

Untersuchungen zum Raumklima und zur Fensterlüftung in Schulen

von

Dr.-Ing. Runa Tabea Hellwig

M. Eng. Florian Antretter

Dr.-Ing. Andreas Holm

Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer

Fraunhofer-Institut für Bauphysik

(Leitung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer)

Postfach 80 04 69 – 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12 – 70569 Stuttgart

Institutsteil Holzkirchen

Postfach 11 52 – 83601 Holzkirchen

Fraunhoferstraße 10 – 83626 Valley

Untersuchungen zum Raumklima und zur Fensterlüftung in Schulen

Es gibt mehr als 40.000 Schulgebäude in Deutschland, von denen die meisten noch auf eine Sanierung warten. Sanierungen sollen nicht nur dazu dienen, den energetischen Standard der Gebäude zu verbessern, sondern sollten in erster Linie dazu genutzt werden, die raumklimatischen Bedingungen in den Klassenräumen für Schüler und Lehrer zu verbessern. Da die meisten deutschen Schulgebäude nicht mit Raumlüftungstechnischen Anlagen ausgestattet sind, werden die Räume durch freie Fensterlüftung, betätigt durch die Lehrer und Schüler, belüftet. Daher ist das Fensteröffnungsverhalten der Nutzer von Interesse. Der Einfluss des Fensteröffnungsverhaltens der Nutzer auf die raumklimatischen Bedingungen in den Klassenräumen wurde in zwei Schulen untersucht. Innentemperatur, Kohlendioxidkonzentration sowie die außenklimatischen Bedingungen wurden gemessen. In einer Schule wurde die Fensteröffnungszeit erfasst. Neben hohen Kohlendioxidkonzentrationen besonders während der Heizperiode, sind einige Klassenräume im Winter zu kalt und zu warm im Sommer. Einige Klassenräume haben keinen Sonnenschutz, oder der Sonnenschutz ist unzureichend oder er behindert die Belüftung des dahinterliegenden Raumes. Die Fenster werden zu einem gewissen Grad während des Unterrichts und in den Pausen genutzt. Jedoch werden die Fenster nach dem Unterricht geschlossen und bleiben geschlossen bis zum nächsten Morgen. Es wird keine Nachtlüftung oder Lüftung in den frühen Morgenstunden praktiziert. Signifikante schwache bis moderate Korrelationen zwischen der Fensteröffnungszeit und der Innentemperatur wurden gefunden. Die Korrelation zwischen der Fensteröffnungszeit und der Außentemperatur ist in den meisten Fällen nicht signifikant oder ist nur schwach ausgeprägt.

Investigations on indoor environmental conditions and natural ventilation in school buildings. *There are more than 40,000 school buildings in Germany. Most of them are awaiting retrofitting. Retrofitting is not only intended to improve the energetic standards, but first of all to improve indoor environmental conditions for pupils and teachers. As most of German schools are not equipped with mechanical ventilation systems, natural ventilation controlled by the occupants opening the windows is the main way to maintain healthy and comfortable conditions in the classrooms. For that purpose the influence of window opening behaviour of the occupants on the indoor environment was measured in two German schools. Temperature and carbon dioxide concentration of the indoor air as well as the outdoor climate conditions were measured. In one school the frequency of window opening was recorded. Besides high CO₂-concentrations especially during winter, some of the investigated classrooms are additionally to cold in winter or to hot in summer. Some classrooms do not have a shading device or the shading device is insufficient or it constricts the*

ventilation of the room. Windows are used as controls in some degree during lessons and during the breaks. But windows get closed after lessons and stay closed until next morning. There is no night or early morning ventilation in summer. A significant weak to moderate positive correlation between total open window ratio and indoor temperature has been found. Correlation between total open window ratio and outdoor temperature is not significant in most cases or show a weak correlation coefficient.

1 Einführung

In Deutschland gibt es mehr als 40.000 Schulgebäude. Wegen sinkender Schülerzahlen ist es wahrscheinlicher, dass bestehende Schulgebäude weiter betrieben werden, als dass neue gebaut werden. Sanierungen sollen nicht nur dazu dienen, den energetischen Standard der Gebäude zu verbessern, sondern sollten in erster Linie dazu genutzt werden, die raumklimatischen Bedingungen in den Klassenräumen für Schüler und Lehrer zu verbessern. Bei der Sanierung von Schulgebäuden sind die spezifischen Charakteristika solcher Gebäude zu beachten. Wegen der hohen Personenbelegungsdichte sind die internen Wärmegevinne sehr hoch. Ebenso hoch ist aber auch der erforderliche Luftvolumenstrom, um eine gute Luftqualität sicherzustellen. Die meisten Fassaden von Schulgebäuden besitzen Verglasungsanteile von 50 % und mehr, um eine gute Tageslichtversorgung sicherstellen zu können. Verschattung ist daher ein sehr bedeutsames Thema. Bisher sind die Nutzungsstunden in Deutschlands Schulen eher gering. Dies wird sich jedoch mit der Etablierung von Ganztagschulen in der Zukunft ändern. Die Struktur des Gebäudebestandes einer Schule ist oft sehr heterogen; die einzelnen Gebäudeabschnitte wurden häufig in unterschiedlichen Jahren erstellt. Aufgrund der begrenzten finanziellen Ressourcen der Kommunen sind diese bestrebt, mit einer Sanierung auch die Betriebskosten zu senken oder auf einem konstanten Niveau zu halten. Zu den Betriebskosten zählen die Kosten für Energie, aber auch für die Erhaltung der haustechnischen Anlagen. In der Regel besitzen die Hausmeister von Schulen keine spezielle haustechnische Ausbildung oder haustechnisches Wissen. Daher sollten die haustechnischen Anlagen nicht nur kosteneffizient, sondern auch robust und einfach instand zu halten sein.

Mit der vorliegenden Arbeit sollen die raumklimatischen Konditionen in verschiedenen Klassenräumen in zwei

Schulen untersucht werden. Dabei wird der Fokus auf die herrschenden thermischen Konditionen, die Luftqualität und das Fensteröffnungsverhalten gelegt. Gleichzeitig mit den hier vorgestellten Untersuchungen wurden auch die akustischen Bedingungen in Klassenräumen untersucht, die aber hier nicht dargestellt werden sollen.

2 Derzeitige raumklimatische Situation in deutschen Schulen

Die Kohlendioxidkonzentration der Innenraumluft wird als Indikator für die Luftqualität in Räumen mit einer hohen Personenbelegungsdichte genutzt. Während des Untersuchungs- und Auswertzeitraumes der vorliegenden Untersuchungen postulierte der damalige Leitfaden zur Innenraumlufthygiene für Schulen ein Maximum der CO₂-Konzentration von 1.500 ppm_v. Dieser Wert soll nicht für längere Zeiträume überschritten werden. Die Innentemperaturen sollen sich in einem Bereich von 20 bis 25 °C bewegen [11]. Zum überarbeiteten Leitfaden für Innenraumlufthygiene in Schulen siehe Abschnitt 6.

Die Mehrzahl der Schulen in Deutschland wird ausschließlich über Fenster belüftet. Einige ältere Schulen aus der Zeit um 1900 nutzten Schachtlüftung. Allerdings liegen den Autoren keine Informationen vor, ob diese Systeme noch in Benutzung sind oder nicht. In verschiedenen Querschnittsstudien wurden Kurzeitmessungen in Schulen durchgeführt. *Fromme* et al. [2] untersuchten die CO₂-Konzentration in Klassenräumen in München und im Landkreis München. Die in 92 Klassenräumen gemessene CO₂-Konzentration unter winterlichen Witterungsverhältnissen zeigt Werte für Tagesmediane zwischen 600 und 4.200 ppm_v. 92 % der Tagesmediane überschritten 1.000 ppm_v und 60 % der Tagesmediane überschritten 1.500 ppm_v. Während Messungen unter sommerlichen Konditionen in 76 Klassenräumen überschritten nur 25 % der Tagesmediane (500 bis 1.900 ppm_v) den Wert von 1.000 ppm_v und nur 9 % überschritten einen Wert von 1.500 ppm_v. Vergleichbare Messungen wurden von *Grams* et al. [4] für Klassenräume in Niedersachsen berichtet (Tabelle 1). In 40 Klassenräumen in Berliner Schulen wurden Mittelwerte der CO₂-Konzentrationen zwischen 500 und 4.200 ppm_v gemessen. Der Median aller Einzelwerte ist 1.600 ppm_v [6]. Es liegen keine umfassenden Messwerte für die thermischen Raumklimazustände an deutschen Schulen vor.

