Themeninfo **I**/2015

Energieforschung kompakt

BINE Informationsdienst

Lüften in Schulen

Bessere Lernbedingungen für junge Menschen

Ein Service von FIZ Karlsruhe GmbH

Zur Sache

Kinder, Jugendliche und Lehrer verbringen heutzutage durch die verkürzte Gymnasialzeit und den häufigeren Ganztagsunterricht mehr Wochenstunden in Schulgebäuden als frühere Generationen. Moderne Schulgebäude sollen eine vielfältige Pädagogik ermöglichen und zum Lebensraum Schule beitragen. Neben den gesellschaftlich breit diskutierten pädagogischen Ansätzen gehören zum Thema zeitgemäße Schule auch Gebäude mit höherer Nutzerqualität. Angesichts abnehmender Schülerzahlen geht es dabei überwiegend um die bauliche und energetische Sanierung bestehender Gebäude und weniger um Neubauten. Ein Aspekt ist eine architektonische Gestaltung, die sich stärker an den Bedürfnissen von Kindern und Jugendlichen orientiert. Doch nur mit einer modernen Energietechnik, die u. a. bedarfsgerecht heizt und für eine konstant gute Luftqualität sorgt, ermöglichen Schulen auch ein lernförderndes Klima. Bei jeder neu gebauten oder zur Sanierung anstehenden Schule sollte das Thema Lüftung höchste Aufmerksamkeit genießen.

Lüftungsstrategien sind meistens ein zentraler Baustein in einem umfassenderen Energiekonzept. Derartige Konzepte zielen darauf ab, die Gebäude und die eingesetzte Technik auf einen zeitgemäßen Stand zu bringen, d. h., einen Gebäudebetrieb zu ermöglichen, der optimal auf die variablen Bedingungen einer Schule abgestimmt ist. So entstehen gute äußere Bedingungen für ein erfolgreiches Lernen und die Kosten für Betrieb und Unterhalt der Gebäude sinken. Seit Jahren begleiten die Portale www.enob.info und www.eneff-schule.de Forschungsvorhaben zu energieoptimierten Schulen und präsentieren erfolgreiche Beispiele und Methoden.

In den vergangenen Jahren wurden im Rahmen der Energieforschung, des Konjunkturpaketes II und ähnlicher Maßnahmen zahlreiche Schulgebäude saniert und manche neu gebaut. Fast immer gehören auch Lüftungskonzepte zu den umgesetzten Maßnahmen. Dieses BINE-Themeninfo hat die wichtigsten Informationen zum Lüften an Schulen zusammengestellt.

Ihre BINE-Redaktion wünscht Ihnen eine anregende Lektüre

Inhalt

3 *Anforderungen von allen Seiten*
4 *Luftqualität im Schulalltag*
7 *Aus der Praxis: Motorisch unterstützte Fensterlüftung*
8 *Systeme und Anlagentechnik*
13 *Aus der Praxis: Schule Olbersdorf*
13 *En passant: Schachtlüftung*
14 *Gute Akustik in Klassenräumen*
16 *Erfahrungen und Kommunikation*
19 *Standpunkte: Lüftungsanlagen in Schulen – Luxus oder Notwendigkeit*
19 *Aus der Praxis: Realschule Lindau*
20 *Lüftung und Energie*

Autoren
Alle Kapitel (außer Akustik):
Prof. Runa T. Hellwig, E2D, Hochschule Augsburg, jetzt: Solar Energy Research Institute of Singapore | National University of Singapore
Martina Hackl, E2D, Hochschule Augsburg

Gute Akustik in Klassenräumen:
Dr. Christian Nocke, Akustikbüro Oldenburg

Redaktion
Uwe Milles

Urheberrecht
Eine Verwendung von Text und Abbildungen aus dieser Publikation ist nur mit Zustimmung der BINE-Redaktion gestattet. Sprechen Sie uns an.

Titelbild: Luminaimages | Shutterstock.com
Aufmacherbilder:
S. 3: Syda Productions | Shutterstock.com
S. 4: LTG AG
S. 8: Trox GmbH
S. 14: wavebreakmedia | Shutterstock.com
S. 16: contrastwerkstatt | Fotolia
S. 20: Trox GmbH

BINE Informationsdienst

Kaiserstraße 185-197, 53113 Bonn
Tel. 0228 92379-0
kontakt@bine.info
www.bine.info

Anforderungen von allen Seiten

Um an Schulen Energieeffizienz, gutes Raumklima inklusive guter Luftqualität sowie eine ansprechende Lernumgebung gleichermaßen herstellen zu können, ist eine gut geplante und einregulierte Gebäudetechnik erforderlich. Dabei sind viele Anforderungen zu berücksichtigen.

Schulgebäude unterscheiden sich erheblich von anderen Nicht-Wohngebäuden. Sie sind dichter belegt und werden diskontinuierlich genutzt. Schulunterricht findet etwa an 20 bis 25 % der Jahresstunden statt und nur ein Teil der Räume wird auch für Nachmittagsunterricht oder Abendveranstaltungen benötigt. Pro Schüler sehen viele Schulbaurichtlinien als Faustwert 2 m² Fläche und 6 m³ Raumvolumen vor. Tische und Stühle sind bis in unmittelbare Nähe zu Heizkörpern und Fenstern aufgestellt, was Heizen und Lüften erschwert. Um mit einer reinen Fensterlüftung eine ausreichende Luftqualität im Klassenraum herzustellen, müsste etwa alle 20 Minuten eine Lüftungspause eingelegt werden. Dies findet aber im Alltag kaum statt.

Klassenräume müssen unterschiedliche Anforderungen erfüllen: Neben einer energieeffizienten Beheizung und hoher Luftqualität werden auch gute visuelle und auditive Bedingungen benötigt. Hierzu gehören die Vermeidung von Blendung durch einfallendes Sonnenlicht, ein energieeffizientes Beleuchtungssystem, der Schutz vor Lärmeinträgen aus der Außenwelt, von Nachbarklassen und von Lüftungsanlagen sowie kurze Nachhallzeiten für gute Sprachverständlichkeit. Auch Einflussmöglichkeiten der Nutzer auf die Gebäudetechnik sollen angeboten werden.

Eine Klasse mit 30 Schülern produziert pro Stunde 2,3 bis 2,7 kWh Wärme und ca. 500 Liter CO_2. Diese inneren Lasten müssen abgeführt werden, um eine Überwärmung zu vermeiden und aus Gründen der Hygiene. CO_2 ist dabei der lufthygienische Leitparameter. Liegt sein Wert hoch, zeigt dies meist auch eine hohe Geruchsbelastung an. Deshalb benötigt eine Klasse pro Stunde zwischen 500 und 900 m³ Frischluft.

Lüftungskonzepte müssen sich in diesen Kontext einpassen. Fällt die Entscheidung zugunsten eines maschinellen Lüftungssystems aus, gibt es in einem neuen Schulgebäude baulich andere Möglichkeiten zur Integration der Lüftungstechnik ins Gebäude als in einem Modernisierungsobjekt. Es sind immer wieder ähnliche Fragestellungen in Bezug auf Lüftung zu klären, wie:

- Welches ist das geeignete Lüftungssystem für unsere Schule?
- Welche Fassade eignet sich für unsere Schule?
- Wie viel Gebäudeautomation wird vorgesehen?
- Wie stark sollen die Nutzer, also Lehrer und Schüler, eingreifen können?

Das BINE-Themeninfo führt in die Anforderungen an ein gutes Raumklima und die Auslegung der Anlagen unter den flexiblen Nutzungszeiten einzelner Räume ein. Ein weiterer Schwerpunkt sind die unterschiedlichen Lüftungssysteme, deren Steuerung und die bedarfsgeführte Lüftung. Die Anforderungen an die Akustik sowie Erfahrungsberichte schließen sich an. Die energetische Bilanz von Lüftungskonzepten rundet das Thema ab.

Abb. 1 *Diese Faktoren beeinflussen ein behagliches Raumklima. Mit gebäudetechnischen Anlagen lassen sich Luftqualität, Luftfeuchte und Temperatur beeinflussen.*
Quelle: Fraunhofer IBP/BINE Informationsdienst

Luftqualität im Schulalltag

Die bisher übliche, größtenteils unzureichende Lüftungspraxis an Schulen hat Gründe. Dazu liegen viele Erfahrungen aus Forschungsprojekten vor. Welche Anforderungen an ein gutes Raumklima und eine hohe Raumluftqualität sind zu berücksichtigen? Wie fließen interne Wärmelasten und Nutzungszeiten in die Berechnungen ein?

Rund 50 Schulen in Deutschland wurden bisher im Rahmen öffentlich geförderter Projekte verschiedener Geldgeber energetisch modernisiert. Auswertungen von derartigen Modernisierungsprojekten, die z. B. im Rahmen des Konjunkturpaketes II durchgeführt wurden, zeigen, dass sowohl das Wissen über Lüftungssysteme als auch die Umsetzung von Lüftungskonzepten noch nicht ausreichend in der Praxis angekommen sind. Eine Erhebung der Hochschule Augsburg [1] in einem süddeutschen Regierungsbezirk ergab, dass von 96 energetisch modernisierten Schulen bei 60 % ein Lüftungskonzept ausgearbeitet, bei 40 % maschinelle Lüftungssysteme und bei 20 % ein Lüftungsplan vorgesehen wurden.

Die sozialwissenschaftliche Begleitforschung des Förderprogramms Energieeffiziente Schule (EnEff:Schule) hat durch Befragungen ermittelt, dass beispielsweise fast 60 % der Schüler und 50 % der Lehrer im Unterricht selten lüften. Während der Pausenzeiten lag dieser Anteil immerhin noch bei 40 % innerhalb der Schüler und 10 % bei den Lehrern. Zahlreiche Messungen der Kohlendioxid-Konzentration in Klassenräumen in bestehenden Schulen belegen die dortige unzureichende Luftqualität (Abb. 3).

Warum wird zu wenig gelüftet?

Raumklima setzt sich aus dem thermisch hygrischen, dem akustischen und dem visuellen Raumklima sowie der Raumluftqualität zusammen. Während der Mensch thermische, akustische und visuelle Reize sehr gut wahrnehmen kann, besitzt er für Luftqualität und Luftfeuchte kein Sensorium.

An Gerüche, die von Personen ausgehen, kann sich der Mensch innerhalb von 10 bis 15 Minuten adaptieren. Er kann zwar beim Betreten eines Raumes die Luftqualität einschätzen, verliert aber sein Beurteilungsvermögen nach sehr kurzer Zeit durch Geruchsadaptation. Aus diesem Grund können Personen, die sich lange in einem Raum aufhalten, die Verschlechterung der Luftqualität nicht mehr wahrnehmen und sehen daher keinen Anlass zu lüften. Im Gegensatz dazu schließen wir ein Fenster sehr schnell, wenn die Temperatur zu stark absinkt oder es draußen zu laut ist.

Welche Anforderungen gelten für das Raumklima?

Anforderungen an das Raumklima und die Hygiene in Klassenräumen sind in Normen und Leitfäden festgelegt: DIN EN 15251; DIN EN ISO 7730; DIN 18041; DIN 4109; VDI 6022; Umweltbundesamt 2008 [2]. Bei den Lüftungssystemen betreffen diese die thermische Gesamtbehaglichkeit, die Vermeidung von Zugluft, die Luftqualität und die Schallemissionen. Die energetischen Anforderungen legt die Energieeinsparverordnung und die zugehörige Normenreihe DIN V 18599 legt die Berechnungsregeln fest. Mit einem Referenzgebäude, das mit einer Referenztechnik nach EnEV ausgestattet ist und einer

Abb. 2 *Luftvolumenströme für Neubau und Bestand nach DIN EN 15251 für 30 Schüler inklusive Lehrer in einem 60 m² großen Klassenraum*

Einteilung nach DIN EN 15251	***Luftvolumenstrom für Personenlast m³/(h·Person)***	***Luftvolumenstrom für schadstoffarme Gebäude m³/(h·m²)***	***Luftvolumenstrom insgesamt pro Klassenraum m³/h***	***Luftvolumenstrom insgesamt pro Person m³/(h·Person)***
Kategorie II, Neubau	*25*	*2,5*	*900*	*30*
Kategorie III, Bestand	*14*	*1,4*	*500*	*17*

durchschnittlichen Situation entsprechen soll, wird das Anforderungsniveau festgelegt und der Nutz-, End- und Primärenergiebedarf des Gebäudes nach DIN V 18599 berechnet. Dabei wird für Klassenräume ein spezielles Nutzungsprofil angesetzt.

Was ist thermische Behaglichkeit?

Die physikalischen Umgebungsparameter Lufttemperatur, Oberflächentemperatur der Raumumschließungsflächen und Luftgeschwindigkeit bestimmen zusammen mit der Aktivität einer Person (innere Wärmeproduktion, Feuchteabgabe über Atemluft und Hautoberflächen) und deren Bekleidung das Temperaturempfinden (thermisches Empfinden). Thermische Behaglichkeit entsteht dann, wenn das Temperaturempfinden einer Person ihrer Erwartung an die thermische Umgebung entspricht. Diese wird vom Kontext geprägt, z. B. der vorherrschenden Witterung der letzten Tage oder der Raumnutzung.

Der Mensch gibt Wärme hauptsächlich durch Konvektion, Wärmestrahlung und Verdunstung an seine Umgebung ab. Die Wärmeabgabe durch Konvektion wird durch die Lufttemperatur und die Luftbewegung im Raum bestimmt. Die Wärmeabgabe durch Wärmestrahlung entsteht durch die Unterschiede zwischen der Haut bzw. Temperatur auf der Bekleidungsoberfläche und der Oberflächentemperatur sämtlicher Wände und Fenster im Raum, des Bodens und der Decke. Deshalb sind die Lufttemperatur und die Oberflächentemperatur der Raumumschließungsflächen („Strahlungstemperatur“) bestimmende Größen für die thermische Behaglichkeit im Raum. Beide Größen werden im Begriff der Raumtemperatur oder auch Operativtemperatur zusammengefasst. Sie ist die in Deutschland gebräuchlichste Größe zur Kennzeichnung der thermischen Umgebung. Bei geringen Luftgeschwindigkeiten unter 0,2 m/s ist sie der Mittelwert aus Lufttemperatur und mittlerer Strahlungstemperatur der Umgebungsflächen.

Zugluftempfinden kann durch zu hohe Luftgeschwindigkeiten in Räumen mit maschinellen Lüftungssystemen sowie bei Fensterlüftung auftreten. Im letzteren Fall kann der Nutzer in der Regel Zugluftererscheinungen selbst abstellen. Einflussparameter auf das Empfinden von Zugluft sind die Temperatur der Luft selber, deren mittlere Luftgeschwindigkeit und die Standardabweichung dieser Luftgeschwindigkeit als Maß für die auftretenden Maximalwerte. Beispielsweise wären bei 22 °C Lufttemperatur eine mittlere Luftgeschwindigkeit von 0,18 m/s bei Mischlüftung und 0,22 m/s bei Quelllüftung zulässig. Erhöhte Luftgeschwindigkeit kann bei sommerlichen Außentemperaturen aber auch die thermische Behaglichkeit verbessern, weil die vom Körper produzierte Wärme besser abtransportiert wird.

Was ist gute Raumluftqualität?

Luftqualität wird heute unter gesundheitlichen und sensorischen Aspekten beurteilt. Bei der gesundheitlichen Bewertung wird sichergestellt, dass in der Luft keine unzulässigen Konzentrationen von Luftinhaltsstoffen enthalten sind, die die Gesundheit beeinträchtigen können.

