

Abschlussbericht

Projektnummer: 2016-10

Berichtsdatum: 25.04.2019

Laufzeit: 01.04.2016 bis 31.12.2018

Berichtszeitraum: 01.04.2016 bis 31.03.2019

Fördervolumen: 125.000 €

Projektname:

Begleitforschung zur energieoptimierten Sanierung der Waldbachschule mittels innovativer solarer Lüftungstechnik (enSol).



Autoren:

Hans-Jürgen Schneble (Stadt Offenburg)
Dominik Bestenlehner (Solar- und Wärmetechnik Stuttgart)
Jochen Klingler (EnerSearch Solar GmbH)
Marco Wagner (EnerSearch Solar GmbH)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Ausgangslage	5
1.2	Maßnahmen der Sanierung	5
1.3	Lage der Schule	6
1.4	Grundrisse	7
1.5	Energieausweis und Passivhausnachweis (nicht zertifiziert)	9
1.6	Leitfaden Innenraumhygiene Schulgebäude	10
1.7	Grenzwerte Normen	10
1.8	Grenzwerte Stadt Offenburg	11
2	Projektbeschreibung	12
2.1	Projektablaufplan und Meilensteine	12
2.2	Definition und Terminierung von Meilensteinen	14
3	Projektablauf und Ergebnisse	19
3.1	Demoanlage und Vorversuch	19
3.2	Inbetriebnahme	20
3.3	CO ₂ -Verteilung	21
3.4	Brownsche Molekularbewegung	22
3.5	Carpet Plots (Heat Maps)	23
3.6	Dauerlinien	27
3.7	CO ₂ -Konzentration und Lüfter Drehzahl	29
3.8	Aerosole und vorbeugender Gesundheitsschutz	29
3.9	Sommerlicher Wärmeschutz	29
3.10	Sommernachtlüftung	30
3.11	Klimawandel	32
3.12	Flächenheizung/-kühlung	33
3.13	Stromverbrauch	35
3.14	Solarkollektoren	37
3.15	Ferien- und Nachtabschaltung	38
3.16	Software	38
3.17	Schall	39
4	Zusammenfassung	43
	Literaturverzeichnis	44
	Abbildungsverzeichnis	45
	Tabellenverzeichnis	46

1 Einleitung

Die heute übliche, energieeffiziente Bauweise mit luftdichten Gebäudehüllen führt bei konventioneller Fensterlüftung häufig zu unzureichenden Luftwechselraten. Gerade im Schulbereich sind die Anforderungen erhöht und deshalb nur mit besonderem Aufwand einzuhalten. Insbesondere die Begrenzung der CO₂-Konzentrationen stellen an Planer, Errichter und Betreiber große Herausforderungen dar.

Herkömmlich wird von starren Volumenströmen pro Person ausgegangen. Große, zentrale Lüftungsanlagen oder –systeme haben bei vielen realisierten Projekten zu hohen Geräuschemissionen und unangenehmen Zuglufterscheinungen (Bollin, et al., 2016) geführt, die im Schulalltag den Unterricht so signifikant stören, dass die Lüftung von den Lehrkräften abgeschaltet wird. Unzulässig hohe CO₂-Konzentrationen waren damit in aller Regel die Folge.

Zielführender ist das Quellen-/Senken-Prinzip, bei dem viele kleine Zuluft-/Abluft-Öffnungen die singuläre Zuluft/Abluft ersetzen. Darüber hinaus ermöglicht die Integration von CO₂-Sensoren und die Implementierung deren Messwerte in den Regelalgorithmus die Drosselung der Lüftung derart, dass einerseits die notwendigen Luftvolumenströme immer gewährleistet sind und andererseits die geforderten Grenzwerte an CO₂-Konzentrationen nicht überschritten werden.

Ziel des Projektes war daher die Entwicklung und Implementierung einer neuartigen, dezentralen Lüftung, die den folgenden Anforderungen gerecht wird.

- Sicherstellung der notwendigen Luftwechselraten
- Sensorgeregelte, bedarfsgerechte Volumenströme
- Begrenzung der CO₂-Konzentrationen
- Reduktion Aerosol-Konzentrationen zum vorbeugenden Gesundheitsschutz
- Wärmerückgewinnung
- Eingriffsmöglichkeit für Lehrkräfte
- Ferienabschaltung
- Nutzung solarer Wärme
- Sommerlicher Wärmeschutz
- Schule als Passivenergiegebäude

Darüber hinaus sollte das System geringe Investitions- und Installationskosten wie auch im späteren Betrieb geringe Betriebs- und Wartungskosten verursachen.

1.1 Ausgangslage

Die Waldbachschule war in die Jahre gekommen. Fassade und Fenster waren unansehnlich und energetisch ineffizient. Viele Fenster waren altersbedingt angelaufen bzw. blind, die Lichtkuppeln undicht.



Abbildung 1: Fotografie der Waldbachschule vor der Sanierung

1.2 Maßnahmen der Sanierung

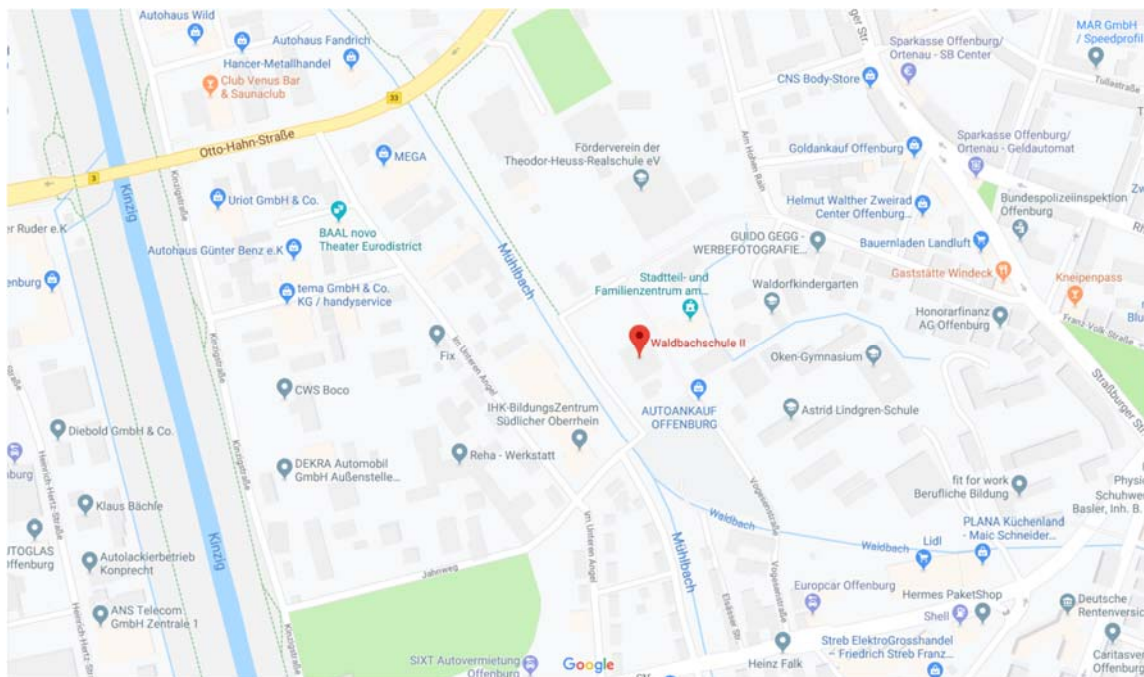
Die Fassade wurde mit 26 cm Mineralwolle, das Flachdach mit 24 cm PUR gedämmt. Die Fenster wurden durch neue mit 3-fach Verglasung und geringem, gedämmten Rahmenanteil ersetzt. Die Lichtkuppeln im Treppenhaus wurden durch einen Dachreiter ersetzt und die Wärmebrücken weitgehend minimiert. Der sommerliche Wärmeschutz wird durch eine computergesteuerte Jalousie erbracht. Auf dem Dach wurde eine Photovoltaik-Anlage installiert. Eine dezentrale Lüftung mit solaren Luftkollektoren wurde eingebaut. Die Planung, Energieplanung und Bauleitung wurde von Dipl.-Ing. Architekt Rainer Roth, Offenburg übernommen.



Abbildung 2: Fotografie der Waldbachschule nach der Sanierung

1.3 Lage der Schule

Die Waldbachschule befindet sich in der Vogesenstraße 30 in 77652 Offenburg.



Quelle: Google-Maps

Abbildung 3: Karte mit der Lage der Waldbachschule

1.4 Grundrisse

Die Grundrisse werden im Folgenden mit den installierten dezentralen Lüftungsgeräten und Sonnenkollektoren dargestellt.

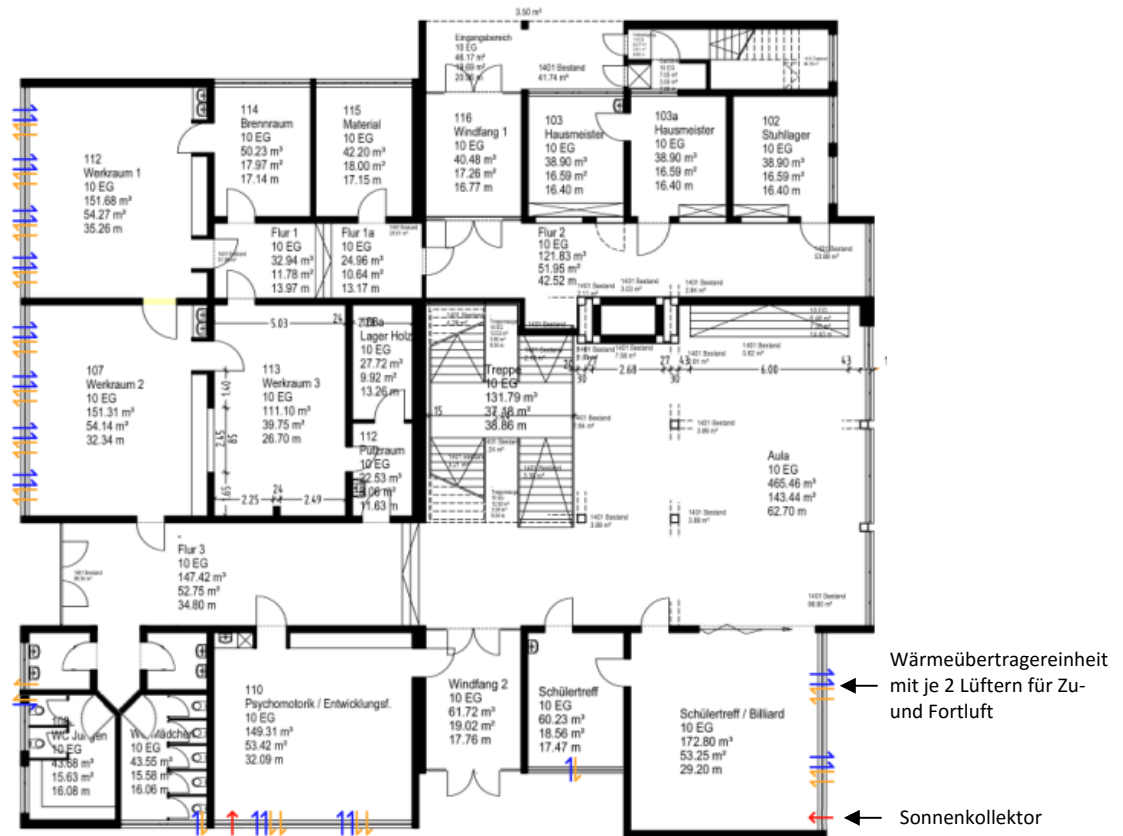


Abbildung 4: Grundriss Erdgeschoss



Abbildung 5: Grundriss 1. Obergeschoss

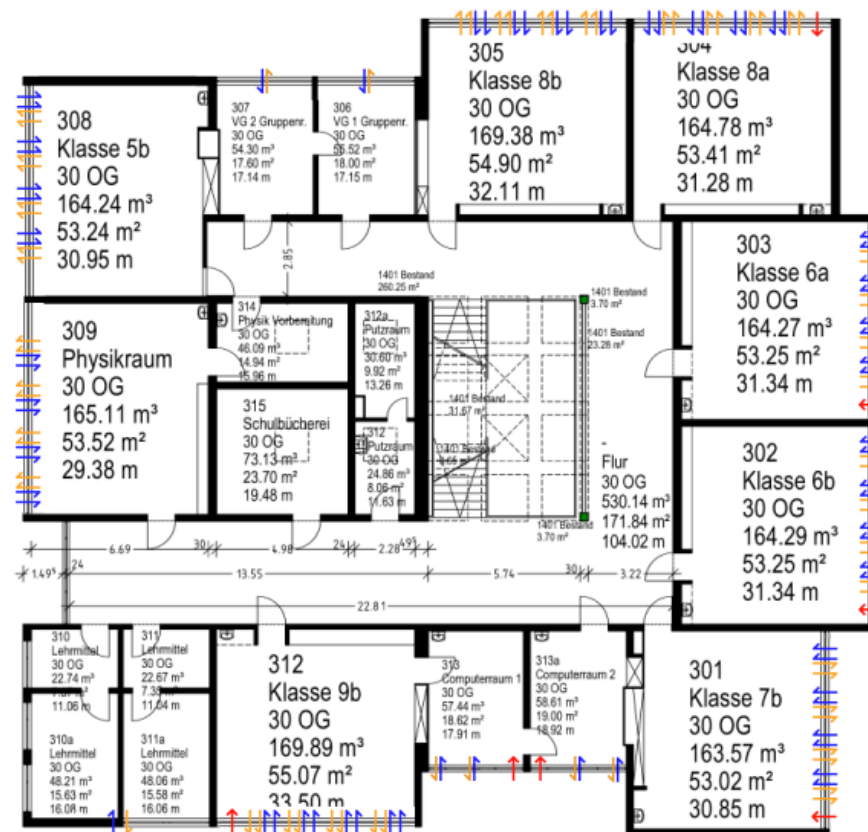


Abbildung 6: Grundriss 2. Obergeschoss

1.5 Energieausweis und Passivhausnachweis (nicht zertifiziert)

ENERGIEAUSWEIS für Nichtwohngebäude

gemäß den §§ 16 ff. der Energieeinsparverordnung (EnEV) vom 1. 11. 2013

Gültig ab: 19.07.2028

Registriernummer: BW 2018 002051818
(oder: Registernummer wurde beibehalten...)

Aushang

Gebäude	
Hauptnutzung/ Gebäudekategorie	Sonderschulen
Adresse	Vogesenstraße 30, 77657 Offenburg
Gebäudetitel	Gesamtgebäude
Baujahr Gebäude	1973
Nettogrundfläche	2386 m²
Wesentliche Energieträger für Heizung und Warmwasser	Nahwärme, Strom-Mix
Erneuerbare Energien	Art: Heizwerk (regenerativ), Fotovoltaik; Verwendung: Heizung

Primärenergiebedarf

↓ Primärenergiebedarf dieses Gebäudes
25,0 kWh/(m²a)

EnEV Anforderungswert
Neubau (Vergleichswert) ↑

↑ EnEV Anforderungswert
modernisierter Altbau (Vergleichswert)

Aufteilung Energiebedarf

Kühlung einschließlich Befehlsleitung
Lüftung
Eingebaute Beleuchtung
Warmwasser
Heizung

Aussteller:
Hans-Jürgen Schnelle
Stadt Offenburg
Weinstraße 12
77654 Offenburg

19.07.2018
Ausstellungsdatum

Unterschrift des Ausstellers

[illegible]

1.6 Leitfaden Innenraumhygiene Schulgebäude

Im „Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden“ des Umwelt-Bundesamts (Moriske, et al., 2008) wird umfangreich auf die verschiedenen Aspekte der Innenraumhygiene in Schulgebäuden eingegangen. So heißt es darin auf S. 10:

Zu den Haupt(luft)verunreinigungen in Schulen zählen:

- Kohlendioxidanreicherungen durch unzureichendes Lüften.
- Zu hohe Feuchtigkeit in der Gebäudestruktur oder in der Raumluft mit der Folge mikrobiellen Befalls.
- Emissionen aus Bauprodukten, Einrichtungs- bzw. Ausstattungsgegenständen.
- Diverse Gerüche bei unzureichendem Lüften etc.
- Emissionen aus Reinigungs- und Pflegemitteln.
- Mögliche Freisetzung von Staub und Rauchgasen im Werkunterricht und naturwissenschaftlichen Unterricht.
- Feinstäube durch Einträge von außen und Innenraumquellen.

Hinsichtlich der CO₂-Konzentrationen werden in diesem Leitfaden auf S. 38 folgende Bereiche definiert:

Tabelle 1: Grenzwerte der CO₂-Konzentrationen gemäß „Leitfaden für Innenraumhygiene in Schulgebäuden“

Tabelle 2. Leitwerte für die Kohlendioxid-Konzentrationen in der Innenraumluft (Ad-hoc-AG 2008)		
CO ₂ -Konzentration [ppm]	Hygienische Bewertung	Empfehlung
< 1000	Hygienisch unbedenklich	▶ Keine weiteren Maßnahmen
1000–2000	Hygienisch auffällig	▶ Lüftungsmaßnahmen intensivieren (Außenluftvolumenstrom bzw. Luftwechsel erhöhen) ▶ Lüftungsverhalten überprüfen und verbessern
> 2000	Hygienisch inakzeptabel	▶ Belüftbarkeit des Raumes prüfen ▶ ggf. weitgehende Maßnahmen prüfen

1.7 Grenzwerte Normen

In Schulen mit technischen Lüftungseinrichtungen galt in Deutschland bis 2005 nach DIN 1946 Teil 2 (Deutsches Institut für Normung e.V., 1994) ein CO₂-Wert von 0,15 Vol.-% (= 1500 ppm) als hygienischer Richtwert. Im Juli 2005 ist an die Stelle von DIN 1946-2 die EN 13779 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2007) getreten, die im September 2007 ergänzt wurde. Diese EN enthält Empfehlungen für die Planung und Ausführung lüftungstechnischer Anlagen in allen Nichtwohngebäuden, die für den Aufenthalt von Menschen bestimmt sind. Die Raumluft wird in vier Qualitätsstufen (In Door Air 1 bis 4) unterteilt. Aus diesen Qualitätsstufen ergeben sich unterschiedliche Lüftungsraten je Person bzw. je m² Grundfläche.

Tabelle 2: Grenzwerte der CO₂-Konzentrationen gemäß DIN EN 13779

Tabelle 3. Klassifizierung der Raumluftqualität nach DIN EN 13779: 2007-09. Die Tabelle enthält in den Spalten 1 bis 3 die Vorgaben der DIN EN 13779. Spalte 3 zeigt den Anteil der CO₂-Konzentration der Innenraumluft an der CO₂-Gesamtkonzentration. Spalte 4 stellt beispielhaft für eine CO₂-Außenluftkonzentration von 400 ppm absolute CO₂-Konzentrationen in der Innenraumluft vor.