Tabelle 1. Anteil von Messungen der Kohlendioxidkonzentrationen über und unter 1.500 ppm_v in Klassenräumen im Sommer und im Winter aus [4], Messung an je einem Tag je Klassenraum

Table 1. Proportion of measurements of carbon dioxide concentration above and below 1,500 ppm_v in the classrooms in summer and winter from [4], measurement at one day per classroom

CO ₂ -Konzentration	Sommer		Winter	
	Anzahl Klassenräume	%	Anzahl Klassenräume	%
unter 1.500 ppm _v	15	65	4	11
über 1.500 ppm _v	7	32	32	89
Summe	22	100	36	100

3 Fensteröffnungsverhalten

Das Öffnen der Fenster ist erforderlich, um Klassenräume zu belüften, wenn keine RLT-Anlage betrieben wird. Aufgrund des Adaptationeffektes an Bioeffluenzen, der ab ca. 15 Minuten beim andauernden Aufenthalt in einem Raum auftritt, bemerken die Nutzer oft nicht, dass die Luftqualität sinkt. Es gibt aber andere Größen als die Raumluftqualität, die das Fensteröffnungsverhalten von Nutzern beeinflussen. Dazu wurden einige Studien in Bürogebäuden durchgeführt.

Nach *Raja* et al. [9] steigt der Anteil der offenen Fenster in Bürogebäuden mit einem Anstieg der Außentemperatur. *Nicol* [7] fand eine starke Korrelation zwischen dem Fensteröffnen und der Außentemperatur. Der Anteil der offenen Fenster tendierte dazu, signifikant anzusteigen, wenn die Außentemperatur über 10 °C anstieg. *Rijal* et al. [10] schlossen, dass die Nutzer mit großer Wahrscheinlichkeit die Fenster bei hohen Innen- wie Außentemperaturen öffnen. Der Anteil der offenen Fenster ist daher im Sommer höher als im Winter und am Nachmittag höher als am Vormittag. *Herkel* et al. [5] untersuchten die Benutzung der Fenster in einem Bürogebäude. Zwischen Oktober und März waren weniger Fenster offen als im Rest des Jahres. Ein plötzlicher Rückgang des Anteils offener Fenster wurde zwischen September und Oktober und ein plötzlicher Anstieg des Anteils offener Fenster zwischen März und April gefunden. Die Änderung des Nutzerverhaltens tritt demnach mit dem ersten kalten Tag bei ca. 10 °C bzw. dem ersten warmen Tag mit 15 °C auf.

Nordquist [8] führte in schwedischen Schulen eine Untersuchung zu den Fensteröffnungsgewohnheiten von Lehrern durch. Im Sommer wird danach häufig und lange gelüftet. Im Winter dagegen lüften die Hälfte der Lehrer einige Male am Tag oder weniger. Lediglich 35 % der befragten Lehrer geben an, die Fenster beim winterlichen Lüften mindestens 5 bis 10 Minuten offen zu lassen. Als Gründe für das Öffnen des Fensters geben mehr als 70 % der Lehrer an, dass die Raumluft als zu warm oder zu stickig empfunden wird. Geschlossen werden die Fenster primär wegen zu kalter Außenluft (67 %), Lärm von Außen (62 %) und Zugluft (42 %). Erst an vierter Stelle (40 %) wird genannt, dass genug Frischluft in den Raum gelangt ist und die Raumluftqualität somit zufriedenstellend ist.

4 Beschreibung der untersuchten Klassenräume

Gymnasium Miesbach

Das Gymnasium Miesbach liegt im bayerischen Alpenvorland in der Stadt Miesbach. Die Schule besteht aus vier Gebäudeteilen, die in unterschiedlichen Baujahren errichtet wurden. Aus jedem Gebäudeteil wurde ein Klassenraum für Messungen ausgewählt.

Der älteste Gebäudeteil wurde 1964 errichtet. Der ausgewählte Klassenraum 205 mit einem Volumen von 168 m³ besitzt eine südwestliche Orientierung. Den außenliegenden Sonnenschutz bildet eine Markise aus hellem Stoff. Der Sonnenschutz ist in großem Abstand vor der Fassade angebracht und ist daher sehr gut hinterlüftet. Ein Teil des 1964 errichteten Gebäudes wurde 1974 mit einem Stockwerk aufgestockt.

Der Klassenraum 211 mit einem Volumen von 135 m^3 ist südostorientiert. Vor der Fassade wurde ein Sonnenschutz vermutlich nachträglich angebracht und direkt auf dem Blendrahmen des Fensters montiert. Daher ist der Sonnenschutz nicht nur schlecht hinterlüftet sondern beeinträchtigt sogar die Belüftung des Klassenraumes. Dies liegt daran, dass sich die Schwingflügel bei geschlossenem Sonnenschutz praktisch nicht öffnen lassen.

Der Gebäudekomplex wurde 1984 um einen weiteren Anbau erweitert. Dort befindet sich der nordwestorientierte Klassenraum 208, der nach oben direkt mit der Dachfläche an die Außenluft angrenzt und daher auch ein großes Volumen von 205 m^3 besitzt. Dieser Raum besitzt eine ab Brüstungshöhe verglaste Fassade, die nicht verschattet ist.

Der vierte Gebäudeteil wurde 1993 errichtet. Der Klassenraum N04 ist zum Hof hin nach Südosten orientiert und besitzt wie Raum 205 eine gut hinterlüftete Markise aus hellem Stoff als Sonnenschutz. Alle Fenster sind mit Doppelverglasung und Schwingflügeln ausgestattet. Wegen einer Fixierung aus Sicherheitsgründen lassen sich die Schwingflügel nur mit einem schmalen Spalt öffnen.

Die Klassenräume wurden in Kooperation mit den Lehrern ausgewählt, um Räume mit regelmäßiger Belegung und raumklimatischen Problemen in jedem Gebäudeteil zu finden.

Die Messungen fanden während je einer Woche im Juli 2006 und im Januar 2007 statt. Die Raumlufttemperatur wurde in den vier Höhen 0,1; 0,6; 1,1; und 1,7 m gemessen (kalibrierte Thermolemente mit einer Genauigkeit von $\pm 0,3 \text{ K}$). Die Kohlendioxidkonzentration wurde in einer Höhe von 1,7 m gemessen (NDIR-Sensor, relativer Messfehler 3 % in einem Bereich von 0 bis 5.000 ppm_v). Die Sensoren wurden möglichst in der Mitte jedes Klassenraumes angeordnet. Kurze Fragebögen lagen am Lehrerpult aus, in denen die Lehrer die Anzahl der Schüler, das Fensteröffnungsverhalten und die Benutzung des Sonnenschutzes während jeder Stunde dokumentierten. Die Messdaten zur Außenwitterung wurden von der Wetterstation am nahegelegenen Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) Holzkirchen erfasst.

Angelaschule

Die zweite untersuchte Schule befindet sich in Niedersachsen in Osnabrück. Diese Schule besteht aus vier nahezu einzeln stehenden Gebäuden unterschiedlicher Baujahre.

Das älteste Gebäude ist ein Klostergebäude, 1903 gebaut und 1963 nach einem Brand instandgesetzt. In diesem Gebäudeteil wurden zwei Klassenräume für die Messung ausgewählt: Klassenraum KL302 (Volumen 175 m^3) mit Nordwestorientierung und an die Straße angrenzend sowie KL312 (Volumen 179 m^3) mit Südostorientierung und an den Innenhof grenzend. Beide Räume haben monolithische Außenwände aus 0,6 m dickem Sandstein. Raum KL302 besitzt drei relativ neue wärmeschutzverglaste Fenster. Die zwei Fenster in Raum KL312 sind einfachverglast und haben verzogene undichte Holzrahmen. Jedes Fenster besitzt zwei Drehflügel und ein kippbares Oberlicht. Nur das Oberlicht kann zum Lüften verwendet werden. Die Drehflügel sind aus Sicherheitsgründen während des regulären Schulunterrichtes durch eine Kette gesichert und

können daher nur mit einem schmalen Spalt geöffnet werden.