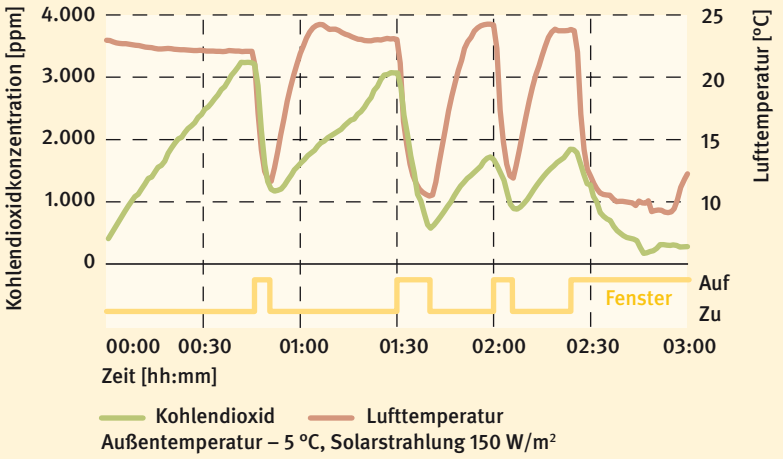


Abb. 3 *Kohlendioxidverlauf bei Stoßlüftung in einem Testklassenraum mit Belegung durch 24 CO_2-abgebende Dummies*
Quelle: Steiger, Hellwig

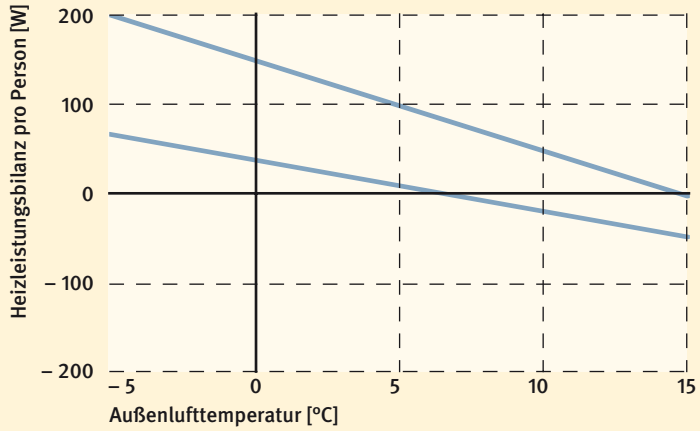


Abb. 4 *Bereich für die Heizleistungsbilanz aus der sensiblen Wärmeabgabe pro Person und den Lüftungswärmeverlusten aufgrund des personenbezogenen Luftvolumenstroms (ohne Wärmerückgewinnung) von 75 W/Person bis 90 W/Person bzw. 17 m³/(h·Person) bis 30 m³/(h·Person)*
Quelle: Hellwig

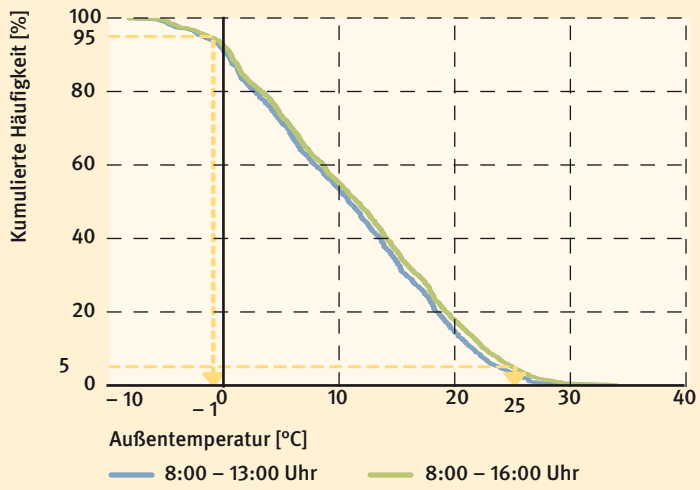


Abb. 5 *Außentemperaturen zur Nutzungszeit, mittleres Klima Deutschland, TRY 04, 2010, Mittleres Stadtgebiet, 50.000 Einwohner, Schulferien Bayern 2010.*
Quelle: Hellwig

Leitfaden Innenraumhygiene für Schulgebäude des Umweltbundesamtes

Die CO_2-Konzentration wird in Volumenprozent (Vol%) oder in parts per million (ppm) angegeben: 1.000 ppm = 0,1 Vol%. Durch die hohe Personenbelegung in Klassenräumen sind Menschen die wesentliche Quelle von Verunreinigungen der Innenraumluft. Über die Atmung und mit seinen Ausdünstungen gibt der Mensch Geruchsstoffe an den Raum ab und atmet gleichzeitig CO_2 aus. Die Geruchsintensität korreliert mit dem Anstieg der Kohlendioxidkonzentration im Raum. Diese dient seit Mitte des 19. Jahrhunderts als Leitparameter zur Beurteilung der Luftqualität. Die Leitwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes für Kohlendioxid in der Raumluft stellen praxisorientierte Handlungsempfehlungen und keine toxikologisch begründeten Richtwerte dar. Abb. 6 zeigt die Werte und die zugehörigen Handlungsempfehlungen.

Abb. 6 *Leitwerte für Kohlendioxid und Handlungsempfehlungen*
Quelle: Umweltbundesamt

CO_2-Konzentration [ppm]	**Hygienische Bewertung**	**Empfehlungen**
‹ 1.000	Hygienisch unbedenklich	Keine weiteren Maßnahmen
1.000 – 2.000	Hygienisch auffällig	Lüftungsmaßnahme (Außenluftvolumenstrom bzw. Luftwechsel erhöhen) Lüftungsverhalten überprüfen und verbessern
› 2.000	Hygienisch inakzeptabel	Belüftbarkeit des Raumes prüfen Ggf. weitergehende Maßnahmen prüfen

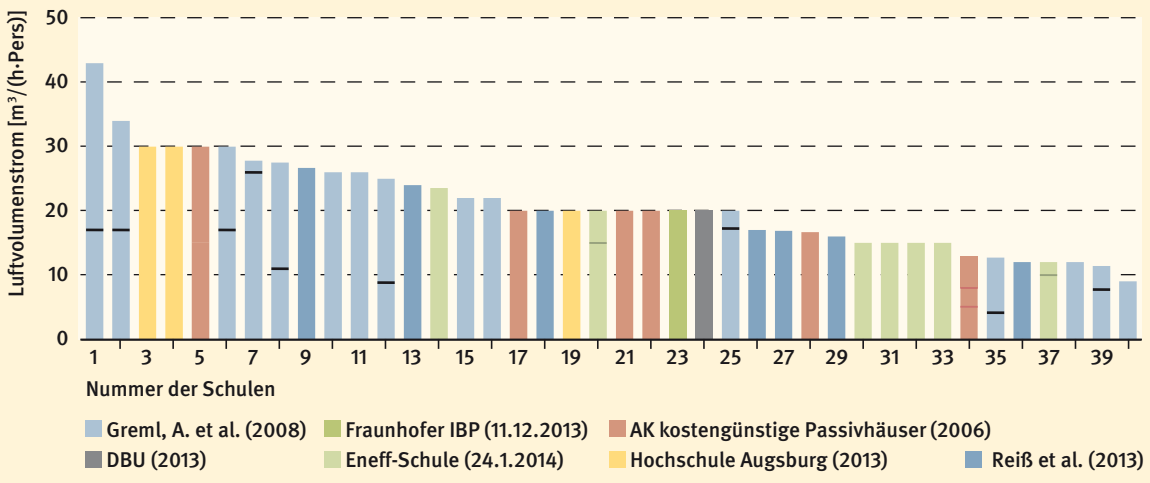
Bei der sensorischen Bewertung der Luftqualität wird die Luft geruchlich bewertet. Dabei können geruchlich wahrnehmbare Luftinhaltsstoffe gesundheitlich unbedenklich sein. Trotzdem werden Gerüche oft als unangenehm eingestuft und lösen unter Umständen auch Ängste der Nutzer vor gesundheitlicher Beeinträchtigung aus.

Quellen von Gerüchen und anderen Luftinhaltsstoffen sind Personen im Raum und Emissionen aus Ausbaumaterialien oder Möbeln. Flüchtige organische Stoffe (VOC – volatile organic compounds) sind wesentlich bei der gesundheitlichen Bewertung der Luftqualität. Sie können nur durch den Einsatz emissionsarmer Produkte vermieden werden. Nur die Geruchsabgabe von Personen korreliert mit dem Anstieg der Kohlendioxid-Konzentration im Raum, die relativ einfach zu messen ist.

Anforderungen Luftmengen und Praxisbeispiele

Da in Klassenräumen die Luftqualität wesentlich durch die Anzahl der anwesenden Personen bestimmt wird, kann die erforderliche Luftmenge aus einer angestrebten maximalen CO_2-Konzentration berechnet werden. DIN EN 15251 empfiehlt, zusätzlich einen Luftvolumenstrom für die Raumgrundfläche zu addieren, der die Emissionen aus den Ausbaumaterialien abtransportieren soll. Dabei wird üblicherweise eine schadstoffarme Bauweise

Abb. 7 *In Demonstrations- und Praxisprojekten in Deutschland und Österreich umgesetzte Luftmengen bei Gebäuden mit mechanischen Lüftungsanlagen Quelle: Hackl, Hellwig*



in Deutschland vorausgesetzt. Damit ergeben sich für den Neubau und den Bestand die in Abb. 2 gezeigten Luftvolumenströme.

Abb. 7 zeigt die in 40 Demonstrations- und Praxisprojekten mit maschinellen Lüftungseinrichtungen umgesetzten Luftvolumenströme in Klassenräumen. 60 % der Projekte haben Luftvolumenströme zwischen 15 und 25 m³/(h·Person) umgesetzt. Ein Viertel der Luftvolumenströme sind größer als 25 m³/(h·Pers). In sieben Projekten wurden Luftvolumenströme unter 15 m³/(h·Pers) realisiert.

Interne Wärmelasten und Nutzungszeiten

In Klassenräumen führt die große Anzahl an Personen auch zu hohen internen Wärmelasten. Ein Erwachsener mit sitzender Tätigkeit gibt 75 W bis 90 W sensible Wärme ab. Kinder sind zwar kleiner, aber meistens – auch im Unterricht – aktiver als Erwachsene. Daher bleibt die Wärmeabgabe insgesamt gleich. So gibt eine Person bei einem Außenluftvolumenstrom von 17 m³/(h·Pers) und einer Wärmeabgabe von 90 W jeweils pro Person bereits ab ca. 5 °C Außentemperatur mehr Wärme an den Raum ab als durch die Lüftung nach außen abtransportiert wird (Abb. 4). Schon ab relativ niedrigen Außentemperaturen dient daher die Lüftung in einem Klassenraum auch zur Abfuhr von Wärmelasten.

Typischerweise werden Grundschulen von 8 bis 13 Uhr genutzt. An weiterführenden Schulen und an Ganztagsschulen sind die Zeiten länger: 8 bis 16 Uhr. Die Länge der einzelnen Unterrichtsstunden variiert stark von 45 min für eine Einzelstunde über 60 min bis zu 90 min für eine Doppelstunde. An 190 bis 200 Tagen im Jahr findet Unterricht statt. Ausgehend von einer Nutzung zwischen 8:00 und 13:00 bzw. 8:00 bis 16:00 Uhr ergibt sich die in Abb. 5 dargestellte kumulierte Häufigkeitsverteilung der Außentemperatur zur Schulzeit. 90 % der Unterrichtsstunden liegen in Zeiten, in denen bei mittlerem Deutschland-Klima eine Außentemperatur zwischen – 1 und 25 °C herrscht. Während der Aufheizphase der Klassenräume vor Unterrichtsbeginn treten geringere Außentemperaturen auf.

Raumgestaltung und Raumbedarf

Die meisten Schulbaurichtlinien in Deutschland fordern mindestens 2 m² pro Schüler bei einer Raumhöhe von mindestens 3 m. Durch flexible Möblierung der Klassenräume wird die gesamte Fläche eines Klassenraumes als Aufenthaltszone genutzt. Das ist bei der Auslegung von Lüftungssystemen zu berücksichtigen.

[1] Hackl, M. ; Hellwig, R.T.: Energetic retrofitting and indoor climate improvement of schools in the administrative district Swabia in Bavaria, Germany. In: Ziemann, O.; Mottock, J.; Pforr, J. (Eds.): Applied Research conference – ARC 2014, Ingolstadt, 5th July 2014. Aachen: Shaker Verl., 2014., p 190-195.

[2] DIN EN 15251; DIN EN ISO 7730; DIN 18041; DIN 4109; VDI 6022; Umweltbundesamt 2008

Aus der Praxis

Motorisch unterstützte Fensterlüftung

Das Fraunhofer Institut für Bauphysik in Holzkirchen hat das Potenzial motorisch unterstützter Fensterlüftung in einem Freilandversuch erforscht. Ziel war es, die Fenster geeignet in der Fassade zu platzieren und ein Regelkonzept zu entwickeln.

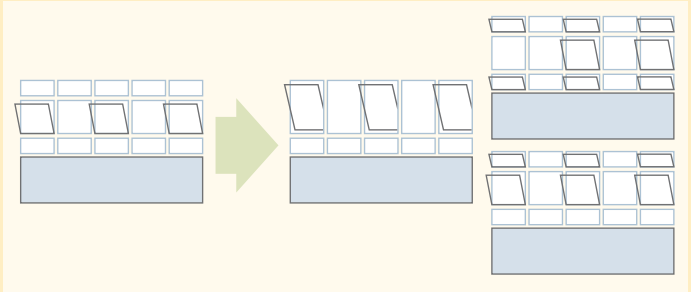
Schwingflügel und Kippflügel, die in zwei Reihen übereinander angeordnet werden, erwiesen sich als sehr günstig für die Kombination mit einer Regelung. Zwei getrennte Fenster für Zu- und Abluft erzeugen einen stabilen Luftvolumenstrom im Raum, der über die Öffnungsweite geregelt werden kann. Normale Kippflügel, einreihig angeordnet, zeigen in Abhängigkeit von der Witterung eine zu große Schwankung des Luftvolumenstroms. Im Sommer sollte die Fassade großzügiges Öffnen ermöglichen.

Die Regelung umfasste die beiden Parameter Luftqualität und -temperatur, die beide von der Fensteröffnung beeinflusst werden. Zudem kommt die Witterung als Störgröße hinzu. Es wurde das Prinzip einer Fuzzy-Regelung getestet. Sowohl der CO_2-Gehalt der Raumluft als auch die Raumtemperatur konnten mit dem Regler ausreichend kontrolliert werden.

Der Regler verhält sich stabil und die Öffnungsweite der Fenster passt sich sehr schnell an ein Ansteigen bzw. Abfallen der Raumlast durch Personen an. Die Heizungsregelung lässt sich in den Fuzzy-Regler integrieren oder sie kann eigenständig erfolgen. Bei Tests mit realen Schülern zeigt sich eine grundsätzliche Zufriedenheit mit der automatisierten Fensterlüftung. Eine Möglichkeit der manuellen Einflussnahme durch Nutzer ist auf jeden Fall notwendig und einfach umsetzbar.

Abb. 8 *Innenansicht der Freilandversuchseinrichtung am Fraunhofer IBP Holzkirchen mit Dummies, die sowohl Wärme als auch CO_2 emittieren*
Quelle: Fraunhofer IBP

Abb. 9 *Fassadengestaltung in Klassenräumen: eine getrennte Zu- und Abluftführung in der Fassade ist günstiger (rechts im Bild) als eine einzige Öffnung für Zu- und Abluft, wie z. B. bei nur einer Reihe gekippter Fenster (links)*
Quelle: Fraunhofer IBP



Systeme und Anlagentechnik

Für die Belüftung in Schulen gibt es im Wesentlichen drei Wege: Die freie (natürliche) Lüftung, z. B. über Fenster, ist das gebräuchlichste System. Eine maschinelle Lüftung kann dezentral oder zentral erfolgen. Die hybride Lüftung kombiniert die Vorteile freier und maschineller Lüftung. Eine Gebäudeautomation bietet für die maschinelle Lüftung gute Voraussetzungen.

