus einer experimentellen Studie von Wargocki und Wyon [3] übernommen, die an dänischen Schulen durchgeführt wurde (vergl. Bild 5). In unserem Beispiel arbeiten die Schüler im maschinell belüfteten Raum um 16% effizienter und konzentrierter.

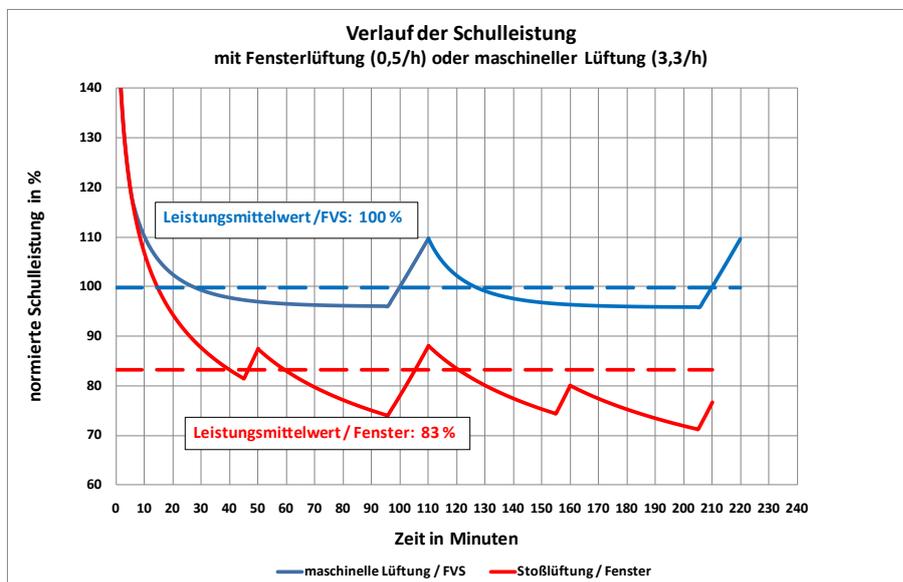


Abbildung 4: Schulische Leistung mit Stoßlüftung über Fenster und maschineller Lüftung

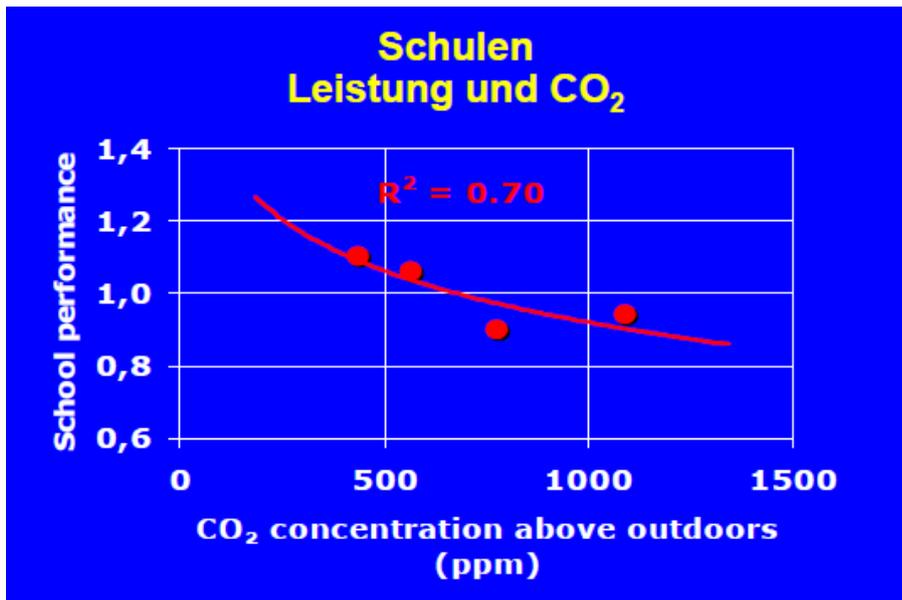


Abbildung 5: Abhängigkeit von der schulischen Leistung von der Kohlendioxidkonzentration [3]

Vergleicht man die Feinstaubkonzentration PM₁₀ in Bild 6, so liegen die Maxima ohne maschinelle Lüftung um den Faktor 5 höher. Im Gegensatz zum Kohlendioxid, das in der Außenluft und damit auch in der Zuluft in einer Konzentration von 380 bis 400ppm vorkommt, werden durch ein F7-Feinfilter 95% des PM₁₀-Staubs zurückgehalten. Die Minderung dieser Staubkonzentration beruht wie beim Kohlendioxid auf dem Verdünnungseffekt bei konstanter Emission pro Person in mg Staub/h. Der alveolengängige Feinstaub der Außenluft (PM_{2,5}) wird mit der F7-Filterklasse immer noch mit 85% der Partikelmasse abgeschieden, d. h. bei einer Außenluftkonzentration von 25µg/m³ ist die Zuluft nur noch mit 4µg/m³ belastet.