Das Aulagebäude wurde 1962 errichtet. Über der Aula befindet sich Raum A102 mit Südwestorientierung und einem Volumen von 159 m^3 . Der Raum hat drei Drehkippflügel, die ca. ein Drittel der Fläche der ab der Brüstung einfachverglasten Fassade bilden. Der Raum besitzt keinen Sonnenschutz.

Das Gebäude mit den meisten Klassenräumen (18 Räume auf drei Etagen) wurde 1965 erbaut. In diesem sogenannten Klassentrakt befindet sich im 2. Stock der nach Nordosten ausgerichtete Raum K203 (Volumen 175 m^3). Das Gebäude wurde in Stahlbetonskelettbauweise mit Ausfachungen im Brüstungsbereich errichtet. Die vier doppelverglasten Schwingflügel können nicht verschattet werden.

Eine Erweiterung des Klostergebäudes wurde im Jahr 1980 errichtet. Hier befindet sich der Physik-Fachraum (Volumen 207 m^3 , Nordwest-Orientierung). Die Fassade ist oberhalb der Brüstung komplett verglast. Die untere Hälfte des verglasten Teils kann geöffnet werden. Die Fassade besitzt einen außenliegenden Sonnenschutz.

Alle Räume wurden mit Messeinrichtungen zur Erfassung der Innentemperatur (kalibrierte Pt100-Sensoren mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1 \text{ K}$) und der Kohlendioxidkonzentration (potentiometrisches Messverfahren, relativer Fehler 5 % im Bereich von 0 bis 5.000 ppm_v). Beide Messwerte wurden in einer Höhe von 1,7 bis 2,0 m an der Innenwand installiert, um die Sensoren, die für eine Langzeitmessung installiert bleiben sollten, vor Beschädigung zu schützen. Es wurde eine Position gewählt, die den Einfluss von Fenstern und offenen Innentüren möglichst gering hält. Alle Fenster in den Messräumen wurden mit je einem Fensterkontakt ausgerüstet. Dieser Sensor gibt ausschließlich den Zustand des Fensters mit „offen“ oder „geschlossen“ an. Die Öffnungsweite wird nicht erfasst. Die Messdaten sind verfügbar von Mai 2006 bis Juli 2008. Für die vorliegende Auswertung wurde der Zeitraum von Mai 2006 bis Juni 2007 einbezogen. Die Fensterkontakte wurden erst im November 2006 installiert. Die Wetterdaten wurden von der nahen Fachhochschule Osnabrück bereitgestellt.

Das Software Paket GNU R (2008) wurde für die statistische Auswertung benutzt. Da die Voraussetzung einer Normalverteilung für die gemessenen Fensteröffnungszeiten nicht gegeben ist, wurden Rangkorrelationen bestimmt. Das Signifikanzniveau wurde zu $\alpha = 0,025$ (einseitig) festgelegt.

5 Ergebnisse und Diskussion

Die im folgenden Abschnitt präsentierten Ergebnisse konzentrieren sich auf den Vergleich der Klassenräume und auf Ergebnisse aus den kontinuierlichen Messungen in einem Klassenraum der Angelaschule.

Gymnasium Miesbach

Die Außentemperaturen während der Messwoche im Juli 2006 können als recht warm angesehen werden. Von Montag bis Freitag wurden ein Minimum von $7,7 \text{ }^\circ\text{C}$, ein unteres Quartil von $16,0 \text{ }^\circ\text{C}$, ein Mittelwert von $21,1 \text{ }^\circ\text{C}$, ein oberes Quartil von $26,7 \text{ }^\circ\text{C}$ und ein Maximum von $32,8 \text{ }^\circ\text{C}$

gemessen. Der Mittelwert der Außenlufttemperatur während der Unterrichtsstunden beträgt 26,2 °C. Während der Messwoche im Winter ist die Außentemperatur mit einem Mittelwert von 7,8 °C untypisch hoch.

Für die Auswertung werden nur Messdaten, die von Montag bis Freitag zwischen 8 und 13 Uhr gemessen wurden, berücksichtigt (Bilder 1 und 2). Die Kohlendioxidkonzentration im Winter überschreitet in Abhängigkeit vom untersuchten Klassenraum in 69 bis 91 % der Zeit einen Wert von 1.000 ppm_v. Eine Kohlendioxidkonzentration von 1.500 ppm_v wird in 28 bis 68 % der Zeit über-

schritten. Während der Sommermessung liegt der Anteil der Werte, die 1.000 bzw. 1.500 ppm_v überschreiten bei 1 bis 17 % bzw. 0 bis 3 %. Dies korrespondiert gut mit den Werten, die aus [2], [4], [6] ermittelt wurden. Bild 1 zeigt

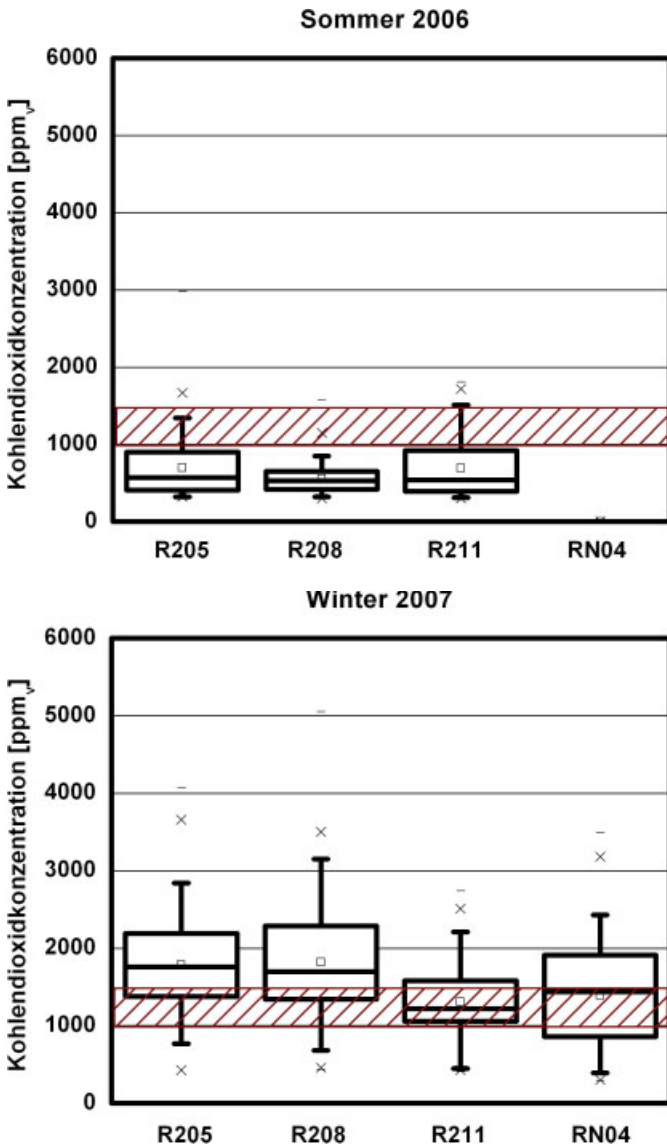


Bild 1. Box-Whisker-Plot der Häufigkeit von CO₂-Konzentrationen in den untersuchten Klassenräumen am Gymnasium Miesbach während der Sommermessung 17.-21. 7. 2006 (oben) und während der Wintermessung 8.-12. 1. 2007 (unten) zwischen 8 und 13 Uhr; - Maximum/Minimum; x = 1 bzw. 99 %; Whisker = 5 bzw. 95 %; Box 25 bzw. 75 %; - Median)

Fig. 1. Box and whisker diagram (boxplot) of the CO₂ concentration frequencies in the classrooms examined at Gymnasium Miesbach during the summer measuring period 17-21 July 2006 (above) and the winter measuring period 8-12 January 2007 (below) between 8 am and 1 pm (- maximum/minimum: x = 1 or 99 %; whisker = 5 or 95 %; box 25 or 75 %; - median)