Eine Fensterlüftung durch Nutzer kann über einen Lüftungsplan organisiert werden. Dazu wird ein Verantwortlicher (Lehrer oder Schüler) festgelegt, der darauf achtet, dass in Abständen – in Klassenzimmern in der Regel – von 20 Minuten gelüftet wird. Lüften nach Lüftungsplan kann durch Lüftungsampeln unterstützt werden. Dabei sind geeignete Sensoren zu wählen (s. CO_2-Messung, S. 12).

Maschinelle Lüftung wird in zentrale Abluftsysteme (mit unkontrollierter Zuluftführung über Fugen oder kontrolliert, z. B. über feuchtegeregelte Lüftungsöffnungen) und in Zu- und Abluftsysteme über dezentrale oder zentrale Geräte unterteilt. Dezentrale Lüftungsgeräte werden nach ihrer Einbausituation benannt: Brüstungs- oder Zargengeräte sind unterhalb der Fenster positioniert, wobei Außen- und Fortluft direkt über Stutzen durch die Fassade geführt werden. Zu- und Abluft werden dem Raum direkt vom Gerät zu- bzw. von ihm abgeführt. Standgeräte haben einen frei wählbaren Aufstellort im Klassenraum, da Außen- und Fortluft auch über kurze Kanäle durch die Fassade geführt werden können. Deckengeräte werden unterhalb der Decke nahe der Fassade oder auch frei im Raum montiert. Außen- und Fortluft werden über die Fassade geführt. Die Luftverteilung kann bei Stand- und Deckengeräten direkt vom Gerät aus oder über ein zusätzliches Kanalnetz erfolgen.

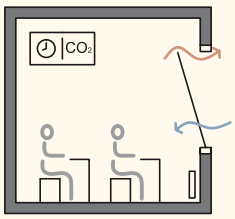
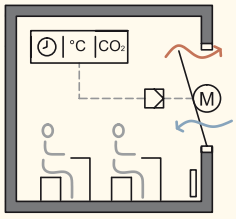
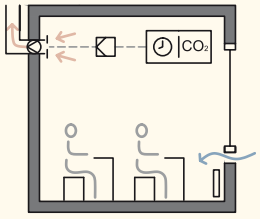
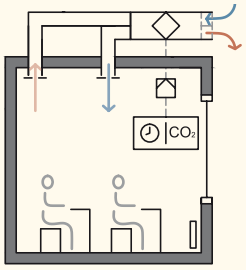
Der Einsatz von maschinellen Lüftungssystemen bedeutet nicht den Verzicht auf eine ausreichend öffenbare Fassade. Über weite Zeiten des Jahres kann frei gelüftet werden. Hybride Lüftungssysteme nutzen natürliche und maschinelle Antriebskräfte (Abb. 10). Bei planmäßiger Fensterlüftung, hybrider Lüftung und Lüftung im Sommer kommt es auch auf die Platzierung der Lüftungsöffnungen in der Fassade an (s. Seite 7).

Luftführung beeinflusst Raumluftströmung

Maschinelle Lüftungssysteme unterscheiden sich hinsichtlich der Zu- und Abluftführung und der sich daraus ergebenden Raumluftströmung. Bei Mischlüftung wird die Zuluft mit hohem Impuls eingeblasen und vermischt sich so schnell mit der Raumluft. Mischlüftung kann grundsätzlich mit allen oben genannten maschinellen Lüftungssystemen bzw. an allen Positionierungen dezentraler Geräte erzeugt werden. Bei Quelllüftung erfolgt eine Schichtung der Raumluftqualität, wobei die frische Luft im unteren Aufenthaltsbereich zugeführt wird. Dazu muss die Zuluft mit Untertemperatur in Bodennähe eingebracht werden. Die frische Luft erwärmt sich an den Schülern, steigt an ihnen auf und kann eingeatmet werden. Die verbrauchte Luft sammelt sich im oberen Bereich des Raumes und muss daher in Deckennähe abgesaugt werden. Aufgrund der Positionierung im Raum ist bei Deckengeräten ausschließlich Mischlüftung möglich. Mischlüftung und Quelllüftung unterscheiden sich aufgrund der unterschiedlichen Raumluftströmung in der Lüftungseffektivität. Diese beschreibt das Verhältnis der Differenz der Konzentration von Luftinhaltsstoffen in Abluft und Zuluft zur Differenz der Konzentration an einer bestimmten Raumposition. Ein Wert von „1“ zeigt an, dass die Luftqualität in der spezifischen Raumposition gleich der Abluftqualität ist. Werte größer „1“ bedeuten hierbei, dass die Luftqualität in der spezifischen Raumposition besser ist als in der Abluft. Dabei erreichen Mischluftsysteme Werte um „1“. Bei Quellluftsystemen können sie im Aufenthaltsbereich bis zu „2“ erreichen.

Die in Abb. 2 angegebenen Luftvolumenströme gelten für Mischluftsysteme. Bei zentralen oder semi-zentralen maschinellen Lüftungssystemen können grundsätzlich die hierin geforderten Außenluftvolumenströme umgesetzt werden. Decken und Standgeräte fördern in der Regel um 700 m³/h und Brüstungs- bzw. Zargengeräte zwischen 100 bis 250 m³/h pro Gerät. Bei letzteren kommen mehrere Geräte zum Einsatz.

Bei der Lufteinbringung ist darauf zu achten, dass die Zuluft alle Raumbereiche erreicht. Die Hersteller geben die jeweilige Eindringtiefe an, die besagt, wie weit der Zuluftvolumenstrom in den Raum reicht. Sie wird aber unter Umständen durch Raumeinbauten herabgesetzt, z. B. Deckenleuchten oder Unterzüge. Auch bei reduziertem Luftvolumenstrom, z. B. Bedarfslüftung bei Teilbelegung, wird eine ausreichende Eindringtiefe benötigt.

Lüftungssystem	***Freie Lüftung***		***Abluftsysteme***	***(semi-) zentrale Lüftungssysteme***
Konzept	*Fensterlüftung mit Lüftungsplan oder Lüftungsampeln*	*Geregelte, motorisch unterstützte Fensterlüftung*	*Geregeltes Abluftsystem*	*Lüftungsgerät für mehrere Räume Innen-/ Außengerät*
Gerätetyp				
Beschreibung	*Lüftung über Fenster; Lüftung nach Lüftungszeitplan oder Luftqualitätssensoren melden eine schlechte Luftqualität in den Klassenzimmern.*	*Temperatur- und Luftqualitätssensoren regeln die Luftqualität über motorisch verstellbare Fenster oder Oberlichter.*	*Abluftsysteme mit motorisch verstellbaren Nach- bzw. Überströmöffnungen. Bedarfsführung über Luftqualitätssensoren/ Präsenzmelder/Stundenplan.*	*Ein Lüftungsgerät versorgt mehrere Klassenzimmer mit zentral aufbereiteter Außenluft. Luftleitungssystem erforderlich. Raumweise Bedarfsführung über Luftqualitätssensoren/ Präsenzmelder/Stundenplan.*

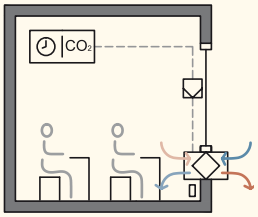
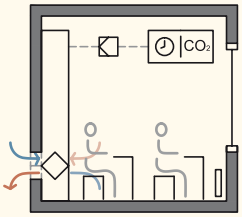
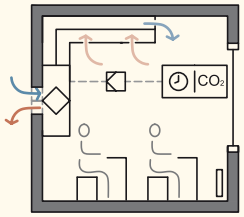
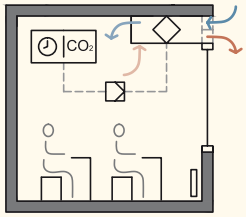
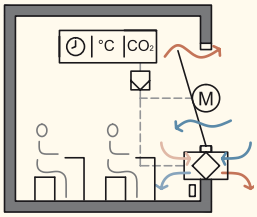
Dezentrale, raumweise Lüftungssysteme *(Ein Lüftungsgerät pro Raum) Zu- und Abluftventilator und Wärmerückgewinnung*				***Hybride Lüftung***
Brüstungs-/ Zargengerät	*Standgerät*	*Wandgerät*	*Deckengerät*	*Hybride Lüftung*
				
3 – 5 Geräte versorgen ein Klassenzimmer. Bedarfsführung über Luftqualitätssensoren/Präsenzmelder/ Stundenplan. Keine Lüftungskanäle erforderlich.	*Ein Gerät versorgt ein Klassenzimmer. Bedarfsführung über Luftqualitätssensoren/Präsenzmelder/ Stundenplan. Je nach Aufstellungsort kurze Kanäle für Außenluft und Fortluft notwendig. Quelllüftung möglich.*	*Ein Gerät versorgt ein Klassenzimmer über ein kurzes Luftleitungssystem. Bedarfsführung über Luftqualitätssensoren/ Präsenzmelder/Stundenplan. Je nach Aufstellungsort kurze Kanäle für Außenluft und Fortluft notwendig.*	*Ein Gerät versorgt ein Klassenzimmer. Bedarfsführung über Luftqualitätssensoren/ Präsenzmelder/Stundenplan. Luftaufbereitung, Schalldämpfung und Luftverteilung können in einem Deckenabsatz untergebracht werden. Ausführung in Sichtmontage möglich.*	*Kombination von motorisch unterstützter Fensterlüftung und maschinellem Lüftungssystem. Die Betriebsart und Bedarfsführung über Temperatur- und Luftqualitätssensoren/Präsenzmelder/ Stundenplan geregelt.*

Abb. 10 *Überblick über mögliche Lüftungsvarianten. Der FGK Statusreport 22 enthält weitere Informationen.*
Quelle: Hellwig/Hackl

Wärmerückgewinnung und Wärmeübertrager

Maschinelle Lüftungssysteme erlauben es, eine Wärmerückgewinnung einzusetzen. Bei dezentralen Geräten liegt der Wärmerückgewinnungsgrad zwischen 55 und 90 %, die meisten Geräte erreichen zwischen 80 und 85 %. In der Regel werden bei dezentralen Geräten rekuperative Wärmeübertrager (z. B. Plattenwärmeübertrager) eingesetzt. Sie erlauben keine Feuchterückgewinnung. Die relative Luftfeuchte liegt jedoch durch die Feuchteabgabe (Atmung) der Schüler normalerweise in den üblichen Bereichen. Mischlüftungssysteme führen mehr Feuchte von der Haut (auch Schleimhäuten) ab als andere Lüftungssysteme. Bei Klagen über Trockenheit im Winter sollte zuerst überprüft werden, ob die Raumlufttemperatur nicht verringert werden kann, die heute oft über 22 °C liegt. Bei Problemen sollten die mittleren Luftgeschwindigkeiten und die Maximalwerte der Luftgeschwindigkeit überprüft werden (s. Thermische Behaglichkeit, S. 5).

Der Wärmeübertrager soll eine Betriebsweise erlauben, die auf die Ziele Behaglichkeit und Energieeffizienz ausgelegt ist. Es ist beispielsweise zu berücksichtigen, dass in den Übergangsjahreszeiten und im Sommer bei Temperaturdifferenzen zwischen Raum- und Außenluft kleiner ca. 5 K – primärenergetisch betrachtet – der Stromverbrauch für die Lüfter höher sein kann als die Energiemenge, die über die Wärmerückgewinnung wiedergewonnen werden kann. Dafür ist eine Bypass-Schaltung vorzusehen. Bei entsprechenden Außentemperaturen ab ca. 10 °C kann die Bypassklappe teilweise oder bei

höheren Außentemperaturen ganz geöffnet werden. Der Luftvolumenstrom umgeht so den Wärmetauscher. Das vermeidet eine Überwärmung der Klassenräume. Die Bypassregelung kann auch eine Nachtauskühlung mit Außenluft ermöglichen, die bei mittlerer bis hoher Speicherfähigkeit des Raumes sinnvoll ist. Nicht alle am Markt befindlichen Geräte besitzen eine solche Bypassklappe; einige Geräte bieten eine automatische außen- und raumlufttemperaturgeführte Regelung der Klappe an.

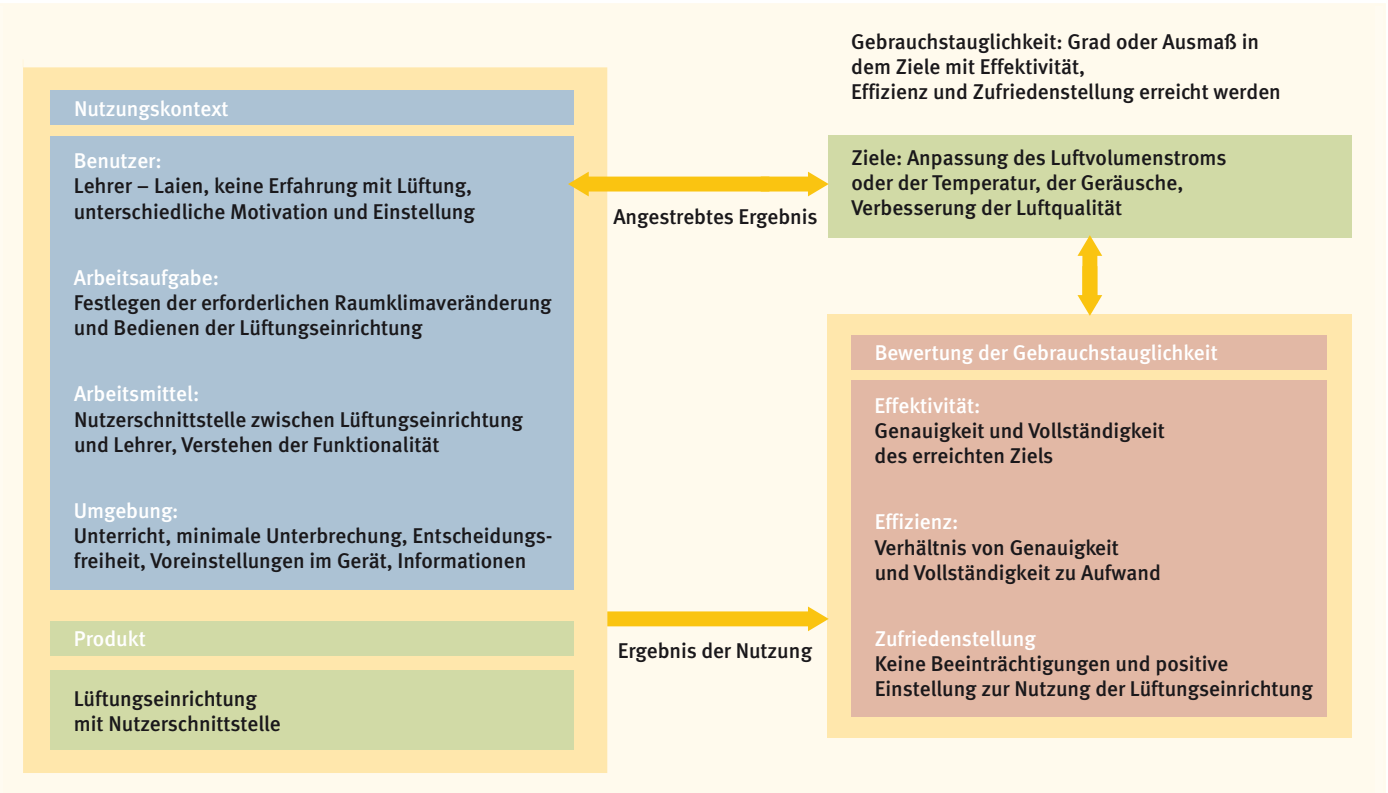
Bei sehr niedrigen Außenlufttemperaturen kann es im Wärmeübertrager zu Tauwasserbildung und Vereisungen kommen. Deshalb kann die Temperatur der Außenluft vor Eintritt in den Wärmeübertrager mittels elektrisch betriebenem Vorerhitzer, einem verringerten Zuluftvolumenstrom bei konstantem Abluftvolumenstrom oder durch beigemischte Abluft angehoben bzw. der Wärmeübertrager durch einen Bypass umgangen werden. Die Lüftungsgeräte verfügen teilweise über Nachheizregister. Manche der Geräte können die komplette Raumheizlast abdecken, andere wiederum wärmen die Zuluft nur bis zur Raumtemperatur nach. Das Nachheizen erfolgt entweder elektrisch, warmwasserbetrieben oder durch beigemischte Umluft.