Kategorie	Beschreibung	Erhöhung der CO ₂ -Konzentration gegenüber der Außenluft [ppm]	Absolute CO ₂ -Konzentration in der Innenraumluft [ppm]	Lüftungsrate/ Außenluftvolumenstrom [l/s/Person] ([m³/h/Person])
IDA 1	Hohe Raumluftqualität	≤ 400	≤ 800	> 15 (> 54)
IDA 2	Mittlere Raumluftqualität	> 400–600	> 800–1000	> 10–15 (> 36–54)
IDA 3	Mäßige Raumluftqualität	> 600–1000	> 1000–1400	> 6–10 (> 22–36)
IDA 4	Niedrige Raumluftqualität	> 1000	> 1400	< 6 (< 22)

Es liegt nahe, dass eine derart scharfe Grenzwertsetzung mitunter nur mit erheblichem Aufwand zu erreichen und zu erhalten sein dürfte, mit den daraus resultierenden, negativen Konsequenzen, wie hohe Lautstärke der Lüftung, Zugscheinungen, Investitionskosten und Stromverbrauch. Die Fähigkeit einer Lüftungsanlage die vorgeschriebenen Grenzwerte einhalten zu können, hängt zudem von der Qualität (niedrige CO₂-Konzentration) der Außenluft ab. Regional sind die Unterschiede hinsichtlich der Vorbelastung der Außenluft signifikant gegeben. In der Praxis führt das dazu, dass Lehrkräfte die Lüftung abschalten, wodurch CO₂-Konzentrationen von 3300 ppm im Klassenzimmer nachgewiesen werden konnten. Damit kehren sich die eigentlich gut gemeinten Grenzwerte ins Gegenteil um.

1.8 Grenzwerte Stadt Offenburg

Die Stadt Offenburg hat als Ziel vorgegeben, dass die CO₂-Konzentrationen im Allgemeinen 1500 ppm nicht überschreiten sollten. CO₂-Konzentrationen bis 1000 werden als sehr gut, bis 1500 gut, bis 2000 ppm als auffällig und über 2000 ppm als inakzeptabel angesehen.

2 Projektbeschreibung

Die Waldbachschule in Offenburg wurde durch eine effiziente Wärmedämmung, Austausch der Fenster, Einbau einer solaren Lüftung, Anschluss an eine im Nahwärmeverbund betriebene Pellet-Heizung und Installation einer Photovoltaikanlage auf dem Dach der Schule mit dem Ziel saniert, den Passivhaus Energiestandard zu erreichen. Vergleichbare Projekte wurden in der Vergangenheit bereits durchgeführt, wie z.B. Sanierung Max-Steenbeck-Gymnasium, Cottbus, (Häusler, et al., 2015) bzw. (Passivhaus-Datenbank, 2020)

Im Unterschied zu diesen Projekten wurden bei der Waldbachschule dezentrale Kreuzstromwärmeüberträger und zusätzlich solare Luftkollektoren eingebaut. Neu ist ferner die Regelung der Lüftung über CO₂-Sensoren.

Die eigentliche energetische Sanierung mit dem Ziel des Energiestandards Passivhaus ist nicht Gegenstand des geförderten Vorhabens, sondern wurde vollständig über den Haushalt der Stadt Offenburg finanziert. Die energetische Sanierung wurde vom Bund im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative über die KfW sowie die Lüftungsanlage durch den PTJ gefördert. Das Land Baden-Württemberg förderte die Sanierung als Modellvorhaben über die L-Bank.

Ziel des Vorhabens ist es, Praxisdaten der fassadenintegrierten Lüftungsanlage und Wärmeübertrager und der solaren Lüftung, die hier erstmalig in einer Schule installiert wurden, zu erhalten, wissenschaftlich auszuwerten, zu veröffentlichen und so eine Datenbasis zur Weiterentwicklung der Technologie für zukünftige Projekte zu generieren.

2.1 Projektablaufplan und Meilensteine

Darstellung des geplanten, sachlichen und zeitlichen Ablaufs des Vorhabens (Ablaufplan)

Arbeits- und Zeitplan

Zur erfolgreichen und effizienten Bearbeitung wurde das Projekt in fünf Arbeitspakete (AP) unterteilt. Eine nähere Beschreibung der APs ist im Folgenden zu finden.

AP 1: Definition und Ausarbeitung des Konzepts

Im ersten AP wurde das Messkonzept entwickelt und beschrieben, basierend auf den Randbedingungen wie Anzahl, Art, Position der Messfühler, zur Verfügung stehender Speicherplatz, Samplingrate, Messgenauigkeit. Diese wurden in AP2 realisiert und in AP3 genutzt.

AP 2: Entwicklung der Software

Die vorhandene Software aus dem Wohnungsbau wurde für Klassenzimmer/Schulen durch andere/zusätzliche Randbedingungen wie CO₂-Sensoren & -Algorithmen, Luftvolumenströme, Anzahl der Geräte, Netzwerk-Topologie erweitert und während der ganzen Projektdauer stetig weiterentwickelt.

AP 3: Monitoring, Auswertung und Optimierung

Während der Projektdauer nach Installation wurden die Messgrößen wie Außentemperatur, Raumlufttemperatur, Raumluftfeuchte, CO₂-Konzentration im Raum, solarer Ertrag, etc., erfasst. Die ordnungsgemäße Erfassung wurde kontinuierlich überprüft. Im Rahmen der Weiterentwicklung der Software konnten Unterbrechungen bei der Datenaufnahme frühzeitig erkannt und behoben werden. Die Datenauswertung umfasste die Aufbereitung der Rohdaten, die Überprüfung der Messdaten auf Plausibilität, Erstellung von Energiebilanzen, Berechnung der energetischen, ökologischen und ökonomischen Effizienz. Für diese wissenschaftliche Auswertung der Messdaten wurde ein Unterauftrag an Solar- und Wärmetechnik Stuttgart (SWT) vergeben. Auf Basis der erzielten Ergebnisse konnten Verbesserungspotenziale hinsichtlich der Betriebsweise, aber auch bzgl. energetischer und ökonomischer Aspekte identifiziert werden.

AP 4: Öffentlichkeitsarbeit / Kommunikation

Während des Projekts fand ein intensiver Austausch zwischen den Projektpartnern und der Schule statt.

So wurde die Schulleitung und Lehrerschaft in einer Gesamtlehrerkonferenz am 14.02.17 über das Thema Lüftung aufgeklärt und das neue Lüftungskonzept erläutert.

Am Tag der offenen Tür am 07.06.17 wurde dem interessierten Publikum das Lüftungssystem erklärt. Im Rahmen des Partnertags am 13.07.17 wurde zusammen mit dem Ortenauer Baunetzwerk und der Ortenauer Energieagentur die Sanierung der Waldbachschule in Vorträgen vorgestellt und in Expertenworkshops vertieft.

Bei der Energieagentur Freiburg am 12.04.18 wurde das Fachpublikum in einer Vortragsreihe über die modernen Möglichkeiten der Schulsanierung informiert. Dabei wurden die gewählten Maßnahmen der Sanierung der Waldbachschule ausführlich erläutert.

AP 5: Projektmanagement

Das Projektmanagement umfasste alle organisatorischen Aufgaben zur ordnungsgemäßen und erfolgreichen Abwicklung des Vorhabens. Die Arbeiten der einzelnen Arbeitspakete wurden koordiniert und zusammen mit den Projektpartnern aufeinander abgestimmt. Ein Abgleich zwischen dem Projektfortschritt und den Projektplanungen wurde stetig vorgenommen und in Zwischenberichten dokumentiert. Alle wesentlichen Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten sind in diesem Abschlussbericht dokumentiert.

2.2 Definition und Terminierung von Meilensteinen

Tabelle 3: Übersicht über die quartalsweisen Arbeitspakete.

Jahre, Quartale → APs ↓	1. Laufzeitjahr				2. Laufzeitjahr				3. Laufzeitjahr			
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12
AP 1 Konzept			•									
AP 2 Software				•								
AP 3 Monitoring/wiss. Bewertung		-			•			•				•
AP 4 Öffentlichkeitsarbeit				•				•				•
AP 5 Projektmanagement	•			•				•				•

Meilensteine:

AP 1 Konzept:

- Konzept entwickelt Q 3

AP 2 Software

- Software entwickelt, getestet und implementiert Q 4

AP 3 Monitoring

- Messtechnik voll funktionsfähig und Monitoring in Betrieb genommen Q 5
- erstes Jahr Monitoring abgeschlossen Q 8
- zweites Jahr Monitoring abgeschlossen Q 12

AP 4 Öffentlichkeitsarbeit

- Messebesuch und Schulworkshop Q 4
- Messebesuch und Expertenworkshop Q 8
- Abschlussworkshop
- Gremienvorlage, Messevortrag Oberrheinmesse Q 12

AP 5 Projektmanagement

- Projekt Kick-off Q 1
- Schulworkshop Q 4
- Expertenworkshop Q 8
- Abschlussworkshop Q 12

AP 1 Definition und Ausarbeitung des Konzepts

Im ersten AP werden verschiedene Messkonzepte entwickelt und beschrieben. Basierend auf den Randbedingungen wie Anzahl, Art, Position der Messfühler, zur Verfügung stehender Speicherplatz, Samplingrate, Messgenauigkeit, Umfang der Auswertung wird mit den vielversprechendsten Ansätzen weiter gearbeitet. Diese werden in AP2 realisiert und in AP3 genutzt. Werden über die bereits werkseitig vorhandene Sensorik weitere Sensoren benötigt, so werden diese ebenfalls in AP1 festgelegt.

Ein Überblick über das zu entwickelnde Konzept kann den folgenden Abbildung 1 bis 3 entnommen werden. Hier ist ein erster Entwurf eines möglichen Konzepts und dessen Komplexität ersichtlich

TAP 1.1 CO₂-Sensorik

Für konzentriertes Arbeiten und Lernen ist ein ausreichend hoher Sauerstoffanteil und ein möglichst geringer Anteil von Luftschadstoffen in der Raumluft notwendig. Zur Sicherstellung einer ausreichend guten Raumluftqualität bietet sich eine Regelung der Zuluft anhand des Kohlendioxidgehalts (CO₂) in der Raumluft an.

Diese Sensorik zur Messung des CO₂-Anteils in der Raumluft und die Steuerung des Lüftungssystems entsprechend der gemessenen Werte wird innerhalb des TAP 1.1 entwickelt werden.

TAP 1.2 Regelalgorithmen

Innerhalb des TAP 1.2 wird der bisher bei anderen Lüftungsanlagen eingesetzte und bewährte Regelalgorithmus zur Regelung der Feuchte und Temperatur im Raum für die Anwendung des zu entwickelnden Lüftungssystems erweitert.

Zusätzlich müssen die Regelgrenzen hierzu überprüft und gegebenenfalls erweitert oder geändert werden. Dies ist mit unterschiedlichen CO₂-Konzentrationen in Abhängigkeit von der Anwesenheit von Schülern im Raum begründet:

CO₂ in der Außenluft hat im Mittel eine Konzentration von etwa 400 ppm. Bei Konzentrationen im Klassenzimmer über 1000 ppm nimmt die Konzentrationsfähigkeit der Schüler und Lehrer ab. Eine Konzentration von 1500 ppm wird von der Stadt Offenburg als obere Grenze angesehen. Zusätzlich wird eine quasi-lineare Regelung erwünscht, d. h. mit steigender Konzentration soll die Luftwechselrate stufenlos gleitend erhöht werden, so dass die Lüftung bei 1500 ppm die maximale Luftwechselrate erreicht. Während des Unterrichts sind höhere Luftwechselraten notwendig. In der unterrichtsfreien Zeit (nachts, während Hohlstunden) hingegen sind hohe Luftwechselraten nur notwendig, wenn im Rahmen der Sommernachtauskühlung ein maximaler Luftwechsel zum Austrag von Wärmelasten erwünscht ist. Sonst ist aus energetischer Sicht ein Durchlaufen der Lüftung in den leeren Klassenzimmern nicht sinnvoll. Es soll daher zusätzlich eine untere Grenze (beispielsweise bei 400 ppm) realisiert werden, bei deren Unterschreitung die Lüftung abschaltet.

TAP 1.3 Netzwerktopologie

Für einen zuverlässigen Betrieb der Lüftungsanlage ist eine kontinuierliche Überwachung der Anlage notwendig. Hierzu muss die sichere Einbindung der Steuertechnik in die lokale IT-Infrastruktur gewährleistet werden. Darauf basierend kann dann das Erfassen, Weiterverarbeiten und der Export der Daten erfolgen.

Diese sichere Einbindung in die Netzwerktopologie ist innerhalb des TAP 1.3 zu entwickeln.

AP 2 Entwicklung der Software

Die vorhandene Software war optimiert auf Wohneinheiten. Für Klassenzimmer/ Schulen sind andere oder zusätzliche Randbedingungen wie CO₂-Sensoren & -Algorithmen, Luftvolumenströme, Anzahl der Geräte, Netzwerk-Topographie, ...zu beachten. Die Implementierung, Adaption und Test der Software wird nur mittels signifikantem Arbeits- und Zeiteinsatz möglich sein.

TAP 2.1 Regelalgorithmen

Entsprechend der Arbeiten aus TAP 1.2 wird in TAP 2.1 die Softwareimplementierung der Regelalgorithmen entwickelt werden. Hierbei geht es um die Erweiterung und Implementierung der Algorithmen zur Feuchte- und Temperaturregelung, der neu definierten Regelgrenzen und der quasi-linearen Lüftersteuerung.

TAP 2.2 Datenspeicherung

Zur Erfassung von Messwerten ist der Aufbau einer serverbasierten Datenspeicherung notwendig. Hierzu muss zum einen der Server mit einer Datenbank aufgesetzt, zum anderen der Datenexports implementiert werden. Zur weiteren Datenverarbeitung sind Schnittstellen zum Datenextrakt und die Erstellung von Reports notwendig.

TAP 2.3 Netzwerktopologie

Gemäß den Arbeiten aus TAP 1.3 wird in TAP 2.3 die Implementierung der Netzwerkeinbindung der Steuerung und Regelung der Anlage in die Software realisiert werden. Hierbei sind die zusätzlich die Programmierung Erfassung, Weiterverarbeitung und der Export der Daten zu berücksichtigen

TAP 2.4 Schnittstellen/Zugriff Daten

Für eine zuverlässige und vor ungewolltem Zugriff geschützte Datenverarbeitung muss eine sichere Schnittstelle programmiert werden. Dies wird eine der Kernarbeiten des TAP 2.4 sein. Dazu sind das Aufsetzen und Einrichten eines Servers, sowie die Kommunikation mit diesem Server notwendig. Zur Erreichung einer hohen Nutzerakzeptanz ist es erfahrungsgemäß notwendig eine möglichst hohe Transparenz des umgesetzten Vorhabens zu gewährleisten. Hierzu gehören einerseits die Auswertung des Betriebs der Lüftungsanlage und der Einfluss der jeweiligen Nutzer. Andererseits ist eine übersichtliche visuelle Darstellung, beispielsweise über eine Nutzeroberfläche und Zugriff auf die die Auswertung mittels Tablets, angedacht. Hierzu ist eine Anbindung an das lokale Netzwerk notwendig.

AP 3 Monitoring, wissenschaftliche Bewertung

Während der gesamten Projektdauer nach Installation sollen die Umgebungsgrößen wie Temperaturen, Feuchte, CO₂, solarer Ertrag, etc. erfasst werden. Die ordnungsgemäße Erfassung wird kontinuierlich überprüft. Wird festgestellt, dass die gewählten Parameter nicht richtig/vollständig sind, so werden während des Projektes Anpassungen vorgenommen.

Zunächst wird das Messkonzept aus AP 1 umgesetzt und es soll die Softwareentwicklung aus AP2 zum Einsatz kommen. Dazu ist die notwendige Messtechnik nach der Installation der Lüftungseinheiten aufzubauen, zu prüfen und in Betrieb zu nehmen. Eine zuverlässige, ausfallsichere und gesicherte Datenverbindung zur Übertragung der Daten vom Messobjekt zum Fördermittelempfänger ist herzustellen. Die Datenauswertung umfasst die Aufbereitung der Rohdaten, die Überprüfung der Messdaten auf Plausibilität, Erstellung von Energiebilanzen, Berechnung der energetischen, ökologischen und ökonomischen Effizienz. Für diese wissenschaftliche Auswertung der Messdaten ist geplant, einen Unterauftrag an das Institut Solar- und Wärmetechnik Stuttgart (SWT), ein kleines, innovatives Spin-off aus der Universität Stuttgart zu vergeben. Auf Basis der erzielten Ergebnisse werden Verbesserungspotenziale hinsichtlich der Betriebsweise, aber auch bzgl. energetischer und ökonomischer Aspekte identifiziert und soweit möglich direkt umgesetzt bzw. in den Entwicklungsprozess der Lüftungskomponenten rückgekoppelt.

TAP 3.1 Auswertung Daten

Das TAP 3.1 umfasst die Beschaffung, Installation, Prüfung und Inbetriebnahme der Messtechnik, die zum umfassenden Monitoring der Lüftungsanlage der Waldbachschule notwendig ist. Anschließend werden innerhalb des TAP 3.1 die erfassten Daten ausgewertet und aufbereitet. Dies umfasst sowohl die Erfassung der Effizienz der Einzellüftungsanlagen wie auch die der gesamten Lüftungsanlage. Es werden der Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Betrieb der Lüftungsanlage analysiert sowie die

Robustheit des Systems gegenüber dem Nutzerverhalten aber auch äußeren Einflüssen wie beispielsweise der Witterung.

TAP 3.2 Berichterstellung

Die Arbeiten im TAP 3.2 beinhalten die Berichterstellung über den jeweiligen Stand der Anlagenvermessung und der wissenschaftlichen Auswertung der erfassten Daten. Darüber hinaus werden die grafische Aufbereitung der Messergebnisse und deren Auswertungen für die Projektberichte, für die Öffentlichkeitsarbeit, sowie für die Nutzer innerhalb des TAP 3.2 erarbeitet. Mögliche Inhalte können sein:

- Graphische Darstellung über Internet: Stunden-, Wochenverlauf
- Monats- und Jahresstatistik (Mittelwert)
- Grafische Darstellung über Touchscreen: Stunden-, Wochenverlauf
- Monats- und Jahresstatistik (Mittelwert)

AP 4 Öffentlichkeitsarbeit

Während des Projekts ist es notwendig, die Fachöffentlichkeit über den aktuellen Stand des Projekts zu informieren. Gleichzeitig muss eine kritische Auseinandersetzung mit den erzielten Ergebnissen mit Experten stattfinden, die nicht Teil des Projektkonsortiums sind. Für diese wichtigen projektbegleitenden Themen haben sich in der Vergangenheit bei anderen Vorhaben sogenannte Expertenworkshops bewährt. Deshalb werden auch während der Laufzeit dieses Vorhabens ein Expertenworkshop sowie ein Schulworkshop durchgeführt. Bei diesen Workshops wird das Lüftungskonzept präsentiert, die laufenden Ergebnisse vorgestellt und mit der Fachöffentlichkeit, den Lehrern und Schülern diskutiert. Physiklehrern erhalten Material für ihren Physikunterricht. Physik zum Erleben.

