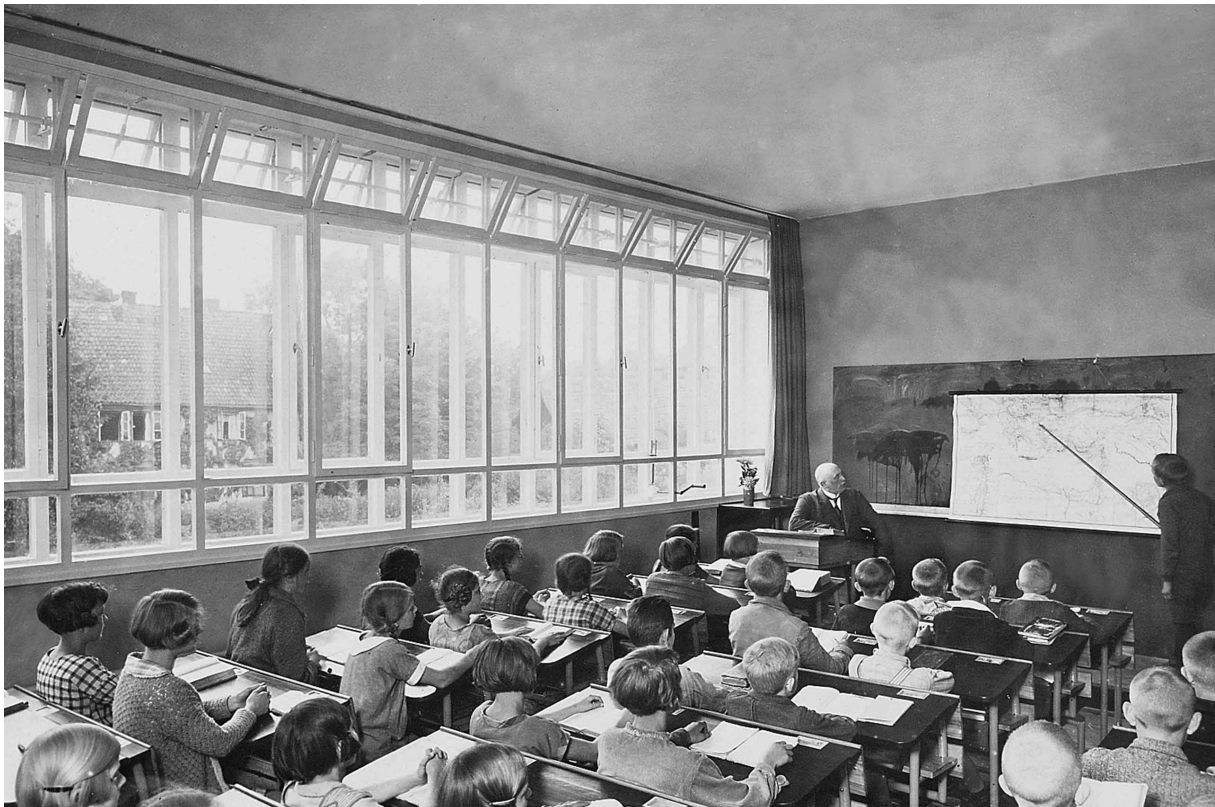


# Prototype energetische Klassenraumsanierung Denkmal Altstädter Schule in Celle von Otto Haesler

Konzeptbewertung mittels meßtechnischer Testraumerfassung

DBU Förderprojekt AZ 35021/01



November 2023

Matthias Schuler, Matthias Rammig, Henrik Pfitzenmaier

In Zusammenarbeit mit den Spital-Frenking Schwarz Architekten und der Stadt Celle