Sofern das Gerät ein Kühlregister enthält, wird dieses mit Kaltwasser betrieben. Manche Geräte lassen sich optional um einen adiabaten Verdunstungskühler in der Abluft erweitern. Verdunstendes Wasser senkt bei diesen die Temperatur der Abluft ab, bevor sie durch den Wärmeübertrager nach außen fortgeführt wird. Eine abgesenkte Temperatur der Abluft kühlt im Wärmeübertrager die einströmende frische Außenluft.

Wartung und Hygiene

Damit Lüftungssysteme nicht selbst zur Quelle von Luftverunreinigungen werden, ist eine regelmäßige Wartung erforderlich. Lüftungssysteme in Nichtwohngebäuden wie Schulen sind gemäß VDI 6022 regelmäßig einer hygienischen Inspektion zu unterziehen. Die Richtlinie definiert hygienerelevante Anforderungen an Planung, Ausführung, Betrieb und Instandhaltung raumlufttechnischer Anlagen. Sie legt auch fest, welcher Personenkreis Hygiene-Inspektionen durchführen darf. Dabei reicht es nicht aus, geeignete Materialien und Produkte zu verwenden. Erst eine fachgerechte Planung, Installation und Betriebsführung gemäß den Anforderungen sowie die Durchführung einer Erst-Hygiene-Inspektion und von Wiederholungs-Inspektionen kann den dauerhaft hygienischen Betrieb sicherstellen. Bei der Erst-Inspektion werden die konkret zu überprüfenden Punkte für die regelmäßigen Wiederholungs-Inspektionen aufgestellt. Bei Anlagen ohne Luftbefeuchtung, wie im Regelfall in Schulen, ist eine Wiederholungs-Inspektion alle drei Jahre durchzuführen [1]. VDI 6022 führt Art, Umfang und Zeitintervalle für die Kontrolle der verschiedenen Anlagenteile auf. So werden z. B. Luftfilter alle drei Monate einer Sicht- und Geruchsprüfung und der Differenzdruck am Filter alle sechs Monate geprüft. Filter der Filterstufe 1 sind spätestens nach zwölf, der Filterstufe 2 nach 24 Monaten zu wechseln.

Abb. 11 *Anwendungsrahmen für die Gebrauchstauglichkeit von Lüftungssystemen (Usability) in Schulen auf der Grundlage von DIN EN ISO 9241-11*
Quelle: Hellwig



Einflussnahme des Nutzers und dessen Zufriedenheit

Verfügen Nutzer über Möglichkeiten, die baulichen und technischen Systeme im Raum anzupassen, sobald sich entweder ihre eigenen Anforderungen oder das Raumklima verändert haben, erhöht dies ihre Zufriedenheit. Dabei kommt es vor allem auf drei Aspekte an: Die Nutzer müssen die Möglichkeiten zum Anpassen kennen. Außerdem müssen sie die Bedienung intuitiv verstehen können und das technische System muss auch reagieren. Placeboschalter, die immer wieder diskutiert werden, sind völlig ungeeignet. Sie beeinträchtigen das Vertrauen der Nutzer in ihr Gebäude, dessen technische Systeme und in den Gebäudebetreiber. Die Bedürfnisse und Beschwerden der Nutzer sollten ernst genommen werden.

Gebäudeautomation

In nicht-privaten Räumen ist oft das persönliche Verantwortungsbewusstsein für das Abschalten stromverbrauchender Geräte, z. B. beim Verlassen eines Raumes, herabgesetzt. Mit einer Gebäudeautomation lässt sich dem entgegenwirken. Außerhalb der Nutzungszeit kann sie energetisch oder raumklimatisch sinnvolle Veränderungen am Gebäude veranlassen. Dazu zählen beispielsweise das Abschalten von Kunstlicht in Klassenräumen zu bestimmten Zeiten (z. B. in den Pausen), die Aktivierung von Lüftungseinrichtungen über Präsenzmelder oder zum Vorspülen bzw. Nachlüften sowie deren Bedarfsführung. Weitere Möglichkeiten sind bei hoher Solarstrahlung außerhalb der Nutzungszeit das automatische Betätigen von Sonnenschutzsystemen oder das Anbieten von energetisch und raumklimatisch sinnvollen Default-Zuständen (Standardeinstellungen, Absenk- oder Stützbetrieb bzw. Nachtabschaltung der Heizung), die aber vom Nutzer übersteuert werden können.

Gebrauchstauglichkeit von Gebäudeautomation

Haben Nutzer die Möglichkeit, über eine Bedieneinheit im Raum die Regelparameter zu ändern, wird das oft als kritisch für den Anlagenbetrieb angesehen. Andererseits bietet dies Chancen, die Nutzerzufriedenheit zu erhöhen (Infobox rechts oben). Generell ist die Gebrauchstauglichkeit vom Nutzungskontext, in dem ein Produkt eingesetzt wird, abhängig (DIN EN ISO 9241-11). Der Nutzungskontext umfasst das Benutzerverhalten, repräsentiert durch definierte sogenannte Nutzerprototypen, die Arbeitsaufgabe, die Arbeitsmittel sowie die physische und soziale Umgebung. Die drei Leitkriterien für die Gebrauchstauglichkeit eines Produktes sind Effektivität zur Aufgabenlösung, Effizienz und Zufriedenheit der Nutzer. Den Anwendungsrahmen für die Gebrauchstauglichkeit von Lüftungssystemen in Schulen zeigt Abb. 11. Außerdem ist die Gebrauchstauglichkeit der Nutzerschnittstelle zu prüfen. Um den Leitkriterien gerecht zu werden, sollte sich der Planer in die Rolle des Nutzers versetzen, der eben nicht über das fachliche Wissen und Verständnis eines beruflichen Experten verfügt. Die Kennzeichen einer geeigneten Gebäudeautomation für Schulen sind in einer Infobox (Seite 12) zusammengefasst.

Bedarfslüftung

Unter Bedarfslüftung ist eine optimierte Betriebsweise von Lüftungssystemen zu verstehen, bei welcher der Luftvolumenstrom mittels einer Regelung oder Steuerung an den Bedarf angepasst wird [2]. Dies kann durch geschaltete oder geregelte Ventilatoren, durch Luftklappen bzw. Luftdurchlässe für variablen Luftvolumenstrom oder durch motorisierte Lüftungselemente in der Fassade erfolgen.

Bei gesteuerten Systemen wird der Außenluftvolumenstrom manuell, nach Präsenz oder nach Zeitprogramm erhöht bzw. abgesenkt. Bei einer geregelten Bedarfslüftung wird der Bedarf an Frischluft kontinuierlich mittels Luftqualitätsfühlern (in Schulen: CO_2-Fühler) gemessen. Die dem Raum zugeführte Außenluftmenge wird durch einen Regler an den ermittelten Bedarf angepasst. Eine Grundlüftung bei Anwesenheit von Personen kann über einen Präsenzmelder ausgelöst werden. Das Lüftungsgerät schaltet dann nicht erst nach Überschreiten eines CO_2-Schwellenwertes (z. B. 1.000 ppm) ein, sondern bereits, wenn der Präsenzmelder Personen erkennt.

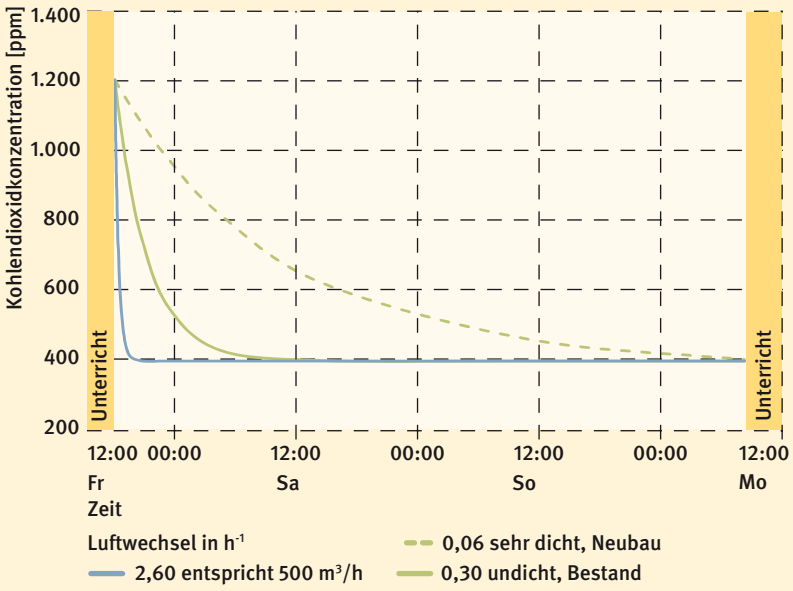
Lehrer sollten die Betriebsweise, z. B. den Volumenstrom, anpassen können, weil dadurch die Akzeptanz des Lüftungssystems erhöht und auf die individuell verschiedenen Anforderungen der Nutzer reagiert werden kann. Bei den meisten dezentralen Geräten kann der Luftvolumenstrom in mehreren Stufen oder stufenlos eingestellt werden. Manche Hersteller bieten fest vorprogrammierte und auf Schulen abgestimmte Betriebsarten an. So können Temperatur und Luftvolumenströme über Ferien- und Wochenprogramme angepasst werden. Zusätzlich verfügen die meisten Geräte über eine manuelle Betriebsart. Bei dieser hat der Nutzer direkt Zugriff auf die verschiedenen Parameter. Entscheidend für eine hohe Akzeptanz des Lüftungssystems ist jedoch die Einfachheit und Klarheit des Bedienmoduls (Nutzerschnittstelle) im Klassenzimmer selbst.

Außerhalb der Nutzungszeit und in Zeiten ohne Lüftungsbedarf sollte das Lüftungssystem möglichst ausgeschaltet bzw. der Volumenstrom auf einen Minimalwert reduziert werden können. Damit die Luftqualität beim Wiederbetreten des Raumes als angenehm empfunden wird, sollte kurz vor Beginn der Nutzungszeit der Raum auch bei abwesenden Nutzern gelüftet werden (Zeitprogramm).

Nach der letzten Belegung eines Klassenzimmers sollte dieses vollständig gelüftet werden, d. h. der Luftaustausch über ein Lüftungssystem soll solange fortgesetzt werden, bis die Außenluftqualität im Raum wieder erreicht ist. Durch die heute übliche luftdichte Bauweise, die dazu dient, unkontrollierte Wärmeverluste durch In- und Exfiltration (z. B. Undichtigkeiten an Fugen und Wandanschlüssen von Fenstern und Türen) zu reduzieren, verbliebe ansonsten die verbrauchte Luft bis zum nächsten Morgen zu Schulbeginn im Raum. Abb. 12 zeigt, dass an einem Freitag nach der letzten Nutzung in einem sehr dichten Klassenzimmer (In- und Exfiltrationsluftwechsel 0,06 h-1) die CO_2-Konzentration (Startwert im

Beispiel 1.200 ppm) nur sehr langsam abnimmt und die Außenluftkonzentration (im Beispiel 400 ppm) erst nach 85 Stunden am Montagmorgen erreicht wird. Wird jedoch mit einem Lüftungssystem nachgelüftet, so ist die Außenluftkonzentration nach 1 Stunde und 20 Minuten wieder erreicht. Bei undichter Bauweise mit Bestandsfenstern wird deutlich vor dem darauf folgenden Morgen wieder Außenluftqualität erreicht. Solche Werte konnten bereits in der Praxis nachgewiesen werden. Wird die Luft erst mit der morgendlichen Spüllüftung erneuert, setzen sich Gerüche im Raum eher fest.

Abb. 12 *Abnahme der CO_2-Konzentration in einem Klassenzimmer bei unterschiedlichen Luftwechseln nach Unterrichtsschluss an einem Freitag um 15:00 Uhr, Ausgangskonzentrationen CO_2 innen: 1.200 ppm, außen: 400 ppm*
Quelle: Hellwig



Kennzeichen guter Raumautomation

Im Sinne einer hohen Gebrauchstauglichkeit stellt eine gut funktionierende Raumautomation für den Nutzer vorhersehbare und seinen Erwartungen entsprechende, "normale" Raumklimazustände her. Diese sind auf die üblicherweise im Raum stattfindenden Tätigkeiten ausgelegt. Die Default-Werte, die den ersten Eindruck eines Nutzers beim Betreten des Raumes bestimmen, sollten daher entsprechend sorgfältig festgelegt werden. Gute Raumautomation bietet Möglichkeiten zur Intervention (Einflussnahme) an, weil nicht alle Wünsche der Nutzer vorhersehbar sind, sich die Wünsche verschiedener Nutzer unterscheiden oder die Anforderungen je nach Tätigkeit auch wechseln. Der Nutzer sollte seine Möglichkeiten zur Änderung intuitiv erkennen und klar zuordnen können. Die Raumklimasysteme sollten auf die veränderte Einstellung prompt reagieren, um dem Nutzer eine Positiv-Rückmeldung zu seinem Eingriff zu geben. Einfachheit, Klarheit und eine begrenzte Auswahl sind zweckdienlicher als eine zu große und komplizierte Vielfalt.

CO_2-Sensoren und CO_2-Messung

Werden Kohlendioxid-Sensoren für die Bedarfslüftung eingesetzt, basieren diese in der Regel auf der nichtdispersiven Infrarotspektroskopie, die eine Gasanalyse ermöglicht. Dabei gibt es Bautypen, die mit einer oder mit zwei Infrarotquellen und mit ein oder zwei Wellenlängenbereichen der Infrarotquelle arbeiten. Die Art der Ausführung bestimmt die Kosten aber auch die Zuverlässigkeit hinsichtlich der Messgenauigkeit und der Langzeitstabilität. So benötigen Sensoren mit nur einer Infrarotquelle und nur einem Wellenlängenbereich der Infrarotquelle einen Algorithmus, der für einen regelmäßigen Abgleich sorgt: Die in einem bestimmten Zeitraum minimal gemessene CO_2-Konzentration wird als Außenluftkonzentration – meist mit 400 ppm – angenommen. Dazu muss jedoch regelmäßig (meistens einmal in 24 h) die Außenluftkonzentration erreicht werden. Dies kann sich, wie in Abb. 12 dargestellt, als schwierig erweisen. Daher sind solche Sensoren für den Einsatz in sehr dichten oder ausschließlich frei belüfteten Räumen mit hoher Belegung eher ungeeignet. Beim Einsatz von maschinellen Lüftungssystemen sollte sofort nach der Nutzung der Raum ‚leergelüftet' werden, wenn solche Sensoren eingesetzt werden. Ob die verwendeten CO_2-Sensoren noch korrekt messen, sollte regelmäßig überprüft werden, um unnötiges Lüften zu vermeiden.

Generell gilt für alle Sensoren, dass messtechnisch stets die absolute CO_2-Konzentration im Raum erfasst wird. Dies ist einfacher zu erreichen als noch zusätzlich die Außenluftkonzentration zu erfassen, um die Differenz zwischen der Außen- und Innenluft als Maßstab für die Luftqualität heranzuziehen. In Stadtgebieten in Deutschland kann die Schwankung der Außenkonzentration innerhalb eines Jahres bis zu 200 ppm aufweisen. Im Spätwinter können die Werte bis zu 600 ppm erreichen. Insgesamt können eine jahreszeitlich bedingt erhöhte CO_2-Konzentration in der Außenluft und ein Messfehler sich zu einem Klassifikationsfehler von einer ganzen Luftqualitätsklasse nach DIN EN 13779 addieren. Bei der Interpretation von CO_2-Messwerten sollten daher die Außenluftkonzentration und der CO_2-Sensortyp berücksichtigt werden.