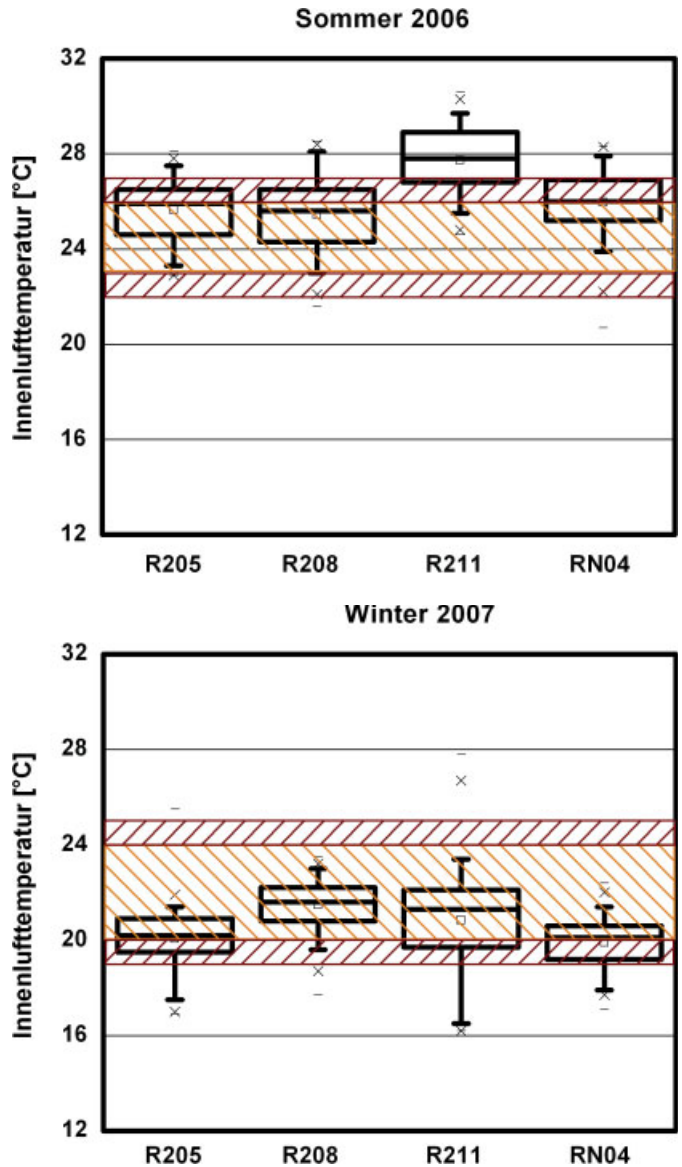


Bild 2. Box-Whisker-Plot der Häufigkeit von Innenlufttemperaturen in den untersuchten Klassenräumen am Gymnasium Miesbach während der Sommermessung (17.-21. 7. 2006, oben) und während der Wintermessung (8.-12. 1. 2007, unten) zwischen 8 und 13 Uhr (- Maximum/Minimum; x = 1 bzw. 99 %; Whisker = 5 bzw. 95 %; Box 25 bzw. 75 %; - Median). Die schraffierten Bereiche kennzeichnen im Sommerfall den Bereich von 23 bis 26 °C Kat. II bzw. 22 bis 27 °C Kat. III nach EN 15251 [1] und im Winterfall den Bereich von 20 bis 24 °C Kat. II bzw. 19 bis 25 °C Kat. III nach EN 15251 [1] Fig. 2. Box and whisker diagram (boxplot) of the indoor air temperature frequencies in the classrooms examined at Gymnasium Miesbach during the summer measuring period (17-21 July 2006, above) and the winter measuring period (8-12 January 2007, below) between 8 am and 1 pm (- maximum/minimum: x = 1 or 99 %; whisker = 5 or 95 %; box 25 or 75 %; - median). The shaded areas indicate the temperature range 23-26 °C category II or 22-27 °C category III according to standard EN 15251 [1] for the summer and the temperature range 20-24 °C category II or 19-25 °C category III according to standard EN 15251 [1] for the winter

die Häufigkeiten in einer Box-Whisker-Plot-Darstellung für den Sommer (oben) und für den Winter (unten).

Im Sommer überschreitet die Innentemperatur während der Unterrichtszeit in 40 bis 86 % der Zeit einen Wert von 26 °C (Bild 2, oben). Besonders in Raum 211 mit Südorientierung stellt sich die Situation kritisch dar. 66 % der gemessenen Werte überschreiten einen Wert von 27 °C und fast 50 % der Werte überschreiten 28 °C.

Im Gegensatz dazu überschreitet die Innentemperatur in Raum 205 und N04 nur in 14 bzw. 20 % der Zeit eine Temperatur von 27 °C. In Raum 208 liegen nur 9 % der Werte oberhalb von 27 °C. Verglichen mit den niedrigen Nachttemperaturen (Minimum 7,7 °C, unteres Quartil 16 °C) überraschen die hohen Innentemperaturen jedoch. Dies wird in einem späteren Abschnitt noch diskutiert werden.

Bild 2 (unten) zeigt, dass über 75 % der Innentemperaturen im Winter innerhalb der Komfortgrenzen der Kategorie III (19 bis 25 °C) von EN 15251 [1] liegen. In Abhängigkeit vom betrachteten Klassenraum liegen aber 10 bis 48 % der Temperaturen unterhalb von 20 °C. Temperaturen unter 19 °C werden je Klassenraum in 0 bis 21 % der Fälle gemessen. Diese niedrigen Temperaturen treten hauptsächlich am Morgen, während der Pausen und während nicht belegter Stunden auf.

Klassenräume weisen im Sommer oft sehr hohe Temperaturen auf. Dies liegt natürlich durchaus darin begründet, dass die Fassaden in der Regel hohe Verglasungsanteile aufweisen, ein unzureichender oder gar kein Sonnenschutz vorhanden ist und die internen Wärmegewinne durch die hohe Personendichte sehr hoch ist. Wird davon ausgegangen, dass die Mindestfläche pro Schüler in einem Klassenraum von 2 m² eingehalten wird, dann ergeben sich allein durch die Personenbelegung bereits sensible Kühllasten von 38 W/m². Aber nicht nur in ost- oder südorientierten Klassenräumen, wo die externen und die internen Wärmelasten gleichzeitig wirken, sondern auch in (nord-)westorientierten Räumen können hohe Temperaturen gemessen werden.

Die Rücksprache mit dem Hausmeister der Schule ergibt eine nachvollziehbare Erklärung. Die Fenster werden nach der letzten Unterrichtsstunde geschlossen, um Wassereindringen bei Regen oder Gewitter zu verhindern. Der Sonnenschutz – falls überhaupt vorhanden – wird aus den gleichen Gründen nach dem Unterricht geöffnet. Am Morgen werden die Fenster frühestens zu Beginn der ersten Stunde geöffnet. Befragte Lehrer berichten, dass sie die Temperatur am Morgen genauso warm empfinden wie nach der letzten Unterrichtsstunde am Vortag.

