

# **Lüftungskonzepte in Bildungsstätten - Einfluss der Luftqualität auf die Leistungsfähigkeit von Schülern**

Von der  
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina  
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades einer  
**Doktoringenieurin (Dr.-Ing.)**  
genehmigte

## **Dissertation**

von  
Jennifer König  
geboren am 05.03.1981  
aus Gifhorn

Eingereicht am 06. Juli 2015

Disputation am 28. September 2015

Berichterstatter Univ.- Prof. Dr.-Ing. M. Norbert Fisch  
Prof. Dr.-Ing. Lars Kühl

2015



## VORWORT UND DANK

Diese Arbeit entstand im Rahmen eines Promotionsstipendiums der Deutschen Bundesstiftung Umwelt und meiner anschließenden Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Arbeitsgruppe Energieeffizientes Bauen des Instituts für Gebäude- und Solartechnik der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.

Ich möchte mich ganz herzlich bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die Unterstützung durch das Stipendium und die Möglichkeit der Bearbeitung eines derartigen Forschungsprojektes bedanken. Ich danke Frau Christiane Grimm, Herrn Dr. Hans-Christian Schaefer und Herrn Dr. Maximilian Hempel für die persönliche Betreuung. Die Treffen der Stipendiaten und die weiteren Veranstaltungen werden mir in sehr guter Erinnerung bleiben. Ich konnte über die DBU ein Netzwerk zu anderen Stipendiaten und Wissenschaftlern aufbauen das mich sowohl beruflich als auch persönlich geprägt und mir sehr geholfen hat.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. M. Norbert Fisch für die fachliche Betreuung der Arbeit, die Unterstützung bei der Entwicklung des Themas, die wertvollen Diskussionen und konstruktiven Anregungen in der Bearbeitungszeit und die abschließenden Korrekturge-spräche, die zur Abrundung der Arbeit beigetragen haben.

Für die Mitbetreuung der Arbeit und für die freundliche Übernahme des Korreferats möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Lars Kühl herzlich bedanken.

Ich möchte mich zudem bei den Projektpartnern Energenio AG (Sustainable Energy), J.Dittrich Elektronik GmbH & Co. KG, SK Elektronik GmbH und TROX Deutschland GmbH für die Kooperation und die gute Zusammenarbeit bedanken.

Ich danke meinen Kollegen, ehemaligen Kollegen und Freunden am Institute für Gebäude- und Solartechnik, die mit Geduld und Mühe zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, für den intensiven Gedankenaustausch, die Zusammenarbeit sowie das persönliche Interesse am Entstehen dieser Arbeit. Für den fachlichen Austausch und andauernden Aufmunterung bin ich insbesondere Arne Diedrich sehr dankbar.

Den studentischen Hilfskräften gilt mein Dank für die Unterstützung bei den zahlreichen Aufbauten und Messungen.

Besonders danke ich auch Prof. Volker Huckemann für die wertvollen Hinweise und die Hilfestellung in der Umsetzung. Ich danke Oliver Rosebrock, Mani Zargari und Philipp Knöfler für das Korrekturlesen und die freundlichen Ratschläge.

Bei Herrn Dr. Gerhart Tiesler und Herrn Prof. Dr. Hans-Georg Schönwälder möchte ich mich für die fachliche Unterstützung und Austausch, sowie die konstruktiven Gespräche herzlich bedanken.

Ich bedanke mich bei den Schulleitern, Hausmeistern, Schülern, Lehrern, sowie bei den Kollegen der Stadt Wolfsburg ohne deren Zutun, Mitarbeit und Einsatz das Vorhaben so nicht umsetzbar gewesen wäre.

Meinen Freunden und meiner Familie danke ich für das aufrichtige Interesse, die wiederholte Nachfrage und den stetigen Zuspruch. Mein herzlicher Dank gilt dabei meinen Eltern, die mir eine vielseitige Bildung und Ausbildung ermöglichten und mich immer unterstützt haben.

Schließlich möchte ich mich bei meinem Partner Sebastian Wulf, der das Entstehen dieser Arbeit mit Verständnis und Geduld verfolgt, mich über den gesamten Bearbeitungszeitraum immer unterstützt, aufgemuntert und motiviert hat, von Herzen bedanken.

Jennifer König, Braunschweig 2015

## KURZFASSUNG

### **Lüftungskonzepte in Bildungsstätten - Einfluss der Luftqualität auf die Leistungsfähigkeit von Schülern**

Eine Vielzahl von Veröffentlichungen zum Thema Luftqualität und Schülerleistung dokumentierte in den letzten Jahren Empfehlungen hinsichtlich einer optimalen Belüftungsstrategie von Bildungsstätten. Es gilt als nachgewiesen, dass eine gute Raumluftqualität und ein behagliches Lernumfeld das Lernverhalten und den Lernerfolg von Schülern beeinflussen. Zur Sicherstellung eines solchen Umfeldes in den Klassenräumen werden für den Neubau und die Sanierung von Bildungsstätten fast ausschließlich mechanische Lüftungssysteme in Form von zentralen Lüftungsanlagen, dezentralen Lüftungsgeräten oder automatische Stellmotoren an den Fenstern empfohlen [1]. Es wird beschrieben, dass natürlich belüftete Klassenräume in der Regel nicht ausreichend mit Frischluft versorgt werden können. Nutzermotivierende Ansätze für die natürliche Lüftung konnten in bisherigen Untersuchungen als kurzfristige Lösung nachgewiesen werden [2], wurden jedoch bisher nicht im Langzeit-test bestätigt.

Im Zuge der Sanierungen von Bildungsstätten wurde der Fokus häufig auf die Verbesserung der energetischen Qualität der Gebäudehülle gelegt. Vorrangig wurden die Fassaden und Dächer gedämmt und die Fenster erneuert. Durch die Herstellung einer luftdichten Gebäudehülle nimmt der infiltrationsbedingte Luftwechsel ab. Wird dies nicht durch eine Anpassung des Lüftungskonzeptes berücksichtigt, sinkt die Raumluftqualität. Im ungünstigsten Fall könnte durch eine energetische Sanierung von Bildungsstätten ohne angepasste Lüftungskonzepte ein Leistungsabfall der Schüler eintreten.

Diese Arbeit untersucht in einer Langzeitstudie anhand beispielhafter Referenzgebäude in Deutschland sowohl für mechanisch als auch für natürlich belüftete Unterrichtsräume die Eignung und Umsetzbarkeit der Lüftungskonzepte. Dabei werden vorhandene Potenziale zur Verbesserung der Raumluftqualität aufgedeckt. Es wird untersucht, ob ausschließlich eine mechanische Belüftung als Maßnahme zur Sicherstellung eines adäquaten Lernumfeldes geeignet ist oder ob nutzermotivierende Maßnahmen für die Fensterlüftung ebenfalls über längere Zeiträume erfolgreich sein können.

Die Ergebnisse dieser Arbeit resultieren aus Untersuchungen und Messungen in insgesamt zehn Klassenräumen von vier Schulen, dem Gruppenraum einer Kindertagesstätte und dem Hörsaal einer Universität über einen Zeitraum von insgesamt 246 Monaten. Auf der Basis eigener Messergebnisse und Nutzerbefragungen wurde die Umsetzung verschiede-

ner, objektbezogener Maßnahmen, sowie die pädagogische Sensibilisierung der Beteiligten dokumentiert. Der Einsatz unterschiedlicher, mechanischer Lüftungssysteme und die Nutzer motivation zur natürlichen Lüftung wurden im Langzeittest unter realen Nutzungsbedingungen untersucht. In einer der Schulen wurde der Einfluss der Raumluftqualität auf das Lernverhalten und die Leistungsfähigkeit der Schüler analysiert.

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass die Lernleistungen sowohl von einer individuellen Lüftungskonzepterstellung, als auch von deren Umsetzung und Anwendung abhängen. Sowohl die Planer, als auch die Nutzer müssen sich intensiv mit dem Thema Raumluftqualität und deren Bereit- und Sicherstellung auseinandersetzen. Die unterschiedlichen Altersstufen der Schüler erfordern angepasste Informationsmaterialien zur Klassenraumlüftung in Form von Broschüren und Flyern. Dazu sind Nutzermotivierende Maßnahmen wie Workshops notwendig.

Bei der Erstellung von Lüftungskonzepten in Unterrichtsräumen ist zu berücksichtigen, dass die nutzer motivierte Fensterlüftung und der Einsatz dezentraler mechanischer Lüftungsgeräte für die Einhaltung einer dauerhaft guten Raumluftqualität nur mit Einschränkungen geeignet sind. Zentrale mechanische Lüftungsanlagen können bei bedarfsgerechter Dimensionierung uneingeschränkt für den Einsatz in Unterrichtsräumen empfohlen werden.

## ABSTRACT

### **Ventilation concept in educational institutions - Influence of air quality on pupil performance**

During the recent years there was already published a large number of publications on air quality and student performance regarding an optimal ventilation strategy of educational institutions. It is proved that there is a correlation between a good air quality, a comfortable learning environment and the learning behavior and the learning success of students. In case of planning new buildings and refurbishments, it is exclusively recommended to take mechanical ventilations systems or automated actuators on windows to ensure that kind of environment in the classrooms [1]. It is described that natural ventilated classrooms usually cannot be supplied with fresh air sufficiently. Approaches to motivate the users to open the windows regularly are only intended as short-term solutions and could not be detected in long-term studies as an effective measure to keep the indoor quality to a decent level [2].

In the course of renovation, the focus was mostly set on improving the energy quality of the building envelope. Mainly the facades and roofs of educational institutions were insulated and the windows were renewed. By producing an airtight building envelope the infiltration induced air exchange decreases. If this is not taken into account by adjusting the ventilation concept, the indoor air quality deteriorates. In the worst case a dynamic renewal of educational institutions without customizing the ventilation concepts could cause a loss of student-performance.

This work investigates the weakness and the difficulties of both mechanically as well as free-ventilated classrooms in a long-term study on the basis of exemplary reference buildings in Germany. In addition, the existing potential for optimization in terms of ventilation strategies is shown. It is to examine if only mechanical ventilation concepts can ensure an adequate learning environment or if even user-motivating measures for free ventilation can be successful in long term as well.

The results of this work arise from investigations and measurements in ten classrooms of four schools, the group room of a nursery and a lecture hall of a university over a period of 246 months. Based on own measurement results and user surveys the implementation of various object-related actions, as well as the pedagogical sensitization of the participants was documented. Different mechanical ventilation systems and the implementation of a user-motivating ventilation concept were tested and verified under real conditions in classrooms in a long-term use. In addition, the high influence of air quality on the learning behavior and the pupil performance was exemplified in one of the schools.

The results of this work show that the learning benefits depend on both, developing individual ventilation concepts, as well as their implementation and application. Both the planners and the users have to deal intensively with the topic of indoor air quality and its establishment and ensuring. Because of the different ages of the pupils it is required to give adapted information materials for classroom ventilation in the form of brochures and flyers. In addition, it is necessary to perform user-motivating strategies like workshops.

In creating ventilation concepts in classrooms it has to be considered that user motivated free ventilation and the decentralized mechanical ventilation units are suitable only with restrictions to ensure a permanent good indoor air quality. Central mechanical ventilation systems can be fully recommended if their air supply is sized need-based.



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>I</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Nomenklatur</b> .....	<b>X</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation.....	1
1.2 Problemstellung.....	1
1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise .....	2
<b>2 Stand des Wissens und der Forschung</b> .....	<b>3</b>
2.1 Definition der Luftqualität .....	3
2.2 Luftqualität in Bildungsstätten .....	4
2.2.1 Zusammenhang Luftqualität und Luftwechselrate.....	4
2.2.2 Freie Lüftung .....	4
2.2.3 Mechanische Lüftung mit raumluftechnischen Anlagen.....	7
2.2.4 CO <sub>2</sub> -Abgaberate durch den Menschen .....	7
2.2.5 Luftqualität in Klassenräumen .....	8
2.3 Einflussgrößen für die Leistungsfähigkeit.....	11
2.3.1 Einfluss der Luftqualität .....	11
2.3.2 Raumakustik und Schalldruckpegel .....	17
2.4 Normative Anforderungen an das Raumklima .....	18
2.4.1 Die Pettenkofer Zahl .....	18
2.4.2 DIN 1946-2/ DIN EN 13779 .....	18
2.4.3 DIN EN 15251.....	20
2.4.4 DIN EN ISO 7730 .....	23
2.4.5 Arbeitsstättenrichtlinie – ASR A3.6.....	23
2.4.6 VDI 6040 Blatt 1: Lüftungsregeln – Schulbaurichtlinien .....	25
2.4.7 Leitfaden des Bundesumweltamtes .....	26
2.5 Zusammenführung der Anforderungen an das Raumklima .....	27
2.5.1 Individueller Bewertungsmaßstab.....	27
2.5.2 Bewertung der Raumlufqualität (CO <sub>2</sub> -Konzentration) .....	27
2.5.3 Bewertung des thermischen Komforts .....	27

2.6	Weitere Anforderungen.....	28
2.6.1	Bewertung der Akustik.....	28
2.6.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	29
2.7	Stand der Forschung .....	30
2.7.1	Ausstattung von Klassenräumen.....	30
2.7.2	Raumklimatische Planungsgrundlagen für Klassenräume .....	31
2.7.3	Freie Fensterlüftung.....	32
2.7.3.1	Untersuchungen an bayrischen Schulen .....	32
2.7.3.2	Untersuchungen zum Raumklima .....	33
2.7.3.3	Gesundes Lernen in Schulen .....	35
2.7.4	Hybride Lüftung (Kombination von freier und mechanischer Belüftung) .....	35
2.7.4.1	Hybride Lüftungssysteme für Schulen.....	35
2.7.4.2	Hybride Lüftungstechnik für Schulgebäude .....	36
2.7.4.3	Pilotprojekt Schulhaus Untermoss .....	38
2.7.5	Vergleich freier und mechanischer Lüftung.....	39
2.7.5.1	Niedersächsisches Schulmessprogramm .....	39
2.7.6	Mechanische Belüftung – dezentral.....	40
2.7.7	Mechanische Belüftung - zentral.....	40
2.7.7.1	Mechanische Klassenzimmerlüftung in Österreich.....	40
2.7.7.2	CO <sub>2</sub> -gesteuerte Lüftung in Schulen .....	42
<b>3</b>	<b>Hypothesen.....</b>	<b>43</b>
<b>4</b>	<b>Methodik und Werkzeuge.....</b>	<b>44</b>
4.1	Auswahl der Referenzgebäude .....	44
4.2	Datenaufzeichnung/ Langzeitmonitoring .....	45
4.2.1	CO <sub>2</sub> -Konzentration .....	46
4.2.2	Raumlufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit .....	46
4.2.3	Fensterkontakte .....	46
4.2.4	Wetterdaten.....	47
4.2.5	Datenspeicherung und Weiterverarbeitung.....	47
4.2.6	Lüftungsampel.....	47
4.3	Akustische Messungen.....	48
4.4	Wirtschaftlichkeit.....	48
4.5	Leistungsfähigkeit und Luftqualität .....	49

<b>5 Analyse und Anpassung der Lüftungsstrategien.....</b>	<b>50</b>
5.1 Anpassung des Nutzerverhaltens.....	50
5.1.1 Analyse und Verbesserung des bestehenden Nutzerverhaltens.....	50
5.1.2 Nutzerbefragung und Interviews.....	50
5.1.3 Workshop mit Schülern .....	51
5.1.4 Handlungsleitfaden für Pädagogen .....	51
5.2 Bauliche und technische Maßnahmen .....	52
5.2.1 Planung .....	52
5.2.2 Umsetzung.....	53
<b>6 Ergebnisse.....</b>	<b>54</b>
6.1 Referenzgebäude und –räume .....	54
6.1.1 Die Schulen .....	55
6.1.1.1 Grundschule Hamburg-Harburg (GS HH) .....	55
6.1.1.2 Schulzentrum Fallersleben (SZ FL) .....	57
6.1.1.3 Schulzentrum Vorsfelde (SZ VF).....	62
6.1.1.4 Grundschule Braunschweig (GS BS).....	63
6.1.2 Die Kindertagesstätte Wolfsburg (Kita WOB).....	64
6.1.3 Die Universität Braunschweig (TU BS).....	65
6.1.4 Übersicht zu den Referenzräumen .....	66
6.2 Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität .....	68
6.2.1 Die Schulen .....	68
6.2.1.1 Grundschule Hamburg-Harburg (GS HH) .....	68
6.2.1.2 Schulzentrum Fallersleben (SZ FL) .....	69
6.2.1.3 Schulzentrum Vorsfelde (SZ VF).....	69
6.2.1.4 Grundschule Braunschweig (GS BS).....	70
6.2.2 Die Kindertagesstätte Wolfsburg (Kita WOB).....	70
6.2.3 Die Universität Braunschweig (TU BS).....	70
6.3 Auswertung der Messdaten zur Bewertung der Luftqualität.....	71
6.3.1 Die Schulen .....	73
6.3.1.1 Grundschule Hamburg-Harburg (GS HH) .....	73
6.3.1.2 Schulzentrum Fallersleben (SZ FL) .....	80
6.3.1.3 Schulzentrum Vorsfelde (SZ VF).....	95
6.3.1.4 Grundschule Braunschweig (GS BS).....	98

6.3.2 Die Kindertagesstätte Wolfsburg (Kita WOB) .....	102
6.3.3 Die Universität Braunschweig (TU BS) - Einzelmessungen.....	105
6.3.4 Gegenüberstellung der Ergebnisse der Referenzräume .....	109
6.3.4.1 Luftwechsel .....	109
6.3.4.2 CO <sub>2</sub> -Konzentration (Raumluftqualität).....	110
6.3.4.3 Thermische Behaglichkeit .....	112
6.4 Auswertung der Nutzerbefragung zur Luftqualität .....	114
6.4.1 Die Schulen.....	114
6.4.1.1 Grundschule Hamburg-Harburg (GS HH) .....	114
6.4.1.2 Schulzentrum Fallersleben (SZ FL).....	117
6.4.1.3 Schulzentrum Vorsfelde (SZ VF) .....	120
6.4.1.4 Grundschule Braunschweig (GS BS) .....	123
6.4.2 Die Kindertagesstätte Wolfsburg (Kita WOB) .....	125
6.4.3 Die Universität Braunschweig (TU BS) .....	127
6.4.4 Zusammenfassung der Nutzerbefragung .....	128
6.5 Auswertung der Messdaten zur Akustik .....	132
6.5.1 Nachhallzeit.....	132
6.5.2 Schalldruckpegel .....	132
6.5.2.1 Grundschule Hamburg-Harburg (GS HH) .....	133
6.5.2.2 Schulzentrum Fallersleben (SZ FL).....	134
6.6 Auswertung der Wirtschaftlichkeitsberechnung .....	136
6.6.1.1 Eingangsdaten .....	136
6.6.1.2 Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsberechnung .....	137
6.7 Bewertung der umgesetzten Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität.....	139
6.7.1 Die Schulen.....	139
6.7.1.1 Grundschule Hamburg-Harburg (GS HH) .....	139
6.7.1.2 Schulzentrum Fallersleben (SZ FL).....	140
6.7.1.3 Schulzentrum Vorsfelde (SZ VF) .....	141
6.7.1.4 Grundschule Braunschweig (GS BS) .....	142
6.7.2 Die Kindertagesstätte (Kita WOB) .....	142
6.7.3 Die Universität Braunschweig (TU BS) .....	143
6.8 Auswertungen der Tests zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit.....	144
6.8.1 Randbedingungen an den Testtagen .....	144

---

6.8.2 Ergebnisse der Leistungstests.....	147
6.8.3 Ableitung der Einflussgrößen für Leistungsfähigkeit.....	148
<b>7 Verifizierung der Hypothesen und Diskussion.....</b>	<b>150</b>
<b>8 Zusammenfassung und Schlussfolgerung .....</b>	<b>154</b>
<b>9 Ausblick .....</b>	<b>157</b>
<b>Veröffentlichungen und Vorträge .....</b>	<b>158</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>159</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>162</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>164</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>169</b>

# NOMENKLATUR

## Begriffe und Abkürzungen

$CO_2$	Kohlenstoffdioxid	$RAL$	Raumluftqualität
$VOC$	Volatile Organic Compounds	$IDA$	Raumluftqualität
$r.F.$	relative Luftfeuchtigkeit	$AUL$	Außenluftqualität
$LGA$	Landesgesundheitsamt	$ODA$	Außenluftqualität
$LTG$	Lüftungsggerät	$P$	Anzahl der Personen
$RLT$	Raumlufttechnische Anlagen	$A$	Alter der Personen
$IDA$	Indoor Air Quality	$EnEG$	Energieeinsparungsgesetz
$ASR$	Arbeitsstättenrichtlinie	$GS$	Grundschule
$T_{ODA}$	Außenlufttemperatur	$Kita$	Kindertagesstätte
$T_{IDA}$	Raumtemperatur	$SZ$	Schulzentrum
$p_{ODA}$	Druckverhältnisse Außenluft	$TU$	Technische Universität
$p_{IDA}$	Druckverhältnisse Raumluft	$STI$	Speech Transmission Index/ Sprachverständlichkeitsindex

## Einheiten

$A$	Jahr	$m^3$	Kubikmeter
$D$	Tag	$ppm$	Parts per Million
$H$	Stunde	$L$	Liter
$S$	Sekunde	$^{\circ}C$	Grad Celsius
$G$	Gramm	$K$	Kelvin
$kg$	Kilogramm	$kW$	Kilowatt
$Pa$	Pascal	$kWh$	Kilowattstunden
$m$	Meter	$Hz$	Hertz
$m^2$	Quadratmeter	$dB(A)$	Dezibel (A-Bewertung)

## Formelzeichen

$\Delta p_A$	Druckdifferenz des Auftriebes [Pa]	$V_{zu}$	Luftvolumenstrom RLT-Anlagen [ $m^3/h$ ]
$g$	Gravitationskonstante [-]	$LW$	Luftwechselrate [ $h^{-1}$ ]
$\Delta \rho$	Differenz der Dichte [ $kg/m^3$ ]	$\theta_{rm}$	gleitender Mittelwert Temp. aktueller Tag [ $^{\circ}C$ ]
$\Delta z$	Höhenunterschied [m]	$\theta_{rm-1}$	gleitender Mittelwert Temp. vorheriger Tag [ $^{\circ}C$ ]
$\Delta p$	Druckdifferenz [Pa]	$\theta_{ed-1}$	Tagesmittelwert Außentemp. vorheriger Tag [ $^{\circ}C$ ]
$q_{v,SUP}$	Zuluftvolumenstrom [ $m^3/h$ ]	$\alpha$	Konstante [-]
$n$	Anzahl der Personen [-]	$t$	Laufzeit [h/a]
$q_p$	Lüftungsrate je Person [ $m^3/(h \cdot Person)$ ]	$T_{Soll}$	Sollnachhallzeit [s]
$A$	Grundfläche [ $m^2$ ]	$P$	Schalldruck [Pa]
$\dot{V}_R$	Raumvolumen [ $m^3$ ]	$L_P$	Schalldruckpegel [dB]
$\dot{V}_{AU}$	Außenluftvolumenstrom [ $m^3/h$ ]	$\alpha$	Annuitätenfaktor [-]

# 1 EINLEITUNG

## 1.1 Ausgangssituation

Der Mensch hält sich bis zu 80 % des Tages in geschlossenen Räumen auf. Kinder, Jugendliche und junge Erwachsene verbringen dabei bis zu einem Drittel des Tages in Schulen oder anderen Bildungseinrichtungen [3]. Durch die Anpassung des Betreuungsangebots an eine flexible Arbeitswelt wird sich dieser Anteil zukünftig noch verlängern.

Verschiedene Faktoren haben in diesem Zusammenhang Einfluss auf das menschliche Wohlbefinden und somit auf die Lern- und Lehrleistung. Dazu gehören sowohl die Raumakustik [4], als auch eine ausreichende Tageslichtversorgung und die Beleuchtung [5]. Im besonderen Maße trägt das thermische Umfeld für die Aufenthaltsqualität in Klassenräumen bei. Die Raumluftqualität und die thermische Behaglichkeit sind maßgebend für gute Lern- und Lehrergebnisse [6][7]. Sowohl die Lernfähigkeit von Schülern und Studenten als auch die Lehrfähigkeit von Pädagogen und Dozenten ist an eine hochwertige Raumluftqualität gekoppelt [8]. Eine erhöhte Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>)-Konzentration und eine zu hohe Raumlufttemperatur schränken das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit ein [9].

## 1.2 Problemstellung

Es gibt in Deutschland etwa 45.000 allgemeinbildende und berufsbildende Schulen [10], 430 Hochschulen und Universitäten [11] und 52.000 Kindergärten und Kindertagesstätten [12]. Viele dieser Bildungsbauten unterschiedlicher Baualtersklassen sind noch immer sanierungsbedürftig. Aufgrund hoher klimapolitischer Ziele wird sowohl im Neubau als auch in der Sanierung in erster Linie eine Verbesserung der energetischen Qualität der Gebäudehülle angestrebt. Die Planung von Neubauten berücksichtigt zwar den Einbau zentraler oder dezentraler Lüftungssysteme gemäß den aktuellen Anforderungen [13], jedoch wird nur vereinzelt im Betrieb geprüft, ob raumlufttechnische Anlagen entsprechend der Planung funktionieren. Nur selten findet eine Rückkopplung auf die Nutzerzufriedenheit oder die Güte des entstandenen Lernumfeldes statt. Eine Prüfung der thermische Behaglichkeit und der raumklimatischen Bedingungen wird häufig erst durchgeführt, wenn die Nutzer nach einer Sanierung über eine Verschlechterung der Raumluftqualität und damit einhergehend über Müdigkeit und Unaufmerksamkeit der Schüler klagen.

In den Bestandsbauten werden vorhandene mechanische Lüftungsanlagen teilweise nicht mehr genutzt oder laufen tagsüber durchgehend mit maximaler Leistung. Dieser permanente Betrieb der Anlagen führt zu hohen Stromkosten. Weitere Möglichkeiten, wie der Einsatz einer Nachtlüftung zur passiven Kühlung, werden dabei jedoch nicht ausgenutzt [14]. Zu-

dem führt das bestehende Lüftungsverhalten in frei belüfteten Gebäuden – am weitesten verbreitet ist die Dauerlüftung über gekippte Fenster – zu erheblichen Energieverlusten in den Wintermonaten.

### **1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise**

Ziel dieser Arbeit ist es, die Möglichkeiten der Bereitstellung einer der Lernumfeld entsprechenden Raumluftqualität und thermischen Behaglichkeit mittels natürlicher und mechanischer Belüftung zu prüfen und zu validieren. Der Einfluss der Raumluftqualität auf die Lern- und Lehrqualität wird anhand ausgewählter, beispielhafter Bildungsstätten aufgezeigt.

1. Auf Grundlage nationaler und internationaler Studien wurden verschiedene Lüftungskonzepte an ausgewählten Referenzgebäuden recherchiert und untersucht. Sowohl freie, als auch mechanische Belüftungskonzepte von Klassenräumen, sowie die Kombination beider Systeme (hybride Lüftung) wurden untersucht und die Funktionalität hinsichtlich der Bereitstellung und Einhaltung einer der Schülerleistung angemessenen Raumluftqualität bewertet.
2. Die Einflussgrößen zur Gewährleistung einer guten Raumluftqualität und eines hohen thermischen Komforts in Bezug auf die unterschiedlichen Anforderungen, Nutzungen und baulichen Gegebenheiten wurden herausgestellt und auf Basis von Messergebnissen, Nutzerbefragungen und Leistungstests verifiziert.
3. Individuelle Lüftungsstrategien wurden an zwölf Bildungsstätten umgesetzt. Die Schüler und Lehrer wurden permanent in das Projekt eingebunden, sodass eine pädagogische Sensibilisierung für die Lüftungsthematik erzielt wurde. Zur Vermittlung des erforderlichen Wissens fanden Workshops statt. Zudem wurden Nutzerbefragungen in Form von Fragebögen und Interviews durchgeführt.
4. Die Wirksamkeit der Lüftungskonzepte wurde anhand von exemplarischen Tests zur Leistungsfähigkeit überprüft. Die Korrelation zwischen Komfortbedingungen und Lernverhalten wird aufgezeigt und bestätigt.
5. Ausgehend von den Ergebnissen werden energieeffiziente und wirtschaftliche Lösungskonzepte für die jeweiligen Bedürfnisse der Gebäude- und Schulformen aufgezeigt.



## 2 STAND DES WISSENS UND DER FORSCHUNG

### 2.1 Definition der Luftqualität

Die Luftqualität stellt einen der wichtigsten Einflussfaktoren für das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit des Menschen dar [15]. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Raumluft dient als messbarer Indikator für die Bewertung der Raumluftqualität, da die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft mit der Personenzahl proportional ansteigt. Sie ist dabei sowohl von der Aufenthaltsdauer, der Aktivität der anwesenden Personen als auch von den baulichen Gegebenheiten abhängig. Die subjektive Empfindung zur Güte der Raumluft von Personen, die sich bereits über einen längeren Zeitraum in einem Raum aufhalten, ist meist falsch, da der Mensch keine Rezeptoren für die CO<sub>2</sub>-Konzentration besitzt. Er kann lediglich beim Betreten eines Raumes bemerken, dass die vorhandene Raumluft bereits „verbraucht“ ist, jedoch passt er sich schnell der Umgebung an und nach wenigen Minuten lässt diese Empfindung nach [16]. Die Außenluft besitzt in ländlichen Gebieten einen CO<sub>2</sub>-Gehalt von 0,038 Vol.-% (380 ppm). In städtischen Gebieten können Werte von bis zu 0,07 Vol.-% (700 ppm) auftreten [17]. Für Deutschland gelten definierte Grenzwerte zur Qualität der Innenraumluft mit Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Konzentration, welche in Tabelle 1 aufgeführt sind und in Kapitel 2.2 ausführlich erläutert werden.

**Tabelle 1 CO<sub>2</sub>-Grenzwerte [18],[19],[20]**

0,10 Vol.-%	1.000 ppm	Maximalwert nach Pettenkofer 1858
0,14 Vol.-%	1.400 ppm	Maximalwert nach DIN EN 13779
0,15 Vol.-%	1.500 ppm	Maximalwert nach DIN 1946-2

Tabelle 2 zeigt, dass die Luftqualität das Wohlbefinden des Menschen nachweislich beeinflusst. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration ist zwar erst ab 50.000 ppm (5 Vol.-%) für den Menschen giftig, verursacht jedoch schon bei wesentlich geringeren Konzentrationen ab 1.500 ppm Befindlichkeitsstörungen wie Müdigkeit, Konzentrationsschwäche oder Kopfschmerzen und führt besonders bei jungen Menschen zu einem Leistungsabfall [21].

**Tabelle 2 Gesundheitsrelevante CO<sub>2</sub>-Konzentrationen [22]**

ab 0,20 Vol.-%	2.000 ppm	Konzentrationsschwierigkeiten, Müdigkeit
ab 0,50 Vol.-%	5.000 ppm	Kopfschmerzen, leichtes Unwohlsein
ab 3,00 Vol.-%	30.000 ppm	Kopfdruck, Atemstörungen, Unwohlsein
ab 4,00 Vol.-%	40.000 ppm	Ohrensausen, Herzklopfen, Blutdruckanstieg
ab 5,00 Vol.-%	50.000 ppm	Schwindel, Benommenheit
ab 8,00 Vol.-%	80.000 ppm	Krämpfe, Ohnmacht, Atemstillstand, Tod

## 2.2 Luftqualität in Bildungsstätten

### 2.2.1 Zusammenhang Luftqualität und Luftwechselrate

Ein entscheidender Faktor für die Raumlufqualität stellt die Luftwechselrate dar. Diese beschreibt das Verhältnis zwischen der dem Raum pro Stunde zu- bzw. abgeführten Luftmenge (Luftvolumenstrom) und dem Raumvolumen. Abhängig von der Personenbelegung der Räume und dem Raumvolumen muss der Luftvolumenstrom für eine ausreichende Belüftung eines Raumes dementsprechend bemessen sein. Wird beispielsweise für einen Klassenraum mit einem Innenraumvolumen von  $200 \text{ m}^3$  ein dreifacher Luftwechsel ( $n = 3 \text{ h}^{-1}$ ) angestrebt, so bedeutet dies einen Luftvolumenstrom von  $600 \text{ m}^3$  pro Stunde.

Je höher die angesetzte Luftwechselrate, desto geringer ist die Verunreinigung der Raumluft. Jedoch führt ein zu hoch bemessener Luftstrom zu starken Luftströmen im Raum und unter Umständen zu subjektiv unangenehmen Zugserscheinungen für die Personen im Raum.

Die genaue Einhaltung des angestrebten Luftwechsels ist in der Regel nur mit dem Einsatz raumluftechnischer Anlagen sicherzustellen. Die Luftwechselrate bei der freien Fensterlüftung ist hingegen von diversen Faktoren abhängig. Das Nutzerverhalten, die Anzahl und Größe der Fenster, die Öffnungszeiten und die Öffnungsweite, aber auch die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft sowie die Windgeschwindigkeit und -richtung beeinflussen die Luftwechselrate.

### 2.2.2 Freie Lüftung

Bei der freien oder natürlichen Lüftung entsteht der Austausch der Luft ausschließlich über das Öffnen der Fenster. Die Effektivität der freien Lüftung wird bauseitig durch die Fensterform (Bauart und Öffnungsanordnung), den effektiven freien Querschnitt und der Höhendifferenz zwischen zwei Lüftungsöffnungen bestimmt [23]. Dabei erfolgt der Luftaustausch aufgrund des thermischen Auftriebs und des Winddrucks [24]. Der thermische Auftrieb entsteht durch natürliche Druckdifferenzen aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft.

**In Näherung ergibt sich die Differenz des thermischen Auftriebes wie folgt:**

$$\Delta\rho_A = g \cdot \Delta\rho \cdot \Delta z$$

*Dabei ist:*

$\Delta\rho_A$  *Druckdifferenz des Auftriebes*

$g$  *Gravitationskonstante*

$\Delta\rho$  *Differenz der Dichte*

$\Delta z$  *Höhenunterschied*

In den Wintermonaten sind die Temperaturdifferenz und damit auch die Dichtedifferenz zwischen der Innen- und Außenluft größer als in den Sommermonaten, so dass es zu einer größeren Druckdifferenz ( $\Delta p_A$ ) kommt. Die geringe Temperaturdifferenz im Sommer führt dazu, dass auch die Druckdifferenz nahe Null ist. Liegt die Außentemperatur im Sommer oberhalb der Raumlufthtemperatur ( $T_{ODA} > T_{IDA}$ ), so strömt die Außenluft im oberen Bereich der Fensteröffnung in den Raum und die Raumluft im unteren Fensterbereich hinaus. Im Winter strömt die warme Innenraumluft ( $T_{IDA}$ ) im oberen Teil der Fensteröffnung nach außen, während die kalte Außenluft ( $T_{ODA}$ ) im unteren Teil der Fensteröffnung in den Raum hineinströmt. Der Luftaustausch ist dabei dort am größten, wo die Druckdifferenz ( $\Delta p_A$ ) am höchsten ist (Abb. 1) Daraus folgt, dass die zu erwartende Luftwechselrate bei freier Fensterlüftung aufgrund der hohen Temperatur- und Druckdifferenzen zwischen Innenraum- und Außenluft im Winter höher ist als in den Sommermonaten.

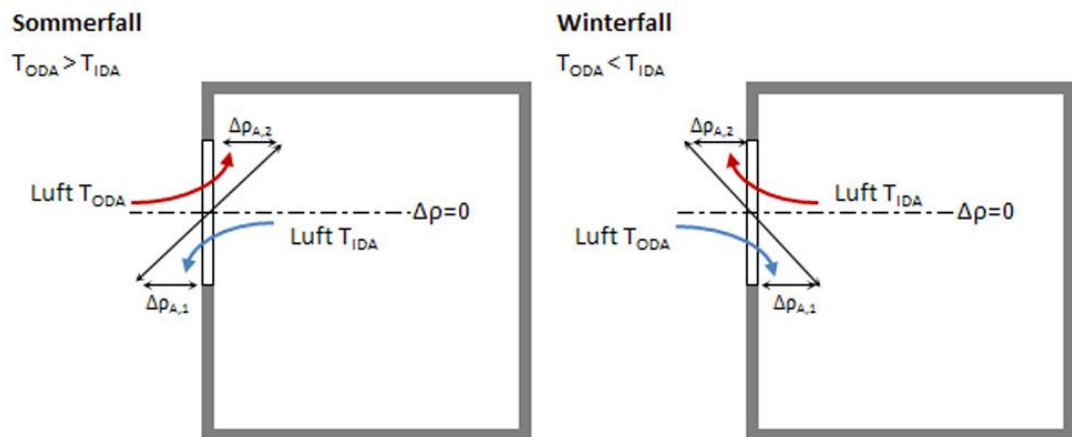


Abb. 1 Strömungsverhältnisse bei geöffneten Fenstern [25]

Weiterhin spielt die Windeinwirkung auf ein Gebäude eine Rolle in der freien Fensterlüftung. Auf der Wind zugewandten Seite (Luv) bildet sich an der Fassade ein Überdruck, auf der abgewandten Seite (Lee) entsteht ein Unterdruck (Abb. 2).

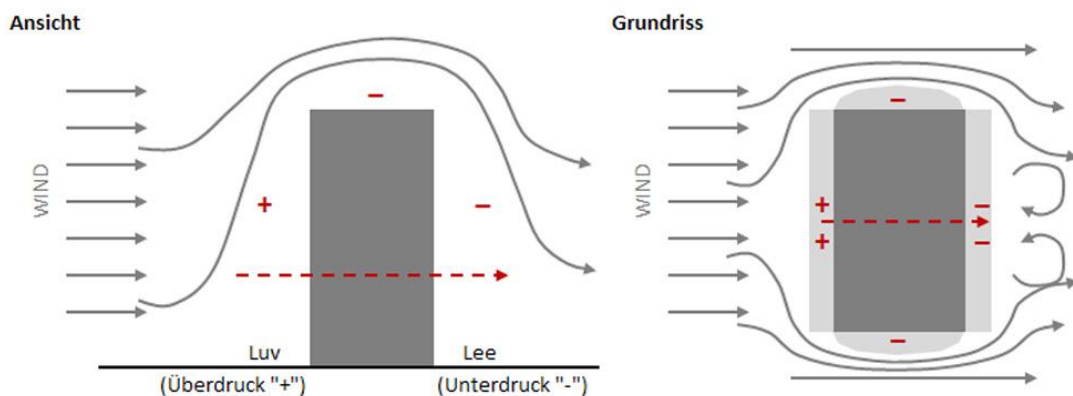
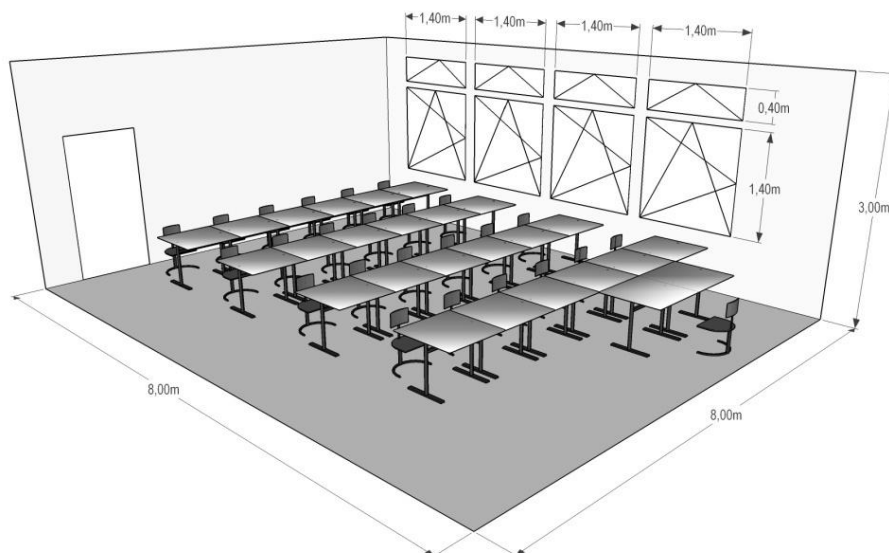


Abb. 2 Umströmung Gebäude [25]

Der Winddruck überlagert sich mit dem Druck durch den thermischen Auftrieb. Dabei kommt es zu einer Verschiebung der Druckdifferenz, so dass auf der Luvseite die Luftströmung im unteren Fensterbereich und auf der Leeseite oberen Fensterbereich verstärkt wird.

Entsprechend dieser Grundlagen sind Berechnungen zur Prognose von Luftwechselraten möglich [26]. Zugrunde gelegt wird dabei ein Klassenraum mit einer Grundfläche von  $64 \text{ m}^2$ , einem Raumvolumen von  $192 \text{ m}^3$  und einer einseitigen Belüftung über Fensterflügel mit Drehkippfunktion und Oberlichtern mit Kippfunktion. Der angesetzte Fensterflächenanteil liegt bei 42 % (siehe Abb. 3). Diese Annahme entspricht einem beispielhaften Klassenraum, wie er in den meisten Bestandsgebäuden zu finden ist.



**Abb. 3 Beispielklassenraum für Berechnungen und Simulationen**

Tabelle 3 zeigt die berechneten Luftwechselraten bei Kipp- und Stoßlüftung<sup>1</sup>. Für die Berechnung werden als äußere Parameter Windstille mit  $1 \text{ m/s}$  und im Sommerfall eine Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen von  $2 \text{ Kelvin}$  angesetzt. Im Winterfall beträgt die angesetzte Temperaturdifferenz der Innen- und Außenluft  $20 \text{ Kelvin}$ .

**Tabelle 3 Luftwechselraten Fensterlüftung Sommer und Winter [27]**

Fensterstellung	Lüftungsart	Luftwechsel [ $\text{h}^{-1}$ ]	
		Sommer	Winter
Fenster geschlossen	Fugenlüftung [28]	0,5	0,5
$10^\circ$ Öffnungswinkel	Kipplüftung (Spaltlüftung)	1,0	3,0
$90^\circ$ Öffnungswinkel	Stoßlüftung	9,9	30,0

<sup>1</sup> Die Berechnungen zum Luftwechsel bei natürlicher Lüftung finden sich in Anhang 4.

### 2.2.3 Mechanische Lüftung mit raumluftechnischen Anlagen

Bei einer mechanischen Lüftung erfolgt der Luftaustausch ausschließlich oder unterstützend kontrolliert mechanisch [29]. Raumluftechnische Anlagen sorgen mit gezielter Luftführung und einem oder mehreren Ventilatoren bedarfsbezogen und unabhängig von äußeren Einflüssen für eine konstante Luftwechselrate [30]. Dabei dienen raumluftechnische Anlagen (RLT-Anlagen) meist nicht ausschließlich dem Luftaustausch. Gemäß der Definition nach DIN 1946-2 [20] dienen RLT-Anlagen sowohl der Abfuhr von Luftverunreinigungen (Geruchsstoffe, Schadstoffe), als auch von sensiblen Wärmelasten (Heiz- und Kühllasten) und latenten Wärmelasten (Be- oder Entfeuchtungslasten). Unterschieden wird grundsätzlich zwischen zentralen und dezentralen Lüftungssystemen. Dabei versorgen zentrale Lüftungsanlagen mehrere Räume, Gebäudetrakte oder ganze Gebäude. Die Leitungskanäle für Zu- und Abluft benötigen entsprechend Platz und besondere Maßnahmen hinsichtlich des Schall- und Brandschutzes sind erforderlich [31]. Dezentrale Lüftungsgeräte hingegen versorgen lediglich einzelne Räume und können dementsprechend individuell betrieben werden. Sie benötigen kein zusätzliches Luftkanalsystem. Der Anschluss der Zu- und Abluftkanäle erfolgt in der Regel über die Fassade im Brüstungsbereich. Weiterhin wird bei raumluftechnischen Anlagen zwischen Abluftanlagen und Zu- und Abluftanlagen differenziert. Bei Abluftanlagen wird die Innenraumluft aus den Räumen mechanisch abgeführt und Außenluft strömt über Luftdurchlässe aufgrund des entstehenden Unterdrucks in den Raum nach. Bei Zu- und Abluftanlagen erfolgt sowohl die Luftabfuhr als auch die Luftzufuhr mechanisch mit aufeinander angepassten Luftvolumenströmen.

Eine Unterscheidung der Systeme erfolgt weiterhin in RLT-Anlagen mit und ohne Wärmehückgewinnung (WRG).

### 2.2.4 CO<sub>2</sub>-Abgaberate durch den Menschen

Die CO<sub>2</sub>-Abgaberate eines Menschen ist abhängig vom Alter und dem Aktivitätsgrad (Tabelle 4). Die Abgaberate für Schüler in Klassenräumen wird mit 20 l/h angenommen.

*Tabelle 4 CO<sub>2</sub>-Abgaberate in [l/(h\*Person)] von Personen [27]*

<b>Tätigkeit/ Aktivitätsgrad</b>	<b>Alter in Jahren</b>					
	<b>&lt;1</b>	<b>1-3</b>	<b>4-6</b>	<b>7-9</b>	<b>10-14</b>	<b>&gt;14</b>
<i>Ruhe</i>	2,3	4,8	9,7	14,0	20,0	22,0
<i>Leichte Aktivität</i>	4,8	9,7	20,0	28,0	38,0	43,0
<i>Mäßige Aktivität</i>	9,7	20,0	38,0	58,0	77,0	85,0
<i>Intensive Aktivität</i>	17,0	33,0	67,0	102,0	135,0	152,0

Die Entwicklung der Luftqualität in einem Raum ist abhängig von dem Aktivitätsgrad der Personen, der Belegungsdichte und der vorhandenen Lüftungssituation. Bei einer CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von über 1.000 ppm (0,10 Vol.-%) wird die Innenraumluft insbesondere im Hinblick auf Körpergerüche als ein Indikator für inakzeptabel angesehen [32].

### 2.2.5 Luftqualität in Klassenräumen

Über Simulationen<sup>II</sup> mittels der Modellsoftware QUIRL/CO<sub>2</sub> [22][27] kann die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Innenraumluft sowohl für die freie Fensterlüftung als auch für mechanisch belüftete Klassenräume aufgezeigt werden.

Der Raum für die Simulationen wird entsprechend des beschriebenen Beispielraumes aus Kapitel 2.2.2 mit einer Fläche von 64 m<sup>2</sup>, einem Raumvolumen von 192 m<sup>3</sup> und einer Belegung mit 25 Personen angesetzt. Die Infiltration bei geschlossenen Fenstern wird mit 0,5 h<sup>-1</sup> angenommen.

Für die Simulationen wird ein Unterrichtstag mit sechs Schulstunden mit je 45 Unterrichtsminuten und fünf bis zehn Pausenminuten zwischen den Unterrichtseinheiten zugrunde gelegt. Es wird angenommen, dass die Personen den Klassenraum in den Unterrichtspausen verlassen. Die angenommene CO<sub>2</sub>-Konzentration zu Unterrichtsbeginn liegt bei 380 ppm. Die angesetzte CO<sub>2</sub>-Abgaberate für die Schüler im Klassenraum liegt bei 20 l/h. Angenommen wird, dass die Fenster in der Unterrichtszeit geschlossen bleiben und während der Pausenzeiten geöffnet werden. Die beiden Simulationskurven in Abb. 4 zeigen die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Konzentration für die Luftwechselraten bei Kipp- und Stoßlüftung in den Sommermonaten. Angenommen wird einer Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen von 2 Kelvin und Windstille mit 1 m/s.

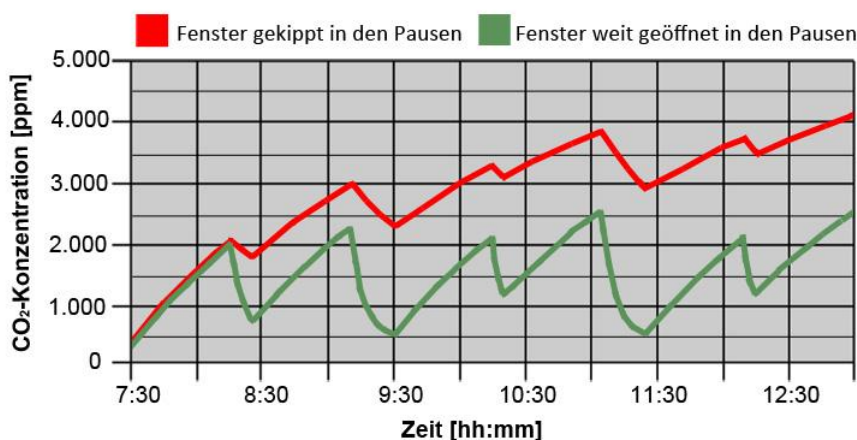


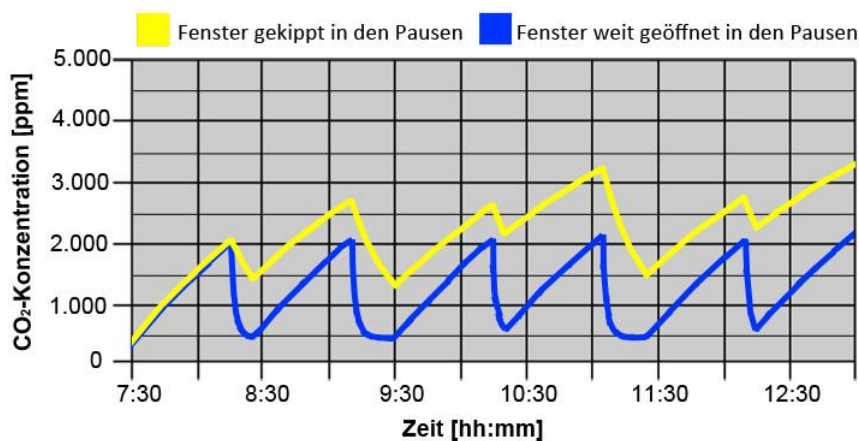
Abb. 4 Simulation CO<sub>2</sub>-Konzentration Lüftungsverhalten Sommer

<sup>II</sup> CO<sub>2</sub>-Modellsoftware [Niedersächsisches Landesgesundheitsamt]

Die Simulationsfälle der Sommermonate zeigen, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration bereits in den ersten 45 Unterrichtsminuten auf 2.000 ppm ansteigt. Bei einer Kipplüftung in den Pausen reduziert sich der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Innenraumluft nur minimal. Zu Beginn der zweiten Unterrichtsstunde liegt der CO<sub>2</sub>-Gehalt bei knapp 1.800 ppm und steigt in den darauf folgenden 45 Unterrichtsminuten auf 3.000 ppm. Am Ende des Unterrichtstages wird eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von mehr als 4.000 ppm erreicht.

Eine konsequente Stoßlüftung in den Pausen reduziert trotz der geringen Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft den CO<sub>2</sub>-Gehalt der Innenraumluft vor dem nächsten Unterrichtsbeginn auf knapp 900 ppm. Zwar steigt folgend die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Unterrichtszeit erneut stark an, sie kann jedoch über den Unterrichtstag mittels Stoßlüftung in den Pausen wieder auf ein Niveau unterhalb von 1.400 ppm gebracht werden.

Die beiden Simulationskurven in Abb. 5 zeigen die Konzentrationsentwicklung zum CO<sub>2</sub>-Anteil bei Kipp- und Stoßlüftung in der Heizperiode. In dem Fall wird eine Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen von 20 Kelvin und Windstille mit 1 m/s angenommen.

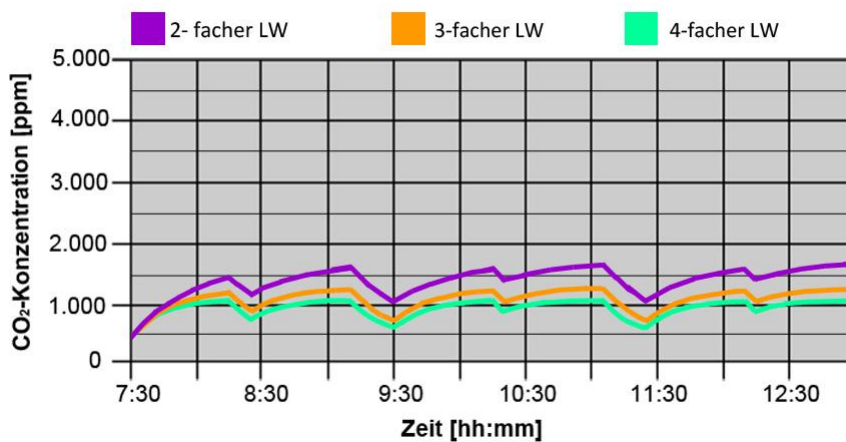


**Abb. 5 Simulation CO<sub>2</sub>-Konzentration Lüftungsverhalten Winter**

In den beiden Simulationsfällen der Wintermonate steigt die CO<sub>2</sub>-Konzentration in den ersten 45 Unterrichtsminuten wie bei den vorhergehenden Simulationen auf 2.000 ppm. Bei einer Kipplüftung in den Pausen zeigt sich, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Innenraumluft trotz einer höheren Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft nur geringfügig reduziert werden kann. Nach der zweiten Unterrichtsstunde liegt der Wert der Innenraumluft ebenfalls oberhalb von 2.500 ppm. Über den Unterrichtstag ergeben sich auch bei dieser Simulation CO<sub>2</sub>-Konzentrationen oberhalb von 3.000 ppm. Eine konsequente Stoßlüftung in den Pausen hingegen bringt die Luftqualität im Klassenraum vor dem nächsten Unterrichtsbeginn nach jeder Schulstunde wieder auf Außenluftniveau, so dass im Verlauf des Unterrichtstages maximal 2.000 ppm erreicht werden.

Die Simulationen für freie Fensterlüftung, sowohl für den Winter- als auch für den Sommerfall, zeigen, dass eine konsequent durchgeführte Stoßlüftung zu einer signifikanten Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Konzentration beiträgt. Die praktische Umsetzung im Schulalltag ist jedoch in den meisten Fällen nicht konsequent oder regelmäßig.

Die Simulationskurven in Abb. 6 zeigen die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Konzentration für mechanische Belüftung von Klassenräumen. Es wird deutlich, dass ein konstanter Luftvolumenstrom die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Klassenraum signifikant und kontinuierlich positiv beeinflusst. Die Kurve der CO<sub>2</sub>-Entwicklung verläuft insgesamt flacher als bei den Simulationen mit freier Fensterlüftung.



**Abb. 6 Simulation CO<sub>2</sub>-Konzentration Luftwechselraten**

Bei einem kontinuierlichen 2-fachen Luftwechsel bleibt die CO<sub>2</sub>-Konzentration bereits unterhalb von 2.000 ppm. Es werden Spitzenwerte von knapp 1.700 ppm erreicht. Ein 3-facher Luftwechsel führt zu einer CO<sub>2</sub>-Werteentwicklung unterhalb von 1.500 ppm und bei einem 4-fachen Luftwechsel werden nur geringfügig CO<sub>2</sub>-Konzentrationen oberhalb von 1.000 ppm erreicht. Ein 4-facher Luftwechsel bedeutet bei dem angesetzten Beispielklassenraum (Kapitel 2.2.2, Seite 6, Abb. 3) einen Luftvolumenstrom von knapp 800 m<sup>3</sup>/h.



## 2.3 Einflussgrößen für die Leistungsfähigkeit

Der Zusammenhang zwischen der Gesundheit und der Leistungsfähigkeit des Menschen und der thermischen Behaglichkeit sind unumstritten und wurden bereits in zahlreichen Projekten und Studien belegt [33]. Hingegen ist der Einfluss von Raumlufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit auf die Leistungsfähigkeit von Schülern ist nicht in gleicher Weise wissenschaftlich belegt wie die der CO<sub>2</sub>-Konzentration und liefert einen Ansatz für die weitere Bearbeitung.

### 2.3.1 Einfluss der Luftqualität

Der Zusammenhang zwischen Leistungsfähigkeit des Menschen und der Luftqualität wurde erstmals 1885 von Max von Pettenkofer [18] untersucht. Er behandelt die Frage nach „*guter Raumluftqualität*“ und dem „*notwendigen Luftwechsel*“ für Innenräume. Er beschreibt die Qualität der Luft über ihre Reinheit und definiert zwei Arten der Unreinheit. Demnach ist die Raumluft unrein, wenn sie fremdartige Stoffe enthält oder die Bestandteile der Raumluft in einem anormalen Mischverhältnis vorhanden sind. Derartigen Verunreinigungen müsse mittels Belüftung entgegen gewirkt werden. Pettenkofer schreibt, dass der Mensch die einzige Verunreinigungsquelle in Wohnräumen darstellt und dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration, ausgelöst durch die Atmung und Ausdünstung des Menschen, in der Raumluft daher als Qualitätsmaßstab angesetzt werden kann. Aus Feldstudien und Messungen leitet er ab, dass eine Raumluft mit einer CO<sub>2</sub>-Konzentration oberhalb von 1.000 ppm (0,01 Vol.-%) als unbehaglich empfunden wird. Dieser Wert ist auch heute noch als „*Pettenkofer Zahl*“ ein gängiger Richtwert für die Beurteilung der Raumluftqualität.

Im Jahr 1979 wurde eine Studie mit 72 Schülern zur Ermittlung des Einflusses der Raumlufttemperatur auf die Leistungsfähigkeit durchgeführt [15]. In Vierergruppen wurden die Schüler jeweils einem von drei verschiedenen Temperaturverläufen ausgesetzt und mussten Leistungstests zu verschiedenen Themen durchführen. Diese Tests bestanden aus Text- und Vokabel- und Kreativitätsaufgaben, Erinnerungsübungen und einem Reaktionstest. Zusätzlich mussten die Schüler Angaben zur empfundenen Behaglichkeit machen. Das Ergebnis der Studie zeigte, dass Aufgaben, die Konzentration erforderten, besser bei niedrigen Temperaturen um die 23°C ausgeführt wurden. Bei Gedächtnisübungen und Reaktionstests wurden hingegen bei höheren Temperaturen bis 26°C bessere Leistungen erzielt. Daraus ergab sich die Annahme, dass eine zeitliche Strukturierung des Schulalltags notwendig sei. Aufgaben, die ein hohes Maß an Konzentration erfordern, sollten auf den Vormittag gelegt werden, da zu der Zeit die Temperaturen im Raum meist noch niedriger sind.

In einer weiteren Studie wurde 1982 ebenfalls die Raumluft über die CO<sub>2</sub>-Konzentration

beurteilt [34]. In einem Testraum wurden mehrere Versuche mit unterschiedlicher Personenzahl, Tätigkeit der Personen und Luftwechselzahl durchgeführt und kontinuierlich der CO<sub>2</sub>-Gehalt gemessen. Die Testpersonen mussten im 15-Minuten-Rhythmus die Gerüche im Testraum nach Geruchsintensität und Geruchsbelästigung beurteilen. Dazu verglichen die Testpersonen die Raumluft mit zwei Pyridin-Konzentrationen. Das Ergebnis zeigte einen starken Zusammenhang zwischen dem CO<sub>2</sub>-Gehalt und der Geruchsintensität. Eine Geruchsbelästigung wurde erst ab einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1.500 ppm beschrieben.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgte eine Studie von 1996 [35]. In 22 Klassenräumen von fünf Schulen wurden die Zusammenhänge zwischen CO<sub>2</sub>-Konzentration der Raumluft sowohl mit der Gesundheit der Schüler, als auch mit deren Leistung untersucht. Gemessen wurden Luftwechselrate, CO<sub>2</sub>-Konzentration der Raumluft, flüchtige organische Verbindungen (VOCs), Raumlufttemperatur und Raumluftfeuchtigkeit, sowie Strahlungsasymmetrie und Luftgeschwindigkeit. Die Schüler nahmen an Reaktionstests teil und füllten zudem zur Bewertung des gesundheitlichen Empfindens und der subjektiv empfundenen thermischen Behaglichkeit Fragebögen aus. Die eine Hälfte der Schüler hielt sich in Klassenräumen mit einem Tagesmittelwert der CO<sub>2</sub>-Konzentration von 380 bis 990 ppm auf, etwa 25 % der Schüler waren in Räumen mit 1.000 bis 1.500 ppm und weitere 25 % in Räumen mit Werten von 1.500 bis 4.000 ppm. Bei der Auswertung ergab sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen der CO<sub>2</sub>-Konzentration in den Klassenräumen und der Leistung der Schüler. Die Leistung der Schüler in den Räumen mit der CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1.000 bis 1.500 ppm war vermindert. Zusätzliche Gesundheitssymptome (Unwohlsein, Müdigkeit) traten in der Schülergruppe auf, die sich in Räumen mit 1.500 bis 4.000 ppm aufgehalten hatten.

In einer schwedischen Studie wurde 1996 die Raumluftqualität von 28 Klassenräumen untersucht [36]. Im Vorfeld waren Befragungen zur Schülerleistung in Abhängigkeit zur Raumluftqualität bei Schülern der siebten Klassenstufe in 39 Schulen durchgeführt worden. Bei der Untersuchung wurden Lufttemperatur, Luftfeuchte, CO<sub>2</sub>-Konzentration, Formaldehydkonzentration, VOCs und der Gehalt von Bakterien und Schimmelpilzsporen gemessen. Zusätzlich wurden Aufzeichnungen zu Konstruktion, Material, Raumgröße und Anzahl der zu öffnenden Fenster gemacht. Als Ergebnis wurde in 29 % der untersuchten Klassenräume eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von über 1.000 ppm gemessen, wobei natürlich belüftete Räume die höchsten Werte aufwiesen. Der stärkste Zusammenhang wurde dabei zwischen empfundener Leistungsminderung mit dem Faktor Stress in der Schule herausgestellt. Eine allgemeine Unzufriedenheit und Nahrungsmittelallergien wiesen ebenfalls starken Einfluss auf die Schülerleistung auf. Die Raumluftqualität, die Konzentration von Schadstoffen sowie die Luftwechselrate wurden als Einflussfaktoren auf die Schülerleistung bestätigt.

In einer weiteren Studie wurden 1999 in Kopenhagen knapp 12.000 Angestellte und Schüler zum Auftreten von Krankheitssymptomen wie Irritationen an den Augen, Kopfschmerzen und Konzentrationsschwierigkeiten befragt [37]. Nach der Befragung wurden jeweils zehn Schulen mit dem geringsten und häufigsten Krankheitsaufkommen untersucht. Es wurden Messungen zur Raumluftqualität, Raumtemperatur, Luftfeuchtigkeit und zum Schimmelbefall durchgeführt. Das Ergebnis zeigte signifikante Zusammenhänge zwischen den gemessenen Werten und den Befragungen. Die Schulen mit dem geringsten Krankheitsaufkommen wiesen die niedrigsten Raumtemperaturen und ein größeres Raumvolumen pro Person auf. Festgestellt wurde zudem, dass die Schulen mit dem geringsten Krankheitsaufkommen zu 20 % und die Schulen mit dem höchsten Krankheitsaufkommen zu 52 % mechanisch belüftet wurden.

In einer Studie wurde von 2000 bis 2002 in Washington und Idaho an 22 Schulen in über 400 Klassenzimmern mit mechanischer Belüftung ein signifikanter Zusammenhang zwischen der CO<sub>2</sub>-Konzentration und der Fehlzeit von Schülern nachgewiesen [38]. Bei einem Anstieg um 1.000 ppm stieg die Fehlzeit der Schüler um 10 bis 20 %.

Eine Literaturstudie von 2005 fasste die Erkenntnisse zum Einfluss der Raumluftqualität auf die Schülerleistung für Nordamerika und Europa zusammen [39]. Es wurde festgestellt, dass die Belüftungsraten mechanisch belüfteter Klassenzimmer vieler Schulen unterhalb der Normen liegen und dass in Schulen Bestandteile in der Luft vorhanden seien, die Gesundheit und Leistungsfähigkeit negativ beeinflussen.

In den USA wurden 2006 in einer ähnlichen Studie die Luftwechselraten von Klassenräumen der fünften Klassenstufe in 54 Schulen aufgezeichnet [40]. Zum Ende des Schuljahres wurden die Ergebnisse üblicher Mathematiktests, die über das Schuljahr hinweg durchgeführt worden waren, den gemessenen Werten gegenüber gestellt. Die ermittelten Luftwechselraten lagen zwischen 3 m<sup>3</sup>/h Person (0,9 l/s Person) und 42 m<sup>3</sup>/h Person (11,7 l/s Person). Das Ergebnis der Studie zeigt ebenfalls einen mäßigen, aber signifikanten Zusammenhang zwischen Schülerleistung und Außenluftfrate.

In Untersuchungen in den Jahren 2005 und 2006 wurde am Internationalen Zentrum für Raumklima und Energie der Technischen Universität Dänemark in Lyngby die Leistungsfähigkeit von Schülern untersucht [41][42][43][44]. In sechs identischen Klassenzimmern einer Gesamtschule in Dänemark wurden Messungen zum Einfluss des Raumklimas auf die Leistungsfähigkeit der Schüler durchgeführt. Die zehn- bis zwölfjährigen Schüler erhielten verschiedene Aufgaben oder Tests unterschiedlicher Schulfächer. Die Inhalte der Tests orientierten sich an den üblichen Unterrichtsthemen. Es gab keine Änderungen im Stunden- oder Lehrplan um einen geregelten Tagesablauf sicherzustellen. Zuerst wurden in drei Un-

tersuchungen gegen Ende des Sommers und im Winter die Luftwechselraten in den Klassenräumen während der Tests mit den Referenzklassen erhöht. Zur Erhöhung der Luftwechselrate wurden die Einstellungen des vorhandenen mechanischen Lüftungssystems angepasst.

Des Weiteren wurde in zwei Untersuchungen gegen Ende des Sommers die Temperatur in den Klassenräumen während der Durchführung der Tests mittels Kühleinheiten reduziert. Die Ergebnisse der Experimente zeigen, dass eine erhöhte Luftwechselrate und die Reduzierung der Raumlufttemperaturen entscheidend zur Leistungsverbesserung beitragen, besonders in Bezug darauf, wie schnell ein Schüler arbeitet und wie viele Fehler in den Tests gemacht werden (Abb. 7).

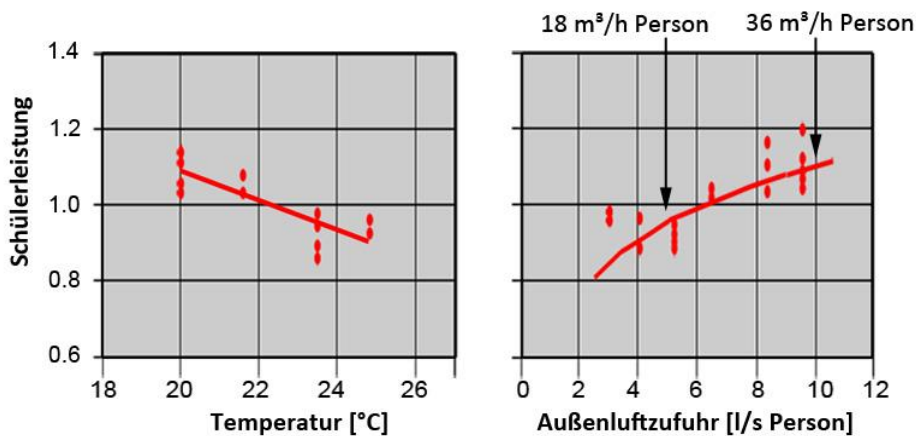
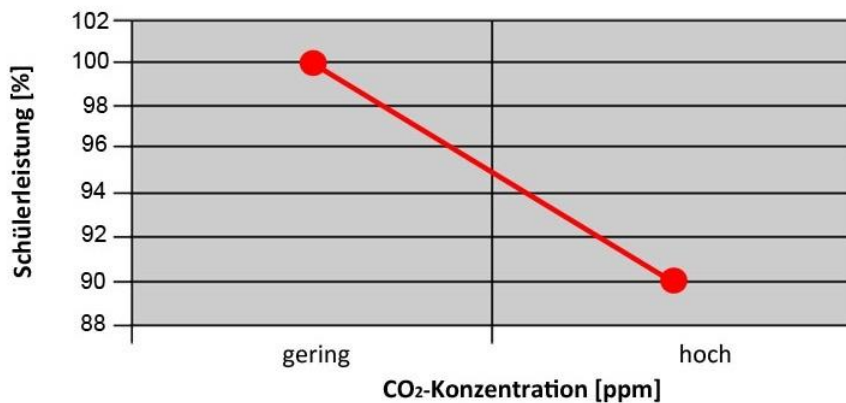


Abb. 7 Einfluss Temperatur und Luftwechselrate Schülerleistung [44]

Das Ergebnis der Studie formuliert, dass ein Temperaturanstieg im Klassenzimmer um ein Kelvin bei den Schülern zu einem Leistungsabfall von 2 bis 4 % führt (Abb. 7, links). Weiterhin wird mit einer Verdopplung der Luftwechselrate von 18 auf 36 m<sup>3</sup>/h Person eine 8- bis 14 %ige Steigerung der Leistung erreicht (Abb. 7, rechts).

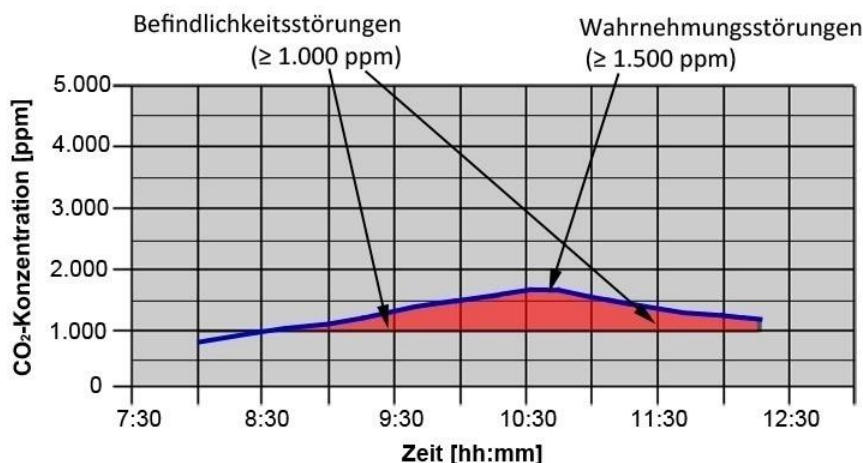
In einer Studie in Österreich 2008 zum Nachweis des Zusammenhangs zwischen Leistungsfähigkeit und Raumluftqualität wurde ebenfalls die Konzentrationsleistung von Schülern in zwei Unterrichtsszenarien mit unterschiedlicher CO<sub>2</sub>-Konzentration getestet [45]. 152 Schüler derselben Schulstufe im Alter zwischen 15 und 16 Jahren waren beteiligt. Zur Ermittlung der Konzentrationsleistung wurden keine fächerspezifischen Tests, sondern Aufmerksamkeits-Belastungs-Tests, sogenannte d2-Tests, verwendet. Die Studie ergab einen hoch signifikanten Unterschied der Konzentrationsleistung der Schüler bei hohem und niedrigem CO<sub>2</sub>-Gehalt.

Es wurden jedoch keine genauen Zahlenangaben zur Höhe und Differenz der gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen gemacht (Abb. 8).



**Abb. 8 Einfluss CO<sub>2</sub>-Konzentration auf das Schülerleistung [45]**

In einer weiteren Studie wurde 2009 in insgesamt drei Schulen über je zwei Wochen Unterrichtszeit der Zusammenhang zwischen Raumluftqualität und Schüleraufmerksamkeit untersucht [2]. Der Unterricht wurde an zwei gleichen Unterrichtstagen mit zwei unterschiedlichen Lüftungsszenarien begleitet. Es wurden Kommunikations- und Aktionsprotokolle angefertigt, Messungen zur CO<sub>2</sub>-Konzentration und zum Geräuschpegel in der Klasse durchgeführt und Aufmerksamkeitstests vor und nach dem Unterricht mit den Schülern bearbeitet. In der ersten Woche wurden die Lehrer gebeten das übliche Lüftungsverhalten zu zeigen. Die Auswertung der Messung zeigt, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration über den Tag auf Werte von bis oberhalb von 1.500 ppm steigt (Abb. 9).



**Abb. 9 Verlauf CO<sub>2</sub>-Konzentration ohne Lüftungspause [2]**

In der zweiten Woche erhielten die Lehrkräfte die Anweisung bereits in der Schulstunde nach zwanzig Unterrichtsminuten eine zweiminütige Lüftungspause mittels Stoßlüftung durchzuführen.

Die Auswertungen der CO<sub>2</sub>-Messdaten zeigen, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der zweiten Woche innerhalb der Schulstunde mittels der Intervention (Stoßlüftung) wieder auf unterhalb 1.000 ppm gebracht werden konnte (Abb. 10).

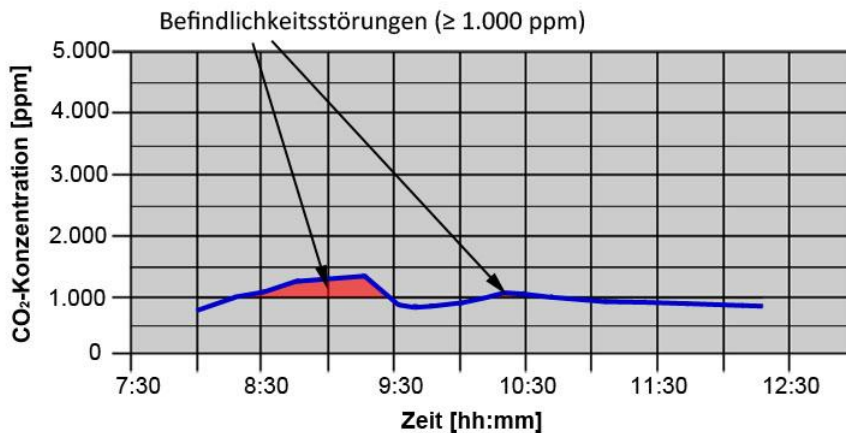


Abb. 10 Verlauf CO<sub>2</sub>-Konzentration mit Lüftungspause [2]

Ausgehend von der Annahme, dass Ermüdung zu Unruhe bei den Schülern führt, wurden die Anzahl der dysfunktionalen Aktivitäten in den Kommunikations- und Aktionsprotokollen dokumentiert. Dazu zählten nicht unterrichtbezogene Unterhaltungen oder Aktivitäten der Schüler, die mit Disziplinierungen durch die Lehrkraft beendet wurden. Die Auswertung zeigt eine Abnahme der dysfunktionalen Aktivitäten durch die Einführung der Lüftungspausen an allen drei Schulen (Abb. 11).

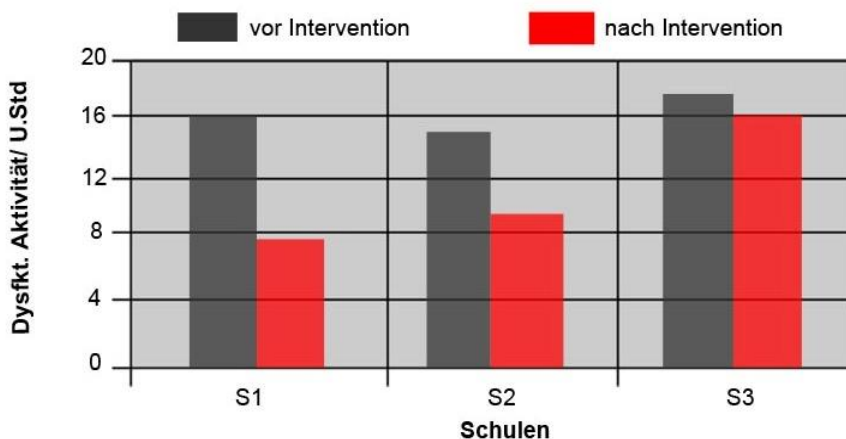


Abb. 11 Einfluss Lüftungsintervention auf dysfunktionale Aktivitäten [2]

Dieses Ergebnis lässt auf eine erhöhte Aufmerksamkeit bei den Schülern nach Umsetzung der Lüftungspause schließen und bedeutet insgesamt einen positiven Einfluss auf das Lernverhalten der Schüler.

### 2.3.2 Raumakustik und Schalldruckpegel

Die Raumakustik besitzt für Bildungsstätten eine ebenso große Bedeutung wie die thermische Behaglichkeit, allerdings wird sie in der Planung häufig erst spät einbezogen [46]. Es wurde bereits nachgewiesen, dass die physiologische Beanspruchung und Ermüdungsprozesse durch Verbesserung der raumakustischen Bedingungen reduziert werden können [4]. Zur Feststellung von akustischen Belastungen in Bildungsstätten müssen verschiedene Schallereignisse differenziert werden. Der uneingeschränkten sprachlichen Kommunikation wirken diverse Schallereignisse entgegen. Sowohl raumluftechnische Anlagen, als auch spielende Kinder vor einem geöffneten Fenster emittieren einen Störgeräuschpegel und können die akustischen Gegebenheiten und somit das Lernumfeld im Innenraum negativ beeinflussen.

Darüber hinaus ist eine geeignete Raumakustik entscheidend. Die Nachhallzeit eines Raumes hat in diesem Zusammenhang einen großen Einfluss auf die Sprachverständlichkeit [47] in Unterrichtsräumen. Die Oberflächen eines Raumes sind dabei bestimmend für Absorption und Reflektion von Schallereignissen im Raum.

Eine Studie zur Akustik in Klassenräumen [48] befasste sich eingehend mit den Auswirkungen akustischer Gegebenheiten in Klassenzimmern. Über 70 Unterrichtsräume von Grundschulen in Schottland, England und Nordirland wurden untersucht. Dabei wurde eine Reihe von objektiven Messungen und subjektiven Befragungen in leeren und besetzten Klassenzimmern sowie jeweils vor und nach der Installation von Akustikdecken durchgeführt. Ermittelt wurden sowohl der Schalldruckpegel als auch die Nachhallzeit. Das Ergebnis der Studie beschreibt, dass die Sprachverständlichkeit sich in zahlreichen Klassenzimmern als mangelhaft erwies, was auf eine lange Nachhallzeit und damit verbunden einen außerordentlich hohen Störgeräuschpegel zurückzuführen war.

Im Zuge der Studie erfolgte in einigen der untersuchten Klassenräume die Installation schallabsorbierender Abhangdecken. Als Folge konnte einer Verringerung der Nachhallzeit und damit einhergehend eine Reduzierung des Störgeräuschpegel erzielt werden. In den Nutzerbefragungen äußerten die Klassenlehrer(innen), dass eine akustisch wirksame Decke für ein leiseres Arbeitsumfeld Sorge und weiterhin dazu führe, dass die Kinder selbst ebenfalls leiser und aufmerksamer sind.

## 2.4 Normative Anforderungen an das Raumklima

### 2.4.1 Die Pettenkofer Zahl

Wie bereits in Kapitel 2.3.1 dargestellt, beschrieb Max von Pettenkofer bereits 1885, dass eine Raumlufte mit einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von über 1.000 ppm als unbehaglich empfunden wird [18]. Abb. 12 zeigt als Ergebnis einer Simulation, dass zur Einhaltung dieser „Pettenkofer Zahl“ für den in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Klassenraum mit einem Raumvolumen von 192 m<sup>3</sup>, einer Grundfläche von 64 m<sup>2</sup> und einer Besetzung mit 25 Personen ein konstanter 4,1-facher Luftwechsel notwendig ist. Dies entspricht in diesem Beispiel einer kontinuierlichen Zuluftmenge von etwa 31 m<sup>3</sup>/h und Person.

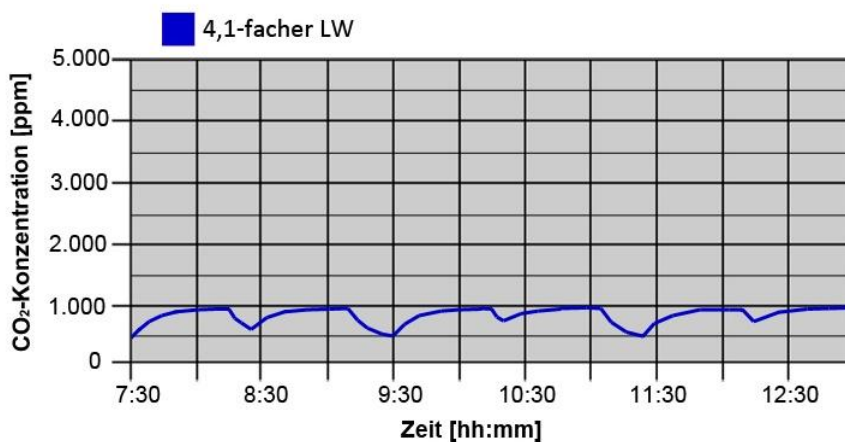


Abb. 12 Simulation Luftwechsel Einhaltung „Pettenkofer Zahl“

Pettenkofer benennt jedoch einen notwendigen Mindestluftvolumenstrom von 60 m<sup>3</sup>/h und Person [18]. Für die angenommenen Werte des Beispielraumes würde dieser Wert einen 8,2-fachen Luftwechsel bedeuten.

### 2.4.2 DIN 1946-2/ DIN EN 13779

Die Anforderungen nach DIN 1946-2 gelten zunächst für Räume mit raumluftechnischen Anlagen [20]. In Bezug auf die Raumluftequalität definiert sie den notwendigen Luftvolumenstrom in mechanisch belüfteten Unterrichtsräumen sowohl personen- als auch flächenbezogen (Tabelle 5).

Tabelle 5 Mindestluftvolumenstrom [20]

Raumart	Beispiel	Luftvolumenstrom	
		personenbezogen	flächenbezogen
Unterrichtsräume	Lesesaal	20 [m <sup>3</sup> /(h·Person)]	12 [m <sup>3</sup> /(h·m <sup>2</sup> )]
	Klassenraum, Hörsaal	30 [m <sup>3</sup> /(h·Person)]	15 [m <sup>3</sup> /(h·m <sup>2</sup> )]

Werden diese in Tabelle 5 beschriebenen Werte in Relation zur Belegungsdichte gesetzt,



bedeutet es für den in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Beispielklassenraum mit einem Rauminhalt von 192 m<sup>3</sup>, einer Grundfläche von 64 m<sup>2</sup> und einer Besetzung mit 25 Personen personenbezogen einen 3,9-fachen und flächenbezogen einen 5-fachen Luftwechsel. Nach DIN 1946-2 empfindet eine Person die Innenraumluft als behaglich, wenn sie mit Temperatur, Feuchte und Luftbewegung in seiner Umgebung zufrieden ist und weder wärmere noch kältere, weder trockenere noch feuchtere Raumluft wünscht. Die DIN 1946-2 beschreibt, dass die Qualität der Raumluft einerseits durch die Qualität der Zuluft und andererseits durch nutzungs- und raumbedingte Verunreinigungen bestimmt ist. Dabei wird die Zuluft über die Zuführung der Außen- und Umluft, deren eigene Qualität berücksichtigt werden muss, definiert. Sie formuliert drei Luftqualitätsklassen zur empfundenen Raumluftqualität (Tabelle 6) über den Prozentsatz der unzufriedenen Personen.

**Tabelle 6 Empfundene Luftqualität [20]**

<b>Kategorie</b>	<b>Empfundene Luftqualität [dezipol]<sup>1</sup></b>	<b>Unzufriedene Personen [%]<sup>2</sup></b>
Hoch	0,7	≤ 10
Mittel	1,4	≤ 20
Niedrig	2,5	≤ 30

<sup>1</sup> Die Luftverunreinigung, wenn 10 l/s reine Luft mit 1 Olf<sup>III</sup> verunreinigt werden.  
<sup>2</sup> Beim Betreten eines Raumes

Die Stärke der Verunreinigung der Luft steht dabei in Zusammenhang zum Aktivitätsgrad der im Raum befindlichen Personen. Die DIN 1946-2 benennt einen hygienischen Grenzwert für mechanisch belüftete Räume mit 1.500 ppm. Dieser Wert liegt 500 ppm oberhalb der „Pettenkofer Zahl“.

Im Mai 2005 wurde die DIN 1946-2 durch die DIN EN 13779 ersetzt, welche neben den Angaben zur Auslegung lüftungstechnischer Anlagen eine erweiterte Klassifizierung der Luftqualität vornimmt [19]. Es erfolgt eine Unterscheidung zwischen ODA („Outdoor Air“) und IDA („Indoor Air“). Die ODA wird in drei Kategorien unterteilt (Tabelle 7).

**Tabelle 7 Kategorien ODA [19]**

<b>Kategorie</b>	<b>Beschreibung</b>
ODA 1	saubere Luft, die nur zeitweise staubbelastet sein darf
ODA 2	Außenluft mit hoher Konzentration an Staub oder Feinstaub und/oder gasförmigen Verunreinigungen
ODA 3	Außenluft mit sehr hoher Konzentration an Staub oder Feinstaub und/oder gasförmigen Verunreinigungen

<sup>III</sup> Das Olf ist eine Maßeinheit zur Bewertung der Stärke einer Geruchsquelle [93] [88].

Die Ermittlung des tatsächlichen für den Gebäudestandort geltenden ODA-Werts setzt eine Schadstofffassung der Außenluft voraus. Der IDA-Wert bezieht sich auf die gewünschte Raumluftqualität (Tabelle 8).

**Tabelle 8 Klassifizierung Raumluftqualität [19]**

Kategorie	Beschreibung Raumluftqualität	CO <sub>2</sub> -Konzentration der Innenraumluft <sup>1</sup> [ppm]		Mindestluftvolumenstrom <sup>2</sup> [m <sup>3</sup> /h Person]	
		Üblicher Bereich	Standard	Üblicher Bereich	Standard
IDA 1	Hoch	≤ 800	850	> 54	72
IDA 2	Mittel	> 800 – 1.000	900	> 36–54	45
IDA 3	Mäßig	> 1.000 – 1.400	1.200	> 22 - 36	28,8
IDA 4	Niedrig	> 1.400	1.600	< 22	18

<sup>1</sup> absoluter Wert gegenüber der Annahme von 400 ppm für die Außenluft  
<sup>2</sup> zur Einhaltung der absoluten CO<sub>2</sub>-Konzentration

Zur Einhaltung der IDA 1 wird ein Luftvolumenstrom von 72 m<sup>3</sup>/h pro Person gefordert. Das bedeutet für einen in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Beispielklassenraum mit einem Raumvolumen von 192 m<sup>3</sup> und einer Besetzung mit 25 Personen 9,4-fachen Luftwechsel.

### 2.4.3 DIN EN 15251

Die DIN EN 15251 beschreibt Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik zur Einhaltung von vier Kategorien [49]. Die Anforderungen beziehen sich dabei auf die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und gelten zunächst für Räume mit raumlufttechnischen Anlagen. Es werden die vier Kategorien zur Anwendbarkeit beschrieben (Tabelle 9).

**Tabelle 9 Kategorien zur Anwendbarkeit [49]**

Kategorie	Beschreibung
I	Hohes Maß an Erwartungen; empfohlen für Räume, in denen sich sehr empfindliche und anfällige Personen mit besonderen Bedürfnissen aufhalten, z.B. Personen mit Behinderungen, kranke Personen, sehr kleine Kinder und ältere Personen.
II	Normales Maß an Erwartungen; empfohlen für neue und renovierte Gebäude.
III	Annehmbares, moderates Maß an Erwartungen; kann bei bestehenden Gebäude angewendet werden.
IV	Werte außerhalb der obengenannten Kategorien. Diese Kategorie sollte nur für einen begrenzten Teil des Jahres angewendet werden.

Tabelle 10 zeigt die empfohlenen Auslegungswerte der Raumlufttemperatur für die Raumlufttechnik-Anlagen von Bildungsstätten bei Unterscheidung in drei Kategorien.

**Tabelle 10 Empfohlene Auslegungswerte Raumlufttemperatur [49]**

<b>Gebäude- bzw. Raumtyp</b>	<b>Kategorie</b>	<b>Operative Temperatur</b>	
		<b>Mindestwert für Heizperiode</b>	<b>Höchstwert für Kühlperiode</b>
<i>Hörsaal, Zuschauersaal (sitzende Personen)</i>	<i>I</i>	21,0	25,5
	<i>II</i>	20,0	26,0
	<i>III</i>	19,0	27,0
<i>Klassenraum (sitzende Personen)</i>	<i>I</i>	21,0	25,0
	<i>II</i>	20,0	26,0
	<i>III</i>	19,0	27,0
<i>Kindergarten (stehende/ gehende Personen)</i>	<i>I</i>	19,0	24,5
	<i>II</i>	17,5	25,5
	<i>III</i>	16,5	26,0

In Bezug auf die Raumluftqualität definiert die DIN EN 15251 den erforderlichen Luftvolumenstrom unabhängig von der Jahreszeit je nach Belegungs- bzw. Nutzungsrate, Aktivitäten und Prozessen im Raum und der Emission aus Baustoffen und Mobiliar. Tabelle 11 zeigt die empfohlenen Lüftungsraten für die unterschiedlichen Kategorien, die entweder je Person oder je Quadratmeter Grundfläche angegeben werden. Bei den personenbezogenen Werten wird angenommen, dass der Mensch die einzige Verunreinigungsquelle im Raum ist. Bei dieser Annahme werden andersartige Verunreinigungen, wie beispielsweise VOCs, nicht berücksichtigt, wobei diese ebenfalls eine Verunreinigung der Raumluft darstellen können.

**Tabelle 11 Empfohlene Lüftungsraten [49]**

<b>Gebäude-bzw. Raumtyp</b>	<b>Kategorie</b>	<b>Grundfläche [m<sup>2</sup>/ Person]</b>	<b>Luftvolumenstrom [m<sup>3</sup>/(h· m<sup>2</sup>)]</b>
<i>Hörsaal, Zuschauersaal</i>	<i>I</i>	0,75	54,0
	<i>II</i>	0,75	37,8
	<i>III</i>	0,75	21,6
<i>Klassenraum</i>	<i>I</i>	2,0	18,0
	<i>II</i>	2,0	12,6
	<i>III</i>	2,0	7,2
<i>Kindergarten</i>	<i>I</i>	2,0	21,6
	<i>II</i>	2,0	15,1
	<i>III</i>	2,0	8,6

Der Wert des Mindestluftvolumenstroms gemäß Kategorie I (hohes Maß an Erwartungen) liegt für einen Klassenraum demnach bei 18 m<sup>3</sup> pro Quadratmeter und Stunde. Die anzusetzende Grundfläche pro Person beträgt 2 m<sup>2</sup>. Bei einer Belegung von 25 Personen in einem Klassenraum mit einer Grundfläche von 64 m<sup>2</sup> und einem Raumvolumen von 192 m<sup>3</sup> bedeuten diese Annahmen einen Mindestluftvolumenstrom von 1.152 m<sup>3</sup>/h und somit einen 6-fachen Luftwechsel. Der Luftvolumenstrom pro Person liegt dementsprechend bei 45 m<sup>3</sup>/h. Tabelle 12 zeigt anzunehmenden CO<sub>2</sub>-Konzentrationen für Energieberechnungen nach DIN EN 15251. Die Einordnung der Kategorie II deckt sich näherungsweise mit den Ergebnissen von Pettenkofer. Der definierte Grenzwert wird um 100 ppm geringer angesetzt.

**Tabelle 12** Empfohlene CO<sub>2</sub>-Konzentrationen [49]

Kategorie	CO <sub>2</sub> -Konzentration oberhalb der Konzentration in der Außenluft [ppm]	CO <sub>2</sub> -Konzentration absolut für Energieberechnungen [ppm]
I	350	750
II	500	900
III	800	1200
IV	< 800	< 1200

Nach DIN EN 15251 wird für Klassenräume für Kategorie I eine operative Raumtemperatur im Winter zwischen 20 und 24°C und im Sommer zwischen 23 und 26 °C angegeben (Tabelle 13).

**Tabelle 13** Empfohlene Innenraumlufttemperatur [49]

Kategorie	Winter	Sommer
I	20 – 24°C	23 – 26°C
II	19 – 25 °C	22 – 27°C

Die Unterscheidung in Winter und Sommer, bzw. in Heiz- und Kühlperiode erfolgt über den gleitenden Mittelwert der Außentemperatur. Die Heizgrenztemperatur liegt bei 15 °C.

**Der gleitende Mittelwert kann mit folgender Formel berechnet werden:**

$$\theta_{rm} = (1 - \alpha) \theta_{ed-1} + \alpha \cdot \theta_{rm-1}$$

**Dabei ist:**

- $\theta_{rm}$  gleitender Mittelwert Temperatur aktueller Tag [°C]
- $\theta_{rm-1}$  gleitender Mittelwert Temperatur vorheriger Tag [°C]
- $\theta_{ed-1}$  Tagesmittelwert Außentemperatur vorheriger Tag [°C]
- $\alpha$  Konstante zwischen 0 und 1 (empfohlener Wert 0,8)

#### 2.4.4 DIN EN ISO 7730

Die DIN EN ISO 7730 beschreibt eine Methode zur Bestimmung und Bewertung des Umgebungsklimas unter Berücksichtigung der menschlichen Empfindungen mittels Berechnung des PMV<sup>IV</sup>- und PPD<sup>V</sup>-Indexes [50].

Der Anwendungsbereich der DIN EN ISO 7730 bezieht sich auf Gebäude die das ganze Jahr mechanisch beheizt und gekühlt werden. Berücksichtigt werden Annahmen zur Tätigkeit und Kleidung im Raum anwesender Personen.

Nach DIN EN ISO 7730 ist der Behaglichkeitsbereich der operativen Raumtemperatur unabhängig von der Außenlufttemperatur. Er wird durch die Differenzierung des Heiz- und Kühlzeitraums unterschieden. Tabelle 14 zeigt die Unterteilung der Behaglichkeitsbereiche für Klassenräume und Kindergärten.

**Tabelle 14 Behaglichkeitsbereiche Innenraumlufttemperatur [50]**

Gebäudetyp/ Raumtyp	Kategorie	Operative Temperatur <sup>4</sup>	
		Sommer (Kühlperiode)	Winter (Heizperiode)
Klassenraum	A (gut)	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0
	B (akzeptabel)	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0
	C (eingeschränkt)	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0
Kindergarten	A (gut)	23,5 ± 1,0	20,0 ± 1,0
	B (akzeptabel)	23,5 ± 2,0	20,0 ± 2,5
	C (eingeschränkt)	23,5 ± 2,5	20,0 ± 3,5

<sup>4</sup> empfundene Raumtemperatur

#### 2.4.5 Arbeitsstättenrichtlinie – ASR A3.6

Die Arbeitsstättenrichtlinie ASR A3.6 beschreibt, dass für ein gesundheitlich zuträgliches Arbeitsumfeld die Raumluftqualität im Wesentlichen der Außenluftqualität entsprechen soll [51]. Sie gilt für jegliche Arbeitsplätze in umschlossenen Arbeitsräumen und berücksichtigt die Arbeitsverfahren, die körperliche Belastung und die Anzahl der Beschäftigten sowie der sonstigen anwesenden Personen. In diesem Zusammenhang wird der Geltungsbereich auf das Arbeitsfeld von Lehrkräften in Schulen, Betreuer und Pädagogen in Kindertagesstätten und Dozenten in Universitäten übertragen.

Die Arbeitsstättenrichtlinie benennt die CO<sub>2</sub>-Konzentration als ein anerkanntes Maß für die

<sup>IV</sup> PMV: Predicted Mean Vote, vorausgesagtes mittleres Votum

<sup>V</sup> PPD: Predicted Percentage of Dissatisfied, vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen

Bewertung der Raumluftqualität. Es erfolgt eine Einteilung in drei Kategorien mit Empfehlungen mit den jeweilig zu ergreifenden Maßnahmen zur Einhaltung einer angemessenen Raumluftqualität (Tabelle 15).

Weiterhin wird beschrieben, dass bei einem begründeten Verdacht auf zu hohe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen Messungen unter üblichen Nutzungsbedingungen und mit der üblichen Personenbelegung durchzuführen sind. Der definierte Grenzwert von 1.000 ppm deckt sich mit der „Pettenkofer Zahl“.

**Tabelle 15 Lüftungsmaßnahmen nach CO<sub>2</sub>-Konzentrationen [51]**

<b>CO<sub>2</sub>-Konzentration [ppm]</b>	<b>Empfohlene Maßnahmen</b>
< 1.000	<ul style="list-style-type: none"> <li>Keine weiteren Maßnahmen</li> </ul>
1.000 – 2.000	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lüftungsverhalten überprüfen und verbessern</li> <li>Lüftungsplan aufstellen</li> <li>Lüftungsmaßnahme (Luftvolumenstrom/ Luftwechsel erhöhen)</li> </ul>
>2.000	<ul style="list-style-type: none"> <li>weitergehende Maßnahmen erforderlich (Reduzierung Personenzahl)</li> </ul>

Die Arbeitsstättenrichtlinie definiert zwei Kategorien für die Anforderungen an eine ausreichende Innenraumlüftung. Es wird in freie Lüftung und Lüftung über raumlufttechnische Anlagen unterschieden. In Bezug auf die freie Lüftung werden vier Kategorien formuliert (Tabelle 16).

**Tabelle 16 Anforderungen an die freie Lüftung [51]**

<b>Kategorie</b>	<b>Beschreibung</b>
1	Für die Fensterlüftung sind mindestens Lüftungsquerschnitte nach Tabelle 17 erforderlich, um die Anforderungen nach Tabelle 15 zu erreichen. Tür- und Torflächen bleiben unberücksichtigt.
2	Die Fensteröffnungen sind so anzuordnen, dass eine ausreichend gleichmäßige Durchlüftung der Arbeitsräume gewährleistet ist.
3	Andere Formen der freien Lüftung sind so auszulegen, dass die Anforderungen nach Punkt 4 erfüllt werden (zeitliche/jahreszeitliche Einschränkungen in der Funktion sind zu beachten).
4	Dauer und Intensität des Luftaustausches bei freier Lüftung sind so zu gestalten, dass Zugluft möglichst vermieden wird.

Zur Einhaltung eines Mindestluftwechsels bei der freien Lüftung über das Öffnen der Fenster werden Anforderungen an die notwendigen Öffnungsflächen mit Bezug auf die Personenzahl und auf die Grundfläche definiert (Tabelle 17, Seite 25).

Tabelle 17 Einteilung Systeme freie Lüftung [51]

System	Maximal zulässige Raumtiefe bezogen auf die lichte Raumhöhe (h) [m]	Öffnungsfläche zur Sicherung des Mindestluftwechsels	
		konstante Kipplüftung [m <sup>2</sup> / Person]	Stoßlüftung [m <sup>2</sup> /10 m <sup>2</sup> Grundfläche]
I einseitige Lüftung <sup>1</sup>	Raumtiefe = 2,5 x h (bei h > 4 m: max. Raumtiefe = 10 m) (angen. Luftgeschwindigkeit 0,08 m/s)	0,35	1,05
II Quer- lüftung <sup>2</sup>	Raumtiefe = 5,0 x h (bei h > 4 m: max. Raumtiefe = 20 m) (angen. Luftgeschwindigkeit 0,14 m/s)	0,20	0,60

<sup>1</sup> Zu- und Abluftöffnungen in der Außenwand  
<sup>2</sup> Öffnungen in gegenüberliegenden Außenwänden

Gemäß diesen Angaben bedürfen Klassenräume mit einer Grundfläche von 64 m<sup>2</sup> und einer Belegungsdichte von 25 Personen überschlägig bei einseitiger Belüftung eine Öffnungsfläche von 9 m<sup>2</sup> bei kontinuierlicher Kipplüftung und 7 m<sup>2</sup> bei einer Stoßlüftung zur Sicherung eines Mindestluftwechsels. Für eine Querlüftung sind bei kontinuierlicher Kipplüftung überschlägig 5 m<sup>2</sup> und bei Stoßlüftung 4 m<sup>2</sup> Öffnungsfläche notwendig.

Für die mechanische Belüftung und die Umsetzung raumluftechnischer Anlagen fordert die Arbeitsstättenrichtlinie eine Auslegung der Außenluftvolumenströme nach dem Stand der Technik, dass Lasten (Stoff-, Feuchte-, Wärmelasten) zuverlässig abgeführt werden und die CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1.000 ppm gemäß Tabelle 15 (Seite 24) unter Berücksichtigung der entsprechenden Vorgaben (DIN-Norm und VDI-Richtlinien) eingehalten wird [51].

#### 2.4.6 VDI 6040 Blatt 1: Lüftungsregeln – Schulbaurichtlinien

Die in Deutschland vorhandenen Schulbaurichtlinien der Bundesländer unterscheiden sich in Teilen erheblich. In Bezug auf die Belüftung von Klassenräumen werden in einigen der Richtlinien sehr detaillierte Angaben gemacht, in anderen wird das Thema Belüftung nicht erwähnt.

Die VDI 6040 definiert als Regelwerk der Technik eine Richtlinie mit Anforderungen für die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft und die operative Raumtemperatur sowohl für mechanisch als auch für frei belüftete Unterrichtsräume (Tabelle 18, Seite 26).

Die Anforderungen der VDI 6040 gelten dabei für Unterrichts- und Aufenthaltsräume in den Schüler allgemein- und berufsbildender Schulen unterrichtet oder beaufsichtigt werden.

**Tabelle 18 Anforderungen thermische/ lufthygienische Konditionen [52]**

<b>Operative Raumtemperatur</b>	mind. 20 °C, max. 26 °C Vorausgesetzt wird, dass die Nutzer keiner direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind.
<b>CO<sub>2</sub>-Konzentration</b>	Während der Unterrichtszeit: <sup>1</sup> < 1.000 ppm: lufthygienisch unbedenklich 1.000 – 2.000 ppm: hygienisch bedenklich > 2.000 ppm: nicht akzeptabel
<sup>1</sup> Die durchschnittliche CO <sub>2</sub> -Konzentration zeitlich gewichtet über die Dauer einer Unterrichtsstunde (45min). Annahme einer Außenluftkonzentration von 400 ppm	

An die Raumluftfeuchte wird, aufgrund der Annahme, dass nasse Oberbekleidung nicht im Klassenraum aufbewahrt wird und durch die Gebäudereinigung keine erhöhte Feuchtigkeitsbelastung in der Nutzungszeit auftritt, keine Anforderung gestellt [52].

#### 2.4.7 Leitfaden des Bundesumweltamtes

Die Arbeitsgruppe der Kommission Innenraumlufthygiene und der Obersten Landesgesundheitsbehörden verfasste 2006 und 2008 im Auftrag des Bundesumweltamtes (BUA) „Leitfaden zur Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden“. Der aktuelle Leitfaden BUA beschreibt Leitwerte für die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Innenraumluft [17]. Nach diesem Leitfaden wird die Güte der Raumluftqualität in Klassenräumen unterschieden in: „hygienisch unbedenklich“, „hygienisch auffällig“ und „hygienisch inakzeptabel“ (Tabelle 19).

**Tabelle 19 Leitwerte CO<sub>2</sub> Innenraumluft [17]**

<b>CO<sub>2</sub>-Konzentration</b>	<b>Hygienische Bewertung</b>	<b>Empfehlung</b>
< 1.000 ppm	Hygienisch unbedenklich	• keine weiteren Maßnahmen
1.000 – 2.000 ppm	Hygienisch auffällig	• Lüftungsmaßnahmen intensivieren (Luftvolumenstrom bzw. Luftwechsel erhöhen) • Lüftungsverhalten überprüfen und verbessern
> 2.000 ppm	Hygienisch inakzeptabel	• Belüftbarkeit des Raumes prüfen • ggf. weitgehende Maßnahmen prüfen

Der Leitfaden beschreibt, dass beim Überschreiten eines CO<sub>2</sub>-Wertes von 1.000 ppm bereits gelüftet werden soll und beim Überschreiten von 2.000 ppm zwingend gelüftet werden muss. Eine Unterschreitung des Grenzwertes von 1.000 ppm ist dabei grundsätzlich für die Raumluftqualität in Klassenräumen anzustreben. Der Leitfaden fordert für den Fall, dass sich auf Dauer durch Lüften allein die Situation im Klassenraum nicht verbessert, lüftungstechnische Maßnahmen zu ergreifen oder eine Verringerung der Zahl der Schülerinnen und Schüler im Klassenraum vorzunehmen sind.



## 2.5 Zusammenführung der Anforderungen an das Raumklima

Die vorgestellten Quellen stellen die aktuellen Anforderungen an die Raumluftqualität für Bildungsstätten in Deutschland dar. Für die weitere Bearbeitung und Bewertung der Raumluftqualität in Bildungsstätten werden die hier aufgezeigten Kriterien zusammengefasst und in einen eigenen Bewertungsmaßstab überführt.

### 2.5.1 Individueller Bewertungsmaßstab

Für die Bewertung der CO<sub>2</sub>-Konzentration, der Raumlufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit erfolgt je eine Einteilung in vier Kategorien (Tabelle 20).

**Tabelle 20 Kategorisierung zur Beurteilung der Raumluftqualität**

Kategorie	Bewertung	Empfehlung
A	unbedenklich	• Kein Handlungsbedarf
B	auffällig	• Lüftungsverhalten überprüfen und steigern
C	bedenklich	• Lüftungsplan aufstellen und Verantwortung zuweisen
D	inakzeptabel	• Dringender Handlungsbedarf • Belüftbarkeit des Raumes prüfen • Reduzierung der Personenzahl

### 2.5.2 Bewertung der Raumluftqualität (CO<sub>2</sub>-Konzentration)

Tabelle 21 zeigt die Einteilung zur Bewertung der Raumluftqualität anhand der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Innenraumluft. Die Leitwerte und Formulierungen des Leitfadens BUA und die Richtwerte der VDI 6040 werden übernommen und zusätzlich einer Farbskala zugeordnet. Die „Pettenkofer Zahl“ mit 1.000 ppm bildet den Grenzwert für den „unbedenklichen“ Bereich. Der Grenzwert von 1.400 ppm der Kategorie „IDA 4“ gemäß der DIN EN 13779 teilt den nach VDI 6040 „hygienisch bedenklichen“ Bereich und wird weiterhin als Grenzwert in die Bewertungsskala übernommen. Von 1.400 ppm bis 2.000 ppm wird die Raumluftqualität als „bedenklich“ eingestuft, ein Lüftungsplan ist notwendig. Oberhalb von 2.000 ppm besteht dringender Handlungsbedarf.

**Tabelle 21 Grenzwerte Bewertung CO<sub>2</sub>-Konzentration Raumluft**

Kategorie	A	B	C	D
CO <sub>2</sub> -Konzentration [ppm]	< 1.000	1.000 – 1.400	1.400 – 2.000	> 2.000

### 2.5.3 Bewertung des thermischen Komforts

Tabelle 22 (Seite 28) zeigt die für die Raumlufttemperatur angesetzten Grenzwerte, welche sich an der DIN EN ISO 7730 und der VDI 6040 orientieren. Es wird die Annahme getroffen, dass in Klassenräumen mittels Blend- und Sonnenschutz eine direkte Sonneneinstrahlung

verhindert und die operative Temperatur mit der Lufttemperatur gleichgesetzt werden kann. Die Temperaturbereiche oberhalb von 25 °C und unterhalb von 19 °C werden als eingeschränkt definiert.

**Tabelle 22 Grenzwerte Bewertung Raumlufthtemperatur**

Kategorie	Raumlufthtemperatur [°C]			
A			21 – 23	
B		20 – 21		23 – 24
C		19 – 20		24 – 25
D	< 19			> 25

Zusätzlich erfolgt eine Auswertung der relativen Luftfeuchtigkeit der Innenraumluft gemäß den Anforderungen nach DIN EN ISO 7730 und DIN EN 15251 anhand stündlicher, bzw. 45-minütiger Mittelwerte (Vorlesungs- und Unterrichtseinheit) unter Berücksichtigung und Unterscheidung von Heiz- und Kühlperiode unter Ermittlung des gleitenden Mittelwertes (Winter und Sommer).

**Tabelle 23 Grenzwerte Bewertung relative Luftfeuchtigkeit**

Kategorie	Relative Luftfeuchtigkeit [%]			
A			30 – 50	
B		25 – 30		50 – 60
C		20 – 25		60 – 70
D	< 20			> 70

## 2.6 Weitere Anforderungen

### 2.6.1 Bewertung der Akustik

Die Raumakustik und Sprachverständlichkeit sind entscheidend für ein gutes Lernergebnis [53][54]. Der Einsatz mechanischer Lüftungssysteme ist mit einer Geräuschpegelemission verbunden. Auch das weite Öffnen der Fensterflügel bei der freien Lüftung kann durch Störgeräusche zu einer Beeinträchtigung der Akustik im Klassenraum führen. Die Messung des Schalldruckpegels erfolgt gemäß der DIN 18041 [55].

Gemäß der DIN 4109 [56] sollte in Unterrichts- und Arbeitsräumen der Schalldruckpegel im unbesetzten Zustand insgesamt nicht mehr als 35 dB(A)<sup>VI</sup> betragen. Beim Einsatz raumluf-

<sup>VI</sup> A-Bewertung des Schallpegels: Das Gehör empfindet Töne unterschiedlicher Frequenz als verschieden laut. Schallsignale werden in einem Messgerät so gefiltert, dass die Eigenschaften des menschlichen Gehörs nachgeahmt werden. Die Dezibel-Skala ist logarithmisch aufgebaut. Null dB(A) entspricht der Hörschwelle und 130 dB(A) der Schmerzgrenze. [93]

technischer Anlagen sind um 5 dB(A) höhere Werte zulässig, sofern es sich um Dauergeräusche ohne auffällige Einzeltöne handelt.

Auch die Nachhallzeit besitzt einen nennenswerten Einfluss auf die Sprachverständlichkeit in Unterrichtsräumen.

**Der Sollwert der Nachhallzeit in Sekunden für die Nutzungsart Unterricht ist nach DIN 18041 [55] wie folgt zu berechnen:**

$$T_{\text{soll}} = \left( 0,32 \times \lg\left(\frac{V}{m^3}\right) - 0,17 \right) s$$

*Dabei ist:*

$T_{\text{soll}}$  *Sollnachhallzeit [s]*

$V$  *Raumvolumen [m<sup>3</sup>]*

Räume in Kindertagesstätten können als vergleichbare Unterrichtsbauten angesehen werden, sodass sowohl die für Schulen und vergleichbare Unterrichtsbauten beschriebenen Anforderungen nach auch auf Räume in Kindertageseinrichtungen übertragen werden können.

## 2.6.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Grundsätzlich bedeutet der Einsatz mechanischer Lüftungssysteme – unabhängig ob Sanierungsfall oder Neubau – eine kostenintensivere Investition gegenüber der Fensterlüftung. Mechanische Lüftungssysteme können zu einer Reduzierung der Lüftungswärmeverluste und somit auch zu einer Einsparung hinsichtlich des Wärmebedarfs beitragen, erzeugen jedoch zeitgleich Kosten für den Betrieb und die Instandhaltung. Das Verhältnis des erzielten Gewinns zum eingesetzten Kapitalaufwand definiert dabei die Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme. Das Energieeinsparungsgesetz [57] verlangt, dass umgesetzte, technische Maßnahmen grundsätzlich zu einer wesentlichen Verminderung der Energieverluste beitragen. Zudem müssen die eintretenden Einsparungen die Aufwendungen innerhalb eines angemessenen Zeitraumes erwirtschaften können. Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer umgesetzten Maßnahme wird der Gewinn den Investitions- und Folgekosten gegenübergestellt [58]. Als Gewinn wird in diesem Zusammenhang die energetische Einsparung durch reduzierte Energiekosten definiert. Für die Analyse zur Wirtschaftlichkeit wird eine Vollkostenbetrachtung durchgeführt.

## 2.7 Stand der Forschung

Im Folgenden werden vergleichbare Forschungsprojekte und deren Ergebnisse vorgestellt. Zusammenfassend kommen die vorgestellten Studien zu dem Ergebnis, dass eine freie Fensterlüftung allein nicht zu einer konstant guten, lerngerechten Raumluftqualität führen kann. Keine der im Folgenden beschriebenen Studien stellt einen ökonomischen oder wirtschaftlichen Vergleich der Lüftungssysteme her. Es werden lediglich Aussagen zu notwendigen und umsetzbaren Luftwechselraten getroffen und den Komfortkriterien gegenüber gestellt.

### 2.7.1 Ausstattung von Klassenräumen

In einem 2009 veröffentlichten Artikel werden die Einflussgrößen zur Ausstattung von Klassenräumen zur Raumkonditionierung und Beleuchtung zusammengeführt [59]. Es wurden 23 Schulen (106 Klassenraumtypen) im Landkreis Miesbach in Oberbayern begangen und sowohl die baulichen Gegebenheiten, als auch die technischen Ausstattungen und die Belegungsdichte und Belüftungsmöglichkeiten erhoben. Abb. 13 zeigt die Anzahl der untersuchten Schultypen.

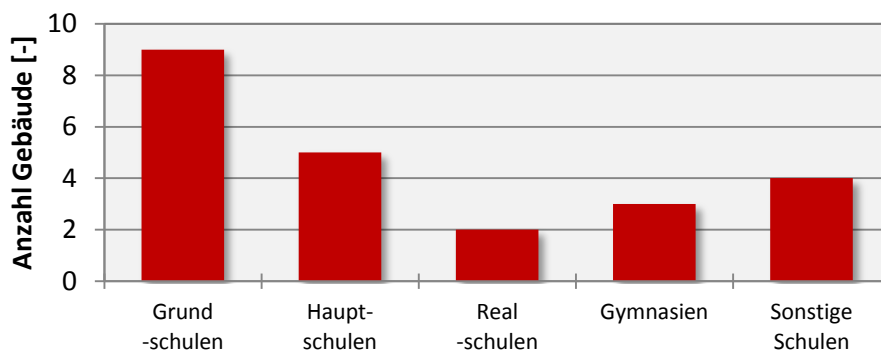


Abb. 13 Anzahl untersuchter Schulen nach Schultyp [59]

Insgesamt besitzen 13 der untersuchten Schulen Bauabschnitte unterschiedlichen Baujahren. Abb. 14 zeigt die Gesamtverteilung der Baualtersklassen.