[1] Fachinstitut Gebäude-Klima e.V. Bietigheim-Bissingen (Hrsg.): Raumlufttechnische Anlagen. Leitfaden für die Durchführung von Hygiene-Inspektionen nach VDI 6022. Aug. 2003. FGK Status-Report 15

[2] Fachverband Gebäude-Klima e. V., Bietigheim-Bissingen (Hrsg.): Bedarfslüftung im Nichtwohnungsbau. 2014. TGA – Report 2014. Nr. 1

Aus der Praxis

Schule Olbersdorf

Das ausgewählte Maßnahmenpaket für die Schule im sächsischen Olbersdorf umfasst eine Vakuumdämmung im unteren Gebäudeabschluss, die Nutzung des Erdreichs als regenerative Energiequelle, eine Akustik und Kühldecke (Kapillarrohrmatten) und den Einsatz von elektrochromer Verglasung als Sonnenschutz in stark exponierten Klassenräumen. Ein außenliegender Sonnenschutz war aus Denkmalschutzgründen nicht möglich. Lichtlenkende Jalousien und eine präsenz- und tageslichtabhängige Beleuchtungssteuerung tragen zu einer guten Tageslichtversorgung bei. Das Kunstlicht wird zentral nach Schulschluss oder über einen Präsenzmelder 10 Minuten nach dem letzten Impuls ausgeschaltet.

Zur bestmöglichen Integration einer bedarfsgeführten Lüftung in ein denkmalgeschütztes Gebäude wurden vorhandene Abluftschächte eines historischen Schachtlüftungssystems benutzt und mit Zuluft-Kastenfenstern kombiniert. Die Zuluft wird über das Kastenfenster geführt und dabei vorgewärmt. Die Abluft wird durch CO_2-geregelte Gleichstromventilatoren in Abhängigkeit vom Bedarf abgeführt. Die Schächte wurden mit zusätzlichen Absperrklappen und Schalldämpfern ertüchtigt. Nachts sind die Anlagen ausgeschaltet. Das Öffnen der Fenster ist möglich und erwünscht, da das Abluftsystem nur eine Grundlüftung für die Klassenräume liefert.

Abb. 13 *Außenansicht der Schule Olbersdorf*
Quelle: Milke, Planungsgesellschaft AIZ

Abb. 14 *Gebäudesteckbrief Schule Olbersdorf*

Baujahr 1927/28
Kulturdenkmal:
Bedeutendes regionales Beispiel für den sachlichen Schulbau der Weimarer Republik mit Anklängen des Expressionismus
Förderschule für 180 Schüler
Bruttogrundfläche (DIN V18599): 4.600 m²
Endenergie vor der Modernisierung: 235 kWh/(m²a)
Bauherr: Landkreis Löbau/Zittau, Landratsamt

Modernisierungsziele
Energetische Modernisierung 2009 – 2011
Verringerung des Energieverbrauchs zur 3-Liter Schule
Lernförderndes Raumklima:
- Raumluftqualitätsverbesserung
- Verbesserung Raumakustik
- Begrenzung sommerlicher Innentemperaturen
Schulalltagstaugliche, robuste und bedienfreundliche Ausführung
Wartungsarme Technik
Einsatz vorbildhafter Produkte unter baupraktischen Gegebenheiten (Zeit, Kosten, Baugesetzgebung, bauaufsichtliche Prüfungen und Zulassungen, Ausschreibung, Vergabe und Ausführung)

En passant

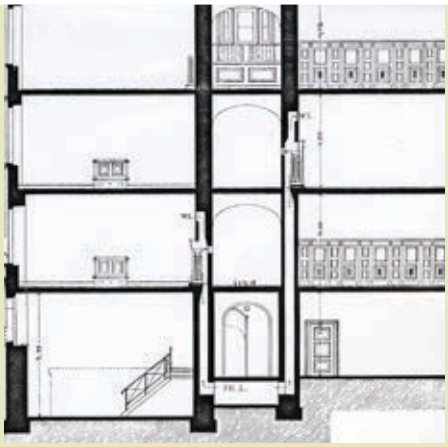


Abb. 15 *Zuluftschacht mit Vorerwärmung, Grundschule Dom Pedro Platz 2.*
Quelle: Landeshauptstadt München

Schachtlüftung

Schachtlüftungssysteme hatten vor 100 Jahren bis in die 1950er Jahre hinein eine große Verbreitung. Heute sind sie in der Regel nicht mehr in Betrieb und wurden teilweise oder ganz rückgebaut. Diese Systeme nutzen das Prinzip des thermischen Auftriebs. Dabei werden Räume über Schächte be- bzw. entlüftet. Die Wärmequellen im Raum wirken als Antrieb für die Lüftung. In Klassenräumen sind durch die hohe Personenbelegungsdichte gute Voraussetzungen für eine Schachtlüftung gegeben. Besonders häufig waren Systeme mit Zu- und Abluftführung über getrennte Schächte für jeden Klassenraum.

Ein Projekt der Hochschule Augsburg untersuchte das Potenzial der Schachtlüftung in heutigen Klassenzimmern in einem Gebäude von 1895. Die alten Zuluftschächte wurden reaktiviert, mit regulierbaren Zuluftgittern versehen und ohne zusätzliche Vorwärmung über ein Jahr lang betrieben. Zwei Klassenräume mit Zu- und Abluftschacht wurden mit normaler Fensterlüftung verglichen. In allen Klassenräumen wurden die CO_2-Konzentration und die Lufttemperatur gemessen. Im Gegensatz zur Fensterlüftung, bei der nur 2 m³/(h Pers) ermittelt wurden, erreichten die personenbezogenen Luftvolumenströme in den Räumen mit Schachtlüftung im Winter ca. 14 m³/(h Pers). Dies erfolgte bei einer Vorwärmung im Schacht von 0,5 K/m (1.OG) bis 0,7 K/m (3. OG). 50 % der gemessenen CO_2-Konzentrationen im Winter lagen bei Schachtlüftung unterhalb von 1.350 ppm, während im Gegensatz dazu der Wert bei der Fensterlüftung 1.800 ppm betrug. Im Sommer wiesen die Räume mit Schachtlüftung im Vergleich zur Fensterlüftung geringere Temperaturen am Morgen und auch während des Unterrichts auf.

Abb. 16 *Historische Abluftschächte auf dem Dachboden*
Quelle: Hochschule Augsburg, E2D, Bauklimatik, 2010

Gute Akustik in Klassenräumen

Eine gute Akustik fördert die Konzentrationsfähigkeit und ist für Schüler und Schülerinnen mit vermindertem Hörvermögen, Nicht-Muttersprachler sowie jeden Sprachunterricht wichtig. In vielen Klassenräumen ist die akustische Situation nicht optimal. Bei jeder Lüftungsplanung sollte daher auch das Thema Akustik mit bedacht werden.

Unabhängig davon, ob in einer Schule über Fenster oder maschinelle Lüftungssysteme gelüftet wird, sind in allen Klassenräumen gute akustische Bedingungen erforderlich. Dies betrifft sowohl die Wahrnehmung von Außengeräuschen als auch die von Anlagen verursachten Lärmemissionen. Wie die Akustik eines Raums wahrgenommen wird, hängt im Wesentlichen von der Nachhallzeit ab. Daneben ist aber für die Kommunikation im Raum auch die Geräuschsituation bedeutsam. Aus diesem Grund werden in DIN 18041 [1] nicht nur Anforderungen an die Nachhallzeit, sondern ebenfalls Empfehlungen an den Geräuschpegel im Raum definiert. Bevor man sich über die Schallausbreitung im Raum (Raumakustik) Gedanken macht, sind daher zuerst die Geräuscheinträge (Bauakustik) zu minimieren, damit Ruhe im Raum herrscht. Im Folgenden werden zunächst die einschlägigen Anforderungen an die Geräusche im Raum und anschließend kurz die raumakustischen Anforderungen an die Nachhallzeit vorgestellt.

Schallpegel im Raum

DIN 18041 definiert und verwendet den Störschalldruckpegel der bauseitigen Geräusche als Kenngröße für die Geräusche im Raum. Der Wert des Störschalldruckpegels berücksichtigt im jeweils betrachteten Raum den gesamten Schalldruckpegel. Dieser umfasst die Außengeräusche sowie die Geräusche aus Nachbarräumen, von haustechnischen Anlagen, Sanitärinstallationen und den fest installierten medientechnischen Geräten. Für eine Prognose des Wertes sind teilweise Annahmen zu den verschiedenen Geräuschanteilen zu treffen. Die Außengeräusche wie auch die Geräusche aus den Nachbarräumen können nur prognostiziert werden, wenn eine Abschätzung zum Schallpegel im Außenbereich bzw. dem Nachbarraum sowie zur Schalldämmung des betreffenden (Außen-)Bauteils getroffen wird. Einfacher zu prognostizieren sind die Geräusche aus haus- und medientechnischen Anlagen. Vielfach kann in der Praxis davon ausgegangen werden, dass diese beiden Geräuschanteile den bauseitigen Störschalldruckpegel bestimmen. Die Außengeräusche wie auch die Geräusche aus Nachbarräumen sollten durch die schalldämmenden Eigenschaften der Konstruktionen (Decken, Wände, Türen, Fenster) ausreichend niedrig sein. Messtechnisch kann der bauseitige Störschalldruckpegel im leeren, betriebsfertigen Raum ermittelt werden.

In Abb. 17 ist die Einstufung des Störschalldruckpegels der bauseitigen Geräusche je nach Anforderung an die Raumnutzung mit einigen Kommentaren dargestellt. Neben diesen Angaben der DIN 18041 zum Gesamt-Pegel im Raum gibt es noch weitere Regelwerke, die teilweise spezielle Aspekte der Planung berücksichtigen.

In der Richtlinie VDI 2081 [2] sind Richtwerte für den A-bewerteten Schalldruckpegel der Geräusche aus RLT-Anlagen in belüfteten Räumen angeführt. Für Klassen- und Seminarräume wird ein maximaler Wert von 35 dB(A) bei hohen und 40 dB(A) bei niedrigen Anforderungen angeführt.

Abb. 17 *Anforderung an die bauseitigen Geräusche nach DIN 18041. Quelle: Akustikbüro Oldenburg*

Schalltechnische Anforderung an die Raumnutzung	***Störschalldruckpegel der bauseitigen Geräusche***	***Anmerkung***
mindest	*LNA, Bau ≤ 40 dB*	*Mindestanforderung; nur für mittlere Entfernungen geeignet*
mittlere	*LNA, Bau ≤ 35 dB*	*Minimalanforderung; für Personen mit Hörverlusten oder schwierige / fremdsprachige Kommunikation*
hohe	*LNA, Bau ≤ 30 dB*	*Für Personen mit Hörverlusten; für schwierige oder fremdsprachige Kommunikation*

In DIN 4109 [3], werden ebenfalls Werte für die zulässigen Schalldruckpegel aus haustechnischen Anlagen in Unterrichtsräumen angegeben. Hier wird ein Wert von 35 dB(A) für den Maximal-Pegel vorgegeben.

Nachhallzeit im Raum

Die Hörsamkeit eines Raums wird in DIN 18041 wie folgt definiert: „Eignung eines Raums für bestimmte Schalldarbietungen, insbesondere für angemessene sprachliche Kommunikation und musikalische Darbietung an den für die Nutzung des Raums vorgesehenen Orten."

Für die Räume mit Anforderungen an die Nachhallzeit (Gruppe A genannt) werden in der Norm drei Nutzungsarten definiert. Beispiele für die Nutzungsarten in Schulgebäuden sind:

Musik · Musikunterrichtsraum mit aktivem Musizieren
Sprache · Versammlungsraum, Aula
Unterricht · Klassenraum, Seminarraum, Konferenzraum

Für jede dieser Nutzungsarten werden in der Norm Empfehlungen für die Nachhallzeit in Abhängigkeit vom Raumvolumen aufgeführt (Abb. 18). Ein Klassenraum mit einem Raumvolumen von 250 m³ sollte demnach eine Nachhallzeit von 0,6 Sekunden bei mittleren Frequenzen haben. Neben dem Sollwert der Nachhallzeit trifft DIN 18041 weiterhin eine Vorgabe für die Frequenzabhängigkeit der Nachhallzeit. Hierbei wird zwischen den Nutzungsarten „Musik" sowie „Sprache"/„Unterricht" unterschieden (s. die Empfehlung in Abb. 19). Die Nachhallzeit darf in diesem Fall bei mittleren Frequenzen nicht mehr als +/- 20 % vom empfohlenen Sollwert für das entsprechende Volumen abweichen. Für den oben angeführten Klassenraum also zwischen 0,48 und 0,72 Sekunden. Dieser Toleranzbereich ist sinnvoll, da die Planung immer eine gewisse Ungenauigkeit hat und der Mensch zum anderen kleine Differenzen auch kaum wahrnehmen kann. Raumakustische Planungen sollten prinzipiell frequenzabhängig durchgeführt werden.

Weiterhin werden in der Norm auch andere Räume in Schulgebäuden (Gruppe B genannt) wie Foyers, Flure, Büros etc. aufgeführt, in denen der Lärm minimiert werden soll, um so „eine dem Zweck angepasste Sprachkommunikation über geringe Entfernungen zu ermöglichen".

Die im Oktober 2013 begonnene Fortschreibung von DIN 18041 wurde notwendig, um Trends der modernen Architektur zu berücksichtigen, sowie Erfordernisse an die Raumakustik für die Umsetzung der Inklusion festzuschreiben. Thermisch optimierte Gebäude erfordern andere raumakustische Maßnahmen als die klassischen Absorber an der Decke, da die Decke mitunter eine thermische Funktion als Speichermasse übernimmt.

DIN 18041 aus dem Jahr 2004 wird vielfach als allgemein anerkannte Regel der Technik im Bereich der Raumakustik angesehen. Durch die aktuelle Fortschreibung sind keine großen Änderungen bei den Vorgaben und Empfehlungen zu erwarten.

Lombardeffekt

Erhöht ein Sprecher bei intensiven Störgeräuschen seine Sprechlautstärke und gelegentlich auch die Tonlage, dann wird das als Lombard-Effekt bezeichnet. Hohe Störgeräusche können durch Geräuscheinträge oder eine zu geringe Dämpfung (langer Nachhall) in einem Raum ausgelöst werden. Immer wenn viele Menschen gemeinsam in einem Raum kommunizieren (z. B. in Schulen, Kantinen), kommt es durch den Lombard-Effekt zu einem gegenseitigen „Aufschaukeln" und einem deutlichen Anstieg der Gesamtlautstärke. Umgekehrt führen ein niedriger Störpegel und eine angemessene Nachhallzeit zu einem Absinken der Gesamtlautstärke. Dies wird als inverser Lombard-Effekt oder auch Caféhaus-Effekt bezeichnet.