Darüber hinaus werden die Ergebnisse und das Lüftungselement auf Konferenzen, Fachtagungen und einschlägigen Messen präsentiert werden. Angedacht sind hier für die Bau 2017, die Weltleitmesse für Architektur, Materialien und Systeme vom 16. bis 21.01.2017 in München, die Energietage auf der Oberrheinmesse und auf Fachkongressen wie z.B. die jährliche Tagung der kommunalen Energiemanager.

Zum Vorhabenende werden die Ergebnisse in einem Abschlussworkshop zusammengefasst der Fachöffentlichkeit präsentiert werden.

Die Ergebnisse werden danach den Gremien der Stadt Offenburg und der interessierten Öffentlichkeit vorgestellt

TAP 4.1 Erstellung Präsentation

Zur Durchführung der erwähnten Veranstaltungen wie Expertenworkshops und Schulworkshops ist es notwendig entsprechendes Präsentationsmaterial zu erstellen. Speziell die Workshops für die Schüler sowie das Material für den Physikunterricht erfordern eine entsprechend der Zielgruppe zugeschnittene pädagogische und didaktische Aufbereitung der Sachverhalte.

Mögliche Inhalte dieser Workshops können unter anderem sein:

- Bedeutung der Lüftung
- Verhalten der Schüler
- Verhalten der Lehrer
- Einfluss auf die moderne Bauweise
- Luftdichte Gebäudehülle
- Raumklima
- Zusammenspiel unterschiedlicher Bauteile
- Einfluss auf die Physiologie
- Gesundheitsvorsorge
- Hygienischer Luftausgleich
- Wärmestrahlung

- Wechselwirkung des Nutzers bezüglich Baumaterialien und Anlagentechnik

Zusätzlich werden innerhalb dieses TAP die Anschauungsobjekte für die Workshops, die Fachmessen und die Kongresse hergestellt.

TAP 4.2 Workshop

TAP 4.2 beinhaltet die Vorbereitung, Organisation und Durchführung der Experten-, Schul- und des Abschlussworkshops sowie der Messebesuche. Die Kosten für die Anmietung von Räumlichkeiten und zur Deckung des Caterings bei den Workshops sowie die Standmiete der Messeauftritte und Teilnahmegebühren von Fachtagungen und Konferenzen sind ebenfalls in diesem TAP enthalten.

AP 5 Projektmanagement

Das Projektmanagement umfasst alle organisatorischen Aufgaben zur ordnungsgemäßen und erfolgreichen Abwicklung des Vorhabens. Die Arbeiten der einzelnen Arbeitspakete werden koordiniert und zusammen mit den Projektpartnern aufeinander abgestimmt. Ein Abgleich zwischen dem Projektfortschritt und den Projektplanungen wird in regelmäßigen Abständen vorgenommen und in Zwischenberichten dokumentiert. Alle wesentlichen Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten werden in einem Abschlussbericht dokumentiert.

TAP 5.1 Projektleitung

TAP 5.1 beinhaltet die Projektleitung des Gesamtprojekts. Hierzu sind die Überwachung der Einhaltung der Meilensteine, sowie des Gesamtfortschritts des Projekts notwendig. Ebenfalls ist die Überwachung der Einhaltung von Terminen und Abgabefristen Teil des TAP. Es findet eine kontinuierliche Überwachung und Abgleich der Projektplanung mit dem aktuellen Stand des Projekts statt.

TAP 5.2 Projekttreffen

Im TAP 5.2 sind die Organisation, Vorbereitung und Durchführung der Projekttreffen beinhaltet, die für die effektive und ergebnisorientierte Zusammenarbeit der Projektpartner innerhalb des Projekts notwendig sind.

TAP 5.3 Berichte

Die jährliche Berichte und Reportings zum jeweiligen aktuellen Stand des Projektes werden innerhalb TAP 5.3 erstellt.

Ebenfalls fällt die Erstellung des Abschlussberichts und des Verwendungsnachweises der Fördermittel in dieses TAP.

3 Projektablauf und Ergebnisse

3.1 Demoanlage und Vorversuch

Auf Wunsch der Stadt Offenburg wurde im Jan. 2016 in der Waldbachschule zunächst eine Demoanlage installiert. Diese wurde am 13.01.2016 in Raum 301 in Betrieb genommen.



Abbildung 7: Foto der Demoanlage (außen) an Raum 301.

Die Temperatur und Feuchte sowie der CO₂-Gehalt der Raumluft wurden von einem externen Messgerät aufgezeichnet.

Bereits mit dieser Anlage wurde die Funktionsweise des gewählten Lüftungskonzepts gezeigt. Obwohl die noch nicht optimierte und nicht sensorgeführte Anlage noch CO₂-Spitzen bis in einen Bereich oberhalb von 2000 ppm aufwies, ist an den steilen Abklingkurven erkennbar, dass diese hohen CO₂-Konzentrationen wirkungsvoll abgebaut werden.

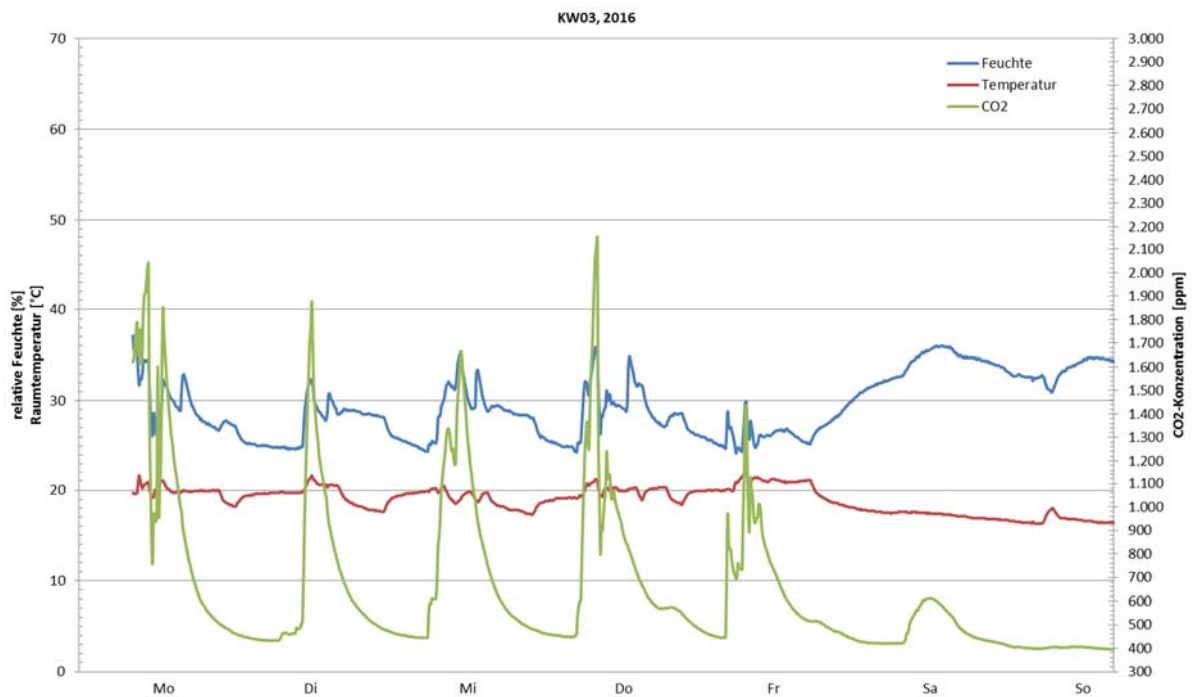


Abbildung 8: CO₂-Konzentration der KW03, 2016

Beim unsanierten Altbau ist eine deutliche Abhängigkeit der Raumtemperatur mit Heizphasen erkennbar und ein Absinken beispielsweise nachts und am Wochenende.

3.2 Inbetriebnahme

Die gesamte Lüftungsanlage wurde am 14.12.16 von der Stadt Offenburg abgenommen und zum Jahresbeginn 2017 in Betrieb genommen.

Zur Simulation des Einflusses der Be- und Entlüftung im Vergleich zum Raum ohne Lüftung wurde ein Gegenversuch durchgeführt. Hierbei wurden stillschweigend die Lüftungsöffnungen in Raum 302 verschlossen. Durch die Unwissenheit von Lehrer und Schülern konnte eine menschliche Einflussnahme ausgeschlossen werden.

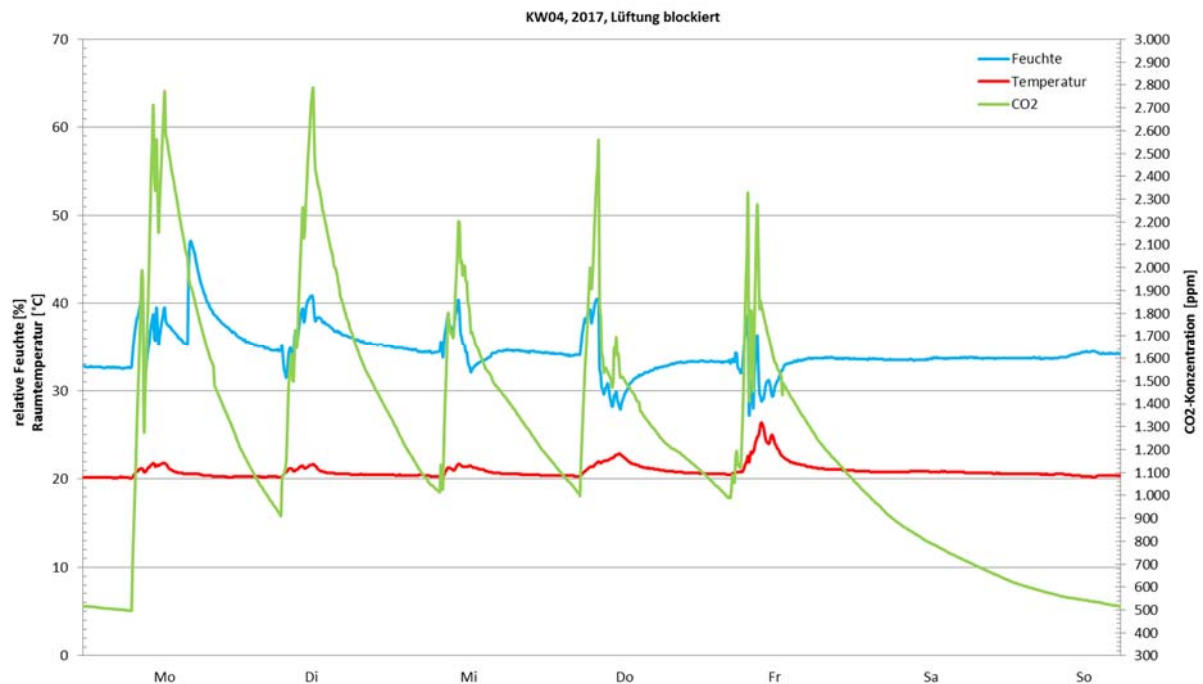


Abbildung 9: CO₂-Konzentration in Raum 302 in KW04, 2017 mit verschlossener Lüftung

Nach Entfernung der Blockade sank die CO₂-Konzentration signifikant.

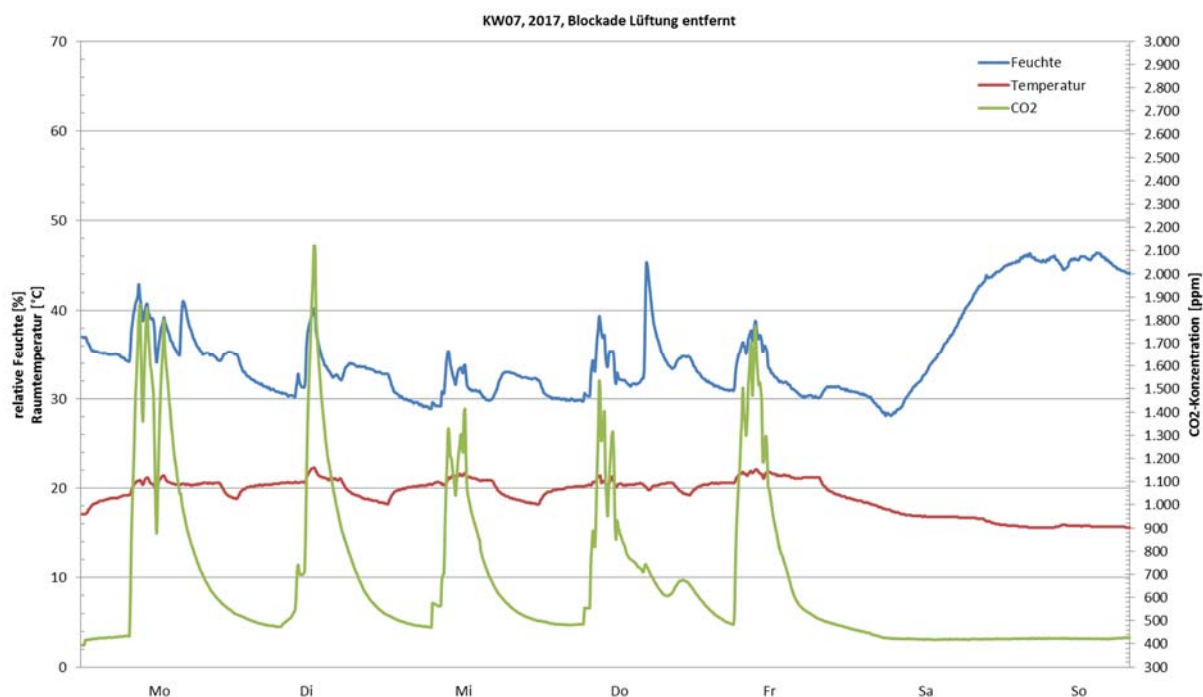


Abbildung 10: CO₂-Konzentration in Raum 302 in KW07, 2017 mit offener Lüftung

Besonders deutlich erkennbar ist die Steilheit der Abklingkurve. Während ohne Lüftung die CO₂-Konzentration selbst in der Nacht alleine durch natürliche Infiltration nicht hinreichend abgebaut werden konnte, so wurde mit der Lüftung die CO₂-Konzentrationen nachts wieder vollständig auf das Niveau der Außenluft reduziert. Ohne Lüftung waren die CO₂-Konzentrationen am nächsten Morgen noch immer bei rd. 1000 ppm wodurch der Unterricht bereits zum Start am Morgen mit hygienisch auffälligen Werten begonnen wurde.

3.3 CO₂-Verteilung

Ein häufig geäußelter Kritikpunkt ist, dass durch physisch gegebene, einseitige Infiltration es zu Konzentrationsunterschieden im Klassenzimmer kommen würde. Zu diesem Zweck wurden in Raum 301 neben dem im Brüstungskanal befindlichen CO₂-Sensor unter der Decke an den vier Ecken und in der Mitte jeweils zwei CO₂-Sensoren zusätzlich installiert.

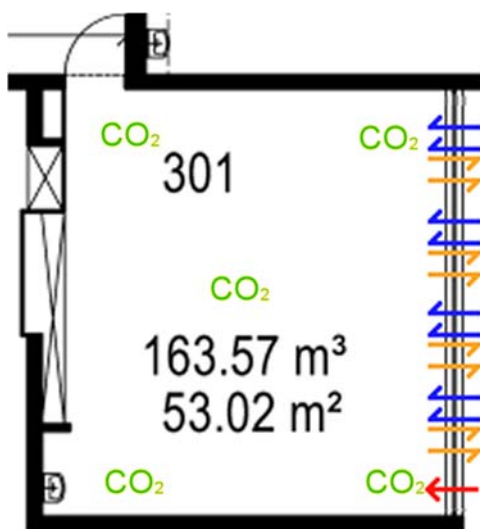


Abbildung 11: Grundriss von Raum 301 mit Positionen der CO₂-Sensoren

Die Ergebnisse belegen zweifelsfrei, dass die CO₂-Konzentration im Rahmen der Messgenauigkeit homogen ist.

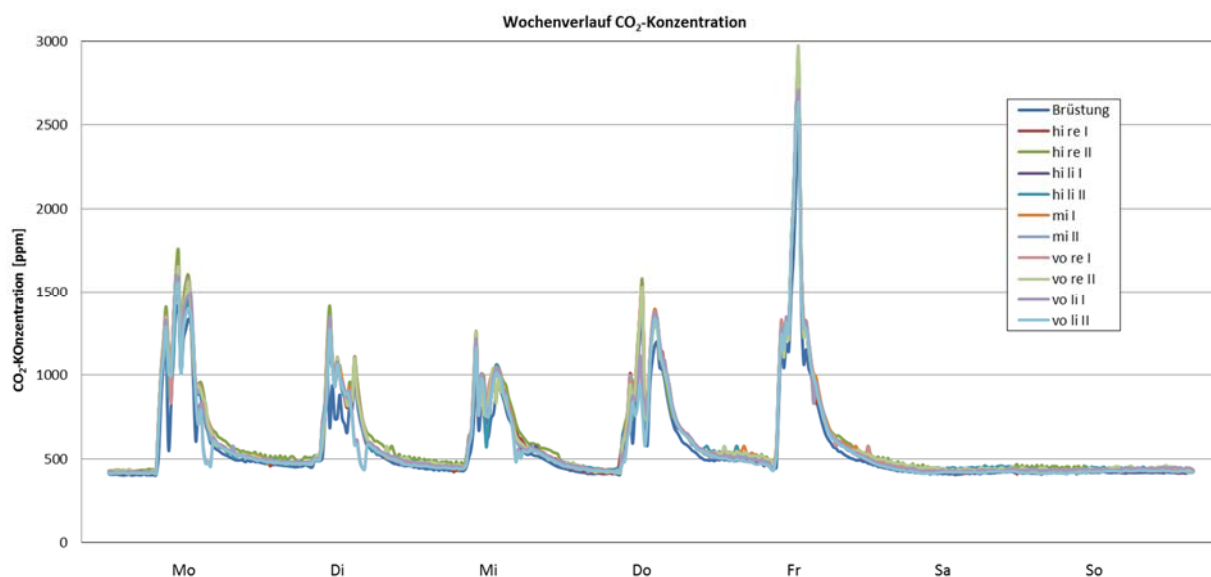


Abbildung 12: Wochenverlauf der CO₂-Konzentration (Raum 301, KW19, 2019)

Abbildung 12 zeigt den Verlauf der CO₂-Konzentrationen der einzelnen 10 zusätzlichen zusammen mit den Standard-Sensoren in Raum 301 in KW19, 2019. Der extrem hohe Peak am Freitag rührt daher, dass die Lüftung von der Lehrkraft manuell ausgeschaltet worden ist. Die dann erreichten CO₂-Konzentrationen überstiegen die zulässigen Grenzwerte bei weitem.

