



Gefördert durch den
Innovationsfonds
Klima- und Wasserschutz

badenova
Energie. Tag für Tag

Projekt 2012-10

Dezentrale, fassadenintegrierte
Lüftungsanlagen für energetisch
sanierte Gebäude

Abschlussbericht



Ansprechpartner

Elmar Bollin¹

Klaus Huber¹

Fred Gresens²

Hans-Jürgen Schneble³

¹ Forschungsgruppe net – Nachhaltige Energietechnik, INES - Institut für Energiesystemtechnik der Hochschule Offenburg,

² Gemibau
Mittelbadische Baugenossenschaft eG

³ Stadt Offenburg

Erstellungsdatum

21.07.2016

Inhalt

Projektüberblick.....	4
1.1 Ausgangslage.....	4
1.2 Wissenschaftliche und technische Ziele.....	6
2 Untersuchte Gebäude und Problemstellung.....	6
2.1 Teilprojekt I Schulen.....	6
2.1.1 Umgesetzte Lüftungsmaßnahmen.....	7
2.1.2 Auslegung der Lüftungsgeräte.....	14
2.2 Teilprojekt II Wohnungen.....	16
2.2.1 Umgesetzte Lüftungsmaßnahmen.....	16
2.2.2 Auslegung der Lüftungsgeräte.....	17
3 Messkampagne und Messergebnisse.....	18
3.1 Messdatenerfassung.....	18
3.2 Messdatenauswertung.....	20
3.3 Messergebnisse Teilprojekt I Schulen.....	22
3.3.1 Prinzipielle Beobachtungen in den Schulen.....	23
3.3.2 Computer- und Serverraum Oststadtschule.....	25
3.3.3 Lehrerzimmer.....	28
3.3.4 Sekretariate und Rektorate.....	29
3.3.5 Kellerräume Oststadtschule.....	31
3.3.6 Biologieräume Theodor-Heuss-Realschule.....	34
3.3.7 Hygieneuntersuchungen.....	37
3.3.8 Nutzerzufriedenheit.....	38
3.3.9 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen (Kosten- Nutzenvergleich).....	46
3.3.10 Energetische Bewertung und ökologischer Nutzen.....	47
3.4 Messergebnisse Teilprojekt II Wohnungen.....	50
3.4.1 Prinzipielle Beobachtungen in den Wohnungen.....	50
3.4.2 Küchen.....	53
3.4.3 Bäder.....	58
3.4.4 Wohnzimmer / Schlafzimmer.....	62
3.4.5 Nutzerzufriedenheit.....	65
3.4.6 Hygieneuntersuchungen.....	66
3.4.7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen (Kosten- Nutzenvergleich).....	66
3.4.8 Energetische Bewertung und ökologischer Nutzen.....	68
4 Wirkung der Umsetzung.....	70
4.1 Auswirkungen auf den zukünftigen Betrieb.....	70
4.2 Weiterführende, resultierende Maßnahmen.....	70
4.3 Übertragbarkeit der Projektergebnisse.....	70

5	Öffentlichkeitsarbeit.....	71
5.1	Führungen und Vorträge	71
5.2	Flyer, Presse, Veröffentlichungen.....	71
6	Zusammenfassung.....	71
7	Literaturverzeichnis	73
8	Anhang.....	74
8.1	Auswertung der Fragebögen der Mietwohnungen	
8.2	Artikel Gemibau Mieterzeitschrift	
8.3	Leitfaden Schulen	
8.4	Leitfaden Wohnungen	

Projektüberblick

1.1 Ausgangslage

Der sommerliche Wärmeschutz von Schulgebäuden im Oberrheingraben und die Bereitstellung von Kühlenergie wurden bereits untersucht und finden Aufnahme im Leitfaden „Natürliche Gebäudeklimatisierung in Klassenzimmern des südlichen Oberrheins“ [1]. Im Rahmen der Arbeiten zur Minderung der sommerlichen Überhitzung wurde durch den Einbau und die damit verbundene kontinuierliche Aufzeichnung der CO₂-Konzentrationen der Raumluft festgestellt, dass besonders im Winterhalbjahr eine Verbesserung der Luftqualität erreicht werden muss. Verstärkt wird der Lüftungsbedarf durch energetische Sanierungen mit deutlich höherer Gebäudedichtigkeit und die Umstellung vieler Schulen auf den Ganztagschulbetrieb, der bei fehlender Lüftungsaktivität die Qualität der Raumluft stark absinken lässt. Dieser Sachverhalt führt zu schneller Ermüdung durch Sauerstoffmangel und damit signifikant starken Einbruch der Konzentrationsfähigkeit der Schüler [2]. Oberhalb einer Konzentration von 1.500 ppm wurde eine deutliche Zunahme von Kopfschmerzen, Müdigkeit, Schwindel und Konzentrationsschwächen festgestellt [3].

Nach DIN 1946 Teil 6 gilt: „für neu zu errichtende oder zu modernisierende Gebäude mit Lüftungstechnisch relevanten Änderungen ist ein Lüftungskonzept zu erstellen. Das Lüftungskonzept umfasst die Feststellung der Notwendigkeit von Lüftungstechnischen Maßnahmen und die Auswahl des Lüftungssystems. Dabei sind bauphysikalische, Lüftungs- und gebäudetechnische sowie auch hygienische Gesichtspunkte zu beachten“.

Allgemein wird speziell im Winter wegen niedrigen Außentemperaturen nicht ausreichend gelüftet. Geht man von einem Raumvolumen von 6 m³/Pers. aus, wäre, um über eine reine Fensterlüftung in Unterrichtsräumen eine ausreichende Luftqualität zu erreichen, ca. alle 20 Minuten eine Fensterlüftung notwendig [4]. Dies ist im Schulalltag kaum realisierbar. Deshalb sind aufgrund der hohen Belegungsdichte von Unterrichtsräumen automatische Lüftungsmaßnahmen notwendig.

Ähnliche Erfahrungswerte wurden in Gesprächen mit Wohnbaugesellschaften im kommunalen und privaten Wohnungsbau gewonnen. Hier wird die Verpflichtung zur energetischen Sanierung als sehr kostenintensiv gesehen. Gerade im Mietwohnungsbau lassen sich Mehrkosten jedoch nur beschränkt auf die Mieter umlegen. Die Wohnbaugesellschaften haben deshalb ein starkes Interesse an kosteneffizienten, dezentralen, möglichst fassadenintegrierten Lüftungslösungen angezeigt, können aber nicht auf ausreichende Erfahrungen zurückgreifen. Für einen Feldtest mit unterschiedlichen dezentralen Einheiten war die Wohnbaugenossenschaft Gemibau gerne bereit, dieses Projekt der Hochschule mit Mustermietobjekten/-wohnungen zu unterstützen. Insbesondere sollten kostengünstige Lüftungen gefunden werden, die die Verbesserung der Raumhygiene / Wohnbedingungen in Wohngebäuden durch Austragen der Feuchtigkeit / Erneuerung der Luftqualität durch einfache, eventuell auch automatisierte Vorgänge erreichen.

Für das Projekt wurden jeweils drei Wohnungen in zwei Mietobjekten ausgewählt. Das Gebäude im Eichenknick war bereits energetisch saniert worden. Das Gebäude in der Walnussallee befand sich zu Projektbeginn noch im unsanierten Zustand und sollte während der Projektlaufzeit ebenfalls energetisch saniert werden. Gleichzeitig sollten die Lüftungsmaßnahmen umgesetzt werden.

Für eine nachhaltige Sicherung einer ausreichenden Luftqualität in Anlehnung an den Vorgaben des Leitfadens für Innenraumlufthygiene des Umweltbundesamts [5] sollten energieeffiziente Konzepte zum Einsatz kommen, die auf den Gedanken der natürlichen Gebäudeklimatisierung aufsetzen. Elemente einer nachhaltigen Strategie können beispielsweise sein:

- Nutzung zentraler Abluftventilatoren zur Verbesserung der Luftqualität in Wintermonaten;
- An Nutzerpräsenz orientierter, energieeffizienter Lüftungsbetrieb mit CO₂-Überwachung;
- Dezentrale Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, erweitert durch bzw. leistungsorientiert an einer ausreichenden Nachtlüftungskühlung.

Erste Untersuchungen zu zentralen Lüftungen und dezentralen raumlufthechnischen Anlagen für Klassenzimmer [1] haben gezeigt, dass bei beiden Konzepten gute Aussichten auf Erfolg bestehen. Als lufttechnische Problemfälle stellen sich Sondernutzungsbereiche wie Physik- oder Chemiesäle, Lehrerzimmer oder Sekretariatsräume heraus, da Türen zu Flurbereichen auch über Nacht geschlossen bleiben müssen. Dies begründet sich insbesondere aus einer hochwertigen Ausstattung, der Aufbewahrung sensibler Dokumente und Unterlagen bzw. gefährlicher oder giftiger Stoffe wie Chemikalien.

Sowohl an der Theodor-Heuss-Realschule (THR) als auch an der Oststadtschule wurden Sondernutzungsräume in das Messprogramm aufgenommen.

Theodor-Heuss-Realschule THR

Das über große Wärmekapazitäten verfügende Gebäude wurde vollständig saniert und energetisch aufgewertet. Im Rahmen der energetischen Sanierung wurde die Gebäudedichtigkeit mit mehreren Maßnahmen deutlich erhöht. Für die Organisation und Steuerung der technischen Vorgänge bei der Gebäudetechnik wurde eine Gebäudeautomation eingebaut, die viele Prozesse automatisiert abarbeitet.

Im Rahmen des Projekts „Natürliche Gebäudeklimatisierung in Klassenzimmern“ wurden in der THR zwei Ventilatoren mit einem Gesamtvolumenstrom von ca. 16.600 m³/h zur sommerlichen Nachtkühlung des Gebäudes installiert.

Die Ventilatoren in Verbindung mit einer raumselektiven Ansteuerung von Oberlichtfenstern und dem manuellen Aufstellen der Klassenzimmertüren durch den Hausmeister zeigten Wirkung und führten zu sehr angenehmen Arbeitsbedingungen für Schüler und Lehrkräfte der Schule. Mit diesen Lüftungsanlagen konnte auch durch Pausenlüftung die CO₂-Konzentration der Klassenräume reduziert werden [6].

Ergänzend dazu sollten nun im Rahmen dieses Projektes einige Sondernutzungsräume mit dezentralen Geräten ausgestattet und messtechnisch begleitet werden.

Oststadtschule

Beschwerden über starke Wärmeentwicklung im aufgesetzten Dachgeschoß der Oststadtschule führten zu mehreren Überlegungen des Gebäudemanagement der Stadt Offenburg und letztlich zum Projekt „Natürliche Gebäudeklimatisierung in Klassenzimmern“ mit dem Forschungspartner Hochschule Offenburg. Das ehemalige Kasernengebäude verfügt mit dem Kellergeschoß bis zum zweiten Obergeschoß über vier Geschoße in schwerer Bauweise und über ein nachträglich aufgesetztes drittes Obergeschoß, das Dachgeschoß in Leichtbauweise, das im Jahr 2003 fertiggestellt wurde und sich energetisch an der ENEC 2002 orientiert. Im Kellergeschoß sind ebenfalls Unterrichtsräume untergebracht.

Die Gründe für die Leichtbauweise lagen nicht zuletzt in den zulässigen Lasten, die den Eintrag von massiven Baukomponenten begrenzten. Der Einbau zweier Lüftereinheiten auf den Stirnseiten des Dachgeschosses in Verbindung mit der Ansteuerung der Oberlichtfenster in Klassenräumen über die zentrale Gebäudeautomation war der erste Schritt zur Minderung. Unterstützt wurden die Gebäudeautomation durch die Öffnung der Klassenzimmer und Flurtüren durch den Hausmeister. Maßnahmen des Dachgeschosses wurden auf das zweite Obergeschoß ausgeweitet. Das Nachtlüftungskonzept sorgt für

eine deutliche Absenkung der Innenraumtemperaturen in wärmeren Phasen des Sommers.

Ergänzend dazu sollten auch an dieser Schule im Rahmen dieses Projektes Sondernutzungsräume mit dezentralen Geräten ausgestattet und messtechnisch begleitet werden [6].

1.2 Wissenschaftliche und technische Ziele

Ziele des Vorhabens sind die Erweiterung des Maßnahmenkataloges/Leitfadens aus dem badenova Innovationsfondsprojekt 2008-1 „Natürliche Gebäudeklimatisierung in Klassenzimmern“ um ergänzende Erkenntnisse und Empfehlungen zum Thema „Verbesserung der Luftqualität in Klassenzimmern“ zu bekommen. An ausgewählten Schulgebäuden des Projekts oder bei anstehenden Sanierungsvorhaben sollen Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität in Sondernutzungsbereichen insbesondere für das Winterhalbjahr (im Sommer tritt das Problem deutlich weniger ausgeprägt hervor) näher untersucht werden. Eine Ausnahme bilden hier die EDV- und/oder Serverräume, die durch die verstärkte Temperaturentwicklung einer ganzjährigen Betrachtung bedürfen.

Diejenigen Lösungen werden somit in den Leitfaden aufgenommen, die einer technischen und wirtschaftlichen Prüfung für beide Halbjahre stand halten. Lassen sich lufttechnische Anlagen zur sommerlichen Nachtlüftkühlung mit der Luftqualitätssicherung im Winterhalbjahr energieeffizient koppeln, werden Synergieeffekte zu Maßnahmen aus dem Vorprojekt, eventuell mit zusätzlichen Anpassungen bei der Gebäudeautomation nutzbar.

Mindestens drei Typen von dezentralen Fassadeneinheiten sollen sowohl in Schulgebäuden als auch in sanierten Mietshäusern in unterschiedlichen Räumen untersucht werden. Hierbei ist zu bemerken, dass der Einsatz einer Gebäudeautomation im Mietwohnungsbau eher nicht gegeben ist. Für die individuelle Voreinstellung ist dennoch eine eingeschränkte Kommunikationsfähigkeit oder ein durch Passwort geschützter Zugang zur Gerätesteuerung gewünscht, damit eine bedarfsorientierte Parametereinstellung für Temperatur-, Feuchte oder Kohlendioxidwerte, Periodendefinitionen Sommer/Winter oder Nachtlüftung möglich ist und durch Dritte nicht verändert werden kann.

Die jeweilige Fassadenintegration soll auf ihre Eignung und Kosteneffizienz für Schulobjekte und im Mietwohnungsbau geprüft und bewertet werden.

2 Untersuchte Gebäude und Problemstellung

Das Projekt gliedert sich in zwei Teilprojekte mit unterschiedlichem Forschungsschwerpunkt. Im ersten Teilprojekt wurden in zwei Schulen Sondernutzungsräume auf deren CO₂-Belastung hin untersucht. Es handelt sich um die Erich-Kästner-Realschule in der Oststadtschule und die Theodor-Heuss-Realschule in Offenburg.

Der Fokus des zweiten Teilprojekts liegt auf der Untersuchung der Feuchtebelastung der Luft in Wohnungen, die im Rahmen von energetischen Sanierungsmaßnahmen Wärmedämmung wurden. Die Gebäude befinden sich in der Walnussallee 5 – 7 und im Eichenknick 1 – 3. Außerdem werden in den Wohnungen die Temperatur und die CO₂-Konzentration der Luft erfasst.

2.1 Teilprojekt I Schulen

Im Rahmen des Vorprojektes „Natürliche Gebäudeklimatisierung in Klassenzimmern“ zeigte sich, dass in den Klassenräumen der Schulen deutlich überhöhte CO₂-Werte auftreten. Speziell in den Wintermonaten werden die Klassenräume nur unzureichend gelüftet. Bei niedrigen Außentemperaturen werden die Fenster kaum noch geöffnet. Dieses Ver-

halten wurde auch in anderen Untersuchungen festgestellt [3]. Während des Unterrichts werden innerhalb weniger Minuten CO₂-Konzentrationen oberhalb der empfohlenen Konzentrationen von 1.000 ppm bzw. 2.000 ppm und auch weit darüber erreicht (Abb. 2.1). Nach dem Leitfaden "Innenraumhygiene für Schulgebäude" des Umweltbundesamtes [7] gelten Konzentrationen zwischen 1.000 ppm und 2.000 ppm als hygienisch auffällig und über 2.000 ppm als inakzeptabel. Ab 2.000 ppm wird empfohlen, weitergehende Maßnahmen und die Belüftbarkeit des Raumes zu prüfen.

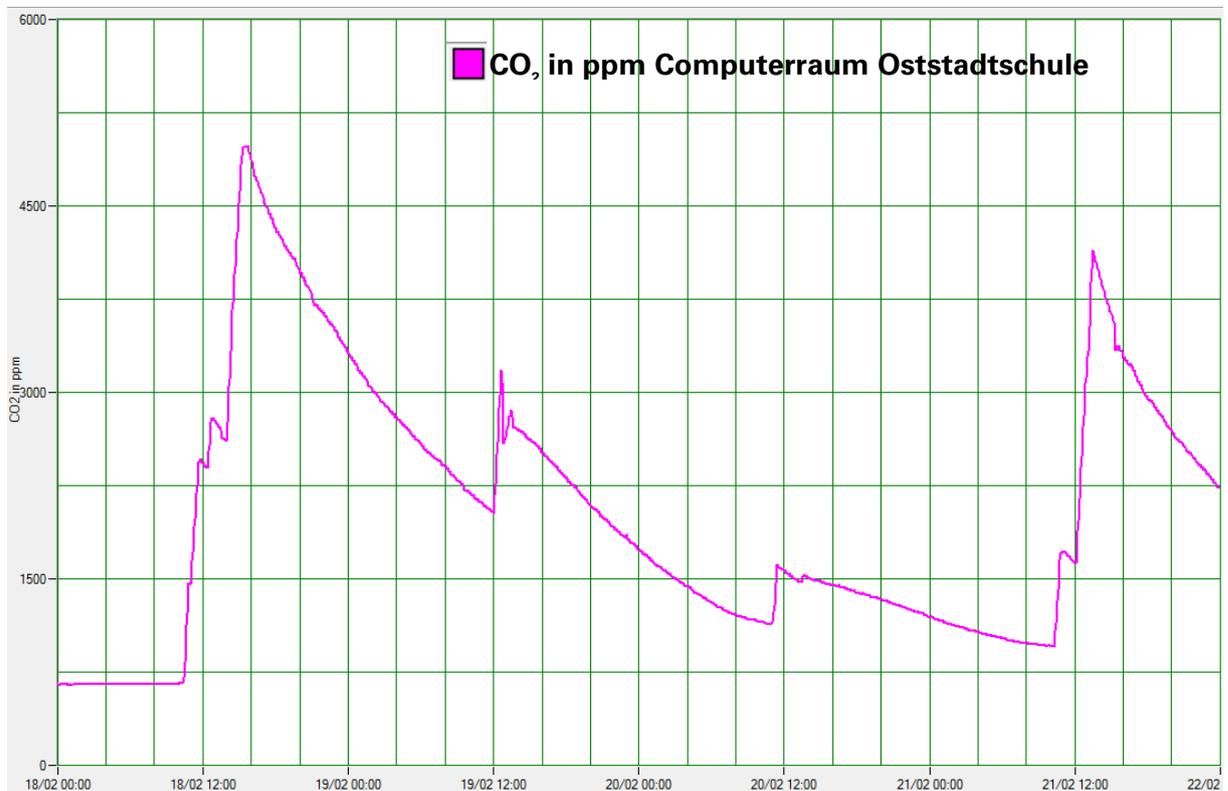


Abb. 2.1: CO₂-Konzentration im Computerraum der Oststadtschule ohne aktive Lüftung am 19. – 21.02.2013. Die Messwerte steigen bei Belegung innerhalb einer Unterrichtsstunde ab 10:45 Uhr auf ca. 2.500 ppm. Ab 14 Uhr steigt die Konzentration weiter auf bis zu 5.000 ppm. Um 16 Uhr beginnt die Konzentration langsam abzuklingen. Am nächsten Tag um 12 Uhr zu Beginn der nächsten Unterrichtsstunde liegt immer noch eine CO₂-Konzentration von mehr als 2.000 ppm vor.

Im hier vorliegenden Projekt liegt nun der Fokus auf Sondernutzungsräumen. In diesen Räumen dürfen die Zimmertüren während des Lüftungsvorgangs in den Pausen nicht geöffnet werden. Die Öffnung der Türen ist aber für das im Rahmen des Vorprojektes entwickelte Lüftungskonzept zwingend notwendig, da die Zentrale Abluftanlage in den Atrien bzw. Fluren der Schulen, bei geöffneten Oberlichtern der Klassenräume den Luftaustausch bewirkt.

Das Projekt „Natürliche Gebäudeklimatisierung in Klassenzimmern“ wurde ebenfalls vom Badenova Innovationsfond unter der Nummer 2008-1 gefördert.

2.1.1 Umgesetzte Lüftungsmaßnahmen

An die Lüftungsmaßnahmen werden im Interesse der Lehrer, Schüler und des Schulträgers verschiedene Anforderungen gestellt. So besteht großes Interesse an kostengünstigen, geräusch- und wartungsarmen Maßnahmen. Ferner muss beachtet werden, dass keine Zugerscheinungen durch die Geräte entstehen, die aufgrund der großen Luftdurchsatzraten, die in Klassenräumen notwendig sind entstehen können.

Computer- und Serverraum Oststadtschule

In der Oststadtschule wurde im Computer- und Serverraum eine dezentrale Anlage mit Wärmerückgewinnung installiert, die beide Räume mit Frischluft versorgt. Hersteller der Anlage vom Typ maxi 1100 EL 400 V ist Systemair. Das Lüftungsgerät selbst ist im Serverraum mit ca 30 cm Abstand zur Decke installiert (Abb. 2.2). Frisch- und Fortluft werden über Bohrungen in der Fassade angesaugt bzw. ausgeblasen. Die Zuluft wird im Computerraum in einer der Raumecken mittels eines Quellauslasses in den Raum eingebracht (Abb. 2.3). Durch dessen große Oberfläche strömt die Luft bewegungsarm mit geringer Geräuschentwicklung in den Raum ein. In der diagonal gegenüberliegenden Ecke wird die Abluft durch eine mit einem Gitter versehene Wandöffnung im oberen Bereich abgesaugt (Abb. 2.4) und im Serverraum dem Lüftungsgerät zugeführt. Im Serverraum wird über Lüftungsventile, die als Abzweige in den Zu- und Abluftrohren des Computerraums angebracht sind, der Luftaustausch gewährleistet (Abb. 2.5).

Die Lüftungsanlage ist an Wochentagen zwischen 7 Uhr und 17 Uhr auf halber Drehzahl in Betrieb. Bei Erreichen einer CO₂-Konzentration von 1.200 ppm schaltet sie auf volle Drehzahl und bei unterschreiten von 1.000 ppm wieder auf halbe Drehzahl zurück.

Um sommerliche Überhitzungen zu reduzieren wurde in der Regelung der Lüftungsanlage die freie Kühlung eingestellt. Dabei wird nachts ab 0 Uhr bei einer Raumtemperatur von über 22 °C und wenn die Außentemperatur 2 K unterhalb der Raumtemperatur liegt die Lüftungsanlage bei voller Drehzahl betrieben, bis die Sollraumtemperatur von 18 °C unterschritten wird. Der Wärmetauscher wird dabei mit Hilfe der Bypassklappe umgangen.



Abb. 2.2: Lüftungsgerät Systemair maxi 1100 EL 400 V



Abb. 2.3: Links: Zuluftanordnung im Computerraum. Rechts: Quellauslass



Abb. 2.4: Lüftungsgitter mit dahinterliegendem Abluftrohr im Computerraum

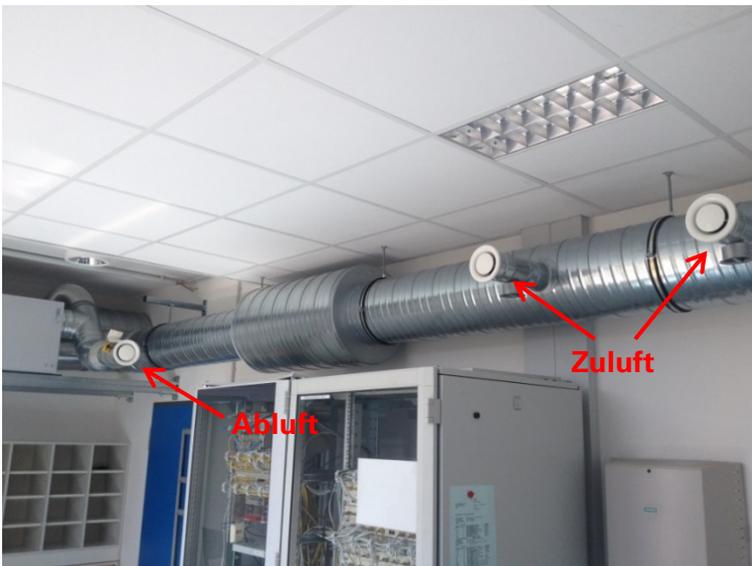


Abb. 2.5: Zu- und Abluftventile Serverraum

Lehrerzimmer Theodor-Heuss-Realschule

Folgendes Lüftungskonzept wurde im Lehrerzimmer der THR umgesetzt:

Die bestehenden Einrichtungen Abluftanlage und motorisch öffnbare Oberlichter werden von der bestehenden EIB Gebäudeautomation automatisch zur Reduzierung der CO₂-Belastung gesteuert. An zusätzlicher Hardware war lediglich die Installation eines CO₂-Sensors im Lehrerzimmer erforderlich. Außer den genannten Geräten wird ein vorhandener Außentemperaturfühler und ein Präsenzmelder in die Regelung eingebunden.

Der Abluftventilator lüftet mit einem Volumenstrom von 520 m³/h. Damit ist ein Austausch des gesamten Luftvolumens des Lehrerzimmers (ca. 316 m³), innerhalb von 36 Minuten möglich.

Regelbeschreibung:

Die Automatisierung der Lüftung und der Fenster soll dazu dienen, den CO₂-Gehalt der Luft bei minimalen Wärmeverlusten im Winter, minimalen Wärmeeinträgen im Sommer und minimaler Störung der anwesenden Lehrer auf einen vertretbaren Wert zu begrenzen. Lüftung bedeutet im folgenden Text, dass die beiden automatisierten Oberlichter geöffnet und der Abluftventilator eingeschaltet werden.

Bei überschreiten eines CO₂-Wertes von c1 wird die Lüftung für die Zeit t aktiviert. Wird vom Außentemperaturfühler eine Temperatur kleiner T1 gemessen, wird die Lüftung nur außerhalb der Unterrichtspausen, wenn nur wenig Lehrer im Lehrerzimmer sind aktiviert, oder wenn der Präsenzmelder keine Person im Raum anzeigt. Nach Ablauf von t bleibt die Lüftung für einen weiteren Zeitraum t deaktiviert. Bei einer Außentemperatur > T2 bleibt die Lüftung in jedem Fall deaktiviert.

Die folgend angegebenen Werte sind in der EIB parametrierbar angelegt. Die Einschaltparameter für die CO₂-Konzentration wurden entsprechend der unter 2.1 erwähnten Empfehlungen des Umweltbundesamtes gewählt [7]. Der Einschaltwert 2.000 ppm ist nur dann aktiv, wenn Personen im Raum sind und die Außentemperatur außerhalb der Grenzen T1 und T2 liegt.

c1 = 1.000 ppm; c2 = 2.000 ppm; c3 = 600 ppm, c4 = 800 ppm, T1 = 10 °C; T2 = 25 °C; t = 10 min

Wenn

$c(\text{CO}_2) > c1$

und

$T_{\text{Außen}} > T1$

und

$T_{\text{Außen}} < T2$

dann

Für die Dauer t wird die Abluftanlage eingeschaltet und die Oberlichter geöffnet. Danach bleibt die Lüftung mindestens für die Zeit t ausgeschaltet.

Wenn

$c(\text{CO}_2) > c1$

und

$T_{\text{Außen}} < T1$

und

keine Person im Raum

oder

keine Pause (Änderung der Pausenzeiten müssen hier jedes Mal übernommen werden)

dann

Für die Dauer t wird die Abluftanlage eingeschaltet und die Oberlichter geöffnet. Danach bleibt die Lüftung mindestens für die Zeit t ausgeschaltet.

Bei Überschreiten einer CO_2 -Konzentration von c_2 wird die Lüftungsanlage eingeschaltet, wenn die Außentemperatur kleiner als T_2 ist.

Wenn

$c(\text{CO}_2) > c_2$

und

$T_{\text{Außen}} < T_2$

dann

Für die Dauer t wird die Abluftanlage eingeschaltet und die Oberlichter geöffnet. Danach bleibt die Lüftung mindestens für die Zeit t ausgeschaltet.

Nach 18 Uhr wird die Lüftung einmalig bei einer CO_2 -Konzentration $> c_4$ und Außentemperatur $< T_2$ eingeschaltet und wieder ausgeschaltet, wenn die CO_2 -Konzentration $< c_3$ ist.

Wenn

Uhrzeit > 18 Uhr

und

keine Nachtlüftung für diese Nacht vorgesehen

und

$T_{\text{außen}} < T_2$

und

$c(\text{CO}_2) > c_4$

dann

Die Abluftanlage wird eingeschaltet und die Oberlichter geöffnet

Wenn

Uhrzeit > 18 Uhr

und

$T_{\text{außen}} < T_2$

und

$c(\text{CO}_2) < c_3$

dann

Die Abluftanlage wird ausgeschaltet und die Oberlichter geschlossen. Damit wird gewährleistet, dass auch moderate CO_2 -Konzentrationen nicht bis zum nächsten Tag bestehen bleiben.

Die Lüftung kann in jedem Fall über das Bedienpanel im Lehrerzimmer für 30 min. deaktiviert werden.

Da laut Aussage des Hausmeisters vorher nur die Oberlichter in das Nachtlüftungskonzept zur sommerlichen Klimatisierung der Schule integriert waren, wurde empfohlen die Abluftanlage zeitgleich zur bestehenden Nachtlüftung zu aktivieren. Vorher wurden zwar die Oberlichter geöffnet, ein Luftaustausch über den zentralen Lüfter war aber nicht möglich, da die Tür geschlossen bleiben muss.

Rektorat und Sekretariat Theodor-Heuss-Realschule

In diesen beiden Zimmern war aufgrund erhöhter CO₂-Konzentrationen der Einbau einer Lüftungsanlage die neben den Büros des Rektors, Konrektors und des Sekretariats auch das Lehrerzimmer versorgen sollte, geplant. Vom Rektor wurde die Anlage wegen Bedenken hinsichtlich Geräusentwicklung abgelehnt. Da die CO₂-Belastung in diesen Räumen generell nur moderat ausfiel, aber eine Maßnahme in jedem Fall befürwortet wird, wurden Lüftungsampeln installiert, die den Mitarbeitern im Büro über 6 LEDs im Stile einer Verkehrsampel hohe CO₂-Konzentrationen anzeigen (Abb. 2.6).



Abb. 2.6: CO₂-Ampel mit Hobo-Datenlogger (Foto MB-Systemtechnik)

Die LEDs werden gemäß den folgenden CO₂-Werten geschaltet:

- | | |
|-------------|---------------------|
| 1. LED grün | bis 600 ppm |
| 2. LED grün | 601 bis 900 ppm |
| 3. LED gelb | 901 bis 1.200 ppm |
| 4. LED gelb | 1.201 bis 1.600 ppm |
| 5. LED rot | 1.601 bis 2.000 ppm |
| 6. LED rot | über 2.001 ppm |

Sekretariat, Rektorat, Lehrerzimmer Oststadtschule und Kellerräume Oststadtschule

In den Verwaltungsräumen der Lehrerzimmer, Rektorat und Sekretariat der Oststadtschule wurden keine erhöhten CO₂-Konzentrationen erfasst, sodass hier auf Lüftungsmaßnahmen verzichtet wurde. Als Ersatz für die Verwaltungsräume wurden die beiden Kellerräume in das Messprogramm aufgenommen. Da im Verlauf der Messdatenerfassung die weitere Nutzung der Kellerräume aufgrund der erheblichen Veränderungen im Schulsystem Baden-Württembergs und der daraus resultierenden Auswirkungen auf den Schulstandort unklar wurde, wurde auch hier trotz erhöhter CO₂-Werte sinnvollerweise auf den Einbau einer Lüftungsanlage verzichtet. Dementsprechend wurde das Messprogramm in diesen Räumen eingestellt und auf zwei Biologieräume in der THR erweitert.

Biologieräume Theodor-Heuss-Realschule

Die beiden Biologieräume in der THR R300 und R317 wurden aufgrund der im letzten Abschnitt beschriebenen Umstände erst spät in das Messprogramm eingebunden. In diesen Räumen wurde wegen hoher CO₂-Belastungen jeweils ein Lüftungsgerät eingebaut. Die Wahl fiel hier auf ein Deckengerät der Fa. ENERGENIO Typ Geniovent.x 900 WESO GVX, das ohne weitere Verrohrung die Frischluft an einer der breiten Seiten des Gerätes unter der Decke einbläst (Abb. 2.7). Die Abluft wird an der schmalen Seite des Gerätes angesaugt. Frisch- und Fortluft sind über ein Oberlicht realisiert, das durch eine wetterfeste Platte mit passenden Bohrungen ersetzt wurde.

Während der Planung waren zuerst Standgeräte mit Quellauslass am Boden überprüft aber verworfen. Bei Installation im Raum wären alle Schränke entfallen. Bei Installation im Nebenraum hätte der Platz für die notwendige Verrohrung nicht ausgereicht.

Die beiden Lüftungsgeräte sind an Schultagen zwischen 7:30 und 22:00 Uhr im Komfortbetrieb. In dieser Zeit werden die beiden Lüfter über die CO₂-Konzentration geregelt.

Die Lüfterdrehzahl der Geräte wird proportional zur CO₂-Konzentration gefahren. Als unterer Wert, unterhalb dessen die Lüfter auf kleinster Stufe (30 %) laufen, sind 800 ppm eingestellt. Der obere Wert bei dem die Lüfter mit 100 % Leistung laufen ist mit 1.500 ppm vorgegeben.

Leider konnten diese Einstellungen trotz Anschlusses des Gerätes an die GLT und einiger Nachbesserungen des Elektroinstallationsbetriebes im Berichtszeitraum nicht überprüft werden, da falsche Messwerte aufgezeichnet werden. Die separat erfassten CO₂-Werte zeigen aber eine deutliche Verbesserung der Raumluftqualität (Kapitel 3.3.6).

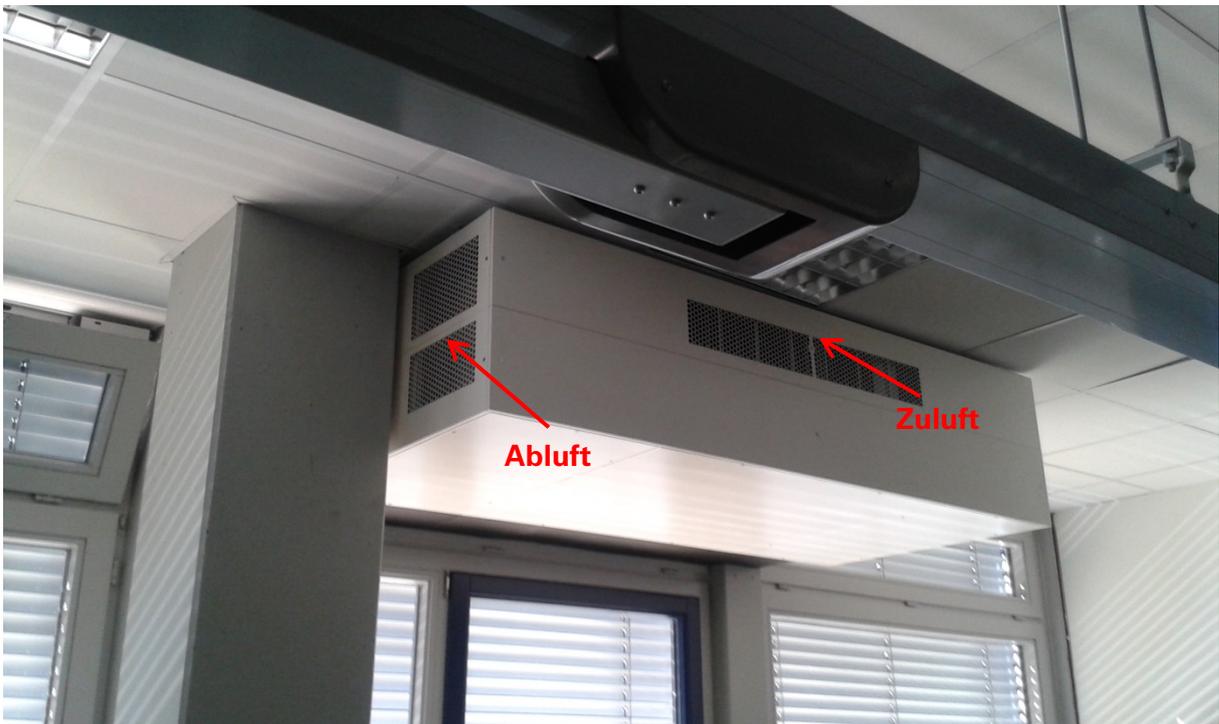


Abb. 2.7: Lüftungsgerät im Biologieraum R300 ENERGENIO Geniovent.x 900 WESO GVX

Tab. 2.1: Übersicht Lüftungsmaßnahmen in den Schulen

Raum	Art der Lüftungsmaßnahme	Luftdurchsatz	Hersteller	Typ
Theodor-Heuss-Realschule				
Rektorat	CO ₂ -Ampel	-	MB Systemtechnik,	DL U12 CO ₂ ,
Sekretariat	CO ₂ -Ampel	-	MB Systemtechnik,	DL U12 CO ₂ ,
Konrektorat	CO ₂ -Ampel	-	MB Systemtechnik,	DL U12 CO ₂ ,
Lehrerzimmer	Abluftanlage	520 m ³ /h		
2 Bioräume	Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung	200 – 900 m ³ /h	ENERGENIO	Geniovent.x 900 WESO GVX
Oststadtschule				
Computer- / Serverraum	Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung	450 – 600 m ³ /h	Systemair	maxi 1100 EL 400 V

2.1.2 Auslegung der Lüftungsgeräte

Die Geräte wurden anhand der Raumvolumina und der Personenzahl ausgelegt. Hierfür existieren verschiedene Verfahren um den benötigten Volumenstrom zu berechnen.

Laut DIN EN 15251 ist der Luftvolumenstrom in Abhängigkeit von der Kategorie, der Schülerzahl und der Schadstoffbelastung des Gebäudes zu berechnen. Die Kategorien geben die Qualität der Raumluft in 3 Kategorien an, wobei Kategorie I eine hohe Qualität und III eine niedrige Qualität bedeutet.

Nach DIN EN 13779 gelten für die Raumluftqualität die Kategorien IDA 1 bis 4. Wobei IDA für eine niedrigere Qualität über 1.000 ppm steht und IDA 1 für eine hohe unter 400 ppm. Zum Erreichen einer mäßigen Raumluftqualität zwischen 600 ppm und 1.000 ppm nach IDA 3 ist ein Luftwechsel von 22 – 36 m³/h pro Schüler erforderlich.

Tab. 2.2: Auslegung der Lüftungsgeräte in den Schulen

		Lehrerzimmer THR	Rektorat THR	Sekretariat THR	Konrektorat THR	Computerraum Oststadt	Serverraum Oststadt	Bioraum 300 THR	Bioraum 317 THR
1	Fläche in m ²	97,31	21,94	22,24	20,44	73,77	21,64	87,09	82,92
2	Raumhöhe in m	3,25	2,5	2,5	2,5	3,12	3,12	3,46	3,46
3	Volumen in m ³	316	55	56	51	230	68	301	287
4	Personenzahl	50	4	4	4	30	1	30	30
5	25 m ³ /(Person h) + 5 m ³ /(m ² h) Volumenstrom in m ³ /h	1737	210	211	202	1119	133	1185	1165
6	20 m ³ /(h Person)	1000	80	80	80	600	20	600	600
7	Doppelter Luftwechsel in m ³ /h	633	110	111	102	460	135	603	574
8	40 m ³ /(h Person)	2.000	160	160	160	1200	40	1200	1200
9	22 - 36 m ³ /(h Person)	1.100 - 1.800	88 - 144	88 - 144	88 - 144	660 - 1.080	22 - 36	660 - 1.080	660 - 1.080
10	Tatsächlicher Volumenstrom in m ³ /h	520 m ³ /h	-	-	-	600	100	900	900

Für die Berechnungen in Tab. 2.2 Zeile 5 wurde Kategorie II für mittlere Raumluftqualität und $5 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ für schadstoffarme Gebäude nach DIN EN 15251 gewählt. In Zeile 9 wurde der notwendige Volumenstrom nach DIN EN 13779 für IDA 3 berechnet.

Außerdem wurden Berechnungen für einen doppelten Luftwechsel (Zeile 7) durchgeführt. Die Vorgaben des Passivhausinstituts [8] mit $20 \text{ m}^3/(\text{h Pers.})$ (Zeile 6) und $40 \text{ m}^3/(\text{h Pers.})$ laut DIN EN 13779 (Zeile 8) wurden zum Vergleich eingefügt.

Die jeweils angegebene Personenzahl ist in den Unterrichtsräumen und im Lehrerzimmer die Anzahl der Sitzplätze. In den Verwaltungsräumen wurde von jeweils maximal vier Personen ausgegangen.

Im Computerraum der Oststadtschule liegt der tatsächlich gemessene Volumenstrom mit $400 \text{ m}^3/\text{h}$ deutlich unterhalb des berechneten Sollvolumenstroms. Die in den technischen Daten des Gerätes angegebene Luftleistung von $1.300 \text{ m}^3/\text{h}$ wird aufgrund der langen Verrohrung im Raum und des damit verbundenen Druckverlustes und der zum Zeitpunkt der Messung vermutlich mit Staub belegten Luftfilter deutlich unterschritten.

2.2 Teilprojekt II Wohnungen

Werden Gebäude energetisch saniert, beinhaltet dies eine Abdichtung der Gebäudehülle insbesondere im Bereich der Fenster. Die neuen Fenster und Türen selbst sind normalerweise wesentlich winddichter als die alten Fenster. Dadurch wird der Wärmeverlust des Gebäudes durch Konvektion deutlich reduziert. Damit einhergehend bleibt allerdings Luftfeuchtigkeit durch Kochen, Duschen/Baden und Feuchtigkeitsabgabe der Bewohner im Raum und muss durch aktive Maßnahmen aus dem Raum befördert werden. Auch hier gelten die Vorgaben nach DIN 1946 Teil 6 vgl. Abschnitt 1.1. „Für neu zu errichtende oder zu modernisierende Gebäude mit lüftungstechnisch relevanten Änderungen ist ein Lüftungskonzept zu erstellen. Das Lüftungskonzept umfasst die Feststellung der Notwendigkeit von lüftungstechnischen Maßnahmen und die Auswahl des Lüftungssystems. Dabei sind bauphysikalische, lüftungs- und gebäudetechnische sowie auch hygienische Gesichtspunkte zu beachten“.

Eine reine manuelle Fensterlüftung birgt die Gefahr, dass Bewohner nicht regelmäßig lüften und die Feuchtigkeit nicht ausreichend aus dem Raum befördert wird. In Folge dessen kann sich Schimmel bilden, der die Gebäudesubstanz schädigt und aufwendige Sanierungsmaßnahmen zur Folge hat. Außerdem führt Schimmelbildung zu Beeinträchtigungen der Gesundheit der Bewohner und ist auch aus diesem Grund unbedingt zu vermeiden. Dementsprechend besteht bei Vermietern großes Interesse an Maßnahmen, die die Feuchtigkeit aus der Wohnung automatisiert entfernen.

Hierzu wurden bereits vor der Installation von Lüftungsgeräten in 6 Wohnungen in jeweils 2 Räumen Messgeräte zur Erfassung von Temperatur, relativer Feuchte und CO_2 -Konzentration installiert.