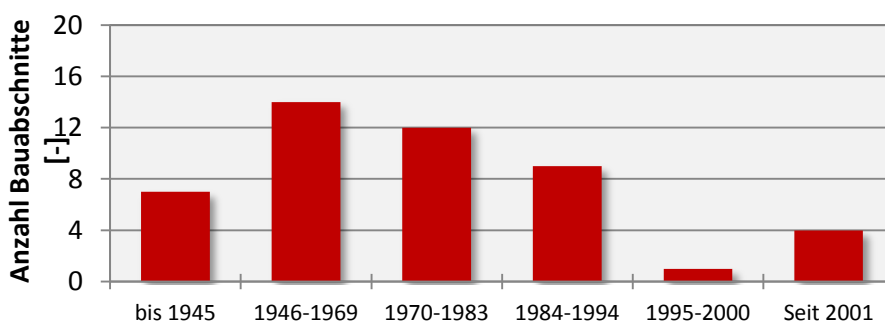


Abb. 14 Anzahl der Bauabschnitte nach Baualtersklasse [60]

Zusammenfassend werden folgende bauliche Gegebenheiten für die untersuchten Klassenräume genannt:

- 80 % besitzen eine normale bis geringe Belegungsdichte mit mindestens 2 m<sup>2</sup>/ Schüler
- 88 % besitzen eine mittlere bis hohe thermische Masse
- Der Fensterflächenanteil liegt bei 30 % bis 60 %
- 50 % besitzen einen Sonnenschutz
- Der bauliche sommerliche Wärmeschutz ist als unzureichend zu bewerten
- Zwei Drittel weisen eine gute bis mittlere Tageslichtversorgung auf
- Nahezu 100 % werden natürlich gelüftet, am häufigsten über Drehkipp- oder Schwingflügel
- Drei Klassenräume (Fachräume) besitzen raumluftlufttechnische Anlagen
- Die bereitgestellte öffentbare Fensterfläche liegt, bezogen auf die gesamte Fensterfläche, bei 80 %.

Es wird beschrieben, dass besonders in Grundschulen die Öffnungsmöglichkeiten der Fensterflügel aufgrund dekorativer Maßnahmen, wie z.B. das Platzieren von Blumentöpfen, nicht genutzt werden. Weiterhin wird genannt, dass einige der untersuchten Klassenräume Lüftungsschlitze besitzen, welche jedoch schwergängig zu bedienen sind. Daraus wird geschlossen, dass derartige Lüftungsmöglichkeiten in der Regel nicht genutzt werden und demzufolge keine ausreichende Belüftung der Klassenräume über eine freie Fensterlüftung erzielt werden kann.

### **2.7.2 Raumklimatische Planungsgrundlagen für Klassenräume**

Aufbauend auf den in Kapitel 2.7.1 beschriebenen Ergebnisse, folgte ein weitere Artikel der die Grundlagen für die raumklimatische Planung von Klassenräumen zusammenführt [60]. Es erfolgt eine Beschreibung der Anforderungen an das Raumklima unter Berücksichtigung der anzuwendenden Normen und dem Hinweis auf den Leitfaden des Umweltbundesamtes [17] hinsichtlich der Raumtemperatur, der Belichtung, der Akustik und der Belüftung. In Bezug auf die Belüftung wird gleichermaßen auf die „*Pettenkofer Zahl*“ verwiesen.

Weiter wird angeführt, dass die meisten Schulen in Deutschland über Fenster belüftet werden und dass aufgrund der schlechten Dosierbarkeit der Luftmengen im Winter thermische Behaglichkeitsprobleme auftreten, die zu einer unzureichenden Fensteröffnung führen. Selbst ein konsequentes Stoßlüften in den Pausen bei Unterrichtsblöcken von 45 Minuten führe nicht zu einer ausreichenden Frischluftzufuhr gemäß des Leitfadens des Umweltbundesamtes. In Folge wird für die Planung von Klassenräumen ein 2,5- bis 4,5-fachen Luftwechsel zur Einhaltung der angestrebten Raumluftqualität empfohlen. Die Belüftung kann

dabei sowohl über die Fenster als auch mechanisch – zentral oder dezentral – erfolgen. Auch das Prinzip der hybriden Lüftung [61], welche die freie Lüftung mit mechanisch unterstützten Systemen kombiniert, bietet großes Potenzial. Abschließend werden das richtige Betreiben der eingesetzten Technik und das Informieren der Lehrer und Schüler als wesentliche Kriterien für eine Verbesserung des Raumklimas benannt.

### 2.7.3 Freie Fensterlüftung

#### 2.7.3.1 Untersuchungen an bayerischen Schulen

In einer Studie wurde die Belastungssituation in bayerischen Schulen untersucht [62]. Die Zielsetzung des Projekts besteht darin die Möglichkeiten zur Verbesserung der Raumluftqualität bei freier Fensterlüftung zu ermitteln und diese gemeinsam mit den Nutzern umzusetzen. Das Vorhaben verlief in zwei Teilen mit einer Wintermessung in 92 Klassenräumen von 46 Schulen und einer Sommermessung in 76 Klassenräumen von 38 Schulen. Bei den Schulen handelt es sich um Grundschulen und weiterführende Schulen in München und im Landkreis Dachau. In jedem der Klassenräume wurden einen Tag lang während der Unterrichtszeit die Parameter Temperatur, relative Luftfeuchte, CO<sub>2</sub>-Konzentration, VOC und Feinstäube in der Innenraumluft gemessen. In der überwiegenden Anzahl der vermessenen Klassenräume wurde eine unzureichende Raumluftqualität in der Wintermessperiode festgestellt. Abb. 15 zeigt die Minimal-, Maximal- und Medianwerte der Wintermessung.

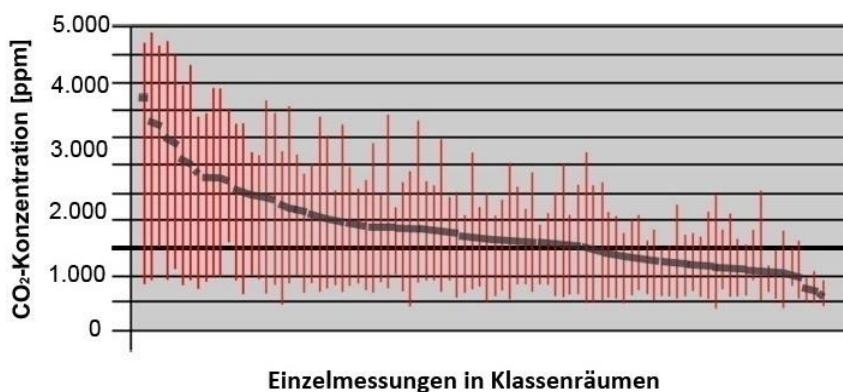


Abb. 15 Wintermessperiode (Min.-, Max.-, Medianwerte) [62]

Für die Sommermessung konnten hingegen keine statistisch bedeutsamen Ereignisse in den Auswertungen erkannt werden. Die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen entsprachen den Anforderungen. Aufgrund dieses Ergebnisses wird auf ein ausreichendes Lüftungsverhalten in den Sommermonaten geschlossen. Als Schlussfolgerung wurde ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der Außenlufttemperatur und einer unzureichenden Fensterlüftung beschrieben. Die Luftqualität bei natürlich belüfteten Räumen ist im Winter aufgrund unzureichenden

Lüftungsverhaltens schlechter als im Sommer [62].

### 2.7.3.2 Untersuchungen zum Raumklima

In einer weiteren Studie wurden verschiedene Klassenräume einer Klosterschule in Osnabrück untersucht [63]. Die Schule besitzt verschiedene Gebäude unterschiedlicher Baualterklassen. Die Messungen zum Raumklima und zur Raumluftqualität erfolgten in fünf Klassenräumen mit freier Fensterlüftung über den Zeitraum von 29 Monaten. Ziel des Projektes war es repräsentative Datensätze über das Raumklima in Klassenzimmern für zukünftige Sanierungsfälle zu ermitteln [64].

Gemessen wurden die Raumlufttemperatur und die –feuchtigkeit, sowie der CO<sub>2</sub>-Gehalt. Zur Erfassung der Fensteröffnungszeiten wurden Fensterkontakte installiert. Für die Auswertungen, Gegenüberstellung und Darstellung des tageszeitlichen Verlaufes der Ergebnisse wurden Schulstundenmittelwerte gebildet.

Abb. 16 zeigt die Ergebnisse der Winterperiode. Die Auswertungen erfolgten als Box-Plot [65]. Die Box zeigt dabei den Bereich, in dem die mittleren 50 % der erhobenen Daten liegen. Die Werte für Minimum und Maximum definieren je das untere und obere Quantil.

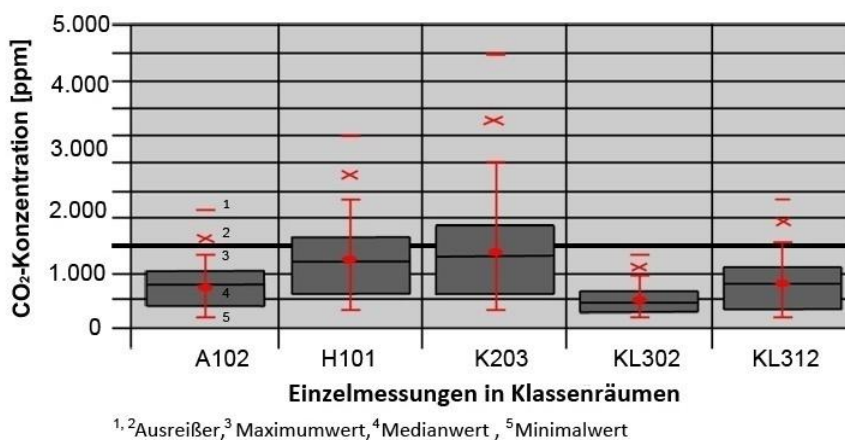


Abb. 16 Boxplot Zeitraum Nov.-März, 8:00 bis 13:00 Uhr [66]

Die Messwerte in den Räumen A102, KL302 und KL312 bleiben nahe der natürlichen CO<sub>2</sub>-Konzentration der Außenluft. Es wird angenommen, dass die Räume nicht belegt waren. Die Räume H101 und K203 hingegen zeigen sehr hohe Schwankungen der CO<sub>2</sub>-Konzentration. 25 % der Messwerte in Raum H101 liegen oberhalb von 1.700 ppm, in Raum K203 sogar oberhalb von 1.900 ppm. Aus den Ergebnissen der Wintermessung wird geschlossen, dass die Fensteröffnungen von der Außenlufttemperatur abhängig sind und bei niedrigeren Außenlufttemperaturen auch weniger gelüftet wird.

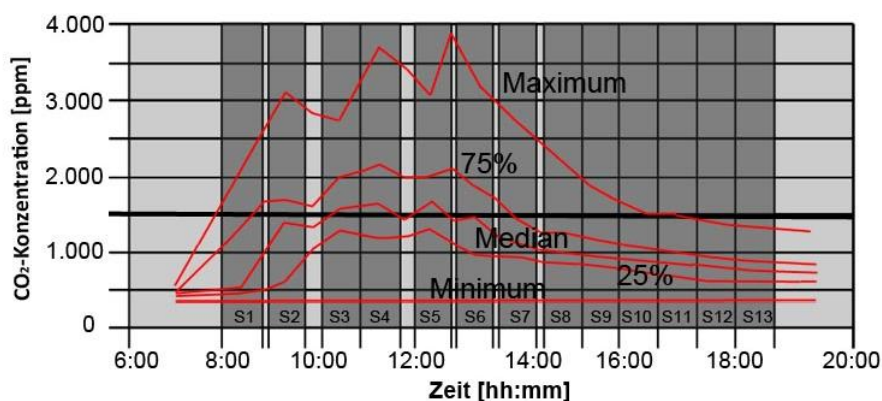
Für den Zeitraum November bis Mai wurde der Status der Fenster im Minutentakt erfasst und ausgewertet.

Tabelle 24 zeigt die Medianwerte für die Fensteröffnungszeiten gegenüber den Innen- und Außenlufttemperaturen.

**Tabelle 24 Medianwerte in der Unterrichtszeit Nov.-Mai [66]**

Klassenraum	Außenlufttemperatur	Innenlufttemperatur	Fensteröffnungszeit pro Schulstunde (45 min)
H 101	8,1 °C	19,8 °C	0,00 h
A102	8,1 °C	19,6 °C	0,02 h
K203	8,0 °C	18,6 °C	0,13 h
KL 302	8,0 °C	19,5 °C	0,05 h
KL 312	8,2 °C	19,0 °C	0,25 h

Der ermittelte Medianwert für die Fensteröffnungszeiten im Messzeitraum November 2006 bis Mai 2007 ist für alle Räume sehr gering. In Raum H101 waren 65 % der erfassten Werte für die Fensteröffnung gleich Null, was bedeutet, dass in 65 % der betrachteten Schulstunden die Fenster während der gesamten Schulstunde geschlossen waren. Um das Lüftungsverhalten in Bezug zur Außen- und Innenlufttemperatur stellen zu können, wurden Rangkorrelationen berechnet. Das Ergebnis zeigte nur für den Klassenraum H101 eine bedeutende Korrelation zwischen der Fensteröffnungszeit und der Außenlufttemperatur. Eine signifikante Korrelation zwischen Innenlufttemperatur und Fensteröffnungszeit konnte hingegen für alle untersuchten Räume herausgestellt werden. Daraus wurde geschlossen, dass mit steigender Innenlufttemperatur auch die Fensteröffnungszeit steigt. Abb. 17 zeigt die über die Monate Januar und Februar für jede Schulstunde und jede Pause gemittelte CO<sub>2</sub>-Konzentration.



**Abb. 17 Gemittelte Verläufe CO<sub>2</sub> Raum K203 [66]**

Die Medianwerte in den Pausen sind geringer als die Mediane in den Schulstunden unmittelbar vor der Pause, was bedeutet, dass die Fenster während der Pausen geöffnet wurden. 50 % aller Werte von Stunde drei bis sechs lagen dabei zwischen 1.200 und 2.000 ppm. Schlussfolgernd wurde formuliert, dass für die Aufrechterhaltung eines Luftwechsels zur



Begrenzung der CO<sub>2</sub>-Konzentration auf akzeptable Werte von maximal 1.000 ppm eine kontinuierliche Lüftung erforderlich ist. Allerdings sei dafür eine freie Fensterlüftung kaum geeignet, da in der untersuchten Schule trotz CO<sub>2</sub>-Sensoren, die den aktuellen Messwert anzeigten, nicht auf eine Einhaltung akzeptabler Werte geachtet wurde. In der Heizperiode mit kalten Außenlufttemperaturen verursachte die Fensterlüftung eine Absenkung der Raumlufttemperatur, was zu einer Reduzierung der Lüftungsaktivität führte.

### **2.7.3.3 Gesundes Lernen in Schulen**

In den Niederlanden wurde 2006 eine Studie zum Langzeiteffekt von Lüftungskonzepten bei freier Fensterlüftung durchgeführt [67]. Die Lehrer erhielten Anweisungen zum richtigen Lüften und den Schülern wurde in Lernpaketen das korrekte Lüftungsverhalten erläutert. Eine Verbesserung der Raumluftqualität konnte jedoch mit dieser Methode nur kurzzeitig erzielt werden. Daraus resultierend wurde der Einsatz von Lüftungsampeln in Kombination mit den Lernpaketen empfohlen. Schlussfolgernd wurde ein positiver Langzeiteffekt des Einsatzes der Lüftungsampeln beschrieben, da den Schülern die Möglichkeit gegeben wird die Raumluftqualität visuell selbst zu erkennen und entsprechend zu handeln.

### **2.7.4 Hybride Lüftung (Kombination von freier und mechanischer Belüftung)**

Hybride Lüftung ist eine Kombination aus mechanischer und natürlicher Lüftung. Beide Lüftungsarten können zeitgleich oder zeitversetzt eingesetzt werden [1]. Beispielsweise kommt ein das mechanische System zum Einsatz, wenn aufgrund der Witterungsverhältnisse eine natürliche Lüftung die thermische Behaglichkeit negativ beeinflussen würde. Darüber hinaus können raumlufttechnische Systeme mit geringen Luftvolumenströmen als Lüftungsunterstützung in der Unterrichtszeit CO<sub>2</sub>-Spitzen reduzieren.

#### **2.7.4.1 Hybride Lüftungssysteme für Schulen**

In einer Studie wurden die Möglichkeit der Umsetzung hybrider Lüftungssysteme in Schulen untersucht [68]. Die hybride Lüftung wurde über ein Zusammenwirken mechanischer und natürlicher Antriebskräfte definiert. Eine Regelung für eine automatisierte Fensterlüftung über Antriebsmotoren bezieht Wetterdaten, Geräuschpegelmissionen und Innenraumluftparameter mit ein. Kommt es nicht zu einer natürlichen Lüftung, schaltet die mechanische Lüftung automatisch ein.

Die automatisierte Fensteröffnung wurde in einem Versuchsstand mit Dummies und unter realen Unterrichtsbedingungen mit Schülern erprobt und optimiert [61]. In verschiedenen Anforderungsprofilen für den Sommer- und Winterfall und je nach Tageszeit erfolgte eine automatisierte Fensterlüftung. Untersucht wurden die bestmögliche Anordnung und die Öffnungsmöglichkeit der Fenster in Bezug auf einen konstanten Luftaustausch und die pra-

xistaugliche Umsetzung automatisierter, motorischer Fensteröffnungen.

Es wurde festgestellt, dass dieses System der automatisierten Öffnung der Fensterflügel auch bei kalten Außenlufttemperaturen einen Anstieg der CO<sub>2</sub>-Werte oberhalb der gängigen Grenzwerte verhindern kann, ohne dabei die thermische Behaglichkeit einzuschränken. Auch bei sehr geringen Außentemperaturen konnte die Raumtemperatur mit der untersuchten, hybriden Lüftung bis zu einem 2,5-fachen Luftwechsel in einem akzeptablen Bereich gemäß der im Vorfeld beschriebenen Komfortkriterien gehalten werden.

#### 2.7.4.2 Hybride Lüftungstechnik für Schulgebäude

Aufbauend auf der Studie aus dem vorhergehenden Kapitel 2.7.4.1 wurde ebenfalls die freie Fensterlüftung in Kombination mit einer mechanischen Lüftung in einem Feldversuch in einer Berliner Schule untersucht [69].

Die technischen Komponenten der mechanischen Belüftung wurden in die Fassadenelemente unterhalb der Fenster im Brüstungsbereich integriert. Die Regelung des Lüftungsgeschäftes erfolgt stufenlos und bedarfsgerecht. Das Regelungskonzept berücksichtigt dabei Tageszeit- und belegungsabhängige Betriebsmodi. Die Fensterflügel waren zusätzlich motorisch steuerbar. Abb. 18 zeigt die Zusammensetzung der zugeführten Luftmengen im Vergleich von natürlicher, mechanischer und hybrider Lüftung. Die Grundlüftung erfolgt bei der hybriden Lüftung ebenfalls über die Fenster, der Fehlbetrag wird mittels mechanischer Belüftung kompensiert. Es wird beschrieben, dass sich dieses System besonders für den Sanierungsfall eignet.

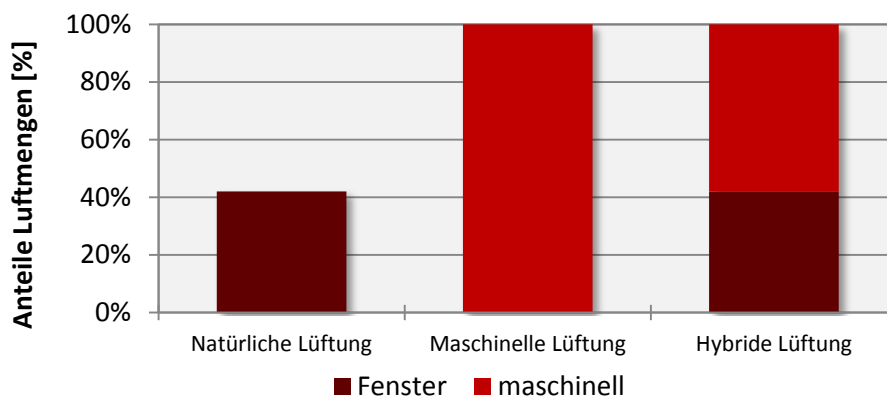
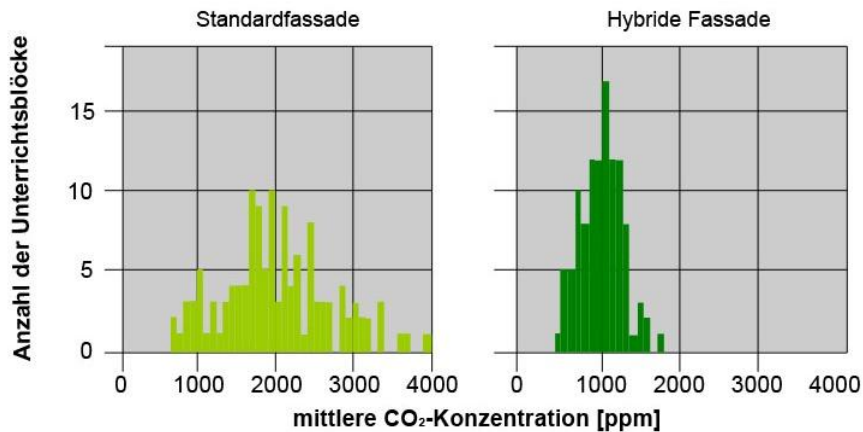


Abb. 18 Vergleich zugeführte Luftmengen [69]

Zum Vergleich wurde in zwei baugleichen Räumen gemessen. Untersucht wurden die Raumlufttemperaturen und die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen der Innenraumluft. Im Raum mit der Hybridlüftung wurden zusätzlich Parameter der Lüftungsgeräte, wie Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und CO<sub>2</sub>-Konzentration, sowie Druck und Luftvolumenstrom erfasst. Über ein Touchpanel im Raum konnten die Nutzer auf die Einstellungen der Lüftungsgeräte in Hin-

blick auf die Raumlufttemperatur und den Luftvolumenstrom Einfluss nehmen. Zusätzlich wurde ein Fragebogen zur subjektiven Bewertung des Innenraumklimas an die Schüler beider Räume verteilt.

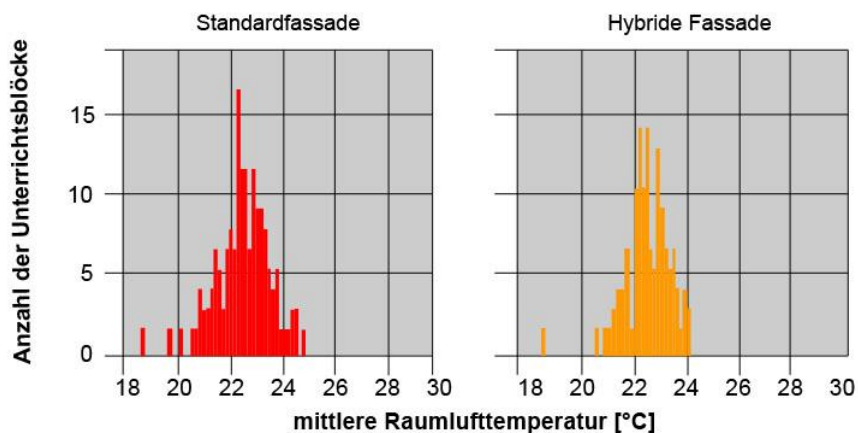
Die Ergebnisse der Messdatenauswertung aus der Wintermessung in Abb. 19 zeigen eine eindeutige Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Konzentration für den Raum mit der Hybridfassade.



**Abb. 19 Mittelwerte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen Winter [69]**

Der Raum mit der Standardfassade weist häufig CO<sub>2</sub>-Konzentrationen oberhalb von 2.000 ppm auf, wohingegen die Auswertung des Raumes mit der Hybridfassade nur vereinzelt Maximalwerte von 1.800 ppm aufzeigt. Beschrieben wird eine Verminderung des Medianwertes für die CO<sub>2</sub>-Konzentration um 880 ppm für die Hybridfassade gegenüber der Standardfassade.

Die Auswertung der Messdaten zu den Raumlufttemperaturen der Wintermessung in Abb. 20 zeigt, dass der Raum mit der Standardfassade höhere Innenraumlufttemperaturen als der Raum mit der Hybridfassade aufweist.



**Abb. 20 Mittelwerte Raumlufttemperaturen Winter [69]**

In diesem Zusammenhang wird die Hybridfassade positiver bewertet, da die Innenraumlufttemperaturen mit Werten zwischen 20 °C und 25 °C dort eher den Anforderungen nach DIN

EN 15251 entsprechen. Zudem wird geschlussfolgert, dass eine reduzierte Innenraumlufttemperatur sowohl eine bessere Leistungsfähigkeit der Schüler als auch einen geringeren Energieverbrauch hinsichtlich der Erwärmung des Raumes bedeutet. Insgesamt wird eine deutliche Verbesserung des Innenraumklimas und eine gute Nutzerakzeptanz für die Hybridfassade resümiert [69].

### 2.7.4.3 Pilotprojekt Schulhaus Untermoss

In einem Schweizer Pilotprojekt wurde der Vergleich einer freien Fensterlüftung in Kombination mit mechanischen Stellmotoren zur kontrollierten Fensterlüftung in einem Schulhaus in Untermoss dokumentiert [70].

Untersucht wurden vier Klassenräume mit gegenüberliegenden Fensterfronten. Die gegenüberliegenden Fenster ermöglichten eine Querlüftung der Klassenräume. In zwei der Räume wurden an je zwei Kippfenstern Stellmotoren zum automatisierten Öffnen und Schließen der Fensterflügel montiert. Die Regelung der Antriebe der Motoren erfolgte über einen Zentralrechner, welcher mit Daten von Messfühlern im Klassenraum ( $\text{CO}_2$ -Konzentration und Raumtemperatur) und von einer Wetterstation auf dem Dach gespeist wurde. Der Öffnungswinkel der Fensterflügel wurde dabei den fortlaufenden Wetter- und Raumluftdaten angepasst. Die Nutzer hatten während der Projektlaufzeit die Möglichkeit der manuellen Übersteuerung des Systems.

Die Auswertung der Messergebnisse in Abb. 21 zur Luftqualität in den kontrolliert belüfteten Klassenräumen Zimmer 5 und 7 fällt befriedigend aus. Mehr als drei Viertel der Unterrichtszeit wiesen einen  $\text{CO}_2$ -Medianwert von unter 1.350 ppm auf.

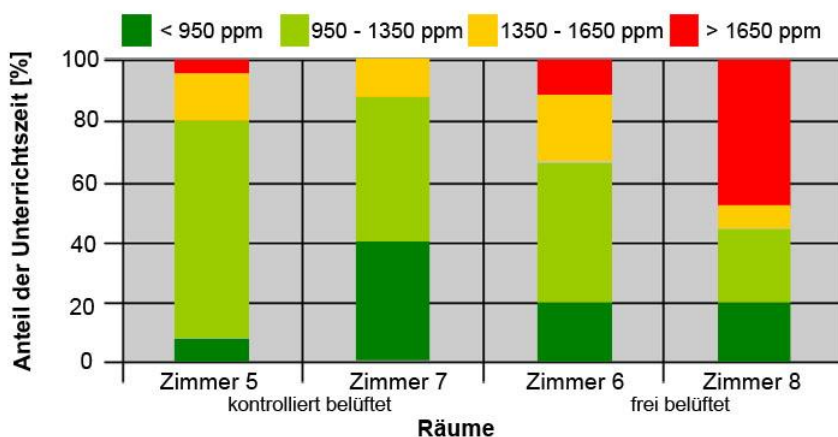


Abb. 21 Prozentuale Verteilung Luftqualität Unterrichtszeit [70]

Die Auswertung von Zimmer 6 zeigt, dass mit einer konsequent durchgeführten freien Fensterlüftung ebenfalls eine befriedigende Raumluftqualität erzielt werden kann. Dazu ist jedoch eine Öffnung der Fensterflügel während der Unterrichtszeit und in allen Pausen not-

wendig. Die Auswertung von Zimmer 8 in Abb. 21 (seite 38) zeigt, dass die Raumluftqualität bei unzureichender freier Fensterlüftung als inakzeptabel zu bewerten ist.

## 2.7.5 Vergleich freier und mechanischer Lüftung

### 2.7.5.1 Niedersächsisches Schulmessprogramm

In einer Studie, die die Ergebnisse der Zusammenarbeit des Niedersächsischen Landesgesundheitsamtes mit dem Niedersächsischen Landesinstitut für Fort- und Weiterbildung im Schulwesen und Medienpädagogik dokumentiert, wurden in sieben Schulen lufthygienische Untersuchungen zur CO<sub>2</sub>-Konzentration in frei und mechanisch belüfteten Klassenräumen angestellt [71].

Im Zeitraum eines Jahres wurden stichprobenartige Messungen über je zwei Schultage in der Heiz- und Nicht-Heizperiode angestellt. Während dieser Messungen wurden die Schüler und Lehrer angehalten, die Klassenraumlüftung so wie sonst üblich durchzuführen. Ledig in den letzten beiden Unterrichtsstunden sollten die Fenster geschlossen gehalten werden. Die Referenzschulen waren sowohl freie über die Fenster als auch mechanisch belüftet Gebäude.

Untersucht wurden im Sommer insgesamt 48 Klassenräume, vier Seminarräume und vier weitere Räume wie Lehrerzimmer und im Winter 50 Klassenräume und vier Seminarräume. Bei den Klassenräumen sind es dabei 78 Messtage in Klassenräumen und 20 Messtage in Fachräumen.

Für die Auswertung der gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentration in den frei belüfteten Schulen wurden im Anschluss die Minimum-, Maximum- und Mittelwerte, der Median und das 95 %-Perzentil ermittelt. Der Grenzwert zur Bestimmung der Raumluftqualität wurde mit 1.500 ppm definiert. Die Bestimmung der Überschreitungshäufigkeit des definierten Grenzwertes von 1.500 ppm wird in Tabelle 25 dargestellt.

**Tabelle 25 Darstellung CO<sub>2</sub>-Messergebnisse [71]**

<b>CO<sub>2</sub>-Konzentration</b>	<b>Sommer (n=22)</b>	<b>Winter (n=36)</b>
<i>DIN-Überschreitungen (&gt; 1.500 ppm)</i>	68 % (15 Fälle)	11 % ( 4 Fälle)
<i>DIN-Unterschreitungen (&lt; 1.500 ppm)</i>	32 % ( 7 Fälle)	89 % (32 Fälle)

Während der Unterrichtszeit zeichneten sich an 39 von 58 Messtagen Überschreitungen des Grenzwertes von 1.500 ppm ab, wobei diese sowohl in ihrer zeitlichen Dauer als auch in der Höhe deutlich variierten. Abschließend wurde festgestellt, dass ein Zusammenhang zwischen der CO<sub>2</sub>-Konzentration und der Außenlufttemperatur besteht. Je niedriger die Außenlufttemperatur ist, desto höher steigt der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Innenraumluft. In den Schu-

len mit mechanischen Lüftungssystemen konnten insgesamt keine Überschreitung des Grenzwertes von 1.500 ppm festgestellt werden.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde ein Computerprogramm zur Simulation von CO<sub>2</sub>-Verläufen in Unterrichtsräumen entwickelt das die Betrachtung verschiedener Belegungs- und Lüftungsvarianten ermöglicht [72]. Das Programm erlaubt die Ermittlung notwendiger Luftwechselraten für Klassenräume mit individueller Schülerbesetzung unterschiedlichen Alters und Aktivitätsgrad.

### **2.7.6 Mechanische Belüftung – dezentral**

Zum Zeitpunkt der Bearbeitung lagen keine aussagekräftigen Berichte zur Untersuchung der Raumluftqualität von ausschließlich dezentral belüfteten Klassenräumen in Schulen vor.

### **2.7.7 Mechanische Belüftung - zentral**

#### **2.7.7.1 Mechanische Klassenzimmerlüftung in Österreich**

In einer Studie in 2007 wurden bestehende mechanische Klassenzimmerlüftungen an 16 ausgewählten Schulen in Österreich mittels Messungen zur Raumluftqualität evaluiert [73]. Erhoben wurden die CO<sub>2</sub>-Konzentration, die Raumlufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit.

Die Studie beschreibt die Unentbehrlichkeit mechanischer Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung für Klassenzimmer in Schulen als Ausgangspunkt der Untersuchung mit der Begründung, dass mangelnde Raumluftqualität in Schulen mit Fensterlüftung in zahlreichen Studien hinreichend belegt wurde. Es wurden sowohl Fehler und Mängel als auch Lösungen aus bestehenden Projekten gesammelt um Qualitätskriterien für zukünftige Umsetzung von Klassenzimmerlüftungen bei Neubau und Sanierung formulieren zu können.

Neben den technischen Aspekten wurde ein besonderer Fokus auf die Erfassung und Darstellung der Akzeptanz bei den Nutzern gelegt. Die Akzeptanzanalyse, bei der ein schriftlicher Fragebogen eingesetzt wurde, gab Aufschluss über die Notwendigkeit einer intensiven Kommunikation mit den Nutzern, um Missverständnisse und falsche Erwartungen minimieren und eine optimale Nutzung der Lüftungssysteme erreichen zu können.

Bei der technischen Analyse wurde neben der Evaluierung der Lüftungskonzepte (dezentral, semizentral, zentral) ebenfalls besonderer Wert auf die Luftmengenwahl, die Luftverteilung, den Druckverlust, die Art der Wärmerückgewinnung, den elektrischen Energieverbrauch und die erreichte Raumluftqualität gelegt.

Tabelle 26 zeigt die Ergebnisse zu den Feldmessungen der 16 Schulen.

**Tabelle 26 Messwertübersicht Klassenzimmerlüftung Österreich [73]**

Nr.	CO <sub>2</sub> -Werte <sub>max</sub>	Temp <sub>min</sub>	Temp <sub>max</sub>	r.F. min	r.F. max
1	2.500 ppm	19,0 °C	24,0 °C	27,0 %	36,0 %
2	1.200 ppm	20,0 °C	23,0 °C	22,0 %	34,0 %
3	1.100 ppm	21,0 °C	24,0 °C	25,0 %	30,0 %
4	1.500 ppm	20,0 °C	24,0 °C	30,0 %	40,0 %
5	2.000 ppm	18,0 °C	24,0 °C	35,0 %	45,0 %
6	1.737 ppm	19,0 °C	25,0 °C	28,0 %	38,0 %
7	1.000 ppm	25,7 °C	27,6 °C	60,0 %	63,0 %
8	1.600 ppm	21,0 °C	24,0 °C	27,0 %	45,0 %
9	1.270 ppm	23,9 °C	27,0 °C	38,0 %	41,0 %
10	1.700 ppm	24,1 °C	27,0 °C	43,0 %	50,0 %
11	2.990 ppm	19,0 °C	25,0 °C	23,0 %	37,0 %
12	2.800 ppm	20,0 °C	24,0 °C	25,0 %	40,0 %
13	1.450 ppm	23,5 °C	25,0 °C	20,0 %	47,5 %
14	2.300 ppm	20,0 °C	25,0 °C	35,0 %	45,0 %
15	1.600 ppm	19,5 °C	24,2 °C	45,0 %	54,0 %
16	1.200 ppm	21,0 °C	23,0 °C	36,0 %	43,0 %

*Einstufung der Messwerte*

Sehr gut	> 1.000 ppm	≤ 20 °C	≤ 24 °C	> 30 %	≤ 45 %
Gut	> 1.400 ppm	≤ 19 °C	≤ 25 °C	≤ 30 %	≤ 50 %
Befriedigend	> 19000 ppm	≤ 18 °C	≤ 26 °C	≤ 25 %	≤ 55 %
Ungenügend	> 2.000 ppm	< 18 °C	> 26 °C	≤ 20 %	> 55 %

Das Ergebnis führt die Ergebnisse aus Nutzerbefragung und Messung zusammen und benennt ein Verbesserungspotential bei der Auswahl der notwendigen Luftmengen, der Luftführung im Raum und der Regelungsstrategie. In der Ergebnisbewertung der Messungen wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es sich bei den Messungen um Tages- bzw. Monatsaufnahmen bei sehr unterschiedlichen Rahmenbedingungen handelt. Abschließend wird resümiert, dass Schulneubauten und Schulsanierungen ohne den Einbau mechanischer Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung nicht mehr zeitgemäß seien. Allerdings wird ebenfalls darauf hingewiesen, dass die bestehende Anlagennutzung und bisher umgesetzte Anlagenqualität nur in Teilen den Ansprüchen an eine qualitativ hochwertige Raumluft gerecht wird. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde ein Planungsleitfaden mit 61 Qualitätskriterien für mechanische Klassenzimmerlüftungen formuliert [74].

### 2.7.7.2 CO<sub>2</sub>-gesteuerte Lüftung in Schulen

Eine weitere Studie befasste sich mit der optimalen Steuerung von raumluftechnischen Anlagen in Unterrichtsräumen [75]. In drei Schulanlagen wurden insgesamt zehn Unterrichtszimmer mit raumluftechnische Anlagen mit und ohne CO<sub>2</sub>-Rückkopplung im realen Betrieb über mehrere Wochen innerhalb eines Jahres analysiert. Erhoben wurden sowohl die CO<sub>2</sub>-Konzentration, die Raumlufttemperatur als auch die Raumluftfeuchtigkeit. Darüber hinaus wurden Nutzerbefragungen durchgeführt. Ein Ergebnis der Studie ist die Bestätigung, dass mechanisch gelüftete Schulräume bei korrektem Betrieb tatsächlich die aktuellen Anforderungen für Lernbedingungen bei geringen Energieverbräuchen gewährleisten können. Zugleich wurde jedoch erneut herausgestellt, dass in vielen Schulräumen tatsächlich weiterhin unzureichende Raumluftqualität vorherrscht. Dieser Umstand wird auf die bestehenden Betriebsprobleme der Lüftungsanlagen zurückgeführt. Den Nutzerbefragungen zufolge wird ein Lüftungssystem gänzlich abgelehnt, sobald ein einzelnes Kriterium, wie beispielsweise die Geräuschentwicklung, als störend empfunden wird.

Die Anforderungen an die Raumluftqualität wurden wie folgt zusammengefasst:

- CO<sub>2</sub>-Konzentration max. 1.350 ppm (als Mittelwert über eine Unterrichtseinheit)
- spezifische Auslegungskriterien für Schulen:
  - Klassenräume ohne unterstützende Fensterlüftung: 30 m<sup>3</sup>/(h·Person)
  - Klassenräume mit unterstützende Fensterlüftung: 25 m<sup>3</sup>/(h·Person)
  - Lehrerzimmer: 36 m<sup>3</sup>/(h·Person)

Betont wird, dass die maximale CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1.350 ppm als Mittelwert über eine Unterrichtseinheit verstanden werden muss. Findet vor Unterrichtsbeginn eine ausreichende Fensterlüftung statt, können auch manuell gelüftete Klassenzimmer bei nicht allzu großer Belegungsdichte diesen Anforderungen gerecht werden. Es wird herausgestellt, dass eine CO<sub>2</sub>-Steuerung für Klassenräume mit stark variierender Belegung von Bedeutung ist, da eine reine Präsenzsteuerung zu hohen Laufzeiten der raumluftechnischen Anlagen führt. Im Vergleich zu einer Zeitsteuerung wird die Reduktion des Lüftungsbetriebs mit 40 % benannt. Als weiteres Ergebnis der Studie wird angegeben, dass Klassenräume hinsichtlich der mechanischen Belüftung nicht selbstverständlich gleichzusetzen sind. Es sei eine individuelle Untersuchung für jede raumluftechnische Anlage notwendig und Erkenntnisse könnten nicht ohne Prüfung auf jede beliebige Anlage übertragen werden.



### 3 HYPOTHESEN

Aus der Literaturanalyse und vorangegangenen Forschungsprojekten lassen sich die folgenden Hypothesen aufstellen, die im Verlauf der Arbeit überprüft werden.

**Hypothese [1] Die freie Belüftung über die Fenster wird trotz umfangreicher Studien und dem mehrfach nachgewiesenen Einfluss der Raumluftqualität auf die Schülerleistung in Klassenräumen nicht ausreichend umgesetzt.**

**Hypothese [2] Eine Nutzerschulung oder Sensibilisierung zur natürlichen Lüftung bringt nur kurzfristig Erfolg und kann langfristig keine Verbesserung des Lüftungsverhaltens erzielen.**

**Hypothese [3] Die Installation von raumlufttechnischen Anlagen – unabhängig ob zentral oder dezentral – führt in jedem Fall zu einer Verbesserung der Raumluftqualität und zu einer Steigerung des Wohlbefindens.**

**Hypothese [4] Für Bildungseinrichtungen ist eine nutzerabhängige Regelung der raumlufttechnischen Anlagen besser geeignet als eine Zeitsteuerung, da eine Anpassung der Volumenströme entsprechend der Belegung umgesetzt werden kann.**

**Hypothese [5] Die Anforderungen von Klassenzimmerlüftung sind auf die Belüftung von Hörsälen und Seminarräumen in Universitäten übertragbar.**

**Hypothese [6] Eine mechanische Belüftung von Kindertagesstätten und Kindergärten ist nicht notwendig. Dort kann aufgrund geringerer Belegungszahlen eine freie Fensterlüftung so umgesetzt werden, dass die Raumluftqualität den Anforderungen an ein konstant gutes Umfeld gerecht wird.**

Zur Beantwortung der Hypothesen muss die vorhandene Situation in Bildungsstätten betrachtet, analysiert und bewertet werden. In Kapitel 5 werden die vorhandenen Lüftungsszenarien in beispielhaften Bildungsstätten analysiert, bewertet und individuelle Optimierungskonzepte erläutert. In Kapitel 6 werden die Ergebnisse vorgestellt. In Kapitel 7 werden die Hypothesen anhand der Untersuchungsergebnisse diskutiert.

## 4 METHODIK UND WERKZEUGE

Es wurden insgesamt fünf Schulen mit 15 Klassen, eine Kindertagesstätte mit einer Kindergruppe und zwei Hörsäle mit verschiedenen Vorlesungen an einer Universität untersucht. Die Unterrichtsräume wurden anhand der im Folgenden beschriebenen Kriterien in Bezug auf die Lüftungskonzepte, die Bauzeit, die Nutzung und den Zustand der Gebäudehülle entsprechend ausgewählt. Mittels eines Langzeitmonitoring erfolgte eine umfangreiche Datenerfassung. Individuell entwickelte Feldversuche zur Klassenzimmerlüftung wurden umgesetzt und evaluiert.

### 4.1 Auswahl der Referenzgebäude

Es erfolgte die Erhebung von Bildungsstätten mit beispielhaften Lüftungskonzepten und eine Auswahl von passenden Referenzgebäuden unter Berücksichtigung von vier Auswahlkriterien (Tabelle 27) getroffen.

**Tabelle 27 Auswahlkriterien der Referenzgebäude**

<b>1.</b>	<b>Lüftungskonzepte</b>	<i>Freie Fensterlüftung Mechanische Lüftung (zentral) Mechanische Lüftung (dezentral)</i>
<b>2.</b>	<b>Bauzeit/ Gebäudealter</b>	<i>Historische Bauten um 1900 (vor 1930) Gebäude der 50er/ 60er Jahre (1930 - 1969) Gebäude der 70er Jahre (ab 1970)</i>
<b>3.</b>	<b>Nutzungsart</b>	<i>Schule Kindergarten Universität</i>
<b>4.</b>	<b>Betriebsdauer</b>	<i>Halbtagsbetrieb (nur vormittags) Ganztagsbetrieb (vor- und nachmittags)</i>

Im ersten Schritt erfolgte die Unterteilung der Gebäude in zwei Lüftungskategorien, „freie Fensterlüftung“ und „mechanische Lüftungsanlagen“. Folgend wurde nach Gebäudealter unterschieden. Die Gruppierung spiegelte dabei die typischen Bauzeiten für Schulgebäude wieder. „Historische Bauten um 1900“ besitzen hohe Räume und eine schwere Bauweise, „Gebäude der 50er/60er Jahre“ und „Gebäude der 70er Jahre“ weisen meist kleinere Räume mit geringeren Raumvolumina auf.

Die Unterteilung nach Nutzungsart diente zur Einteilung der Altersgruppen in Kleinkinder, Schüler und junge Erwachsene. Mit der Unterscheidung von jungen und älteren Schulklassen konnte im weiteren Verlauf der Untersuchung mögliche Optimierungsmaßnahmen aufgezeigt werden. Die Trennung in Ganztags- und Halbtagsbetrieb wurde nachrangig ein-

geordnet. Stattdessen wurde die Belegung der Räume als Kriterium für die Auswahl der Räume herangezogen. Die für die Untersuchung ausgewählten Klassenräume wurden weitestgehend unterbrechungsfrei genutzt.

In Universitäten geschah die Auswahl der Hörsäle ebenfalls mit Blick auf die unterbrechungsfreie Belegung. Ununterbrochen genutzte Räume bieten einen besseren Einblick in das Lüftungsverhalten der Nutzer in Bezug auf die Raumluftqualität. In Kindergärten oder Kindertagesstätten wurde ein Gruppenraum betrachtet, in dem sich die Kinder die meiste Zeit des Tages aufhielten.

## **4.2 Datenaufzeichnung/ Langzeitmonitoring**

In den Gebäuden wurden Messungen in ausgewählten, repräsentativen Räumen durchgeführt. Bei diesen Messungen handelt es sich um Langzeitmessungen die mit einer Dauer von zehn bis 31 Monaten durchgeführt wurden. Die detaillierte Darstellung der Messzyklen erfolgt in Kapitel 6. In den Klassenräumen wurden unauffällig Sensoren installiert, die Werte zur thermischen Behaglichkeit und Raumluftqualität erfassten und in einem Datenlogger speicherten. An den Fenstern installierte Kontakte dokumentierten zusätzlich in zwei der Referenzräume das Öffnen und Schließen der Fenster und gaben somit Aufschluss über das Lüftungsverhalten. Die Messfühler für Raumlufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und CO<sub>2</sub>-Konzentration wurden in 1,10 m Höhe montiert, das entspricht der Kopfhöhe sitzender Personen.

Das Messintervall betrug zwei, fünf oder zehn Minuten. Bei der Installation von Fensterkontakte waren zweiminütige Messintervalle notwendig, um auch kurze Stoßlüftungen abbilden zu können. In den Räumen ohne installierte Fensterkontakte genügten fünf- oder zehnminütige Messintervalle, da diese ausreichend Aufschluss über die Entwicklung der thermischen Verhältnisse und die der Raumluftqualität geben. Die Aufzeichnung der Außenlufttemperatur erfolgte in einem zehnminütigen Intervall.

Es wurden folgende Parameter erfasst:

- Raumlufttemperatur
- Rel. Raumluftfeuchtigkeit
- CO<sub>2</sub>-Konzentration
- Fensterkontakte/ Fensteröffnungen

Die eingesetzten Messfühler entsprechen den empfohlenen Gerätespezifikationen der VDI 6038 [76] und wurden zu Beginn der Messungen unter Laborbedingungen kalibriert.

#### 4.2.1 CO<sub>2</sub>-Konzentration

Die Erfassung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft erfolgte mit Messfühlern der Marke Driesen & Kern [77]. Es handelt sich um das Modell „SenseAir“, welches einen Messbereich von bis zu 6.000 ppm (0,6 Vol.-%) besitzt. Der CO<sub>2</sub>-Messwertgeber ist mit einer Messzelle und einem Infrarot-Emitter ausgestattet. Der Infrarot-Emitter erzeugt Lichtwellen, die auf die Messzelle treffen. Der Messwertgeber wird mit der Raumluft durchströmt und entsprechend der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft wird der erzeugte Lichtstrahl geschwächt oder gebrochen. Tabelle 28 zeigt die Messgenauigkeit des Fühlers.

**Tabelle 28 Messgenauigkeit CO<sub>2</sub>-Konzentration [77]**

Gemessenes Medium	Messbereich	Auflösung	Genauigkeit
CO <sub>2</sub> -Konzentration	0 - 6.000 ppm	1 ppm	30 ppm +/- 5 % des Wertes

#### 4.2.2 Raumlufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit

Die für das Projekt ausgewählten Temperatur- und Feuchtefühler „FHA646-E1“ der Firma AHLBORN [78] gehören in die Reihe der kapazitiven Messfühler für einen Messbereich von -20°C bis zu 60°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von bis zu 100 %. Der Messfühler besitzt zwei Elektroden. Die Raumluft durchströmt den Fühler und verändert je nach Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit die Dielektrizitätszahl. Diese Kapazitätsveränderung erzeugt ein Signal das aufbereitet und als Messwert ausgegeben wird. Die Messgenauigkeit der Fühler wird in Tabelle 29 dargestellt.

**Tabelle 29 Messgenauigkeit Raumlufttemperatur und Raumluftfeuchtigkeit [78]**

Gemessenes Medium	Messbereich	Auflösung	Genauigkeit
Raumlufttemperatur	- 20...+ 60 °C	0,1 °C	±0,4°C bei - 20 ... 0°C ±0,1°C bei 0 ... 60°C
Relative Luftfeuchtigkeit	0 ... 100 % r.F.	0,1 %	± 2 % r.F. bei 25°C ±3°C ± 5 % r.F. bei anderen Werten

#### 4.2.3 Fensterkontakte

An den Fensterrahmen und -flügeln wurden Kontakte installiert. Ein Sensor am Rahmen reagiert auf ein magnetisches Feld, welches durch ein am Fensterflügel installierten Magneten erzeugt wird. Beim Öffnen der Fenster wird der Magnet vom Sensor entfernt und dieser gibt eine Statusänderung an einen Datenlogger. Beim Schließen des Fensterflügels erfolgt eine weitere Statusmeldung. Diese Aufzeichnung ermöglicht eine genaue Erfassung des Lüftungsverhaltens, jedoch lässt sich mit dieser Methode nicht abbilden, ob Fensterflügel weit geöffnet oder nur gekippt werden.

#### 4.2.4 Wetterdaten

Tabelle 30 zeigt die Standorte der für das Projekt bezogenen Wetterdaten. Die Außenlufttemperaturen von Braunschweig wurden über einen Datenlogger gemessen und für Hamburg über eine Wetterstation in Hamburg-Bergedorf [79] bezogen. Für den Standort Wolfsburg wurden aufgrund der geographischen Nähe ebenfalls die Wetterdaten von Braunschweig verwendet.

*Tabelle 30 Standorte Wetterdatenbezug*

<b>Standort der Bildungsstätte</b>	<b>Standort der bezogenen Wetterdaten</b>
Hamburg	Hamburg Bergedorf (Wetterstation) [79]
Braunschweig	Braunschweig (Datenlogger, eigene Aufzeichnung)
Wolfsburg	

#### 4.2.5 Datenspeicherung und Weiterverarbeitung

Der Datenlogger „8590-9“ ist ein Messerfassungsmodul der Firma AHLBORN [78]. Er besitzt neun getrennte Messeingänge und vier geräteinterne Funktionskanäle, so dass ein Temperatur- und Feuchtigkeitsfühler zeitgleich zwei Signale an den Logger geben kann und dieser die Signale getrennt aufzeichnet. Die gespeicherten Datensätze werden über die AHLBORN ALMEMO-Software exportiert und anschließend mit Microsoft Excel ausgewertet.

#### 4.2.6 Lüftungsampel

Abb. 22. zeigt die „Luftgüte-Ampel“ der Firma J. Dittrich Elektronik [80]. Sie ist für den Einsatz in fensterbelüfteten Räumen konzipiert. Die „Luftgüte“ wird über die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Innenraumluft bewertet.



**Abb. 22** „Luftgüte-Ampel“ [80]

Das Gerät besitzt einen Infrarot-Transmitter zur Erfassung der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Raumluft und zeigt nach dem Ampelprinzip die „Luftgüte“ mittels Leuchtdioden an, Zusätzlich ertönen akustische Signale bei einer Veränderung der Raumluftqualität.

Tabelle 31 zeigt die Einteilung der Bewertungsintervalle. Die Intervalle orientieren sich nach Angabe des Herstellers an dem Leitfaden des Bundesumweltamtes [17].

**Tabelle 31 Bewertungsintervalle „Luftgüte-Ampel“ [80]**

<b>Anzeige der Diode</b>	<b>Akustisches Signal</b>	<b>CO<sub>2</sub>-Konzentration Raumluft</b>
<i>Grünes Licht</i>	<i>Kein Signal</i>	<i>&lt; 1.500 ppm</i>
<i>Gelbes Licht</i>	<i>Einfacher Signalton bei 1.500 ppm</i>	<i>1.500 - 2.500 ppm</i>
<i>Rotes Licht</i>	<i>Einfacher Signalton bei 2.500 ppm</i>	<i>2.500 - 3.000 ppm</i>
<i>Rotes Licht - blinkt</i>	<i>5-facher Signalton bei 3.000 ppm</i>	<i>&gt; 3.000 ppm</i>

Der Hersteller empfiehlt die Installation der Ampel im vorderen Bereich der Klassen, nahe der Tafel, in Blickrichtung der Schüler. Zur Unterstützung der Nutzung sollten zusätzlich Piktogramme, die im Klassenraum für alle Schüler sichtbar platziert werden.

### **4.3 Akustische Messungen**

Die akustischen Messungen in den Referenzräumen erfolgten mittels eines Schallpegelmessgerätes der Firma NORSONIC [81]. In den Referenzräumen wurde Störschallpegelmessungen vorgenommen. In Klassenräumen mit mechanischer Lüftungstechnik erfolgten die Messungen sowohl mit als auch ohne Betrieb der Geräte jedoch nicht im Schulbetrieb sondern nach Unterrichtsende gegen 16:00 Uhr am Nachmittag.

Zusätzlich wurden die Nachhallzeiten in den Räumen entsprechend in drei Messungen pro Raum ermittelt. Die Nachhallzeitmessung erfolgte entsprechend den Anforderungen nach DIN 18041 [55]. Der Störgeräuschpegel wurde nach DIN 45641 [82] ermittelt.

### **4.4 Wirtschaftlichkeit**

Zur Ermittlung und Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer umgesetzten Investition wird zwischen Methoden mit volks- und betriebswirtschaftlichem Ansatz unterschieden. Die volkswirtschaftliche Betrachtung zeigt den Einfluss der untersuchten Maßnahme auf die Gesellschaft als Untersuchungsschwerpunkt auf. Die betriebswirtschaftliche Methode wird als reine wirtschaftliche Betrachtungsweise angewendet [83]. Die Betrachtung erfolgt in dieser Arbeit als Vollkostenbetrachtung welche alle jährlich entstehenden Kosten im Zusammenhang mit dem Betrieb einer raumluftechnischen Anlage berücksichtigt. Angesetzt werden die Kapitalkosten (Umrechnung der Investition in jährliche Annuitäten), die Verbrauchskosten (Brennstoffe, Hilfsenergie) und die Betriebskosten (Wartung, Reparaturen). Die Berechnung erfolgt dynamisch nach der Annuitätenmethode nach DIN 2067 [84]. Die Wärmekosten wurden auf Basis berechneter Energiebedarfswerte aus einem vergleichbaren Projekt [85] ermittelt.

#### 4.5 Leistungsfähigkeit und Luftqualität

Die Ermittlung der Leistungsfähigkeit erfolgte mittels Konzentrationstests die bereits in einer Studie zu gesundheitsfördernden Einflüssen auf das Leistungsvermögen im schulischen Unterricht erfolgreich eingesetzt wurden [2]. Es handelt sich bei dem Konzentrationstest um Zahlen-Symbol-Zuordnungstests zur Messung der Aufmerksamkeit, bei denen die Zahlen von eins bis neun jeweils einem Symbol zugeordnet werden müssen. Abb. 23 zeigt eine beispielhafte Zahlen-Symbol-Zuordnung und drei Reihen mit wahllos aufeinander folgenden Zahlen unter denen die richtigen Symbole einzutragen sind. Bei der Bearbeitung sollen so viele Zahlen wie möglich dem richtigen Symbol zugeordnet werden.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
÷	)	+	┌	└	√	(	-	-

2	1	4	6	3	5	2	1	3	4	2	1	3	1	2	3	1	4	2	6	3	1	2	5	1

3	1	5	4	2	7	4	6	9	2	5	8	4	7	6	1	8	7	5	4	8	6	9	4	3

1	8	2	9	7	6	2	5	4	7	3	6	8	5	9	4	1	6	8	9	3	7	5	1	4

**Abb. 23 Leistungstest Beispiel [2]**

Die Schüler erhalten vor Beginn des Tests eine Einführung auf der Rückseite des Blattes, auf der sie zur Probe eine Beispielzeile ausfüllen. Die Bearbeitungszeit für die Schüler im Test beträgt 60 Sekunden, wobei in der ersten Reihe begonnen und der Reihe nach ausgefüllt werden muss, so dass nicht nur Geschwindigkeit sondern auch Sorgfalt beim Ausfüllen von den Schülern gefordert wird. Bei der Auswertung mittels einer Schablone wird sowohl die Anzahl ausgefüllter Kästchen als auch die Fehleranzahl berücksichtigt und daraus der Leistungsquotient ermittelt.

## 5 ANALYSE UND ANPASSUNG DER LÜFTUNGSSTRATEGIEN

Mit der Auswertung der Messergebnisse wurden die Lüftungssysteme analysiert. Auf dieser Basis wurden individuelle Maßnahmen zur Sicherstellung der erforderlichen Raumluftqualität mit einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von maximal 1.400 ppm unter Einhaltung einer angemessenen thermischen Behaglichkeit entwickelt. Zusätzlich wurden die möglichen Senkungen der Betriebskosten eruiert. Neben der Modifizierung der Lüftungsstrategien wurden bauliche Maßnahmen vorgeschlagen und umgesetzt.

### 5.1 Anpassung des Nutzerverhaltens

#### 5.1.1 Analyse und Verbesserung des bestehenden Nutzerverhaltens

Die nutzerorientierten Maßnahmen beziehen sich sowohl auf die mechanisch, als auch auf die frei belüfteten Räume. Einen Überblick über die Möglichkeiten zeigt Tabelle 32.

**Tabelle 32 Nutzerorientierte Maßnahmen**

<i>Freie Fensterlüftung</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Zuweisung von Verantwortlichkeit</i></li> <li>• <i>Sensibilisierung der Nutzer auf den Lüftungsbedarf</i></li> <li>• <i>Visualisierung der Luftqualität</i></li> </ul>
<i>Mechanische Lüftungssysteme</i>	<i>Information der Nutzer über vorhandene Systeme</i>

Eine Anpassung des Nutzerverhaltens wurde mittels der Umsetzung einer optimierten Fensterlüftung angestrebt. Weiterhin sollte die Zuweisung von Verantwortlichkeit in Form von Lüftungsdiensten innerhalb der Klassen zu einer Veränderung des Nutzerverhaltens beitragen. Eine Visualisierung der Luftqualität konnte mit der Installation von Lüftungsampeln umgesetzt werden.

Für die mechanischen Systeme konnte mittels Information über die vorhandenen Systeme und die Steuerung der Lüftungsgeräte eine Sensibilisierung der Nutzer erzielt werden.

#### 5.1.2 Nutzerbefragung und Interviews

In den Referenzräumen der Gebäude wurden Nutzerbefragungen – in Form von Fragebögen und Interviews – durchgeführt um Aufschluss über das Behaglichkeitsempfinden, die subjektive Einschätzung der Aufenthaltsqualität und das bestehende Lüftungsverhalten zu erhalten. Die Abfrage des Lüftungsverhaltens brachte zugleich eine Sensibilisierung der Nutzer für diese Thematik. Ein enger Austausch mit den Betreibern der Schulen, den Schülern und Pädagogen war dabei möglich. Die Auswertung der Nutzerbefragungen erfolgt in Kapitel 6.4.



### 5.1.3 Workshop mit Schülern

Die Analyse der Nutzerbefragungen und deren Bewertung bildeten einen Baustein bei der Erarbeitung optimierter Lüftungskonzepte. In Workshops, die in den Unterricht eingebunden waren, wurden diese modifizierten Lüftungsstrategien vermittelt und unter Mitarbeit der Schüler und Lehrkräfte kurzfristig auch umgesetzt.

In Projektstunden mit den Schülern wurden an die Altersklasse angepasste Inhalte zum Thema Raumluftqualität erörtert. Ziel war es eine Sensibilisierung der Schüler hinsichtlich physikalischer Grundlagen und CO<sub>2</sub>-Konzentration als Belastungsfaktor der Leistungsfähigkeit zu erreichen. Die Bearbeitung von Arbeitsblättern, das Austeilen von Handzetteln oder die Präsentation der Raumluftqualität mit Hilfe von CO<sub>2</sub>-Messfühlern waren dabei Teil der Workshops (Abb. 24).



Abb. 24 Schülerworkshop



Abb. 25 Beispiel Klassendienst

Die Schüler erarbeiteten selbstständig Konzepte, wie beispielsweise das angeleitete Lüften oder das Einführen von Lüftungspausen und setzten es unmittelbar um. Exemplarisch ist dabei die Einrichtung eines Lüftungsdienstes zu nennen. Klassendienste sind besonders in jungen Klassen beliebt und werden dort konsequent betrieben (Abb. 25). Auch die Installation von Lüftungsampeln in den Klassenzimmern konnte eine Sensibilisierung unterstützen, da sie den Schülern und Lehrern die Güte der Raumluftqualität auf einfache Weise verdeutlichen. Die Auswertungen und Bewertungen zur Nutzung der Lüftungsampel erfolgt in Kapitel 6.7.

### 5.1.4 Handlungsleitfaden für Pädagogen

Unterstützend wurden Leitfäden<sup>VII</sup> zur „motivierten Fensterlüftung“ an die Schulbetreiber, Lehrer und Betreuer ausgegeben. In Anlehnung an bereits erprobte und durchgeführte Studien aus vergleichbaren Projekten gaben diese sowohl Informationen als auch eine Hilfestellung für Maßnahmen zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassen- oder Be-

<sup>VII</sup> Die Leitfäden finden sich in Anhang 12.

treuungsräumen. Die Inhalte der Leitfäden umfassen immer eine Einführung in die Thematik, einen umzusetzenden Teil mit Arbeitsanweisungen und nachhaltige Empfehlungen.

Sowohl für Schulen als auch für Kindertagesstätten wurden die Leitfäden mit den physikalischen Grundlagen wie „CO<sub>2</sub> als Belastungsfaktor“ eingeleitet. Weiter wurden dem Leser Grenzwerte gemäß der Beschreibungen in Kapitel 2.4 erläutert und beispielhafte Projekte sowie eigene Messergebnisse vorgestellt. Diese dienten dazu, den Nutzern die Wirkung der CO<sub>2</sub>-Belastung in Schulklassen oder Betreuungsräumen näher zu bringen. Abschließend wurden individuelle, nachhaltige Empfehlungen für die Umsetzung und Beibehaltung optimierter Lüftungsstrategien im Schulalltag erläutert. Zusätzlich wurden präventiv mögliche Probleme bei der Umsetzung und deren Lösung genannt.

## 5.2 Bauliche und technische Maßnahmen

### 5.2.1 Planung

Die baulichen Maßnahmen unterscheiden sich zwischen natürlich belüfteten und mechanisch belüfteten Gebäuden (Tabelle 33).

**Tabelle 33 Technische Maßnahmen**

<i>Freie Fensterlüftung</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Automatisierung durch Fenster mit Stellmotoren</i></li> <li>• <i>Installation dezentraler Lüftungsgeräte (Hybride Lüftung)</i></li> </ul>
<i>Mechanische Lüftungssysteme</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Optimierte Regelung der Anlage</i></li> <li>• <i>Einbau von Präsenzmeldern</i></li> <li>• <i>Einsatz energieeffizienterer Ventilatoren</i></li> <li>• <i>Dämmung der Luftleitungen</i></li> </ul>

Bei frei belüfteten Gebäuden wurde der Einsatz von Stellmotoren an den Fensterflügeln zur automatisierten Öffnung erwogen. Als weitere Maßnahme sollte eine hybride Lüftung durch den Einbau mechanischer Lüftungsgeräte - zur Unterstützung der freien Lüftung - analysiert werden. Soweit es unter der Berücksichtigung der thermischen Behaglichkeit nicht zu Einschränkungen führt, sollten die Nutzer über eine Fensterlüftung für eine ausreichende Frischluftzufuhr in den Räumen sorgen. Wurde jedoch die thermische Behaglichkeit aufgrund einer Fensterlüftung bei kalten Außenlufttemperaturen eingeschränkt, sollten CO<sub>2</sub>- oder zeitgesteuerte Lüftungsgeräte für eine Frischluftzufuhr sorgen.

An Schulen mit mechanischen Lüftungsanlagen oder dezentralen Lüftungsgeräten wurden die Luftvolumenstrommengen der Zu- und Abluft, die Zulufttemperaturen und die Laufzeiten der Ventilatoren überprüft und angepasst. Weitere Überlegungen waren der Einbau von Präsenzmeldern, CO<sub>2</sub>-Fühlern oder energiesparenden Ventilatoren. Die Dämmung, bzw. Kürzung der Luftleitungen oder der Austausch der Antriebstechnik zum Zwecke der

Energieeinsparung wurden ebenfalls geprüft, wären jedoch mit einem deutlich höheren Aufwand verbunden. Insgesamt wurde eine Vereinfachung der Anlagenregelung zur Kostenminderung angestrebt.

### **5.2.2 Umsetzung**

Einige der geplanten technischen Maßnahmen zur Verbesserung der Raumluftqualität wurden aus Kostengründen von Seiten der Schulbetreiber abgelehnt. In Gebäuden mit vorhandener Lüftungstechnik konnte dagegen eine Optimierung der Anlagenregelung umgesetzt werden. Luftvolumenströme und Zulufttemperaturen wurden angepasst.

Zur Umsetzung der hybriden Lüftung wurden dezentrale Lüftungsgeräte ausgewählt. Um die Unterschiede der mechanischen Lüftungsunterstützung prüfen zu können, wurden Geräte verschiedener Hersteller mit unterschiedlichen Zuluftvolumenmengen untersucht.

Nach und während der technischen und nutzerorientierten Maßnahmen dienten die Messungen zur Erfolgskontrolle. Zusätzlich wurden Nutzerbefragung oder Interviews mit Einzelpersonen vor und nach den Veränderungen durchgeführt um das Verhalten und Behaglichkeitsempfinden abbilden zu können.

## 6 ERGEBNISSE

### 6.1 Referenzgebäude und -räume

Die Auswahl für das Projekt ergab zwölf zu untersuchende Szenarien. Untersucht wurde der Hörsaal einer Universität, neun Klassenräume in vier Schulen und der Gruppenraum einer Kindertagesstätte. Der Untersuchungszeitraum betrug insgesamt 2,5 Jahre (Abb. 26).

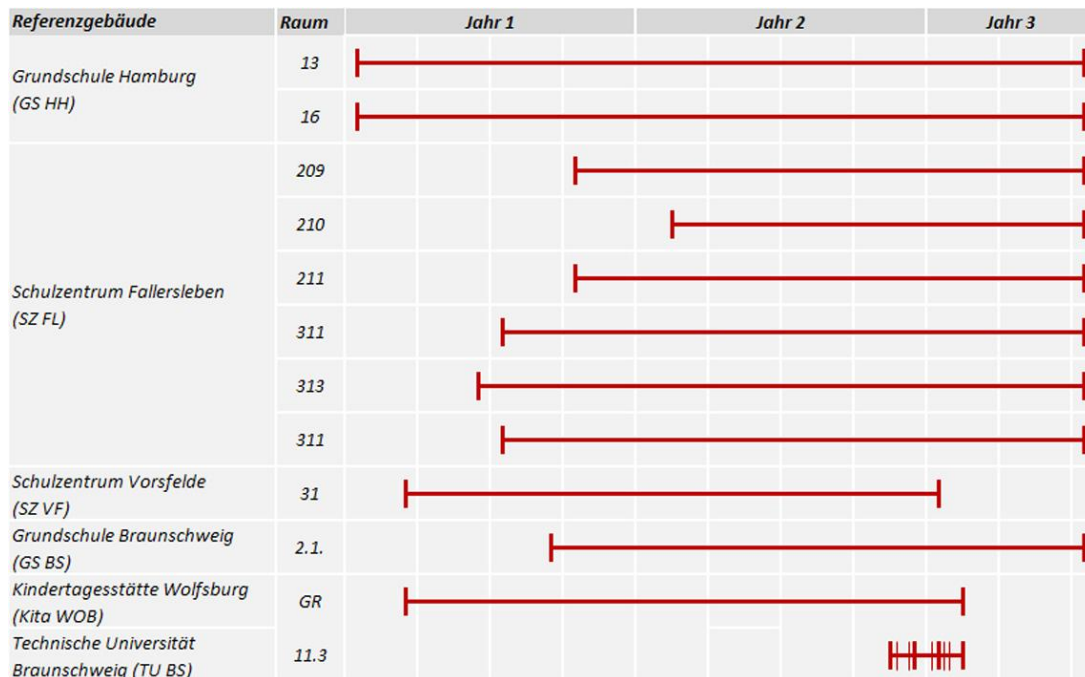


Abb. 26 Zeitraum der Messungen in den Referenzräumen

In fünf der Referenzgebäude und -räume waren bereits oder wurden im Zuge des Projekts mechanische Lüftungssysteme installiert. Für die Auswertung der Ergebnisse und in der weiteren Bearbeitung werden die Hersteller dieser installierten raumluftechnischen Systeme namentlich nicht genannt. Auch die Gerätebezeichnung wird anonymisiert. Untersucht wurden zentrale und dezentrale mechanische Lüftungssysteme (Tabelle 34).

Tabelle 34 Mechanische Lüftungstechnik in den Referenzgebäuden

<b>Zentrale mechanische Lüftungsanlage</b>		
Schulzentrum Vorsfelde	Raum 31	Zentrale Lüftungsanlage
<b>Dezentrale mechanische Lüftungsgeräte</b>		
Grundschule Hamburg-Harburg	Raum 13	Lüftungsgerät Typ A
	Raum 209	Lüftungsgerät Typ B
Schulzentrum Fallersleben	Raum 311	Lüftungsgerät Typ C
	Raum 313	Lüftungsgerät Typ D

## 6.1.1 Die Schulen

### 6.1.1.1 Grundschule Hamburg-Harburg (GS HH)

Die Grundschule Hamburg-Harburg aus dem Baujahr 1952 wurde im Jahr 2007 saniert. Die Sanierung beinhaltet einen Austausch der Fenster, eine Dämmung des Daches und eine Erneuerung der Fassade. Die zweizügige Grundschule umfasst die Klassenstufen eins bis vier. Die Räume des eingeschossigen Grundschultraktes besitzen gegenüberliegend nach Norden und Süden ausgerichtete Fenster. Die Fenster der Südseite sind kleiner und weisen eine Brüstungshöhe von 1,20 m auf. Aufgrund der Höhe können diese Fensterflügel nur von den Lehrkräften geöffnet werden. Die Fenster auf der Nordseite können auch von den Schülern geöffnet werden. Der Unterricht findet montags bis freitags jeden Tag durchgehend von 08:00 Uhr bis 13:00 Uhr statt. Die Klassen bleiben über den Verlauf eines Schultages in ihren Räumen, die Schüler verlassen den Raum nur in den Pausen. Für die Untersuchung wurden zwei baugleiche Klassenräume mit identischer Ausrichtung ausgewählt, die Räume 13 und 16 befinden sich im gleichen Schultrakt (Abb. 27) nebeneinander. In beiden Räumen werden Klassen der Stufe drei mit je 26 Kindern frontal an Gruppentischen unterrichtet (Abb. 28).



Abb. 27 GS HH Südansicht



Abb. 28 GS HH Raum 13

**Raum 13:** Im Raum wurde ein dezentrales Lüftungsgerät Typ A an der Decke des Klassenraumes installiert (Abb. 29, Seite 56). Es fördert einen Luftvolumenstrom von bis zu 800 m<sup>3</sup>/h und besitzt einen Gegenstromwärmeüberträger aus Aluminium. Der Wärmerückgewinnungsgrad liegt nach Angabe des Herstellers bei bis zu 85 %. Die Klassenräume 13 und 16 besitzen ein Raumvolumen von 230 m<sup>3</sup>, demnach ist mit dem konstanten Betrieb des Gerätes Typ A ein 3,5-facher Luftwechsel umsetzbar. Das Gerät wurde seit Inbetriebnahme in der Unterrichtszeit mit 80 %iger Laufleistung betrieben. Die eingestellte Zulufttemperatur betrug 25 °C. Das Gerät kann manuell bedient oder zeitgesteuert programmiert werden. Im Betrieb erfolgt eine Regelung des Gerätes stufenlos über die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Innenraumluft. Die Installation der Bedieneinheit erfolgte im Klassenraum (Abb. 30, Seite 56).



Abb. 29 Lüftungsgerät Typ A

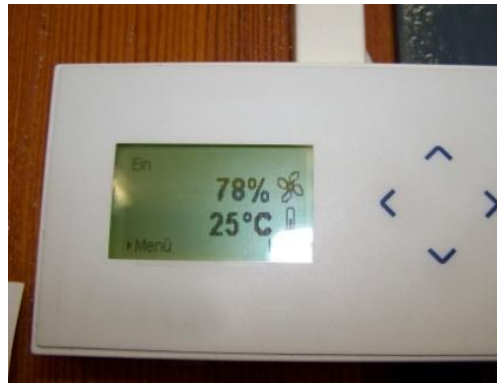


Abb. 30 Bedieneinheit Lüftungsgerät Typ A

Ein Eingreifen in den Betrieb des Gerätes von den Lehrkräften oder Schülern ist zwar von der Schulleitung nicht vorgesehen, kann jedoch auch nicht unterbunden werden, da das Gerät frei zugänglich für Lehrer und Schüler ist. Eine Fernabfrage der Einstellung am Gerät ist aktuell nicht möglich. Zur Dokumentation der Veränderungen der Regelungseinstellungen muss ein Protokoll von den Nutzern angefertigt werden.

Tabelle 35 Kenndaten GS HH Raum 13

<b>Raumvolumen</b>	➤ 230 m <sup>3</sup>
<b>Ausrichtung</b>	➤ Süd und Nord (gegenüberliegende Fensterfronten)
<b>Personenzahl</b>	➤ 25 Schüler, 1 Lehrkraft (8,8 m <sup>3</sup> /Person)
<b>Belüftung</b>	➤ mechanisch dezentral ➤ Luftvolumenstrom stufenlos nach CO <sub>2</sub> -Gehalt der Raumluft geregelt, max. 800 m <sup>3</sup> /h
<b>Luftwechsel</b>	➤ 3,5 h <sup>-1</sup>
<b>Gemessene Parameter</b>	➤ CO <sub>2</sub> -Konzentration, Lufttemperatur, rel. Raumluftfeuchtigkeit

**Raum 16:** Der Raum verfügt über sechs Drehkippenfenster und sechs Oberlichter. Entsprechend der Annahmen aus Kapitel 2.2.2 wurden die möglichen Luftwechselzahlen für Kipp- und Stoßlüftung im Sommer- und Winterfall berechnet<sup>VIII</sup>.

Tabelle 36 Kenndaten GS HH Raum 16

<b>Raumvolumen</b>	➤ 230 m <sup>3</sup>
<b>Ausrichtung</b>	➤ Süd und Nord (gegenüberliegende Fensterfronten)
<b>Personenzahl</b>	➤ 25 Schüler, 1 Lehrkraft (8,8 m <sup>3</sup> / Person)
<b>Belüftung</b>	➤ Natürliche Fensterlüftung
<b>Luftwechsel</b>	➤ Sommer Kipplüftung 1,0 h <sup>-1</sup> , Stoßlüftung 11,5 h <sup>-1</sup> ➤ Winter Kipplüftung 2,8 h <sup>-1</sup> , Stoßlüftung 34,7 h <sup>-1</sup>
<b>Gemessene Parameter</b>	➤ CO <sub>2</sub> -Konzentration, Lufttemperatur, rel. Raumluftfeuchtigkeit, Fensterkontakte

<sup>VIII</sup> Die Berechnungen zum Luftwechsel bei natürlicher Lüftung finden sich in Anhang 4.

### 6.1.1.2 Schulzentrum Fallersleben (SZ FL)

Das Schulzentrum in Fallersleben besteht aus einem Gebäudekomplex unterschiedlicher Bauzeiten. Insgesamt sind eine Haupt- und Realschule und ein Gymnasium integriert. Die Realschule erhielt in den Jahren 2000-2002 einen Anbau. In den nächsten Jahren sind weitere Sanierungen in den anderen Schulteilern geplant.



*Abb. 31 SZ FL Nordostansicht*



*Abb. 32 SZ FL Klassenraum Gymnasium*

Untersucht wurden Räume des Gymnasiums. Dieser Gebäudetrakts aus den 70er Jahren (Abb. 31) wird in einigen Bereichen, wie den Fluren und den Fachräumen mechanisch belüftet. Die Klassenzimmer besitzen keine mechanischen Lüftungssysteme und werden über die Fenster natürlich belüftet. Sie neigen nach Angabe der Lehrkräfte in den Sommermonaten zu Überhitzungen. Die Fensterfronten besitzen zum Teil Festverglasungen, zum Teil Drehkippflügel, welche komplett zu öffnen sind (Abb. 32). Die Oberlichter sind über Kippflügel zu öffnen. Der Unterricht im Gymnasium am Schulzentrum in Fallersleben findet wochentags von 07:30 Uhr bis 14:00 Uhr statt. Die niedrigeren Klassenstufen bleiben weitestgehend in ihren Räumen, wobei die älteren Oberstufen-Klassen für die naturwissenschaftlichen Fächer in die Fachräume wechseln. In den Pausen verlassen alle Schüler die Räume. Es wurden fünf Klassenräume untersucht.

In drei baugleichen Räumen (Raum 209, Raum 311 und Raum 313) mit einem Raumvolumen von je  $240 \text{ m}^3$  wurden für die vorliegende Untersuchung drei unterschiedliche Lüftungsgeräte installiert. Die zwei weiteren Räume (Raum 210 und Raum 211) dienen als Referenzräume ohne mechanische Belüftung. Raum 211 besitzt ebenfalls ein Raumvolumen von  $240 \text{ m}^3$ . Raum 210 ist etwas kleiner und besitzt ein Raumvolumen von  $200 \text{ m}^3$ .

In den Räumen 209, 210 und 211 werden überwiegend Schüler der achten Klassenstufe unterrichtet. In den Räumen 311 und 313 findet überwiegend Unterricht der zehnten Klassenstufen statt.

**Raum 209:** Im Raum erfolgte die Installation von zwei Lüftungsgeräten Typ B. Diese Lüftungsgeräte (Abb. 33) wurden speziell für den Einsatz in Klassenräumen entwickelt und fördern pro Gerät einen Luftvolumenstrom von bis zu 250 m<sup>3</sup>/h.



Abb. 33 Lüftungsgerät Typ B



Abb. 34 Bedieneinheit Lüftungsgerät Typ B

Der Hersteller gibt einen Wärmerückgewinnungsgrad von bis zu 50 % an. Eingesetzt werden die Geräte paarweise, um einen ausreichenden Luftwechsel in den Räumen sicherstellen zu können. So ergibt sich für Raum 209 ein Gesamtluftvolumenstrom von 500 m<sup>3</sup>/h über die Lüftungsgeräte. Die Lüftungsgeräte Typ B müssen zu Unterrichtsbeginn manuell am Bediengerät im Klassenraum eingeschaltet werden (Abb. 34). Die Volumenstromregelung der Geräte erfolgt im weiteren Tagesverlauf über einen CO<sub>2</sub>-Sensor in der Abluft. Der voreingestellte Schwellwert liegt gemäß der Herstellerangabe bei 1.500 ppm. Dazu kann bei Bedarf das Gerät manuell in die Booststufe mit einem Luftvolumenstrom von 800 m<sup>3</sup>/h geschaltet werden. Die Einstellung der Zulufttemperatur erfolgt ebenfalls über die Bedieneinheit. Bei dem vorhandenen Raumvolumen von 240 m<sup>3</sup> kann bei 500 m<sup>3</sup>/h mit zwei Geräten ein 2,1-facher Luftwechsel sichergestellt werden. In der Booststufe ergibt sich ein 2,7-facher Luftwechsel.

Tabelle 37 Kenndaten SZ FL Raum 209

<b>Raumvolumen</b>	➤ 240 m <sup>3</sup>
<b>Ausrichtung</b>	➤ Südost
<b>Personenzahl</b>	➤ 28 Schüler, 1 Lehrkraft (8,3 m <sup>3</sup> /Person)
<b>Belüftung</b>	➤ mechanisch dezentral ➤ Luftvolumenstrom je nach Betrieb, Stufe 1 = 300 m <sup>3</sup> /h, Stufe 2 = 400 m <sup>3</sup> /h, Stufe 3 = 500 m <sup>3</sup> /h, Stufe 4 = 640 m <sup>3</sup> /h (Booststufe)
<b>Luftwechsel</b>	➤ 2,1 h <sup>-1</sup> bei Stufe 3 ➤ 2,7 h <sup>-1</sup> bei Booststufe
<b>Gemessene Parameter</b>	➤ CO <sub>2</sub> -Konzentration, Lufttemperatur, rel. Raumluftfeuchtigkeit



**Raum 311:** Im Raum erfolgte die Installation des Lüftungsgerätes Typ C (Abb. 35). Dieses Gerät wurde ebenfalls speziell für den Gebrauch in Schulen konzipiert. Es fördert einen Luftvolumenstrom von bis zu 480 m<sup>3</sup>/h und besitzt einen integrierten Plattenwärmetauscher mit einem Wärmerückgewinnungsgrad nach Angabe des Herstellers von bis zu 90 %. Das Lüftungsgerät Typ C wird ausschließlich manuell bedient. Die Bedieneinheit für die Lüftungsgeräte ist im Klassenraum direkt am Gerät installiert (Abb. 36) und kann somit sowohl von Schülern, als auch von den Lehrern bedient werden. Um die Einstellung am Gerät dokumentieren zu können, muss ein Protokoll von den Nutzern angefertigt werden. Eine Einstellung der Zulufttemperatur kann nicht vorgenommen werden. Die Einstellung der Volumenströme des Lüftungsgerätes erfolgt in vier Stufen. In Stufe 0 erfolgt eine CO<sub>2</sub>-Regelung. Der voreingestellte Schwellwert liegt nach Angabe des Herstellers bei 2.000 ppm. Das Gerät passt in dieser Stufe den Luftvolumenstrom der vorhandenen CO<sub>2</sub>-Konzentration der Innenraumluft an.



Abb. 35 Lüftungsgerät C

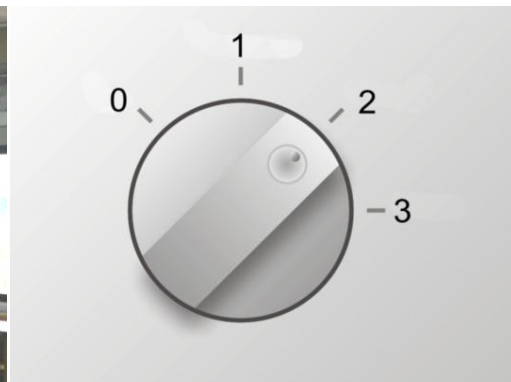


Abb. 36 Bedieneinheit Lüftungsgerät C

Bei dem vorhandenen Raumvolumen von 240 m<sup>3</sup> kann in Stufe 3 ein 2-facher Luftwechsel umgesetzt werden.

Tabelle 38 Kenndaten SZ FL Raum 311

<b>Raumvolumen</b>	➤ 240 m <sup>3</sup>
<b>Ausrichtung</b>	➤ Südost
<b>Personenzahl</b>	➤ 28 Schüler, 1 Lehrkraft (8,3 m <sup>3</sup> / Person)
<b>Belüftung</b>	➤ mechanisch dezentral ➤ Luftvolumenstrom je nach Betrieb, Stufe 0 = CO <sub>2</sub> -Regelung, Stufe 1 = 240 m <sup>3</sup> /h, Stufe 2 = 360 m <sup>3</sup> /h, Stufe 3 = 480 m <sup>3</sup> /h
<b>Luftwechsel</b>	➤ 2,0 h <sup>-1</sup> bei Stufe 3
<b>Gemessene Parameter</b>	➤ CO <sub>2</sub> -Konzentration, Lufttemperatur, rel. Raumluftfeuchtigkeit

**Raum 313:** Im Raum erfolgte die Installation des Lüftungsgerätes Typ D (Abb. 37). Das Gerät kann sowohl in der Außenwand als auch in der Fensterscheibe eingebaut werden. Es eignet sich gemäß der Angabe des Herstellers besonders zur Nachrüstung in Gebäuden. Das Gerät fördert einen Luftvolumenstrom von 80 bis 200 m<sup>3</sup>/h und besitzt einen Gegenstromwärmetauscher. Der Hersteller gibt einen Wärmerückgewinnungsgrad von bis zu 90 % an und empfiehlt für Schulen den Einsatz von ein bis zwei Geräten pro Klassenraum.



Abb. 37 Lüftungsgerät Typ D



Abb. 38 Bedieneinheit Lüftungsgerät Typ D

Bei einem Raumvolumen von 240 m<sup>3</sup> kann das Gerät Typ D einen 0,8-fachen Luftwechsel generieren. Somit können die abgegebenen 200 m<sup>3</sup>/h lediglich als Lüftungsunterstützung zur natürlichen Fensterlüftung und der Vermeidung möglicher CO<sub>2</sub>-Spitzen angesehen werden. Entsprechend der Annahmen aus Kapitel 2.2.2 wurden die möglichen Luftwechselzahlen der freien Lüftung für Kipp- und Stoßlüftung im Sommer- und Winterfall unter Berücksichtigung des Luftvolumenstroms für das Lüftungsgerät Typ D berechnet. Das Lüftungsgerät Typ D kann ausschließlich manuell bedient werden. Die Bedieneinheit wird im Klassenraum installiert (Abb. 38). Die Einstellung des Luftvolumenstroms ist stufenlos möglich. Eine Einstellung der Zulufttemperatur kann nicht vorgenommen werden. Es besteht die Möglichkeit eine automatische Abschaltung mit einer Laufzeit von bis zu 12 Stunden einzustellen. Um die Einstellung des Luftvolumenstroms und die Laufzeit des Gerätes dokumentieren zu können, muss ein Protokoll von den Nutzern angefertigt werden.

Tabelle 39 Kenndaten SZ FL Raum 313

<b>Raumvolumen</b>	➤ 240 m <sup>3</sup>
<b>Ausrichtung</b>	➤ Südwest
<b>Personenzahl</b>	➤ 31 Schüler, 1 Lehrkraft (7,5 m <sup>3</sup> / Person)
<b>Belüftung</b>	➤ Hybride Lüftung (Lüftungsunterstützung) ➤ Luftvolumenstrom stufenlos bis zu 200 m <sup>3</sup> /h
<b>Luftwechsel</b>	➤ 0,8 h <sup>-1</sup> bei geschlossenen Fenstern ➤ Sommer Kipplüftung 1,4 h <sup>-1</sup> , Stoßlüftung 6,3 h <sup>-1</sup> ➤ Winter Kipplüftung 2,4 h <sup>-1</sup> , Stoßlüftung 16,9 h <sup>-1</sup>
<b>Gemessene Parameter</b>	➤ CO <sub>2</sub> -Konzentration, Lufttemperatur, rel. Raumluftfeuchtigkeit

**Raum 210 und Raum 211:** Die Räume dienen als Referenzräume ohne mechanische Belüftung. Dabei besitzt Raum 211 ebenfalls ein Raumvolumen von  $240 \text{ m}^3$ . Raum 210 ist etwas kleiner und besitzt ein Raumvolumen von  $200 \text{ m}^3$ . Die Belüftung der Räume erfolgt ausschließlich über die Fenster. Raum 210 besitzt eine Fensterfront mit zwei Drehkipplügel und sechs Oberlichtern (Abb. 39). Raum 211 besitzt an zwei Raumseiten Fensterfronten, so dass fünf Fenster mit Drehkipplügel und acht Oberlichter zur Lüftung verfügbar sind (Abb. 40).



Abb. 39 SZ FL Raum 210



Abb. 40 SZ FL Raum 211

Entsprechend der Annahmen aus Kapitel 2.2.2 wurden die möglichen Luftwechselzahlen für Kipp- und Stoßlüftung im Sommer- und Winterfall berechnet.

Tabelle 40 Kenndaten SZ FL Raum 210

<b>Raumvolumen</b>	➤ $200 \text{ m}^3$
<b>Ausrichtung</b>	➤ Süd
<b>Personenzahl</b>	➤ 28 Schüler, 1 Lehrkraft ( $6,9 \text{ m}^3/\text{Person}$ )
<b>Belüftung</b>	➤ Freie Fensterlüftung
<b>Luftwechsel</b>	➤ Sommer Luftwechsel Kipplüftung $0,4 \text{ h}^{-1}$ , Stoßlüftung $2,8 \text{ h}^{-1}$ ➤ Winter Luftwechsel Kipplüftung $1,3 \text{ h}^{-1}$ , Stoßlüftung $11,8 \text{ h}^{-1}$
<b>Gemessene Parameter</b>	➤ $\text{CO}_2$ -Konzentration, Lufttemperatur, rel. Raumluftfeuchtigkeit

Tabelle 41 Kenndaten SZ FL Raum 211

<b>Raumvolumen</b>	➤ $240 \text{ m}^3$
<b>Ausrichtung</b>	➤ Südwest
<b>Personenzahl</b>	➤ 31 Schüler, 1 Lehrkraft ( $7,5 \text{ m}^3/\text{Person}$ )
<b>Belüftung</b>	➤ Freie Fensterlüftung
<b>Luftwechsel</b>	➤ Sommer Luftwechsel Kipplüftung $0,7 \text{ h}^{-1}$ , Stoßlüftung $5,5 \text{ h}^{-1}$ ➤ Winter Luftwechsel Kipplüftung $1,7 \text{ h}^{-1}$ , Stoßlüftung $16,2 \text{ h}^{-1}$
<b>Gemessene Parameter</b>	➤ $\text{CO}_2$ -Konzentration, Lufttemperatur, rel. Raumluftfeuchtigkeit

### 6.1.1.3 Schulzentrum Vorsfelde (SZ VF)

Das Schulzentrum in Vorsfelde bei Wolfsburg setzt sich aus einer Haupt- und Realschule und einem Gymnasium aus unterschiedlichen Bauzeiten zusammen. Im Projekt untersucht wurde ein Klassenraum des Gymnasiums aus den 70er Jahren. Die Klassenräume des Gebäudes werden über eine zentrale Lüftungsanlage be- und entlüftet. Die Zuluftauslässe befinden sich in allen Räumen im Deckenbereich.



Abb. 41 SZ VF Süd-Ostansicht



Abb. 42 SZ VF Raum 31

**Raum 31:** Der Raum wird im Frontalunterricht genutzt, besitzt eine einseitige Fensterfront mit zwei Kippflügeln (Abb. 41, Abb. 42) und eine Ausrichtung nach Süd-Osten. Der Unterricht findet wochentags von 07:30 Uhr bis 14:00 Uhr statt. Die Schüler verlassen in den Pausen den Raum. Zum Zeitpunkt der Messungen wurde die Klassenstufe 7 mit 30 Kindern unterrichtet. Die Lüftungsanlage wurde im Herbst 2008 erneuert. Die Anlage liefert einen Luftvolumenstrom von 46.000 m<sup>3</sup>/h, besitzt eine Wärmerückgewinnung über Kreuzstromwärmetauscher und versorgt insgesamt acht Klassenzimmer und weitere Räume unterschiedlicher Nutzung mit einem Gesamtvolumen von 4.300 m<sup>3</sup>. Bei 100 %iger Auslastung der Lüftungsanlage kann ein 10,7-facher Luftwechsel umgesetzt werden. Die Steuerung der Betriebszeiten, des Luftvolumenstroms und der Zulufttemperatur erfolgt ausschließlich über eine Technikzentrale und richtet sich nach den Schulzeiten. Ein Nutzereingriff ist nicht möglich. Die Anlage läuft das ganze Jahr über von Montag bis Freitag während der Schulzeit von 07:30h bis 14:00h. In den Schulferien erfolgt eine Abschaltung des Lüftungssystems.

Tabelle 42 Kenndaten SZ VL Raum 31

<b>Raumvolumen</b>	➤ 180 m <sup>3</sup>
<b>Ausrichtung</b>	➤ Süd
<b>Personenzahl</b>	➤ 24 Schüler, 1 Lehrkraft (7,2 m <sup>3</sup> / Person)
<b>Belüftung</b>	➤ mechanisch zentral ➤ Luftvolumenstrom bis zu 1.800 m <sup>3</sup> /h
<b>Luftwechsel</b>	➤ 10,7 h <sup>-1</sup>
<b>Gemessene Parameter</b>	➤ CO <sub>2</sub> -Konzentration, Raumlufttemperatur, rel. Raumluftfeuchtigkeit, Fensterkontakte

#### 6.1.1.4 Grundschule Braunschweig (GS BS)

Die Grundschule in Braunschweig wurde im Jahr 1881 eingeweiht. Das Gebäude überstand sowohl den Ersten als auch den Zweiten Weltkrieg unversehrt (Abb. 43). Die Belüftung der Klassenräume erfolgt ausschließlich über die Fenster.



Abb. 43 GS BS Ostansicht



Abb. 44 GS BS Raum 2.1

**Raum 2.1:** Der untersuchte Klassenraum besitzt fünf Fenster mit Drehflügel und fünf Oberlichter mit Ausrichtung nach Westen (Abb. 44). Zur Ermittlung der möglichen Luftwechselzahlen der freien Lüftung für Kipp- und Stoßlüftung in den Sommer- und Wintermonaten wurden die Annahmen aus Kapitel 2.2.2 verwendet. Die Schüler kommen wochentags am Morgen um 7:45 Uhr in den Raum und bleiben über den Verlauf des Schultages während der Unterrichtszeit von 08:00h bis 12:45 Uhr in ihren Klassenräumen und sie verlassen ihn in den Pausen. Ein Wechsel der Räume findet nicht statt. Nach Unterrichtschluss erfolgt eine weitere Förderbetreuung mit weniger Kindern von 12:50 Uhr bis 13:35 Uhr. In dieser Phase halten sich die Kinder nicht zwingend nur im Klassenraum, sondern zum Teil auch auf dem Flur auf, während die Klassenzimmertür zum Flur geöffnet bleibt.

Tabelle 43 Kenndaten GS BS Raum 2.1

<b>Raumvolumen</b>	➤ 235 m <sup>3</sup>
<b>Ausrichtung</b>	➤ West
<b>Personenzahl</b>	➤ 23 Schüler, 1 Lehrkraft (9,8 m <sup>3</sup> / Person)
<b>Belüftung</b>	➤ Natürliche Fensterlüftung
<b>Luftwechsel</b>	➤ Sommer Luftwechsel Kipplüftung 0,8 h <sup>-1</sup> , Stoßlüftung 9,7 h <sup>-1</sup> ➤ Winter Luftwechsel Kipplüftung 2,2 h <sup>-1</sup> , Stoßlüftung 17,2 h <sup>-1</sup>
<b>Gemessene Parameter</b>	➤ CO <sub>2</sub> -Konzentration, Raumlufttemperatur, rel. Raumluftfeuchtigkeit

### 6.1.2 Die Kindertagesstätte Wolfsburg (Kita WOB)

Die Kindertagesstätte Wolfsburg aus dem Baujahr 1971 ist ein eingeschossiger Pavillonbau (Abb. 45). Die Fenster wurden 2002 erneuert. Die Kindertagesstätte verfügt sowohl über Räume für Gruppen einer Kinderkrippe und eines Kindergartens. Die Gruppen der Kinderkrippe setzen sich aus maximal zwölf Kindern und zwei Betreuern zusammen. In den Gruppen des Kindergartens (Abb. 46) werden 20 Kinder von einer Person betreut. Die Betreuung der Kinder erfolgt ganztags von 7:30h bis 16:00h.



Abb. 45 Kita WOB Westansicht



Abb. 46 Kita WOB Gruppenraum

Die Organisation der Kindergruppen ist offen und häufig werden Gruppen übergreifend von mehreren Personen gemeinsam betreut. Die Kinder halten sich nicht zwingend nur in den Gruppenräumen, sondern zum Teil auch in den Fluren auf. Alle Gruppenräume werden ausschließlich natürlich belüftet. Die Fenster sind zum Teil fest verglast und besitzen Oberlichter, die gekippt werden können. Zudem verfügen alle Gruppenräume über eine Außentür. Sowohl für den Sommer- als auch für den Winterfall wurden die Annahmen aus Kapitel 2.2.2 zur Berechnung der möglichen Luftwechselzahlen verwendet. Jedem Gruppenraum ist ein Flur mit Garderobe und Sanitärraum zugeordnet. Im Projekt wurde ein typischer Gruppenraum des Kindergartens mit Ausrichtung nach Nord-Westen untersucht. Das Raumvolumen beträgt einschließlich des angeschlossenen Garderobebereich und des Sanitärbereichs  $145 \text{ m}^3$ .

Tabelle 44 Kenndaten Kita WOB

<b>Raumvolumen</b>	➤ $145 \text{ m}^3$
<b>Ausrichtung</b>	➤ Nord-West
<b>Personenzahl</b>	➤ 20 Kinder, 1 Betreuungskraft ( $6,9 \text{ m}^3/\text{Person}$ )
<b>Belüftung</b>	➤ Natürliche Fensterlüftung
<b>Luftwechsel</b>	➤ Sommer Luftwechsel Kipplüftung $0,6 \text{ h}^{-1}$ , Stoßlüftung $5,3 \text{ h}^{-1}$ ➤ Winter Luftwechsel Kipplüftung $1,7 \text{ h}^{-1}$ , Stoßlüftung $16,0 \text{ h}^{-1}$
<b>Gemessene Parameter</b>	➤ $\text{CO}_2$ -Konzentration, Raumlufttemperatur, rel. Raumluftfeuchtigkeit

### 6.1.3 Die Universität Braunschweig (TU BS)

Das „Haus der Wissenschaft“ der Technischen Universität Braunschweig (Abb. 47), ein Backsteingebäude aus dem Jahr 1935, beinhaltet neben einem Hörsaaltrakt ebenfalls das Naturhistorische Museum und eine Turnhalle. Die Hörsäle besitzen verschiedene Größen, und werden zum Teil mechanisch belüftet.



Abb. 47 TU BS Haus d. Wissenschaft Westansicht



Abb. 48 TU BS Hörsaal 11.3

**Hörsaal 11.3:** Der ausgewählte Hörsaal besitzt zwar eine raumluftechnische Anlage, diese wurde in den Feldversuchen jedoch nicht betrieben. Der Hörsaal besitzt ein Raumvolumen von  $675 \text{ m}^3$  und bietet insgesamt 200 Personen auf gestaffelten Sitzreihen Platz (Abb. 48). Der Raum besitzt an drei der Raumseiten Fenster. Die Fenster der Querseiten besitzen Drehkipplügel, die Fensterflügel der Längsseite im Rücken der Sitzreihen können lediglich gekippt werden. Zur Berechnung des möglichen Luftwechsels bei natürlicher Lüftung wurden die Annahmen aus Kapitel 2.2.2 für den Sommer- und den Winterfall verwendet. In einer wöchentlich stattfindenden Vorlesung wurden verschiedene Lüftungsszenarien gemeinsam mit den Studierenden als Feldversuch umgesetzt und bewertet.

Tabelle 45 Kenndaten TU BS Hörsaal 11.3

<b>Raumvolumen</b>	➤ $675 \text{ m}^3$
<b>Ausrichtung</b>	➤ Nord, Süd, Ost (Fensterfronten auf drei Seiten)
<b>Personenzahl</b>	➤ bis zu 200 ( $3,5 \text{ m}^3/\text{Person}$ )
<b>Belüftung</b>	➤ Natürliche Fensterlüftung
<b>Luftwechsel</b>	➤ Sommer Luftwechsel Kipplüftung $0,5 \text{ h}^{-1}$ , Stoßlüftung $5,4 \text{ h}^{-1}$ ➤ Winter Luftwechsel Kipplüftung $1,5 \text{ h}^{-1}$ , Stoßlüftung $16,2 \text{ h}^{-1}$
<b>Gemessene Parameter</b>	➤ $\text{CO}_2$ -Konzentration, Raumlufttemperatur, rel. Raumluftfeuchtigkeit

### 6.1.4 Übersicht zu den Referenzräumen

Die Referenzräume weisen zum Teil deutliche Unterschiede in den Raumvolumina und der Belegungsdichte auf. Abb. 49 zeigt, dass der Klassenraum der Grundschule Braunschweig (GS BS, Raum 2.1) im Vergleich mit 9,8 m<sup>3</sup> das größte Raumvolumen pro Person aufweist. Der Hörsaal (TU BS, Raum 11.3) besitzt dagegen mit 3,4 m<sup>3</sup> das geringste Raumvolumen pro Person. Der in Kapitel 2.2.2 beschriebene Beispielklassenraum stellt den Mittelwert der untersuchten Klassenräume dar.

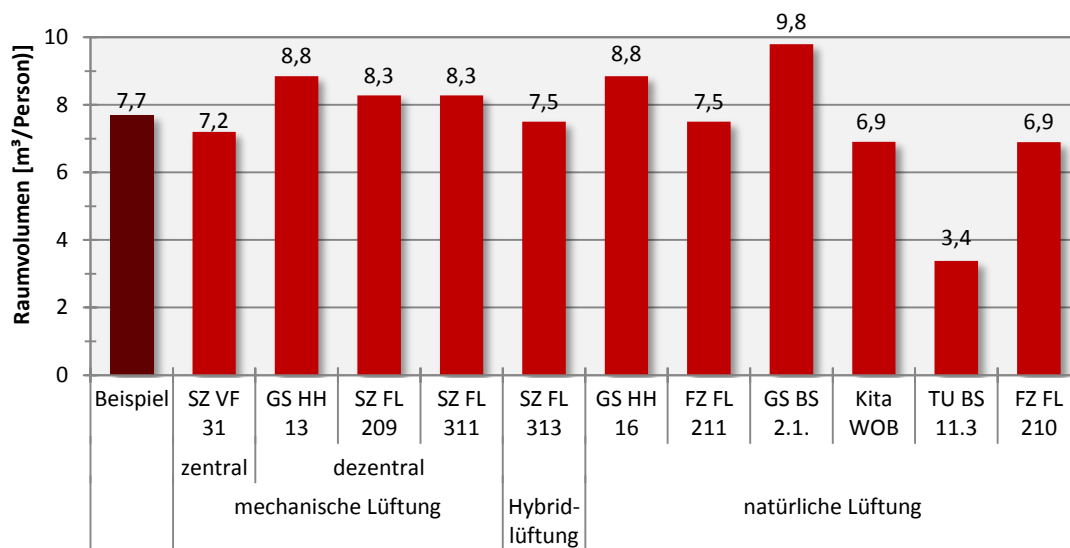


Abb. 49 Raumvolumen pro Person Referenzräume

Die in Kapitel 2.4 beschriebenen Anforderungen für den notwendigen Luftvolumenstrom werden in Tabelle 46 mit dem dazu berechneten Luftwechsel für den in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Beispielraum gegenübergestellt.

Tabelle 46 Anforderungen gemäß normativer Regelung

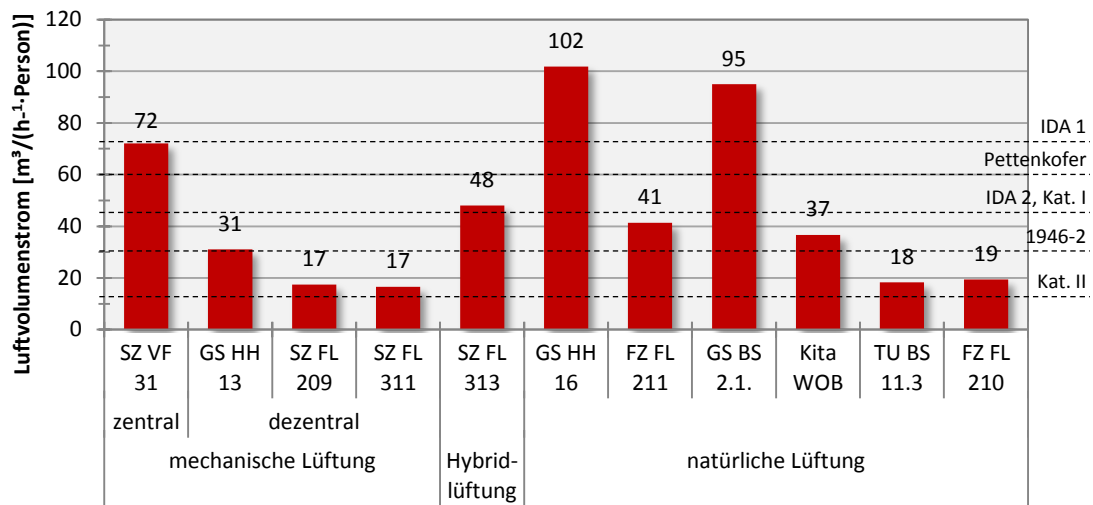
Regelwerk	Pettenkofer [18]	DIN EN 13779 [19]		DIN EN 15251 [49]		DIN 1946-2 [20]
		IDA 1	IDA 2	Kat. I	Kat. II	
Luftvolumenstrom [m <sup>3</sup> /(h·Person)]	60	72	45	45	12,6	30

Im Vergleich des maximal erreichbaren Luftwechsel der Referenzräume (Abb. 50, Seite 67) werden die tatsächlichen Raumvolumina und Belegungszahlen sowie die Luftvolumenströme der eingesetzten raumluftechnischen Anlagen für die Berechnung genutzt. Für die freie Lüftung wird nur eine Stoßlüftung im Sommerfall für die Berechnung<sup>IX</sup> [26] berücksichtigt, da davon ausgegangen werden muss, dass die Fensteröffnung nur bei moderaten Außen-

<sup>IX</sup> Die Berechnungen zum Luftwechsel bei natürlicher Lüftung finden sich in Anhang 4.



temperaturen erfolgt.



**Abb. 50 Maximal umsetzbarer Luftvolumenstrom Referenzräume**

Den hohen Anforderungen der Kategorie IDA 1 aus DIN EN 13779 [19] und Pettenkofer [18] entsprechen nur die zentrale Lüftungsanlage des Schulzentrum Vorsfelde und zwei frei belüftete Räume.

Alle Referenzräume erfüllen die Anforderungen der Kategorie II nach DIN EN 15251 [49]. Allerdings ist davon auszugehen, dass die natürliche Lüftung nicht konsequent mit dem berechneten Luftwechsel in der Praxis umgesetzt wird.

## 6.2 Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität

Mit Bezug auf die individuellen Gegebenheiten der Referenzräume wurden je nach Belüftungsart und Nutzerprofil spezifische Lüftungskonzepte zur Verbesserung der Belüftung erarbeitet (Tabelle 47).

**Tabelle 47 Übersicht Maßnahmen Verbesserung Lüftungskonzepte**

<b>Gebäude</b>	<b>Raum</b>	<b>Belüftungsart</b>	<b>Maßnahme</b>
GS HH	13	➤ mechanisch dezentral (Lüftungsgerät Typ A)	➤ Veränderung Luftvolumenstroms ➤ Verlängerung Laufzeit
	16	➤ Freie Fensterlüftung	➤ Installation Lüftungsampel
SZ FL	209	➤ mechanisch dezentral (Lüftungsgerät Typ B)	➤ Veränderung Laufzeit, ➤ Anpassung CO <sub>2</sub> -Schwellwert
	210	➤ Freie Fensterlüftung	➤ Keine Maßnahme
	211	➤ Freie Fensterlüftung	➤ Installation Lüftungsampel
	311	➤ Hybride Lüftung, natürliche Lüftung und mechanisch dezentral (Lüftungsgerät Typ C)	➤ Keine Maßnahme
	313	➤ mechanisch dezentral (Lüftungsgerät D)	➤ Keine Maßnahme
SZ VF	31	➤ mechanisch zentral (Lüftungsanlage)	➤ Umsetzung Nachtlüftung
GS BS	2.1	➤ Natürliche Lüftung	➤ Lüftungsworkshop im Unterricht
TU BS	11.3	➤ Natürliche Lüftung	➤ verschiedene Lüftungsstrategien
Kita WOB	Gruppenraum	➤ Natürliche Lüftung	➤ Ausgabe eines Leitfadens

### 6.2.1 Die Schulen

#### 6.2.1.1 Grundschule Hamburg-Harburg (GS HH)

**Raum 13:** Das Lüftungskonzept für Raum 13 beschreibt eine Erhöhung des Zuluftvolumenstroms und eine Verlängerung der Laufzeit des Lüftungsgerätes. Das installierte Gerät kann einen Luftvolumenstrom von bis zu 800 m<sup>3</sup>/h liefern. Mit der Ersteinstellung zu Projektstart wurde ein Luftvolumenstrom von 80 % (640 m<sup>3</sup>/h) in den Raum gebracht. Die zeitliche Programmierung des Gerätes sah eine Laufzeit exakt zur Unterrichtszeit vor. Der Luftvolumenstrom wurde auf 100 % gesetzt und die Laufzeiten wurden über die Unterrichtszeit auf eine Stunde vor und nach Unterrichtsbeginn verlängert.

**Raum 16:** Das Konzept für Raum 16 beschreibt die Installation einer Lüftungsampel. In Absprache mit dem Schulleiter und auf Wunsch der Klassenlehrerin wurde das akustische Signal vor der Installation der Ampel deaktiviert. Die Installation der Lüftungsampel erfolgte

in der Nähe des Lehrerpultes, so ist sie von allen Sitzplätzen der Schüler gut sichtbar (Abb. 52). Gleichzeitig mit der Installation wurden zusätzlich sowohl die Klassenlehrerin als auch die Schüler ausführlich mittels Handzetteln zum Gerät informiert. Außerdem wurden Plakate mit Piktogrammen zur Funktionsweise und Handlungsempfehlungen (Abb. 52) im Klassenraum für alle Schüler sichtbar platziert.



Abb. 51 Installation Lüftungsampel



Abb. 52 Piktogramm Lüftungsampel

#### 6.2.1.2 Schulzentrum Fallersleben (SZ FL)

**Raum 209:** Das Konzept sieht eine Anpassung des CO<sub>2</sub>-Schwellwertes von 1.500 ppm auf 1.000 ppm und eine Veränderung der automatischen Laufzeit der Lüftungsgeräte vor. Die Geräte starten vor Unterrichtsbeginn automatisch und müssen nicht mehr manuell vor Unterrichtsbeginn eingeschaltet werden.

**Raum 311:** Das Konzept beschreibt Feldstudien, in denen das Gerät in den drei Stufen konstant je eine Woche lang jeden Tag vor der Unterrichtszeit eingeschaltet und über Tag betrieben werden soll.

**Raum 313:** Wie in Raum 311 beschreibt das Konzept ebenfalls Feldstudien, in denen das Gerät mit verschiedenen Luftvolumenströmen über je eine Woche in der Unterrichtszeit konstant betrieben werden soll.

**Raum 210:** Der Raum dient als Referenzraum für eine freie Lüftung. Aus diesem Grund wurde kein Konzept erarbeitet oder umgesetzt.

**Raum 211:** Das Konzept sieht die Installation einer Lüftungsampel vor. Im Raum werden vorrangig Klassen der achten und neunten Klassenstufe unterrichtet. So kann im direkten Vergleich mit der Grundschulklasse in Hamburg die Akzeptanz und Umsetzung bei unterschiedlichen Altersstufen überprüft und gegenübergestellt werden.

#### 6.2.1.3 Schulzentrum Vorsfelde (SZ VF)

**Raum 31:** Das Konzept für den Raum 31 sieht eine Laufzeitverlängerung zur Nachtkühlung

in den Sommermonaten vor.

#### **6.2.1.4 Grundschule Braunschweig (GS BS)**

**Raum 2.1:** Für den Raum soll eine motivierte Fensterlüftung umgesetzt werden. Mittels einer kurzen Arbeitsphase zur Thematik der natürlichen Lüftung werden die Schüler im Unterricht vorbereitet. Folgend ermitteln die Schüler in einem Workshop selbstständig ein praktikables Lüftungsverhalten in Form eines Lüftungsdienstes.

#### **6.2.2 Die Kindertagesstätte Wolfsburg (Kita WOB)**

**Gruppenraum:** Wie in der Grundschule in Braunschweig soll auch in der Kita Wolfsburg eine motivierte Fensterlüftung umgesetzt werden. Zur Verbesserung des Lüftungsverhaltens wird ein Lüftungsleitfaden an das Betreuungspersonal der Kita ausgegeben.

#### **6.2.3 Die Universität Braunschweig (TU BS)**

**Hörsaal 11.3:** Das Konzept sieht vier verschiedene Lüftungsszenarien vor. Jeder der Feldversuche erfolgt in einer Vorlesung mit einer Dauer von 90 Minuten.

Das erste Szenario sieht die Umsetzung einer drei-minütigen Lüftungspause nach 45 Minuten Vorlesungszeit vor.

In einem zweiten Szenario wird wie im ersten ebenfalls eine Lüftungspause nach 45 Minuten umgesetzt, jedoch soll diese statt drei Minuten fünf Minuten durchgeführt werden. Zusätzlich erfolgt vorab eine Lüftung des Raumes.

Das dritte Szenario sieht den Einsatz eines Ventilators [86] zur Unterdruckerzeugung und Nachströmung über die Fenster vor. Der Einbau des Ventilators erfolgt im Türrahmen. Vor Beginn der Vorlesung und in einer Lüftungspause nach 45 Minuten wird der Ventilator nach Möglichkeit bei maximaler Leistung betrieben. Über den gesamten Verlauf der Vorlesung erfolgt der Betrieb mit einem Luftvolumenstrom, dessen Geräuschpegel für die Nutzer als akzeptabel empfunden wird.

Das vierte Szenario beschreibt wie das zweite Szenario eine Querlüftung vor Vorlesungsbeginn, eine konstante Kipplüftung während der Vorlesung und eine Lüftungspause mit Querlüftung nach 45 Minuten.

### 6.3 Auswertung der Messdaten zur Bewertung der Luftqualität

Die Auswertung der Messdaten erfolgt, wie in Kapitel 2.5 beschrieben, auf Basis der Klassifizierungen der Raumluftqualität und der thermischen Behaglichkeit in vier Kategorien (Tabelle 48).

Unter der Annahme, dass eine verbesserte Raumluftqualität und eine angemessene thermische Behaglichkeit zu einer Verbesserung der Schülerleistung führen und auf Basis vorhandener Ergebnisse vergleichbarer Forschungsvorhaben[42][43][87][44], wird als Anforderung die Einhaltung der Kategorie A in mindestens 50 % der Unterrichtszeit sowohl für die CO<sub>2</sub>-Konzentration als auch für die thermische Behaglichkeit voraus gesetzt. Weiterhin sollten in maximal 10 % der Unterrichtszeit die Anforderungen für Kategorie D überschritten werden.

**Tabelle 48 Kategorien zur Bewertung der Raumluftqualität und der therm. Behaglichkeit**

Kategorie	A	B	C	D
CO <sub>2</sub> -Konzentration [ppm]	< 1.000	1.000 - 1.400	1.400 - 2.000	> 2.000
Raumlufttemperatur [°C]	21 - 23	21 - 21; 23 - 24	19 - 20; 24 - 25	< 19; > 25
Relative Luftfeuchtigkeit [%]	30 - 50	25 - 30; 50 - 60	20 - 25; 60 - 70	< 20; > 70

Die erfassten Messdaten werden für jeden der Referenzräume in einer Einzelauswertung aufgearbeitet und analysiert.