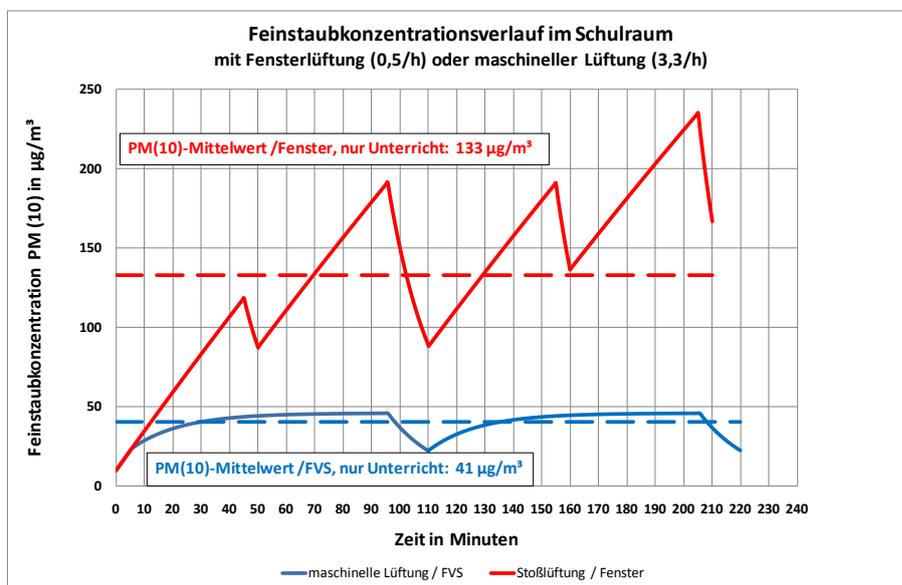


Abbildung 6: Feinstaubkonzentration in einem Schulraum mit Stoßlüftung über Fenster und maschineller Lüftung

Zur Beurteilung der Lüftungswärmeverluste und des Stromesatzes für die Ventilatoren wird vorausgesetzt, dass die Transmissionsverluste des natürlich und maschinell belüfteten Schulraums gleich sind und die Fassade einen U-Wert < 0,8W/(m² K) aufweist (< Mindestwert des Wärmedurchgangskoeffizienten bei 50% Fensterflächenanteil nach EnEV 2009).

Für die Berechnung des Lüftungswärmebedarfs nach DIN V 18599 werden folgende Annahmen zugrunde gelegt:

- Jahresbetriebszeit 1.400 h
- über gesamter Heizperiode gemittelter Außenluftwechsel bei Fensterlüftung $L_w = 1/h$, entsprechend $180m^3/(h \text{ Raum})$ oder $3m^3/(h m^2)$
- Außenluftwechsel mit maschineller Lüftung $L_w = 3,3/h$ entsprechend $600m^3/(h \text{ Raum})$ oder $10m^3/(h m^2)$
- Lüftungsgerät mit 75% Wärmerückgewinnung
- spezifische Ventilatorleistung für Zu- und Abluftventilator zusammen $SFP = 840W/(m^3/s)$ bzw. $0,24 W/(m^3/h)$
- Zulufttemperatur $17^\circ C$ zur Raumkühlung der inneren Lasten (Personenwärme) für Fensterlüftung und maschinelle Lüftung gleich

Bei der Stoßlüftung über das Fenster kann die im Schulraum freigesetzte Wärme nicht genutzt werden. Die Außenluft muss über die Heizung auf $17^\circ C$ erwärmt werden. Wie in Bild 7 dargestellt, reicht eine Wärmerückgewinnung, die 75% der Abluftwärme auf die Zuluft überträgt, aus, die Lüftungswärmeverluste nahezu auszugleichen. In Schulräumen sind Rückwärmzahlen oberhalb von 80% aus Sicht der Energieeinsparung nicht mehr effizient aber zur Einsparung der Nacherwärmung im Lüftungsgerät erforderlich. Der im Vergleich zur Fensterlüftung 3-fach höhere Außenluftwechsel der maschinellen Lüftung stellt sich in der CO_2 -Umweltbilanz für die angenommene Gasheizung und den Stromeinsatz ($620 gCO_2/kWh$) immer noch um rund 10% günstiger dar. Die Energiekosten für die Lüftungswärme pro Raum liegen bei der Fensterlüftung mit 42€ um 10€ höher.