2.2.1 Umgesetzte Lüftungsmaßnahmen

An die Lüftungsmaßnahmen werden im Interesse der Bewohner und des Besitzers verschiedene Anforderungen gestellt. So besteht großes Interesse an kostengünstigen, geräusch- und wartungsarmen sowie energieeffizienten Maßnahmen um die Belastung für den Mieter gering zu halten. Außerdem sollen die Geräte Manipulationssicher sein, um unerwünschte Eingriffe durch die Mieter zu verhindern, die den Luftaustausch durch die Lüftungsgeräte reduzieren oder verhindern.

In der Walnußallee 5 – 7 wurden im Zuge der energetischen Sanierung des Gebäudes Abluftgeräte installiert, die zentral die Luft in Küche und Bad absaugen. In den Fenstern der anderen Räume wurden Nachströmöffnungen ZFH 5-35 des Herstellers AERECO (Abb. 2.8) montiert. Diese Geräte öffnen die Nachströmöffnungen in Abhängigkeit von der

Raumluftfeuchte. Die feuchte Luft wird also in den Räumen in denen die meiste Feuchtigkeit entsteht abgesaugt und strömt in den prinzipiell trockeneren Räumen nach. Damit wird vermieden, dass sich die feuchte Luft in der Wohnung verteilt und in anderen Räumen kondensieren kann und dass sich definierte Luftströmungen in der Wohnung einstellen ohne Zuglufterscheinungen zu verursachen. Die Geräte ermöglichen keine Wärmerückgewinnung. Die Messkampagne wurde vor der energetischen Sanierung begonnen und währenddessen sowie danach fortgesetzt. Details können Tab. 2.3 entnommen werden.



Abb. 2.8: Nachströmöffnung an einem Fenster im Wohngebäude Walnussallee 5 - 7

Im Eichenknick 1 - 3 wurden in zwei von drei vermessenen Wohnungen fassadenintegrierte Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung montiert. Die Sanierung des Gebäudes fand bereits vor Beginn der Messungen statt, sodass die Lüftungsgeräte nachträglich in den zuvor vermessenen Räumen eingebaut werden mussten. In einer Wohnung wurden in Küche und Wohnzimmer zwei Lüftungsgeräte mit reversiblen Luftstrom und Keramikscheibe als Wärmespeicher montiert. In der anderen Wohnung kam im Bad ein Gerät mit Wärmeübertrager und separatem Zu- und Abluftventilator zum Einsatz. Im Schlafzimmer konnte aus Platzgründen nicht wie geplant das baugleiche Gerät eingesetzt werden, sondern es wurde ein Gerät wie in der vorher genannten Wohnung verbaut. Genauere Daten können Sie Tab. 2.3 entnehmen.

Tab. 2.3: Daten der in den Wohnungen eingebauten Lüftungsgeräte

Wohnung	Art des Lüftungsgeräts	Hersteller	Typ
Walnussallee 1.	Zentrale Abluftanlage	Systemair	KVO250EC
Walnussallee 2.	Zentrale Abluftanlage	Systemair	KVO250EC
Walnussallee 3.	Zentrale Abluftanlage	Systemair	KVO250EC
Eichenknick 1.	Referenz ohne Lüftungsgerät	-	-
Eichenknick 2.	Zwei Geräte mit Keramikscheibe	Limot	Airodor30
Eichenknick 3.	Ein mit Keramikscheibe Ein mit Kreuzstromwärmetauscher	Limot	Airodor30
		Maico	WRG 35

2.2.2 Auslegung der Lüftungsgeräte

Laut DIN 4108-2 ist ein ausreichender Luftwechsel in Wohnungen gegeben, wenn die Raumluft innerhalb von 2 Stunden komplett ausgetauscht wird. Damit ergibt sich eine Luftwechselrate von 0,5 als Mindestvoraussetzung für die mechanische Raumlüftung um feuchte Luft in ausreichendem Maße aus den Räumen zu entfernen.

Die Luftwechselraten der untersuchten Räume sind zur Anonymisierung in Abschnitt 3.4 angegeben.

3 Messkampagne und Messergebnisse

Ziel der Messkampagne ist es, die Parameter Lufttemperatur, relative Feuchte und CO₂-Konzentration in den Wohnungen und Schulräumen vor und nach Inbetriebnahme der Lüftungsmaßnahmen zu erfassen. Damit wird eine Beurteilung der Lüftungsmaßnahmen hinsichtlich Ihrer Eignung für die Wohnungen bzw. die Sondernutzungsräume möglich.

3.1 Messdatenerfassung

In allen untersuchten Räumen in den Schulen und Wohnungen, werden neben der Raumtemperatur, die relative Feuchte und die CO₂-Konzentration erfasst. Zur Datenerfassung werden HOBO ONS-U12-012 4-Kanal-Miniatur-Datenlogger der Firma Onset verwendet. Dieser Datenloggertyp ist bereits mit Temperatur-, Luftfeuchte- und Helligkeitssensoren ausgestattet. Der Helligkeitssensor wird im Rahmen dieses Projektes nicht aufgezeichnet. Außerdem bietet dieser Datenlogger die Möglichkeit einen externen analogen Sensor anzuschließen.

Zur Erfassung der CO₂-Konzentration der Luft ist jeweils ein EE80 der Firma E+E am Analogeingang des Datenloggers angeschlossen. Dieses Gerät erfasst zusätzlich die Raumtemperatur und die relative Feuchte der Luft und zeigt diese in einem einzeiligen Display an. Temperatur und Feuchte des EE80 sind nicht am Datenlogger angeschlossen. Die Stromversorgung ist durch ein 24 V Netzteil realisiert, wobei der Datenlogger über einen Akku zur Überbrückung von Stromausfällen oder kurzzeitigem Ausstecken des Geräts verfügt. Der Messaufbau ist in Abb. 3.1 zu sehen.



Abb. 3.1: Messaufbau zur Erfassung von Raumtemperatur, relativer Feuchte und CO₂-Konzentration. Links der HOBO-Datenlogger mit integrierten Temperatur- und Feuchtesensoren. Rechts der E+E E80-Sensor mit dem die CO₂-Konzentration erfasst wird, mit Display.

Neben der oben gezeigten Messanordnung wurde auch auf vorhandene Anordnungen zurückgegriffen, die größtenteils aber dieselben Komponenten beinhalten. Im Lehrerzimmer der Oststadtschule wird allerdings statt des E+E-CO₂-Sensors ein Telaire 7001 (siehe Abb. 3.2) eingesetzt. Die Daten der Messgeräte und des Datenloggers können Tab. 3.1 entnommen werden.



Abb. 3.2: Messaufbau zur Erfassung von Raumtemperatur, relativer Feuchte und CO₂-Konzentration. Rechts der HOBO-Datenlogger mit integrierten Temperatur- und Feuchtesensoren. Links der Telaire 7001-Sensor mit Display mit dem die CO₂-Konzentration erfasst wird.

Tab. 3.1: Wichtigste Kenndaten der Messgeräte, die in den Schulen und Wohnungen zum Einsatz kommen.

Messgerät	HOBO ONS-U12-012		EE80	Telaire 7001
	rel. Feuchte	Temperatur	CO ₂	CO ₂
Messbereich	5 % bis 95 %	-20 °C bis 70 °C	0 - 5000 ppm	0 bis 5000 ppm
Messgenauigkeit	± 2,5 %	± 0,35 °C	± 50 ppm + 3 % vom Messwert	± 50 ppm oder 5 % vom Messwert
Auflösung	0,03 %	0,03 °C	1 ppm	1 ppm

In Tab. 3.2 sind die Zeiträume des Messgeräteeinsatzes in den einzelnen Wohngebäuden / Schulräumen dargestellt. In einigen Schulräumen werden keine Lüftungsmaßnahmen eingesetzt. In Kapitel 3.3 werden die Gründe dafür genauer erläutert.

Tab. 3.2: Zeiträume der Messdatenerfassung in den Wohngebäuden und Schulen.

Raum / Gebäude	Beginn Datenerfassung	Inbetriebnahme Lüftungsgeräte	Ende Datenerfassung
Wohnungen			
Walnussallee	18.10.2012	Jan. 2014	17.04.2015
Eichenknick	18.10.2012	Apr. 2014	17.04.2015
Oststadtschule			
Lehrerzimmer	10.07.2012	-	15.04.2016
Sekretariat	10.07.2012	-	16.09.2013
Rektorat	10.07.2012	-	16.09.2013
PC-Raum	11.09.2012	Feb. 2014	15.04.2016
Serverraum	11.09.2012	Feb. 2014	15.04.2016
Werkraum Keller	16.09.2013	-	13.11.2014
PC-Raum Keller	16.09.2013	-	13.11.2014
Theodor-Heuss-Realschule			
Lehrerzimmer	10.07.2012	Jan./Feb. 2014	fortlaufend
Sekretariat	13.09.2012	Mai 2014	fortlaufend
Rektorat	13.09.2012	Mai 2014	fortlaufend
Biologie 300	16.07.2014	08.Dez. 2015	15.04.2016
Biologie 317	-	08.Dez. 2015	fortlaufend

Die Messgeräte mussten je nach den Gegebenheiten vor Ort platziert werden. Folgende Vorgaben wurden dabei versucht einzuhalten.

- Kopfhöhe der Schüler / Lehrer / Bewohner
- Abstand zu den Schülern
- Abstand zu offenbaren Fenstern und Türen
- Nähe zu einer Steckdose zur Stromversorgung des Geräts

Leider konnten in vielen Fällen nicht alle Vorgaben eingehalten werden. Vor allem die Notwendigkeit der Nähe zu einer Steckdose beschränkte die Platzierung stark. Teilweise mussten die Messgeräte über oder unter Kopfhöhe platziert werden oder es konnte nur wenig Abstand zu Türen und Fenstern eingehalten werden. Die Aussagekraft der gewonnenen Messwerte wurde aber nur wenig beeinflusst, da die Messdaten hauptsächlich zwischen vor und nach Inbetriebnahme der Lüftungsgeräte verglichen werden. Es findet also eine relative Auswertung statt, bei der die Randbedingungen wie z.B. der Aufstellungsort der Messgeräte nicht verändert werden.

Im Biologieraum 317 der Theodor-Heuss-Realschule kann auf Messdaten der Gebäudeleittechnik zurückgegriffen werden. In diesem Raum war bereits vor Inbetriebnahme der Lüftungsanlage ein CO₂-Sensor dessen Messdaten über die GLT aufgezeichnet werden vorhanden.

3.2 Messdatenauswertung

Nach dem Auslesen und Konvertieren der Messdaten in ein Textformat werden sie in eine Datenbank geschrieben. Aus dieser Datenbank können sie ausgelesen und mit Hilfe verschiedener LabVIEW-Tools als Verlaufsdiagramme, Carpet-Plots und Dauerlinien dargestellt werden. Die Auswertetools sind größtenteils Eigenentwicklungen der Forschungsgruppe net der Hochschule Offenburg und wurden speziell an die hier im Projekt erfassten Daten angepasst. In Abb. 3.3 ist beispielhaft ein Carpet-Plot der CO₂-Konzentration des Lehrerzimmers der Oststadtschule dargestellt. Im Carpet-Plot wird die Zeitachse auf die X- und Y-Achse aufgeteilt. Auf der Y-Achse ist die Tageszeit aufgetragen und auf der X-Achse die Tage nebeneinander aufgereiht. Die Messwertehöhe ist farblich kodiert. Die Kodierung kann auf der rechts neben dem Plot dargestellten Skala abgelesen werden. Messwerte oberhalb des oberen Grenzwerts (in Abb. 3.3 3.000 ppm) werden weiß dargestellt unterhalb des unteren Grenzwertes (In Abb. 3.3 0 ppm) schwarz. Die Aufteilung der Achse bewirkt, dass immer die gleiche Tageszeit nebeneinander dargestellt wird. Wenn sich die Farbe über einen längeren Zeitraum nicht ändert weist dies auf einen Datenausfall hin. In Abb. 3.3 erscheint ein solcher Zeitraum im November 2014 bis Januar 2015 blau. Täglich zur gleichen Uhrzeit auftretende Ereignisse bilden horizontale Linien. Abweichungen von diesem Muster können sehr leicht erkannt werden. Die Darstellung im Carpet-Plot ermöglicht die übersichtliche und auch detailgenaue Darstellung großer Datenmengen. Die Darstellung der Werte mehrerer Messpunkte in einem Diagramm ist jedoch nicht möglich.

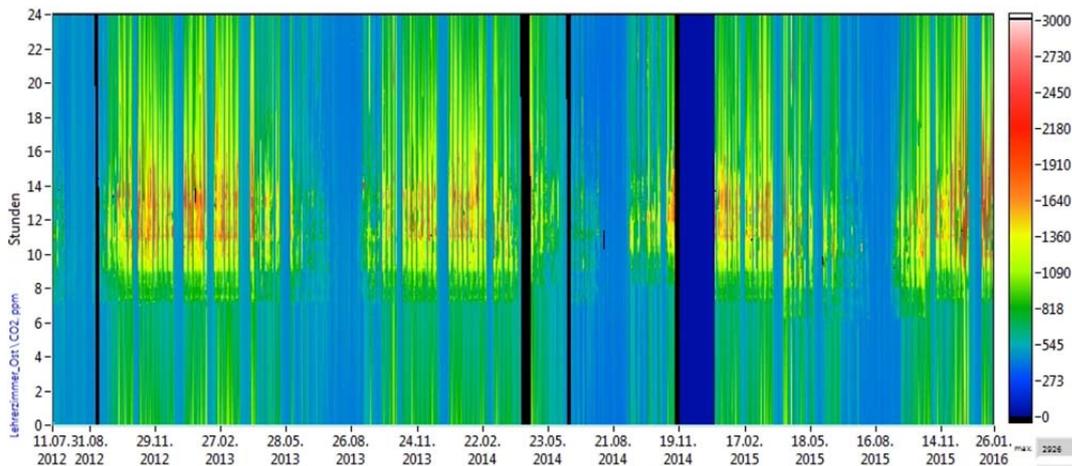


Abb. 3.3: Beispielhafte Darstellung der CO₂-Konzentration in ppm im Lehrerzimmer der Oststadtschule in einem Carpet-Plot.

In Abb. 3.4 sind beispielhaft Messwerte zweier Lehrerzimmer eines Monats in einer Dauerlinie dargestellt. Anhand der Dauerlinie können Messwerte unterschiedlicher Räume einfach und Aussagekräftig verglichen werden. Die Messwerthöhe ist auf der Y-Achse und die Überschreitungsdauer des Messwertes auf der X-Achse dargestellt. Im Beispiel zeigt sich, dass im Lehrerzimmer der Theodor-Heuss-Realschule im dargestellten Zeitraum die CO₂-Belastung höher ist, als im Lehrerzimmer der Oststadtschule. Während 72 % der Zeit im Messzeitraum, liegt die CO₂-Konzentration in der Oststadtschule oberhalb 1.000 ppm. In der THR liegt die Konzentration während 85 % der Zeit im Messzeitraum über 1.000 ppm. Konzentrationen über 2.000 ppm werden in der Oststadtschule fast nie erreicht, in der Theodor-Heuss-Realschule treten diese während 5 % der Zeit im Messzeitraum auf.

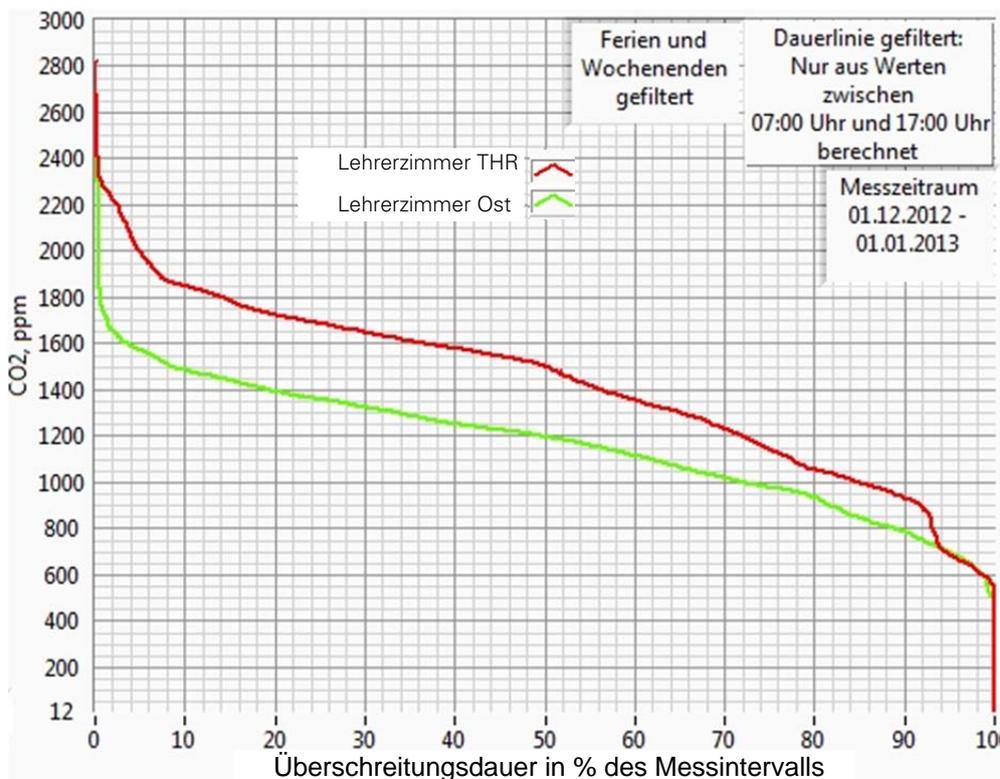


Abb. 3.4: Dauerlinien der Lehrerzimmer der Theodor-Heuss-Realschule und der Oststadtschule im Dezember 2012

Die Darstellung der Messdaten im Verlaufsdiagramm wird als bekannt vorausgesetzt, weshalb an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen wird.

3.3 Messergebnisse Teilprojekt I Schulen

Nachfolgend werden die Messergebnisse der einzelnen Schulräume dargestellt, und die Auswahl der Schulräume sowie die Entscheidung über den Einbau von Lüftungsanlagen erläutert. Außerdem wird der Erfolg der Lüftungsmaßnahmen untersucht. Die Zeiträume der Messungen und der Zeitpunkt der Inbetriebnahme der Lüftungsmaßnahme können Tab. 3.2 entnommen werden. In beiden Schulen sind zentrale Abluftanlagen installiert, die im Zuge des Vorgängerprojekts „Natürliche Gebäudeklimatisierung in Klassenzimmern“ installiert wurden. Ziel dieser Anlagen ist es, die sommerliche Überhitzung der Räume durch Nachtlüftung zu reduzieren. Mit diesen Anlagen kann auch die CO₂-Belastung in Klassenräumen z.B. durch Pausenlüftung reduziert werden. Da dieses Lüftungskonzept aber offene Zimmertüren erfordert, ist eine Lüftung von Sondernutzungsräumen nicht möglich. In den Sondernutzungsräumen muss außerhalb des Unterrichts die Tür geschlossen bleiben, um den unbefugten Zutritt durch Schüler auszuschließen. Daraus ergibt sich der Einsatz von dezentralen Lüftungsmaßnahmen in diesen Räumen.

In

Tab. 3.3 sind die messtechnisch untersuchten Räume und die darin ausgeführten Lüftungsmaßnahmen aufgelistet. In einigen Räumen wurde auf Lüftungsmaßnahmen verzichtet, da die gemessenen CO₂-Werte den Einbau einer Lüftungsmaßnahme nicht anzeigten. In den Kellerräumen der Oststadtschule wurde auf Lüftungsmaßnahmen verzichtet, da die geplante weitere Nutzung als Unterrichtsräume sich während der Messperiode veränderte und seither offen ist.

Tab. 3.3: Übersicht Monitoring und Lüftungsmaßnahmen in den Schulen

Raum	Art der Lüftungsmaßnahme	Messbeginn	Inbetriebnahme Lüftung
Theodor-Heuss-Realschule			
Rektorat	CO ₂ -Ampel	12.09.2012	Mai 2014
Sekretariat	CO ₂ -Ampel	12.09.2012	Mai 2014
Konrektorat	CO ₂ -Ampel		Mai 2014
Lehrerzimmer	Abluftanlage	11.07.2012	Februar 2014
2 Bioräume	Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung	17.07.2014	08.Dezember 2015
Oststadtschule			
Rektorat	-	11.07.2012	-
Sekretariat	-	11.07.2012	-
Lehrerzimmer	-	11.07.2012	-
Computer- / Serverraum	Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung	12.09.2012	März 2014
Werkraum Keller	-	17.09.2013	-
PC-Raum Keller	-	17.09.2013	-

3.3.1 Prinzipielle Beobachtungen in den Schulen

In diesem Kapitel wird auf einige allgemeine Beobachtungen eingegangen, die im Rahmen dieses Projektes gemacht wurden.

Im Carpet-Plot in Abb. 3.5 ist die CO₂-Konzentration im Computerraum der Oststadtschule im Jahr 2013 dargestellt. In diesem Jahr war hier noch kein Lüftungsgerät installiert. Auf den ersten Blick ist bereits zu erkennen, dass hohe CO₂-Konzentrationen hauptsächlich im Winter auftreten. Wegen den niedrigen Außentemperaturen werden im Winter die Fenster nur noch selten geöffnet. In Folge dessen bleibt das CO₂ im Raum und führt sehr schnell zu einer hohen Konzentration von bis zu 5.000 ppm.

Weiterhin ist zu erkennen, dass hohe CO₂-Konzentrationen auch über Nacht nur langsam abklingen. Die CO₂-Konzentration bleibt bis zum nächsten Tag deutlich über der Konzentration der Außenluft. In Folge dessen besteht bei Unterrichtsbeginn am nächsten Morgen bereits eine erhöhte CO₂-Konzentration, die dann während des Unterrichts zu noch höheren Konzentrationen als am Vortag führen kann und teilweise erst am Wochenende auf das Niveau der Außenluft abklingt. Die Tür zum Flur muss in diesem Raum außerhalb des Unterrichts geschlossen bleiben, sodass nur ein geringer Luftwechsel über die Undichtigkeiten in der Fassade und der Tür stattfindet.

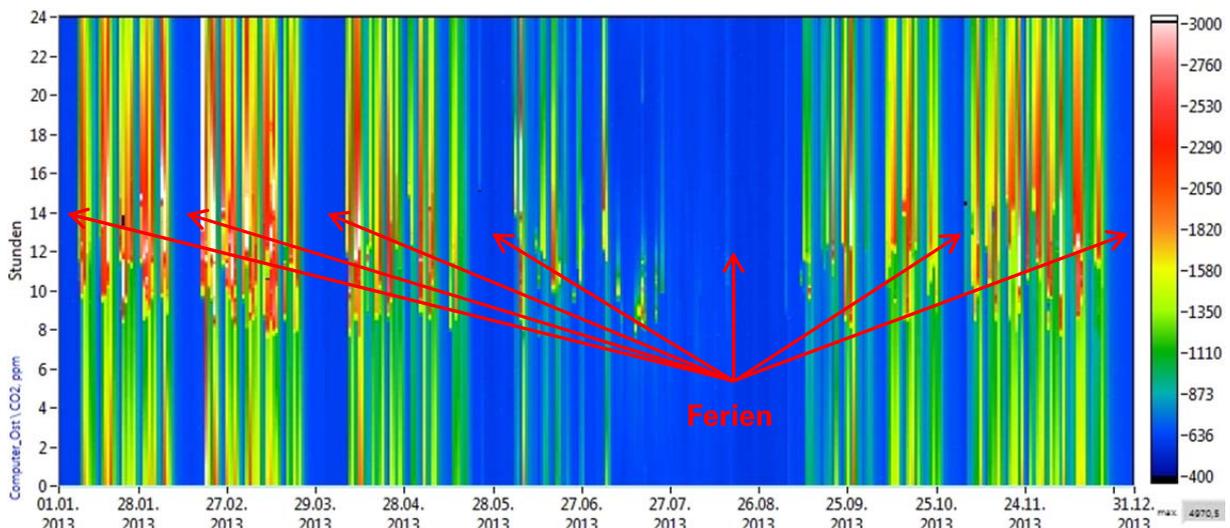


Abb. 3.5: CO₂-Konzentration des Computerraums der Oststadtschule ohne automatische Lüftung

In Abb. 3.6 wurde der CO₂-Verlauf einer Woche als Kurvendiagramm dargestellt, in der die beschriebenen Beobachtungen deutlich zu erkennen sind. Am ersten Tag der Woche steigt die CO₂-Konzentration fast auf 5.000 ppm und bleibt mit fallender Tendenz bis zur nächsten Unterrichtsstunde am nächsten Tag über 2.000 ppm. Während des Unterrichts steigt an diesem Tag die Konzentration wieder bis über 3.000 ppm an und klingt dann auf ca. 1.100 ppm ab. Dieser Verlauf wiederholt sich an den folgenden Tagen in ähnlicher Weise, wobei die Maximal- und Minimalwerte variieren. Teilweise sinkt die CO₂-Konzentration relativ schnell (z.B. am 22.02.2013), was auf eine Fensterlüftung oder offen stehende Tür schließen lässt. Die unterschiedlich hohen Maximalwerte sind dabei auf die variable Schülerzahl pro Klasse und das unterschiedliche Ausgangsniveau zu Unterrichtsbeginn zurückzuführen. Erst am Wochenende (23. und 24.02.) geht Die Konzentration auf den Ausgangswert zurück.

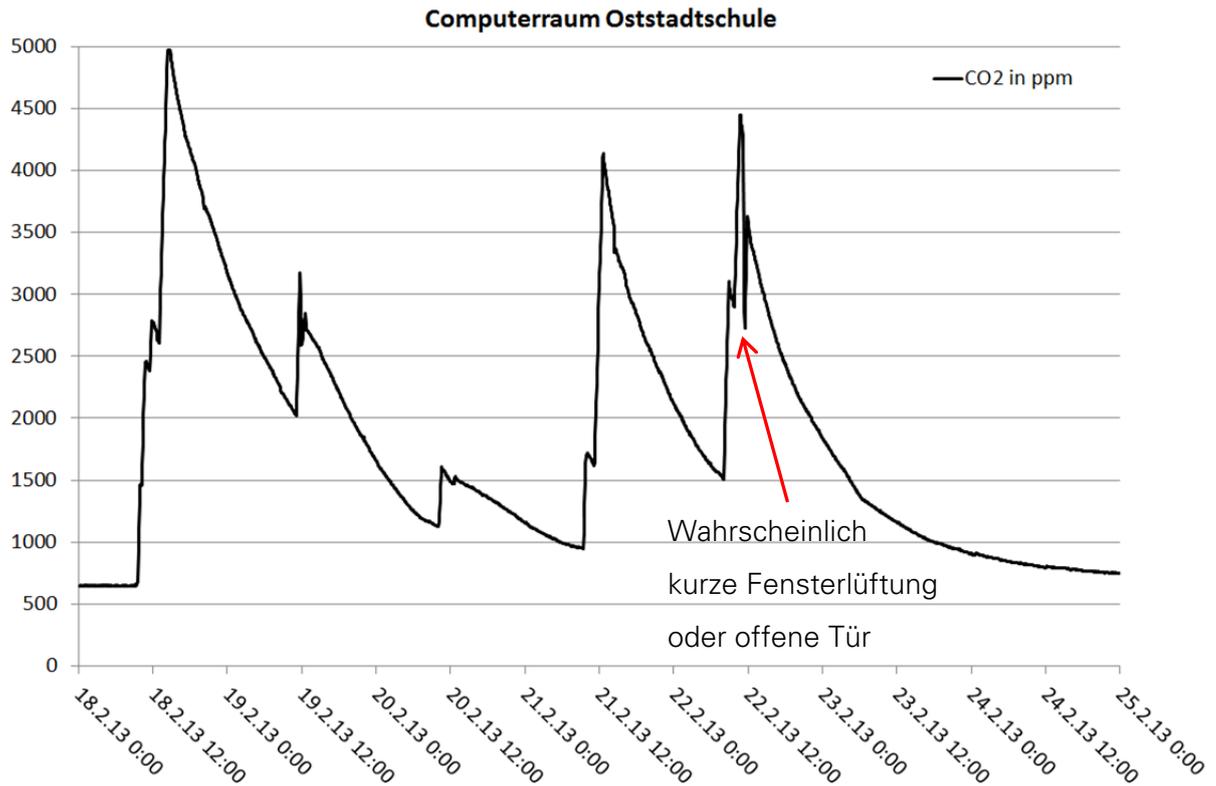


Abb. 3.6: CO₂-Verlauf im Computerraum der Oststadtschule in der Woche vom 18.02.2013 bis 24.02.2013

In Abb. 3.7 ist der CO₂-Verlauf im Lehrerzimmer der Theodor-Heuss-Realschule im Jahr 2013 dargestellt. Auch hier ist zu diesem Zeitpunkt noch keine automatische Lüftung installiert. Die einfarbig blauen und schwarzen Bereiche sind auf fehlende Messdaten bzw. Messfehler in diesen Zeiträumen zurückzuführen.

Hier zeigt sich der für Lehrerzimmer typische Verlauf. An nahezu allen Unterrichtstagen zeigen sich drei bis vier sehr schnelle und kurze Konzentrationsanstiege. Diese treten vor Unterrichtsbeginn, in den Pausen und nach Unterrichtsende auf, wenn sich eine größere Anzahl Lehrer für die Dauer der großen Pausen im Lehrerzimmer aufhält. Während den Unterrichtsstunden, steigt die Konzentration kaum oder geht sogar zurück, da sich nur wenige oder keine Lehrer während des Unterrichts dort aufhalten. Dieses Verhalten ist in Abb. 3.8 im Kurvendiagramm des 17.04.2013 für einen Tag dargestellt. Gut zu erkennen ist der stufige Verlauf der CO₂-Konzentration. Außerdem sind das langsame Abklingen der Konzentration nach Unterrichtsschluss und die bereits erhöhte Konzentration zu Unterrichtsbeginn zu sehen. Im Lehrerzimmer müssen die Türen geschlossen gehalten werden, sodass nur wenig natürlicher Luftwechsel möglich ist.

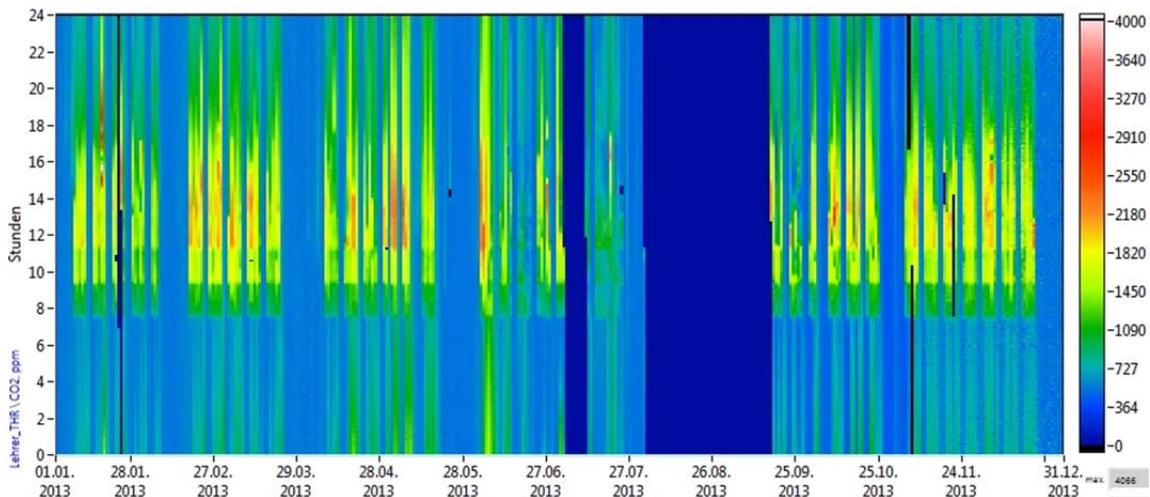


Abb. 3.7: CO₂-Konzentration im Lehrerzimmer der Theodor-Heuss-Realschule im Jahr 2013

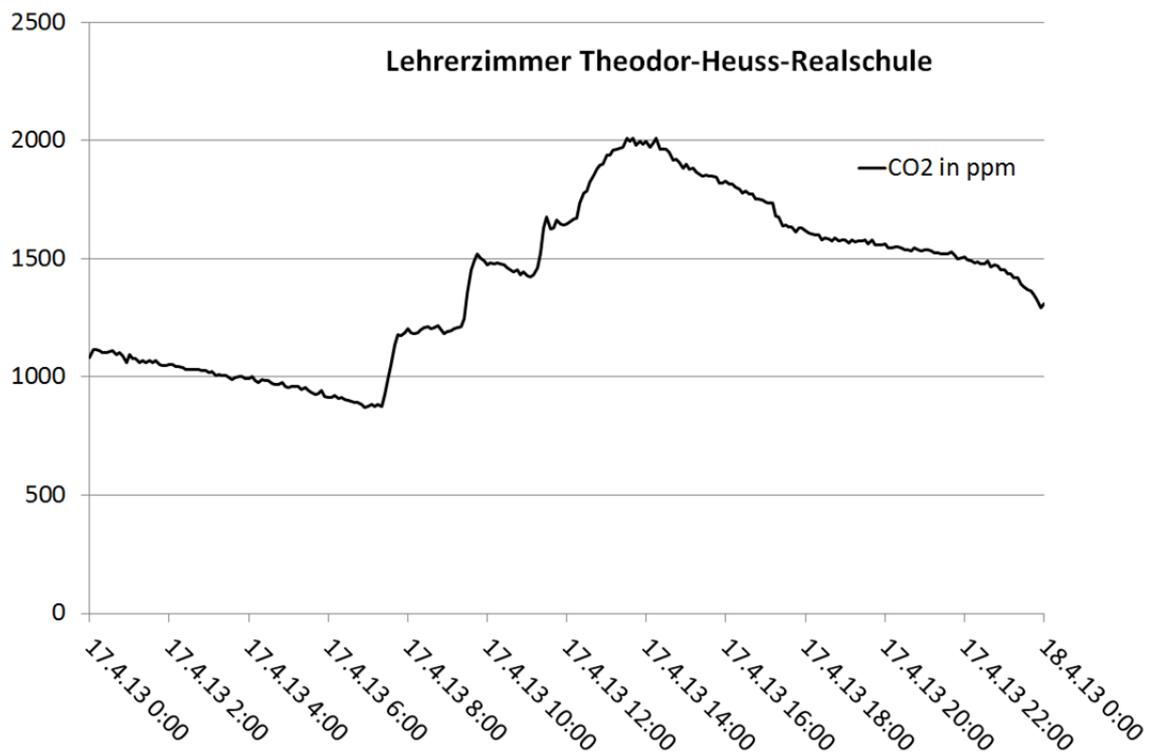


Abb. 3.8: CO₂-Konzentration im Lehrerzimmer der Theodor-Heuss-Realschule am 17.04.2013.

3.3.2 Computer- und Serverraum Oststadtschule

Neben dem Computerraum, in dem hohe CO₂-Konzentrationen vermutet wurden, wurde der daneben liegende Serverraum untersucht, um mit einer Lüftungsanlage dort auftretende sommerliche Temperaturspitzen reduzieren zu können. Diese treten in diesem Raum aufgrund des dort installierten Servers und der Südausrichtung verstärkt auf. Im Sommer 2013 wurden Temperaturen bis 31,7 °C erfasst.

Im Carpet-Plot in Abb. 3.9 zeigt sich, dass im Computerraum sehr häufig sehr hohe CO₂-Werte bis nahezu 5.000 ppm, auftreten wenn, wegen niedriger Außentemperatur, nur ungenügend gelüftet wird. Dementsprechend wurde eine Lüftungsanlage installiert, die auch den Serverraum im Nebenzimmer mit Frischluft versorgt. Die CO₂-Werte im Serverraum bewegen sich fast ausschließlich auf relativ niedrigerem Niveau bis 2.000 ppm. Hohe Werte um 2.000 ppm und darüber sind in diesem Raum vermutlich auf Luftaustausch zwischen Computer- und Serverraum durch die Verbindungstür zurückzuführen.

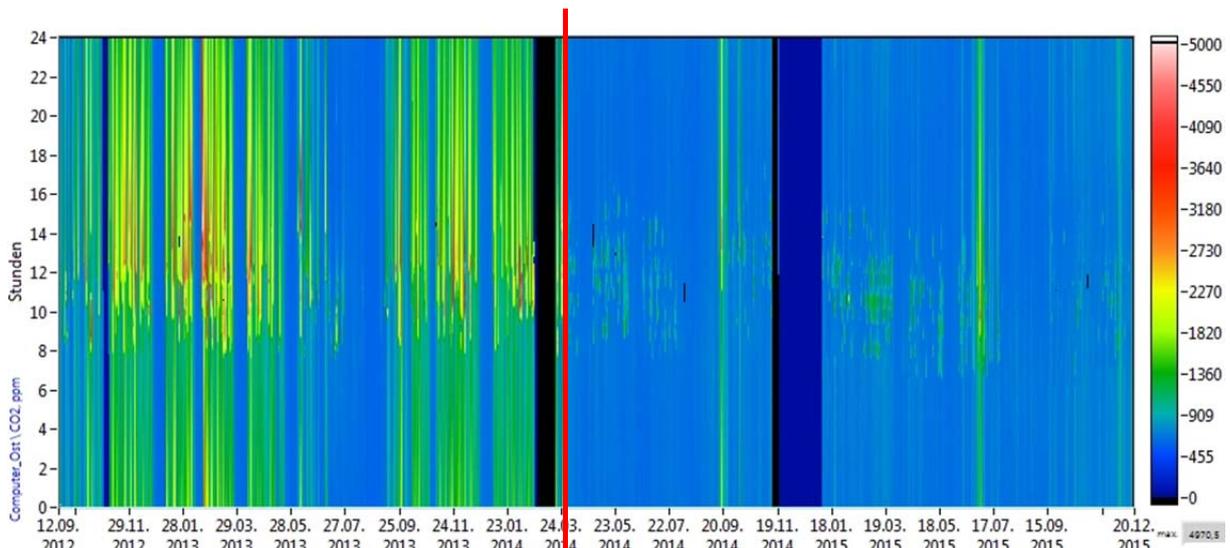


Abb. 3.9: Carpet-Plot der CO₂-Konzentration in ppm im Computerraum der Oststadtschule vom 12.09.2012 bis 20.12.2015. Die rote Linie markiert die Inbetriebnahme der Lüftungsanlage.

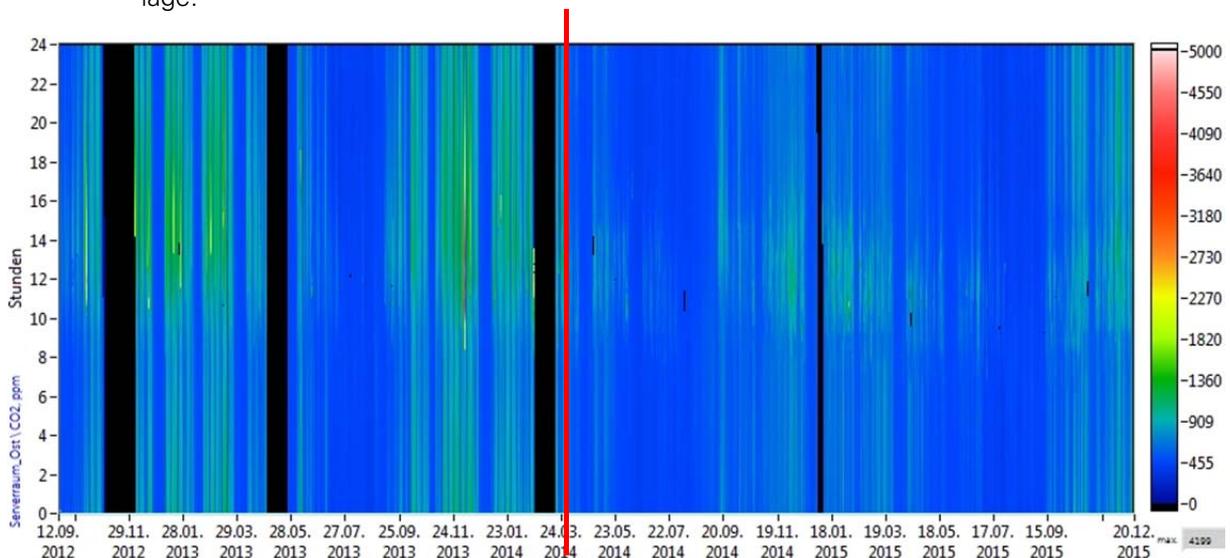


Abb. 3.10: Carpet-Plot der CO₂-Konzentration in ppm im Serverraum der Oststadtschule vom 12.09.2012 bis 20.12.2015. Die rote Linie markiert die Inbetriebnahme der Lüftungsanlage.

In Kapitel 0 Abb. 3.6 wurde bereits im Verlaufsdiagramm gezeigt, wie die CO₂-Konzentration ohne Lüftungsgerät bei ungenügender Fensterlüftung nur langsam abnimmt und bis in den nächsten Tag auf erhöhtem Niveau bleibt.

Nach Inbetriebnahme des Lüftungsgeräts verändert sich die Situation im Computerraum grundlegend (Abb. 3.9 und Abb. 3.11). Die CO₂-Werte steigen meist nur noch bis ca. 1.400 ppm und gehen relativ schnell wieder auf das Ausgangsniveau zurück. Der Vergleich der Dauerlinien vor und nach Inbetriebnahme der Lüftungsanlage (Abb. 3.12) zeigt eine deutliche Verbesserung der CO₂-Situation. Wurden vor Inbetriebnahme des Lüftungsgerätes während 90 % des Messzeitraums Werte über 1.000 ppm erfasst, treten nach der Inbetriebnahme noch während 10 % der Messzeit Werte darüber auf. Werte über 2.000 ppm die vor Inbetriebnahme während 36 % der Zeit im Messzeitraum auftraten treten nachher fast nicht mehr auf. Der Maximalwert von zuvor 5.000 ppm wurde auf ca. 2.250 ppm mehr als halbiert.

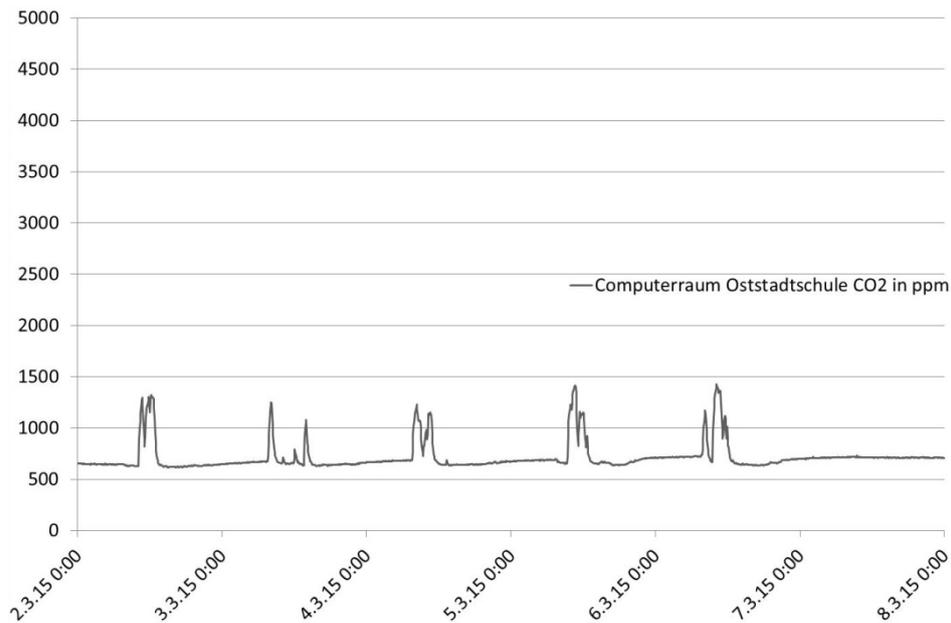


Abb. 3.11: Verlaufsdiagramm der CO₂-Konzentration im Computerraum der Oststadtschule nach Inbetriebnahme des Lüftungsgeräts vom 02.03.2015 – 07.03.2015. Die Skalierung bis 5.000 ppm wurde gewählt um eine bessere Vergleichbarkeit mit Abb. 3.6 zu gewährleisten.