Zuweilen ist der vom Brüstungssensor gemessene Wert geringer, da dieser partiell vom Zuluftstrom erfasst ist. Das ist stimmig zur Theorie, dass in mechanischen Luftströmen die gemessene Konzentration niedriger sein kann als im Rest des Raumes. Besonders wirkt sich dieser Effekt bei zentralen Lüftungsanlagen mit nur einer Luftzufuhr und Absaugung aus. Diese Anlagen generieren eine große Luftwalze, die für Lehrer und Schüler störend sein kann und zur Abschaltung der Anlage motiviert. Diese bei zentralen Anlagen gewonnenen Erkenntnisse bzgl. inhomogener Luftverteilung verleitet zu der allgemeinen, jedoch falschen, Auffassung, dass eine dezentrale Anordnung keine homogene Luftverteilung gewährleisten könne.

Dieser Versuch zeigt jedoch klar, dass das Gegenteil der Fall ist. Eine dezentrale Lüftung, welche die Luft nach dem Quellen-/Senken-Prinzip infiltriert, liefert homogenere Konzentrationen bei Minimierung der Zuglufterscheinungen.

3.4 Brownsche Molekularbewegung

Die physikalische Begründung des im vorherigen Kapitel beschriebenen Effektes der Durchmischung und Homogenisierung der Zuluft mit der Raumluft ist die sogenannte Brownsche Molekularbewegung.

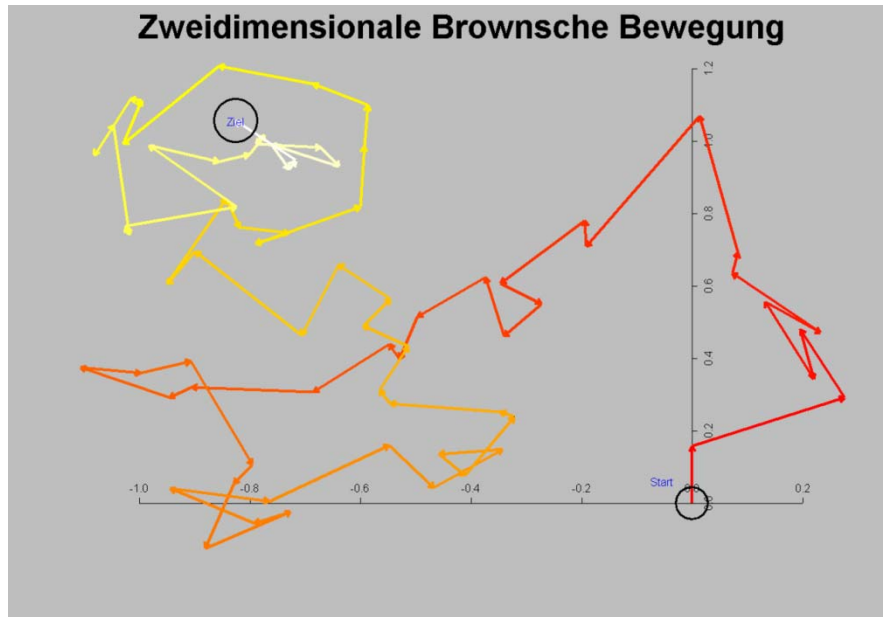


Abbildung 13: Skizze der Bahnen von Teilchen bei der Brownschen Molekularbewegung

Die Moleküle der Luft bewegen sich chaotisch durch von Stößen dominierten Bahnen durch den Raum. Bei Normbedingungen herrschen folgende Zustände:

- Teilchendichte = $2,7 \cdot 10^{19}$ Moleküle pro cm^3
- mittlere Geschwindigkeit = 474 m/s
- mittlere freie Weglänge = 68 nm
- mittlere Stoßzeit = 143 ps
- Anzahl Stöße = $3 \cdot 10^{23}$ 1/(s cm^2)

Daraus ergibt sich, dass die Moleküle permanent zusammenstoßen. Aus dieser enormen Stoßrate folgt die schnelle Durchmischung der Luft und daraus die homogene Verteilung. Verstärkt wird dies durch die Bewegungen der Schüler und Lehrkräfte, die kontinuierlich sog. erzwungene Konvektionsströmungen verursachen.

3.5 Carpet Plots (Heat Maps)

In diesem Kapitel werden die CO_2 -Konzentrationen exemplarisch aus vier Klassenzimmern im Zeitraum Oktober 2018 bis Februar 2019 als Funktion von Tag und Uhrzeit auf Farbskalen von Blau (niedrige CO_2 -Konzentration) bis rot (hohe CO_2 -Konzentration) dargestellt.

Leider fehlen aufgrund eines Datenausfalls die Werte für den Zeitraum von 11.10. bis zum 23.10.2018. Dies ist durch die dunkelblaue Einfärbung kenntlich gemacht. Grundsätzlich sind die Wochentage von den Wochenenden sehr gut zu unterscheiden, da ausschließlich an den Wochentagen CO_2 -Konzentrationen bis ca. 1 500 ppm festzustellen sind. Die Wochenenden, sowie die Herbst- und Weihnachtsferien sind ebenfalls gut an den vergleichsweise niedrigen CO_2 -Konzentrationen zu erkennen. Da die Messwerte nicht bzgl. der Zeitumstellung umgerechnet wurden, ist ebenfalls gut zu erkennen, dass nach den Herbstferien der Unterricht eine Stunde später beginnt.

Raum 203:

Raum 203 (**Abbildung 14**) zeigt ein eindeutiges Klassenzimmerverhalten: Die CO_2 -Konzentrationen steigen morgens um kurz vor 8:00 Uhr rapide an und fallen je nach Unterrichtszeiten wieder ab 12:00 Uhr oder auch erst gegen 16:00 Uhr ab.

Insgesamt liegen die Konzentrationen meist unterhalb 1 200 ppm, hin und wieder bei 1 500 ppm und sehr selten auch etwas darüber bei etwa 1 800 ppm.

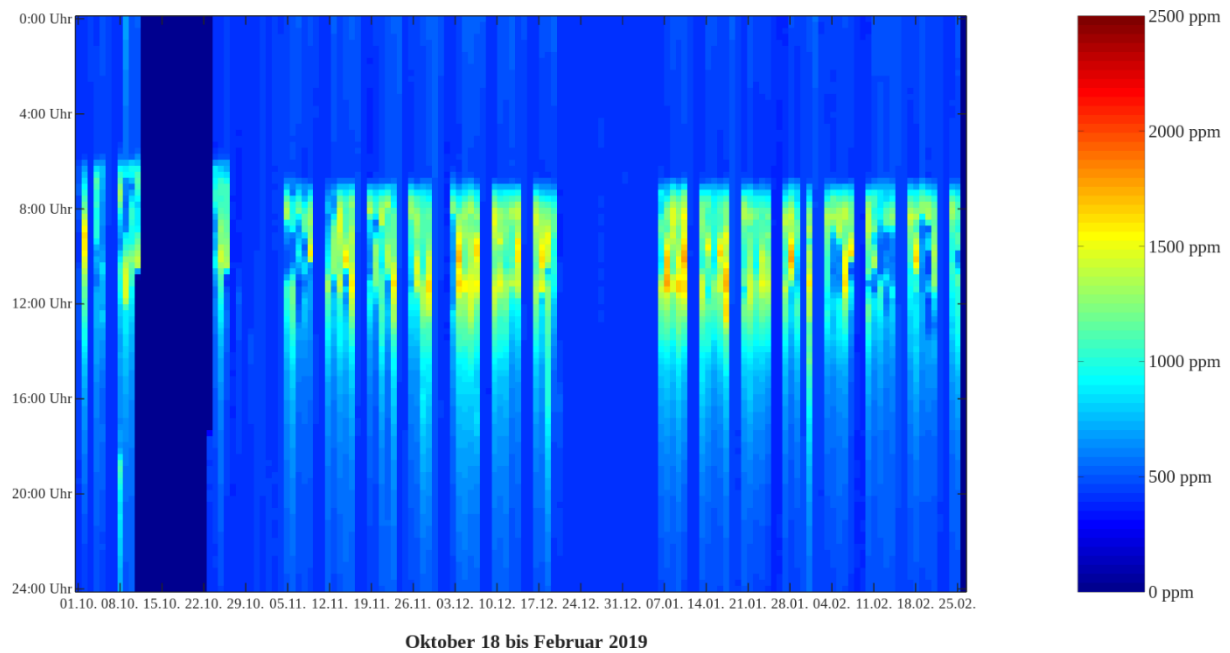


Abbildung 14: Carpet Plot der CO₂-Konzentration in Raum 203

Raum 204:

Für Raum 204 (**Abbildung 15**) gilt ähnliches wie für Raum 203. Allerdings beginnt der Unterricht an den Tagen Dienstag und Donnerstag erst später. Wahrscheinlich fand am 8.10. ein Elternabend und am 7.12. nachmittags noch eine andere Veranstaltung statt

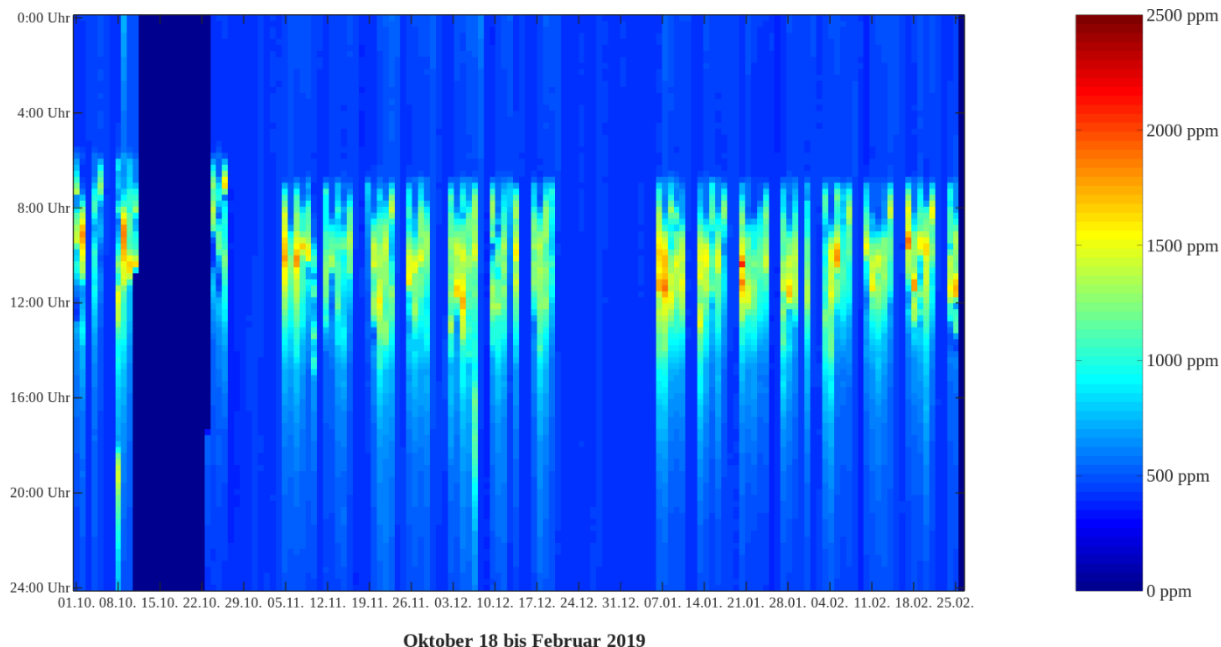


Abbildung 15: Carpet Plot der CO₂-Konzentration in Raum 204

Raum 210:

In Raum 210 (**Abbildung 16**) findet in der Regel erst 11:00 Uhr Unterricht statt. Dennoch liegen die CO₂-Werte in ähnlicher Höhe wie die der beiden anderen Räume. Somit lässt sich klar feststellen, dass die kontinuierliche Lüftung sehr gut funktioniert und sich kein CO₂ über längere Zeit ansammelt.

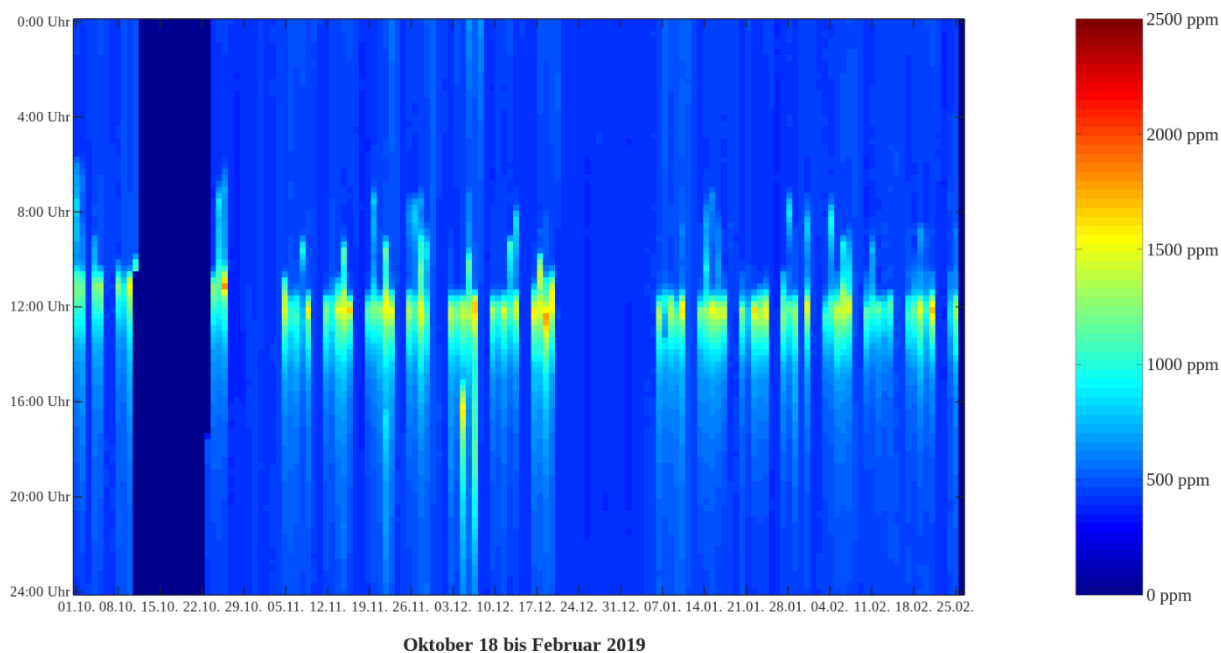


Abbildung 16: Carpet Plot der CO₂-Konzentration in Raum 210

Raum 312:

Für Raum 312 (**Abbildung 17**) gilt die Interpretation der Messwerte aus den anderen Räumen analog. Dennoch fällt auf, dass dieser Raum deutlich seltener in Benutzung ist als die anderen untersuchten Räume.

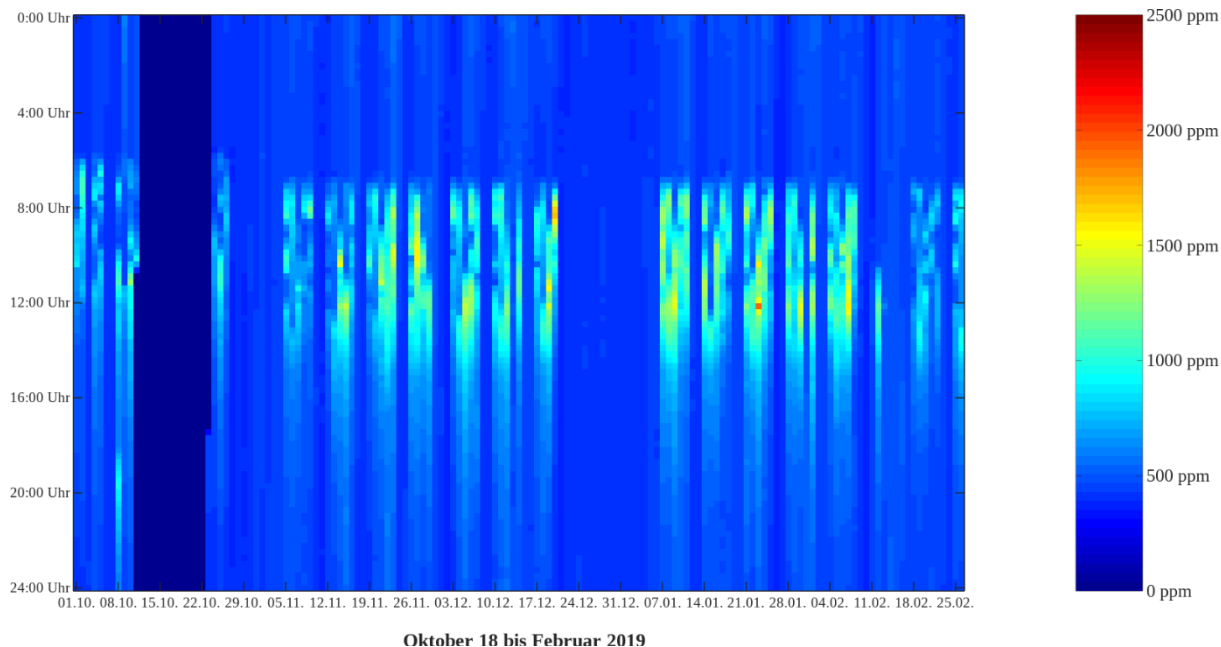


Abbildung 17: Carpet Plot der CO₂-Konzentration in Raum 312

3.6 Dauerlinien

Wird die CO₂-Konzentration als Funktion der Zeitanteile aufgetragen, bei denen die jeweilige Konzentration besteht, eine sogenannte geordnete Dauerlinie, so kann dargestellt werden, wie effizient die Lüftung ist. Darin ist erkennbar, dass die Konzentration über einen weiten Bereich im Zielfenster von 500 bis 1500 ppm liegt. Konzentrationen über 1500 ppm sind marginal.