1. Es erfolgt eine Übersicht des jeweiligen Messzeitraumes und mit Kennzeichnung und Benennung der durchgeführten Maßnahmen in einer Tabelle.
2. Die Messdaten zur CO<sub>2</sub>-Konzentration für die gesamte Messreihe werden in einem Liniendiagramm dargestellt. Eine Markierung (blauer Pfeil) markiert den Zeitpunkt einer umgesetzten Maßnahme.
3. Die prozentuale Verteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Raumluft während der Unterrichtszeit wird in einem Summenhäufigkeitsdiagramm dargestellt. Unterrichtsfreie Zeiten werden vor der Betrachtung aus den Messdaten gefiltert.
4. Die Innenraumtemperatur wird in Abhängigkeit von der Außentemperatur in der Unterrichtszeit dargestellt. Bei Referenzräumen mit umgesetzten Maßnahmen zur Verbesserung der Raumluftqualität erfolgt eine Unterscheidung der Messdaten in „vor“ und „nach der Maßnahme“.
5. Die Messwerte zur thermischen Behaglichkeit (Raumlufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit) während der Unterrichtszeit werden visuell anschaulich in Behaglichkeitskategorien in einem Nomogramm dargestellt. Auch bei dieser Auswertung erfolgt bei den Räumen mit umgesetzten Maßnahmen eine Unterscheidung der Messdaten in

„vor“ und „nach der Maßnahme“.

6. Die prozentuale Verteilung der thermischen Behaglichkeit während der Unterrichtszeit wird in einem Summenhäufigkeitsdiagramm dargestellt.
7. Bei Räumen mit installierten Fensterkontakten erfolgt zusätzlich eine Auswertung in Zeitreihen. Diese sind als Balkendiagramme mit der prozentualen Verteilung dargestellt, so dass für jeden Monat die Anzahl der geöffneten Fenster und der Öffnungszeiten ablesbar sind.

Abschließend werden die Einzelergebnisse in einer Gegenüberstellung, die die Auswirkung der Maßnahmen auf die Raumluftqualität und der thermischen Behaglichkeit veranschaulicht, zusammengefasst.

### 6.3.1 Die Schulen

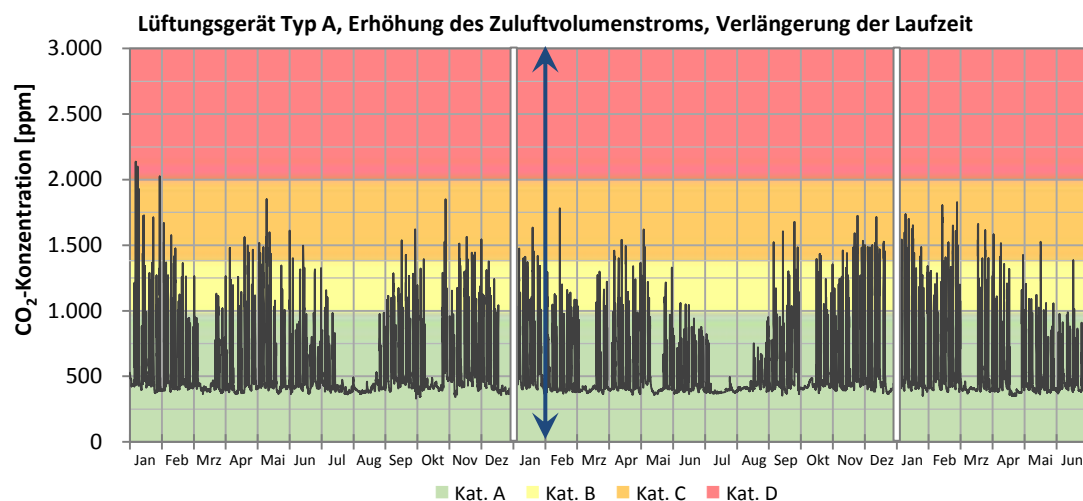
#### 6.3.1.1 Grundschule Hamburg-Harburg (GS HH)

**Raum 13:** Die in Kapitel 6.2.1.1 beschriebene Umsetzung der Einstellungsänderung am Lüftungsgerätes Typ A erfolgte im Januar des zweiten Jahres (Tabelle 49). Der Luftvolumenstrom wurde von 80 % (640 m<sup>3</sup>/h) auf 100 % (800 m<sup>3</sup>/h) erhöht und die Laufzeit wurde verlängert. Die Zulufttemperatur wurde unverändert auf 25 °C belassen.

**Tabelle 49 Übersicht des Messzeitraumes GS HH Raum 13**

1. Jahr												2. Jahr												3. Jahr					
Schuljahr 1 (Klassenstufe 4)						Schuljahr 2 (Klassenstufe 4)						Schuljahr 3 (Klassenstufe 7)																	
JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN
<b>Lüftungsgerät Typ A, Erhöhung des Zuluftvolumenstroms, Verlängerung der Laufzeit</b>																													

Abb. 53 zeigt alle Messwerte der CO<sub>2</sub>-Konzentration für Raum 13. Der blaue Pfeil markiert den Zeitpunkt der Umstellung am Lüftungsgerät. Es zeigt, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Klassenraum bereits vor der Umstellung des Lüftungsgerätes zwar Werte von über 1.000 ppm erreichte, aber es traten nur kurzzeitige Überschreitungen des Grenzwertes von 1.400 ppm (Kategorie C) auf. Mit der umgesetzten Maßnahme stellten sich keine signifikanten Veränderungen hinsichtlich der Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Klassenraum ein.



**Abb. 53 Messwerte CO<sub>2</sub>-Konzentration GS HH Raum 13**

Die Auswertung der prozentualen Verteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration während der Unterrichtszeit in Abb. 54 bestätigt, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Unterrichtszeit bereits vor der Veränderung der Einstellung am Lüftungsgerät 69 % im Sommer und 67 % im Winter in der Kategorie A (< 1.000 ppm) lag. Es wurden keine Überschreitungen des oberen Grenzwertes von 2.000 ppm in der Unterrichtszeit gemessen. Damit erfüllte das Gerät Typ A be-

reits vor der Umstellung die geforderten Werte. Die Erhöhung des Luftvolumenstroms und die Verlängerung der Laufzeit konnten dennoch zu einer weiteren Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Unterrichtszeit beitragen (Abb. 54). Die gemessenen Werte lagen in Sommer nach der Umstellung in fast 90 % der Unterrichtszeit in Kategorie A. Rechnerisch bedeutet der anfangs eingestellte Luftvolumenstrom des Lüftungsgerätes von 640 m<sup>3</sup>/h einen 2,8-fachen Luftwechsel pro Stunde. Die Messergebnisse zeigen, dass dieser Wert in der Praxis noch nicht ausreicht, um die Raumluftqualität konstant unterhalb des Grenzwertes von 1.000 ppm zu halten. In 21 % der Unterrichtszeit lag die gemessene CO<sub>2</sub>-Konzentration in Kategorie B und in 9 % der Zeit in Kategorie C. Im direkten Vergleich zeigt die prozentuale Verteilung der Messwerte vor und nach der Maßnahme eine Verbesserung.

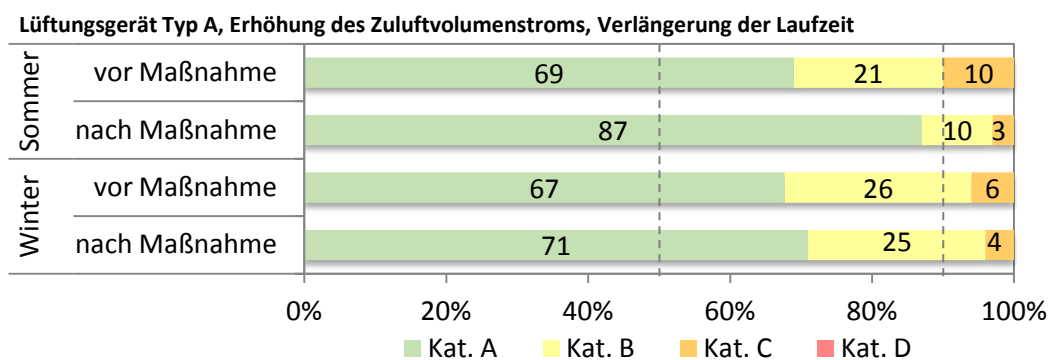


Abb. 54 Verteilung CO<sub>2</sub>-Konzentration Unterrichtszeit GS HH Raum 13

Die Darstellung der Innen- und Außentemperatur im Nomogramm (Abb. 55) zeigt, dass mit der Veränderung der Einstellungen am Lüftungsgerät auch eine Veränderung der Raumlufttemperatur eintrat. Die erhöhten Temperaturwerte lassen sich über den erhöhten Luftvolumenstrom mit gleicher Zulufttemperatur (25 °C) erklären. Nach der umgesetzten Maßnahme lagen mehr Werte oberhalb von 24 °C.

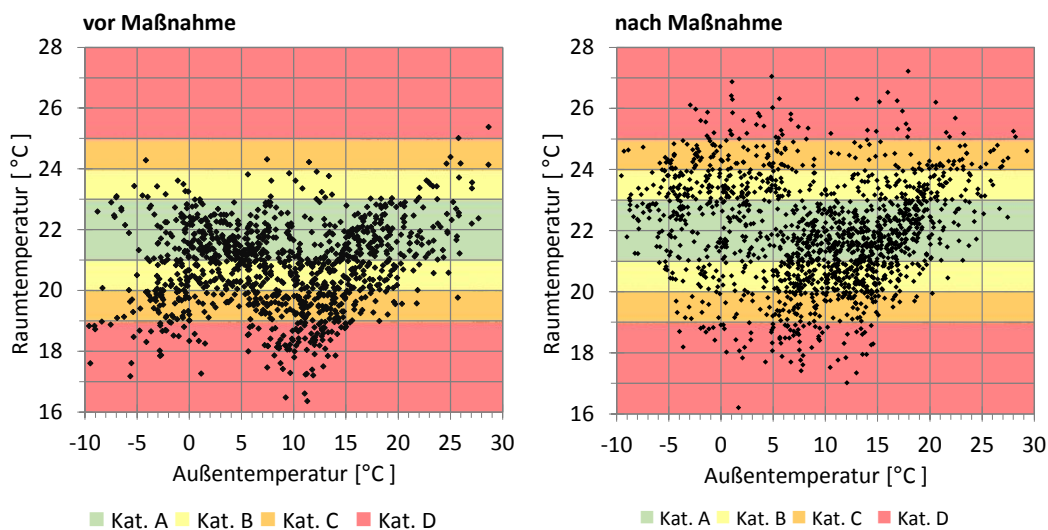


Abb. 55 Innenraum- gegenüber Außentemperatur Unterrichtszeit GS HH Raum 13



Die Werteverteilung der Innentemperatur gegenüber der relativen Luftfeuchtigkeit in der Unterrichtszeit im Nomogramm (Abb. 56) zeigt, dass nur wenige der gemessenen Werte vor der Umsetzung der Maßnahme in Kategorie D lagen. Die Werte nach der Maßnahme weisen eine höhere Streuung auf und liegen zudem mit höheren Raumlufttemperaturen im Bereich D. Dies ist auf den erhöhten Luftvolumenstrom bei gleichbleibender Zulufttemperatur (25 °C) zurückzuführen

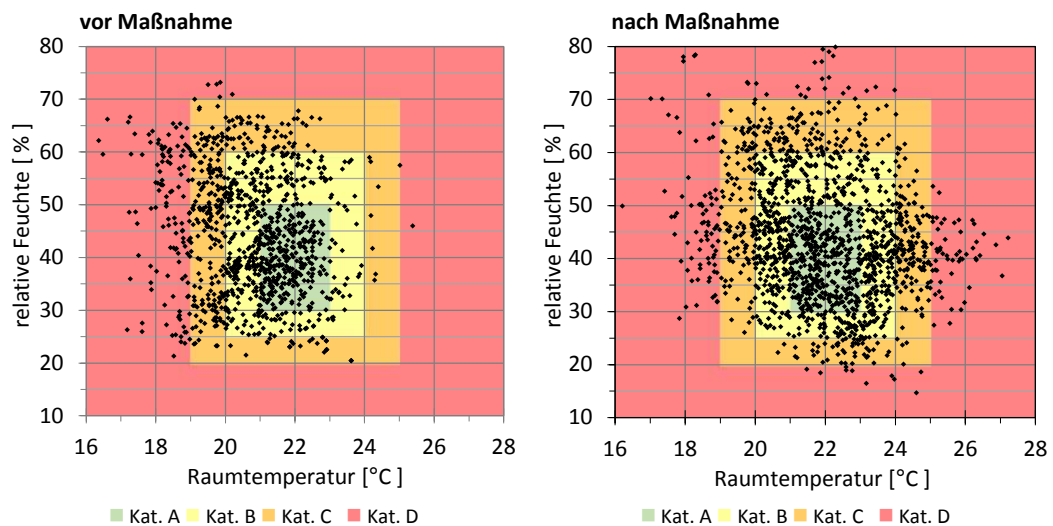


Abb. 56 Thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit GS HH Raum 13

Die Auswertung der prozentualen Verteilung der Werte zur thermischen Behaglichkeit in der Unterrichtszeit (Abb. 57) zeigt, dass in den Sommermonaten bereits 40 % und in den Wintermonaten knapp 30 % den Anforderungen von Kategorie A entsprachen. Die umgesetzte Maßnahme konnte zu einer signifikanten Verbesserung in den Wintermonaten beitragen. Die Werte entsprachen nach der Maßnahme in mehr als 50 % der Unterrichtszeit Kategorie A. Der prozentuale Anteil der Werte in Kategorie D lag unterhalb von 10 %. Dies entspricht den geforderten Werten.

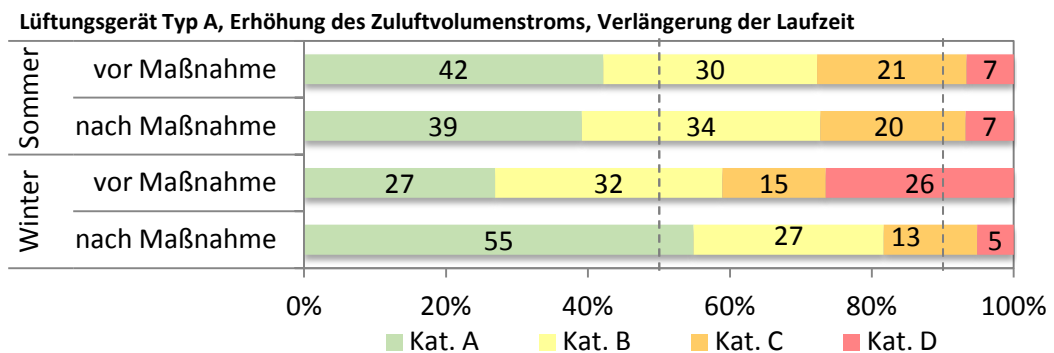


Abb. 57 Verteilung thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit GS HH Raum 13

Insgesamt ist die umgesetzte Maßnahme für Raum 13 mit der Erhöhung des Luftvolumenstroms und der Verlängerung der Laufzeit des Lüftungsgerätes positiv zu bewerten. Die

CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Unterrichtszeit wurde trotz einer guten Ausgangssituation reduziert und die thermische Behaglichkeit wurde verbessert.

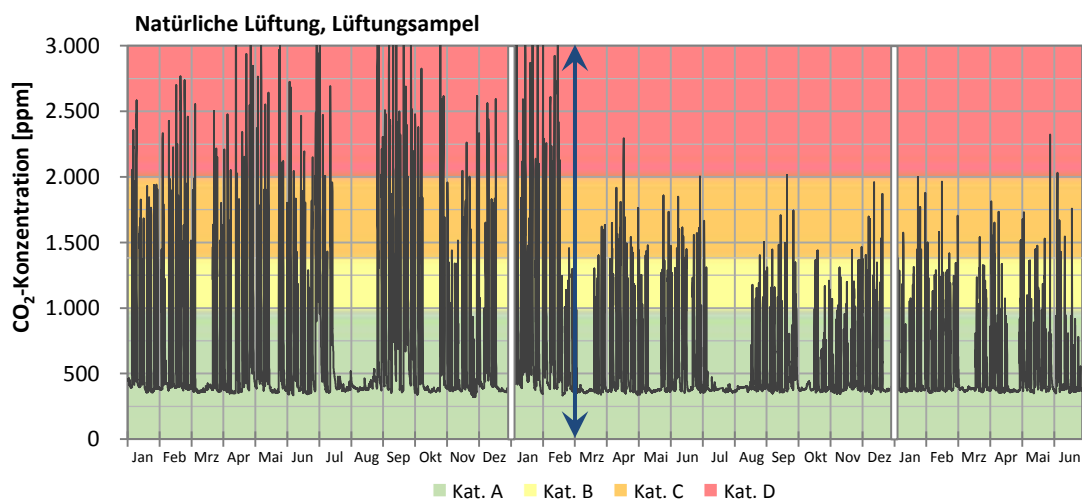
Das Ergebnis zeigt, dass ein dezentrales Lüftungsgerät mit einem Luftvolumenstrom von bis zu 800 m<sup>3</sup>/h bei einem Raumvolumen von 230 m<sup>3</sup> (3,5 h<sup>-1</sup> Luftwechsel) und einer zeitgesteuerten Laufzeit zu einer langfristigen Verbesserung der Raumlufthqualität und einer angemessenen thermischen Behaglichkeit beiträgt.

**Raum 16:** Die Installation einer Lüftungsampel erfolgte im Februar des zweiten Jahres (Tabelle 50). Die Schüler und Lehrer des zweiten Schuljahres (Klassenstufe 4) wurden mittels eines Leitfadens zur Funktionsweise der Lüftungsampel informiert. Die Schüler führten zusätzlich selbstständig einen „Lüftungsdienst“ in der Klasse ein. Die Schüler und Lehrer der Klassenstufe 7 übernahmen im dritten Schuljahr die Lüftungsampel ohne weitere Maßnahmen.

**Tabelle 50 Übersicht des Messzeitraumes GS HH Raum 16**

1. Jahr												2. Jahr												3. Jahr					
Schuljahr 1 (Klassenstufe 4)						Schuljahr 2 (Klassenstufe 4)						Schuljahr 3 (Klassenstufe 7)																	
JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN
<b>Natürliche Lüftung, Lüftungsampel</b>																													

Abb. 58 zeigt die gesamten Messwerte der CO<sub>2</sub>-Konzentration für Raum 16. Der blaue Pfeil markiert den Zeitpunkt der Installation der Lüftungsampel.



**Abb. 58 Messwerte CO<sub>2</sub>-Konzentration GS HH Raum 16**

Im direkten Vergleich mit Raum 13 wird deutlich, dass der natürlich belüftete Raum im ersten Messjahr weitaus höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (bis Kategorie D) in der Unterrichtszeit aufzeigte. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Ergebnissen der in Kapitel 2.7.3 dargestellten

Forschungsvorhaben, dass eine natürliche Lüftung nicht die geforderte Raumluftqualität sicherstellen kann. Im ersten Messjahr lagen die Werte der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Unterrichtszeit weit oberhalb der Grenze von 1.400 ppm. Mit der Installation der Lüftungsampel trat eine signifikante Veränderung ein. CO<sub>2</sub>-Konzentrationen oberhalb von 2.000 ppm traten selten auf. Die Auswertung der prozentualen Verteilung (Abb. 59) bestätigt, dass vor der Installation der Lüftungsampel die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Sommer in knapp 70 % und im Winter in knapp 43 % der Unterrichtszeit in Kategorie D (> 2.000 ppm) lag. Mit der Installation der Lüftungsampel konnten diese Werte auf 2 % im Sommer und 1 % im Winter reduziert werden. Die Messergebnisse nach der Installation dieser Lüftungsampel belegen in diesem Zusammenhang eine deutliche Veränderung des Lüftungsverhaltens mit dem Einsatz der Lüftungsampel.

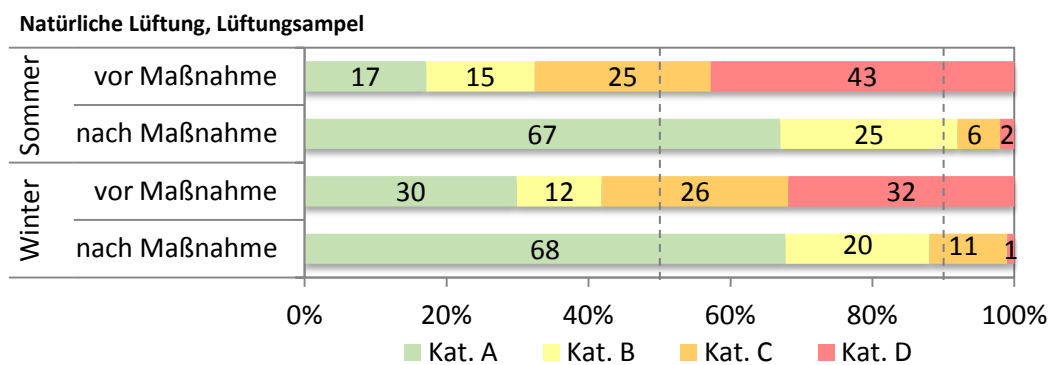


Abb. 59 Verteilung CO<sub>2</sub>-Konzentration Unterrichtszeit GS HH Raum 16

Die Werteverteilung der Innen- und Außentemperatur im Nomogramm (Abb. 60) zeigt, dass keine Veränderung der Raumlufttemperatur mit der Installation der Lüftungsampel eintrat. Sowohl vor als auch nach der Maßnahme weisen die Messwerte eine hohe Streuung auf, die meisten Werte liegen zwischen 18 und 23 °C.

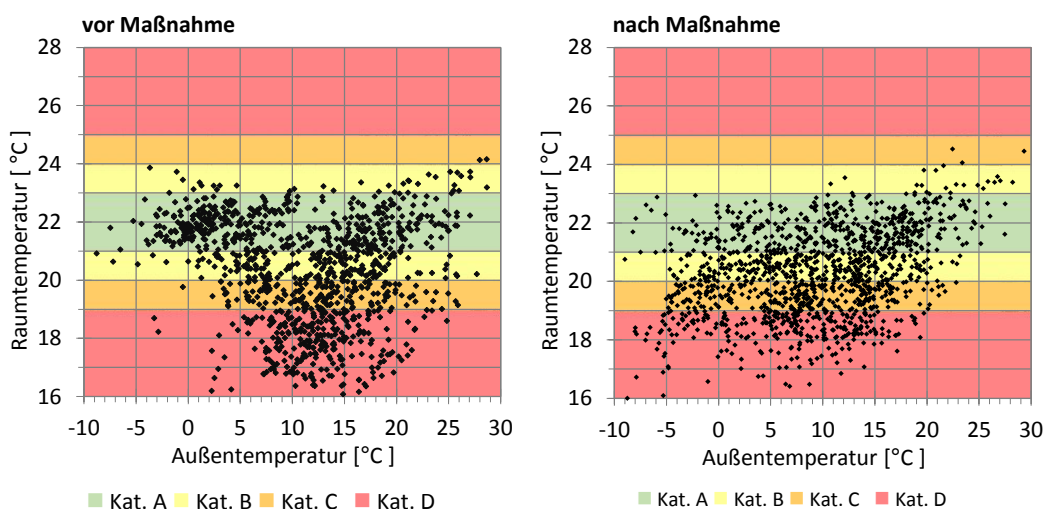


Abb. 60 Innenraum- gegenüber Außentemperatur Unterrichtszeit GS HH Raum 16

Die Lehrer äußerten bei Installation der Lüftungsampel die Sorge, dass der Raum in den Sommermonaten bei regelmäßiger Fensterlüftung überhitzen könne. Diese Befürchtung konnte nicht bestätigt werden.

Die Werteverteilung der Innentemperatur gegenüber der relativen Luftfeuchtigkeit in der Unterrichtszeit im Nomogramm (Abb. 61) zeigt einen positiven Effekt der Lüftungsampel. Die Luftfeuchtigkeit, die zuvor mit bis zu 80 % problematisch war, konnte bei niedrigen Raumtemperaturen reduziert werden.

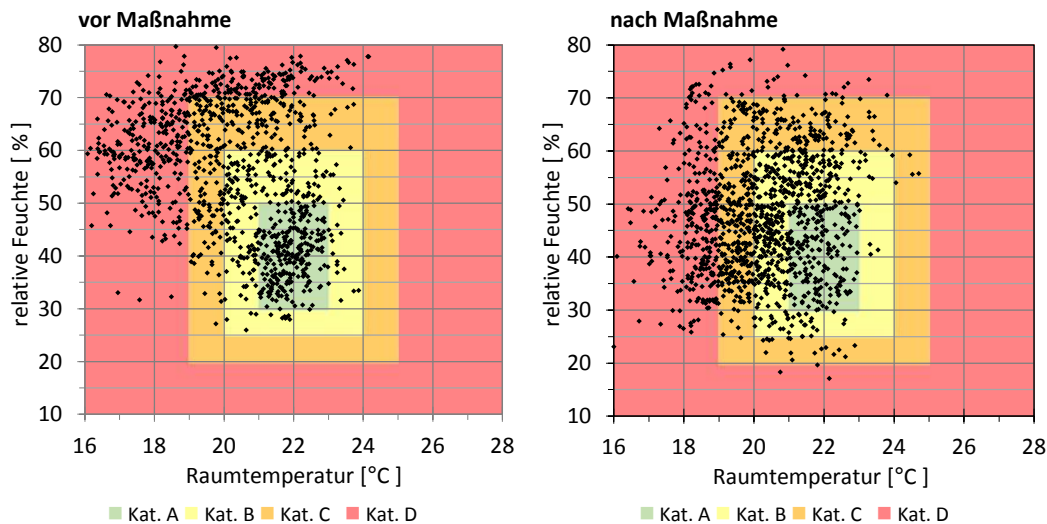


Abb. 61 Thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit GS HH Raum 16

Die Auswertung der prozentualen Verteilung der Werte zur thermischen Behaglichkeit (Abb. 62) bestätigt, dass in den Sommermonaten eine Steigerung von 18 % auf 28 % der gemessenen Werte in Kategorie A erreicht werden konnte. In den Wintermonaten trat eine Verbesserung um 4 % ein. Sowohl im Sommer als auch nach im Winter lagen die Werte für die thermische Behaglichkeit nach der Installation der Lüftungsampel in etwa 38 % der Unterrichtszeit innerhalb Kategorie A.

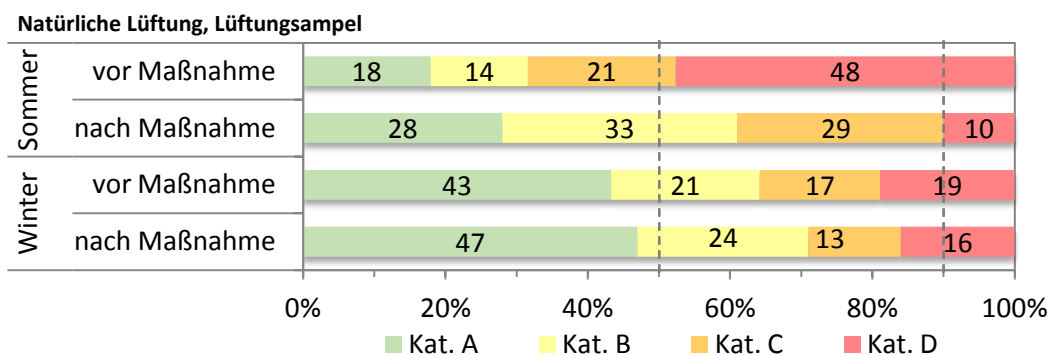
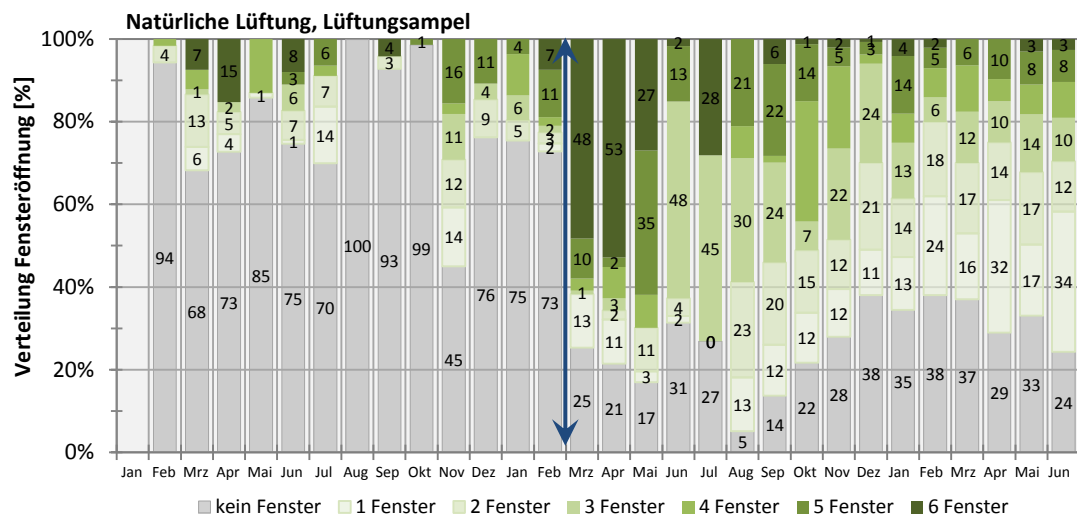


Abb. 62 Verteilung thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit GS HH Raum 16

Das Ergebnis für Raum 16 macht erneut deutlich, dass der Luftwechsel unmittelbar mit den Öffnungszeiten der Fenster zusammenhängt. Aufgrund kurzer, zweiminütiger Messintervall-

le konnten auch kurze Fensteröffnungen erfasst und abgebildet werden. Die prozentuale Auswertung der Fensteröffnungen (Abb. 63) in der Unterrichtszeit zeigt, dass im ersten Messjahr vor Installation der Lüftungsampel durchschnittlich in knapp 80 % der Unterrichtszeit alle Fenster geschlossen blieben.



**Abb. 63** Verteilung Fensteröffnungen in der Unterrichtszeit GS HH Raum 16

Auffällig ist dabei, dass vor der Installation der Lüftungsampel selbst in den Sommermonaten sehr selten gelüftet wurde. Die Messergebnisse der weiteren untersuchten Klassenräume mit natürlicher Lüftung zeigen, dass die Lüftungsbereitschaft erst mit sinkenden Außenlufttemperaturen abnimmt. Auf Rückfrage bei den Lehrkräften wurde angegeben, dass die Fenster aus Angst vor Überhitzung des Klassenraumes im Sommer geschlossen blieben.

Mit der Installation der Lüftungsampel änderte sich das Lüftungsverhalten bedeutend. Die erwartete „Einstiegsphase“ mit einer intensiven Nutzung der Lüftungsampel ist deutlich erkennbar, da in den ersten beiden Monaten alle Fenster auf einmal geöffnet wurden. Im weiteren Verlauf waren weiterhin in über 50 % der Unterrichtszeit die Fenster geöffnet, jedoch nahm die Anzahl der geöffneten Flügel ab. Die Kontinuität des Lüftens selbst wurde auch nach den Sommerferien im August des zweiten Messjahres beibehalten. Zum Schulstart im dritten Messjahr mit dem Neubezug des Gebäudetraktes durch eine siebte Klassenstufe wurde die Lüftungsampel weiterhin genutzt. Die Schüler der siebten Klasse erhielten keine erneute Einführung in die Funktionsweise der Lüftungsampel, sondern nutzen diese von Beginn an selbstständig und in gleichem Maße wie die vierte Klasse im Schuljahr zuvor. Lediglich die Lehrkraft wurde vom Schulleiter zu dem Gerät informiert.

Das Ergebnis zeigt, dass in Raum 16 mit der Lüftungsampel ein positiver Langzeiteffekt erzielt werden konnte. Der Einsatz von Geräten zur Visualisierung der Raumluftqualität (Lüf-

tungsampel) trägt demnach bei jungen Klassenstufen langfristig dazu bei, die Raumluftqualität in einem guten Bereich zu halten. Das Nutzerempfinden wird offensichtlich geschärft. Jedoch müssen in dieser Maßnahme im Vergleich zu mechanisch belüfteten Räumen geringfügige Einbußen in Bezug auf die thermische Behaglichkeit akzeptiert werden.

**6.3.1.2 Schulzentrum Fallersleben (SZ FL)**

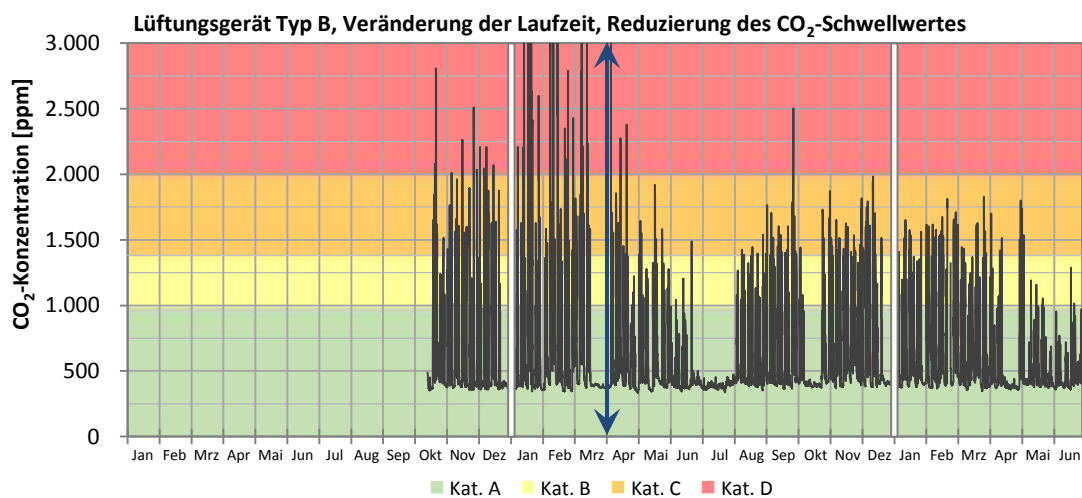
**Raum 209:** Die Lehrkräfte wurden zu Beginn der Messungen mittels einer Broschüre ausführlich zur Funktionsweise und Bedienung des Lüftungsgerätes Typ B informiert. Zusätzlich wurde ein Poster mit Informationen zum Lüftungsgerät für alle Schüler sichtbar im Klassenraum platziert. Die beiden installierten Geräte Typ B fördern gemeinsam einen Luftvolumenstrom von bis zu 500 m³/h (2-facher Luftwechsel). Der Volumenstrom wird bei Betrieb entsprechend der CO<sub>2</sub>-Konzentration geregelt.

Die Umstellung des CO<sub>2</sub>-Schwellwertes von 1.500 ppm auf 1.000 ppm und die Programmierung des automatischen Starts der Geräte erfolgte im März des zweiten Messjahres.

**Tabelle 51 Übersicht des Messzeitraumes SZ FL Raum 209**

1. Jahr									2. Jahr									3. Jahr											
Schuljahr 1 (Klassenstufe 4)									Schuljahr 2 (Klassenstufe 7)									Schuljahr 3 (Klassenstufe 7)											
JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN
															<b>Lüftungsgerät Typ B, Veränderung der Laufzeit, Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Schwellwertes</b>														

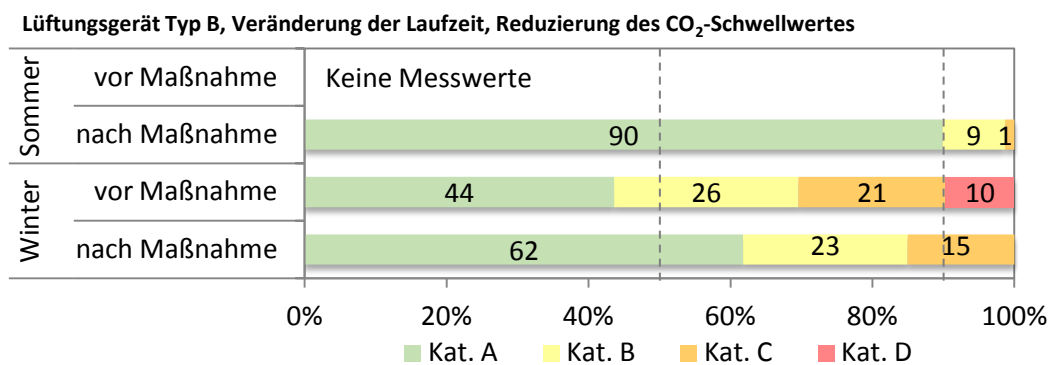
Die Geräte mussten zu Beginn der Messungen morgens manuell eingeschaltet werden. Die Auswertung des ersten Messjahres und in den Monaten Januar und Februar des zweiten Messjahres (Abb. 64) zeigt deutliche Überschreitungen des Grenzwertes von 2.000 ppm.



**Abb. 64 Messwerte CO<sub>2</sub>-Konzentration SZ FL Raum 209**

Mit der Umstellung des Schwellwertes und der Programmierung des automatischen Starts des Lüftungsgerätes vor Unterrichtsbeginn (blauer Pfeil) stellte sich eine sichtbare Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Konzentration ein. Da die Geräte vor der Umprogrammierung zu Unterrichtsbeginn manuell eingeschaltet werden mussten, wird vermutet, dass das Einschalten nicht regelmäßig geschah. Auf Nachfrage wurde von den Lehrern bestätigt, dass das Einschalten am Morgen oftmals vergessen wurde. Noch deutlicher wurde dieser Aspekt nach den Winterferien im Januar des zweiten Messjahres, da die Messwerte noch schlechter ausfielen.

Die Auswertung der prozentualen Verteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Unterrichtszeit (Abb. 65) bestätigt die Verbesserung der CO<sub>2</sub>-Werte nach der Umstellung des Gerätes. Vor der Umprogrammierung wurden in 10 % der Unterrichtszeit Werte oberhalb von 2.000 ppm (Kategorie D) gemessen. Diese Spitzen der CO<sub>2</sub>-Konzentration konnten mit der Umstellung durchgehend verhindert werden.



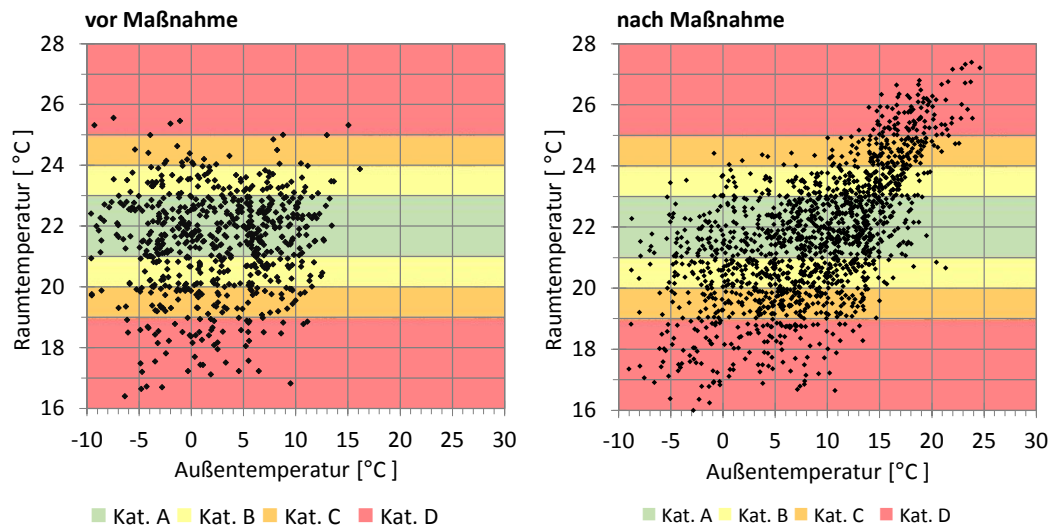
**Abb. 65 Verteilung CO<sub>2</sub>-Konzentration Unterrichtszeit SZ FL Raum 209**

Es wird vermutet, dass aufgrund des Anstieges der Außenlufttemperatur im Frühjahr zeitgleich auch die Lüftungsbereitschaft anstieg. Wie bereits in Kapitel 2.7 beschrieben wurde bereits in vergleichbaren Forschungsprojekten nachgewiesen, dass die natürliche Lüftung mit steigenden Außentemperaturen zunimmt. Die Verbesserung der Raumluftqualität in Raum 209 muss somit nicht zwangsläufig mit dem installierten Lüftungsgerät Typ B zusammenhängen.

Als Reaktion auf diesen Hinweis überprüfte der Hersteller im Juni des zweiten Messjahres die CO<sub>2</sub>-Sensoren in den Geräten und kalibrierte sie erneut. Zudem erhielten die Schüler und Lehrer nach den Sommerferien eine erneute Einführung in die Funktionsweise und Bedienung des Gerätes. Als Ergebnis wurden im Anschluss in 90 % der Unterrichtszeit CO<sub>2</sub>-Konzentrationen unterhalb von 1.000 ppm (Kategorie A) gemessen.

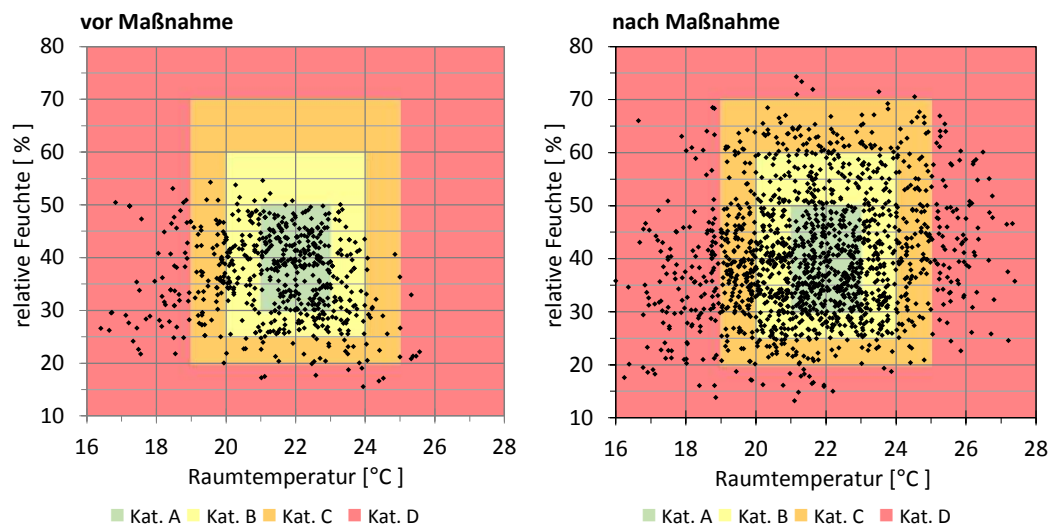
Die Werteverteilung der Innen- gegenüber der Außentemperatur (Abb. 66) zeigt eine höhere Anzahl von Einzelwerten im Bereich der hohen Außen- und Innentemperaturen nach der Maßnahme. Dieses Ergebnis ist darauf zurückzuführen, dass die Messung in der Winterpe-

riode startet und keine vergleichbaren Sommerwerte vor der Maßnahme vorliegen. Die Auswertung vor der Maßnahme zeigt entsprechend insgesamt weniger Einzelwerte.



**Abb. 66 Innenraum- gegenüber Außentemperatur Unterrichtszeit SZ FL Raum 209**

Die Werteverteilung der Raumlufttemperatur gegenüber der relativen Luftfeuchtigkeit in der Unterrichtszeit (Abb. 67) wies sowohl vor als auch nach der Maßnahme eine hohe Streuung der Messwerte auf. Dennoch ist eine Häufung der Messwerte in Kategorie A und Kategorie B sowohl vor als auch nach der Maßnahme deutlich erkennbar.

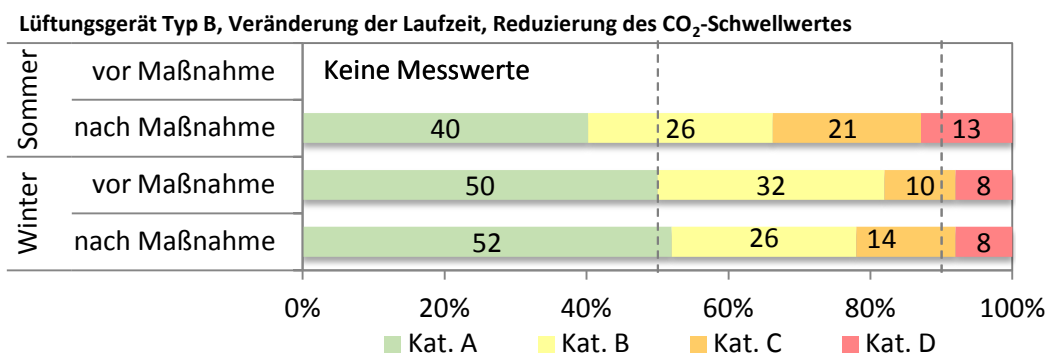


**Abb. 67 Thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit SZ FL Raum 209**

Die Auswertung der prozentualen Verteilung der Werte zur thermischen Behaglichkeit (Abb. 68, Seite 83) bestätigt diese Annahme. Nach der Umsetzung der Maßnahme lagen 52 % der Messwerte der Unterrichtszeit im Winter und 40 % der Messwerte im Sommer in Kategorie A. Nur 8 % im Winter und 13 % im Sommer lagen in Kategorie D. Insgesamt belegen die Messwerte die Wirksamkeit der installierten Geräte Typ B. Sowohl die Raumluftqualität als auch die thermische Behaglichkeit konnten überwiegend in den Kategorien A



gehalten werden.



**Abb. 68** Verteilung thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit SZ FL Raum 209

Das Ergebnis für Raum 209 im Schulzentrum Fallersleben zeigt, dass der Einsatz dezentraler Lüftungsgeräte nur dann zu einer langfristigen Verbesserung der Raumluftqualität beitragen kann, wenn die Steuerung nutzerunabhängig erfolgt. Der notwendige Nutzereingriff zum Schulstart am Morgen stellte keine erfolgreiche oder praktikable Maßnahme dar. Nur die zeitlich programmierte und automatisierte Laufzeit der Geräte konnte für den Klassenraum einen konstanten und ausreichenden Luftwechsel sicherstellen.

**Raum 311:** Die Lehrkräfte und Schüler wurden zu Beginn der Messung über die Funktionsweise des Lüftungsgerätes Typ C mittels einer Broschüre informiert. Die geplante Maßnahme sah vor, dass das Lüftungsgerät in der Unterrichtszeit in allen drei Stufen jeweils über eine Woche betrieben werden sollte. Diese Feldversuche konnten aufgrund störender Geräuschpegelmissionen nicht umgesetzt werden. Die Ergebnisse der Schalldruckpegelmessung zu Lüftungsgerät Typ C werden in Kapitel 6.5.2.2 erläutert. Auf Wunsch der Lehrer und Schüler wurde von den Feldversuchen Abstand genommen und keine weitere Maßnahme umgesetzt. Das Lüftungsgerät C wurde in der Unterrichtszeit ausschließlich auf Stufe 0 (CO<sub>2</sub>-Regelung) betrieben. Zu Beginn des dritten Schuljahres wurden die Schüler und Lehrer erneut mittels einer Broschüre und einem Poster mit der Funktionsweise des Lüftungsgerätes Typ C vertraut gemacht.

**Tabelle 52** Übersicht des Messzeitraumes SZ FL Raum 311

1. Jahr												2. Jahr												3. Jahr											
Keine Aufzeichnung												Schuljahr 2 (Klassenstufe 9)												Schuljahr 3 (Klassenstufe 9)											
JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN						
<b>Lüftungsgerät Typ C, keine Veränderung des Lüftungskonzeptes</b>																																			

Die Auswertung der gesamten Messwerte zur CO<sub>2</sub>-Konzentration (Abb. 69, Seite 84) zeigt, dass in den Sommermonaten der Grenzwert von 2.000 ppm eingehalten wurde, doch mit

Beginn der Heizperioden häuften sich in beiden Messjahren die Überschreitungen des Grenzwertes von 2.000 ppm. Dieses Ergebnis entspricht dem eines natürlich belüfteten Raumes.

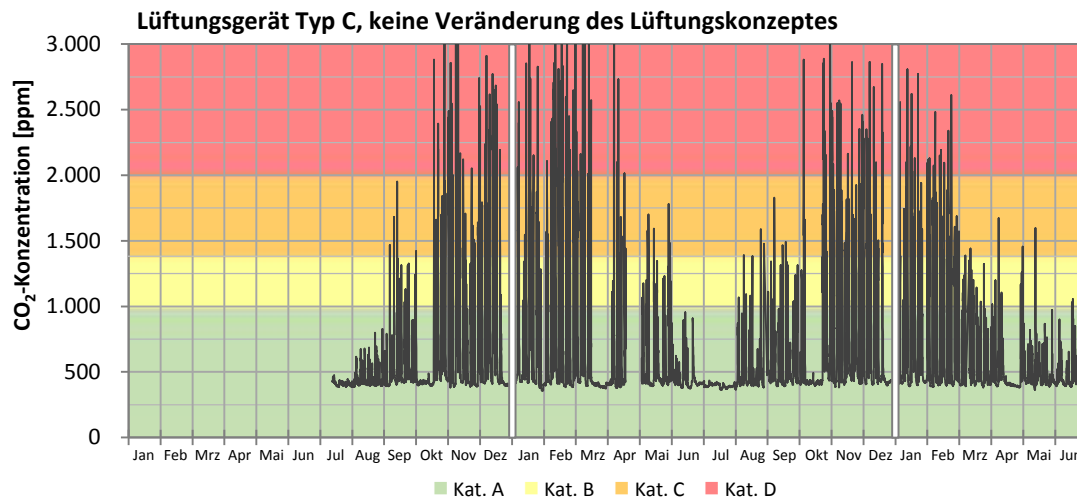


Abb. 69 Messwerte CO<sub>2</sub>-Konzentration SZ FL Raum 311

Im ersten Schritt wurde daraus geschlossen, dass die Belüftung des Raumes 311 natürlich über die Fenster erfolgte und das Gerät ungenutzt blieb. Da das Gerät prinzipiell nicht ausgeschaltet werden kann, und selbst in Stufe 0 entsprechend der CO<sub>2</sub>-Konzentration regeln sollte, muss die Funktionsfähigkeit des Gerätes Typ C in Frage gestellt werden.

Die Auswertung der prozentualen Verteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Unterrichtszeit (Abb. 70) bestätigt diese Annahme, da die Verteilung der Messwerte sowohl für den Sommer als auch für den Winter eine ähnliche Verteilungen wie die der natürlich belüfteten Räume 210 und 211 aufweist.

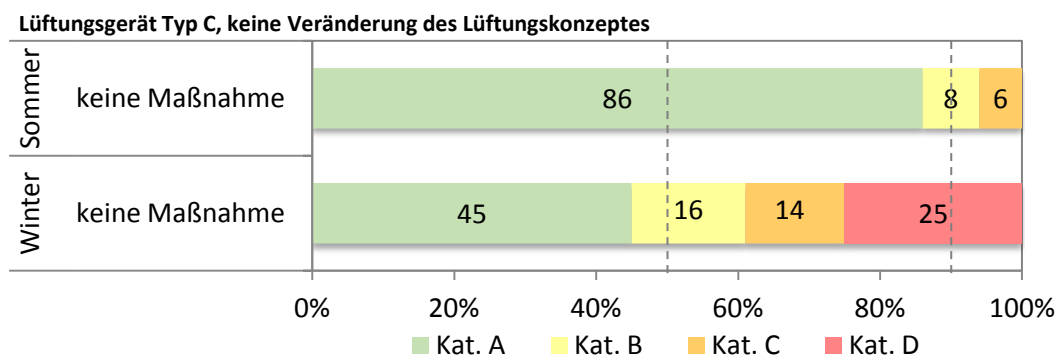
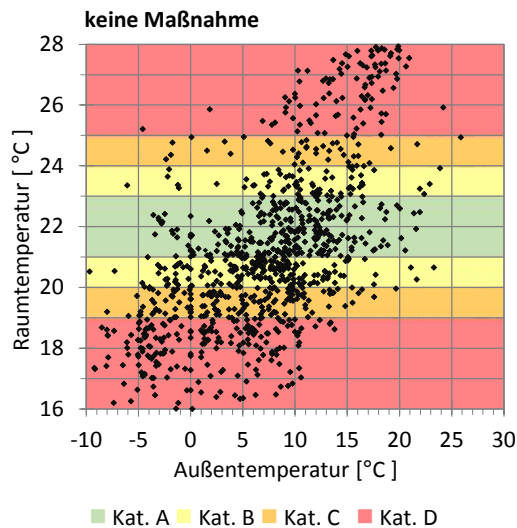


Abb. 70 Verteilung CO<sub>2</sub>-Konzentration Unterrichtszeit SZ FL Raum 311

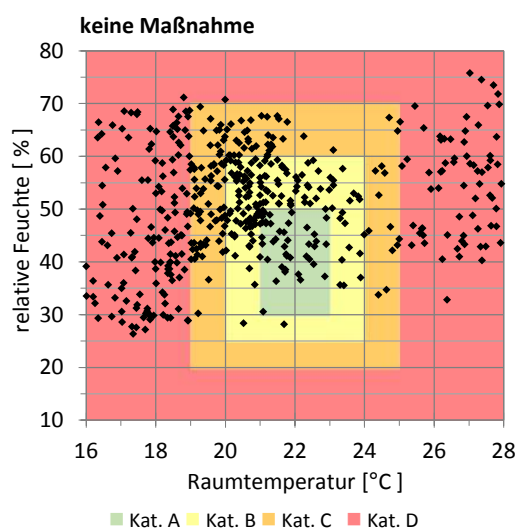
Hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Konzentration besteht in den Sommermonaten keinerlei Handlungsbedarf. In den Wintermonaten hingegen sind Maßnahmen zur Verbesserung zur Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes in der Unterrichtszeit notwendig. In einem Viertel der Unterrichtszeit lag die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Kategorie D (> 2.000 ppm).

Die Werteverteilung der Innen- und Außentemperatur im Datenpunktediagramm (Abb. 71) zeigt, dass bei hohen Außentemperaturen zum Teil auch hohe Raumlufttemperaturen vorlagen. Besonders bei kalten Außentemperaturen lagen die Werte der Raumlufttemperaturen ebenfalls häufig in Kategorie D (<19 °C; > 25 °C).



**Abb. 71 Innenraum- gegenüber Außentemperatur Unterrichtszeit SZ FL Raum 311**

Die Werteverteilung der Innentemperatur gegenüber der relativen Luftfeuchtigkeit in der Unterrichtszeit im Nomogramm (Abb. 72) zeigt aufgrund eines Datenausfalls für die Aufzeichnung der relativen Luftfeuchtigkeit nur wenige Datenpunkte. Die erfassten Daten weisen eine hohe Streuung auf. Hierbei liegen nur wenige Werte in Kategorie A.



**Abb. 72 Thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit SZ FL Raum 311**

Die Auswertung der prozentualen Verteilung der Werte zur thermischen Behaglichkeit (Abb. 73, Seite 86) verdeutlicht dies. Im Sommer lagen 46 % und im Winter 26 % der erfassten Werte in der Unterrichtszeit in Kategorie D. Insgesamt lagen im Mittel nur 25 % der Unterrichtszeit in Kategorie A.

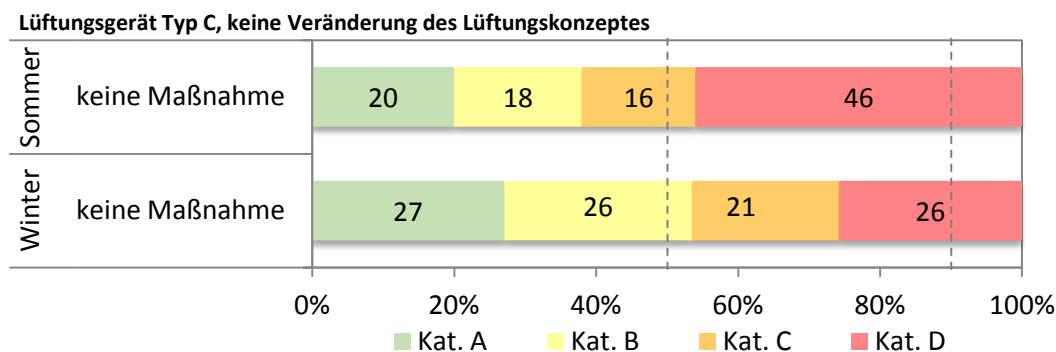


Abb. 73 Verteilung thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit SZ FL Raum 311

Insgesamt belegen die Messwerte, dass das installierte Lüftungsgerät Typ C nicht zu einer Verbesserung der Luftqualität oder der thermischen Behaglichkeit beitragen konnte.

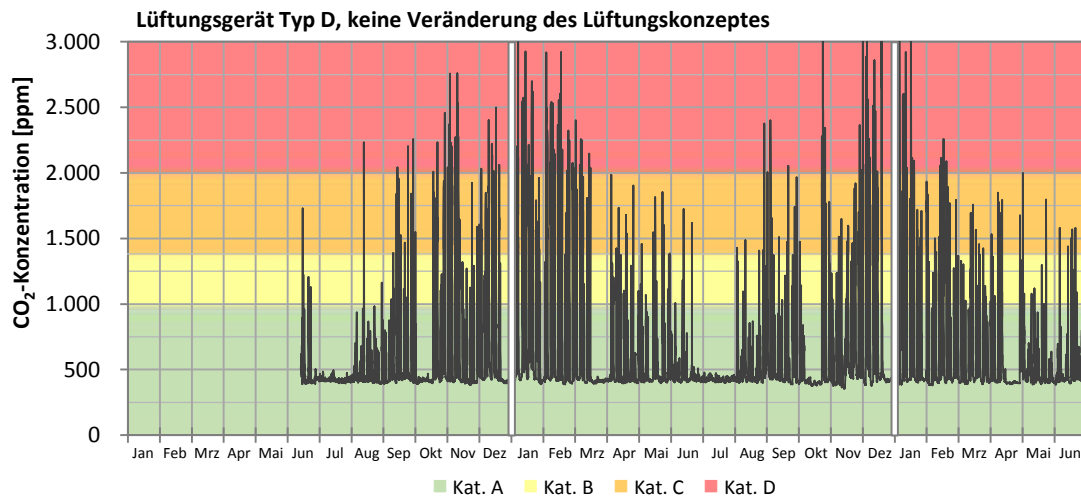
Zusammenfassend zeigt das Ergebnis für den Raum 311, dass die Installation eines Lüftungsgerätes trotz einer Nutzereinweisung nicht automatisch zu einer Verbesserung der Raumluftqualität beiträgt. Der ordnungsgemäße Betrieb der Geräte muss zwingend bei Inbetriebnahme und im Betrieb regelmäßig geprüft werden. Eine konsequente Betreuung in der Startphase, die akustische Prüfung der Geräte und die regelmäßige Wartung sind unverzichtbar.

**Raum 313:** Die Lehrkräfte wurden zu Beginn der Messung über die Funktionsweise des Lüftungsgerätes Typ D über eine Broschüre informiert und gaben die Information an die Schüler weiter. Wie in Raum 311 konnte in Raum 313 aufgrund des störenden Geräuschpegels (Kapitel 6.5.2.2) beim Betrieb des Lüftungsgerätes die geforderte Maßnahme nicht umgesetzt werden. Das Lüftungsgerät Typ D sollte wochenweise mit verschiedenen Luftvolumenströmen durchgängig betrieben werden.

Tabelle 53 Übersicht des Messzeitraumes SZ FL Raum 313

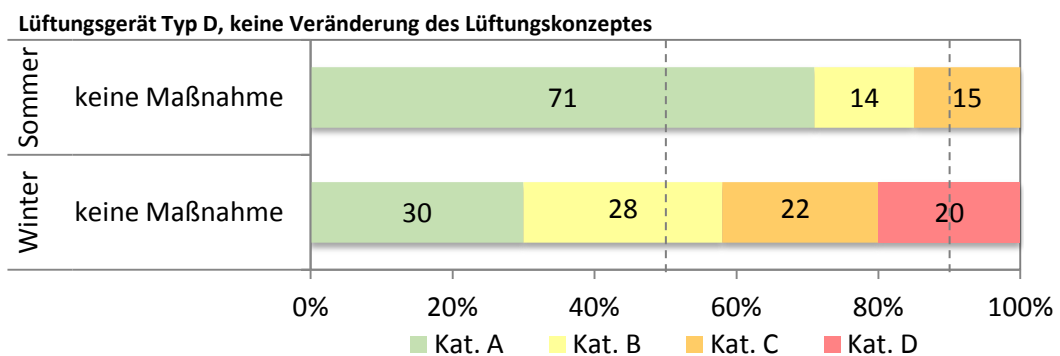
1. Jahr						2. Jahr						3. Jahr																	
Keine Aufzeichnung						Schuljahr 2 (Klassenstufe 9)						Schuljahr 3 (Klassenstufe 9)																	
JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN
<b>Lüftungsgerät Typ D, keine Veränderung des Lüftungskonzeptes</b>																													

Abb. 74 (Seite 87) zeigt die gesamten Messwerte der der CO<sub>2</sub>-Konzentration für Raum 313. Die Auswertung zeigt, den Sommermonaten der Grenzwert von 2.000 ppm eingehalten wurde, doch mit Beginn der Heizperioden traten häufig Überschreitungen des Grenzwertes auf. Dieses Ergebnis entspricht, wie zuvor für Raum 311 beschrieben, dem eines natürlich belüfteten Raumes.



**Abb. 74 Messwerte CO<sub>2</sub>-Konzentration SZ FL Raum 313**

Die Auswertung der prozentualen Verteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Unterrichtszeit (Abb. 75) bestätigt, dass die Messwerte in 20 % der Unterrichtszeit in Kategorie D (> 2.000 ppm) lagen. Im Sommer hingegen lagen 71 % der Messwerte in Kategorie A (< 1.000 ppm).

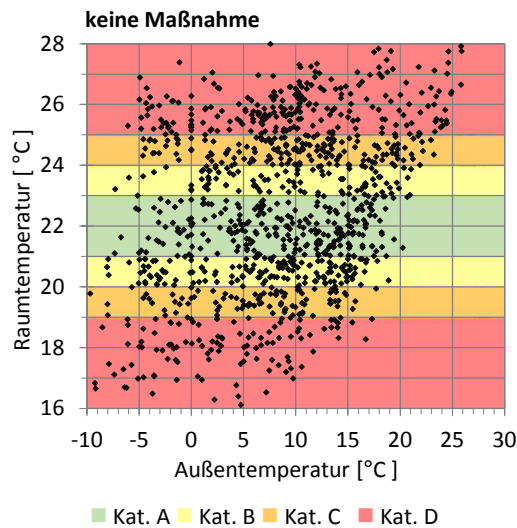


**Abb. 75 Verteilung CO<sub>2</sub>-Konzentration Unterrichtszeit SZ FL Raum 313**

Die Laufzeiten des Gerätes und die Einstellungen des Luftvolumenstromes konnten sowohl von den Schülern als auch von den Lehrkräften jederzeit beeinflusst werden. Es wurde keine kontinuierlichen Aufzeichnungen zum Betrieb des Gerätes angefertigt. Somit lässt sich kein direkter Zusammenhang zwischen dem Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration und dem Einsatz des Gerätes nachweisen. Auf Nachfrage gaben die Lehrkräfte an, das Gerät „nach Bedarf“, durchaus häufig, aber aus akustischen Gründen auf der kleinsten Stufe mit einem Luftvolumenstrom von 80 m<sup>3</sup>/h genutzt zu haben. Diese Aussage lässt sich an den Messungen jedoch nicht überprüfen.

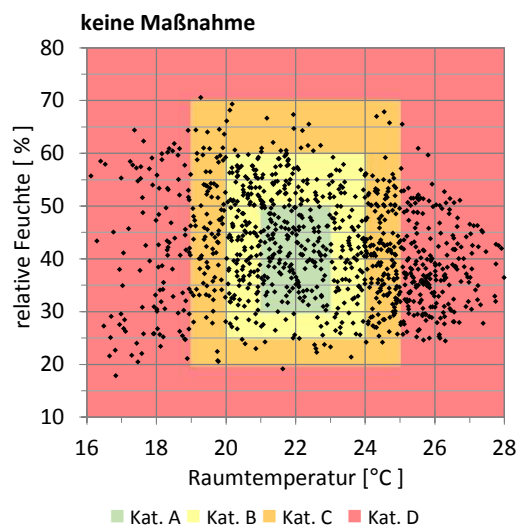
Die Werteverteilung der Innen- und Außentemperatur im Datenpunktediagramm (Abb. 76, Seite 88) zeigt eine hohe Streuung der Messwerte. Es lagen insgesamt zum Teil sehr hohe Raumlufttemperaturen im Bereich von Kategorie D (<19 °C; > 25 °C) vor. Der Raum 313 weist mit 31 Schülern eine sehr hohe Belegungsdichte im Vergleich zu den weiteren Refe-

rensräumen auf. Es wird vermutet, dass diese hohe Belegung zu den hohen Raumlufttemperaturen beitrug.



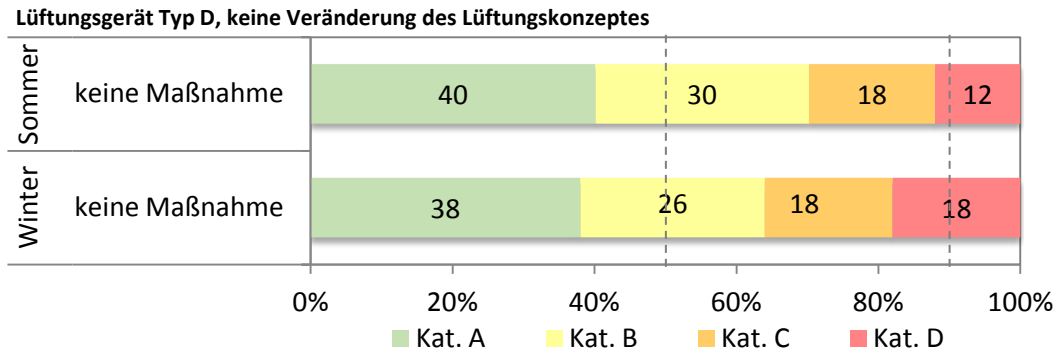
**Abb. 76 Innenraum- gegenüber Außentemperatur Unterrichtszeit SZ FL Raum 313**

Die Werteverteilung der Innentemperatur gegenüber der relativen Luftfeuchtigkeit in der Unterrichtszeit im Nomogramm (Abb. 77) weist eine hohe Streuung über alle vier Kategorien auf.



**Abb. 77 Thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit SZ FL Raum 313**

Die Auswertung der prozentualen Verteilung der Werte zur thermischen Behaglichkeit (Abb. 78, Seite 89) zeigt, dass sowohl im Sommer als auch im Winter etwa 40 % der gemessenen Werte in Kategorie A lagen. Der Werteanteil für Kategorie D lag im Winter bei 18 % und im Sommer bei 12 %.



**Abb. 78** Verteilung thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit SZ FL Raum 313

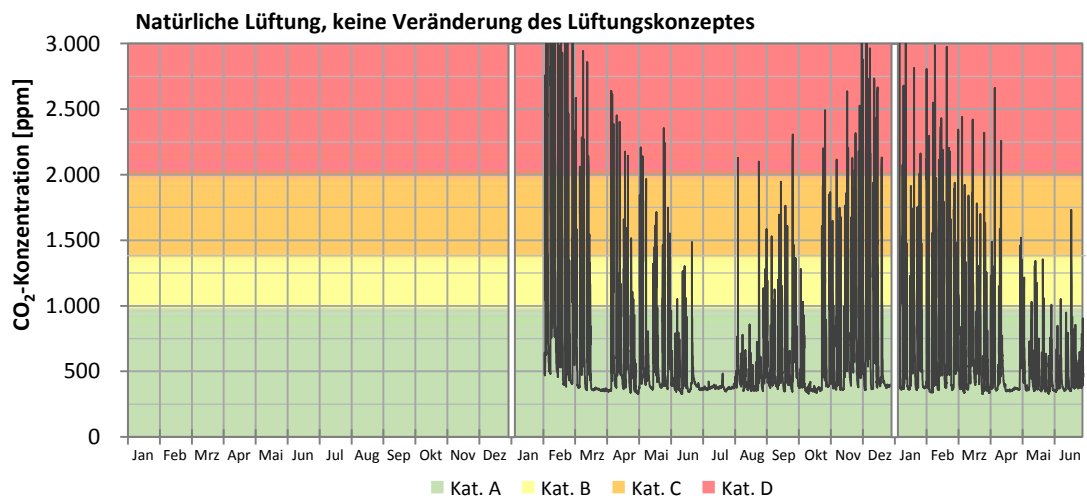
Das Ergebnis für den Raum 313 bestätigt erneut die Ergebnisse der Räume 209 und 311. Der Einsatz dezentraler Lüftungsgeräte führt nicht automatisch zu einer Verbesserung der Raumluftqualität, wobei beim Einsatz von Wohnungslüftungsgeräten mit geringen Luftvolumenströmen auch keine sichtbare Veränderung erwartet werden darf.

**Raum 210:** Im Raum 210 fand die Referenzmessung bei natürlicher Lüftung statt. Es wurde keine Maßnahme zur Veränderung des Lüftungskonzeptes umgesetzt.

**Tabelle 54** Übersicht des Messzeitraumes SZ FL Raum 210

1. Jahr												2. Jahr												3. Jahr					
Keine Aufzeichnung												Schuljahr 2 (Klassenstufe 8)												Schuljahr 3 (Klassenstufe 8)					
JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN
<b>Natürliche Lüftung, keine Veränderung des Lüftungskonzeptes</b>																													

**Abb. 79** zeigt die gesamten Messwerte der der CO<sub>2</sub>-Konzentration für Raum 210.



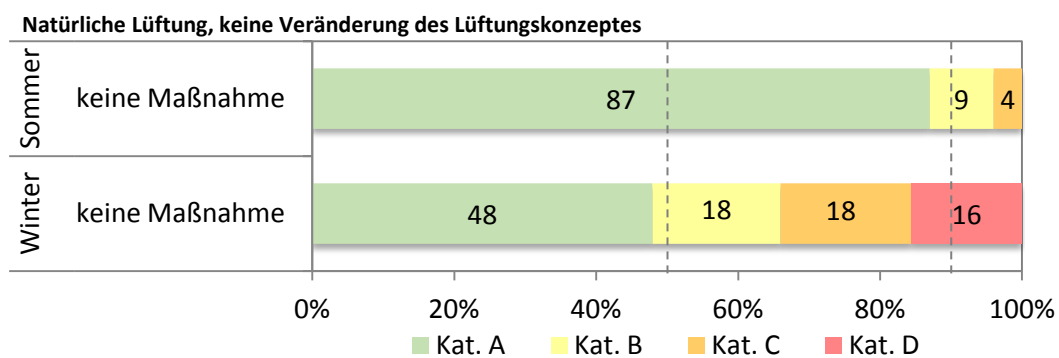
**Abb. 79** Messwerte CO<sub>2</sub>-Konzentration SZ FL Raum 210

Die Auswertung zeigt, dass es bei einer natürlichen Lüftung besonders in der Heizperiode zu

sehr hohen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Klassenraum kam. Es wird deutlich, dass in der Nichtheizperiode das Lüftungsverhalten soweit zunahm, dass die Raumluftqualität in der Unterrichtszeit unterhalb von 2.000 ppm blieb.

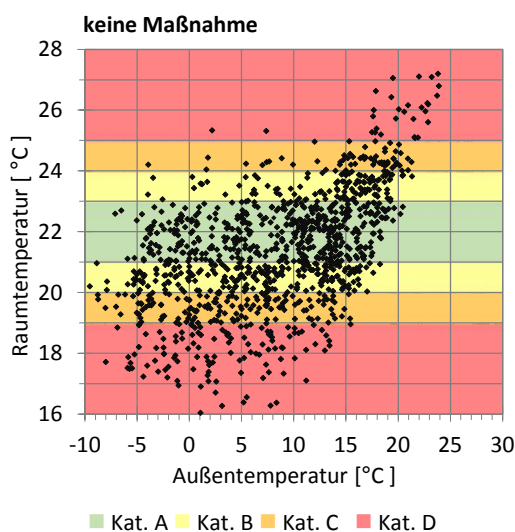
Problematisch ist, dass die Überschreitungen des Grenzwertes von 2.000 ppm im Winter zwar nicht häufiger als in dem mechanisch belüfteten Raum auftraten, doch die CO<sub>2</sub>-Konzentration wesentlich höhere Werte in der Unterrichtszeit erreichte. Es wurden zum Teil CO<sub>2</sub>-Konzentrationen oberhalb von 4.000 ppm ermittelt. Derartig hohe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen verursachen, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, Kopfschmerzen und Unwohlsein.

Die Auswertung der prozentualen Verteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Unterrichtszeit (Abb. 80) zeigt, dass die Messwerte im Winter in 16 % der Unterrichtszeit in Kategorie D (> 2.000 ppm) lagen. Positiv ist, dass im Winter 48 % der Unterrichtszeit in Kategorie A lagen (< 1.000 ppm). Im Sommer waren es 87 %.



**Abb. 80 Verteilung CO<sub>2</sub>-Konzentration Unterrichtszeit SZ FL Raum 210**

Die Werteverteilung der Innen- und Außentemperatur im Datenpunktediagramm (Abb. 81) zeigt, dass die Mehrzahl der Messwerte in Kategorie A (21-23 °C) lag.



**Abb. 81 Innenraum- gegenüber Außentemperatur Unterrichtszeit SZ FL Raum 210**



Die Werteverteilung der Innentemperatur gegenüber der relativen Luftfeuchtigkeit in der Unterrichtszeit im Nomogramm (Abb. 82) zeigt ebenfalls, dass die Messwerte überwiegend in Kategorie A lagen. Es traten nur vereinzelt Werte in Kategorie D auf.

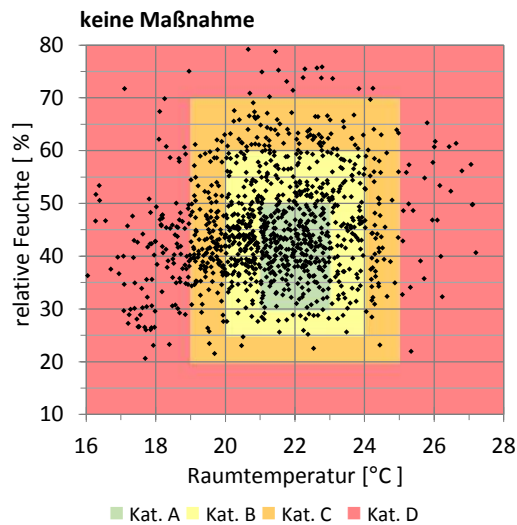


Abb. 82 Thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit SZ FL Raum 210

Die Auswertung der prozentualen Verteilung der Werte zur thermischen Behaglichkeit (Abb. 83) bestätigt, dass im Winter 56 % der Messwerte in der Unterrichtszeit und im Sommer 33 % in Kategorie A lagen. Die Belegungsdichte in Raum 210 ist, wie bei Raum 313 höher als bei den anderen untersuchten Klassenräumen. Mit 200 m<sup>3</sup> und einer durchschnittlichen Belegung von 28 Schülern sind die internen Wärmegewinne sehr hoch. Eine konsequent durchgeführte Stoßlüftung führte in den Wintermonaten nicht zu einer Auskühlung des Raumes oder einer Einschränkung der thermischen Behaglichkeit. Im Sommer hingegen kam es mehrfach zu einer erhöhten Raumlufttemperatur oberhalb von 25°C. Die Anzahl der Werte lässt aber noch nicht auf eine dauerhafte Überhitzung der Räume schließen.

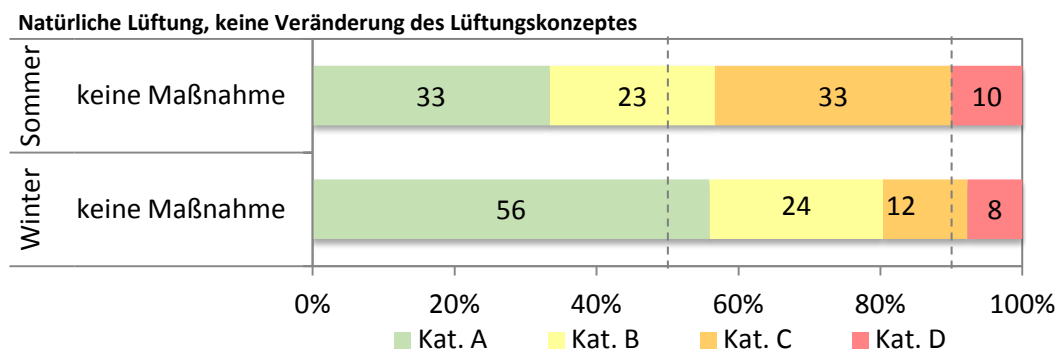


Abb. 83 Verteilung thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit SZ FL Raum 210

Das Ergebnis für den Raum 210 zeigt, dass in einem natürlich belüfteten Raum im Winter eine Problematik in Bezug auf die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Unterrichts-

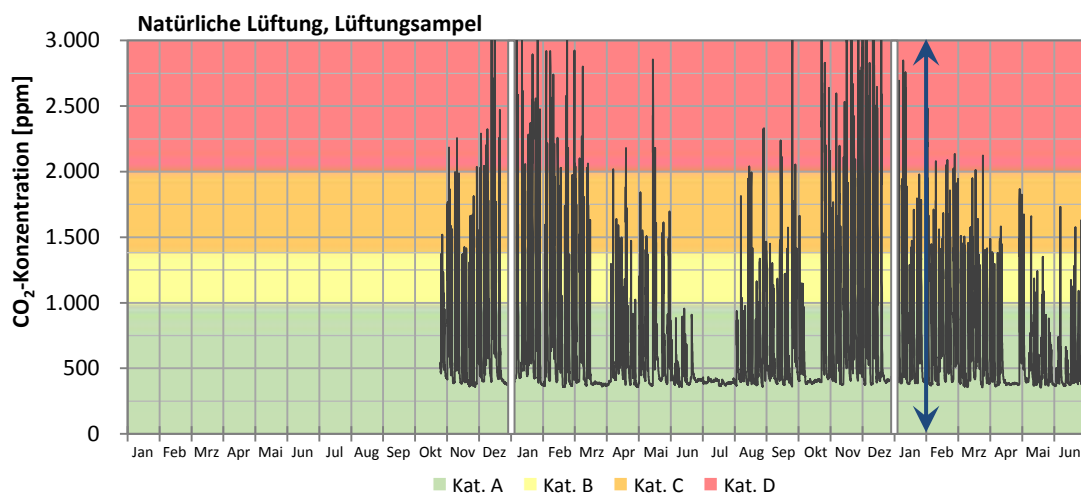
zeit besteht. In den Sommermonaten kann es aufgrund der einströmenden warmen Außenluft zu Überhitzung des Klassenraumes kommen.

**Raum 211:** Die Belüftung des Raumes erfolgt wie in Raum 210 ausschließlich über die Fenster. Die Installation der Lüftungsampel erfolgte im Januar des dritten Jahres (Tabelle 55). Die Schüler und Lehrer wurden mittels eines Leitfadens und Poster im Klassenraum zur Funktionsweise der Lüftungsampel informiert.

**Tabelle 55 Übersicht Des Messzeitraumes SZ FL Raum 211**

1. Jahr									2. Jahr									3. Jahr											
Keine Aufzeichnung									Schuljahr 2 (Klassenstufe 8)									Schuljahr 3 (Klassenstufe 8)											
JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN
Natürliche Lüftung, Lüftungsampel																													

Die Auswertungen der gesamten Messdaten der CO<sub>2</sub>-Konzentration (Abb. 84) zeigen ein ähnliches Bild wie in Raum 210. In der Heizperiode stieg die CO<sub>2</sub>-Konzentration regelmäßig auf Werte oberhalb der Grenze von 1.400 ppm. In Raum 211 konnten Maximalwerte von mehr als 4.000 ppm gemessen werden, wenngleich die Häufigkeit dieser Maximalwerte deutlich geringer war als in Raum 210 was auf das größere Raumvolumen zurückgeführt werden kann.

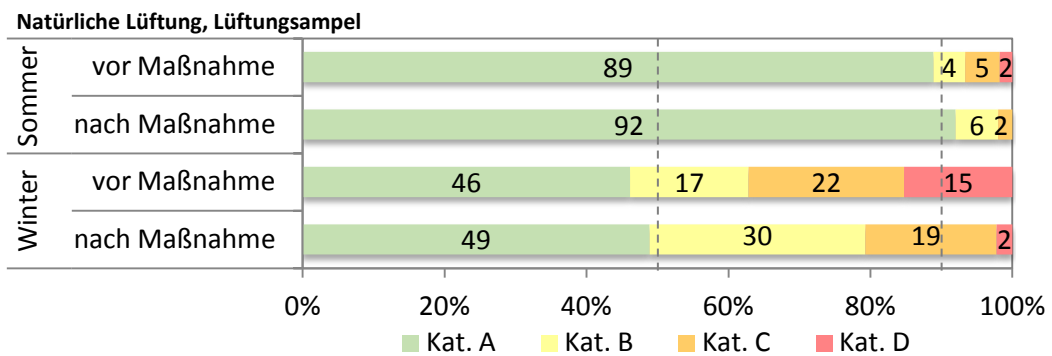


**Abb. 84 Messwerte CO<sub>2</sub>-Konzentration SZ FL Raum 211**

Die Auswertung der prozentualen Verteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration (Abb. 85, Seite 93) zeigt, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration bereits vor der Maßnahme im Sommer in 89 % und im Winter in 46 % der Unterrichtszeit in Kategorie A (< 1.000 ppm) lag.

Mit der Installation der Lüftungsampel konnten hohe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von mehr als 2.000 ppm (Kategorie D) im Sommer gänzlich vermieden und im Winter von 5 % auf 2 %

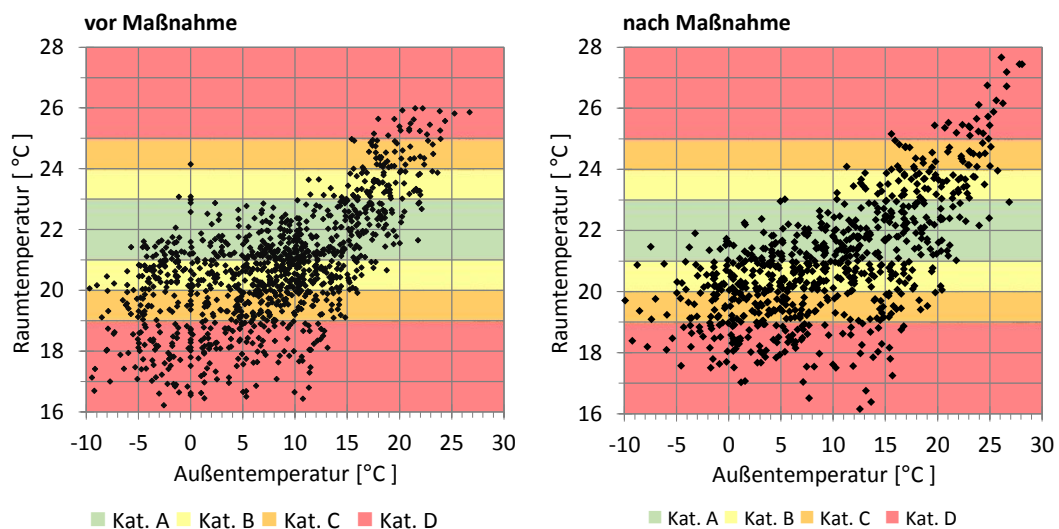
reduziert werden.



**Abb. 85 Verteilung CO<sub>2</sub>-Konzentration Unterrichtszeit SZ FL Raum 211**

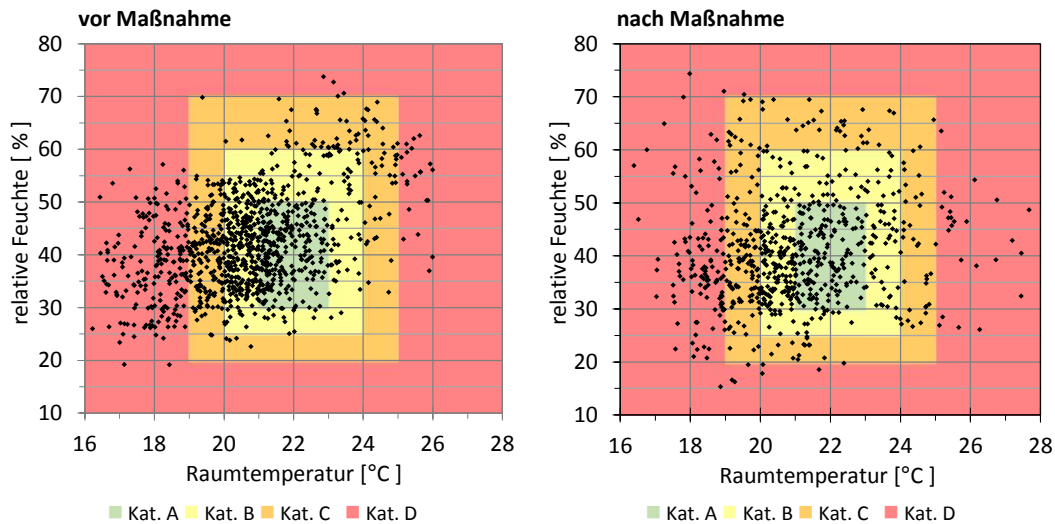
Die Auswertung zeigt, dass mit dem Einsatz der Lüftungsampel eine Veränderung eintrat. Sowohl im Sommer als auch im Winter konnte die Verteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Unterrichtszeit verbessert werden. Es traten deutlich weniger CO<sub>2</sub>-Konzentrationen oberhalb des Grenzwertes von 2.000 ppm (Kategorie D) auf.

Die Werteverteilung der Innen- gegenüber der Außentemperatur in der Unterrichtszeit im Nomogramm (Abb. 86) zeigt vor der Maßnahme eine Häufung der Messwerte in Kategorie A und B. Nach der Installation der Lüftungsampel ist die Streuung der Messwerte höher.



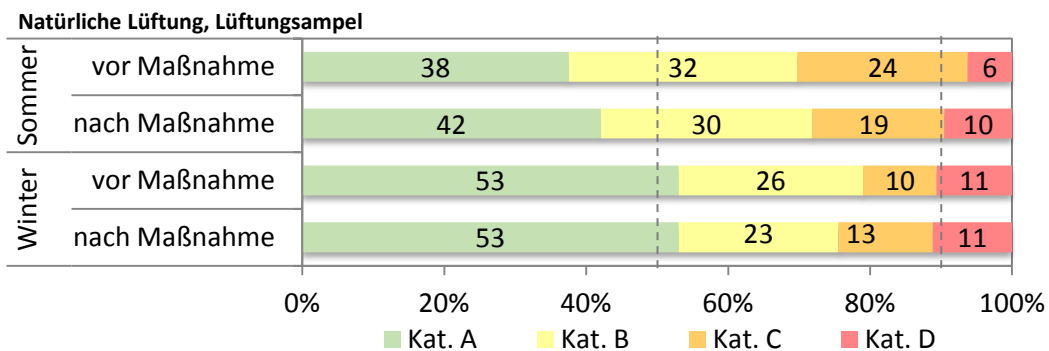
**Abb. 86 Innenraum- gegenüber Außentemperatur Unterrichtszeit SZ FL Raum 211**

Die Werteverteilung der Innentemperatur gegenüber der relativen Luftfeuchtigkeit in der Unterrichtszeit im Nomogramm (Abb. 87, Seite 94) zeigt, dass die Messwerte vor der Maßnahme überwiegend in Kategorie A und B lagen. Nach der Installation der Lüftungsampel wiesen die Messwerte zwar eine höhere Streuung auf, die Messwerte lagen jedoch weiterhin überwiegend im Bereich von Kategorie A und B.



**Abb. 87 Thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit SZ FL Raum 211**

Die Auswertung der prozentualen Verteilung der thermischen Behaglichkeit (Abb. 88) bestätigt, dass die gemessenen Werte vor der Maßnahme im Sommer in 42 % und im Winter in 47 % der Unterrichtszeit in Kategorie A lagen. Im Mittel lagen 20 % der Unterrichtszeit vor der Maßnahme in Kategorie D. Nach der Installation der Lüftungsampel traten aufgrund der vermehrten Öffnung der Fenster im Winter weniger häufig Einschränkungen der thermischen Behaglichkeit auf. Die Anzahl der Werte in Kategorie A konnte erhöht und die Anzahl in Kategorie D reduziert werden.



**Abb. 88 Verteilung Thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit SZ FL Raum 211**

Das Ergebnis für den Raum 211 zeigt, dass der Einsatz von Lüftungsampeln (Visualisierung der Raumluftqualität) ebenfalls bei höheren Klassenstufen dazu beiträgt die Raumluftqualität in einem guten Bereich zu halten. Das Nutzerempfinden wird geschärft. Jedoch müssen, wie auch bereits bei Raum 16 der Grundschule Hamburg-Harburg beschrieben, Einbußen in Bezug auf die thermische Behaglichkeit akzeptiert werden. Die Effizienz der Lüftungsampel im Langzeiteinsatz konnte in Raum 211 nicht überprüft werden, da mit Ende des dritten Schuljahres die Lüftungsampel und die Messtechnik deinstalliert wurden.

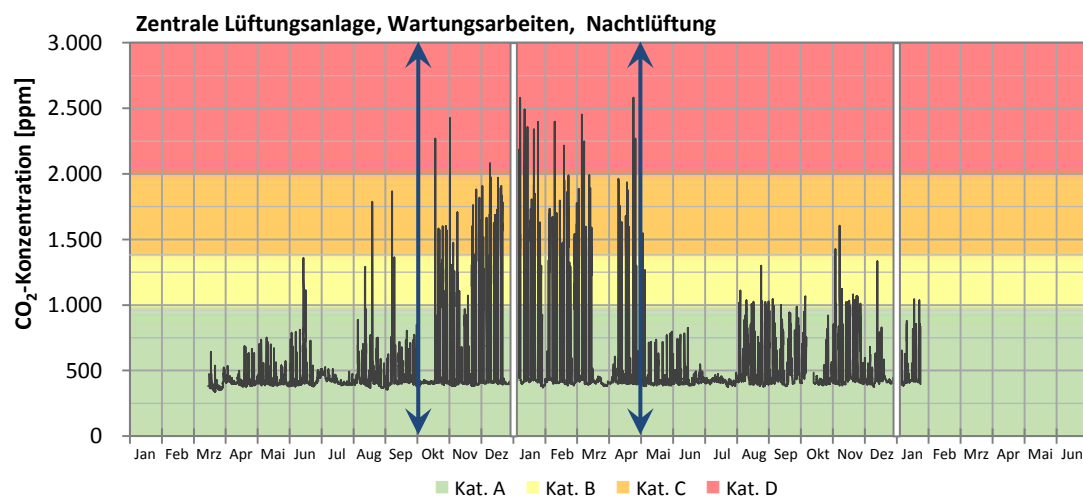
### 6.3.1.3 Schulzentrum Vorsfelde (SZ VF)

**Raum 31:** Mit der Installation der Messtechnik in Raum 31 des Schulzentrums Vorsfelde erfolgte eine Abfrage der Einstellungen der zentralen Lüftungsanlage. Die Anlage wurde zum Start der Messung tagsüber mit 100 % Leistung betrieben und nachts abgeschaltet. Die eingestellte Zulufttemperatur betrug 22 °C. In den Herbstferien des zweiten Schuljahres wurden Wartungsarbeiten an der Anlage ausgeführt und es kam zu technischen Problemen, sodass die Anlage nach den Ferien nicht wieder in Betrieb genommen wurde. Im Mai des zweiten Messjahres erfolgte die erneute Inbetriebnahme. Die Laufzeiten der Lüftungsanlage wurden angepasst, sodass ab April des zweiten Messjahres eine Nachtlüftung umgesetzt wurde. Die eingestellte Solltemperatur der Zuluft lag sowohl vor als auch nach der Umsetzung der Maßnahme bei 21 °C.

**Tabelle 56 Übersicht des Messzeitraumes SZ VF Raum 31**

1. Jahr										2. Jahr										3. Jahr									
Schuljahr 1 (Klassenstufe 4)					Schuljahr 2 (Klassenstufe 9)					Schuljahr 3 (Klassenstufe 9)																			
JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN
<b>Zentrale Lüftungsanlage, Wartungsarbeiten, Nachtlüftung</b>																													

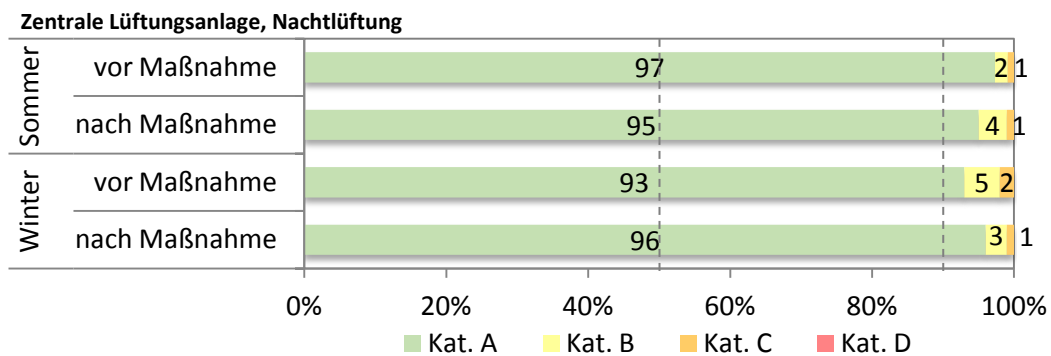
Abb. 89 zeigt die gesamten Messwerte der CO<sub>2</sub>-Konzentration für Raum 31. Die blauen Pfeile markieren den Zeitraum im dem die Lüftungsanlage außer Betrieb genommen und im Anschluss die Nachtlüftung umgesetzt wurde.



**Abb. 89 Messwerte CO<sub>2</sub>-Konzentration SZ VF Raum 31**

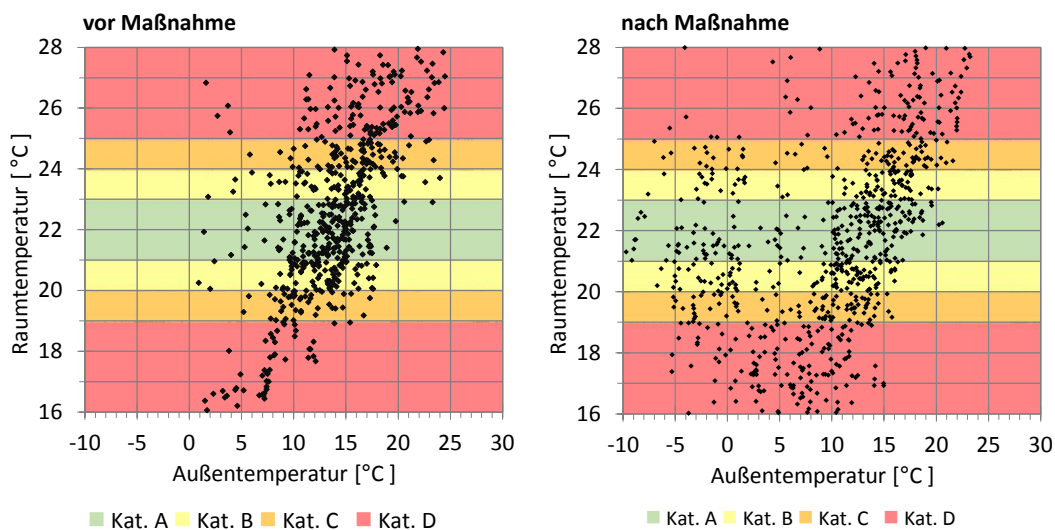
Die Auswertung zeigt, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration bis zur Abschaltung der Lüftungsanlage in insgesamt nur sehr geringe Ausschläge oberhalb von Kategorie A (< 1.000 ppm) aufwies, was auf eine ausreichende Belüftung des Raumes schließen lässt. Der Zeitraum der Abschaltung der Lüftungsanlage hatte eine deutlich negative Auswirkung auf die Raumluftqualität

in Raum 31. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration stieg auf Maximalwerte von bis zu 2.500 ppm. Dieser Zeitraum wurde jedoch für die prozentuale Auswertung nicht berücksichtigt, da für Raum 31 lediglich die Funktionalität der Lüftungsanlage bewertet werden soll. In der Auswertung werden der Zeitraum vor und der Zeitraum nach der Einführung der Nachtlüftung gegenüber gestellt. Die Auswertung der prozentualen Verteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration (Abb. 90) zeigt, dass bereits vor der Umsetzung der Nachtlüftung 97 % der Unterrichtszeit im Sommer und 93 % im Winter in Kategorie A (< 1.000 ppm) lagen. Mit der erneuten Inbetriebnahme und der Umsetzung der Nachtlüftung trat eine minimale Veränderung in der Verteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ein. Die Messwerte lagen weiterhin im Mittel in 95 % der Unterrichtszeit in Kategorie A (< 1.000 ppm). Wie zu erwarten, nahm die Nachtlüftung in Bezug auf die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Konzentration nur bedingt Einfluss.



**Abb. 90 Verteilung CO<sub>2</sub>-Konzentration Unterrichtszeit SZ VF Raum 31**

Die Werteverteilung der Innen- gegenüber der Außentemperatur in der Unterrichtszeit im Nomogramm (Abb. 91) zeigt eine Veränderung nach der Einführung der Nachtlüftung. Nach der Maßnahme lagen die Messwerte vermehrt in Kategorie A und B. Die Werte in Kategorie D (< 19 °C; > 25 °C) konnten reduziert werden.



**Abb. 91 Innenraum- gegenüber Außentemperatur Unterrichtszeit SZ VF Raum 31**

Die Werteverteilung der Innentemperatur gegenüber der relativen Luftfeuchtigkeit in der Unterrichtszeit im Nomogramm (Abb. 92) zeigt, dass mit der Umsetzung der Nachtlüftung keine Veränderung der thermischen Behaglichkeit erzielt werden konnte.

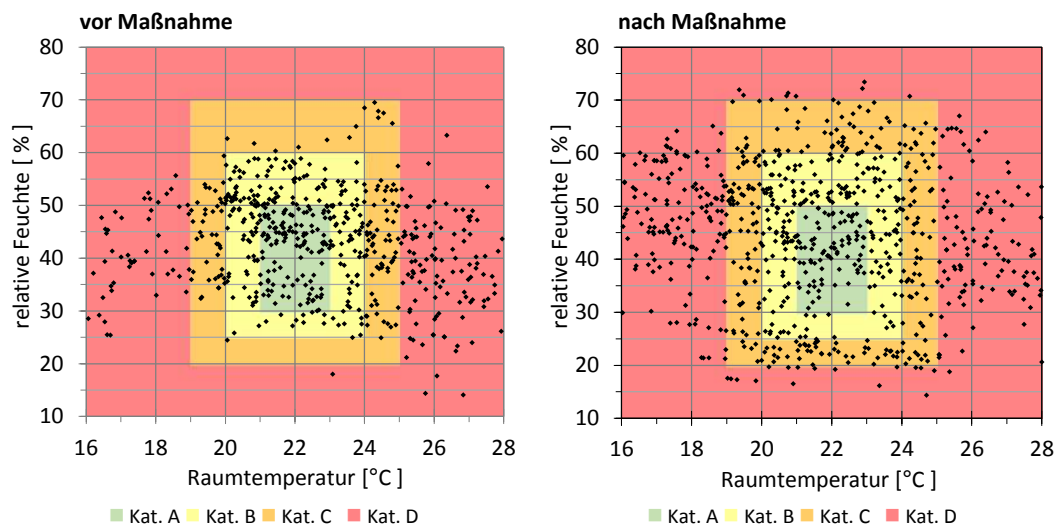


Abb. 92 Thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit SZ VF Raum 31

Die Auswertung der prozentualen Verteilung der thermischen Behaglichkeit (Abb. 93) bestätigt, dass die gemessenen Werte vor der Maßnahme im Sommer in 42 % und im Winter in 46 % der Unterrichtszeit in Kategorie A lagen. Der Prozentsatz in Kategorie D lag im Winter vor der Maßnahme bei 15 % und im Sommer bei 25 %. Diese Werte konnten mittels der Nachtlüftung auf 12 % im Sommer und 10 % im Winter reduziert werden.

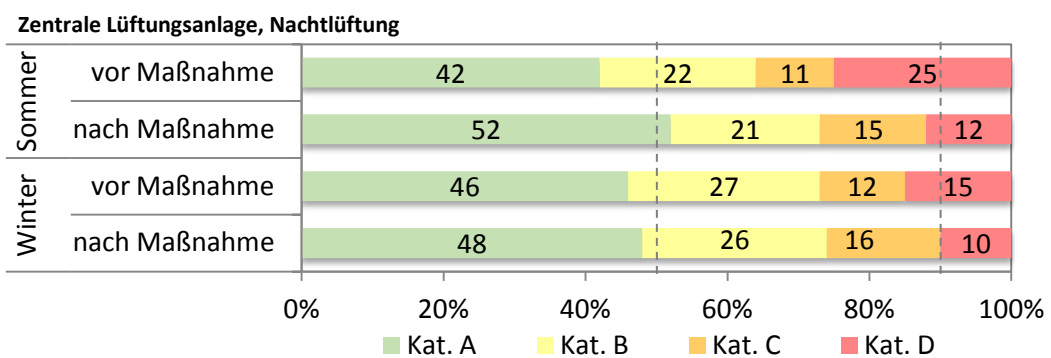
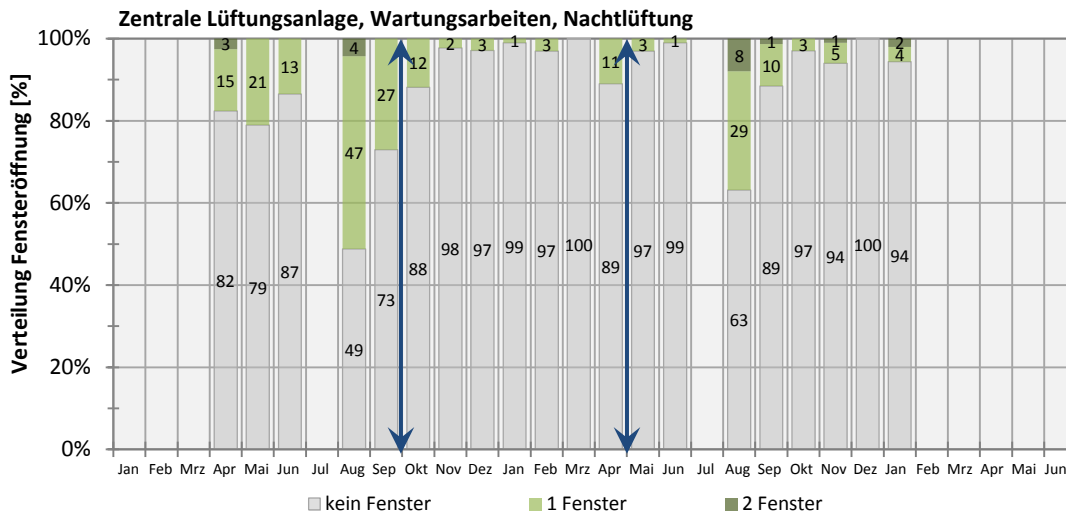


Abb. 93 Verteilung Thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit SZ VF Raum 31

Die Auswertung der prozentualen Verteilung der Fensteröffnungen (Abb. 94, Seite 98) zeigt, dass die Fensterflügel insgesamt in durchschnittlich 25 % der Unterrichtszeit geöffnet waren. Problematisch war die Entwicklung der Raumlufttemperatur, da aufgrund der Südausrichtung des Raumes mit einer hohen Sonneneinstrahlung bereits in den Übergangsmo- naten zum Teil 30 °C überschritten wurden.

Weder die Schüler noch die Lehrkräfte wurden von der Abschaltung der Lüftungsanlage in Kenntnis gesetzt. Das erklärt das unzureichende Lüftungsverhalten in der Zeit. In den Win-

termonaten wurden nur in durchschnittlich 4 % der Unterrichtszeit die Fensterflügel zum Lüften geöffnet. Auf Nachfrage gaben die Lehrkräfte an, eine Verschlechterung der Luft in der Heizperiode festgestellt zu haben. Die detaillierte Auswertung der Nutzerbefragungen wird in Kapitel 6.4.1.3 erläutert.



**Abb. 94** Verteilung Fensteröffnungen in der Unterrichtszeit SZ VF Raum 31

Das Ergebnis für den Raum 31 des Schulzentrums Vorsfelde zeigt, dass eine zentrale Lüftungsanlage die CO<sub>2</sub>-Konzentration in einem Klassenraum signifikant positiv beeinflusst. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration konnte im Raum 31 konstant in Kategorie A (< 1.000 ppm) gehalten werden. Eine Nachtlüftung hat eine positive Wirkung auf die thermische Behaglichkeit bei Klassenräumen mit Südorientierung. Die zentrale Lüftungsanlage wirkt in diesem Zusammenhang einer Überhitzung des Klassenraumes entgegen.

Wie bei dezentralen Lüftungsgeräten ist eine regelmäßige Kontrolle der Laufzeit und des Luftvolumenstroms bei zentralen Lüftungsanlagen in gleichem Maße erforderlich, um einen konstant positiven Einfluss auf das Raumklima sicherstellen zu können.

#### 6.3.1.4 Grundschule Braunschweig (GS BS)

**Raum 2.1:** Wie bereits in Kapitel 6.1.1.4 beschrieben, ist die Belegung geringer als bei den anderen Referenzräumen. Das verfügbare Raumvolumen weist mit knapp 10 m<sup>3</sup> pro Schüler im Vergleich den höchsten Wert der Referenzobjekte auf. Aufgrund dieses günstigen Verhältnisses wird mit einer positiven Wirkung auf die Raumluftqualität gerechnet.

Im März des dritten Jahres wurde ein Workshop zum Thema Klassenraumlüftung durchgeführt. In einem Feldversuch ermittelten die Schüler selbst, welches Lüftungsverhalten angemessen ist und wie sie es in der eigenen Klasse umsetzen konnten. Die Schüler erarbeiteten ein Lüftungskonzept, in dem die Fensterflügel und die Tür des Klassenraumes zur Querlüftung geöffnet werden sollten. Zusätzlich wurde ein „Lüftungsdienst“ für die Ausführung



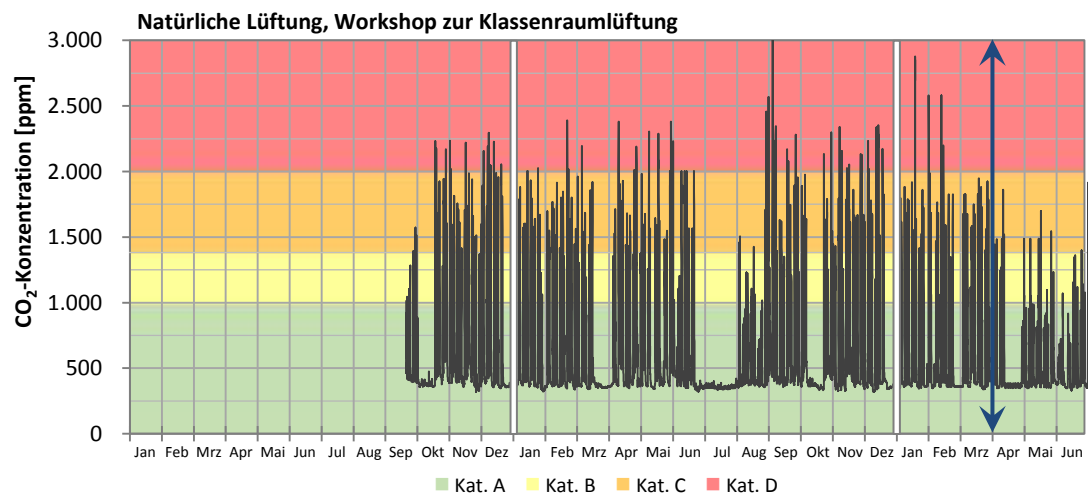
der Lüftung von den Schülern benannt.

Da der Workshop erst in der Nichtheizperiode umgesetzt wurde, konnte nur für die Nichtheizperiode ein Vergleich in der Auswertung der Häufigkeitsverteilung angestellt werden.

**Tabelle 57 Übersicht des Messzeitraumes GS BS Raum 2.1**

1. Jahr								2. Jahr								3. Jahr													
Keine Aufzeichnung								Schuljahr 2 (Klassenstufe 4)								Schuljahr 3 (Klassenstufe 4)													
JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN
<b>Natürliche Lüftung, Workshop zur Klassenraumlüftung</b>																													

Abb. 95 zeigt die gesamten Messwerte der CO<sub>2</sub>-Konzentration für Raum 2.1. Der blaue Pfeil markiert den Zeitpunkt des Workshops. Die Auswertung bestätigt die Erwartung, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration aufgrund der geringeren Belegung weniger stark ansteigt als in den anderen Referenzräumen. Die Werte der CO<sub>2</sub>-Konzentration stiegen insgesamt im Vergleich zu den anderen natürlich belüfteten Klassenräumen nicht so stark an.



**Abb. 95 Messwerte CO<sub>2</sub>-Konzentration GS BS Raum 2.1**

Auffällig ist, dass das Lüftungsverhalten scheinbar in den Sommermonaten nicht zunahm, da die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auch bei steigenden Außenlufttemperaturen nicht signifikant sanken. Das Öffnen der Fensterflügel ist in Räumen 2.1 nur über Drehflügel möglich, eine Kippstellung ist nicht vorgesehen. Das bedeutet, dass die Fenster beim Lüften automatisch weit geöffnet wurden. Die Rückfrage bei den Lehrkräften und Schülern bestätigte, dass die Fenster sowohl in der Unterrichtszeit als auch in den Pausen geöffnet wurden.

Die Auswertung der prozentualen Verteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration (Abb. 96, Seite 100) bestätigt, dass bereits vor der Durchführung des Workshops 67 % der Unterrichtszeit im Sommer und 51 % im Winter in Kategorie A (< 1.000 ppm) lagen. Die Maximalwerte der CO<sub>2</sub>-Konzentration überstiegen in der Unterrichtszeit vor dem Workshop nur in durch-

schnittlich 5 % den Grenzwert von Kategorie D (> 2.000 ppm). Nach dem Workshop konnte eine Verbesserung der Raumluftqualität erreicht werden. Im Mittel lagen 73 % der gemessenen Werte in der Unterrichtszeit in Kategorie A (< 1.000 ppm).

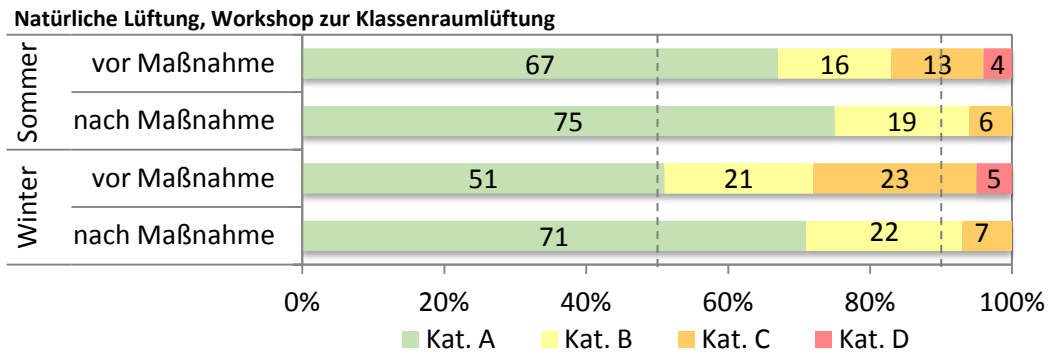


Abb. 96 Verteilung CO<sub>2</sub>-Konzentration Unterrichtszeit GS BS Raum 2.1

Aufgrund der späten Durchführung des Workshops im März des dritten Jahres, ist die Anzahl der Messwerte nach dem Workshop entsprechend gering (drei Monate). Die Werteverteilung der Innen- gegenüber der Außentemperatur in der Unterrichtszeit im Nomogramm (Abb. 97) macht die Verhältnismäßigkeit der Anzahl der Werte deutlich.

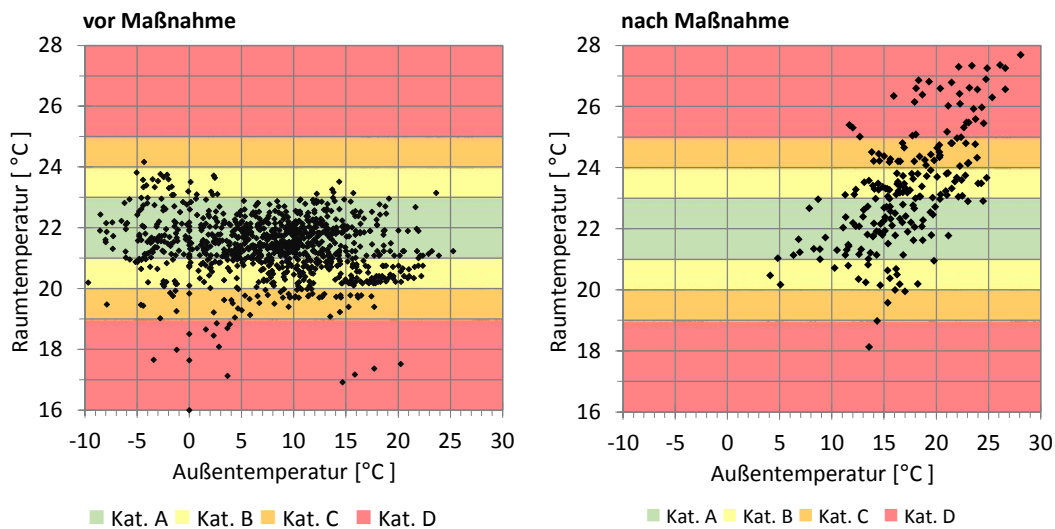


Abb. 97 Innenraum- gegenüber Außentemperatur Unterrichtszeit GS BS Raum 2.1

Trotz der geringen Anzahl der Messwert kann eine Aussage zur Entwicklung der Raumlufttemperatur für den Zeitraum nach dem Workshop getroffen werden. Aufgrund der vermehrten natürlichen Lüftung traten bei hohen Außentemperaturen ebenfalls höhere Raumlufttemperaturen auf.