Auf Primärenergie umgerechnet sind anspruchsvolle Kennwerte mit natürlicher Lüftung trotz schlechterer Luftqualität nicht erreichbar:

Fensterlüftung (1/h)	15 kWh/m ²
Masch. Lüftung (3,3/h)	7 kWh/m ²

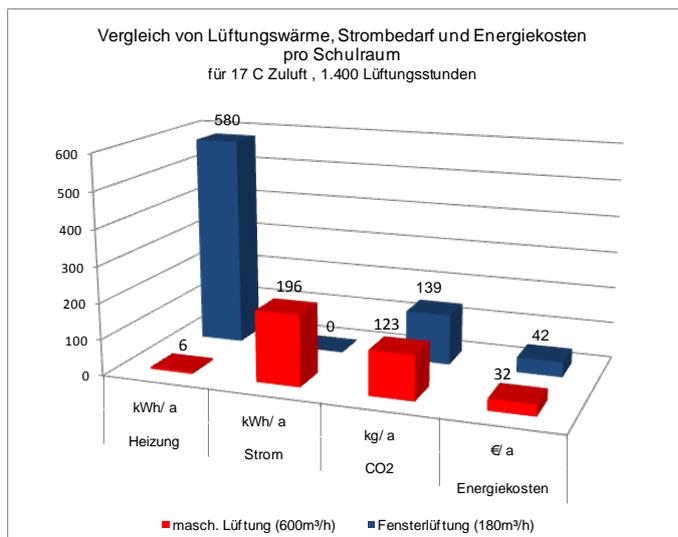


Abbildung 7: Energiebedarf der Lüftungswärme eines Schulraums bei Fensterlüftung und maschineller Lüftung mit Wärmerückgewinnung (75%)

Umsetzung der Ziele mit dezentraler Lüftung

Prüft man die Rahmenbedingungen für eine dezentrale maschinelle Lüftung, sind vorrangig zwei Aufgaben zu lösen:

1. Der Einbau wettergeschützter Öffnungen für den Außen- und Fortluftvolumenstrom in die Außenwand
2. Die Integration von Lüftungsgerät und Luftdurchlässen im Raum.

Aus mehr als 1500 Anfragen und aus Erfahrungen mit über 200 ausgelieferten Geräten vom Typ FVS der LTG Aktiengesellschaft haben sich beispielhaft gute Lösungen für eine Fassadenanbindung in Fensterbändern entwickelt. Das Wetterschutzgitter darf dabei nicht durch einen außenliegenden Sonnenschutz abgedeckt werden. Bei **einem** Lüftungsgerät pro Schulraum zeigt sich eine deckenorientierte maschinelle Lüftung als wirtschaftlichste und flexibelste Lösung, da sie in Klassenräumen keine Grundflächen beansprucht.

Die Geräte können innerhalb einer Teildecke oder sichtbar im Raum aufgehängt werden. In Bildern 8 und 9 sind beide Einbauvarianten dargestellt.



Abbildung 8: Beispiel für FVS-Sichtmontage



Abbildung 9: Beispiel für Einbau in einen Deckenkoffer

Die sehr gute Energieeffizienz des FVS-Geräts beruht auf seinem niedrigen Strombedarf ($0,23\text{W}/(\text{m}^3/\text{h})$) und seiner bedarfsgeführten Lüftung. Der Strombedarf des FVS-Geräts bleibt unterhalb des Grenzwerts für die Energieeffizienzklasse A+ der RLT-Richtlinie 01 und bietet damit den Zugang zu Fördermitteln, die für „Klimaschutztechnologien bei der Stromnutzung“ gewährt werden. Gelüftet wird mit einem konstanten Zuluftvolumenstrom, der für eine Standardbelegung ausgelegt ist. Über das Signal des CO_2 -Fühlers im Raum werden die Ventilatoren ein- und ausgeschaltet. Damit lassen sich die Laufzeiten auf ein Minimum beschränken. Ein weiterer Vorteil dieser Betriebsweise besteht darin, dass eine Bedienung vom Raum aus nicht erforderlich ist und das Gerät selbsttätig abschaltet, wenn über das Fenster gelüftet wird. Das FVS-Gerät kann auch von zentraler Stelle in zwei wählbaren Lüftungsstufen freigeschaltet werden, um einen Betrieb außerhalb vorgesehener Nutzungszeiten zu unterbinden. Ein geregelter Nachtlüftungszyklus, mit dem sich das Gebäude in kühlen Sommernächten vorkühlen lässt, muss ebenfalls freigegeben werden. Auch diese für Schulen ohne mechanische Kühlung wichtige Funktion ist mit Fensterlüftung nicht umsetzbar.