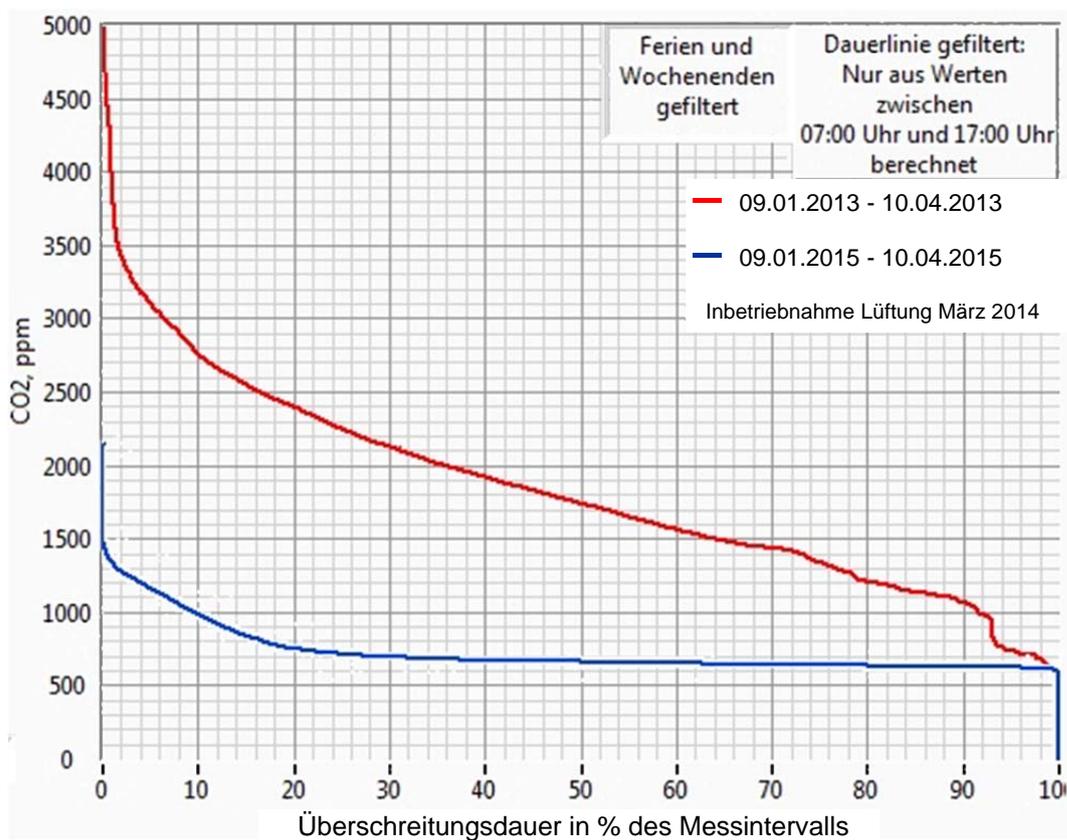


Abb. 3.12: Dauerlinien der CO₂-Konzentration im Computerraum. Die Messwerte wurden gefiltert, sodass nur Messwerte an Schultagen zwischen 7 und 17 Uhr in die Berechnung der Dauerlinien mit einfließen.

Die Nachtlüftung zur Kühlung des Raums bei sommerlicher Überhitzung ist im Regler zwar eingestellt ging bisher aber nicht in Betrieb. Ursache hierfür ist, dass die Außentemperatur im Frischluftkanal erfasst wird und damit nur dann, wenn der zugehörige Lüfter in Betrieb ist, die Außentemperatur korrekt gemessen wird. Aufgrund der Insolvenz des Installationsbetriebes konnte hier bisher der Fehler nicht gefunden werden. Möglicherweise wurde eine Funktion für den Fall, dass der Außentemperaturfühler im Rohr verbaut ist, in der Regelung nicht aktiviert.

3.3.3 Lehrerzimmer

Im Lehrerzimmer der THR wird eine CO₂-Konzentration von 1.000 ppm mit ca. 85 % Überschreitungsdauer häufiger überschritten als in der Oststadtschule mit 75 % Überschreitungsdauer (Abb. 3.13). Der Wert 2.000 ppm wird in der THR während 5 % der Messzeit überschritten. In der Oststadtschule liegt die CO₂-Konzentration fast ausnahmslos darunter. Ursache für diesen Unterschied ist vermutlich, dass in der Oststadtschule während des dargestellten Zeitraums die Türen zum Lehrerzimmer, wenn Lehrer anwesend waren, geöffnet waren. Damit konnte ständig ein Luftaustausch zum Flur stattfinden, der über die zentrale Lüftungsanlage regelmäßig während den Pausen mit frischer Luft versorgt wird. In der THR ist die Tür zur Aula stets geschlossen. Damit bleibt verbrauchte Luft im Raum und wird bei ebenfalls geschlossenen Fenstern kaum ausgetauscht.

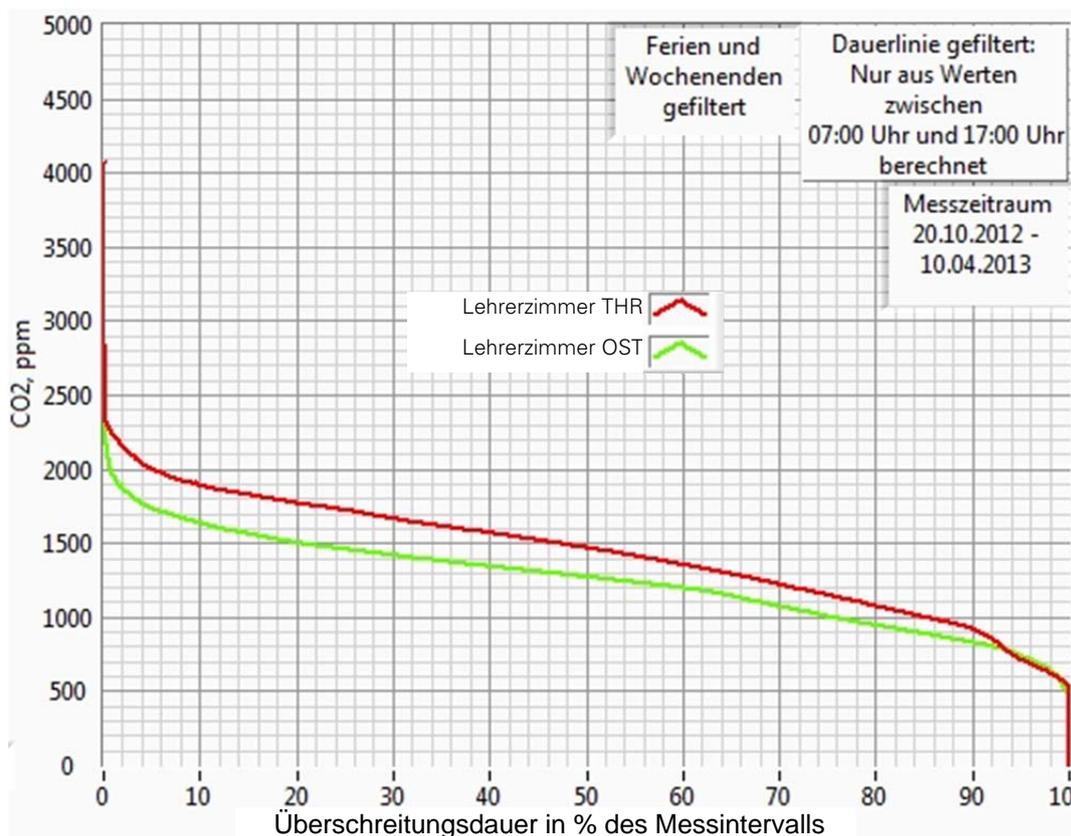


Abb. 3.13: Dauerlinien der CO₂-Konzentration in ppm in den Lehrerzimmern der THR und der Oststadtschule vom 20.10.2012 bis 10.04.2013. Die Messwerte wurden gefiltert, sodass nur Messwerte an Schultagen zwischen 7 und 17 Uhr in die Berechnung der Dauerlinien mit einfließen.

Dementsprechend wurde in der Oststadtschule im Lehrerzimmer keine Lüftungsmaßnahme realisiert.

In der THR wurde wie in Abschnitt 2.1.1 beschrieben die bestehende Abluftanlage regelungstechnisch nachgerüstet. In der Dauerlinie in Abb. 3.14 zeigt sich, dass die Marke von 1.000 ppm nur noch während 70 % der Messzeit überschritten wird, statt vorher während 85 %. Der Wert 2.000 ppm wird nach der Inbetriebnahme nur noch selten überschritten. Der Maximalwert liegt im Zeitraum nach Inbetriebnahme der Lüftungsanlage noch bei ca. 3.300 ppm statt vorher 4.100 ppm. Hier wären noch weitere Verbesserungen möglich, jedoch verhindert der Präsenzmelder den häufigeren Betrieb der Anlage. Dieser verhindert das Einschalten des Lüfters und das Öffnen der Oberlichter, wenn Personen im Raum registriert werden und die Außentemperatur nicht innerhalb eines Temperaturkorridors liegt (siehe Kapitel 2.1.1). Aus Rücksicht auf die Befindlichkeiten der Personen im Raum wurde dieser jedoch aktiviert um Beschwerden wegen Zugluft oder Geräusentwicklung zu vermeiden.

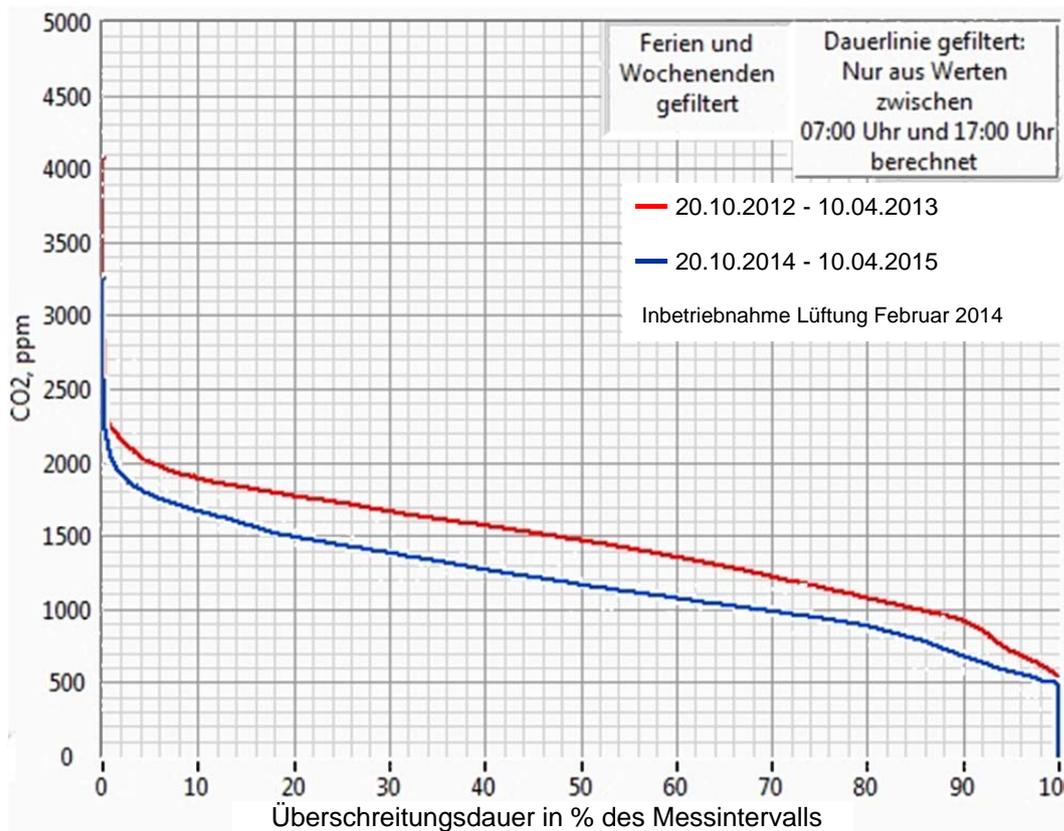


Abb. 3.14: Dauerlinien der CO₂-Konzentration in ppm im Lehrerzimmer THR vom 20.10.2012 bis 10.04.2013 und 20.10.2014 und 10.04.2015. Die Messwerte sind gefiltert, sodass nur Messwerte an Schultagen zwischen 7 und 17 Uhr in die Berechnung der Dauerlinien mit einfließen.

3.3.4 Sekretariate und Rektorate

Ein Vergleich der Dauerlinien der Verwaltungsräume von THR und Oststadtschule (Abb. 3.15) zeigt, dass die Werte in der THR tendenziell höher liegen als in der Oststadtschule. Ursache hierfür ist wie bei den Lehrerzimmern die in der Oststadtschule meist geöffneten Türen zum Flur. Da die CO₂-Werte im Verwaltungsbereich der THR mit max. 2.500 ppm im Rektorat moderat sind, wurden in der THR CO₂-Ampeln installiert, die die Mitarbeiter durch ein farblich kodiertes Signal im Stile einer Verkehrsampel auffordern zu lüften. Zur weiteren Auswertung wurde das Rektorat als der Raum mit den höchsten Werten herangezogen.

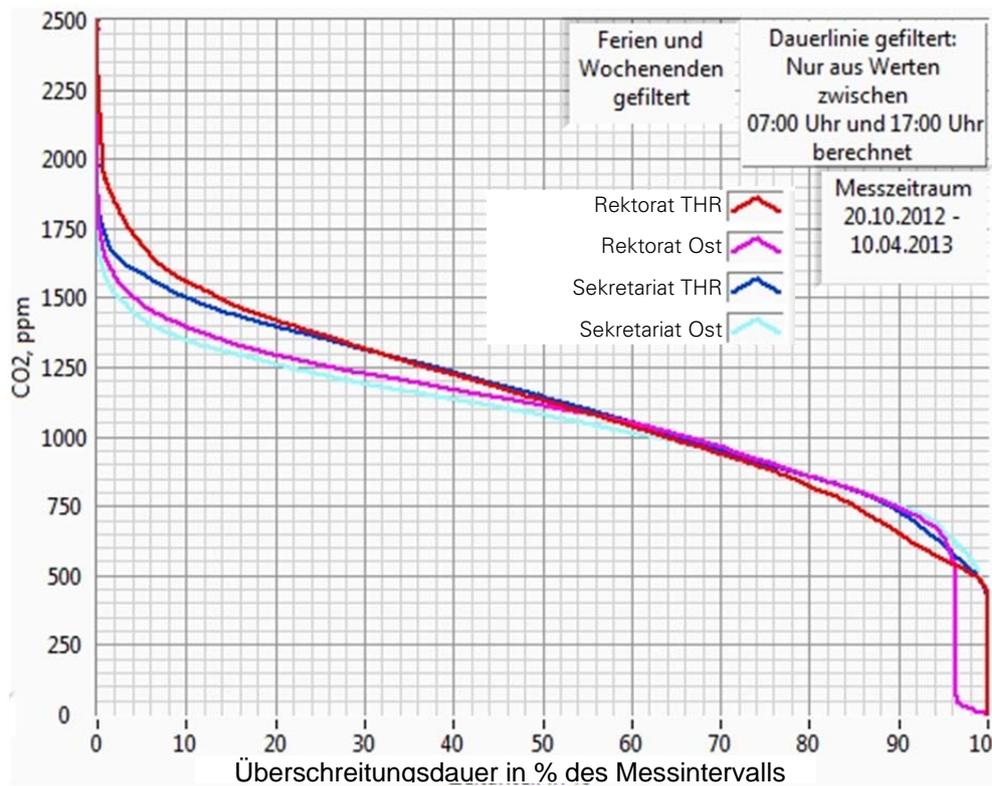


Abb. 3.15: Dauerlinien der Verwaltungsräume Sekretariat, Rektorat und Lehrerzimmer der THR und der Oststadtschule im direkten Vergleich vom 20.10.2012 bis 10.04.2013. Die Messwerte sind gefiltert, sodass nur Messwerte an Schultagen zwischen 7 und 17 Uhr in die Berechnung der Dauerlinien mit einfließen.

Der Vergleich der Dauerlinien vor und nach Installation der Lüftungsampeln in Abb. 3.16 zeigt keinen deutlichen Unterschied, dennoch ist eine Verbesserung der CO₂-Situation sichtbar, die aber auch durch andere Faktoren verursacht sein kann. Da die CO₂-Belastung in diesem Raum bereits vorher deutlich niedriger, als in den anderen untersuchten Räumen war, kann auch keine drastische Reduzierung erwartet werden.

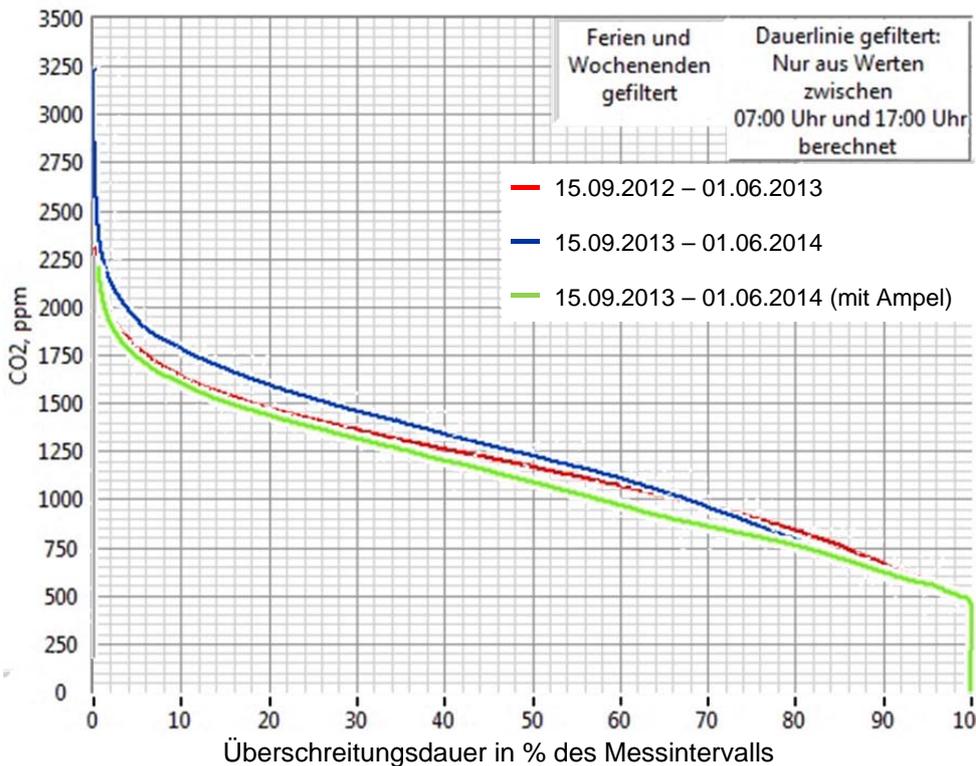


Abb. 3.16: Dauerlinien der CO₂-Konzentration in ppm im Rektorat THR. Die Messwerte sind gefiltert, sodass nur Messwerte an Schultagen zwischen 7 und 17 Uhr in die Berechnung der Dauerlinien mit einfließen.

3.3.5 Kellerräume Oststadtschule

In den Räumen im Untergeschoß der Oststadtschule besteht neben der CO₂-Problematik eine hohe Luftfeuchtigkeit. Diese ist vor allem durch die feuchte Bausubstanz des Kellers verursacht. Versuche diese trockenzulegen erbrachten bisher nicht die beabsichtigte Verbesserung. Außerdem führt feuchte, warme Außenluft, die in den Keller strömt und die Feuchteabgabe der Personen im Raum zu einer Verschärfung des Problems. Feuchte, warme Außenluft kühlt im Keller ab und Wasserdampf kondensiert an den Oberflächen im Raum. Rost an Werkzeugen und Einrichtungsgegenständen war eine der Folgen. In den Kellerräumen sind deshalb Trocknungsgeräte aufgestellt, die die relative Feuchte der Raumluft begrenzen sollen. Die Betriebszeit der Geräte ist auf außerhalb der Unterrichtszeiten beschränkt, um Lärmbelästigungen zu vermeiden.

In Abb. 3.17 und Abb. 3.18 wird deutlich, dass speziell im Technikraum 007 hohe CO₂-Werte vorliegen, die wie bereits in den zuvor betrachteten Räumen nur langsam abklingen, wenn der Raum wieder frei ist. Die Konzentration steigt bis über 3.000 ppm. 1.000 ppm werden während 37 % und 2.000 ppm während 7 % der Unterrichtszeit überschritten.

Abb. 3.19 zeigt den Verlauf der relativen Feuchte ebenfalls im Technikraum. Hier zeigt sich, dass speziell im Sommer hohe Feuchtwerte bis 65 % rH auftreten, die ohne die Trocknungsgeräte sehr wahrscheinlich noch deutlich höher wären. Außerdem wird in Abb. 3.20 deutlich, dass während des Unterrichts die relative Feuchte parallel zur CO₂-Konzentration ansteigt. Die Schüler arbeiten im Raum körperlich und geben damit viel Wasserdampf an die Raumluft ab. Damit steigt die relative Feuchte stark an und wird nach Unterrichtschluss durch das Trocknungsgerät wieder abgebaut.

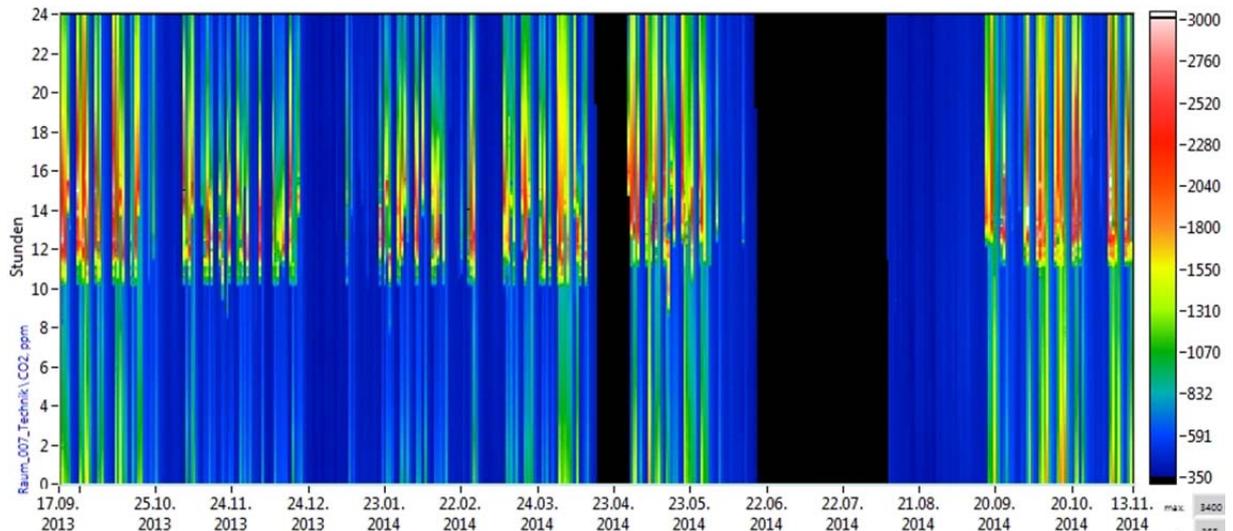


Abb. 3.17: Carpet-Plot der CO₂-Konzentration in ppm im Technikraum im Keller der Oststadtschule vom 17.09.2013 bis 12.11.2014.

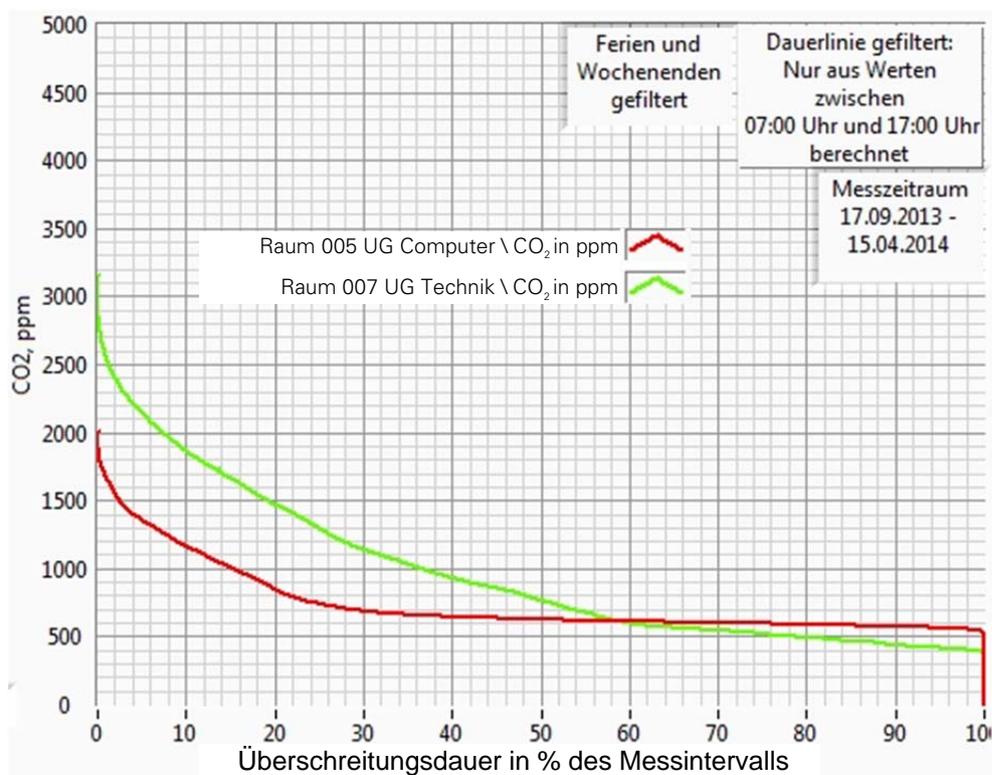


Abb. 3.18: Dauerlinien der CO₂-Konzentration in ppm im Technik- und Computerraum im Keller der Oststadtschule vom 17.09.2013 bis 15.04.2014. Die Messwerte wurden gefiltert, so dass nur Messwerte an Schultagen zwischen 7 und 17 Uhr in die Berechnung der Dauerlinien mit einfließen.

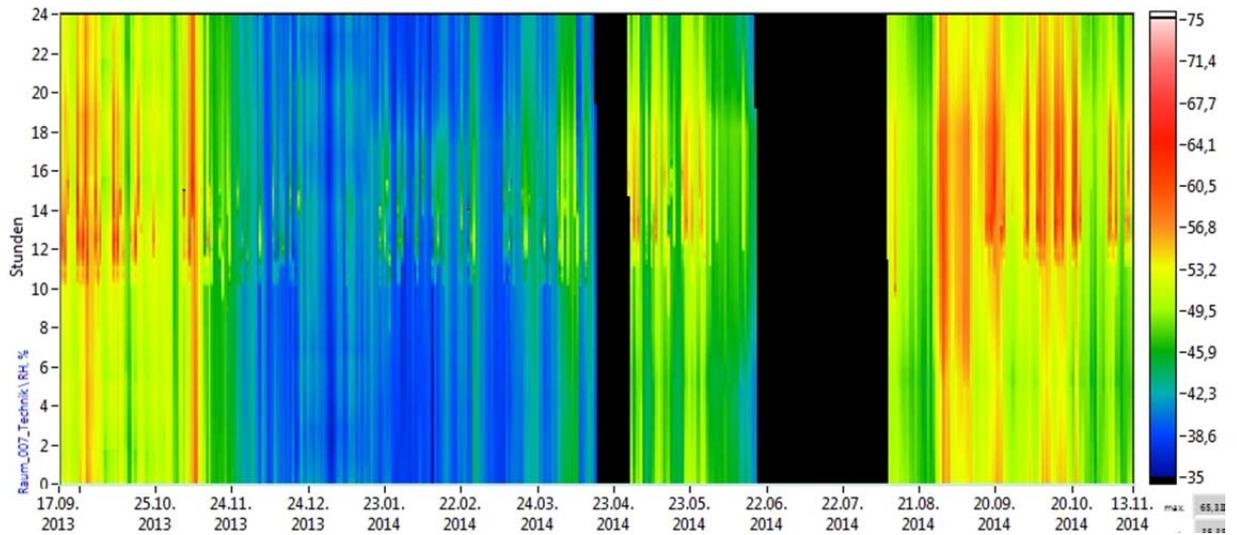


Abb. 3.19: Carpet-Plot der relativen Feuchte in % im Technikraum im Keller der Oststadtschule vom 17.09.2013 bis 12.11.2014.

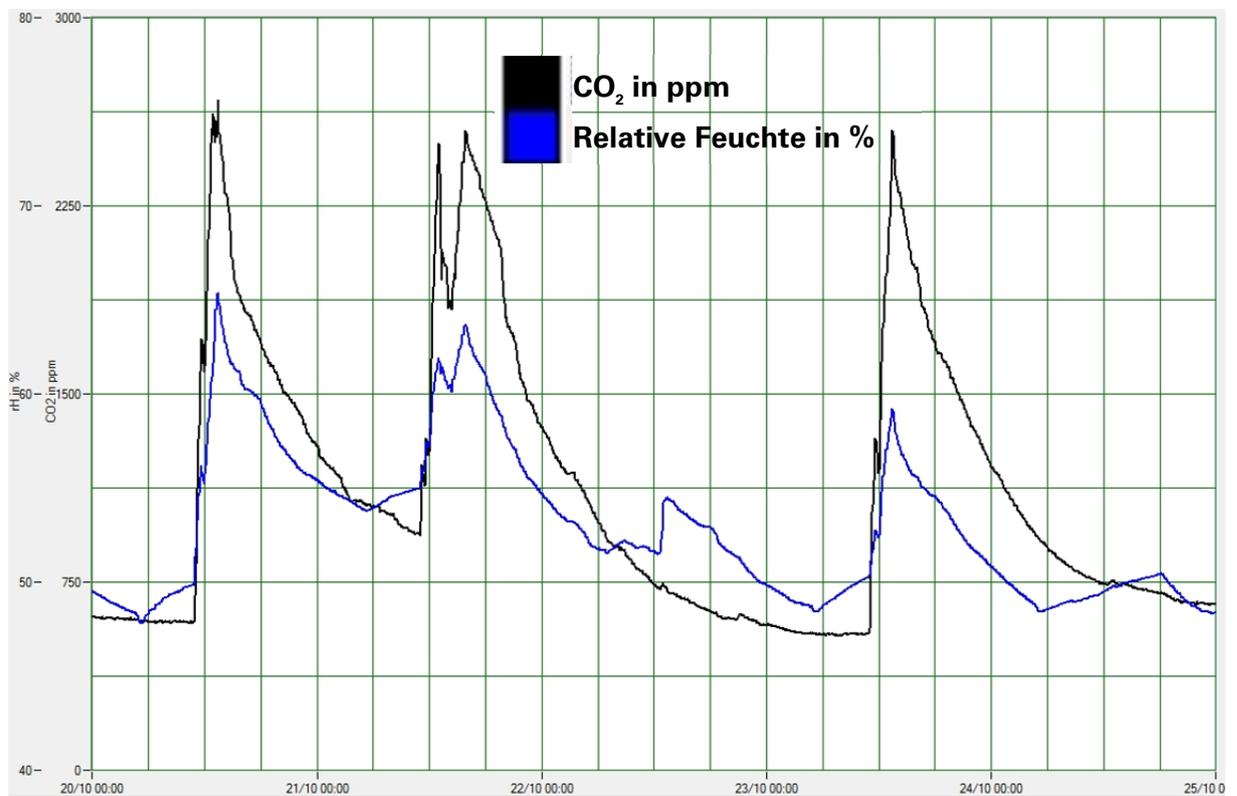


Abb. 3.20: Verlaufsdiagramm der CO₂-Konzentration in ppm und der relativen Feuchte im Technikraum im Keller der Oststadtschule vom 20.10. bis 25.10.2013.

Der Einfluss der Trocknungsgeräte auf die relative Feuchte der Raumluft wird in Abb. 3.21 deutlich. Im Computerraum 005 ist kein Trocknungsgerät installiert. Dementsprechend fallen die relativen Feuchtwerte speziell im Sommer 2014 mit bis zu 76 % relative Feuchte deutlich höher, als im Technikraum 005 aus.

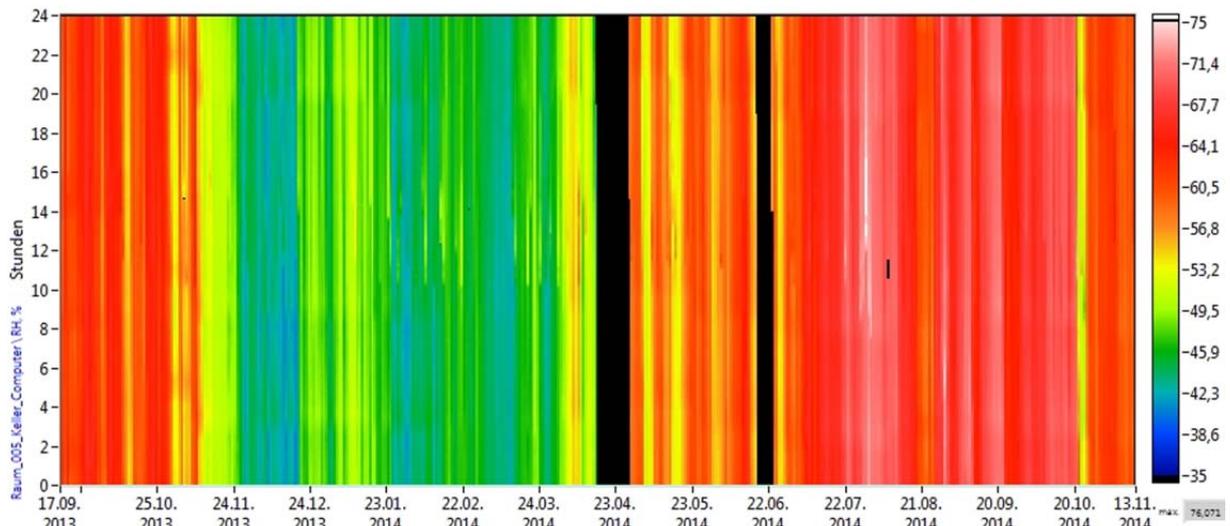


Abb. 3.21: Carpet-Plot der relativen Feuchte in % im Computerraum im Keller der Oststadtschule vom 17.09.2013 bis 12.11.2014.

Das geplante Ziel einer Lüftungsmaßnahme in den Kellerräumen wäre neben der Reduzierung der CO₂-Belastung eine Reduzierung der relativen Feuchte gewesen. Der energieintensive Einsatz der Trocknungsgeräte sollte ebenfalls durch die Lüftungsmaßnahme ersetzt werden.

Aufgrund der besonderen Situation in Kellerräumen, in denen vor allem im Sommer häufig eine niedrigere Temperatur vorliegt als in der Außenluft, wäre hier eine aufwendigere Regelung als bei oberirdischen Klassenräumen notwendig. Eine einfache Erfassung der CO₂-Konzentration der Raumluft wäre nicht ausgereicht. Zusätzlich ist eine Erfassung der Feuchtebelastung in g Wasserdampf/kg Luft bzw. des Taupunktes der Außen- und Raumluft notwendig. Damit kann sichergestellt werden, dass nur dann gelüftet wird, wenn die Außenluft eine geringere Feuchtebelastung, als die Raumluft aufweist. Mit diesem Regelkonzept wird ein Feuchteeintrag von außen in den Keller und damit nicht nur eine Erhöhung der relativen Feuchte vermieden sondern ein Austrag der Luftfeuchte möglich. Ein einfacher Abgleich der relativen Feuchte von Außen- und Raumluft ist, wegen der im Keller häufig niedrigeren Raumtemperatur, nicht ausreichend und würde zu Feuchteeintrag führen.

Die Entscheidung gegen den Einbau einer Lüftungsanlage in diesen Räumen wurde aufgrund der unklaren weiteren Nutzung der Räume im Untergeschoss im Kontext der weiteren Schulentwicklung getroffen.

3.3.6 Biologieräume Theodor-Heuss-Realschule

Im Verlauf des Projektes stellte sich heraus, dass in den ausgewählten Räumen teilweise keine automatische Lüftungsanlage sinnvoll eingesetzt werden kann (Keller- und Verwaltungsräume Oststadtschule). Gründe hierfür sind eine geringe CO₂-Belastung oder die nicht absehbare weitere Nutzung der Räume.

Als Ersatz für diese Räume wurden deshalb die beiden Biologieräume R300 und R317 der Theodor-Heuss-Realschule in das Messprogramm aufgenommen.

In R317 waren bereits vor Messbeginn CO₂-, Temperatur- und Feuchtesensor in die Gebäudeleittechnik (GLT) integriert. Deshalb wurde nur in R300 der in Abb. 3.1 gezeigte Messaufbau installiert. Abb. 3.22 und Abb. 3.23 zeigen den Verlauf der CO₂-Konzentration vor und nach Einbau der Lüftungsgeräte in diesen beiden Sondernutzungsräumen. In beiden Räumen ist nach Inbetriebnahme der Lüftungsgeräte eine deutliche Verbesserung der CO₂-Situation erkennbar. Hohe Werte über 2.000 ppm werden nur noch selten und

nur in R300 erreicht. Solch hohe Werte werden nur dann erreicht, wenn über den Schalter am Lehrerpult das Lüftungsgerät bis Ende der Unterrichtsstunde deaktiviert wird. Diese Möglichkeit wurde eingerichtet, um das Lüftungsgerät bei Geräuscentwicklungen oder Zuglufterscheinungen deaktivieren zu können. Die Deaktivierung über den Schalter wird automatisch bei Pausenbeginn wieder zurückgesetzt. Dadurch wird gewährleistet, dass zumindest während den Pausen die verbrauchte Luft ausgetauscht wird.

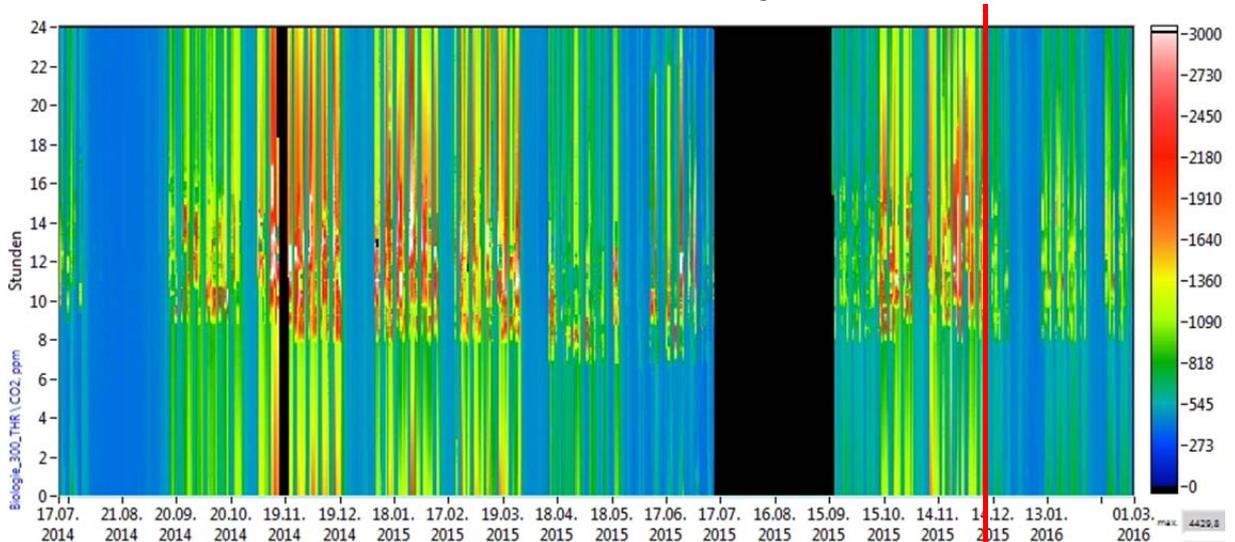


Abb. 3.22: Carpet-Plot der CO₂-Konzentration in ppm im Biologieraum R300 der Theodor-Heuss-Realschule vom 17.07.2014 bis 29.02.2016. Die rote Linie markiert die Inbetriebnahme des Lüftungsgerätes.

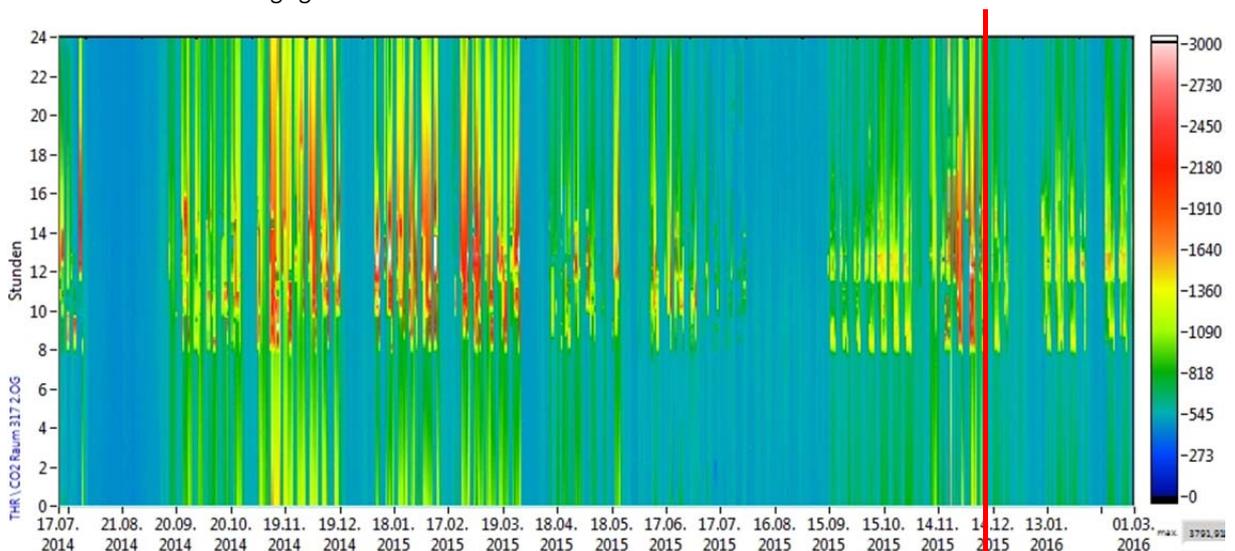


Abb. 3.23: Carpet-Plot der CO₂-Konzentration in ppm im Biologieraum R317 der Theodor-Heuss-Realschule vom 01.10.2013 bis 29.02.2016. Die rote Linie markiert die Inbetriebnahme des Lüftungsgerätes.

In Abb. 3.24 Ist anhand des Statussignals zu erkennen, dass das Lüftungsgerät zwischen 10:20 Uhr und 11:10 Uhr ausgeschaltet war. Da zu diesem Zeitpunkt sehr wahrscheinlich Unterricht in diesem Raum stattfand, stieg die CO₂-Konzentration in diesem Zeitraum bis zum Wiedereinschalten der Anlage steil an und fiel dann ebenso schnell wieder auf den Ausgangswert zurück.