Die Werteverteilung der Innentemperatur gegenüber der relativen Luftfeuchtigkeit in der Unterrichtszeit im Nomogramm (Abb. 98, Seite 101) zeigt, dass nach dem Workshop eine leicht negative Veränderung der thermischen Behaglichkeit eintrat.

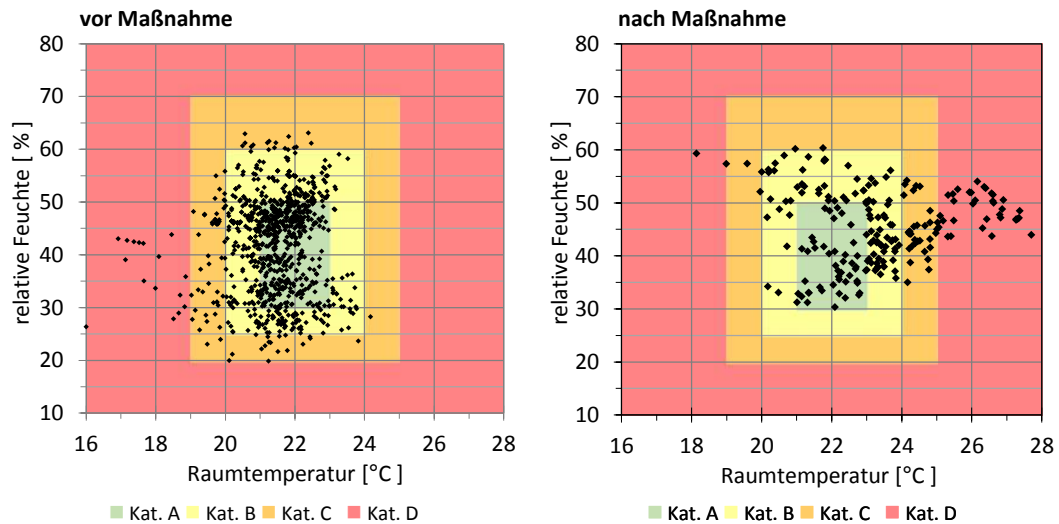


Abb. 98 Thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit GS BS Raum 2.1

Die Auswertung der prozentualen Verteilung der thermischen Behaglichkeit (Abb. 99) bestätigt, dass mit der Umsetzung des im Workshop ermittelten Lüftungsszenarios die Werte in Kategorie D im Sommer von 5 % auf 10 % und im Winter von 5 % auf 7% anstiegen. Die Werte in Kategorie A nahmen sowohl im Sommer als auch im Winter ebenfalls ab.

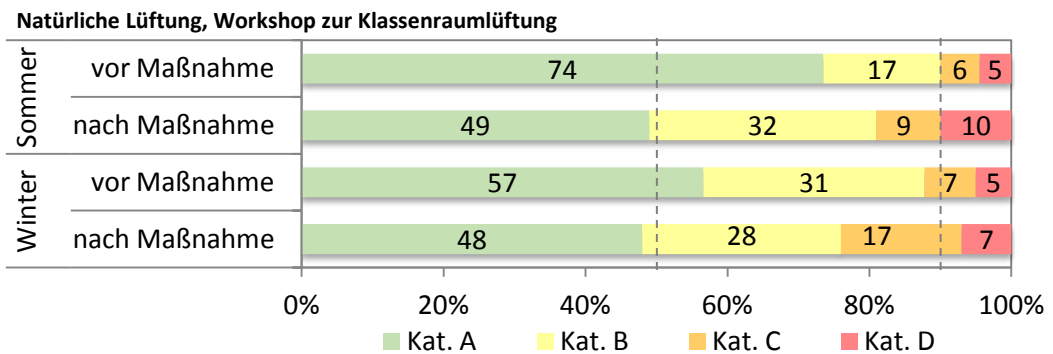


Abb. 99 Verteilung Thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit GS BS Raum 2.1

Das Ergebnis für den Raum 2.1 der Grundschule Braunschweig zeigt, dass die Umsetzung eines Workshops mit Einbezug der Schüler und der selbstständigen Erarbeitung von Lüftungskonzepten deutlich zu einer Verbesserung der Raumluftqualität beiträgt. Die Übertragung von Verantwortung auf die Nutzer führt, wie beim Einsatz einer Lüftungsampel, zu einer Sensibilisierung. Jedoch müssen, wie bereits für die anderen natürlich belüfteten Räume beschrieben, signifikante Einbußen in Bezug auf die thermische Behaglichkeit akzeptiert werden. Die langfristige Wirksamkeit des Workshops konnte nicht nachgewiesen werden, da die Aufzeichnung der Daten mit dem Ende des Schuljahres abschloss.

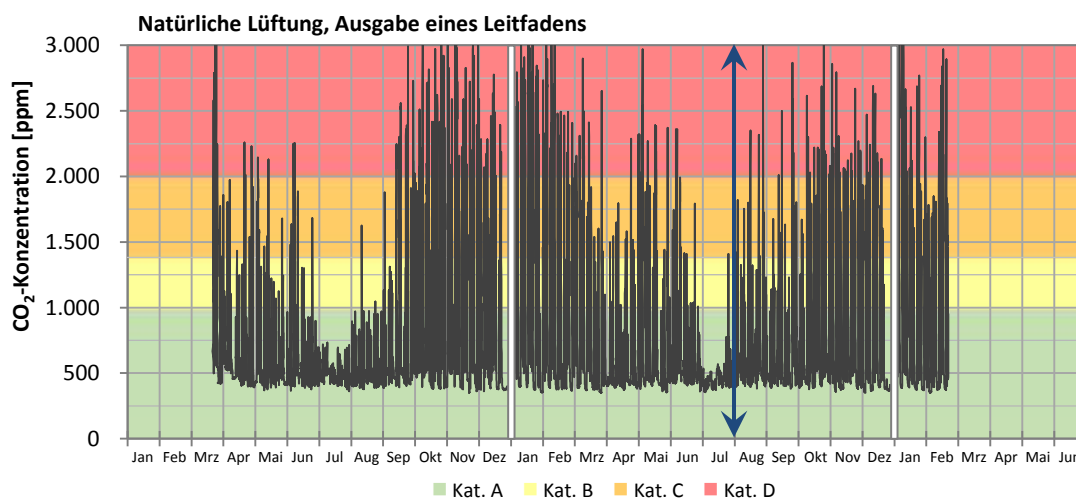
### 6.3.2 Die Kindertagesstätte Wolfsburg (Kita WOB)

Das erarbeitete Konzept für den Gruppenraum der Kindertagesstätte Wolfsburg bestand in der Ausgabe eines Leitfadens zur Lüftung an die Betreuer im Juli des zweiten Jahres. Der Leitfaden beinhaltete die ersten Messergebnisse zur Veranschaulichung der vorhandenen Problematik. Das Angebot für ein persönliches Gespräch und die Möglichkeit für Rückfragen wurden von den Betreuern nicht wahrgenommen.

**Tabelle 58 Übersicht des Messzeitraumes Kita WOB**

1. Jahr												2. Jahr												3. Jahr											
<i>Gruppenraum (Altersstufe 3 – 5 Jahre)</i>																																			
JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN						
<b>Natürliche Lüftung, Ausgabe eines Lüftungsleitfadens</b>																																			

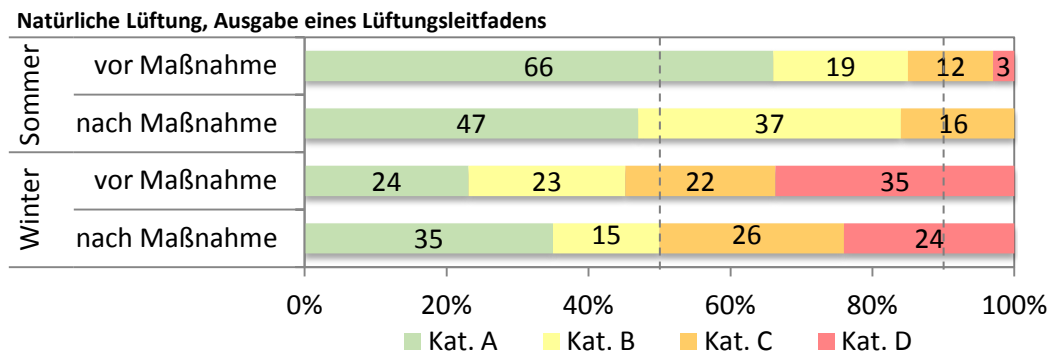
Abb. 100 zeigt die gesamten Messwerte der CO<sub>2</sub>-Konzentration für den untersuchten Gruppenraum. Der blaue Pfeil markiert den Zeitpunkt der Ausgabe des Leitfadens. Die Messwerte weisen hohe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen über den gesamten Verlauf der Messzeit auf. Im Winter stieg der gemessene Wert häufig auf über 2.000 ppm und erreichte sogar Spitzenwerte von bis zu 3.500 ppm. Um einen ausreichenden Luftwechsel sicherstellen zu können, müssten die Fenster und die Außentür regelmäßig mehrmals am Tag weit geöffnet werden. Ein ausreichender Luftaustausch konnte jedoch nur für die Sommermonate festgestellt werden. Mit steigenden Außenlufttemperaturen fand die Betreuung der Kinder zum Teil im Garten der Kindertagesstätte statt und die Außentüren der Räume blieben in dieser Zeit geöffnet.



**Abb. 100 Messwerte CO<sub>2</sub>-Konzentration Kita WOB**

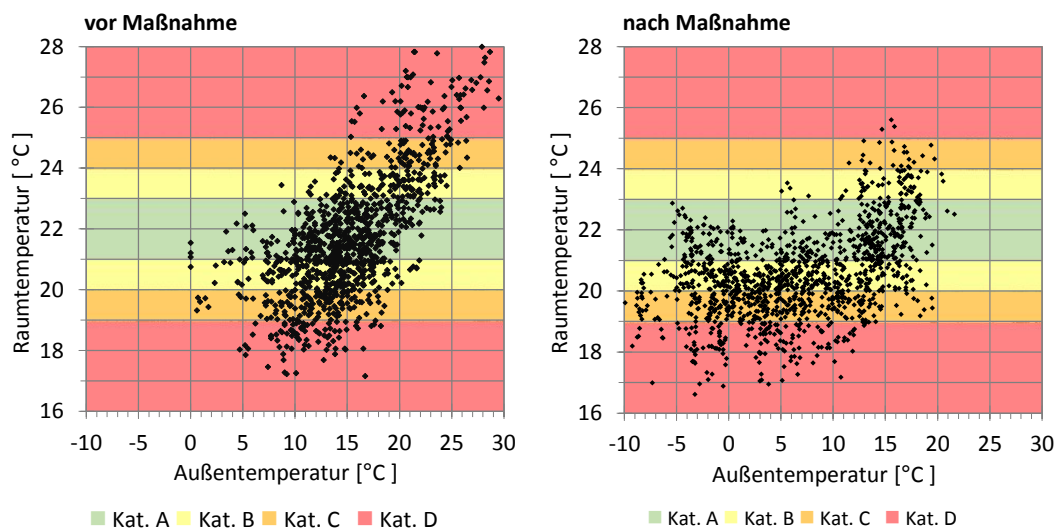
Die Messwerte zur CO<sub>2</sub>-Konzentration nach der Ausgabe des Leitfadens unterscheiden sich nicht signifikant von den Messwerten vor der Ausgabe des Leitfadens.

Die Auswertung der prozentualen Verteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Betreuungszeit (Abb. 101) zeigt insgesamt eine Verschlechterung der Werte im Winter. Allerdings konnten die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Kategorie D konnten sowohl im Sommer als auch im Winter reduziert werden. Schlussfolgernd wird vermutet, dass der Leitfaden keine signifikante Veränderung des Lüftungsverhaltens herbeiführen konnte.



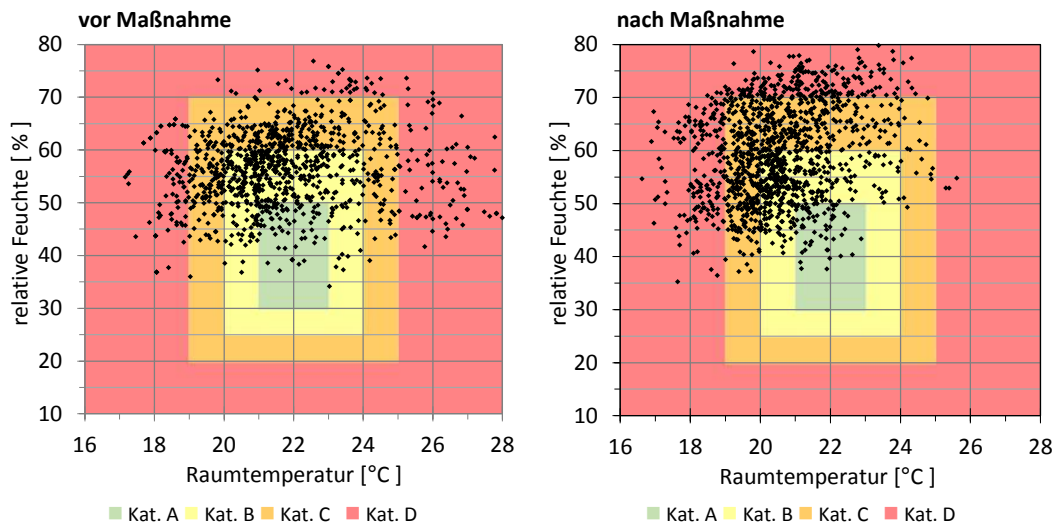
**Abb. 101 Verteilung CO<sub>2</sub>-Konzentration Betreuungszeit Kita WOB**

Die Auswertung der prozentualen Verteilung der Raumlufttemperaturen gegenüber der Außentemperatur (Abb. 102) zeigt, dass mit der Ausgabe des Leitfadens eine Veränderung stattfand. Die Raumlufttemperaturen lagen vor Ausgabe des Leitfadens mehrheitlich in Kategorie A und B. Nach der Ausgabe konnten hohe Raumlufttemperaturen bei hohen Außentemperaturen reduziert werden. Diese Entwicklung kann darauf zurückgeführt werden, dass die Kinder einen großen Teil des Tages im Garten verbrachten und damit die internen Wärmegewinne [88] reduziert wurden. Bei niedrigen Außentemperaturen nahmen die Raumlufttemperaturen nach der Ausgabe des Leitfadens ab. Es lag eine höhere Streuung der Messwerte mit einer Mehrheit in den Kategorien B und C vor.



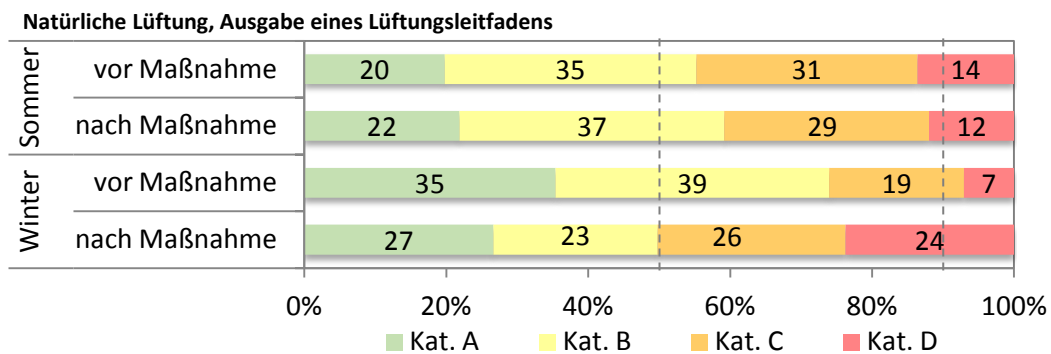
**Abb. 102 Innenraum- gegenüber Außentemperatur Betreuungszeit Kita WOB**

Die Auswertung der prozentualen Verteilung der Raumlufttemperaturen gegenüber der relativen Luftfeuchtigkeit (Abb. 103) zeigt, dass mit der Ausgabe des Leitfadens ebenfalls eine Veränderung der Werte zur thermischen Behaglichkeit stattfand. Vor der Ausgabe des Leitfadens lag eine höhere Streuung der Messwerte vor. Nach der Maßnahme lagen mehr Messwerte in Kategorie D als vorher.



**Abb. 103 Thermische Behaglichkeit Betreuungszeit Kita WOB**

Die Auswertung der prozentualen Verteilung der thermischen Behaglichkeit (Abb. 104) bestätigt diese Annahme. Die Auswertung zeigt, dass mit der Ausgabe des Leitfadens die Anteile der Messwerte in Kategorien D im Winter anstiegen. Für den Sommer ergab sich keine Veränderung.



**Abb. 104 Verteilung Thermische Behaglichkeit Betreuungszeit Kita WOB**

Das Ergebnis des Gruppenraumes in der Kindertagesstätte Wolfsburg zeigt, dass die Problematik in Bezug auf die Entwicklung der Raumluftqualität in gleichem Maße wie in Klassenzimmern von Schulen besteht. Die Kinder weisen zwar ein geringeres Lungenvolumen, jedoch einen erhöhten Aktivitätsgrad auf, was zu einem mit Schülern vergleichbaren CO<sub>2</sub>-Ausstoß pro Person führt [72]. In Anbetracht dessen, dass sich junge Kinder in Räumen bei einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1.400 ppm dauerhaft aufhalten, zeigt einen dringenden Hand-

lungsbedarf auf. Die Ausgabe des Lüftungsleitfadens führte trotz der Konfrontation der Nutzer mit den Messergebnissen weder zu der gewünschten Sensibilisierung noch zu einer selbstständigen Verbesserung des Lüftungsverhaltens.

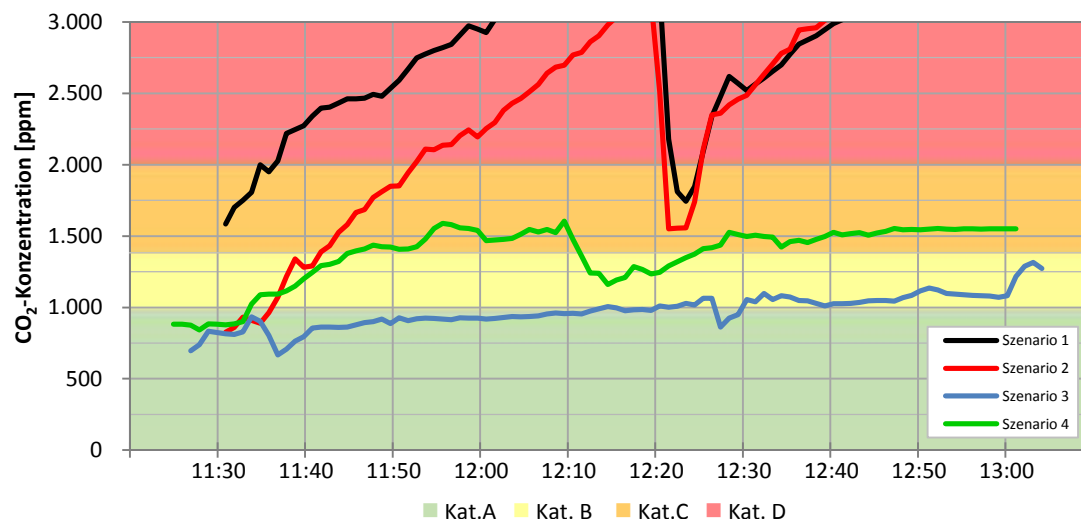
### 6.3.3 Die Universität Braunschweig (TU BS) - Einzelmessungen

**Hörsaal 11.3:** Die in Kapitel 6.2.3 beschriebenen Szenarien wurden zum Teil mehrfach durchgeführt. Die Außenlufttemperatur lag an den Messtagen zwischen 1°C und 3°C und die durchschnittliche Personenanzahl lag bei 165.

**Tabelle 59 Übersicht Aufzeichnung TU BS Hörsaal 11.3**

Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
183 Personen	179 Personen	143 Personen	155 Personen
Außentemperatur 3°C	Außentemperatur 2°C	Außentemperatur 1°C	Außentemperatur 2°C
Durchführungen: 1	Durchführungen: 4	Durchführungen: 1	Durchführungen: 3
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3 min Lüftungspause (Stoßlüftung) nach 45 min</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorablüftung 5 min</li> <li>• 3 min Lüftungspause (Stoßlüftung) nach 45 min</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einsatz Gebläse</li> <li>• 3 min Lüftungspause (Stoßlüftung) nach 45 min</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorablüftung 5 min</li> <li>• Permanent gekippte Fenster</li> <li>• 3 min Lüftungspause (Stoßlüftung) nach 45 min</li> </ul>

Abb. 105 zeigt die gesamten Messwerte der CO<sub>2</sub>-Konzentration für Hörsaal 11.3. Die Messergebnisse der jeweiligen Szenarien wurden für die Auswertungen gemittelt.<sup>x</sup>



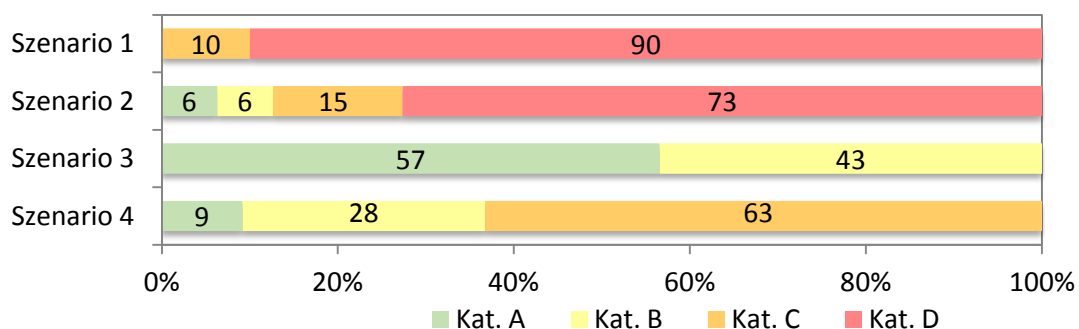
**Abb. 105 Messwerte CO<sub>2</sub>-Konzentration TU BS Hörsaal 11.3**

Die Szenarien 1 und 2 zeigen deutlich, wie schnell die CO<sub>2</sub>-Konzentration in einem Hörsaal ohne kontinuierliche Belüftung ansteigt. Bei der ersten Messung in Szenario 1 startete die Vorlesung bereits bei einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von über 1.400 ppm. Der Grund dafür lag in

<sup>x</sup> Die Einzelmessungen zu den Szenarien finden sich in Anhang 7.

der vorherigen Belegung des Raumes und einer unzureichenden Belüftung zwischen den Vorlesungen. Zur Vermeidung dieser schlechten Ausgangslage wurde im zweiten Szenario vor Beginn der Vorlesung gelüftet, dabei konnte die Konzentration der Raumluft auf unter 1.000 ppm reduziert werden. Im Verlauf der Vorlesung überstieg die CO<sub>2</sub>-Konzentration bereits nach 15 Minuten den Wert von 1.400 ppm und lag nach 45 Minuten oberhalb von 3.000 ppm. In der Lüftungspause zur Hälfte der Vorlesung nach 45 Minuten wurden die Fenster beidseitig erneut für eine Querlüftung weit geöffnet, wodurch der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft auf etwa 1.500 ppm reduziert werden konnte. Doch zum Ende der Vorlesung (Dauer 90 Minuten) bei Szenario 1 und 2 lag die CO<sub>2</sub>-Konzentration oberhalb von 3.500 ppm. Im dritten Szenario wurde ein Ventilator in eine der beiden Türen zum Flur eingebaut. Mit dem Ventilator wurde vor Beginn der Vorlesung und in der Lüftungspause ein Luftvolumenstrom von ca. 8.000 m<sup>3</sup>/h (12-facher Luftwechsel) erzeugt und die Innenraumluft aus dem Raum abgesaugt. Die Zuluft strömte über die gekippten Fenster von außen nach. So konnte zu Beginn der Vorlesung eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von 700 ppm erzielt werden. Während der Vorlesung wurde der Ventilator mit 2.000 m<sup>3</sup>/h (3-facher Luftwechsel) betrieben. Die Messwerte belegen, dass ein permanenter 3-facher Luftwechsel einen CO<sub>2</sub>-Gehalt in 57 % der Vorlesungszeit in Kategorie A sicherstellen kann. Die Messergebnisse des vierten Szenarios zeigen, dass eine Querlüftung über gekippte Fenster ebenfalls einen ausreichenden Luftaustausch gewährleistet. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration stieg im Vergleich zu Szenario 1 und 2 langsam an. Der Wert von 1.400 ppm (Kategorie C) wurde nach knapp 15 Minuten nach Vorlesungsbeginn überschritten. Der Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration verlief insgesamt langsamer und konnte insgesamt unterhalb von Kategorie D (> 2.000 ppm) gehalten werden.

Die Auswertung der prozentualen Verteilung (Abb. 106) bestätigt die negative Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in den Szenarien 1 und 2.

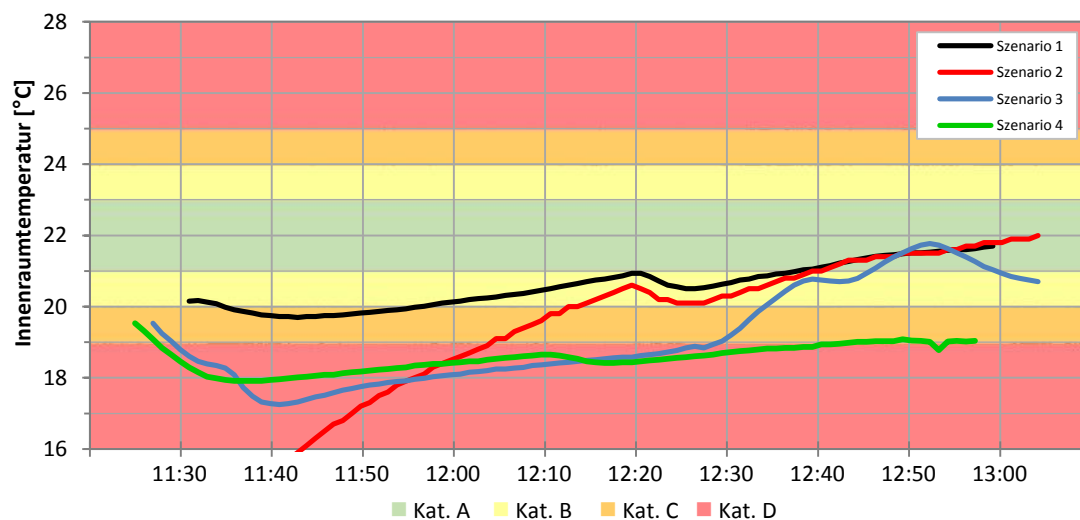


**Abb. 106** Verteilung CO<sub>2</sub>-Konzentration TU BS Hörsaal 11.3

Im ersten Szenario lagen 90 % und im zweiten Szenario 73 % der Messwerte in Kategorie D



(> 2.000). Die Auswertung von Szenario 3 bestätigt für 57 % der Vorlesungszeit einen CO<sub>2</sub>-Gehalt in Kategorie A (< 1.000 ppm). Die Auswertung für Szenario 4 zeigt, dass trotz des langsamen Anstiegs der CO<sub>2</sub>-Konzentration effektiv über 60 % der Vorlesungszeit in Kategorie C (>1.400 ppm) lagen. Abb. 107 zeigt die gesamten Messwerte der Raumlufttemperaturen für die vier Szenarien in Hörsaal 11.3. Es wird deutlich, dass die durchgeführten Szenarien zu sehr hohen Wärmeverlusten und dementsprechend kalten Raumlufttemperaturen führten. Im ersten Szenario sank die Raumlufttemperatur aufgrund der geschlossenen Fenster nicht so weit ab wie in den anderen Szenarien.

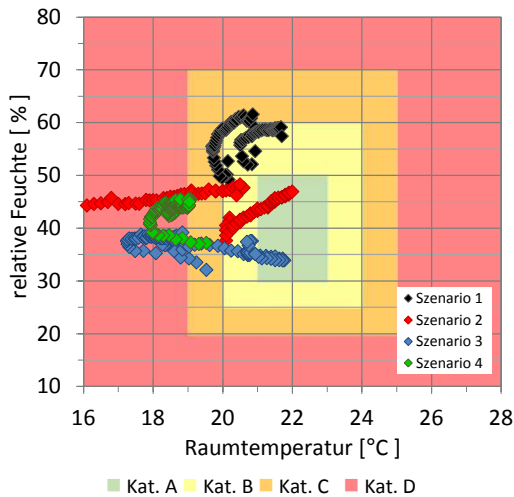


**Abb. 107 Messwerte Raumlufttemperatur TU BS Hörsaal 11.3**

Die Vorablüftung in Szenario 2 führte bei einer Außentemperatur von 2 °C zu einer Absenkung der Raumlufttemperatur von unter 16 °C zu Vorlesungsbeginn. Im Verlauf der Vorlesung stieg die Temperatur wieder auf über 22 °C. Die Vorablüftung führte zu einem so hohen Temperaturabfall, dass fast mehr als 30 % der Raumtemperaturen unterhalb von 19 °C lagen. So muss festgestellt werden, dass eine zu lange durchgeführte Vorablüftung zwar den CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft absenkt, aber auch die thermische Behaglichkeit stark einschränkt. Im dritten Szenario führte der Einsatz des Ventilators zu einer Temperatursenkung bis auf knapp 17 °C. Die Messwerte des vierten Szenarios zeigen, dass die Querlüftung über gekippte Fenster ebenfalls zu einer Absenkung der Raumlufttemperatur führte. Die gemessenen Raumlufttemperaturen in Szenario 3 zeigen ebenfalls, dass mit dem Einsatz des Ventilators mehr als 60 % der Vorlesungszeit in Kategorie D (< 19 °C) lagen. Die Dauerlüftung über gekippte Fenster in Szenario 4 führte zu den höchsten Komforteinbußen. Mehr als 80 % der gemessenen Werte lagen unterhalb von 19 °C (Kategorie D), was eine massive Einschränkung der thermischen Behaglichkeit bedeutet.

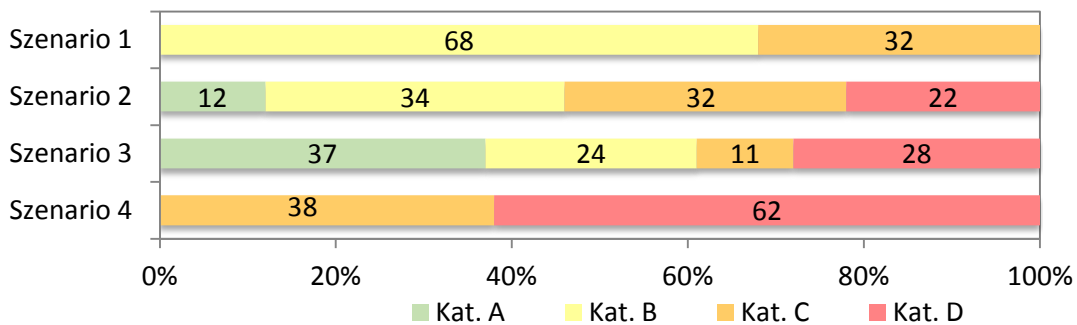
Die Werteverteilung der Innentemperatur gegenüber der relativen Luftfeuchtigkeit im No-

mogramm (Abb. 108) zeigt, dass die Messwerte in allen vier Szenarien zumeist in Kategorie C und D lagen. Szenario 3 weist hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit die besten Werte auf.



**Abb. 108 Thermische Behaglichkeit TU BS Hörsaal 11.3**

Die Auswertung der prozentualen Verteilung der Werte zur thermischen Behaglichkeit (Abb. 109) bestätigt, dass in Szenario 4 bei permanenter Kipplüftung über die Fenster mehr als 60 % der Vorlesungszeit in Kategorie D lagen. Nur in Szenario 3 konnten 37 % der gemessenen Werte die Anforderungen nach Kategorie A erfüllen.



**Abb. 109 Verteilung Thermische Behaglichkeit TU BS Hörsaal 11.3**

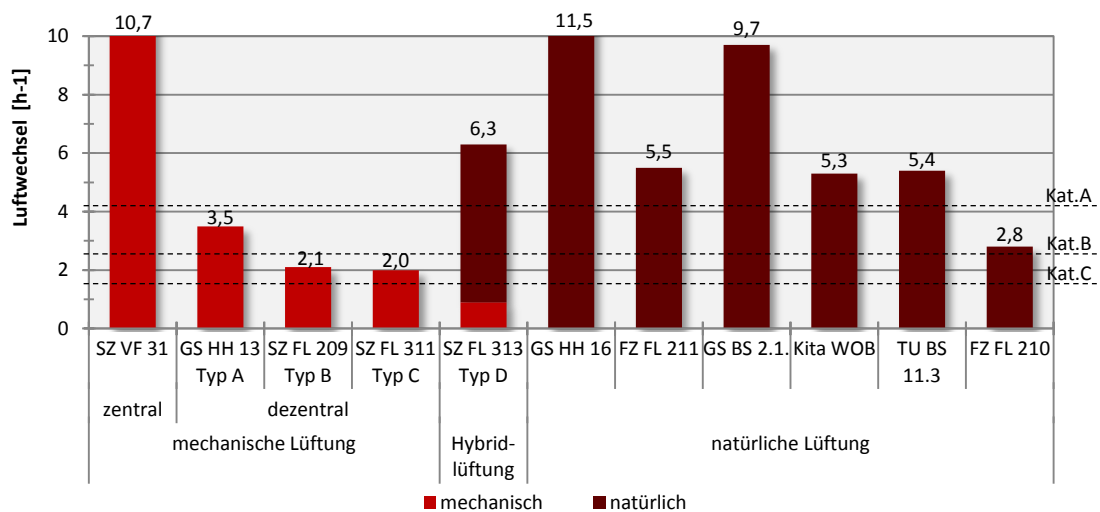
Die Ergebnisse der Feldstudien für den Hörsaal 11.3 zeigen, dass mittels mechanischer Unterstützung in Form eines Ventilators ein ausreichender Luftwechsel sichergestellt werden kann. Allerdings mussten bei dieser erzwungenen Lüftungsmethode starke Einbußen in Bezug auf die thermische Behaglichkeit akzeptiert werden. Die Lüftung über permanent gekippte Fenster kann als Maßnahme gegen eine Verschlechterung der Raumluftqualität zwar erwogen werden, da sie den hygienischen Mindestluftwechsel erfüllt. Sie geht jedoch besonders im Winter mit hohen Komfortbußen einher. Insgesamt wird eine natürliche Lüftung für den untersuchten Hörsaal als ungeeignet bewertet.

### 6.3.4 Gegenüberstellung der Ergebnisse der Referenzräume

#### 6.3.4.1 Luftwechsel

Wie bereits in Kapitel 2.2.5 beschrieben, ist zur dauerhaften Einhaltung des Grenzwertes von 1.000 ppm (Kategorie A) in einem beispielhaften Klassenraum (entsprechend der Beschreibung aus Kapitel 2.2.2) mit einem Raumvolumen von knapp 200 m<sup>3</sup> und 25 Personen ein 4,1-facher Luftwechsel notwendig. Das entspricht einem Luftvolumenstrom von etwa 33 m<sup>3</sup>/(h·Person). Zur Einhaltung des Grenzwertes von 1.400 ppm (Kategorie B) ist ein 2,5-facher Luftwechsel, entsprechend einem Luftvolumenstrom von 20 m<sup>3</sup>/(h·Person), erforderlich. Der obere Grenzwert von 2.000 ppm (Kategorie C) wird bei einem 1,5-fachen Luftwechsel (12 m<sup>3</sup>/(h·Person)) nicht überschritten.

Zur Gegenüberstellung und Vergleichbarkeit aller Referenzräume, sowohl mechanisch als auch natürlich belüftet, werden die maximal umsetzbaren Luftwechsel aus Kapitel 6.1 zusammengestellt (Abb. 110). Die Luftwechsel für die natürlich belüfteten Räume zeigen die berechnete Stoßlüftung im Sommerfall<sup>xI</sup> (sommerlicher Luftwechsel [26]).



**Abb. 110 Maximal umsetzbarer Luftwechsel Referenzräume**

Die Gegenüberstellung zeigt, dass in dieser Untersuchung ausschließlich die zentrale Lüftungsanlage einen 4,1-fachen Luftwechsel bereitstellen kann. Das Lüftungsgerät Typ A (GS HH, Raum 13) liegt mit einem bereitgestellten 3,5-fachen Luftwechsel knapp darunter.

Die Lüftungsgeräte Typ B (SZ FL, Raum 209) und Typ C (SZ FL, Raum 311) können einen 2-fachen Luftwechsel bereitstellen, was in der Simulation (Kapitel 2.2.5) für zur Einhaltung des Grenzwertes von 2.000 ppm (Kategorie C) ausreicht. Die Einhaltung des Grenzwertes für Kategorie B kann für die Geräte Typ B und Typ C nicht sichergestellt werden.

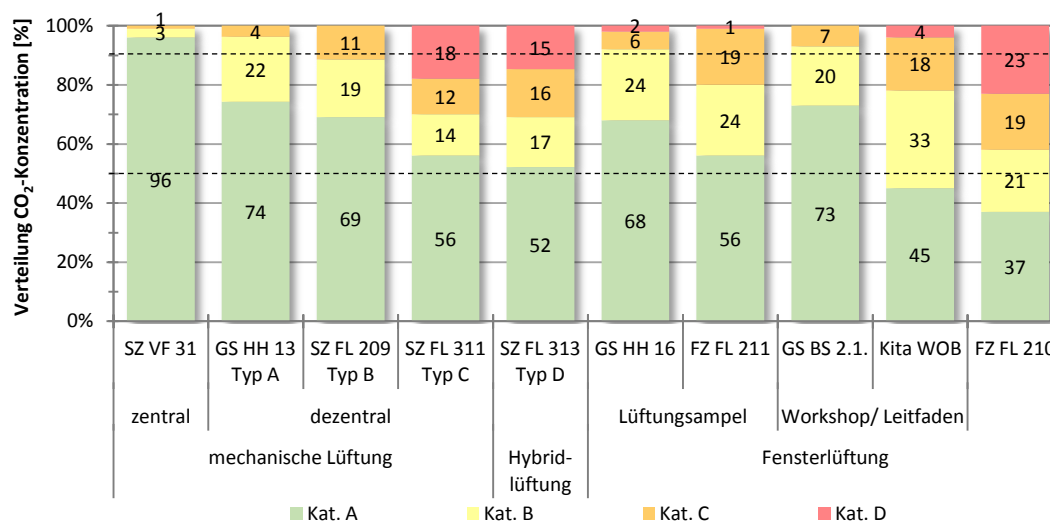
<sup>xI</sup> Die Berechnungen zum Luftwechsel bei natürlicher Lüftung finden sich in Anhang 4.

Für die natürlich belüfteten Räume werden vergleichsweise hohe Luftwechsel erzielt, da die Berechnung den Optimalfall abbildet. Der Berechnung nach kann in den natürlich belüfteten Räumen der erforderliche Luftwechsel zur Einhaltung der Werte entsprechend Kategorie A erzeugt werden. Lediglich ein Raum (SZ FL, Raum 210) weist zu wenig Fensterfläche für die Umsetzung eines angemessenen Luftwechsels auf. In der Praxis werden die berechneten Luftwechsel in der Regel nicht erreicht. Die Ergebnisse für Raum 16 (GS HH) und Raum 2.1 (GS BS) belegen, dass bei natürlicher Lüftung vergleichbare Ergebnisse hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Konzentration zu mechanisch belüfteten Räumen erzielt werden können.

**Wie zu Beginn von Kapitel 6.3 beschrieben, wird eine Einhaltung der Kategorie A in mindestens 50 % der Unterrichtszeit sowohl für die CO<sub>2</sub>-Konzentration als auch für die thermische Behaglichkeit für die Referenzräume gefordert. Zudem sollten in maximal 10 % der Unterrichtszeit die Anforderungen für Kategorie D überschritten werden. Diese Anforderungen entsprechen einem 3,5-fachen Luftwechsel und bei dem angesetzten Beispielklassenraum einem Luftvolumenstrom von 28 m<sup>3</sup>/(h·Person).**

#### 6.3.4.2 CO<sub>2</sub>-Konzentration (Raumluftqualität)

Abb. 111 zeigt die Ergebnisse zur Summenhäufigkeit der CO<sub>2</sub>-Konzentration aller Referenzräume im Vergleich. Dabei wurden die Messdaten nach den umgesetzten Maßnahmen für die Gegenüberstellung genutzt und die Sommer- und Winterergebnisse zusammengeführt.



**Abb. 111 Verteilung CO<sub>2</sub>-Konzentration Referenzräume**

Die Auswertung zeigt, dass nach den umgesetzten Maßnahmen annähernd alle Räume die Anforderungen nach Kategorie A in 50 % der Unterrichtszeit sicherstellen konnten.

Die zentrale Lüftungsanlage (SZ VF, Raum 31) konnte in nahezu 100 % der Unterrichtszeit eine Raumluftqualität in Kategorie A bereitstellen. Das dezentrale Lüftungsgerät Typ A (GS HH, Raum 13) erfüllte die Anforderungen ebenfalls in 74 % der Unterrichtszeit. Die Auswertung

tung für das dezentralen Lüftungsgeräte Typ B (SZ FL, Raum 209) weist akzeptable Werte auf. Es wurden keine Messwerte in Kategorie D aufgezeichnet, so dass die Funktionsweise der zentralen Anlage und der dezentralen Geräte Typ A und Typ B hinsichtlich der Raumluftqualität positiv zu bewerten sind.

Das Ergebnis für Raum 311 (SZ FL) mit dem Lüftungsgerät Typ C unterscheidet sich nicht signifikant von dem hybrid belüfteten Raum 313 (SZ FL) mit dem Lüftungsgerät Typ D. In beiden Räumen konnte die geforderte Luftqualität in Kategorie A eingehalten werden, doch in beiden Räumen kam es in mehr als 10 % der Zeit zu einer Überschreitung des Grenzwertes für Kategorie D. Die Funktionsweise der dezentralen Lüftungsgeräte Typ C und Typ D ist für den Einsatz in Schulen hinsichtlich der Raumluftqualität damit negativ zu bewerten.

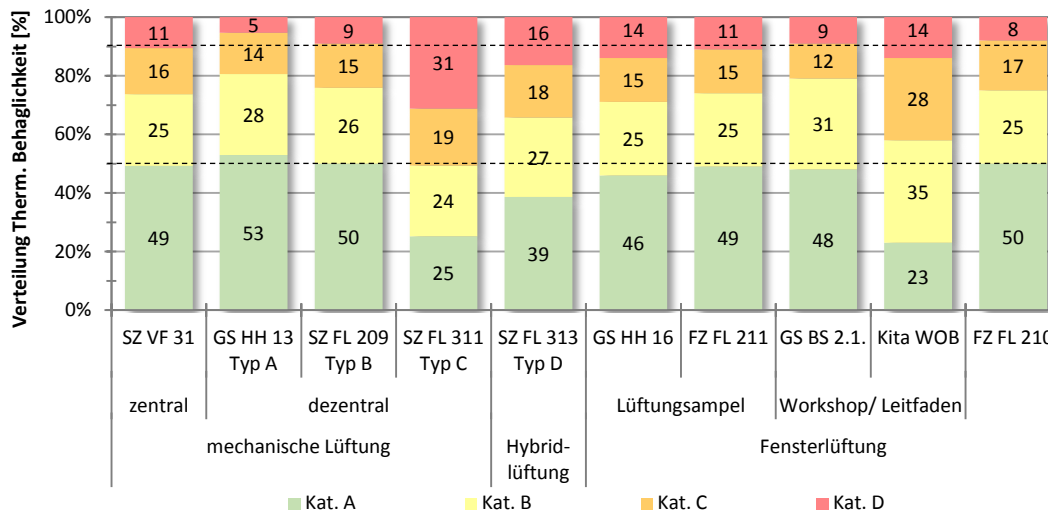
Die natürlich belüfteten Räume 16 (GS HH) und 2.1 (GS BS) weisen vergleichbar gute Werteverteilungen auf. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration konnte in diesen Räumen in mehr als 50 % der Unterrichtszeit in Kategorie A gehalten werden. Auch in Raum 211 (SZ FL) lagen nach der Installation der Lüftungsampel 56 % der Unterrichtszeit in Kategorie A. Es wurden nur vereinzelt Werte in Kategorie D aufgezeichnet. Dieses Ergebnis zeigt, dass der Einsatz der Lüftungsampel und die Umsetzung eines Workshops positiv zu bewerten sind.

Die Ergebnisse des Gruppenraumes (Kita WOB) und des Raumes 210 (SZ FL) zeigen die bereits mehrfach bewiesene Problematik der schlechten Luftqualität in natürlich belüfteten Räumen (siehe Kapitel 2.7.3) erneut auf. In beiden Räumen wird die Forderung zur Einhaltung von 50 % in Kategorie A nicht erfüllt. Im Gruppenraum lagen 45 % der Betreuungszeit und in Raum 210 nur 37 % der Unterrichtszeit in Kategorie A. In Raum 210 lagen darüber hinaus 23 % der gemessenen Werte in Kategorie D.

**Das Ergebnis zeigt insgesamt, dass bei der Auslegung von mechanischen Lüftungsgeräten und Lüftungsanlagen die Bereitstellung eines 3,5-fachen Mindestluftwechsels zur Einhaltung einer der Lernqualität angemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentration angestrebt werden sollte. Die Messwerte belegen eine Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Konzentration mit durchschnittlich 75 % der Unterrichtszeit in Kategorie A (< 1.000 ppm) und keine Überschreitung des Grenzwertes zu Kategorie D (> 2.000 ppm). Für natürlich belüftete Räume ist es notwendig, die Nutzer regelmäßig und wiederholt mittels Visualisierung der Luftqualität (Lüftungsampel) oder der Umsetzung von Workshops und aktiver Teilnahme an der Entwicklung von Lüftungskonzepten für die Thematik zu sensibilisieren. Die Messwerte belegen für die natürliche Lüftung eine CO<sub>2</sub>-Konzentration mit durchschnittlich 66 % der Unterrichtszeit in Kategorie A (< 1.000 ppm) und vereinzelte Überschreitung des Grenzwertes zu Kategorie D (> 2.000 ppm).**

### 6.3.4.3 Thermische Behaglichkeit

Abb. 112 zeigt die Ergebnisse zur Summenhäufigkeit der thermischen Behaglichkeit aller Referenzräume im Vergleich. Zur Berechnung wurden ebenfalls die Messdaten nach den umgesetzten Maßnahmen genutzt und die Sommer- und Winterergebnisse zusammengeführt.



**Abb. 112** Verteilung thermische Behaglichkeit Referenzräume

Die Auswertung zeigt, dass die Räume 31 (SZ VF), 13 (GS HH) und 209 (SZ FL) auch in Bezug auf die thermische Behaglichkeit eine ähnliche Verteilung der Messwerte aufweisen. Die zentrale Lüftungsanlage (SZ VF Raum 31) konnte in knapp 50 % der Unterrichtszeit eine thermische Behaglichkeit in Kategorie A bereitstellen. Die gemessenen Werte in Kategorie D lagen überwiegend im Bereich  $> 26$  °C und sind der Südausrichtung des Klassenraumes geschuldet. Mit der Umsetzung der Nachtlüftung konnten diese Werte erfolgreich auf knapp 11 % reduziert werden. Die dezentralen Lüftungsgeräte Typ A (Raum 13, GS HH) und Typ B (SZ FL, Raum 209) erfüllten die Anforderungen Kategorie D lagen in weniger als 10 % in Kategorie D. Somit werden sowohl die zentrale Lüftungsanlage als auch die dezentralen Lüftungsgeräte Typ A und Typ B hinsichtlich der Bereitstellung einer angemessenen thermischen Behaglichkeit positiv bewertet.

In Raum 311 (SZ FL) mit dem Lüftungsgerät Typ C werden in nur 25 % der Unterrichtszeit Werte in Kategorie A erreicht und erfüllt damit nicht die Forderungen. Zudem liegen 31 % der gemessenen Werte in Kategorie D. Die Funktionsweise des dezentralen Lüftungsgeräte Typ C ist in diesem Kontext negativ zu bewerten.

Der hybrid belüftete Raum 313 (SZ FL) mit dem Lüftungsgerät Typ D weist bessere Werte als Raum 311 auf, wenn gleich die Forderungen auch bei diesem Raum nicht eingehalten werden. Nur in 39 % der Unterrichtszeit lagen die Werte der thermischen Behaglichkeit in

Kategorie A und in 16 % in Kategorie D. Diese Werte sind nicht akzeptabel. Damit ist die Funktionsweise des dezentralen Lüftungsgeräte Typ D als Lüftungsunterstützung insgesamt negativ zu bewerten.

In den natürlich belüfteten Räumen 16 (GS HH), 211 (SZ FL), 2.1 (GS BS) und 210 (SZ FL) konnten die Forderungen an die thermische Behaglichkeit nahezu eingehalten werden. Bei diesen Räumen lagen die gemessenen Werte in knapp 50 % der Unterrichtszeit in Kategorie A und in maximal 14 % in Kategorie D. Diese Werte sind insgesamt akzeptabel, da die Personen in natürlich belüfteten Räumen eher bereit sind Einbußen in der thermischen Behaglichkeit zu akzeptieren als Personen in mechanisch belüfteten Räumen [89].

Der Gruppenraum (Kita WOB) weist ein ähnliches Ergebnis wie Raum 311 (SZ FL) auf. Die Summenhäufigkeit der Messwerte in Kategorie D ist im direkten Vergleich mit 14 % zwar geringer, für Kategorie A wurden die Messwerte jedoch ebenfalls nur in 23 % der Betriebszeit erfüllt. Dieses Ergebnis ist als inakzeptabel zu werten.

**Das Ergebnis zeigt insgesamt, dass mechanische Lüftungsgeräte und Lüftungsanlagen eine angemessene thermische Behaglichkeit bei konstant guter Raumlufqualität entsprechend den vorab definierten Forderungen bereitstellen können. Bei der Auslegung der mechanischen Systeme sollte ein 3,5-facher Luftwechsel angestrebt werden. Für natürlich belüftete Räume müssen bei vergleichbaren Messwerten der CO<sub>2</sub>-Konzentration Einschränkungen hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit akzeptiert werden.**

## 6.4 Auswertung der Nutzerbefragung zur Luftqualität

Es erfolgten Nutzerbefragungen zum subjektiven Beurteilung. Je nach Konzept wurden vor und nach der Maßnahme oder nur vorab Befragungen durchgeführt. Die ausgegebenen Fragebögen<sup>xii</sup> unterscheiden sich in der Fragestellung nach Klassenstufe und Belüftungsart. Die folgenden Themen wurden abgefragt:

- Einschätzung der Raumlufttemperatur
- Einschätzung der Raumluftqualität
- Verschlechterung der Raumluftqualität über den Tag
- Lüftungsverhalten (Art und Regelmäßigkeit)
- Zweckmäßigkeit des Lüftungsgerätes (sofern vorhanden)
- Geräuschpegel des Lüftungsgerätes (sofern vorhanden)
- Wohlbefinden
- Leistungsfähigkeit

Abgefragt wurden zudem die Einschätzung umsetzbarer Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität, das Verantwortungsbewusstsein und die Motivation zur natürlichen Lüftung.

### 6.4.1 Die Schulen

#### 6.4.1.1 Grundschule Hamburg-Harburg (GS HH)

Die Nutzerbefragung beschränkte sich auf eine Ausgabe der Fragebögen an die Schüler vor der Maßnahmenumsetzung im ersten Messjahr. Die Klassenlehrerinnen wurden kurz zu ihren persönlichen Einschätzungen befragt. Insgesamt wurden 49 Schüler und Schülerinnen der vierten Klassenstufe befragt.

Abb. 113 (seite 115) zeigt, dass mehr als die Hälfte der befragten Kinder in beiden Räumen die Raumlufttemperatur als „kalt“ bewerteten. Von den Lehrkräften wurde jedoch angegeben, dass die Räume im Sommer bei häufiger Fensterlüftung zur Überhitzung neigen.

Die Kinder beurteilten in beiden Räumen die Raumluftqualität insgesamt „eher schlecht“ (Abb. 114, Seite 115). Für Raum 16 ist diese Einschätzung korrekt. Die subjektive Wahrnehmung für Raum 13 unterscheidet sich dagegen stark von den tatsächlich vorhandenen Verhältnissen.

Auf die Frage nach einer spürbaren Verschlechterung der Raumluftqualität im Laufe eines Unterrichtstages antworteten die Schüler sehr unsicher.

---

<sup>xii</sup> Die Fragebögen finden sich in Anhang 11.



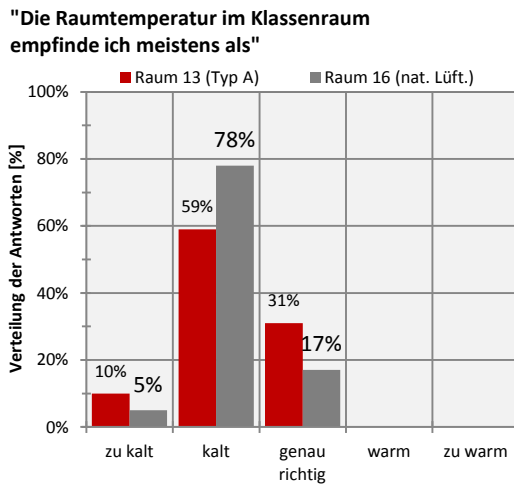


Abb. 113 Befragung Temperatur GS HH

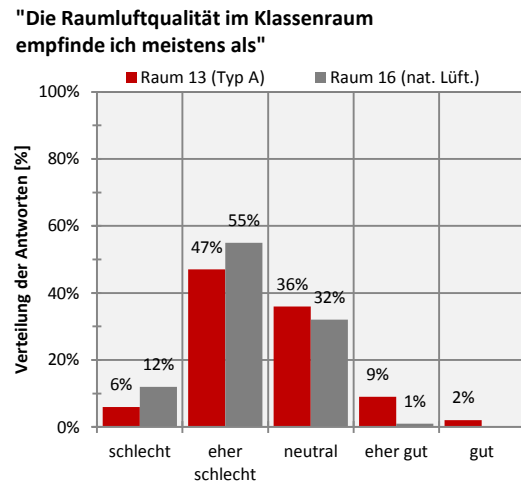


Abb. 114 Befragung Luftqualität 1 GS HH

Abb. 115 zeigt, dass eine eindeutig Mehrheit erkennbar ist, doch diese bezieht sich auf die unentschlossene Antwort „teils-teils“.

Die subjektive Einschätzung zur natürlichen Lüftung entspricht nicht dem tatsächlichen Lüftungsverhalten (Abb. 116). Die Befragung wurde vor der Umsetzung der Maßnahme durchgeführt. Die Auswertung der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Unterricht in Kapitel 6.3.1.1 zeigte, dass im ersten Messjahr keine regelmäßige Fensterlüftung praktiziert wurde. Im Interview gab die Lehrkraft an, dass tatsächlich erst mit der Installation der Lüftungsampel ein bewusstes Lüften umgesetzt wurde. Weiterhin konnte die Lehrerin weder vor noch nach der Maßnahme Einbußen in Bezug auf die thermische Behaglichkeit oder den Störgeräuschpegel feststellen.

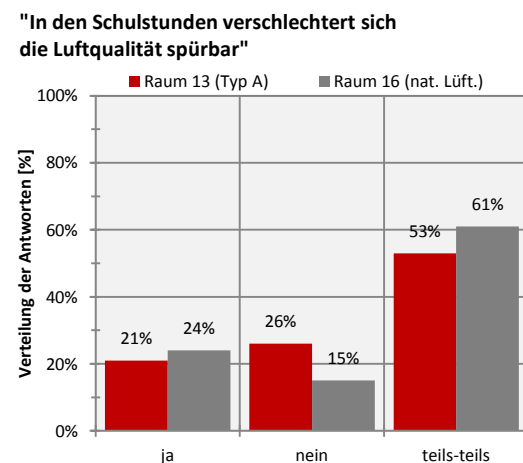


Abb. 115 Befragung Luftqualität 2 GS HH

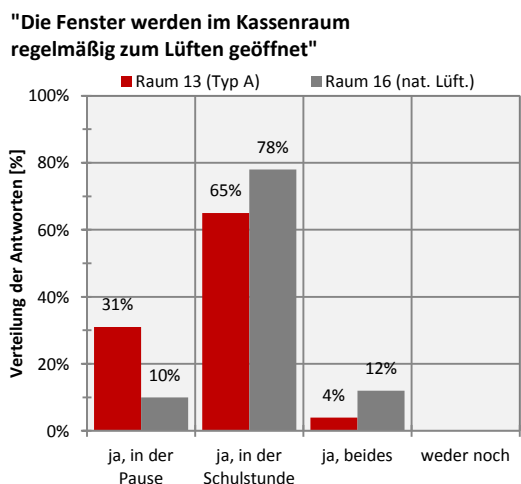


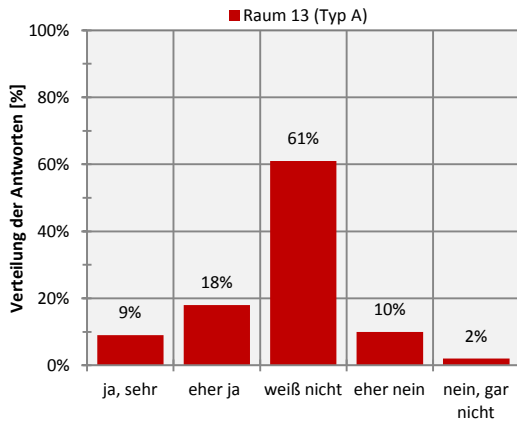
Abb. 116 Befragung Lüftungsverhalten GS HH

Die Schüler äußerten sich unsicher in Bezug auf die Wirksamkeit des Lüftungsgerätes Typ A (Abb. 117, Seite116). 61 % der befragten Schüler gaben an nicht zu wissen ob das Gerät zur Verbesserung der Raumluftqualität beitrage. Nur 27 % der Kinder beurteilten das Gerät positiv in seiner Wirkung. Diese Aussage widerspricht der Einschätzung zur Raumluftquali-

tät.

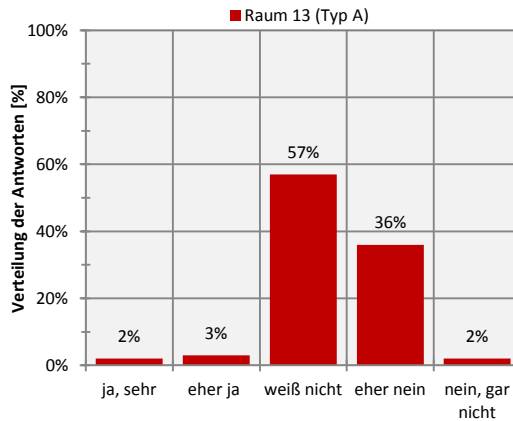
In Bezug auf den Störgeräuschpegel des Lüftungsgerätes Typ A waren die Schüler 13 unentschlossen (Abb. 118). 57 % der Schüler antworteten nicht zu wissen ob das Lüftungsgerät Typ A einen störenden Schalldruckpegel besitzt. 38 % beurteilten den Schalldruckpegel des Lüftungsgerätes Typ A als nicht störend. Eine ausführliche Auswertung zur Störgeräuschpegelmission des Lüftungsgerätes Typ A wird in Kapitel 6.5.2.1 durchgeführt.

**"Das Lüftungsgerät im Klassenraum erfüllt seinen Zweck"**



**Abb. 117 Befragung mech. Lüftung GS HH**

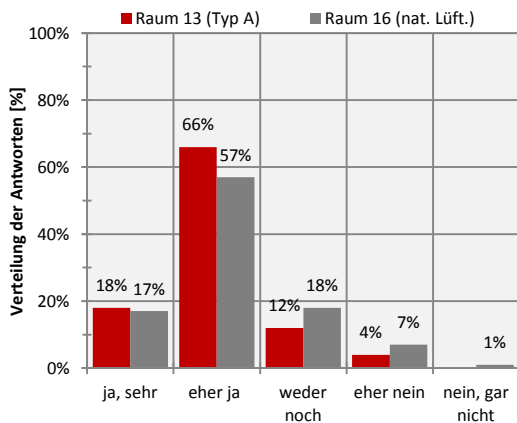
**"Ich empfinde den Geräuschpegel des Lüftungsgerätes als störend"**



**Abb. 118 Befragung Geräuschpegel GS HH**

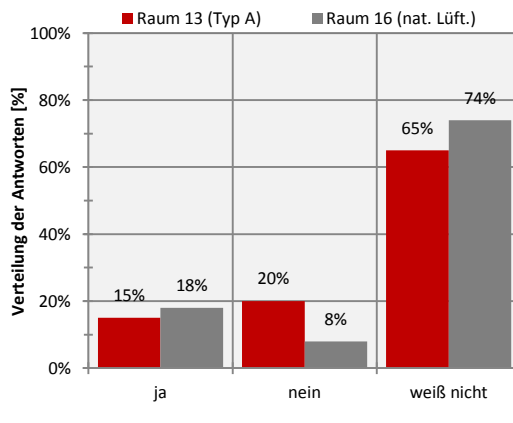
Die Nutzerbefragungen in Bezug auf das Wohlbefinden zeigt, dass die Schüler sich der zum Teil schlechten, „verbrauchten“ Klassenraumluft nicht bewusst sind, da sowohl die Kinder in Raum 13 als auch die Kinder in Raum 16 angeben, sich wohl zu fühlen (Abb. 119). Lediglich 8 % der Schüler in Raum 16 beantworteten die Fragestellung negativ. In Bezug auf die Einschätzung der eigenen Leistungsfähigkeit in wird das junge Alter der Grundschüler deutlich, da 65 % und 74 % der Kinder nicht einschätzen können ob die Raumluftqualität einen Einfluss auf ihre Konzentrationsfähigkeit hat (Abb. 120).

**"Bei der Luft im Klassenraum fühle ich mich meistens wohl"**



**Abb. 119 Befragung Wohlbefinden GS HH**

**"Bei der Luft im Klassenraum kann ich mich meistens gut konzentrieren"**



**Abb. 120 Befragung Leistung GS HH**

### 6.4.1.2 Schulzentrum Fallersleben (SZ FL)

Die Nutzerbefragung erfolgte im Schulzentrums Fallersleben erst nach der Umsetzung der Maßnahmen. Im September des zweiten Messjahres wurden an insgesamt 145 Schüler der Klassenstufen sieben bis neun Fragebögen verteilt. Die Lehrkräfte wurden nicht befragt. Die Befragung zur Raumlufttemperatur (Abb. 121) zeigt, dass die Schüler in allen Räumen eher ein „zu warmes“ Empfinden verspüren. Dieses Votum lässt auf eine hohe Sonneneinstrahlung im Laufe der Unterrichtszeit schließen.

"Die Raumtemperatur im Klassenraum empfinde ich meistens als"

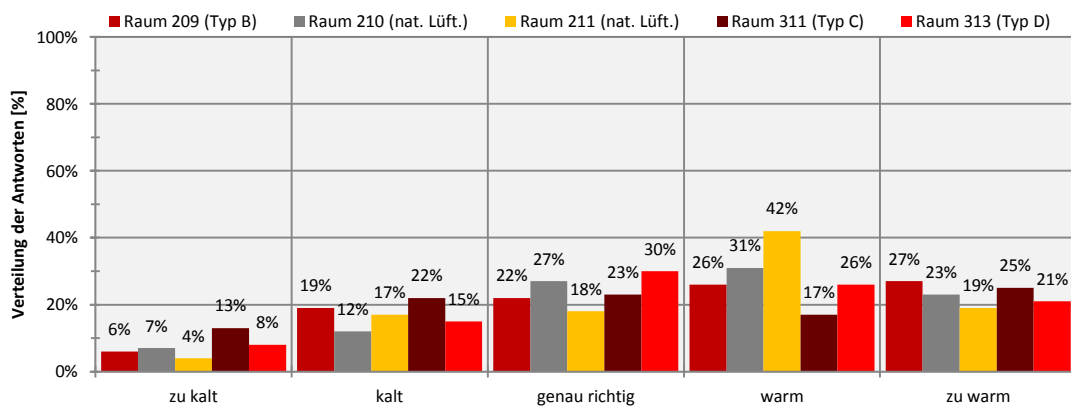


Abb. 121 Befragung Temperatur SZ FL

Die untersuchten Räume im Schulzentrum Fallersleben besitzen breite Fensterbänder und ausschließlich innenliegenden Blendschutz in Form von Vorhängen. Die Räume 209 und 311 sind nach Südosten ausgerichtet, die Räume 211 und 313 besitzen Südwestausrichtung Raum 209 Südausrichtung. Die Auswertungen der Messwerte in Kapitel 6.3.1.2 zur Raumlufttemperatur der Räume zeigte keine signifikanten Auffälligkeiten hinsichtlich einer Überhitzung. Die Schüler beurteilen die Raumluftqualität „neutral“ oder „eher schlecht“ bis „schlecht“ (Abb. 122). Keiner der Schüler gab an, die Luftqualität als „gut“ zu empfinden.

"Die Raumluftqualität im Klassenraum empfinde ich meistens als"

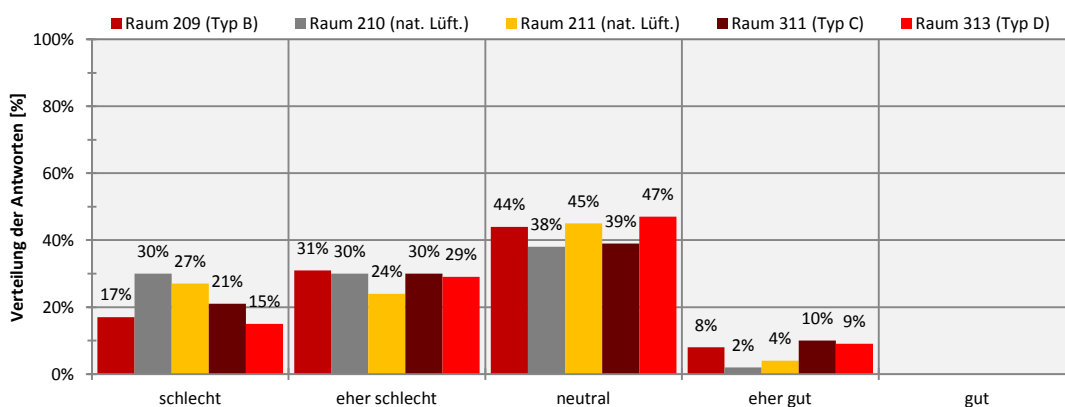
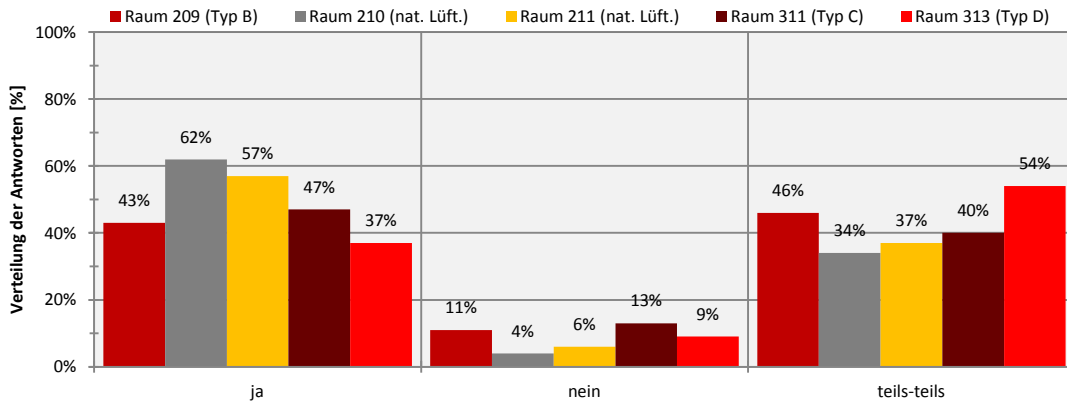


Abb. 122 Befragung Luftqualität 1 SZ FL

50 % der befragten Schüler beurteilten die Entwicklung der Raumluftqualität, dass eine Verschlechterung über die Unterrichtszeit eintritt, weitere 42 % waren sich unsicher und nur 8 % verneinten eine Verschlechterung der Raumluftqualität (Abb. 123).

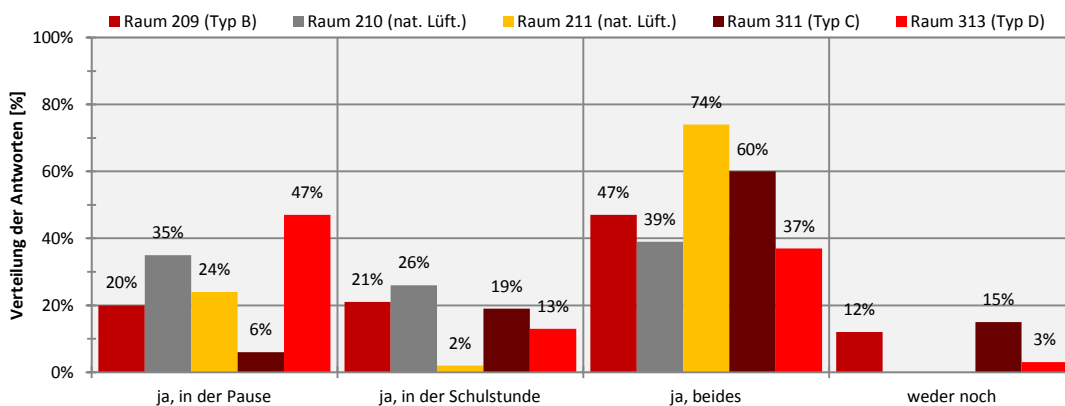
**"In den Schulstunden verschlechtert sich die Luftqualität spürbar"**



**Abb. 123 Befragung Luftqualität 2 SZ FL**

Die Frage zur Klassenraumlüftung (Abb. 124) verdeutlicht, dass die Einschätzung zum Lüftungsverhalten in den Räumen variierte. In Raum 211 mit der Installation der Lüftungsampel gaben 74 % der Schüler an, dass sowohl in der Schulstunde als auch in den Pausen regelmäßig gelüftet wurde. Diese Aussage kann nicht validiert werden, da die Fensteröffnungen nicht aufgezeichnet wurden. Doch aufgrund der sichtbaren Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen nach dem Einsatz der Lüftungsampel in Raum 211, wird die Einschätzung der Schüler als korrekt bewertet.

**"Die Fenster werden im Klassenraum regelmäßig zum Lüften geöffnet"**

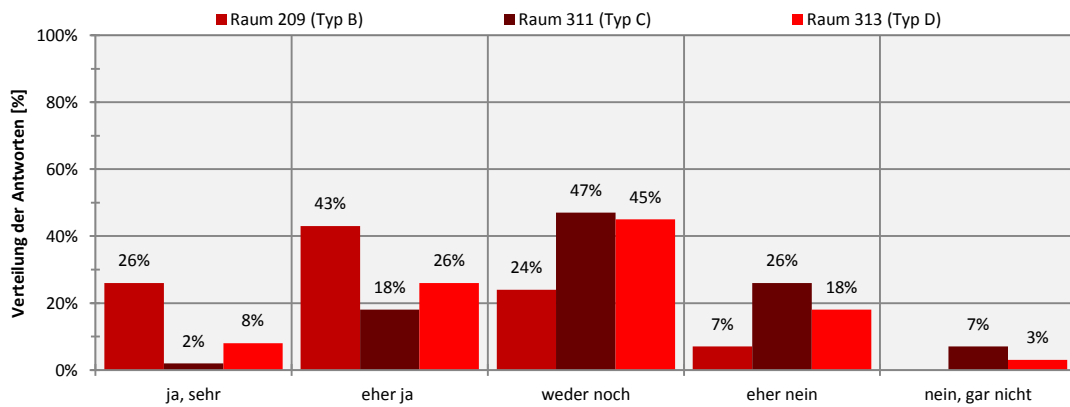


**Abb. 124 Befragung Lüftungsverhalten SZ FL**

Die Schüler in den Räumen 209, 311 und 313 äußerten sich sehr unterschiedlich in Bezug auf die Wirksamkeit der installierten Lüftungsgeräte (Abb. 125, Seite 119). Die Schüler in Raum 209 beurteilten das Gerät Typ B als wirksam, die Schüler in Raum 311 schätzten die Wirksamkeit des Gerätes Typ C eher schlecht ein und die Schüler in Raum 313 waren unsi-

cher in Bezug auf die Wirksamkeit des Lüftungsgerätes Typ D. Diese Aussagen decken sich mit den Messergebnissen.

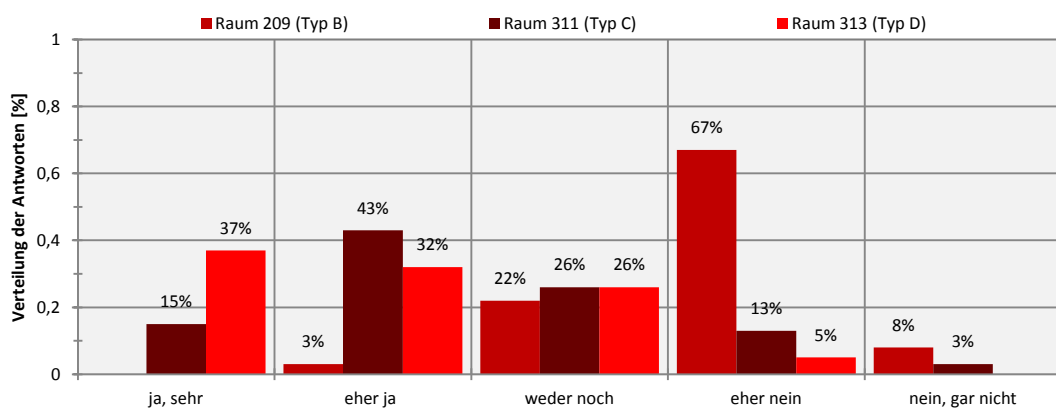
**"Das Lüftungsgerät im Klassenraum erfüllt seinen Zweck"**



**Abb. 125 Befragung mech. Lüftung SZ FL**

In Bezug auf den Störgeräuschpegel der Geräte beurteilten die Schüler in Raum 209 das Gerät Typ B am besten (Abb. 126). Nur 3 % empfanden den Schalldruckpegel des Gerätes Typ B im Betrieb als störend. Die Lehrkraft äußerte sich auf Rückfrage ebenfalls dahingehend, dass sie den Schalldruckpegel nicht als störend empfand. Die Schüler der Räume 311 und 313 äußerten sich negativ zu den Schalldruckpegeln der installierten Geräte Typ C und Typ D. 58 % der Schüler in Raum 311 und 69 % der Schüler in Raum 313 beurteilten den Schalldruckpegel der Lüftungsgeräte Typ C und Typ D als störend. Die Auswertung zur Schalldruckpegelmission der Lüftungsgeräte erfolgt in Kapitel 6.5.2.2.

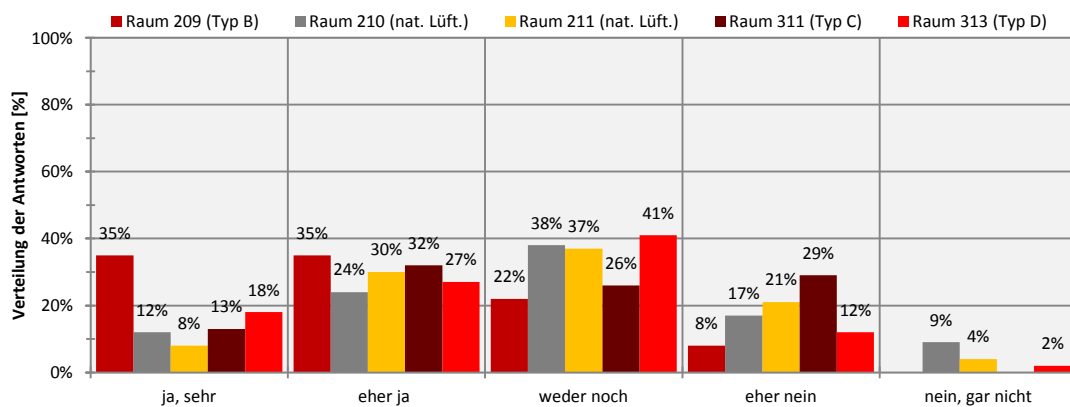
**"Ich empfinde den Geräuschpegel des Lüftungsgerätes als störend"**



**Abb. 126 Befragung Geräuschpegel SZ FL**

Die Nutzerbefragungen nach dem Wohlbefinden (Abb. 127, Seite 120) zeigt, dass die Schüler in Raum 209 und Raum 313 sich wohler fühlten als die Schüler der anderen Räume. 9 % der Schüler des Raumes 210 äußerten, dass sie sich „gar nicht“ wohl fühlten.

**"Bei der Luft im Klassenraum fühle ich mich meistens wohl"**

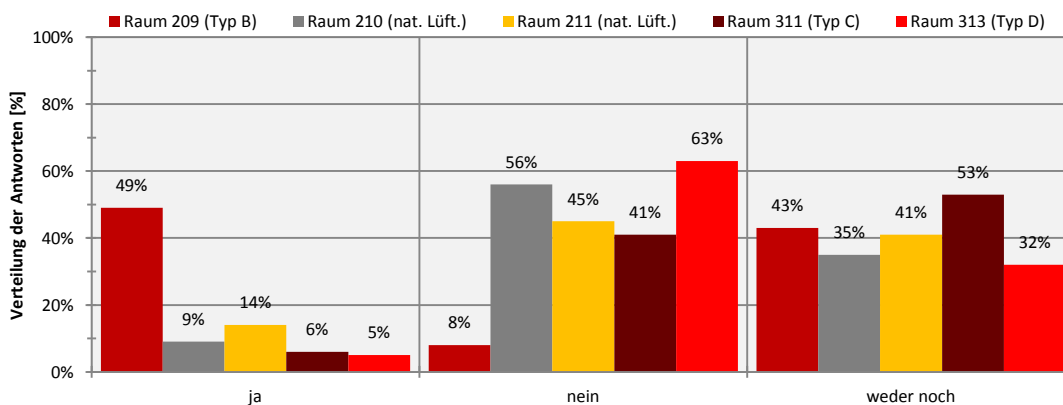


**Abb. 127 Befragung Wohlbefinden SZ FL**

Für das Schulzentrum Fallersleben kann dementsprechend angenommen werden, dass Schüler sich in den mechanisch belüfteten Räumen eher wohl fühlen als in den natürlich belüfteten Räumen.

Die Befragung in Bezug auf die Leistungsfähigkeit (Abb. 128) bestätigt diese Annahme bei den Räumen 209 und 210, da die Schüler in dem mechanisch belüfteten Raum 209 ihre Leistungsfähigkeit als „gut“ einschätzten und die Schüler in Raum 210 exakt gegenteilig antworteten.

**"Bei der Luft im Klassenraum kann ich mich meistens gut konzentrieren"**



**Abb. 128 Befragung Leistung SZ FL**

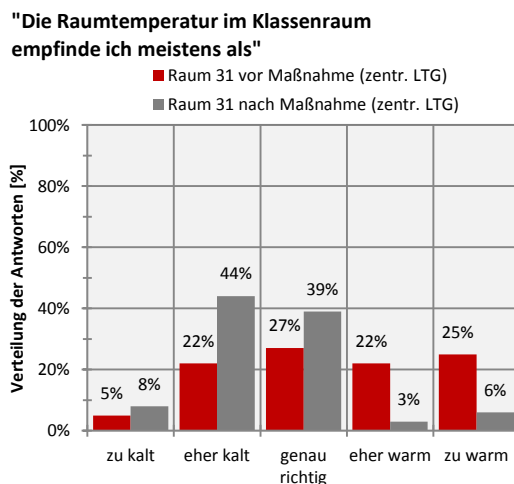
**6.4.1.3 Schulzentrum Vorsfelde (SZ VF)**

Im Schulzentrum in Vorsfelde wurden sowohl vor als auch nach der Umsetzung der Maßnahme Nutzerbefragungen durchgeführt. Die erste Befragung wurde im August des ersten Messjahres durchgeführt, die zweite Befragung fand im Juni des zweiten Messjahres in denselben Klassen statt. Die Lehrkräfte wurden von der Maßnahme in Kenntnis gesetzt und informierten auch die Schüler darüber. Insgesamt wurden 96 Schüler der Klassenstufen

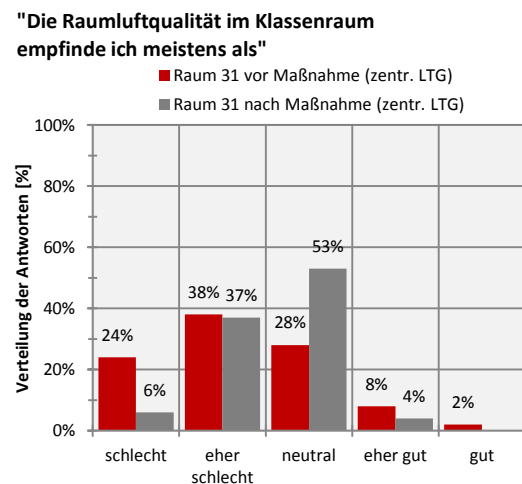
sechs bis zehn befragt. Die Lehrer wurden nicht befragt.

In der ersten Nutzerbefragung der Schulklassen zeigt, dass die empfundenen Raumtemperaturen im Sommer ein Problem darstellten. 25 % der befragten Schüler fanden es im Sommer „zu warm“, 22 % beschrieben die Raumlufthtemperatur als „eher warm“ (Abb. 129). Nach der Einführung der Nachtlüftung änderte sich diese Einschätzung. Nur 6 % der Schüler empfanden die Raumlufthtemperatur „zu warm“, 3 % fanden die Raumlufthtemperatur „eher warm“. Die Messergebnisse für Raum 31 konnten diese Aussagen bestätigen.

Vor der Umsetzung der Nachtlüftung beurteilen die Schüler die Raumlufthqualität besser. 8 % der Schüler benannten die Raumlufthqualität „eher gut“, 2 % „gut“. Nach der Maßnahme gaben nur 4 % an die Raumlufthqualität als „eher gut“ zu empfinden. Kein Schüler beurteilte die Raumlufthqualität als „gut“ (Abb. 130). Diese subjektive Einschätzung deckt sich nicht mit den Messergebnissen.



**Abb. 129 Befragung Temperatur SZ VF**



**Abb. 130 Befragung Luftqualität 1 SZ VF**

Es wird angenommen, dass die schlechte Beurteilung der Raumlufthqualität auf die teilweise unbehaglichen Raumlufthtemperaturen zurückzuführen ist.

Die Auswertung zur Einschätzung der Raumlufthqualität (Abb. 131, Seite 122) zeigt, dass vor der Maßnahme 50 % der Schüler eine spürbare Verschlechterung der Raumlufthqualität im Laufe der Unterrichtsstunden bemerkten. Danach gaben nur noch 14 % an, dass die Qualität der Raumlufth über den Unterrichttag abnimmt.

Die Befragung zum Lüftungsverhalten (Abb. 132, Seite 122) ergab keine eindeutige Aussage. Sowohl vor als auch nach der Maßnahme wurde von 30 % der Schüler angegeben, dass die Fenster in der Schulstunde geöffnet würden. Die Auswertung zur Aufzeichnung der Fensterkontakte zeigt jedoch, dass die Fensterflügel sowohl vor als auch nach der Maßnahme meist über den ganzen Schultag geschlossen blieben.

**"In den Schulstunden verschlechtert sich die Luftqualität spürbar"**

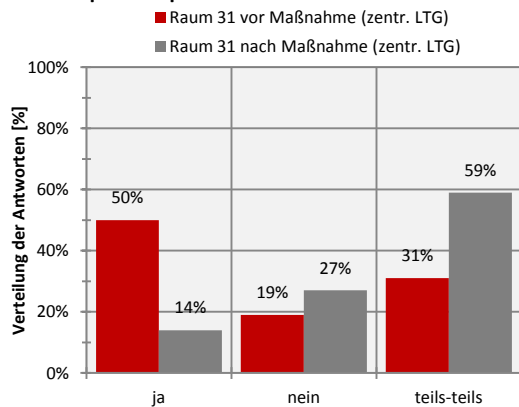


Abb. 131 Befragung Luftqualität 2 SZ VF

**"Die Fenster werden im Kassenraum regelmäßig zum Lüften geöffnet"**

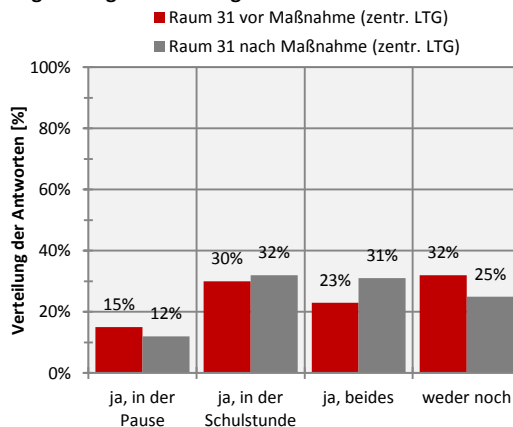


Abb. 132 Befragung Lüftungsverhalten SZ VF

Abb. 133 zeigt, dass vor der Maßnahme nur 34 % der Schüler wussten, dass der Raum 31 mechanisch belüftet wird. Danach waren es 87 %.

Mit Erhalt der Information zum Betrieb der Lüftungsanlage schätzten die Schüler auch die Wirksamkeit der Lüftungsanlage anders ein (Abb. 134). Zuvor äußerten sich die Schüler negativ. 42 % der Schüler beurteilten die Lüftungsanlage als unzweckmäßig. Nach der Maßnahme beurteilten die Schüler die Wirksamkeit der Lüftungsanlage neutral.

**"Ich wusste, dass dieser Klassenraum mechanisch belüftet wird"**

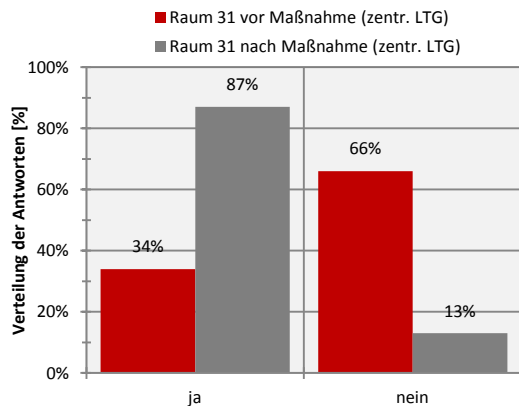


Abb. 133 Befragung Belüftung 1 SZ VF

**"Meiner Meinung nach erfüllt die Lüftungsanlage ihren Zweck"**

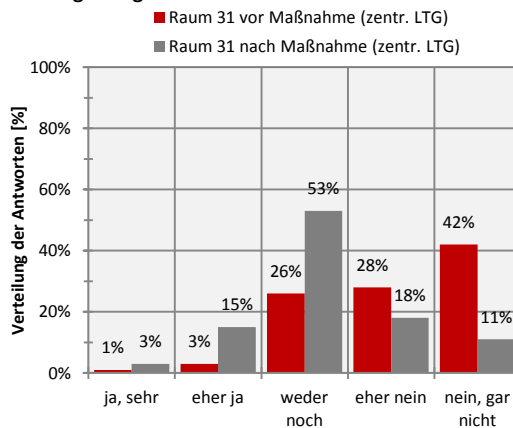
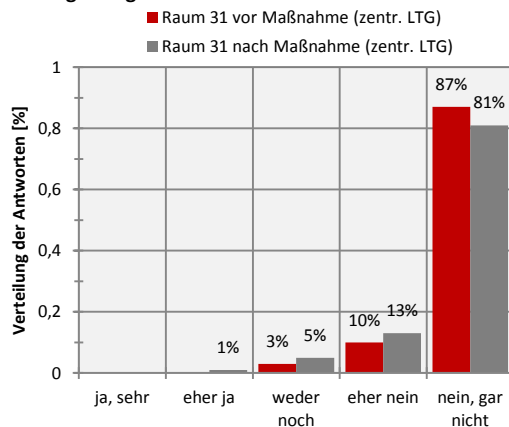


Abb. 134 Befragung Belüftung 2 SZ VF

Die positive Beurteilung des Geräuschpegels der Anlage vor der Maßnahme lässt sich darauf zurückführen, dass die Mehrheit der Schüler nicht wusste, dass der Raum mechanisch belüftet wird (Abb. 135, Seite 123). Doch auch nach der Umsetzung der Nachtlüftung beurteilten die Schüler den Schalldruckpegel der Anlage weiterhin mehrheitlich als nicht störend. Auf Nachfrage gaben die Lehrkräfte an, ebenfalls keine akustischen Einbußen zu empfinden. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde von einer Schalldruckpegelmessung in Vorsfelde abgesehen. Die Frage nach dem empfundenen Luftzug am Sitzplatz (Abb. 136, Seite 123) verneinte die Mehrheit der Schüler.

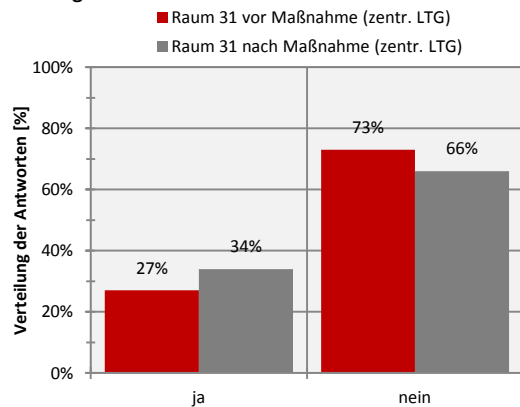


**"Ich empfinde den Geräuschpegel der Lüftungsanlage als störend"**



**Abb. 135 Befragung Geräuschpegel SZ VF**

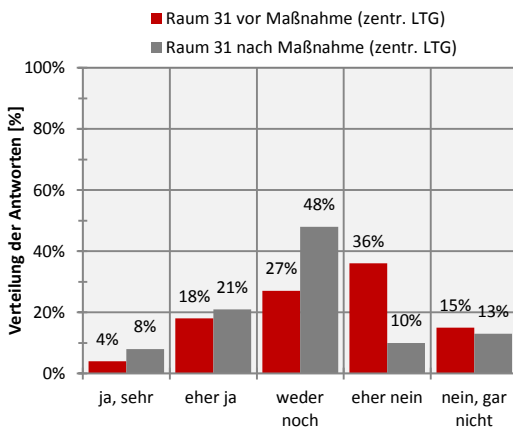
**"Ich empfinde aktuell an meinem Sitzplatz Luftzug"**



**Abb. 136 Befragung Luftzug SZ VF**

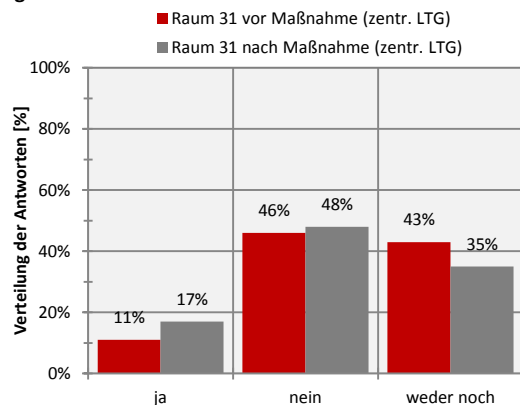
Abb. 137 zeigt, dass sich vor der Einführung der Nachtlüftung 22 % der Schüler im Klassenraum wohl und 51 % nicht wohl fühlten. Nach der Maßnahme waren es 29 % die sich wohl und 23 % die sich nicht wohl fühlten. Auf die Frage nach der persönlichen Einschätzung zur Leistungsfähigkeit gaben die Schüler sowohl vor als auch nach der Umsetzung der Maßnahme an, sich schlecht konzentrieren zu können (Abb. 138). Die Messwerte belegen für sowohl für den Zeitraum vor als auch nach der Maßnahme konstante Werte unterhalb von 1.000 ppm. Die subjektive Empfindung der Schüler muss demnach anderen Umständen geschuldet sein.

**"Bei der Luft im Klassenraum fühle ich mich meistens wohl"**



**Abb. 137 Befragung Wohlbefinden SZ VF**

**"Bei der Luft im Klassenraum kann ich mich gut konzentrieren"**



**Abb. 138 Befragung Leistung SZ VF**

#### 6.4.1.4 Grundschule Braunschweig (GS BS)

Die Befragung der Schüler in der Grundschule in Braunschweig wurde im Januar des zweiten Messjahres durchgeführt. Es wurden 22 Kinder der vierten Klassenstufe befragt. Die Lehrkraft wurde im persönlichen Gespräch befragt.

Abb. 139 zeigt, dass 36 % der Schüler die Raumlufttemperatur für den Winterfall und 57 % für den Sommerfall als „genau richtig“ beurteilten. 57 % der Schüler beurteilten die Raumlufttemperatur im Sommer als „eher warm“. Die Raumluftqualität wurde von den Schülern sowohl für den Sommer- als auch für den Winterfall gut eingestuft (Abb. 140). Dieses Ergebnis deckt sich mit den Auswertungen der Messwerte zur Raumluftqualität.

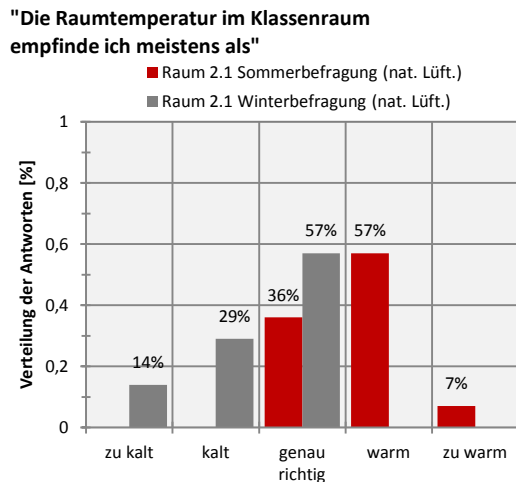


Abb. 139 Befragung Temperatur GS BS

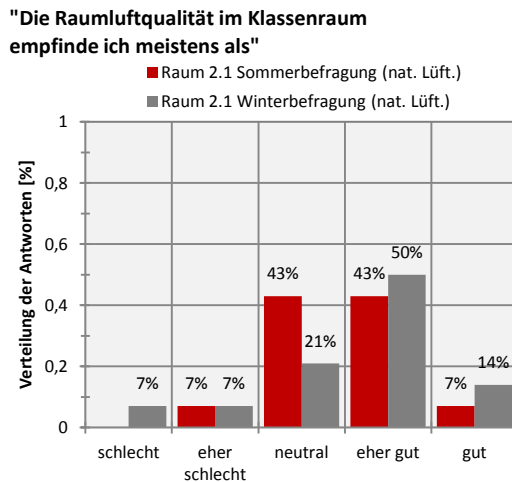


Abb. 140 Befragung Luftqualität 1 GS BS

Die Frage nach einer Verschlechterung der Raumluftqualität über den Schultag verneinten 59 % für den Sommerfall und 53 % für den Winterfall (Abb. 141). Zudem gaben alle Schüler an, dass sowohl im Sommer als auch im Winter entweder in der Schulstunde oder in der Schulstunde und zusätzlich in den Pausen gelüftet wurde (Abb. 142).

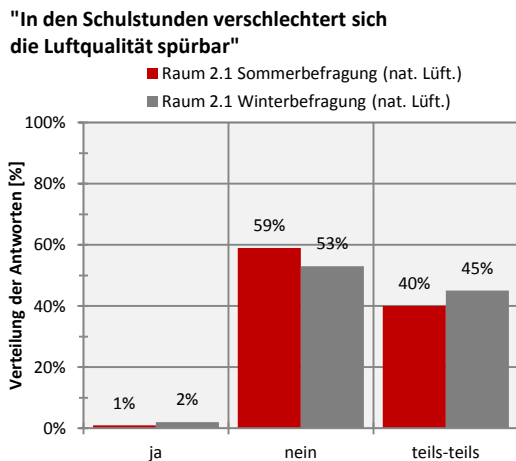


Abb. 141 Befragung Luftqualität 2 GS BS

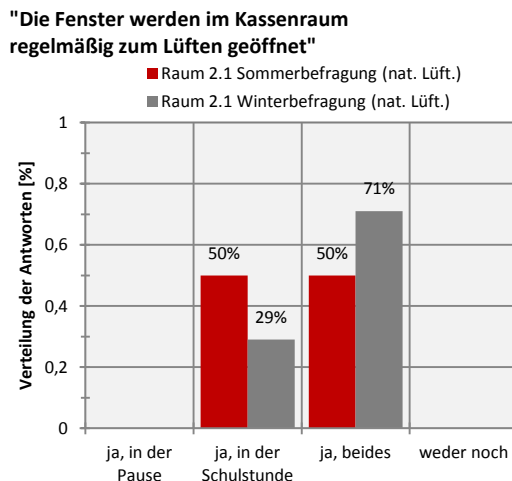


Abb. 142 Befragung Lüftungsverhalten GS BS

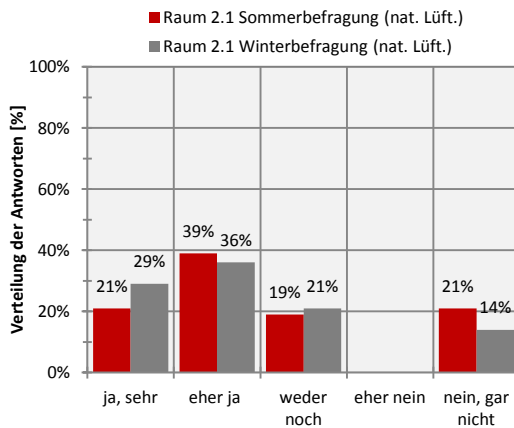
Auch die Lehrkraft gab an, dass bereits vor dem Workshop eine regelmäßige Lüftung in der Unterrichtszeit und in den Pausen praktiziert wurde.

Die Auswertung der Messergebnisse der Raumluftqualität bestätigt das. Abb. 143 (Seite 125) zeigt, dass die Schüler sich insgesamt im Klassenraum wohl fühlen. Nur 21 % der Schüler verneinten die Frage und 14 % der Schüler fühlten sich im Winter im Klassenraum nicht

wohl. Demzufolge gaben für den Sommerfall 43 % und für den Winterfall 57 % der Schüler an, dass sie sich im Klassenraum bei der bestehenden Raumluftqualität gut konzentrieren konnten (Abb. 144).

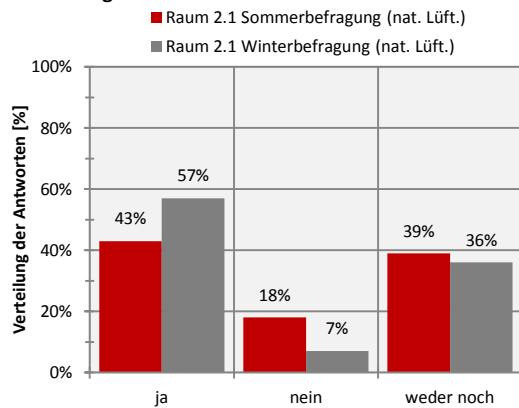
Lediglich 18 % der Schüler im Sommer und 7 % der Schüler im Winter fühlten sich in ihrer Leistungsfähigkeit eingeschränkt.

**"Bei der Luft im Klassenraum fühle ich mich meistens wohl"**



**Abb. 143 Befragung Wohlbefinden GS BS**

**"Bei der Luft im Klassenraum kann ich mich meistens gut konzentrieren"**

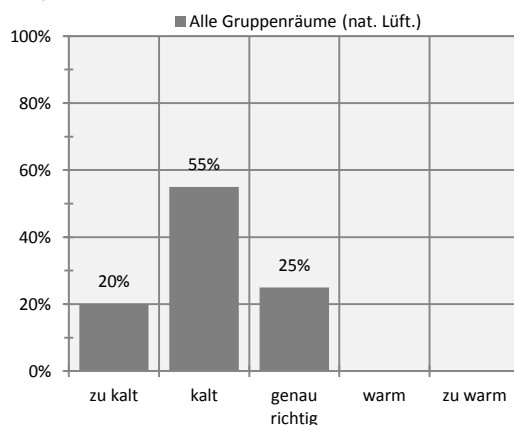


**Abb. 144 Befragung Leistung GS BS**

### 6.4.2 Die Kindertagesstätte Wolfsburg (Kita WOB)

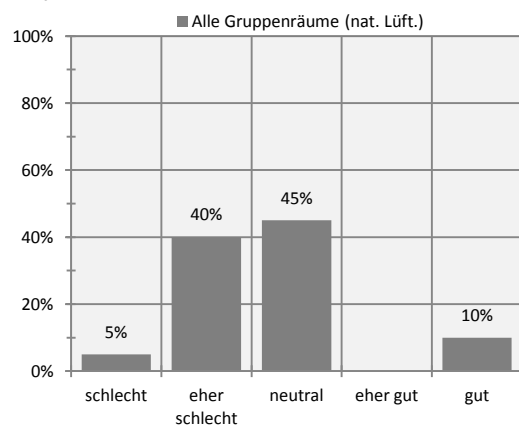
In der Kindertagesstätte in Wolfsburg wurden im April des zweiten Jahres Fragebögen an die 18 ausschließlich weiblichen Betreuerinnen verteilt. Die Auswertung der Fragebögen zeigt eine sehr geteilte Meinung zum Thema Raumlufttemperatur und Raumluftqualität unter den Betreuerinnen und Pädagoginnen. 25 % der befragten Frauen empfand die Raumlufttemperatur als „genau richtig“. 20 % der Befragten empfanden es als „eher kalt“ und 55 % als „kalt“ (Abb. 145). Abb. 146 zeigt, dass 45 % der Befragten die Raumluftqualität „neutral“ einstufen, wobei 40 % sie als „eher schlecht“ beschrieben.

**Die Raumtemperatur im Gruppenraum empfinde ich meistens als:**



**Abb. 145 Befragung Temperatur Kita**

**Die Raumluftqualität im Gruppenraum empfinde ich meistens als:**



**Abb. 146 Befragung Luftqualität 1 Kita**

Die vorliegenden Messwerte zeigen jedoch eine schlechtere Entwicklung der Raumluftqualität, als die Befragten wahrnehmen. Auf die Frage nach einer spürbaren Verschlechterung der Raumluftqualität im Laufe eines Tages antworteten 35 % mit „ja“, 35 % mit „nein“ und 30 % mit „teils-teils“ (Abb. 147).

Abb. 148 zeigt, dass 80 % der Betreuerinnen das Wohlbefinden der Kinder unter den gegebenen Raumluftbedingungen im Tagesverlauf unverändert beurteilen.

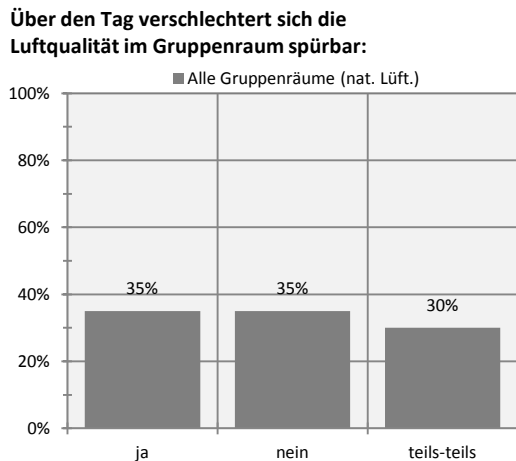


Abb. 147 Befragung Luftqualität 2 Kita

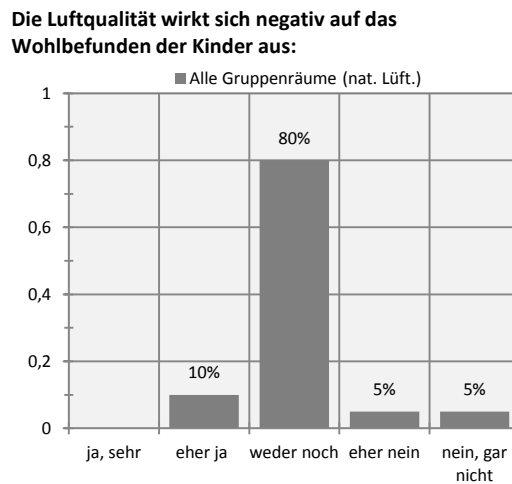


Abb. 148 Befragung Wohlbefinden Kita

Nach den Angaben der Betreuer lüfteten 95 % der Befragten sowohl vor- als auch nachmittags (Abb. 149). 90 % gaben an nur über gekippte Fenster zu lüften und 5 % sagten, sie würden die Fenster weit öffnen (Abb. 150). Auch diese Wahrnehmung unterscheidet sich gravierend von der tatsächlichen Umsetzung in der Praxis.

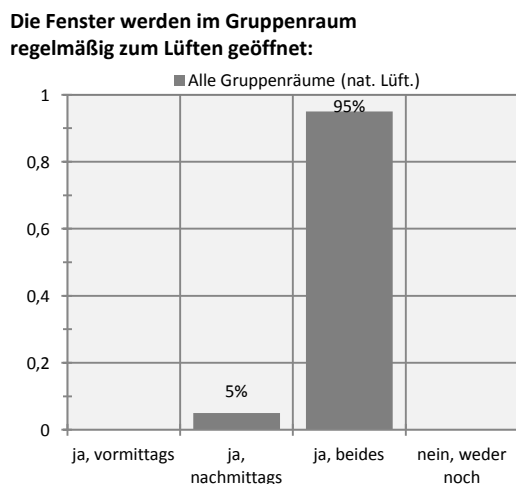


Abb. 149 Befragung Lüftungsverhalten 1 Kita

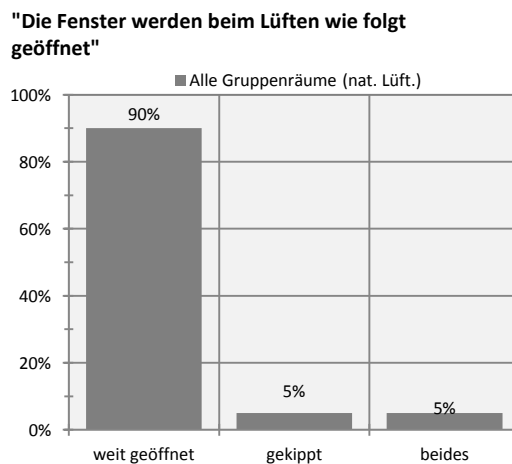


Abb. 150 Befragung Lüftungsverhalten 2 Kita

Mit der Ausgabe des Lüftungsleitfadens wurden die Betreuerinnen motiviert, regelmäßig die Fensterflügel und die Tür zum Garten hin weit zu öffnen und somit für einen ausreichenden Raumluftaustausch zu sorgen. Die Auswertungen der Messergebnisse belegen jedoch, dass keine vermehrte Fensterlüftung nach der Ausgabe des Leitfadens stattfand.

Eine Rückfrage ergab, dass die Betreuerinnen zwar die Fenster am Tag mehrfach kurz öffnen, eine konsequente und regelmäßige Fensterlüftung jedoch nicht umsetzbar sei, da der Betreuungsaufwand der Kinder zu unvorhersehbar und an jedem Tag abweichend sei.

#### 6.4.3 Die Universität Braunschweig (TU BS)

**Hörsaal 11.3:** In den Feldversuchen in 11.3 wurden keine Fragebögen an die Studierenden verteilt. Die subjektive Empfindung wurde lediglich über Befragungen oder Kommentare einzelner Personen in der Vorlesung aufgenommen und dokumentiert.

In Szenario 1 wurde von keinem der Studenten und Studentinnen in Bezug auf die Raumluftqualität oder die Raumtemperatur Kommentare abgegeben. Die Lüftungspause wurde von allen Studierenden positiv aufgenommen.

Im zweiten Szenario äußerten sich die an den Fensterseiten sitzenden Studierenden - vornehmlich Studentinnen - zu Beginn negativ über die Vorablüftung, da sie die Raumlufttemperatur als zu kalt empfanden, was mittels der gemessenen Raumlufttemperatur von unter 15 °C zu Beginn bestätigt wird.

Das dritte Szenario mit dem temporären Einsatz des Abluft-Ventilators wurde von den Studierenden in erster Linie skeptisch aufgenommen. Zu der Vorablüftung und der Lüftungspause in der der Ventilator mit 8.000 m<sup>3</sup>/h betrieben wurde, äußerten sich die Studierenden dahingehend, dass sie den Geräuschpegel des Ventilators als „*sehr störend*“ empfanden. Der Luftvolumenstrom von 2.000 m<sup>3</sup>/h in der Vorlesungszeit hingegen wurde von den Studierenden und auch von dem lehrenden Professor als „*akzeptabel*“ beurteilt. Lediglich der entstehende Luftzug wurde von den Studierenden als „*unangenehm*“ bewertet. Obwohl die Messwerte in Szenario 3 eindeutig belegen, dass der Einsatz des Ventilators zu einer konstanten CO<sub>2</sub>-Konzentration unterhalb von 1.400 ppm oder sogar 1.000 ppm beiträgt, wurde die Raumluftqualität von den Studierenden insgesamt nicht als besser als in den vorgehenden Szenarien beschrieben, was auf die geminderte Raumlufttemperatur zurückzuführen ist.

Die Reaktion der Studierenden im vierten Szenario war der im dritten Szenario ähnlich. Aufgrund der verhältnismäßig kalten Raumlufttemperaturen über den Verlauf der Vorlesung wurde auch die Raumluftqualität von den Studierenden „*eher schlecht*“ beurteilt. Die Messwerte zeigen, dass durch die Lüftungspause nach 45 Minuten der Wert von 1.400 ppm noch einmal unterschritten wurde. Die Lüftungspause wurde durch die Betreuer der Feldstudie ausgeführt. Die Bereitschaft zur eigenständigen Umsetzung einer Lüftungspause für weitere Vorlesungen war jedoch bei den Studierenden nicht vorhanden.

#### 6.4.4 Zusammenfassung der Nutzerbefragung

Die Analyse der Nutzerbefragung zeigt zum Teil erhebliche Unterschiede in Abhängigkeit vom Alter der befragten Schulkinder. Die Schulform, das Geschlecht und die Art der Belüftung der Räume (mechanisch oder natürlich) sind keine eindeutigen Indikatoren für die Antworten.

Folgend werden die Ergebnisse aller Schulen vergleichend gegenübergestellt. Abb. 151 zeigt, dass sowohl die Schüler in den mechanisch belüfteten Klassenräumen als auch die Schüler in den frei belüfteten Räumen die Raumlufttemperatur insgesamt als „genau richtig“ oder „warm“ empfanden. Dennoch zeichnet sich ab, dass die Schüler der mechanisch belüfteten Räume eher zu einer kälteren, die Schüler der frei belüfteten Räume zu einer wärmeren Beurteilung der Raumlufttemperatur tendierten.

Entgegen den Ergebnissen in Fallersleben beurteilten die Schüler die Raumluftqualität in den mechanisch belüfteten Klassenräumen schlechter als die Schüler der frei belüfteten Räume (Abb. 152). Allerdings stuften bei beiden Schülergruppen etwa 40 % der befragten Schüler die Raumluftqualität als „neutral“ ein.

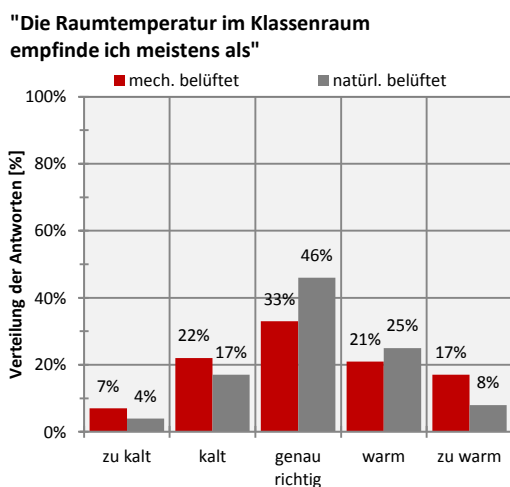


Abb. 151 Befragung Temperatur

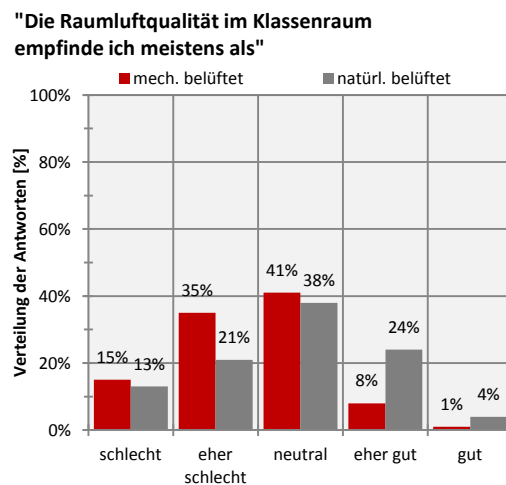


Abb. 152 Befragung Luftqualität 1

Die Frage nach der Entwicklung der Raumluftqualität über den Schultag (Abb. 153, Seite 129) ergab, dass die Schüler der frei belüfteten Klassenräume diese weniger negativ beurteilten (27 %) als die Schüler der mechanisch belüfteten Räume (35 %). Insgesamt waren sich jedoch mehr als 40 % der befragten Schüler eher unsicher.

Abb. 154 (Seite 129) zeigt, dass trotz der mechanischen Belüftung in den Räumen ebenfalls eine Lüftung über die Fenster durchgeführt wurde. Lediglich 15 % der Schüler in den mechanisch belüfteten Klassenräumen gaben an, die Fenster über den Unterrichtstag geschlossen gelassen zu haben. Die Mehrheit der Schüler der frei belüfteten Klassenräume gab an, sowohl in den Schulstunden als auch in den Pausen regelmäßig gelüftet zu haben.