Raum 203:

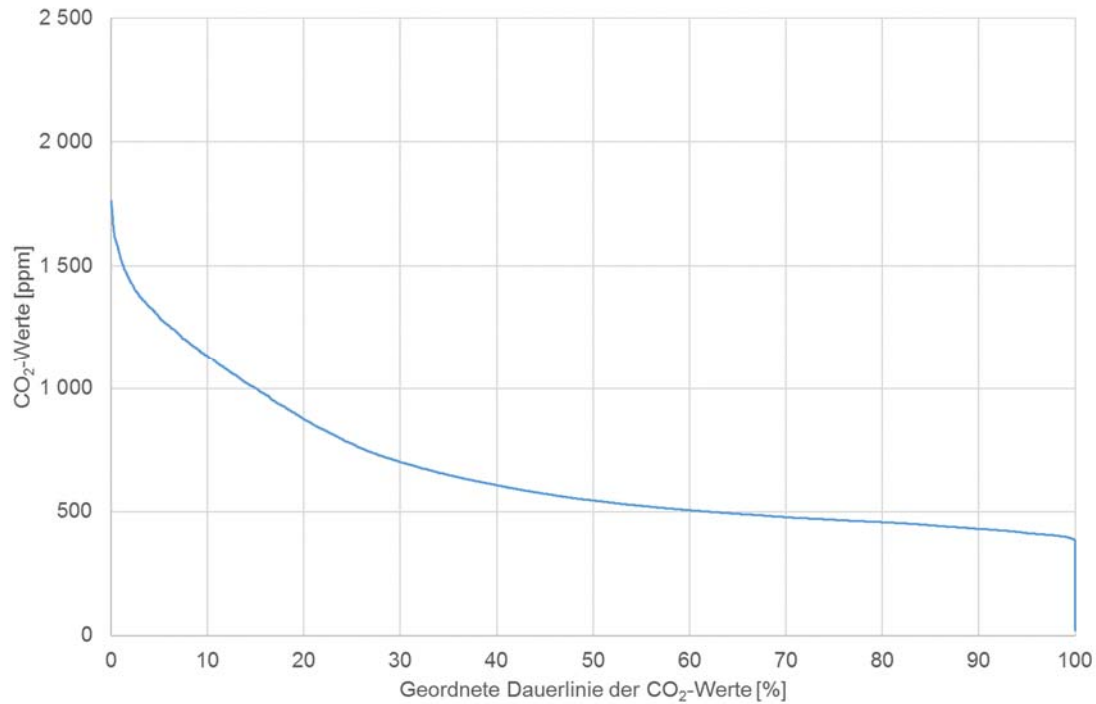


Abbildung 18: CO₂-Konzentration als Funktion ihrer Zeitanteile in Raum 203

Raum 204:

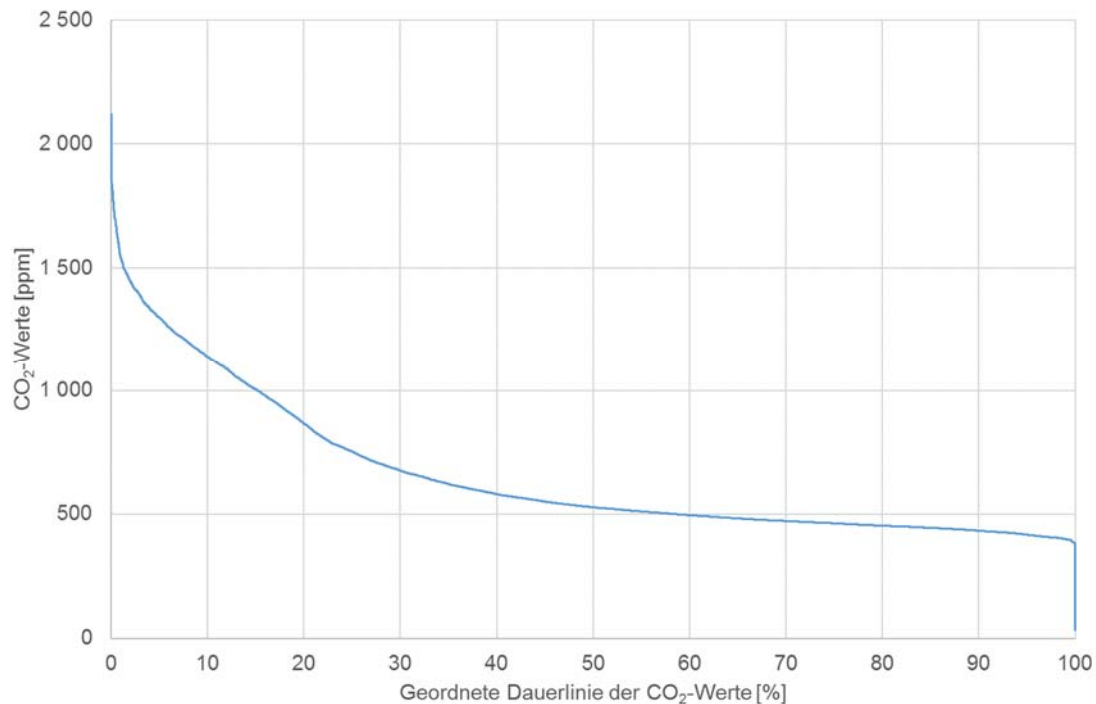


Abbildung 19: CO₂-Konzentration als Funktion ihrer Zeitanteile in Raum 204

Raum 210:

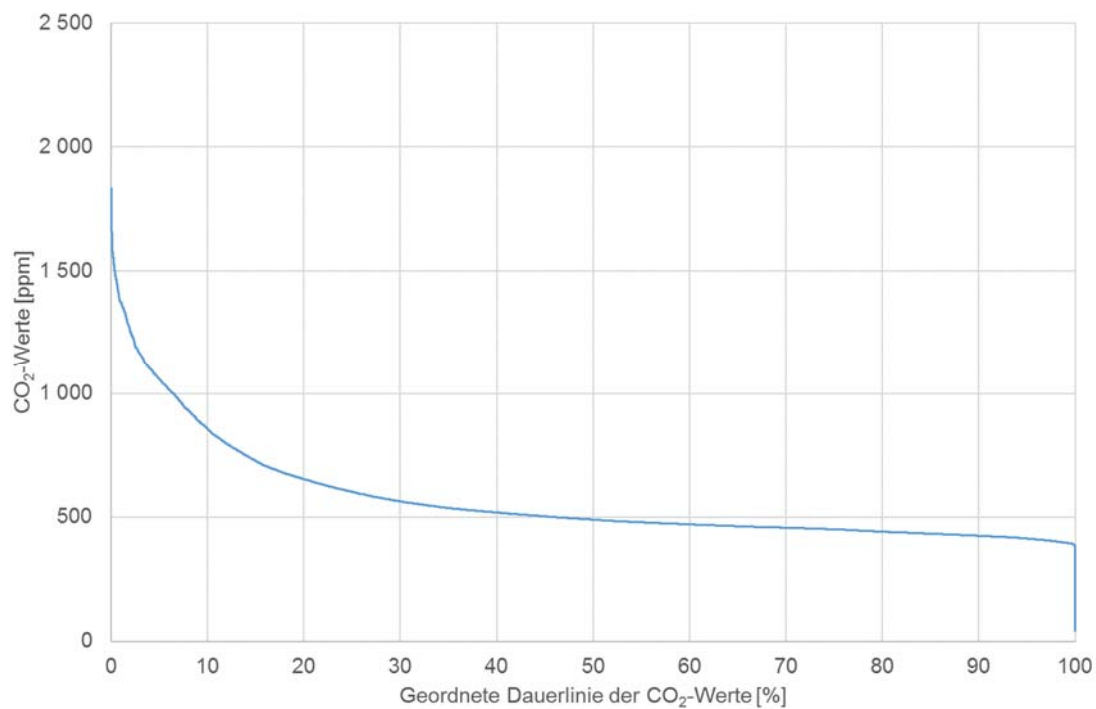


Abbildung 20: CO₂-Konzentration als Funktion ihrer Zeitanteile in Raum 210

Raum 312:

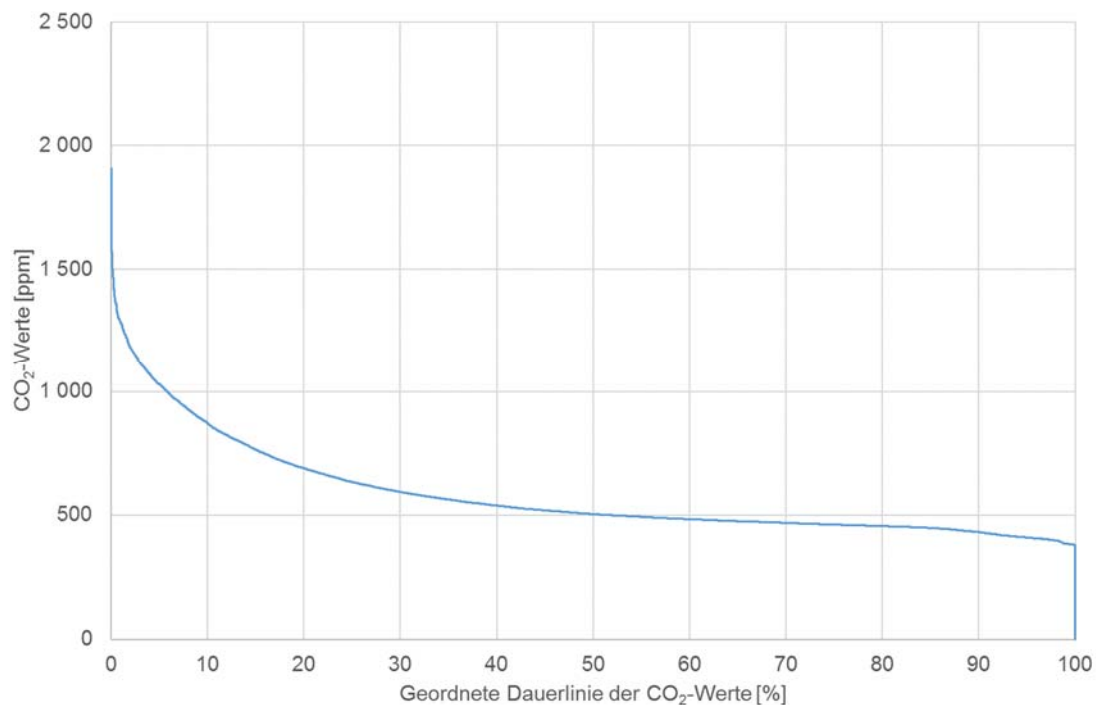


Abbildung 21: CO₂-Konzentration als Funktion ihrer Zeitanteile in Raum 212

3.7 CO₂-Konzentration und Lüfter Drehzahl

Ziel war gewesen, eine Lüftungsanlage zu konzeptionieren, die zwar die notwendige Luftwechselrate gewährleistet, aber unnötig hohe Luftwechsel vermeidet. Zu hohe Luftwechsel können zu hohen Luftgeschwindigkeiten und Geräuschemission führen. Die Erfahrungen von früheren Projekten (Bollin, et al., 2016) zeigt, dass das die Akzeptanz von Lüftungstechnischen Installationen schmälert. In der Folge werden häufig die notwendigen Lüftungsanlagen abgeschaltet.

Aus diesen Gründen wurde die Software zur Regelung der Lüftungsanlage so programmiert, dass die Lüftung bei dreistelligen CO₂-Konzentrationen (zunächst bis 1000 ppm, spätere Reduktion auf 800 ppm, heute 600 ppm) in der Grundlüftung läuft und erst bei steigenden Konzentrationen dynamisch die Drehzahl der Lüfter anhebt. Auch kann die Steilheit des Anstieges in der Software eingestellt und den Erfordernissen angepasst werden.

Generell kann gesagt werden, dass eine Lüftungsanlage nicht zu knapp bemessen werden sollte, da eine hinreichende Anzahl an Zuluftquellen und Abluftsenken bedeutet, dass die Drehzahl der Lüfter mit einhergehend geringeren Geräuschemission gesenkt werden kann und die Anlage trotzdem genug Reserven besitzt, um CO₂-Spitzen abbauen zu können.

3.8 Aerosole und vorbeugender Gesundheitsschutz

Aus Plausibilitätserwägungen lässt sich ableiten, dass die CO₂-Konzentration mit zunehmender Personenzahl ansteigt, damit einhergehend die mögliche Freisetzung und Verbreitung pathogener Keime (z. B. in Aerosolen) in der Raumluft. Eine dynamische, CO₂-geregelte Lüftung führt zu einer Begrenzung der Aerosol-Konzentration in der Raumluft und ist damit dem vorbeugenden Gesundheitsschutz dienlich.

3.9 Sommerlicher Wärmeschutz

Der größte Wärmeeintrag im Sommer findet durch Sonneneinstrahlung durch die Fenster statt. Bedingt durch eine 26 cm starke Wärmedämmung und dreifach verglaste Fenster führt die Sonneneinstrahlung zur Aufheizung der Wände, Decken und Böden. Aus diesem Grund ist ein hinreichender sommerlicher Wärmeschutz mittels einer wirkungsvollen Verschattung erforderlich.

Eine niedrige Oberflächentemperatur senkt die Intensität des Wärmestrahlungsfeldes im Raum, wohingegen eine hohe Oberflächentemperatur die Intensität des Wärmestrahlungsfeldes erhöht. Der Wohlfühlbereich zwischen kalten und warmen Oberflächen (abstrahlung/-absorptionen) und die damit einhergehenden Umgebungslufttemperaturen, ist sehr schmal. Konzeptionell sollte daher auf ein ganzjährig möglichst gleichbleibendes Niveau der Raumtemperatur geachtet werden. Deckenheiz-/kühlsysteme können hierzu eine sinnvolle Ergänzung darstellen.

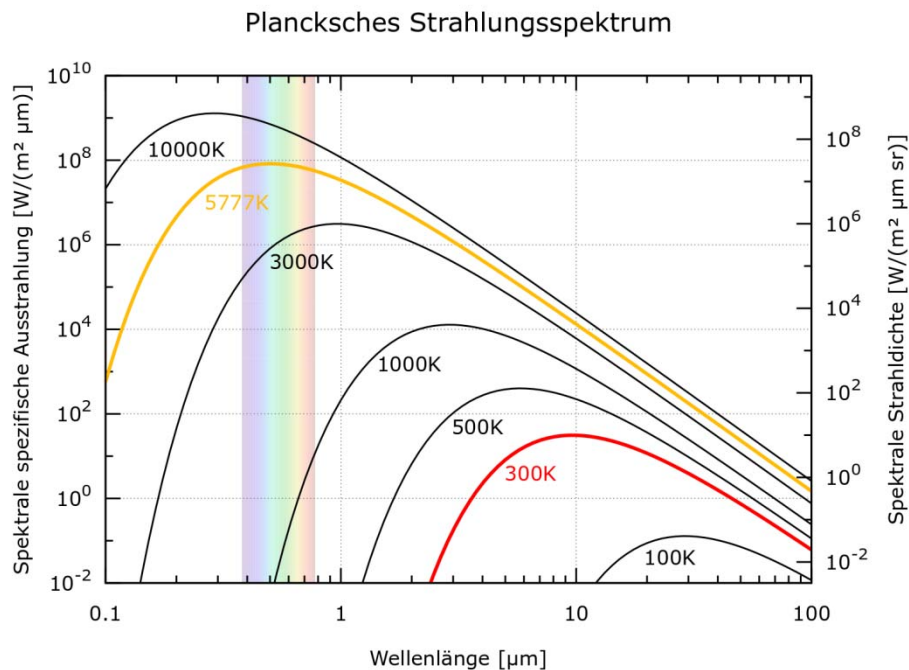


Abbildung 22: Spektrum der spezifischen Ausstrahlung als Funktion der Wellenlänge

In der Waldbachschule wurden die Raffstores mit einem Präsenzmelder gekoppelt. Wenn der Raum belegt ist, wird die Automatik übersteuert und allein der Nutzer bestimmt die Stellung der Jalousie. Die Lehrer haben so die Möglichkeit manuell die Neigung der Raffstores zu verändern und an die jeweilige Unterrichtssituation anzupassen. Bei Abwesenheit und vor Unterrichtsbeginn werden die Raffstores in den Automatikmodus geschaltet. Während in den Wintermonaten bei Abwesenheit die Raffstores nach 15 min. hochgefahren werden, werden diese in den Sommermonaten je nach Ausrichtung der Fassade auf unterschiedliche Neigungen so gestellt, dass die Fenster gerade verschattet sind. Damit werden solare Wärmeeinträge vermieden, aber dennoch ist der Blick nach außen möglich und es gelangt ausreichend Licht ins Klassenzimmer. So muss die Beleuchtung nicht eingeschaltet werden, wenn das Klassenzimmer betreten wird. Da die so optimierten Lamellenstellungen bei Betreten des Klassenzimmers vorgefunden werden, sind Anpassungen nur notwendig, wenn es die jeweilige Unterrichtssituation erfordert. Die Erfahrung zeigt, dass diese optimierte Stellung dann i.d.R. nicht verändert wird.

Das Ziel ist, im Sommer solare Wärmeeinträge weitgehend zu vermeiden und im Winter solare Gewinne zu ermöglichen. Das Vermeiden von solaren Wärmeeinträgen im Sommer ist sehr wichtig um zu verhindern, dass das Sommernachtlüftungskonzept nicht an zu hohen Wärmelasten scheitert.

3.10 Sommernachtlüftung

Die Stadt Offenburg hat sich bereits in der Vergangenheit intensiv mit sommerlichen Temperaturen in Klassenzimmern beschäftigt und daraus Konzepte zur Sommernachtkühlung von Klassenzimmern entwickelt (da Costa Fernades, et al., 2013). Diese Konzepte sollten nun auf die neue Situation mit der dezentralen Be- und Entlüftung angepasst werden und um die Möglichkeiten, die das Lüftungssystem zusätzlich bietet, ergänzt werden.

Wände, Decken und Böden haben im Gegensatz zu Luft eine hohe Wärmekapazität und Dichte. Die Wärmestromdichte hieraus in die Luft ist physikalisch begrenzt. Folglich ist die Wärmeabfuhr alleine mit dem Medium Luft begrenzt. Daher ist die im vorhergehenden Kapitel beschriebene Begrenzung der sommerlichen Wärmeeinträge essentiell für das Funktionieren der Systematik, besonders an sehr heißen Sommertagen, die am Oberrhein immer wieder vorkommen.

Das Ziel der Sommernachtspülung ist es, die Wärmeeinträge des Tages in der Nacht abzuführen und am nächsten Tag nicht auf einem höheren Temperaturniveau als am Tag zuvor zu beginnen.

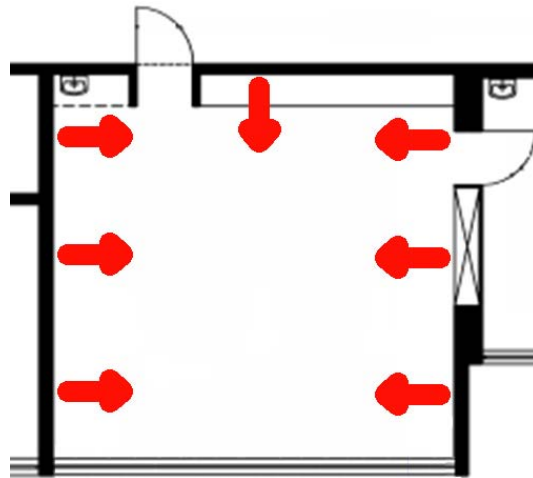


Abbildung 23: Skizze des Wärmestroms aus der Speichermasse in die Luft

Trotz dieser Limitierung konnte das Konzept der Sommernachtlüftung in die Lüftungssystematik integriert werden, das eine Abschaltung der Hälfte der Lüfter in den Wärmeübertragern vorsieht, wodurch die Luft nur noch durch eine Seite des Wärmeübertragers strömt und eine Wärmerückgewinnung nicht mehr stattfindet. Es sind drei Varianten möglich.