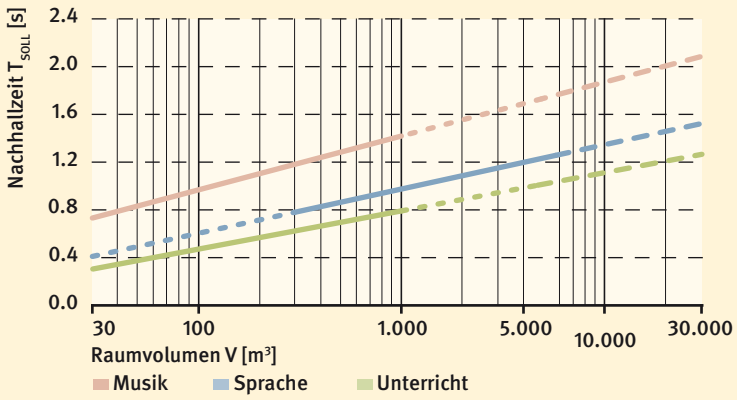


Abb. 18 *Werte für die Nachhallzeit T_{soll} je nach Raumnutzung und -volumen nach DIN 18041 Quelle: Akustikbüro Oldenburg*

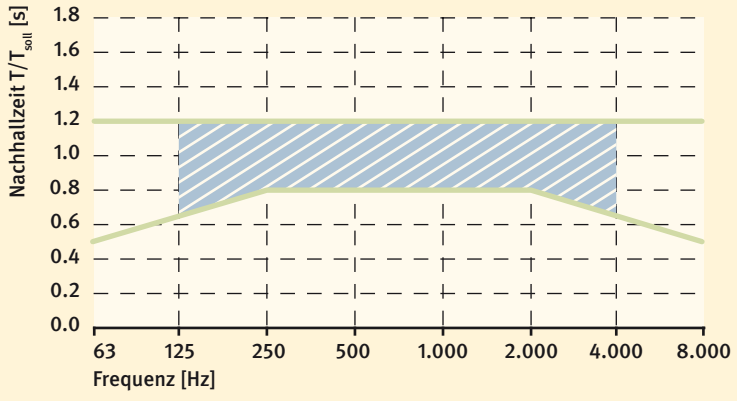


Abb. 19 *Frequenzabhängigkeit der Nachhallzeit bezogen auf T_{soll} für die Kategorien Sprache und Unterricht Quelle: Akustikbüro Oldenburg*

[1] DIN 18041 – Hörsamkeit in kleinen und mittelgroßen Räumen, Berlin: Beuth, Mai 2004 (derzeit in Überarbeitung)

[2] VDI 2081 Blatt 1: Geräuscherzeugung und Lärmminderung in Raumlufttechnischen Anlagen. Berlin: Beuth, Juli 2001

[3] DIN 4109 - Schallschutz im Hochbau - Anforderungen und Nachweise. Berlin: Beuth, November 1989

Erfahrungen und Kommunikation

Wird ein modernisiertes Schulgebäude auch mit Lüftungstechnik ausgerüstet, dann sind die Erwartungen der Nutzer hoch. Bei der notwendigen Optimierung der Anlagen im laufenden Betrieb hängt viel von der gewählten Kommunikationsstrategie ab. Der in Großbritannien entwickelte „Softlandings"-Prozess ist hierfür ein interessanter Ansatz.

Befragungen in zur Sanierung anstehenden oder bereits sanierten Schulen zeigen, dass die Erwartungen an das Bauwerk und die neue Lüftungstechnik sehr hoch sind [1, 2]. Die Erwartungshaltung der Nutzer ist immer auch ein Ergebnis früherer Erfahrungen im alten Gebäude. So liegt zum Beispiel der Schwerpunkt der Erwartungen eher in Themenbereichen, die im alten Gebäude nicht so gut bewertet wurden. Außerdem sind die Erwartungen ein Spiegel des gesellschaftlichen Wissensstands und der im Vorfeld einer Planung gesetzten Maßstäbe (Abb. 21). Jede Modernisierung und jeder Neubau muss sich dann an diesen Maßstäben messen lassen. Es ist also wichtig, realistische Erwartungen zu wecken.

In Österreich wurden maschinelle Lüftungssysteme untersucht [2]. 40 % der ca. 270 befragten Schüler bewerteten die Anlagen auf einer 5-stufigen Noten-Skala mit 1 und 2, aber ein Viertel mit 4 und 5. Von rund 130 befragten Lehrern äußerten sich 56 % dagegen eher oder sehr zufrieden. Die Hälfte der Lehrer stufte die Lüftungssysteme als bedienfreundlich ein. Als Ursachen für die nicht durchgängig positive Bewertung wurden die in Abb. 21 aufgeführten Gründe angeführt. Am häufigsten wurden Luftqualitätsprobleme, Überhitzung oder zu geringe Wärmeversorgung genannt.

Aus den beiden o. g. Untersuchungen in Österreich und in Deutschland lassen sich Verbesserungspotenziale ableiten. Obwohl die Messungen der CO_2-Konzentration eine erhebliche Verbesserung der Luftqualität im Vergleich zum Gebäudebestand belegen, wird in einigen Schulen mit Lüftungstechnik die Luftqualität als nicht ausreichend empfunden. Messergebnisse zeigen, dass in manchen Klassenzimmern die Temperatur im Winter recht hoch ist. Die Luft wird bei einer höheren Temperatur in der Regel als weniger frisch empfunden. Schritte zur Absenkung der Temperatur in diesen Räumen wurden bereits unternommen. Des Weiteren sollte ein konsequentes (Leer-) Lüften der Räume nach der Nutzung erfolgen, um Gerüche sofort abzuführen (Abb. 12, S. 12). Ein zusätzliches Vorspülen am Morgen bei Temperaturen am unteren Ende des Behaglichkeitsbereichs hilft, dass Nutzer beim Betreten des Raumes die Luft als frisch wahrnehmen.

In Österreich hatten nur ca. ein Drittel der Lehrer die Möglichkeit, den Volumenstrom des Lüftungssystems zu beeinflussen. Die Temperatur konnte nicht angepasst werden. Grundsätzlich ist eine Einflussnahme über die Technik auf das Raumklima aber gewünscht (s. Infobox, S. 11). Dabei wird Bedienfreundlichkeit erwartet (Abb. 11). Ein interessantes Ergebnis der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung im Rahmen von EnEff-Schule ist, dass ein hoher Automationsgrad einem energiebewussten Verhalten der Schüler an einer Schule entgegenwirkt.

Kommunikationsstrategie

Neue, bisher in Schulen nicht übliche Technik muss erst den Weg in die Alltagsanwendung finden. Wichtig für die Akzeptanz von Technik ist eine umfassende Kenntnis der Funktion bei den Nutzern. Vom Planungsbeginn bis über die Inbetriebnahme hinaus müssen Lehrer, Schüler und Hausmeister im Rahmen einer intensiven Kommunikationsstrategie in die Entscheidungsprozesse eingebunden sein (s. Beispiel Lindau, S. 19). Dies vermeidet Missverständnisse, minimiert falsche Erwartungen und ermöglicht echte Teilhabe.

Wenn an einer Schule Lüftungssysteme und Gebäudeautomation implementiert werden sollen, dann ist eine regelmäßige Betreuung, Pflege und Überwachung der automatisierten Funktionen erforderlich. Dies stellt den traditionellen „Hausmeister" einer Schule vor völlig neue Herausforderungen. Es ist daher bereits vor Einführung zu klären, welche Personen für den Betrieb zuständig sein werden und ob diese zur Betreuung der Gebäudeautomation bzw. der Lüftungseinrichtungen ausreichend aus- oder weitergebildet sind.

Die Lehrer benötigen Informationen zum richtigen Lüftungsverhalten und Umgang mit Problemen beim Betrieb des Lüftungssystems. Jeder neue Lehrer sollte bei Arbeitsantritt in die Anlage eingewiesen werden. Den Hausmeistern sollte die neue Technik und ihre Bedienung am besten persönlich erläutert werden. Dazu muss

die Schule auch über das entsprechende Informationsmaterial verfügen, z. B. die Bedienungsanleitungen der Lüftungssysteme.

Fehlende Information und Kommunikation verursachen Akzeptanzprobleme und führen, insbesondere bei Störungen der Anlage in der Einführungsphase, zu falschen Reaktionen und verunsichern. Eine der Folgen sind unzufriedene Nutzer. Werden Lehrer und vor allem auch die Schüler frühzeitig eingebunden, dann können sie die Schule besser als „ihre“ Schule annehmen.

Softlandings for Schools

In Großbritannien wurde ein Prozess entwickelt, genannt „Softlandings“, um die Implementierung von baulichen und technischen Maßnahmen an nachhaltigen Gebäuden, speziell neuen oder sanierten Schulen, zu unterstützen (Abb. 22). Vorrangiges Ziel ist es, durch den „Softlandings“ -Prozess einen Kulturwandel bei Planung, Erstellung, Übergabe und Betreiben eines Gebäudes zu erzeugen. Dies soll die Langzeiteffizienz der Gebäude und die Nutzerzufriedenheit erhöhen. Außerdem fördert der Prozess ein höheres Verantwortungsbewusstsein bei den Planern und Technikern für eine geordnete Übergabe an die Nutzer und die Inbetriebnahme. Die in diesem britischen Projekt an Schulen gesammelten Erfahrungen bestätigen die Ergebnisse, die im Rahmen des deutschen Forschungsprogramms SolarBau: Monitor an Demonstrationsprojekten im Verwaltungsbau erzielt wurden.

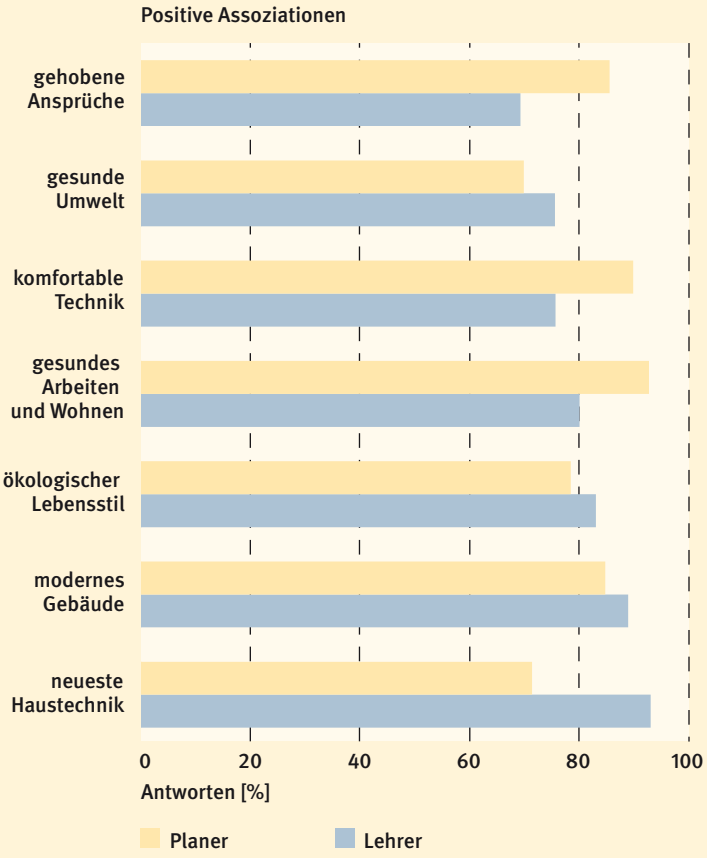


Abb. 20 *Assoziationen von Lehrern (128) und Planern bzw. Bauherrenvertretern (31) mit maschinellen Lüftungssystemen in Österreich*
Quelle: Greml u. a.

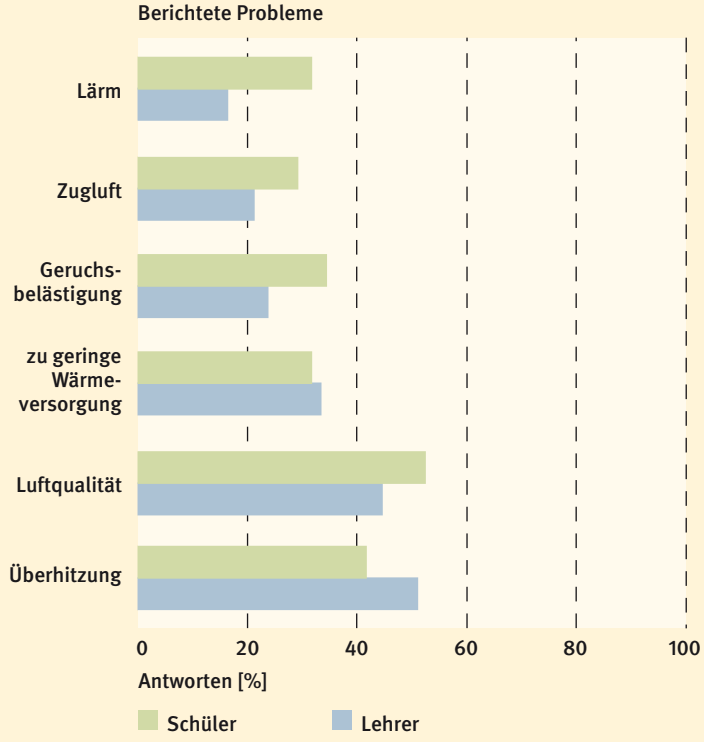


Abb. 21 *Von Schülern (268) und Lehrern (128) berichtete Probleme, die mit der Nutzung maschineller Lüftungssysteme (16) in Verbindung gebracht wurden (Österreich)*
Quelle: Greml u. a.

[1] Reiß, J.; Erhorn, H.; Geiger, M. u. a.: Energieeffiziente Schulen – EnEff Schule. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl., 2013. 358 S, ISBN 978-3-8167-9034-1

[2] Greml, A.; Blümel, E.; Gössler, A. u. a.: Evaluierung von mechanischen Klassenzimmerlüftungen in Österreich und Erstellung eines Planungsleitfadens. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien (Österreich) (Hrsg.). 2008. Berichte aus Energie- und Umweltforschung. 14/2008

Softlandings – Fünf Schritte für eine weiche Landung

Phase 1: Information und Einweisung	• *Prozess und Verantwortlichkeiten (er)klären* • *Einbeziehung der Parteien, die nicht im direkten Kontakt mit den Planern stehen, wie Lehrerschaft, für Gebäudebetrieb, -erhalt und -wartung Verantwortliche, Hausmeister* • *Prozess der Übergabe und Inbetriebnahme festlegen*
Phase 2: Entwurf und Umsetzung	• *Frühere Nutzererfahrungen und Prioritäten der Nutzer beschreiben* • *Technischen Erfahrungsstand der Nutzer berücksichtigen* • *Auf Entwurfsziele und -eigenschaften sowie Zielkennwerte (Lüftung, Energie) einigen* • *Realistische Erwartungen bei den Nutzern wecken* • *Zu erwartendendes Betriebsverhalten und Benutzerfreundlichkeit der technischen Ausstattung prüfen* • *Den Nutzern von Erfahrungen aus früheren Projekten berichten* • *Ausschreibungsergebnisse im Hinblick auf mit den Nutzern festgelegte Anforderungen prüfen*
Phase 3: Vorbereitung der Gebäudeübergabe	• *Vorbereitung des Start des Gebäudebetriebes mit Unterstützung der Planer und Ausführenden* • *Zielgemäße Ausführung überprüfen* • *Nutzer-Dokumentationen und -informationen bereitstellen* • *Für Gebäudebetrieb, -erhalt und -wartung Verantwortliche sowie Hausmeister lernen technische Systeme kennen* • *Information, Informationsmaterial und Vorführen der Nutzerschnittstellen (Gebäudebetreiber, Lehrer) trägt zur erfolgreichen Nutzereinbindung bei*
Phase 4: Initiale Inbetriebnahme	• *Dient als erweiterter Übergabeprozess* • *Feedback der Nutzer einholen und darauf reagieren* • *Mehr Nutzereinweisung wo notwendig* • *Auf Nutzeranforderungen eingehen, z. B. Sollwerte, Bedienfunktionen anpassen* • *Raum für Inbetriebnahmeteam bereitstellen* • *Sichtbarkeit und Erreichbarkeit des Inbetriebnahmeteams herstellen*
Phase 5: Nachbetreuung	• *Professionelle Nachbetreuung für Fehlerbehebung, Feinabstimmung, verbesserten Gebäudebetrieb und Reduzierung des Verbrauchs* • *Gebäudebetriebsverhalten mit Entwurfszielen vergleichen* • *Feedback der Nutzer an Planer und Ausführende* • *Dauer der Nachbetreuung 1 bis 3 Jahre* • *Professionelle Nutzerbefragung*

Abb. 22 *Die fünf Schritte des britischen Konzepts*
Quelle: Nach „the Soft Landings Framework“, www.softlandings.org.uk, Darstellung Hellwig

Aus der Praxis

Realschule Lindau

Beim Neubau der Realschule Lindau 2008 wurde auf die geplante Lüftungsanlage in den Klassenräumen mit Ausnahme der Fachräume verzichtet. Nach Problemen mit der Luftqualität und den sommerlichen Raumtemperaturen beauftragte der Schulträger ein Ingenieurbüro in Lindau, nachträglich Lüftungstechnik ins fertige Gebäude zu integrieren.