Neben guter Raumluftqualität und niedrigen Energiekosten sind niedrige Lüftungsgeräusche und hohe thermische Behaglichkeit gleichrangig zu bewerten. So liegt der A-bewertete Summenpegel des Schalldrucks beim FVS-Gerät bei $600\text{m}^3/\text{h}$ zwischen 33 und 35 dB(A).

Eine zugluftarme Belüftung und hohe Lüftungseffektivität erreicht man durch eine gleichmäßige

Verteilung des Zuluftstroms im Raum. Im Projektbeispiel der Abbildung 10 belüften Schlitzdüsen in zwei 4m langen Linearauslässe einen 50m²- Raum über hochinduktive Einzelstrahlen. Damit werden die Raumluftgeschwindigkeiten in Kopfhöhe einer stehenden Person, 80cm unterhalb des Lüftungsgeräts, bereits auf Werte unter 15cm/s abgebaut. Bewertete man die in Bild 10 dargestellten, gemessenen Luftgeschwindigkeiten gemäß DIN ISO 7730, so ist zu erwarten, dass sich weniger als 10% der Raumbenutzer über Zugluft beklagen. Diese Bewertung entspricht der anspruchsvollsten Klasse nach DIN ISO 7730.

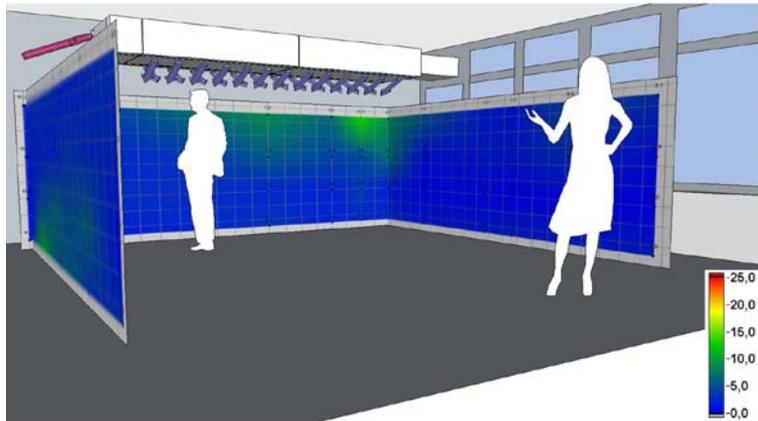


Abbildung 10: Raumluftgeschwindigkeiten in einem Schulraum mit frei aufgehängtem FVS-Lüftungsgerät

Fazit

Eine bedarfsgeregelte maschinelle Lüftung mit Wärmerückgewinnung ist in Schulen erforderlich, um durch niedrige CO₂- und Feinstaub- und Keimkonzentrationen eine gute Raumluftqualität **und** einen niedrigen Primärenergiebedarf zu erreichen. Damit leistet eine nachhaltige Raumlufttechnik einen positiven Beitrag zu Gesundheit, Leistung und zum Schutz der Umwelt.

Bei der Nachrüstung ist das LTG-Lüftungsgerät FVS häufig wirtschaftlicher und energieeffizienter zu betreiben als eine zentrale Lüftung. Das frei aufgehängte Gerät mit integrierten Luftdurchlässen erspart die Herstellung von Deckenkoffern und zusätzlichen Revisionsöffnungen und ist für eine stufenweise Nachrüstung, auch in den Ferien und an Wochenenden gut geeignet.

Literatur

- /1/ Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden,
- /2/ Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft
Bundesgesundheitsbl.-Gesundheitsforsch.-Gesundheitsschutz 11, 2008
- /3/ Wargocki P, Wyon DP, Research report on effects of HVAC on student performance.
ASHRAE JI 48(Oct. 2006)
Olesen B.W., Behaglichkeit, Luftqualität und Leistungsfähigkeit
Vortrag Symposium für Schulsanierung in Rheinland-Pfalz, FH-Kaiserslautern, Dez. 2008

- /4/ Rudnick S.N., Milton D.K., Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration.
Indoor Air 2003