Variante 1: Ringströmung

Von den vier Wärmeübertragern werden je zwei als Zuluft und als Abluft geschaltet:

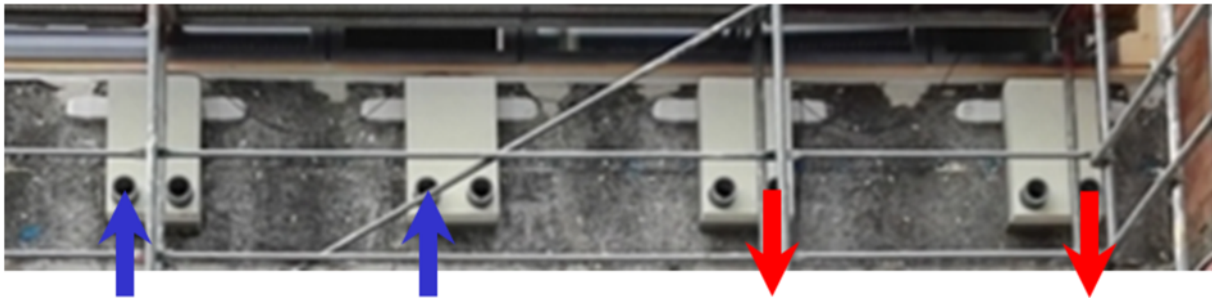


Abbildung 24: Skizze der Luftströme bei der Ringlüftung

Hier kommt es zu einer Ringströmung im Klassenzimmer, die die warme Luft mitnimmt. Diese Variante funktioniert auch bei geschlossenen Zimmertüren.

Variante 2: Zuluft

Werden die Zimmertüren geöffnet, können alle Wärmeübertrager auf Zuluft geschaltet werden.



Abbildung 25: Skizze der Luftströme bei der Zuluft

Dadurch verdrängt die kühle Außenluft die warme Zimmerluft ins Gebäude. Diese kann durch die geöffneten Dachreiter abströmen. Die entstehende Thermik unterstützt den Effekt.

Variante 3: Abluft

Bei dieser Variante müssen die Zimmertüren ebenfalls geöffnet bleiben.

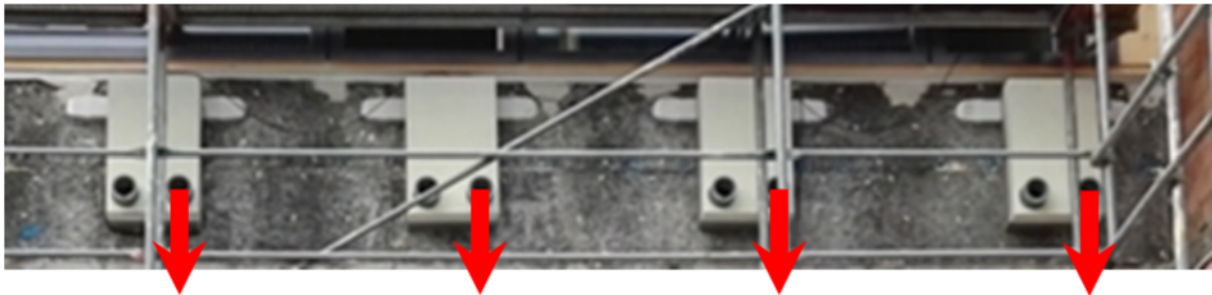


Abbildung 26: Skizze der Luftströme bei der Abluft

Die Wärmeübertrager werden auf Abluft geschaltet. Dabei wird ausgenutzt, dass die Aula ein Kältereservoir darstellt. Durch den Betrieb wird die warme Luft in den Klassenzimmern durch die kühle Luft aus der Aula ersetzt. Luft kann durch geöffnete Oberlichter in den Fenstern dorthin nachströmen.

In der Waldbachschule wurde bisher die in Variante 1 beschriebene Systematik umgesetzt. In der Heizperiode ist diese Nachtlüftungssystematik verriegelt. In der Hitzeperiode wird die Nachtlüftung zwischen 18:00 Uhr und Schulbeginn freigegeben. Über die Parameter Außentemperatur, Innentemperatur und die definierten Zielwerte schaltet die Anlage jedes Klassenzimmer einzeln in die beschriebene Sommernachtlüftung, wenn es sinnvoll ist um eine nächtliche Auskühlung zu erreichen.

3.11 Klimawandel

Die absolute Feuchte in der Außenluft steigt im Tagesverlauf an, nachts sinkt sie wieder. Die besten Zeitpunkte zum Lüften im Sommer sind daher die Morgenstunden. Durch eine Sommernachtspülung wird feuchte Luft durch trockenere ersetzt. Durch absorbierende Wände kann eine gewisse Pufferwirkung erzielt werden. Die Raumluft wirkt nicht so schwül.

Mit zunehmenden Temperaturen und steigenden absoluten Feuchten in der Luft nehmen die Klimaextrema zu. Ein Wetterextremum wurde in KW26, 2019 gemessen (**Abbildung 27**).

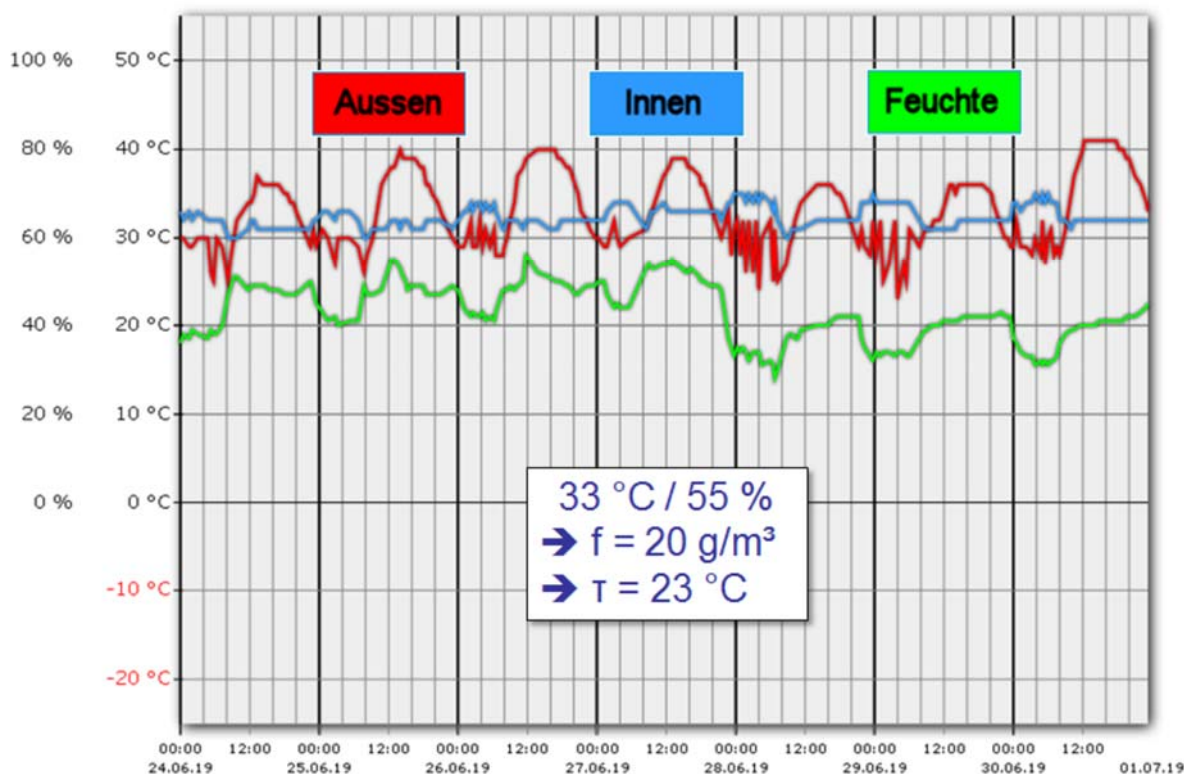


Abbildung 27: Wochenverlauf der Außen-/Raumlufttemperatur und Raumluftfeuchte in KW26, 2019

Es wurden Temperaturen der Außenluft bis 41 °C gemessen. Die kumulierte Wärme im Klassenzimmer führte zu Temperaturen von bis zu 33 °C, allerdings bei relativen Feuchten von 55 %! Hieraus ergibt sich eine absolute Feuchte von 20 g/m³, woraus eine Taupunkttemperatur von 23 °C resultiert.

Bei Räumen mit klassischer, aktiver Kühlung (Klimaanlage) führt das zwangsläufig zur Taupunktunterschreitung, Kondensation ist die Folge. Klassische, aktive Kühlung muss daher immer eine Kondensatableitung konstruktiv beinhalten. Gleichzeitig steigt die relative Feuchte stark an. Auf diesen Anstieg wiederum reagiert die Lüftung. Allerdings ist die mögliche Entfeuchtung durch die Lüftung im Sommer im Gegensatz zum Winter aufgrund der höheren absoluten Feuchte begrenzt.

3.12 Flächenheizung/-kühlung

Klassische Radiatoren führen zu Konvektionsströmungen sowie inhomogenen und anisotropen Wärmestrahlungsfeldern im Klassenzimmer. Diese wirken physiologisch unangenehm, weshalb die Nutzer in der Regel diese Effekte durch eine Erhöhung der Raumtemperatur durch die Heizung versuchen zu kompensieren. Diese erhöhten Raumlufttemperaturen führen zu einem signifikanten Anstieg der Wärmeverluste.

Mit Flächenheizungen wie beispielsweise Deckenheizungen können die Vorlauftemperaturen gesenkt werden. Bei gedämmten Gebäuden sind die Oberflächentemperaturen der Außenwände und Fenster höher und damit ähnlich der der Innenwände, die zusammen mit der moderaten Temperatur der Flächenheizung zu homogenen und isotroperen Wärmestrahlungsfeldern im Klassenzimmer führen, die wiederum als behaglicher wahrgenommen werden. Aufgrund dieser homogenen Situation sind die Bedenken, eine Deckenheizung verursache einen großen vertikalen Temperaturgradienten, daher unbegründet.

Im Sommer wirken aufgeheizte Decken, Böden und Wände wie Infrarotstrahler. Dadurch wird das Raumklima nicht mehr als behaglich, sondern als zu heiß empfunden. Die Kombination von hoher Wärmestrahlung mit hohen Raumlufttemperaturen, hoher absoluter/relativer Feuchte und gewissen

Gerüchen (VOCs) führt regelmäßig zur physiologisch unbehaglichen Aussage, die „Luft ist schlecht“, obwohl die Luftgüte hinsichtlich CO₂ in der Regel auf dem Niveau der Außenluft liegt.

Klassische Klimaanlage versuchen diese physiologische Unbehaglichkeit durch eine starke Absenkung der Raumlufttemperatur zu kompensieren ohne das Wärmestrahlungsfeld zu beeinflussen.

Flächenkühlungen wie beispielsweise Deckenkühlungen reduzieren überschüssige Wärmestrahlung und rufen einen Kälteschleier hervor, der Raum wird dadurch deutlich behaglicher empfunden. Flächenkühlungen können mit höheren Vorlauftemperaturen betrieben werden. Das Temperaturniveau der Kühlflächen und umgebenden Raumflächen ist geringer, weshalb das Wärmestrahlungsfeld isotroper ist. Eine starke Absenkung ist nicht notwendig. Auf die erhöhte relative Feuchte bei gleichbleibender absoluten Feuchte wiederum reagiert die Lüftung sofern sinnvoll möglich. Dies ist beispielsweise nachts der Fall, wenn die absolute Feuchte sinkt.

In der Waldbachschule wurde im Rahmen der Sanierung keine Flächenheizung installiert sondern die Beheizung über konventionelle Röhrenradiatoren beibehalten. Grundsätzlich zeigt sich, dass dies nicht optimal ist, da die Vorlauftemperaturen im Winter nicht soweit abgesenkt werden können, wie es notwendig wäre, um den Zielwert von 15 kWh/m² zu erreichen. Daher wird auch im Winter mehr Wärme angefordert als notwendig wäre und dann über geöffnete Fenster an die Umgebung abgegeben, obwohl die Frischluftzufuhr über das Lüftungssystem nahezu ohne Lüftungswärmeverluste möglich wäre.

Daher liegt auf der Hand, dass Flächenheizungen/-kühlungen im Gesamtkonzept einer Sanierung oder eines Neubaus in Verbindung mit der untersuchten Be- und Entlüftung eine sehr zu empfehlende Ergänzung darstellen und dazu beitragen das Verbrauchsziel eines Niedrigstenergiegebäudes oder Passivhauses zu erreichen.

In Folgeprojekten wurde rechnerisch nachgewiesen, dass bei großflächigen Schulsanierungen allein die Umstellung auf Flächenheizungen bei ansonsten gleichen Rahmenparametern zu 20 % Endenergieeinsparung führen kann.

Da im Rahmen von Schulsanierungen i.d.R. auch akustische Verbesserungen erreicht werden sollen, sind Deckenheizsysteme, deren Auslegung sich am Heizwärmebedarf orientiert, trotz ihrer noch geringen Verbreitung sowohl bezüglich Investitionskosten aber vor allem in Bezug auf die Betriebskosten eine günstige Lösung.

3.13 Stromverbrauch

In jedem Stockwerk wurde jeweils ein eigener Stromzähler für die Lüftungsanlage installiert. Diese liefern alle 15 min ihre Zählerstände. Hieraus lassen sich die Leistungsaufnahmen pro Stockwerk und der Jahresverbrauch errechnen. Die folgenden Grafiken zeigen die Viertelstundenverbräuche von 2018.

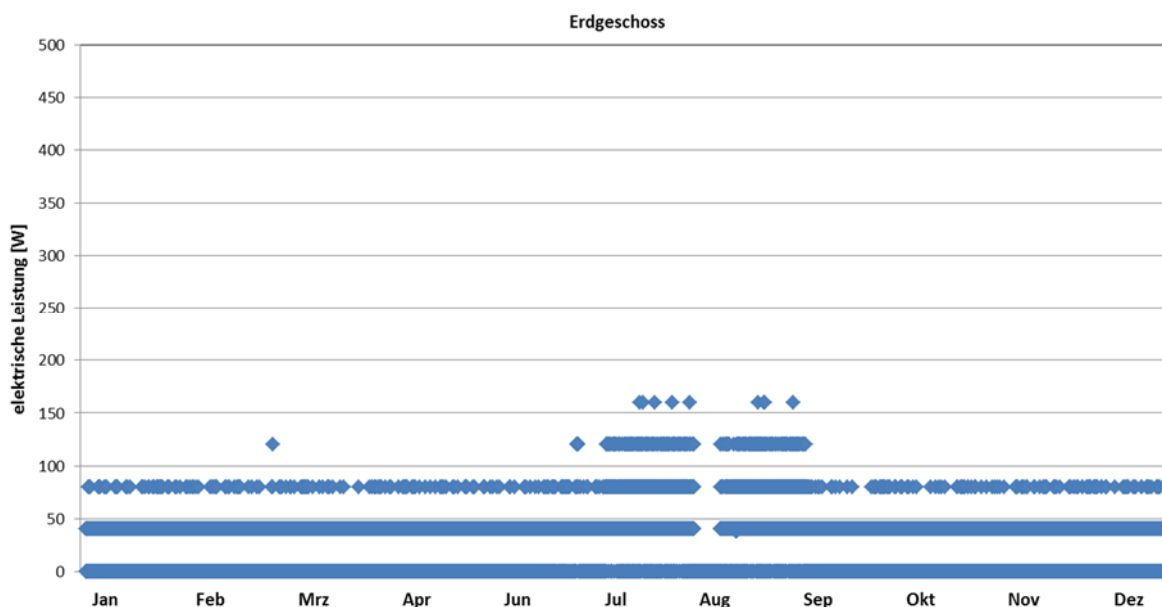


Abbildung 28: Darstellung der elektrischen Leistung im Jahresverlauf im Erdgeschoss

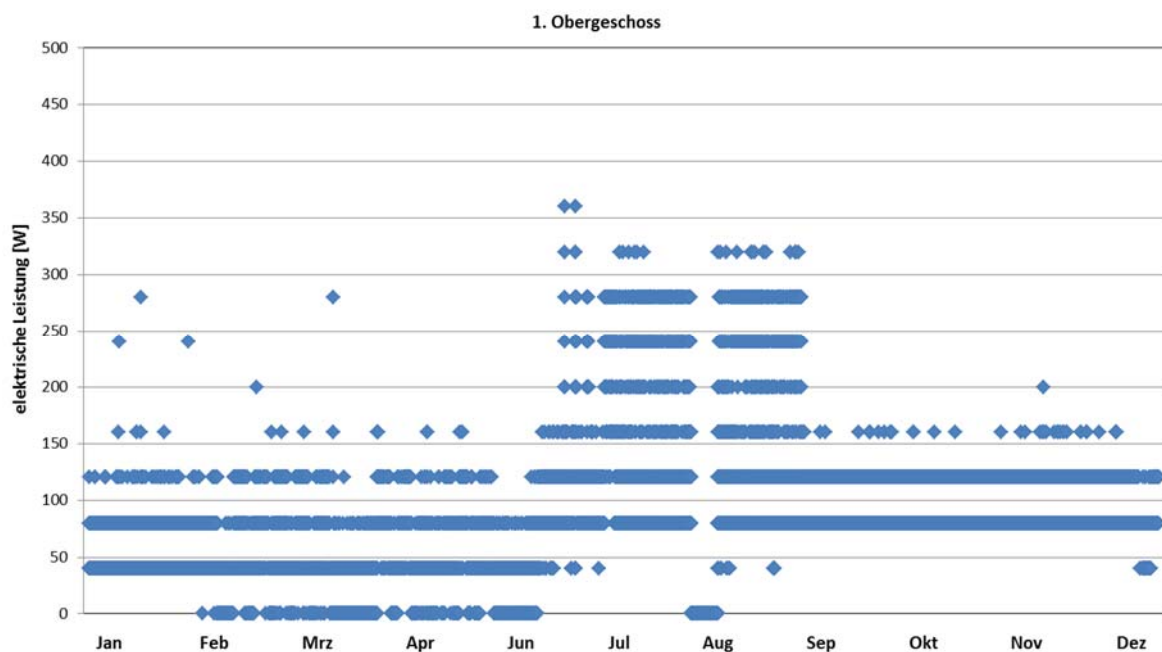


Abbildung 29: Darstellung der elektrischen Leistung im Jahresverlauf im 1. Obergeschoss

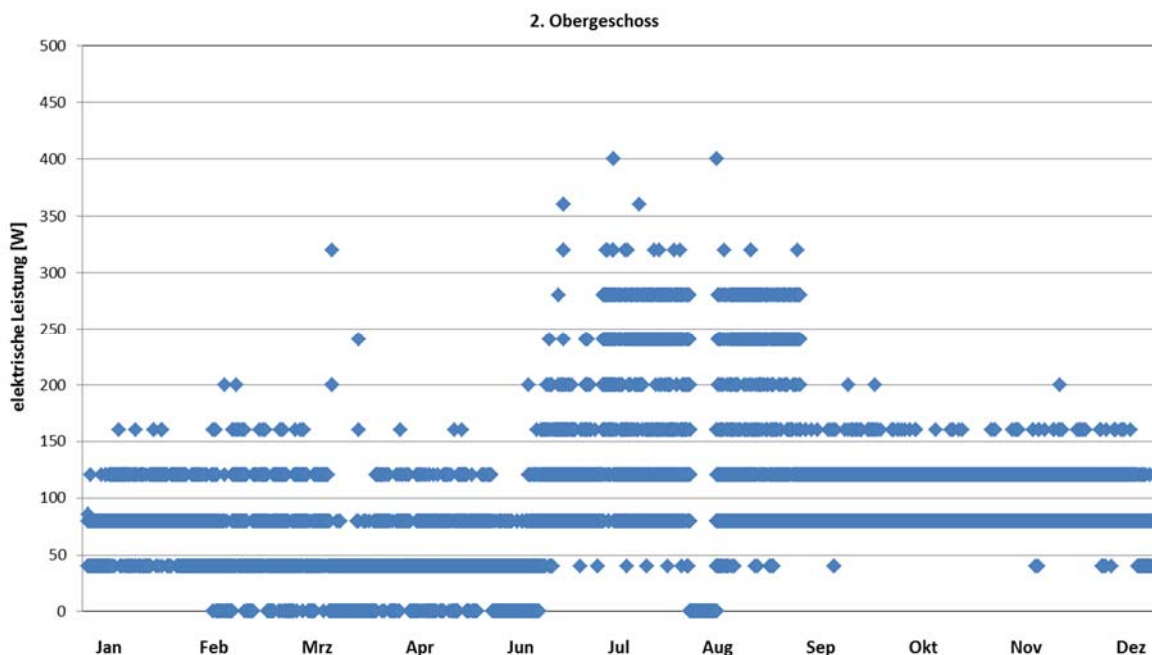


Abbildung 30: Darstellung der elektrischen Leistung im Jahresverlauf im 2. Obergeschoss

Hieraus ergibt sich ein jährlicher Stromverbrauch von rd. 2280 kWh. Wird mit 0,25 €/kWh gerechnet ergeben sich jährliche Stromkosten von rd. 1140 €.