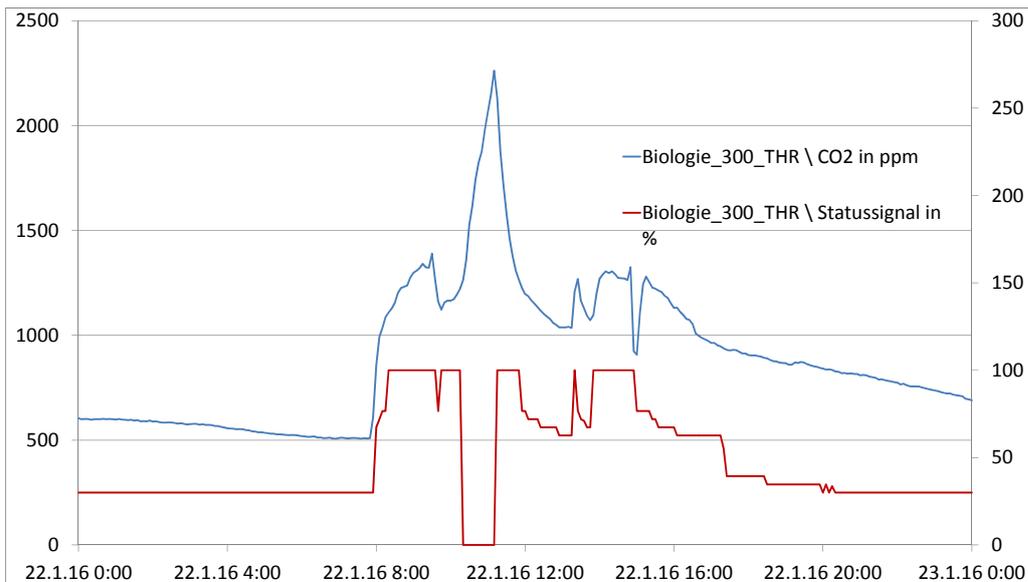


Abb. 3.24: Verlaufdiagramm der CO₂-Konzentration und des Statussignals im Biologieraum 300 THR.

In Abb. 3.25 sind die Messdaten für beide Biologieräume für jeweils zwei Zeiträume als Dauerlinien aufbereitet. Die gestrichelten Linien stellen dabei einen Zeitraum nach und die durchgezogenen Linien vor Inbetriebnahme der Lüftungsgeräte dar. Deutlich zu sehen ist eine Verringerung der CO₂-Belastung nach Inbetriebnahme der Lüftungsgeräte. Die Messdaten wurden entsprechend der Einblendung im Bild gefiltert, sodass nur Zeiten für die Auswertung berücksichtigt wurden in denen potentiell Unterricht stattfindet.

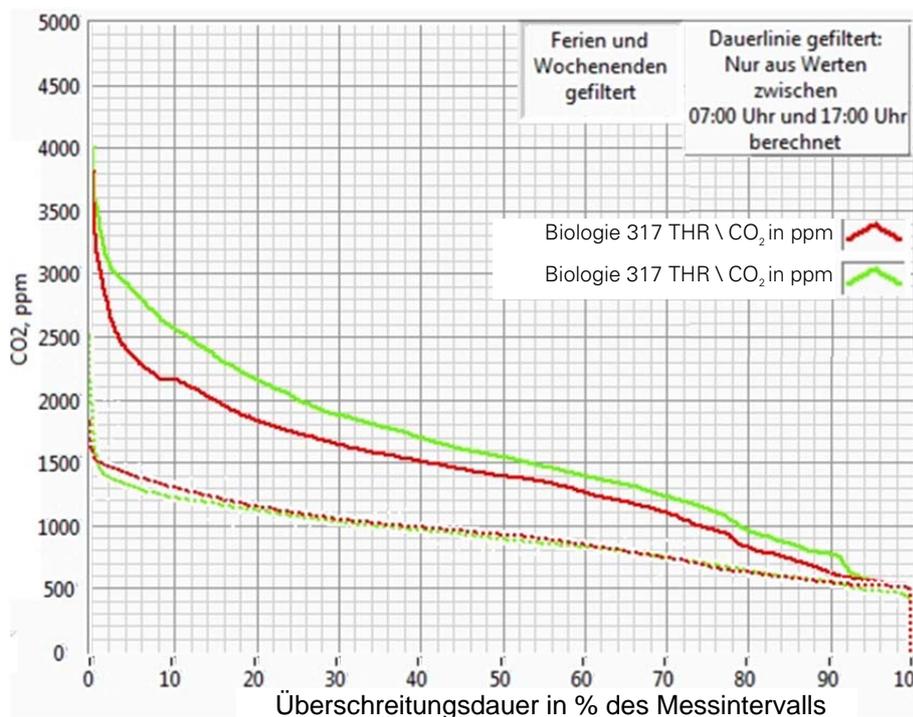


Abb. 3.25: Dauerlinien der CO₂-Konzentration in ppm in den beiden Biologieräumen der THR vom 09.12.2014 bis 01.03.2015 (durchgehende Linien, vor Inbetriebnahme Lüftung) und 09.12.2015 bis 01.03.2016 (gestrichelte Linien, nach Inbetriebnahme Lüftung).

3.3.7 Hygieneuntersuchungen

Teil des Projekts ist auch eine Hygieneinspektion gemäß VDI 6022 an den Lüftungsgeräten mit Wärmerückgewinnung, da hier im Wärmetauscher, an den inneren Geräteoberflächen und an den Filtern sich Mikroben wie Pilze und Bakterien festsetzen und vermehren können.

Vom Umweltinstitut synlab wurde an allen im Rahmen dieses Projektes in den Schulen installierten Lüftungsgeräten Abklatschproben an Wärmetauschern, Ventilatoren, Gehäuseinnenseite und Filtermatten genommen. Zusätzlich wurde ein Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung in der Konrad-Adenauer-Schule auf dessen Hygiene untersucht. Dieses Gerät wurde 2011 installiert und wurde zu Vergleichszwecken in die Untersuchungen mit aufgenommen. Außer den Abklatschproben wurden Luftkeimmessungen in der Außenluft und an den Zuluftventilen der Lüftungsgeräte durchgeführt.

An allen Geräten mit Wärmerückgewinnung wurden dabei Keimbelastungen an mindestens einem der beprobten Geräteteile im grenzwertigen oder hygienisch unzureichenden Bereich festgestellt. Die Zahl der Kolonien bildenden Einheiten pro m³ Zuluft lag allerdings bei nahezu allen Geräten unterhalb der Zahl der Außenluft. Nur beim Lüftungsgerät in der Konrad-Adenauer-Schule wurde eine höhere Keimbelastung der Zuluft gemessen als in der Außenluft. Hier wird auf eine Verkeimung des Zuluftkanalsystems geschlossen, da die beprobten Bauteile des Lüftungsgerätes keine hygienischen Mängel aufwiesen. Die Probenahme fand ca. 3 Jahre nach Inbetriebnahme des Gerätes statt. Damit werden aufgrund der Luftfilterung in den Geräten mit einer Ausnahme weniger Keime in den Raum eingetragen als bei Abluftgeräten bei gleicher Luftwechselrate ohne Filterung oder bei Fensterlüftung.

Das Lüftungsgerät im Computerraum der Oststadtschule wies hygienische Mängel im Bereich des Heizregisters auf. Die Probenahme fand hier ca. sechs Monate nach Inbetriebnahme des Gerätes statt.

An den Geräten in den Biologieräumen der THR wurden an beiden Geräten an den Gehäuseinnenwänden grenzwertige Messergebnisse festgestellt. Die beiden Geräte waren zum Zeitpunkt der Messungen erst sehr kurz in Betrieb, dennoch konnten sich schon Keime ansiedeln.

An der Lüftungsanlage im Lehrerzimmer der THR wurden keine Abklatschproben genommen. Das Abluftgerät mit regelungstechnisch gekoppelten Oberlichtern bietet der Zuluft keine Oberflächen, an denen sich Kondenswasser niederschlagen könnte. Deshalb wurden lediglich Luftkeimmessungen mit und ohne Lüftung im Vergleich zur Außenluft durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die Zahl der Kolonien bildenden Einheiten der Bakterien sowohl mit als auch ohne Lüftung oberhalb der Außenluft liegt. Mit Lüftung wurde aber eine geringere Anzahl ermittelt als ohne. Die Lüftungsanlage war vor der Probenahme mit Lüftungsgerät nur wenige Augenblicke in Betrieb. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass bei längerem Betrieb weiter Keime ausgetragen werden und die Anzahl sich dem Niveau der Außenluft annähert.

Das Hygieneinstitut empfiehlt im Inspektionsbericht zu jedem Gerät, welche Stellen im Gerät gereinigt und desinfiziert werden müssen und welche Umbaumaßnahmen an den fabrikneuen Geräten durchzuführen sind, um einen hygienischen und technisch sicheren Betrieb gemäß VDI 6022 zu gewährleisten. Der Hersteller kommt in einer Stellungnahme zum Hygienebericht zu einer abweichenden Beurteilung setzt jedoch inzwischen veränderte Beschichtungen im Produktionsprozess ein.

Damit kann festgehalten werden, dass bei Geräten mit Wärmerückgewinnung die Reinigungs- und Filterwechselintervalle eingehalten werden müssen um einen einwandfreien, hygienisch unbedenklichen Betrieb zu gewährleisten. Außerdem sind Hygieneinspektio-

nen gemäß VDI 6022 durchzuführen, um den hygienischen Betrieb zu überprüfen und zu dokumentieren. Abluftanlagen wie im Lehrerzimmer der THR führen zu einer Reduzierung der Keimbelastung im Raum. Luftkeimzahlen, die sich bei geschlossenen Fenstern erhöhen, können durch die Lüftung abgeführt werden.

3.3.8 Nutzerzufriedenheit

Zur Überprüfung der Auswirkungen der Lüftungsgeräte auf die Lehrer und Schüler und deren Zufriedenheit damit, wurden Fragebögen erstellt, die an die Lehrer ausgehändigt wurde. Darin wurden Fragen zum Lüftungsverhalten, zur Zufriedenheit mit den Lüftungsgeräten und zur subjektiven Einschätzung von Veränderungen durch die Geräte gestellt. Dieser Punkt wurde zusätzlich zum beantragten Projektumfang bearbeitet, da sich im Projektverlauf zeigte, dass die Nutzerzufriedenheit von entscheidender Bedeutung für die erfolgreiche Umsetzung von Lüftungsmaßnahmen ist. Die Lüftungsgeräte in den Biologieräumen der THR sind mit einem Schalldruckpegel von < 35 dB(A) angegeben. 30 – 40 dB(A) entsprechen dem üblichen häuslichen Hintergrundschall am Ohr [9].

Für das Abluftgerät im Lehrerzimmer liegen leider keine Daten vor. Der Lüfter selbst ist hier auf dem Dach installiert, sodass der größte Teil der Geräuschemissionen außerhalb des Raumes entsteht. Dennoch ist der Lüfter im Raum zu hören.

Das Gerät im Computerraum der Oststadtschule selbst ist mit einem Gehäuseabstrahlwert von 45 dB (A) angegeben. Durch die Installation im Nebenraum und den Einbau von Schalldämpfern sind die Geräusche des Gerätes im Unterrichtsraum nur wenig hörbar.

Lehrerzimmer Theodor-Heuss-Realschule

In der THR haben sich an der Befragung zum Lehrerzimmer 16 Personen beteiligt. In Tab. 3.4 sind die einzelnen Ergebnisse der Befragung aufgeführt.

Eine Veränderung der Luftqualität seit Automatisierung der Anlage wurde nur von 3 Personen bemerkt. Die Luftqualität wird nach Inbetriebnahme mit der durchschnittlichen Schulnote 3,1 (vor Inbetriebnahme 3,5) nur geringfügig besser eingeschätzt.

Im Vergleich zu anderen Unterrichtsräumen wird die Luftqualität im Lehrerzimmer von 10 Personen als etwas oder viel besser eingeschätzt, nur von einer Person als etwas schlechter.

Hinsichtlich Geräuschentwicklung wird die Lüftungsanlage nur von 2 Personen als störend empfunden. Eine Person hat hier als Kommentar eingefügt, "weil dauernd während einer Konferenz auf und zu". Dies kann auftreten, wenn Konzentrationen über 2.000 ppm auftreten und dann auch bei anwesenden Personen gelüftet wird. Hier kann von den Nutzern durch Übersteuern des Lüftungsgerätes am Bedienpanel im Lehrerzimmer Abhilfe geschaffen werden. Nur eine Person hat Geräusche von außen bemerkt, die nun verstärkt eindringen. Gerüche wurden nach Inbetriebnahme der Regelung von einer Person weniger wahrgenommen.

Insgesamt 5 Personen haben das händische Lüftungsverhalten seither verändert. Eine Person hat angegeben, dass die Fenster nun weniger geöffnet werden.

Eine Verbesserung des körperlichen Wohlbefindens hat niemand bemerkt und die Behaglichkeit wird als besser (2 Personen) oder gleich (13 Personen) eingeschätzt. Mit der Anlage eher zufrieden sind 10 Personen eher unzufrieden 2. Bedenken gegenüber dem Einsatz von Lüftungsanlagen hat keine der befragten Personen. Andere störende Einflüsse durch die Lüftungsanlage werden nicht angegeben.

Tab. 3.4: Einzelergebnisse der Befragung der Lehrer zu Ihren Erfahrungen vor und nach Inbetriebnahme der Automatisierung des Lüftungsgerätes im Lehrerzimmer THR

Frage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Ergebnis
1. Haben Sie eine Veränderung der Luftqualität seit der Automatisierung der Lüftungsanlage bemerkt?	n	n	n	j	n	n	n	n	n	n	n	j	n	n	j	n	3 Ja 13 Nein
2. Wie schätzen Sie die Luftqualität im Lehrerzimmer vor dem oben genannten Termin (Automatisierung der Lüftungsanlage) in Schulnoten von 1 – 6 ein	2	4		5	3	2		3	3	3	4	4		5	4	3	3,5
Kommentar zu 2.			schlechte Luft				kann nicht einschätzen		In den Klassenzimmern ist häufig sehr schlechte Luft								
3. Wie schätzen Sie die Luftqualität im Lehrerzimmer <u>nach</u> dem oben genannten Termin (Automatisierung der Lüftungsanlage) in Schulnoten von 1 – 6 ein	2	4		3	3	2		3	3	3	4	3	4	4	2	3	3,1
Kommentar zu 3.			gelegentlich schlechte Luft				kann nicht einschätzen										
4. Wie schätzen Sie die Luftqualität im Lehrerzimmer nach dessen Einbau im Vergleich zu anderen Unterrichtsräumen ohne Lüftungsgerät ein?	2	0		1	1	1			1	1		1	1	1	1	-1	1 viel besser 9 etwas besser 1 etwas schlechter

Kommentar zu 4.							kann nicht einschätzen										
5. Wird die Lüftungsanlage von Ihnen als störend hinsichtlich Geräuschentwicklung empfunden?	n	n	n	n	n	n	n	n	j	n	n	n	n	j	n	n	2 Ja 14 Nein
Kommentar zu 5.			gelegentlich						weil dauernd während einer Konferenz auf und zu								
6. Wird die Lüftungsanlage von Ihnen störend hinsichtlich Zugerscheinungen empfunden?	n	n	n	n	j	n	n	n	n	n	n	n	n	j	n	n	2 Ja 14 Nein
7. Haben Sie Geräusche bemerkt, die durch die Lüftungsanlage nun verstärkt in den Raum eindringen?	n	n	n	n	n	j	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	1 Ja 15 Nein
8. Dringen durch die Lüftungsgeräte, im Vergleich zu vor dem Einbau, verstärkt Gerüche von außerhalb in den Raum ein?	0	0		0	0	-1	0	0	0	0		0	0	0	0	0	13 gleich 1 weniger
Kommentar zu 8.			nicht bemerkt														
9. Haben Sie das Lüftungsverhalten durch händisches öffnen der Fenster seither verändert?	n	n	j	j	n	n	j		n	n	n	n	j	n	j	n	5 Ja 10 Nein
Kommentar zu 9.				Fenster werden weniger geöffnet													

10. Haben Sie Veränderungen bei sich selbst seit Einbau der Lüftungsgeräte bemerkt (z.B. bessere Konzentration, weniger Kopfschmerzen usw.)?	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	15 Nein
11. Wie zufrieden sind Sie mit der Lüftungsanlage / den Lüftungsgeräten allgemein?	1	-1		1	1	1		1	1	1	1	-1	1	1		-1	10 eher zufrieden 2 eher unzufrieden
Kommentar zu 11.							kann nicht einschätzen										
12. Haben Sie Bedenken gegenüber dem Einsatz von Lüftungsgeräten im Lehrerzimmer?	n	n		n	n	n	n		n	n	n	n	n	n	n	n	14 Nein
13. Die Behaglichkeit hat sich durch den Einbau der Lüftungsanlage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		1	0	0	1	0	2 besser 13 gleich
14. Gibt es andere störende Einflüsse durch das Lüftungsgerät und die sich öffnenden Fenster	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	16 Nein
15. Weitere Anmerkungen																	In bestimmten Räumen wird es Sommers zu heiß zum Arbeiten

Damit kann festgehalten werden, dass die Lüftungsanlage insgesamt relativ neutral eingeschätzt wird, was sehr wahrscheinlich an der bewusst nutzerfreundlichen Regelung liegt, die nur dann den Lüfter einschaltet und die Fenster öffnet, wenn niemand im Raum ist. Dementsprechend wird die Lüftung vermutlich kaum wahrgenommen. Nachteil dieser Einschränkung des Lüftungsbetriebs ist, dass die Luftqualität nur in geringerem Umfang verbessert werden kann, als es ohne diese Einschränkung möglich wäre. Dennoch wird auf eine hohe Nutzerzufriedenheit großen Wert gelegt um deren Akzeptanz zu erhöhen.

Biologieräume Theodor-Heuss-Realschule

An der Umfrage zu den Lüftungsgeräten in den Biologieräumen haben sich 7 Personen beteiligt (Tab. 3.5).

Eine Veränderung der Luftqualität seit Inbetriebnahme der Lüftungsanlagen wurde hier von 5 Personen bemerkt und die Luftqualität hat sich nach dem Empfinden der Befragten deutlich von Schulnote 3,9 auf 2,6 verbessert. Im Vergleich zu anderen Unterrichtsräumen wird die Luftqualität von 6 Personen als besser bis viel besser eingeschätzt. Nur eine Person hat keinen Unterschied bemerkt.

Hinsichtlich Geräuschentwicklung wird die Lüftungsanlage von 4 Personen als störend empfunden. Durch Zugluft fühlen sich alle Befragten von der Lüftungsanlage gestört. Von 2 Personen wurden auch Geräusche bemerkt, die nun durch das Gerät verstärkt eindringen. Weniger eindringende Gerüche wurden von 2 Personen bemerkt.

An dieser Anlage wurde um Störungen des Unterrichts zu vermeiden ein Taster am Lehrerpult angebracht. Diesen kannten bei der Befragung nur 3 Personen.

Das Lüftungsverhalten wurde von 3 Personen als verändert angegeben. Bei den Schülern und sich selbst, hat nur eine Person bei sich selbst eine Verbesserung des körperlichen Wohlbefindens registriert und fühlt sich nun weniger müde und konzentrierter. Die Behaglichkeit in den Räumen hat sich nach Ansicht von 2 Personen verbessert und von 3 Personen verschlechtert. 2 Personen empfinden keine Veränderung.

Ob es andere störende Einflüsse durch das Lüftungsgerät gibt hat eine Person mit „Zugluft im Genick“ beantwortet und eine weitere mit „es ist zu kalt“ was vermutlich auch auf ein Zugluftempfinden zurückzuführen ist.

Insgesamt 4 Personen sind mit den Geräten eher zufrieden 3 eher unzufrieden. Bedenken gegenüber dieser Technik hat nur eine Person.

In einem der beiden Biologieräume ist das Lüftungsgerät so installiert, dass die Zuluft direkt vor dem Lehrerpult zu Zuglufterscheinungen führt. Für diesen Fall wurde der Taster zum Ausschalten des Gerätes installiert. Leider war dieser nur einem Teil der Lehrer bekannt und wurde deshalb nur wenig genutzt. Es wird davon ausgegangen, dass nachdem die Lehrer über diese Möglichkeit die Lüftung auszuschalten informiert sind auch die Beurteilung in den entsprechenden Punkten besser ausfallen würde.

Als Schlussfolgerung kann festgehalten werden, dass durch die Lüftungsanlagen negative Auswirkungen auf die Personen im Raum auftreten, die aber durch ausschalten der Anlage vermieden werden können. Um auf die Möglichkeit, die Lüftungsgeräte temporär ausschalten zu können besser hinzuweisen, wird mit der Begrüßungsmappe, die den Lehrern bei Dienstantritt an der Schule ausgehändigt wird, ein Informationsblatt zu der Anlage ausgehändigt und ein Aushang im Lehrerzimmer angebracht.

Tab. 3.5: Einzelergebnisse der Befragung der Lehrer zu Ihren Erfahrungen vor und nach Inbetriebnahme der Automatisierung des Lüftungsgerätes in den Biologieräumen der THR

	1	2	3	4	5	6	7	
1. Haben Sie eine Veränderung der Luftqualität seit Einbau der Lüftungsanlage bemerkt?	n	n	j	j	j	j	j	2 Nein 5 Ja
2. Wie schätzen Sie die Luftqualität im Raum mit Lüftungsgerät vor dessen Einbau in Schulnoten von 1 – 6 ein	3	3	3	4	4	5	5	3,9
3. Wie schätzen Sie die Luftqualität im Raum mit Lüftungsgerät <u>nach</u> dessen Einbau in Schulnoten von 1 – 6 ein	3	3	2	2	2	4	2	2,6
4. Wie schätzen Sie die Luftqualität im Raum mit Lüftungsgerät nach dessen Einbau im Vergleich zu anderen Unterrichtsräumen ohne Lüftungsgerät ein?	0	1	2	1	1	1	1	1 viel besser 5 besser 1 kein Unterschied
5. Wird die Lüftungsanlage von Ihnen oder den Schülern als störend hinsichtlich Geräuschentwicklung empfunden?	j	n	n	j	n	j	j	4 Ja 3 Nein
6. Wird die Lüftungsanlage von Ihnen oder den Schülern als störend hinsichtlich Zugescheinungen empfunden?	j	j	j	j	j	j	j	7 Ja 0 Nein
7. Haben Sie Geräusche bemerkt, die durch die Lüftungsanlage nun verstärkt in den Raum eindringen?	n	n	j	n	n	j	n	2 Ja 5 Nein
8. Dringen durch die Lüftungsgeräte, im Vergleich zu vor dem Einbau, verstärkt Gerüche von außerhalb in den Raum ein?	0	0	-1	0	-1	0	0	5 gleich 2 weniger
9. Kennen Sie den Schalter am Lehrerpult mit dem das Lüftungsgerät temporär ausgeschaltet werden kann?	n	n	n	n	n	j	n	1 Ja 6 Nein
10. Haben Sie das Lüftungsverhalten über die Fenster seit Einbau der Lüftungs-	n	n	j	n	j	n	j	3 Ja 4 Nein

anlage verändert?								
11. Haben Sie Veränderungen bei den Schülern seit Einbau der Lüftungsgeräte bemerkt (z.B. bessere Konzentration, weniger Klagen über Kopfschmerzen usw.)?	n	n	n	n	n	n	n	0 Ja 7 Nein
12. Haben Sie Veränderungen bei sich selbst seit Einbau der Lüftungsgeräte bemerkt (z.B. bessere Konzentration, weniger Kopfschmerzen usw.)?	n	n	n	n	n	n	j	1 Ja 6 Nein
wenn ja inwiefern:							weniger Müdigkeit, mehr Konzentration	
13. Wie zufrieden sind Sie mit der Lüftungsanlage / den Lüftungsgeräten allgemein?	-1	1	1	-1	1	-1	1	4 eher zufrieden 3 eher unzufrieden
14. Haben Sie Bedenken gegenüber dem Einsatz von Lüftungsgeräten in Schulräumen?	n	n	n	n	n	j	n	1 Ja 6 Nein
15. Die Behaglichkeit hat sich durch den Einbau der Lüftungsanlage	-1	0	-1	1	1	0	-1	2 verbessert 2 gleich geblieben 3 verschlechtert
16. Gibt es andere störende Einflüsse durch die Lüftungsgeräte	n	n	j	n	n	n	j	2 Ja 5 Nein
wenn ja welche:			Zugluft ins Genick				Es ist zu kalt	
17. Weitere Anmerkungen	Durch Zugserscheinungen Hals-schmerzen				In Raum 300 zieht es vor dem Pult	Zugserscheinung im Bereich des Lehrerpults ist extrem hoch, man kann sich dort nicht aufhalten ohne sich eine Erkältung zu holen		

Rektorat, Konrektorat, Sekretariat Theodor-Heuss-Realschule

Zu den Erfahrungen der Nutzer in den Büroräumen Rektorat und Sekretariat der THR zu den CO₂-Ampeln wurde kein Fragebogen erstellt, sondern mit Einverständnis der betreffenden Personen die Erfahrungen im Gespräch am 01.03.2016 erörtert. Das Protokoll dieser Besprechung finden Sie nachfolgend.

Gesprächsprotokoll zur CO₂-Ampel

Datum: Montag 01.03.2016,

Gegenstand: Erfahrungen mit CO₂-Ampeln in den Büros im Verwaltungsbereich der THR

Im Büro des Rektors, des Konrektors und im Sekretariat sind je eine Lüftungsampel aufgehängt, die in Abhängigkeit von der gemessenen CO₂-Konzentration ein farblich codiertes Signal, von grün über gelb bis rot, mit jeweils zwei Anzeigestufen, ausgibt. Die Ampeln wurden in allen Räumen unter der Decke installiert. Die BesprechungsteilnehmerInnen wurden von Herrn Huber zu Ihren Erfahrungen mit den Ampeln befragt.

Folgende Erfahrungen wurden berichtet:

- Die Ampeln werden, wenn es das Tagesgeschäft zulässt, beachtet und die Fenster bei roter Anzeige geöffnet.
- Auf die Fensteröffnung wird im Sekretariat im Winter verzichtet, wenn die Mitarbeiterin am Fenster im Raum ist, um Zugluft für sie zu vermeiden.
- Die Mitarbeiterinnen im Sekretariat sitzen einander gegenüber. Die Platzierung der Ampel im Sekretariat im Rücken der einen Sekretärin ist nicht optimal, da sie nicht im Blickfeld dieser Mitarbeiterin ist. Besser wäre bei der Tür oder bei der Uhr, da der Blick öfter dort hin fällt und die Ampel dann wahrgenommen wird.
- Gegenüber einer automatisierten Lüftungsanlage gibt es Bedenken wegen möglicher Geräusentwicklung. Aus diesem Grund wurde im Verwaltungsbereich auf die Installation einer Lüftungsanlage verzichtet.
- Bei der Beurteilung der Behaglichkeit des Raumklimas gibt es unterschiedliche Einschätzungen. Eine Person sieht keinen Unterschied zu vor Installation der Ampeln. Eine Person sieht eine Verbesserung auf Grund des guten Gefühls, das mit der aktiven Fensterlüftung verbunden ist. (Man tut etwas für das eigene Wohlbefinden).
- Störende Einflüsse durch die manuelle Lüftung, wie Geräusche oder Gerüche von draußen werden nicht wahrgenommen. Vor den Fenstern des Verwaltungsbereichs ist Rasen mit Bäumen und ein Fußweg in einigen Metern Entfernung.

Insgesamt wurde die Installation der Lüftungsampel als sehr positiv empfunden, da die Mitarbeiter selbst über Dauer und Zeitpunkt der Lüftung entscheiden können. Die Anzeige wird als Aufforderung zur Lüftung und nicht als Bevormundung empfunden. Außerdem werden negative Einflüsse wie störende Geräusche oder Hygieneprobleme durch ein Lüftungsgerät selbst von vornherein ausgeschlossen.

Die Zufriedenheit mit den CO₂-Ampeln ist sehr hoch, obwohl regelmäßige Aktionen der Nutzer (Fenster öffnen) erforderlich sind. Die Nutzer begrüßen das hohe Maß an Entscheidungsfreiheit ohne durch eine Automatisierung des Lüftungsvorgangs „bevormundet“ zu werden und negative Auswirkungen erdulden zu müssen. Mit einer automatischen Lüftungsanlage wäre sicherlich eine deutlichere Verbesserung der CO₂-Situation möglich, hätte aber neben höheren Kosten auch eine verringerte Nutzerakzeptanz zur Folge.

Computerraum Oststadtschule

Für den Computerraum der Oststadtschule wurde ebenfalls ein Fragebogen entwickelt, der weitgehend identisch ist mit dem Fragebogen für die Biologieräume der THR. Leider erklärte sich keiner der Raumnutzer bereit den Fragebogen auszufüllen. Der Computerraum wird seit einiger Zeit nicht mehr als solcher, sondern nur noch sporadisch als Ausweichraum genutzt. Dementsprechend liegen auch kaum Erfahrungswerte mit dem automatisch belüfteten Raum vor, bzw. diese sind bei den Nutzern nicht mehr präsent.

Aus den Erfahrungen in den Biologieräumen der THR heraus wurde geprüft, ob bei dem Lüftungssystem in der Oststadtschule auch Zugerscheinungen zu erwarten sind. Unter ungünstigen Umständen ist vorstellbar, dass an Sitzplätzen neben dem Quellauslass Zug empfunden wird (Abb. 2.3). An allen anderen Orten im Raum ist die Geschwindigkeit der Luft bereits soweit reduziert, dass keine Zugerscheinungen zu erwarten sind.

Auch hinsichtlich Geräusentwicklung wurde geprüft, ob Störungen zu erwarten sind. Da das Lüftungsgerät selbst im Nebenraum installiert ist, entstehen lediglich am Quellauslass sehr leise Geräusche durch die Luftströmung.

3.3.9 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen (Kosten- Nutzenvergleich)

Für die in den Schulen umgesetzten Lüftungskonzepte sind die in Tab. 3.6 aufgelisteten Kosten entstanden. In den Kosten sind neben den reinen Anlagenkosten, die Kosten für Montage, Nebenarbeiten (z.B. Kernbohrungen) und Planung enthalten.

Es zeigt sich eine sehr große Bandbreite bei den Kosten, die sich aufgrund der sehr unterschiedlichen Lüftungskonzepte ergibt.

Die Lüftungsampeln in den Büroräumen der THR sind die mit 420,19 € pro Ampel mit großem Abstand günstigste Variante. Neben den Hardwarekosten fallen lediglich Kosten für die Montage der CO₂-Ampel und evtl. eine Steckdose in Reichweite der Ampel an. Die Kosten hierfür sind sehr von den örtlichen Gegebenheiten abhängig und werden hier auf 100 € geschätzt. Zum Auslesen des Datenloggers wird einmalig die zugehörige Software HOBOWare Pro zum Preis von ca. 118 € benötigt. Die Montage beschränkt sich auf das Anbringen eines Nagels oder einer Schraube an der Wand zum Aufhängen. An Betriebskosten fallen Stromkosten bei 0,25 €/kWh für max. 17,5 kWh/a (vgl. Kapitel 3.3.10) in Höhe von ca. 4,40 €/a an. Außerdem ist gelegentlich der jährliche Wechsel der Batterie (2 €) im Datenlogger notwendig. Für die mit CO₂ gering belasteten Büroräume der THR, sind die CO₂-Ampeln, u.a. aufgrund der hohen Nutzerzufriedenheit eine kostengünstige, leicht umsetzbare und bedarfsgerechte Alternative zu automatisierten Lüftungsgeräten. Nachteilig wirkt sich hier allerdings aus, dass bei jeder Fensterlüftung immer viel warme Luft an die Umgebung verloren geht und der Raum bei zu langer Lüftung auskühlt. Dieses Problem besteht in gleichem Maße auch ohne CO₂-Ampel. Im Sommer zeigt sich der umgekehrte Effekt, es wird bei jedem Lüftungsvorgang zusätzliche Wärme in den Raum eingetragen. Außerdem wird die CO₂-Konzentration nur in geringerem Maße, als mit automatisierten Lösungen gesenkt. Inwiefern CO₂-Ampeln in Unterrichtsräumen geeignet sind, war nicht Bestandteil dieses Projektes.

Die Kosten für die Einbindung der Abluftanlage der THR in die Gebäudeleittechnik (GLT) mit 1.217,23 € haben nur eine geringe Aussagekraft. Die Kosten für den Lüfter, die Fensterantriebe, den Präsenzmelder und die benötigten Temperaturfühler sowie der Einbau dieser Geräte sind nicht enthalten. Allerdings würden die Kosten dieses Anlagentyps incl. der bereits vorhandenen Anlagenbestandteile sehr wahrscheinlich günstiger ausfallen als bei einem Gerät mit Wärmerückgewinnung. An Betriebskosten fallen hier Stromkosten für ca. 130 kWh/a (siehe Kapitel 3.3.10) und Wartungskosten an. Bei einem angenommenen Strompreis von 0,25 €/kWh ergeben sich Kosten von 32,50 €/a. Kosten für die Wartung liegen nicht vor. Es wird deshalb ein Betrag von ca. 100 €/a angenommen. Unter der

Annahme, dass gleich viel Luftwechsel stattfindet als bei manueller Fensterlüftung fallen hier keine zusätzlichen Kosten für Wärmeverluste an.

Die drei Lüftungsanlagen in den Biologieräumen der THR (21.259,78 €) und dem Computerraum der Oststadtschule (26.638,30 €) fallen naturgemäß am teuersten aus und bewegen sich trotz der unterschiedlichen Lüftungsanlagentypen und dem unterschiedlichen Installationsaufwand preislich auf ähnlichem Niveau. In der Oststadtschule waren vier Kernbohrungen notwendig. Außerdem musste ein Luftkanal für die Zuluft über die gesamte Raumlänge verlegt werden. In den Biologieräumen der THR wurde keine Kernbohrung benötigt und eine Verrohrung war aufgrund des Gerätetyps nicht notwendig. Zum Anschluss des Gerätes an die Außenluft wurde ein Oberlicht durch eine Platte mit passenden Bohrungen ersetzt.

Für die Wartung fallen in der THR Kosten in Höhe von 160 € je Gerät und Jahr und in der Oststadtschule 300 € je Gerät und Jahr an. Für die alle drei Jahre notwendigen Hygieneinspektionen entstehen Kosten von 238 € pro Inspektion, also ca. 80 €/a. An Stromkosten fallen entsprechend den Berechnungen in Kapitel 3.3.10 bei den Geräten in der THR ein maximaler Stromverbrauch von 280 kWh pro Gerät und Jahr an. Dies entspricht bei 0,25 €/kWh Kosten in Höhe von 70 €. In der Oststadtschule wird ein Stromverbrauch von 1.300 kWh berechnet aus dem sich Stromkosten in Höhe von 325 € berechnen.

Damit ergeben sich für die Geräte in der THR Betriebskosten in Höhe von 310 € pro Gerät und Jahr und für das Gerät in der Oststadtschule Betriebskosten in Höhe von 705 €/a.

Kosten für Wärmeverluste entstehen keine. Unter der Annahme einer Fensterlüftung, die die gleiche Luftqualität garantiert ist der Luftwechsel gleich groß wie mit Lüftungsgerät. Damit entsteht bei Fensterlüftung ein höherer Wärmeverlust. In Folge dessen könnte entsprechend des Wärmerückgewinnungsgrades des Lüftungsgerätes eine Gutschrift bei Lüftung mit Wärmerückgewinnung erfolgen. Beim Lüftungsgerät in der Oststadtschule ergibt sich z.B. eine energetische Gutschrift von 2.600 kWh/a.

Tab. 3.6: Kosten für die in den Schulen installierten Lüftungskonzepte

Lüftungskonzept	Investitionskosten	Betriebskosten
Einbindung Abluftanlage THR in GLT	1.217,23 €	132,50 €/a
CO ₂ -Ampeln THR	560,19 €	6,40 €/a
Lüftungsanlage mit WRG Oststadtschule	26.638,30 €	705 €/a
Lüftungsanlagen mit WRG Biologie THR	21.259,78 €	310 €/a

Eine abschließende Bewertung der Wirtschaftlichkeit der realisierten Anlagentypen ist aufgrund der überschaubaren Anlagenanzahl nur bedingt möglich. Dennoch kann festgehalten werden, dass die jeweils technisch und wirtschaftlich optimale Lösung stark von den Randbedingungen CO₂-Belastung, Nutzersensibilität und Raumsituation abhängt.

3.3.10 Energetische Bewertung und ökologischer Nutzen

Die energetische Bewertung der Lüftungsmaßnahmen ohne Wärmerückgewinnung muss im Zusammenhang mit der energetischen Sanierung der Gebäude gesehen werden. Nach der Sanierung ist die Gebäudehülle wesentlich winddichter, sodass ein natürlicher Luftwechsel nur noch in sehr geringem Umfang stattfindet und somit eine Lüftungsmaßnahme zur Reduzierung der CO₂-Belastung notwendig wird. Einerseits ergibt

sich durch die Sanierung eine Energieeinsparung die andererseits durch den Stromverbrauch und die Wärmeverluste der Lüftungsmaßnahme teilweise reduziert wird.

Rektorat, Sekretariat THR

In den Verwaltungsräumen der THR die ohne automatisierte Lüftungsanlage verblieben sind, in denen aber CO₂-Ampeln installiert wurden, kann keine Aussage über die Veränderung des Energieverbrauchs durch die Ampeln gemacht werden. Die Nutzer kommen der Aufforderung zum Lüften durch die Ampeln laut Befragung (Kapitel 3.3.8) gerne nach. Dennoch sollte durch die Ampeln kein nennenswerter zusätzlicher Wärmeverlust durch die Fensterlüftung im Vergleich zu vor deren Installation entstehen. Die Ampeln selbst haben einen Stromverbrauch von unter 2 W. Der Datenlogger, der für die Funktion der Ampel selbst nicht benötigt wird, wird über eine Knopf-batterie mit Strom versorgt. Damit ergibt sich unter der Annahme eines Stromverbrauchs von 2 W ein Jahresstromverbrauch von 17,5 kWh pro Ampel, was im Vergleich zum Wärmebedarf der Räume vernachlässigbar ist. Der Wärmebedarf der drei Verwaltungsräume lag im Jahr 2014 bei 1422 kWh/a. Dieser Wert wurde aus dem gemessenen Gesamtwärmeverbrauch des Gebäudes berechnet. Im Gesamtpaket mit der energetischen Sanierung die 2007/2008 durchgeführt wurde kann hier dennoch eine energetische Verbesserung der Verwaltungsräume festgestellt werden. Durch die Ampeln und deren Aufforderung zum Lüften wird lediglich die negative Begleiterscheinung der Abdichtung der Gebäudehülle - der verringerte Luftwechsels - reduziert, die möglicherweise bereits vor der energetischen Sanierung in reduziertem Maße bestand.

Lehrerzimmer THR

Der Wärmeverlust durch die mechanische Lüftung ohne Wärmerückgewinnung im Lehrerzimmer der THR kann nur grob abgeschätzt werden, da die Betriebszeiten des Lüftungsgeräts leider nicht abgespeichert wurden.

Ausgehend von einer Betriebsdauer von 2 h/d ergibt sich bei einer gemessenen elektrischen Leistung von 160 W ein jährlicher Stromverbrauch von 0,32 kWh/d. 117 kWh/a. Zusammen mit dem Stromverbrauch der elektrischen Fensteröffner, die jeweils zu Beginn und Ende eines Lüftungsvorgangs kurz in Betrieb sind, ergibt sich ein Stromverbrauch von ca. 130 kWh/a. Diese Annahme beinhaltet sowohl die Betriebszeiten für die Lüftung wegen hoher CO₂-Werte als auch die Lüftung zur Nachtkühlung. Bezogen auf den Wärmebedarf des Lehrerzimmers von 2140 kWh/a liegt der Stromverbrauch bei 7 %. Auch hier wurde der Wärmebedarf aus dem Gesamtwärmebedarf des Gebäudes über den Flächenanteil berechnet. Der tatsächliche Anteil des Lehrerzimmers am Gesamtwärmebedarf liegt aufgrund der Lage des Lehrerzimmers im Gebäude wahrscheinlich höher. Das Lehrerzimmer hat nach Südwesten und Südosten Außenwände. Außerdem ist es größtenteils nicht überbaut.

Wärmeverlust, der einen zusätzlichen Heizbedarf bedeutet, entsteht nur im Winter, wenn die Heizung aktiv ist. Dementsprechend wurden nur die Monate September bis April in der Berechnung des Wärmeverlustes berücksichtigt. Dabei wurde angenommen, dass das Lüftungsgerät 2 h pro Tag in Betrieb ist. Es ergibt sich für diesen Zeitraum ein Wärmeverlust von ca. 570 kWh. Dabei wurde angenommen, dass die Lüftungsanlage nur an Schultagen in Betrieb geht. Die Wärmeverluste wurden ausgehend von einem konstanten Volumenstrom von 520 m³/h im Lehrerzimmer und des Verlaufs der Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Raumluft berechnet.

Biologieräume THR

In den beiden Biologieräumen wurde die Lüfterleistung erfasst. Damit kann der Stromverbrauch und der Wärmeverlust durch die Geräte genauer berechnet werden. Die Lüftung läuft in den beiden Räumen mit einer Mindestleistung von 30 %. Bei dieser Lüfterleistung wurde eine elektrische Leistung von 15 W gemessen. Bei 100 % Lüfterleistung wurde eine elektrische Leistung von 150 W gemessen. Davon ausgehend, dass die elektrische Leistung proportional zur Lüfterleistung ist, ergibt sich für die Monate Januar bis April 2016 ein Stromverbrauch von 80 kWh bzw. 67 kWh. Für die Monate September bis Dezember 2015 liegen keine Messdaten vor, weshalb davon ausgegangen wird, dass aufgrund des nahezu gleich langen Zeitraums der gleiche Strombedarf vorlag. Damit ergibt sich für die Wintermonate ein Stromverbrauch von 160 kWh bzw. 134 kWh. In den restlichen 4 Monaten dürfte der Stromverbrauch aufgrund der Nachtlüftung zur Kühlung der Räume etwas höher liegen. Damit wird von einem Stromverbrauch für das Gesamtjahr von 250 kWh bis 280 kWh bzw. 210 bis 240 kWh ausgegangen.

Bei den Geräten mit Wärmerückgewinnung in den Biologieräumen wird der größte Teil der Wärme der Abluft zurückgewonnen. Die Lüftungsgeräte in den Biologieräumen sind mit Wärmerückgewinnungsgraden von 87 % angegeben. Dieser wird bei der Berechnung der Wärmeverluste berücksichtigt. Die berechneten Wärmeverluste der beiden Räume betragen 350 kWh bzw. 398 kWh für den Zeitraum Januar bis April 2016. Hochgerechnet auf die Heizperiode September bis April ergeben sich Verluste von 700 kWh bzw. 796 kWh. Bezogen auf den Heizwärmebedarf der beiden Räume in Höhe von 1916 kWh/a bzw. 1824 kWh/a entsprechen diese Verluste ungefähr 40 % des Heizwärmebedarfs. Der Rückgewinnungsgrad wurde dem Datenblatt des Lüfters entnommen. Da diese in der Realität normalerweise nicht erreicht werden, fallen die tatsächlichen Wärmeverluste höher aus. Stromverbrauch und Wärmeverluste durch die Lüftungsgeräte hängen bei CO₂-geführter Regelung stark von der Nutzung der Räume ab.

Computerraum Oststadtschule

Im Computerraum der Oststadtschule verbraucht die Lüftungsanlage in Stufe 1 360 W und in Stufe 2 550 W elektrische Leistung. Es wurde für die Berechnung der elektrischen und thermischen Leistung davon ausgegangen, dass das Gerät wie in den Regelparametern beschrieben nur zwischen 7 Uhr und 17 Uhr in Betrieb ist. Steigt die CO₂-Konzentration über 1.100 ppm wird davon ausgegangen, dass das Gerät auf Stufe 2 läuft. Unter diesen Annahmen in Verbindung mit den gemessenen elektrischen Leistungen ergibt sich für das Messjahr April 2014 bis März 2015 ein Stromverbrauch von 1.300 kWh. Der Wärmeverlust im Winterhalbjahr (September bis April) addiert sich im Messzeitraum auf 1.400 kWh bei einem Wärmerückgewinnungsgrad von 65 %. Stromverbrauch und Wärmeverluste durch die Lüftungsgeräte hängen bei CO₂-geführter Regelung stark von der Nutzung der Räume ab.

Die Nachtlüftung zur sommerlichen Klimatisierung mit kalter Nachtluft war während des Messzeitraums nicht in Betrieb und konnte deshalb hier nicht mit erfasst werden.