Die Messergebnisse in Bild 3 demonstrieren den beschriebenen Effekt beispielhaft für den 19. Juli 2006 für je einen Raum mit Südwest-, Nordwest- und Südorientierung. Es ist deutlich zu erkennen, dass um ca. 8 Uhr noch eine Temperatur von 24 bzw. 26 °C in den Räumen herrscht. Wenn die Schüler die Klassenräume betreten, steigt die Temperatur in den Räumen 211 (grüne Linie) und 205 (blaue Linie) schneller an. In Raum 211 können die Fenster wegen des zu dicht vor der Fassade angebrachten Sonnenschutzes nicht weit geöffnet werden. In Raum 208 wurden um 8 Uhr die Fenster geöffnet und die Temperatur sank umgehend um 2 bis 3 K. Mit dem Verlassen der Klassenräume nach Unterrichtschluss steigt in Raum 205

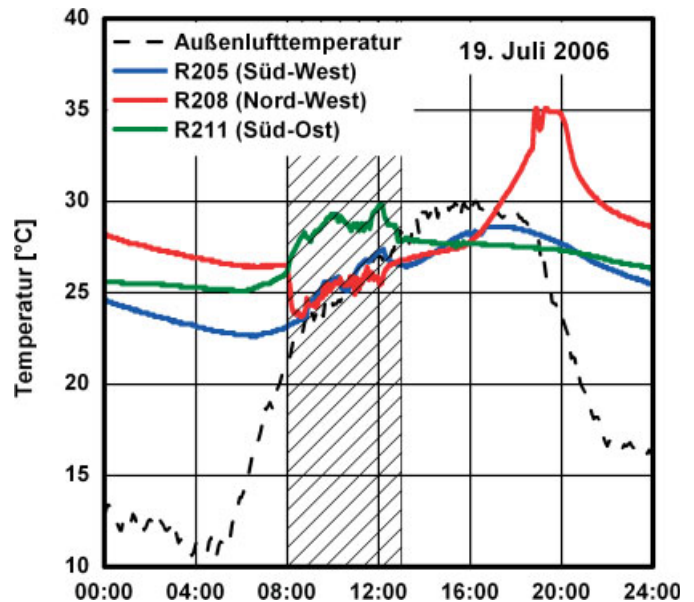


Bild 3. Innentemperatur in drei Klassenräumen am 19. Juli 2006 in Abhängigkeit von der Orientierung; Belegung der Räume zwischen 8 und 13 Uhr; die Außenlufttemperatur ist ebenfalls dargestellt

Fig. 3. Indoor temperature in three classrooms on 19 July 2006 as a function of orientation; occupancy of the rooms between 8 am and 1 pm; outdoor air temperature also shown

die Temperatur wieder an. In Raum 208 wird das Maximum von 35 °C zwischen 19 und 20 Uhr erreicht. Raum 208 ist nach Nordwesten ausgerichtet und besitzt keinen Sonnenschutz. Bis morgens um 8 Uhr nimmt in diesem Raum die hohe Temperatur nur langsam ab. In Bild 3 ist auch der Verlauf der Außentemperatur dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass für die Räume bei diesen Außentemperaturen ein beträchtliches Nachtauskühlungspotential bestünde. Auch eine intensive Lüftung in den frühen Morgenstunden könnte die Temperatur erheblich senken. Dieses Potential bleibt bisher ungenutzt.

Angelaschule

Für die Auswertung wurden nur belegte Schulstunden herangezogen. Die im Folgenden vorgestellten Analysen basieren auf minutlich erfassten Messwerten, die über eine Schulstunde von 45 Minuten oder für die Dauer der Pause zwischen den Stunden gemittelt wurden. Die Schulstunden wurden nummeriert von S1 bis S13. Da die meisten Stunden am Vormittag gehalten werden und nur sehr wenige Stunden am Nachmittag stattfinden, sind die Stunden S1 bis S6 die wichtigsten Stunden.

Bild 4 zeigt das monatliche Minimum, Maximum und die Quartile der Außentemperatur, ermittelt aus den Mittelwerten der Stunden S1 bis S6. Verglichen mit den Messungen am Gymnasium Miesbach ist die Außentemperatur nicht so hoch im Sommer und nicht so gering im Winter.

Bild 5 zeigt das monatliche Minimum, Maximum und die Quartile der Kohlendioxidkonzentration, der Innentemperatur und der Fensteröffnungszeit, ermittelt aus den Mittelwerten der Schulstunden eins bis sechs für den Klassenraum K203. Zwischen November und März ergibt sich ein Median der Kohlendioxidkonzentration von 1.200 bis 1.560 ppm_v. Dies bedeutet, dass in 50 % der Schulstunden der Mittelwert der Kohlendioxidkonzentration über

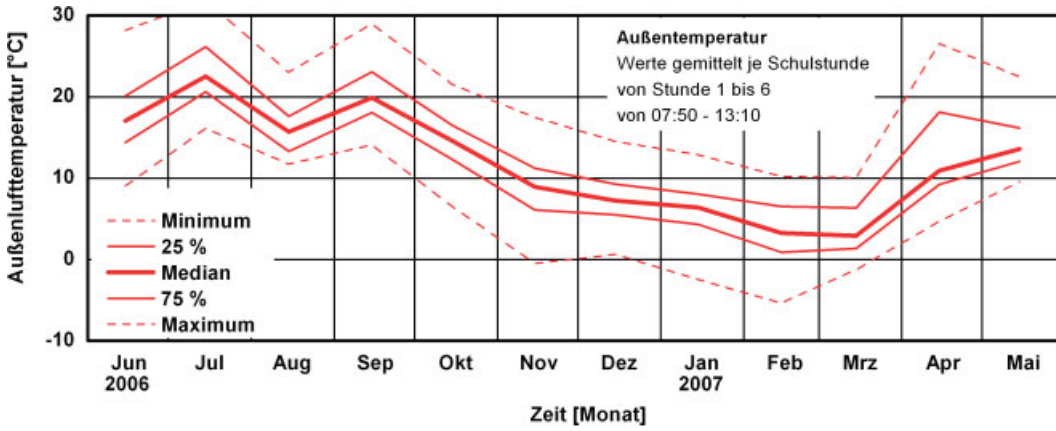


Bild 4. Monatliche Werte für Minimum, Maximum, Median, 25 %- und 75 %-Quartil der Außentemperatur, gewonnen aus den Mittelwerten je Schulstunde von Stunde 1 bis 6 für die Angelaschule
 Fig. 4. Monthly values for the minimum, maximum, median, 25 % and 75 % quartile of the outdoor temperature obtained from the mean values for each lesson for lessons 1 to 6 for Angela School