Interessant ist hierbei auch die Beobachtung, dass in der Waldbachschule der Stromverbrauch der Lüftungen in der jährlichen Hitzeperiode (1.6 bis 15.7) in der Zeit zwischen 20:00 Uhr und 7:00 Uhr um rund 60 % höher als am Tag ist. Dies ist durch das Nachtlüftungskonzept bedingt. Hierbei wird, um eine sommerliche Nachtauskühlung zu erreichen, bei entsprechenden Raum- und Außenkonditionen (siehe Kapitel 3.10) zw. 18:00 Uhr und morgendlichem Unterrichtsbeginn die Lüfter in der höchsten Stufe betrieben um in der Nacht die unvermeidlichen Wärmegewinne des Tages abzuführen. In der Heizperiode, in der das Nachtlüftungssystem natürlich deaktiviert ist, wird erwartungsgemäß nachts weniger Strom als tagsüber und auch insgesamt nur rund die Hälfte des Stroms verbraucht, der in der Hitzeperiode benötigt wird.

Wie bereits zuvor dargestellt, bewegt sich der Stromverbrauch der Lüftungen mit ca. 2.280 kWh/a für die Lüftung einer ganzen Schule mit 21 Klassenzimmern und weiteren Räumen und einer NGF von ca. 2.400 m² aber auf einem äußerst niedrigen Niveau.

3.14 Solarkollektoren

Die in diesem Projekt eingesetzten solaren Luftkollektoren integrieren sich harmonisch in die Fensterebene der Fassade. Hierdurch ergibt sich ein optisch geschlossenes Bild, ohne dass die Kollektoren störend wirken.

Der prinzipielle Aufbau der Kollektoren besteht von vorn nach hinten gesehen aus Glasscheibe, Absorber, Wärmedämmung, Luftführungsebene und Rückwand. Temperatursensoren messen die Außentemperatur, die Ertragstemperatur des Absorbers sowie die Raumtemperatur. Darüber hinaus werden die CO₂-Sensoren abgefragt. Die Diagramme (**Abbildung 31, Abbildung 32**) zeigen deren Verläufe über 4 Wochen von KW02 – KW05 2020.

Zur Demonstration wurden zwei auf der Nordostseite nebeneinander liegende Räume (204/205) ausgewählt. Raum 204 wurde mit einem Solarkollektor ausgestattet, Raum 205 nicht. Eine quantitative Auswertung ist schwer möglich, da durch die Pufferung der raumseitigen Wand der Temperaturanstieg in der Zuluft gedämpft wird und die Kollektoren dafür länger laufen, als die Sonne scheint. Pyranometer, die die Strahlungsleistung messen und ein gesonderter Wärmezähler für die Heizung dieses Raumes sind nicht vorhanden. Daher kann keine Aussage zur Heizreduktion getroffen werden. Qualitativ ist aber eindeutig ersichtlich, dass die Temperatur in Raum 204 mehr Temperatursprünge macht, auch an Wochenenden ohne Unterricht, und tendenziell höher liegt. Darüber hinaus tragen die solaren Luftkollektoren zur Luftversorgung und Sommernachtspülung bei.

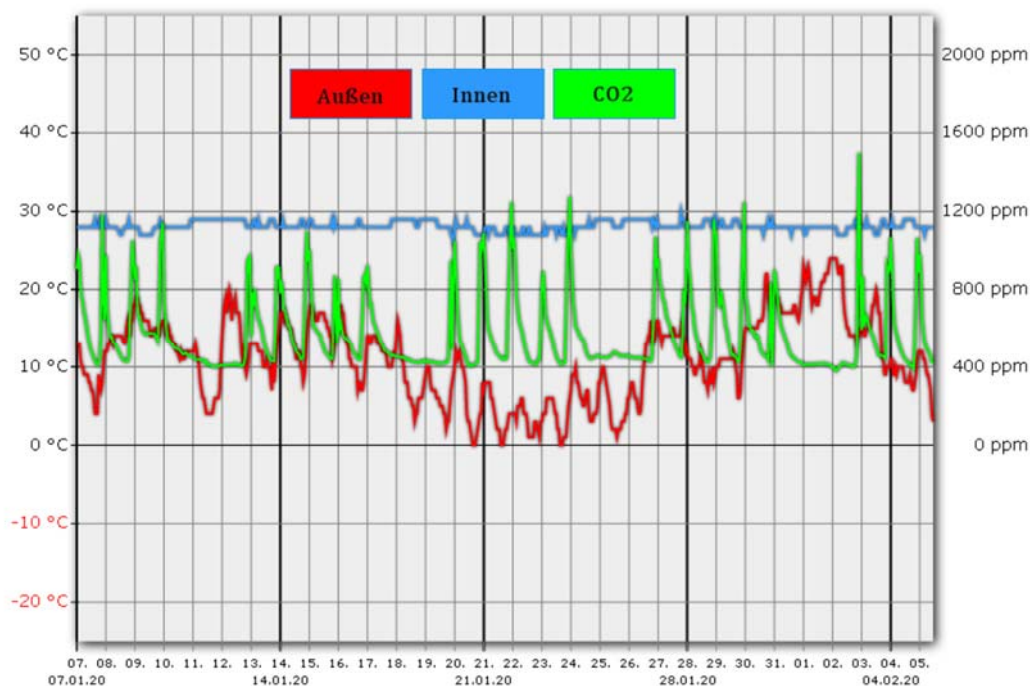


Abbildung 31: Temperaturverlauf Raum 204 mit Solarkollektor

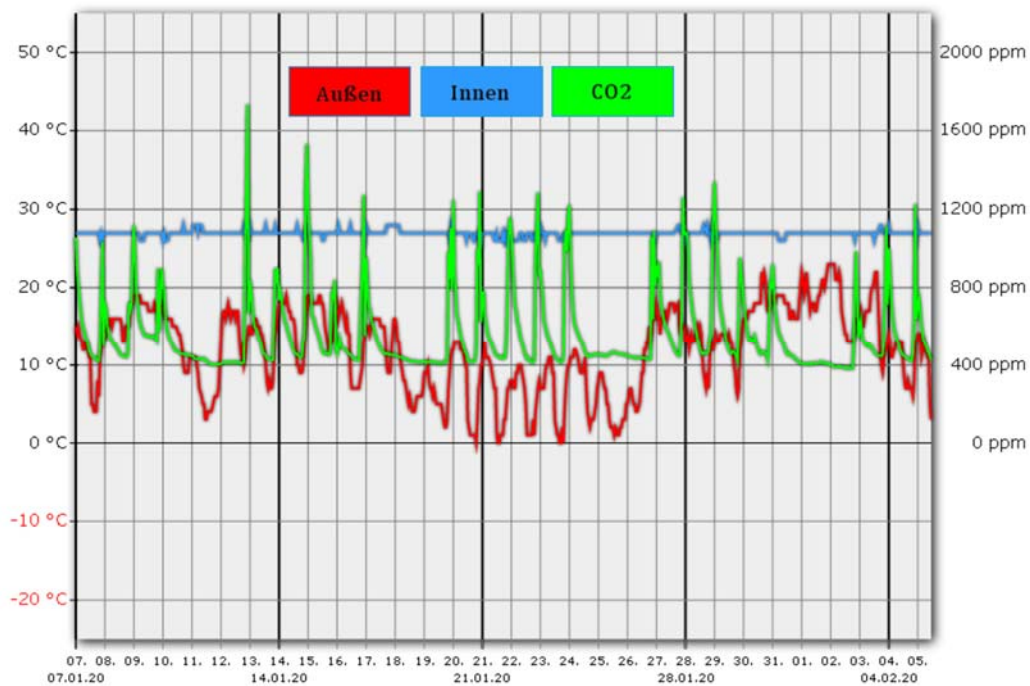


Abbildung 32: Temperaturverlauf Raum 205 ohne Solarkollektor

3.15 Ferien- und Nachtabschaltung

Es war der Wunsch der Stadt Offenburg, einen Betrieb der Lüftungsanlage zu Zeiten ohne Schulbetrieb wie beispielsweise in den Ferien zu vermeiden und damit elektrische Energie einzusparen. Aus diesem Grund wurde durch die Auswertung der CO₂-Messwerte eine sog. Ferienabschaltung implementiert. Die CO₂-Konzentration in der Außenluft liegt bei ca. 400 ppm. Es wurde eine Schwelle dahingegen definiert, dass die Anlage bei CO₂-Konzentrationen unterhalb von 450 ppm im Klassenzimmer abschaltet. Es stellte sich heraus, dass wegen der sehr steilen Abklingkurve der CO₂-Konzentration diese Schwelle bereits nachmittags/abends erreicht wurde.

Insbesondere in den Wintermonaten lief die Anlage nachts daher nicht. Trotzdem gibt es in den Klassenzimmern Ausgasungen (z. B. flüchtige organische Komponenten VOCs). Am Morgen konnte daher ein gewisser Eigengeruch der Räume wahrgenommen werden, der gelegentlich als „schlechte Luft“ bezeichnet wurde, obwohl die Luftgüte hinsichtlich CO₂ praktisch Außenluftniveau hatte.

Die Ferien-/Nachtabschaltung war in der Lehrerschaft daher unbeliebt. Beliebt hingegen ist die Sommernachtspülung, da sie zu spürbar besserer Luft am Morgen führt.

Wegen des sehr geringen Stromverbrauchs der Lüftung im Vergleich zu zentralen Lüftungsanlagen oder dezentralen Einzelgeräten, besonders in der Grundlüftung wurde in Abstimmung mit der Stadt Offenburg die Ferien-/Nachtabschaltung wieder deaktiviert, so dass es auch nachts eine gewisse Flutung gibt.

3.16 Software

Die Software wurde im Laufe des Projektes deutlich weiterentwickelt und den gestiegenen Anforderungen angepasst. Die ursprüngliche Software war für Geräte des Wohnungsbaus entwickelt worden. Um eine universelle Software und keine zwei verschiedene Software-Linien pflegen zu müssen, wurde die Software so erweitert, dass sie für Schulen/Büros, aber auch den Wohnungsbau konfiguriert werden kann.

Als Neuerungen kamen hinzu

- CO₂-Regelung
- VOC-Monitoring
- Beeinflussung der Lüfterstufen durch Lehrkräfte (Taster)
- Rücksprungautomatik (Zeitschaltuhr) nach Drücken des Tasters
- Optimierung Wintertaktung
- Ferien-(Nacht-)Abschaltung
- Sommernachtspülung
- Präsenzmelder mit Vorlauf-/Nachlauf-Steuerung für Toiletten/Bäder/Küchen
- Option CO-Überwachung
- Koppelung Geräte über ein Netzwerk
- Datenexport in Cloud
- Portal für Beauftragte Stadt/Hausmeister zur Visualisierung Messwerte
- Fernzugriff und Ferneinstellung der einzelnen Geräte

Um all diese Punkte bedienen zu können, war die Entwicklung einer neuen Prozessor-Hardware notwendig.

3.17 Schall

Das Schallthema war nicht Bestandteil dieses Projektes.

Dennoch wurden sowohl die Wärmeüberträger wie auch die Solarkollektoren im Schalllabor des Fraunhofer-Instituts IBP schalltechnischen Untersuchungen unterzogen (Müller, Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, 2016/2018). Hierzu wurden die Geräte in speziellen, schallentkoppelnden Trockenbau-Konstruktionen in eine Nische zwischen zwei schallentkoppelten Räumen eingebaut. Fremdgeräusche und Randeﬀekte konnten dadurch wirkungsvoll unterbunden werden.

Je nach Variante wurden für die Wärmeüberträger Norm-Schallpegeldifferenzen zwischen 48 und rd. 75 dB(A) erreicht, beim Solarkollektor wurden rd. 62 dB(A) Norm-Schallpegeldifferenz erreicht.

Aufgrund der jeweils anderen, spezifischen Bauweise und Einbausituationen der Geräte können die Werte in der Praxis variieren.

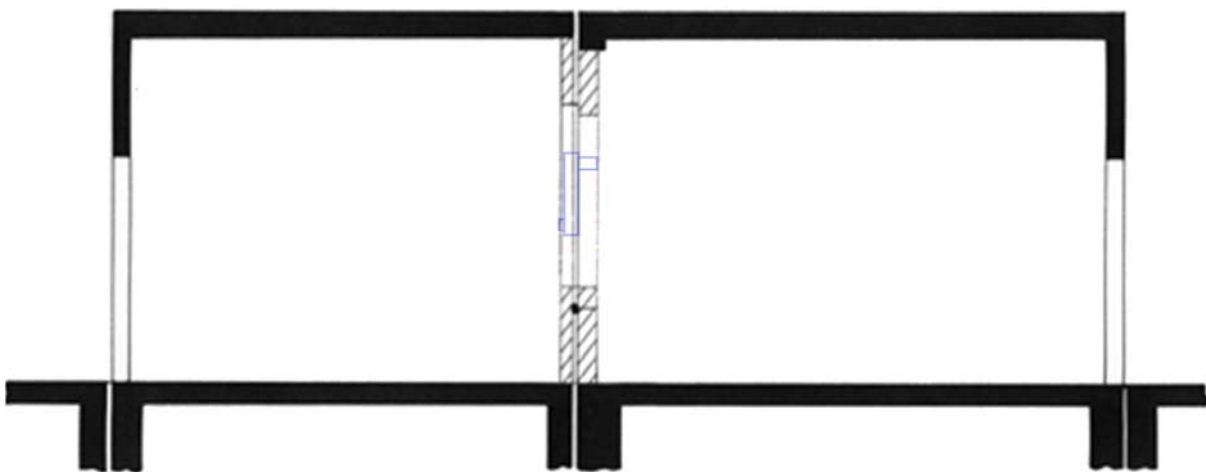
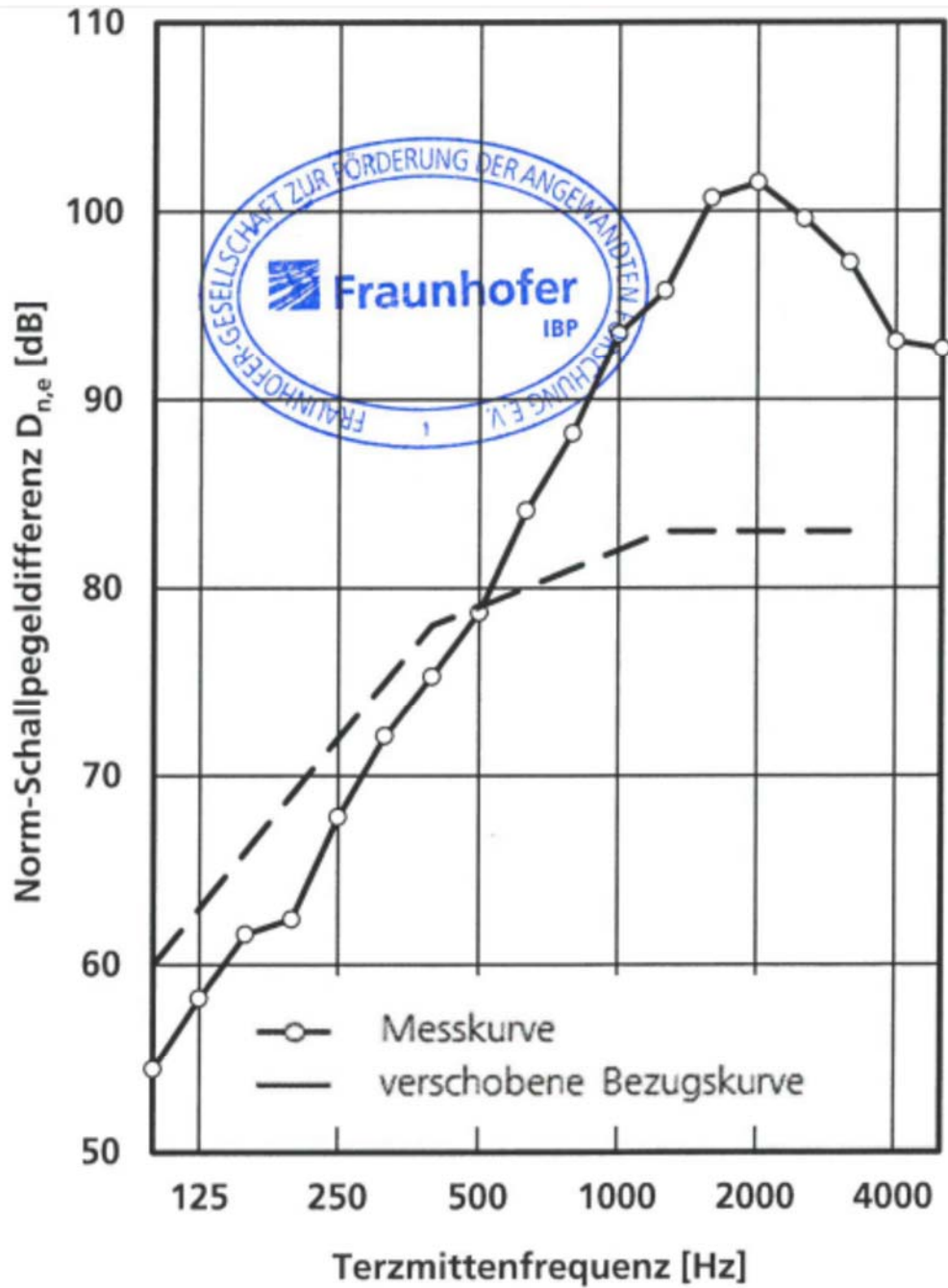
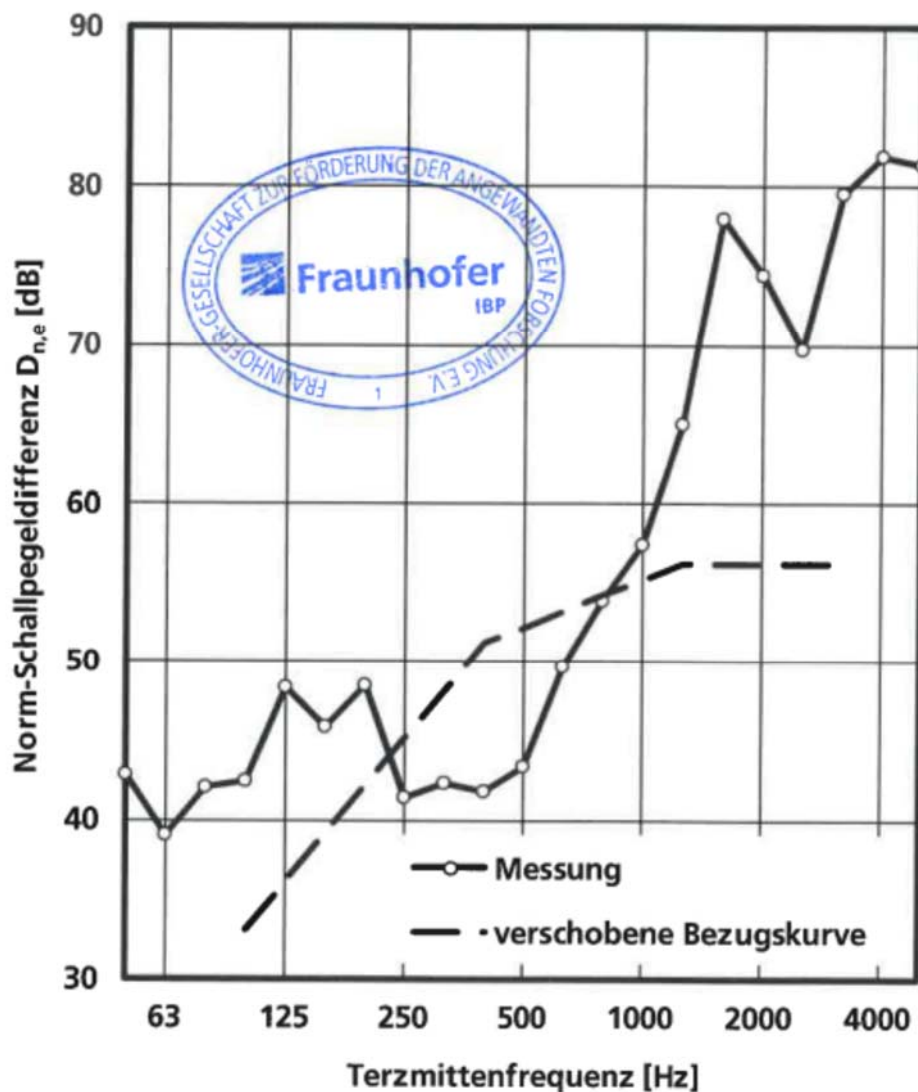