Anhand des berechneten Stromverbrauchs und der Wärmeverluste zeigt sich die hohe Wichtigkeit der Leistungsdaten der Lüftungsgeräte. Insbesondere beim Stromverbrauch ist darauf zu achten, dass die Geräte über effiziente EC-Lüfter verfügen, die bei etwas höherem Anschaffungspreis eine vielfach niedrigere elektrische Leistungsaufnahme haben als Geräte mit AC-Lüftern.

3.4 Messergebnisse Teilprojekt II Wohnungen

Nachfolgend werden die Messergebnisse der einzelnen Wohnungen und Lüftungsmaßnahmen erläutert. Außerdem wird der Erfolg der Lüftungsmaßnahmen untersucht. Die Zeiträume der Messungen und der Zeitpunkt der Inbetriebnahme der Lüftungsmaßnahme können Tab. 3.2 entnommen werden. Das Gebäude im Eichenknick war bereits vor Beginn der Messungen energetisch saniert worden. In der Walnussallee fand die energetische Sanierung während der Messperiode statt und die Lüftungsgeräte wurden im Zuge dessen installiert. In beiden Gebäuden wurden je 2 Küchen, 2 Bäder, 1 Wohnzimmer und 1 Schlafzimmer mit Messgeräten zur Erfassung von Temperatur, relativer Feuchte und CO₂-Konzentration ausgestattet. In einer der Wohnungen fand im Juni 2013 ein Mieterwechsel statt. Dadurch verschlechtert sich die Vergleichbarkeit der Messdaten vor und nach Inbetriebnahme der Lüftungsgeräte. Die Geräte wurden im April 2014 eingebaut, wodurch auch noch einige Zeit vorher gemessen werden konnte. Eines der Messgeräte wurde auf Wunsch der Mieter vom Bad ins Wohnzimmer verlegt.

Grundsätzlich wird aus Datenschutzgründen vermieden die jeweilige Wohnung den Messdaten zuzuordnen.

3.4.1 Prinzipielle Beobachtungen in den Wohnungen

In diesem Kapitel wird auf einige allgemeine Grundlagen und Beobachtungen eingegangen, die im Rahmen dieses Projektes in den Wohnungen gemacht wurden.

Die maximal mögliche Beladung der Luft mit Wasserdampf ist stark von der Temperatur abhängig und steigt mit dieser an. Die relative Feuchte (rH) beschreibt wieviel Wasserdampf, bezogen auf den maximal möglichen Anteil bei der vorliegenden Temperatur in der Luft ist und wird in % angegeben. Dadurch entsteht der Effekt, dass bei niedriger Außentemperatur und hoher relativer Feuchte der Außenluft, die durch die Heizung erwärmte Luft dennoch als trocken empfunden wird. Die Luft kann bei höherer Temperatur mit mehr Wasserdampf beladen werden.

Die relative Feuchte der Luft in beheizten Räumen ist in den Sommermonaten im Durchschnitt deutlich höher als im Winter. Die niedrigen Feuchtwerte in den Wintermonaten entstehen, wenn beim Lüften kalte, mit wenig Wasserdampf beladene Luft in die Räume einströmt und dort erwärmt wird. Dennoch treten Feuchteschäden vor allem durch Kondensation der Luftfeuchte im Winter auf, wenn die Außenwände im Haus kälter als die Raumluft sind und z.B. an Kältebrücken an der Fassade lokale relative Feuchtemaxima auftreten. Höhere Beladungen der Raumluft treten im Winter auf, wenn im Raum gekocht oder geduscht wird, oder auch über Nacht in den Schlafräumen und wenn wegen niedrigen Außentemperaturen nur ungenügend gelüftet wird.

Hier genügt es bereits, wenn drei Stunden täglich eine relative Luftfeuchtigkeit über 65 % am Bauteil besteht um Schimmel zu begünstigen. Hierzu müssen aber eine Reihe anderer Voraussetzungen wie eine hohe Wasseraktivität an der Bauteiloberfläche bzw. in den Poren und die Anwesenheit xerophiler Schimmelsporen, die in solch trockener Umgebung auch keimen können. Die meisten Schimmelpilze benötigen eine relative Luftfeuchte von 80 – 85 % an der Bauteiloberfläche [10]. In Abb. 3.26 ist die relative Feuchte in einem der untersuchten Bäder als Carpet-Plot dargestellt. In den Sommermonaten und im frühen Herbst bestehen kurzzeitig relative Feuchtebelastungen bis über 80 %. Diese sind, aufgrund des seltenen und kurzzeitigen Auftretens und den auch an den Außenwänden warmen Oberflächen, nicht problematisch, da nicht mit höheren Feuchtwerten an der Wand oder gar dauerhaftem Kondenswasser zu rechnen ist.

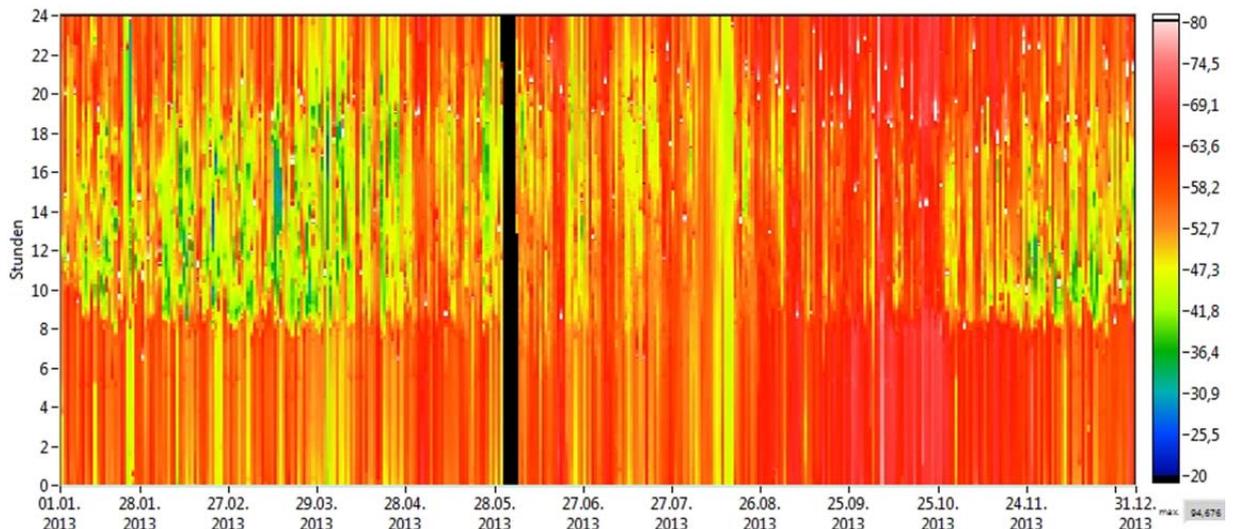


Abb. 3.26: Carpet-Plot der relativen Feuchte in % in einem der untersuchten Bäder im Eichenknick

Auffällig ist weiterhin, dass besonders in den Monaten September und Oktober hohe relative Feuchtwerte auftreten. Ursache hierfür ist die in diesen Monaten im Frühherbst noch hohe Feuchtebelastung der Außenluft wie sie in Abb. 3.27 dargestellt ist, bei gleichzeitig fallender Außentemperatur. Diese Beobachtung kann in allen vermessenen Räumen und in allen Messjahren gemacht werden.

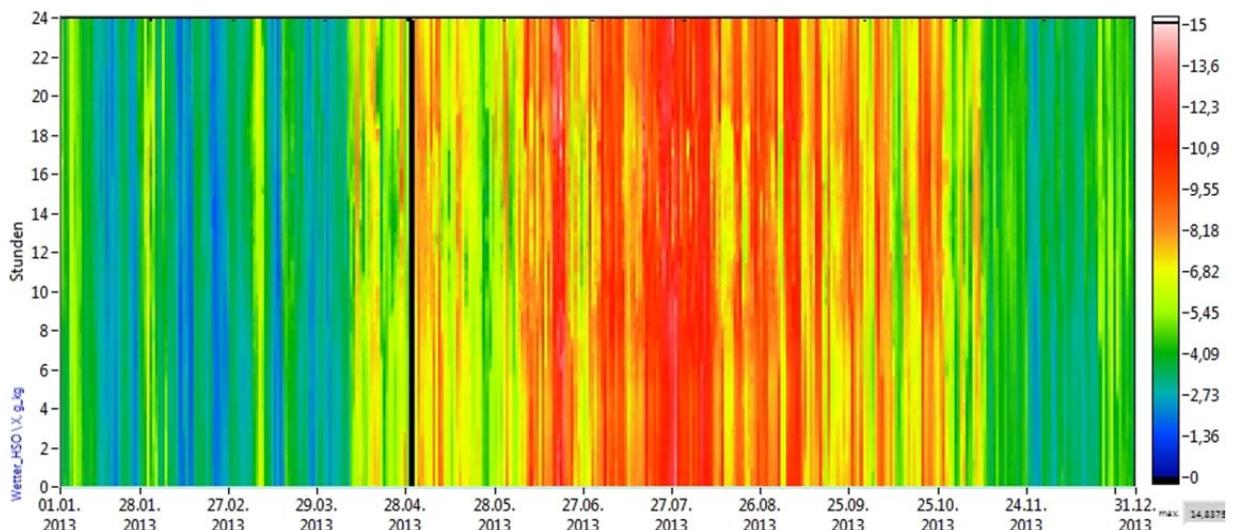


Abb. 3.27: Feuchtebelastung der Außenluft in g/kg im Jahr 2013.

Die einzelnen Wohnungen unterscheiden sich stark im Profil der relativen Feuchte und auch der CO_2 -Konzentration. Ursache dafür sind unterschiedliche Arbeitszeiten, Gewohnheiten beim Kochen und Duschen, Anzahl der Bewohner, Alterststruktur und Lüftungsverhalten. In Abb. 3.28 ist ein anderes Bad zum Vergleich mit Abb. 3.26 dargestellt. Das Feuchteprofil unterscheidet sich deutlich im Verlauf. Vor allem im Winter und Frühjahr treten im Bad in Abb. 3.28 deutlich niedrigere Messwerte auf. Im September/Oktober liegen die Feuchtwerte aber tendenziell höher.

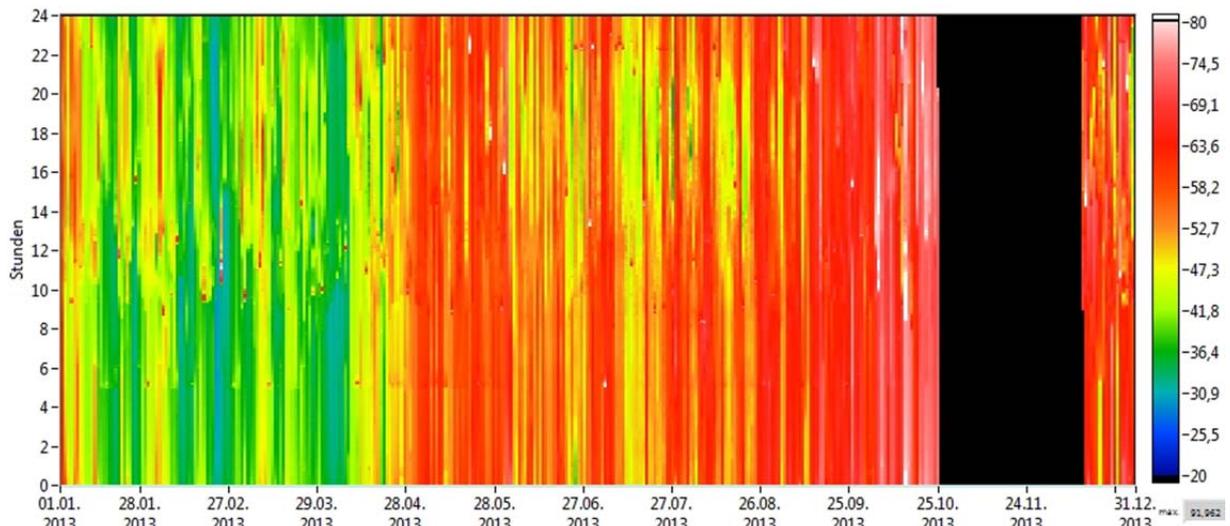


Abb. 3.28: Carpet-Plot der relativen Feuchte in % in einem der untersuchten Bäder in der Walnussallee, für den Vergleich mit Abb. 3.26. Der schwarze Bereich ist durch einen Messdatenausfall verursacht.

Abb. 3.29 zeigt die Dauerlinien der beiden oben gezeigten Bäder. Es bestätigt sich die oben gemachte Beobachtung. Es treten im Bad aus Abb. 3.26 seltener niedrige Werte unter 60 % rH auf als in Abb. 3.28. Hohe Werte über 60 % rH treten wiederum häufiger im Bad von Abb. 3.28 auf.

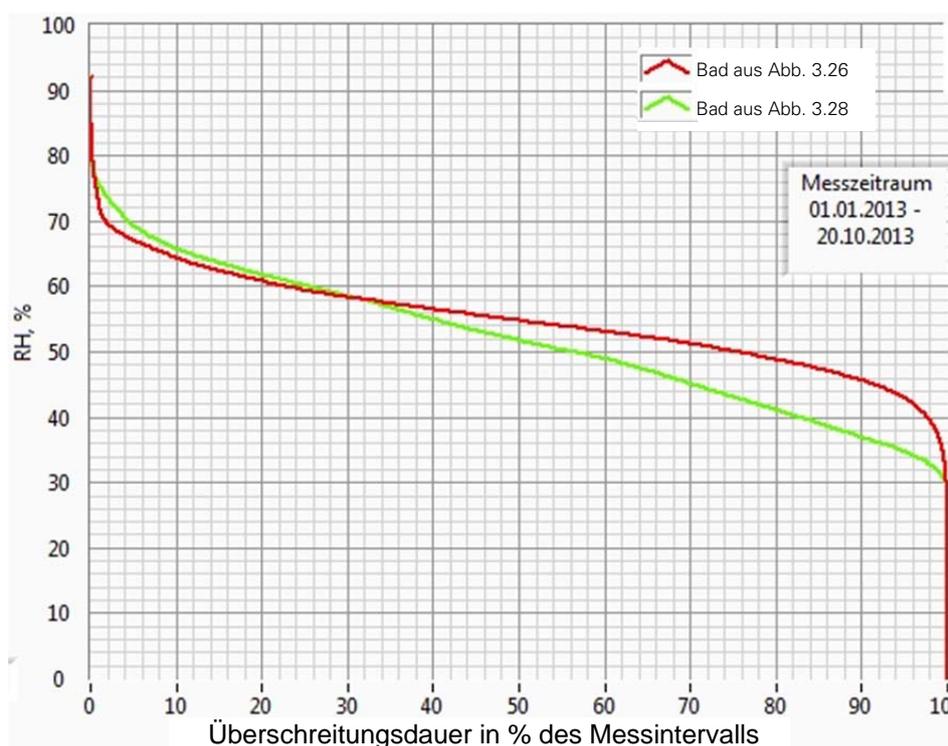


Abb. 3.29: Dauerlinie der relativen Feuchte der beiden in Abb. 3.26 und Abb. 3.28 dargestellten Bäder.

Auch in den Wohnungen wurde die CO_2 -Konzentration der Luft gemessen. Hohe CO_2 -Belastungen führen zu eingeschränktem Wohlbefinden der Bewohner, wie bereits im Teilprojekt Schule Abschnitt 2.1 näher erläutert wurde. Teilweise wurden CO_2 -Belastungen weit oberhalb des empfohlenen Maximalwerts von 1.500 ppm gemessen. In Abb. 3.30 ist der Verlauf der CO_2 -Konzentration eines Schlafzimmers dargestellt. Sehr gut zu erkennen sind, durch den plötzlichen Konzentrationsrückgang, die Zeiten zu denen über das Fenster gelüftet wird. Die Lüftung findet meist zwischen 8 und 10 Uhr

statt. Nachts steigt die Konzentration dann bis zum Lüften morgens wieder an. Im Sommer bleibt die Konzentration auch über Nacht auf niedrigerem Niveau. Vermutlich wird bei höheren Außentemperaturen ein Fenster offen gelassen.

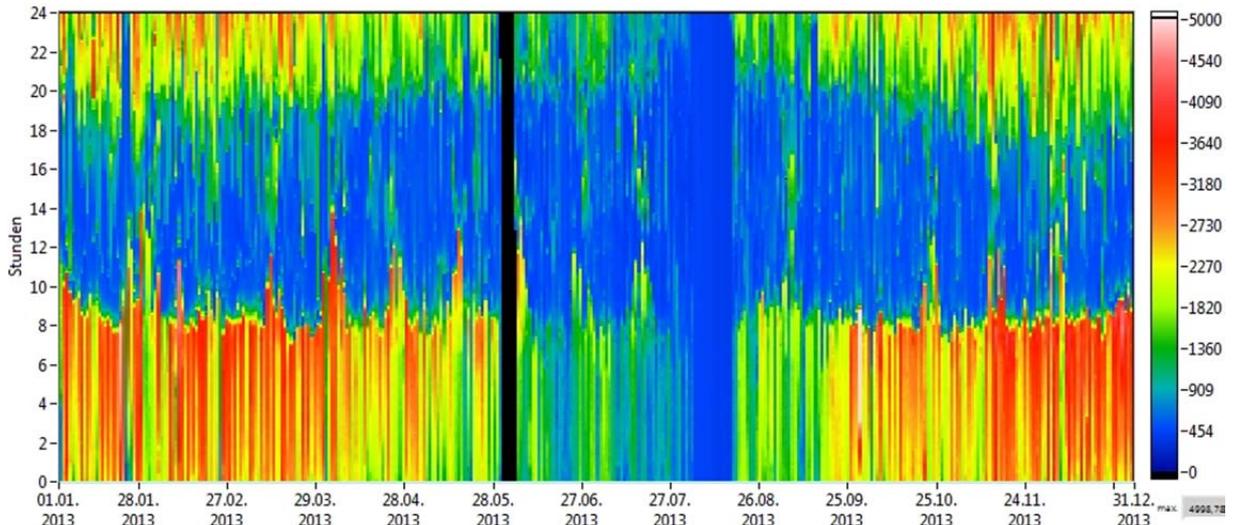


Abb. 3.30: Carpet-Plot der CO₂-Konzentration in einem Schlafzimmer im Eichenknick in ppm. Anfang August waren die Bewohner vermutlich in Urlaub, weshalb niedrige CO₂-Werte auf dem Niveau der Außenluftkonzentration gemessen wurden.

3.4.2 Küchen

Im nachfolgenden Dauerliniendiagramm (Abb. 3.31) zeigt sich in einer der Küchen in der Walnussallee (blaue Linie) eine deutlich höhere Feuchtebelastung als in den anderen. In dieser Küche liegt während 55 % der Zeit des dargestellten Zeitraums die relative Feuchte oberhalb 60 % rH und während 8 % der Zeit oberhalb 70 % rH. In den anderen Küchen werden Werte oberhalb 70 % rH fast nie erreicht und 60 % rH nur während max. 1 % der Gesamtzeit überschritten. In den Vergleichsküchen im Eichenknick wurde entweder keine Lüftungsanlage eingebaut oder es fand ein Mieterwechsel statt. Dementsprechend eignet sich die Küche in der Walnussallee besonders für die weitere Betrachtung.

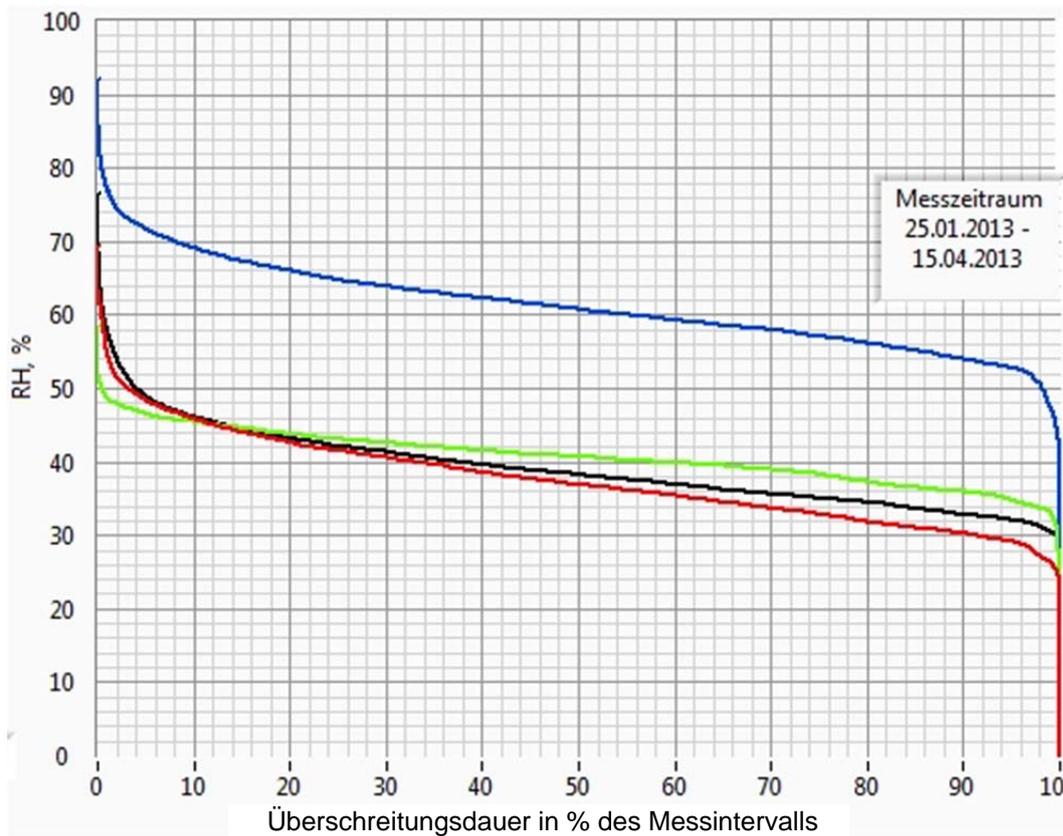


Abb. 3.31: Dauerlinien der relativen Feuchte in den untersuchten Küchen beider Gebäude vor Inbetriebnahme der Lüftungsanlagen im Zeitraum 25.01. – 15.04.2013. (Blaue Linie Küche Walnussallee, grün, schwarz und rot sind Vergleichsküchen)

Eine regelmäßige Fensterlüftung ist anhand der Feuchte- (Abb. 3.32) und CO_2 -Messwerte im Carpet-Plot (Abb. 3.33) nicht zu erkennen. Die relative Feuchte ist in diesem Raum besonders im Frühjahr und Herbst erhöht. Im Sommer und Winter sind die Messwerte niedriger. Ursache für die im Sommer relativ niedrigen Werte ist, dass bei höheren Außentemperaturen die Fenster häufiger geöffnet oder gekippt werden.

Ein weiterer Hinweis darauf sind auch die niedrigeren CO_2 -Werte in diesem Zeitraum (Abb. 3.33). Im Winter ist, wie bereits weiter oben erläutert, aufgrund der niedrigeren Feuchtebelastung der Außenluft, die relative Feuchte im Raum niedriger. Ab Oktober 2013 bis Januar 2014 treten erhöhte CO_2 -Werte bis nahe 4.000 ppm auf. Gleichzeitig sind auch die Feuchtwerte im Vergleich zum Vorjahr erhöht. Wahrscheinliche Ursache ist, dass im Oktober die Gebäudehülle bereits gedämmt und die Fenster ausgetauscht wurden, die Lüftung aber noch nicht in Betrieb war. Die Gebäudesanierung fand von Mai bis Oktober 2013 statt. Die Lüftung wurde im Januar 2014 in Betrieb genommen. Durch die dichte Gebäudehülle findet weniger natürlicher Luftwechsel statt als zuvor.

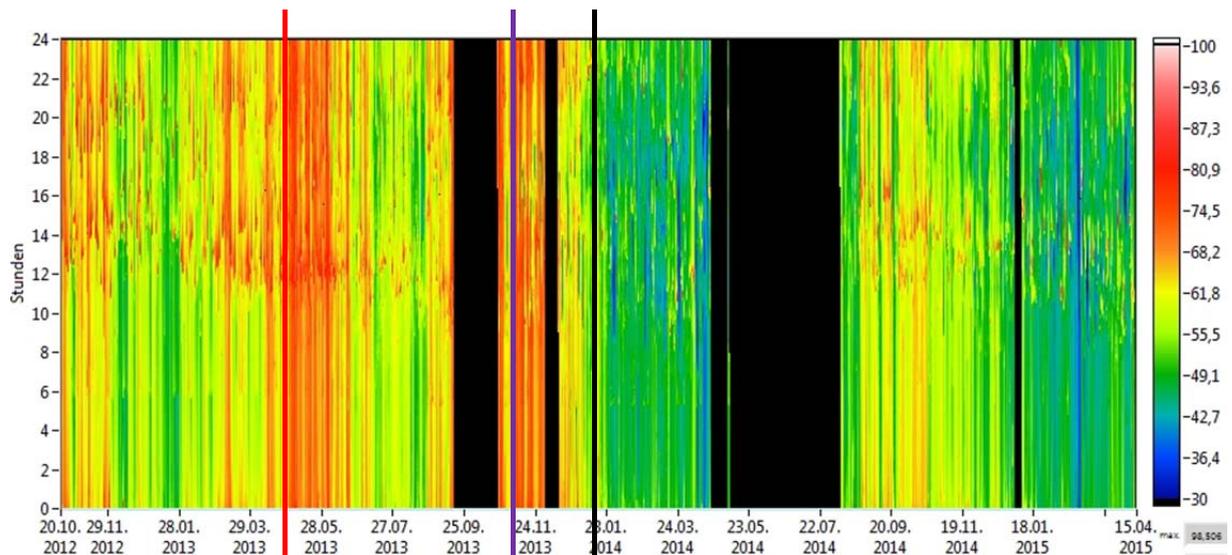
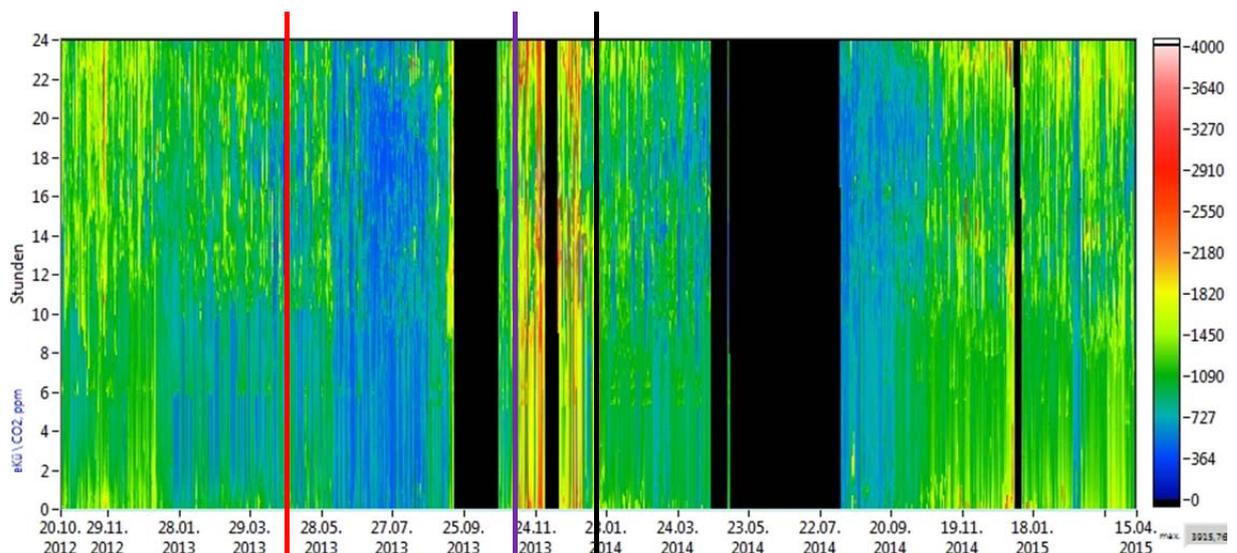


Abb. 3.32: Carpet-Plot der relativen Feuchte in einer Küche in der Walnussallee während der gesamten Messperiode. Die vertikalen Linien kennzeichnen ungefähr die wesentlichen Ereignisse in Bezug auf die Luftqualität. **Rot:** Sanierungsbeginn; **violett:** Sanierungsende; **schwarz:** Inbetriebnahme Lüftungsanlage



bb. 3.33: Carpet-Plot der CO₂-Konzentration in ppm in einer Küche in der Walnussallee während der gesamten Messperiode. Die vertikalen Linien kennzeichnen ungefähr die wesentlichen Ereignisse in Bezug auf die Luftqualität. **Rot:** Sanierungsbeginn; **violett:** Sanierungsende; **schwarz:** Inbetriebnahme Lüftungsanlage.

In Abb. 3.34 sind die Dauerlinien für die Zeiträume 25.01. – 15.04. der Jahre 2013, 2014 und 2015 dargestellt. Dieser Jahresabschnitt wurde ausgewählt, da in allen drei Jahren vollständige Daten vorhanden sind. Inbetriebnahme der Lüftungsanlage war im Januar 2014. Es liegen also ein Zeitabschnitt vor Inbetriebnahme und zwei danach vor. Durch die Inbetriebnahme der Lüftungsanlage konnte eine deutliche Verbesserung der Feuchtesituation erzielt werden. Wobei die Messergebnisse der Jahre 2014 und 2015 nahezu deckungsgleich sind.

In dieser Wohnung wurde der Volumenstrom der Abluft gemessen. Im Bad werden konstant 30 m³/h und in der Küche 34 m³/h abgeführt und damit in der Wohnung insgesamt 64 m³/h. Damit ergibt sich bei einem Gesamtvolumen der Wohnung von ca. 203 m³ eine Luftwechselrate von 0,32 /h durch die mechanische Lüftung. Zur Erinnerung: In den Wohnungen in der Walnussallee ist eine zentrale Abluftanlage installiert, die die ver-

brauchte Luft in Küche und Bad abführt und frische Luft über Nachströmöffnungen in den Fenstern zugeführt wird.

Die Luftwechselrate ist definiert als Quotient aus Lüftungsvolumenstrom (m^3/h) und Raumvolumen (m^3) und hat die Einheit $1/\text{h}$.

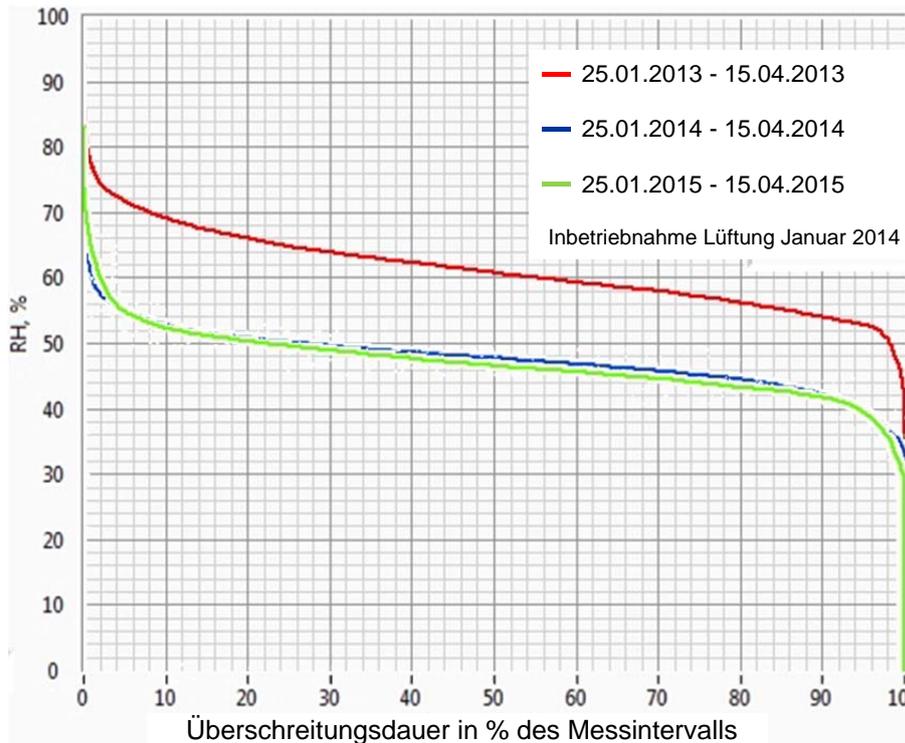


Abb. 3.34: Dauerlinien der relativen Feuchte in % der Küche Walnussallee aus Abb. 3.32 und Abb. 3.33 vor und nach Inbetriebnahme der Lüftungsanlage

Beispielsweise wird nach Inbetriebnahme der Lüftung der Wert 60 % rH nur noch während ca. 2 % – 4 % der Zeit im Messintervall überschritten. Vorher lag die Überschreitungsdauer bei ca. 55 % der Zeit. Ähnliches gilt für den Wert 70 % rH. Dieser Wert wird nach Inbetriebnahme der Lüftung kaum mehr erreicht. Vorher wurde er während 8 % der Zeit des Messintervalls überschritten.

Bei den CO_2 -Werten in den betrachteten Zeiträumen in Abb. 3.35, zeigt sich ein grundlegend anderes Bild. Hier liegen die Werte im Jahr 2015 am höchsten. In den Jahren 2013 und 2014 liegen nahezu identische Verläufe der Dauerlinien vor. Erwartet würde hier, dass ähnlich wie bei der relativen Feuchte nach Einbau der Lüftungsanlage die Werte fallen. Bei genauerer Betrachtung des Carpet-Plots in Abb. 3.33 wird dieser Sachverhalt bestätigt. Ein kausaler Zusammenhang konnte aber nicht ermittelt werden.

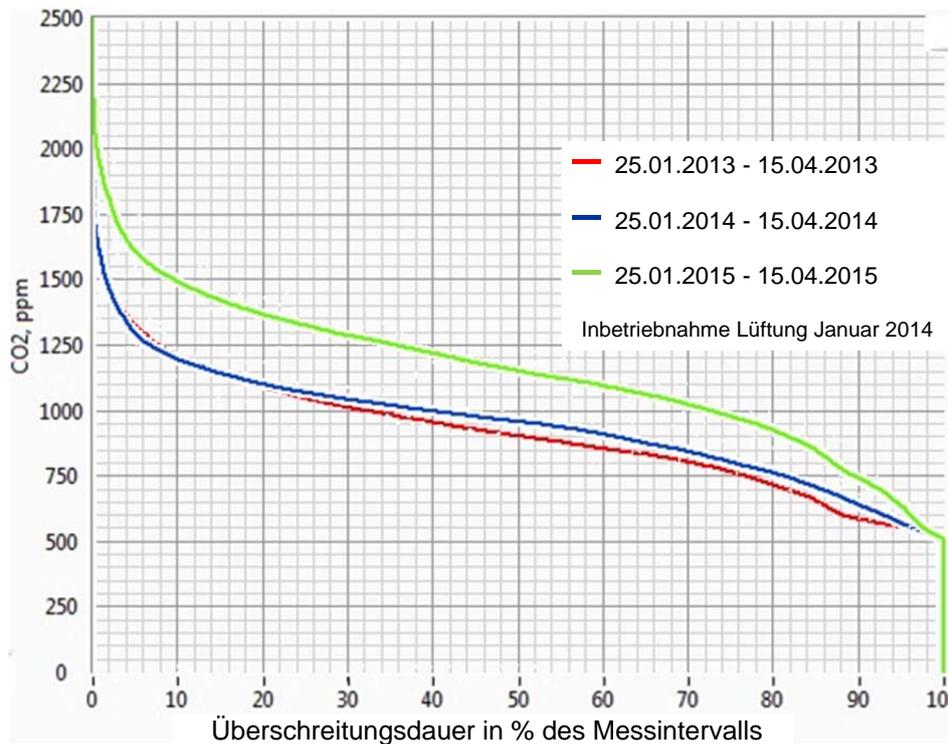


Abb. 3.35: Dauerlinien der CO₂-Konzentration in ppm der Küche Walnussallee aus Abb. 3.32 und Abb. 3.33 vor und nach Inbetriebnahme der Lüftungsanlage

Ein nochmaliger Vergleich der Messergebnisse der vier Küchen nach Inbetriebnahme der Lüftungsanlagen (Abb. 3.36) mit den Messdaten vor Inbetriebnahme zeigt, dass im Jahr 2015 in den drei Vergleichsküchen leicht höhere Feuchte-Werte gemessen wurden, als 2013. In der zuvor genauer untersuchten Küche in der Walnussallee wurde hingegen eine deutliche Reduzierung der Feuchtwerte festgestellt.

Damit kann festgehalten werden, dass bei zuvor ungenügender Lüftung im Winter durch die zentrale Abluftanlage mit Nachströmöffnungen in den Fenstern in der Walnussallee eine deutliche Reduzierung der Luftfeuchtwerte erzielt werden kann. Gleichzeitig kann ein durch die energetische Sanierung des Gebäudes reduzierter natürlicher Luftwechsel in der Walnussallee angenommen werden, der eine Zwangslüftung der Wohnungen dringend gebietet. Die Luftwechselrate von ca. 0,3 /h ist angesichts der nach Inbetriebnahme höheren CO₂-Werte und der immer noch vergleichsweise hohen Feuchtwerte zu niedrig eingestellt und sollte auf 0,4 /h– 0,5 /h erhöht werden.

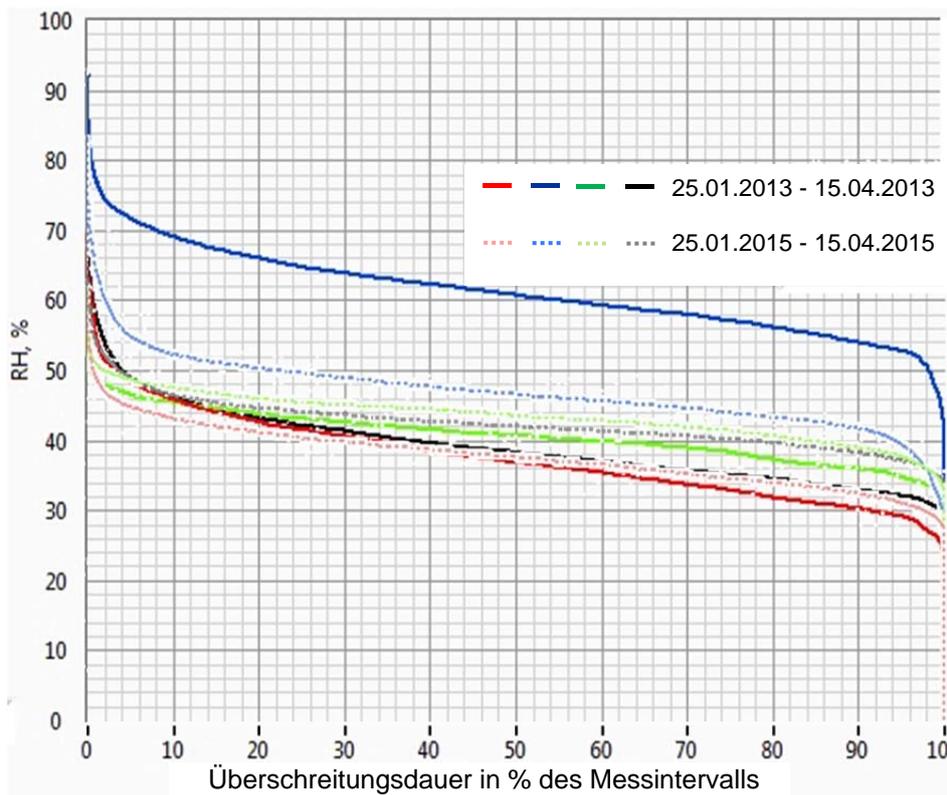


Abb. 3.36: Dauerlinien der vier Küchen vor und nach Inbetriebnahme der Lüftungsgeräte.

3.4.3 Bäder

Im nachfolgenden Dauerliniendiagramm (Abb. 3.37) zeigt sich in einem der Bäder im Eichenknick (grüne Linie) eine höhere Feuchtebelastung als in den anderen. In diesem Bad liegt während 21 % der Zeit des dargestellten Zeitraums die relative Feuchte oberhalb 60 % rH und während 3 % der Zeit oberhalb 70 % rH. In den anderen Bädern werden Werte oberhalb 60 % rH max. während 9 % erreicht und 70 % rH nur während max. 1,5 % der Gesamtzeit überschritten.

Im Carpet-Plot in Abb. 3.38 und Abb. 3.39 ist anhand des Verlaufs der relativen Feuchte und der CO_2 -Konzentration gut zu erkennen, dass vor Inbetriebnahme des Lüftungsgeräts eine regelmäßige Fensterlüftung zwischen 8 Uhr und 10 Uhr stattgefunden hat. der Zeitraum ab Januar 2015 zeigt deutlich niedrigere Feuchtwerte als in den gleichen Zeiträumen in den Jahren zuvor. Ob zusätzlich zur automatischen Lüftung eine Fensterlüftung stattfindet, konnte nicht abschließend geklärt werden. Die Mieter wurden darauf hingewiesen, dass die händische Fensterlüftung in Räumen mit Lüftungsgerät nicht mehr notwendig ist und durch das Lüftungsgerät ersetzt wird. Deutlich zu sehen ist, dass häufig abends zwischen 19 Uhr und 21 Uhr ein kurzzeitiges Feuchtemaximum auftritt (kurze rote Linien), das nach Inbetriebnahme des Lüftungsgeräts sehr schnell wieder abklingt. Vor Inbetriebnahme bleibt das Maximum länger bestehen.

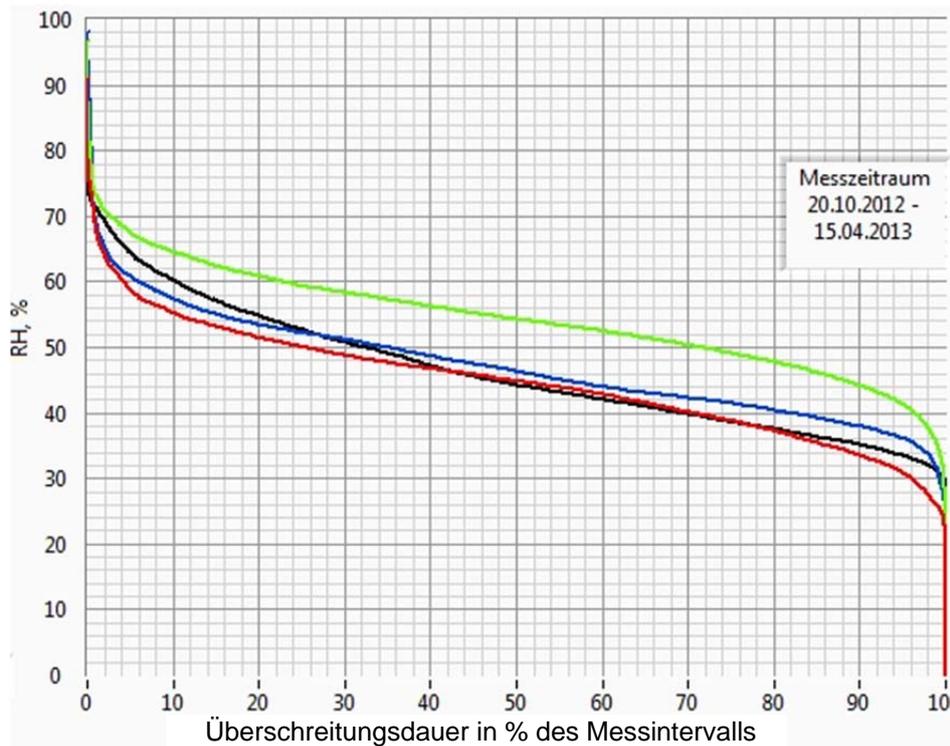


Abb. 3.37: Dauerlinien der relativen Feuchte in den untersuchten Bäder beider Gebäude vor Inbetriebnahme der Lüftungsanlagen im Zeitraum 20.10.2012 – 15.04.2013. (Grüne Linie Bad Eichenknick, blau, schwarz und rot sind Vergleichsküchen)

Das Lüftungsgerät wird anhand der relativen Feuchte im Bad geregelt und läuft mindestens auf Stufe 1. Es verfügt über 4 Schaltstufen und regelt die relative Feuchte im Raum auf einen Sollwert von max. 60 %. Im Detail bedeutet das, dass bei jeweils 5 % höherer relativer Luftfeuchte in die nächste Stufe geschaltet wird. Sowohl bei den Feuchte- als auch bei den CO₂-Werten kann in den Carpet-Plots eine leichte Reduzierung der Werte erkannt werden.