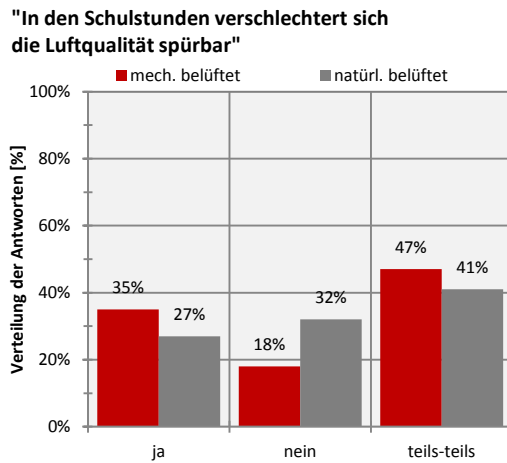


Abb. 153 Befragung Luftqualität 2

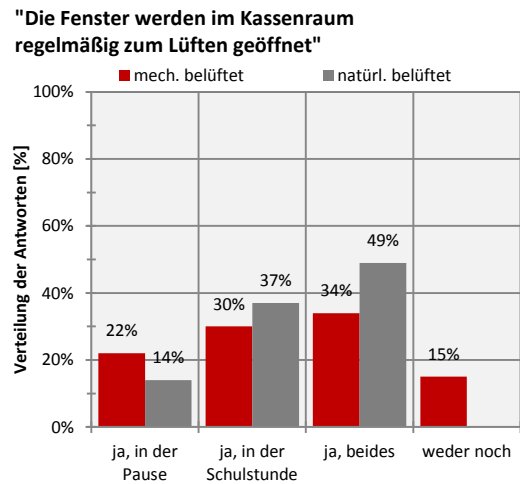


Abb. 154 Befragung Lüftungsverhalten

Die Auswertung der Nutzerbefragung zum Wohlbefinden (Abb. 155) zeigt, dass die befragten Schüler, unabhängig vom Lüftungskonzept der Räume, sich in den Räumen wohl fühlen. Etwa ein Drittel beantwortete die Fragestellung neutral und insgesamt 22 % der Schüler in den mechanisch belüfteten Räumen und 19 % der Schüler in den frei belüfteten Räumen gaben an, sich nicht wohl zu fühlen. In Bezug auf die Leistungsfähigkeit gaben je 45 % der Schüler in beiden Lüftungsszenarien an unsicher zu sein (Abb. 156). Tendenziell gaben mehr Schüler der mechanisch belüfteten Klassenräume an sich schlechter konzentrieren zu können als Schüler der frei belüfteten Klassenräume.

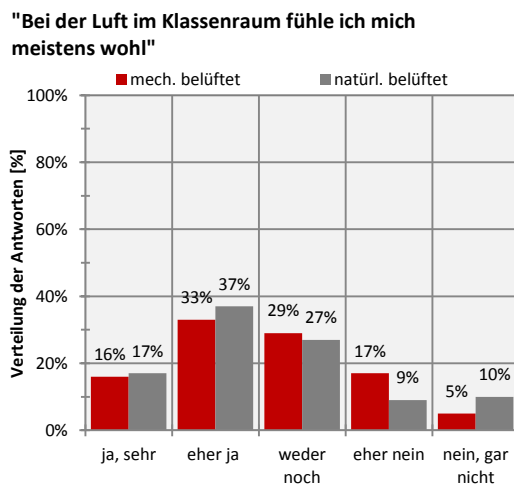


Abb. 155 Befragung Wohlbefinden

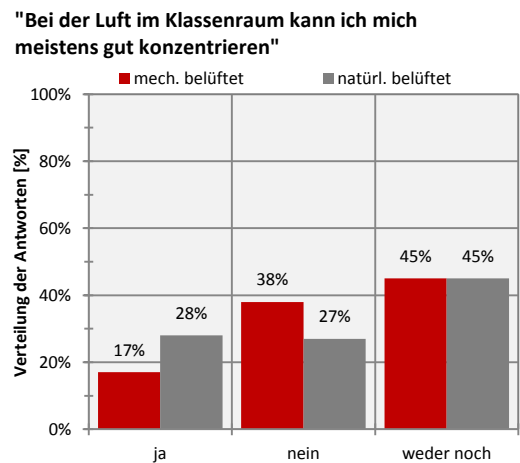
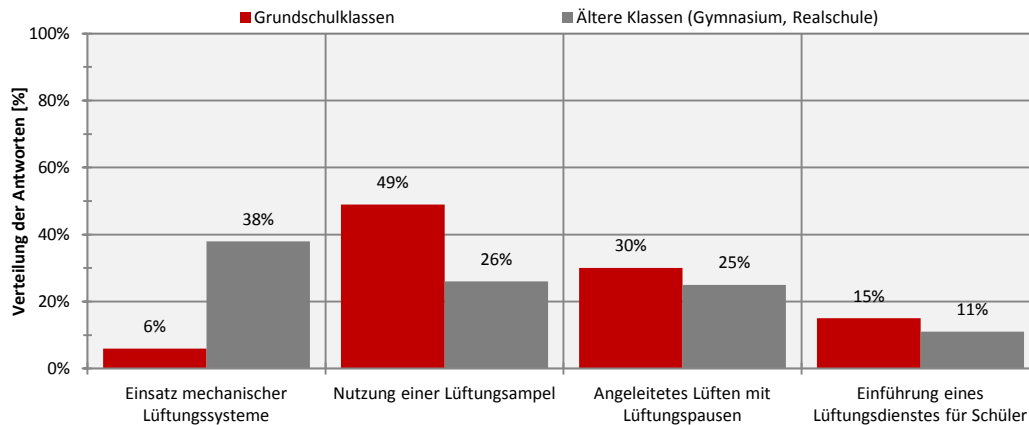


Abb. 156 Befragung Leistung

Auf die Frage nach möglichen Maßnahmen zur Verbesserung der Raumluftqualität in den Klassenräumen antworteten die Schüler je nach Altersgruppe unterschiedlich. Die Ergebnisse der Nutzerbefragungen von insgesamt 387 Grund-, Gymnasial und Realschülern aus den Klassenstufen vier bis zehn (Abb. 157, Seite 130) zeigen, dass bei den jüngeren Schülern der Einsatz einer Lüftungsampel neben der Einführung einer Lüftungspause die höchste Bewertung als Verbesserungsmaßnahme erhielt. Die älteren Klassenstufen beurteilten den Einsatz

mechanischer Lüftungssysteme als wirkungsvollste Maßnahme. Die Nutzung einer Lüftungsampel und die Lüftungspause wurden von je einem Viertel der Befragten als sinnvolle Maßnahme erachtet. Lediglich 11 % der höheren Altersklassen und 15 % der Grundschüler sprachen sich für selbstorganisierte Lüftung der Schüler mittels eines Lüftungsdienstes ohne zusätzliche visuelle Unterstützung aus.

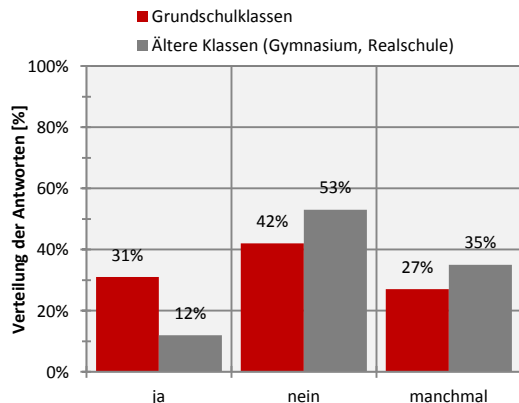
**"Diese Maßnahmen können meiner Ansicht nach zu einer Verbesserung der Luftqualität beitragen"**



**Abb. 157 Befragung Lüftungsmaßnahmen**

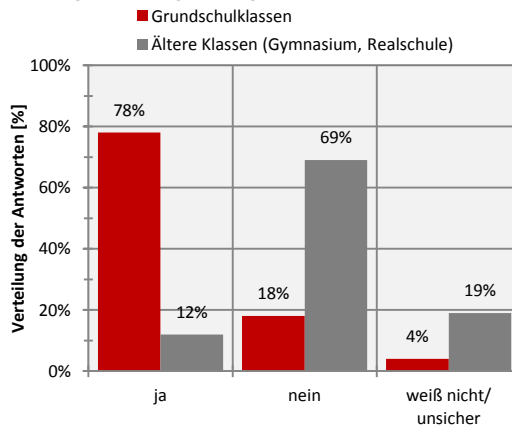
Die Auswertung zum Verantwortungsbewusstsein (Abb. 158) zeigt, dass die Mehrheit der Schüler sich nicht für die verbrauchte Raumluftqualität verantwortlich fühlte und dadurch die Fenster selbstständig öffnete. Auffällig ist, dass auch auf diese Frage die jungen Grundschülern positiver antworten – 32 % gaben an sich verantwortlich zu fühlen. Dem gegenüber bejahten nur 12 % der höheren Altersklassen die Fragestellung. Auch die Beantwortung der Frage nach der Bereitschaft Verantwortung in Form eines Lüftungsdienstes zu übernehmen unterscheidet sich stark innerhalb der beiden Altersgruppen der Schüler (Abb. 159).

**"Ich fühle mich für die verbrauchte Luft verantwortlich und öffne die Fenster?"**



**Abb. 158 Befragung Verantwortung**

**"Ich bin bereit selbst in einem Lüftungsdienst regelmäßig zu lüften"**



**Abb. 159 Befragung Motivation**



78 % der Grundschüler, jedoch nur 12 % der höheren Altersklassen äußerten sich positiv. 69 % der älteren Klassenstufen waren nicht bereit, die Verantwortung eines Lüftungsdienstes zu übernehmen.

**Zusammenfassend für die Nutzerbefragung kann gesagt werden, dass ältere Schüler und Studenten sich eher der Abhängigkeit der eigenen Leistungsfähigkeit von der Qualität der Raumluft bewusst sind. Sie fordern zur Verbesserung der Raumluft jedoch eher eine mechanische Lüftungsunterstützung als dass sie bereit sind, selbst Verantwortung für eine regelmäßige Fensterlüftung zu übernehmen.**

Jüngere Schüler lassen sich leichter für eine motivierte Fensterlüftung begeistern. Mittels einfacher Maßnahmen wie der Installation einer Lüftungssampel wird eine Sensibilisierung der Nutzer für die Entwicklung der Raumluftqualität im Klassenzimmer erzielt.

Weiterhin ist festzuhalten, dass mechanische Lüftungssysteme nicht den gewünschten Erfolg bringen, da die Nutzer aus Unwissenheit die Raumluftqualität falsch einschätzen oder Geräte nicht korrekt bedienen. Eine ausführliche Einweisung in die Technik und Erklärung der Bedienung der Geräte kann Abhilfe und Nutzerakzeptanz schaffen.

Tendenziell wird die Raumluftqualität in mechanisch belüfteten Räumen schlechter bewertet, da die subjektive Wahrnehmung frische Luft mit kalter Luft gleichsetzt. In mechanisch belüfteten Räumen wird häufig eine Zulufttemperatur von mindestens 20 °C voreingestellt, so dass der Nutzer trotz Frischlufteintrag in den Raum einen subjektiven Eindruck von verbrauchter, „warmer“ Luft im Raum hat.

## 6.5 Auswertung der Messdaten zur Akustik

Eine akustische Beurteilung der Lüftungstechnik wurde nur bei den dezentralen Geräten durchgeführt, da in dem untersuchten Raum mit zentraler Lüftung keinerlei akustische Auffälligkeiten seitens der Nutzer formuliert wurden. Im Schulzentrum Vorsfelde war die Mehrzahl der Schüler nicht aufgefallen, dass der Raum mechanisch belüftet wird. Die Schüler stellten keine Geräuschemission seitens der Lüftungstechnik fest.

### 6.5.1 Nachhallzeit

Die Nachhallzeitmessung erfolgte wie bereits in Kapitel 4.3 beschrieben jeweils dreifach in den Referenzräumen. Für alle Referenzräume wird der Sollwert ( $T_{\text{soll}}$ ) für Unterricht gemäß DIN 18041 [55] berechnet und den Messwerten gegenüber gestellt (Tabelle 60). Die Messwerte wurden über den sprachrelevanten Frequenzbereich von 250 bis 4.000 Hertz gemittelt<sup>XIII</sup>. Die gemessene Nachhallzeit liegt in allen Referenzräumen unter dem Sollwert.

*Tabelle 60 Messwerte der Nachhallzeit der Referenzräume*

<b>Referenzgebäude</b>	<b>Raum</b>	<b>Sollnachhallzeit <math>T_{\text{soll}}</math> [s] [55]</b>	<b>Nachhallzeit [s]</b>
Grundschule Hamburg-Harburg	13	0,59	0,47
	16	0,59	0,49
Schulzentrum Fallersleben	209	0,59	0,44
	311	0,59	0,47
	313	0,59	0,44
	210	0,57	0,48
	211	0,59	0,44
Schulzentrum Vorsfelde	31	0,55	0,48
Grundschule Braunschweig	2.1	0,59	0,49
Kindertagesstätte Wolfsburg	GR	0,52	0,49

### 6.5.2 Schalldruckpegel

Die Schalldruckpegelmessung erfolgte in den Referenzräumen mit dezentraler Lüftungstechnik jeweils über einen Zeitraum von 20 Sekunden. Ermittelt wurde sowohl der Schalldruckpegel bei ausgeschalteten Geräten, als auch bei den einzelnen Betriebsstufen der Lüftungsgeräte. Das Messgerät wurde etwa mittig im Klassenraum auf Schülerkopfhöhe positioniert. Wie bereits in Kapitel 2.6.1 und Kapitel 4.3 erläutert, ist für Klassenräume ist nach DIN 4109 [56] ein Wert von 35 dB(A) zulässig. Beim Einsatz raumluftechnischer Anla-

<sup>XIII</sup> Die Berechnungen der Nachhallzeit der Referenzräume finden sich in Anhang 8.

gen sind 40 dB(A) zulässig, sofern es sich um Dauergeräusche ohne auffällige Einzeltöne handelt.

### 6.5.2.1 Grundschule Hamburg-Harburg (GS HH)

**Raum 13:** Die Lehrkräfte gaben an, weder vor noch nach der Maßnahme (Erhöhung des Luftvolumenstroms) akustische Einschränkungen im Klassenraum feststellen zu können.

Die Auswertung der Messungen des Schalldruckpegels des Lüftungsgerätes Typ A (Tabelle 61) zeigt, dass der Schalldruckpegel auch bei der höchstmöglichen Luftvolumenstromzufuhr von 800 m<sup>3</sup>/h den maximal zulässigen Wert von 40 dB(A) nicht erreicht. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Äußerungen der Lehrkräfte.

Das dezentrale Lüftungsgerät Typ A kann aus akustischer Sicht für den Einsatz in Schulen empfohlen werden.

**Tabelle 61 Messergebnis Schalldruckpegel GS HH Raum 13 Lüftungsgerät Typ A**

<b>Betriebsmodus der Lüftungstechnik</b>	<b>Schalldruckpegel [dB(A)]</b>			
	<b>Messung 1</b>	<b>Messung 2</b>	<b>Messung 3</b>	<b>Mittelwert</b>
<i>Lüftungsgeräte ausgeschaltet</i>	25,9	24,9	25,6	<b>25,5</b>
<i>Luftvolumenstrom 100 % (800 m<sup>3</sup>/h)</i>	31,9	31,5	32,0	<b>31,8</b>
<i>Luftvolumenstrom 50 % (400 m<sup>3</sup>/h)</i>	26,6	26,8	26,6	<b>26,7</b>

**Raum 16:** Als Referenz zu Raum 13 wurde in dem natürliche belüfteten Raum ebenfalls eine Schalldruckpegelmessung durchgeführt. Die Messung zeigt, dass der Schalldruckpegel sowohl bei gekippten als auch bei weit geöffneten Fenstern zwar steigt, den zulässigen Grenzwert von 35 dB(A) für natürliche belüftete Räume nicht überschreitet (Tabelle 62).

Die Fenster der Räume 13 und 16 sind zum Schulhof orientiert. Die Schalldruckpegelmessung fand nach Unterrichtsende gegen 16:00 Uhr statt, so dass sich keine Schüler auf dem Schulhof aufhielten. Die Lehrkräfte des Raumes 16 äußerten auf Rückfrage, dass sich in den Schulstunden ebenfalls keine Schüler im Schulhof aufhielten und eine Fensteröffnung ohne störende Geräuschemissionen möglich war.

**Tabelle 62 Messergebnis Schalldruckpegel GS HH Raum 16**

<b>Lüftungsszenario</b>	<b>Schalldruckpegel [dB(A)]</b>			
	<b>Messung 1</b>	<b>Messung 2</b>	<b>Messung 3</b>	<b>Mittelwert</b>
<i>Alle Fenster geschlossen</i>	25,7	25,1	25,2	<b>25,3</b>
<i>Alle Fenster gekippt</i>	27,0	26,4	26,8	<b>26,7</b>
<i>Alle Fenster weit geöffnet</i>	27,4	27,9	28,2	<b>27,8</b>

### 6.5.2.2 Schulzentrum Fallersleben (SZ FL)

**Raum 209:** Die Schüler und Lehrkräfte gaben in der Nutzerbefragung an, keinerlei akustische Einschränkungen aufgrund der dezentralen Lüftungsgeräte zu bemerken.

Die Messung des Schalldruckpegels (Tabelle 63) zeigt, dass die Grundlüftung mit 25,9 dB(A) in einem akustisch unauffälligen Bereich liegt. Die Booststufe des Gerätes mit 500 m<sup>3</sup>/h erreicht im Mittel einen Wert von 34,9 dB(A). Nach Aussage der Schüler wurde die Booststufe nur in den Pausen genutzt. Die Lehrer bestätigten, dass das Gerät in der ganzen Unterrichtszeit nicht so laut gewesen sei wie bei der Nutzung der Booststufe.

Somit kann auch das dezentrale Lüftungsgerät Typ B für den Einsatz in Schulklassen aus akustischer Sicht empfohlen werden.

*Tabelle 63 Messergebnis Schalldruckpegel SZ FL Raum 209 Lüftungsgerät Typ B*

Betriebsmodus der Lüftungstechnik	Schalldruckpegel [dB(A)]			
	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert
Lüftungsgeräte ausgeschaltet	23,7	22,3	23,4	<b>23,1</b>
Grundlüftung (250 m <sup>3</sup> /h)	26,4	25,4	25,8	<b>25,9</b>
Booststufe (500 m <sup>3</sup> /h)	34,6	35,1	35,0	<b>34,9</b>

**Raum 311:** Die Schüler und Lehrkräfte des Raumes 311 in Fallersleben äußerten sich in der Nutzerbefragung negativ zum Störgeräuschpegel des Lüftungsgerätes Typ C. Sie gaben an das Gerät nur auf Stufe 0 oder 1 betreiben zu können, da ab Stufe 2 der Störgeräuschpegel zu laut würde.

Der gemessene Schalldruckpegel des Lüftungsgerätes Typ C liegt in Stufe I bei durchschnittlich 31,9 dB(A) und in Stufe II bei 35,8 dB(A). In Stufe III emittiert das Lüftungsgerät Typ C einen Schalldruckpegel von 38,9 dB(A). Der zulässige Grenzwert von 40 dB(A) wird in keiner Stufe überschritten (Tabelle 64).

*Tabelle 64 Messergebnis Schalldruckpegel SZ FL Raum 311 Lüftungsgerät Typ C*

Betriebsmodus der Lüftungstechnik	Schalldruckpegel [dB(A)]			
	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert
Lüftungsgeräte ausgeschaltet	31,3	29,4	30,5	<b>30,4</b>
Stufe I (240 m <sup>3</sup> /h)	33,7	30,0	32,0	<b>31,9</b>
Stufe II (360 m <sup>3</sup> /h)	36,0	35,6	35,9	<b>35,8</b>
Stufe III (480 m <sup>3</sup> /h)	38,6	39,1	39,0	<b>38,9</b>

Die subjektive Wahrnehmung der Lehrkräften und Schülern unterscheidet sich von den Messwerten. Der Messwert in Stufe III zeigt jedoch, dass der Schalldruckpegel dem zulässigen Grenzwert sehr nahe ist und es ist nachvollziehbar, dass der Schalldruckpegel in der

Unterrichtszeit für Stillarbeiten als unangemessen empfunden wird. Der Einsatz des Lüftungsgerätes C in Klassenräumen kann aus akustischer Sicht nur eingeschränkt empfohlen werden.

**Raum 313:** Die Schüler und Lehrkräfte äußerten sich in der Nutzerbefragung negativ zum Störgeräuschpegel des Lüftungsgerätes Typ D.

Die Messung des Schalldruckpegels (Tabelle 65) zeigen einen Anstieg des Schalldruckpegels mit steigendem Luftvolumenstrom. Ein Luftvolumenstrom von 120 m<sup>3</sup>/h weist mit einem Schalldruckpegel von 38,8 dB(A) den höchsten Wert auf. Mit weiter steigendem Luftvolumenstrom sinkt der Schalldruckpegel auf knapp 35 dB(A). Der zulässige Grenzwert von 40 dB(A) wird in keiner Stufe überschritten.

Da die Schüler und Lehrkräfte angaben, dass der Schalldruckpegel des Lüftungsgerätes Typ D ebenfalls oberhalb von 120 m<sup>3</sup>/h als störend empfunden wurde, muss gefolgert werden, dass die Tonzusammensetzung (Impulshaltigkeit [90]) des Gerätes die Ursache ist.

**Tabelle 65 Messergebnis Schalldruckpegel SZ FL Raum 313 Lüftungsgerät Typ D**

<b>Betriebsmodus der Lüftungstechnik</b>	<b>Schalldruckpegel [dB(A)]</b>			
	<b>Messung 1</b>	<b>Messung 2</b>	<b>Messung 3</b>	<b>Mittelwert</b>
<i>Lüftungsgeräte ausgeschaltet</i>	26,8	25,7	25,3	<b>25,9</b>
<i>Luftvolumenstrom 80 m<sup>3</sup>/h</i>	33,1	30,7	30,0	<b>31,3</b>
<i>Luftvolumenstrom 100 m<sup>3</sup>/h</i>	36,8	35,3	34,0	<b>35,4</b>
<i>Luftvolumenstrom 120 m<sup>3</sup>/h</i>	40,2	39,8	36,3	<b>38,8</b>
<i>Luftvolumenstrom 140 m<sup>3</sup>/h</i>	36,2	38,5	33,3	<b>36,0</b>
<i>Luftvolumenstrom 160 m<sup>3</sup>/h</i>	37,5	35,7	32,2	<b>35,1</b>
<i>Luftvolumenstrom 180 m<sup>3</sup>/h</i>	36,5	35,4	32,8	<b>34,9</b>
<i>Luftvolumenstrom 200 m<sup>3</sup>/h</i>	37,8	36,5	34,1	<b>36,1</b>

Die subjektive Wahrnehmung der Lehrkräften und Schülern unterscheidet sich nicht signifikant von den Messwerten. Zwar wird der zulässige Grenzwert von 40 dB(A) in allen Luftvolumenstufen eingehalten, doch der Schalldruckpegel liegt ab einem Luftvolumenstrom von 100 m<sup>3</sup>/h im Mittel oberhalb von 35 dB(A). In der Unterrichtszeit und bei Stillarbeiten wird dieser Schalldruckpegel als unangemessen empfunden [4].

Das Lüftungsgerät Typ D ist für den Einsatz in Klassenräumen als mechanische Lüftungunterstützung aus akustischer Sicht nicht geeignet.

## 6.6 Auswertung der Wirtschaftlichkeitsberechnung

### 6.6.1.1 Eingangsdaten

Wie bereits in Kapitel 4.4 erläutert, erfolgt die Bewertung der Wirtschaftlichkeit in Form einer Vollkostenbetrachtung die alle jährlich entstehenden Kosten im Zusammenhang mit dem Betrieb der eingesetzten, mechanischen Lüftungssysteme berücksichtigt. Zur Vergleichbarkeit wird für die Berechnung die Belüftung des in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Beispielklassenraumes mit einer Grundfläche von 64 m<sup>2</sup> und einem Raumvolumen von 192 m<sup>3</sup> angenommen. Gefordert wird ein 3,5-facher Luftwechsel (28 m<sup>3</sup>/(h·Person)).

Die zentrale Lüftungsanlage und das dezentrale Lüftungsgerät Typ A können diesen Luftwechsel sicherstellen. Die dezentralen Lüftungsgeräte Typ B und Typ C stellen einen etwa 2,5-fachen Luftwechsel sicher. Es wird angenommen, dass zur Sicherstellung des 3,5-fachen Luftwechsels zusätzlich natürlich gelüftet wird. Aufgrund dieser Annahme werden sowohl das dezentrale Lüftungsgerät Typ B als auch das Lüftungsgerät Typ C für die Sicherstellung eines 3,5-fachen Luftwechsels in der weiteren Betrachtung als Systeme der Hybridlüftung betrachtet.

Die Lüftungsgeräte Typ C und D werden für die Auswertung der Wirtschaftlichkeit zwar aufgeführt und entsprechend berechnet, jedoch in der Bewertung und Empfehlung nicht weiter berücksichtigt, da die Geräte die geforderte Raumluftqualität und thermische Behaglichkeit nicht bereitstellen konnten und akustisch für den Einsatz in Schulen ungeeignet sind. Abb. 160 zeigt die Verteilung der mechanisch und natürlich zugeführten Luftmengen.

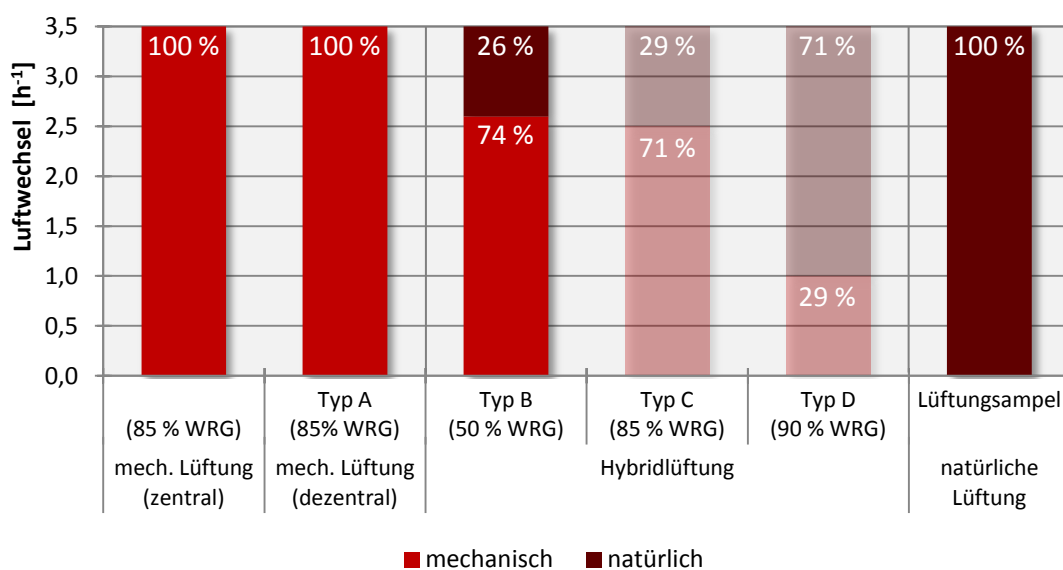


Abb. 160 Verteilung Luftmengen (3,5-facher Luftwechsel) Referenzräume

Für die Vollkostenbetrachtung werden die Kapitalkosten (Umrechnung der Investition in jährliche Annuitäten), die Verbrauchskosten (Brennstoffe, Hilfsenergie) und die Betriebskosten (Wartung, Reparaturen) angesetzt. Die Berechnung erfolgt nach der Annuitätenmethode nach DIN 2067 [84]. Die Wärmekosten werden auf Basis berechneter Energiebedarfswerte aus einem vergleichbaren Projekt [85] ermittelt. Die Stromkosten werden über die spezifischen Stromkennzahlen und Laufzeiten berechnet<sup>XIV</sup>. Es wird für die Nutzung der Lüftungsampel davon ausgegangen, dass diese permanent das ganze Jahr über angeschlossen und nicht vom Stromnetz getrennt wird. Für die Lüftungsanlagen wird eine Betriebszeit von 06:00 bis 15:00 Uhr an 200 Tagen im Jahr entsprechen der Angaben der DIN V 18599 [91] angesetzt.

Die Berechnung wird mit folgenden Annahmen durchgeführt:

- Betriebszeit/ Laufzeit: 1.800 h/a bei mechanischen Lüftungssystemen [91]
- Betriebszeit/ Laufzeit: 8.760 h/a bei der Lüftungsampel (Betrieb 24 h/d, 365 d/a)
- Kalkulatorischer Zinssatz: 4,3 %
- Teuerung Kapital und Betrieb: 3 %
- Energiepreissteigerung: 4,5 %
- Energiekosten: Wärme 0,065 EUR/kWh und Strom 0,25 EUR/kWh (Stand:11/2014 [92])
- Wartungskosten: 3,5 % der Investitionskosten
- Betrachtungszeitraum: 15 Jahre

#### 6.6.1.2 Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsberechnung

Das Ergebnis der Berechnung (Abb. 161) zeigt, dass die neu definierte Hybridlüftung mit dem Einsatz des Lüftungsgerätes Typ B die höchsten Jahresgesamtkosten aufweist. Die hohen Wärmekosten resultieren aus der zusätzlichen natürlichen Lüftung zur Einhaltung des 3,5-fachen Luftwechsels und dem im Vergleich geringen Wärmerückgewinnungsgrad von 50 %.

Der Einsatz des dezentralen Lüftungsgerätes Typ A ist bei einem Wärmerückgewinnungsgrad von 85% insgesamt lediglich 9 % günstiger, was auf die höheren Investitions-, Strom- und Betriebskosten zurückzuführen ist.

Die Gesamtkosten für die zentrale Lüftungsanlage sind gegenüber den dezentralen Lüftungsgerät Typ A um weitere 20 % reduziert. Die Investitions- und Betriebskosten sind deutlich geringer, die Strom- und Wärmekosten sind vergleichbar mit denen des Lüftungsgerätes Typ A. Somit stellt die zentrale Lüftungsanlage bei den mechanischen Lüftungssys-

---

<sup>XIV</sup> Die Wirtschaftlichkeitsberechnung findet sich in Anhang 9.

temen die wirtschaftlichste Variante dar.

Die natürliche Lüftung mit dem Einsatz einer Lüftungsampel und die zentrale, mechanische Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung sind aus wirtschaftlicher Sicht nahezu vergleichbar. Der Investitionsaufwand für die Installation und den Betrieb der notwendigen Technik ist bei der natürlichen Lüftung zwar signifikant geringer, doch die höheren Wärmekosten infolge höherer Lüftungswärmeverluste bei der natürlichen Lüftung führen insgesamt zu einer vergleichbaren Gesamtkostenbilanz.

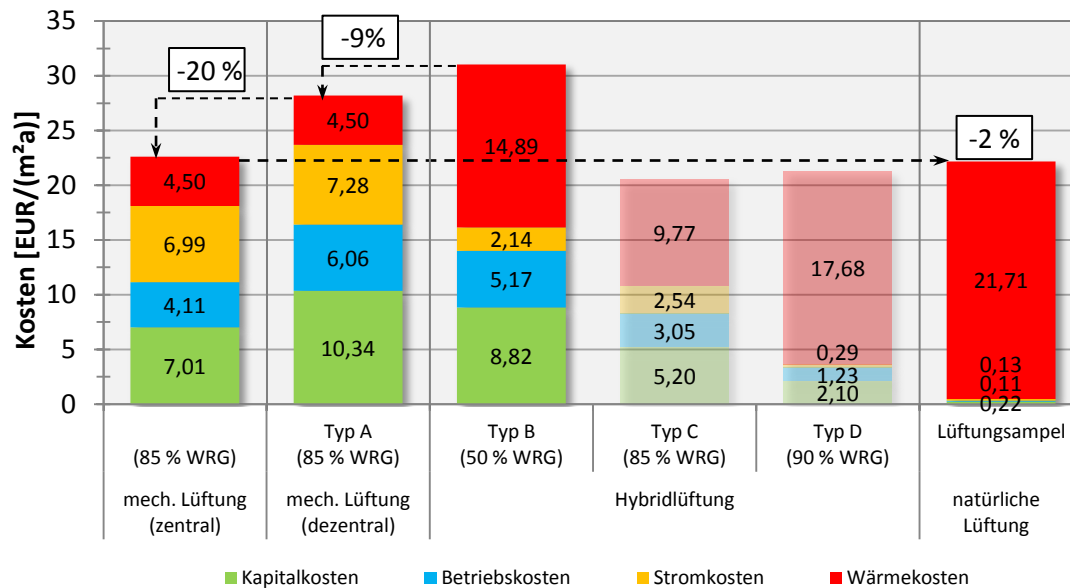


Abb. 161 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Referenzräume

Das Ergebnis zeigt, dass bei der geforderten Umsetzung eines 3,5-fachen Luftwechsels zentrale mechanische Lüftungsanlagen und eine natürliche Lüftung in Kombination mit einer Lüftungsampel vergleichbare Jahresgesamtkosten aufweisen. Der Einsatz dezentraler Lüftungsgeräte weist bei gleichen Bedingungen 9 bis 20 % höhere Jahresgesamtkosten auf.

Aus wirtschaftlicher Sicht ist der Einsatz zentraler mechanischer Lüftungsanlagen für den Einsatz in Schulen zu empfehlen. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass in Bildungsstätten, die im Zuge von Sanierungen nachträglich mit mechanischen Lüftungssystemen ausgerüstet werden, dezentrale Lüftungsgeräte besser geeignet sind, da die Integration einer zentralen Lüftungsanlage zusätzlichen Raum und einer umfangreichen Kanalführung bedarf.

Die Umsetzung einer natürlichen, motivierten Lüftung mit dem Einsatz einer Lüftungsampel aus wirtschaftlicher Sicht sowohl für den Neubau als auch für den Sanierungsfall zu empfehlen.



## 6.7 Bewertung der umgesetzten Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität

In Kapitel 5 wurden die individuellen Strategien zur Verbesserung der Luftqualität dargestellt und in Kapitel 6.3 anhand der Messdaten erläutert und bewertet. In Tabelle 66 werden sie erneut kurz zusammengefasst dargestellt.

*Tabelle 66 Übersicht der Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität*

<b>Gebäude</b>	<b>Raum</b>	<b>Maßnahme zur Verbesserung der Luftqualität</b>
GS HH	13	Erhöhung des Luftvolumenstroms, Verlängerung der Laufzeit
	16	Installation einer Lüftungsampel
SZ Fallersleben	209	Umstellung der Geräte von manueller auf automatisierte Steuerung, Veränderung der Laufzeiten der Geräte
	210	Keine Maßnahme
	211	Installation einer Lüftungsampel
	311	Keine Maßnahme
SZ Vorsfelde	313	Keine Maßnahme
	31	Umsetzung einer Nachtlüftung
GS BS	2.1	Lüftungsworkshop im Unterricht
TU BS	11.3	Umsetzung verschiedener Lüftungsstrategien
Kita WOB	GR	Ausgabe eines Lüftungsleitfadens

In diesem Kapitel werden alle Maßnahmen unter den betrachteten Aspekten gegenübergestellt und bewertet.

### 6.7.1 Die Schulen

#### 6.7.1.1 Grundschule Hamburg-Harburg (GS HH)

**Raum 13:** Die Raumluftqualität konnte mit der Installation des dezentralen Lüftungsgerätes Typ A deutlich verbessert werden. Die durchgeführte Veränderung des Luftvolumenstroms und der Verlängerung der Laufzeiten des Gerätes konnten darüber hinaus zu einer weiteren Verbesserung der Raumluft beitragen. So kann diese Maßnahme als erfolgreiche technische Lösung gewertet werden.

Die positive Wirkung des Einsatzes des Lüftungsgerätes Typ A wurde von den Schülern jedoch nicht wahrgenommen. Sie beurteilten die Raumluftqualität trotz gegenteiliger Messergebnisse neutral bis schlecht, vergleichbar dem Votum der Schüler des benachbarten Raumes 16. Lediglich die Lehrkraft stellte mit der Installation des Gerätes eine spürbare Verbesserung im Vergleich zu benachbarten Klassenräumen fest. Die umgesetzte Maßnahme (Erhöhung des Luftvolumenstroms, Verlängerung der Laufzeit) blieb unbemerkt.

Aus Nutzersicht ist ein mäßiger Erfolg erreicht worden, was auf eine fehlende Akzeptanz

der Geräte seitens der Nutzer zurückgeführt wird.

Das Ergebnis zeigt, dass dezentrale Lüftungsgeräte mit einem ausreichenden Luftvolumenstrom und einer zeitgesteuerten Laufzeit signifikant zu einer langfristigen Verbesserung der Raumlufthilfe beitragen können.

Wirtschaftlich betrachtet ist der Einsatz dezentraler Lüftungsgeräte mit 22 % erhöhten Jahresgesamtkosten gegenüber der natürlichen Lüftung verbunden.

**Raum 16:** Der Einsatz einer Lüftungsampel führte zu einer langfristigen Verbesserung der Raumlufthilfequalität, unabhängig von einer Einweisung der Schüler. Das Ergebnis zeigt, dass der Einsatz von Geräten zur Visualisierung der Luftqualität bei jungen Klassenstufen auch langfristig dazu beiträgt, die Raumlufthilfequalität nachhaltig zu verbessern. Das Nutzerempfinden wird geschärft. Jedoch müssen in dieser Maßnahme Einbußen in Bezug auf die thermische Behaglichkeit und ein erhöhter Heizwärmebedarf akzeptiert werden.

Die Jahresgesamtkosten mit dem Einsatz der Lüftungsampel kommen aufgrund erhöhter Lüftungswärmeverluste denen einer zentralen Lüftungsanlage gleich.

Die Nutzer beurteilten diese Maßnahme weitaus positiver als den Einbau des Lüftungsgerätes Typ A in Raum 13, da sie selbst einen aktiven Beitrag leisten. Die Reflektion des eigenen Handelns und der positive Effekt der mittels der Messergebnisse belegt wurde, bestätigten die Lehrkräfte und Schüler in der weiteren Umsetzung. So kann die motivierte Fensterlüftung vorbehaltlos positiv bewertet werden.

#### 6.7.1.2 Schulzentrum Fallersleben (SZ FL)

**Raum 209:** Das Ergebnis belegt, dass die Installation Lüftungsgerätes Typ B, das vor Unterrichtsbeginn manuell eingeschaltet werden musste, trotz hinreichender Einweisung der Nutzer, zu keiner Verbesserung der Raumlufthilfequalität führte. Erst die Korrektur der Laufzeiten des dezentralen Lüftungsgerätes und die Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Schwellwertes auf 1.000 ppm konnten zu einer Verbesserung der Raumlufthilfequalität beitragen.

Die positive Wirkung des Einsatzes des Lüftungsgerätes B wurde von den Schülern nach eigenen Angaben nicht wahrgenommen. Sie beurteilten die Raumlufthilfequalität neutral bis schlecht. Die Lehrkräfte bemerkten eine leichte Verbesserung. Demnach muss der Einsatz des Lüftungsgerätes B aus Nutzersicht durchschnittlich bewertet werden. Die fehlende Nutzerakzeptanz der Geräte führte zu einer Fehleinschätzung der Wirkungsweise der Lüftungsgeräte.

Das Ergebnis zeigt, dass ein dezentrales Lüftungsgerät nur dann zu einer langfristigen Verbesserung der Raumlufthilfequalität beitragen kann, wenn die Steuerung nutzerunabhängig und

zeitgerecht erfolgt.

**Raum 211:** Der Einsatz einer Lüftungsampel führte auch bei den älteren Klassenstufen zu einer positiven Veränderung der Raumluftqualität. Die Schüler beurteilten den Einsatz der Lüftungsampel positiv. Die Schüler weiterer Klassenräume fragten, ob auch ihre Klasse eine derartige Visualisierung erhalten könne. Diese Reaktion bestätigt die Akzeptanz der Lüftungsampel und so kann die Zuweisung von Verantwortlichkeit insgesamt positiv bewertet werden.

**Raum 311:** Der Einsatz der dezentralen Lüftungsgerätes C führte zu keiner Verbesserung der Raumluftqualität. Die Messergebnisse zeigen einen ähnlichen Verlauf der Werte wie die eines natürlich belüfteten Klassenraumes. Demnach ist die alleinige Installation nicht ausreichend, um einen positiven Einfluss auf das Lernumfeld ausüben zu können. Das Gerät konnte aus akustischen Gründen nur in Stufe 0 (CO<sub>2</sub>-Regelung) betrieben werden. Folglich muss der Einsatz des Lüftungsgerätes C als erfolglos und für Klassenräume als ungeeignet bewertet werden. Die reine Installation von mechanischen Systemen führt nicht ausdrücklich zu einem positiven Einfluss auf die Raumluftqualität.

**Raum 313:** Die Installation des dezentralen Lüftungsgerätes Typ D als Ergänzung zur natürlichen Lüftung (Hybridlüftung) hatte keinen positiven Einfluss auf die Raumluftqualität. Das Gerät konnte aus akustischen Gründen nicht oder nur mit zu geringem Luftvolumenstrom betrieben werden.

Die Beurteilung der Schüler und Lehrkräfte hinsichtlich des Einsatzes der Lüftungsgerätes D deckt sich mit den Messergebnissen. Die Nutzer beurteilten die Raumluftqualität im Klassenraum schlecht und äußerten sich ebenfalls negativ zum Schalldruckpegel des Lüftungsgerätes Typ D.

Das Ergebnis zeigt, dass der Einsatz von dezentralen Lüftungsgeräten mit einem geringen Luftvolumenstrom, wie er für Wohnräume angewendet wird, in einem Konzept zur Hybridlüftung nicht funktioniert. Ein 0,5-facher bis 1-facher Luftwechsel reicht nicht aus, um der geforderten CO<sub>2</sub>-Konzentration für Kategorie A, bedingt durch die hohe Belegungsdichte in Bildungsräumen, gerecht zu werden. Folglich ist das Lüftungsgerätes Typ D ungeeignet für den Einsatz in Bildungsstätten mit hoher Belegungsdichte.

### 6.7.1.3 Schulzentrum Vorsfelde (SZ VF)

**Raum 31:** Die zentrale Lüftungsanlage gewährleistet die Einhaltung der Kategorie A sowohl für die Raumluftqualität als auch für die thermische Behaglichkeit. Die Lüftungsanlage in

Vorsfelde bot im Ausgangszustand nur wenig Verbesserungspotential, da die Raumluftqualität bereits dauerhaft unterhalb des Grenzwertes von 1.000 ppm gehalten wurde.

Die Einführung einer Nachtlüftung konnte einen leicht positiven Einfluss auf die Raumlufttemperaturen nehmen. Daher wird die Maßnahme als erfolgreich bewertet. Dieses Ergebnis zeigt sich auch in der Einschätzung der Schüler. Die Schüler bewerteten die zentrale Lüftungsanlage nach der Umsetzung der Nachtlüftung positiv. Sie gaben an eine Verbesserung der Raumluftqualität festgestellt zu haben. Dieses Ergebnis resultiert auch aus der umfangreichen Informationsweitergabe der Lehrer an die Schüler. Die Schüler wurden detailliert über die Maßnahmen informiert, was zu einer erhöhten Nutzerakzeptanz für die Lüftungsanlage führte.

Das Ergebnis zeigt, dass der Einsatz zentraler Lüftungsanlagen in Schulen eine angemessene Raumluftqualität und thermische Behaglichkeit bereitstellen und einhalten kann.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Kapitel 6.6) zeigt, dass der Betrieb einer zentralen Lüftungsanlage nahezu die gleichen Jahresgesamtkosten gegenüber der natürlichen Lüftung aufweist und in diesem Zusammenhang nicht nachteilig zu bewerten ist.

#### **6.7.1.4 Grundschule Braunschweig (GS BS)**

**Raum 2.1:** Das Ergebnis zeigt, dass die selbstständige Erarbeitung und Einschätzung der eigenen Leistungsfähigkeit in Bezug zur Raumluftqualität einen positiven Einfluss auf das Lüftungsverhalten hat. Die Maßnahme in Form eines Workshops unter Einbezug der Schüler und der selbstständigen Erarbeitung von optimierten Lüftungskonzepten wird positiv bewertet und ist als Maßnahme zur Verbesserung der Raumluftqualität geeignet.

#### **6.7.2 Die Kindertagesstätte (Kita WOB)**

Die Ausgabe eines Lüftungsleitfadens konnte den Betreuerinnen zwar die vorhandene Problematik vor Augen führen, doch als Verbesserungsmaßnahme für die Raumluftqualität war der Leitfaden nicht effektiv. Die Betreuerinnen gaben, an aufgrund des erhöhten Betreuungsaufwandes keine regelmäßige Fensterlüftung praktizieren zu können.

Die subjektive Einschätzung der Betreuerinnen zur Raumluftqualität unterschied sich deutlich von den Messergebnissen. Sie beurteilten die Raumluftqualität um zwei Kategorien besser als tatsächlich vorhanden. Diese Fehleinschätzung trug dazu bei, dass keine signifikante Änderung in Bezug auf das Lüftungsverhalten eintrat. Eine Nutzersensibilisierung konnte durch die Ausgabe der Messergebnisse in dem Leitfaden nicht zufriedenstellend erreicht werden.

Zusammenfassend muss diese Maßnahme für die natürliche Lüftung in Kindertagesstätten

als gescheitert gewertet werden.

### **6.7.3 Die Universität Braunschweig (TU BS)**

Der Einsatz eines Ventilators zur mechanischen Lüftungsunterstützung führte zu einer eindeutigen Verbesserung der Raumluftqualität im Hörsaal 11.3.

Die an den Feldstudien teilnehmenden Studenten reagierten insgesamt jedoch skeptisch auf die verschiedenen Lüftungsszenarien. Die subjektive Einschätzung des Raumklimas wurde dabei fast ausschließlich von den Raumtemperaturen beeinflusst. Die Studierenden klagten zum Teil über kalte Zugluft und beurteilten die Raumluftqualität aufgrund dessen negativ. Lediglich die Lüftungspause wurde von allen Studierenden positiv aufgenommen.

Die provisorische und doch positive Maßnahme muss auf nutzerorientierter Ebene als mäßig erfolgreich bewertet werden, da die Nutzerakzeptanz für den in die Tür eingebauten Ventilators nicht gegeben war. Für eine dauerhafte Praxislösung sollte eine konditionierte, mechanische Belüftung eingesetzt werden.

In Bildungsstätten mit großen Raumvolumina wie die Hörsäle einer Universität ist der Einsatz zentraler Lüftungsanlagen zwingend notwendig, da die Nutzer kein Gefühl für die Raumluftqualität besitzen und es keine für die Raumluftqualität verantwortlichen Personen gibt. Die Nutzer verlassen die Hörsäle nach den Vorlesungen und eine natürliche Lüftung findet nicht statt. Die Feldversuche im Hörsaal 11.3 zeigen, dass die Studenten keine Ambitionen hatten, selbst vor der Vorlesung für eine ausreichende Raumluftqualität zu sorgen, obwohl sie feststellten, dass die Raumluft zu Beginn der Vorlesung bereits verbraucht war. Eine natürliche Lüftung die den aktiven Einsatz der Nutzer voraussetzt, ist in Hörsälen nicht umsetzbar, da die Nutzer sich dort nur relativ kurz aufhalten und keine Verantwortung für den Raum übernehmen. Im Feldversuch wurde die natürliche Lüftung aufgrund der niedrigen Außentemperaturen negativ bewertet.

Dieses Ergebnis deckt sich mit den Ergebnissen der Nutzerbefragung aus Kapitel 6.4.3. Wie bereits ausführlich in Kapitel 6.3 beschrieben, bedarf es beim Einsatz mechanischer Lüftungssysteme in jedem Fall einer regelmäßigen Kontrolle oder eines Monitorings zum Raumklima, um Fehlfunktionen erkennen und gegebenenfalls Maßnahmen vornehmen und zu können.

## 6.8 Auswertungen der Tests zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit

Der unter Kapitel 4.5 beschriebene Leistungstest wurde im Schulzentrum Fallersleben parallel in fünf Klassen der Stufen sieben bis neun mit 104 Schülern umgesetzt.

### 6.8.1 Randbedingungen an den Testtagen

Die Durchführung des Tests erfolgte an zwei Tagen je zweimal während der Unterrichtszeit, jeweils zu Unterrichtsbeginn (Test 1.1/ 2.1) und zum Unterrichtsende (Test 2.1/ 2.2). Zwischen den Testtagen (Tag 1 und Tag 2) lag ein zwei-wöchiger Abstand. Die Durchführung der Tests erfolgte an beiden Tagen bei unterschiedlichen Lüftungsszenarien (Tabelle 67). Mit der Wiederholung der Tests lässt sich der Leistungszugewinn von Test 1.1 (2.1) zu Test 1.2 (2.2) über den Verlauf des Schultages ermitteln.

*Tabelle 67 Durchführung der Leistungstests*

Tagesablauf		Tag 1	Tag 2 (2 Wochen später)
1	07:50 - 08:35 Uhr	Durchführung Test 1.1 vor Unterrichtsbeginn	Durchführung Test 2.1 vor Unterrichtsbeginn
2	08:40 - 09:25 Uhr	Ausschaltung der Lüftungsgeräte, keine Fensterlüftung	Konstanter Betrieb der Lüftungsgeräte, Fensterlüftung in der Unterrichtszeit und in den Pausen
3	09:40 - 10:25 Uhr		
4	10:30 - 11:15 Uhr		
5	11:35 - 12:20 Uhr		
6	12:25 - 13:10 Uhr	Durchführung Test 1.2 nach Unterrichtsende	Durchführung Test 2.2 nach Unterrichtsende

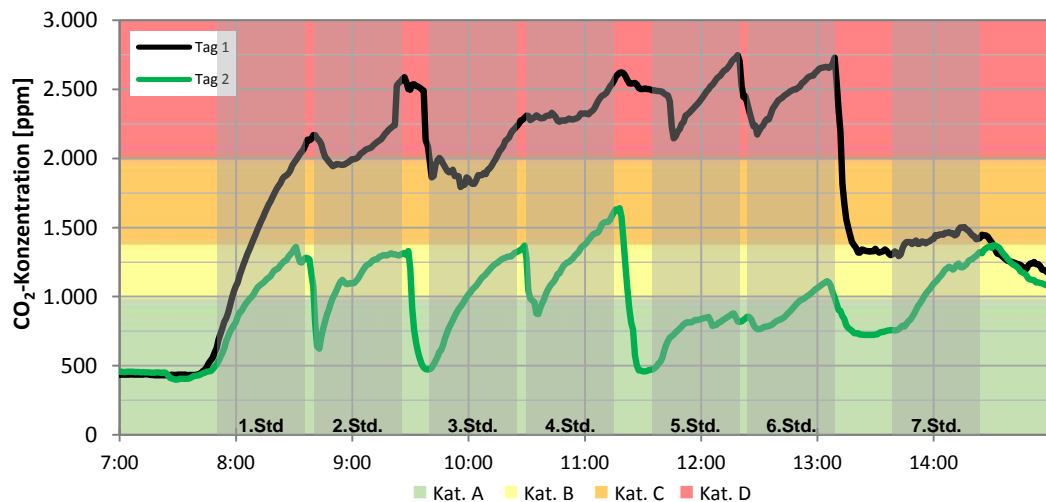
An beiden Testtagen hielten sich die Schüler über den Schultag im Klassenraum auf und verließen ihn nur zu den großen Pausen.

Die Außentemperatur lag an Tag 1 im Tagesmittel bei 7 °C und an Tag 2 bei 1 °C.

An Tag 1 fand keine kontinuierliche Fensterlüftung statt. Die dezentralen Lüftungsgeräte wurden nicht betrieben, so dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration meist in Kategorie D (> 2.000 ppm) lag. Die Fenster sollten nur kurz in den Pausen geöffnet werden, um CO<sub>2</sub>-Spitzen oberhalb von 3.000 ppm vorzubeugen.

An Tag 2 wurde mittels regelmäßiger Fensterlüftung während der Schulstunden und in den Pausen eine Raumluftqualität unterhalb der Grenze von 1.400 ppm angestrebt. In den Räumen mit mechanischer Lüftungstechnik wurden die Geräte während der Unterrichtszeit kontinuierlich betrieben. Für die Auswertung der Messdaten werden Mittelwerte der gemessenen Daten aller fünf Räume genommen und zusammengefasst jeweils pro Tag dargestellt.

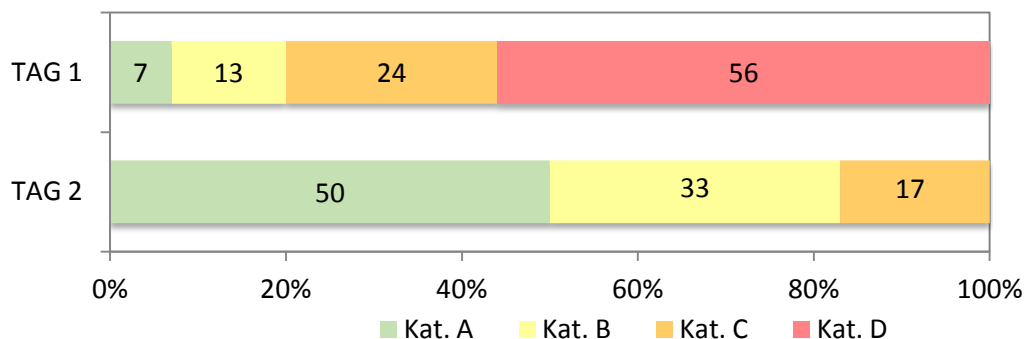
Abb. 162 zeigt den deutlichen Unterschied der Verläufe der CO<sub>2</sub>-Konzentration an den beiden Unterrichtstagen. Am ersten Tag ohne regelmäßige Lüftung überstiegen die Werte bereits in der ersten Unterrichtsstunde den Grenzwert von 2.000 ppm (Kategorie D) und blieben über den ganzen Unterrichtstag oberhalb dieses Grenzwertes. Am zweiten Tag konnten die regelmäßig durchgeführte Fensterlüftung und der Betrieb der Lüftungsgeräte dazu beitragen, die CO<sub>2</sub>-Konzentration in den Klassenräumen in etwa der Hälfte der Unterrichtszeit unterhalb des Grenzwertes von 1.000 ppm (Kategorie A) zu halten.



**Abb. 162 Messergebnisse CO<sub>2</sub>-Konzentration Testtag 1 + Testtag 2**

Die prozentuale Verteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration zeigt, dass am ersten Tag 56 % der Unterrichtszeit oberhalb des Grenzwertes von 2.000 ppm (Kategorie D) lagen.

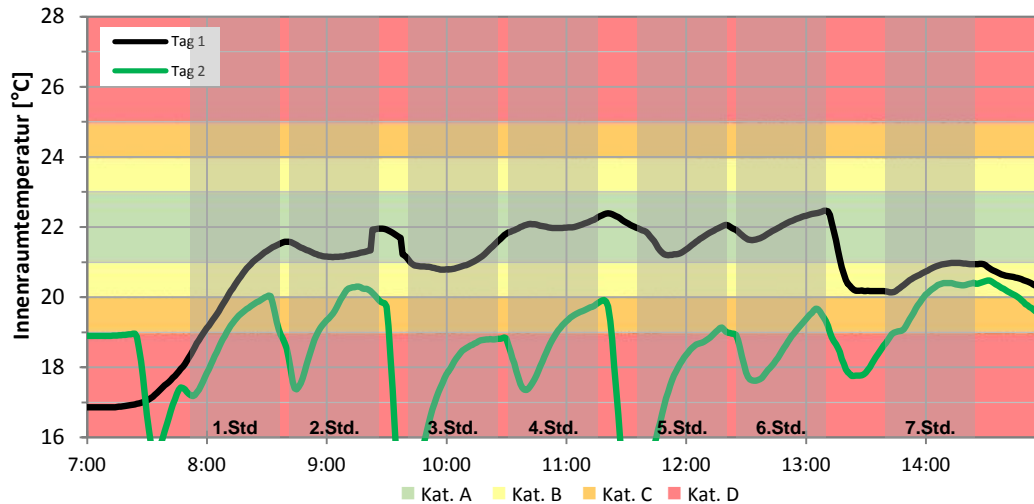
Am zweiten Tag konnten mittels der kontinuierlichen Lüftung 50 % der Unterrichtszeit unterhalb des Grenzwertes von 1.000 ppm gehalten werden. Die Werte erreichten den Grenzwert von 2.000 ppm (Kategorie D) nicht.



**Abb. 163 Verteilung CO<sub>2</sub>-Konzentration Tag 1 + Tag 2**

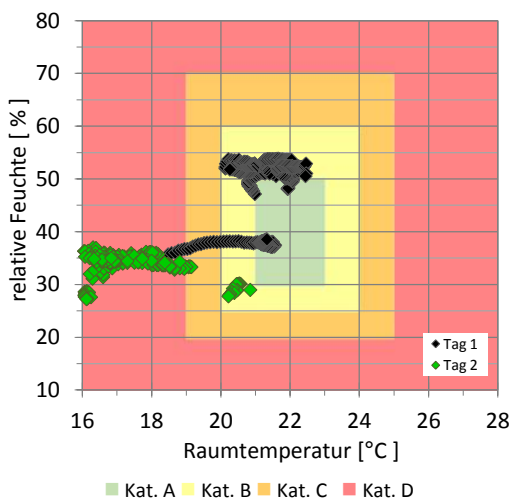
Abb. 164 (Seite 146) zeigt die Messwerte der Raumlufttemperaturen der beiden Tage. Am ersten Tag wurde die Raumlufttemperatur fast ununterbrochen in Kategorie A (21-23 °C)

gehalten. Die Außenlufttemperatur war am zweiten Testtag um 6 °C kälter als am ersten Tag. Demzufolge mussten am zweiten Tag aufgrund der regelmäßigen Fensterlüftung hohe thermische Einbußen hingenommen werden. Die Innenraumtemperatur sank zum Teil bis auf unter 16 °C.



**Abb. 164 Messergebnisse Temperaturen Tag 1 + Tag 2 SZ Fallersleben - Alle Räume**

Am ersten Tag wurden die Anforderungen der thermischen Behaglichkeit der Kategorien A bis C erfüllt (Abb. 165). Am zweiten Tag lagen die Werte überwiegend in Kategorie C und D.



**Abb. 165 Thermische Behaglichkeit Tag 1 + Tag 2 SZ Fallersleben - Alle Räume**

Die prozentuale Verteilung der Werte zur thermischen Behaglichkeit (Abb. 166, Seite 147) bestätigt, dass am ersten Tag 42 % der gemessenen Werte in der Unterrichtszeit in Kategorie A lagen. Der Anteil der gemessenen Werte in Kategorie D betrug 2 %.

Am zweiten Tag lagen 54 % der Unterrichtszeit in Kategorie D. Es konnten keine Werte für Kategorie A nachgewiesen werden.



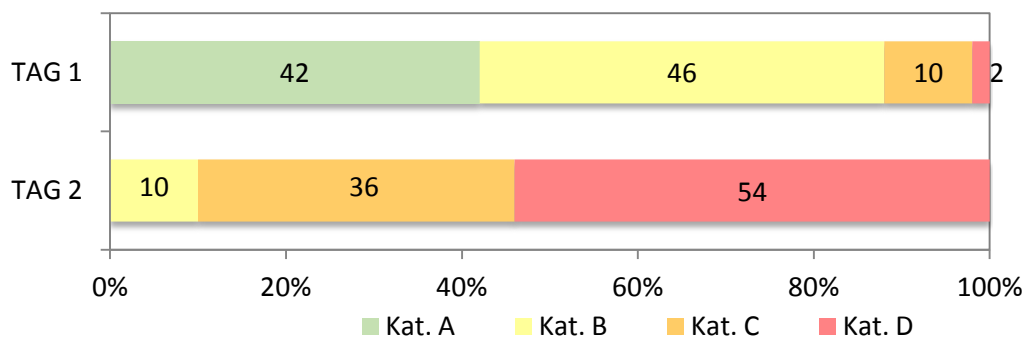


Abb. 166 Verteilung Thermische Behaglichkeit Tag 1 + Tag 2 SZ Fallersleben – Alle Räume

Die bewusst vermiedene Lüftung an Tag 1 führte zu sehr hohen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Unterrichtsverlauf. Die thermische Behaglichkeit an Tag 1 war akzeptabel. Die konsequent durchgeführte, natürliche Lüftung und der Betrieb der dezentralen Lüftungsgeräte an Tag 2 konnten eine akzeptable Raumluftqualität sicherstellen. Allerdings mussten beträchtliche Einschränkungen in der thermischen Behaglichkeit toleriert werden.

### 6.8.2 Ergebnisse der Leistungstests

Die Ergebnisse der durchgeführten Leistungstests (Abb. 167) zeigen einen Leistungsabfall der Schüler am ersten Tag. Unter schlechten Luftbedingungen zeichnete sich ein Leistungsabfalls von -1,6 % ab. Die Schüler machten mehr Fehler und die Anzahl der ausgefüllten Felder sank.

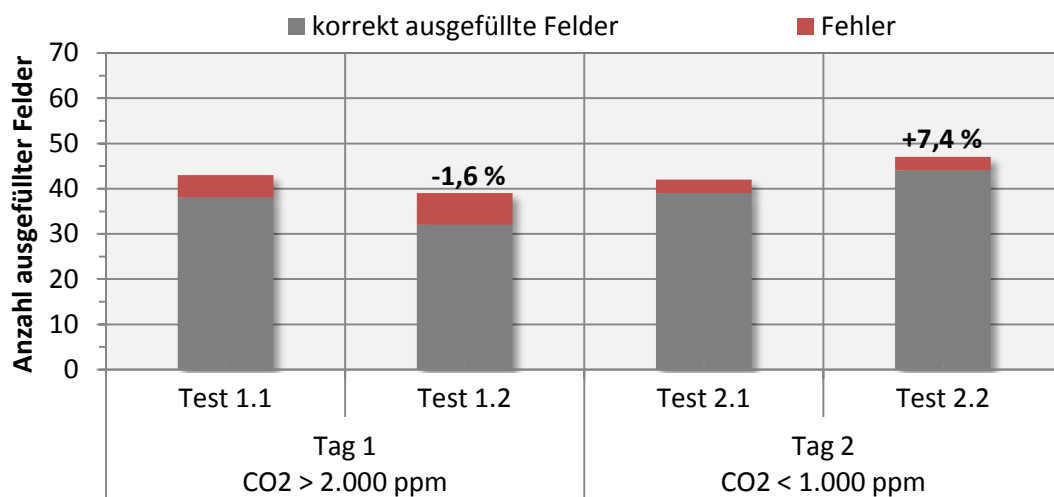


Abb. 167 Ergebnisse der Leistungstests

Obwohl die Schüler weder über Unwohlsein noch eine schlechte Raumluftqualität klagten, ist die Abnahme der Schülerleistung mit steigendem CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Raumluft eindeutig nachgewiesen.

Am zweiten Tag mit kontinuierlicher Lüftung konnte hingegen ein Leistungszuwachs zwischen den beiden Tests von 7,4 % ermittelt werden. Die Schüler klagten allerdings zum Teil über eine zu kalte Raumlufttemperatur.

Wie bereits unter Kapitel 2.3 erläutert, wurde bereits nachgewiesen, dass auch eine reduzierte Raumlufttemperatur einen positiven Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Schüler hat [87][93]. Die aufgezeigten Studien belegen, dass eine Reduzierung der Raumtemperatur um 1 °C zu einer 2 bis 4 %igen Leistungssteigerung führt. In diesem Zusammenhang wird in Frage gestellt, welche Messgröße den stärkeren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Schüler hatte, da sowohl die CO<sub>2</sub>-Konzentration als auch die Raumlufttemperatur am zweiten Tag wesentlich reduziert waren.

Die Annahme einer stark reduzierten Leistungsfähigkeit bei hohen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (> 2.000 ppm) in der Unterrichtszeit wird mit diesem Ergebnis eindeutig bestätigt.

### 6.8.3 Ableitung der Einflussgrößen für Leistungsfähigkeit

Die Einzelauswertung der Luftqualität Räume zu den Leistungstests (Abb. 168) zeigt, dass mit der Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Konzentration ein Leistungszuwachs der Schüler eintritt. Für die Auswertung wird eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von 2.000 ppm (Kategorie D) mit 100 % gleichgesetzt.

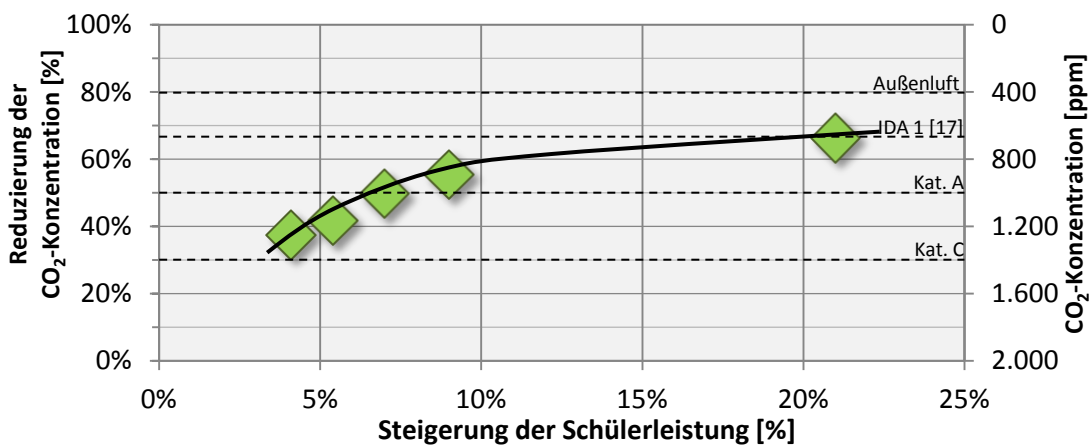


Abb. 168 Einfluss CO<sub>2</sub>-Konzentration Leistungsfähigkeit

Bei einer Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Konzentration um 38 % auf einem Wert von etwa 1.200 ppm wird eine Leistungssteigerung von 4 % erreicht. Eine Reduzierung von 50 % auf etwa 1.000 ppm führt zu einer Leistungssteigerung von 7 %. Die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Unterrichtszeit um 65 % auf einen Wert von etwa 700 ppm führte zu einer Leistungssteigerung von über 20 %. Die Tendenz der Leistungssteigerung zeigt auf, dass die maximale Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Konzentration bei 65 % auf 700 ppm annähernd erreicht ist. Eine derartige Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Konzentration entspricht den Anforderungen nach IDA 1 der

DIN EN 13779 [19] und einem konstanten Luftvolumenstrom von  $72 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{Person})$ . Für den Beispielraum mit  $192 \text{ m}^3$  Raumvolumen und einer Belegung von 26 Personen entspricht dies einem 9,8-fachen Luftwechsel.

Die Einzelauswertung der Raumlufttemperatur der Räume zu den Leistungstests (Abb. 169) zeigt, dass der Leistungszuwachs ebenfalls mit der Reduzierung der Raumlufttemperatur korreliert. 100 % der Raumlufttemperatur entsprechen bei der Auswertung  $22 \text{ °C}$ . Bis zu einer Reduzierung von 20 % auf einen Wert von knapp  $18 \text{ °C}$  ergibt sich eine Leistungssteigerung. Bei einer weiteren Reduzierung auf  $16,7 \text{ °C}$  stellt sich jedoch ein Rückgang in der Leistungssteigerung ein. Dieses Ergebnis lässt darauf schließen, dass eine zu starke Reduzierung der Raumlufttemperatur zu hohen Einschränkungen und einem unzureichenden thermischen Umfeld führt. Der untere Grenzwert zur Steigerung der Leistungsfähigkeit reduzierter Raumlufttemperaturen liegt mit  $18 \text{ °C}$  jedoch deutlich tiefer als in den Regelwerken in Kapitel 2.4 beschrieben und in Kapitel 2.5.2 für die Kategorisierung übernommen wurde.

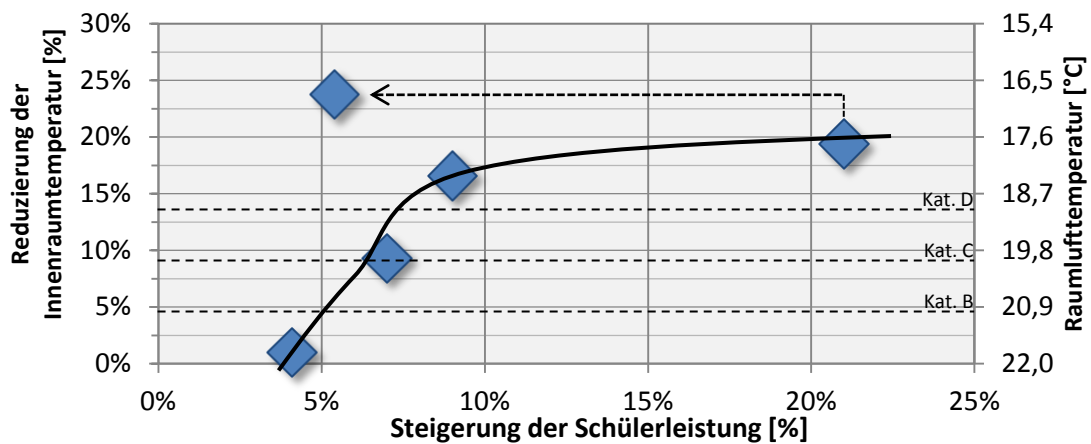


Abb. 169 Einfluss Raumlufttemperatur Leistungsfähigkeit

Es muss darauf hingewiesen werden, dass die Testergebnisse mit einer Personenanzahl von 104 Schülern nicht in dem Maße repräsentativ sind wie die vorab angeführten, vergleichbaren Studien. Ein Einfluss auf die Schülerleistung konnte jedoch sowohl für die Raumluftqualität als auch für die thermische Behaglichkeit nachgewiesen werden.

## 7 VERIFIZIERUNG DER HYPOTHESEN UND DISKUSSION

Die Ergebnisse des Projektes werden folgend vor dem Hintergrund der unter Kapitel 3 aufgestellten Hypothesen diskutiert.

**Hypothese [1] Die freie Belüftung über die Fenster wird trotz umfangreicher Studien und dem mehrfach nachgewiesenen Einfluss der Raumluftqualität auf die Schülerleistung in Klassenräumen nicht ausreichend umgesetzt.**

Es hat sich gezeigt, dass das Lüftungsverhalten in den untersuchten Klassenzimmern ungeachtet der Altersstufen der Schüler besonders in den Wintermonaten stark eingeschränkt ist. Die Raumluftqualität nimmt mit fallenden Außenlufttemperaturen ab, da die Schüler und Lehrkräfte aufgrund der Einschränkung der thermischen Behaglichkeit die Fenster weniger häufig öffnen. In den Sommermonaten hingegen findet eine regelmäßige und konsequent durchgeführte natürliche Lüftung in allen untersuchten Klassenräumen statt. Auf Basis dieser Ergebnisse kann die Hypothese für die Heizperiode (Winter) bestätigt werden.

**Hypothese [2] Eine Nutzerschulung oder Sensibilisierung zur natürlichen Lüftung bringt nur kurzfristig Erfolg und kann langfristig keine Verbesserung des Lüftungsverhaltens erzielen.**

Mit Einsatz der Lüftungsampel werden häufiger und mehr Fenster geöffnet als ohne die Lüftungsampel. Zu beobachten ist dabei eine eindeutige Einstiegsphase in der das Lüften intensiv vorgenommen wird und nach etwa zwei Monaten nachlässt. Langfristig bleibt die Kontinuität des Lüftens bestehen. Mit diesen Ergebnissen kann die These gestützt werden, dass eine „*motivierter Fensterlüftung*“ mit dem Einsatz einer Lüftungsampel praktikabel und auch im Langzeiteinsatz effektiv ist. Die Raumluftqualität konnte über den Beobachtungszeitraum von mehr als 12 Monaten und über die Heizperiode hinaus in mindestens 50 % der Unterrichtszeit unterhalb von 1.000 ppm und in maximal 10 % oberhalb von 2.000 ppm gehalten werden.

Der umgesetzte Workshop konnte ebenfalls zu einer Verbesserung der Raumluftqualität beitragen. Aufgrund der intensiven Auseinandersetzung mit der Lüftungsthematik wurden die Schüler sensibilisiert und führten selbstständig eine ausreichende Lüftung aus.

In der Kindertagesstätte brachte die Ausgabe eines Leitfadens zur motivierten Raumlüftung mit Information zu den gemessenen Werten im Gruppenraum und der CO<sub>2</sub>-Belastung auf das Wohlbefinden der Kinder keine Veränderung des Nutzerverhaltens. Nach Angabe der Betreuer ist eine motivierte oder zeitlich geplante Lüftung in den Gruppenräumen aufgrund

der intensiven Kinderbetreuung nicht umsetzbar. Die Installation einer Lüftungsampel wurde abgelehnt.

***Insofern muss die Hypothese umformuliert werden: Eine Nutzerschulung und Sensibilisierung zur natürlichen Lüftung mittels des Einsatzes einer Lüftungsampel oder eines Workshops führt in Schulen zu einer langfristigen Verbesserung des Lüftungsverhaltens.***

**Hypothese [3] Die Installation von raumlufttechnischen Anlagen – unabhängig ob zentral oder dezentral – führt in jedem Fall zu einer Verbesserung der Raumluftqualität und zu einer Steigerung des Wohlbefindens.**

Zentrale Lüftungsanlagen stellen sowohl eine gute Raumluftqualität und eine akzeptable thermische Behaglichkeit sicher. Sie können auch akustisch uneingeschränkt empfohlen werden können. Für den Einsatz dezentraler Lüftungsgeräte konnte nachgewiesen werden, dass die bloße Installation nicht per se zu einer Verbesserung der Raumluftqualität führt. Verschiedene Faktoren beeinflussen den erfolgreichen Einsatz dezentraler Lüftungstechnik.

- Die Geräte müssen einen 3,5-fachen Mindestluftwechsel (entspricht  $28 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{Person})$ ) und eine akzeptable thermische Behaglichkeit sicherstellen können.
- Die Lüftungsgeräte müssen zeitgesteuert eingeschaltet und konstant über die Unterrichtszeit betrieben werden.
- Die Geräte dürfen den zulässigen Schalldruckpegel von 35 dB(A) unabhängig vom Luftvolumenstrom nicht überschreiten. Eine Schalldruckpegelmessung bei Inbetriebnahme ist erforderlich.
- Die Nutzer müssen intensiv über Funktionsweise der Lüftungsgeräte informiert werden. Erfolgt mit der Installation von dezentralen Lüftungsgeräten keine Einführung der Nutzer ist die Akzeptanz entscheidend reduziert.
- Bei dezentralen Lüftungsgeräten müssen regelmäßig im Betrieb die Laufzeiten, Luftvolumenströme, Raumlufttemperaturen und  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen geprüft werden.

***Die Hypothese sollte daher neu formuliert werden: Die Installation von dezentralen Lüftungsgeräten oder zentralen Lüftungsanlagen führt zu einer Verbesserung der Raumluftqualität und der Schülerleistung, sofern ein 3,5-facher Luftwechsel umgesetzt und eine akzeptable thermische Behaglichkeit sichergestellt werden kann. Regelmäßige Kontrollen zur Laufzeit und ein Monitoring zur Raumluftqualität, zur thermischen Behaglichkeit und zur Akustik sind in diesem Zusammenhang sowohl für dezentrale Lüftungsgeräte als auch für zentrale Lüftungsanlagen notwendig.*** Die wissenschaftliche Begleitung eines Sanierungsprojekt [94] in Form eines zwei-jährigen Monitorings hat bereits gezeigt, dass bei kon-

stanter Überwachung und Prüfung nachweislich die Raumlufthqualität und die thermische Behaglichkeit verbessert werden konnten.

**Hypothese [4] Für Bildungseinrichtungen ist eine nutzerabhängige Regelung der raumlufthtechnischen Anlagen besser geeignet als eine Zeitsteuerung, da eine Anpassung der Volumenströme entsprechend der Belegung umgesetzt werden kann.**

Die Befragungen haben gezeigt, dass die subjektive Empfindung keine Beurteilung der Raumlufthqualität zulässt. Der geforderte Nutzereinfluss mit einer täglichen Einschaltung der Geräte zu Unterrichtsbeginn ist nicht praktikabel. Die Nutzer vergessen häufig die Geräte einzuschalten, so dass eine konstante Verbesserung der Raumlufthqualität nicht eintritt.

Die vom Hersteller beabsichtigte bedarfsorientierte Regelung der Laufzeit der Lüftungsgeräte über eine manuelle Einschaltung der Geräte muss somit als ungeeignet beurteilt werden. Eine konsequente Belüftung über die mechanischen Lüftungsgeräte oder –anlagen kann ausschließlich mittels einer zeitlichen Steuerung und einer CO<sub>2</sub>-Regelung der Geräte erzielt werden.

***Die Hypothese sollte auf Grundlage der Ergebnisse dieser Arbeit neu formuliert werden: Eine nutzerabhängige Steuerung ist in Schulen nicht geeignet. Nur eine automatisierte, zeitliche Steuerung der Geräte kann langfristig zu einer Verbesserung der Raumlufthqualität führen. Die Belegungspläne der Räume müssen individuell auf die Laufzeiten der Geräte angepasst werden um einen unnötigen Betrieb in unbelegten Stunden zu vermeiden.***

**Hypothese [5] Die Anforderungen von Klassenzimmerlüftung sind auf die Belüftung von Hörsälen und Seminarräumen in Universitäten übertragbar.**

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass für die Verbesserungsstrategien zur Belüftung von Bildungsstätten zwischen Schulen und Universitäten unterschieden werden muss. Die Nutzung und Belegung der Räume unterscheiden sich erheblich und können nicht miteinander verglichen werden. In Universitäten ist die Belegung deutlich höher und die Nutzer wechseln die Räume nach den Vorlesungen.

Das Verantwortungsbewusstsein der Nutzer für die Raumlufthqualität ist stark vom Alter abhängig und in diesem Zusammenhang maßgeblich verschieden. In den Hörsälen und Seminarräumen der Universität fühlen sich die Studierenden nicht für das Raumklima verantwortlich und sind nicht bereit, im Anschluss an eine Vorlesung Lüftungsmaßnahmen durchzuführen. In den untersuchten Schulen waren die jüngeren Schüler freiwillig bereit, Lüftungsdienste zu übernehmen und selbst für eine gute Raumlufthqualität Verantwortung zu

tragen.

Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass eine natürliche Lüftung aufgrund der hohen Belegungsdichte keine akzeptablen Werte für Hörsäle hinsichtlich der Raumluftqualität und der thermischen Behaglichkeit sicherstellen kann.

***Bezogen auf die vorliegenden Ergebnisse muss die Hypothese daher neu formuliert werden: Die Anforderungen von Klassenzimmerlüftung sind nicht auf die Belüftung von Hörsälen in Universitäten übertragbar. Eine ausreichende Belüftung der Hörsäle kann nur mittels mechanischer Belüftung sichergestellt werden.***

**Hypothese [6] Eine mechanische Belüftung von Kindertagesstätten und Kindergärten ist nicht notwendig. Dort kann aufgrund geringerer Belegungszahlen eine freie Fensterlüftung so umgesetzt werden, dass die Raumluftqualität den Anforderungen an ein konstant gutes Umfeld gerecht wird.**

Die Messwerte des untersuchten Gruppenraumes der Kindertagesstätte zeigen sehr hohe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen über den gesamten untersuchten Zeitraum. Trotz der offenen Raumstruktur wurden regelmäßig Spitzenwerte von über 2.000 ppm erreicht. Die Ausgabe des Leitfadens zur motivierten Raumlüftung brachte keine Veränderung des Nutzerverhaltens. Die Nutzung der Räume, der Aktivitätsgrad der Kinder und tägliche Ablauf können nicht mit denen einer Schule oder Universität verglichen oder gleichgesetzt werden.

***Abschließend kann die Hypothese, dass eine mechanische Belüftung von Kindertagesstätten nicht notwendig ist, aufgrund der vorliegenden Ergebnisse, nicht bestätigt werden. Die CO<sub>2</sub>-Emission pro Person gleicht aufgrund des hohen Aktivitätsgrades der Kinder denen in Klassenräumen. Die Belegungsdichte ist entgegen geläufiger Annahmen mit der in Klassenräumen vergleichbar. Aufgrund der Notwendigkeit einer kontinuierlichen Betreuung der Kinder, ist eine motivierte Lüftung über die Fenster nicht konsequent umsetzbar. So muss für die Belüftung von Kindertagesstätten eine mechanische Belüftung zur Einhaltung des hygienisch notwendigen Mindestluftwechsels empfohlen werden.***

## 8 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die Raumluftqualität in den untersuchten Klassenzimmern, dem Hörsaal und dem Gruppenraum der Kindertagesstätte mangelhaft ist. Die Messungen der CO<sub>2</sub>-Konzentration belegten Werte von über 2.000 ppm. Die Leistungsfähigkeit der Schüler ist unmittelbar abhängig von der Raumluftqualität. Es konnte nachgewiesen werden, dass eine Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Innenraumluft um 50 % auf 1.000 ppm zu einer Leistungssteigerung von im Mittel 7 % führt.

Es war das Ziel dieser Arbeit, zu untersuchen, welche Methoden zur Verbesserung der Luftqualität für Konzepte der mechanischen und der natürlichen Lüftung notwendig sind. Dafür wurden Anforderungen sowohl für die Raumluftqualität als auch für die thermische Behaglichkeit anhand gültiger Normen definiert.

Es wurde geprüft, welche Faktoren Einfluss auf die erfolgreiche Umsetzung einer ausreichenden Belüftung haben. Die mechanisch belüfteten Unterrichtsräume boten Verbesserungspotenzial hinsichtlich verlängerter Betriebszeiten der Lüftungsanlagen und erhöhter Luftwechselraten. In den natürlich belüfteten Unterrichtsräumen wurde eine Nutzermotivation mittels Lüftungssampel als geeignete und langfristig wirksame Maßnahme bestätigt.

Die Einflussgrößen zur Gewährleistung einer guten Raumluftqualität und eines hohen thermischen Komforts für Bildungseinrichtungen können wie folgt herausgestellt werden:

- **Notwendiger Luftwechsel:** Die Umsetzung individueller Lüftungsstrategien hat gezeigt, dass zur Bereitstellung und dauerhaften Einhaltung einer guten Raumluftqualität mindestens ein 3,5-facher Luftwechsel erforderlich ist. Für den in dieser Arbeit beispielhaften Klassenraum mit einem Raumvolumen von 192 m<sup>3</sup>, einer Grundfläche von 64 m<sup>2</sup> und einer Besetzung mit 25 Personen bedeutet dies einen Zuluftvolumenstrom von 28 m<sup>3</sup>/(h·Person). Der Einsatz zentraler Lüftungsanlagen konnte dieser Anforderung gerecht werden ohne die thermische Behaglichkeit einzuschränken. Von den eingesetzten dezentralen Lüftungsgeräten konnte nur ein Gerät den erforderlichen Luftvolumenstrom bereitstellen. Die Einhaltung der thermischen Behaglichkeit war auch bei diesem dezentralen Lüftungsgerät gegeben. Die mit einer Lüftungssampel nutzermotivierte Fensterlüftung konnte in den Schulen langfristig zu einer signifikanten Verbesserung der Raumluftqualität beitragen. Dieses Lüftungskonzept führte jedoch zu Einschränkungen der thermischen Behaglichkeit.

In den Räumen der Universität und der Kindertagesstätte konnte mit der nutzermotivierten natürlichen Lüftung kein positives Ergebnis erzielt werden, so dass in diesen Bil-



dungsstätten zu einer mechanischen Belüftung geraten werden muss.

Zur Bereitstellung einer guten Raumlufthqualität wird insgesamt geschlussfolgert, dass die nutzermotivierte Fensterlüftung und der Einsatz dezentraler mechanischer Lüftungsgeräte einen eingeschränkten Lösungsansatz bieten. Die zentrale mechanische Lüftungsanlage kann bei bedarfsgerechter Dimensionierung uneingeschränkt empfohlen werden.

- **Nutzermotivation und Nutzerinformation:** Die Ergebnisse der Nutzerbefragung zeigen, dass die Zufriedenheit von Personen bezüglich der thermischen Behaglichkeit in natürlich belüfteten Räumen höher ist als in mechanisch belüfteten Räumen. Eine fehlende oder unzureichende Nutzerinformation führt zu einer Ablehnung der technischen Anlagen. Eine nutzermotivierte natürliche Lüftung konnte in den Schulen ohne Ausnahme mit positiven Ergebnissen umgesetzt werden. Hierbei hat sich die Lüftungssampel als effektives Mittel zur Umsetzung der nutzermotivierten Fensterlüftung erwiesen. Durch sie werden die Nutzer für die Thematik der Raumlufthqualität ausreichend sensibilisiert. Diese Form der Nutzermotivation sollte eher für jüngere Schüler erwogen werden, da ältere Klassenstufen oder Studierende sich nicht für die Verpflichtung zu Lüftungsdiensten motivieren lassen.

Ein Handlungsleitfaden für die Nutzer trägt nur bedingt zu einer Verbesserung der Raumlufthqualität bei. Ein Workshop mit den Nutzern und die dabei vermittelten Informationen zur Raumlüftung erwiesen sich als wirksamer.

Eine Einbindung der Schüler und Lehrer in die Planung und Umsetzung von Lüftungskonzepten führt zu einer Sensibilisierung der Nutzer und erhöht die Akzeptanz der umgesetzten Maßnahmen. Wenn die Nutzer ausführlich über geplante und durchgeführte Maßnahmen informiert werden, verbessert sich die Wahrnehmung in Bezug auf die Raumlufthqualität und die Funktionalität von mechanischen Lüftungssystemen. Die Nutzerakzeptanz wird entscheidend erhöht. Zukünftig sollten die Themen Raumlufthqualität und Lüftungsverhalten in den Unterricht der Schulen integriert werden.

- **Einhaltung der Akustikanforderungen:** Die raumakustischen Anforderungen an mechanische Lüftungssysteme sind mit einem maximal zulässigen Schalldruckpegel von 35 dB(A) in Bildungsbauten hoch. Zwei der vier untersuchten dezentralen Lüftungsgeräte erfüllten diese Anforderung nicht und sind somit für den Einsatz in Unterrichtsräumen nicht zu empfehlen.

Die Recherche und Gespräche mit Herstellern der Lüftungsgeräte zeigt, dass die Schall-

emission anfangs nachrangig behandelt wurde. Die Problematik bezüglich der notwendigen Luftvolumenströme und der damit entstehenden Schalldruckpegel als Störquelle im Klassenraum wurde unterschätzt. Die aktuellen Entwicklungen im Bereich der Schullüftungssysteme berücksichtigen diesen Aspekt und halten den geforderten Grenzwert des Schalldruckpegels ein.

- **Wirtschaftlichkeit:** Die Berechnung der Jahresgesamtkosten für die untersuchten Konzepte und Systeme zeigt, dass zentrale Lüftungsanlagen und die nutzermotivierte natürliche Lüftung mit dem Einsatz einer Lüftungsampel vergleichbare Jahresgesamtkosten von etwa 22,- €/m<sup>2</sup>a aufweisen. Der Einsatz dezentraler Geräte führt zu höheren Jahresgesamtkosten von 28 €/m<sup>2</sup>a. Daher wird für die Planung und Umsetzung von Neubauten insbesondere bei Schulen für ältere Schüler und an Hochschulen zur Umsetzung zentraler Lüftungsanlagen geraten. Aus wirtschaftlicher Sicht ist für Sanierungen hingegen der Einbau dezentraler Lüftungsgeräte zu empfehlen, da in der Regel die Integration von Lüftungskanälen und die Berücksichtigung des baulichen Brandschutzes kostengünstiger gegenüber zentralen Anlagen umzusetzen sind. Für die Integration einer zentralen Lüftungsanlage und deren Kanalführung wird zusätzlicher Raum benötigt.
- **Prüfung und Überwachung mechanischer Lüftungssysteme im Betrieb:** Beim Einsatz mechanischer Lüftungssysteme, zentral wie dezentral, ist eine regelmäßige Kontrolle der Betriebszeit und des Luftvolumenstroms durchzuführen. Ein Monitoring zur Raumluftqualität und zur Behaglichkeit sollte ergänzend erfolgen. Regelmäßige Wartungen sind unumgänglich.

**Fazit:** *Es besteht Handlungsbedarf darin die Luftqualität in Bildungseinrichtungen entscheidend und konsequent zu verbessern. Die Klassenraumlüftung mit der Umsetzung von Lüftungskonzepten muss ein zentrales Thema der Planung werden. Abgeschlossene Studien und die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass eine nicht nutzermotivierte Fensterlüftung zu einer unzureichenden Raumluftqualität führt. Insbesondere die CO<sub>2</sub>-Konzentration erreicht zu hohe Werte. Aufgrund der nachgewiesenen Leistungssteigerung der Schüler von im Mittel 7 %, ist in Unterrichtsräumen eine Einhaltung des Grenzwertes von 1.000 ppm in mindestens 50 % der Unterrichtszeit anzustreben. Mit der Umsetzung eines 3,5-fachen Luftwechsels wird diese Forderung eingehalten.*

## 9 AUSBLICK

Zukünftig wird das Thema der Luftqualität in Bildungsstätten deutlich an Bedeutung gewinnen, da die Leistungsfähigkeit und Lernerfolge der Kinder, Schüler und Studierenden unmittelbar mit guter Raumluftqualität in Verbindung gebracht werden können. Die Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Schülern hat einen volkswirtschaftlichen Mehrwert für die Zukunft.

Die konstante Bereit- und Sicherstellung einer guten Raumluftqualität muss besonders im Gebäudebestand und bei Sanierungen weiter thematisiert werden, da die energetische Sanierung häufig nur eine unzureichende Anpassung der Lüftungskonzepte vorsieht. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass sowohl für freie als auch für mechanisch belüftete Klassenräume, Hörsäle und Gruppenräume in Kindertagesstätten individuelle Konzepte erarbeitet werden müssen.

Als Antwort auf die Frage nach der Messbarkeit von Raumluftqualität, wird die Idee eines „Luftgütepass“ für Gebäude formuliert. So wie der Energieausweis als Standard für öffentliche Gebäude etabliert wurde, um deren energetische Qualität dokumentieren zu können, sollte zukünftig auch für die Einhaltung der Raumluftqualität ein Gütesiegel erarbeitet werden. Dieser „Luftgütepass“ informiert, und zeigt die geplante Qualität der Raumluft und der thermischen Behaglichkeit in einem öffentlichen Gebäude auf und klassifiziert sie.

Ein zukünftiger Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Qualitätssicherung umgesetzter Maßnahmen zur Verbesserung der Raumluftqualität und Einhaltung der thermischen Behaglichkeit in Bildungseinrichtungen. Einen Forschungsansatz bietet die Untersuchung der Notwendigkeit von Richtlinien oder Normen zur Durchführung eines Monitorings zur Raumluftqualität von realisierten Lüftungskonzepten.

## VERÖFFENTLICHUNGEN UND VORTRÄGE

- (1) König, J.: „Lüftungskonzepte in Bildungsstätten - Analyse und Optimierungsansätze, DBU Zwischenbericht 1“, Braunschweig, Juni 2009
- (2) König, J.: „Lüftungskonzepte in Bildungsstätten – Analyse und Optimierungsansätze“, Vortrag auf ift-Forschungstag, ift Rosenheim GmbH, Theodor-Gietl-Straße 7-9, 83026 Rosenheim, April 2010
- (3) König, J.: „Lüftungskonzepte in Bildungsstätten - Analyse und Optimierungsansätze, DBU Zwischenbericht 2“, Braunschweig, Juni 2010
- (4) König, J.: „Richtig Lüften in deutschen Schulen“, Vortrag beim Planspiel Energie, Integrierte Gesamtschule Franzisches Feld, Grünewaldstraße 12a, 38104 Braunschweig, Februar 2011
- (5) König, J.: „Lüftungskonzepte in Bildungsstätten - Analyse und Optimierungsansätze, DBU Endbericht 2“, Braunschweig, August 2011
- (6) Fisch, M. N.; Altendorf, L.; Goydke, H.; Huckemann, V.; König, J.; Plessner, S.: „Auf dem Prüfstand: Raumkomfort in Schulen“. Zeitschrift XIA intelligente Architektur , Zeitschrift für Architektur und Technik. Ausgabe 06/2011
- (7) Altendorf, Lars; König, Jennifer: „Auf dem Prüfstand: Lüftung in Schulen“. Zeitschrift XIA intelligente Architektur , Zeitschrift für Architektur und Technik. Ausgabe 09/2011
- (8) König, Jennifer: „Lüftungskonzepte in Bildungsstätten – Analyse und Optimierungsansätze“, Vortrag bei der „Woche der Umwelt“, Schloss Bellevue, Spreeweg 1, 10557 Berlin, Juni 2012.

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1 Strömungsverhältnisse bei geöffneten Fenstern [25] .....	5
Abb. 2 Umströmung Gebäude [25].....	5
Abb. 3 Beispielklassenraum für Berechnungen und Simulationen .....	6
Abb. 4 Simulation CO <sub>2</sub> -Konzentration Lüftungsverhalten Sommer .....	8
Abb. 5 Simulation CO <sub>2</sub> -Konzentration Lüftungsverhalten Winter .....	9
Abb. 6 Simulation CO <sub>2</sub> -Konzentration Luftwechselraten .....	10
Abb. 7 Einfluss Temperatur und Luftwechselrate Schülerleistung [44] .....	14
Abb. 8 Einfluss CO <sub>2</sub> - Konzentration auf das Schülerleistung [45] .....	15
Abb. 9 Verlauf CO <sub>2</sub> -Konzentration ohne Lüftungspause [2] .....	15
Abb. 10 Verlauf CO <sub>2</sub> -Konzentration mit Lüftungspause [2] .....	16
Abb. 11 Einfluss Lüftungsintervention auf dysfunktionale Aktivitäten [2] .....	16
Abb. 12 Simulation Luftwechsel Einhaltung „Pettenkofer Zahl“ .....	18
Abb. 13 Anzahl untersuchter Schulen nach Schultyp [59] .....	30
Abb. 14 Anzahl der Bauabschnitte nach Baualtersklasse [60] .....	30
Abb. 15 Wintermessperiode (Min.-, Max.-, Medianwerte) [62] .....	32
Abb. 16 Boxplot Zeitraum Nov.-März, 8:00 bis 13:00 Uhr [66].....	33
Abb. 17 Gemittelte Verläufe CO <sub>2</sub> Raum K203 [66] .....	34
Abb. 18 Vergleich zugeführte Luftmengen [69].....	36
Abb. 19 Mittelwerte CO <sub>2</sub> -Konzentrationen Winter [69] .....	37
Abb. 20 Mittelwerte Raumlufttemperaturen Winter [69].....	37
Abb. 21 Prozentuale Verteilung Luftqualität Unterrichtszeit [70] .....	38
Abb. 22 „Luftgüte-Ampel“ [80] .....	47
Abb. 23 Leistungstest Beispiel [2] .....	49
Abb. 24 Schülerworkshop .....	51
Abb. 25 Beispiel Klassendienst .....	51
Abb. 26 Zeitraum der Messungen in den Referenzräumen .....	54
Abb. 27 GS HH Südansicht .....	55
Abb. 28 GS HH Raum 13 .....	55
Abb. 29 Lüftungsgerät Typ A .....	56
Abb. 30 Bedieneinheit Lüftungsgerät Typ A .....	56
Abb. 31 SZ FL Nordostansicht .....	57
Abb. 32 SZ FL Klassenraum Gymnasium .....	57
Abb. 33 Lüftungsgerät Typ B.....	58
Abb. 34 Bedieneinheit Lüftungsgerät Typ B.....	58
Abb. 35 Lüftungsgerät C .....	59
Abb. 36 Bedieneinheit Lüftungsgerät C .....	59
Abb. 37 Lüftungsgerät Typ D .....	60
Abb. 38 Bedieneinheit Lüftungsgerät Typ D .....	60
Abb. 39 SZ FL Raum 210 .....	61
Abb. 40 SZ FL Raum 211 .....	61
Abb. 41 SZ VF Süd-Ostansicht .....	62
Abb. 42 SZ VF Raum 31 .....	62
Abb. 43 GS BS Ostansicht.....	63
Abb. 44 GS BS Raum 2.1 .....	63
Abb. 45 Kita WOB Westansicht.....	64
Abb. 46 Kita WOB Gruppenraum.....	64
Abb. 47 TU BS Haus d. Wissenschaft Westansicht.....	65
Abb. 48 TU BS Hörsaal 11.3 .....	65
Abb. 49 Raumvolumen pro Person Referenzräume .....	66
Abb. 50 Maximal umsetzbarer Luftvolumenstrom Referenzräume .....	67
Abb. 51 Installation Lüftungsampel .....	69
Abb. 52 Piktogramm Lüftungsampel .....	69
Abb. 53 Messwerte CO <sub>2</sub> -Konzentration GS HH Raum 13.....	73
Abb. 54 Verteilung CO <sub>2</sub> -Konzentration Unterrichtszeit GS HH Raum 13 .....	74
Abb. 55 Innenraum- gegenüber Außentemperatur Unterrichtszeit GS HH Raum 13 .....	74
Abb. 56 Thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit GS HH Raum 13.....	75
Abb. 57 Verteilung thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit GS HH Raum 13 .....	75
Abb. 58 Messwerte CO <sub>2</sub> -Konzentration GS HH Raum 16.....	76
Abb. 59 Verteilung CO <sub>2</sub> -Konzentration Unterrichtszeit GS HH Raum 16 .....	77
Abb. 60 Innenraum- gegenüber Außentemperatur Unterrichtszeit GS HH Raum 16 .....	77
Abb. 61 Thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit GS HH Raum 16.....	78

Abb. 62 Verteilung thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit GS HH Raum 16 .....	78
Abb. 63 Verteilung Fensteröffnungen in der Unterrichtszeit GS HH Raum 16 .....	79
Abb. 64 Messwerte CO <sub>2</sub> -Konzentration SZ FL Raum 209 .....	80
Abb. 65 Verteilung CO <sub>2</sub> -Konzentration Unterrichtszeit SZ FL Raum 209 .....	81
Abb. 66 Innenraum- gegenüber Außentemperatur Unterrichtszeit SZ FL Raum 209 .....	82
Abb. 67 Thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit SZ FL Raum 209 .....	82
Abb. 68 Verteilung thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit SZ FL Raum 209 .....	83
Abb. 69 Messwerte CO <sub>2</sub> -Konzentration SZ FL Raum 311 .....	84
Abb. 70 Verteilung CO <sub>2</sub> -Konzentration Unterrichtszeit SZ FL Raum 311 .....	84
Abb. 71 Innenraum- gegenüber Außentemperatur Unterrichtszeit SZ FL Raum 311 .....	85
Abb. 72 Thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit SZ FL Raum 311 .....	85
Abb. 73 Verteilung thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit SZ FL Raum 311 .....	86
Abb. 74 Messwerte CO <sub>2</sub> -Konzentration SZ FL Raum 313 .....	87
Abb. 75 Verteilung CO <sub>2</sub> -Konzentration Unterrichtszeit SZ FL Raum 313 .....	87
Abb. 76 Innenraum- gegenüber Außentemperatur Unterrichtszeit SZ FL Raum 313 .....	88
Abb. 77 Thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit SZ FL Raum 313 .....	88
Abb. 78 Verteilung thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit SZ FL Raum 313 .....	89
Abb. 79 Messwerte CO <sub>2</sub> -Konzentration SZ FL Raum 210 .....	89
Abb. 80 Verteilung CO <sub>2</sub> -Konzentration Unterrichtszeit SZ FL Raum 210 .....	90
Abb. 81 Innenraum- gegenüber Außentemperatur Unterrichtszeit SZ FL Raum 210 .....	90
Abb. 82 Thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit SZ FL Raum 210 .....	91
Abb. 83 Verteilung thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit SZ FL Raum 210 .....	91
Abb. 84 Messwerte CO <sub>2</sub> -Konzentration SZ FL Raum 211 .....	92
Abb. 85 Verteilung CO <sub>2</sub> -Konzentration Unterrichtszeit SZ FL Raum 211 .....	93
Abb. 86 Innenraum- gegenüber Außentemperatur Unterrichtszeit SZ FL Raum 211 .....	93
Abb. 87 Thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit SZ FL Raum 211 .....	94
Abb. 88 Verteilung Thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit SZ FL Raum 211 .....	94
Abb. 89 Messwerte CO <sub>2</sub> -Konzentration SZ VF Raum 31 .....	95
Abb. 90 Verteilung CO <sub>2</sub> -Konzentration Unterrichtszeit SZ VF Raum 31 .....	96
Abb. 91 Innenraum- gegenüber Außentemperatur Unterrichtszeit SZ VF Raum 31 .....	96
Abb. 92 Thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit SZ VF Raum 31 .....	97
Abb. 93 Verteilung Thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit SZ VF Raum 31 .....	97
Abb. 94 Verteilung Fensteröffnungen in der Unterrichtszeit SZ VF Raum 31 .....	98
Abb. 95 Messwerte CO <sub>2</sub> -Konzentration GS BS Raum 2.1 .....	99
Abb. 96 Verteilung CO <sub>2</sub> -Konzentration Unterrichtszeit GS BS Raum 2.1 .....	100
Abb. 97 Innenraum- gegenüber Außentemperatur Unterrichtszeit GS BS Raum 2.1 .....	100
Abb. 98 Thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit GS BS Raum 2.1 .....	101
Abb. 99 Verteilung Thermische Behaglichkeit Unterrichtszeit GS BS Raum 2.1 .....	101
Abb. 100 Messwerte CO <sub>2</sub> -Konzentration Kita WOB .....	102
Abb. 101 Verteilung CO <sub>2</sub> -Konzentration Betreuungszeit Kita WOB .....	103
Abb. 102 Innenraum- gegenüber Außentemperatur Betreuungszeit Kita WOB .....	103
Abb. 103 Thermische Behaglichkeit Betreuungszeit Kita WOB .....	104
Abb. 104 Verteilung Thermische Behaglichkeit Betreuungszeit Kita WOB .....	104
Abb. 105 Messwerte CO <sub>2</sub> -Konzentration TU BS Hörsaal 11.3 .....	105
Abb. 106 Verteilung CO <sub>2</sub> -Konzentration TU BS Hörsaal 11.3 .....	106
Abb. 107 Messwerte Raumlufttemperatur TU BS Hörsaal 11.3 .....	107
Abb. 108 Thermische Behaglichkeit TU BS Hörsaal 11.3 .....	108
Abb. 109 Verteilung Thermische Behaglichkeit TU BS Hörsaal 11.3 .....	108
Abb. 110 Maximal umsetzbarer Luftwechsel Referenzräume .....	109
Abb. 111 Verteilung CO <sub>2</sub> -Konzentration Referenzräume .....	110
Abb. 112 Verteilung thermische Behaglichkeit Referenzräume .....	112
Abb. 113 Befragung Temperatur GS HH .....	115
Abb. 114 Befragung Luftqualität 1 GS HH .....	115
Abb. 115 Befragung Luftqualität 2 GS HH .....	115
Abb. 116 Befragung Lüftungsverhalten GS HH .....	115
Abb. 117 Befragung mech. Lüftung GS HH .....	116
Abb. 118 Befragung Geräuschpegel GS HH .....	116
Abb. 119 Befragung Wohlbefinden GS HH .....	116
Abb. 120 Befragung Leistung GS HH .....	116
Abb. 121 Befragung Temperatur SZ FL .....	117
Abb. 122 Befragung Luftqualität 1 SZ FL .....	117
Abb. 123 Befragung Luftqualität 2 SZ FL .....	118
Abb. 124 Befragung Lüftungsverhalten SZ FL .....	118
Abb. 125 Befragung mech. Lüftung SZ FL .....	119

Abb. 126 Befragung Geräuschpegel SZ FL .....	119
Abb. 127 Befragung Wohlbefinden SZ FL .....	120
Abb. 128 Befragung Leistung SZ FL .....	120
Abb. 129 Befragung Temperatur SZ VF .....	121
Abb. 130 Befragung Luftqualität 1 SZ VF .....	121
Abb. 131 Befragung Luftqualität 2 SZ VF .....	122
Abb. 132 Befragung Lüftungsverhalten SZ VF .....	122
Abb. 133 Befragung Belüftung 1 SZ VF .....	122
Abb. 134 Befragung Belüftung 2 SZ VF .....	122
Abb. 135 Befragung Geräuschpegel SZ VF .....	123
Abb. 136 Befragung Luftzug SZ VF .....	123
Abb. 137 Befragung Wohlbefinden SZ VF .....	123
Abb. 138 Befragung Leistung SZ VF .....	123
Abb. 139 Befragung Temperatur GS BS .....	124
Abb. 140 Befragung Luftqualität 1 GS BS .....	124
Abb. 141 Befragung Luftqualität 2 GS BS .....	124
Abb. 142 Befragung Lüftungsverhalten GS BS .....	124
Abb. 143 Befragung Wohlbefinden GS BS .....	125
Abb. 144 Befragung Leistung GS BS .....	125
Abb. 145 Befragung Temperatur Kita .....	125
Abb. 146 Befragung Luftqualität 1 Kita .....	125
Abb. 147 Befragung Luftqualität 2 Kita .....	126
Abb. 148 Befragung Wohlbefinden Kita .....	126
Abb. 149 Befragung Lüftungsverhalten 1 Kita .....	126
Abb. 150 Befragung Lüftungsverhalten 2 Kita .....	126
Abb. 151 Befragung Temperatur .....	128
Abb. 152 Befragung Luftqualität 1 .....	128
Abb. 153 Befragung Luftqualität 2 .....	129
Abb. 154 Befragung Lüftungsverhalten .....	129
Abb. 155 Befragung Wohlbefinden .....	129
Abb. 156 Befragung Leistung .....	129
Abb. 157 Befragung Lüftungsmaßnahmen .....	130
Abb. 158 Befragung Verantwortung .....	130
Abb. 159 Befragung Motivation .....	130
Abb. 160 Verteilung Luftmengen (3,5-facher Luftwechsel) Referenzräume .....	136
Abb. 161 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Referenzräume .....	138
Abb. 162 Messergebnisse CO <sub>2</sub> -Konzentration Testtag 1 + Testtag 2 .....	145
Abb. 163 Verteilung CO <sub>2</sub> -Konzentration Tag 1 + Tag 2 .....	145
Abb. 164 Messergebnisse Temperaturen Tag 1 + Tag 2 SZ Fallersleben - Alle Räume .....	146
Abb. 165 Thermische Behaglichkeit Tag 1 + Tag 2 SZ Fallersleben - Alle Räume .....	146
Abb. 166 Verteilung Thermische Behaglichkeit Tag 1 + Tag 2 SZ Fallersleben – Alle Räume .....	147
Abb. 167 Ergebnisse der Leistungstests .....	147
Abb. 168 Einfluss CO <sub>2</sub> -Konzentration Leistungsfähigkeit .....	148
Abb. 169 Einfluss Raumlufttemperatur Leistungsfähigkeit .....	149

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1 CO <sub>2</sub> -Grenzwerte [18],[19],[20].....	3
Tabelle 2 Gesundheitsrelevante CO <sub>2</sub> -Konzentrationen [22] .....	3
Tabelle 3 Luftwechselraten Fensterlüftung Sommer und Winter [27].....	6
Tabelle 4 CO <sub>2</sub> -Abgaberate in [l/(h*Person)] von Personen [27].....	7
Tabelle 5 Mindestluftvolumenstrom [20] .....	18
Tabelle 6 Empfundene Luftqualität [20].....	19
Tabelle 7 Kategorien ODA [19] .....	19
Tabelle 8 Klassifizierung Raumlufqualität [19] .....	20
Tabelle 9 Kategorien zur Anwendbarkeit [49] .....	20
Tabelle 10 Empfohlene Auslegungswerte Raumlufqualität [49].....	21
Tabelle 11 Empfohlene Lüftungsraten [49] .....	21
Tabelle 12 Empfohlene CO <sub>2</sub> -Konzentrationen [49] .....	22
Tabelle 13 Empfohlene Innenraumlufqualität [49].....	22
Tabelle 14 Behaglichkeitsbereiche Innenraumlufqualität [50] .....	23
Tabelle 15 Lüftungsmaßnahmen nach CO <sub>2</sub> -Konzentrationen [51] .....	24
Tabelle 16 Anforderungen an die freie Lüftung [51] .....	24
Tabelle 17 Einteilung Systeme freie Lüftung [51].....	25
Tabelle 18 Anforderungen thermische/ lufthygienische Konditionen [52] .....	26
Tabelle 19 Leitwerte CO <sub>2</sub> Innenraumluf [17] .....	26
Tabelle 20 Kategorisierung zur Beurteilung der Raumlufqualität .....	27
Tabelle 21 Grenzwerte Bewertung CO <sub>2</sub> -Konzentration Raumluf .....	27
Tabelle 22 Grenzwerte Bewertung Raumlufqualität .....	28
Tabelle 23 Grenzwerte Bewertung relative Luftfeuchtigkeit .....	28
Tabelle 24 Medianwerte in der Unterrichtszeit Nov.-Mai [66] .....	34
Tabelle 25 Darstellung CO <sub>2</sub> -Messergebnisse [71].....	39
Tabelle 26 Messwertübersicht Klassenzimmerlüftung Österreich [73].....	41
Tabelle 27 Auswahlkriterien der Referenzgebäude .....	44
Tabelle 28 Messgenauigkeit CO <sub>2</sub> -Konzentration [77].....	46
Tabelle 29 Messgenauigkeit Raumlufqualität und Raumluf Feuchtigkeit [78].....	46
Tabelle 30 Standorte Wetterdatenbezug .....	47
Tabelle 31 Bewertungsintervalle „Luftgüte-Ampel“ [80] .....	48
Tabelle 32 Nutzerorientierte Maßnahmen .....	50
Tabelle 33 Technische Maßnahmen.....	52
Tabelle 34 Mechanische Lüftungstechnik in den Referenzgebäuden .....	54
Tabelle 35 Kenndaten GS HH Raum 13 .....	56
Tabelle 36 Kenndaten GS HH Raum 16 .....	56
Tabelle 37 Kenndaten SZ FL Raum 209.....	58
Tabelle 38 Kenndaten SZ FL Raum 311.....	59
Tabelle 39 Kenndaten SZ FL Raum 313.....	60
Tabelle 40 Kenndaten SZ FL Raum 210.....	61
Tabelle 41 Kenndaten SZ FL Raum 211.....	61
Tabelle 42 Kenndaten SZ VL Raum 31 .....	62
Tabelle 43 Kenndaten GS BS Raum 2.1 .....	63
Tabelle 44 Kenndaten Kita WOB .....	64
Tabelle 45 Kenndaten TU BS Hörsaal 11.3 .....	65
Tabelle 46 Anforderungen gemäß normativer Regelung .....	66
Tabelle 47 Übersicht Maßnahmen Verbesserung Lüftungskonzepte.....	68
Tabelle 48 Kategorien zur Bewertung der Raumlufqualität und der therm. Behaglichkeit .....	71
Tabelle 49 Übersicht des Messzeitraumes GS HH Raum 13 .....	73
Tabelle 50 Übersicht des Messzeitraumes GS HH Raum 16 .....	76
Tabelle 51 Übersicht des Messzeitraumes SZ FL Raum 209 .....	80
Tabelle 52 Übersicht des Messzeitraumes SZ FL Raum 311 .....	83
Tabelle 53 Übersicht des Messzeitraumes SZ FL Raum 313 .....	86
Tabelle 54 Übersicht des Messzeitraumes SZ FL Raum 210 .....	89
Tabelle 55 Übersicht Des Messzeitraumes SZ FL Raum 211.....	92
Tabelle 56 Übersicht des Messzeitraumes SZ VF Raum 31 .....	95
Tabelle 57 Übersicht des Messzeitraumes GS BS Raum 2.1 .....	99
Tabelle 58 Übersicht des Messzeitraumes Kita WOB.....	102
Tabelle 59 Übersicht Aufzeichnung TU BS Hörsaal 11.3.....	105
Tabelle 60 Messwerte der Nachhallzeit der Referenzräume .....	132
Tabelle 61 Messergebnis Schalldruckpegel GS HH Raum 13 Lüftungsgerät Typ A .....	133



---

Tabelle 62 Messergebnis Schalldruckpegel GS HH Raum 16 .....	133
Tabelle 63 Messergebnis Schalldruckpegel SZ FL Raum 209 Lüftungsgerät Typ B .....	134
Tabelle 64 Messergebnis Schalldruckpegel SZ FL Raum 311 Lüftungsgerät Typ C.....	134
Tabelle 65 Messergebnis Schalldruckpegel SZ FL Raum 313 Lüftungsgerät Typ D .....	135
Tabelle 66 Übersicht der Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität .....	139
Tabelle 67 Durchführung der Leistungstests .....	144

## LITERATURVERZEICHNIS

- [1] I. Eggers, P. Matthes und D. Müller, „Thermische Behaglichkeit und gute Luftqualität in Schulgebäuden durch hybride Lüftungstechnik. Verbundprojekt hybride Lüftung für Schulen,“ Technische Universität Berlin. Hermann-Rietschel-Institut, Berlin, 2009.
- [2] G. Tiesler, H. G. Schönwälder und F. Ströver, „Gesundheitsfördernde Einflüsse auf das Leistungsvermögen im schulischen Unterricht: Ein Beitrag zur Ergonomie der Schule. WB 30: Werkstattberichte aus Wissenschaft und Technik,“ NW-Verlag, Bremerhaven, 2004.
- [3] A. Lederer, A. Pieper und R. Kötz, Schulen in Deutschland - Neubau und Revitalisierung - Wüstenroth Stiftung Bild: Heinz-Jürgen Goldhorn, Stuttgart: Karl Krämer Verlag, 2004.
- [4] M. Oberdörster und G. Tiesler, Akustische Ergonomie der Schule, Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für Neue Wissenschaft GmbH, 2006.
- [5] N. Wessolowski, *Wirksamkeit von Dynamischem Licht im Schulunterricht*, Hamburg: Dissertation, Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf Klinik für Kinder- und Jugendpsychiatrie, -psychotherapie und -psychosomatik, 2014.
- [6] D. P. Wyon, „Healthy buildings an their impact on productivity,“ *Indoor Air*, pp. 6, 3-13, 1993.
- [7] D. H. Gugerli, H. Huber und A. Weber, „Schulhäuser - Wieviel Luft braucht das Hirn,“ Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, Hochschule für Technik und Architektur, Luzern (HTA), Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA).
- [8] D. P. Wyon, „Indoor Environmental Effects on Productivity,“ *Indoor Air. Quality '96 / Paths to Better Building Environments*, pp. 5-15, 1996.
- [9] O. Seppänen, W. J. Fisk und Q. Lei, „Effect of temperature on task performance in office environment,“ Helsinki University of Technology, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2006.
- [10] Statistisches Bundesamt, „<http://www.destatis.de>,“ [Online]. Available: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/BildungForschungKultur/Schulen/Tabellen/AllgemeinBildendeBeruflicheSchulenSchularten.html>. [Zugriff am 22. Februar 2014].
- [11] Statistisches Bundesamt, „<http://www.destatis.de>,“ [Online]. Available: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/BildungForschungKultur/Hochschulen/Tabel len/HochschulenHochschularten.html>. [Zugriff am 22. Februar 2014].
- [12] B. Gillmann, „Es fehlen viel mehr Kitaplätze als gedacht,“ *Handelsblatt*, Nr. 216, p. 9, 2012.
- [13] J. Reiß, H. Erhorn, M. Geiger, A. Roser, E. Gruber, K. Schakib-Ekbatan, M. Winkler und W. Jensch, Energieeffiziente Schulen - EnEff:Schule, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2013.
- [14] H. Grams, O. Hehl und J. Dreesmann, „Aufatmen in Schulen - Untersuchungsergebnisse und Modellierungsansätze zur Raumluftqualität in Schulen,“ Gesundheitswesen, 2003.
- [15] D. P. Wyon, „The effect of indoor climate on productivity and performance,“ VVS & Energy. Organ für VVS-Tekniska Föreningen, Lingby, 1986.
- [16] H. Rietschel und H. Esdorn, Raumklimattechnik : Band 1: Grundlagen, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1994.
- [17] Umweltbundesamt, Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes, „Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden,“ Umweltbundesamt, Berlin, 2008.
- [18] M. von Pettenkofer, Über den Luftwechsel in Wohngebäuden, München: Literarisch-artistische Anstalt der Cotta'schen Buchhandlungen, 1858.
- [19] Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN 13779: Lüftung in Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlsysteme, Berlin: Beuth Verlag GmbH Berlin, 2007.
- [20] Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 1946-2: Raumlufttechnik; Gesundheitstechnische

- Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln), Berlin: Beuth Verlag GmbH Berlin, 1994.
- [21] D. P. Wyon, P. O. Fanger, B. W. Olesen und C. J. Pedersen, „The mental performance of Subjects Clothed for Comfort at Two Different Air Temperatures,“ *Ergonomics*, pp. 18-4, 359-374, 1975.
- [22] Niedersächsisches Landesgesundheitsamt (NLGA), „<http://www.nlga.niedersachsen.de/>,“ [Online]. Available: [http://www.nlga.niedersachsen.de/portal/live.php?navigation\\_id=27083&article\\_id=19316&psmand=20](http://www.nlga.niedersachsen.de/portal/live.php?navigation_id=27083&article_id=19316&psmand=20). [Zugriff am 3. Mai 2007].
- [23] A. Trogisch, Planungshilfen Lüftungstechnik, Berlin: VDE-Verlag, 2011, 4. vollständ. überarb..
- [24] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) e.V., VDI 4706: Kriterien für das Raumklima, Berlin: Beuth Verlag GmbH Berlin, 2011.
- [25] B. Hörner und M. Schmidt, Handbuch der Klimatechnik, Band 2: Anwendungen, Berlin: VDE Verlag, 2003.
- [26] W. Feist, Passivhaus Projektierungs Paket 2007: Anforderungen an qualitätsgeprüfte Passivhäuser, Passivhaus Institut, 2007.
- [27] Niedersächsisches Landesgesundheitsamt (NLGA), Handbuch zum Programm QUIRL/CO<sub>2</sub>, „Modell Zur Simulation der Qualität der Innenraumluft am Beispiel von CO<sub>2</sub>“.
- [28] H. Recknagel, E. Sprenger und E. R. Schramek, Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 07/08, München: Oldenbourg Industrieverlag, 73. Auflage 2007.
- [29] T. Laasch und E. Laasch, Haustechnik Grundlagen: Planung - Ausführung, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 13. durchgesehen und akt. Aufl. 2013 (2012).
- [30] „<http://www.baunetzwissen.de/>,“ BauNetz Media GmbH, [Online]. Available: [http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Gebaedudetechnik-Mechanische-Lueftung\\_2466143.html](http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Gebaedudetechnik-Mechanische-Lueftung_2466143.html). [Zugriff am 06. Januar 2012].
- [31] K. W. Usemann, Brandschutz in der Gebäudetechnik: Grundlagen - Gesetzgebung - Bauteile - Anwendungen, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2003.
- [32] J. M. Daisy, W. Angell und M. Apte, „Indoor Air quality, ventilation and health symptoms in school: an analysis of existing information,“ *Indoor Air*, pp. 53-64, 2003.
- [33] Stuttgart Fraunhofer-Institut für Bauphysik -IBP-, *Besseres Lernen in energieeffizienten Schulen Leitfaden*, Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag, 2010.
- [34] H. U. Wanner, „Belastung der Raumluft durch den Menschen (Kohlendioxid, Gerüche),“ in *s Luftqualität in Innenräumen*, Stuttgart, New York, Gustav Fischer Verlag, 1982.
- [35] A. N. Myhrvold, E. Olsen und O. Lauridsen, „Indoor environment in schools—Pupils’ health and performance in regard to CO<sub>2</sub> concentration,“ in *s Proceedings of Indoor Air*, 1996, pp. 369-374.
- [36] G. Smedje, D. Norback und C. Edling, „Mental performance by secondary school pupils in relation to the quality of indoor air,“ in *s Indoor Air '96, The 7th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, 1996, pp. 413-419.
- [37] H. W. Meyer, L. Allermann, J. B. Nielsen, M. O. Hansen, S. Gravesen, P. A. Nielsen, P. Skov und F. Gyntelberg, „Building conditions and building-related symptoms in the Copenhagen school study,“ in *s Indoor Air '99: Pro-ceedings of the 8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, 2.
- [38] D. G. Shendell, R. Prill, W. J. Fisk, M. G. Apte, D. Blake und D. Faulkner, „Associations between classroom CO<sub>2</sub> concentrations and student attendance in Washington and Idaho,“ *Indoor Air*, pp. 333-341, 2004.
- [39] M. J. Mendell und G. A. Heath, „Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of literature,“ *Indoor Air*, 2005.
- [40] R. J. Shaughnessy, U. Haverinen-Shaughnessy, A. Nevalainen und D. Moschandreas, „A preliminary study on the association between ventilation rates in classrooms and student performance,“ *Indoor Air*, pp. 465-468, 2006.
- [41] P. Wargocki und D. P. Wyon, „Effects of HVAC on students performance,“ *ASHRAE Journal*, pp. 22-28, 2006.