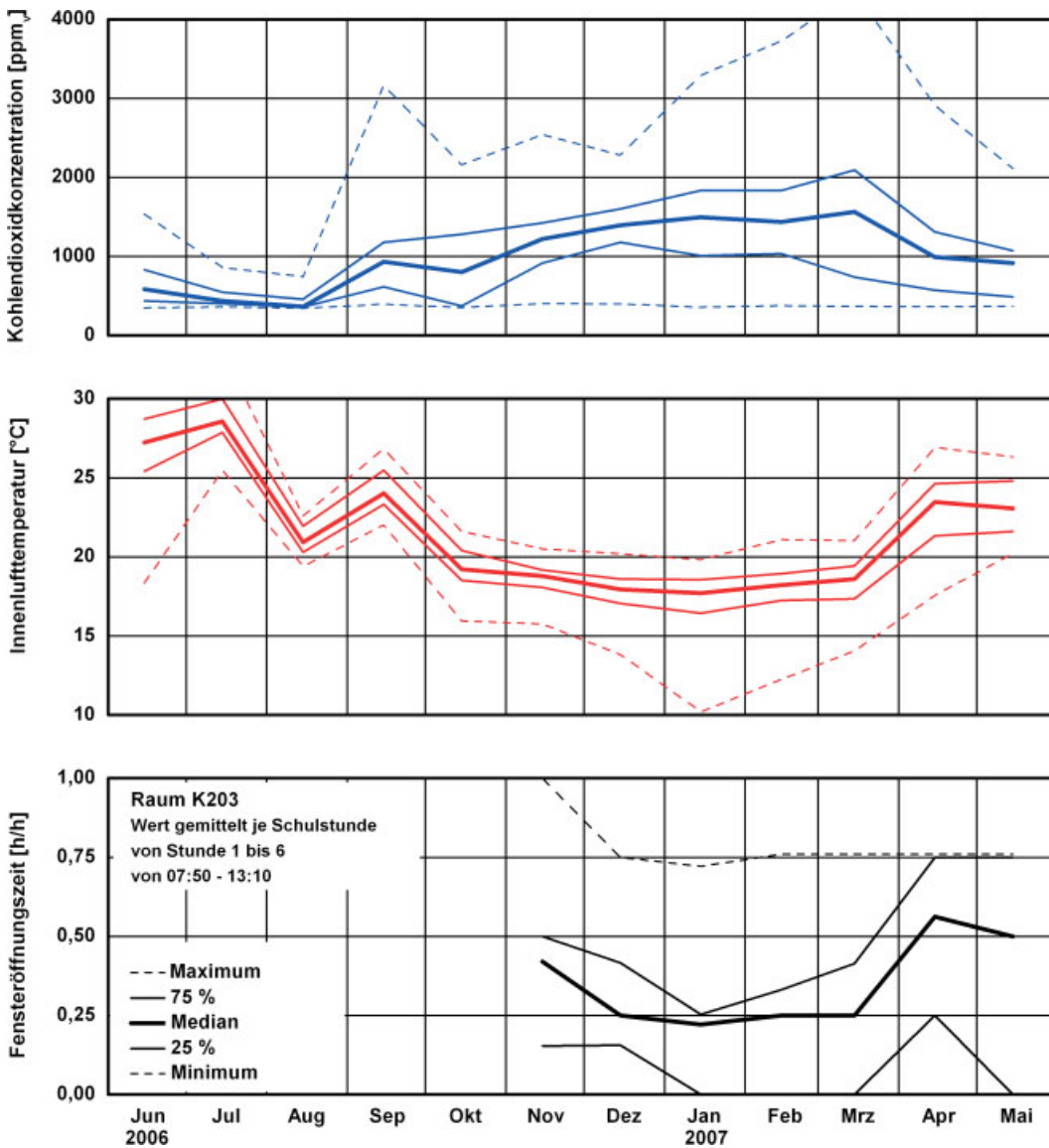


Bild 5. Monatliche Werte für Minimum, Maximum, Median, 25 %- und 75 %-Quartil der CO₂-Konzentration, der Innentemperatur und der Fensteröffnungszeit, gewonnen aus den Mittelwerten je Schulstunde von Stunde 1 bis 6 für Raum K203 der Angelaschule
 Fig. 5. Monthly values for the minimum, maximum, median, 25 % and 75 % quartile for the concentration of CO₂, indoor temperature and window opening time obtained from the mean values for each lesson from lessons 1 to 6 for room K203 of Angela School

1.200 bzw. 1.560 ppm_v lag. Außerhalb dieses Zeitraumes liegen alle Medianwerte unter 1.000 ppm_v. Die gemessene Innenraumtemperatur in K203 ist sehr niedrig. Von November bis März sind die ermittelten Mediane während der Belegung durch Schüler (!) unter 18,8 °C und das obere Quartil überschreitet 19,4 °C nicht. Fast alle Schulstundenwerte liegen also in diesem Zeitraum unterhalb von 20 °C. Die Fensteröffnungszeiten liefern zwischen Dezember und März Werte um 0,25. Dieser Wert ist gleichbedeutend damit, dass eines der vier in K203 vorhandenen Fenster für eine Stunde geöffnet wurde oder dass alle vier Fenster während eines Viertels der Schulstunde geöffnet wurden. Ein Wert von 1,0 würde bedeuten, dass alle Fenster eines Raumes für eine gesamte Stunde geöffnet sind. Mit steigender Innentemperatur im April (Median 23,1 °C) steigt auch die Fensteröffnungszeit an.

Bild 6 zeigt die über die Monate Januar und Februar für jede Schulstunde und jede Pause gemittelte CO₂-Konzentration. Der Median der Stunden S3 bis S6 liegt bei 1.500 ppm_v. Die Maximalwerte sind recht hoch und erreichen 3.000 bis 4.000 ppm_v. Die Medianwerte in den Pausen sind geringer als die Mediane in den Schulstunden unmittelbar vor der Pause. Dies bedeutet, dass die Fenster während der Pausen geöffnet werden. 50 % aller Werte

von Stunde 3 bis 6 liegen zwischen 1.200 (unteres Quartil) und 2.000 ppm_v (oberes Quartil). Die für Januar und Februar für den Zeitraum von 8 bis 18 Uhr gemittelte Außentemperatur wurde zu 5,2 °C bestimmt.

Aufgrund des Baujahres von 1965 weist der untersuchte Klassenraum eine sehr schlechte Wärmedämmung auf. Wegen dieser unzureichenden Wärmedämmung sind die Innenoberflächentemperaturen sehr gering. Bei einem Median der Außentemperatur von 10 °C liegt der Median der Innenoberflächentemperatur der Wand und des Daches bei 16 °C. Auch wenn die internen Wärmelasten sehr hoch sind, ist die Innentemperatur doch viel zu kalt. Die Lehrer berichten über Schüler, die Anoraks im Klassenraum tragen. Die Analyse der Betriebsführung der Heizungsanlage zeigt, dass ein Abfallen der Temperatur in der Nacht bis auf 12 °C zugelassen wird. Erneutes Heizen beginnt morgens um 6 Uhr. Dass mit dieser Art der Beheizung keine akzeptablen Raumtemperaturen in solch einem Gebäude erreicht werden können, ist nachvollziehbar. Es kann vermutet werden, dass die Nutzer auch deshalb nicht die Fenster öffnen, weil sie ein weiteres Absinken der Raumtemperatur vermeiden wollen.

Für den Zeitraum von November bis Mai 2007 wurde in jeder Minute der Status der Fenster erfasst. Tabelle 2

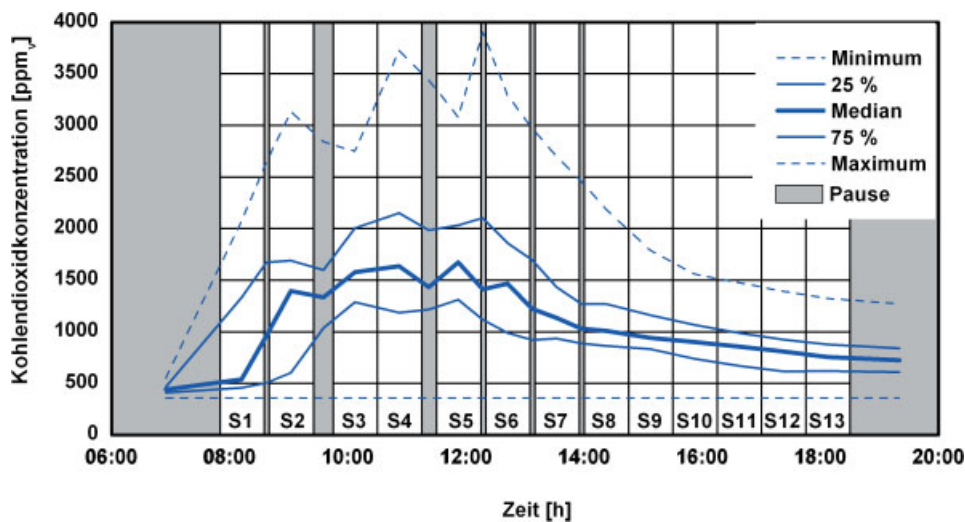


Bild 6. Bandbreite der CO₂-Konzentration im Klassenraum K203 während des Schultages, gemittelt aus allen Werten für Januar und Februar 2007

Fig. 6. Range of the CO₂ concentration in classroom K203 during the school day averaged out from all values for January and February 2007

Tabelle 2. Medianwerte für die Fensteröffnungszeiten, Außentemperatur und Innentemperatur in den fünf Klassenräumen der Angelaschule. Es wurden nur Werte belegter Schulstunden (= Anzahl der Beobachtungen) zwischen November 2006 und Mai 2007 berücksichtigt

Table 2. Median values for total open window ratio, outdoor temperature and indoor temperature in the five classrooms at Angela School. Only values for occupied lessons (= number of observations) between November 2006 and May 2007 were taken into account

Klassenraum	Anzahl der Beobachtungen	Außentemperatur [°C]	Innentemperatur [°C]	Fensteröffnungszeit [h/h]
H101	691	8,1	19,8	0,00
A102	824	8,1	19,6	0,02
K203	684	8,0	18,6	0,13
KL302	765	8,0	19,5	0,05
KL312	653	8,2	19,0	0,25

zeigt die Medianwerte für die Fensteröffnungszeiten, Innen- und Außentemperaturen. Bei einem Median der Außentemperatur von 8 °C erreicht der Median der Innentemperatur in keinem Klassenraum 20 °C. Der Median der Fensteröffnungszeit während aller belegten Schulstunden ist in

allen untersuchten Klassenräumen sehr gering. In Raum H101 sind 65 % der erfassten Werte gleich Null. Dies bedeutet, dass in 65 % aller Schulstunden die Fenster während der gesamten Schulstunde geschlossen waren. Der höchste Median der Fensteröffnungszeit wurde zu 0,25 für den Raum KL312 im alten Klostergebäude, der zum Hof hin orientiert ist, ermittelt.