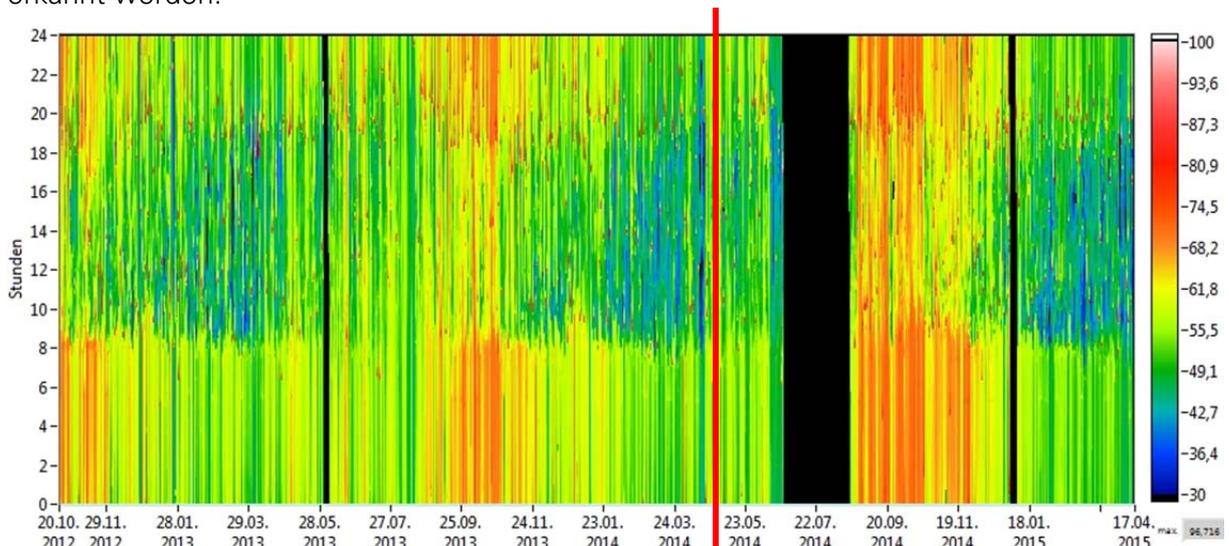


Abb. 3.38: Carpet-Plot der relativen Feuchte in % in einem Bad im Eichenknick während der gesamten Messperiode. Die rote vertikale Linie kennzeichnet die Inbetriebnahme der Lüftungsanlage.

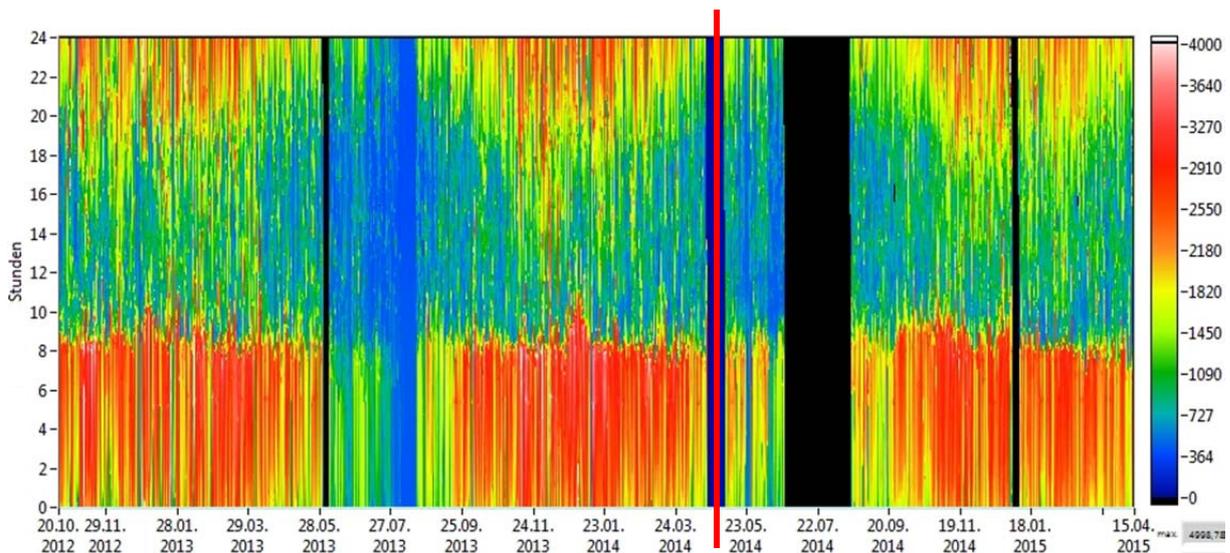


Abb. 3.39: Carpet-Plot der CO₂-Konzentration in ppm in einem Bad im Eichenknick während der gesamten Messperiode. Die rote vertikale Linie kennzeichnet die Inbetriebnahme der Lüftungsanlage.

In Abb. 3.41 und Abb. 3.42 wird diese Aussage untermauert. Im Vergleichszeitraum in 2015 liegen sowohl die relativen Feuchtwerte als auch die CO₂-Werte im Bereich über ca. 50 % bzw. ca. 2.000 ppm – etwas niedriger als in den Vorjahren 2013 und 2014.

Da das Lüftungsgerät in diesem Bad vierstufig und feuchtegeführt ist, kann kein fester Wert für die Luftwechselrate angegeben werden. Der Volumenstrom am Gerät beträgt für Zu- und Abluft laut Datenblatt zwischen 17 m³/h und 60 m³/h. Eine Messung am Gerät (Abb. 3.40) ergab deutlich niedrigere Messwerte zwischen 7 m³/h und 13,7 m³/h in der Zuluft und 7 m³/h bis 28 m³/h in der Abluft.



Abb. 3.40: Einbausituation des Lüftungsgerätes des in diesem Kapitel besprochenen Bades im Eichenknick

Das Lüftungsgerät war zum Zeitpunkt der Messung schon einige Zeit eingebaut und deshalb die Filter bereits mit Staub belegt. Außerdem passte das Flügelradanemometer mit Messtrichter nicht passgenau auf die Zu- bzw. Abluftöffnung und eine Abdeckung des überstehenden Bereichs war nur ungenügend möglich, sodass Strömungen am Messgerät vorbei nicht zuverlässig vermieden werden konnten.

Damit ergeben sich bei 14 m³ Raumvolumen Luftwechselraten zwischen 0,5 /h (7 m³/h) und 4,2 /h (60 m³/h).

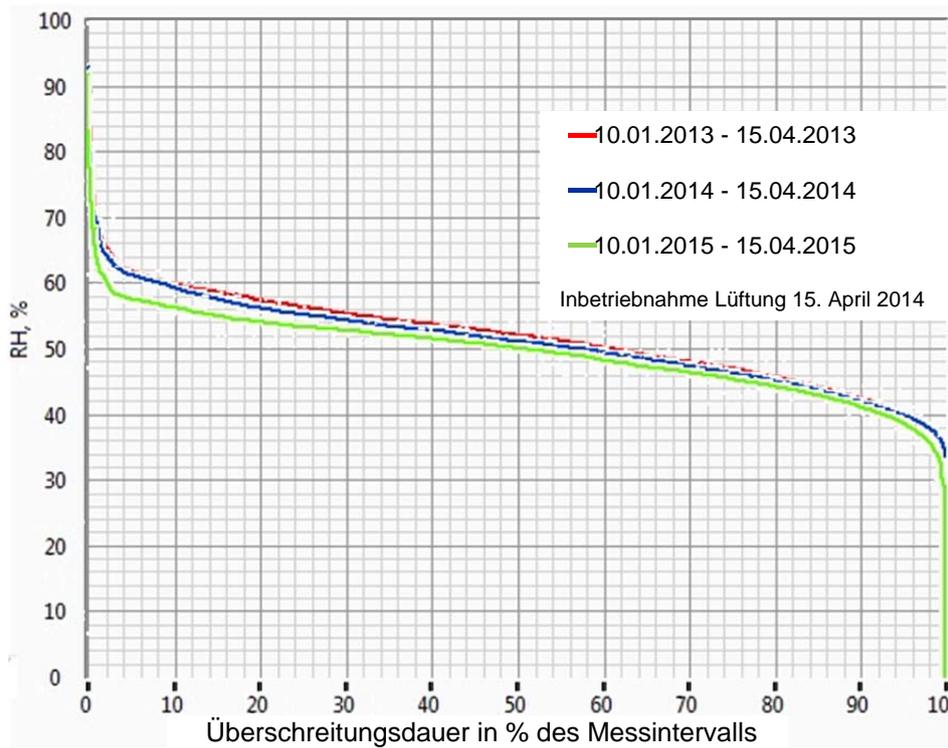


Abb. 3.41: Dauerlinien der relativen Feuchte in % des Bades Eichenknick aus Abb. 3.38 und Abb. 3.39 vor und nach Inbetriebnahme der Lüftungsanlage

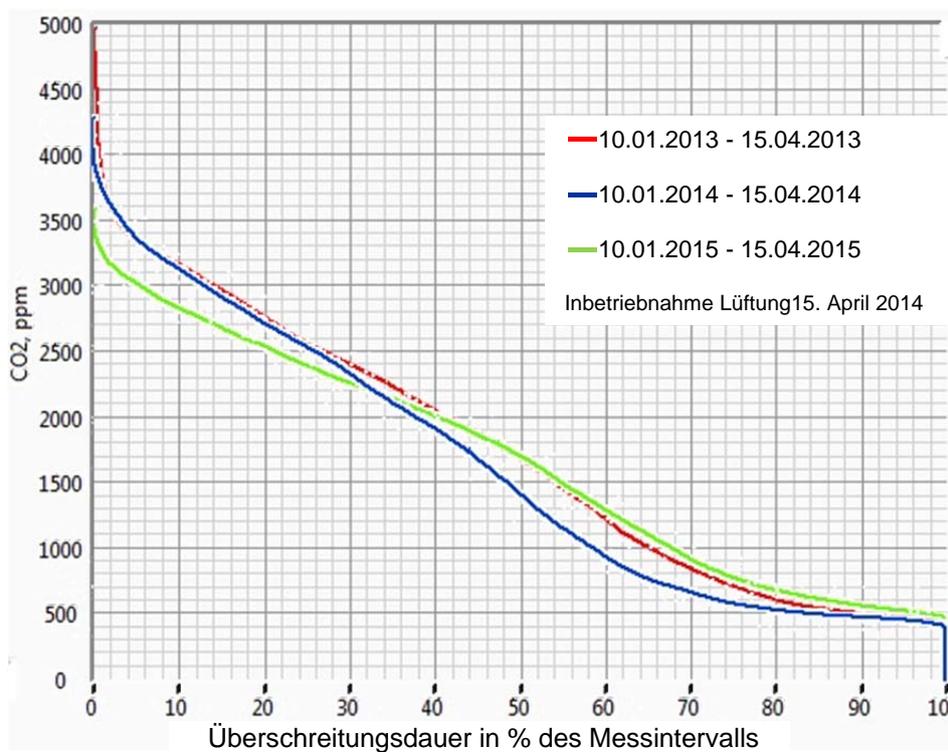


Abb. 3.42: Dauerlinien der CO₂-Konzentration in ppm des Bades Eichenknick aus Abb. 3.38 und Abb. 3.39 vor und nach Inbetriebnahme der Lüftungsanlage

3.4.4 Wohnzimmer / Schlafzimmer

Im Dauerliniendiagramm in Abb. 3.43 zeigen sich in einem Schlafzimmer im Eichenknick (grüne Linie) höhere Werte als in den anderen Wohn- / Schlafzimmern. Das Schlafzimmer gehört zu der gleichen Wohnung wie das Bad das in Kapitel 3.4.3 genauer untersucht wurde. Die Werte sind hier jedoch deutlich niedriger als in dem zuvor betrachteten Bad. Dennoch wird dieser Raum hier, aufgrund der Zugehörigkeit zur gleichen Wohnung genauer betrachtet. Die Messwerte steigen im ausgewählten Schlafzimmer nur sehr selten über 60 % rH.

Hier wurde zuerst entgegen dem Installationsauftrag ein Schalter statt einer feuchtegeführten Regelung am Lüftungsgerät eingebaut. Das führte dazu, dass das Lüftungsgerät nur händisch an- und ausgeschaltet werden konnte. Die gewünschte Funktion des Gerätes zur Reduzierung der Raumluftfeuchte war damit nicht gegeben, da der Mieter direkt am Lüfter eingreifen konnte. Bei der ersten Nachbesserung wurde der Schalter durch einen VOC-Sensor ersetzt. Dieser misst die Belastung der Raumluft mit flüchtigen organischen Verbindungen. Damit ist eine automatisierte Regelung gegeben, die bei Belastung der Raumluft mit VOCs den Lüfter in Betrieb setzt. Ein weiterer Umbau auf den ursprünglich vorgesehenen Feuchte-Sensor wurde nicht durchgeführt.

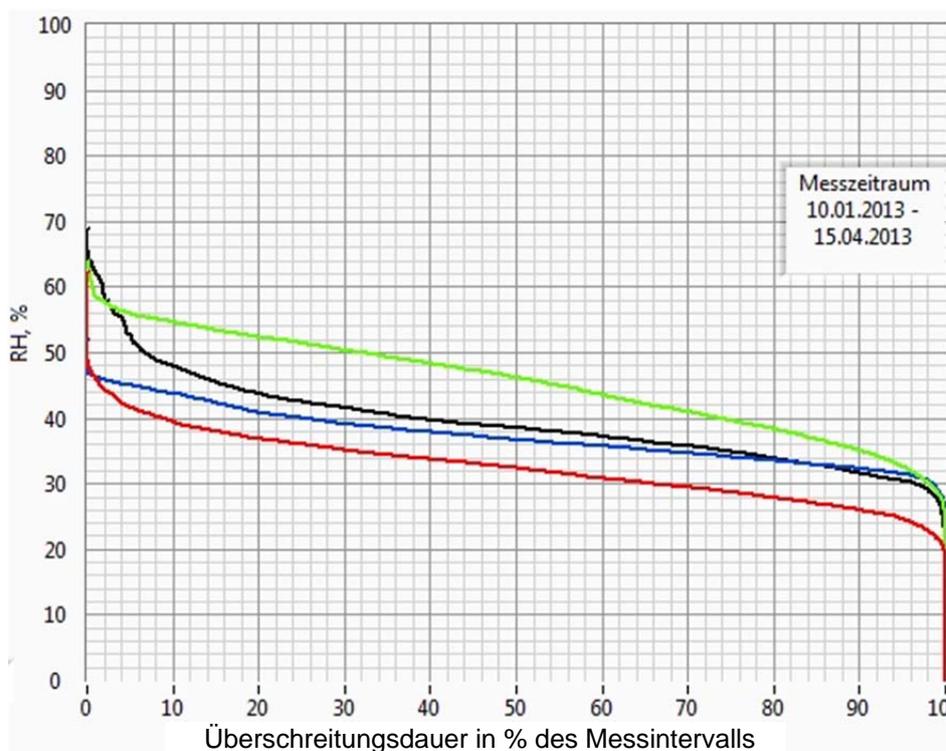


Abb. 3.43: Dauerlinien der relativen Feuchte in den untersuchten Wohnzimmer (**rot** und **schwarz**) sowie der Schlafzimmer (**blau** und **grün**) vor Inbetriebnahme der Lüftungsanlagen im Zeitraum 10.01. – 15.04.2013.

In den Messdaten zeigte sich nach Ersatz des Schalters durch einen VOC-Sensor, dass nachts im Schlafzimmer die Sicherung ausgeschaltet wurde um den Lüfter zu deaktivieren. Dies konnte anhand der Messdaten des CO₂-Sensors des Datenloggers festgestellt werden, da dieser nur bei Spannungsversorgung CO₂-Messwerte erfasst. In Abb. 3.45 ist dies im Carpet-Plot deutlich zu erkennen. Die roten Pfeile zeigen Zeiträume in denen die Sicherung ausgeschaltet war. Eine Nachfrage bei den Bewohnern ergab, dass die Sicherung aufgrund der Geräuschentwicklung des Lüfters ausgeschaltet wurde. Der hier eingebaute Lüfter mit Keramikscheibe als Wärmeübertrager wird reversibel betrieben. D.h. die Richtung des Luftstroms ändert sich häufig. Das dadurch entstehende fluktuierende Geräusch führt dazu, dass die Bewohner im Schlaf gestört werden und in Folge dessen

das Gerät über die Sicherung ausschalten. Laut Datenblatt erzeugt das Gerät einen Geräuschpegel von maximal 32 dB(A). Zur Verbesserung der Handhabung durch die Bewohner und deren Wohnkomfort wurde der noch vorhandene Schalter reaktiviert, sodass die Bewohner den Lüfter damit ausschalten können. Bei eingeschaltetem Lüfter ist weiterhin der VOC-Sensor zur Steuerung des Lüfters in Betrieb.

In den Carpet-Plots von relativer Feuchte Abb. 3.44 und CO₂-Konzentration Abb. 3.45 ist keine Verbesserung der Raumluftbelastung nach Inbetriebnahme der Lüftung zu erkennen.

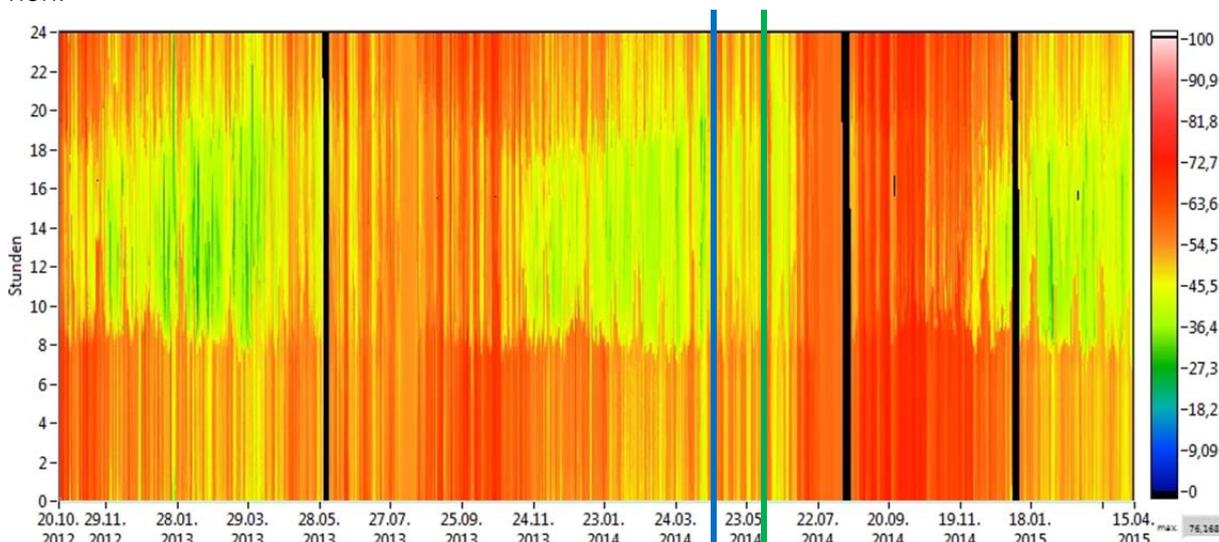


Abb. 3.44: Carpet-Plot der relativen Feuchte in % in einem Schlafzimmer im Eichenknick während der gesamten Messperiode. Die blaue vertikale Linie kennzeichnet die Inbetriebnahme der Lüftungsanlage, die grüne Linie die erste Nachbesserung.

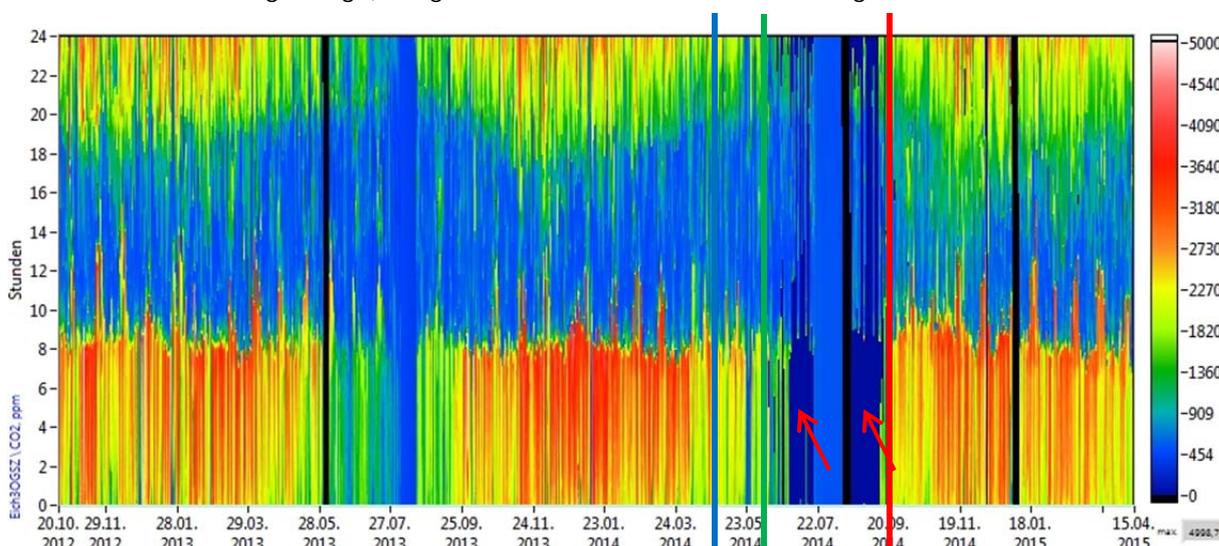


Abb. 3.45: Carpet-Plot der CO₂-Konzentration in ppm in einem Schlafzimmer im Eichenknick während der gesamten Messperiode. Die blaue vertikale Linie kennzeichnet die Inbetriebnahme der Lüftungsanlage, die grüne Linie die erste Nachbesserung. Die roten Pfeile zeigen beispielhaft Zeiten zu denen im Schlafzimmer die Sicherung ausgeschaltet wurde. Die rote Linie kennzeichnet die zweite Nachbesserung, bei der der Schalter reaktiviert wurde.

In den Dauerlinien in Abb. 3.46 und Abb. 3.47 zeigt sich nur eine leichte Änderung. Im Vergleichszeitraum 2015 werden sowohl die relativen Feuchtwerte als auch die CO₂-Werte im Bereich über ca. 50 % bzw. ca. 2.000 ppm – etwas seltener erreicht als in den Vorjahren 2013 und 2014. Die hohen Werte von bis zu 5.000 ppm CO₂ werden nun nicht mehr erreicht. Auch bei der relativen Feuchte werden 60 % rH nicht mehr überschritten.

Die Messung des konstanten Luftvolumenstroms am Gerät ergab einen Luftdurchsatz von je 30 m³/h in beide Richtungen. Damit ergibt sich bei 36,3 m³ Raumvolumen eine Luftwechselrate von 0,41 /h. Es wurde dabei berücksichtigt, dass der Lüfter jeweils nur während der halben Betriebszeit je Richtung in Betrieb ist.

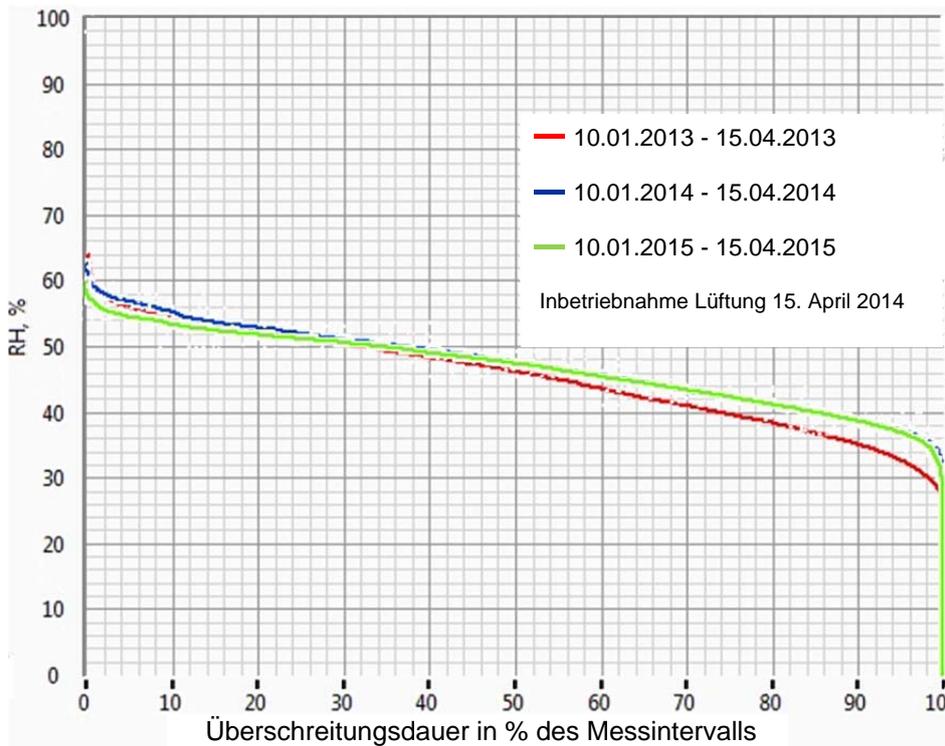


Abb. 3.46: Dauerlinien der relativen Feuchte in % des Schlafzimmers Eichenknick aus Abb. 3.44 und Abb. 3.45 vor und nach Inbetriebnahme der Lüftungsanlage

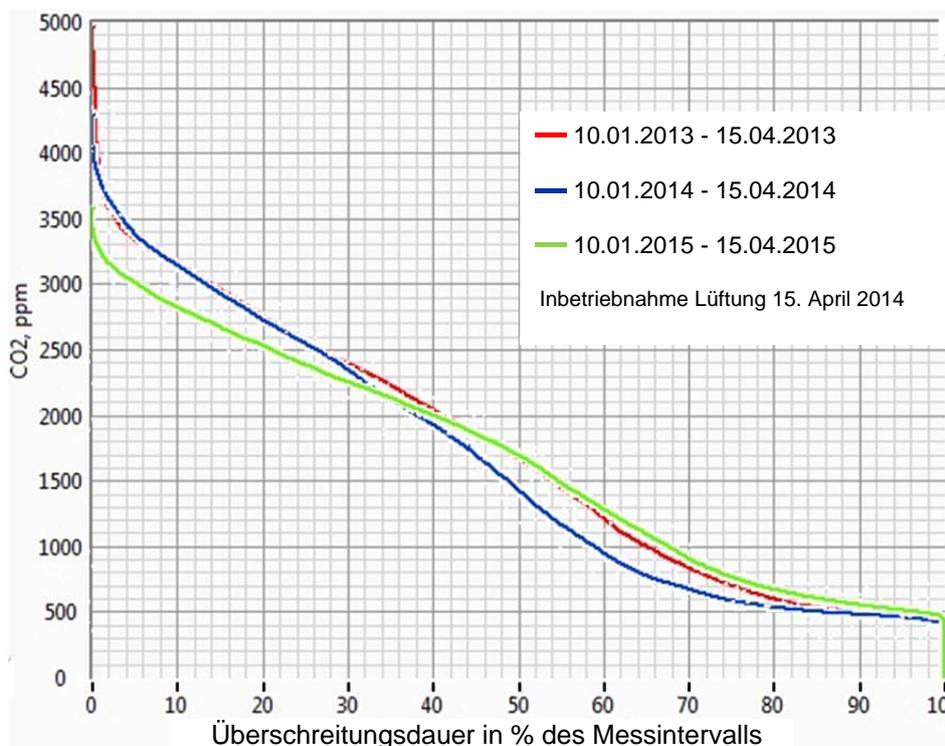


Abb. 3.47: Dauerlinien der relativen CO₂-Konzentration in ppm des Schlafzimmers Eichenknick aus Abb. 3.44 und Abb. 3.45 vor und nach Inbetriebnahme der Lüftungsanlage

3.4.5 Nutzerzufriedenheit

Zur Überprüfung der Auswirkungen der Lüftungsgeräte auf die Bewohner und deren Zufriedenheit damit, wurde ein Fragebogen erstellt, der an die Bewohner ausgehändigt wurde. Darin wurden Fragen zum Lüftungsverhalten, zur Zufriedenheit mit den Lüftungsgeräten und zur subjektiven Einschätzung von Veränderungen durch die Geräte. Das zusammengefasste Ergebnis der Fragebögen befinden sich im Anhang!

Alle Mieter haben sich an der Umfrage beteiligt und den Fragebogen zurückgeschickt.

Beim Lüftungsverhalten der Bewohner zeigt sich laut Umfrage, dass in keiner Wohnung das Lüftungsverhalten verändert wurde. Die Bewohner haben demnach in 4 Wohnungen die Fenster meist gekippt oder offen, wobei in zwei Wohnung angegeben wurde, dass zusätzlich noch einmal täglich gelüftet wird. In den beiden anderen Wohnungen wird morgens oder abends gelüftet.

Die Bewohner zweier Wohnungen sind sehr zufrieden mit den Lüftungsgeräten. In je einer Wohnung sind die Bewohner eher zufrieden oder sehr unzufrieden. In einer Wohnung wurde kein Lüftungsgerät eingebaut.

Bei den Bewohnern der Wohnung die sehr unzufrieden mit der Lüftungsanlage sind, wird bemängelt, dass durch die Lüftungsgeräte/-anlage störende Geräusche und Zugluferscheinungen entstehen. Bei den anderen Fragen zu Veränderungen durch die automatische Lüftung wurde angegeben, dass es keine Veränderungen gibt. In dieser Wohnung sind die Fenster laut Fragebogen meist gekippt.

Auf drei Fragebogen wurde angegeben, dass sich die Behaglichkeit in der Wohnung verbessert hat. Diese Bewohner haben auch angegeben, dass sie sehr zufrieden oder eher zufrieden mit der Lüftungsanlage sind. In 2 Wohnungen wird kein Unterschied zu vor Inbetriebnahme der Lüftungsanlage festgestellt. Diese Bewohner sind entweder unentschieden bei der Zufriedenheit mit der Lüftungsmaßnahme oder sehr unzufrieden.

Von den Bewohnern jeweils zweier Wohnungen wurde die Frage nach störenden Geräuschen durch die Lüftungsgeräte mit ja bzw. nein beantwortet. Bei den anderen Wohnungen wurden keine Angaben hierzu gemacht. In einer dieser Wohnungen wurde kein Lüftungsgerät eingebaut.

Durch die Lüftungsanlagen treten nach Angabe der Bewohner im Vergleich zu vor Inbetriebnahme der Lüftungsanlagen gleich oder weniger Geräusche und Gerüche in die Wohnungen. In drei Wohnungen wurde hierbei keine Veränderung festgestellt. In zwei Wohnungen wurden weniger Geräusche festgestellt und in einer Wohnung weniger Gerüche. Die anderen Bewohner machten hierzu keine Angaben.

Die Raumluftqualität wird in allen abgefragten Räumen besser oder gleich eingeschätzt. Hier fällt vor allem auf, dass die Qualität der Luft im Bad (4 Wohnungen) und in der Küche (3 Wohnungen) besser eingeschätzt. In Wohn- und Schlafzimmer wird die Luft von einer Mietpartei besser eingeschätzt.

Aufgrund der anonymen Befragung der Bewohner ist leider keine Zuordnung der Fragebögen zu den Wohnungen mit den verschiedenen Lüftungsmaßnahmen möglich, sodass auch kein Rückschluss auf die Art der Lüftung möglich ist.

Im Gespräch mit den Bewohnern wurde allerdings deutlich, dass die Bewohner in den Wohnungen mit Fassadenlüftungsgeräten mit Wärmerückgewinnungsfunktion über störende Geräusche durch die Geräte klagten. Dies wurde speziell im Schlafzimmer das in Abschnitt 3.4.4 untersucht wurde deutlich.

Insgesamt werden die Lüftungsgeräte von den meisten Bewohner gut oder neutral beurteilt. Als wichtigstes Ergebnis der Umfrage kann festgehalten werden, dass vor allem auf den Lärmpegel der Geräte geachtet werden muss. Dabei liegt in diesem Projekt die zent-

rale Abluftanlage klar im Vorteil, weil störende Geräusche in der Wohnung nicht entstehen können, da in der Wohnung selbst kein Lüfter eingebaut ist. Speziell Lüftungsgeräte mit fluktuierendem Geräuschpegel, werden von den Bewohnern als störend empfunden, selbst wenn diese nur sehr leise Geräusche entwickeln und verringern die Akzeptanz der Bewohner.

Die Ergebnisse der Umfrage sind im Anhang in Abschnitt 8.1 im Detail aufgeführt.

3.4.6 Hygieneuntersuchungen

Teil des Projekts ist auch eine Hygieneinspektion gemäß VDI 6022 an den Lüftungsgeräten mit Wärmerückgewinnung, da hier im Wärmetauscher, an den inneren Geräteoberflächen und an den Filtern sich Mikroben wie Pilze und Bakterien festsetzen und vermehren können. Die zentralen Abluftgeräte mit Nachströmöffnungen in den Fenstern wurden nicht untersucht, da die Zuluft zu den Wohnräumen nicht mit dem Lüftungsgerät selbst in Kontakt kommt und damit keine Mikroben von den Oberflächen in die Wohnungen eingetragen werden.

Vom Umweltinstitut synlab wurde an den vier Lüftungsgeräten im Eichenknick Abklatschproben an Wärmetauschern/Keramikspeichern, Ventilatoren, Gehäuseinnenseite und Filtermatten genommen. Außerdem wurden Luftkeimmessungen in der Außenluft und der Zuluft der Lüftungsgeräte durchgeführt. An allen Geräten wurden dabei Keimbelastungen an mindestens einem der beprobten Geräteteile festgestellt. Die Zahl der Koloniebildenden Einheiten pro m³ der Zuluft lag bei den Geräten mit Keramikscheiben unterhalb der Zahl der Außenluft. Lediglich beim Gerät mit Wärmerückgewinnung im Bad wurde eine höhere Keimbelastung der Zuluft festgestellt als in der Außenluft.

Damit kann festgehalten werden, dass die Mieter bei Geräten mit Wärmerückgewinnung dringend über die Reinigung und Wartung der Geräte und die notwendigen Intervalle informiert werden müssen um eine sichere Funktion der Geräte zu gewährleisten.

Die Hygieneberichte sind im Anhang in Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aufgeführt

3.4.7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen (Kosten- Nutzenvergleich)

Für die in den Wohnungen umgesetzten Lüftungskonzepte sind die in Tab. 3.7 aufgelisteten Kosten entstanden. In den Kosten sind neben den reinen Anlagenkosten, die Kosten für Montage, Nebenarbeiten (z.B. Staubwände, Steiger, Malerarbeiten) und Planung aufgelistet.

Tab. 3.7: Kosten für die in den Wohnungen installierten Lüftungskonzepte. Bei der zentralen Abluftanlage Walnussallee wurden die Kosten für eine Anlage mit der 6 Wohnungen versorgt werden angegeben und auf eine Wohnung umgerechnet. Bei den dezentralen Geräten im Eichenknick wurden die Kosten eines Gerätes auf eine komplett ausgestattete drei-Zimmer-Wohnung hochgerechnet. Planungskosten wurden für 2 Geräte je Wohnung in Höhe von 3.000 € abgerechnet. Diese werden auch bei einer kompletten Wohnung als gleich angenommen.

Zentrale Abluftanlage Walnussallee		
Komponente	Gesamt	Wohneinheit (WE)
Abluftanlage für 6 Wohnungen incl. Zuluftelemente, Abluftschächte, Dachentlüfter, Stromanschluß	14.384,37 €	2.397,39 €
Planung	1.020 €	170 €
Nebenkosten	719,22 €	119,87 €
Gesamtkosten	16.123,60 €	2.687,27 €
Einzelraumlüftung Eichenknick		
Komponente	Einzelgerät	Wohneinheit (WE)
Lüftungsgerät Limodor (reversibler Betrieb)	797,16 €	3.985,78 €
Lüftungsgerät Maico (Kreuzstromwärmeübertrager)	1.894,36 €	9471,80 €
Steuerung, Elektroanschluß, Staubwände, Steiger	1.462,55 €	7.312,75 €
Planung	1.500 €	3.000 €
Nebenkosten	265,83 €	1.329,15 €
Gesamtkosten Limodor	4.025,54 €	15.627,68 €
Gesamtkosten Maico	5.122,74 €	21.113,70 €

Die Kosten liegen bei den dezentralen Einzelraumlüftungsgeräten mit insgesamt 15.628 €/WE bzw. 21.114 €/WE höher als bei der zentralen Abluftanlage (2.687,27 €/WE). Ursachen sind die höhere Anzahl an Lüftungsgeräten und der deutlich höhere Installationsaufwand, als bei der zentralen Anlage, da diese auch im Rahmen einer generellen energetischen Sanierung durchgeführt wurde. Der nachträgliche Einbau ist auch durch die benötigten Staubwände und den Steiger deutlich teurer. Kernbohrungen, für die die Staubwände nötig wurden sind für die zentrale Abluftanlage nicht notwendig. Außerdem war bei der energetischen Sanierung in der Walnussallee ein Gerüst vorhanden, wodurch auch bei den dezentralen Geräten kein Steiger notwendig gewesen wäre.

Die Betriebskosten setzen sich aus Stromverbrauch, Wartungs-, Reinigungs- und Filterkosten und Kosten für die Hygieneinspektion zusammen. Die Hygieneinspektion nach VDI 6022 ist nur bei Lüftungsgeräten mit Wärmerückgewinnung alle drei Jahre durchzuführen, da hier Kondenswasser entstehen kann, das zu Keimwachstum führt. Die Kosten

lagen im Projekt „dezentrale Lüftung“ pro Gerät und Hygieneinspektion bei 238 € brutto. Der Stromverbrauch wird im nachfolgenden Kapitel genauer untersucht. Filterwechsel können von den Bewohnern selbst oder von einem Fachunternehmen zusammen mit der Wartung und Reinigung durchgeführt werden. Kosten hierfür liegen allerdings nicht vor und hängen stark vom eingesetzten Gerät ab. Die Betriebskosten können auf die Mieter umgelegt werden.

Zentrale Lüftungsgeräte, die über eine Wärmerückgewinnung verfügen, wurden im Projekt dezentrale Lüftungen nicht untersucht. Die Kosten liegen aber vermutlich im Bereich zwischen zentraler Abluftanlage und dezentralen Geräten mit Wärmerückgewinnung. Außerdem ist der Platzbedarf für das Lüftungsgerät wegen des Wärmeübertragers deutlich größer.

Eine abschließende Bewertung der Wirtschaftlichkeit der realisierten Anlagentypen ist aufgrund der überschaubaren Anlagenanzahl nur bedingt möglich. Dennoch kann festgehalten werden, dass zentrale Lüftungsmaßnahmen, die im Rahmen anderer Umbaumaßnahmen, wie hier der energetischen Sanierung des Gebäudes, stattfinden, sowohl bei den Installations- als auch bei den Betriebskosten deutlich preiswerter sind.

3.4.8 Energetische Bewertung und ökologischer Nutzen

Im Wohngebäude in der Walnussallee wurden im Dachgeschoss Lüftungsgeräte eingebaut, die jeweils sechs 3-Zimmer-Wohnungen versorgen. Unter anderem werden auch die im Projekt vermessenen Wohnungen damit belüftet. Nach den durchgeführten Messungen in den im Projekt eingebundenen Wohnungen, wird abgeschätzt, dass pro Wohnung ca. 60 m³/h und damit insgesamt rund 360 m³/h verbrauchte Luft aus den Wohnungen abgesaugt werden. Das Gerät verbraucht konstant ca. 50 W an elektrischer Leistung.

Ausgehend von einem 24 Stunden Betrieb an 365 Tagen pro Jahr ergibt sich ein Stromverbrauch von 438 kWh/a. Das entspricht einem Stromverbrauch von 73 kWh pro Wohnung und Jahr bzw. 0,86 kWh/(m²a).

In den Wohnungen im Eichenknick in denen die dezentralen Fassadengeräte installiert sind, ist beim Gerät vom Hersteller Maico, das im Bad montiert ist, eine elektrische Gesamtleistung von 2 W – 8 W in Abhängigkeit von der Lüfterstufe angegeben. Das Gerät läuft kontinuierlich mindestens in der niedrigsten Lüfterstufe. Nur bei höherer relativer Luftfeuchte schaltet das Gerät in die höheren Stufen. Geht man von dem Fall aus, dass das Gerät 3 h pro Tag in der höchsten Stufe mit 8 W elektrischer Leistung läuft und den Rest des Tages auf Stufe 1 mit 2 W, ergibt sich ein Stromverbrauch für ein Gerät von ca. 24 kWh/a. Würde nun in jedem Raum der 3-Zimmerwohnung das gleiche Gerät, also insgesamt 5 Geräte, installiert, ergäbe sich ein Gesamtstromverbrauch von 120 kWh/a bzw. 1,75 kWh/(m² a).

Die Airodor-Geräte vom Hersteller Limot, die ebenfalls im Eichenknick eingebaut sind, haben eine elektrische Leistung von 2,7 W. Damit ergibt sich bei kontinuierlichem Betrieb ein Stromverbrauch von 24 kWh/a. Insgesamt würden 5 Geräte je Wohnung 120 kWh/a bzw. 1,75 kWh/(m² a) verbrauchen und lägen damit gleichauf mit den Maico-Geräten. Dieser Wert ist auf einen Dauerbetrieb bezogen. Da die Geräte aber nur bei Bedarf über den Sensor einschalten, liegt der tatsächliche Stromverbrauch noch unterhalb dieses Wertes.

Die Volumenströme bzw. die Luftwechselraten der unterschiedlichen Lüftungskonzepte bewegen sich auf sehr ähnlichem Niveau. Der Stromverbrauch der zentralen Abluftanlage liegt bei ca. der Hälfte des Verbrauchs der dezentralen Geräte mit Wärmerückgewinnung.

Bei den Abluftanlagen findet keine Wärmerückgewinnung statt, sodass die komplette Wärme der Abluft an die Umwelt verloren geht, während bei den Geräten mit Wärme-

rückgewinnung nur ein Teil verloren geht. Die Lüftungsgeräte mit WRG sind mit Wärmerückgewinnungsgraden von 70 % (Maico) bzw. 85 % (Limot) angegebene.

Die Gesamtenergieeinsparung muss im Vergleich zum Gebäudezustand vor der energetischen Sanierung der Gebäude gesehen werden. Im Eichenknick lag der Endenergieverbrauch vor der Sanierung für Heizung und Warmwasserbereitung im Mittel bei 120 kWh/(m²a). Danach bei 67 kWh/(m²a). Die Werte beziehen sich auf das Gesamtgebäude. Für die Wohnungen liegen keine Einzelwerte vor.

In der Walnussallee liegen für vor der Sanierung keine Messwerte vor, da das Gebäude mit Gaseinzelöfen beheizt wurde und die Mieter direkt mit dem Energieversorger abrechneten. Einzelrechnungen der Mieter von deren Gasversorger liegen nicht vor. Bei der energetischen Sanierung wurde auf eine Zentralheizung umgestellt und die Wohnungen weisen auf Grund deren sehr großen Ungleichheit beim Anteil an der Gebäudehülle sehr ungleiche Wärmeverbräuche auf. Damit wären die Verbrauchsdaten vor und nach der Sanierung kaum vergleichbar. Es wird deshalb für vor der Sanierung für den Endenergieverbrauch auf einen Schätzwert der Gemibau in Höhe von 250 kWh/(m²a) – 300 kWh/(m²a) zurückgegriffen. Nach der Sanierung wurde ein Wert von 39 kWh/(m²a) erfasst.