- [42] P. Wargocki und D. P. Wyon, „The effects of moderately raised classroom temperatures and classroom ventilation rate on the performance of schoolwork by children,“ HVAC&R Research, 2006.
- [43] P. Wargocki und D. P. Wyon, „The effects of outdoor air supply rate and supply air filter condition in classrooms on the performance of schoolwork by children,“ HVAC&R Research, 2006.
- [44] P. Wargocki, D. P. Wyon und S. Irgens, „The effects of classroom air temperature and outdoor air supply rate on the performance of school work by children,“ *Indoor Air*, 2005.
- [45] W. Ribic, „Nachweis des Zusammenhanges zwischen Leistungsfähigkeit und Luftqualität,“ : *HLH Lüftung/Klima, Heizung/ Sanitär, Gebäudetechnik* 59, Nr.7, 2008.
- [46] M. Dudek, Entwurfsatlas Schulen und Kindergärten, Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser Verlag AG, 2007.
- [47] H. J. Steeneken, THE MEASUREMENT OF SPEECH INTELLIGIBILITY, Soesterberg: TNO Human Factors.
- [48] D. J. Mac Kenzie und S. Airey, „Classroom Acoustics,“ Department of Building Engineering and Surveying, Heriot-Watt University, Edinburgh, Schottland, 1999.
- [49] Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN 15251: Eingangsparmeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik, Berlin: Beuth Verlag GmbH Berlin, 2007.
- [50] Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN ISO 7730: Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit, Berlin: Beuth Verlag GmbH Berlin, 2006.
- [51] Arbeitsstättenrichtlinie, Technische Regeln für Arbeitsstätten, „ASR A3.6 - Lüftung,“ BArbBl., 01/2012.
- [52] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) e.V., VDI 6040: Blatt 1. Raumlufttechnik Schulen Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln, VDI-Schulbaurichtlinien), Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH Berlin, 2011.
- [53] C. Ruhe, „Bauschädensammlung: Kindertagesstätte, zu hohe Schallpegel infolge zu geringer Schallabsorption,“ *Deutsches Architektenblatt Heft 1*, 2000.
- [54] G. Tiesler, H. G. Schönwälder, J. Berndt und F. Ströver, „Lärm in Bildungsstätten - Ursachen und Minderung,“ in *s Forschungsberichte der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund, Bremerhaven, NW-Verlag*, 2004.
- [55] Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 18041: Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen, Berlin: Beuth Verlag GmbH Berlin, 2004.
- [56] Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 4109: Schallschutz im Hochbau, Berlin: Beuth Verlag GmbH Berlin, 2006.
- [57] Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden (Energieeinsparungsgesetz - EnEG), Berlin, 28. März 2009.
- [58] C. Uske, EnEV 2009 - Anforderungen und Lösungen für Konstruktionen, Bauteile und technische Anlagen, München: Forum Verlag Herkert GmbH, 2012.
- [59] R. T. Hellwig, M. Kersken und S. Schmidt, „Ausstattung von Klassenräumen mit Einrichtungen zum Temperieren, Lüften und Belichten,“ *Bauphysik* 31, Heft 3, pp. 157-162, 2009.
- [60] R. T. Hellweg, „Raumklimatische Planungsgrundlagen für Klassenräume,“ *Bauphysik* 32, Heft 4, pp. 240-252, 2010.
- [61] S. Steiger und R. T. Hellweg, „Hybride Lüftungssysteme für Schulen,“ IBP-Bericht, Abschlussbericht, Valley, 2011.
- [62] H. Fromme, D. Heitmann, S. Dietrich, R. Schierl, W. Körner, M. Kiranoglu, A. Zapf und D. Twardella, „Raumluftqualität in Schulen - Belastung von Klassenräumen mit Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), flüchtigen organischen Verbindungen (VOC), Aldehyden, Endotoxinen und Katzenallergenen,“ *Gesundheitswesen*, 2008.
- [63] K. Sedlbauer, A. Holm, R. T. Hellweg und F. Antretter, „Messung des Raumklimas und der Raumluftqualität in verschiedenen Klassenzimmern,“ DBU-Abschlussbericht Band 1 -AZ-23991,

Osnabrück.

- [64] K. Sedlbauer, A. Holm und R. T. Hellweg, „Raumklima und Schülerleistung,“ DBU-Abschlussbericht Band 2 -AZ-23991, Osnabrück.
- [65] J. W. Tukey, *Exploratory Data Analysis*, Mass. Menlo Park, Cal., London, Amsterdam, Don Mills, Ontario, Sydney: Addison-Wesley Publishing Company Reading, 1977.
- [66] K. Sedlbauer, A. Holm, R. T. Hellweg und F. Antretter, „Untersuchungen zum Raumklima und zur Fensterlüftung in Schulen,“ *Bauphysik 31, Heft 2*, pp. 89-98, 2009.
- [67] L. M. Geelen und A. van der Zijden, „Healthy Learning at School. Proceedings Healthy Buildings 2006,“ Lissabon, Portugal, 2006.
- [68] S. Steiger, F. Nöske, M. Kersken und R. T. Hellweg, „Untersuchungen zur Belüftung von Schulen,“ in *s Tagungsband Deutsche Kälte-Klima-Tagung*, Ulm, 2009.
- [69] I. Eggers, P. Matthes und D. Müller, „Hybride Lüftungstechnik für Schulgebäude – Dezentrale Lüftungstechnik,“ in *s DKV Tagung AA IV 11*, Berlin, 2009.
- [70] A. Galli und W. Hässig, „Kontrollierte Fensterlüftung – Pilotprojekt Schulhaus Untermoss,“ Hochbauamt der Stadt Zürich, Zürich, 2009.
- [71] H. Grams und J. Dreesmann, „Niedersächsisches Schulmessprogramm: Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Raumluftqualität in Klassenräumen sowie Modellierung von Kohlenstoffdioxid-Verläufen,“ Niedersächsisches Landesgesundheitsamt, Projektbericht 2002, Ergänzungen 2004.
- [72] Niedersächsisches Landesgesundheitsamt, *Modellsoftware QUIRL/CO2*, Hannover: NLGA, 2003.
- [73] A. Greml, E. Blümel, A. Gössler, R. Kapferer, W. Leitzinger, J. Suschek-Berger und P. Tappler, „Evaluierung von mechanischen Klassenzimmerlüftungen in Österreich und Erstellung eines Planungsleitfadens,“ Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.): Bericht aus Energie- und Umweltforschung 14/2008, Wien, 2008.
- [74] A. Greml, R. Kapferer, W. Leitzinger und A. Gössler, „Planungsleitfaden Klassenzimmerlüftung,“ Fachhochschule Kufstein, Tirol, 2008.
- [75] W. Hässig, A. Primas, P. Karlström, M. Leonarz und M. Marti, „CO<sub>2</sub>-gesteuerte Lüftungen in Schulen,“ Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Energie in Gebäuden, Ittingen, Bern, 2008.
- [76] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) e.V., VDI 6038: Raumluftqualität - Beurteilung der Raumluftqualität (VDI-Lüftungsregeln) (Entwurf), Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH Berlin, 2010.
- [77] Driesen + Kern GmbH, „<http://www.driesen-kern.de/>,“ [Online]. Available: <http://www.driesen-kern.de/produkte/co2-sensoren-co2-messwertgeber/co2transmitter/index.html>. [Zugriff am 11. Dezember 2011].
- [78] Ahlborn, „<http://www.ahlborn.de/>,“ [Online]. Available: <http://ahlborn.de/getfile.php?2045.pdf>. [Zugriff am 11. Dezember 2011].
- [79] H. f. A. W. Hamburg, „<http://www.wetterstation.com/>,“ [Online]. Available: [http://141.22.116.42/#http://www.yr.no/place/Germany/Hamburg/Hamburg-Bergedorf/forecast\\_hour\\_by\\_hour.xml](http://141.22.116.42/#http://www.yr.no/place/Germany/Hamburg/Hamburg-Bergedorf/forecast_hour_by_hour.xml). [Zugriff am 22. Februar 2012].
- [80] J. Dittrich Elektronik, „<http://www.dittrich-systeme.de/>,“ [Online]. Available: <http://www.dittrich-systeme.de/produkte/messfuehler/luftguete/luftgueteampel>. [Zugriff am 11. Dezember 2011].
- [81] Norsonic, „<http://www.norsonic.de/>,“ [Online]. Available: <http://www.norsonic.de/schallpegelmesser-nor140-klasse-1-und-eichfaehig.html>. [Zugriff am 11. Dezember 2011].
- [82] Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 45641: Mittelung von Schallpegeln, Berlin: Beuth Verlag GmbH Berlin, 1990.
- [83] W. Pistohl, *Handbuch der Gebäudetechnik, Band 2*, Kneiting: Werner Verlag (Wolters Kluwer Deutschland GmbH), Köln, 2009.
- [84] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) e.V., VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung, Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH Berlin, 2010.

- [85] M. N. Fisch, L. Altendorf, V. Huckemann, J. König, H. Goydke, H. Léon, M. P. Reichwald, P. K. Schultz, T. Dittert, D. Schüttler, K. Volmer, H. Kemnitz, B. Zschiesche, Linneweber und K. Pischel, „DBU Endbericht GASS - Ganzheitliche Sanierung von Schulen,“ Braunschweig, 2009.
- [86] M. BlowerDoor, *Minneapolis BlowerDoor Messgebläse*, Springe-Eldagsen: BlowerDoor GmbH, MessSysteme für Luftdichtheit, 2013.
- [87] P. Wargocki und D. P. Wyon, „The performance of school-work by children is affected by classroom air quality and temperature,“ *Proceedings of Healthy Buildings 2006, Vol. A*, p. 396 ff., 2006.
- [88] R. E. M. F. Heinz, J. Richard, F. Hanns, S. Martin, H. Peter und H. Martin, *Lehrbuch der Bauphysik - Schall, Wärme, Feuchte, Licht, Brand, Klima*, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 6. vollst. überarb. Aufl. 2008.
- [89] R. T. Hellweg, *Thermische Behaglichkeit - Unterschiede zwischen frei und mechanisch belüfteten Bürogebäuden aus Nutzersicht*, München: Selbstverlag, 2006.
- [90] D. C. Beckert, D. j. S. Fabricius und D. I. Chotjewitz, *TA Lärm - technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm mit Erläuterungen*, Berlin: Schmidt Erich Verlag, 2009.
- [91] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN V 18599: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung*, Berlin: Beuth Verlag GmbH Berlin, 2011.
- [92] „AGEB - AG Energiebilanzen e.V.,“ [Online]. Available: <http://www.ag-energiebilanzen.de/>. [Zugriff am 12. Dezember 2011].
- [93] P. Wargocki, D. P. Wyon, Y. K. Baik, G. Clausen und P. O. Fanger, „Perceived Air Quality, Sick Building Syndrome (SBS) Symptoms and Productivity in an Office with Two Different Pollution Loads,“ *Indoor Air*, pp. 165-179, 1999.
- [94] E. von Hebel, K. Jahn und K. D. Clausnitzer, „Der energetische Sanierungsbedarf und der Neubaubedarf von Gebäuden der kommunalen und sozialen Infrastruktur,“ Bremer Energie Institut, Bremen, 2011.
- [95] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN ISO 10551: Ergonomie des Umgebungsklimas - Beurteilung des Einflusses des Umgebungsklimas unter Anwendung subjektiver Bewertungsskalen (ISO 10551:1995)*, Berlin: Beuth Verlag GmbH Berlin, Januar 2002.
- [96] O. P. Fanger, „Introduction of the Olf and the dezipol Units to Quantify Air Pollution Perceived by Humans Indoors,“ *Energy and Buildings*, Dezember 1988.
- [97] M. Möser, *Messtechnik der Akustik*, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2009.

## ANHANG

Anhang 1	Datenblätter zu den Messungen der Referenzräume.....	170
Anhang 2	Grundrisse der Referenzgebäude.....	175
Anhang 3	Simulationen und Berechnungen zur CO <sub>2</sub> -Konzentration.....	177
Anhang 4	Berechnungen zum Luftwechsel .....	179
Anhang 5	Abgebrochene Messungen .....	187
Anhang 6	Gesamtauswertung der Messungen .....	189
Anhang 7	Einzelauswertungen zu den Messungen.....	202
Anhang 8	Messungen der Nachhallzeit.....	205
Anhang 9	Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	207
Anhang 10	Dokumentation der Nutzung dezentraler Lüftungsgeräte.....	208
Anhang 11	Fragebögen Raumklima.....	210
Anhang 12	Lüftungsleitfäden.....	219
Anhang 13	Durchführung der Leistungstests .....	227
Anhang 14	Auswertung der Leistungstests.....	229
Anhang 15	Projektflyer und -faltblätter .....	234

## Anhang 1      Datenblätter zu den Messungen der Referenzräume

<b>Komfortmonitoring:</b>	Grundschule Hamburg
<b>Raum:</b>	Raum 13
<b>Belüftung:</b>	dezentrales Lüftungsgerät
<b>Unterrichtszeit:</b>	Mo-Fr, 08:00 - 13:30
<b>Raumvolumen:</b>	230 m <sup>3</sup> (9 m <sup>3</sup> pro Person)
<b>Personenanzahl:</b>	Schuljahr '08/'09: Klassenstufe 4: 26 = 25 Schüler + 1 Lehrkraft Schuljahr '09/'10: Klassenstufe 4: 27 = 26 Schüler + 1 Lehrkraft Schuljahr '10/'11: Klassenstufe 7: 25 = 24 Schüler + 1 Lehrkraft
<b>Messzeitraum:</b>	01.01.2009    01.07.2011    (30 Monate)
<b>Optimierung:</b>	22.01.2010    Optimierung der Einstellungen am Lüftungsgerät
<b>Anmerkungen:</b>	keine

<b>Komfortmonitoring:</b>	Grundschule Hamburg Ehestorfer Weg
<b>Raum:</b>	Raum 16
<b>Belüftung:</b>	freie Fensterlüftung, Einsatz Lüftungsampel
<b>Unterrichtszeit:</b>	Mo-Fr, 08:00 - 13:30 Klassenstufe: 4+7
<b>Raumvolumen:</b>	230 m <sup>3</sup> (9 m <sup>3</sup> pro Person)
<b>Personenanzahl:</b>	Schuljahr '08/'09: Klassenstufe 4: 25 = 24 Schüler + 1 Lehrkraft Schuljahr '09/'10: Klassenstufe 4: 27 = 26 Schüler + 1 Lehrkraft Schuljahr '10/'11: Klassenstufe 7: 26 = 25 Schüler + 1 Lehrkraft
<b>Messzeitraum:</b>	01.01.2009    01.07.2011    (30 Monate)
<b>Optimierung:</b>	17.02.2010    Einsatz einer Lüftungsampel Selbstständige Einrichtung eines Lüftungsdienstes
<b>Anmerkungen:</b>	keine

<b>Komfortmonitoring:</b>	Schulzentrum Fallersleben
<b>Raum:</b>	Raum 209
<b>Belüftung:</b>	dezentrales Lüftungsgerät
<b>Unterrichtszeit:</b>	Mo-Fr, 07:50 - 13:10
<b>Raumvolumen:</b>	240 m <sup>3</sup> (8 m <sup>3</sup> pro Person)
<b>Personenanzahl:</b>	Schuljahr '08/'09: -- Schuljahr '09/'10: Klassenstufe 7: 28 = 27 Schüler + 1 Lehrkraft Schuljahr '10/'11: Klassenstufe 7: 30 = 29 Schüler + 1 Lehrkraft
<b>Messzeitraum:</b>	14.10.2009    07.07.2011    (21 Monate)
<b>Optimierung:</b>	16.03.2010    Optimierung der Einstellungen am Lüftungsgerät
<b>Anmerkungen:</b>	keine



<b>Komfortmonitoring:</b>	Schulzentrum Fallersleben
<b>Raum:</b>	Raum 311
<b>Belüftung:</b>	dezentrales Lüftungsgerät
<b>Unterrichtszeit:</b>	Mo - Fr, 07:50 - 13:10h
<b>Raumvolumen:</b>	240 m <sup>3</sup> (8 m <sup>3</sup> pro Person)
<b>Personenanzahl:</b>	Schuljahr '08/'09: -- Schuljahr '09/'10: Klassenstufe 9: 30 = 29 Schüler + 1 Lehrkraft Schuljahr '10/'11: Klassenstufe 9: 29 = 28 Schüler + 1 Lehrkraft
<b>Messzeitraum:</b>	14.07.2009 07.07.2011 (24 Monate)
<b>Optimierung:</b>	Keine
<b>Anmerkungen:</b>	keine

<b>Komfortmonitoring:</b>	Schulzentrum Fallersleben
<b>Raum:</b>	Raum 313
<b>Belüftung:</b>	dezentrales Lüftungsgerät (hybride Lüftung)
<b>Unterrichtszeit:</b>	Mo - Fr, 07:50 - 13:10h
<b>Raumvolumen:</b>	240 m <sup>3</sup> (7 m <sup>3</sup> pro Person)
<b>Personenanzahl:</b>	Schuljahr '08/'09: -- Schuljahr '09/'10: Klassenstufe 9: 30 = 29 Schüler + 1 Lehrkraft Schuljahr '10/'11: Klassenstufe 9: 35 = 34 Schüler + 1 Lehrkraft
<b>Messzeitraum:</b>	15.06.2009 07.07.2011 (25 Monate)
<b>Optimierung:</b>	keine
<b>Anmerkungen:</b>	keine

<b>Komfortmonitoring:</b>	Schulzentrum Fallersleben
<b>Raum:</b>	Raum 210
<b>Belüftung:</b>	freie Fensterlüftung
<b>Unterrichtszeit:</b>	Mo-Fr, 07:50 - 13:10
<b>Raumvolumen:</b>	200 m <sup>3</sup> (7 m <sup>3</sup> pro Person)
<b>Personenanzahl:</b>	Schuljahr '08/'09: -- Schuljahr '09/'10: Klassenstufe 8: 29 = 28 Schüler + 1 Lehrkraft Schuljahr '10/'11: Klassenstufe 8: 28 = 27 Schüler + 1 Lehrkraft
<b>Messzeitraum:</b>	02.02.2010 07.07.2011 (17 Monate)
<b>Optimierung:</b>	Keine
<b>Anmerkungen:</b>	keine

<b>Komfortmonitoring:</b>	Schulzentrum Fallersleben
<b>Raum:</b>	Raum 211
<b>Belüftung:</b>	freie Fensterlüftung
<b>Unterrichtszeit:</b>	Mo-Fr, 07:50 - 13:10
<b>Raumvolumen:</b>	240 m <sup>3</sup> (8 m <sup>3</sup> pro Person)
<b>Personenanzahl:</b>	Schuljahr '08/'09: -- Schuljahr '09/'10: Klassenstufe 8: 28 = 27 Schüler + 1 Lehrkraft Schuljahr '10/'11: Klassenstufe 8: 28 = 27 Schüler + 1 Lehrkraft
<b>Messzeitraum:</b>	26.10.2009 07.07.2011
<b>Optimierung:</b>	14.01.2011 Einsatz einer Lüftungsampel
<b>Anmerkungen:</b>	keine

<b>Komfortmonitoring:</b>	Schulzentrum Vorsfelde
<b>Raum:</b>	Raum 31
<b>Belüftung:</b>	zentrale Lüftungsanlage
<b>Unterrichtszeit:</b>	Mo - Fr, 07:30 - 14:00h
<b>Raumvolumen:</b>	180 m <sup>3</sup> (7 m <sup>3</sup> pro Person)
<b>Personenanzahl:</b>	Schuljahr '08/'09: Verschiedene Stufen: 25 = 24 Schüler + 1 Lehrkraft Schuljahr '09/'10: Verschiedene Stufen: 25 = 24 Schüler + 1 Lehrkraft Schuljahr '10/'11: Verschiedene Stufen: 25 = 24 Schüler + 1 Lehrkraft
<b>Messzeitraum:</b>	17.03.2009 25.01.2011 (22 Monate)
<b>Optimierung:</b>	Okt. 2009 Abschaltung der Lüftungsanlage zu Wartungszwecken Mai 2010 Wiederinbetriebnahme der Lüftungsanlage Einführung einer Nachtlüftung
<b>Anmerkungen:</b>	keine

<b>Komfortmonitoring:</b>	Grundschule Braunschweig
<b>Raum:</b>	Raum 2.1
<b>Belüftung:</b>	freie Fensterlüftung, Lüftungsworkshop
<b>Unterrichtszeit:</b>	Mo - Fr 07.45 - 13:35 h
<b>Raumvolumen:</b>	235 m <sup>3</sup> (10 m <sup>3</sup> pro Person)
<b>Personenanzahl:</b>	Schuljahr '08/'09: -- Schuljahr '09/'10: Klassenstufe 4: 23 = 22 Schüler + 1 Lehrkraft Schuljahr '10/'11: Klassenstufe 4: 25 = 24 Schüler + 1 Lehrkraft
<b>Messzeitraum:</b>	21.09.2009 06.07.2011 (22 Monate)
<b>Optimierung:</b>	Mai 2011 Durchführung eines Workshops
<b>Anmerkungen:</b>	keine

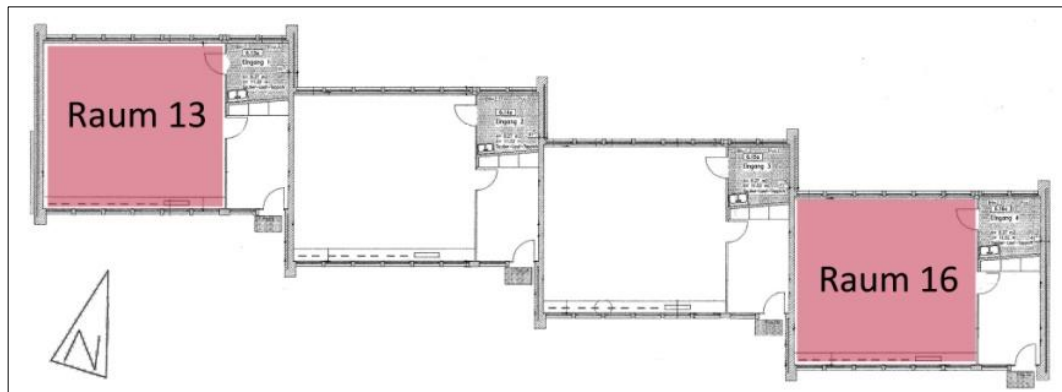
<b>Komfortmonitoring:</b>	Kindertagesstätte Wolfsburg
<b>Raum:</b>	Gruppenraum
<b>Belüftung:</b>	Ohne Lüftungstechnik
<b>Unterrichtszeit:</b>	Mo - Fr 07.30 - 16.00h
<b>Raumvolumen:</b>	145 m <sup>3</sup> (7 m <sup>3</sup> pro Person)
<b>Personenanzahl:</b>	1. Jahr: 20 Kinder, 1 Betreuer 2. Jahr: 21 Kinder, 1 Betreuer 3. Jahr 20 Kinder, 1 Betreuer
<b>Messzeiten:</b>	23.03.2009 23.02.2011 (23 Monate)
<b>Optimierung:</b>	26.07.2010 Ausgabe eines Lüftungsleitfadens
<b>Anmerkungen:</b>	keine

<b>Komfortmonitoring:</b>	Technische Universität Braunschweig
<b>Raum:</b>	Hörsaal 11.3
<b>Belüftung:</b>	freie Fensterlüftung
<b>Vorlesungszeit:</b>	Bauphysik Vorlesung: 11:30 - 13:00 h
<b>Raumvolumen:</b>	675 m <sup>3</sup> (3,5 m <sup>3</sup> pro Person)
<b>Personenanzahl:</b>	183, 197, 179, 143, 168, 143, 162, 155, 157 (165 Personen im Schnitt)
<b>Messzeitraum:</b>	22.11.2010 3 min Lüftungspause nach 45 min 29.11.2010 Vorablüftung, 3 min Lüftungspause nach 45 min 06.12.2010 Vorablüftung, 5 min Lüftungspause nach 45 min 13.12.2010 Vorablüftung, 5 min Lüftungspause nach 45 min 03.01.2011 5 min Lüftungspause nach 45 min 10.01.2011 Einsatz Blower-Door 17.01.2011 Lüftung vorab, permanent gekippte Fenster 24.01.2011 Lüftung vorab, permanent gekippte Fenster, Lüftungspause 07.02.2011 Lüftung vorab, permanent gekippte Fenster, Lüftungspause
<b>Optimierung:</b>	verschiedene Lüftungsszenarien
<b>Anmerkungen:</b>	keine

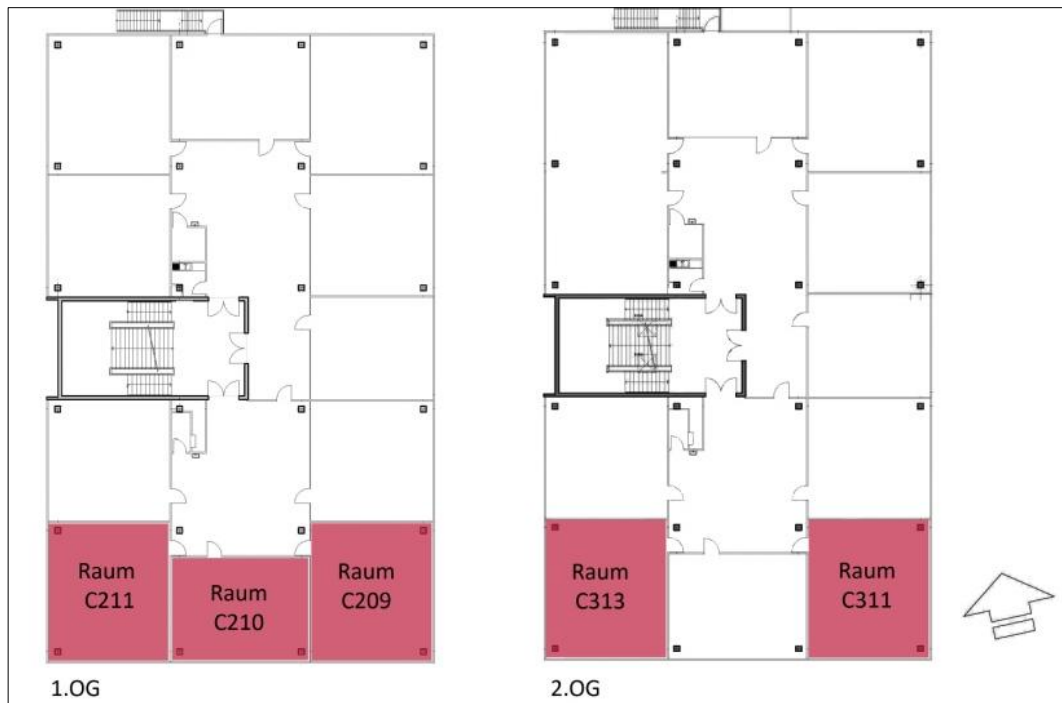
<b>Komfortmonitoring:</b>	Technische Universität Braunschweig
<b>Raum:</b>	Hörsaal 15.1
<b>Belüftung:</b>	zentrale Lüftungsanlage
<b>Vorlesungszeit:</b>	Mo-Fr, 08:00 - 15:00
<b>Raumvolumen:</b>	ca. 3.000 m <sup>3</sup> (6,3 m <sup>3</sup> pro Person)
<b>Personenanzahl:</b>	bis zu 480
<b>Messzeitraum:</b>	01.01.2009 18.11.2009 (10 Monate)
<b>Optimierung:</b>	Keine
<b>Anmerkungen:</b>	Messung abgebrochen

<b>Komfortmonitoring:</b>	Erich-Kästner Grundschule
<b>Raum:</b>	Raum C3
<b>Belüftung:</b>	dezentrales Lüftungsgerät (hybride Lüftung)
<b>Unterrichtszeit:</b>	Mo-Fr, 07:55 - 13:00
<b>Raumvolumen:</b>	220 m <sup>3</sup> (9 m <sup>3</sup> pro Person)
<b>Personenanzahl:</b>	Schuljahr '08/'09: Klassenstufe 4: 23 = 22 Schüler + 1 Lehrkraft Schuljahr '09/'10: Klassenstufe 4: 25 = 24 Schüler + 1 Lehrkraft Schuljahr '10/'11: --
<b>Messzeitraum:</b>	15.01.2009 19.10.2009 (9 Monate)
<b>Optimierung:</b>	Keine
<b>Anmerkungen:</b>	Messung abgebrochen

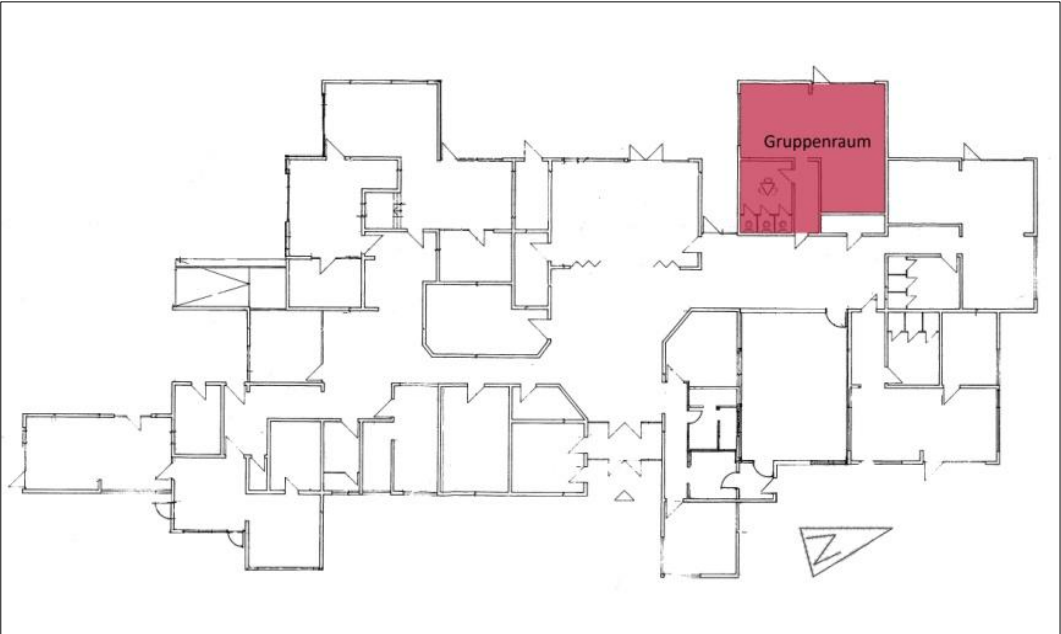
**Anhang 2 Grundrisse der Referenzgebäude**



**Grundriss GS HH**



**Grundriss SZ FL**

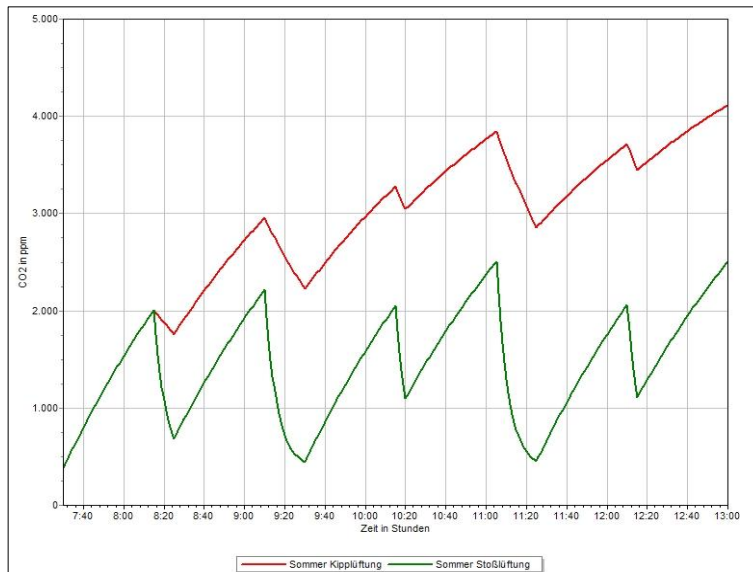


Grundriss Kita WOB

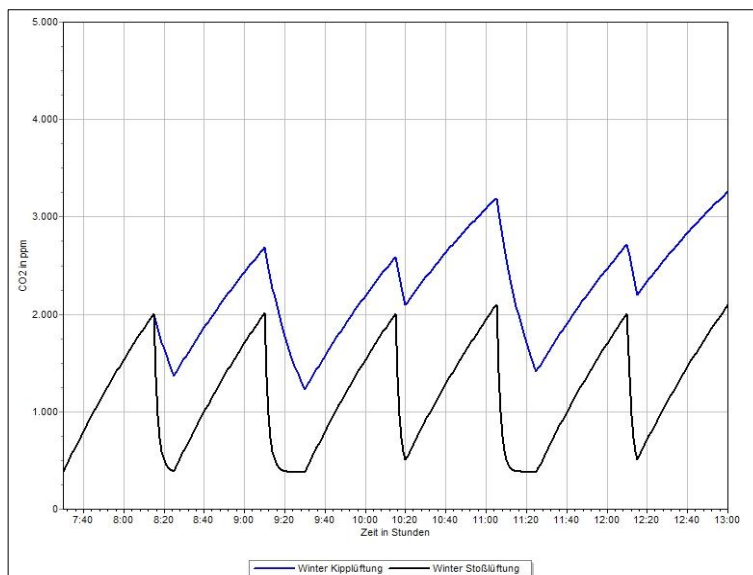


Grundriss SZ VF

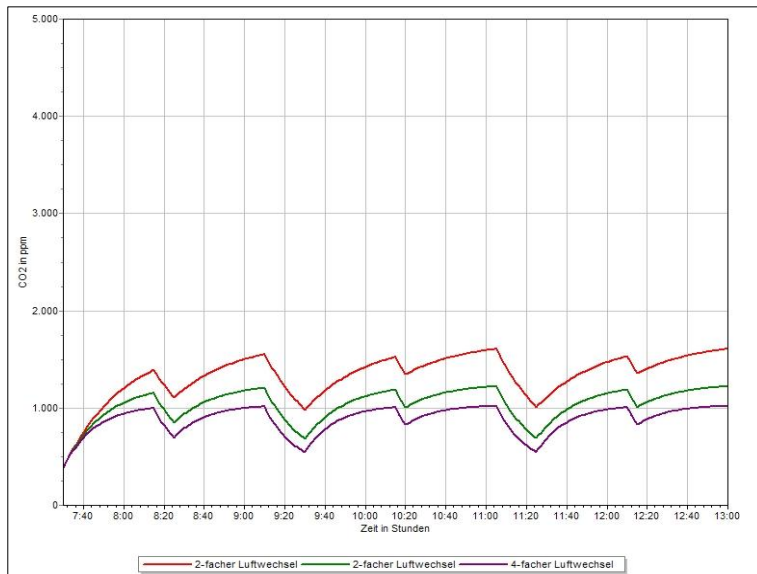
### Anhang 3 Simulationen und Berechnungen zur CO<sub>2</sub>-Konzentration



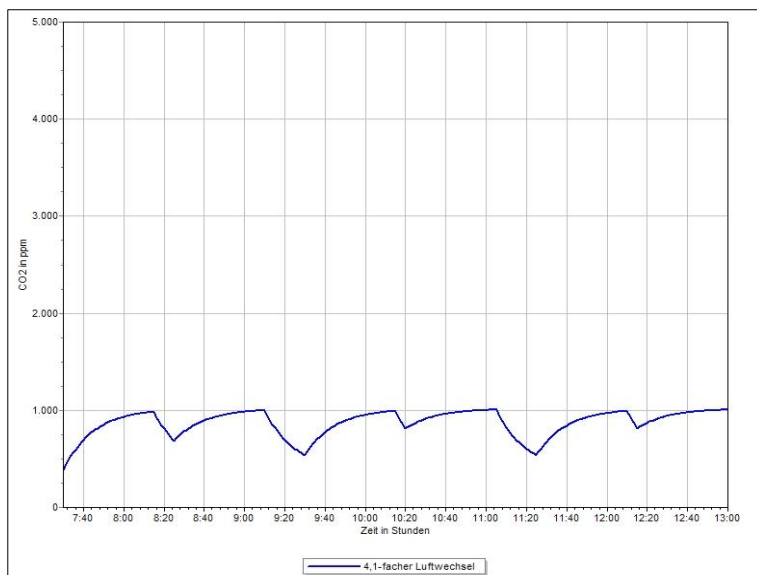
Original Abb. 4 Simulation CO<sub>2</sub>-Konzentration Lüftungsverhalten Sommer



Original Abb. 5 Simulation CO<sub>2</sub>-Konzentration Lüftungsverhalten Winter



Original Abb. 6 Simulation CO<sub>2</sub>-Konzentration Luftwechselraten



Original Abb. 12 Simulation Luftwechsel Einhaltung „Pettenkofer Zahl“



## Anhang 4 Berechnungen zum Luftwechsel

### Beispielklassenraum Berechnung des Fensterluftwechsels Sommer

Klima-Randbedingungen		Physikalische und geometrische Parameter	
Temperaturdifferenz innen - außen	2 K	Erdbeschleunigung	9,81 m/s <sup>2</sup>
Windgeschwindigkeit	1 m/s	Mittlere Temperatur	298 K
		dimensionslose Volumenstromrate bei Windantrieb	0,02
<b>Gebäude</b>		$f_{Drehsck}$ (bei Kippfenster)	0,7
Raumvolumen	192 m <sup>3</sup>	$C_d$	0,61
		$Dc_p$	0,3

Drehfenster		Oberlichter	
Anzahl	4	Anzahl	4
lichte Breite	1,40 m	lichte Breite	0,30 m
lichte Höhe	1,40 m	lichte Höhe	1,40 m
Öffnungsweite (bei Kipp Lüftung)	0,07 m	Öffnungsweite (bei Kipp Lüftung)	0,07 m

Stoßlüftung		Kipplüftung	
<b>Drehfenster weit geöffnet</b>			
lichter Querschnitt	2,0 m <sup>2</sup>	Drehfenster gekippt	
Volumenstrom thermischer Antrieb	435,6 m <sup>3</sup> /h	lichter Querschnitt	0,2 m <sup>2</sup>
Volumenstrom Windantrieb	141,1 m <sup>3</sup> /h	Breite / Höhe	1,0
<b>Volumenstrom</b>	<b>1.831,5 m<sup>3</sup>/h</b>	rel. Höhe der neutralen Ebene	0,9
		Volumenstrom thermischer Antrieb	28,0 m <sup>3</sup> /h
		Volumenstrom Windantrieb	12,0 m <sup>3</sup> /h
		<b>Volumenstrom</b>	<b>122,0 m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Oberlicht weit geöffnet</b>			
lichter Querschnitt	0,4 m <sup>2</sup>	Oberlicht gekippt	
Volumenstrom thermischer Antrieb	93,3 m <sup>3</sup> /h	lichter Querschnitt	0,1 m <sup>2</sup>
Volumenstrom Windantrieb	30,2 m <sup>3</sup> /h	Breite / Höhe	0,2
<b>Volumenstrom</b>	<b>392,5 m<sup>3</sup>/h</b>	rel. Höhe der neutralen Ebene	0,8
		Volumenstrom thermischer Antrieb	17,8 m <sup>3</sup> /h
		Volumenstrom Windantrieb	6,5 m <sup>3</sup> /h
		<b>Volumenstrom</b>	<b>75,8 m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Luftwechsel</b>			
Gesamt-Volumenstrom Stoßlüftung	2.224,0 m <sup>3</sup> /h	Gesamt-Volumenstrom Kipplüftung	197,8 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel Stoßlüftung	11,6 h <sup>-1</sup>	Luftwechsel Kipplüftung	1,0 h <sup>-1</sup>

Luftwechsel (Stoßlüftung, Oberlichter gekippt)	
Gesamt-Volumenstrom	1.907,3 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel	9,9 h <sup>-1</sup>

### Beispielklassenraum Berechnung des Fensterluftwechsels Winter

Klima-Randbedingungen		Physikalische und geometrische Parameter	
Temperaturdifferenz innen - außen	20 K	Erdbeschleunigung	9,81 m/s <sup>2</sup>
Windgeschwindigkeit	1 m/s	Mittlere Temperatur	298 K
		dimensionslose Volumenstromrate bei Windantrieb	0,02
<b>Gebäude</b>		$f_{Drehsck}$ (bei Kippfenster)	0,7
Raumvolumen	192 m <sup>3</sup>	$C_d$	0,61
		$Dc_p$	0,3

Drehfenster		Oberlichter	
Anzahl	4	Anzahl	4
lichte Breite	1,40 m	lichte Breite	0,30 m
lichte Höhe	1,40 m	lichte Höhe	1,40 m
Öffnungsweite (bei Kipp Lüftung)	0,07 m	Öffnungsweite (bei Kipp Lüftung)	0,07 m

Stoßlüftung		Kipplüftung	
<b>Drehfenster weit geöffnet</b>			
lichter Querschnitt	2,0 m <sup>2</sup>	Drehfenster gekippt	
Volumenstrom thermischer Antrieb	1.377,4 m <sup>3</sup> /h	lichter Querschnitt	0,2 m <sup>2</sup>
Volumenstrom Windantrieb	141,1 m <sup>3</sup> /h	Breite / Höhe	1,0
<b>Volumenstrom</b>	<b>5.538,6 m<sup>3</sup>/h</b>	rel. Höhe der neutralen Ebene	0,9
		Volumenstrom thermischer Antrieb	88,7 m <sup>3</sup> /h
		Volumenstrom Windantrieb	12,0 m <sup>3</sup> /h
		<b>Volumenstrom</b>	<b>358,0 m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Oberlicht weit geöffnet</b>			
lichter Querschnitt	0,4 m <sup>2</sup>	Oberlicht gekippt	
Volumenstrom thermischer Antrieb	295,2 m <sup>3</sup> /h	lichter Querschnitt	0,1 m <sup>2</sup>
Volumenstrom Windantrieb	30,2 m <sup>3</sup> /h	Breite / Höhe	0,2
<b>Volumenstrom</b>	<b>1.186,8 m<sup>3</sup>/h</b>	rel. Höhe der neutralen Ebene	0,8
		Volumenstrom thermischer Antrieb	56,3 m <sup>3</sup> /h
		Volumenstrom Windantrieb	6,5 m <sup>3</sup> /h
		<b>Volumenstrom</b>	<b>226,8 m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Luftwechsel</b>			
Gesamt-Volumenstrom Stoßlüftung	6.725,4 m <sup>3</sup> /h	Gesamt-Volumenstrom Kipplüftung	584,8 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel Stoßlüftung	35,0 h <sup>-1</sup>	Luftwechsel Kipplüftung	3,0 h <sup>-1</sup>

Luftwechsel (Stoßlüftung, Oberlichter gekippt)	
Gesamt-Volumenstrom	5.765,4 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel	30,0 h <sup>-1</sup>

**GS HH Raum 16**  
**Berechnung des Fensterluftwechsels Sommer**

**Klima-Randbedingungen**

Temperaturdifferenz innen - außen	20 K
Windgeschwindigkeit	1 m/s

**Gebäude**

Raumvolumen	230 m <sup>3</sup>
-------------	--------------------

**Physikalische und geometrische Parameter**

Erdbeschleunigung	9,81 m/s <sup>2</sup>
Mittlere Temperatur	298 K
dimensionslose Volumenstromrate bei Windantrieb	0,02
f <sub>Dreieck</sub> (bei Kippfenster)	0,7
C <sub>d</sub>	0,61
Dc <sub>p</sub>	0,3

Drehfenster		Oberlichter	
Anzahl	6	Anzahl	6
lichte Breite	1,20 m	lichte Breite	1,20 m
lichte Höhe	1,50 m	lichte Höhe	0,30 m
Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	0,07 m	Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	0,07 m

**Stoßlüftung**

**Drehfenster weit geöffnet**

lichter Querschnitt	1,8 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	414,1 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	129,6 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>2.603,3 m<sup>3</sup>/h</b>

**Oberlicht weit geöffnet**

lichter Querschnitt	0,4 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	37,0 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	25,9 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>271,2 m<sup>3</sup>/h</b>

**Luftwechsel**

Gesamt-Volumenstrom Stoßlüftung	2.874,5 m <sup>3</sup> /h
<b>Luftwechsel Stoßlüftung</b>	<b>12,5 h<sup>-1</sup></b>

**Kipplüftung**

**Drehfenster gekippt**

lichter Querschnitt	0,2 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	0,8
rel. Höhe der neutralen Ebene	0,9
Volumenstrom thermischer Antrieb	29,3 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	11,3 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>188,3 m<sup>3</sup>/h</b>

**Oberlicht gekippt**

lichter Querschnitt	0,1 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	4,0
rel. Höhe der neutralen Ebene	1,0
Volumenstrom thermischer Antrieb	3,3 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	7,1 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>47,1 m<sup>3</sup>/h</b>

**Luftwechsel**

Gesamt-Volumenstrom Kipplüftung	235,4 m <sup>3</sup> /h
<b>Luftwechsel Kipplüftung</b>	<b>1,0 h<sup>-1</sup></b>

**Luftwechsel (Stoßlüftung, Oberlichter gekippt)**

Gesamt-Volumenstrom	2.650,4 m <sup>3</sup> /h
<b>Luftwechsel</b>	<b>11,5 h<sup>-1</sup></b>

**GS HH Raum 16**  
**Berechnung des Fensterluftwechsels Winter**

**Klima-Randbedingungen**

Temperaturdifferenz innen - außen	20 K
Windgeschwindigkeit	1 m/s

**Gebäude**

Raumvolumen	230 m <sup>3</sup>
-------------	--------------------

**Physikalische und geometrische Parameter**

Erdbeschleunigung	9,81 m/s <sup>2</sup>
Mittlere Temperatur	298 K
dimensionslose Volumenstromrate bei Windantrieb	0,02
f <sub>Dreieck</sub> (bei Kippfenster)	0,7
C <sub>d</sub>	0,61
Dc <sub>p</sub>	0,3

Drehfenster		Oberlichter	
Anzahl	6	Anzahl	6
lichte Breite	1,20 m	lichte Breite	1,20 m
lichte Höhe	1,50 m	lichte Höhe	0,30 m
Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	0,07 m	Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	0,07 m

**Stoßlüftung**

**Drehfenster weit geöffnet**

lichter Querschnitt	1,8 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	1.309,4 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	129,6 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>7.894,8 m<sup>3</sup>/h</b>

**Oberlicht weit geöffnet**

lichter Querschnitt	0,4 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	117,1 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	25,9 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>719,7 m<sup>3</sup>/h</b>

**Luftwechsel**

Gesamt-Volumenstrom Stoßlüftung	8.614,5 m <sup>3</sup> /h
<b>Luftwechsel Stoßlüftung</b>	<b>37,5 h<sup>-1</sup></b>

**Kipplüftung**

**Drehfenster gekippt**

lichter Querschnitt	0,2 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	0,8
rel. Höhe der neutralen Ebene	0,9
Volumenstrom thermischer Antrieb	92,5 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	11,3 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>559,3 m<sup>3</sup>/h</b>

**Oberlicht gekippt**

lichter Querschnitt	0,1 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	4,0
rel. Höhe der neutralen Ebene	1,0
Volumenstrom thermischer Antrieb	10,6 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	7,1 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>76,4 m<sup>3</sup>/h</b>

**Luftwechsel**

Gesamt-Volumenstrom Kipplüftung	635,7 m <sup>3</sup> /h
<b>Luftwechsel Kipplüftung</b>	<b>2,8 h<sup>-1</sup></b>

**Luftwechsel (Stoßlüftung, Oberlichter gekippt)**

Gesamt-Volumenstrom	7.971,2 m <sup>3</sup> /h
<b>Luftwechsel</b>	<b>34,7 h<sup>-1</sup></b>

**SZ FL 210**

**Berechnung des Fensterluftwechsels Sommer**

**Klima-Randbedingungen**

Temperaturdifferenz innen - außen	2 K
Windgeschwindigkeit	1 m/s

**Gebäude**

Raumvolumen	200 m <sup>3</sup>
-------------	--------------------

**Physikalische und geometrische Parameter**

Erdbeschleunigung	9,81 m/s <sup>2</sup>
Mittlere Temperatur	298 K
dimensionslose Volumenstromrate bei Windantrieb	0,02
f <sub>Dreieck</sub> (bei Kippfenster)	0,7
C <sub>d</sub>	0,61
Dc <sub>p</sub>	0,3

Drehfenster		Oberlichter	
Anzahl	2	Anzahl	6
lichte Breite	1,10 m	lichte Breite	1,10 m
lichte Höhe	1,10 m	lichte Höhe	0,30 m
Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	0,07 m	Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	0,07 m

**Stoßlüftung**

**Drehfenster weit geöffnet**

lichter Querschnitt	1,2 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	238,4 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	87,1 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>507,6 m<sup>3</sup>/h</b>

**Oberlicht weit geöffnet**

lichter Querschnitt	0,3 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	33,9 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	23,8 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>248,6 m<sup>3</sup>/h</b>

**Luftwechsel**

Gesamt-Volumenstrom Stoßlüftung	756,2 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel Stoßlüftung	3,8 h <sup>-1</sup>

**Kipplüftung**

**Drehfenster gekippt**

lichter Querschnitt	0,1 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	1,0
rel. Höhe der neutralen Ebene	0,9
Volumenstrom thermischer Antrieb	19,5 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	9,4 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>43,4 m<sup>3</sup>/h</b>

**Oberlicht gekippt**

lichter Querschnitt	0,1 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	3,7
rel. Höhe der neutralen Ebene	1,0
Volumenstrom thermischer Antrieb	3,3 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	6,6 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>44,4 m<sup>3</sup>/h</b>

**Luftwechsel**

Gesamt-Volumenstrom Kipplüftung	87,7 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel Kipplüftung	0,4 h <sup>-1</sup>

**Luftwechsel (Stoßlüftung, Oberlichter gekippt)**

Gesamt-Volumenstrom	551,9 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel	2,8 h <sup>-1</sup>

**SZ FL 210**

**Berechnung des Fensterluftwechsels Winter**

**Klima-Randbedingungen**

Temperaturdifferenz innen - außen	20 K
Windgeschwindigkeit	1 m/s

**Gebäude**

Raumvolumen	200 m <sup>3</sup>
-------------	--------------------

**Physikalische und geometrische Parameter**

Erdbeschleunigung	9,81 m/s <sup>2</sup>
Mittlere Temperatur	298 K
dimensionslose Volumenstromrate bei Windantrieb	0,02
f <sub>Dreieck</sub> (bei Kippfenster)	0,7
C <sub>d</sub>	0,61
Dc <sub>p</sub>	0,3

Drehfenster		Oberlichter	
Anzahl	3	Anzahl	6
lichte Breite	1,10 m	lichte Breite	1,10 m
lichte Höhe	1,10 m	lichte Höhe	0,30 m
Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	0,07 m	Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	0,07 m

**Stoßlüftung**

**Drehfenster weit geöffnet**

lichter Querschnitt	1,2 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	753,8 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	87,1 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>2.276,3 m<sup>3</sup>/h</b>

**Oberlicht weit geöffnet**

lichter Querschnitt	0,3 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	107,4 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	23,8 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>659,7 m<sup>3</sup>/h</b>

**Luftwechsel**

Gesamt-Volumenstrom Stoßlüftung	2.936,1 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel Stoßlüftung	14,7 h <sup>-1</sup>

**Kipplüftung**

**Drehfenster gekippt**

lichter Querschnitt	0,1 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	1,0
rel. Höhe der neutralen Ebene	0,9
Volumenstrom thermischer Antrieb	61,8 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	9,4 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>187,5 m<sup>3</sup>/h</b>

**Oberlicht gekippt**

lichter Querschnitt	0,1 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	3,7
rel. Höhe der neutralen Ebene	1,0
Volumenstrom thermischer Antrieb	10,5 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	6,6 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>74,6 m<sup>3</sup>/h</b>

**Luftwechsel**

Gesamt-Volumenstrom Kipplüftung	262,0 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel Kipplüftung	1,3 h <sup>-1</sup>

**Luftwechsel (Stoßlüftung, Oberlichter gekippt)**

Gesamt-Volumenstrom	2.350,9 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel	11,8 h <sup>-1</sup>

**SZ FL 211**

**Berechnung des Fensterluftwechsels Sommer**

**Klima-Randbedingungen**

Temperaturdifferenz innen - außen	20 K
Windgeschwindigkeit	1 m/s

**Gebäude**

Raumvolumen	240 m <sup>3</sup>
-------------	--------------------

**Physikalische und geometrische Parameter**

Erdbeschleunigung	9,81 m/s <sup>2</sup>
Mittlere Temperatur	298 K
dimensionslose Volumenstromrate bei Windantrieb	0,02
f <sub>Dreieck</sub> (bei Kippfenster)	0,7
C <sub>d</sub>	0,61
Dc <sub>p</sub>	0,3

Drehfenster		Oberlichter	
Anzahl	5	Anzahl	8
lichte Breite	1,10 m	lichte Breite	1,10 m
lichte Höhe	1,10 m	lichte Höhe	0,30 m
Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	0,07 m	Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	0,07 m

**Stoßlüftung**

**Drehfenster weit geöffnet**

lichter Querschnitt	1,2 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	238,4 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	87,1 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>1.268,9 m<sup>3</sup>/h</b>

**Oberlicht weit geöffnet**

lichter Querschnitt	0,3 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	33,9 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	23,8 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>331,5 m<sup>3</sup>/h</b>

**Luftwechsel**

Gesamt-Volumenstrom Stoßlüftung	1.600,4 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel Stoßlüftung	6,7 h <sup>-1</sup>

**Kipplüftung**

**Drehfenster gekippt**

lichter Querschnitt	0,1 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	1,0
rel. Höhe der neutralen Ebene	0,9
Volumenstrom thermischer Antrieb	19,5 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	9,4 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>108,4 m<sup>3</sup>/h</b>

**Oberlicht gekippt**

lichter Querschnitt	0,1 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	3,7
rel. Höhe der neutralen Ebene	1,0
Volumenstrom thermischer Antrieb	3,3 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	6,6 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>59,2 m<sup>3</sup>/h</b>

**Luftwechsel**

Gesamt-Volumenstrom Kipplüftung	167,6 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel Kipplüftung	0,7 h <sup>-1</sup>

**Luftwechsel (Stoßlüftung, Oberlichter gekippt)**

Gesamt-Volumenstrom	1.328,1 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel	5,5 h <sup>-1</sup>

**SZ FL 211**

**Berechnung des Fensterluftwechsels Winter**

**Klima-Randbedingungen**

Temperaturdifferenz innen - außen	20 K
Windgeschwindigkeit	1 m/s

**Gebäude**

Raumvolumen	240 m <sup>3</sup>
-------------	--------------------

**Physikalische und geometrische Parameter**

Erdbeschleunigung	9,81 m/s <sup>2</sup>
Mittlere Temperatur	298 K
dimensionslose Volumenstromrate bei Windantrieb	0,02
f <sub>Dreieck</sub> (bei Kippfenster)	0,7
C <sub>d</sub>	0,61
Dc <sub>p</sub>	0,3

Drehfenster		Oberlichter	
Anzahl	5	Anzahl	8
lichte Breite	1,10 m	lichte Breite	1,10 m
lichte Höhe	1,10 m	lichte Höhe	0,30 m
Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	0,07 m	Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	0,07 m

**Stoßlüftung**

**Drehfenster weit geöffnet**

lichter Querschnitt	1,2 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	753,8 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	87,1 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>3.793,9 m<sup>3</sup>/h</b>

**Oberlicht weit geöffnet**

lichter Querschnitt	0,3 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	107,4 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	23,8 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>879,6 m<sup>3</sup>/h</b>

**Luftwechsel**

Gesamt-Volumenstrom Stoßlüftung	4.673,5 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel Stoßlüftung	19,5 h <sup>-1</sup>

**Kipplüftung**

**Drehfenster gekippt**

lichter Querschnitt	0,1 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	1,0
rel. Höhe der neutralen Ebene	0,9
Volumenstrom thermischer Antrieb	61,8 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	9,4 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>312,4 m<sup>3</sup>/h</b>

**Oberlicht gekippt**

lichter Querschnitt	0,1 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	3,7
rel. Höhe der neutralen Ebene	1,0
Volumenstrom thermischer Antrieb	10,5 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	6,6 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>99,4 m<sup>3</sup>/h</b>

**Luftwechsel**

Gesamt-Volumenstrom Kipplüftung	411,8 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel Kipplüftung	1,7 h <sup>-1</sup>

**Luftwechsel (Stoßlüftung, Oberlichter gekippt)**

Gesamt-Volumenstrom	3.893,3 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel	16,2 h <sup>-1</sup>

**SZ FL 313**  
**Berechnung des Fensterluftwechsels Sommer**

Klima-Randbedingungen		Physikalische und geometrische Parameter	
Temperaturdifferenz innen - außen	2 K	Erdbeschleunigung	9,81 m/s <sup>2</sup>
Windgeschwindigkeit	1 m/s	Mittlere Temperatur	298 K
		dimensionslose Volumenstromrate bei Windantrieb	0,02
		f <sub>Dreieck</sub> (bei Kippfenster)	0,7
		C <sub>d</sub>	0,61
		Dc <sub>p</sub>	0,3

Gebäude	
Raumvolumen	240 m <sup>3</sup>

Drehfenster		Oberlichter	
Anzahl	5	Anzahl	6
lichte Breite	1,10 m	lichte Breite	1,10 m
lichte Höhe	1,10 m	lichte Höhe	0,30 m
Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	0,07 m	Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	0,07 m

Stoßlüftung	
<b>Drehfenster weit geöffnet</b>	
lichter Querschnitt	1,2 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	238,4 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	87,1 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>1.268,9 m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Oberlicht weit geöffnet</b>	
lichter Querschnitt	0,3 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	33,9 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	23,8 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>248,6 m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Luftwechsel</b>	
Gesamt-Volumenstrom Stoßlüftung	1.517,5 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel Stoßlüftung	6,3 h <sup>-1</sup>

Kipplüftung	
<b>Drehfenster gekippt</b>	
lichter Querschnitt	0,1 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	1,0
rel. Höhe der neutralen Ebene	0,9
Volumenstrom thermischer Antrieb	19,5 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	9,4 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>108,4 m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Oberlicht gekippt</b>	
lichter Querschnitt	0,1 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	3,7
rel. Höhe der neutralen Ebene	1,0
Volumenstrom thermischer Antrieb	3,3 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	6,6 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>44,4 m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Luftwechsel</b>	
Gesamt-Volumenstrom Kipplüftung	152,8 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel Kipplüftung	0,6 h <sup>-1</sup>

Luftwechsel (Stoßlüftung, Oberlichter gekippt)	
Gesamt-Volumenstrom	1.313,3 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel	5,5 h <sup>-1</sup>

**SZ FL 313**  
**Berechnung des Fensterluftwechsels Winter**

Klima-Randbedingungen		Physikalische und geometrische Parameter	
Temperaturdifferenz innen - außen	20 K	Erdbeschleunigung	9,81 m/s <sup>2</sup>
Windgeschwindigkeit	1 m/s	Mittlere Temperatur	298 K
		dimensionslose Volumenstromrate bei Windantrieb	0,02
		f <sub>Dreieck</sub> (bei Kippfenster)	0,7
		C <sub>d</sub>	0,61
		Dc <sub>p</sub>	0,3

Gebäude	
Raumvolumen	240 m <sup>3</sup>

Drehfenster		Oberlichter	
Anzahl	5	Anzahl	6
lichte Breite	1,10 m	lichte Breite	1,10 m
lichte Höhe	1,10 m	lichte Höhe	0,30 m
Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	0,07 m	Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	0,07 m

Stoßlüftung	
<b>Drehfenster weit geöffnet</b>	
lichter Querschnitt	1,2 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	753,8 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	87,1 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>3.793,9 m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Oberlicht weit geöffnet</b>	
lichter Querschnitt	0,3 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	107,4 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	23,8 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>659,7 m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Luftwechsel</b>	
Gesamt-Volumenstrom Stoßlüftung	4.453,6 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel Stoßlüftung	18,6 h <sup>-1</sup>

Kipplüftung	
<b>Drehfenster gekippt</b>	
lichter Querschnitt	0,1 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	1,0
rel. Höhe der neutralen Ebene	0,9
Volumenstrom thermischer Antrieb	61,8 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	9,4 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>312,4 m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Oberlicht gekippt</b>	
lichter Querschnitt	0,1 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	3,7
rel. Höhe der neutralen Ebene	1,0
Volumenstrom thermischer Antrieb	10,5 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	6,6 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>74,6 m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Luftwechsel</b>	
Gesamt-Volumenstrom Kipplüftung	387,0 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel Kipplüftung	1,6 h <sup>-1</sup>

Luftwechsel (Stoßlüftung, Oberlichter gekippt)	
Gesamt-Volumenstrom	3.868,5 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel	16,1 h <sup>-1</sup>

**GS BS R2.1**  
**Berechnung des Fensterluftwechsels Sommer**

**Klima-Randbedingungen**

Temperaturdifferenz innen - außen	20 K
Windgeschwindigkeit	1 m/s

**Gebäude**

Raumvolumen	235 m <sup>3</sup>
-------------	--------------------

**Physikalische und geometrische Parameter**

Erdbeschleunigung	9,81 m/s <sup>2</sup>
Mittlere Temperatur	298 K
dimensionslose Volumenstromrate bei Windantrieb	0,02
f <sub>Dreieck</sub> (bei Kippfenster)	0,7
C <sub>d</sub>	0,61
Dc <sub>p</sub>	0,3

Drehfenster		Oberlichter	
Anzahl	5	Anzahl	5
lichte Breite	0,80 m	lichte Breite	0,80 m
lichte Höhe	1,40 m	lichte Höhe	0,35 m
Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	0,08 m	Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	0,08 m

**Stoßlüftung**

**Drehfenster weit geöffnet**

lichter Querschnitt	1,1 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	248,9 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	80,6 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>1.308,2 m<sup>3</sup>/h</b>

**Oberlicht weit geöffnet**

lichter Querschnitt	0,3 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	31,1 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	20,2 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>185,4 m<sup>3</sup>/h</b>

**Luftwechsel**

Gesamt-Volumenstrom Stoßlüftung	1.493,6 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel Stoßlüftung	6,4 h <sup>-1</sup>

**Kipplüftung**

**Drehfenster gekippt**

lichter Querschnitt	0,1 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	0,6
rel. Höhe der neutralen Ebene	0,9
Volumenstrom thermischer Antrieb	27,2 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	10,3 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>145,2 m<sup>3</sup>/h</b>

**Oberlicht gekippt**

lichter Querschnitt	0,1 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	2,3
rel. Höhe der neutralen Ebene	1,0
Volumenstrom thermischer Antrieb	4,6 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	6,0 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>38,0 m<sup>3</sup>/h</b>

**Luftwechsel**

Gesamt-Volumenstrom Kipplüftung	183,1 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel Kipplüftung	0,8 h <sup>-1</sup>

**Luftwechsel (Stoßlüftung, Oberlichter gekippt)**

Gesamt-Volumenstrom	1.346,2 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel	5,7 h <sup>-1</sup>

**GS BS R2.1**  
**Berechnung des Fensterluftwechsels Winter**

**Klima-Randbedingungen**

Temperaturdifferenz innen - außen	20 K
Windgeschwindigkeit	1 m/s

**Gebäude**

Raumvolumen	235 m <sup>3</sup>
-------------	--------------------

**Physikalische und geometrische Parameter**

Erdbeschleunigung	9,81 m/s <sup>2</sup>
Mittlere Temperatur	298 K
dimensionslose Volumenstromrate bei Windantrieb	0,02
f <sub>Dreieck</sub> (bei Kippfenster)	0,7
C <sub>d</sub>	0,61
Dc <sub>p</sub>	0,3

Drehfenster		Oberlichter	
Anzahl	5	Anzahl	5
lichte Breite	0,80 m	lichte Breite	0,80 m
lichte Höhe	1,40 m	lichte Höhe	0,35 m
Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	0,08 m	Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	0,08 m

**Stoßlüftung**

**Drehfenster weit geöffnet**

lichter Querschnitt	1,1 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	787,1 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	80,6 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>3.956,1 m<sup>3</sup>/h</b>

**Oberlicht weit geöffnet**

lichter Querschnitt	0,3 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	98,4 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	20,2 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>502,2 m<sup>3</sup>/h</b>

**Luftwechsel**

Gesamt-Volumenstrom Stoßlüftung	4.458,3 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel Stoßlüftung	19,0 h <sup>-1</sup>

**Kipplüftung**

**Drehfenster gekippt**

lichter Querschnitt	0,1 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	0,6
rel. Höhe der neutralen Ebene	0,9
Volumenstrom thermischer Antrieb	85,9 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	10,3 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>432,5 m<sup>3</sup>/h</b>

**Oberlicht gekippt**

lichter Querschnitt	0,1 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	2,3
rel. Höhe der neutralen Ebene	1,0
Volumenstrom thermischer Antrieb	14,6 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	6,0 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>79,2 m<sup>3</sup>/h</b>

**Luftwechsel**

Gesamt-Volumenstrom Kipplüftung	511,7 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel Kipplüftung	2,2 h <sup>-1</sup>

**Luftwechsel (Stoßlüftung, Oberlichter gekippt)**

Gesamt-Volumenstrom	4.035,3 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel	17,2 h <sup>-1</sup>

**Kita WOB**  
**Berechnung des Fensterluftwechsels Sommer**

Klima-Randbedingungen		Physikalische und geometrische Parameter	
Temperaturdifferenz innen - außen	2 K	Erdbeschleunigung	9,81 m/s <sup>2</sup>
Windgeschwindigkeit	1 m/s	Mittlere Temperatur	298 K
		dimensionslose Volumenstromrate bei Windantrieb	0,02
		f <sub>Dreieck</sub> (bei Kippfenster)	0,7
		C <sub>d</sub>	0,61
		DC <sub>p</sub>	0,3

Gebäude	
Raumvolumen	145 m <sup>3</sup>

Drehfenster		Oberlichter	
Anzahl	2	Anzahl	1
lichte Breite	0,80 m	lichte Breite	2,00 m
lichte Höhe	1,80 m	lichte Höhe	0,35 m
Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	0,08 m	Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	0,08 m

Stoßlüftung	
<b>Drehfenster weit geöffnet</b>	
lichter Querschnitt	1,4 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	362,9 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	103,7 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>754,8 m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Oberlicht weit öffnet</b>	
lichter Querschnitt	0,7 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	77,8 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	50,4 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>92,7 m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Luftwechsel</b>	
Gesamt-Volumenstrom Stoßlüftung	847,5 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel Stoßlüftung	5,8 h <sup>-1</sup>

Kipplüftung	
<b>Drehfenster gekippt</b>	
lichter Querschnitt	0,2 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	0,4
rel. Höhe der neutralen Ebene	0,8
Volumenstrom thermischer Antrieb	36,5 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	11,9 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>76,8 m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Oberlicht gekippt</b>	
lichter Querschnitt	0,2 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	5,7
rel. Höhe der neutralen Ebene	1,0
Volumenstrom thermischer Antrieb	4,9 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	12,9 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>13,8 m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Luftwechsel</b>	
Gesamt-Volumenstrom Kipplüftung	90,6 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel Kipplüftung	0,6 h <sup>-1</sup>

Luftwechsel (Stoßlüftung, Oberlichter gekippt)	
Gesamt-Volumenstrom	768,6 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel	5,3 h <sup>-1</sup>

**Kita WOB**  
**Berechnung des Fensterluftwechsels Winter**

Klima-Randbedingungen		Physikalische und geometrische Parameter	
Temperaturdifferenz innen - außen	20 K	Erdbeschleunigung	9,81 m/s <sup>2</sup>
Windgeschwindigkeit	1 m/s	Mittlere Temperatur	298 K
		dimensionslose Volumenstromrate bei Windantrieb	0,02
		f <sub>Dreieck</sub> (bei Kippfenster)	0,7
		C <sub>d</sub>	0,61
		DC <sub>p</sub>	0,3

Gebäude	
Raumvolumen	145 m <sup>3</sup>

Drehfenster		Oberlichter	
Anzahl	2	Anzahl	1
lichte Breite	0,80 m	lichte Breite	2,00 m
lichte Höhe	1,80 m	lichte Höhe	0,35 m
Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	0,08 m	Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	0,08 m

Stoßlüftung	
<b>Drehfenster weit geöffnet</b>	
lichter Querschnitt	1,4 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	1.147,5 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	103,7 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>2.304,3 m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Oberlicht weit öffnet</b>	
lichter Querschnitt	0,7 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	246,0 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	50,4 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>251,1 m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Luftwechsel</b>	
Gesamt-Volumenstrom Stoßlüftung	2.555,4 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel Stoßlüftung	17,6 h <sup>-1</sup>

Kipplüftung	
<b>Drehfenster gekippt</b>	
lichter Querschnitt	0,2 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	0,4
rel. Höhe der neutralen Ebene	0,8
Volumenstrom thermischer Antrieb	115,4 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	11,9 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>232,1 m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Oberlicht gekippt</b>	
lichter Querschnitt	0,2 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	5,7
rel. Höhe der neutralen Ebene	1,0
Volumenstrom thermischer Antrieb	15,4 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	12,9 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>20,1 m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Luftwechsel</b>	
Gesamt-Volumenstrom Kipplüftung	252,2 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel Kipplüftung	1,7 h <sup>-1</sup>

Luftwechsel (Stoßlüftung, Oberlichter gekippt)	
Gesamt-Volumenstrom	2.324,4 m <sup>3</sup> /h
Luftwechsel	16,0 h <sup>-1</sup>

**TU BS Hörsaal 11.3**  
**Berechnung des Fensterluftwechsels Sommer**

**Klima-Randbedingungen**

Temperaturdifferenz innen - außen	20 K
Windgeschwindigkeit	1 m/s

**Gebäude**

Raumvolumen	675 m <sup>3</sup>
-------------	--------------------

**Physikalische und geometrische Parameter**

Erdbeschleunigung	9,81 m/s <sup>2</sup>
Mittlere Temperatur	298 K
dimensionslose Volumenstromrate bei Windantrieb	0,02
f <sub>Dreieck</sub> (bei Kippfenster)	0,7
C <sub>d</sub>	0,61
Dc <sub>p</sub>	0,3

Drehfenster		Oberlichter	
Anzahl	10	Anzahl	
lichte Breite	1,00 m	lichte Breite	m
lichte Höhe	1,50 m	lichte Höhe	m
Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	0,08 m	Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	m

**Stoßlüftung**

**Drehfenster weit geöffnet**

lichter Querschnitt	1,5 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	345,1 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	108,0 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>3.615,6 m<sup>3</sup>/h</b>

**Oberlicht weit geöffnet**

lichter Querschnitt	0,0 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	0,0 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	0,0 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>0,0 m<sup>3</sup>/h</b>

**Luftwechsel**

Gesamt-Volumenstrom Stoßlüftung	3.615,6 m <sup>3</sup> /h
<b>Luftwechsel Stoßlüftung</b>	<b>5,4 h<sup>-1</sup></b>

**Kipplüftung**

**Drehfenster gekippt**

lichter Querschnitt	0,2 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	0,7
rel. Höhe der neutralen Ebene	0,9
Volumenstrom thermischer Antrieb	31,6 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	11,8 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>337,7 m<sup>3</sup>/h</b>

**Oberlicht gekippt**

lichter Querschnitt	0,0 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	0,0
rel. Höhe der neutralen Ebene	0,7
Volumenstrom thermischer Antrieb	0,0 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	0,0 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>0,0 m<sup>3</sup>/h</b>

**Luftwechsel**

Gesamt-Volumenstrom Kipplüftung	337,7 m <sup>3</sup> /h
<b>Luftwechsel Kipplüftung</b>	<b>0,5 h<sup>-1</sup></b>

**Luftwechsel (Stoßlüftung, Oberlichter gekippt)**

Gesamt-Volumenstrom	3.615,6 m <sup>3</sup> /h
<b>Luftwechsel</b>	<b>5,4 h<sup>-1</sup></b>

**TU BS Hörsaal 11.3**  
**Berechnung des Fensterluftwechsels Winter**

**Klima-Randbedingungen**

Temperaturdifferenz innen - außen	20 K
Windgeschwindigkeit	1 m/s

**Gebäude**

Raumvolumen	675 m <sup>3</sup>
-------------	--------------------

**Physikalische und geometrische Parameter**

Erdbeschleunigung	9,81 m/s <sup>2</sup>
Mittlere Temperatur	298 K
dimensionslose Volumenstromrate bei Windantrieb	0,02
f <sub>Dreieck</sub> (bei Kippfenster)	0,7
C <sub>d</sub>	0,61
Dc <sub>p</sub>	0,3

Drehfenster		Oberlichter	
Anzahl	10	Anzahl	
lichte Breite	1,00 m	lichte Breite	m
lichte Höhe	1,50 m	lichte Höhe	m
Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	0,08 m	Öffnungsweite (bei Kipplüftung)	m

**Stoßlüftung**

**Drehfenster weit geöffnet**

lichter Querschnitt	1,5 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	1.091,2 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	108,0 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>10.964,9 m<sup>3</sup>/h</b>

**Oberlicht weit geöffnet**

lichter Querschnitt	0,0 m <sup>2</sup>
Volumenstrom thermischer Antrieb	0,0 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	0,0 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>0,0 m<sup>3</sup>/h</b>

**Luftwechsel**

Gesamt-Volumenstrom Stoßlüftung	10.964,9 m <sup>3</sup> /h
<b>Luftwechsel Stoßlüftung</b>	<b>16,2 h<sup>-1</sup></b>

**Kipplüftung**

**Drehfenster gekippt**

lichter Querschnitt	0,2 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	0,7
rel. Höhe der neutralen Ebene	0,9
Volumenstrom thermischer Antrieb	100,1 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	11,8 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>1.007,5 m<sup>3</sup>/h</b>

**Oberlicht gekippt**

lichter Querschnitt	0,0 m <sup>2</sup>
Breite / Höhe	0,0
rel. Höhe der neutralen Ebene	0,7
Volumenstrom thermischer Antrieb	0,0 m <sup>3</sup> /h
Volumenstrom Windantrieb	0,0 m <sup>3</sup> /h
<b>Volumenstrom</b>	<b>0,0 m<sup>3</sup>/h</b>

**Luftwechsel**

Gesamt-Volumenstrom Kipplüftung	1.007,5 m <sup>3</sup> /h
<b>Luftwechsel Kipplüftung</b>	<b>1,5 h<sup>-1</sup></b>

**Luftwechsel (Stoßlüftung, Oberlichter gekippt)**

Gesamt-Volumenstrom	10.964,9 m <sup>3</sup> /h
<b>Luftwechsel</b>	<b>16,2 h<sup>-1</sup></b>



## Anhang 5 Abgebrochene Messungen

**TU Braunschweig, Audimax (Hörsaal 15.1):** Das Audimax der TU Braunschweig wurde Anfang der 60er - Architektur Friedrich Wilhelm Kraemer - erbaut und beinhaltet zwei übereinander liegende, große Hörsäle. Untersucht wurde der untere Saal 15.1, der keine Fenster besitzt und ausschließlich mechanisch belüftet wird. Über die Lüftungsanlage wird der Raum je nach Bedarf beheizt oder gekühlt. Der Hörsaal bietet in gestaffelten Reihen Sitzplätze für 480 Studenten.



**TU BS Audimax Nordansicht**



**TU BS Hörsaal 15.1**

Die Lüftungsanlagen für die beiden Hörsäle des Audimax sind aus der Bauzeit. Die Anlage besitzt eine Wärmerückgewinnung über Kreuzstromwärmetauscher, eine Angabe zum Wärmerückgewinnungsgrad kann nicht getroffen werden. Bei 100 %iger Laufleistung fördert die Anlage einen Luftvolumenstrom von bis zu 30.000 m<sup>3</sup>/h. Bei dem vorhandenen Raumvolumens von ca. 3.000 m<sup>3</sup>, kann somit ein zehnfacher Luftwechsel erzielt werden. Die mechanische Lüftungsanlage wird ausschließlich über die Technikzentrale zeitprogrammiert entsprechend des Belegungsplans gesteuert. Ein direktes Eingreifen in den Betrieb ist vom Hörsaal aus nicht möglich. Die Zulufttemperatur beträgt 22 °C. In der Technikzentrale erfolgt eine Protokollierung Raumluftdaten. Über Sensoren werden im Raum und in den Abluftkanälen die Raumlufttemperatur, Temperatur des Zuluftstroms, relative Luftfeuchtigkeit und die CO<sub>2</sub>-Konzentration erfasst und aufgezeichnet. Die Messung für den Hörsaal 15.1 im Audimax der TU Braunschweig erfolgte über 10 Monate. Es konnte jedoch keine Maßnahme entwickelt oder umgesetzt werden, ohnehin eine Sanierung für das gesamte Gebäude umgesetzt wurde, bei dem ein Austausch und eine Instandsetzung der Lüftungstechnik durchgeführt wurden. Eine erneute Messreihe war geplant, wurde jedoch nicht umgesetzt, da mit dem Austausch der Technik eine Aufzeichnung der Messdaten nicht mehr durchgeführt werden konnte.

### **Kenndaten TU BS 15.1**

<b>Raumvolumen</b>	➤ 3.000 m <sup>3</sup>
<b>Personenzahl</b>	➤ bis zu 480, Raumvolumen pro Person: 6,3 m <sup>3</sup>
<b>Belüftung</b>	➤ mechanisch zentral ➤ Luftvolumenstrom je nach Betrieb, Stufe 1 = AUS, Stufe 2 = 15.000 m <sup>3</sup> /h, Stufe 3 = 30.000 m <sup>3</sup> /h, Luftwechsel bis zu 10 h <sup>-1</sup>
<b>Messzeitraum</b>	➤ 10 Monate
<b>Gemessene Parameter</b>	➤ CO <sub>2</sub> -Konzentration, Raumlufttemperatur, rel. Raumluftfeuchtigkeit, Betriebszeiten Lüftungsanlage

**Erich Kästner Grundschule Cremlingen (EK GS):** Die Grundschule aus dem Baujahr 1976. Im Jahr 2008 wurden die Fenster erneuert. In der Grundschule werden die Klassenstufen eins bis vier von Montag bis Freitag unterrichtet. Die Belüftung der Klassenräume erfolgt natürlich. Der untersuchte Klassenraum ist nach Süden orientiert und besitzt eine ganzseitige Fensterfront. Diese ist geteilt in eine Festverglasung, zwei Oberlichter die nur gekippt werden können und zwei Fenster mit Drehkipplügel. Der Klassenraum der Stufe vier mit 22 Schülern besitzt ein Raumvolumen von 220 m<sup>3</sup>. Der Unterricht findet frontal statt.



**EK GS Haupteingang/ Nordansicht**



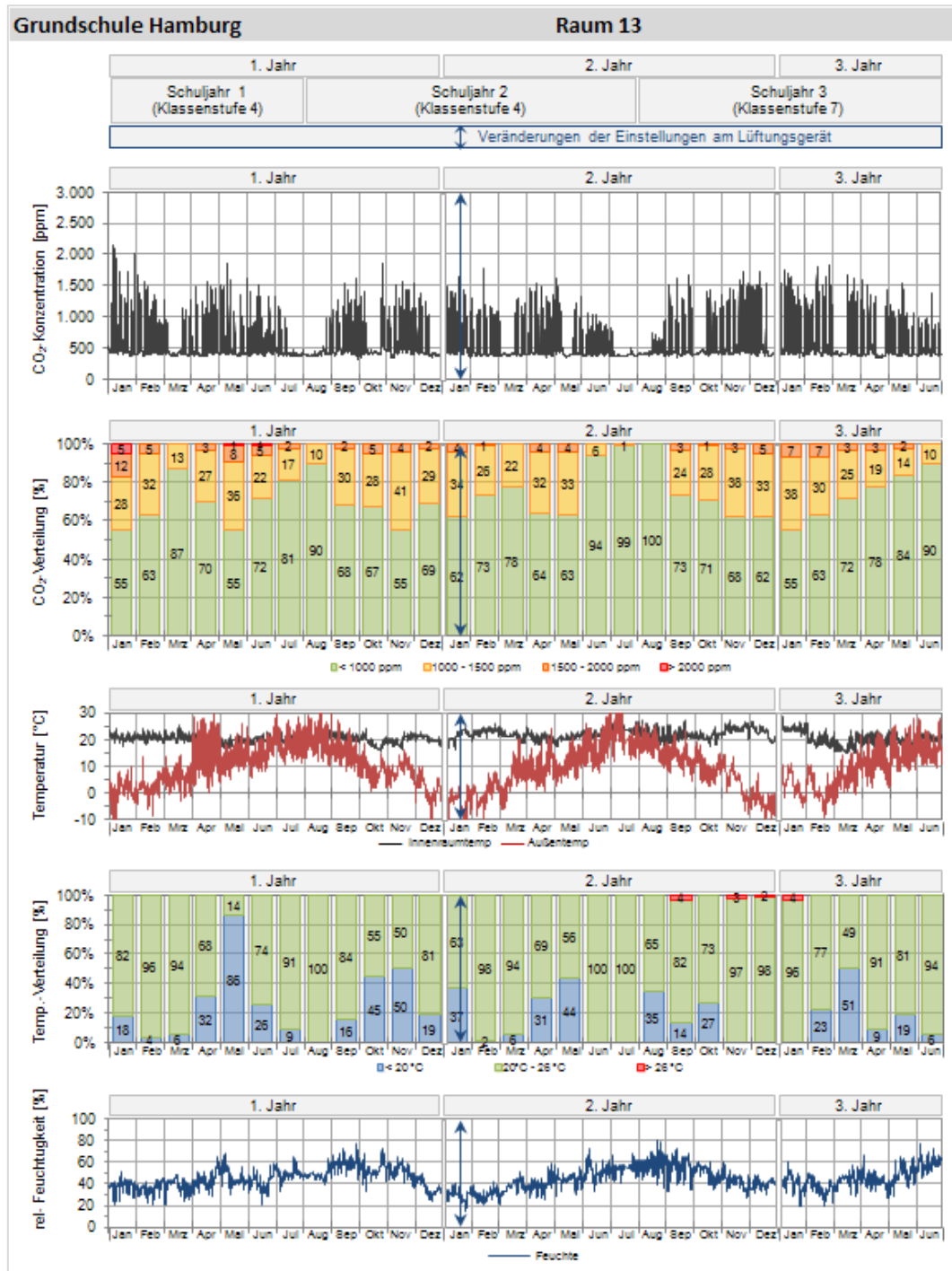
**EK GS Raum C3**

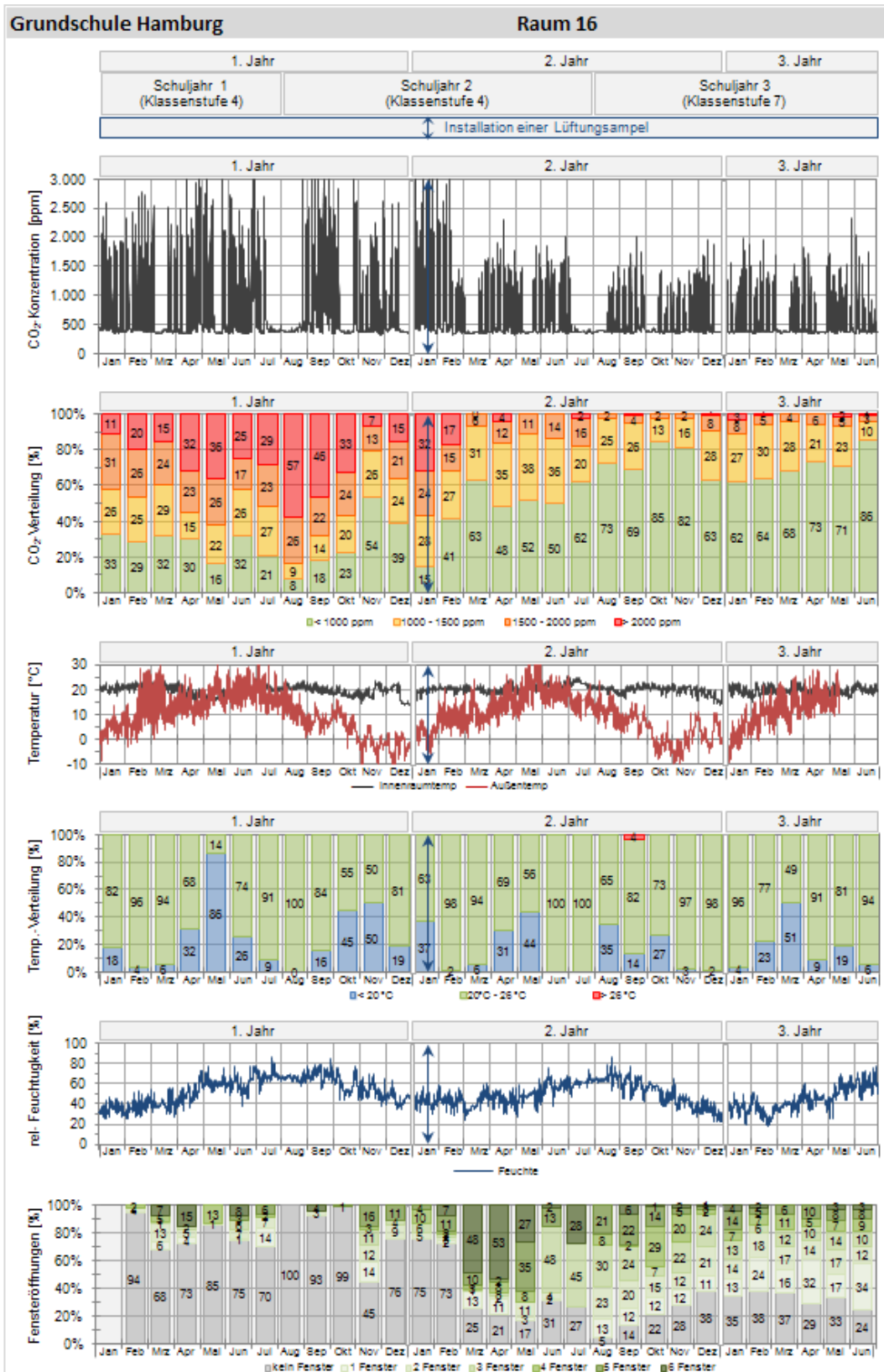
Die in der Außenwand installierten Lüftungsgeräte fördern einen Luftvolumenstrom von bis zu 40 m<sup>3</sup>/h. Sie verfügen über eine rekuperative Wärmerückgewinnung mittels eines Keramikspeichers. Der Wärmerückgewinnungsgrad liegt nach Herstellerangabe etwa bei 40 %. Der Hersteller fordert einen parallelen Betrieb von zwei Geräten pro Raum. Die beiden Geräte laufen im wechselseitigen Betrieb. Eines der beiden Geräte fährt dabei Zuluft, das andere Abluft. Im Takt von 70 Sekunden ändern die Ventilatoren ihre Laufrichtung. Die Geräte können auch bei gleich bleibender Laufrichtung betrieben werden. Die Geräte werden ausschließlich manuell eingeschaltet. Die Bedieneinheit ist im Klassenraum installiert und kann somit sowohl von Schülern, als auch vom den Lehrern bedient werden. Eine Einstellung der Zulufttemperatur kann nicht vorgenommen werden. Bei einem Raumvolumen von 220 m<sup>3</sup> können die Lüftungsgeräte keinen ausreichenden Luftvolumenstrom zur Erhaltung einer angemessenen Raumluftqualität gewährleisten, die Luftmenge von 40m<sup>3</sup>/h kommt lediglich einem Luftwechsel einer „undichten“ Fassade gleich. Die Aufzeichnung der Messdaten in Raum C3 erfolgte über einen Zeitraum von knapp 9 Monaten. Es konnte kein Konzept zur Verbesserung der Raumluftqualität entwickelt oder umgesetzt werden. Die Schule wurde auf Wunsch der Klassenlehrerin aus dem Projekt genommen wurde.

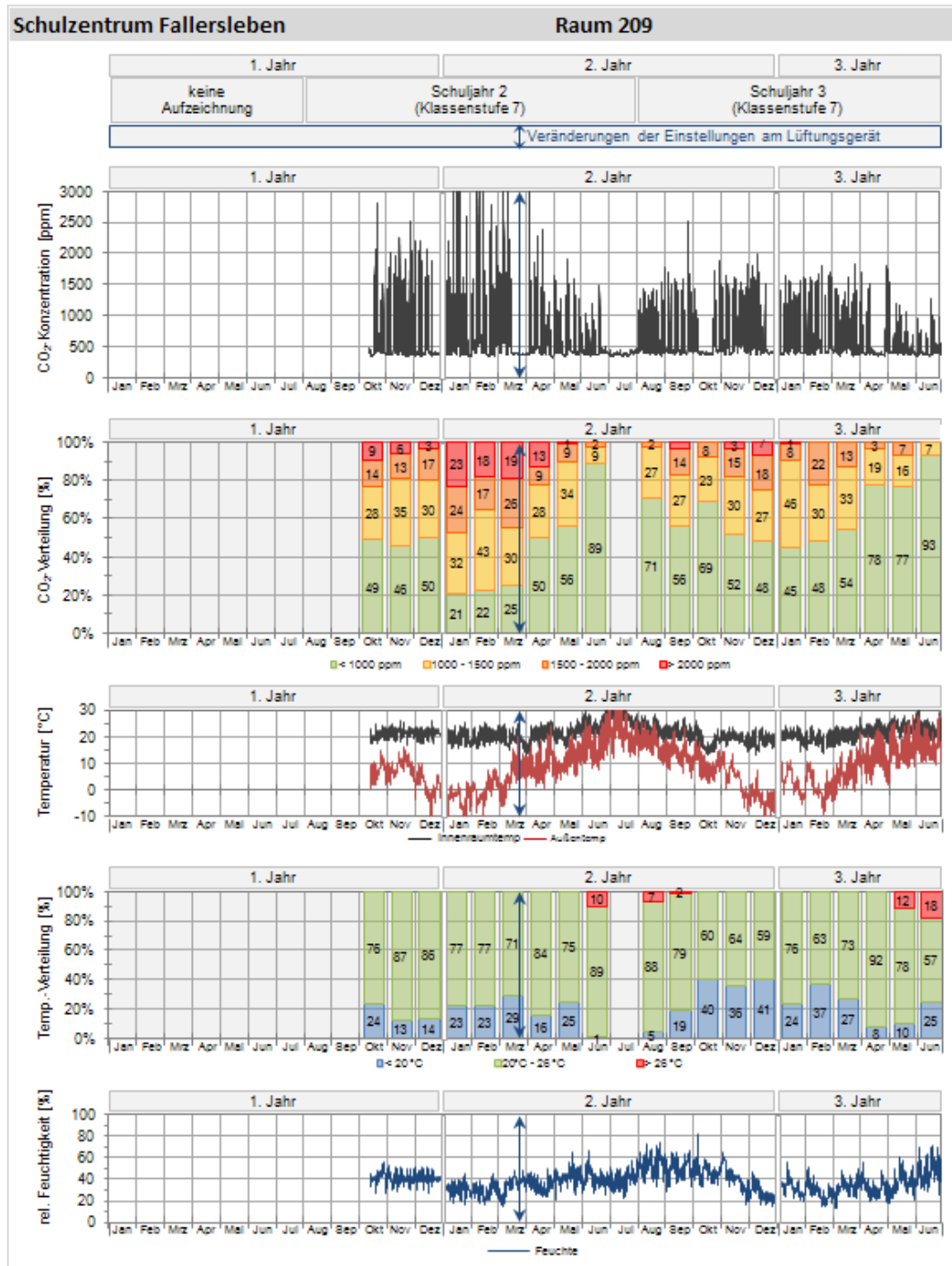
#### **Kenndaten EK GS**

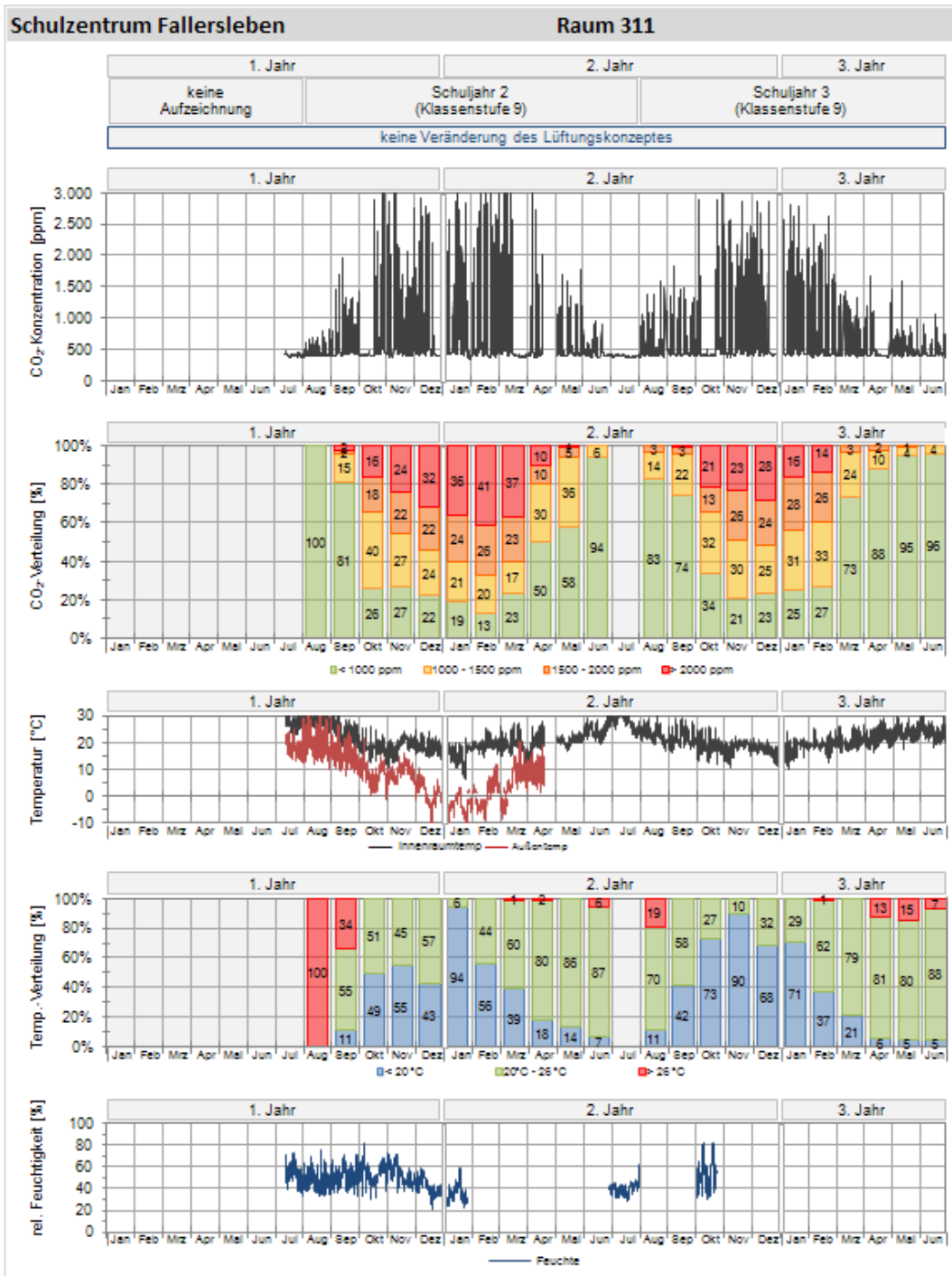
<b>Raumvolumen</b>	➤ 220 m <sup>3</sup>
<b>Personenzahl</b>	➤ 23 Schüler, 1 Lehrkraft, Raumvolumen pro Person: 9,2 m <sup>3</sup>
<b>Belüftung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Hybride Lüftung (Lüftungsgerät dezentral)</li> <li>➤ Luftvolumenstrom je nach Betrieb: Stufe 1 = 13 m<sup>3</sup>/h, Stufe 2 = 26 m<sup>3</sup>/h, Stufe 3 = 40 m<sup>3</sup>/h</li> <li>➤ Luftwechsel bis zu 0,18 h<sup>-1</sup> bei geschlossenen Fenstern, bei Kipplüftung inkl. Lüftungsgerät 0,8 h<sup>-1</sup>, bei Stoßlüftung inkl. Lüftungsgerät 5,3 h<sup>-1</sup></li> </ul>
<b>Messzeitraum</b>	➤ 10 Monate
<b>Gemessene Parameter</b>	➤ CO <sub>2</sub> -Konzentration, Raumlufttemperatur, rel. Raumluftfeuchtigkeit, Fensterkontakte

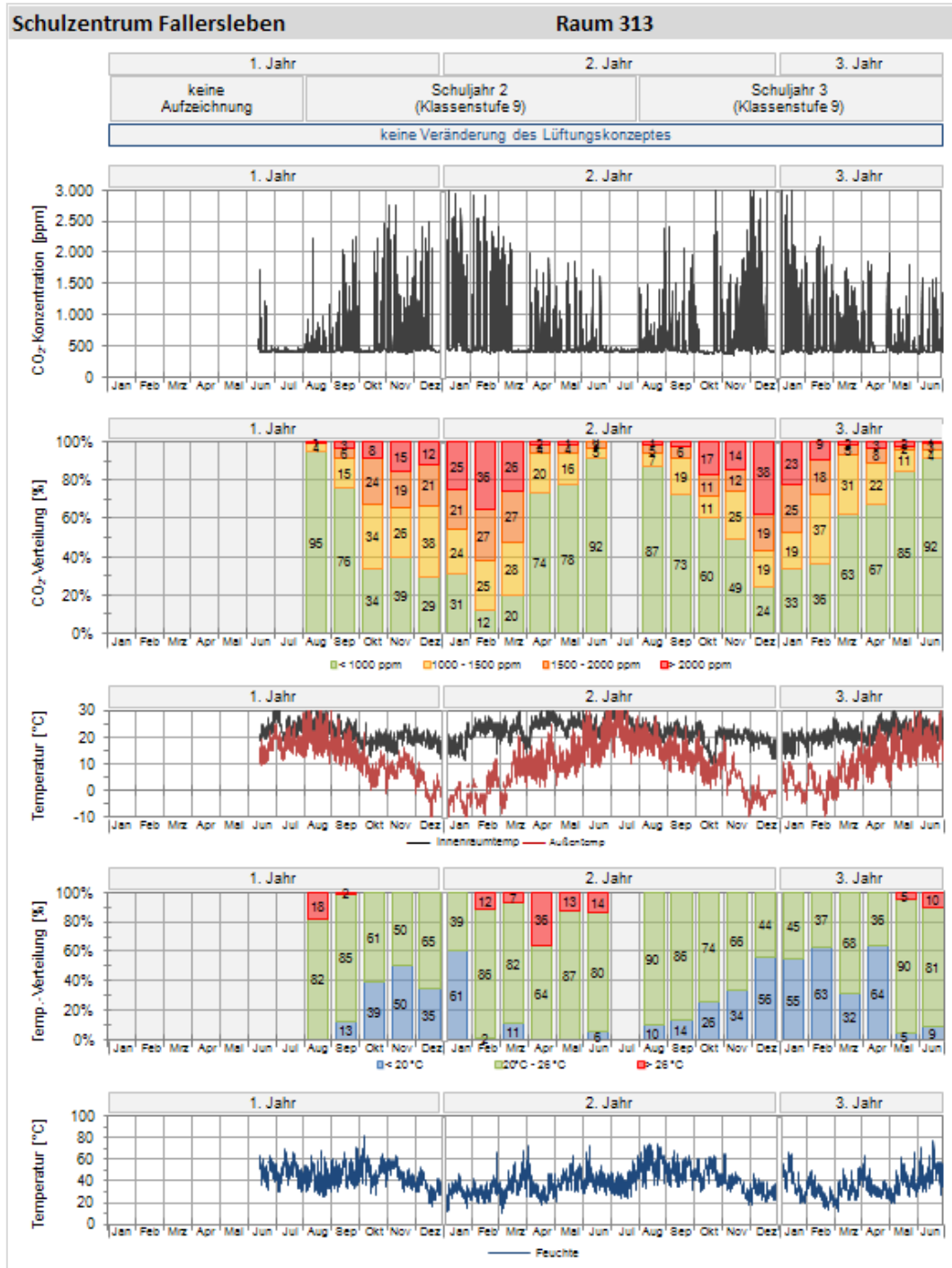
## Anhang 6 Gesamtauswertung der Messungen