Die Planer entwickelten einen Kompromiss für die unterschiedlichen Anforderungen: eine ausreichende Luftmenge, eine akzeptable und prüfungstaugliche Akustik, ein begrenzter Installationsaufwand und ein ästhetischer Gesamteindruck. Gewählt wurde ein dezentrales Deckenlüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung mit bis zu 600 m³/h bei bis zu 30 Schülern im Raum. Jedes Gerät besitzt eine Bedarfsführung durch CO_2-Messung.

Dass die Planer vor der Wahl eines Gerätetyps verschiedene Geräte von Lehrern und Schülern testen ließen, ist bisher eher ungewöhnlich. Die Einbeziehung der Nutzer in den Auswahlprozess ist besonders positiv zu bewerten und hat zum Großteil zu der sehr großen Akzeptanz der Lüftungsgeräte an der Schule beigetragen. Bei den Tests wurden Befragungen und sogenannte Überkreuz-Tests durchgeführt. Bei diesem Test wechselten Klassen zwischen Räumen mit unterschiedlichen Lüftungsgeräten. Bei der Auswertung stimmt die subjektive Beurteilung nicht immer mit der nach Messwerten überein. Dies zeigte das Thema Akustik: Die etwas „lautere" Anlage schnitt in der subjektiven Bewertung besser ab, als es nach den in der Klassenmitte gemessenen Werten zu erwarten war.

Abb. 23 *Deckengerät an der Realschule Lindau. Quelle: Ing. Büro Ruess & Grömmer*

Standpunkte

„Lüftungsanlagen in Schulen – Luxus oder Notwendigkeit?"

Prof. Dirk Müller
Institutsleiter am E.ON Energy Research Center Institut für Energy Efficient Buildings and Indoor Climate (ECB) der RWTH Aachen. Das Thema Lüftung gehört zu seinen Schwerpunkten.

Das Öffnen der Fenster kann an einem ruhigen Schulstandort für die Lüftung eines Schulraums eingesetzt werden. Der Außenluftvolumenstrom, der durch Fensteröffnungen einströmt, wird dabei durch die Fensterstellung, die Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Außenluft sowie der windinduzierten Druckverteilung am Gebäude beeinflusst. Eine konstante Versorgung des Schulraums mit Außenluft verlangt nach einer ständigen Regelung der Fensterstellung, die alle genannten Einflüsse berücksichtigt. Außerdem können bei sehr niedrigen Außentemperaturen erhebliche Behaglichkeitsdefizite durch Zug und niedrige Temperaturen im Bodenbereich eintreten, die ein konzentriertes Arbeiten verhindern. Eine alternative Stoßlüftung in den Pausen ist für eine gute Luftqualität für eine ganze Schulstunde ebenfalls nicht ausreichend, da die Konzentrationen flüchtiger organischer Verbindungen nach einer Lüftungsphase schnell wieder ansteigen. Daher empfiehlt sich in Unterrichtsräumen eine maschinelle Lüftung, die durch eine Fensterlüftung ergänzt werden kann. Eine integrierte Wärmerückgewinnung erhöht zusätzlich die Energieeffizienz.
Natürlich können sich Lernende und Lehrende auch einfach an die schlechte Luftqualität gewöhnen. Studien haben jedoch gezeigt, dass auch im Falle einer Adaption an die schlechte Luftqualität, deren negative Einflüsse auf die Leistungsfähigkeit erhalten bleiben. Daher ist die Lüftung in Schulen sicherlich kein Luxus, sondern eine Notwendigkeit!

Johanna Tenge
Förderschullehrerin und Stellvertretende Schulleiterin an der Heinrich-Hanselmann-Schule. An dieser Schule des Rhein-Sieg-Kreises werden Schülerinnen und Schüler mit dem Förderschwerpunkt Geistige Entwicklung ganztags unterrichtet.

An unserer Schule ergänzt ein Schulneubau in Passivhausstandard einen vorhandenen „Altbau", der Ende der 1990er Jahre gebaut wurde. Bezüglich des Raumklimas ist der Unterschied zwischen den Trakten erheblich. In den Klassenräumen des Altbaus ist die Luft sehr schnell verbraucht. Das Öffnen der Fenster zum Lüften – im Sommer bei heruntergelassenen Jalousien – bringt aber nur kurzfristige Verbesserung. Ein weiterer Nachteil ist der höhere Geräuschpegel in der Klasse durch Aktivitäten, die sich vor dem Fenster abspielen. Dies erschwert es den Schülerinnen und Schülern, sich auf den Unterricht zu konzentrieren. Außerdem verringern die nach innen geöffneten Fenster den Bewegungsspielraum in den Räumen. Weit geöffnete Fenster im ersten Stock erfordern darüber hinaus eine besonders aufmerksame Beaufsichtigung der Schüler.
Im Neubau in Passivhausstandard hilft das morgendliche Stoßlüften, frische, kühle Luft in den Klassenraum zu führen. Dann heißt es bei warmem Wetter allerdings: Die Türen nach draußen auf den Pausenhof müssen geschlossen bleiben. Dies ist im Alltag schon mal schwierig, wenn sonniges Wetter lockt und der Außenbereich vor der Klasse genutzt werden soll. Hält man sich aber daran, bleibt der Klassenraum angenehm temperiert und gut nutzbar. Wichtig ist, dass zusätzlich ein Schutz gegen direkte Sonneneinstrahlung auf die Fensterflächen vorhanden ist (Jalousien, Markisen). Im Vergleich schneidet die Belüftung im Passivhausstandard auf jeden Fall besser ab als die im Altbau.

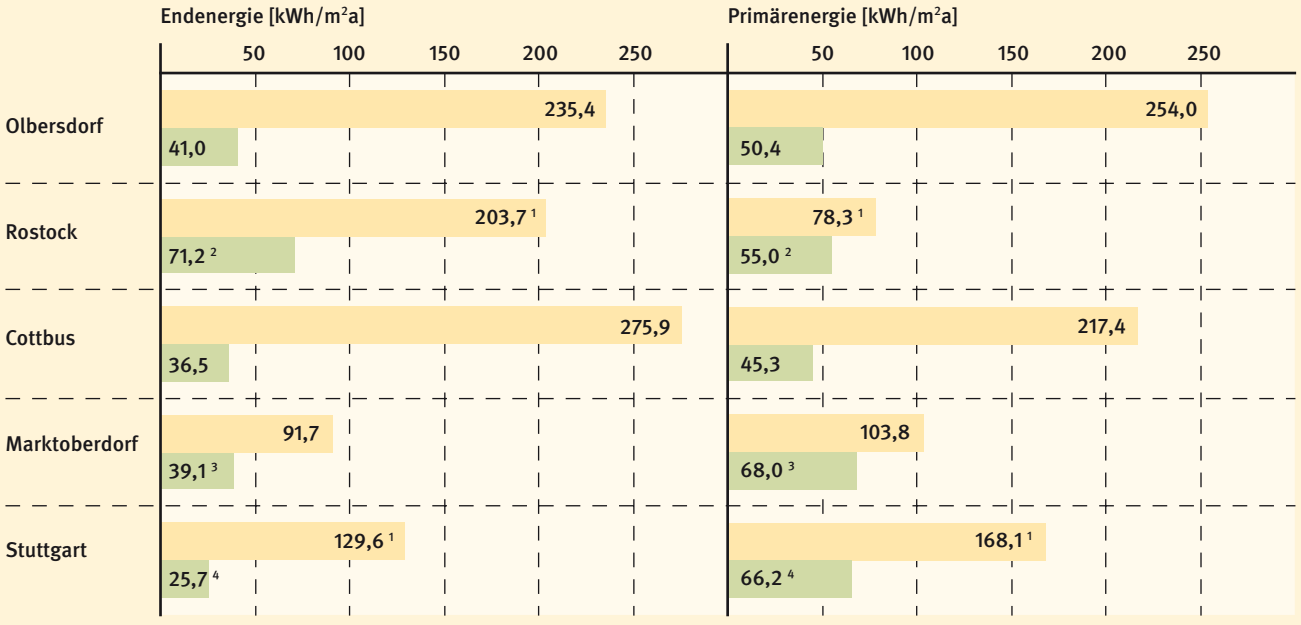
Lüftung und Energie

Die Lüftung beeinflusst die Energiebilanz von Schulen wesentlich. Deshalb müssen Lüftungssysteme sehr sorgfältig in Energiekonzepte für Schulen integriert werden. Ein zentrales Thema ist der sommerliche Wärmeschutz. Für eine effiziente Stromnutzung ist es erforderlich, regelmäßig den laufenden Betrieb der Lüftungs- und Versorgungssysteme zu kontrollieren.

Basis jeden energieeffizienten Gebäudes ist eine Hülle mit gut gedämmten Außenwänden, Dächern und Bodenplatten sowie hochwertigen Fenstersystemen. Heute liegen die Herausforderungen in der Integration der bekannten passiven und aktiven Technologien in optimiert funktionierende Gebäude-Systeme und der Implementierung solcher Systeme im Gebäudebestand. Weiterhin müssen die Anlagen energiesparend betrieben werden und eine erfolgreiche Interaktion der Nutzer mit ihrem Gebäude hinzukommen. Viele Schulen verfügen mittlerweile über eigene Anlagen zur solaren Stromerzeugung. Die Werte vor und nach der Modernisierung für den End- und Primärenergiebedarf von Demonstrationsprojekten im Forschungskonzept EnEff-Schule zeigt Abb. 24.

Wie aus Abb. 29 auf Seite 23 zu ersehen ist, kann der Anteil des Stromes am Endenergieverbrauch dominieren, je nach technischem Konzept für Beheizen und Lüften.

Abb. 24 *Energieverbräuche der Demonstrationsprojekte in EnEff-Schule vor und nach der energetischen Modernisierung*
Quelle: Fraunhofer IBP



[1] *Verbrauchswerte, da keine Bedarfswerte vorliegen*
[2] *ohne Berücksichtigung der Energieeinträge durch PV, Windkraft, ORC*
[3] *ohne Berücksichtigung der Energieeinträge durch PV und BHKW*
[4] *ohne Berücksichtigung der Energieeinträge durch PV*

Abb. 25 *Fenster mit außenliegendem Sonnenschutz, der hinterlüftet werden kann. Quelle: C. Moosmann*

Abb. 26 *Tageslichtsituation im Raum bei außenliegendem Sonnenschutz l.) Vollständig geschlossener Sonnenschutz m.) Unterer Behang geschlossen, oberer Behang mit Tageslichtlenkung r.) Lamellen in Horizontalstellung. Quelle: S. Winterwerber, KIT*

Ein großes Einsparpotenzial an Schulen liegt im Reduzieren von Stand-by-Verbräuchen und im Abschalten von aktuell nicht benötigten, aber durchlaufenden Systemen. Eine Analyse von Lastverläufen [1] an Schulen zeigt konstante „Grundlast"-Verbräuche an Schulen (Abb. 28). Diese Verbräuche treten an Wochenenden und in den Ferien auf, wenn bis auf wenige Räume in der Verwaltung die Schule nicht in Betrieb zu sein bräuchte. Sie können 20 bis 50 % des Stromverbrauchs verursachen. Es wurden je Schüler häufig Grundlasten von 10 bis 20 W/Schüler gefunden, die sich über ein Jahr häufig zu 150 bis 300 kWh/Schüler kumulieren. Durchgehende Verbraucher sollten generell identifiziert und die Notwendigkeit deren Betriebes überprüft werden. Grundlasten von unter 5 W/Schüler sind möglich und anzustreben. Untersuchungen in Österreich und Deutschland zeigen beispielsweise, dass Lüftungsanlagen in den Ferien und am Wochenende nicht abgeschaltet werden. Manche Anlagen werden ganzjährig durchlaufend betrieben.

Wissenschaftler haben an der Gebhard-Müller Schule in Biberach, einem Demonstrationsprojekt der Energieforschung, über mehrere Jahre eine Betriebsoptimierung durchgeführt [2]. Dabei konnten im Betrieb beträchtliche Einsparpotenziale genutzt werden. Der Trend eines Verbrauchsanstieges im Langzeitbetrieb wurde an dieser Schule zwar auch beobachtet, aber durch Coaching des Betriebspersonals konnte ihm wirksam entgegengewirkt werden.

Da heute in den meisten Schulen Gebäudeautomation im Einsatz ist, sollten deren Möglichkeiten auch genutzt werden, alle Strom- und Wärmeverbrauchsstellen regelmäßig zu überprüfen, um anschließend unnötige Verbräuche abzustellen.

Sommerlicher Wärmeschutz

Aufgrund der hohen internen Lasten in Klassenräumen spielt ein exzellenter sommerlicher Wärmeschutz in Schulen eine große Rolle. Eine Datenerhebung der Hochschule Augsburg [3] an 96 energetisch modernisierten Schulen in einem süddeutschen Regierungsbezirk zeigt, dass es sich bei den eingesetzten Sonnenschutzmaßnahmen in fast allen Fällen um außenliegenden Sonnenschutz handelt. Gegenüber der Situation noch vor wenigen Jahren hat sich hier die Planungspraxis wesentlich verbessert.

Sonnenschutzregelung

Viele Untersuchungen zeigen, dass Nutzer den Sonnenschutz selten vollständig schließen, weil dies den Ausblick nach draußen behindert. Dazu ein Praxisbeispiel von einer Schule. Hier fanden die Lehrer anfangs den Sonnenschutz in den ost-orientierten Klassenräumen beim morgendlichen Betreten des Raumes immer vollständig geschlossen vor (Abb. 26 l.). Um Tageslicht zu bekommen, fuhren die Lehrer den Sonnenschutz in den Räumen hoch. Dabei hätte das Sonnenschutzsystem auch die Möglichkeit geboten, eine Situation wie in Abb. 26 m. herzustellen und den Sonnenschutz inklusive Lichtlenkfunktion einzustellen. Ob diese Möglichkeit an der Schule bekannt war, ist nicht dokumentiert. Die Lösung war dann die Situation wie in Abb. 26 r. gezeigt. Eine horizontale Lamellenstellung im unteren Behang wurde an der Schule umgesetzt (Ostorientierung!). Um ein Hochfahren des Sonnenschutzes am Morgen durch die Lehrer zu verhindern, wurde der Sonnenschutz nun in Horizontalstellung heruntergefahren.

Nach einer Begehung mit Studenten wurde die installierende Firma gefragt, warum sie genau diese horizontale Einstellung vorgenommen hatte. Im Gespräch stellte sich heraus, dass die Möglichkeit, die Lamellen in 45°-Stellung herunterzufahren, einfach nicht in Betracht gezogen wurde. Das hätte auch den gewünschten Ausblick nach draußen geboten. Das Beispiel zeigt, dass beim Einsatz von Gebäudetechnik Fachfirmen, Betreibern und Nutzern alle Möglichkeiten der Technik bekannt sein müssen. Den meisten Betrachtern von Abbildung 26 wird spontan auch die Lösung r. am besten zusagen. Mit mehr Wissen um die Wirkungsweise könnte auch Lösung m. akzeptiert werden, denn in dieser Lamellenstellung wird Tageslicht an die Decke und von dort in den Raum gelenkt, ohne ihn durch direkte Sonnenstrahlung zu erwärmen.