Die Wärmeverluste in der Walnussallee wurden ausgehend von einem konstanten Volumenstrom von 60 m³/h bezogen auf die gesamte Wohnung und des Verlaufs der Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Raumluft berechnet. Die Raumtemperatur wurde über alle sechs vermessenen Räume in der Walnussallee gemittelt. Die Berechnungen wurden für das Winterhalbjahr September 2014 bis April 2015 durchgeführt. Es ergibt sich ein mittlerer Wärmeverlust für diesen Zeitraum von 1628 kWh durch die Lüftung ohne Wärmerückgewinnung.

Im Eichenknick, wo geregelte Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung eingebaut sind, ergibt sich bei den gleichen Randbedingungen ein deutlich geringerer Wärmeverlust, da die Geräte einerseits nicht kontinuierlich in Betrieb sind und ein Teil der Abwärme dem Raum mit der Frischluft wieder zugeführt wird. Ausgehend von einem durchschnittlichen tatsächlichen Rückgewinnungsgrad von 70 % (Maico) bzw. 85 % (Limot) ergibt sich ein Wärmeverlust von 646 kWh bzw. 323 kWh bei kontinuierlich angenommenen Betrieb der Lüftungsgeräte mit 75 m³ pro Stunde und Wohnung. Diese Werte werden durch den nicht kontinuierlichen Betrieb reduziert. Allerdings entstehen beim Limot-Lüftungsgerät zusätzliche Wärmeverluste durch unkontrollierte Luftströmungen, die bei ausgeschaltetem Gerät entstehen können. Die Rückgewinnungsgrade wurden den Datenblättern der Lüfter entnommen, da diese in der Realität normalerweise nicht erreicht werden, fallen die tatsächlichen Wärmeverluste bei diesen Geräten etwas höher aus.

Die Verbrauchsdaten sind in Tab. 3.8 aufgelistet.

Tab. 3.8: Stromverbrauch und Wärmeverluste die direkt durch die Lüftungsgeräte entstehen

Gebäude	Walnussallee	Eichenknick
Endenergieverbrauch Heizung und WW <u>vor</u> energet. Sanierung	250 – 300 kWh/(m ² a)	120 kWh/(m ² a)
Endenergieverbrauch Heizung und WW <u>nach</u> energet. Sanierung	39 kWh/(m ² a)	67 kWh/(m ² a)
Wärmeverluste durch Lüftung September 2014 bis April 2015	1628 kWh 19,38 kWh/(m ² a)	646 kWh – 323 kWh 9,4 kWh/(m ² a) – 15,7 kWh/(m ² a)
Stromverbrauch Lüftung	0,86 kWh/(m ² a)	1,75 kWh/(m ² a)

In beiden Gebäuden konnte durch die energetische Sanierung eine deutliche Reduzierung des Wärmebedarfs erzielt werden. Der Stromverbrauch der Lüftungsgeräte ist im Vergleich zur Energieeinsparung durch die energetische Sanierung vernachlässigbar. Der Wärmeverlust durch die Lüftungsgeräte ist deutlich höher, bedeutet aber als notwendige

Maßnahme im Paket der energetischen Sanierung eine Energieeinsparung. Die Geräte mit Wärmerückgewinnung sind dabei energetisch zu bevorzugen, da hier ein geringerer Wärmeverlust entsteht. Diese Aussage trifft auch im Vergleich zur Fensterlüftung zu. Auch hinsichtlich des Komforts für die Mieter bieten sie Vorteile, da vorgewärmte Luft in den Raum einströmt und damit Zuglufterscheinungen reduziert werden. Ungewollte Luftströmungen und damit verbundene Zuglufterscheinungen können durch Klappen, die sich bei ausgeschaltetem Lüfter schließen, vermieden werden. Diese wurden hier im Projekt allerdings nicht eingesetzt.

Zentrale Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung (WRG), liegen beim Stromverbrauch bei gleicher Effizienzklasse der Lüfter auf ca. doppeltem Niveau, da je ein Lüfter für Zu- und Abluft benötigt werden und die Druckverluste im System höher ausfallen als ohne WRG. Die Wärmeverluste bewegen sich auf ähnlichem Niveau wie die dezentralen Geräte mit Wärmerückgewinnung.

4 Wirkung der Umsetzung

4.1 Auswirkungen auf den zukünftigen Betrieb

Durch die Lüftungsmaßnahmen wird sichergestellt, dass in den Sondernutzungsräumen der Schulen höchstens kurzzeitig erhöhte CO₂-Konzentrationen auftreten. In den Wohnungen wird dadurch sichergestellt, dass auch bei ungenügender Fensterlüftung durch die Mieter hohe Feuchtwerte und damit Schimmelbildung vermieden wird.

4.2 Weiterführende, resultierende Maßnahmen

In den beiden untersuchten Schulen sollten in allen Unterrichtsräume, die wegen abzuschließender Türen nicht durch die zentrale Abluftanlage versorgt werden können, Messungen zur CO₂-Situation durchgeführt werden und anhand der Messergebnisse entschieden werden ob die Räume mit dezentralen Lüftungsmaßnahmen ausgestattet werden sollen.

Die Erkenntnisse dieses Projektes werden auf andere Schulen in Offenburg übertragen und umgesetzt.

In den Wohnungen empfiehlt sich, auch ohne vorherige Messung nach einer energetischen Sanierung Lüftungsmaßnahmen vorzusehen. Bei den Messungen zeigte sich, dass die Feuchtesituation äußerst stark von den Bewohnern abhängt. Würde sich also bei einer Messung zeigen, dass keine automatische Lüftung notwendig ist, kann sich dies durch einen Mieterwechsel oder veränderte Lebensgewohnheiten der Mieter ändern. Auch bei den Wohnungen werden die Erkenntnisse auf andere Projekte übertragen und umgesetzt.

4.3 Übertragbarkeit der Projektergebnisse

Die Ergebnisse im Wohnungsbereich sind auf jeden Fall auch auf andere Wohnungen übertragbar. Durch die heterogene Mieterstruktur zeigte sich die Notwendigkeit von Lüftungsmaßnahmen in allen Wohnungen mit dichter Gebäudehülle.

In den Schulen kann die Übertragbarkeit nicht in jedem Fall gesehen werden, da speziell in den Verwaltungsräumen, die nur mit wenigen Personen besetzt sind, nicht unbedingt automatische Lüftungsmaßnahmen notwendig werden. Dennoch ist eine hohe Übertragbarkeit gegeben. In anderen Schulen herrscht eine vergleichbare Situation, sodass die hier gemachten Erfahrungen auch dort umgesetzt werden können.

5 Öffentlichkeitsarbeit

5.1 Führungen und Vorträge

Für den „INservFM Messe und Kongress für Facility Management und Industrieservice“ wurde bereits ein Abstract für 2016 eingereicht. Leider wurde dieser abgelehnt. Es ist deshalb geplant den Themenvorschlag zu überarbeiten und für den Kongress im Februar 2017 einzureichen.

Im Oktober 2016 wird das Projekt und die Ergebnisse beim „4. Partnertag 2016 Energieeffizienz mit Qualität“ des Ortenauer Baunetzwerks vorgestellt. Folgende Programmpunkte sind geplant:

- Vortrag: Lüftung und Klimatisierung von Schulen und Wohnungen: Erfahrungen aus Forschungsvorhaben in Offenburg
- Workshop 1: „Natürliche und Mechanische Lüftung in Schulen“
- Workshop 2: „Wohnungslüftung zur Vermeidung von Feuchteschäden“

5.2 Flyer, Presse, Veröffentlichungen

Der Leitfaden der bereits im Vorgängerprojekt 2008-1 [1] erstellt wurde, wird durch einen Teil „Lüftung von Sondernutzungsräumen in Schulen, Leitfaden für die CO₂-Reduzierung in Sondernutzungsräumen in Schulgebäuden im südlichen Oberrheingraben“ erweitert (siehe Anhang).

Außerdem ist eine Veröffentlichung mit dem Thema „dezentrale Lüftung in Schulen und Wohnungen“ in der Fachzeitschrift Technik am Bau (TAB) im Juni oder Juli angemeldet und von der Zeitschrift bereits angenommen. Der Artikel wird nachgereicht.

Im Mitgliedermagazin „Bauen, Wohnen, Leben“ der Gemibau wurde in Ausgabe 1/2014 ein Artikel zum Teilprojekt II Wohnungen veröffentlicht (siehe Anhang 8.2).

Mit den Ergebnissen des Teilprojektes II wurde ein separater Leitfaden für die Wohnungen erstellt (siehe Anhang 8.4).

Zum Abschluss des Projekts sollen Presseartikel erscheinen, die per Pressemitteilung bei den regionalen Zeitungen eingereicht werden.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Projektes wurden mehrere Sondernutzungsräume in Schulen mit dezentralen Lüftungsmaßnahmen ausgestattet, um die CO₂-Belastung der Räume zu reduzieren. Es handelt sich dabei um Verwaltungsbüros, Lehrerzimmer und Fachräume. Diese Räume, deren Türen aus verschiedenen Gründen abgeschlossen werden müssen, konnten nicht in das Lüftungskonzept des Vorgängerprojektes zur natürlichen Gebäudeklimatisierung integriert werden. Dieses setzt, aufgrund des zentralen Abluftkonzeptes, das Öffnen der Türen und Oberlichter in den Unterrichtsräumen, zum Nachströmen der Frischluft voraus.

Vor Umsetzung der Lüftungsmaßnahmen wurde in den Räumen die CO₂-Belastung erfasst. Es zeigte sich dabei, dass in Verwaltungsbüros und Lehrerzimmern teilweise keine Lüftungsmaßnahmen erforderlich sind. In den untersuchten Fachräumen wurden CO₂-Verläufe erfasst, die Lüftungsmaßnahmen anzeigen. Dementsprechend wird empfohlen, im Falle der Nachrüstung von Lüftungsmaßnahmen, vorher über einen längeren Zeitraum insbesondere im Winter die CO₂-Konzentration zu erfassen, um die Notwendigkeit von Lüftungsmaßnahmen zu prüfen. Der CO₂-Verlauf gibt auch darüber Aufschluss, welche Lüftungsmaßnahme jeweils geeignet ist.

Auch nach Einbau der Lüftungsgeräte wurde das Monitoring fortgesetzt um den Erfolg der Maßnahmen zu prüfen und fehlerhafte Reglereinstellungen feststellen zu können. Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass eine korrekte Gerätefunktion erst nach einer Einregulierungs- und Optimierungsphase zu erreichen ist. Wegen der unterschiedlichen Anforderungen in der Sommer- und Winterphase ist für diese Optimierungen ein Zeitraum von deutlich mehr als einem Jahr realistisch. Bei Ausschreibungen und Ingenieurverträgen sollte diese Optimierung im laufenden Betrieb explizit verlangt und nach der Installation auch durchgesetzt werden.

In den Räumen wurden neben Lüftungsgeräten mit Wärmerückgewinnung auch reine Abluftgeräte installiert bzw. vorhandene Geräte automatisiert. Außerdem fanden CO₂-Ampeln in schwachbelasteten Räumen mit ein oder zwei Arbeitsplätzen Anwendung.

Diese beiden Lüftungskonzepte fanden aufgrund der schwachen Belastung der Räume und des niedrigen Anschaffungspreises Anwendung und haben sich hier bewährt. Vor allem die hohe Nutzerzufriedenheit bei den CO₂-Ampeln bei sehr geringen Kosten ist hier hervorzuheben. Inwieweit CO₂-Ampeln in Unterrichtsräumen mit hoher Belegung geeignet sind, wurde hier nicht untersucht. Es kann aber angenommen werden, daß die geringe Neigung zur Fensterlüftung im Winter wegen niedrigen Außentemperaturen bestehen bleibt und die Ampel nach anfänglicher Beachtung später mehr und mehr ignoriert wird und die Fensterlüftung nur noch reduziert stattfindet.

Ein Vorteil der Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung ist die höhere Temperatur der Zuluft, sodass bei gleichem Luftwechsel nicht nur die Wärmeverluste niedriger ausfallen, sondern auch die Behaglichkeit der Raumnutzer verbessert wird.

Bei der Auswahl der Lüftungsgeräte sollten Wert auf Geräte mit effizienten EC-Lüftern gelegt werden. Diese haben eine viel geringere elektrische Leistungsaufnahme als Geräte mit AC- oder DC-Lüftern. Außerdem ist für den Strom- und Wärmeverbrauch die Betriebsweise der Lüftungsgeräte entscheidend. So sollten die Lüfter nur dann in Betrieb gehen wenn hohe CO₂-Werte im Raum vorliegen. Die Regelung setzt aber häufig auch dann den Lüfterbetrieb auf niedrigster Stufe voraus, wenn keine erhöhten Werte im Raum gemessen werden.

Kommunale Schulträger sehen sich angesichts der ständig wechselnden Rahmenbedingungen im Schulbetrieb und der vom Gesetzgeber immer wieder geforderten Vorbildrolle der öffentlichen Hand bei ihren Bauvorhaben vor großen Herausforderungen im Bezug auf ihre Investitionsentscheidungen. So zeigte sich innerhalb der Laufzeit dieses Projekts, dass sich die Nutzung des Computerraums in der Erich-Kästner-Realschule von häufiger Dauerbelegung zu eher sporadischer Nutzung verändert hat, da die IT immer mehr Einzug in die regulären Klassenzimmer findet. Weiterhin wurden im Rahmen der überarbeiteten Schulkonzeption sehr viel weitergehende Konzepte diskutiert. So wurde u.a. auf dem Areal während der Projektlaufzeit ein Architektenwettbewerb durchgeführt, die Ausführung der Baumaßnahme angesichts abermals veränderter Rahmenbedingungen zurückgestellt.

Im Rahmen des zweiten Teilprojektes wurden mehrere Wohnungen mit verschiedenen Lüftungsmaßnahmen ausgestattet. In einem Gebäude wurde eine zentrale Abluftanlage installiert. Im anderen wurden verschiedene dezentrale fassadenintegrierte Lüftungsgeräte montiert.

Vor Umsetzung der Lüftungsmaßnahmen wurde in den Räumen die Feuchtebelastung erfasst. Es zeigte sich dabei, dass der Verlauf der relativen Feuchte stark vom einzelnen Mieter, dessen Lebensumständen und –gewohnheiten abhängt. Dementsprechend sind in energetisch sanierten Gebäuden, Lüftungsmaßnahmen in allen Wohnungen unabhängig von der Feuchtesituation zu empfehlen, da durch einen Mieterwechsel oder eine Veränderung der Lebensumstände sich die Situation deutlich verändern kann.

Ein wichtiger Punkt ist auch hier die Nutzerzufriedenheit. Sind die Nutzer mit einer Lüftungsmaßnahme unzufrieden, besteht die Gefahr der Manipulation und der sichere Ausstrag feuchter Luft ist nicht mehr gewährleistet. Die Investition wird dadurch nutzlos.

Generell ist der Einbau im Rahmen einer energetischen Sanierungsmaßnahme zu empfehlen, da nicht nur der Installationsaufwand deutlich geringer und preisgünstiger ist, sondern auch Lüftungskonzepte realisiert werden können, die besser auf die Bedürfnisse der Mieter Rücksicht nehmen.

Einen guten Kompromiss aus Nutzerkomfort, Energieeffizienz, Installationsaufwand, Manipulationssicherheit und Kosten stellen sicherlich zentrale Geräte mit Wärmerückgewinnung dar.

7 Literaturverzeichnis

- [1] J. da Costa Fernandes, E. Bollin, M. Niederklostermann, T. Feldmann und H.-J. Schneble, „Natürliche Gebäudeklimatisierung in Klassenzimmern Leitfaden für die Überhizungsminderung an Schulgebäuden im südlichen Oberrheingraben,“ Offenburg, 2013.
- [2] 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,“ Wien, 2008.
- [3] Innenraumlufthygienekommission des UBA, „Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft,“ Berlin, 2008.
- [4] R. T. Hellwig, M. Hackl und C. Nocke, „Lüften in Schulen, Bessere Lernbedingungen für junge Menschen,“ BINE Informationsdienst, Karlsruhe, 2015.
- [5] I. d. UBA, „Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden,“ Berlin, 2008.
- [6] H.-J. Schneble, J. da Costa Fernandes, M. Niederklostermann und E. Bollin, „Natürliche Gebäudeklimatisierung in Klassenzimmern,“ Offenburg, 2013.
- [7] Innenraumlufthygienekommission des UBA, „Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden,“ Berlin, 2008.
- [8] O. Kah, T. Schulz, S. Winkel, J. Schnieders, Z. Bastian und B. Kaufmann, „Leitfaden für energieeffiziente Bildungsgebäude,“ Passivhausinstitut, Darmstadt.
- [9] K. Stroh, C. Wagner und M. Gerke, „Lärm – Hören, messen und bewerten,“ Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 11/2013.
- [10] J. Egert, „Schimmelpilze im Innenraum: Wachstumsbedingungen, gesundheitliche Gefährdung, Bekämpfung,“ in *Feuchtetag '99*, Berlin, 1999.
- [11] K. Huber, E. Bollin, H.-J. Schneble und F. Gresens, „Dezentrale, fassadenintegrierte Lüftungsanlagen für energetisch sanierte Gebäude,“ Offenburg, 2016.
- [12] Fachverband Gebäude-Klima e.V. (kostenloser download unter www.fgk.de), „Status-Report 22 Lüftung in Schulen,“ Fachverband Gebäud-Klima, Bietigheim-Bissingen, 2011.

8 Anhang

8.1 Auswertung der Fragebögen der Mietwohnungen

- Wie viele Personen wohnen ständig in der Wohnung?

Erwachsene	Kinder	Häufigkeit
1	0	1
2	0	3
2	2	2

- Wie lange sind Sie tagsüber durchschnittlich zuhause?
5 Nennungen (4 h, 7 h, 2 x 14 h, 20 h)
- Wohnen Raucher in der Wohnung?
3 Wohnungen mit je einem Raucher es wird nirgends in der Wohnung geraucht
- Wird in der Wohnung regelmäßig gekocht?
3 x täglich 3 x mehrmals pro Woche
- Wann lüften Sie normalerweise?
2 x morgens 2 x abends 4 x Die Fenster sind meist auf Kipp/offen
- Haben Sie Ihr Lüftungsverhalten seit Einbau der Lüftungsanlage verändert?
0 x ja 5 x nein, wenn ja, inwiefern: _____
- Wie zufrieden sind Sie mit der Lüftungsanlage / den Lüftungsgeräten?
2 x sehr zufrieden 1 x eher zufrieden 1 x unentschlossen eher unzufrieden
1 x sehr unzufrieden
- Die Behaglichkeit hat sich durch den Einbau der Lüftungsanlage ...
3 x verbessert 2 x gleich verschlechtert
- Kommt es bei Ihnen in der Wohnung zu störenden Geräuschentwicklungen durch die Lüftungsgeräte?
2 x ja 2 x nein
- Dringen durch die Lüftungsgeräte, im Vergleich zu vor dem Einbau, verstärkt Geräusche von außerhalb der Wohnung (z.B. von Nachbarn, Straßengeräusche) in Ihre Wohnung ein?
 mehr 3 x gleich 2 x weniger wenn mehr welcher Art? _____
- Dringen durch die Lüftungsgeräte, im Vergleich zu vor dem Einbau, verstärkt Gerüche von außerhalb der Wohnung (z.B. Kochgerüche von Nachbarn, Autoabgase) in Ihre Wohnung ein?
 mehr 3 x gleich 1 x weniger wenn mehr welcher Art? _____
- Kommt es durch die Lüftungsanlage, im Vergleich zu vor dem Einbau, zu Zugluferscheinungen?
1 x mehr 2 x gleich 1 x weniger
- Gibt es andere störende Einflüsse durch die Lüftungsgeräte
 ja 4 x nein, wenn ja, welche: _____
- Wie beurteilen Sie die Raumluftqualität im Vergleich zu vor dem Einbau der Lüftungsgeräte?
Wohnzimmer: 1 x besser 4 x gleich schlechter
Schlafzimmer: 1 x besser 4 x gleich schlechter
Bad: 4 x besser 1 x gleich schlechter
Küche: 3 x besser 2 x gleich schlechter

8.2 Artikel Gemibau Mieterzeitschrift

Dicke Luft war gestern



Forschungsstation Wohnung: Matthias Niederklostermann (links) und Klaus Huber (rechts) lesen die Ergebnisse der Messgeräte über den Laptop aus und erklärten derweil Galina Rempel, wie es um die Luftqualität in ihrer Wohnung bestellt ist.

Das Institut für Energiesystemtechnik (INES) der Hochschule Offenburg untersucht für die Gemibau, in einem durch den Innovationsfond der Badenova AG geförderten Projekt, die Luftqualität in Mietwohnungen. Dabei werden die Daten aus sanierten Wohnungen mit den Daten aus unsanierten Wohnungen verglichen – ein Besuch vor Ort.

Offenburg, Stadtteil Uffhofen, Walnussallee 5: Vor dem erst kürzlich sanierten Haus parkt das weiße Elektroauto des Instituts für Energiesystemtechnik der Hochschule Offenburg. Klaus Huber und Matthias Niederklostermann kommen an diesem Tag in die Wohnung von Galina Rempel, um die Daten auszulesen, die die Messgeräte in der Wohnung aufgezeichnet haben.

Lichtdurchflutet und freundlich ist es in Galina Rempels Wohnung.

Kurz vor Weihnachten ist ihre Wohnung energetisch saniert worden: Wärmedämmung, Zentralheizung, eine zentrale Lüftungsanlage sowie Nachströmungsöffnungen gehören neben neuen Fenstern zu den Haupterneuerungen. In ihrer Wohnung wird die Luft zentral über Öffnungen in Küche und Bad abgesaugt. Die Wissenschaftler untersuchen nun, wie gut die zentrale Lüftungsanlage arbeitet. „In Mietwohnungen ist oft Feuchtigkeit das Problem – und damit einhergehend

Schimmelbildung“, sagt Klaus Huber.

Seit September vergangenen Jahres bekommen Galina Rempel und ihr Sohn alle sieben Wochen Besuch von den Wissenschaftlern. „Bei Ihnen ist immer gut gelüftet“, lobt Matthias Niederklostermann mit Blick auf die Messgeräte – „so wäre das in allen Wohnungen ideal“. In sechs Wohnungen der GEMIBAU nehmen die Ingenieure die Luft genau unter die Lupe, sie vergleichen dabei die Daten eines sanierten Gebäudes mit denen eines nicht sanierten. Neben den Wohnungen in der Walnussallee untersuchen sie auch noch Wohnungen im Eichenknick.

8.3 Leitfaden Schulen



Lüftung von Sondernutzungsräumen in Schulen

Leitfaden für die CO₂-Reduzierung in Sondernutzungsräumen
in Schulgebäuden im südlichen Oberrheingraben

Ergänzung zum Leitfaden „Natürliche Gebäudeklimatisierung in Klassenzimmern“

Autoren:

Klaus Huber
Elmar Bollin

Forschungsgruppe net – Nachhaltige Energietechnik, INES - Institut für Energiesystemtechnik der
Hochschule Offenburg,

Fassung vom 23.06.2016, Offenburg

Diese Veröffentlichung wurde erstellt von der

Forschungsgruppe net (Nachhaltige Energietechnik)
INES - Institut für Energiesystemtechnik
Hochschule Offenburg
Badstraße 24
77652 Offenburg
www.fgnet.hs-offenburg.de

Im Auftrag der Stadt Offenburg im Rahmen des vom Innovationsfonds für Klima- und Wasserschutz der
badenova AG & Co. KG geförderten Forschungsprojekts 2012-10

Inhaltliche Eingrenzung / Haftungsausschluss

Diese Veröffentlichung erhebt bezüglich der Lüftung in Sondernutzungsräumen nicht den Anspruch, auch sämtliche anderen für die Planung und Realisierung von Maßnahmen zur CO₂-Minderung in Schulgebäuden abzudecken. Sie ist als Ergänzung zum Leitfaden „Natürliche Gebäudeklimatisierung in Klassenzimmern“ [1] zu sehen, die unter <http://fgnet.hs-offenburg.de/publikationen/> heruntergeladen werden kann. Der Inhalt dieser Veröffentlichung wurde mit größter Sorgfalt und nach bestem Wissen und Gewissen zusammengestellt. Hinsichtlich der Verwendung von gezeigten Informationen muss dennoch jeder die Anforderungen von Gesetzen, Normen oder Verordnungen eigenverantwortlich überprüfen. Jegliche Haftung für die Richtigkeit und Vollständigkeit der Inhalte und Daten sowie insbesondere für eventuelle Schäden oder Konsequenzen, die durch die Nutzung des dargestellten Wissensstoffes entstehen, ist ausgeschlossen.

Inhalt

Einleitung	3
1 Ursachen hoher CO ₂ -Konzentrationen in Schulen	5
1.1 Notwendigkeit der Lüftung in energetisch sanierten Schulen	5
1.2 Lüftungskonzepte	7
2 Regelstrategien	8
2.1 Regelstrategie zur CO ₂ -Reduzierung	8
2.2 Regelstrategie zur Nachtkühlung	10
3 Aufstellung der Lüftungsgeräte	11
3.1 Geräuscentwicklung	12
3.2 Zuglufterscheinungen	12
3.3 Platzbedarf der dezentralen Lüftungsgeräte	14
4 Hygieneuntersuchungen	16
5 Auslegung der Lüftungsgeräte	16
6 Investitionskosten	18
7 Energieeffizienz	20
8 Nutzerzufriedenheit	21
9 Zusammenfassung	22
10 Literaturverzeichnis	23

Einleitung

Der sommerliche Wärmeschutz von Schulgebäuden im Oberrheingraben und die Bereitstellung von Kühlenergie wurden bereits untersucht und finden Aufnahme im Leitfaden „Natürliche Gebäudeklimatisierung in Klassenzimmern des südlichen Oberrheins“ [1]. Dieser Leitfaden ist als Ergänzung zum oben erwähnten Leitfaden zu verstehen. Im Rahmen der Arbeiten zur Minderung der sommerlichen Überhitzung wurde durch den Einbau und die damit verbundene kontinuierliche Aufzeichnung der CO₂-Konzentrationen der Raumluft festgestellt, dass besonders im Winterhalbjahr eine Verbesserung der Luftqualität erreicht werden muss. Verstärkt wird der Lüftungsbedarf durch die Umstellung vieler Schulen auf den Ganztagschulbetrieb, der bei fehlender Lüftungsaktivität die Qualität der Raumluft stark absinken lässt. Dieser Sachverhalt führt zu schneller Ermüdung durch Sauerstoffmangel und damit signifikant starken Einbruch der Konzentrationsfähigkeit der Schüler [2].

Im Rahmen dieses Leitfadens wird entsprechend des Auftrags im Projekt „Dezentrale, fassadenintegrierte Lüftungsanlagen für energetisch sanierte Gebäude“ [3] hauptsächlich auf die Dezentrale Lüftung von Sondernutzungsräumen eingegangen. Die Räume weisen die Besonderheit auf, dass die Türen aus verschiedenen Gründen geschlossen bleiben müssen. Sondernutzungsräume sind Fachräume für Biologie, Physik, Chemie, Computeranwendungen und Werken, Lehrerzimmer, Sekretariate und Rektorate. Klassenräume bei denen die Türen geöffnet bleiben dürfen, können über die in den untersuchten Gebäuden bereits verfügbare zentrale Abluftanlage in Kombination mit automatisch zu öffnenden Fenstern in den Pausen belüftet werden.

Die eingesetzten dezentralen Lüftungsmaßnahmen belüften entsprechend dieser Rahmenbedingungen einzelne Räume bzw. nebeneinander liegende Räume, die mit einer Anlage erfasst werden können. Entsprechend den Raumsituationen wurden verschiedene Lüftungskonzepte installiert bzw. vorhandene Systeme ergänzt und automatisiert.

Bei diesem Konzept ist eine Einbindung der Nutzer und Hausmeister nur in geringem Umfang notwendig, da das Öffnen der Zimmertüren nicht notwendig ist. Lediglich bei Lösungen mit CO₂-Ampeln ist ein Eingriff durch die Nutzer zum Öffnen der Fenster notwendig. Bei den automatisierten Anlagen wird allerdings eine Eingriffsmöglichkeit in den Lüftungsbetrieb eingeräumt, damit unangenehme Nebenerscheinungen der Lüftungsanlage temporär beseitigt werden können.

Die Lüftungsmaßnahmen sind, sofern möglich, an die vorhandene Gebäudeautomation angeschlossen. Eine Steuerung der Geräte fand jedoch im Rahmen des Projektes nur in einem Fall mittels Gebäudeautomation statt. In den meisten Fällen funktionieren die Geräte autark indem die CO₂-Konzentration im Raum erfasst und entsprechend derer die Lüfterleistung der Geräte geregelt wird.

Im Falle des Einbaus von Lüftungsgeräten mit Wärmerückgewinnung wurden nur solche Geräte ausgewählt, die über eine Bypassklappe verfügen und deren Regelung über eine Nachlüftungsfunktion verfügt. Dadurch kann eine sommerliche Überhitzung in den Räumen reduziert werden.

Der vorliegende Leitfaden basiert auf den Ergebnissen des Forschungsprojektes „Dezentrale, fassadenintegrierte Lüftungsanlagen für energetisch sanierte Gebäude“ [3], und geht auf die unterschiedlichen Besonderheiten der Schulgebäude ein. Er belegt an mehreren Beispielen wie gut und unter welchen Randbedingungen die Umsetzung erfolgreich gelingen kann. Die Projektergebnisse sollen somit Schulleitern, Planern und Entscheidungsträgern einen Einblick darüber geben, welche Aspekte für die Ausarbeitung von Ausschreibungsunterlagen und die Begleitung von Bauvorhaben erforderlich sind und mit welchen Kosten bei Investition und Betrieb zu kalkulieren sind. Es besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit.

1 Ursachen hoher CO₂-Konzentrationen in Schulen

Durch die energetische Sanierung von Schulgebäuden bei der auch die Fassade abgedichtet wird, findet in den Räumen ein deutlich geringerer natürlicher Luftwechsel statt als vorher. In Folge dessen reichert sich das ausgeatmete CO₂ der Raumnutzer im Laufe einer Unterrichtsstunde stark an. Wird während den Pausen oder auch schon während des Unterrichts nicht gelüftet, erhöht sich die Konzentration in der darauffolgenden Stunde weiter. Hohe Konzentrationen bauen sich auch häufig bis zum nächsten Tag nicht vollständig ab, sodass am nächsten Tag schon zu Unterrichtsbeginn ein erhöhter Wert vorliegt und zu noch höheren Werten führen kann.

Allgemein wird speziell im Winter wegen niedrigen Außentemperaturen nicht ausreichend gelüftet. Geht man von einem Raumvolumen von 6 m³/Pers. aus, wäre, um über eine reine Fensterlüftung in Unterrichtsräumen eine ausreichende Luftqualität zu erreichen, ca. alle 20 Minuten eine Fensterlüftung notwendig [4]. Dies ist im Schulalltag kaum realisierbar.

1.1 Notwendigkeit der Lüftung in energetisch sanierten Schulen

Da durch hohe CO₂-Konzentrationen das Wohlbefinden der Nutzer und deren Konzentrationsfähigkeit stark eingeschränkt sind, sind Lüftungsmaßnahmen unerlässlich. Ohne Lüftungsmaßnahmen treten hohe Konzentrationen wie in Abb. 1.1 zu sehen auf. In diesem Raum wurden CO₂-Konzentrationen bis 5.000 ppm erfasst. Diese bauen sich ohne Lüftung nur sehr langsam ab, sodass zu Unterrichtsbeginn am nächsten Tag noch Konzentrationen bis 2.000 ppm vorliegen. Nach dem Leitfaden Innenraumhygiene für Schulgebäude des Umweltbundesamtes [5] gelten Konzentrationen zwischen 1.000 ppm und 2.000 ppm als hygienisch auffällig und über 2.000 ppm als inakzeptabel. Ab 2.000 ppm wird empfohlen, weitergehende Maßnahmen und die Belüftbarkeit des Raumes zu prüfen.

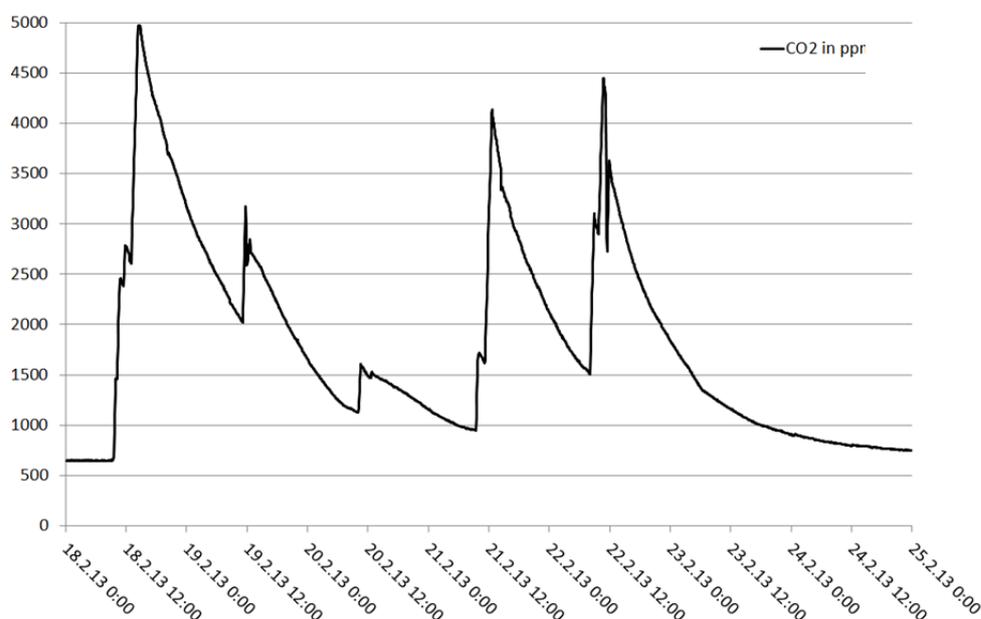


Abb. 1.1: CO₂-Verlauf in ppm in einem Computerraum in der Woche vom 18.02.2013 bis 24.02.2013

In Abb. 1.2 sind Dauerlinien desselben Raumes mit und ohne Lüftung dargestellt. Mit Lüftung wird eine CO₂-Konzentration von 1.000 ppm nur noch während 10 % der Messzeit überschritten. Ohne Lüftung war dies während 92 % der Messzeit der Fall. Wurden ohne Lüftung während 35 % der Messzeit CO₂-Konzentrationen über 2.000 ppm erfasst, wurden mit Lüftung nur noch äußerst selten solch hohe Werte gemessen.

Durch diese Lüftungsmaßnahme konnte also eine deutliche Verbesserung der Luftqualität erreicht werden. Neben CO₂ werden selbstverständlich auch andere Schadstoffe aus dem Raum gelüftet, sodass auch hier eine Verbesserung der Situation gegeben ist.

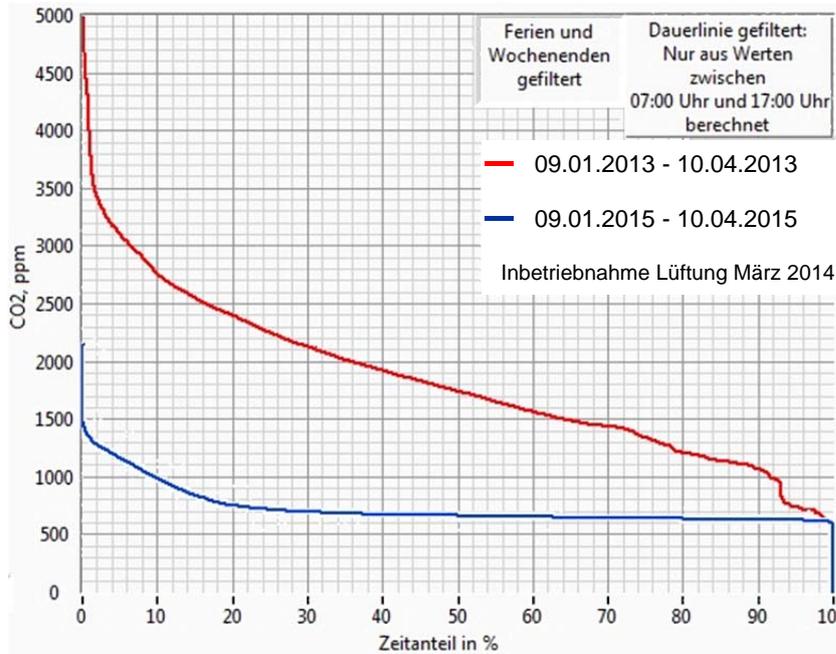


Abb. 1.2. Dauerlinien der CO₂-Konzentration in einem Computerraum. Die Messwerte wurden gefiltert, sodass nur Messwerte an Schultagen zwischen 7 und 17 Uhr in die Berechnung der Dauerlinien mit einfließen.

1.2 Lüftungskonzepte

Zur Raumlüftung kommen die nachfolgenden Konzepte in Betracht. Die im Rahmen des Projektes „Dezentrale Lüftungen“ [3] an den Schulen in Offenburg untersuchten Konzepte sind farblich markiert.

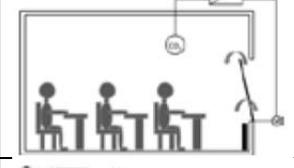
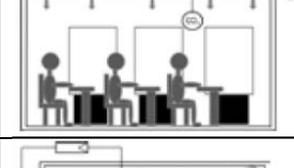
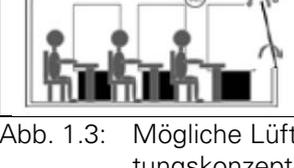
	Rein manuelle Fensterlüftung mit Lüftungsplan oder Unterstützung durch CO ₂ -Ampel
	Motorisch unterstützte Fensterlüftung
	Geregeltes Abluftsystem mit motorisch zu öffnenden Fenstern
	Geregelte maschinelle Lüftung mit Wärmerückgewinnung Decken-/Wandgerät
	Geregelte maschinelle Lüftung mit Wärmerückgewinnung Standgerät
	Hybride Lüftung (Kombination aus motorischer Fensterlüftung und maschineller Lüftung)

Abb. 1.3: Mögliche Lüftungskonzepte zur CO₂-Reduzierung in Schule. Farblich markierte Lüftungskonzepte wurden in Schulen in Offenburg umgesetzt. Die Grafiken wurden freundlicherweise vom Fachverband Gebäude-Klima zur Verfügung gestellt [6].

Die automatisierten Lüftungskonzepte können sowohl dezentral als auch zentral über die Gebäudeautomation (GA) oder kombiniert geregelt werden (Abb. 1.4). Die dezentrale Regelung bietet dabei den Vorteil, dass ein auf das Lüftungsgerät abgestimmter Regler lediglich parametrisiert werden muss. Fehler in den Einstellungen werden so weitgehend vermieden. Nachteilig ist hierbei, dass oft kein zentraler Zugriff auf die Regelparameter möglich ist und nur die vorgegebene Regelstrategie realisierbar ist.

Eine zentrale Regelung über die GA kann nahezu beliebige Regelstrategien beinhalten. Erfahrungsgemäß sind häufig aber mehrere Nachbesserungen der Programmierung erforderlich. Fehler in der Programmierung sind ohne Monitoring nur schwer zu entdecken und bleiben meist unbemerkt.

Eine Kombination aus zentraler und dezentraler Regelung der Lüftungsgeräte erlaubt einen zentralen Zugriff auf einzelne Regelparameter oder übergeordnete Steuerbefehle. Die Geräte können zentral z.B. anhand des Ferienplans zur Energieeinsparung ein- und ausgeschaltet werden. Die verschiedenen Regelgeräte der Hersteller erlauben hier unterschiedliche Zugriffsmöglichkeiten. Teilweise sind Webbrowser mit passwortgeschütztem

Zugriff auf die Regelparameter enthalten. Andere Geräte lassen lediglich übergeordnete Befehle zu, was wiederum die Gefahr der Fehlbedienung verringert.

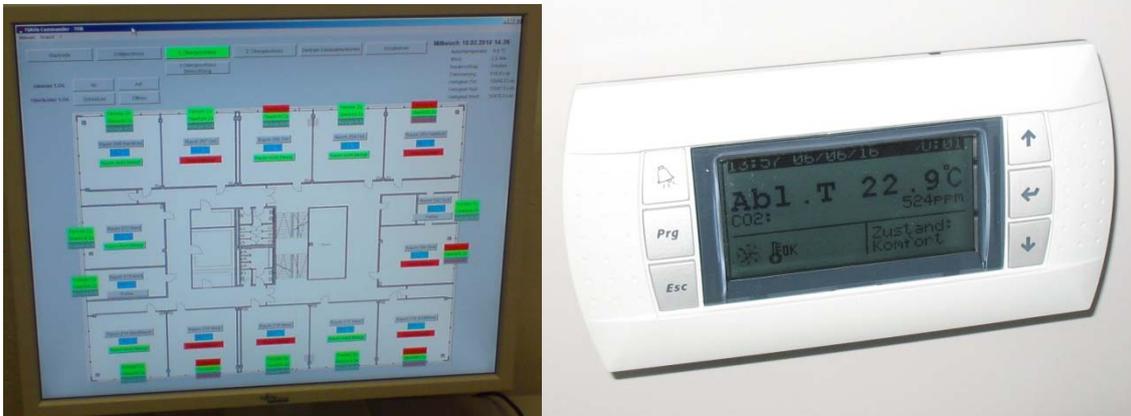


Abb. 1.4: Links Leitfaden mit Gebäudevisualisierung zur zentralen Regelung.
Rechts Lüftungsregler bzw. Steuergerät zur dezentralen Regelung.

2 Regelstrategien

Die nachfolgenden Regelstrategien wurden im Rahmen des Projektes „Dezentrale Lüftungen“ [3] umgesetzt. Bei Lüftungskonzepten mit reiner manueller Fensterlüftung ist selbstredend keine Regelstrategie notwendig. Die Nutzer werden hier angewiesen gemäß einem Lüftungsplan oder anhand der Anzeige einer CO₂-Ampel die Fenster zu öffnen.

2.1 Regelstrategie zur CO₂-Reduzierung

Zur Reduzierung der CO₂-Konzentration bedarf es lediglich einer sehr einfachen Regelung bei der die Lüfterleistung des Lüftungsgerätes bei ansteigender CO₂-Konzentration hochgefahren wird. Je nach Lüftungsgerät ist eine stufenlose oder stufige Erhöhung der Lüfterdrehzahl möglich. Meist gibt die interne Regelung des Lüftungsgerätes vor, dass die Lüfter mindestens auf niedrigster Stufe betrieben werden. Die CO₂-Konzentration bei der in die nächsthöhere Stufe geschaltet wird, sollte sich dabei an den empfohlenen CO₂-Konzentrationen aus Abschnitt 1.1 orientieren. Der Zeitraum in dem die erste Stufe in Betrieb ist, sollte aus energetischen Gründen (siehe Abschnitt 0) auf Zeiträume begrenzt werden, in denen potentiell Unterricht stattfindet. Dabei sollte eine Nachlaufzeit eingeplant werden um erhöhte CO₂-Konzentrationen auch nach Unterrichtschluss noch weglüften zu können. Bei einer dreistufigen Steuerung sollte vor Erreichen von 2.000 ppm in die höchste Lüfterstufe geschaltet werden.

Für stufenlose Lüfterregelungen gelten die gleichen Parameter innerhalb derer die Lüfter in der Leistung angepasst werden.

Eine andere Regelstrategie ist, dass maximale Rücksicht auf die Nutzer genommen wird, wenn unangenehme Begleiterscheinungen wie Zugluft und Geräuschentwicklung im Vorfeld bereits anzunehmen sind. Über einen Präsenzmelder wird dann die Lüftung nur dann frei gegeben, wenn der Raum leer ist. Mit einem Außentemperaturfühler kann bei Lüftungskonzepten ohne Wärmerückgewinnung zudem geprüft werden, ob durch die Lüftung Begleiterscheinungen wie Zugluft durch kalte Frischluft oder ein Wärmeeintrag bei hohen Außentemperaturen zu erwarten sind. Die Lüftung kann dann bei moderaten Außentemperaturen freigegeben werden, wenn Personen im Raum sind.