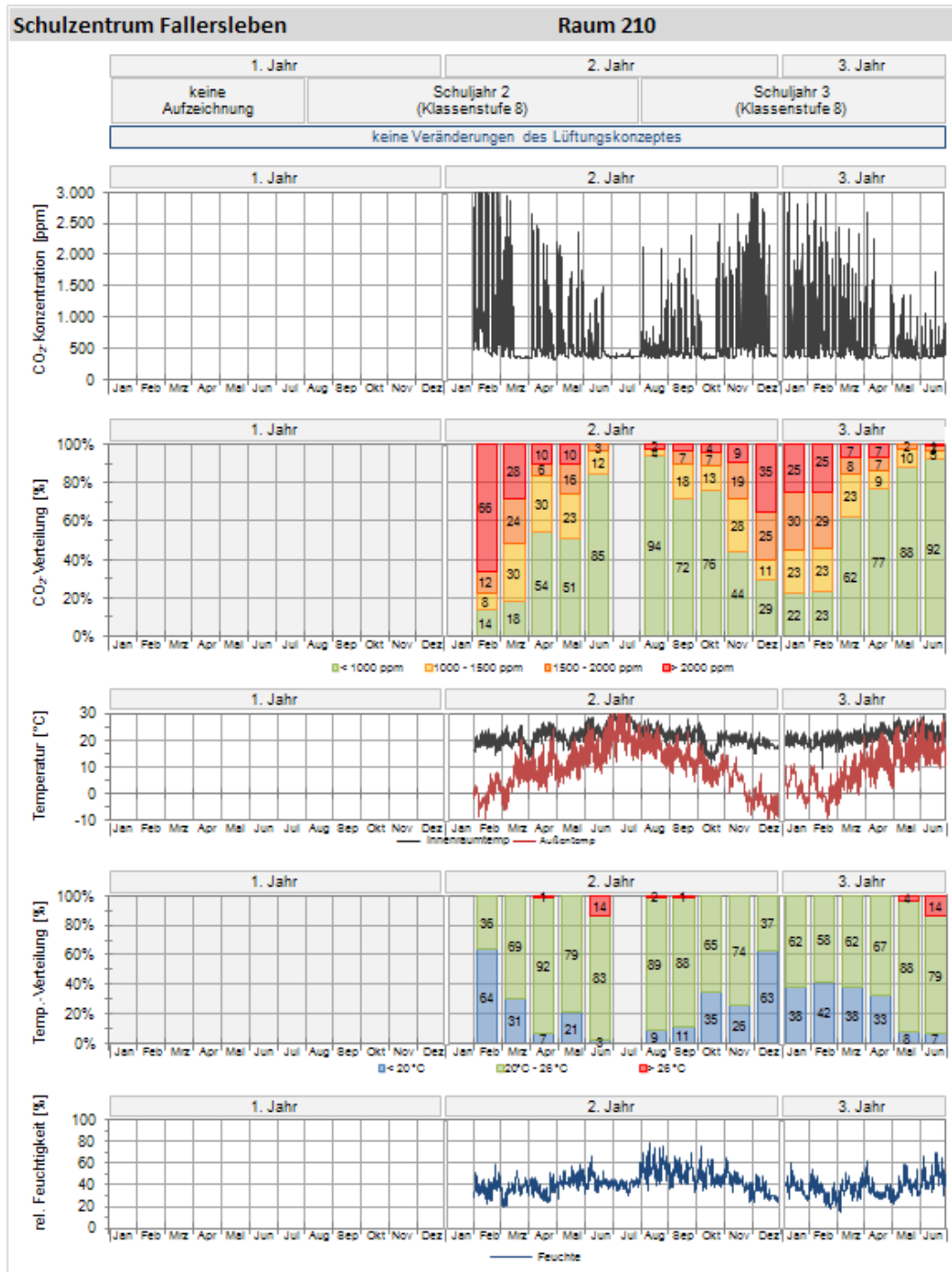




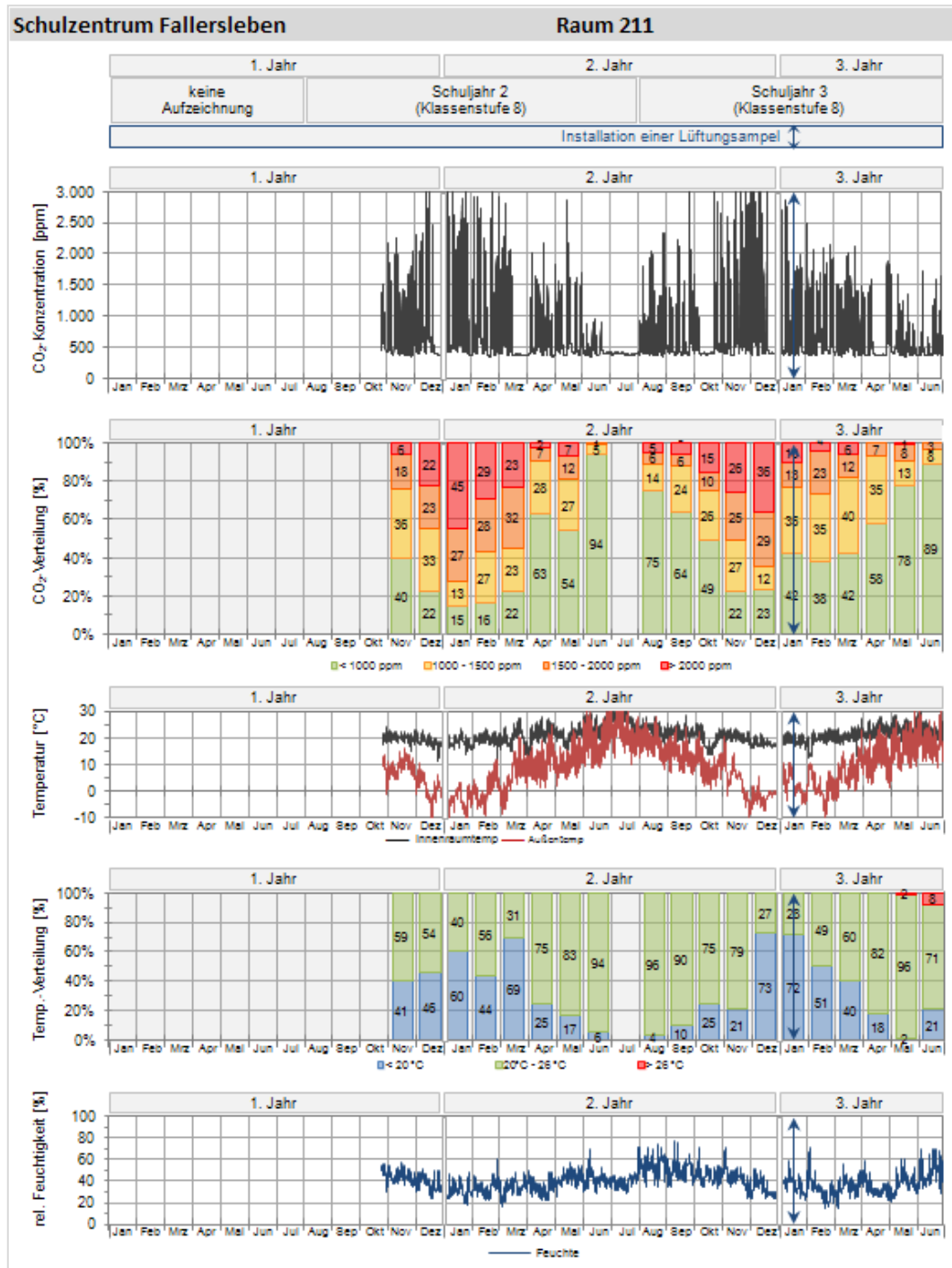


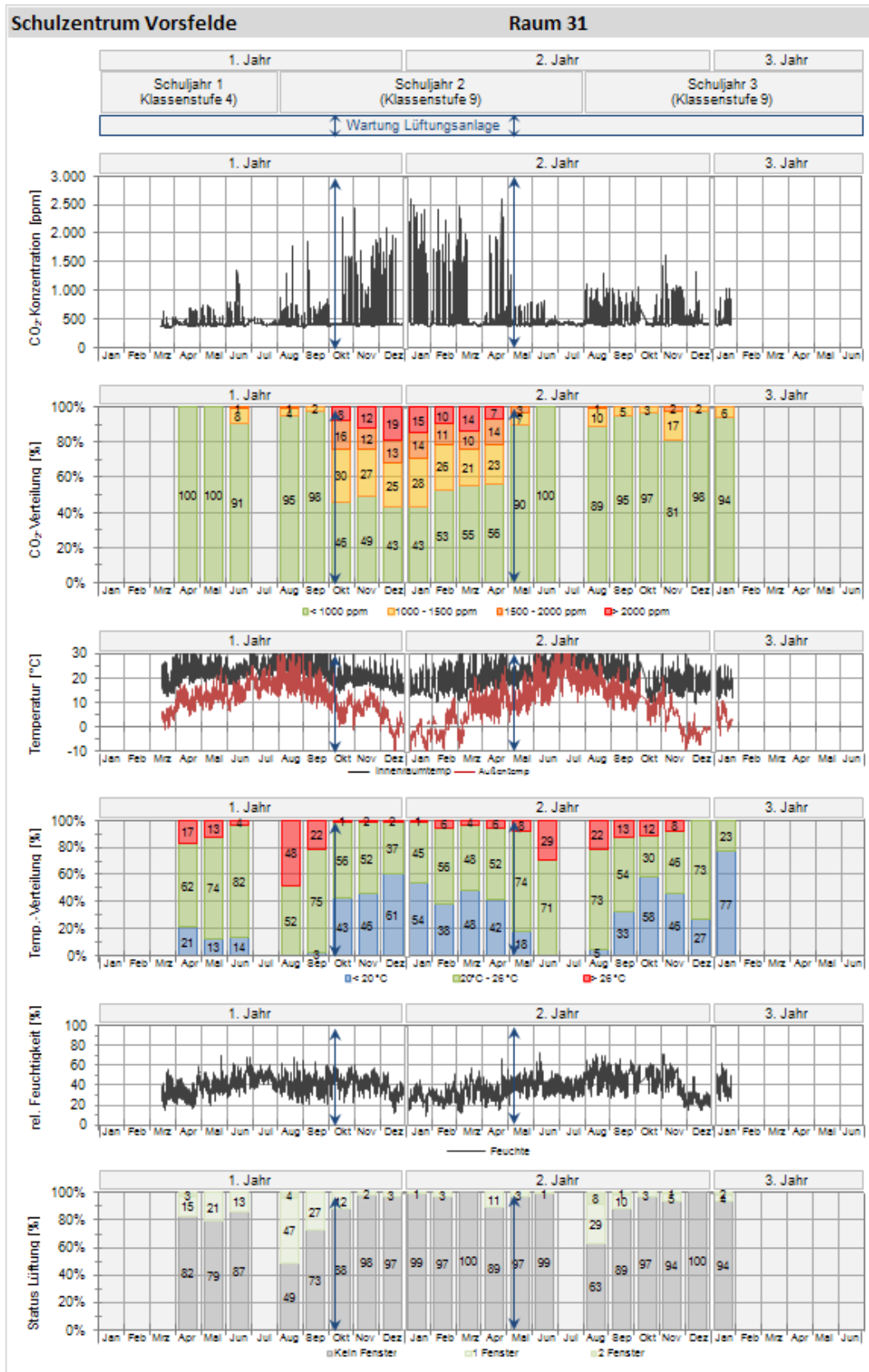


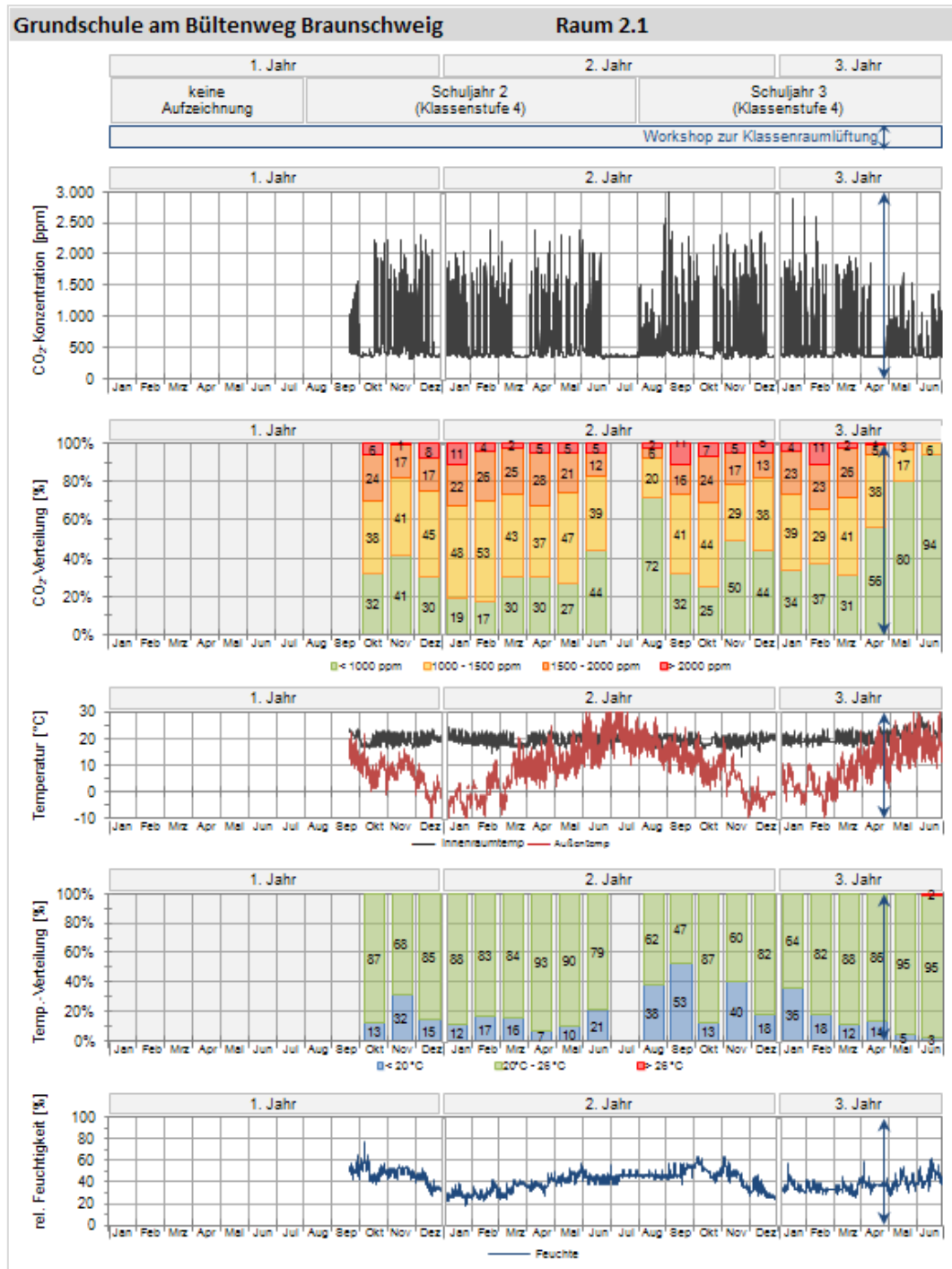


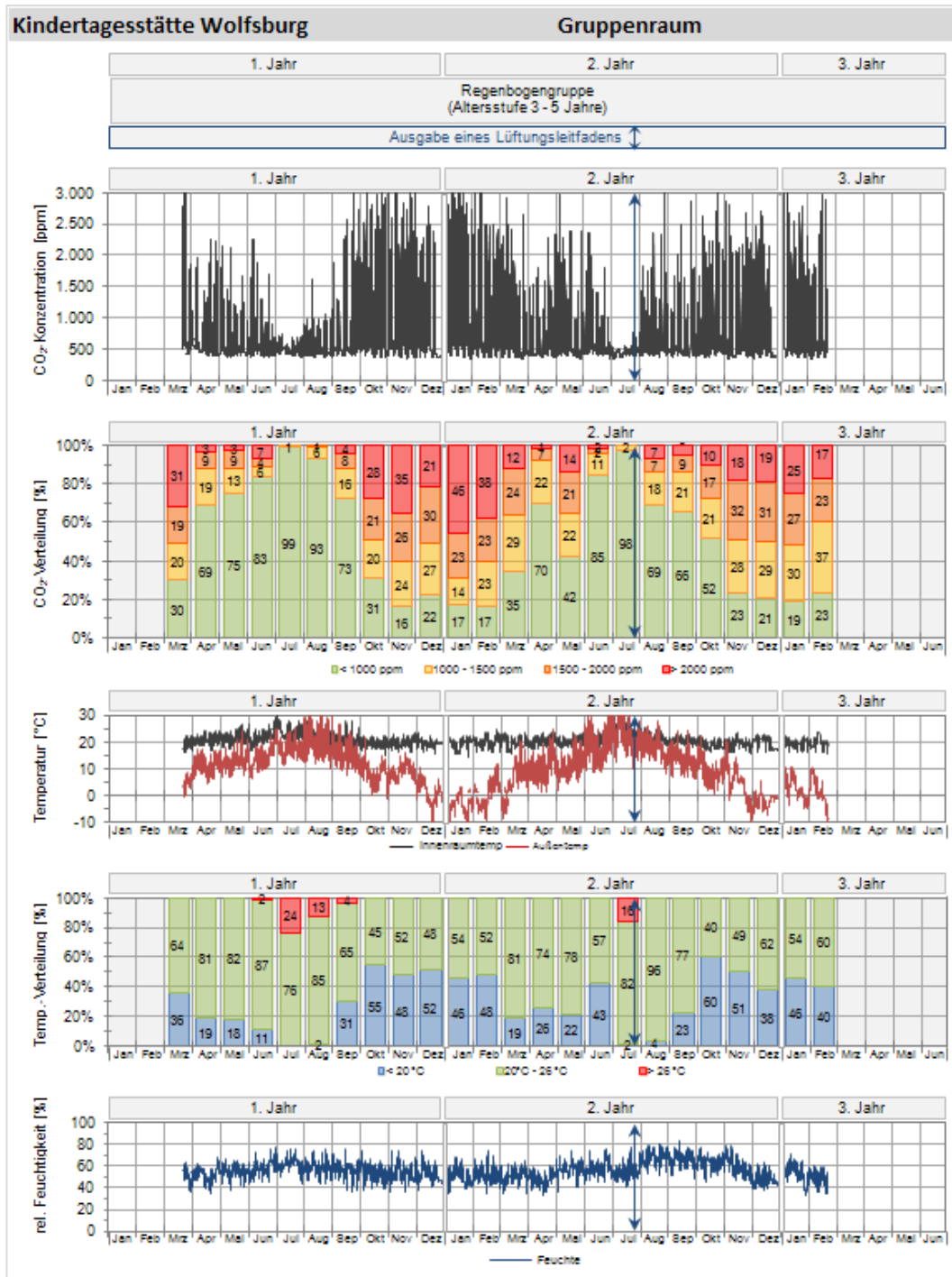


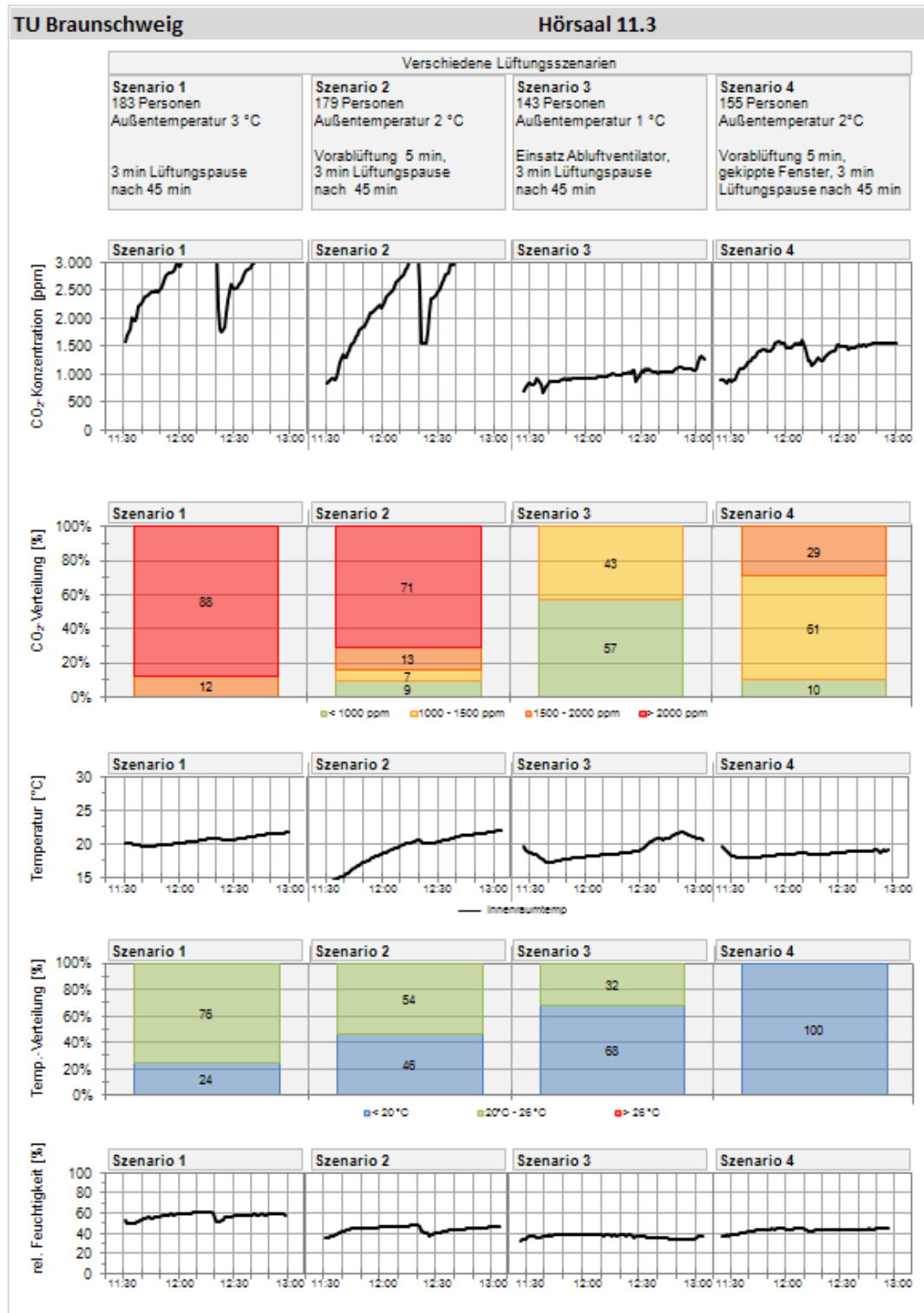


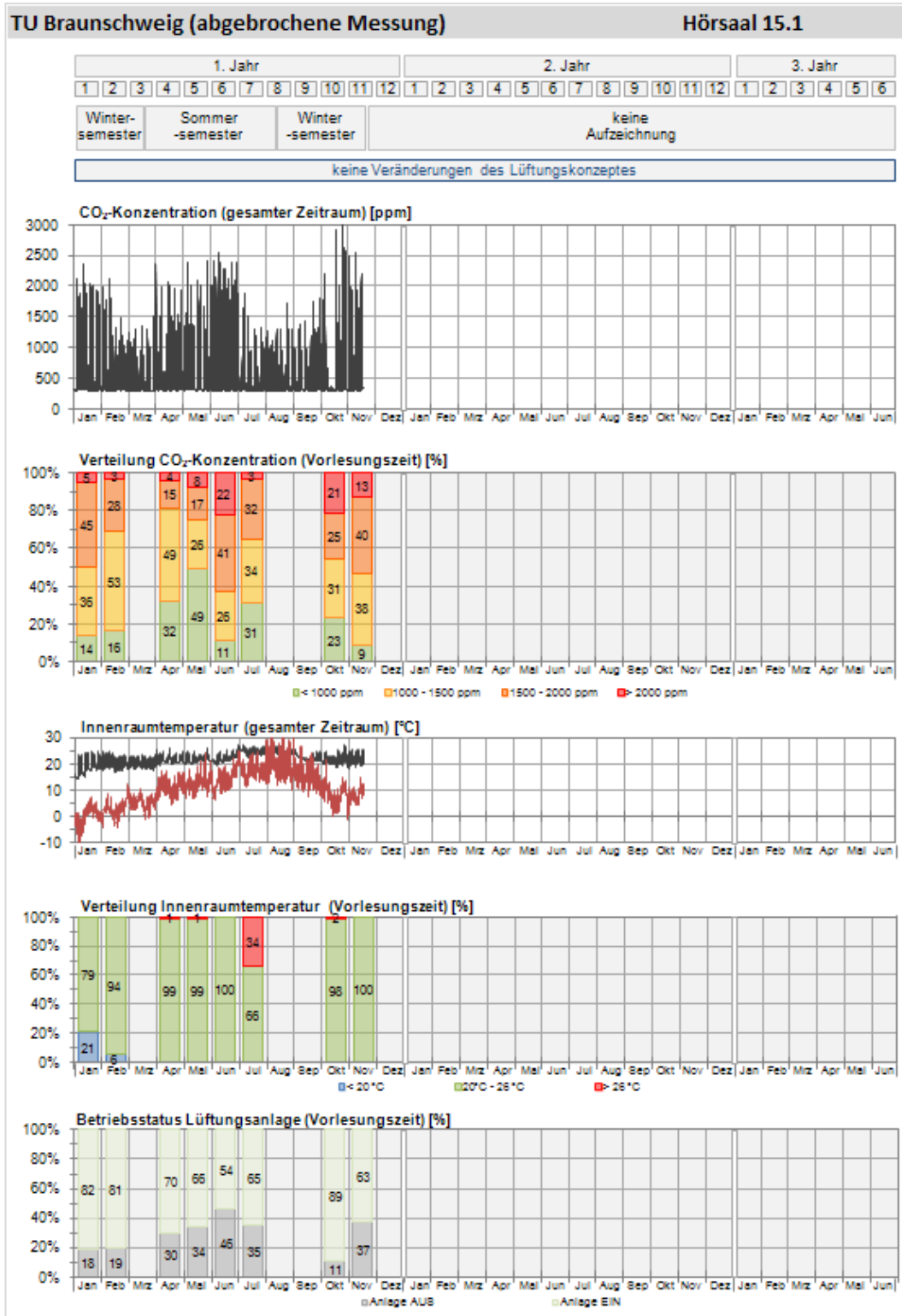


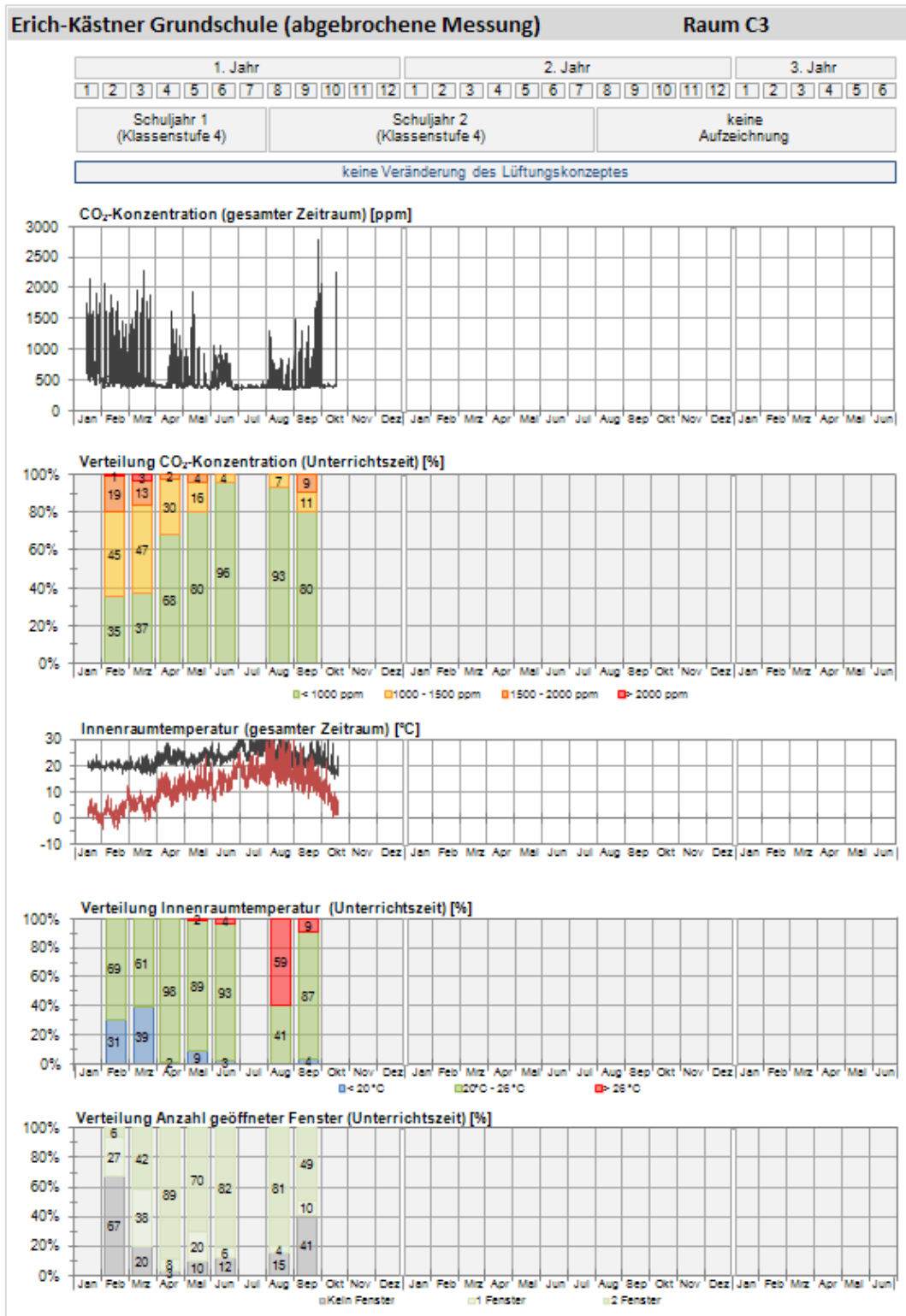




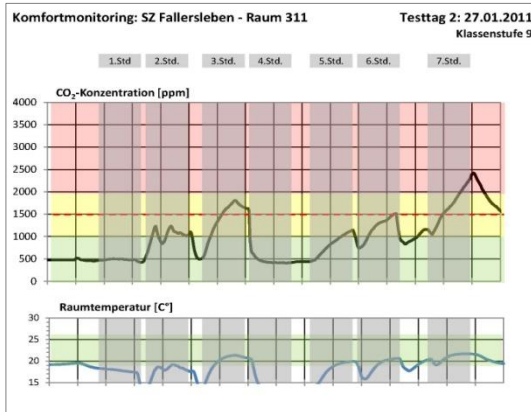
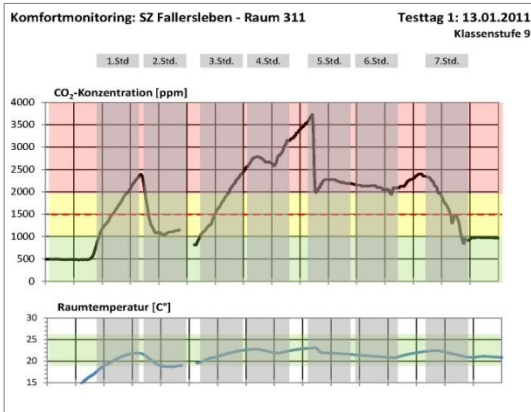
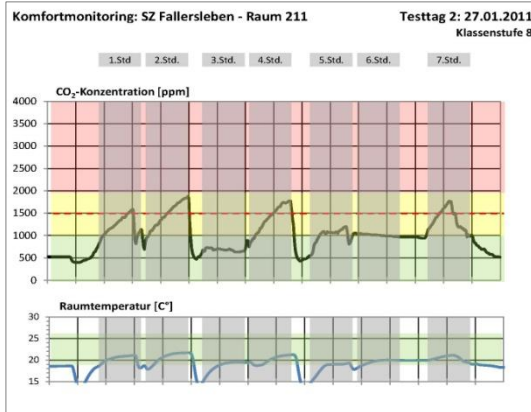
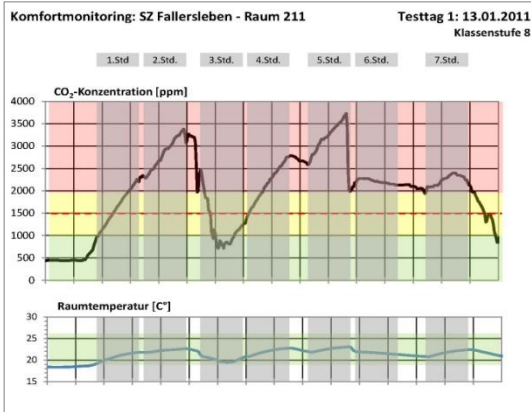
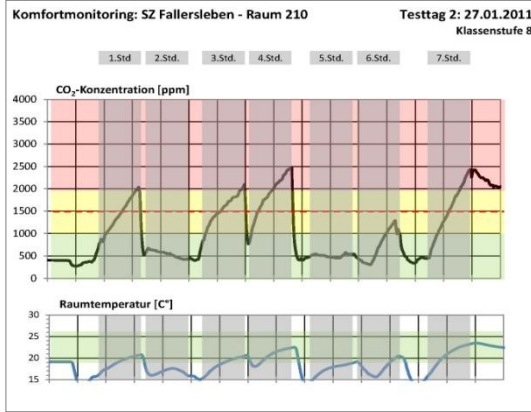
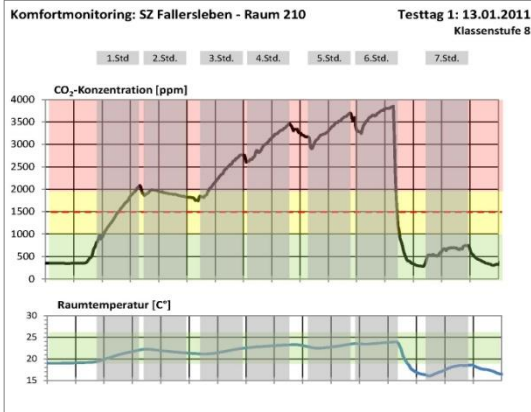
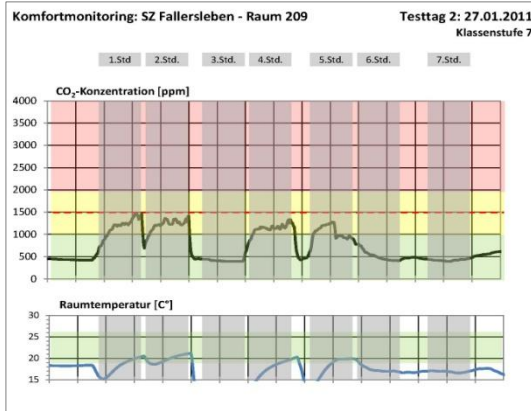
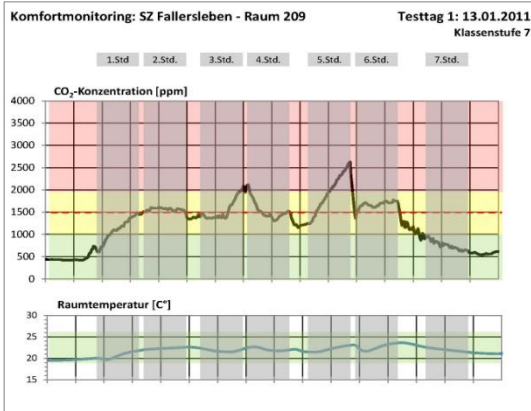




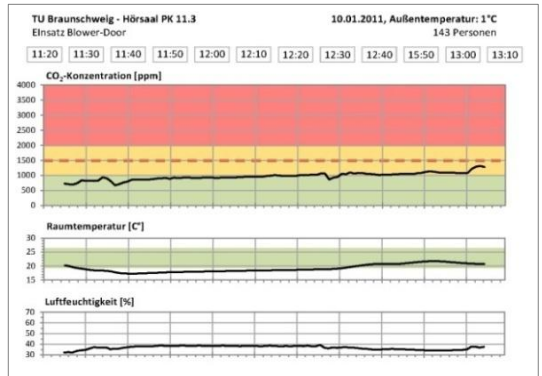
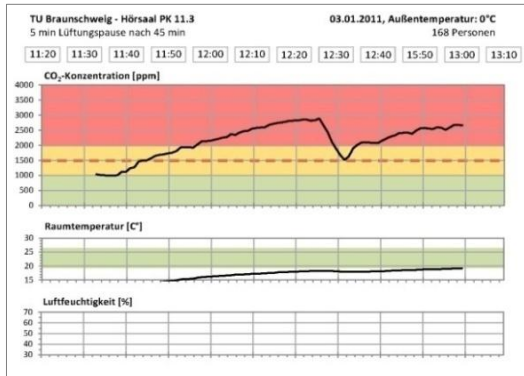
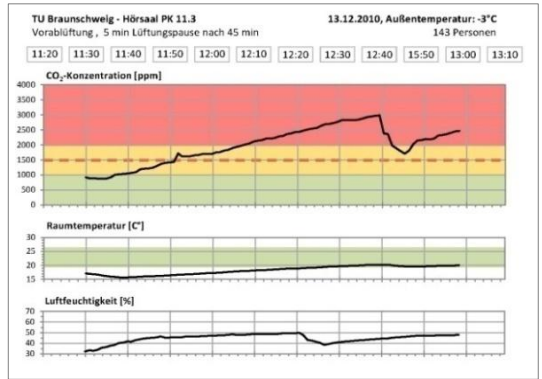
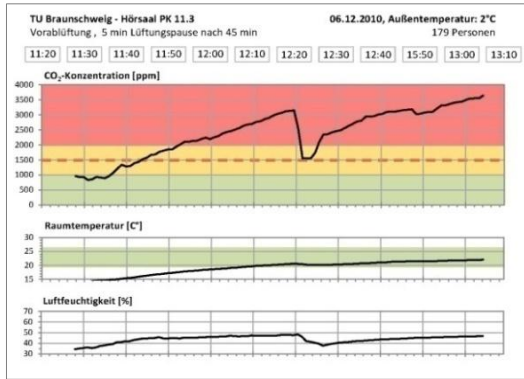
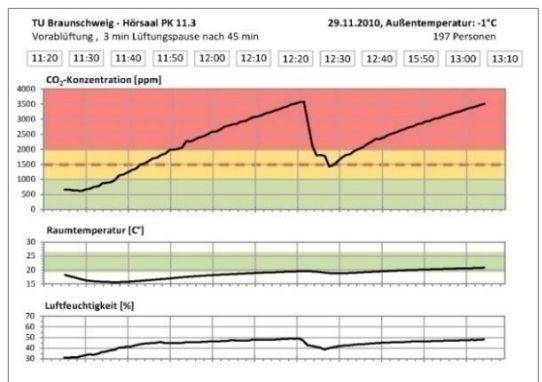
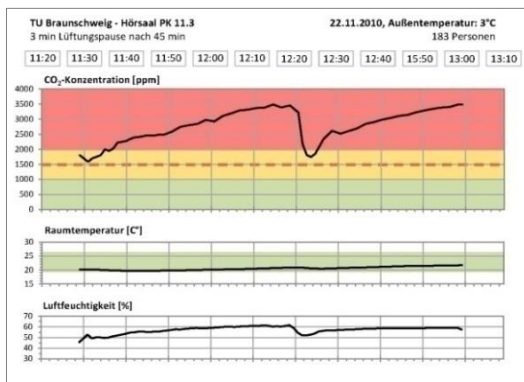
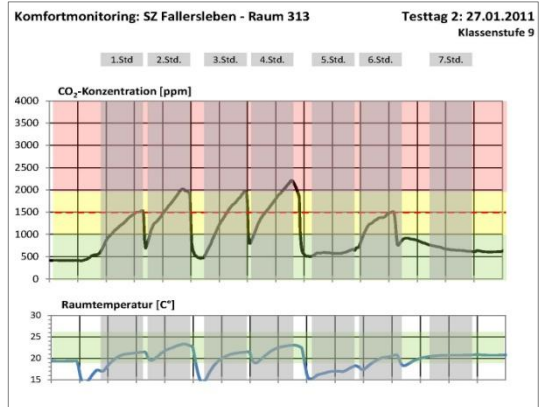
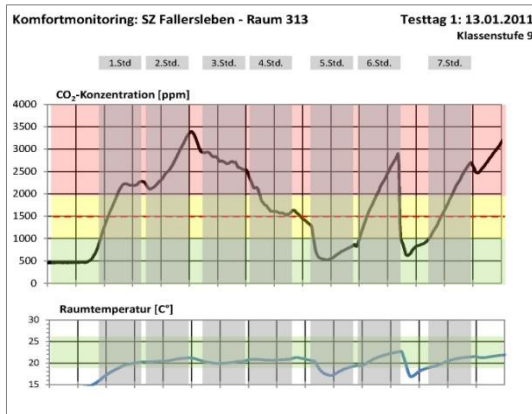


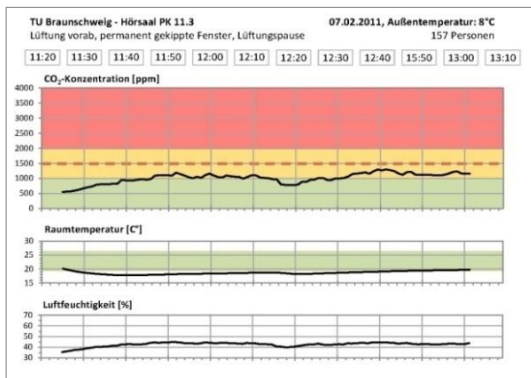
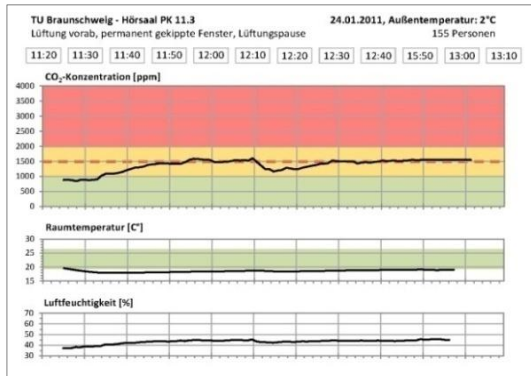
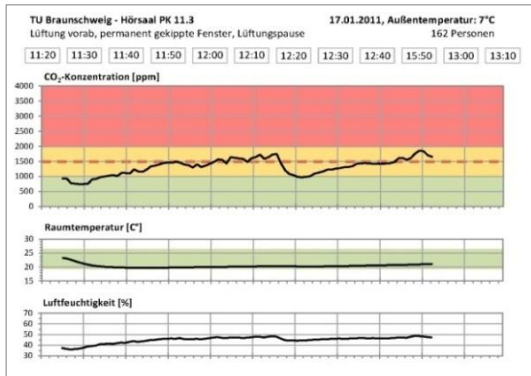


## Anhang 7 Einzelauswertungen zu den Messungen









## Anhang 8 Messungen der Nachhallzeit

T20\_Messungen GS HH

Raum 13				
Frequency	M1	M2	M3	Mittel
63	0,62	0,58	0,52	0,57
125	0,80	0,61	0,57	0,66
250	0,69	0,59	0,62	0,63
500	0,50	0,51	0,51	0,51
1.000	0,51	0,50	0,48	0,50
2.000	0,45	0,44	0,38	0,42
4.000	0,30	0,28	0,31	0,30
8.000	0,27	0,24	0,28	0,26
16.000	NA	NA	NA	NA
Raum_Volumen	230	230	230	
T ist (s)	0,49	0,46	0,46	0,47
T soll (s)	0,59	0,59	0,59	0,59
A ist (m²)	76,51	80,80	81,50	
A soll (m²)	64,00	64,00	64,00	
T ist - T soll (s)	-0,10	-0,12	-0,13	
A soll - A ist (m²)	-12,51	-16,79	-17,50	

T20\_Messungen GS HH

Raum 16				
Frequency	M1	M2	M3	Mittel
63	0,61	0,58	0,60	
125	0,59	0,63	0,57	
250	0,69	0,63	0,61	
500	0,50	0,47	0,52	
1.000	0,51	0,51	0,57	
2.000	0,45	0,47	0,45	
4.000	0,30	0,29	0,37	
8.000	0,27	0,28	0,24667	
16.000	NA	NA	NA	
Raum_Volumen	230	230	230	
T ist (s)	0,49	0,47	0,50	0,49
T soll (s)	0,59	0,59	0,59	0,59
A ist (m²)	76,51	79,09	74,38	
A soll (m²)	64,00	64,00	64,00	
T ist - T soll (s)	-0,10	-0,11	-0,08	
A soll - A ist (m²)	-12,51	-15,09	-10,38	

T20\_Messungen SZ FL

Raum 209				
Frequency	M1	M2	M3	Mittel
63	0,66	0,38	0,20	
125	0,80	0,66	0,43	
250	0,69	0,59	0,62	
500	0,50	0,51	0,40	
1.000	0,40	0,50	0,46	
2.000	0,45	0,44	0,24	
4.000	0,30	0,28	0,28	
8.000	0,23	0,24	0,16	
16.000	NA	NA	NA	
Raum_Volumen	240	240	240	
T ist (s)	0,47	0,46	0,40	0,44
T soll (s)	0,59	0,59	0,59	0,59
A ist (m²)	83,59	84,31	97,80	
A soll (m²)	66,12	66,12	66,12	
T ist - T soll (s)	-0,12	-0,13	-0,19	
A soll - A ist (m²)	-17,47	-18,19	-31,68	

T20\_Messungen SZ FL

Raum 311				
Frequency	M1	M2	M3	Mittel
63	0,42	0,31	0,55	
125	0,64	0,53	0,46	
250	0,53	0,60	0,52	
500	0,45	0,51	0,49	
1.000	0,51	0,52	0,52	
2.000	0,42	0,48	0,45	
4.000	0,26	0,51	0,34	
8.000	0,24	0,27	0,23	
16.000	NA	NA	NA	
Raum_Volumen	240	240	240	
T ist (s)	0,43	0,52	0,46	0,47
T soll (s)	0,59	0,59	0,59	0,59
A ist (m²)	90,14	74,66	84,31	
A soll (m²)	66,12	66,12	66,12	
T ist - T soll (s)	-0,16	-0,07	-0,13	
A soll - A ist (m²)	-24,02	-8,54	-18,19	

T20\_Messungen SZ FL

Raum 313				
Frequency	M1	M2	M3	Mittel
63	NA	0,31	0,35	
125	0,48	0,46	0,46	
250	0,53	0,51	0,61	
500	0,48	0,52	0,49	
1.000	0,42	0,40	0,54	
2.000	0,38	0,36	0,45	
4.000	0,30	0,34	0,31	
8.000	0,25	0,28	0,27	
16.000	0,21	NA	NA	
Raum_Volumen	240	240	240	
T ist (s)	0,42	0,43	0,48	0,44
T soll (s)	0,59	0,59	0,59	0,59
A ist (m²)	92,70	91,83	81,50	
A soll (m²)	66,12	66,12	66,12	
T ist - T soll (s)	-0,17	-0,17	-0,11	
A soll - A ist (m²)	-26,58	-25,71	-15,38	

T20\_Messungen SZ FL

Raum 210				
Frequency	M1	M2	M3	Mittel
63	0,45	0,39	0,37	
125	0,54	0,55	0,52	
250	0,62	0,61	0,59	
500	0,57	0,45	0,41	
1.000	0,51	0,52	0,49	
2.000	0,42	0,51	0,47	
4.000	0,32	0,33	0,31	
8.000	NA	0,22	0,21	
16.000	NA	NA	NA	
Raum_Volumen	200	200	200	
T ist (s)	0,49	0,48	0,45	0,48
T soll (s)	0,57	0,57	0,57	0,57
A ist (m²)	66,80	67,36	71,81	
A soll (m²)	57,56	57,56	57,56	
T ist - T soll (s)	-0,08	-0,08	-0,11	
A soll - A ist (m²)	-9,24	-9,79	-14,24	

**T20\_Messungen SZ FL**

Raum 211				
Frequency	M1	M2	M3	Mittel
63	0,59	0,47	0,51	
125	0,68	0,66	0,62	
250	0,57	0,52	0,51	
500	0,50	0,51	0,48	
1.000	0,41	0,48	0,51	
2.000	0,38	0,44	0,41	
4.000	0,24	0,26	0,31	
8.000	NA	0,22	0,27	
16.000	NA	NA	NA	
Raum_Volume	240	240	240	
T ist (s)	0,42	0,44	0,44	<b>0,44</b>
T soll (s)	0,59	0,59	0,59	<b>0,59</b>
A ist (m²)	93,14	88,51	88,11	
A soll (m²)	66,12	66,12	66,12	
T ist - T soll (s)	-0,17	-0,15	-0,15	
A soll - A ist (m²)	-27,02	-22,39	-21,99	

**T20\_Messungen SZ Vorsfelde**

Raum 31				
Frequency	M1	M2	M3	Mittel
63	0,68	0,62	0,54	
125	0,74	0,66	0,60	
250	0,71	0,61	0,62	
500	0,51	0,48	0,54	
1.000	0,50	0,51	0,57	
2.000	0,44	0,51	0,38	
4.000	0,21	0,37	0,28	
8.000	NA	0,17	0,16	
16.000	NA	NA	NA	
Raum_Volume	180	180	180	
T ist (s)	0,47	0,50	0,48	<b>0,48</b>
T soll (s)	0,55	0,55	0,55	<b>0,55</b>
A ist (m²)	61,90	59,15	61,38	
A soll (m²)	53,18	53,18	53,18	
T ist - T soll (s)	-0,08	-0,06	-0,07	
A soll - A ist (m²)	-8,72	-5,97	-8,20	

**T20\_Messungen GS BS**

Raum 2.1				
Frequency	M1	M2	M3	Mittel
63	0,65	0,51	NA	
125	0,80	0,66	0,54	
250	0,63	0,59	0,62	
500	0,49	0,51	0,57	
1.000	0,54	0,50	0,51	
2.000	0,45	0,43	0,34	
4.000	0,41	NA	0,31	
8.000	0,31	NA	NA	
16.000	NA	NA	NA	
Raum_Volume	235	235	235	
T ist (s)	0,50	0,51	0,47	<b>0,49</b>
T soll (s)	0,59	0,59	0,59	<b>0,59</b>
A ist (m²)	76,00	75,48	81,50	
A soll (m²)	65,06	65,06	65,06	
T ist - T soll (s)	-0,08	-0,08	-0,12	
A soll - A ist (m²)	-10,94	-10,42	-16,44	

**T20\_Messungen Kita WOB**

Gruppenraum				
Frequency	M1	M2	M3	Mittel
63	0,41	0,29	0,54	
125	0,61	0,49	0,48	
250	0,58	0,54	0,49	
500	0,48	0,47	0,51	
1.000	0,48	0,49	0,51	
2.000	0,51	0,48	0,45	
4.000	0,48	0,47	0,42	
8.000	0,25	0,3	0,28	
16.000	NA	NA	NA	
Raum_Volume	145	145	145	
T ist (s)	0,51	0,49	0,48	<b>0,49</b>
T soll (s)	0,52	0,52	0,52	<b>0,52</b>
A ist (m²)	46,71	48,23	49,65	
A soll (m²)	45,31	45,31	45,31	
T ist - T soll (s)	-0,02	-0,03	-0,05	
A soll - A ist (m²)	-1,40	-2,93	-4,34	

**T20\_Messungen GS GK**

Raum C3				
Frequency	M1	M2	M3	Mittel
63	0,42	0,31	0,55	
125	0,64	0,53	0,46	
250	0,53	0,60	0,52	
500	0,45	0,51	0,49	
1.000	0,51	0,52	0,52	
2.000	0,42	0,48	0,45	
4.000	0,26	0,51	0,34	
8.000	0,24	0,27	0,23	
16.000	NA	NA	NA	
Raum_Volume	220	220	220	
T ist (s)	0,43	0,52	0,46	<b>0,47</b>
T soll (s)	0,58	0,58	0,58	<b>0,58</b>
A ist (m²)	82,63	68,44	77,28	
A soll (m²)	61,87	61,87	61,87	
T ist - T soll (s)	-0,15	-0,06	-0,12	
A soll - A ist (m²)	-20,75	-6,56	-15,41	

## Anhang 9 Wirtschaftlichkeitsberechnung

Wirtschaftlichkeitsberechnung zur Klassenraumbelüftung (Beispielklassenraum)							Stand:	04.11.2014
<b>Kosten</b>	<b>Kalk. Zins</b>	<b>Teuerung</b>		<b>Energiekosten</b>				
Kapital	1,043 [-] (4,3%)	1,03 [-] (3%)	Wärme	0,065 [EUR/kWh]				
Betrieb	1,043 [-] (4,3%)	1,03 [-] (3%)	Strom	0,253 [EUR/kWh]				
Verbrauch	1,043 [-] (4,3%)	1,045 [-] (4,5%)						
Betrachtungszeitraum	15 [a]							
Beispiel-Klassenraum	192 [m <sup>2</sup> ]	64 [m <sup>2</sup> ]						
<b>Techn. Anlagen</b>	<b>mech. Lüftung (zentral)</b>	<b>mech. Lüftung (dezentral)</b>		<b>Hybridlüftung</b>		<b>natürliche Lüftung</b>		
		<b>Typ A</b>	<b>Typ B</b>	<b>Typ C</b>	<b>Typ D</b>	<b>Lüftungssampel</b>		
Zuluftmenge	[m <sup>3</sup> /h]	1.900	800	500	600	200	Variabel	
Abluftmenge	[m <sup>3</sup> /h]	1.900	800	500	600	200	Variabel	
Wirkungsgrad WRG	[%]	85	85	50	90	90	0	
Betriebszeit	[h]	1.800	1.800	1.800	1.800	1.800	8.760	
Spez. Ventilatorleistung	[W/m <sup>2</sup> /s]	1.602	800	45	280	31	2	
<b>Energie</b>	<b>mech. Lüftung (zentral)</b>	<b>mech. Lüftung (dezentral)</b>		<b>Hybridlüftung</b>		<b>natürliche Lüftung</b>		
		<b>Typ A</b>	<b>Typ B</b>	<b>Typ C</b>	<b>Typ D</b>	<b>Lüftungssampel</b>		
Wärmebedarf	[kWh]	3.308	3.308	10.951	7.187	13.005	15.971	
Strombedarf	[kWh]	1.320	1.375	405	480	55	25	
Kosten Wärme im 1. Jahr	[EUR]	215,03	215,03	711,84	467,14	845,31	1.038,10	
Kosten Strom im 1. Jahr	[EUR]	334,09	348,01	102,51	121,49	13,92	6,33	
Diskontierung/ Abzinsung	[a]	14,63	14,63	14,63	14,63	14,63	14,63	
Annuitätenfaktor	[1/a]	0,0915	0,0915	0,0915	0,0915	0,0915	0,0915	
Wärmekosten	[EUR/a]	287,86	287,86	952,90	625,34	1.131,57	1.389,65	
Stromkosten	[EUR/a]	447,23	465,87	137,22	162,63	18,63	8,47	
<b>Kapital</b>	<b>mech. Lüftung (zentral)</b>	<b>mech. Lüftung (dezentral)</b>		<b>Hybridlüftung</b>		<b>natürliche Lüftung</b>		
		<b>Typ A</b>	<b>Typ B</b>	<b>Typ C</b>	<b>Typ D</b>	<b>Lüftungssampel</b>		
Investitionskosten	[EUR/m <sup>2</sup> ]	97,00	143,00	122,00	72,00	29,00	2,98	
Investitionskosten	[EUR]	6.208,00	9.152,00	7.808,00	4.608,00	1.856,00	190,72	
Nutzungsdauer	[a]	20	20	20	20	20	10	
Restwertfaktor	[-]	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	
Annuitätenfaktor	[1/a]	0,0915	0,0915	0,0915	0,0915	0,0915	0,0915	
Kapitalkosten	[EUR/a]	448,75	661,55	564,40	333,09	134,16	13,79	
<b>Betrieb</b>	<b>mech. Lüftung (zentral)</b>	<b>mech. Lüftung (dezentral)</b>		<b>Hybridlüftung</b>		<b>natürliche Lüftung</b>		
		<b>Typ A</b>	<b>Typ B</b>	<b>Typ C</b>	<b>Typ D</b>	<b>Lüftungssampel</b>		
Kosten bzgl. Investition	[%]	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,0	
Kosten im 1. Jahr	[EUR]	217,28	320,32	273,28	161,28	64,96	5,72	
Diskontierung/ Abzinsung	[a]	13,24	13,24	13,24	13,24	13,24	13,24	
Annuitätenfaktor	[1/a]	0,0915	0,0915	0,0915	0,0915	0,0915	0,0915	
Betriebskosten	[EUR/a]	263,23	388,05	331,07	195,38	78,70	6,93	
<b>Kosten pro Jahr [EUR/a]</b>	<b>mech. Lüftung (zentral)</b>	<b>mech. Lüftung (dezentral)</b>		<b>Hybridlüftung</b>		<b>natürliche Lüftung</b>		
		<b>Typ A</b>	<b>Typ B</b>	<b>Typ C</b>	<b>Typ D</b>	<b>Lüftungssampel</b>		
Wärmekosten	[EUR/a]	287,86	287,86	952,90	625,34	1.131,57	1.389,65	
Stromkosten	[EUR/a]	447,23	465,87	137,22	162,63	18,63	8,47	
Kapitalkosten	[EUR/a]	448,75	661,55	564,40	333,09	134,16	13,79	
Betriebskosten	[EUR/a]	263,23	388,05	331,07	195,38	78,70	6,93	
Summe	[EUR/a]	1.447,06	1.803,33	1.985,59	1.316,44	1.363,06	1.418,83	
<b>Kosten pro Jahr und Fläche [EUR/(m<sup>2</sup>*a)]</b>	<b>mech. Lüftung (zentral)</b>	<b>mech. Lüftung (dezentral)</b>		<b>Hybridlüftung</b>		<b>natürliche Lüftung</b>		
		<b>Typ A</b>	<b>Typ B</b>	<b>Typ C</b>	<b>Typ D</b>	<b>Lüftungssampel</b>		
Wärmekosten	[EUR/m <sup>2</sup> a]	4,50	4,50	14,89	9,77	17,68	21,71	
Stromkosten	[EUR/m <sup>2</sup> a]	6,99	7,28	2,14	2,54	0,29	0,13	
Kapitalkosten	[EUR/m <sup>2</sup> a]	7,01	10,34	8,82	5,20	2,10	0,22	
Betriebskosten	[EUR/m <sup>2</sup> a]	4,11	6,06	5,17	3,05	1,23	0,11	
Summe	[EUR/m <sup>2</sup> a]	22,61	28,18	31,02	20,57	21,30	22,17	

## Anhang 10 Dokumentation der Nutzung dezentraler Lüftungsgeräte

TU BRAUNSCHWEIG · INSTITUT FÜR GEBÄUDE- UND SOLARTECHNIK  
Prof. Dr.-Ing. M. N. Flich

IGS

10 Braunschweig · IG: AdHörpfordB-23 · D-38106 Braunschweig

Schulzentrum Fallersleben  
RAUM 311

**FORSCHUNGSPROJEKT**  
„Lüftungskonzepte in Bildungsstätten  
– Analyse und Optimierungsansätze“

Liebe Lehrer/Innen, liebe Schüler/Innen,

seit den Sommerferien 2009 begleitet das Institut für Gebäude und Solartechnik (IGS) der Technischen Universität Braunschweig ein Projekt zur Evaluierung von Klassenzimmerlüftungen an deutschen Schulen.

Zu Testzwecken wurde in diesem Raum Lüftungstechnik installiert und ich möchte Sie bitten dieses Gerät möglichst immer auf **STUFE 0** eingeschaltet zu lassen.  
Bitte notieren Sie sich Datum und Uhrzeit wenn Sie das Gerät auf anderen Stufen betreiben.

Vielen Dank für Ihre Mithilfe!

Mit freundlichen Grüßen  
Dipl.-Ing. Jennifer König

Projektbetreuung: Dipl.-Ing. Jennifer König, Tel. 0531 / 391-3524, e-mail: koenig@igs.bau.tu-bs.de

IGS

AdHörpfordB-23  
D-38106 Braunschweig  
Tel: 0531 / 391-3525  
Fax: 0531 / 391-4125  
e-mail: ig@igs.tu-bs.de  
www.igs.tu-bs.de

Labor:  
Zimmernr. 246  
D-38106 Braunschweig  
Tel: 0531 / 391-3425  
Fax: 0531 / 391-3426

TU BRAUNSCHWEIG · INSTITUT FÜR GEBÄUDE- UND SOLARTECHNIK  
Prof. Dr.-Ing. M. N. Flich

IGS

10 Braunschweig · IG: AdHörpfordB-23 · D-38106 Braunschweig

Schulzentrum Fallersleben  
RAUM 311

**FORSCHUNGSPROJEKT**  
„Lüftungskonzepte in Bildungsstätten  
– Analyse und Optimierungsansätze“

Liebe Lehrer/Innen, liebe Schüler/Innen,

seit den Sommerferien 2009 begleitet das Institut für Gebäude und Solartechnik (IGS) der Technischen Universität Braunschweig ein Projekt zur Evaluierung von Klassenzimmerlüftungen an deutschen Schulen.

Zu Testzwecken wurde in diesem Raum Lüftungstechnik installiert und ich möchte Sie bitten dieses Gerät möglichst immer auf **STUFE 0** eingeschaltet zu lassen.  
Bitte notieren Sie sich Datum und Uhrzeit wenn Sie das Gerät auf anderen Stufen betreiben.

Vielen Dank für Ihre Mithilfe!


Mit freundlichen Grüßen  
Dipl.-Ing. Jennifer König

Projektbetreuung: Dipl.-Ing. Jennifer König, Tel. 0531 / 391-3524, e-mail: koenig@igs.bau.tu-bs.de

IGS

AdHörpfordB-23  
D-38106 Braunschweig  
Tel: 0531 / 391-3525  
Fax: 0531 / 391-4125  
e-mail: ig@igs.tu-bs.de  
www.igs.tu-bs.de

Labor:  
Zimmernr. 246  
D-38106 Braunschweig  
Tel: 0531 / 391-3425  
Fax: 0531 / 391-3426



**Betrieb:**

**STUFE 0:**  
Automatisch CO<sub>2</sub>-gesteuert

**STUFE 1:**  
40 %

**STUFE 2:**  
60 %

**STUFE 3:**  
80 %

Bitte notieren Sie hier, wenn Sie das Gerät auf anderen Stufen als auf STUFE 0 betreiben:

DATUM/ UHRZEIT	STUFE	DATUM/ UHRZEIT	STUFE

### Dokumentation Nutzung des Lüftungsgerätes SZ FL Raum 311

TU BRAUNSCHWEIG · INSTITUT FÜR GEBÄUDE- UND SOLARTECHNIK  
Prof. Dr.-Ing. M. N. Flich

IGS

10 Braunschweig · IG: AdHörpfordB-23 · D-38106 Braunschweig

Schulzentrum Fallersleben  
RAUM 313

**FORSCHUNGSPROJEKT**  
„Lüftungskonzepte in Bildungsstätten  
– Analyse und Optimierungsansätze“

Liebe Lehrer/Innen, liebe Schüler/Innen,

seit den Sommerferien 2009 begleitet das Institut für Gebäude und Solartechnik (IGS) der Technischen Universität Braunschweig ein Projekt zur Evaluierung von Klassenzimmerlüftungen an deutschen Schulen.

Zu Testzwecken wurde in diesem Raum Lüftungstechnik installiert und ich möchte Sie bitten dieses Gerät möglichst immer eingeschaltet zu lassen. Bitte schalten Sie das Gerät nicht aus, sondern regeln Sie nur die Luftmenge hinunter. Sollten Sie das Gerät doch ausschalten müssen, so notieren Sie sich bitte Datum und Uhrzeit.

Vielen Dank für Ihre Mithilfe!

Mit freundlichen Grüßen  
Dipl.-Ing. Jennifer König

Projektbetreuung: Dipl.-Ing. Jennifer König, Tel. 0531 / 391-3524, e-mail: koenig@igs.bau.tu-bs.de

IGS

AdHörpfordB-23  
D-38106 Braunschweig  
Tel: 0531 / 391-3525  
Fax: 0531 / 391-4125  
e-mail: ig@igs.tu-bs.de  
www.igs.tu-bs.de

Labor:  
Zimmernr. 246  
D-38106 Braunschweig  
Tel: 0531 / 391-3425  
Fax: 0531 / 391-3426

TU BRAUNSCHWEIG · INSTITUT FÜR GEBÄUDE- UND SOLARTECHNIK  
Prof. Dr.-Ing. M. N. Flich

IGS

10 Braunschweig · IG: AdHörpfordB-23 · D-38106 Braunschweig

Schulzentrum Fallersleben  
RAUM 313

**FORSCHUNGSPROJEKT**  
„Lüftungskonzepte in Bildungsstätten  
– Analyse und Optimierungsansätze“

Liebe Lehrer/Innen, liebe Schüler/Innen,

seit den Sommerferien 2009 begleitet das Institut für Gebäude und Solartechnik (IGS) der Technischen Universität Braunschweig ein Projekt zur Evaluierung von Klassenzimmerlüftungen an deutschen Schulen.

Zu Testzwecken wurde in diesem Raum Lüftungstechnik installiert und ich möchte Sie bitten dieses Gerät möglichst immer eingeschaltet zu lassen. Bitte schalten Sie das Gerät nicht aus, sondern regeln Sie nur die Luftmenge hinunter. Sollten Sie das Gerät doch ausschalten müssen, so notieren Sie sich bitte Datum und Uhrzeit.

Vielen Dank für Ihre Mithilfe!

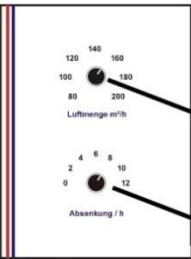
Mit freundlichen Grüßen  
Dipl.-Ing. Jennifer König

Projektbetreuung: Dipl.-Ing. Jennifer König, Tel. 0531 / 391-3524, e-mail: koenig@igs.bau.tu-bs.de

IGS

AdHörpfordB-23  
D-38106 Braunschweig  
Tel: 0531 / 391-3525  
Fax: 0531 / 391-4125  
e-mail: ig@igs.tu-bs.de  
www.igs.tu-bs.de

Labor:  
Zimmernr. 246  
D-38106 Braunschweig  
Tel: 0531 / 391-3425  
Fax: 0531 / 391-3426



**Volumenregler:**  
Bitte stellen Sie nur hier die Luftmenge ein bzw. um. Schalten Sie das Gerät wenn möglich bitte nie aus.

**Zeitsteuerung:**  
Bitte nehmen Sie hier keine Einstellungen vor.

Bitte notieren Sie hier, wenn Sie das Gerät ausschalten:

DATUM	UHRZEIT	DATUM	UHRZEIT

### Dokumentation Nutzung des Lüftungsgerätes SZ FL Raum 313

TU BRAUNSCHWEIG · INSTITUT FÜR GEBÄUDE- UND SOLARTECHNIK  
Prof. Dr.-Ing. M. N. Frich

**IGS**

Tu Braunschweig, IG: Wöhlerpfad 23, D-38106 Braunschweig  
Schulzentrum Fallersleben  
RAUM 209

**FORSCHUNGSPROJEKT**  
„Lüftungskonzepte in Bildungsstätten  
– Analyse und Optimierungsansätze“

Liebe Lehrer/Innen, liebe Schüler/Innen,

seit den Sommerferien 2009 begleitet das Institut für Gebäude und Solartechnik (IGS) der Technischen Universität Braunschweig ein Projekt zur Evaluierung von Klassenzimmerlüftungen an deutschen Schulen.

Zu Testzwecken wurde in diesem Raum Lüftungstechnik installiert und ich möchte Sie bitten dieses Gerät morgens zu Unterrichtsbeginn durch ein kurzes Drücken der Einschalttaste einzuschalten und möglichst immer eingeschaltet zu lassen. Bitte schalten Sie das Gerät nicht aus und nutzen Sie nach Bedarf den „Boostbetrieb“.

Vielen Dank für Ihre Mithilfe!

Mit freundlichen Grüßen  
Dipl.-Ing. Jennifer König

Projektbetreuung: Dipl.-Ing. Jennifer König, Tel. 0531 / 391-3524, e-mail: koenig@igb.bau.tu-bs.de

TU BRAUNSCHWEIG · INSTITUT FÜR GEBÄUDE- UND SOLARTECHNIK  
Prof. Dr.-Ing. M. N. Frich

**IGS**

Tu Braunschweig, IG: Wöhlerpfad 23, D-38106 Braunschweig  
Schulzentrum Fallersleben  
RAUM 209

**Raumbediengerät**



Mit dem Raumthermostat kann die voreingestellte Raumtemperatur von 20 °C um  $\pm 3$  °C verändert werden.  
Leuchtet die Signal-LED nicht, befindet sich das Lüftungsgerät im Betriebsmodus **ABWESENHEIT**.

Kurzanleitung	
1x kurze Drücken (ca. 1 Sekunde) des Präsenztasters	Das Gerät wechselt in die Betriebsart <b>UNTERRICHT</b> , d.h. die Ventilatoren gehen in Betrieb und die Signal-LED leuchtet dauerhaft grün. Durch erneutes kurzes Drücken des Präsenztasters wechselt das Gerät zur Betriebsart <b>ABWESENHEIT</b> .
1x langes Drücken (mehr als 3 Sekunden) des Präsenztasters	Das Gerät geht in den <b>BOOSTBETRIEB</b> , d.h. die Signal-LED blinkt und das Lüftungsgerät fördert einen erhöhten Volumenstrom, um die gewünschte Raumtemperatur schneller zu erreichen. Der <b>BOOSTBETRIEB</b> wird durch erneutes Betätigen des Präsenztasters oder spätestens nach 15 Minuten beendet und das Lüftungsgerät wechselt in die Betriebsart <b>UNTERRICHT</b> .

Bitte notieren Sie hier, wenn Sie das Gerät ausschalten:



DATUM	UHRZEIT	DATUM	UHRZEIT

Projektbetreuung: Dipl.-Ing. Jennifer König, Tel. 0531 / 391-3524, e-mail: koenig@igb.bau.tu-bs.de

Dokumentation Nutzung des Lüftungsgerätes SZ FL Raum 209

## Anhang 11 Fragebögen Raumklima

**FORSCHUNGSPROJEKT:**  
**Lüftungskonzepte in Bildungsstätten**

gefördert durch:  

**Fragebogen für Student(innen)**

Gebäude: \_\_\_\_\_ Raum: \_\_\_\_\_  
 Datum: \_\_\_\_\_ Uhrzeit: \_\_\_\_\_

Das Institut für Gebäude- und Solartechnik begleitet das Forschungsprojekt „Lüftungskonzepte in Bildungsstätten“. Dieses Projekt beschäftigt sich mit der Luftqualität in Bildungsräumen. Ziel ist eine verbesserte Luftqualität und eine Steigerung der Behaglichkeit.

Geschlecht:  männlich  weiblich

ich sitze:  unten  in der Mitte  oben, in der Nähe der Tür

**1. Aktuelles Klima im Raum:**

1.1. Die Raumtemperatur empfinde ich momentan als:  
 zu kalt  eher kalt  genau richtig  eher warm  zu warm

1.2. Die Luftfeuchtigkeit empfinde ich im Moment als:  
 sehr trocken  eher trocken  neutral  eher feucht  sehr feucht

**2. Aktuelle Luftqualität im Raum:**

2.1. Die Qualität der Raumluft empfinde ich momentan als:  
 schlecht  eher schlecht  neutral  eher gut  gut

2.2. Die Raumluft war beim Betreten des Raumes:  
 schlecht  eher schlecht  neutral  eher gut  gut

**3. Aktuelle Belüftung des Raumes:**

3.1. Mir ist bekannt, dass der Raum mit einer Lüftungsanlage mechanisch belüftet wird:  
 ja  nein

3.2. Meiner Meinung nach erfüllt die Lüftungsanlage ihren Zweck:  
 ja, sehr  eher ja  teils-teils  eher nein  nein, gar nicht

- Bitte wenden -

1/2

3.3. Ich empfinde die Lautstärke/ den Geräuschpegel der Anlage als störend:  
 ja, sehr  eher ja  weder noch  eher nein  nein, gar nicht

3.4. An meinem Sitzplatz empfinde ich Luftzug:  
 ja  nein

3.5. Dieser Luftzug stört mich:  
 ja, sehr  eher ja  weder noch  eher nein  nein, gar nicht

**4. Wohlbefinden & Leistung:**

4.1. Ich fühle mich aufgrund der aktuellen Klima- und Luftverhältnisse im Raum wohl:  
 ja, sehr  eher ja  weder noch  eher nein  nein, gar nicht



4.2. Meine Leistungsfähigkeit ist aufgrund der aktuellen Klima- und Luftverhältnisse im Raum:  
 schlecht  eher schlecht  unverändert  eher gut  gut

- Vielen Dank! -

2/2

Fragebogen für Studenten – TU BS Hörsaal 15.1

**FORSCHUNGSPROJEKT:**  
**Lüftungskonzepte in Bildungsstätten**

gefördert durch:  

**Fragebogen für Lehrer(innen)**

Schule: Grundschule am Ehestorfer Weg Klasse: \_\_\_\_\_  
 Datum: \_\_\_\_\_ Uhrzeit: \_\_\_\_\_

Das Institut für Gebäude- und Solartechnik begleitet das Forschungsprojekt „Lüftungskonzepte in Bildungsstätten“. Dieses Projekt beschäftigt sich mit der Luftqualität in Bildungsräumen. Ziel ist eine verbesserte Luftqualität und eine Steigerung der Behaglichkeit.

**1. Aktuelles Klima im Raum:**

1.1. Die Raumtemperatur empfinde ich momentan als:  
 zu kalt  eher kalt  genau richtig  eher warm  zu warm

1.2. Die Luftfeuchtigkeit empfinde ich im Moment als:  
 sehr trocken  eher trocken  neutral  eher feucht  sehr feucht

**2. Aktuelle Luftqualität im Raum:**

2.1. Die Qualität der Raumluft empfinde ich momentan als:  
 schlecht  eher schlecht  neutral  eher gut  gut

2.2. Die Raumluft war zu Beginn der Unterrichtsstunde:  
 schlecht  eher schlecht  neutral  eher gut  gut

**3. Aktuelle Belüftung des Raumes:**

3.1. Mir ist bekannt, dass der Raum zusätzlich mit einer Lüftungsanlage mechanisch belüftet wird:  
 ja  nein

3.4. Im Klassenraum tritt Luftzug auf:  
 ja  nein

3.5. Dieser Luftzug stört:  
 ja, sehr  eher ja  weder noch  eher nein  nein, gar nicht

2.2. Wir machen regelmäßig die Fenster im Klassenzimmer auf und lüften:  
 in den Pausen  in der Schulstunden  beides  nichts davon

2.3. Die Fenster werden beim Lüften:  
 angekippt  weit aufgemacht  beides

2.4. Ich halte das Einführen eines Lüftungsdienst in der Klasse für sinnvoll:  
 ja  nein

**3. Wir möchten herausfinden, wie Du Dich fühlst:**

3.1. Ich fühle mich bei der Luft hier im Klassenraum wohl:  
 ja, sehr  ja  weiß nicht  nein  nein, gar nicht

- Vielen Dank! -

Fragebogen für Lehrer – GS HH



**FORSCHUNGSPROJEKT:**  
**Lüftungskonzepte in Bildungsstätten**

**Fragebogen für Schüler(innen)**

Schule: Grundschule Ehestorfer Weg      Raum: Raum 13/ Raum 16  
 Datum + Uhrzeit:      Klasse:

Wir möchten gerne herausfinden ob die Luft in Deinem Klassenraum gut oder schlecht ist und ob vielleicht etwas verbessert werden kann.

Ich bin ein:  
 Junge     Mädchen

Im Klassenraum sitze ich gerade:  
 nah an der Tür     in der Mitte     nah an der Heizung

**1. Wir möchten gerne etwas über das Klima in Deinem Klassenraum erfahren.**

1.a. Die Temperatur in meinem Klassenraum finde ich meistens:  
 zu kalt     etwas kalt     genau richtig     etwas warm     zu warm

1.b. Es zieht an meinem Platz:  
 ja     nein

**2. Manchmal sagt man: "Hier ist schlechte Luft". Dann macht man das Fenster auf, damit "frische" Luft hereinkommen kann.**

2.a. Ich finde die Luft in meinem Klassenraum meistens:  
 sehr schlecht     schlecht     weiß nicht     gut     sehr gut

2.b. In der Schulstunde verschlechtert sich die Luftqualität spürbar:  
 sehr schlecht     schlecht     weiß nicht     gut     sehr gut

2.c. Wir machen regelmäßig die Fenster auf und lüften:  
 ja, in der Pause     ja, in der Schulstunde     ja, beides     weder noch

1/1

**3. Wir möchten herausfinden wie Du Dich fühlst:**

3.a. Ich fühle mich bei der Luft hier im Klassenraum meistens wohl:  
 nein, gar nicht     eher nein     weder noch     eher ja     ja, sehr

3.b. Ich kann mich der der Luft im Klassenraum gut konzentrieren:  
 ja     nein     weiß nicht

**Zusätzliche Fragen für Schüler in Raum 13:**  
**Die mechanische Belüftung in Raum 13:**

4.1. Erfüllt das Lüftungsgerät Deiner Meinung nach seinen Zweck?  
 nein, gar nicht     eher nein     weder noch     eher ja     ja, sehr

4.2. Empfinden Sie die Lautstärke des Gerätes als störend?  
 nein, gar nicht     eher nein     weder noch     eher ja     ja, sehr

- Vielen Dank für Deine Hilfe! -

2/2

Fragebogen für Schüler – GS HH

**FORSCHUNGSPROJEKT:**  
**Lüftungskonzepte in Bildungsstätten**

**Fragebogen für Lehrer(innen)**

Schule: Erich Kästner-Grundschule Weddel      Datum:      BEURTEILUNG WINTER  
 Das Institut für Gebäude- und Solartechnik begleitet das Forschungsprojekt „ Lüftungskonzepte in Bildungsstätten“. Dieses Projekt beschäftigt sich mit der Luftqualität in Bildungsräumen. Ziel ist eine verbesserte Luftqualität und eine Steigerung der Behaglichkeit.

**Zur Person:**  
 Geschlecht:  
 männlich     weiblich

Ich unterrichte zurzeit folgende Klassen: \_\_\_\_\_ (Bitte die Klassennummern nennen)

Ich unterrichte überwiegend in folgenden Räumen: \_\_\_\_\_

**Bitte beziehen Sie sich bei Ihren anschließenden Antworten auf den Raum, in dem Sie die meiste Zeit unterrichten.**

**1. Klima des Raumes:**

1.1. Wie empfanden Sie die Raumtemperatur in den letzten 2 Schulwochen?  
 zu kalt     eher kalt     genau richtig     eher warm     zu warm

1.2. Wie empfanden Sie die Raumluftfeuchtigkeit in den letzten 2 Schulwochen?  
 sehr trocken     eher trocken     neutral     eher feucht     sehr feucht

**2. Luftqualität des Raumes:**

2.1. Wie empfanden Sie die Raumluftqualität in den letzten 2 Schulwochen?  
 schlecht     eher schlecht     neutral     eher gut     gut

2.2. Konnten Sie eine spürbare Verschlechterung der Raumluftqualität im Laufe der Unterrichtsstunden feststellen?  
 ja     nein     teils-teils

3.4. Trat im Klassenraum Luftzug auf?  
 ja     nein

- Bitte wenden -

1/2

3.5. Störte diese vorhandene Luftzug-Situation?  
 ja, sehr     eher ja     weder noch     eher nein     nein, gar nicht

**4. Das Lüftungsverhalten:**

4.1. Wurden die Fenster im Klassenraum in den letzten zwei Schulwochen regelmäßig zum Lüften geöffnet?  
 ja, in den Pausen     ja, in den Schulstunden     ja, beides     nein, weder noch

4.2. Wenn ja, wie erfolgte das Lüften?  
 selbstständig ausgeführt von den Schülern     auf Anweisung der Lehrkraft     nur ausgeführt durch die Lehrkraft

4.3. Wie wurden die Fenster beim Lüften geöffnet?  
 angekippt     weit geöffnet     beides

4.4. Wurden die Heizkörper während der Lüftungszeit ausgestellt?  
 ja     nein     teils-teils

4.5. Halte Sie das Einführen eines Lüftungsdienstes (wie Tafeldienst) in einer Klasse für sinnvoll?  
 ja     nein  
 Begründung: \_\_\_\_\_

**5. Das Wohlbefinden & die Leistung:**

5.1. Haben Sie sich in den letzten 2 Schulwochen aufgrund der aktuellen Klima- und Luftverhältnisse im Raum wohl gefühlt?  
 nein, gar nicht     eher nein     weder noch     eher ja     ja, sehr

5.2. Wie würden Sie Ihre Leistungsfähigkeit aufgrund der Klima- und Luftverhältnisse in den letzten 2 Schulwochen im Raum einstufen?  
 schlecht     eher schlecht     unverändert     eher gut     gut

5.3. Wie würden Sie die Leistungsfähigkeit Ihrer Schüler aufgrund der aktuellen Klima- und Luftverhältnisse im Raum einstufen?  
 schlecht     eher schlecht     unverändert     eher gut     gut



4.4. Können Sie sich vorstellen, dass eine verbesserte Luftqualität zu einer Leistungs- und Konzentrationssteigerung bei Ihren Schülern führt?  
 nein, gar nicht     eher nein     weder noch     eher ja     ja, sehr

- Vielen Dank! -

2/2

Fragebogen für Lehrer – GS EK (abgebrochene Messung)

**FORSCHUNGSPROJEKT:**  
**Lüftungskonzepte in Bildungsstätten**

**Fragebogen für Schüler(innen)**  
 Schule: Erich-Kästner-Grundschule Weddel Klasse: \_\_\_\_\_  
 Datum: \_\_\_\_\_ Uhrzeit: \_\_\_\_\_

Wir möchten gern herausfinden ob die Luft in Deinem Klassenraum gut oder schlecht ist und ob vielleicht etwas verbessert werden kann.

Ich bin ein:  
 Junge  Mädchen

Im Klassenraum sitze ich gerade:  
 nah am Fenster  in der Mitte  nah an der Tür

**1. Wir möchten gern etwas über das Klima in Deinem Klassenzimmer erfahren:**  
 1.a. Die Temperatur in meinem Klassenraum finde ich gerade:  
 zu kalt  etwas kalt  genau richtig  etwas warm  zu warm

1.b. Es zieht manchmal an meinem Platz:  
 ja  nein

**2. Manchmal sagt man: „Hier ist schlechte Luft“. Dann macht man das Fenster auf, damit „frische“ Luft hereinkommen kann:**  
 2.a. Ich finde die Luft in meinem Klassenraum gerade:  
 sehr schlecht  schlecht  weiß nicht  gut  sehr gut

2.b. Wir machen regelmäßig die Fenster im Klassenzimmer auf und lüften:  
 ja, in den Pausen  ja, in der Schulstunden  ja, beides  nein, gar nicht


2.c. Die Fenster werden beim Lüften:  
 angekippt  weit aufgemacht  beides

- Bitte umdrehen -  
 1/2

2.d. Wir haben einen Lüftungsdienst in der Klasse:  
 ja  nein

**3. Wir möchten herausfinden wie Du Dich fühlst:**  
 3.a. Ich fühle mich bei der Luft hier im Klassenraum wohl:  
 ja, sehr  ja  weiß nicht  nein  nein, gar nicht

3.b. Ich kann mich bei der Luft im Klassenraum gut konzentrieren:  
 ja  nein  weiß nicht

 - Vielen Dank für Deine Hilfe! -

2/2

**Fragebogen für Schüler – GS EK (abgebrochene Messung)**

**FORSCHUNGSPROJEKT:**  
**Lüftungskonzepte in Bildungsstätten**




**Fragebogen für Pädagogen/ Betreuer**  
 BEURTEILUNG FRÜHJAHR

Gebäude: Kindertagesstätte am Krankenhaus WOB Datum: \_\_\_\_\_  
 Das Institut für Gebäude- und Solartechnik begleitet das Forschungsprojekt „Lüftungskonzepte in Bildungsstätten“. Dieses Projekt beschäftigt sich mit der Luftqualität in Bildungsräumen. Ziel ist eine verbesserte Luftqualität und eine Steigerung der Behaglichkeit.

**Zur Person:**  
 Geschlecht:  männlich  weiblich

Ich betreue ich Kinder in folgenden Gruppen: \_\_\_\_\_ (Bitte die Altersstufen nennen)

Ich halte mich überwiegend in folgenden Räumen auf: \_\_\_\_\_

Bitte beziehen Sie sich bei Ihren anschließenden Antworten auf den Raum, in dem Sie sich die meiste Zeit zur Betreuung der Kinder aufhalten.

**1. Klima des Gruppenraumes:**  
 1.1. Wie empfanden Sie die Raumtemperatur in den letzten 2 Wochen?  
 zu kalt  eher kalt  genau richtig  eher warm  zu warm

1.2. Wie empfanden Sie die Raumluftfeuchtigkeit in den letzten 2 Wochen?  
 sehr trocken  eher trocken  neutral  eher feucht  sehr feucht

**2. Luftqualität des Gruppenraumes:**  
 2.1. Wie empfanden Sie die Raumluftqualität in den letzten 2 Wochen?  
 schlecht  eher schlecht  neutral  eher gut  gut

2.2. Konnten Sie eine spürbare Verschlechterung der Raumluftqualität im Laufe eines Tages feststellen?  
 ja  nein  teils-teils

2.3. Trat im Gruppenraum Luftzug auf?  
 ja  nein

- Bitte wenden -  
 1/2

2.4. Störte diese vorhandene Luftzug-Situation?  
 ja, sehr  eher ja  weder noch  eher nein  nein, gar nicht

**3. Das Lüftungsverhalten:**  
 3.1. Wurden die Fenster im Gruppenraum in den letzten zwei Wochen regelmäßig zum Lüften geöffnet?  
 ja, vormittags  ja, nachmittags  ja, beides  nein, weder noch

3.2. Wie wurden die Fenster beim Lüften geöffnet?  
 angekippt  weit geöffnet  beides

3.3. Wurden die Heizkörper während der Lüftungszeit ausgestellt?  
 ja  nein  teils-teils

**4. Das Wohlbefinden & die Leistung:**  
 4.1. Haben Sie sich in den letzten 2 Wochen aufgrund der aktuellen Klima- und Luftverhältnisse im Gruppenraum wohl gefühlt?  
 nein, gar nicht  eher nein  weder noch  eher ja  ja, sehr

4.2. Wie würden Sie Ihre Leistungsfähigkeit aufgrund der Klima- und Luftverhältnisse in den letzten 2 Wochen im Gruppenraum einstufen?  
 schlecht  eher schlecht  unverändert  eher gut  gut

4.2. Wie würden Sie das Wohlbefinden der Kinder aufgrund der Klima- und Luftverhältnisse in den letzten 2 Wochen im Gruppenraum einstufen?  
 schlecht  eher schlecht  unverändert  eher gut  gut

- Vielen Dank! -  
 2/2

**Fragebogen für Betreuer – Kita WOB**

**FORSCHUNGSPROJEKT:**  
**Lüftungskonzepte in Bildungsstätten**

geleitet durch:  

**Fragebogen für Lehrer(innen)**

Schule: Gymnasium am Schulzentrum Fallersleben Datum: \_\_\_\_\_

Der Mensch hält sich bis zu 80% des Tages in geschlossenen Räumen auf. Kinder, Jugendliche und junge Erwachsene verbringen dabei bis zu einem Drittel des Tages in Schulen oder anderen Bildungseinrichtungen. Durch die Anpassung des Betreuungsangebots an eine flexible Arbeitswelt wird sich die Aufenthaltszeit zukünftig sogar noch verlängern. Vor diesem Hintergrund gilt es attraktive Bildungsstätten für die Zukunft zu entwickeln. Zu den wichtigsten Einflussfaktoren der Aufenthaltsqualität gehören die Luftqualität und die thermische Behaglichkeit. Die Lern- und Lehrfähigkeit von Schülern und Lehrkräften ist an eine qualitativ hochwertige Raumluft gekoppelt.

Das Institut für Gebäude- und Solartechnik begleitet das Forschungsprojekt „Lüftungskonzepte in Bildungsstätten – Analyse und Optimierungsansätze“. Dieses Projekt beschäftigt sich mit der Luftqualität in Bildungsräumen. Ziel ist eine verbesserte Luftqualität und eine Steigerung der Behaglichkeit.

**Zur Person:**

**Geschlecht:**  
 männlich  weiblich

Ich unterrichte zurzeit folgende Klassen: \_\_\_\_\_  
(Bitte die Klassenstufen nennen)

Ich unterrichte überwiegend in folgenden Räumen: \_\_\_\_\_

**Bitte beziehen Sie sich bei Ihren anschließenden Antworten auf den Raum, in dem Sie die meiste Zeit unterrichten.**

1/4

**1. Klima des Raumes:**

**1.1. Wie beurteilen Sie die Raumtemperatur im Klassenraum?**  
 Im Sommer:  
 zu kalt  eher kalt  genau richtig  eher warm  zu warm  
 Im Winter:  
 zu kalt  eher kalt  genau richtig  eher warm  zu warm

**1.2. Wie beurteilen Sie die Raumluftfeuchtigkeit im Klassenraum?**  
 Im Sommer:  
 sehr trocken  eher trocken  neutral  eher feucht  sehr feucht  
 Im Winter:  
 sehr trocken  eher trocken  neutral  eher feucht  sehr feucht

**2. Luftqualität des Raumes:**

**2.1. Wie beurteilen Sie die Raumluftqualität im Klassenraum?**  
 Im Sommer:  
 schlecht  eher schlecht  neutral  eher gut  gut  
 Im Winter:  
 schlecht  eher schlecht  neutral  eher gut  gut

**2.2. Können Sie eine spürbare Verschlechterung der Raumluftqualität im Laufe der Unterrichtsstunden feststellen?**  
 Im Sommer:  
 ja  nein  teils-teils  
 Im Winter:  
 ja  nein  teils-teils

**2.4. Tritt im Klassenraum Luftzug auf?**  
 Im Sommer:  
 ja  nein  teils-teils  
 Im Winter:  
 ja  nein  teils-teils

**2.6. Stört diese vorhandene Luftzug-Situation?**  
(Möglicherweise ist es im Sommer zum Teil angenehm wenn ein leichter Luftzug vorhanden ist)  
 Im Sommer:  
 ja, sehr  eher ja  weder noch  eher nein  nein, gar nicht  
 Im Winter:  
 ja, sehr  eher ja  weder noch  eher nein  nein, gar nicht

2/4

**3. Das Lüftungsverhalten:**

**3.1. Werden die Fenster im Klassenraum regelmäßig zum Lüften geöffnet?**  
 Im Sommer:  
 ja, in den Pausen  ja, in den Schulstunden  ja, beides  nein, weder noch  
 Im Winter:  
 ja, in den Pausen  ja, in den Schulstunden  ja, beides  nein, weder noch

**3.2. Wie erfolgt das Lüften?**  
(Mehrrechenung möglich)  
 selbstständig ausgeführt von den Schülern  ausgeführt von den Schülern auf Anweisung der Lehrkraft  ausgeführt durch die Lehrkraft

**3.3. Wie werden die Fenster beim Lüften geöffnet?**  
 Im Sommer:  
 angekippt  weit geöffnet  beides  
 Im Winter:  
 angekippt  weit geöffnet  beides

**3.4. Werden die Heizkörper im Winter während der Lüftungszeit ausgestellt?**  
 ja  nein  teils-teils

**4. Das Wohlbefinden & die Leistung:**

**4.1. Fühlen Sie sich aufgrund der vorhandenen Klima- und Luftverhältnisse im Klassenraum wohl?**  
 Im Sommer:  
 nein, gar nicht  eher nein  weder noch  eher ja  ja, sehr  
 Im Winter:  
 nein, gar nicht  eher nein  weder noch  eher ja  ja, sehr

**4.2. Wie würden Sie Ihre Leistungsfähigkeit aufgrund der vorhandenen Klima- und Luftverhältnisse im Klassenraum einstufen?**  
 Im Sommer:  
 schlecht  eher schlecht  unverändert  eher gut  gut  
 Im Winter:  
 schlecht  eher schlecht  unverändert  eher gut  gut

3/4

**4.3. Wie würden Sie die Leistungsfähigkeit Ihrer Schüler aufgrund der vorhandenen Klima- und Luftverhältnisse im Klassenraum einstufen?**  
 Im Sommer:  
 schlecht  eher schlecht  unverändert  eher gut  gut  
 Im Winter:  
 schlecht  eher schlecht  unverändert  eher gut  gut

**4.4. Können Sie sich vorstellen, dass eine verbesserte Luftqualität zu einer Leistungs- und Konzentrationssteigerung bei Ihren Schülern führt?**  
 nein, gar nicht  eher nein  weder noch  eher ja  ja, sehr

**4.5. Welche Maßnahmen sind in Ihren Augen zur Verbesserung der Luftqualität notwendig?** (Mehrrechenung möglich)  
 Einsatz mechanischer Lüftungsgeräte oder -anlagen  Angeleitetes Lüften (Lüftungspausen nach Zeit, z.B. nach 20 min)  
 Nutzung einer Lüftungsampe mit Licht- und Tonsignal  Einführung eines Lüftungsdienstes für Schüler (ähnlich dem Tafeldienst)

Anmerkungen:  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

– Vielen Dank!

4/4

Fragebogen für Lehrer – SZ FL

**FORSCHUNGSPROJEKT:**  
**Lüftungskonzepte in Bildungsstätten**

gefördert durch:  

**Fragebogen für Schüler(innen)**

Schule: Gymnasium am Schulzentrum Fallersleben

Der Mensch hält sich bis zu 80% des Tages in geschlossenen Räumen auf. Kinder, Jugendliche und junge Erwachsene verbringen dabei bis zu einem Drittel des Tages in Schulen oder anderen Bildungseinrichtungen. In Zukunft wird sich die Unterrichtszeit noch auf die Nachmittagsstunden verlängern. Vor diesem Hintergrund gilt es attraktive Bildungsstätten für die Zukunft zu entwickeln.  
 Zu den wichtigsten Einflussfaktoren der Aufenthaltsqualität gehören die Luftqualität und die thermische Behaglichkeit. Die Lern- und Lehrfähigkeit von Schülern und Lehrkräften hängt stark von einer qualitativ hochwertigen Raumluft ab.

Das Institut für Gebäude- und Solartechnik begleitet das Forschungsprojekt „Lüftungskonzepte in Bildungsstätten – Analyse und Optimierungsansätze“. Dieses Projekt beschäftigt sich mit der Luftqualität in Bildungsräumen. Ziel ist eine verbesserte Luftqualität und eine Steigerung der Behaglichkeit.

**Zum Klassenraum:**

Raum: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

Klasse: \_\_\_\_\_

**Zur Person:**

Geschlecht:  
 männlich  weiblich

Mein Sitzplatz befindet sich:  
 nah am Fenster  in der Mitte  nah an der Tür

1/4

**1. Klima des Raumes:**

**1.1. Wie beurteilst Du die Temperatur im Klassenraum?**

Im Sommer:  
 zu kalt  eher kalt  genau richtig  eher warm  zu warm

Im Winter:  
 zu kalt  eher kalt  genau richtig  eher warm  zu warm

**1.2. Wie beurteilst Du die Luftfeuchtigkeit im Klassenraum?**

Im Sommer:  
 sehr trocken  eher trocken  neutral  eher feucht  sehr feucht

Im Winter:  
 sehr trocken  eher trocken  neutral  eher feucht  sehr feucht

**2. Luftqualität des Raumes:**

**2.1. Wie beurteilst Du die Luftqualität im Klassenraum?**

Im Sommer:  
 schlecht  eher schlecht  neutral  eher gut  gut

Im Winter:  
 schlecht  eher schlecht  neutral  eher gut  gut

**2.2. Würdest Du sagen, dass sich die Luftqualität im Laufe einer Unterrichtsstunde verschlechtert?**

Im Sommer:  
 ja  nein  teils-teils

Im Winter:  
 ja  nein  teils-teils

**2.4. Tritt an Deinem Sitzplatz im Klassenraum Luftzug auf?**

ja  nein

**2.5. Stört diese vorhandene Lüftung-Situation?**  
(Vielleicht ist es im Winter im Sommer manchmal angenehmer wenn es ein bisschen zieht)

ja, sehr  eher ja  weder noch  eher nein  nein, gar nicht

2/4

**3. Das Lüftungsverhalten:**

**3.1. Werden die Fenster im Klassenraum regelmäßig zum Lüften geöffnet?**

Im Sommer:  
 ja, in den Pausen  ja, in den Schulstunden  ja, beides  nein, weder noch

Im Winter:  
 ja, in den Pausen  ja, in den Schulstunden  ja, beides  nein, weder noch

**3.2. Fühlst Du Dich nach den Unterrichtsstunden für die verbrauchte Luft verantwortlich und öffnest die Fenster, damit frische Luft in den Raum kommt?**

ja  nein  manchmal

**3.3. Wie werden die Fenster beim Lüften geöffnet?**

Im Sommer:  
 angekippt  weit geöffnet  beides

Im Winter:  
 angekippt  weit geöffnet  beides

**3.4. Drehst Du die Heizkörper im Winter während der Lüftungszeit aus?**

ja  nein  teils-teils

**4. Das Wohlbefinden & die Leistung:**

**4.1. Fühlst Du Dich aufgrund der vorhandenen Klima- und Luftverhältnisse im Klassenraum wohl?**

Im Sommer:  
 nein, gar nicht  eher nein  weder noch  eher ja  ja, sehr

Im Winter:  
 nein, gar nicht  eher nein  weder noch  eher ja  ja, sehr

3/4

**4.2. Wie würdest Du Deine Leistungsfähigkeit aufgrund der vorhandenen Klima- und Luftverhältnisse im Klassenraum einstufen?**

Im Sommer:  
 schlecht  eher schlecht  unverändert  eher gut  gut

Im Winter:  
 schlecht  eher schlecht  unverändert  eher gut  gut

**4.3. Kannst Du Dir vorstellen, dass eine verbesserte Luftqualität bei Dir zu einer Leistungs- und Konzentrationssteigerung führt?**

nein, gar nicht  eher nein  weder noch  eher ja  ja, sehr

**4.3. Kannst Du Dir vorstellen, dass eine Lüftungspause im Unterricht verbesserte Luftqualität bei Dir zu einer Leistungs- und Konzentrationssteigerung führt?**

nein, gar nicht  eher nein  weder noch  eher ja  ja, sehr

**4.5. Kannst Du Dir vorstellen, dass eine der genannten Maßnahmen zu einer Verbesserung der Luftqualität führen kann? Und wenn ja, welche?**  
(Mehrfachnennung möglich)

Einsatz einer mechanischen/ automatischen Lüftungsanlagen  Angeleitetes Lüften (Lüftungspausen nach Zeit, z.B. nach 20 min)


Einsatz einer Lüftungsmappe mit Licht- und Tonsignal  Einführung eines Lüftungsdienstes für Schüler (ähnlich dem Tafeldienst)

– Vielen Dank! –

4/4

**Fragebogen für Schüler – SZ FL**

**FORSCHUNGSPROJEKT:**  
**Lüftungskonzepte in Bildungsstätten**

gefördert durch:  

**Fragebogen für Lehrer(innen)**

**Schule:** Realschule am Schulzentrum Vorsfelde **Datum:** \_\_\_\_\_

Der Mensch hält sich bis zu 80% des Tages in geschlossenen Räumen auf. Kinder, Jugendliche und junge Erwachsene verbringen dabei bis zu einem Drittel des Tages in Schulen oder anderen Bildungseinrichtungen. Durch die Anpassung des Betreuungsangebots an eine flexible Arbeitswelt wird sich die Aufenthaltszeit zukünftig sogar noch verlängern. Vor diesem Hintergrund gilt es attraktive Bildungsstätten für die Zukunft zu entwickeln. Zu den wichtigsten Einflussfaktoren der Aufenthaltsqualität gehören die Luftqualität und die thermische Behaglichkeit. Die Lern- und Lehrfähigkeit von Schülern und Lehrkräften ist an eine qualitativ hochwertige Raumluft gekoppelt.

Das Institut für Gebäude- und Solartechnik begleitet das Forschungsprojekt „Lüftungskonzepte in Bildungsstätten – Analyse und Optimierungsansätze“. Dieses Projekt beschäftigt sich mit der Luftqualität in Bildungsräumen. Ziel ist eine verbesserte Luftqualität und eine Steigerung der Behaglichkeit.

**Zur Person:**

**Geschlecht:**  
 männlich  weiblich

Ich unterrichte zurzeit folgende Klassen: \_\_\_\_\_ (bitte die Klassenstufen nennen)

Ich unterrichte überwiegend in folgenden Räumen: \_\_\_\_\_

**Bitte beziehen Sie sich bei Ihren anschließenden Antworten auf den Raum, in dem Sie die meiste Zeit unterrichten.**

1/4

**1. Klima des Raumes:**

**1.1. Wie beurteilen Sie die Raumtemperatur im Klassenraum?**  
**Im Sommer:**  
 zu kalt  eher kalt  genau richtig  eher warm  zu warm  
**Im Winter:**  
 zu kalt  eher kalt  genau richtig  eher warm  zu warm

**1.2. Wie beurteilen Sie die Raumluftfeuchtigkeit im Klassenraum?**  
**Im Sommer:**  
 sehr trocken  eher trocken  neutral  eher feucht  sehr feucht  
**Im Winter:**  
 sehr trocken  eher trocken  neutral  eher feucht  sehr feucht

**2. Luftqualität des Raumes:**

**2.1. Wie beurteilen Sie die Raumluftqualität im Klassenraum?**  
**Im Sommer:**  
 schlecht  eher schlecht  neutral  eher gut  gut  
**Im Winter:**  
 schlecht  eher schlecht  neutral  eher gut  gut

**2.2. Können Sie eine spürbare Verschlechterung der Raumluftqualität im Laufe der Unterrichtsstunden feststellen?**  
**Im Sommer:**  
 ja  nein  teils-teils  
**Im Winter:**  
 ja  nein  teils-teils

**2.4. Tritt im Klassenraum Luftzug auf?**  
**Im Sommer:**  
 ja  nein  teils-teils  
**Im Winter:**  
 ja  nein  teils-teils

**2.5. Stört diese vorhandene Luftzug-Situation?**  
(Möglicherweise ist es im Sommer zum Teil angenehmer wenn ein leichter Luftzug vorhanden ist)  
**Im Sommer:**  
 ja, sehr  eher ja  weder noch  eher nein  nein, gar nicht  
**Im Winter:**  
 ja, sehr  eher ja  weder noch  eher nein  nein, gar nicht

2/4

**3. Mechanische Belüftung der Räume:**

**3.1. Wussten Sie, dass die Räume des Fachtraktes mit einer Lüftungsanlage mechanisch belüftet werden?**  
 ja  nein

**3.2. Erfüllt diese Lüftungsanlage Ihrer Meinung nach ihren Zweck?**  
 nein, gar nicht  eher nein  teils-teils  eher ja  ja, sehr  
 ich unterrichte dort nicht

**4. Das Lüftungsverhalten:**

**4.1. Werden die Fenster im Klassenraum regelmäßig zum Lüften geöffnet?**  
**Im Sommer:**  
 ja, in den Pausen  ja, in den Schulstunden  ja, beides  nein, weder noch  
**Im Winter:**  
 ja, in den Pausen  ja, in den Schulstunden  ja, beides  nein, weder noch

**4.2. Wie erfolgt das Lüften?**  
(Mehrfachnennung möglich)  
 selbstständig ausgeführt  ausgeführt von den Schülern  ausgeführt durch die Lehrkraft  
 ausgeführt von den Schülern auf Anweisung der Lehrkraft

**4.4. Werden die Heizkörper im Winter während der Lüftungszeit ausgestellt?**  
 ja  nein  teils-teils

**5. Das Wohlbefinden & die Leistung:**

**5.1. Fühlen Sie sich aufgrund der vorhandenen Klima- und Luftverhältnisse im Klassenraum wohl?**  
**Im Sommer:**  
 nein, gar nicht  eher nein  weder noch  eher ja  ja, sehr  
**Im Winter:**  
 nein, gar nicht  eher nein  weder noch  eher ja  ja, sehr

**5.2. Wie würden Sie Ihre Leistungsfähigkeit aufgrund der vorhandenen Klima- und Luftverhältnisse im Klassenraum einstufen?**  
**Im Sommer:**  
 schlecht  eher schlecht  unverändert  eher gut  gut  
**Im Winter:**  
 schlecht  eher schlecht  unverändert  eher gut  gut

3/4

**5.3. Wie würden Sie die Leistungsfähigkeit Ihrer Schüler aufgrund der vorhandenen Klima- und Luftverhältnisse im Klassenraum einstufen?**  
**Im Sommer:**  
 schlecht  eher schlecht  unverändert  eher gut  gut  
**Im Winter:**  
 schlecht  eher schlecht  unverändert  eher gut  gut

**5.4. Können Sie sich vorstellen, dass eine verbesserte Luftqualität zu einer Leistungs- und Konzentrationssteigerung bei Ihren Schülern führt?**  
 nein, gar nicht  eher nein  weder noch  eher ja  ja, sehr

**5.5. Welche Maßnahmen sind in Ihren Augen zur Verbesserung der Luftqualität notwendig?** (Mehrfachnennung möglich)  
 Einsatz mechanischer Lüftungsgeräte oder -anlagen  Angeleitetes Lüften (Lüftungspausen nach Zeit, z. B. nach 20 min)  
 Nutzung einer Lüftungsampel mit Licht- und Tonsignal  Einführung eines Lüftungsdienstes für Schüler (ähnlich dem Tafeldienst)

Anmerkungen:  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

- Vielen Dank! -

4/4

Fragebogen für Lehrer – SZ VF

**FORSCHUNGSPROJEKT:**  
**Lüftungskonzepte in Bildungsstätten**

gefördert durch:  

**Fragebogen für Schüler(innen)**

Schule: Realschule am Schulzentrum Vorsfelde

Der Mensch hält sich bis zu 80% des Tages in geschlossenen Räumen auf. Kinder, Jugendliche und junge Erwachsene verbringen dabei bis zu einem Drittel des Tages in Schulen oder anderen Bildungseinrichtungen. In Zukunft wird sich die Unterrichtszeit noch auf die Nachmittagsstunden verlängern. Vor diesem Hintergrund gilt es attraktive Bildungsstätten für die Zukunft zu entwickeln.

Zu den wichtigsten Einflussfaktoren der Aufenthaltsqualität gehören die Luftqualität und die thermische Behaglichkeit. Die Lern- und Lehrfähigkeit von Schülern und Lehrkräften hängt stark von einer qualitativ hochwertigen Raumluft ab.

Das Institut für Gebäude- und Solartechnik begleitet das Forschungsprojekt „Lüftungskonzepte in Bildungsstätten – Analyse und Optimierungsansätze“. Dieses Projekt beschäftigt sich mit der Luftqualität in Bildungsräumen. Ziel ist eine verbesserte Luftqualität und eine Steigerung der Behaglichkeit.

**Zum Klassenraum:**

Raum: **31 (Frau Seidel)**

Datum: \_\_\_\_\_

Klasse: \_\_\_\_\_

**Zur Person:**

Geschlecht:  
 männlich  weiblich

Mein Sitzplatz befindet sich:  
 nah am Fenster  in der Mitte  nah an der Tür

1/4

**1. Klima des Raumes:**

**1.1. Wie beurteilst Du die Temperatur im Klassenraum?**

Im Sommer:  
 zu kalt  eher kalt  genau richtig  eher warm  zu warm

Im Winter:  
 zu kalt  eher kalt  genau richtig  eher warm  zu warm

**1.2. Wie beurteilst Du die Luftfeuchtigkeit im Klassenraum?**

Im Sommer:  
 sehr trocken  eher trocken  neutral  eher feucht  sehr feucht

Im Winter:  
 sehr trocken  eher trocken  neutral  eher feucht  sehr feucht

**2. Luftqualität des Raumes:**

**2.1. Wie beurteilst Du die Luftqualität im Klassenraum?**

Im Sommer:  
 schlecht/ verbraucht  eher schlecht  neutral  eher gut  gut/ frisch

Im Winter:  
 schlecht/ verbraucht  eher schlecht  neutral  eher gut  gut/ frisch

**2.2. Würdest Du sagen, dass sich die Luftqualität im Laufe einer Unterrichtsstunde verschlechtert?**

Im Sommer:  
 ja  nein  teils-teils

Im Winter:  
 ja  nein  teils-teils

**2.4. Tritt an Deinem Sitzplatz im Klassenraum Luftzug auf?**

Im Sommer:  
 ja  nein

Im Winter:  
 ja  nein

**2.6. Stört Dich diese vorhandene Luftzug-Situation?**  
(Vielleicht ist es im Winter im Sommer manchmal angenehmer wenn es ein bisschen zieht)

Im Sommer:  
 ja, sehr  eher ja  weder noch  eher nein  nein, gar nicht

Im Winter:  
 ja, sehr  eher ja  weder noch  eher nein  nein, gar nicht

2/4

**3. Aktuelle Belüftung des Raumes:**

**3.1. Wusstest Du, dass der Raum mit einer Lüftungsanlage mechanisch belüftet wird?**

ja  nein

**3.2. Erfüllt diese Lüftungsanlage Deiner Meinung nach ihren Zweck?**

nein, gar nicht  eher nein  teils-teils  eher ja  ja, sehr

**4. Das Lüftungsverhalten:**

**4.1. Werden die Fenster im Klassenraum regelmäßig zum Lüften geöffnet?**

Im Sommer:  
 ja, in den Pausen  ja, in den Schulstunde  ja, beides  nein, weder noch

Im Winter:  
 ja, in den Pausen  ja, in den Schulstunde  ja, beides  nein, weder noch

**4.2. Fühlst Du Dich nach den Unterrichtsstunden für die verbrauchte Luft verantwortlich und öffnest die Fenster, damit frische Luft in den Raum kommt?**

ja  nein  manchmal

**4.4. Drehst Du die Heizkörper im Winter während der Lüftungszeit aus?**

ja  nein  teils-teils

**5. Das Wohlbefinden & die Leistung:**

**5.1. Fühlst Du Dich aufgrund der vorhandenen Klima- und Luftverhältnisse im Klassenraum wohl?**

Im Sommer:  
 nein, gar nicht  eher nein  weder noch  eher ja  ja, sehr

Im Winter:  
 nein, gar nicht  eher nein  weder noch  eher ja  ja, sehr

**5.3. Wie würdest Du Deine Leistungsfähigkeit aufgrund der vorhandenen Klima- und Luftverhältnisse im Klassenraum einstufen?**

Im Sommer:  
 schlecht  eher schlecht  unverändert  eher gut  gut

Im Winter:  
 schlecht  eher schlecht  unverändert  eher gut  gut

3/4

**5.4. Kannst Du Dir vorstellen, dass eine verbesserte Luftqualität bei Dir zu einer Leistungs- und Konzentrationssteigerung führt?**

nein, gar nicht  eher nein  weder noch  eher ja  ja, sehr

**5.6. Kannst Du Dir vorstellen, dass eine zusätzliche, kurze Lüftungspause im Unterricht zu einer verbesserten Luftqualität und damit bei Dir zu einer Leistungssteigerung führt?**

nein, gar nicht  eher nein  weder noch  eher ja  ja, sehr

– Vielen Dank! –

4/4

**Fragebogen für Schüler – SZ VF**

**FORSCHUNGSPROJEKT:**  
**Lüftungskonzepte in Bildungsstätten**

gefördert durch:  

**Fragebogen für Lehrer(innen)**

Schule: Grundschule am Bütenweg Datum: \_\_\_\_\_

Der Mensch hält sich bis zu 80% des Tages in geschlossenen Räumen auf. Kinder, Jugendliche und junge Erwachsene verbringen dabei bis zu einem Drittel des Tages in Schulen oder anderen Bildungseinrichtungen. Durch die Anpassung des Betreuungsangebots an eine flexible Arbeitswelt wird sich die Aufenthaltszeit zukünftig sogar noch verlängern. Vor diesem Hintergrund gilt es attraktive Bildungsstätten für die Zukunft zu entwickeln. Zu den wichtigsten Einflussfaktoren der Aufenthaltsqualität gehören die Luftqualität und die thermische Behaglichkeit. Die Lern- und Lehrfähigkeit von Schülern und Lehrkräften ist an eine qualitativ hochwertige Raumluft gekoppelt.

Das Institut für Gebäude- und Solartechnik begleitet das Forschungsprojekt „Lüftungskonzepte in Bildungsstätten – Analyse und Optimierungsansätze“. Dieses Projekt beschäftigt sich mit der Luftqualität in Bildungsräumen. Ziel ist eine verbesserte Luftqualität und eine Steigerung der Behaglichkeit.

**Zur Person:**

Geschlecht:  männlich  weiblich

Ich unterrichte zurzeit folgende Klassen: \_\_\_\_\_ (Bitte die Klassenstufen nennen)

Ich unterrichte überwiegend in folgenden Räumen: \_\_\_\_\_

**Bitte beziehen Sie sich bei Ihren anschließenden Antworten auf den Raum, in dem Sie die meiste Zeit unterrichten.**

1/4

**1. Klima des Raumes:**

**1.1. Wie beurteilen Sie die Raumtemperatur im Klassenraum?**

Im Sommer:  zu kalt  eher kalt  genau richtig  eher warm  zu warm  
 Im Winter:  zu kalt  eher kalt  genau richtig  eher warm  zu warm

**1.2. Wie beurteilen Sie die Raumluftfeuchtigkeit im Klassenraum?**

Im Sommer:  sehr trocken  eher trocken  neutral  eher feucht  sehr feucht  
 Im Winter:  sehr trocken  eher trocken  neutral  eher feucht  sehr feucht

**2. Luftqualität des Raumes:**

**2.1. Wie beurteilen Sie die Raumluftqualität im Klassenraum?**

Im Sommer:  schlecht  eher schlecht  neutral  eher gut  gut  
 Im Winter:  schlecht  eher schlecht  neutral  eher gut  gut

**2.2. Können Sie eine spürbare Verschlechterung der Raumluftqualität im Laufe der Unterrichtsstunden feststellen?**

Im Sommer:  ja  nein  teils-teils  
 Im Winter:  ja  nein  teils-teils

**2.3. Tritt im Klassenraum Luftzug auf?**

Im Sommer:  ja  nein  teils-teils  
 Im Winter:  ja  nein  teils-teils

**2.4. Stört diese vorhandene Luftzug-Situation?**  
 (Möglicherweise ist es im Sommer zum Teil angenehmer wenn ein leichter Luftzug vorhanden ist)

Im Sommer:  ja, sehr  eher ja  weder noch  eher nein  nein, gar nicht  
 Im Winter:  ja, sehr  eher ja  weder noch  eher nein  nein, gar nicht

2/4

**3. Das Lüftungsverhalten:**

**3.1. Werden die Fenster im Klassenraum regelmäßig zum Lüften geöffnet?**

Im Sommer:  ja, in den Pausen  ja, in den Schulstunden  ja, beides  nein, weder noch  
 Im Winter:  ja, in den Pausen  ja, in den Schulstunden  ja, beides  nein, weder noch

**3.2. Wie erfolgt das Lüften?**  
 (Mehrfachnennung möglich)

selbstständig ausgeführt von den Schülern  ausgeführt von den Schülern auf Anweisung der Lehrkraft  ausgeführt durch die Lehrkraft

**3.3. Wie werden die Fenster beim Lüften geöffnet?**

Im Sommer:  angekippt  weit geöffnet  beides  
 Im Winter:  angekippt  weit geöffnet  beides

**3.4. Werden die Heizkörper im Winter während der Lüftungszeit ausgestellt?**

ja  nein  teils-teils

**4. Das Wohlbefinden & die Leistung:**

**4.1. Fühlen Sie sich aufgrund der vorhandenen Klima- und Luftverhältnisse im Klassenraum wohl?**

Im Sommer:  nein, gar nicht  eher nein  weder noch  eher ja  ja, sehr  
 Im Winter:  nein, gar nicht  eher nein  weder noch  eher ja  ja, sehr

**4.2. Wie würden Sie Ihre Leistungsfähigkeit aufgrund der vorhandenen Klima- und Luftverhältnisse im Klassenraum einstufen?**

Im Sommer:  schlecht  eher schlecht  unverändert  eher gut  gut  
 Im Winter:  schlecht  eher schlecht  unverändert  eher gut  gut

3/4

**4.3. Wie würden Sie die Leistungsfähigkeit Ihrer Schüler aufgrund der vorhandenen Klima- und Luftverhältnisse im Klassenraum einstufen?**

Im Sommer:  schlecht  eher schlecht  unverändert  eher gut  gut  
 Im Winter:  schlecht  eher schlecht  unverändert  eher gut  gut

**4.4. Können Sie sich vorstellen, dass eine verbesserte Luftqualität zu einer Leistungs- und Konzentrationssteigerung bei Ihren Schülern führt?**

nein, gar nicht  eher nein  weder noch  eher ja  ja, sehr

**4.5. Welche Maßnahmen sind in Ihren Augen zur Verbesserung der Luftqualität notwendig?**  
 (Mehrfachnennung möglich)

Einsatz mechanischer Lüftungsgeräte oder -anlagen  Angeleitetes Lüften (Lüftungspausen nach Zeit, z. B. nach 20 min)  
 Nutzung einer Lüftungsampel mit Licht- und Tonsignal  Einführung eines Lüftungsdienstes für Schüler (ähnlich dem Tafeldienst)

Anmerkungen:  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

- Vielen Dank! -

4/4

Fragebogen für Lehrer – GS BS

**FORSCHUNGSPROJEKT:**  
**Lüftungskonzepte in Bildungsstätten**




**Fragebogen für Schüler(innen)**  
 Schule: Grundschule Büthenweg Klasse: \_\_\_\_\_  
 Datum: \_\_\_\_\_ Uhrzeit: \_\_\_\_\_

**Wir möchten gern herausfinden ob die Luft in Deinem Klassenraum gut oder schlecht ist und ob vielleicht etwas verbessert werden kann.**

Ich bin ein:  
 Junge  Mädchen

Im Klassenraum sitze ich gerade:  
 nah am Fenster  in der Mitte  nah an der Tür

**1. Wir möchten gern etwas über das Klima in Deinem Klassenzimmer erfahren:**

1.a. Wie findest Du die Temperatur in Deinem Klassenraum im Sommer?  
 zu kalt  etwas kalt  genau richtig  etwas warm  zu warm

1.b. Wie findest Du die Temperatur in Deinem Klassenraum im Winter?  
 zu kalt  etwas kalt  genau richtig  etwas warm  zu warm

**2. Manchmal sagt man: „Hier ist schlechte Luft“. Dann macht man das Fenster auf, damit frische Luft hereinkommen kann:**

2.a. Wie findest Du die Luft in Deinem Klassenraum im Sommer?  
 sehr schlecht  schlecht  weiß nicht  gut  sehr gut

2.b. Wie findest Du die Luft in Deinem Klassenraum im Winter?  
 sehr schlecht  schlecht  weiß nicht  gut  sehr gut

2.c. Werden bei Euch im Sommer die Fenster im Klassenraum regelmäßig zum Lüften geöffnet?  
 ja, in den Pausen  ja, in der Schulstunden  ja, beides  nein, gar nicht

2.d. Werden bei Euch im Winter die Fenster im Klassenraum regelmäßig zum Lüften geöffnet?  
 ja, in den Pausen  ja, in der Schulstunden  ja, beides  nein, gar nicht

- Bitte umdrehen -  
 1/2

2.e. Wie werden die Fenster im Sommer beim Lüften geöffnet?  
 angekippt  weit aufgemacht  beides

2.f. Wie werden die Fenster im Winter beim Lüften geöffnet?  
 angekippt  weit aufgemacht  beides

2.g. Habt Ihr in der Klasse einen Tafeldienst?  
 ja  nein

2.h. Habt Ihr in der Klasse einen Lüftungsdienst?  
 ja  nein

2.i. Wenn nicht, hättest Du Lust den Tafeldienst oder den Lüftungsdienst in Deiner Klasse zu übernehmen?  
 ja  nein  weiß nicht


**3. Wir möchten herausfinden wie Du Dich fühlst:**

3.a. Fühlst Du Dich bei der Luft im Klassenraum im Sommer wohl?  
 ja, sehr  ja  weiß nicht  nein  nein, gar nicht

3.b. Fühlst Du Dich bei der Luft im Klassenraum im Winter wohl?  
 ja, sehr  ja  weiß nicht  nein  nein, gar nicht

3.c. Kannst Du Dich bei der Luft im Sommer im Klassenraum gut konzentrieren?  
 ja  nein  weiß nicht

3.d. Kannst Du Dich bei der Luft im Winter im Klassenraum gut konzentrieren?  
 ja  nein  weiß nicht

 - Vielen Dank für Deine Hilfe! -

2/2

Fragebogen für Schüler – GS BS



## Anhang 12 Lüftungsleitfäden

**Lüftungskonzepte in Bildungseinrichtungen**  
Ereignisse der Kita am Krankenhaus in Wolfsburg



**Kita am Krankenhaus**  
**Regenbogen**



Dipl.-Ing. Jennifer König  
Institut für Gebäude- und Solartechnik  
TU Braunschweig

**1 | Vorwort**

**Liebe Leserinnen und Leser,**

der Mensch hält sich bis zu 80% des Tages in geschlossenen Räumen auf. Kinder, Jugendliche und junge Erwachsene verbringen dabei bis zu einem Drittel des Tages in Kindergärten, Kitas, Schulen oder anderen Bildungseinrichtungen. Durch die Anpassung des Betreuungsumfeldes an eine flexiblere Arbeitswelt wird sich die Aufenthaltszeit zukünftig sogar noch verlängern. Vor diesem Hintergrund gilt es attraktive Bildungsstätten für die Zukunft zu entwickeln.

Zu den wichtigsten Einflussfaktoren der Aufenthaltsqualität gehören die Luftqualität, die thermische Behaglichkeit und der Lautstärkepegel. Die Gesundheit und die Lern- und Lehrlingfähigkeit sind an ein qualitativ hochwertiges Umfeld gekoppelt. Eine erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration, eine hohe Raumlufttemperatur und laute Geräuschpegel schränken nachweislich das Wohlbefinden und somit die Leistungsfähigkeit ein.

Das Institut für Gebäude- und Solartechnik (IGS) der TU Braunschweig beschäftigt sich seit mehreren Jahren mit der Energieeffizienz von Gebäuden sowie der Entwicklung und Umsetzung von Energiekonzepten und deren Evaluierung in der baulichen Praxis. Es werden Projekte zur modellhaften Sanierung von Bildungsstätten und der Konformsteigerung im späteren Betrieb erfolgreich umgesetzt. Langfristige Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Entwicklung, Innenraumtemperatur und Luftfeuchtigkeit in Schulen und Kindergärten dienen bereits der Dokumentation vorhandener Verhältnisse und bieten eine Grundlage für die Planung und Umsetzung von Sanierungen.

Wir möchten Ihnen mit diesem Leitfaden Informationen geben, mit deren Hilfe Sie die Rahmenbedingungen und somit auch die pädagogische Arbeit in Ihrer Einrichtung verbessern können und wünschen Ihnen viel Spaß und Erfolg bei der Umsetzung.