Abbildung 33: Schnitt durch Sende und Empfangsraum.



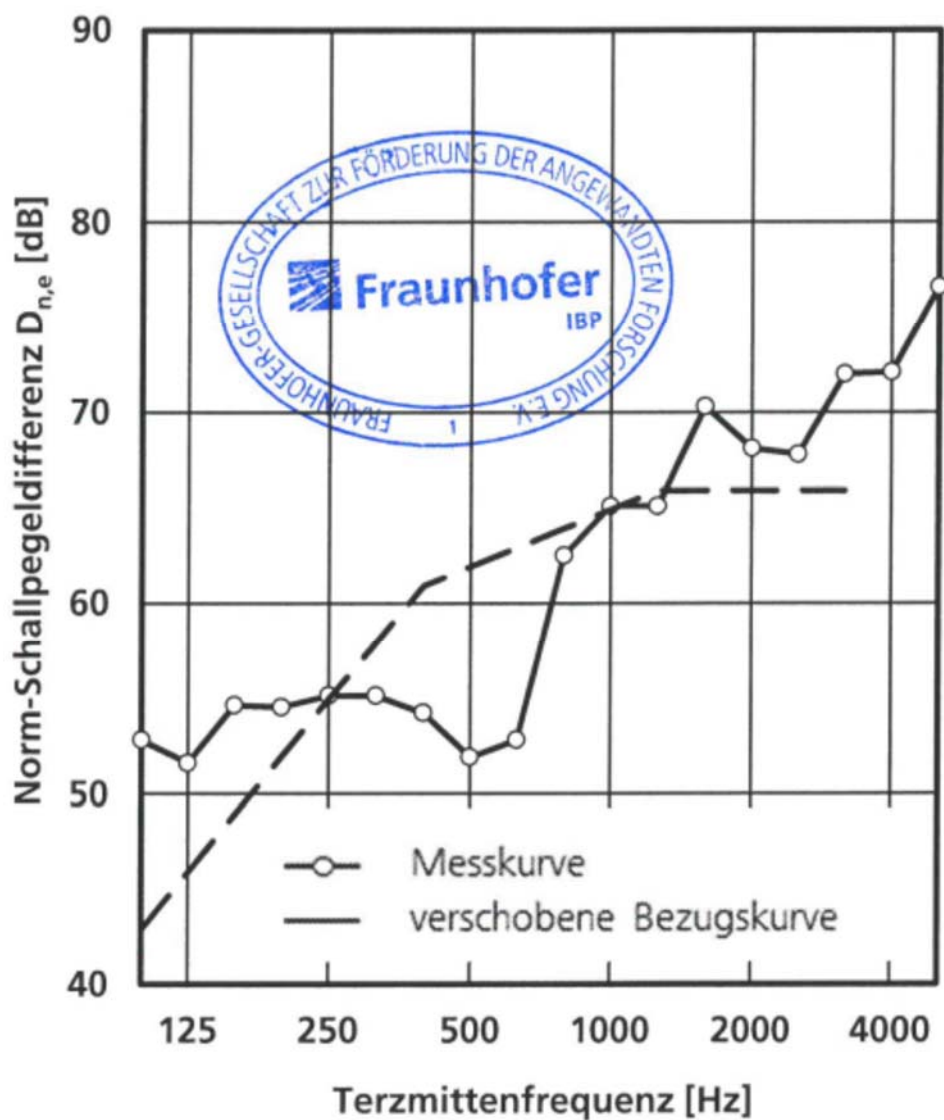
Bewertete Norm-Schallpegeldifferenz nach DIN EN ISO 717-1:2013
 $D_{n,e,w} (C; C_{tr}; C_{100-5000}; C_{tr,100-5000}) = 79,0 \pm 1,2 (-2; -8; -1; -8) \text{ dB}$

Abbildung 34: Referenzaufbau ohne Geräte



Bewertete Norm-Schallpegeldifferenz und Spektrum-Anpassungswerte nach DIN EN ISO 717-1			
$D_{n,e,w} = 52,2 \pm 1,2 \text{ dB}$			
$C_{100-3150} = -1 \text{ dB}$	$C_{100-5000} = 0 \text{ dB}$	$C_{50-3150} = -1 \text{ dB}$	$C_{50-5000} = 0 \text{ dB}$
$C_{tr,100-3150} = -3 \text{ dB}$	$C_{tr,100-5000} = -3 \text{ dB}$	$C_{tr,50-3150} = -4 \text{ dB}$	$C_{tr,50-5000} = -4 \text{ dB}$

Abbildung 35: Norm-Schallpegeldifferenz Wärmeübertrager



Bewertete Norm-Schallpegeldifferenz nach DIN EN ISO 717-1:2013

$$D_{n,e,w} (C; C_{tr}; C_{100-5000}; C_{tr,100-5000}) = 61,9 \pm 1,2 (-2; -4; -2; -4) \text{ dB}$$

Abbildung 36: Norm-Schallpegeldifferenz Solarkollektor

4 Zusammenfassung

Innerhalb des Projekts enSoL - Begleitforschung zur energieoptimierten Sanierung der Waldbachschule mittels innovativer solarer Lüftungstechnik konnte die effiziente und die definierten Ziele vollständig erfüllende Wirkungsweise der neu entwickelten dezentralen Lüftungstechnik gezeigt werden.

Dies bezieht sich einerseits auf den effizienten und effektiven Lüftungseffekt zur Reduzierung der CO₂-Konzentrationen in den Klassenzimmern. Hierzu wurden mit unterschiedlichen Luftvolumenströmen, eingestellt über die drei Lüfterstufen, die Klassenzimmer belüftet. Während des Unterrichts kam es zu den erwarteten Spitzen in der CO₂-Konzentration, die von der Sensorik zuverlässig erkannt und von der Regelung jedoch innerhalb kürzester Zeit wirkungsvoll abgebaut werden konnten. Gleichzeitig konnte mittels direkt vergleichenden Versuchen nachgewiesen werden, dass dies unter deutlicher Reduzierung von störenden Geräuschen durch die Lüftungsanlage erfolgt. Anhand des Monitorings und der Eingriffsmöglichkeiten durch die Lehrkräfte konnte nachgewiesen werden, dass sich nach Ausschalten der Lüftung innerhalb einer Unterrichtsstunde sofort bedenkliche CO₂-Konzentrationen im Raum einstellen, die jedoch bei unbeeinflusst arbeitender Lüftung zuverlässig vermieden werden.

Andererseits zeigte das Projekt auch, dass die dezentrale Lüftungstechnik die zusätzlichen Wärmelasten aufgrund von passiven solaren Gewinnen effektiv während der Nacht abbauen kann. Somit ist es möglich morgens mit einem vergleichsweise kühlen Klassenzimmer den Unterricht zu beginnen. Damit wird ein über mehrere Tage oder auch Wochen andauerndes stetiges Ansteigen der Raumtemperatur wirkungsvoll unterbunden.

Die Wirkungsweise der Wärmerückgewinnung der dezentralen Lüftungseinheiten wurde während des Projekts ebenfalls detailliert untersucht. Hier zeigte sich ein effizientes Wärmeübertragervermögen, sodass sowohl zu Zeiten mit kalten Außentemperaturen die Raumtemperaturen mit wenig zusätzlicher Heizwärme aufrechterhalten werden konnten, als auch zu Zeiten mit hohen Außentemperaturen die Klassenzimmer sich deutlich langsamer erwärmten wie dies mit geöffneten Fenstern der Fall gewesen wäre.

Hinsichtlich des Stromverbrauchs der Lüftungsanlage konnte innerhalb des Projekts gezeigt werden, dass dieser deutlich unterhalb dessen liegt, was eine zentrale Lüftungseinheit benötigt. Diese Reduzierung des Stromverbrauchs ist sogar so signifikant, dass eine Abschaltung der Lüftungsanlage während der Nacht wieder verworfen wurde und dafür eine deutlich höhere Luftqualität zu Beginn des Unterrichtes in den Klassenzimmern herrscht.

Die Software zur zentralen Steuerung der einzelnen dezentralen Lüftungseinheiten wurde ebenfalls während des Projekts umfangreich überarbeitet und deutlich mehr Funktionen ausgestattet. So ist es nun möglich neben der CO₂-Messung und eines darauf ausgerichteten Betriebs der Lüftungsanlage diese in Abhängigkeit der Konzentration der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) in der Luft zu betreiben. Durch die im Projekt entwickelte Mess- und Übertragungstechnik ist es nun direkt möglich, die Messdaten direkt in die Cloud schreiben zu lassen, und somit dem technischen Personal der Schule und den Verantwortlichen der Kommune einen direkten Zugriff auf deren Visualisierung zu gewähren. Zwar war eine Untersuchung der Lüftungsanlage bzgl. der Schallemissionen nicht Bestandteil des Projekts, dennoch wurden während der Laufzeit des Projekts entsprechende Untersuchungen seitens EnerSearch Solar GmbH durchgeführt. Der Vollständigkeit halber sind diese Ergebnisse ebenfalls in diesem Bericht aufgeführt und zeigen maximale Schallpegeldifferenzen.

Literaturverzeichnis

2017. Bine. [Online] 2017.

https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiutlyM9rbtAhUBgRoKHfznDr8QFjAAegQIARAC&url=http%3A%2F%2Fwww.bine.info%2Ffileadmin%2Fcontent%2FPrese%2FProjektinfos_2017%2FPM_08_2017%2FProjektInfo_0817_internetx.pdf&usg=AOvVaw3MR8F.

Bollin, Elmar, et al. 2016. Abschlussbericht Dezentrale, fassadenintegrierte Lüftungsfassaden.

[Online] 2016. <https://www.badenova.de/downloads/unternehmen/engagement/innovationsfonds-downloads/unternehmensbereiche/stab/innovationsfonds/abschlussberichte/2012/2012-10-ab-lueftung-hog.pdf>.

da Costa Fernades, Jesus, et al. 2013. Abschlussbericht Natürliche Gebäudeklimatisierung. [Online]

2013. <https://www.badenova.de/downloads/unternehmen/engagement/innovationsfonds-downloads/unternehmensbereiche/stab/innovationsfonds/abschlussberichte/2008/2008-1abschlussbericht-projekt.pdf>.

da Costa Fernandes, Jesus, et al. 2013. Leitfaden für die Überhitzungsminderung. [Online] 2013.

<https://www.badenova.de/downloads/unternehmen/engagement/innovationsfonds-downloads/unternehmensbereiche/stab/innovationsfonds/abschlussberichte/2008/2008-1-leitfaden.pdf>.

Deutsches Institut für Normung e. V. 2007. *DIN EN 13779*. 2007.

Deutsches Institut für Normung e.V. 1994. *DIN 1946-2*. 1994.

Häusler, Tobias und Neupetsch, Annette. 2015. Schlussbericht Sanierung Max-Steenbeck-Gymnasium. [Online] 2015.

https://www.tib.eu/de/suchen?tx_tibsearch_search%5Baction%5D=download&tx_tibsearch_search%5Bcontroller%5D=Download&tx_tibsearch_search%5Bdocid%5D=TIBKAT%3A1666544787&cHash=034bbdd7f78f7b4039c70fdb46363a8d#download-mark.

Moriske, Heinz-Jörn und Szewzyk, Regine. 2008. *Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden*. [Hrsg.] Umweltbundesamt. 2008.

Müller, Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP. 2016/2018. *Luftschalldämmung einer dezentralen Fassadenlüftungsanlage nach DIN EN ISO 10140*. 2016/2018.

Passivhaus-Datenbank. 2020. Max-Steenbeck-Gymnasium in Passivhaus-Datenbank. [Online] 05. 12 2020. https://passivehouse-database.org/index.php#d_2659.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fotografie der Waldbachschule vor der Sanierung	5
Abbildung 2: Fotografie der Waldbachschule nach der Sanierung	5
Abbildung 3: Karte mit der Lage der Waldbachschule	6
Abbildung 4: Grundriss Erdgeschoss	7
Abbildung 5: Grundriss 1. Obergeschoss	8
Abbildung 6: Grundriss 2. Obergeschoss	8
Abbildung 7: Foto der Demoanlage (außen) an Raum 301.	19
Abbildung 8: CO ₂ -Konzentration der KW03, 2016	19
Abbildung 9: CO ₂ -Konzentration in Raum 302 in KW04, 2017 mit verschlossener Lüftung	20
Abbildung 10: CO ₂ -Konzentration in Raum 302 in KW07, 2017 mit offener Lüftung	21
Abbildung 11: Grundriss von Raum 301 mit Positionen der CO ₂ -Sensoren	21
Abbildung 12: Wochenverlauf der CO ₂ -Konzentration (Raum 301, KW19, 2019)	22
Abbildung 13: Skizze der Bahnen von Teilchen bei der Brownschen Molekularbewegung	23
Abbildung 14: Carpet Plot der CO ₂ -Konzentration in Raum 203	24
Abbildung 15: Carpet Plot der CO ₂ -Konzentration in Raum 204	25
Abbildung 16: Carpet Plot der CO ₂ -Konzentration in Raum 210	25
Abbildung 17: Carpet Plot der CO ₂ -Konzentration in Raum 312	26
Abbildung 18: CO ₂ -Konzentration als Funktion ihrer Zeitanteile in Raum 203	27
Abbildung 19: CO ₂ -Konzentration als Funktion ihrer Zeitanteile in Raum 204	27
Abbildung 20: CO ₂ -Konzentration als Funktion ihrer Zeitanteile in Raum 210	28
Abbildung 21: CO ₂ -Konzentration als Funktion ihrer Zeitanteile in Raum 212	28
Abbildung 22: Spektrum der spezifischen Ausstrahlung als Funktion der Wellenlänge	30
Abbildung 23: Skizze des Wärmestroms aus der Speichermasse in die Luft	31
Abbildung 24: Skizze der Luftströme bei der Ringlüftung	31
Abbildung 25: Skizze der Luftströme bei der Zuluft	32
Abbildung 26: Skizze der Luftströme bei der Abluft	32
Abbildung 27: Wochenverlauf der Außen-/Raumlufttemperatur und Raumluftfeuchte in KW26, 2019	33
Abbildung 28: Darstellung der elektrischen Leistung im Jahresverlauf im Erdgeschoss	35
Abbildung 29: Darstellung der elektrischen Leistung im Jahresverlauf im 1. Obergeschoss	35
Abbildung 30: Darstellung der elektrischen Leistung im Jahresverlauf im 2. Obergeschoss	36
Abbildung 31: Temperaturverlauf Raum 204 mit Solarkollektor	37
Abbildung 32: Temperaturverlauf Raum 205 ohne Solarkollektor	38
Abbildung 33: Schnitt durch Sende und Empfangsraum	39
Abbildung 34: Referenzaufbau ohne Geräte	40
Abbildung 35: Norm-Schallpegeldifferenz Wärmeübertrager	41
Abbildung 36: Norm-Schallpegeldifferenz Solarkollektor	42

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Grenzwerte der CO ₂ -Konzentrationen gemäß „Leitfaden für Innenraumhygiene in Schulgebäuden“	10
Tabelle 2: Grenzwerte der CO ₂ -Konzentrationen gemäß DIN EN 13779	11
Tabelle 3: Übersicht über die quartalsweisen Arbeitspakete.....	14