Durch diese sehr nutzerfreundliche Regelstrategie sind zeitweise erhöhte CO₂-Werte in Kauf zu nehmen. Eine Lüftung erfolgt aufgrund der Restriktionen teilweise nur außerhalb der Unterrichtszeiten und erlaubt damit oft keine Lüftung während Personen im Raum sind.

Diese Regelstrategie wurde in einem Lehrerzimmer (Abb. 2.1) umgesetzt. Bereits bei ersten Tests der vorhandenen Abluftanlage in Verbindung mit automatisierten Oberlichtern wurde festgestellt, dass anwesende Lehrer relativ schnell die Lüftung wieder ausschalteten. Bei Einschalten der Lüftung und Öffnen der Oberlichter entsteht bei kalter Außentemperatur Zugluft, die durch manuelles Ausschalten der Lüftung vermieden wird. Es wird dadurch eine höhere Akzeptanz und weniger unangenehme Nebenerscheinungen erwartet, was sich auch bei der durchgeführten Nutzerbefragung bestätigte.

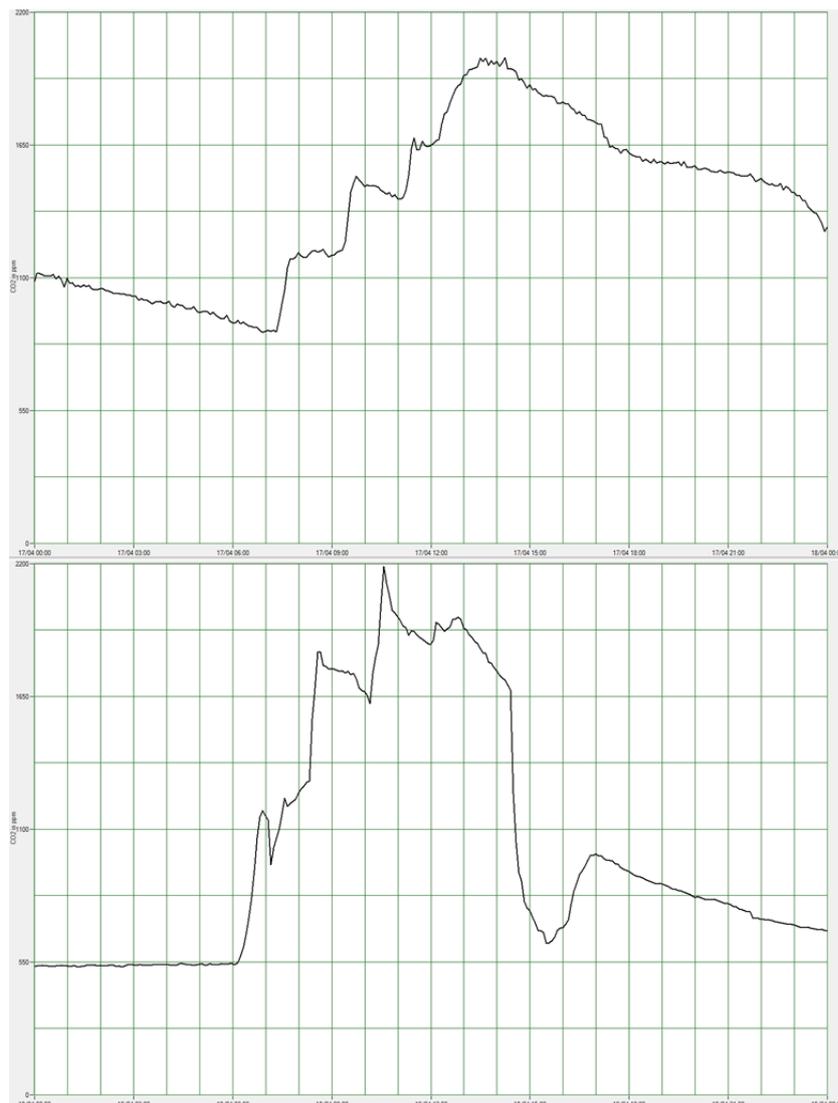


Abb. 2.1: Typischer Verlauf der CO₂-Konzentration in einem untersuchten Lehrerzimmer oben am 17.04.2013 ohne und unten am 18.04.2016 mit automatisierter Lüftung. Typisch ist der stufige Anstieg der CO₂-Konzentration, der ohne Lüftung nur langsam abklingt. Rechts wird die Lüftung um ca. 15 Uhr aktiv und reduziert die Konzentration rapide. Vorher war die Lüftung aufgrund anwesender Personen im Raum und niedriger Außentemperatur inaktiv.

Zur Verbesserung der Akzeptanz werden einfache Eingriffsmöglichkeiten durch den Nutzer empfohlen, die sich nach einiger Zeit selbst wieder zurücksetzen. Placeboschalter, die eine Eingriffsmöglichkeit nur vorgaukeln, werden nicht empfohlen, da diese die Akzeptanz durch die Nutzer eher verringern. Das Vertrauen in die technischen Systeme, das Gebäude und den Betreiber geht dabei verloren [4].

Im Projekt „Dezentrale Lüftungen“ [3] wurde den Nutzern bei einigen Geräten über einen Taster am Lehrerpult (Abb. 2.2) oder im Lehrerzimmer die Möglichkeit eingeräumt, bei unangenehmen Nebenerscheinungen der Lüftungsgeräte wie Geräusentwicklung oder Zugluft die Geräte temporär ausschalten zu können. Bei einer Umfrage unter den Lehrern zeigte sich, dass einige Lehrer unangenehme Zuglufterscheinungen bemängeln, der Taster den Lehrern aber nur teilweise bekannt war. Durch einen Aushang im Lehrerzimmer wurde daraufhin gezielt auf diese Möglichkeit des manuellen Eingriffs in die Regelung hingewiesen. Der Taster wird bei Pausenbeginn automatisch zurückgesetzt, sodass kein weiterer Eingriff durch den Lehrer notwendig ist und die Lüftung des Raums in der Pause gewährleistet ist.



Abb. 2.2: Taster am Lehrerpult zur temporären Deaktivierung des Lüftungsgerätes

2.2 Regelstrategie zur Nachtkühlung

Die meisten am Markt angebotenen Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung verfügen über eine Bypassklappe und eine Schaltung zur Nachtauskühlung. Dabei wird bei hohen Raumtemperaturen der Wärmeübertrager im Gerät umgangen und nachts Außenluft zur Kühlung des Raums ohne Vorwärmung in den Raum eingebracht. Dadurch wird eine energieeffiziente Raumkühlung realisiert, die keinerlei Investitionskosten außer der ohnehin benötigten Lüftungsanlage bedarf. Nähere Details können dem Leitfaden „Natürliche Gebäudeklimatisierung in Klassenzimmern“ [7] entnommen werden.

3 Aufstellung der Lüftungsgeräte

Lüftungsgeräte sind so anzuordnen, dass negative Begleiterscheinungen vermieden werden oder nur reduziert in Erscheinung treten. Leider ist dies nicht immer in ausreichendem Maß möglich. Wo dies nicht gewährleistet werden kann, sollte in jedem Fall eine Einrichtung zur temporären Abschaltung des Lüftungsgeräts installiert werden und die Nutzer in geeigneter Form darüber informiert werden. Folgende Normen, Leitfäden, Verordnungen und Richtlinien sind für die Anforderungen an Hygiene und Raumklima relevant.

Tab. 3.1: Für den Einbau von Lüftungsgeräten relevante Normen, Leitfäden, Verordnungen und Richtlinien

Norm/Richtlinie	Titel	Relevanz für Lüftungsanlagen in Schulen
DIN EN 15251	Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik	Auslegung Raumluftqualität Akustik Energieeffizienz
DIN EN 13779	Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlsysteme	Auslegung Planung
DIN 18041	Hörsamkeit in Räumen - Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung	Akustik / Lärmschutz
DIN 4109	Schallschutz im Hochbau; Anforderungen und Nachweise	Akustik / Lärmschutz
VDI 6022	Raumlufttechnik, Raumluftqualität - Hygieneanforderungen an Raumlufttechnische Anlagen und Geräte	Gerätehygiene
VDI 6040	Raumlufttechnik - Schulen - Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln, VDI-Schulbaurichtlinien)	
Leitfaden	Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden des Umweltbundesamtes	Umfassend
EnEV	Energieeinsparverordnung	Energieeffizienz
DIN V 185599	Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung	Energieeffizienz Berechnungsgrundlagen

3.1 Geräuscentwicklung

Um Geräusche durch die Lüftungsanlage zu reduzieren, sollten diese möglichst in einem anderen Raum oder unter der Deckenverkleidung installiert werden. Die Lüftungsgeräte entwickeln teilweise eine erhebliche Geräuschkulisse, die den Unterricht oder arbeitende Lehrer stören können. Die VDI-Richtlinie 2081 gibt Richtwerte für den maximalen Schalldruckpegel durch Lüftungsanlagen von 35 dB(A) bei hohen und 40 dB(A) bei niedrigen Anforderungen an. Die Geräusche werden aber von verschiedenen Personen unterschiedlich stark wahrgenommen, weshalb auch bei Einhaltung der genannten Richtwerte Beschwerden möglich sind. Außerdem hat auch die akustische Situation im Raum Einfluss auf das Geräuschempfinden. Diese wird durch andere Geräte wie PCs oder Beamer, Geräusche der Nutzer und die Akustik des Raums selbst beeinflusst. So wird eine Lüftungsanlage während einer Klassenarbeit unter Umständen als deutlich störender empfunden, als wenn Geräte wie ein Beamer, oder PCs in Betrieb sind. Die Schlussfolgerung, dass in Räumen in denen schon viele Geräuschquellen vorhanden sind und schon ein hoher Lärmpegel besteht, eine Lüftungsanlage nicht mehr ins Gewicht fällt ist allerdings nicht zulässig.

Außerdem kann das gleiche Gerät je nach Akustik der Räume in verschiedenen Räumen, in Abhängigkeit von der Nachhallzeit und der Nutzung des Raumes, als unterschiedlich stark störend empfunden werden.

Im Projekt „Dezentrale Lüftungen“ [3] hat sich ein Schalter zur temporären Abschaltung der Lüftungsanlage bewährt.

3.2 Zuglufterscheinungen

Zuglufterscheinungen gehören ebenfalls zu den potenziell negativen Auswirkungen einer Lüftungsanlage. Diese können bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten über 0,18 m/s bis 0,22 m/s und / oder niedriger Zulufttemperatur entstehen. Dabei ist anzumerken, dass im Sommer bei hohen Raumtemperaturen Zugluft durchaus auch als angenehm empfunden werden kann, da die Körperabwärme besser abtransportiert wird. Da in Klassenräumen und Lehrerzimmern, aufgrund der dichten Belegung, hohe Luftwechselraten (bis 900 m³/h) notwendig sind, sind niedrige Strömungsgeschwindigkeiten oft nur schwer zu realisieren. Je nach Art des Lüftungsgerätes ist auch kaum zu verhindern, dass zumindest an einzelnen Plätzen Zuglufterscheinungen entstehen. Insbesondere bei Lüftungskonzepten ohne Vorwärmung der Zuluft, entstehen diese bei Außentemperaturen unterhalb der Raumtemperatur.

Im Projekt „Dezentrale Lüftungen“ [3] hat sich hier besonders eine Lösung bewährt, bei der die Zuluft über einen großen Querschnitt in den Raum eingebracht wird (siehe Abb. 3.1). Die Zuluft wird über die gesamte dem Raum zugewandte Oberfläche des Quellauslasses in den Raum eingebracht. Mit einer geschätzten luftdurchlässigen Oberfläche von 2 m² ergibt sich bei einem Luftdurchsatz von ca. 600 m³/h eine Strömungsgeschwindigkeit von 0,08 m/s die sich bei Ausbreitung in den Raum noch verringert. In Kombination mit der über den Wärmetauscher vorgewärmten Zuluft, sollten Zuglufterscheinungen höchstens in Ausnahmefällen auftreten. Die verbrauchte Abluft wird in der dem Quellauslass diagonal gegenüberliegenden Ecke unter der Decke abgesaugt. Damit breitet sich die tendenziell kühlere Zuluft in Bodennähe im Raum aus, steigt bei Erwärmung durch Personen, Heizung, Geräte oder direkte solare Einstrahlung auf und wird oben abgesaugt. Das Lüftungsgerät selbst ist zur Reduzierung von Schallemissionen in einem Nebenraum untergebracht.



Abb. 3.1: Quellauslass im Computerraum einer untersuchten Schule

Eine andere Lösung, bei der der Luftaustausch über ein Deckengerät realisiert wurde (Abb. 3.2), bläst die Zuluft unterhalb der Decke in den Raum. Diese soll an der Decke entlang in den Raum strömen und Zuglufterscheinungen sollten so nicht entstehen. Bei diesem Gerät kam es allerdings zu Klagen wegen Zugluft, da die Zuluft direkt vor dem Lehrerpult in den Raum abfällt und zu Zuglufterscheinungen führt. Durch den Taster zur temporären Abschaltung des Gerätes, können die Nutzer bei unangenehmer Zugluft das Gerät direkt ausschalten. Aufgrund der räumlichen Situation war eine aufwendige Installation wie in Abb. 3.3 hier nicht möglich. Durch das Anbringen eines Zuluftrohres mit mehreren Ventilen, durch die die Luft nicht nur punktuell in den Raum eingebracht wird, könnten sich die Zuglufterscheinungen deutlich reduzieren lassen. Alternativ wäre hier auch ein Schlauch aus Fließ möglich, der die Luft über die gesamte Schlauchoberfläche in den Raum einbringt.



Abb. 3.2: Deckenlüftungsgerät bei dem Zuglufterscheinungen auftreten

Das bereits zuvor in Abschnitt 2.1 erwähnte Lüftungskonzept ohne Vorwärmung der Zuluft wurde regelungstechnisch so realisiert, dass bei Anwesenheit von Personen die Lüftung inaktiv bleibt. Ohne Vorwärmung der Zuluft kommt es bei Außentemperaturen unterhalb der Raumtemperatur verstärkt zu Zuglufterscheinungen.

Bei Lüftungskonzepten mit manueller Fensterlüftung sind temporäre Zuglufterscheinungen vorprogrammiert. Diese sind für den Nutzer durch schließen des Fensters aber sehr leicht zu beseitigen.

3.3 Platzbedarf der dezentralen Lüftungsgeräte

Die verschiedenen Lüftungsgeräte haben aufgrund Ihrer Bauart und Installationsweise sehr unterschiedliche Platzbedarfe. Brauchen Decken-/Wandgeräte zwar einerseits keinen Stellplatz, brauchen sie andererseits aber einen geeigneten Platz unter der Decke oder an der Wand, möglichst direkt an der Fassade um Frisch- und Fortluft mit kurzen Rohren realisieren zu können. Je nach räumlicher Situation und Gerätebauart können diese Geräte ohne weitere Verrohrung die Zuluft über Lüftungsschlitze an den Geräteseiten in den Raum einbringen (Abb. 3.2). Nachteilig ist hierbei, dass die Luft auf derselben Raumhöhe eingebracht wird, auf der sie auch abgesaugt wird.

Ein im Projekt „Dezentrale Lüftungen“ [3] installiertes Deckengerät (Abb. 3.2) hat bei einem maximalen Luftvolumenstrom von 900 m³/h ein Gerätevolumen von 0,824 m³. Ein anderes eingesetztes Deckengerät hat bei maximalem Volumenstrom von 1.100 m³/h ein Gerätevolumen von 0,786 m³ (Abb. 3.3). Die Geräte können bei vorhandenen abgehängten Decken oberhalb der Abhängung eingebaut werden oder mit Zu- und Abluft über Rohrleitungen in einem Nebenraum untergebracht werden.



Abb. 3.3: Deckenlüftungsgerät mit zusätzlicher Verrohrung für Zu- und Abluft.

Standgeräte benötigen eine Aufstellfläche direkt an der Fassade um Frisch- und Fortluft über kurze Wege an die Außenluft anschließen zu können. Die beispielhafte Standfläche eines Gerätes mit 900 m³/h maximalem Luftdurchsatz beträgt bei 1.500 mm Breite 0,9 m². Die Höhe dieses Gerätes beträgt 2.000 mm. Standgeräte bieten den Vorteil, dass die Frischluft in Bodennähe in den Raum einströmen und oben wieder abgesaugt werden kann. Aufgrund des Platzbedarfes an der Wand sind diese aber oft nicht oder nur mit Einschränkungen realisierbar. Dieser Gerätetyp kann aufgrund der Möglichkeit, Zu- und Abluft über Rohrleitungen in den Raum einzubringen auch in einem Nebenraum untergebracht werden. Diese Variante mit Quellauslass am Boden wurde im Projekt „dezentrale Lüftungen“ für die Biologieräume überprüft aber verworfen. Bei Installation im Raum wären alle Schränke entfallen. Bei Installation im Nebenraum hätte der Platz für die notwendige Verrohrung nicht ausgereicht.



Abb. 3.4: Standlüftungsgerät mit Quelllüftung (Quelle: Energenio GmbH. Eine Marke der Maico Gruppe)

Eine weitere Gerätebauart sind Brüstungsgeräte. Diese können aufgrund Ihrer Bauart direkt in oder vor der Fensterbrüstung verbaut werden. Selbstverständlich muss die Brüstung des zu belüftenden Raumes deren Einbau zulassen oder nicht bereits durch z.B. Regale oder Heizkörper belegt sein. Aufgrund der kompakten Bauart sind außerdem oft mehrere Geräte notwendig um den notwendigen Luftwechsel zu realisieren. Der Einbau muss im zu belüftenden Raum erfolgen. Der Anschluss von Zu- und Abluft über Rohrleitungen ist nur in Ausnahmefällen möglich.

Bei reinen Abluftgeräten ist der Platzbedarf deutlich geringer oder entfällt, da die Geräte ohne Wärmeübertrager im Vergleich deutlich kompakter sind. Sie können häufig in die Fassade oder Decke des Raums integriert werden und sind nur durch ein Lüftungsgitter sichtbar. Für die Nachströmung der Zuluft werden häufig Fenster automatisiert geöffnet, für die kein zusätzlicher Platzbedarf besteht.

Lüftungskonzepte mit CO₂-Ampel haben selbstredend nahezu keinen Platzbedarf. Sie benötigen lediglich einen Stellplatz für die Ampel auf einem Tisch oder Fensterbrett, oder können an der Wand befestigt werden. Es ist je nach Modell höchstens ein Stromanschluss in Form einer Steckdose notwendig.

4 Hygieneuntersuchungen

Im Rahmen des Projektes „Dezentrale Lüftungen“ [3] wurden mikrobiologische Hygieneuntersuchungen nach VDI 6022 durchgeführt. Dabei zeigten sich, bei allen untersuchten Geräten an mindestens einer der beprobten Stellen, hygienische Mängel. Allerdings enthielt bei allen außer einem Gerät die Zuluft, die effektiv in den Raum eingebracht wird, weniger Kolonien bildende Einheiten (KBE) an Bakterien und Pilze als die angesaugte Außenluft. Durch die Filter im Lüftungsgerät werden Keime zurückgehalten und führen damit zu einer geringeren Keimzahl als in der Außenluft. Treten höhere Keimzahlen in der Zuluft auf, als in der Außenluft, bestehen hygienische Mängel im Gerät z.B. an den Filtern.

Durch das Hygieneinstitut wurden auch Hinweise zur Gerätesicherheit und Einhaltung der Vorgaben in VDI 6022 hinsichtlich Gerätehygiene gegeben. Hierbei zeigten sich Mängel z.B. im Bereich der Oberflächen, die mit der Zu- bzw. Frischluft in Kontakt kommen. Diese waren bei einem Gerät aus porösem Polystyrol gefertigt, sodass das Gerät nur mit erhöhtem Aufwand hygienisch gereinigt werden kann. Auch im Bereich der Gerätesicherheit wurde z.B. auf nicht gesicherte Geräteabdeckungen an der Unterseite und Ähnliches hingewiesen.

Schlussfolgernd kann festgehalten werden, dass regelmäßige Reinigung, Wartung und Filterwechsel der Geräte unerlässlich für einen gefahrlosen Betrieb der Geräte ist. Die Untersuchungsintervalle der VDI 6022 sind ebenfalls einzuhalten um den Erfolg der Reinigung der Geräte zu dokumentieren und um Problembereiche des Gerätes erkennen und eliminieren zu können.

5 Auslegung der Lüftungsgeräte

Für die Dimensionierung der Lüftungsgeräte gibt es unterschiedliche Ansätze, die auch im Status-Report 22 des Fachverbandes Gebäude-Klima e.V. [6] aufgeführt sind. Diese Berechnungsmethoden basieren auf den Normen DIN EN 13779 und DIN EN15251.

Bei Auslegung nach DIN EN 13779 wird für eine einen Zielwert von ca. 1.000 ppm CO₂ ein Lüftungsvolumenstrom von ca. 36 m³/h pro Schüler angenommen. Die Kategorie der Raumluftqualität ist dabei frei wählbar und reicht von IDA 1 mit größer 400 ppm CO₂ bis IDA 4 mit größer 1.000 ppm CO₂ über dem Außenluftniveau. Bevorzugt werden die Kategorien IDA 2 und IDA 3 angewandt.

Nach DIN EN 15251 werden auch die Gebäudeemissionen in die Berechnung des Luftvolumenstroms flächenbezogen mit einbezogen. Dabei werden sehr schadstoffarme, schadstoffarme, und nicht schadstoffarme Gebäude unterschieden. Die Ziel-Luftqualität wird in drei Kategorien eingeteilt. Kategorie I steht hier für hohe Anforderungen und Kategorie III für niedrige Anforderungen an die Luftqualität. Ausgehend von einem Schadstoffarmen Gebäude, in der Kategorie II für die Ziel Luftqualität, ergibt sich ein Luftvolumenstrom von 30 m³/h pro Person, bei einer Fläche von 2 m²/Person (Tab. 5.1 Zeile 5)

Laut Passivhausinstitut ist ein Luftvolumenstrom von 15 – 20 m³/h pro Person ausreichend [8]. (siehe Tab. 5.1 Zeile 6)

Zum Vergleich wurde in Tab. 5.1 Zeile 8 ein Lüftungsbedarf von 40 m³/h für IDA 2 nach DIN EN 13779 angenommen.

Außer der CO₂-Belastung soll auch die sommerliche Überhitzung durch die Lüftungsgeräte reduziert werden. Dabei wird ein doppelter Luftwechsel als ausreichend angenommen. Das bedeutet: Das Raumvolumen wird rechnerisch zweimal pro Stunde ausgetauscht (Tab. 5.1 Zeile 7). Leider liegen hierzu wegen Fehlfunktion des Gerätes und der Insolvenz der Installationsfirma noch keine Erkenntnisse vor bzw. liegen für die Lüftungsgeräte nur Messdaten der Winterperiode vor.

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass eine korrekte Gerätefunktion erst nach einer Einregulierungs- und Optimierungsphase zu erreichen ist. Wegen der unterschiedlichen Anforderungen in der Sommer- und in der Winterphase ist für diese Optimierungen ein Zeitraum von deutlich mehr als einem Jahr realistisch. Bei Ausschreibungen und Ingenieurverträgen sollte diese Optimierung im laufenden Betrieb explizit verlangt und nach der Installation auch durchgesetzt werden.

Die jeweils angegebene Personenzahl ist in den Unterrichtsräumen und im Lehrerzimmer die Anzahl der Sitzplätze. In den Verwaltungsräumen wurde von jeweils maximal vier Personen ausgegangen.

Die verschiedenen Berechnungsmethoden nach den DIN-Normen zeigen bei den angenommenen Randbedingungen keine gravierenden Unterschiede. Lediglich die Berechnung des Lüftungsbedarfs für die Nachtkühlung liegt deutlich unter den anderen Werten.

Eine einfach zu bedienende Auslegungshilfe, wird von Niedersächsischen Landesgesundheitsamt zur Verfügung gestellt (Abb. 5.1). Anhand einzugebender Parameter wie Personenanzahl, Raumvolumen, Luftwechselrate u.a. wird der zu erwartende CO₂-Verlauf im Raum berechnet und im Kurvendiagramm dargestellt. Der Onlinerechner ist unter <http://www.co2-modell.nlga.niedersachsen.de/index.php> verfügbar.

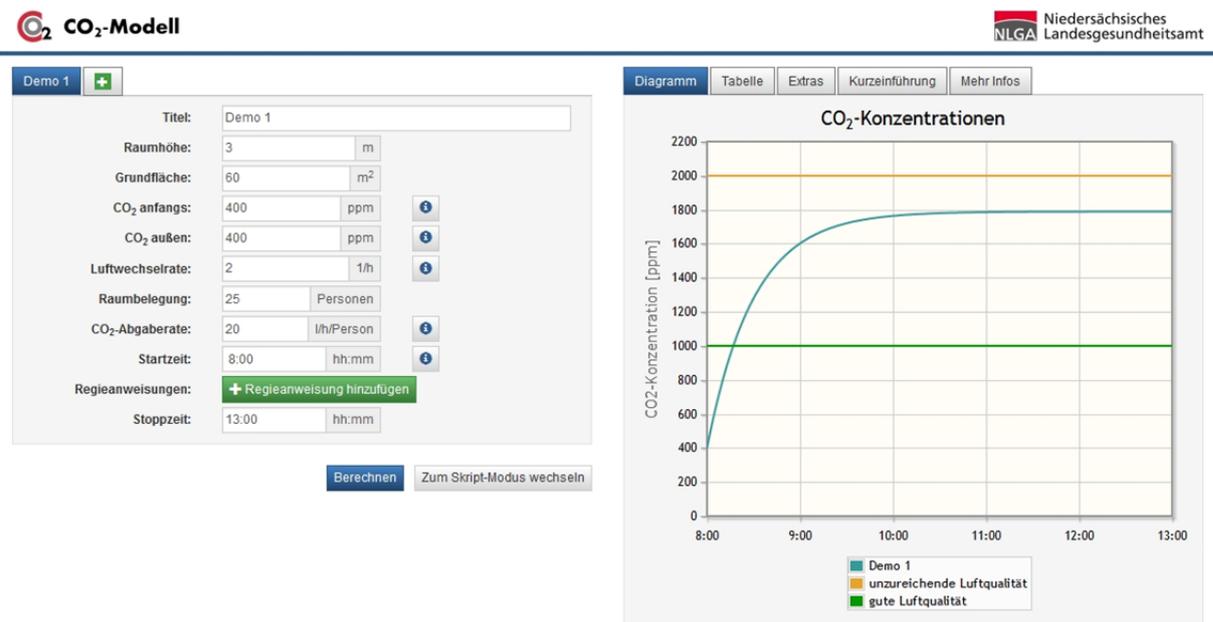


Abb. 5.1: Screenshot des Onlinerechners CO₂-Modell des Niedersächsischen Landesgesundheitsamtes zur Auslegung von Lüftungsanlagen (Mit freundlicher Genehmigung des niedersächsischen Landesgesundheitsamtes)

Tab. 5.1: Auslegung der Lüftungsgeräte in den Schulen des Projektes „Dezentrale Lüftungen“ [3].

		Lehrer- zimmer	Rektorat	Sekreta- riat	Kon- rektorat	Computer- raum	Bioraum 300	Bioraum 317
1	Fläche in m ²	97,31	21,94	22,24	20,44	73,77	87,09	82,92
2	Raumhöhe in m	3,25	2,5	2,5	2,5	3,12	3,46	3,46
3	Volumen in m ³	316	55	56	51	230	301	287
4	Personenzahl	50	4	4	4	30	30	30
5	25 m ³ /(Pers*h) + 5 m ³ /(m ² *h) Volumenstrom in m ³ /h	1737	210	211	202	1119	1185	1165
6	20 m ³ /(h Person)	1000	80	80	80	600	600	600
7	Doppelter Luft- wechsel in m ³ /h	633	110	111	102	460	603	574
8	40 m ³ /Pers.	2000	160	160	160	1200	1200	1200

6 Investitionskosten

Für die in den Schulen im Projekt „Dezentrale Lüftungen“ [3] umgesetzten Lüftungskonzepte sind die in Tab. 6.1 aufgelisteten Kosten entstanden. In den Kosten sind neben den reinen Anlagenkosten, die Kosten für Montage, Nebenarbeiten (z.B. Kernbohrungen) und Planung enthalten.

Es zeigt sich eine sehr große Bandbreite bei den Kosten, die sich aufgrund der sehr unterschiedlichen Lüftungskonzepte ergibt.

Die Lüftungsampeln in den Büroräumen der THR sind die mit 420 € pro Ampel mit großem Abstand günstigste Variante. Neben den Hardwarekosten fallen lediglich Kosten für die Montage der CO₂-Ampel und evtl. eine Steckdose in Reichweite der Ampel an. Die Montage beschränkt sich dabei auf das Anbringen eines Nagels oder einer Schraube an der Wand zum Aufhängen. Für die mit CO₂ gering belasteten Verwaltungsbüros der THR, sind die CO₂-Ampeln, u.a. aufgrund der festgestellten hohen Nutzerzufriedenheit (Kapitel 0) eine kostengünstige, leicht umsetzbare und bedarfsgerechte Alternative zu automatisierten Lüftungsgeräten. Nachteilig wirkt sich hier allerdings aus, dass bei jeder Fensterlüftung immer viel warme Luft an die Umgebung verloren geht und der Raum bei zu langer Lüftung auskühlt. Außerdem wird die CO₂-Konzentration nur in geringerem Maße, als mit automatisierten Lösungen gesenkt. Inwiefern CO₂-Ampeln in Unterrichtsräumen geeignet sind, war nicht Bestandteil dieses Projektes.

Die Kosten für die Einbindung der Abluftanlage der THR in die Gebäudeautomation (GA) mit 1.217 € haben nur eine geringe Aussagekraft. Die Kosten für den Lüfter, die automatischen Fensteröffner, den Präsenzmelder und die benötigten Temperaturfühler sowie

der Einbau dieser Geräte sind nicht enthalten. Die Kosten fallen damit deutlich günstiger aus, als bei den neu installierten Lüftungsgeräten mit Wärmerückgewinnung (WRG). Allerdings würden die Kosten dieses Anlagentyps incl. der bereits vorhandenen Anlagenbestandteile wahrscheinlich günstiger ausfallen. Nachteilig ist aber auch hier der hohe Wärmeverlust über die Abluft und die niedrige Temperatur der Zuluft im Winter.

Die drei Lüftungsanlagen in den Biologieräumen (21.259 €) und dem Computerraum (26.638 €) fallen naturgemäß am teuersten aus und bewegen sich trotz der unterschiedlichen Lüftungsanlagentypen und dem unterschiedlichen Installationsaufwand preislich auf ähnlichem Niveau. Beim Computerraum waren vier Kernbohrungen notwendig. Außerdem musste ein Luftkanal für die Zuluft über die gesamte Raumlänge verlegt werden. In den Biologieräumen wurde keine Kernbohrung benötigt und eine Verrohrung war aufgrund des Gerätetyps nicht notwendig. Zum Anschluss des Gerätes an die Außenluft wurde ein Oberlicht durch eine Platte mit passenden Bohrungen ersetzt.

Tab. 6.1: Kosten für die in den untersuchten Schulen installierten Lüftungskonzepte

Lüftungskonzept	Einzelkosten	Gesamtkosten
Einbindung Abluftanlage in GA	1.217 €	1.217 €
CO ₂ -Ampeln	420 €	1.260 €
Lüftungsanlage mit WRG	26.638 €	26.638 €
Lüftungsanlagen mit WRG Biologie	21.260 €	42.520 €

Eine abschließende Bewertung der Wirtschaftlichkeit der realisierten Anlagentypen ist aufgrund der überschaubaren Anlagenanzahl nur bedingt möglich.

Dennoch kann festgehalten werden, dass die jeweils technisch und wirtschaftlich optimale Lösung stark von den Randbedingungen CO₂-Belastung, Nutzersensibilität und Raumsituation abhängt. In Räumen mit geringer CO₂-Belastung und niedriger Nutzerzahl, wie in den untersuchten Verwaltungsräumen, haben sich die CO₂-Ampeln, u.a. aufgrund der niedrigen Investitionskosten, sehr bewährt.

Im Lehrerzimmer konnte aufgrund der nutzerfreundlichen Regelung die Luftqualität nicht im erhofften Maß verbessert werden (siehe Kapitel 2.1). Dennoch war die Entscheidung für die Aufrüstung der bestehenden Abluftanlage richtig, da die Maßnahme preisgünstig umgesetzt werden konnte und auch ohne Lüftung keine extremen Werte wie in den Unterrichtsräumen aufgetreten sind.

Die Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung sind für Unterrichtsräume am besten geeignet, da damit durch die vorgewärmte Zuluft, Zuglufterscheinungen deutlich reduziert werden. Eine nutzerfreundliche Regelung wie im erwähnten Lehrerzimmer ist hier nicht zu empfehlen. Die CO₂-Konzentration steigt in Unterrichtsräumen sehr rapide, sodass auch während des Unterrichts gelüftet werden muß.

7 Energieeffizienz

Ein entscheidender Parameter für die Auswahl des richtigen Anlagentyps ist dessen thermische und elektrische Effizienz. Daraus ergeben sich ein Teil der Betriebskosten, die sich aus Wartungs-, Reinigungs- Energiekosten zusammensetzen. Bei Geräten mit Wärmerückgewinnung fallen außerdem noch Kosten für Hygieneinspektionen nach VDI 6022 an. Diese lagen im Projekt „Dezentrale Lüftungen“ [3] bei 238,- € pro Gerät. Die Inspektionen sind bei Geräten mit Wärmerückgewinnung ohne Luftbefeuchtung alle drei Jahre durchzuführen.

Die Wartungsverträge der Geräte mit Wärmerückgewinnung verursachen Kosten zwischen 160 € und 300 € pro Gerät und Jahr.

Der Stromverbrauch hängt in erster Linie vom Lüftungstyp ab. CO₂-Ampeln schneiden dabei selbstredend am besten ab, da lediglich für die Mess- und Anzeigeräte Strom benötigt wird.

Reine Abluftgeräte benötigen tendenziell weniger Strom als Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung, da in diesen zwei Lüfter verbaut sind und durch den Wärmeübertrager ein hoher Druckverlust von den Lüftern überwunden werden muss. Außerdem werden oft noch Lüftungsrohre verbaut, die einen zusätzlichen Druckverlust generieren.

Die Regelparameter haben einen entscheidenden Einfluss auf den Stromverbrauch. Laufen die Geräte generell mit einer Grundleistung, wenn sie aktiviert sind, sollten sie außerhalb der Unterrichtszeiten für die CO₂-Lüftung deaktiviert werden. Nach Unterrichtschluss sollte allerdings eine Nachlaufzeit von ein bis zwei Stunden einkalkuliert werden. An Wochenenden und in den Ferien gilt dies ebenfalls. Die Deaktivierung des Lüftungsgerätes kann, falls dies in der Regelung des Gerätes selbst nicht vorgesehen ist, über eine vorhandene Gebäudeautomation realisiert werden.

Hersteller- und auch gerätespezifisch unterscheiden sich Geräte mit Wärmerückgewinnung, auch in der elektrischen Leistungsaufnahme bei ähnlicher Lüftungsleistung und Bauart. Dementsprechend sollte hier besonderes Augenmerk drauf gelegt werden. Im Projekt „Dezentrale Lüftungen“ [3] wurde beispielsweise ein Gerät eingesetzt, das bei Grundlast (30 % Lüfterleistung) 15 Watt an elektrischer Leistung aufnimmt, ein anderes Gerät mit ähnlicher Lüfterleistung benötigt ca. 360 W bei Grundlast.

Ebenso sollte bei Grundlast das Lüftungsgerät nur wenig Luft bewegen, da die Wärmeverluste stark vom Volumenstrom und wie bei Stromverbrauch von der Betriebsdauer abhängen. Die Lüftungsgeräte setzen aber häufig einen kontinuierlichen Betrieb auf niedrigster Stufe voraus, der bei manchen Geräten zeitgesteuert unterbrochen werden kann. Daraus können hohe Wärmeverluste resultieren.

Daher wird empfohlen Lüftungsgeräte einzusetzen, die nicht kontinuierlich auf niedriger Stufe laufen. Die Geräte sollten in Abhängigkeit von der CO₂-Konzentration den Lüfterbetrieb starten. Dafür ist ein außerhalb des Gerätes platzierter CO₂-Sensor notwendig, der auch bei ausgeschaltetem Lüfter die CO₂-Konzentration korrekt erfassen kann. Eine Zeitsteuerung verursacht meist höhere Wärmeverluste und Stromverbräuche.

8 Nutzerzufriedenheit

Für den Einsatz von Lüftungsgeräten ist entscheidend, dass diese auf eine hohe Akzeptanz und Zufriedenheit der Nutzer mit den Geräten stoßen. Vorbehalte gegenüber Lüftungen sind teilweise schon vor dem Einbau vorhanden und können durch Geräuschentwicklungen oder Zuglufterscheinungen durch die eingebauten Anlagen noch verstärkt werden.

Daher ist dringend darauf zu achten, dass die Geräte möglichst geringe Auswirkungen auf das Wohlbefinden der Nutzer haben. Zugluft und Geräuschemissionen sind gering zu halten (Kapitel 0). Außerdem sollten die Nutzer möglichst früh informiert werden um deren Bedenken berücksichtigen zu können. Geräte mit denen die Nutzer unzufrieden sind, führen zu Unmut und schlimmstenfalls zum permanenten Ausschalten auf Druck der Nutzer.

Eine höhere Akzeptanz der Geräte kann durch Eingriffsmöglichkeiten in den Anlagenbetrieb erreicht werden. Hierzu wurden die bereits beschriebenen Taster installiert, mit denen die Geräte temporär deaktiviert werden können. Wichtig ist hierbei, die Nutzer über diese Eingriffsmöglichkeit zu informieren. Bei einer Umfrage unter den Lehrern, die die Räume nutzen, wurde mehrfach bemängelt, dass Zuglufterscheinungen auftreten. Der Taster zum temporären Deaktivieren der Anlage, war aber nur einer Person bekannt. Durch einen Aushang wurden die Lehrer daraufhin gezielt nochmals auf den Taster hingewiesen. Insgesamt wird die Luft nach Aktivierung der Lüftungsanlagen durchschnittlich als um fast 1,5 Schulnoten besser eingeschätzt als vorher. Von den befragten Lehrern sind 4 eher zufrieden und 3 eher unzufrieden, was auf die Zuglufterscheinungen zurückgeführt wird. Durch den Hinweis auf den Taster sollte die Zufriedenheit verbessert worden sein.

Eine sehr hohe Zufriedenheit wurde in den Räumen mit CO₂-Ampel (Bürräume Verwaltung) erreicht, da die befragten Nutzer die Ampeln als Empfehlung „etwas für Ihre Gesundheit zu tun“ empfinden [3]. Bedenken im Vorfeld gegenüber einer automatisierten Lüftungsmaßnahme konnte damit begegnet werden.

Im Lehrerzimmer mit Abluftgerät wird die Raumluft, im Vergleich zu vor dem Einbau, etwas besser eingeschätzt und es fühlen sich 2 von 16 Personen durch die Lüftung gestört. Insgesamt sind 10 Personen eher zufrieden mit der Anlage und 2 Personen eher unzufrieden. Diese tendenziell positive Resonanz ist sicher teilweise auf die nutzerfreundliche Regelung wie sie in Kapitel 2.1 beschrieben ist zurückzuführen. Dabei wird die Lüftung bei anwesenden Personen nur dann aktiviert, wenn moderate Außentemperaturen vorliegen.

9 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes „Dezentrale Lüftungen“ [3] wurden mehrere Sondernutzungsräume in Schulen mit dezentralen Lüftungsmaßnahmen ausgestattet, um die CO₂-Belastung der Räume zu reduzieren. Es handelt sich dabei um Verwaltungsbüros, Lehrerzimmer und Fachräume. Diese Räume, deren Türen aus verschiedenen Gründen abgeschlossen werden müssen, konnten nicht in das Lüftungskonzept des Vorgängerprojektes zur natürlichen Gebäudeklimatisierung integriert werden. Dieses setzt, aufgrund des zentralen Abluftkonzeptes, das Öffnen der Türen und Oberlichter in den Unterrichtsräumen, zum Nachströmen der Frischluft voraus.

Vor Umsetzung der Lüftungsmaßnahmen wurde in den Räumen die CO₂-Belastung erfasst. Es zeigte sich dabei, dass in Verwaltungsbüros und Lehrerzimmern nicht unbedingt Lüftungsmaßnahmen erforderlich sind. Dementsprechend wird empfohlen, im Falle der Nachrüstung von Lüftungsmaßnahmen, vorher über einen längeren Zeitraum im Winter zu erfassen, um die Notwendigkeit von Lüftungsmaßnahmen zu prüfen. Der CO₂-Verlauf gibt auch darüber Aufschluss, welche Lüftungsmaßnahme jeweils geeignet ist.

Auch nach Einbau der Lüftungsgeräte wurde das Monitoring fortgesetzt um den Erfolg der Maßnahmen zu prüfen und fehlerhafte Reglereinstellungen feststellen zu können.

In den Räumen wurden neben Lüftungsgeräten mit Wärmerückgewinnung auch reine Abluftgeräte installiert bzw. vorhandene Geräte automatisiert. Außerdem fanden CO₂-Ampeln in schwachbelasteten Räumen mit ein oder zwei Arbeitsplätzen Anwendung.

Aus den Ergebnissen des zugehörigen Monitorings und den Erfahrungen, die im Zusammenhang mit dem Einbau der Anlagen gemacht wurden, wurde dieser Leitfaden erarbeitet. Er gibt Auskunft zu Auslegung, Platzbedarf, Regelstrategie, Kosten und Energiebedarf der Geräte und auch Wärmeverluste durch die Geräte und gibt Empfehlungen für Neuinstallationen. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Nutzerzufriedenheit, die untersucht und hier berücksichtigt wurde.

10 Literaturverzeichnis

- [1] J. da Costa Fernandes, E. Bollin, M. Niederklostermann, T. Feldmann und H.-J. Schneble, „Natürliche Gebäudeklimatisierung in Klassenzimmern Leitfaden für die Überhizungsminderung an Schulgebäuden im südlichen Oberrheingraben,“ Offenburg, 2013.
- [2] 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,“ Wien, 2008.
- [3] K. Huber, E. Bollin, H.-J. Schneble und F. Gresens, „Dezentrale, fassadenintegrierte Lüftungsanlagen für energetisch sanierte Gebäude,“ Offenburg, 2016.
- [4] R. T. Hellwig, M. Hackl und C. Nocke, „Lüften in Schulen, Bessere Lernbedingungen für junge Menschen,“ BINE Informationsdienst, Karlsruhe, 2015.
- [5] I. d. UBA, „Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden,“ Berlin, 2008.
- [6] Fachverband Gebäude-Klima e.V. (kostenloser download unter www.fgk.de), „Status-Report 22 Lüftung in Schulen,“ Fachverband Gebäud-Klima, Bietigheim-Bissingen, 2011.
- [7] H.-J. Schneble, J. da Costa Fernandes, M. Niederklostermann und E. Bollin, „Natürliche Gebäudeklimatisierung in Klassenzimmern,“ Offenburg, 2013.
- [8] O. Kah, T. Schulz, S. Winkel, J. Schnieders, Z. Bastian und B. Kaufmann, „Leitfaden für energieeffiziente Bildungsgebäude,“ Passivhausinstitut, Darmstadt.
- [9] J. Egert, „Schimmelpilze im Innenraum: Wachstumsbedingungen, gesundheitliche Gefährdung, Bekämpfung,“ in *Feuchtetag '99*, Berlin, 1999.

Das Projekt wurde im Auftrag der Stadt Offenburg durchgeführt und vom Innovationsfonds für Klima- und Wasserschutz der badenova AG & Co. KG unter dem Förderkennzeichen 2012-10 gefördert.