**2 | WAS IST LUFTGÜTE?**

Luftgüte ist ein Maß für die Qualität der Luft in Innenräumen. Objektive Messgröße der Luftgüte ist das Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>). Dieses farb- und geruchlose Gas wird vom Menschen ausgeatmet. Je älter der Mensch wird, desto größer ist das Lungenvolumen und somit wächst auch der CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Und auch bei körperlicher Aktivität ist der Ausstoß höher als bei sitzenden Tätigkeiten.


Im Freien schwankt die Kohlendioxidkonzentration zwischen 350 ppm (parts per million) in Rainkulturgebieten und 700 ppm in Städten. Der empfohlene Maximalwert für Innenräume im Wohnbereich beträgt 1.000 ppm CO<sub>2</sub> und basiert auf der 1858 definierten Zahl von dem Physiker Max Pettenkofer. Die DIN gibt für Bürohäute mit mechanischer Belüftung einen Grenzwert von 1.500 ppm an.

Aufgrund der hohen Personendichte in Klassenräumen von Schulen oder Gruppen-

räumen in Kindertagesstätten steigt die CO<sub>2</sub>-Konzentration schnell stark an. Gemessene Werte von über 3.500 ppm nach 45 Minuten sind keine Seltenheit.

Gemäß einer Empfehlung des Umweltbundesamtes wurde für Schulen und Kindertagesstätten wurde eine Einteilung der Luftgüte in drei Stufen vorgenommen:

- > **über 2.000 ppm = Hygienisch inakzeptabel**  
⇒ Dringender Handlungsbedarf, Belüftung des Raumes prüfen und ggf. weitere Maßnahmen prüfen
- > **won 1.000 bis 2.000 ppm = Hygienisch auffällig**  
⇒ Lüftungsmaßnahmen intensivieren oder Lüftungsverhalten überprüfen
- > **bis 1.000 ppm = hygienisch unbedenklich**  
⇒ Keine Lüftungsmaßnahmen notwendig



Bildquelle: <http://www.umweltbundesamt.de>

**3 | WIESO IST GUTE LUFT SO WICHTIG?**

Die Luftgüte beeinflusst das Wohlbefinden der Personen in einem Raum nachweislich. Kohlendioxid ist zwar erst ab einer Konzentration von 5 Volumenprozent (50.000 ppm) für Menschen giftig, verursacht jedoch schon bei wesentlich geringeren Konzentrationen ab 1.500 ppm unspezifische Befindlichkeitsstörungen wie Müdigkeit, Konzentrationschwäche, Kopfschmerzen und Leistungsabfall.

**4 | WIE LÄSST SICH DIE LUFTGÜTE IM RAUM VERBESSERN?**

Die Antwort ist einfach: Durch ausreichendes Lüften

Dies ist jedoch in der Praxis problematisch, denn jeder Mensch die Luftqualität im Raum subjektiv anders empfindet. Personen, die gerade einen voll besetzten Raum betreten, beurteilen die Luftqualität in der Regel viel schlechter, als diejenigen, die sich dort schon länger aufhalten. (Gewöhnungseffekt)

Im Winter steht das Einsparen von Heizkosten im Vordergrund und die Tatsache dass „dicke“ Luft die Leistungsfähigkeit der Anwesenden verringert, rückt in den Hintergrund. Durch energie sparende Verbesserungen an den Gebäuden nahm die „natürliche“ Lüftung durch Ritzen und Fugen an Fenstern oder Türen in den letzten Jahren kontinuierlich ab. Dem meisten Menschen ist nicht bewusst, dass sie heute für ein gleich bleibendes Innenraumklima mehr Lüften müssen als früher.

**5 | WAS HEISST AUSREICHEND LÜFTEN?**

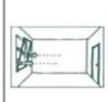
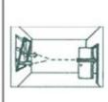
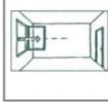
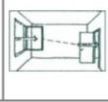
Die Fenster sollten abhängig vom Kohlendioxidgehalt der Raumluft geöffnet werden, damit die verbrauchte Raumluft gegen frische Außenluft ausgetauscht werden kann. Hier werden verschiedene Lüftungsstrategien im Vergleich erläutert.

**Kipp Lüftung:** Das häufig praktizierte dauerhafte Lüften über gekippte Fenster reicht häufig nicht aus um die Qualität der Raumluft zu gewährleisten. Der Luftaustausch ist aufgrund der eingeschränkten Luftströmungsverhältnisse so gering, dass es 60 Minuten dauert um die Raumluft einmal komplett auszutauschen. Dies führt in der Heizperiode zu enormen Lüftungswärmeverlusten und zur Abkühlung des Raumes. Hinzu kommt eine mögliche Belastung durch dauerhaften Außenlärm.

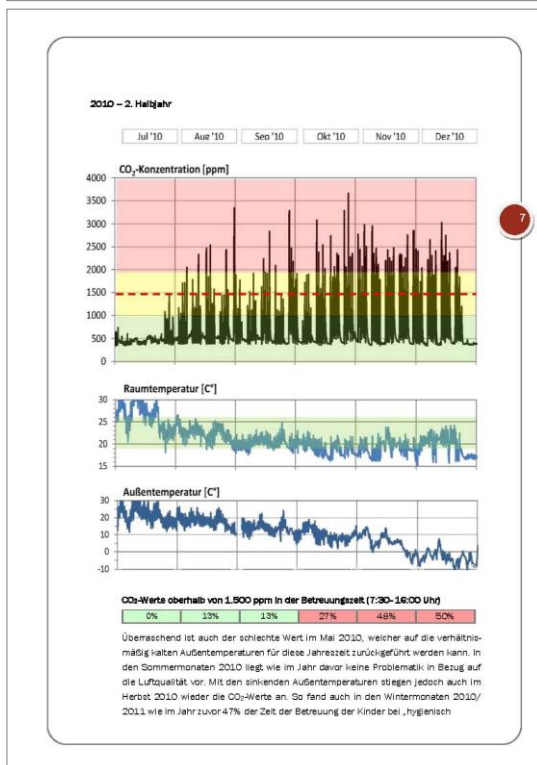
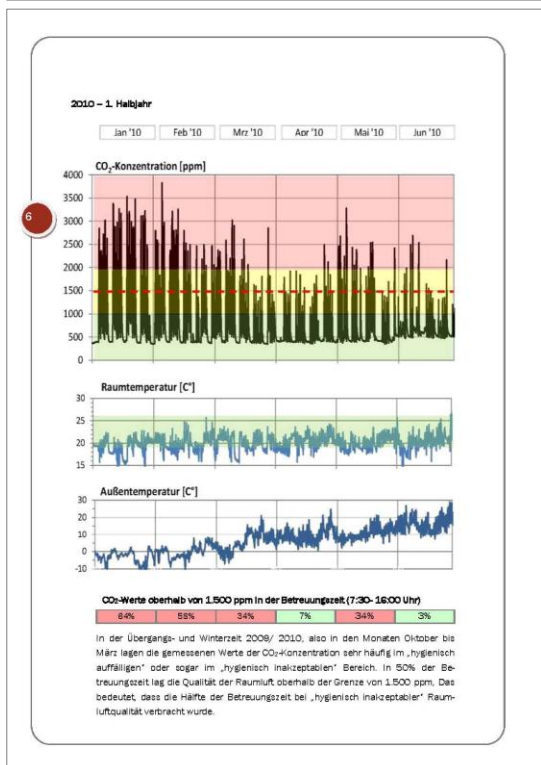
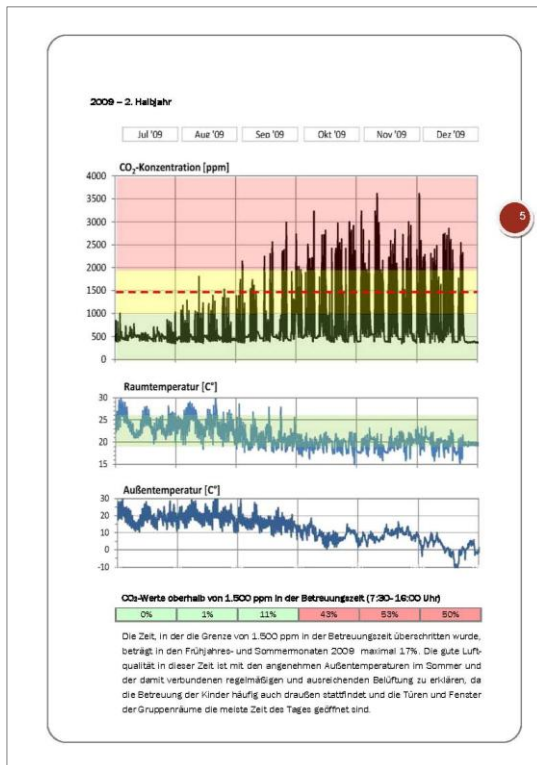
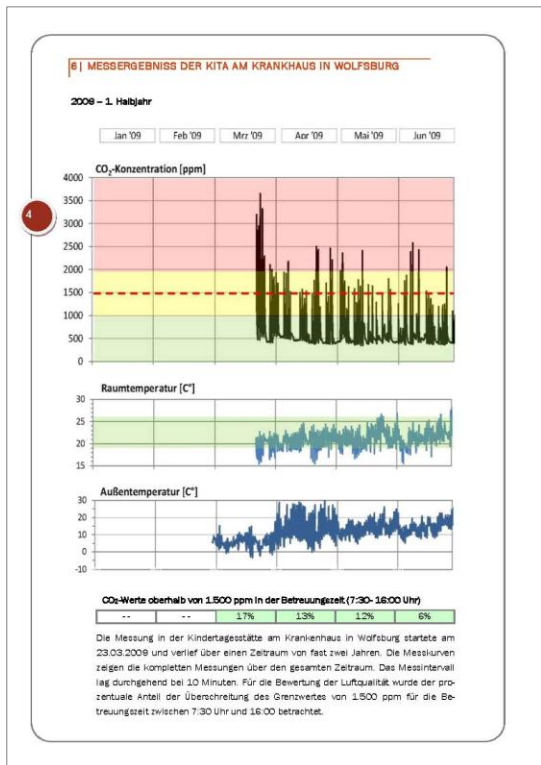
**Stoß Lüftung:** Beim Stoßlüften über weit geöffnete Fenster ist es bei 20 m<sup>2</sup> möglich in 10 Minuten die Raumluft durch Frischluft zu ersetzen. Über das kurze Lüftungsintervall in Verbindung mit der thermischen Speichermasse der Wände, Böden und Möbel geht damit in der Heizperiode weniger Wärme verloren. Die gespeicherte Wärme wird wieder an den Raum abgegeben und trägt so zum schnellen Wiederaufwärmen der frischen Außenluft im Raum bei.

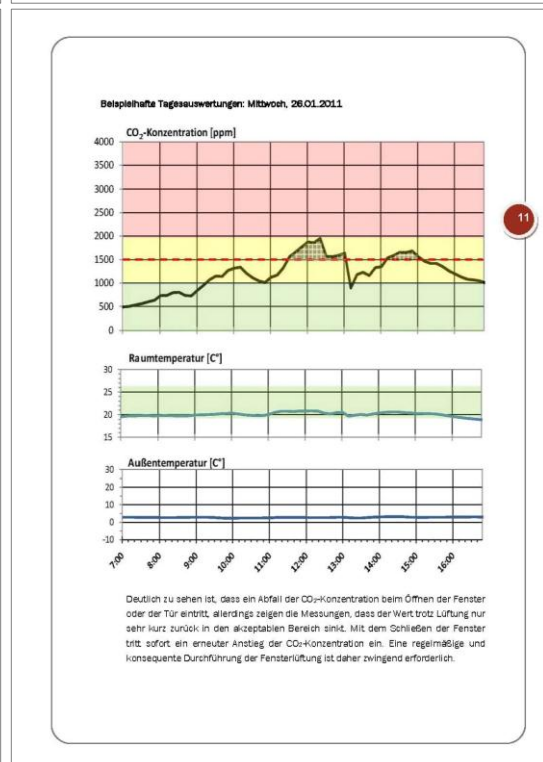
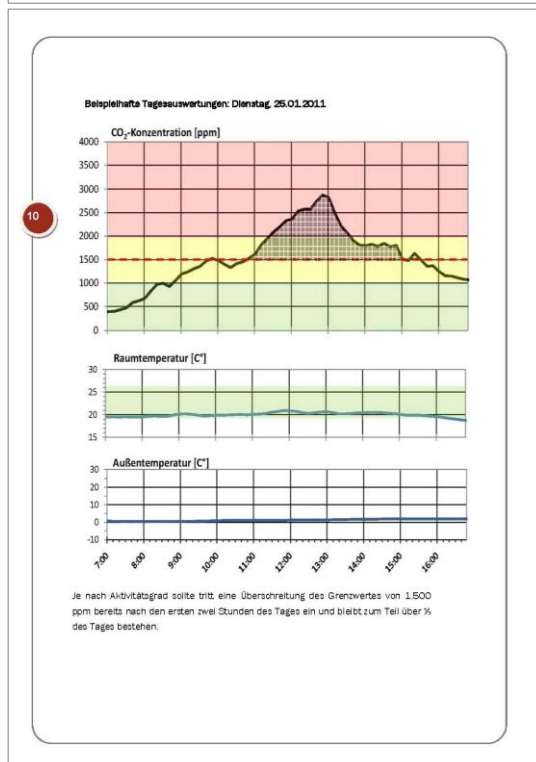
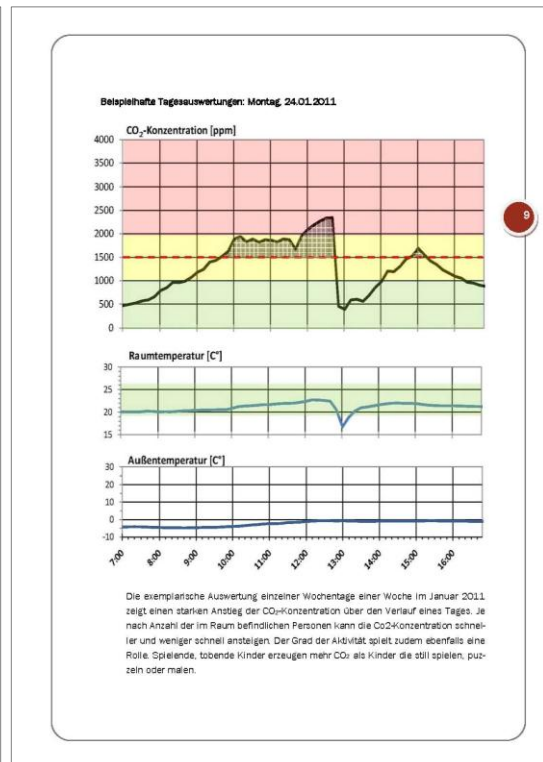
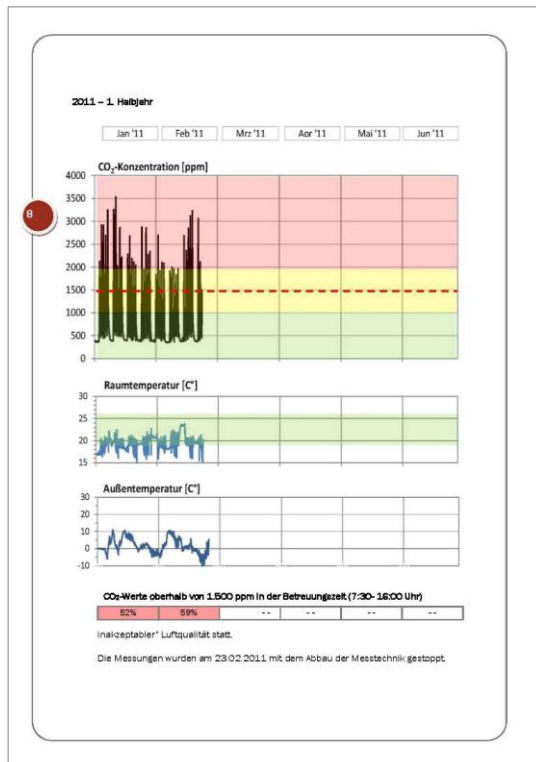
**Querlüftung:** Die Querlüftung über weit geöffnete Fenster und die zusätzliche geöffnete Zimmertür ist als effektivste Lüftungsart zu nennen. Sie kann genau wie die Stoßlüftung für die kurze Dauer von zwei Minuten vorgenommen werden um einen ausreichenden Luftaustausch sicherzustellen. Allerdings kann es dabei für die Schüler während des Unterrichts zu Zugerscheinungen am Sitzplatz kommen.

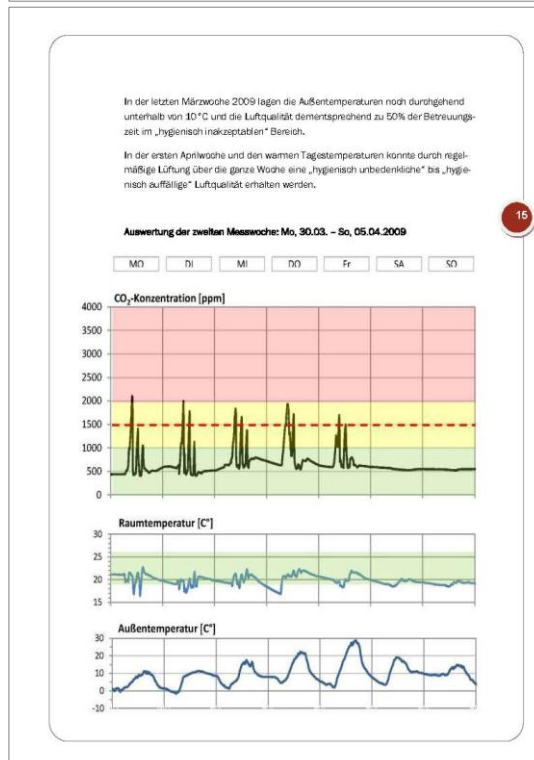
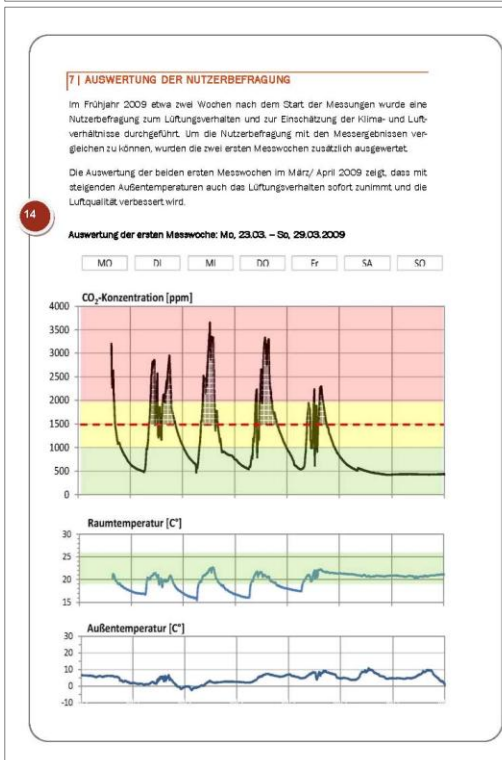
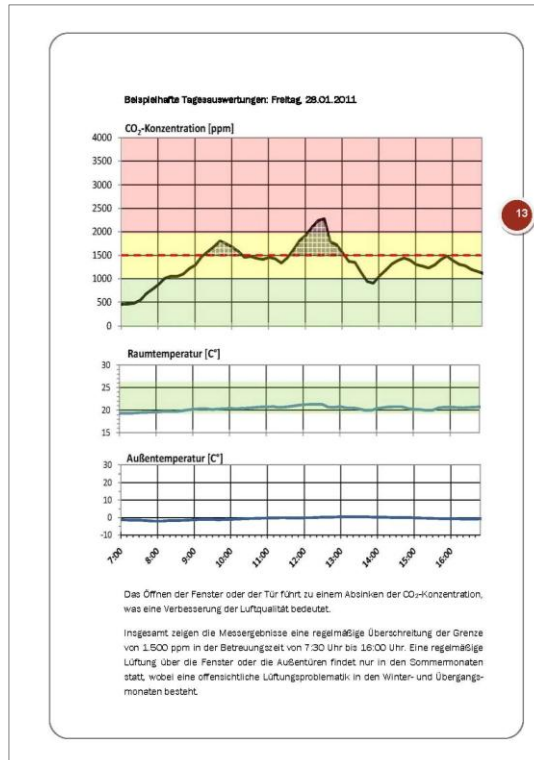
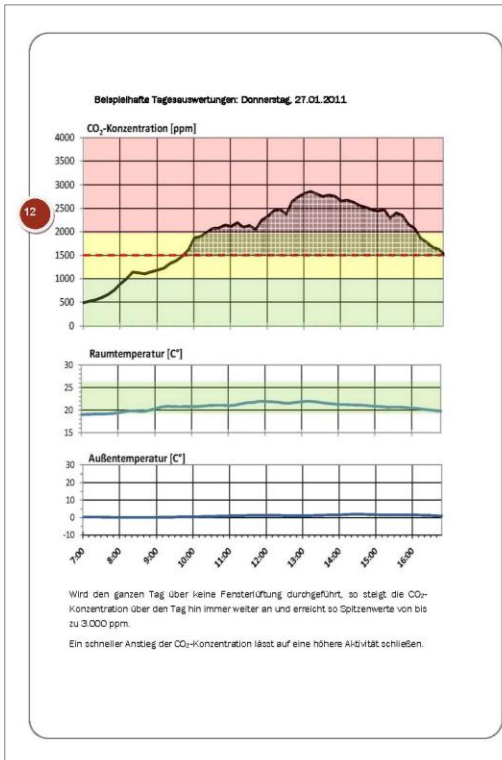
Bei allen drei Lüftungsarten wird die Behaglichkeit während der Heizperiode durch zeitweilige Abkühlungen des Raumes und Zugerscheinungen am Sitzplatz beeinträchtigt. Umso wichtiger ist daher die zeitliche Beschränkung dieser Einschränkungen.

	<b>Kipp Lüftung</b> Fenster gekippt und gegenüberliegende Tür geschlossen <b>30 - 60 Minuten</b>		<b>Kipp-Querlüftung</b> Fenster gekippt und gegenüberliegende Tür ganz geöffnet <b>15 - 30 Minuten</b>
	<b>Stoß Lüftung</b> Fenster ganz geöffnet und gegenüberliegende Tür geschlossen <b>5 - 10 Minuten</b>		<b>Querlüftung</b> Fenster und gegenüberliegende Tür ganz geöffnet <b>1 - 5 Minuten</b>

Bildquellen und Quellen: <http://www.din.de>







16

Diese Nutzerbefragung ergab insgesamt, dass das empfundene Raumklima nicht unbedingt immer mit den gemessenen Werten übereinstimmt.

Die Hälfte der Befragten gab an, dass die Raumtemperatur in den Räumen der Kita genau richtig sei. Je ein Viertel empfindet die Temperatur eher kalt oder eher warm. Diese Angabe kann von der jeweiligen Ausrichtung der Räume im Gebäude abhängen. Südorientiert Räume sind im Allgemeinen wärmer als nordorientierte Räume.

Die Luftqualität wird von 45% der Befragten neutral bewertet. Weitere 40% bewerten die Luftqualität eher schlecht. Nur 10% als gut. Dieses Ergebnis zeigt, dass eine Sensibilisierung für die Luftproblematik besteht.

Allerdings widerlegen die Antworten auf die Frage nach einer spürbaren Verschlechterung der Luftqualität diese Sensibilität, da nur 35% der Befragten tatsächlich wahrnehmen, dass die Luftqualität über den Tag hin schlechter wird. 35% bemerken es gar nicht und 30% bemerken es zum Teil.

Die Antworten auf die Frage nach einem regelmäßigen Lüftungsverhalten zeigen, dass ein aktives Lüftungsverhalten gegeben ist. Es muss lediglich intensiviert werden.

Die Antworten zur Öffnung der Fenster zeigen, dass eine Querlüftung nur zu 6% durchgeführt wird. Da die meisten Fenster der Kita nur gekippt werden können, ist eine Lüftung über das zusätzliche Öffnen der Tür als guter Ansatz für eine mögliche Querlüftung zu sehen.

An der Befragung nahmen insgesamt 20 Frauen teil.

**Wie empfinden Sie die Raumtemperatur in den letzten 2 Wochen?**

- zu kalt (0%)
- eher kalt (20%)
- genau richtig (55%)
- eher warm (25%)
- zu warm (0%)

**Wie empfinden Sie die Raumluftqualität in den letzten 2 Wochen?**

- schlecht (5%)
- eher schlecht (40%)
- neutral (45%)
- eher gut (10%)
- gut (0%)

**Können Sie ein spürbares Verschlechtern der Raumluftqualität im Laufe eines Tages feststellen?**

- ja (35%)
- nein (35%)
- teils/teils (30%)

**Wurden die Fenster im Gruppenraum in den letzten zwei Wochen regelmäßig zum Lüften geöffnet?**

- ja, vormittags (0%)
- ja, nachmittags (5%)
- ja, beides (55%)
- nein, weder noch (40%)

**Wie wurden die Fenster beim Lüften geöffnet?**

- angekippt (60%)
- weit geöffnet (5%)
- beides (35%)

17

**8 | MÖGLICHE LÖSUNGANSÄTZE**

**Der Einsatz einer Lüftungssampel**

Eine Luftgütesampel kann auf einfache Weise die Luftqualität visuell darstellen und trägt so zur Sensibilisierung der Nutzer für ein regelmäßiges Lüften bei. Die Luftgütesampel bestimmt mit Hilfe eines Infrarot-Messsystems die Kohlendioxidkonzentration der Raumluft. Sie zeigt nach dem Ampelprinzip anhand kleiner Leuchtdioden die Luftgüte an und fordert die Personen im Raum somit zum Lüften auf. Piktogramme oder Plakate im Raum unterstützen das einfache Ablesen und machen auf eine veränderte Luftgüte, bzw. verbrauchte Luft im Klassenraum aufmerksam. Die Installation des Gerätes ist einfach – es wird im Klassen- oder Gruppenraum aufgestellt und in die Steckdose gesteckt.

CO <sub>2</sub> -Konzentration (ppm)	optisches Signal (LED)	Luftgüte
0 bis 1.500		gut
1.500 bis 2.500		mittelmäßig bis schlecht, Lüften empfohlen
über 2.500		sehr schlecht, unbedingt lüften!

Ein Lüften abhängig vom CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft schafft ein angenehmes und gesundes Raumklima und spart bei niedrigen Außentemperaturen gleichzeitig Energie.

Ein Lüften abhängig vom O<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft schafft ein angenehmes und gesundes Raumklima und spart bei niedrigen Außentemperaturen gleichzeitig Energie.<sup>1</sup>

Die Lüftungssampel kann für ca. 150,- € erworben werden.

<sup>1</sup> Quelle und Bildquelle: J. DITTRICH ELEKTROTECH, Berlin-Brandenburg, <http://www.optischesystem.de>, <http://www.luftgütesampel.de>

18

**Das angeleitete Lüften – die Lüftungspause**

Eine weitere Möglichkeit für einen ausreichenden Luftwechsel zu sorgen ist angeleitetes oder bewusste Lüften. Die Messergebnisse zeigen, dass eine Lüftung im Optimalfall regelmäßig und bereits nach der ersten Stunde am Morgen erfolgen sollte, da die CO<sub>2</sub>-Konzentration bereits nach dieser Zeit häufig den Grenzwert von 1.500 ppm überschreitet.

Das angeleitete oder bewusste Lüften setzt voraus, dass die Personen diszipliniert und konsequent handeln. Die Einführung regelmäßiger Lüftungspausen mittels eines Weckers oder einer Küchenuhr kann die Einhaltung eines Lüftungsrythmus erleichtern.

Eine zehnminütige Lüftungspause alle zwei Stunden verbessert nachweislich die Luftqualität und trägt damit zu einem „hygienisch einwandfreien“ Umfeld bei.

Die Betreuungszeit startet morgen um 7:30 Uhr. Eine erste Lüftungspause sollte daher spätestens um 9:00 Uhr bewusst durchgeführt werden. Die Fenster sollten für zehn Minuten gekippt werden. Zudem sollte die Tür nach Außen und die Flurtür weit geöffnet werden um eine kurzzeitige Querlüftung sicherzustellen. Können alle Fenster weit geöffnet werden, genügen auch fünf Minuten.

In den Sommermonaten sollten die Fenster auch über einen längeren Zeitraum gekippt geöffnet bleiben. Zusätzlich sollte aber auch im Sommer die Tür nach Außen und die Tür zum Flur hin in regelmäßigen Abständen geöffnet werden um eine gleichmäßige Querlüftung sicherzustellen.

**Viel Erfolg beim „richtigen“ Lüften in der Zukunft!**


**Kontakt**

Dipl.-Ing. Jennifer König  
Tel: 0531 / 391 3524  
Email: koenig@igs.bau.tu-bs.de

Institut für Gebäude- und Spartechnik | TU Braunschweig  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. N. Fisch  
Mühlenpfordtstraße 23, D - 38109 Braunschweig  
web: www.igs.bau.tu-bs.de  
Tel: 0531 / 391-3555 | Fax: 0531 / 391-6125

## Lüftungskonzepte in Schulen

Ein Leitfaden für Lehrkräfte



Dipl.-Ing. Jennifer König  
Institut für Gebäude- und Solartechnik  
TU Braunschweig

### 1) Vorwort

**Liebe Leserinnen und Leser,**

der Mensch hält sich bis zu 80% des Tages in geschlossenen Räumen auf. Kinder, Jugendliche und junge Erwachsene verbringen dabei bis zu einem Drittel des Tages in Schulen oder anderen Bildungseinrichtungen. Durch die Anpassung des Betreuungsangebotes an eine flexible Arbeitswelt wird sich die Aufenthaltszeit zukünftig sogar noch verlängern. Vor diesem Hintergrund gilt es attraktive Bildungsstätten für die Zukunft zu entwickeln.

Zu den wichtigsten Einflussfaktoren der Aufenthaltsqualität gehören die Luftqualität, die thermische Behaglichkeit und der Lautstärkepegel. Die Gesundheit und die Lern- und Lehrfähigkeit sind an ein qualitativ hochwertiges Umfeld gekoppelt. Eine erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration, eine hohe Raumlufttemperatur und laute Geräuschschallpegel schränken nachweislich das Wohlbefinden und somit die Leistungsfähigkeit ein.

Das Institut für Gebäude- und Solartechnik (IGS) der TU Braunschweig beschäftigt sich seit mehreren Jahren mit der Energieeffizienz von Gebäuden sowie der Entwicklung und Umsetzung von Energiekonzepten und deren Evaluierung in der baulichen Praxis. Es werden Projekte zur modellhaften Sanierung von Schulgebäuden und der Komfortsteigerung im späteren Betrieb erfolgreich umgesetzt. Langzeitmessungen zur CO<sub>2</sub>-Entwicklung, Innenraumtemperatur und Luftfeuchtigkeit in Klassenzimmern dienen bereits der Dokumentation vorhandener Verhältnisse und bieten eine Grundlage für die Planung und Umsetzung von Sanierungen.

Wir möchten Ihnen mit diesem Leitfaden Informationen geben, mit deren Hilfe Sie die Rahmenbedingungen und somit auch die pädagogische Arbeit in Ihrer Schule verbessern können und wünschen Ihnen viel Spaß und Erfolg bei der Umsetzung.

### 2) Luftqualität und Behaglichkeit

Es gibt in Deutschland mehr als 40.000 Schulgebäude unterschiedlicher Bauphasen, von denen viele sanierungsbedürftig sind. Im Zuge von Sanierungen wird in erster Linie eine Verbesserung des energetischen Standards angestrebt. Die raumklimatischen Bedingungen und die thermische Behaglichkeit finden häufig erst später Interesse, wenn die Nutzer über eine Verschlechterung der Innenraumluftqualität, Müdigkeit und Unaufmerksamkeit bei den Schülern und Lehrern klagen. Entgegen der Erwartung geht fast immer mit einer Verbesserung der Gebäudehülle eine Verschlechterung der Raumluftqualität einher, da die natürliche Infiltration durch die Gebäudehülle unterbunden wird.

Es ist bekannt, dass eine hohe CO<sub>2</sub>-Konzentration zur Ermüdung und zu Konzentrationschwäche der Lehr- und Lernenden führt. Aufgrund der hohen Perso-


nendeichte in Klassenräumen und des geringen Luftaustausches steigt der CO<sub>2</sub>-Gehalt in den Unterrichtsräumen schnell an und führt zu Müdigkeit, Konzentrationschwierigkeiten oder Kopfschmerzen bei den Schülern und Lehrkräften. Eine regelmäßig ausgeführte Fensterlüftung ist wesentlich für eine gute Luftqualität. Allerdings führt die notwendige Fensterlüftung gerade in den Wintermonaten zu einer Verschlechterung der thermischen Behaglichkeit, da es zu Zugerscheinungen und unbehaglichen Temperaturen im Klassenzimmer kommt. Es gilt also ein gesundes Mittelmaß zu finden.

### 3) CO<sub>2</sub> als Belastungsfaktor

Eine erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration und eine erhöhte Raumlufttemperatur schränken nachweislich das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit ein. Aufbauend auf der „Pettenkofer Zahl“ gilt heute nach DIN 1946 Teil 2 ein Richtwert für Innenräume von 1.500 ppm als Komfortgrenze. Eine Studie zum Thema Leistungsfähigkeit und Raumluftqualität zeigt, dass bei Überschreitung des Grenzwertes von 1500 ppm eine deutliche Ermüdung und ein eine Einschränkung der Aufmerksamkeit einsetzt.

**Ziele**

- ✓ Sensibilisierung der Schüler und Lehrkräfte zum Thema Raumluftqualität und thermische Behaglichkeit.
- ✓ Reduzierung der Wärmeverluste im Winter
- ✓ Reduzierung der Überhitzung der Räume im Sommer
- ✓ Verbesserung der Raumluftqualität
- ✓ Verbesserung der Lernbedingungen
- ✓ Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Lehrkräften und Schülern



### 4) Maßnahmen zur Verbesserung

**Mögliche technische Maßnahmen**

- ✓ Überprüfung der baulichen Gegebenheiten
- ✓ Breite der Öffnungsfügel/ Reinigen in den Raum
- ✓ Oberlichter offenbar
- ✓ Generelle Möglichkeiten zur Öffnung der Fenster
- ✓ (wie lassen sich die Fenster öffnen, gibt es Probleme wenn die Fenster ganz geöffnet werden)
- ✓ Überprüfung der Regelung der Heizung (Thermostatventile raumweise, zentral oder manuell regelbar)

- ✓ Auseinandersetzung mit der Lüftungs-/ Heizthematik

**Pädagogische Maßnahmen**

- ✓ Einführung von regelmäßigen Lüftungsdiensten (Lüftungspause)
- ✓ Durchführung von Unterrichtseinheiten oder Projekten (chemisch-physikalische Grundlagen, physiologische und psychologische Zusammenhänge; Literatur und Materialien s.u.)
- ✓ Einsatz der Luftgütemappe/ Lüftungsmappe

Zur Erreichung einer längerfristigen Verhaltensänderung ist eine Kombination technischer und pädagogischer Maßnahmen empfehlenswert!



### 5) Hinweise für die praktische Umsetzung

Die exemplarische Aufzeichnung eines Schultages in der dritten Klassenstufe einer Grundschule zeigt einen starken Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration über den Verlauf eines Schultages. Der Unterricht beginnt um 07:30h und endet um 13:00h. Die Überschreitung des Grenzwertes von 1500 ppm liegt bereits nach der ersten Unterrichtsstunde vor und bleibt über 1/3 des Schultages bestehen. Deutlich zu sehen ist, dass ein Abfall der CO<sub>2</sub>-Konzentration beim Öffnen der Fenster eintritt, allerdings sinkt der gemessene Wert trotz Lüftung nicht in den akzeptablen Bereich. Eine regelmäßige und konsequente Durchführung der Fensterlüftung ist daher zwingend erforderlich.

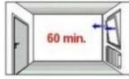
Tagesverlauf (Mittwoch, 22.04.09) April 2009



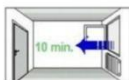
The graph shows two y-axes: Temperature (°C) on the left (ranging from -10 to 30) and CO<sub>2</sub> level (ppm) on the right (ranging from 0 to 3000). The x-axis represents time from 06:00 to 14:00. A red dashed line indicates the CO<sub>2</sub> limit at 1500 ppm. Multiple lines represent different sensors: Außen Temp, Raum Temp, Fenster 1+2, Fenster 3+4, Fenster 5+6, Fenster 7+8, Fenster 9+10, Fenster 11+12, and CO<sub>2</sub>. The CO<sub>2</sub> level starts at approximately 500 ppm at 07:30, rises to over 2000 ppm by 08:30, and remains high until 13:00. Temperature peaks at around 25°C during the lesson.

**6| Richtig lüften – aber wie?**

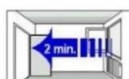
**Kippstellung:** Das häufig praktizierte dauerhafte Lüften über gekippte Fenster reicht nicht aus um die Qualität der Raumluft zu gewährleisten. Der Luftaustausch ist aufgrund der eingeschränkten Luftströmungsverhältnisse so gering, dass es 60 Minuten dauert um die Raumluft einmal komplett auszutauschen. Dies führt in der Heizperiode zu enormen Lüftungswärmeverlusten und zur Abkühlung des Raumes! Hinzu kommt eine mögliche Belastung durch dauerhaften Außenlärm.



**Stoßlüftung:** Beim Stoßlüften über weit geöffnete Fenster ist es möglich in 10 Minuten die Raumluft durch Frischluft zu ersetzen. Über das kurze Lüftungsintervall in Verbindung mit der thermischen Speichermasse der Wände, Böden und Möbel geht damit in der Heizperiode weniger Wärme verloren. Die gespeicherte Wärme wird wieder an den Raum abgegeben und trägt so zum schnellen Wiederaufwärmen der frischen Außenluft im Raum bei.




**Querlüftung:** Die Querlüftung über weit geöffnete Fenster und die zusätzliche geöffnete Zimmertür ist als effektivste Lüftungsart zu nennen. Sie kann genau wie die Stoßlüftung für die kurze Dauer von zwei Minuten vorgenommen werden um einen ausreichenden Luftaustausch sicherzustellen. Allerdings kann es dabei für die Schüler während des Unterrichts zu Zugerscheinungen am Sitzplatz kommen.



Bei allen drei Lüftungsarten wird die Behaglichkeit während der Heizperiode durch zeitweilige Auskühlungen des Raums und Zugerscheinungen am Sitzplatz beeinträchtigt. Umso wichtiger ist daher die zeitliche Beschränkung dieser Einschränkungen.

**8| Der Einsatz von Lüftungsmampeln**

Der Einsatz einer Luftgütemampel ist zur Sensibilisierung der Schüler auf das Thema und zur Überprüfung der realen Werte empfehlenswert. Sie dient dem Erfassen und Überprüfen von Regelmäßigkeiten (z.B. nach spätestens 25 Minuten sind die Werte immer zu hoch). Später können feste Lüftungszeiten das „Lüften nach Ampel“ ablösen. Da man das Gerät also nicht dauerhaft benötigt, ist nicht für jede Lerngruppe eines erforderlich (je nach Alter der Schüler und Anzahl der überprüften Unterrichtsstunden können bereits 1-2 Wochen genügen. Die



„Messungen“ sollten dann aber einmal in den Sommer- und einmal in den Wintermonaten durchgeführt und evaluiert werden).

CO <sub>2</sub> -Konzentration (ppm)	optisches Signal (LED)	Luftgüte
0 bis 1.500		gut
1.500 bis 2.500		mittelmäßig bis schlecht, Lüften empfohlen
über 2.500		sehr schlecht, unbedingt lüften!

Abbildung 1 Quelle: Luftgüte-Ampel (MF 435-20-Markt)

Die Luftgütemampel bestimmt mit Hilfe eines Infrarot-Messsystems die Kohlendioxidkonzentration der Raumluft. Sie zeigt nach dem Ampelprinzip anhand kleiner Leuchtdioden die Luftgüte an und fordert die Personen im Raum somit zum Lüften auf. Piktogramme oder Plakate im Klassenraum unterstützen das einfache Ablesen und machen auf eine veränderte Luftgüte, bzw. verbrauchte Luft im Klassenraum aufmerksam. Die Installation des Gerätes ist einfach – es wird im Klassenraum aufgestellt und in die Steckdose gesteckt.

Ein Lüften abhängig vom CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft schafft ein angenehmes und gesundes Raumklima und spart bei niedrigen Außentemperaturen gleichzeitig Energie.<sup>1</sup>

**7| Das angeleitete Lüften – die Lüftungspause**

Eine Lüftung über weit geöffnete Fenster muss optimaler Weise bereits während der Unterrichtszeit erfolgen, da die CO<sub>2</sub>-Konzentration bereits nach 25 Unterrichtsminuten den Grenzwert von 1500 ppm überschreitet. Wenn der Ermüdungszustand bei den Schülern bereits eintritt, steigt er schnell an. So wird bei einer Verdopplung der Arbeitszeit eine drei- bis vierfache Verlängerung der Pause notwendig um das ursprüngliche Leistungsniveau wieder herzustellen. Die Einführung regelmäßiger Lüftungsdienste kann die Einhaltung der notwendigen Lüftungspausen erleichtern. Eine zweiminütige Lüftungspause nach zwanzig Unterrichtsminuten verbessert nachweislich die Unterrichtsqualität.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> DITTRICH ELECTRONIC, Baden-Baden, <http://www.dittrich-systeme.de>  
<sup>2</sup> Forschung: G. Teuber, H.-G. Schmückler, F. Othmer: gesundheitshöherer Einfluss auf das Leistungsvermögen im schulischen Unterricht: Frische Luft für frisches Denken

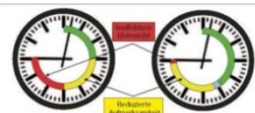


Abbildung 2 Quelle: „Frische Luft für frisches Denken“, IGS, Uni Bremen

**9| Sommerlicher Wärmeschutz**

Zum Schutz vor sommerlicher Überhitzung, sollten die Fenster im Klassenraum während des Unterrichts an heißen Sommertagen geschlossen bleiben. Eine zweiminütige Stoßlüftung oder Querlüftung ist das optimale Lüftungsverhalten, um eine Überhitzung der Räume zu verhindern. Zudem sollten die Lehrkräfte außen liegenden Sonnenschutz nach Unterrichtschluss herunterfahren und innen liegende Vorhänge zuziehen, um eine Überhitzung der Räume in den Nachmittagsstunden vorzubeugen.

In den Sommermonaten optimal ist die Durchführung der Nachtlüftung. Aufgrund der Einbruchgefahr wird eine Nachtlüftung nicht praktiziert. Als Lösung können alternative, einbruchsichere Lüftungsöffnungen mit Lamelleneinsatz in der Fassade genannt werden.

**10| Problembehandlung**

Häufig sind aus Sicherheitsgründen die Fenster abgeschlossen. Jede Lehrkraft wird mit einem Schlüssel ausgestattet und gelüftet wird während der Schulstunde, in Anwesenheit der Lehrkraft. Nach Unterrichtsende werden die Fenster geschlossen und von der Lehrkraft wieder abgeschlossen.

Die Schüler können während einer Lüftungspause mit einfachen Bewegungsübungen oder -spielen beschäftigt werden, so entsteht keine ungenutzte Kurzpause, in der Schüler auf „dumme“ Gedanken kommen.

Permanent gekippte Fenster werden häufig als ausreichende Lüftungsmethode gesehen, führen jedoch zu enormen Wärmeverlusten. Vorhandene Kippflügel sollten unbrauchbar gemacht werden und beim Neubau sollte auf den Einbau von Kippflügeln verzichtet und stattdessen nur Drehflügel verwendet werden.

Die Annahme, dass eine Querlüftung oder Stoßlüftung bei weit geöffneten Fenstern zu einem Temperaturabfall im Klassenzimmer führt, kann dahin gehend entkräftet werden, dass Wände, Fußböden und Möblierung ausreichend Speichermasse besitzen und die gespeicherte Wärme an den Raum abgeben und die frische Außenluft schnell erwärmen.

Das Vorurteil, dass eine Unterbrechung des Unterrichts für eine Lüftungspause stört, kann widerlegt werden, da sie bei regelmäßiger Umsetzung schnell zum

Schulalltag gehört. Die Schüler sind bis zum Unterrichtsende aufmerksamer und aufnahmefähiger.

**11| Weitere Literatur zu Luftqualität und Behaglichkeit**

Für die Umsetzung im Unterricht sind einige empfehlenswerte Materialien erhältlich. Wichtig sind sowohl die Vermittlung chemisch-physikalischer Grundlagen, physiologischer (Atmung und Kreislauf) und psychologischer (Aufmerksamkeit und Konzentration) Zusammenhänge.

1.) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Umwelt und Gesundheit. Materialien für Bildung und Information, Berlin 2008. Geeignet für die Sekundarstufe I. Der Baustein „Mir sinkt's“ Qualität der Innenraumlufthygiene“ enthält Arbeitsblätter mit gut verständlichen Texten, Bildern, Diagrammen und Arbeitsaufträgen sowie Infoblätter mit weiterführenden Internetquellen.

Verfügbar unter: <http://www.bmu.de/publikationen/bildungservice/bildungsmaterialien/bekundastufe/lehre/doc/35737.php>

2.) Unfalldiagnostik Hessen, Frische Luft für frisches Denken – Neue Unterrichtsqualität in unserem Klassenzimmer, Frankfurt am Main 2008. Umfangreiches Heft mit Sachinformationen für Lehrkräfte zur Umsetzung einer Lüftungspause während des Unterrichts – enthält methodische Hinweise.

Verfügbar unter: [http://schuleundgesundheit.hessen.de/fileadmin/content/Medien/Frische\\_Luft\\_UKH\\_HKM-2008-12-12.pdf](http://schuleundgesundheit.hessen.de/fileadmin/content/Medien/Frische_Luft_UKH_HKM-2008-12-12.pdf)

3.) Umweltschulen, Heiße Tipps für kalte Tage – Energie sparen beim Heizen. Arbeitsmaterial für die Klassenstufen 9 und 10. Die Seite enthält Arbeitsblätter und Arbeitsaufträge.

Verfügbar unter: <http://www.umweltschulen.de/energie/kalttage.html>

**Kontakt**

Dipl.-Ing. Jennifer König  
 Tel. 0531 / 301 3524  
 Email: koenig@igs-bau.tu-bs.de



Institut für Gebäude- und Solartechnik | TU Braunschweig  
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. N. Fisch  
 Mühlentopfbaustraße 23, D – 38106 Braunschweig  
 web: www.igs-bau.tu-bs.de  
 Tel. 0531 / 301-3555 | Fax: 0531 / 301-6125

## Der Einsatz von Lüftungsampeln in Schulen



DBU Promotionsprojekt  
Lüftungskonzepte in Bildungsstätten  
- Analyse und Optimierungsaltsätze

**[1] Vorwort**

Liebe Schülerinnen, liebe LehrerInnen,

die Universität Braunschweig betreut seit den Sommerferien 2009 ein Projekt zum Thema Luftqualität in Schulen. In ausgesuchten Klassenräumen beispielhafter Schulen wurde Messtechnik installiert, die die Luftqualität im Klassenzimmer aufzeichnet.

Das Projekt untersucht und dokumentiert die vorhandene Situation zum Thema Luftqualität, Behaglichkeit und Lüftungsverhalten. Die Analyse von Nutzerbefragungen und deren Bewertung bilden die Grundlage bei der Erarbeitung optimierter Lüftungskonzepte. Die Installation von so genannten Lüftungsampeln in den Klassenzimmern kann eine solche Sensibilisierung unterstützen und die Güte der Luftqualität auf einfache Weise verdeutlichen.



**[2] Warum Schulen?**

Der Mensch hält sich bis zu 80% des Tages in geschlossenen Räumen auf. Kinder, Jugendliche und junge Erwachsene verbringen dabei bis zu einem Drittel des Tages in Schulen oder anderen Bildungseinrichtungen. Durch die immer länger werdenden Unterrichtszeiten bis in den Nachmittag wird sich die Aufenthaltszeit zukünftig sogar noch verlängern. Vor diesem Hintergrund soll die Qualität für den Aufenthalt im Raum verbessert werden. Zu den wichtigsten Einflussfaktoren gehören dabei die Luftqualität und die thermische Behaglichkeit. Die Lern- und Lehrfähigkeit von Schülern und Lehrkräften ist also an eine qualitativ hochwertige Raumluft gekoppelt.

*Eine erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration schränkt nachweislich das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit ein.*

Das bestehende Lüftungsverhalten – am weitesten verbreitet ist die Lüftung über gekippte Fenster – führt zu großen Energieverlusten und bringt keinen ausreichenden Luftaustausch.


**[3] Was ist Luftgüte?**

Luftgüte ist ein Maß für die Qualität der Luft in Innenräumen. Eine Möglichkeit die Luftgüte zu messen ist über den Kohlendioxidgehalt in der Luft (CO<sub>2</sub>). Dieses farb- und geruchlose Gas wird vom Menschen ausgeatmet. Je älter der Mensch wird, desto größer ist das Lungenvolumen und somit wächst auch der CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Und auch bei körperlicher Aktivität ist der Ausstoß höher als bei sitzenden Tätigkeiten. Im Freien schwankt die Kohlendioxidkonzentration in der Luft zwischen 360 ppm (parts per million) auf

dem Land oder in der freien Natur und 700 ppm in großen Städten. Es gibt Richtwerte für Räume in denen Menschen sich lange aufhalten. Der empfohlene Höchstwert für Klassenzimmer beträgt 1.000 ppm CO<sub>2</sub>. In den Klassenzimmern steigt die CO<sub>2</sub>-Konzentration während einer Schulstunde sehr schnell an, je nachdem wie viele Schüler sich in dem Raum aufhalten und wie groß der Raum ist.

**[4] Wieso ist gute Luft so wichtig?**

Die Luftgüte beeinflusst das Wohlbefinden der Personen in einem Raum nachweislich. Leider merken wir erst wenn wir von draußen herein kommen wie schlecht und verbraucht die Luft schon ist. Kohlendioxid ist zwar erst ab einer Konzentration von 5 Volumenprozent (also 50.000 ppm) für Menschen giftig, verursacht jedoch schon bei wesentlich geringeren Konzentrationen ab 1.500 ppm Müdigkeit, Konzentrationschwäche und einen starken Leistungsabfall.



**[5] Wie lässt sich die Luftgüte im Raum verbessern?**

Die Antwort ist ganz einfach: Durch ausreichendes Lüften!

Das ist jedoch in der Praxis oft problematisch, denn jeder Mensch empfindet die Luftqualität im Raum anders. Diejenigen, die gerade einen voll besetzten Raum betreten, beurteilen die Luftqualität in der Regel viel schlechter, als diejenigen, die sich dort schon länger aufhalten. (Gewöhnungseffekt)

Im Winter sollen Energie eingespart werden und das Lüften steht dem Einsparen von Heizkosten gegenüber. Den meisten Menschen ist dabei nicht bewusst, dass sie für ein gutes Innenraumklima mehr lüften müssen als sie es tatsächlich tun.

**[6] Was heißt ausreichend Lüften?**

Die Fenster sollten abhängig vom Kohlendioxidgehalt der Raumluft geöffnet werden, damit die verbrauchte Raumluft gegen frische Außenluft ausgetauscht werden kann.

Die kalte Außenluft in den Wintermonaten erwärmt sich bei kurzen effektiven Lüftungspausen schnell und führt nicht so Auskühlungen der Räume. In den Räumen wird ein gleich bleibend gutes Raumklima erzielt, ohne dass unnötig Energie verschwendet wird.

In den Sommermonaten ist ein regelmäßiges Lüften über die Fenster einfacher und noch effektiver, da Fenster in Kippstellung oder über die ganze Unterrichtsstunde weit geöffnet lassen werden können, da die LehrerInnen zusammen mit den Schülern im Raum sind.


Da der Mensch Kohlendioxid mit seinen Sinnen nicht wahrnehmen kann, ist es sinnvoll ein Hilfsmittel in Form eines Messgerätes zu nutzen. Der Einsatz einfacher, aber wirksamer Technik schult die Sensibilität für die Luftqualität bei Schülern und Lehrkräften. Bei konsequenter Nutzung entfallen Diskussionen zum Thema „Fenster auf oder lieber zu“.

**[7] Der Einsatz von Lüftungsampeln**

Die Luftgüteampel bestimmt die Kohlendioxidkonzentration der Raumluft. Sie zeigt nach dem Ampelprinzip anhand kleiner Leuchtdioden die Luftgüte an und fordert die Personen im Raum somit zum Lüften auf. Piktogramme oder Plakate im Klassenraum unterstützen das einfache Ablesen und machen auf eine veränderte Luftgüte, bzw. verbrauchte Luft im Klassenraum aufmerksam. Die Installation des Gerätes ist einfach – es wird im Klassenraum aufgestellt und in die Steckdose gesteckt.

Ein Lüften abhängig vom CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft schafft ein angenehmes und gesundes Raumklima und spart bei niedrigen Außentemperaturen gleichzeitig Energie.

Die Einrichtung eines Lüftungsdienstes in der Klasse kann die Nutzung der Lüftungsampel zusätzlich unterstützen.



**[8] Funktionsweise der Luftgüteampel**

CO <sub>2</sub> -Konzentration (ppm)	optisches Signal	Luftgüte
0 bis 1.500		gut
1.500 bis 2.500		mittelmäßig bis schlecht, Lüften empfohlen
über 2.500		sehr schlecht, unbedingt lüften!

**Viel Spaß beim richtigen Lüften!**

**Leitfaden zur Nutzung von Lüftungsampeln**



## Anhang 13 Durchführung der Leistungstests

(Zahlenreihen vorab an die Tafel kleben)

**Guten Morgen liebe Schüler,  
wir machen heute einen kleinen Test mit Euch um herauszufinden wie gut Ihr  
Euch konzentrieren könnt. Wir machen ja schon länger Messungen zur  
Luftqualität hier in Eurer Klasse und jetzt wollen wir schauen ob Euch die  
Luftgüte beeinflusst.**

**Wir machen den Test einmal jetzt bevor der Unterricht los geht und einmal kurz  
bevor der Unterricht heute zu Ende ist.**

**Dazu bekommt jeder von Euch jetzt ein Blatt, auf dem Ihr Kästchenreihen seht.  
Dieses Blatt dürft Ihr bitte erst umdrehen, wenn ich es Euch sage.  
Jetzt bleibt er erst einmal so liegen.**

(Blätter austeilen)

**Tragt bitte erstmal Euren Vor- und Nachnamen und Eure Klasse ein.  
Schaut Euch zuerst die obere Reihe im Beispiel an.  
Beachtet, dass hier die oberen Kästchen eine Zahl haben und die unteren ein  
Zeichen.  
Zum Beispiel gehört zu der 1 eine Querlinie mit einem Punkt darüber, zu 2 ein  
Bogen der sich nach rechts wölbt und zur 3 ein Pluszeichen.**

(an der Tafel anzeigen)

**Nun seht auf die untere Reihe in der die Kästchen für die Zeichen noch leer sind.  
Dort sollt Ihr der Reihe nach die Zeichen zuordnen und einsetzen die oben  
abgebildet**

(an der Tafel vormachen)

	1	4	3	2	1	1	3	3	

**Dabei ist es wichtig, dass Ihr die Kästchen nacheinander der Reihe nach ausfüllt.**

**Wenn ich es Euch jetzt gleich „STARTEN“ sage, dann dreht Ihr die Blätter um und  
dann habt Ihr eine Minute Zeit zum Ausfüllen.  
Und wenn ich „STOP“ sage, dann bitte sofort die Stifte weg legen und aufhören,  
denn sonst funktioniert der Test nicht.**

(Zeit stoppen und LOS)

(Danach Zettel einsammeln.)

**FORSCHUNGSPROJEKT:**  
**Lüftungskonzepte in Bildungsstätten**



Test Nr. 1, 13.01.2011, Raum C209

Vorname	Nachname	Klasse

**BEISPIEL**

1	2	3	4	5	6	7	8	9
÷	)	+	┌	└	√	(	•	→

Test Nr. 1, 13.01.2011, Raum C209

1	2	3	4	5	6	7	8	9
÷	)	+	┌	└	√	(	•	→

2	1	4	6	3	5	2	1	3	4	2	1	3	1	2	3	1	4	2	6	3	1	2	5	1

3	1	5	4	2	7	4	6	9	2	5	8	4	7	6	1	8	7	5	4	8	6	9	4	3

1	8	2	9	7	6	2	5	4	7	3	6	8	5	9	4	1	6	8	9	3	7	5	1	4

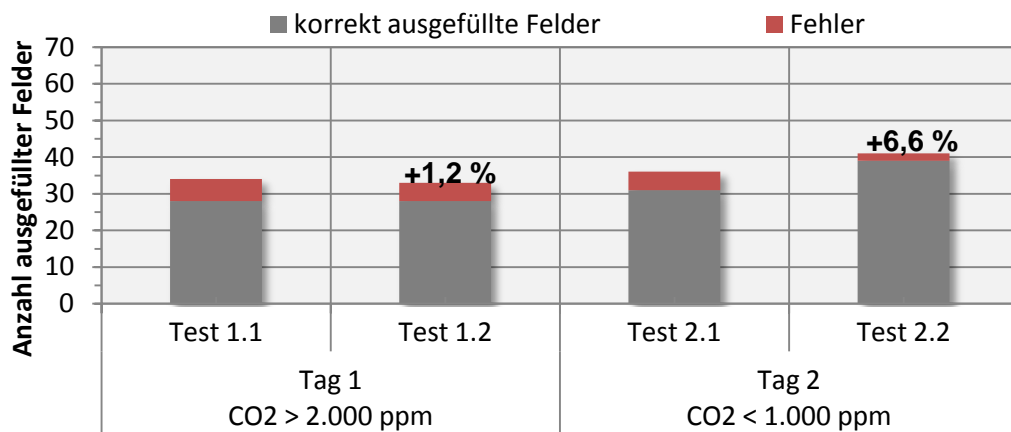
GZ	F		

*Leistungstest, Zahlen-Symbol-Zuordnungstests*

### Anhang 14 Auswertung der Leistungstests

Raum C209 <span style="background-color: #90EE90; padding: 2px;">7,8%</span>												
Masse 7a		Tag 1 Test 1				Tag 1 Test 2				Differenz		
Name	weiblich	männlich	Ausgerollt	Fehler	Ausgerollt	Fehler			Insgesamt			
1 Schüler 1		1	30	0	30	40,0%	31	1	30	41,3%	0	1,3%
2 Schüler 2	1		40	0	40	53,3%	42	0	42	56,0%	2	2,7%
3 Schüler 3	1		32	0	32	42,7%	31	0	31	41,3%	-1	-1,3%
4 Schüler 4	1		37	0	37	49,3%	37	0	37	49,3%	0	0,0%
5 Schüler 5	1		28	1	27	37,3%	26	0	26	34,7%	-2	-2,7%
6 Schüler 6	1		24	0	24	32,0%	25	0	25	33,3%	1	1,3%
7 Schüler 7	1		18	1	17	24,0%	20	0	20	26,7%	2	2,7%
8 Schüler 8	1		36	1	35	48,0%	29	0	29	38,7%	-7	-9,3%
9 Schüler 9	1		40	0	40	53,3%	32	0	32	42,7%	-8	-10,7%
10 Schüler 10	1		54	1	53	72,0%	50	0	50	66,7%	-4	-5,3%
11 Schüler 11	1		37	0	37	49,3%	34	0	34	45,3%	-3	-4,0%
12 Schüler 12	1		35	0	35	46,7%	32	0	32	42,7%	-3	-4,0%
13 Schüler 13	1		39	1	38	52,0%	38	1	37	50,7%	-1	-1,3%
14 Schüler 14	1		36	0	36	48,0%	27	1	26	36,0%	-9	-12,0%
15 Schüler 15	1		37	0	37	49,3%	44	0	44	58,7%	7	9,3%
16 Schüler 16	1		39	0	39	52,0%	42	0	42	56,0%	3	4,0%
17 Schüler 17	1		9	0	9	12,0%	25	0	25	33,3%	16	21,3%
18 Schüler 18	1		38	0	38	50,7%	28	0	28	37,3%	-10	-13,3%
19 Schüler 19	1		30	0	30	40,0%	31	0	31	41,3%	1	1,3%
20 Schüler 20	1		37	0	37	49,3%	30	0	30	40,0%	-7	-9,3%
<b>Zusammen</b>			<b>34</b>		<b>45,7%</b>	<b>33</b>		<b>43,6%</b>		<b>-0,8%</b>		
weiblich	10		34		44,9%	33		44,1%		-0,8%		
männlich		10	34		45,2%	32		43,1%		-2,1%		1,3%
					-0,3%			1,1%				
<b>29% ohne Wertung</b>												
1 Schüler 21	1											
2 Schüler 22	1											
3 Schüler 23		1										
4 Schüler 24	1											
5 Schüler 25	1											
6 Schüler 26	1											
7 Schüler 27	1											
8 Schüler 28		1	35	0	35	46,7%	35	0	35	46,7%	0	0,0%
9 Schüler 29		1										
36	1	35	48,0%	40	0	40	53,3%	4	5,3%			
54	0	54	72,0%	44	0	44	58,7%	-10	-13,3%			
43	2	41	57,3%	65	0	65	86,7%	22	29,3%			
35	0	35	46,7%	38	0	38	50,7%	3	4,0%			
39	1	38	52,0%	47	0	47	62,7%	8	10,7%			
42	1	41	56,0%	44	1	43	58,7%	2	2,7%			
35	0	35	46,7%	45	0	45	60,0%	10	13,3%			

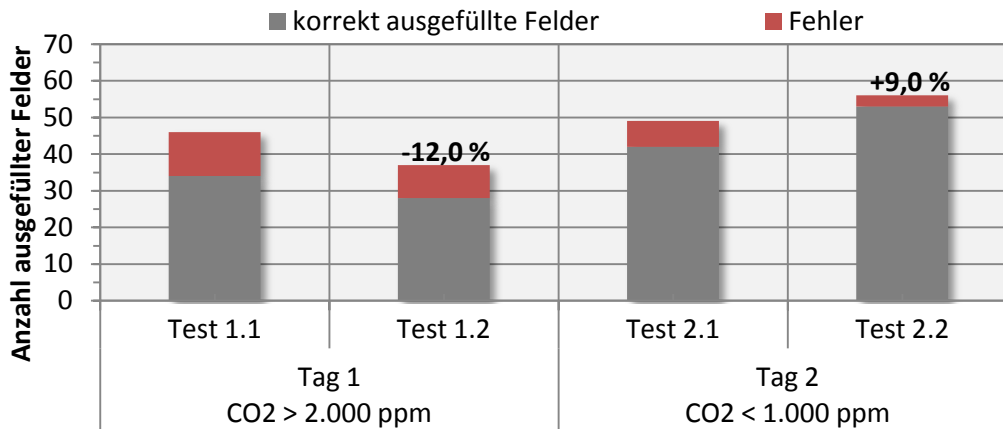
Auswertungsmatrix zu den Leistungstests – SZ FL Raum 209



Auswertung zu den Leistungstests – SZ FL Raum 209

Raum C210												
Klasse Bd		33,0%										
Name	weiblich	männlich	Tag 1 Test 1				Tag 1 Test 2				Differenz	
			Ausgefüllt	Fehler			Ausgefüllt	Fehler			Insgesamt	
1 Schüler 1		1	54	1	53	72,0%	34	0	34	45,3%	-19	-26,7%
2 Schüler 2	1		54	1	53	72,0%	40	0	40	53,3%	-14	-18,7%
3 Schüler 3	1		44	0	44	58,7%	28	0	28	37,3%	-16	-21,3%
4 Schüler 4	1		60	0	60	80,0%	35	0	35	46,7%	-25	-33,3%
5 Schüler 5	1		59	1	58	78,7%	32	0	32	42,7%	-27	-36,0%
6 Schüler 6	1		50	0	50	66,7%	37	0	37	49,3%	-13	-17,3%
7 Schüler 7	1		62	0	62	82,7%	38	7	32	52,0%	-23	-30,7%
8 Schüler 8	1		50	2	48	66,7%	45	0	45	60,0%	-5	-6,7%
9 Schüler 9	1		61	0	61	81,3%	42	0	42	56,0%	-19	-25,3%
10 Schüler 10	1		44	0	44	58,7%	29	0	29	38,7%	-15	-20,0%
11 Schüler 11	1		52	0	52	69,3%	34	0	34	45,3%	-18	-24,0%
12 Schüler 12	1		54	1	53	72,0%	42	0	42	56,0%	-12	-16,0%
13 Schüler 13	1		52	1	51	69,3%	33	2	31	44,0%	-19	-25,3%
14 Schüler 14	1		68	0	68	90,7%	44	0	44	58,7%	-24	-32,0%
15 Schüler 15	1		50	0	50	66,7%	35	0	35	46,7%	-15	-20,0%
16 Schüler 16	1		61	1	60	81,3%	50	0	50	66,7%	-11	-14,7%
17 Schüler 17	1		48	0	48	64,0%	37	0	37	49,3%	-11	-14,7%
18 Schüler 18	1		58	1	57	77,3%	34	0	34	45,3%	-24	-32,0%
19 alle			55			72,7%	37			49,6%	-23,9%	
weiblich	11		54			72,5%	39			51,5%	-22,1%	
männlich		7	55			73,0%	35			46,7%	-23,6%	
						-0,5%				4,8%	1,5%	
33% ohne Wertung:												
1 Schüler 19		1										
2 Schüler 20		1										
3 Schüler 21		1										
4 Schüler 22		1										
5 Schüler 23		1										
6 Schüler 24		1										
7 Schüler 25		1										
8 Schüler 26		1										
9 Schüler 27		1	67	0	67	89,3%	41	1	40	54,7%	-26	-34,7%
39	0	39	52,0%	50	1	49	66,7%	11	14,7%			
47	2	45	62,7%	54	0	54	72,0%	7	9,3%			
41	1	40	54,7%	45	0	45	60,0%	4	5,3%			
36	1	35	48,0%	51	1	50	68,0%	15	20,0%			
34	1	33	45,3%	42	0	42	56,0%	8	10,7%			
18	0	18	24,0%	35	1	38	52,0%	21	28,0%			

Auswertungsmatrix zu den Leistungstests – SZ FL Raum 210



Auswertung zu den Leistungstests – SZ FL Raum 210

Raum C211 <span style="background-color: #90EE90;">-0,1%</span>												
Klasse 8c		Tag 1 Test 1				Tag 1 Test 2				Differenz		
Name	weiblich	weiblich	ausgefüllt	Fehler	ausgefüllt	Fehler	ausgefüllt	Fehler	ausgefüllt	Fehler	insgesamt	
1 Schüler 1		1	35	0	35	46,7%	37	0	37	49,3%	2	2,7%
2 Schüler 2		1	25	0	25	33,3%	25	0	25	33,3%	0	0,0%
3 Schüler 3		1	29	0	29	37,3%	37	1	36	46,3%	9	12,0%
4 Schüler 4		1	29	0	29	38,7%	35	0	35	46,7%	6	8,0%
5 Schüler 5		1	25	0	25	33,3%	32	0	32	42,7%	7	9,3%
6 Schüler 6		1	34	1	33	45,3%	34	1	33	45,3%	0	0,0%
7 Schüler 7		1	33	0	33	44,0%	41	2	39	54,7%	8	10,7%
8 Schüler 8		1	32	0	32	42,7%	32	2	30	42,7%	0	0,0%
9 Schüler 9		1	28	0	28	37,3%	25	1	24	33,3%	-3	-4,0%
10 Schüler 10		1	38	2	36	50,7%	26	2	24	34,7%	-12	-16,0%
11 Schüler 11		1	27	0	27	36,0%	38	0	38	50,7%	11	14,7%
11 alle			30		30	40,5%	33		33	43,9%	3	3,4%
weiblich	3		31		31	41,3%	30		30	39,6%	2	-1,8%
mannlich	8		30		30	40,2%	34		34	45,5%	4	5,3%
						1,2%				-5,9%		-7,1%

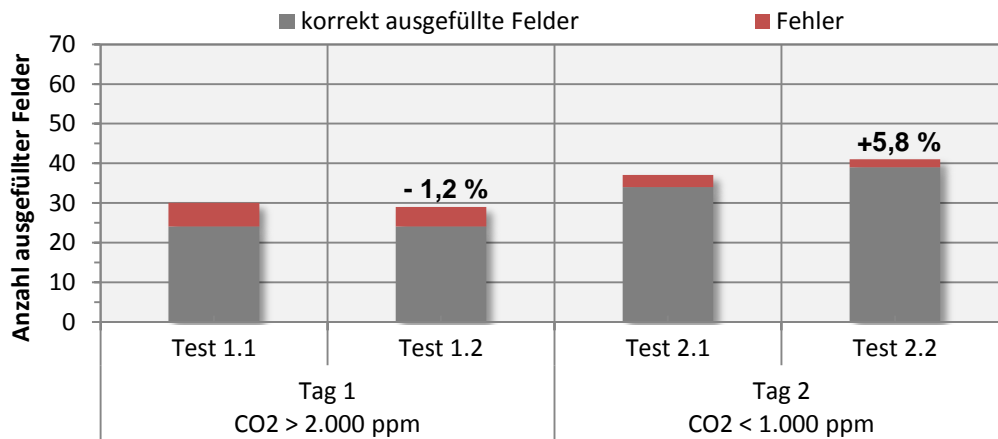
  

Tag 2 Test 1		Tag 2 Test 2		Differenz					
ausgefüllt	Fehler	ausgefüllt	Fehler	ausgefüllt	Fehler				
36	0	36	48,0%	41	0	41	54,7%	5	6,7%
33	0	33	44,0%	36	0	36	48,0%	3	4,0%
43	0	43	57,3%	50	1	49	66,7%	7	9,3%
30	0	30	40,0%	30	0	30	40,0%	0	0,0%
33	0	33	44,0%	40	0	40	53,3%	7	9,3%
34	0	34	45,3%	38	0	38	50,7%	4	5,3%
38	1	37	50,7%	43	0	43	57,3%	5	6,7%
36	1	35	48,0%	40	0	40	53,3%	4	5,3%
36	0	36	48,0%	29	0	29	38,7%	-7	-9,3%
50	1	49	66,7%	45	1	44	60,0%	-5	-6,7%
34	0	34	45,3%	38	0	38	50,7%	4	5,3%
37		37	48,8%	39		39	52,1%	2	3,3%
39		39	53,3%	38		38	49,8%	-1	-1,3%
35		35	47,2%	40		40	53,0%	5	5,8%
			6,2%				-3,2%		-4,4%

59% ohne Wertung												
Name	weiblich	weiblich	ausgefüllt	Fehler	ausgefüllt	Fehler	ausgefüllt	Fehler	ausgefüllt	Fehler	insgesamt	
1 Schüler 12		1										
2 Schüler 13		1										
3 Schüler 14		1										
4 Schüler 15		1										
5 Schüler 16		1										
6 Schüler 17		1										
7 Schüler 18		1										
8 Schüler 19		1										
9 Schüler 20		1	39	0	39	52,0%	28	0	28	37,3%	-11	-14,7%
10 Schüler 21		1	43	0	43	57,3%	44	0	44	58,7%	1	1,3%
11 Schüler 22		1	37	0	37	49,3%	40	0	40	53,3%	3	4,0%
12 Schüler 23		1	37	1	36	48,3%	35	0	35	46,7%	-2	-2,7%
13 Schüler 24		1	21	0	21	28,0%	30	0	30	40,0%	9	12,0%
14 Schüler 25		1	31	1	30	41,3%	37	1	36	48,3%	6	8,0%
15 Schüler 26		1	37	0	37	49,3%	43	1	42	57,3%	6	8,0%
16 Schüler 27		1	36	0	36	48,0%	35	1	34	46,7%	-1	-1,3%
31	0	31	41,3%									
41	1	40	54,7%									
48	0	48	64,0%									
37	1	36	48,3%									
47	1	46	62,7%									
46	0	46	61,3%									
47	0	47	62,7%									
17	2	15	22,7%									
42	1	41	56,0%									
48	1	47	64,0%									
41	0	41	54,7%									
38	0	38	50,7%									
43	0	43	57,3%									
38	1	37	50,7%									
47	1	46	62,7%									
39	0	39	52,0%									

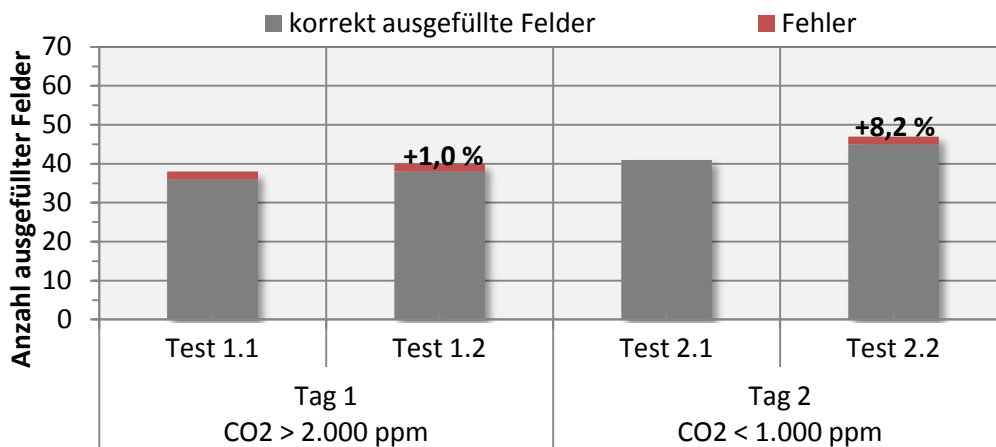
Auswertungsmatrix zu den Leistungstests – SZ FL Raum 211



Auswertung zu den Leistungstests – SZ FL Raum 211

Raum C311												3,4%															
Klasse 9d	Name	weiblich	männlich	Tag 1 Test 1				Tag 1 Test 2				Differenz				Tag 2 Test 1				Tag 2 Test 2				Differenz			
				Ausgefüllt	Fehler			Ausgefüllt	Fehler			Insgesamt					Ausgefüllt	Fehler			Ausgefüllt	Fehler			Insgesamt		
1	Schüler 1		1	42	0	42	56,0%	38	1	37	50,7%	-5	-5,3%	43	0	43	57,3%	50	0	50	66,7%	7	9,3%				
2	Schüler 2	1		36	1	35	48,0%	38	1	37	50,7%	2	2,7%	37	1	36	49,3%	42	0	42	56,0%	5	6,7%				
3	Schüler 3	1		41	0	41	54,7%	41	0	41	54,7%	0	0,0%	38	0	38	50,7%	51	2	49	68,0%	13	17,3%				
4	Schüler 4	1		27	0	27	36,0%	31	1	30	41,3%	4	5,3%	37	1	36	49,3%	35	0	35	46,7%	-2	-2,7%				
5	Schüler 5	1		23	0	23	30,7%	22	0	22	29,3%	-1	-1,3%	25	1	24	33,3%	34	0	34	45,3%	9	12,0%				
6	Schüler 6	1		34	1	33	45,3%	41	1	40	54,7%	7	9,3%	38	0	38	50,7%	46	0	46	61,3%	8	10,7%				
7	Schüler 7	1		42	0	42	56,0%	43	0	43	57,3%	1	1,3%	44	0	44	58,7%	50	0	50	66,7%	6	8,0%				
8	Schüler 8	1		32	0	32	42,7%	29	0	29	38,7%	-3	-4,0%	31	0	31	41,3%	40	0	40	53,3%	9	12,0%				
9	Schüler 9	1		42	0	42	56,0%	41	3	38	54,7%	-1	-1,3%	52	0	52	69,3%	57	0	57	76,0%	5	6,7%				
10	Schüler 10	1		18	1	17	24,0%	25	0	25	33,3%	7	9,3%	33	0	33	44,0%	35	1	34	46,7%	2	2,7%				
11	Schüler 11	1		38	0	38	50,7%	44	0	44	58,7%	6	8,0%	50	1	49	66,7%	55	0	55	73,3%	5	6,7%				
12	Schüler 12	1		39	0	39	52,0%	46	0	46	61,3%	7	9,3%	48	0	48	64,0%	54	0	54	72,0%	6	8,0%				
13	Schüler 13	1		36	0	36	48,0%	44	0	44	58,7%	8	10,7%	46	0	46	61,3%	51	0	51	68,0%	5	6,7%				
14	Schüler 14	1		37	0	37	49,3%	37	0	37	49,3%	0	0,0%	43	0	43	57,3%	45	0	45	60,0%	2	2,7%				
15	Schüler 15	1		41	1	40	54,7%	44	0	44	58,7%	3	4,0%	51	0	51	68,0%	51	1	50	68,0%	0	0,0%				
16	Schüler 16	1		45	0	45	60,0%	46	1	45	61,3%	1	1,3%	50	0	50	66,7%	46	0	46	61,3%	-4	-5,3%				
17	Schüler 17	1		35	0	35	46,7%	33	0	33	44,0%	-2	-2,7%	43	0	43	57,3%	47	0	47	62,7%	4	5,3%				
18	Schüler 18	1		45	1	44	60,0%	43	2	41	57,3%	-2	-2,7%	47	0	47	62,7%	50	1	49	66,7%	3	4,0%				
19	Schüler 19	1		29	0	29	38,7%	31	3	28	41,3%	2	2,7%	34	0	34	45,3%	42	0	42	56,0%	8	10,7%				
20	Schüler 20	1		31	0	31	41,3%	27	0	27	36,0%	-4	-5,3%	30	0	30	40,0%	37	0	37	49,3%	7	9,3%				
21	Schüler 21	1		32	0	32	42,7%	38	1	37	50,7%	6	8,0%	38	0	38	50,7%	45	2	43	60,0%	7	9,3%				
22	Schüler 22	1		25	0	25	33,3%	38	0	38	50,7%	13	17,3%	40	1	39	53,3%	46	1	45	61,3%	6	8,0%				
23	Schüler 23	1		36	0	36	48,0%	42	0	42	56,0%	8	10,7%	48	1	47	64,0%	51	0	51	68,0%	3	4,0%				
24	Schüler 24	1		34	0	34	45,3%	42	0	42	56,0%	8	10,7%	50	0	50	66,7%	50	0	50	66,7%	0	0,0%				
25	Schüler 25	1		43	0	43	57,3%	38	2	36	50,7%	-5	-6,7%	47	1	46	62,7%	57	0	57	76,0%	10	13,3%				
26	Schüler 26	1		25	2	23	33,3%	43	1	42	57,3%	18	24,0%	40	0	40	53,3%	45	0	45	60,0%	5	6,7%				
27	Schüler 27	1		46	1	45	61,3%	46	0	46	61,3%	0	0,0%	36	0	36	48,0%	55	1	54	73,3%	19	25,3%				
27 alle				35		47,1%	38		51,0%	3	3,9%	41		55,3%	47		62,6%	7,2%									
weiblich		19		36		47,5%	39		52,6%	4	5,1%	43		58,0%	48		63,5%	5,5%									
männlich		8		35		46,2%	35		47,2%	1	1,0%	37		48,8%	44		61,5%	9,2%									
						1,3%			5,5%		4,1%			9,1%			2,0%	-2,6%									
7% ohne Wertung:																											
1 Schüler 28		1												30	0	30	40,0%	0	1	-1	0,0%	-30	-40,0%				
2 Schüler 29		1																									

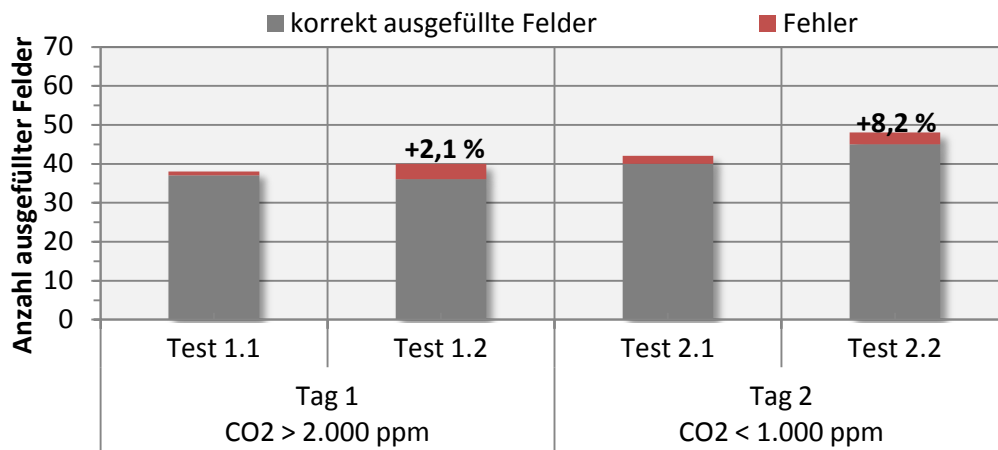
Auswertungsmatrix zu den Leistungstests – SZ FL Raum 311



Auswertung zu den Leistungstests – SZ FL Raum 311

Raum C313												1,4%													
Klasse 9c		Tag 1 Test 1				Tag 1 Test 2				Differenz				Tag 2 Test 1				Tag 2 Test 2				Differenz			
Name	weiblich	mannlich	Ausgefüllt	Fehler	Ausgefüllt	Fehler			Insgesamt	Ausgefüllt	Fehler			Ausgefüllt	Fehler			Insgesamt	Ausgefüllt	Fehler					
1 Schüler 1		1	37	0	37	49,3%			41	0	41	54,7%	4	5,3%	45	0	45	60,0%	47	1	46	62,7%	1	2,7%	
2 Schüler 2		1	32	0	32	42,7%			35	1	34	46,7%	3	4,0%	34	1	33	45,3%	39	1	38	52,0%	5	6,7%	
3 Schüler 3		1	37	0	37	49,3%			34	2	32	45,3%	-3	-4,0%	36	0	36	48,0%	36	0	36	48,0%	0	0,0%	
4 Schüler 4		1	27	0	27	36,0%			28	0	28	37,3%	1	1,3%	29	0	29	38,7%	31	0	31	41,3%	2	2,7%	
5 Schüler 5		1	31	0	31	41,3%			33	0	33	44,0%	2	2,7%	37	0	37	49,3%	45	0	45	60,0%	8	10,7%	
6 Schüler 6		1	25	0	25	33,3%			25	0	25	33,3%	0	0,0%	30	0	30	40,0%	37	0	37	49,3%	7	9,3%	
7 Schüler 7		1	33	0	33	44,0%			35	0	35	46,7%	2	2,7%	33	0	33	44,0%	39	0	38	50,7%	5	6,7%	
8 Schüler 8		1	21	0	21	28,0%			30	0	30	40,0%	9	12,0%	33	0	33	44,0%	43	1	42	57,3%	10	13,3%	
9 Schüler 9		1	22	0	22	29,3%			31	1	30	41,3%	9	12,0%	33	1	32	44,0%	39	0	39	52,0%	6	8,0%	
10 Schüler 10		1	42	0	42	56,0%			45	1	44	60,0%	3	4,0%	45	0	45	60,0%	47	0	47	62,7%	2	2,7%	
11 Schüler 11		1	36	0	36	48,0%			33	1	32	46,0%	-3	-4,0%	49	2	47	65,3%	56	0	56	74,7%	7	9,3%	
12 Schüler 12		1	35	1	34	46,7%			43	0	43	57,3%	8	10,7%	48	0	48	64,0%	53	0	53	70,7%	5	6,7%	
13 Schüler 13		1	40	2	38	53,3%			44	1	43	58,7%	4	5,3%	43	1	42	57,3%	51	1	50	68,0%	8	10,7%	
14 Schüler 14		1	39	1	37	50,7%			43	0	43	57,3%	5	6,7%	41	0	41	54,7%	46	0	46	60,0%	4	5,3%	
15 Schüler 15		1	36	1	35	48,0%			39	0	39	52,0%	3	4,0%	41	0	41	54,7%	46	0	46	61,3%	5	6,7%	
17 Schüler 16		1	34	0	34	45,3%			41	0	41	54,7%	7	9,3%	40	0	40	53,3%	43	0	43	57,3%	3	4,0%	
18 Schüler 17		1	39	0	39	52,0%			42	0	42	56,0%	3	4,0%	44	0	44	58,7%	48	2	46	64,0%	4	5,3%	
19 Schüler 18		1	34	0	34	45,3%			43	0	43	57,3%	9	12,0%	42	0	42	56,0%	46	1	45	61,3%	4	5,3%	
20 Schüler 19		1	39	0	39	52,0%			46	0	46	61,3%	7	9,3%	50	0	50	66,7%	55	0	55	73,3%	5	6,7%	
21 Schüler 20		1	41	0	41	54,7%			53	0	53	70,7%	12	16,0%	50	0	50	66,7%	60	0	60	80,0%	10	13,3%	
22 Schüler 21		1	38	1	37	50,7%			46	3	43	61,3%	8	10,7%	50	1	49	66,7%	57	0	57	76,0%	7	9,3%	
23 Schüler 22		1	41	0	41	54,7%			42	2	40	56,0%	1	1,3%	43	1	42	57,3%	46	0	46	61,3%	3	4,0%	
24 Schüler 23		1	45	0	45	60,0%			46	0	46	61,3%	1	1,3%	42	0	42	56,0%	52	1	51	69,3%	10	13,3%	
25 Schüler 24		1	45	0	45	60,0%			43	0	43	57,3%	-2	-2,7%	43	0	43	57,3%	53	0	53	70,7%	10	13,3%	
26 Schüler 25		1	44	0	44	58,7%			48	0	48	64,0%	4	5,3%	48	0	48	64,0%	50	0	50	66,7%	2	2,7%	
27 Schüler 26		1	41	0	41	54,7%			45	1	44	60,0%	2	3,0%	49	2	47	65,3%	55	2	53	73,3%	6	8,0%	
28 Schüler 27		1	40	1	39	53,3%			55	0	55	75,3%	15	20,0%	51	0	51	68,0%	62	0	62	82,7%	11	14,7%	
29 Schüler 28		1	39	0	39	48,0%			40	0	40	53,3%	4	5,3%	43	0	43	57,3%	42	0	42	56,0%	1	1,3%	
<b>28 alle</b>			<b>39</b>		<b>48,0%</b>	<b>40</b>		<b>53,8%</b>	<b>4</b>	<b>5,7%</b>	<b>42</b>		<b>55,8%</b>	<b>47</b>		<b>63,0%</b>	<b>7,1%</b>	<b>45</b>		<b>59,7%</b>	<b>50</b>		<b>67,6%</b>	<b>7,4%</b>	
weiblich	15		38		51,1%	43		57,9%	5	6,8%	35		46,2%	40		57,6%	6,5%	42		55,8%	40		57,6%	6,5%	
mannlich		13	30		40,5%	33		43,5%	2	3,0%	45		59,7%	50		68,0%	9,9%	43		57,3%	42		56,0%	6,5%	
					10,6%			14,4%		3,8%			13,5%			9,9%	0,9%							0,9%	
<b>15% ohne Wertung:</b>																									
1 Schüler 29		1													28	0	28	37,3%	28	0	28	37,3%		0	0,0%
2 Schüler 30		1													50	0	50	66,7%	59	0	59	78,7%	9	12,0%	
3 Schüler 31		1													34	0	34	45,3%	39	1	38	52,0%	5	6,7%	
4 Schüler 32		1																							
5 Schüler 33		1	40	0	40	53,3%			42	0	42	56,0%	2	2,7%											

Auswertungsmatrix zu den Leistungstests – SZ FL Raum 313



Auswertung zu den Leistungstests – SZ FL Raum 313

## Anhang 15 Projektflyer und -faltblätter

	<p><b>Projekt</b> „Lüftungskonzepte in Bildungsstätten - Analyse und Optimierungsansätze“</p> <p><b>Laufzeit</b> 36 Monate (August 2008 – Juli 2011)</p> <p><b>Betreuung</b> Dipl. Ing. Jennifer König Tel: 0531/ 391-3524 e-mail: koenig@igs.bau.tu-bs.de</p> <p><b>Partner</b> Institut für Gebäude und Solartechnik – IGS TU Braunschweig Univ. Prof. Dr.-Ing. M. N. Fisch Mühlenpfordtstraße 23, D - 38106 Braunschweig web: www.igs.bau.tu-bs.de Tel: 0531 / 391-3555 Fax: 0531/ 391-8125 E-mail: igs@tu-bs.de</p> <p><b>Förderung</b> DBU – Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück</p> 	<p><b>Lüftungskonzepte in Bildungsstätten</b> Analyse und Optimierungsansätze</p> 	
<p><b>Tagesbedarf des Menschen</b></p> <p>1 kg Nahrung    2 l Wasser    15 kg Luft</p>  <p><b>Ausgangssituation</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>⇨ Luftqualität und thermische Behaglichkeit als Einflussfaktoren für die Lern- und Lehrfähigkeit von Schülern, Studenten und Lehrkräften</li> <li>⇨ Einschränkung des Wohlbefindens und der Leistungsfähigkeit durch erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration und Raumlufttemperaturen</li> <li>⇨ Hohe Lüftungsverluste durch falsches Lüftungsverhalten</li> <li>⇨ Kein ausreichender Raumluftaustausch vorhanden</li> <li>⇨ Hoher Energieverbrauch aufgrund falsch eingestellter Lüftungsanlagen</li> </ul> <p><b>Ziele des Projektes</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>⇨ Untersuchung und Dokumentation der vorhandenen Luftqualität und der thermischen Behaglichkeit in Klassenräumen</li> <li>⇨ Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen</li> <li>⇨ Reduzierung des Energieverbrauchs, der Betriebs- und Wartungskosten</li> <li>⇨ Steigerung des Nutzerkomforts durch Verbesserung der Raumluftqualität und thermischen Behaglichkeit</li> </ul> <p><b>Projektumsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>⇨ Laufzeit 36 Monate (August 2008 – Juli 2011)</li> <li>⇨ 3 Projektphasen</li> <li>⇨ Nutzung von vorhandenen Sanierungszyklen für bauliche Interventionen</li> </ul>  	<p><b>„Dicke Luft in deutschen Bildungsstätten“</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>⇨ Grundlagenermittlung und Datenerhebung von Bildungsstätten mit beispielhaften Lüftungskonzepten</li> <li>⇨ Auswahl von acht Referenzgebäuden nach festgelegten Kriterien</li> <li>⇨ Bestandsaufnahme zur Erfassung und Dokumentation der bautechnischen und energetischen Kenndaten</li> <li>⇨ Nutzerbefragungen zum Behaglichkeitsempfinden und zur subjektiven Einschätzung der Aufenthaltsqualität</li> <li>⇨ Unauffällige Installation von Messtechnik in den Unterrichtsräumen</li> <li>⇨ Installation von Fensterkontakten zur Ermittlung des Lüftungsverhaltens</li> <li>⇨ Durchführung von Langzeitmessungen zu Raumtemperatur, Luftfeuchte, CO<sub>2</sub>-Gehalt und Außentemperatur</li> <li>⇨ Erarbeitung optimierter Lüftungskonzepte und modifizierter Lüftungsstrategien</li> <li>⇨ Durchführung in den Unterricht eingebundener Workshops</li> <li>⇨ Empfehlung und ggf. Umsetzung begrenzter baulicher Interventionen</li> <li>⇨ Zusammenführung der Ergebnisse</li> <li>⇨ Schriftliche Darstellung der Bewertungskriterien, Messdaten und Optimierungsstrategien</li> <li>⇨ Formulierung eines Planungsleitfadens</li> <li>⇨ Versuch der Einordnung des Projektes in einen internationalen Bewertungsvergleich</li> <li>⇨ Förderung der Bearbeitung des Projektes und der notwendigen Messtechnik durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)</li> <li>⇨ Installation, Betreuung und Auslesung der Geräte durch das IGS</li> <li>⇨ Anfertigung und Bereitstellung von Arbeitsmaterial für Workshops durch das IGS</li> <li>⇨ Empfehlungen für technische und bauliche Maßnahmen in enger Abstimmung mit den Schulträgern separat für jede Schule je nach Optimierungspotential</li> <li>⇨ Entscheidung der Schulträger über Umsetzung und Umfang der empfohlenen Maßnahmen</li> <li>⇨ Kostendeckung für geringe, kostengünstige bauliche und technische Interventionen durch Schulträger</li> </ul> <p><b>„Lernkomfort, eine Chance für die Zukunft.“</b></p>	<p><b>Projekt – Phase 1:</b> Analyse und Konzept</p> <p><b>Projekt – Phase 2:</b> Messungen und Optimierungen</p> <p><b>Projekt – Phase 3:</b> Dokumentation und Planungsleitfaden</p> <p><b>Kosten und Finanzierung</b></p>	

Projektflyer Schullüftung 1.Auflage



## Lüftungskonzepte in Bildungsstätten

Analyse und Optimierungsansätze

**„Dicke Luft in deutschen Bildungsstätten!“**

Der Mensch hat sich bis zu 80% des Tages in geschlossenen Räumen auf. Kinder, Jugendliche und junge Erwachsene verbringen dabei bis zu einem Drittel des Tages in Schulen oder anderen Bildungseinrichtungen. Durch die Anpassung des Betreuungsangebots an eine flexible Arbeitswelt wird sich die Aufenthaltszeit zukünftig sogar noch verlängern. Vor diesem Hintergrund gilt es attraktive Bildungseinrichtungen für die Zukunft zu entwickeln. Zu den wichtigsten Einflussfaktoren der Aufenthaltsqualität gehören die Luftqualität und die thermische Behaglichkeit. Die Lern- und Lehrfähigkeit von Schülern, Studenten und Lehrkräften ist an eine qualitativ hochwertige Raumluft gekoppelt. Eine erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration und eine erhöhte Raumlufttemperatur schränken nachweislich das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit ein.

Das bestehende Lüftungsverhalten – am weitesten verbreitet ist die Lüftungsart über gekippte Fenster – führt zu großen Energieverlusten und bringt keine ausreichenden Raumluftaustausch. Mechanische Lüftungsanlagen, sofern sie vorhanden sind, werden teilweise nicht mehr genutzt oder laufen durchgehende auf vollen Touren. In den letzten Jahren hat sich unter den rund 18.000 Schulbauten unterschiedlicher Bauphasen ein enormer Sanierungsbedarf aufgestaut. Die Gebäudekomponenten wie Fassaden und die Haustechnik wurden für eine Nutzungsdauer von 30 bis 40 Jahren ausgelegt. Allein die Fenster wurden in den meisten Fällen bereits mindestens einmal ausgetauscht. Es gilt nun den ohnehin vorhandenen Sanierungszyklus zu nutzen und im Zuge einer Sanierung zu untersuchen und zu dokumentieren, ob sich die vorhandene Luftqualität und die thermische Behaglichkeit in den Klassenräumen mit einer Sanierung verbessern. Zum anderen ist es wichtig in bestehenden Gebäuden die Luftqualität und die thermische Behaglichkeit zu überprüfen und gegebenenfalls auch ohne eine Sanierung oder einen Umbau mit einfachen Mitteln zu verbessern.

Ziel des Forschungsprojektes ist eine Steigerung des Nutzerkomforts mittels der Verbesserung der Raumluftqualität und der thermischen Behaglichkeit. Das Wohlbefinden der Lehrer und Schüler besitzt dabei höchste Priorität.

**DBU Promotionsprojekt**






### DER TAGESBEDARF DES MENSCHEN:

- 1 kg Nahrung
- 2 l Wasser
- 15 kg Luft

**ERMÜDUNG UND KONZENTRATIONSSCHWÄCHE:**

Der tägliche Bedarf des Menschen macht deutlich wie wichtig die Versorgung mit Frischluft ist.

Das Gesamtprojekt gliedert sich in drei übergeordnete Phasen und hat eine Laufzeit von insgesamt drei Jahren. Die einzelnen Projektphasen greifen sich nicht als in sich abgeschlossene Arbeitsschritte, sondern stehen ununterbrochen in Wechselbeziehung zueinander.

Die erste Projektphase beginnt mit einer Analyse und der Erstellung eines Konzeptes. Es folgt eine Grundlagenuntersuchung, bei der die Erhebung von Blüddatensätzen mit bewährten Lüftungskonzepten im Vordergrund steht. Die Auswahlkriterien für die Gebäude beschränken sich jedoch nicht ausschließlich auf die Lüftungskonzepte – auch Bauzeit und Nutzung (Grundschule/ Gymnasium/ Gesamtschule etc.) sind ebenfalls entscheidende Kriterien. Ziel ist eine Unterteilung der Gebäude in zwei Lüftungskategorien vorgenommen – „Freie Fensterlüftung“ und „Mechanische Lüftungsanlagen“. Darauf folgt eine Unterteilung der Gebäude nach Gebäudetyp, Nutzung und Zustand der Gebäudehülle.

Ein Kriterium für die Auswahl eines Referenzraumes pro Schule ist eine hohe Belegungsdichte. In den Klassenräumen sollten sich nach Möglichkeit über den

ganzen Schultag Schüler aufhalten. Fachräume, wie Chemie- und Physiklabore sind zum Teil nur wenige Stunden am Tag belegt und für dieses Projekt eher ungeeignet.

Nach der Auswahl der geeigneten Gebäude werden in einer Bestandsaufnahme bautechnische und energetische Kenndaten erfasst und dokumentiert. Zeitgleich sollen Nutzerbefragungen – in Form von Fragebögen und Interviews – Aufschluss über das Behaglichkeitsempfinden, die subjektive Einschätzung der Aufenthaltsqualität und das bestehende Lüftungsverhalten geben. Ein enger Austausch mit den Schulbetreibern, den Lehrern und Schülern wird angestrebt. In der zweiten und längsten

Projektphase werden in erster Linie Messungen an den ausgewählten Schulen durchgeführt. Bei diesen Messungen handelt es sich um Langzeitmessungen. In den Klassenräumen werden unauffällig Sensoren installiert, die sowohl die Innentemperatur, die CO<sub>2</sub>-Konzentration und den Feuchtigkeitsgehalt der Raumluft messen und in einem Datenlogger speichern. An den Fenstern installierte Kontakte dokumentieren das Öffnen und Schließen der Fenster und geben somit Aufschluss über das vorhandene Lüftungsverhalten. Auch im Außenbereich der Schule wird ein Messfühler platziert, der die Außenlufttemperatur aufzeichnet. So lassen sich bei der Auswertung Zusammenhänge zwischen Außenlufttemperatur und Klassenraumluft herstellen.

Die Analyse der Nutzerbefragungen und deren Bewertung bilden die Grund-






### „Lernkomfort, eine Chance für die Zukunft!“

lage bei der Erarbeitung optimierter Lüftungskonzepte. In Workshops, die in den Unterricht eingebunden werden, sollen diese modifizierten Lüftungsstrategien vermittelt und unter Mithilfe der Schüler und Lehrkräfte umgesetzt werden.

Mit der Auswertung der Ergebnisse der ersten Messphase werden, neben der Modifizierung der Lüftungsstrategien, zusätzlich geringe bauliche Maßnahmen vorgeschlagen und bestmöglich umgesetzt. Diese baulichen Interventionen unterscheiden sich zwischen natürlich belüfteten und mechanisch belüfteten Gebäuden. Bei frei über die Fenster belüfteten Gebäuden kann z.B. der Einbau von Lüftungsoffnungen in die Fassade als mögliche Optimierung erwogen werden. Diese Öffnungen ermöglichen eine Nachlüftung des Gebäudes. An Schulen mit mechanischen Lüftungsanlagen werden technische Optimierungen vorgenommen. Die Volumenströmmen der Anlagen werden überprüft und angepasst. Eine Vereinfachung der Anlageneinrichtung kann zur Kostenminderung angestrebt werden.

Nach und während der Optimierungen dienen die andauernden Messungen zusätzlich der Erfolgskontrolle. Ziel ist eine gute Raumluftqualität und thermische Behaglichkeit in den Räumen zu gewährleisten und zugleich zur Senkung der Betriebs- und Wartungskosten an den Bildungsstätten beizutragen. Eine zweite Nutzerbefragung soll nach den durchgeführten Optimierungen verändertes Verhalten und Behaglichkeitsempfinden abbilden.

Die dritte Projektphase bildet zugleich den Projektabschluss. Die Ergebnisse aus der Begleitforschung und der vorangegangenen Projektphasen werden in einer Dokumentation zusammengeführt. Eine schriftliche Darstellung der Bewertungskriterien, Messdaten, Optimierungsstrategien und Ergebnisse bilden die Grundlage für die Formulierung eines Planungseffizienz. Zusätzlich wird ein Versuch der Einordnung des Projektes in einen internationalen Bewertungsvergleich angestrebt.

Der Abschlussbericht wird zusammen mit dem Planungseffizienz über Publikationen und über das Internetportal veröffentlicht und im Anschluss an das Projekt den Projektteilnehmern zur Verfügung gestellt. Der Planungseffizienz zeigt Probleme, Fehler, Schwachstellen und Lösungen auf. Er beschreibt einzelne Optimierungskonzepte für jeweilige Lüftungssysteme mit Bezug auf Bauphysiker, Bauherren und Bildungseinrichtungen. Als Orientierungshilfe spricht der Leitfaden sowohl Architekten, Planer und Schulbetreiber, aber auch Nutzer an. So ist es jeder Schule möglich mit geringen Mitteln nachhaltig Energie und somit auch Kosten einzusparen und somit von der Projektarbeit langfristig zu profitieren.

**WORKSHOPS ZUM THEMA LÜFTUNG:**

Zu der Empfehlung der Verwendung verschiedener Arbeitsmaterialien ist ebenfalls exemplarisch ist die Einrichtung eines Lüftungsdienstes zu nennen.

Neben dem Transport von Informationen ist mit den Workshops eine Sensibilisierung der Schüler und Lehrkräfte für die Problematik der Innensanftluft erstrebenswert.

Die Installation von so genannten Lüftungspampeln in den Klassenzimmern kann eine solche Sensibilisierung unterstützen und die Güte der Luftqualität auf einfache Weise verdeutlichen.





### ARBEITSMATERIALIEN ZUM THEMA LÜFTUNG:

Das gesamte Promotionsprojekt wird gemeinsam mit dem Institut für Gebäude- und Solartechnik (IGS) der TU Braunschweig durchgeführt. Es bestehen eine enge Zusammenarbeit und ein Informationsaustausch mit laufenden Projekten zum Thema Schulsanierung. Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) fördert die wissenschaftliche Begleitung und die Finanzierung notwendiger Messtechnik über eine Dauer von drei Jahren. Für den Zeitraum der Messungen entstehen für die Schulen keinerlei Kosten. Die Messtechnik wird eigenständig vom IGS installiert, betreut und in regelmäßigen Abständen ausgeteilt.

Die Workshops werden in Absprache mit den Pädagogen ausgeführt und bilden einen Teil des normalen Unterrichts. Die dafür notwendigen Arbeitsblätter, Präsentationen, Folien und Informationsmaterialien werden vom IGS angefertigt und zur Verfügung gestellt. Zudem werden Empfehlungen zu verschiedenen Arbeitsmaterialien ausgesprochen.

Im Verlauf des Projekts werden neben den Lüftungsstrategien außerdem in enger Abstimmung mit den Schülern Empfehlungen für technische und bauliche Maßnahmen gegeben. Diese beziehen sich auf das jeweilige Optimierungspotenzial der einzelnen Schulen und können somit sehr unterschiedlich ausfallen. Die bei der Umsetzung entstehenden Kosten sind von den jeweiligen Schülern selbst zu decken. Das Konzept sieht natürlich möglichst kleine, kostengünstige wenn auch effiziente und nachhaltige Eingriffe vor, die im Zuge ohnehin geplanter Sanierungen mit in bereits laufende Planungen eingebunden werden können. Die Entscheidung für die Umsetzung und den Umfang der empfohlenen Maßnahmen liegt letztlich bei den Schülern.

**Projekt:** Lüftungskonzepte in Bildungsstätten Analyse und Optimierungsansätze

**Laufzeit:** 36 Monate (August 2008 – Juli 2011)

**Bearbeitung:** Dipl. Ing. Jennifer König  
Tel: 0531/391-3524  
Email: koenig@igs.bau.tu-bs.de

**Förderung:** DBU – Deutsche Bundesstiftung Umwelt  
An der Bismarckstr. 2, D-49090 Osnabrück  
Web: www.dbu.de

**Jennifer König**  
Doktorandin am IGS mit abgeschlossenem Architekturstudium der TU Braunschweig






**Gymnasium Fallersleben**

**DBU Promotionsprojekt**

**Lüftungskonzepte in Bildungsstätten**  
Analyse und Optimierungsansätze

**„Dicke Luft in deutschen Bildungsstätten!“**

Der Mensch hält sich bis zu 80% des Tages in geschlossenen Räumen auf. Kinder, Jugendliche und junge Erwachsene verbringen dabei bis zu einem Drittel des Tages in Schulen oder anderen Bildungseinrichtungen. Durch die Anpassung des Baugebietes an eine flexible Arbeitswelt wird sich die Aufenthaltszeit zukünftig sogar noch verlängern. Vor diesem Hintergrund gilt es attraktive Bildungsstätten für die Zukunft zu entwickeln. Zu den wichtigsten Einflussfaktoren der Aufenthaltsqualität gehören die Luftqualität und die thermische Behaglichkeit. Die Lern- und Lehrfähigkeit von Schülern, Studenten und Lehrkräften ist an eine qualitativ hochwertige Raumluft gekoppelt. Eine erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration und eine erhöhte Raumlufttemperatur schränken nachweislich das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit ein.

Das bestehende Lüftungsverhalten – am weitesten verbreitet ist die Lüftungart über gekippte Fenster – führt zu großen Energieverlusten und bringt keinen ausreichenden Raumluftaustausch. Mechanische Lüftungsanlagen, sofern sie vorhanden sind, werden teilweise nicht mehr genutzt oder außen durchgehende auf vollen Touren. In den letzten Jahren hat sich unter den rund 18.000 Schulbauten unterschiedlicher Bauphasen ein enormer Sanierungsbedarf aufgetan. Allein die Fenster wurden in den meisten Fällen bereits mindestens einmal ausgetauscht. Es gilt nun den ohnehin vorhandenen Sanierungszyklus zu nutzen und im Zuge einer Sanierung zu untersuchen und zu dokumentieren, ob die vorhandene Luftqualität und die thermische Behaglichkeit in den Klassenräumen mit einer Sanierung verbessert werden kann. Zum anderen ist es wichtig in bestehenden Gebäuden die Luftqualität und die thermische Behaglichkeit zu überprüfen und gegebenenfalls auch ohne eine Sanierung oder einen Umbau mit einfachen Mitteln zu verbessern.

Ziel des Forschungsprojektes ist eine Steigerung des Nutzerkomforts mittels der Verbesserung der Raumluftqualität.

**DER TAGESBEDARF DES MENSCHEN:**

- 1 kg Nahrung
- 2 l Wasser
- 15 kg Luft

Das Gesamtprojekt gliedert sich in vier übergeordnete Phasen und hat eine Laufzeit von insgesamt drei Jahren. Die einzelnen Projektphasen betreffen sich nicht als in sich abgeschlossene Arbeitsschritte, sondern stehen ununterbrochen in Wechselbeziehung zueinander.

Die erste Projektphase begann mit einer Analyse und der Erstellung eines Konzeptes. Es folgte eine Grundgenerierung, bei der die Erhebung von Bildungsstätten mit beispielhaften Lüftungskonzepten im Vordergrund stand. Nach der Auswahl geeigneter Gebäude wurden in einer Bestandsaufnahme bautechnische und energetische Kenndaten erfasst und dokumentiert. Zeitgleich sollten Nutzerbefragungen Aufschluss über das Behaglichkeitsempfinden, die subjektiven Einschätzungen der Aufenthaltsqualität und das bestehende Lüftungsverhalten geben.

In der zweiten und längsten Projektphase wurden und werden in erster Linie Messungen an den ausgewählten Schulen durchgeführt. Bei diesen Messungen handelt es sich um Langzeitmessungen. In den Klassenräumen wurden unauffällig Sensoren installiert, die sowohl die Innenraumtemperatur, die CO<sub>2</sub>-Konzentration und den Feuchtigkeitsgehalt der Raumluft messen und in einem Datenlogger speichern. Auch im Außenbereich der Schule wird ein Messfühler platziert, der die Außenlufttemperatur aufzeichnet. So lassen sich bei der Auswertung Zusammenhänge zwischen Außenlufttemperatur und Klassenraumluft herstellen.

Im Gymnasium in Fallersleben wurde zeitgleich mit der Auswertung der Ergebnisse der ersten Messphase in drei von fünf Klassenräumen Lüftungstechnik installiert. Verschiedene Lüftungsgeräte werden da-

bei in baugleichen Klassenräumen im realen Unterrichtsumfeld eingesetzt.

Als Parameter zur Bestimmung der Luftqualität wurde der Kohlenstoffdioxidgehalt genommen. Kohlenstoffdioxid ist ein leicht zu messendes Gas, das mit sich mit der Belegungsdichte und dem jeweiligen Lüftungsverhalten verändert und somit als Indikator für Luftqualität dient.

Gemäß einer Empfehlung des Umweltbundesamtes wurde für das Projekt eine Einteilung der Luftgüte in drei Stufen vorgenommen.

- > bis 1.000 ppm  
Hygienisch unbedenklich  
Keine Maßnahmen notwendig
- > von 1.000 bis 2.000 ppm  
Hygienisch auffällig  
Lüftungsmaßnahmen intensiver prüfen
- > über 2.000 ppm  
Hygienisch inakzeptabel  
Dringender Handlungsbedarf  
Belüftbarkeit des Raumes prüfen  
ggf. weitere Maßnahmen prüfen

Die aktuellen Messergebnisse für das Gymnasium in Fallersleben (siehe rechts) zeigen, dass die Luftqualität in den zusätzlich mechanisch belüfteten Räumen besser ist, als in den nur über die Fenster belüfteten Räumen. Soll eine Einstellungs- und Lüftungsoptimierung im März 2010 können

**„Lernkomfort, eine Chance für die Zukunft!“**

CO<sub>2</sub>-Spitzen von über 2.500 ppm verhindern werden. Die orange-farbene Linie bei der Darstellung für Raum 209 markiert den Zeitpunkt der Optimierungen der Einstellungen an den Geräten. Die beide sind Räume 209 und 211 haben das gleiche Raumvolumen, womit Sie den direkten Vergleich zwischen dem zusätzlich mechanisch belüfteten Raum und dem Raum nur mit Fensterlüftung darstellen.

Das Projekt zeigt zum aktuellen Zeitpunkt, dass eine Optimierung der Luftqualität über mechanische Lüftungsgeräte gut umsetzbar ist.

**LÜFTUNGSGERÄTE ZUR VERBESSERUNG DER INNENRAUMLUFT:**

In diesem Test sind den Zahlen Eins bis Neun feste Symbole zugeordnet, und der Schüler hat die Aufgabe nach diesem vorgegebenen Schema vorgegebenen Zahlen die richtigen Symbole zuzuordnen. Es gibt vier Reihen von wahllos aufeinanderfolgenden Zahlen unter denen jeweils eine Zeile zur Verfügung steht, in die das passende Symbol einzutragen ist.

Die korrekte Zahlen-Symbol-Zuordnung von Eins bis Neun ist über den vier Reihen abgebildet und somit immer präsent. Ziel ist es, für so viele Zahlen wie möglich das passende Symbol zu finden, wobei in der ersten Reihe begonnen wird und jede Zahl nacheinander bearbeitet werden soll. Für das Ergebnis ist Geschwindigkeit und Sorgfalt entscheidend, da neben der Anzahl der bearbeiteten Ziffern auch die Fehlerzahl (falsche Zuordnung eines Symbols) eine Rolle spielt.

Die dritte Projektphase widmet sich dem Thema der Leistungsfähigkeit in Verbindung zur Luftqualität. Dabei soll in verschiedenen Luftgüte-Szenarien die Aufmerksamkeit der Schüler ermittelt werden. Es soll die Frage beantwortet werden, ob mit einer verbesserten Luftqualität tatsächlich auch die Aufmerksamkeit der Schüler gesteigert werden kann.

Erfassung der Aufmerksamkeit  
Zur Erfassung der Aufmerksamkeit wird in der Klasse vor sowie nach dem Unter-

**ERMÜDUNGSTEST:**

bols zu einer Zahl) berücksichtigt wird. Die Auswertung erfolgt mit Hilfe einer Schablone.

Die Testdurchführung in der Klasse wird direkt zum Beginn der ersten, nachdem der Testleiter die Zahlen-Symbol-Zuordnung an die Tafel angeschrieben hat, mit einer kurzen Instruktion eingeleitet. Für den gesamten Test hatten die Kinder 60 Sekunden Zeit, danach werden die Bögen eingesammelt und der reguläre Unterricht beginnt. Kurz vor dem Ende der letzten Schulstunde wird der Test wiederholt, jedoch mit einer anderen Version des Tests auf die in der Instruktion auch hingewiesen wurde. Nach diesem Prinzip wird die Aufmerksamkeit an zwei Tagen mit unterschiedlichen Lüftungsszenarien erhoben.

Es wird erwartet, auf diesem Wege eine Veränderung der Aufmerksamkeit von morgens zu mittags dokumentieren und vermutete Ermüdungseffekte aufdecken zu können. Dabei liegt der Fokus auf dem Unterschied eines frei über die Fenster belüfteten Raumes und eines Raumes mit zusätzlicher mechanischer Belüftung.

Die vierte Projektphase bildet zugleich den Projektabschluss. Die Ergebnisse aus der Begleitforschung und der vorangegangenen Projektphasen werden in einer Dokumentation zusammengeführt. Eine schriftliche Darstellung der Bewertungskriterien, Messdaten, Optimierungsstrategien und Ergebnisse bilden die Grundlage für die Formulierung eines Planungsfeldes in Bezug auf zukünftige Lüftungsplanung in Schulbauten für Architekten, Planer, Schulbetreiber, Schüler und Lehrer.

Quelle: „Gesundheitsfördernde Einflüsse auf das Leistungsvermögen im schulischen Unterricht“  
Dankbar Texter: Hans-Georg Schönefelder, Frank Schröder, Institut für Interdisziplinäre Schulforschung (ISF) der Universität Bremen

Projekt: Lüftungskonzepte in Bildungsstätten  
Analyse und Optimierungsansätze

Laufzeit: 36 Monate  
(August 2008 – Juli 2011)

Bearbeitung: Dipl.-Ing. Jennifer König  
Tel: 0531/381-3524  
Email: koenig@igs.bau.tu-bs.de

Institut für Gebäude und Solartechnik – IGS  
TU Braunschweig  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. N. Fiech  
Mültenpfordstraße 23, D - 38106 Braunschweig  
Web: www.igs.bau.tu-bs.de

Förderung: DBU – Deutsche Bundesstiftung Umwelt  
An der Bonau 2, D - 40800 Osnabrück  
Web: www.dbu.de

Jennifer König  
Doktorandin am IGS  
mit abgeschlossenem  
Architekturstudium  
der TU Braunschweig

**Faltblatt zur Schullüftung und Leistungstests**