Forschungsvorhaben Energieeffiziete Schule – www.eneff-schule.de

Das Forschungsvorhaben „Energieeffiziente Schule (EnEff:Schule)“ verfolgt das Ziel, sämtliche Aktivitäten auf dem Gebiet der effizienten Schulsanierung zusammenzuführen und darzustellen. Es ist ein zentraler Bestandteil des Förderkonzepts „Energieoptimiertes Bauen (EnOB)“ und wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert.

Ein Schwerpunkt ist die wissenschaftliche Begleitung der im Rahmen von EnEff:Schule durchgeführten Demonstrationsprojekte. Die Vorhaben zeigen auf, welche verschiedenen Möglichkeiten es gibt, den Primärenergiebedarf für die Beheizung, Lüftung, Beleuchtung und Kühlung drastisch zu senken.

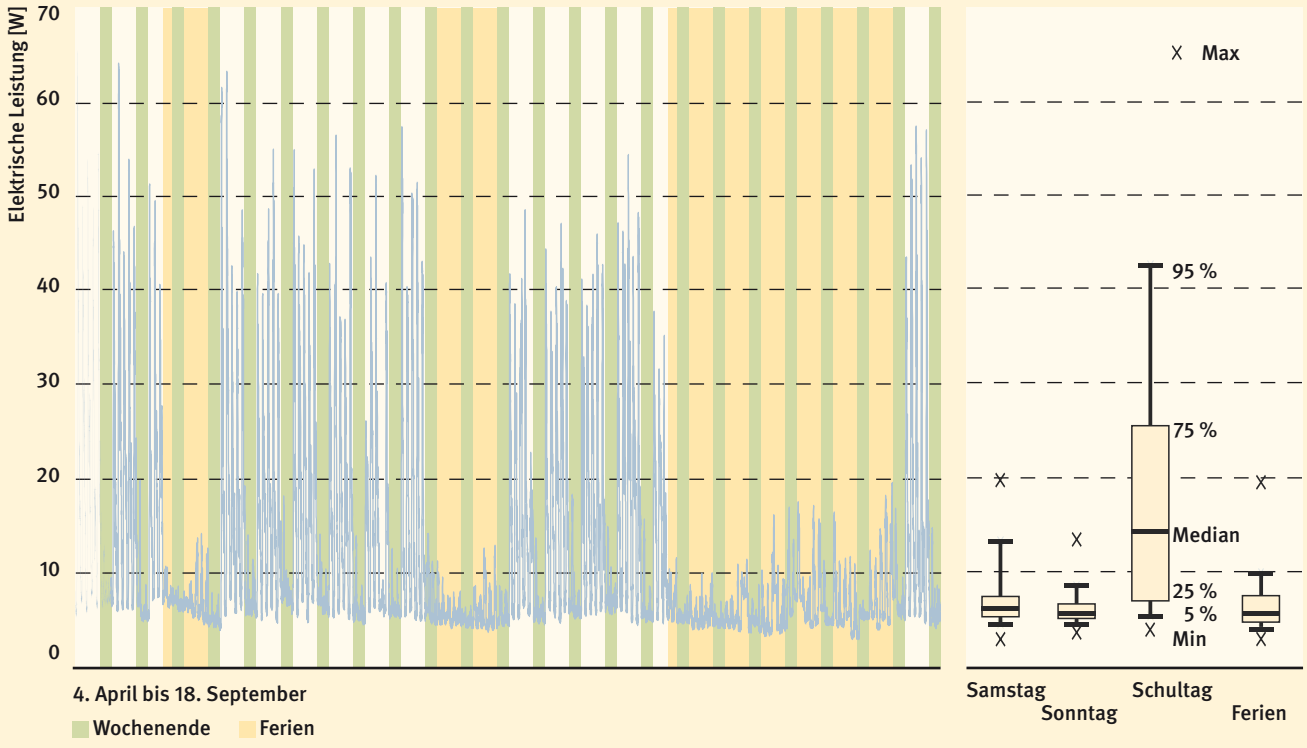
Die sanierten Schulgebäude sollen unterschiedliche energetische Niveaus erreichen. Neben Plus-Energieschulen, die in der Jahresbilanz mehr Energie erzeugen als sie verbrauchen, gibt es im Forschungskonzept auch 3-Liter-Haus-Schulen. Darüber hinaus sind auch andere richtungsweisende Sanierungen von Schulgebäuden aufgenommen, die sogenannten „Best Practice Examples“.

Das Besondere bei der Sanierung von Schulen ist die Möglichkeit, Schüler in den Sanierungsprozess einzubinden.

Abb. 27 *Im Demonstrationsprojekt Hohen Neuendorf kommt natürliche und mechanische Belüftung zum Einsatz. Quelle: Ali Moshiri*

Es bietet sich so die Chance einer enormen Wissensmultiplikation. Die sozialwissenschaftliche Begleitforschung in EnEff:Schule verfolgt das Ziel, die Wirkungen der Schulprojekte auf das Nutzerverhalten und die Einstellung der Nutzer – in diesem Fall der Lehrer, Schüler, Hausmeister sowie der Eltern – zu untersuchen.

Abb. 28 *links: Beispiel für einen Lastgang an einer Schule mit ca. 1.100 Schülern; erkennbare Grundlast zwischen 5 und 7 kW*
rechts: Verteilung der Lasten bei unterschiedlichen Nutzungsprofilen; Wochenende, Ferien: Basislast (Minimalwert bis 75 %), 3 – 8 kW (2 – 6 W/Schüler) und Spitzenlast (95 % bis Maximalwert), 10 – 20 kW (8 – 15 W/Schüler) Schultag: Basislast (Minimalwert bis 75 %), 4 – 26 kW (3 – 20 W/Schüler) und Spitzenlast (95 % bis Maximalwert) 43 – 65 kW (35 – 50 W/Schüler)
Daten: Consiste 2012, Darstellung: Hellwig



Eine aus dem Wohnungsbau übernommene fälschliche Annahme ist, dass geschlossene Fenster in Schulen im Sommer vor Überhitzung schützen. Im Gegenteil: Ein ständiges Abführen der thermischen Lasten der 25 bis 30 Schüler von ca. 2,3 bis 2,7 kW muss auch im Sommer durch Lüften erfolgen und hilft, die Maximaltemperaturen zu begrenzen. Bei einem sehr guten außenliegenden Sonnenschutz, der mit ausreichendem Abstand vor den Fenstern montiert wurde, ist bei entsprechend ruhiger Außenumgebung eine freie Lüftung durchaus möglich (Abb. 25). Außerdem muss die Fassade ein großzügiges Öffnen der Fenster ermöglichen. Um den Aufenthaltsbereich im Klassenraum nicht einzuschränken, sollten die Öffnungsflügel nicht sehr breit sein. Aus diversen Gründen (Sicherheit, reduzierter Überwachungsaufwand zum Schließen der Fenster) sind an vielen Schulen leider potenziell öffenbare Fenster dauerhaft verschlossen oder nur kippbar.

Die am Tag in den Klassenraum eingetragene Wärme muss auch wieder aus dem Klassenraum abgeführt werden. Dazu sollte der Raum im Sommer über Nacht planmäßig belüftet werden. Lüftungsanlagen oder -geräte können unter Umgehung des Wärmetauschers auch zur Nachtlüftung eingesetzt werden. Nachtlüftungskonzepte, die freie Lüftung über die Fassade nutzen, sind zwar sehr wünschenswert und funktionieren, scheitern aber in der Praxis oft an Sicherheits- und Witterungsschutzaspekten. In alten Schulgebäuden mit historischen Schachtlüftungssystemen (s. En passant, S. 13) können diese bei der energetischen Modernisierung in ein solches Nachtlüftungskonzept ideal integriert werden.

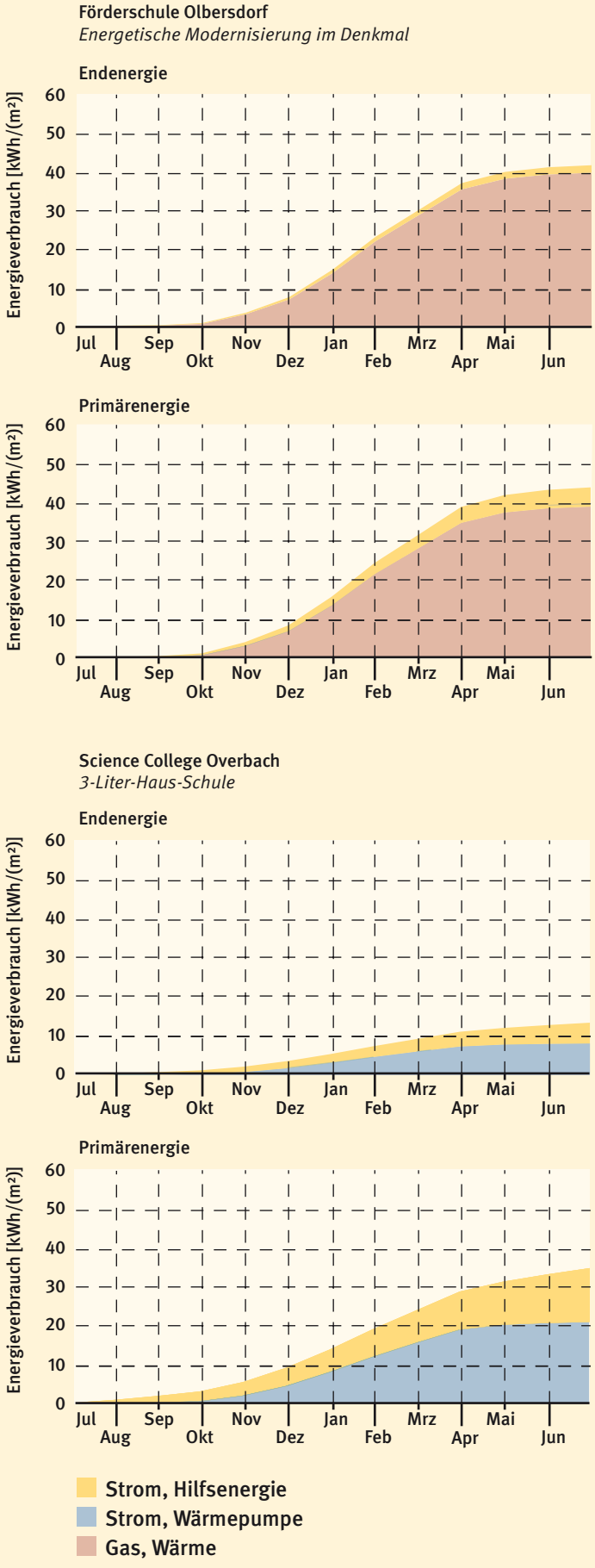


Abb. 29 *Kumulierter End- und Primärenergieverbrauch: Oben: Förderschule Olbersdorf, unten: Science College Overbach im Jahr 2012/13. Daten: www.eneff-schule.de, Fraunhofer IBP, Darstellung: Hellwig*

[1] Rath, U.: Analyse von Lastganglinien an Schulen. Phase I. CONSISTE Consulting für intelligenten Stromeinsatz, Tübingen (Hrsg.). 2012

[2] Heinrich, S.; Königsdorff, R: Wissenschaftliche Begleitung und messtechnische Evaluierung des Neubaus der Gebhard-Müller-Schule des Kreisberufsschulzentrums Biberach. Abschlussbericht. Ein Vorhaben im Förderprogramm „Solaroptimiertes Bauen“, Teilkonzept 3: Solar optimierte Gebäude mit minimalem Energiebedarf. FKZ 0335007P. 2008. 114 S. Wissenschaft / Praxis. 152

[3] Hackl und Hellwig 2014

Auswahl des richtigen Lüftungssystems

Die Entscheidung für ein bestimmtes Lüftungskonzept bzw. –system hängt von vielen Faktoren ab. Der Standort bestimmt, ob eine Fensterlüftung überhaupt infrage kommt, wenn z. B. eine laute Straße an der Schule vorbeiführt. Bestehende Schulgebäude lassen wegen der unveränderlichen örtlichen Gegebenheiten nicht jedes denkbare Lüftungskonzept zu. Selbstverständlich beeinflussen auch Investitions- selten noch die Betriebskosten sowie der Wartungsaufwand die Entscheidung für ein bestimmtes Lüftungssystem. Innovative Technologien sollten auf ihre Eignung für ein Projekt geprüft werden.

Welches Lüftungssystem für eine Schule geeignet ist, hängt nicht nur von der rein technischen Bewertung der Situation ab. Bestehen Vorbehalte der Nutzer gegen ein bestimmtes Lüftungssystem, so ist es nicht ratsam, dieses wegen seiner rein technischen Vorteile zu installieren. Die Nutzer werden ein solches System nicht einsetzen. Ein frühzeitiges Einbinden von Lehrern und Schülern in den Planungsprozess wirkt sich deshalb positiv auf die erfolgreiche Implementierung von Lüftungstechnik aus.

Lüftungssysteme erfordern eine kontinuierliche Betreuung im Betrieb. Das schließt nicht nur Wartungs- oder Reparaturarbeiten mit ein. Im Verlauf der Inbetriebnahme sind nicht nur die Anlagenparameter zu prüfen und zu optimieren, sondern auch die Nutzer in die Bedienung der Lüftungssysteme einzuführen. Egal ob es sich um maschinelle oder freie Lüftung handelt: die Nutzer einer Schule, Schüler und Lehrer, müssen verstehen und wissen, wie die Lüftungssysteme zu bedienen sind und welche Betriebsweisen zu dem von ihnen gewünschten Effekt führen. Dazu ist eine kompetente, mit der Anlage vertraute Person erforderlich, welche die Anlage durchgehend betreuen kann und die das Vertrauen der Nutzer genießt.

Links und Literatur

- wwww.eneff-schule.de ›› www.enob.info ›› www.dena.de
- www.dbu.de ›› www.fgk.de
- Umweltbundesamt, Berlin. Innenraumlufthygiene-Kommission (Hrsg.): Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden. 2008
- Bekanntmachung des Umweltbundesamtes: Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden. Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. In: Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz. Jg. 51 (2008), S. 1358 – 1369
- Fachverband Gebäude-Klima e.V., Bietigheim-Bissingen (Hrsg.): Lüftung von Schulen. Raumluftqualität, Leistungsfähigkeit, Systeme. 2004. FGK Status-Report 22
- Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Stuttgart (Hrsg.): Besseres Lernen in energieeffizienten Schulen. Leitfaden. 2010. 19 S., ISBN 978-3-8167-8276-6 https://www.baufachinformation.de/buch/233633
- Steiger, S.; Hellwig, R. T.: Hybride Lüftungssysteme für Schulen. Abschlussbericht. FKZ 0327387A. 2011
- Die erweiterte Zusammenstellung (inkl. Bezugsquellen) aller in diesem Themeninfo zitierten Literatur finden Sie unter www.bine.info

Mehr vom BINE Informationsdienst

- Frische Luft im Schulneubau. BINE-Projektinfo 16/2014
- Hybride Lüftung verbessert Raumklima in Schulen. BINE-Projektinfo 15/2010
- Dieses Themeninfo gibt es auch online und in englischer Sprache unter www.bine.info/Themeninfo_I_2015

BINE Informationsdienst berichtet aus Projekten der Energieforschung in seinen Broschürenreihen und dem Newsletter. Diese erhalten Sie im kostenlosen Abonnement unter www.bine.info/abo

Impressum

Projektorganisation
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)
11019 Berlin

Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich

Förderkennzeichen
00327430M
0327430H
0327387A-D
0335007P

ISSN
1610-8302

Herausgeber
FIZ Karlsruhe · Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur GmbH
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Kontakt · Info

Fragen zu diesem Themeninfo?
Wir helfen Ihnen weiter:

0228 92379-44
kontakt@bine.info

BINE Informationsdienst
Energieforschung für die Praxis
Ein Service von FIZ Karlsruhe

Kaiserstraße 185-197
53113 Bonn
www.bine.info

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Konzept: iserundschmidt GmbH, Bonn · Satz und Gestaltung: KERSTIN CONRADI Mediengestaltung, Berlin