Bild 7 zeigt die Fensteröffnungszeit für alle untersuchten Klassenräume in Abhängigkeit von der Außentemperatur (links) bzw. von der Innentemperatur (rechts). Die Diagramme zeigen die Quadranten, die aus den Medianlinien für die Fensteröffnungszeit und denen der Außen- bzw. Innentemperatur entstehen. Für jeden Raum ergibt sich eine typische Verteilung der Fensteröffnungszeit, die aus der Anzahl der Fenster je Raum resultiert. Aus den Diagrammen können keine klaren Abhängigkeiten der Fensteröffnungszeit von der Außen- bzw. Innentemperatur abgeleitet werden.

Daher wurden die Rangkorrelationen zwischen Fensteröffnungszeit und Außen- bzw. Innentemperatur berechnet. Tabelle 3 zeigt, dass es nur für einen Klassenraum eine signifikante Korrelation zwischen der Fensteröffnungszeit und der Außentemperatur gibt. Dieser für H101 gefundene Korrelationswert ist jedoch sehr niedrig und zeigt eine schwache Korrelation an. Im Gegensatz dazu sind die Korrelationen zwischen Fensteröffnungszeit und Innentemperatur höher. Alle diese Korrelationen sind auch signifikant. Es kann daraus geschlossen werden, dass mit steigender Innentemperatur auch die Fensteröffnungszeit steigt. H101 und KL302 zeigen Korrelationen von 0,23 bzw. 0,15. Beide Räume sind zur Straße hin orientiert. KL312 zeigt den höchsten Korrelationswert von 0,43 und ist wie A102 und K203 zum Hof hin orientiert.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Messergebnisse des Raumklimas in zwei Schulen zeigen neben hohen Kohlendioxidkonzentrationen – erwartungsgemäß besonders im Winter, dass auch der unzureichende winterliche Wärmeschutz in einer Schule die Behaglichkeit erheblich beeinträchtigen kann. Die sommerlichen Temperaturen waren teilweise bereits am Morgen schon sehr hoch. Ein Abkühlen der Räume erfolgte über den Tag nicht. Einige Klassenräume besitzen gar keinen

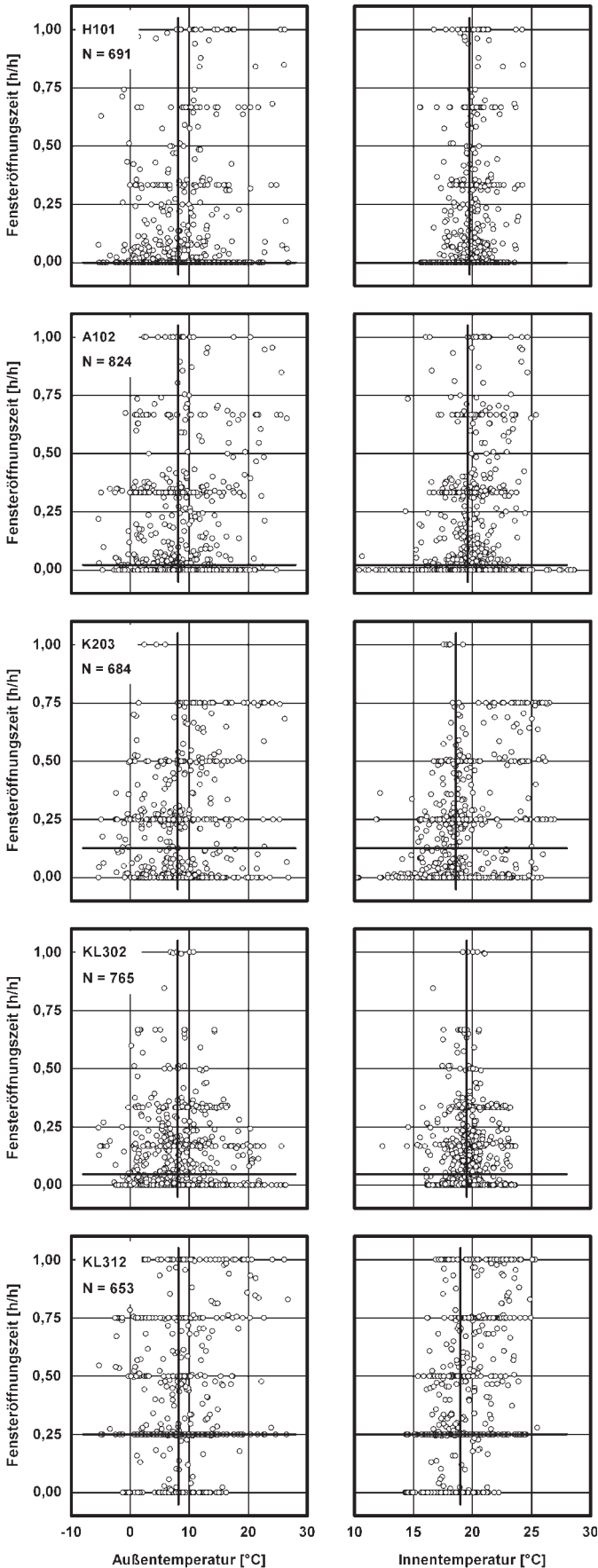


Bild 7. Fensteröffnungszeiten während der Schulstunden aufgetragen über der Außentemperatur (links) bzw. der Innentemperatur (rechts) für alle untersuchten Klassenräume in der Angeschule. Fette Linien kennzeichnen den Median der Außenlufttemperatur bzw. der Innentemperatur und der Fensteröffnungszeit. Anzahl der Fenster je Klassenraum: Raum H101 – 3 Fenster, Raum A102 – 3 Fenster, Raum K203 – 4 Fenster, Raum KL302 – 3 Fenster + 3 Oberlichter, Raum KL312 – 2 Fenster + 2 Oberlichter
 Fig. 7. Total open window ratio during occupied lessons plotted against the outdoor (left) or indoor (right) temperature for all the classrooms examined at Angela School. Bold lines indicate the median for the outdoor air temperature or indoor temperature and the total open window ratio. Number of windows per classroom: room H101 – 3 windows, room A102 – 3 windows, room K203 – 4 windows, room KL302 – 3 windows + 3 roof lights and room KL312 – 2 windows + 2 roof lights

*Tabelle 3. Rangkorrelationskoeffizienten r_s für die Korrelation zwischen Fensteröffnungszeit und Außen- bzw. Innentemperatur für die fünf untersuchten Klassenräume der Angelaschule. Es wurden nur Werte belegter Schulstunden (= Anzahl der Beobachtungen) zwischen November 2006 und Mai 2007 berücksichtigt. Signifikante Korrelationen sind fett markiert (Werte mit * kennzeichnen ein $p < 1 \cdot 10^{-5}$)*

*Table 3. Rank correlation coefficients r_s for the correlation between the total open window ratio and outdoor and indoor temperature for the five classrooms examined at Angela School. Only values for occupied lessons (= number of observations) between November 2006 and May 2007 were taken into account. Significant correlations are marked in bold (values with * indicate $p < 1 \cdot 10^{-5}$)*

Klassenraum	Anzahl der Beobachtungen	Korrelation zur Außentemperatur		Korrelation zur Innentemperatur	
		Korrelationskoeffizient	p	Korrelationskoeffizient	p
H101	691	0,10	0,003	0,23	*
A102	824	-0,05	0,089	0,23	*
K203	684	0,03	0,227	0,31	*
KL302	765	0,01	0,421	0,15	*
KL312	653	0,04	0,149	0,43	*

Sonnenschutz oder der Sonnenschutz ist unzureichend oder behindert sogar die Belüftung des Klassenraumes. Die Fenster werden zwar zum Lüften genutzt, jedoch in unzureichender Weise. Eine signifikante schwache bis moderate positive Korrelation wurde zwischen Fensteröffnungszeit und Innentemperatur gefunden. Die Korrelationskoeffizienten zwischen Fensteröffnungszeit und Außentemperatur waren nicht signifikant oder zeigten eine schwache Korrelation. Während der ausgewerteten Messungen der Fensteröffnungszeit traten allerdings nur niedrige oder moderate Außentemperaturen auf. Wegen des geringen Wärmedämmstandards der untersuchten Räume und der unangepassten Regelung der Heizung wurden sehr niedrige Innentemperaturen gemessen. Dies könnte ein Grund für die sehr niedrigen Werte der Fensteröffnungszeit sein. Aufgrund der zur ausgewerteten Messperiode vorherrschenden niedrigen Außentemperaturen war das gesamte Level der Fensteröffnungszeiten ebenfalls gering. Dies steht in Übereinstimmung mit den in Abschnitt 2 vorgestellten Forschungsergebnissen zum Fensteröffnungsverhalten in Büroräumen. Weitere Untersuchungen sind hier erforderlich.

Um die Raumtemperaturen im Sommer absenken zu können, wäre nicht nur ein besserer bzw. besser hinterlüfteter Sonnenschutz erforderlich. Der Sonnenschutz müsste auch anders bedient werden. Sinnvoll wäre es, den Sonnenschutz bereits vor Unterrichtsbeginn bei Ostorientierung herunterzufahren und auch nach dem Unterricht weiter geschlossen zu halten; dies vor allem bei nach Süden und Westen orientierten Räumen. Es sollte zukünftig berücksichtigt werden, dass sich auch Räume mit Nordost- oder Nordwestausrichtung aufheizen können, wenn – wie bisher üblich – auf einen Sonnenschutz „bei Nordorientierungen“ verzichtet wird. Bei der Anbringung des Sonnenschutzes ist auf eine sehr gute Hinterlüftung, also auf einen ausreichenden Abstand des Sonnenschutzes von der Fassade, zu achten, da sonst die am Sonnenschutz absorbierte Wärme in den Raum gelüftet wird. In Räumen mit hohen inneren Wärmelasten ist die übliche Empfehlung, die Fenster bei hohen Außentemperaturen zu schließen, unangebracht, weil sich der Raum eher durch seine inneren Wärmelasten aufheizt. Die Fenster sollten im Sommer ausreichend große Öffnungsweiten aufweisen.

Soll die in bestehenden Schulgebäuden teilweise vorhandene thermische Speichermasse genutzt werden, so muss auch eine entsprechende Auskühlung über Nachtlüftung sichergestellt werden. In ländlichen Gegenden besteht unter Umständen ein erhebliches Potential, die Nachtlüftung durch eine Lüftung am Morgen vor dem Unterricht zu ersetzen.

Der Leitfaden zur Innenraumlufthygiene in Schulen (siehe Abschnitt 2, [11]) wurde kürzlich durch die Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes überarbeitet [12]. Bisher wurde eine Maximalkonzentration von 1.500 ppm_v Kohlendioxid empfohlen. Das in die neue Fassung des Leitfadens aufgenommene Bewertungsschema geht nun differenzierter vor. Es wird unterschieden in:

- „hygienisch unbedenklich“ (CO₂ < 1.000 ppm_v),
- „hygienisch auffällig“ (1.000 ≤ CO₂ ≤ 2.000 ppm_v) und
- „hygienisch inakzeptabel“ (CO₂ > 2.000 ppm_v).

Bei Überschreiten einer Kohlendioxidkonzentration von 1.000 ppm_v soll gelüftet werden, bei Überschreiten von 2.000 ppm_v muss gelüftet werden.

Eine niederländische Studie berichtet über positive Langzeiteffekte von Lüftungsampeln – kombiniert mit einem Lernpaket für die Schüler – auf die Innenraumluftqualität [3]. Wurden den Lehrern nur spezifische Anweisungen zum richtigen Lüften gegeben, zeigte dies Verbesserungen der Luftqualität nur für einen kurzen Zeitraum. Langfristig konnte keine Verbesserung der Luftqualität erzielt werden. Daher wurde empfohlen, in Schulen Lüftungsampeln zu installieren und dies mit einem entsprechenden Lernpaket zu kombinieren. Dies würde den Schülern die Möglichkeit geben, eine unzureichende Luftqualität selber zu erkennen und zu lüften. Der überarbeitete Leitfaden zur Innenraumlufthygiene in Schulen würde hier auch die entsprechenden Werte zum Umschalten der Lüftungsampeln liefern. Unter der Voraussetzung, dass die Innenraumtemperaturen sich überhaupt in einem behaglichen Temperaturbereich bewegen, könnte eine Kombination aus Lüftungsampeln und Erarbeitung des Themas Raumluftqualität mit den Schülern hier eine Verbesserung der Luftqualität erzielen.

Danksagung

Die dieser Auswertung zugrundeliegenden Messdaten wurden im Rahmen der Projekte Gymnasium Miesbach, gefördert mit Mitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt und der Kreissparkasse Miesbach-Tegernsee, und Angelschule, gefördert mit Mitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, erhoben. Der Fachhochschule Osnabrück sei für die Bereitstellung der Wetterdaten gedankt.

Literatur

- [1] EN 15251:2007-08 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.
- [2] *Fromme, H., Dietrich, S., Kiranoglu, M., Twardella, D., Schierl, R., Nowak, D., Heitmann, D., Körner, W.*: Frische Luft an bayerischen Schulen. Untersuchungen zur Verbesserung der Luftqualität. Vorläufige Zusammenfassung. Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, 2006.
- [3] *Geelen, L. M. J., van der Zijden, A.*: Healthy Learning at School. Proceedings Healthy Buildings 2006, Lisbon/Portugal, June 5.–8. 2006, A 318.
- [4] *Grams, H., Hehl, O., Dreesman, J.*: Niedersächsisches Schulmessprogramm: Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Raumluftqualität in Klassenräumen sowie Modellierung von Kohlendioxid-Verläufen. Niedersächsisches Landesgesundheitsamt. Bericht 2002 und Ergänzung 2004.
- [5] *Herkel, S., Knapp, U., Pfafferoth, J.*: Towards a model of user behaviour regarding the manual control of windows in office buildings. *Building and Environment* Vol. 43 (2008), pp. 588–600.

- [6] ILAT Institut für Lebensmittel, Arzneimittel und Tierseuchen Berlin und Landesamt für Arbeitsschutz, Gesundheitsschutz und technischer Sicherheit Berlin (Hrsg.): Dicke Luft im Klassenzimmer? Innenraumluftqualität in Berliner Schulen. Untersuchungen im Berliner Stadtgebiet 2002/2003. ohne Jahresangabe. http://www.bbges.de/content/fileadmin/res_bbges/dicke-luft.pdf, Mai 2006.
- [7] *Nicol, F.*: Characterising occupant behaviour in buildings: towards a stochastic model of occupant use of windows, lights, blinds, heaters and fans. Proceedings of 7th International IBPSA Conference, Rio de Janeiro/Brazil, 13–15 August 2001.
- [8] *Nordquist, B.*: Vädring av skolor – ett komplement till normal ventilation? 1998.
- [9] *Raja, I. A., Nicol, J. F., McCartney, K. J., Humphreys, M. A.*: Thermal comfort: use of controls in naturally ventilated buildings. *Energy and Buildings* Vol. 33 (2001), pp. 235–244.
- [10] *Rijal, H. B., Tuohy, P., Humphreys, M. A., Nicol, J. F., Samuel, A., Clarke, J.*: Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings. *Energy and Buildings* Vol. 39 (2007), pp. 823–836.
- [11] Umweltbundesamt (Hrsg.): Leitfaden für Innenraumluft-hygiene in Schulgebäuden. 2000.
- [12] Umweltbundesamt (Hrsg.): Leitfaden für die Innenraum-lufthygiene in Schulgebäuden. 2008.

Autoren dieses Beitrages:

Dr.-Ing. Runa Tabea Hellwig, Gruppenleiterin Raumklimaqualität,
Abt. Raumklima und Klimawirkungen

M. Eng. Florian Antretter, wissenschaftlicher Mitarbeiter, Abt. Raumklima
und Klimawirkungen

Dr.-Ing. Andreas Holm, Leiter der Abt. Raumklima und Klimawirkungen

Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer, Institutsleiter

Alle:

Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Fraunhoferstraße 10, 83626 Valley