TRANSSOLAR KlimaEngineering

Stuttgart – München – New York

## Übersicht

Projektübersicht

Originalkonzept

Sanierungskonzept

Umsetzung

Steuerungsanforderungen

Erwartete Antworten aus dem Testraum

Meßaufbau

Meßergebnisse

Auswertung

Erhöhte Lüftungsmengen – manueller Eingriff

Wärmerückgewinnung Kastenfenster

Testbetrieb mit erhöhtem CO<sub>2</sub> Eintrag und Stoßlüften

Heizwärmebedarf

Sommerbetrieb

Systemvereinfachung

    Mechanische Klappenantriebe

Prüfung Kondensatanfall im Kastenfenster bei niedrigen Aussentemperaturen

Gesamtfazit

## Projektübersicht

Die Stadt Celle möchte die Altstädter Schule von Otto Haesler, die seit ihrer Fertigstellung 1928 bis heute durchgängig als Schule genutzt wird, denkmalgerecht Instand setzen. Ziel soll es sein, die bauzeitliche Bausubstanz zu schonen und mit möglichst minimalen Eingriffen das Gebäude für die Zukunft zu ertüchtigen, und dabei die Dinge zu verbessern, die von den Nutzern im Schulbetrieb bemängelt wurden, wie beispielsweise die Raumakustik oder die unzureichende Heizung/Beheizung der nördlichen Klassenräume.

Wesentlicher Bestandteil sowohl der denkmalgerechten Instandsetzung als auch des Energiekonzeptes sind die ursprünglich in den Klassenräumen eingebauten Holzkastenfenster.

Bauhistorisch und gestalterisch sind sie eine Besonderheit, weil in den dreißiger Jahren in Gebäuden im Stil der klassischen Moderne mehrheitlich Einscheiben-Metallrahmenfassaden verwendet wurden. An der Otto-Häsler-Schule wurden die für das Gebäude typischen Holzkastenfenster in den 80er Jahren durch Leichtmetallfenster mit Isolierverglasung ersetzt. Wieder Holzkastenfenster einzusetzen, würde dem Haus viel Identität zurückgeben und wäre deshalb im Rahmen einer denkmalgerechten Instandsetzung eine wünschenswerte Maßnahme.

Energetisch sind die Holzkastenfenster besonders, weil der Zwischenraum der beiden Scheiben gleich mehrere Aufgaben einer Fassade übernehmen kann: Blend- und Sonnenschutz können in diesem Zwischenraum untergebracht werden und durch ihr Schließen von unten nach oben die optimale Nutzung von Tageslicht ermöglichen. Solare Gewinne durch Sonneneinstrahlung können im Zwischenraum gesammelt und im Winter zur Vorwärmung der Zuluft genutzt werden.

Bevor die Sanierung des gesamten Gebäudes durchgeführt wird, soll vorab eine prototype energetische Klassenraumsanierung erfolgen. Diese sah vor, einen der Klassenräume im zweiten OG an der Westfassade in den Sommerferien 2019 zu sanieren und dann über ein Jahr lang meßtechnisch zu erfassen und mit einem Bestandsraum zu vergleichen. Die Umnutzung der Schule in eine Sprachschule sowie der Befund von asbesthaltigen Verspachtelungen hat zu Verzögerungen geführt, so dass erst im Sommer 2022 in die nun leere Schule im Testraum die neue Fassade installiert werden konnte. Seit September 2022 laufen die Messungen.

Projektumfang ist die Planung , Erstellung und Messdurchführung dieses Prototypraumes sowie die Ausstattung eines Referenzraumes im Istzustand für Messungen hinsichtlich Heizwärmebedarf, Luftqualität, thermischem und visuellem Komfort sowie Tageslichtversorgung. Bisher konnten wegen Problemen mit der Sonnenschutzsteuerung noch keine Messungen zum visuellen Komfort gemacht werden.

Die Möglichkeit, über einen Prototypraum Funktions- und Kostensicherheit bei der Instandsetzung eines Denkmals zu erreichen, macht das Projekt exemplarisch in seiner Herangehensweise.

## Das Originalkonzept



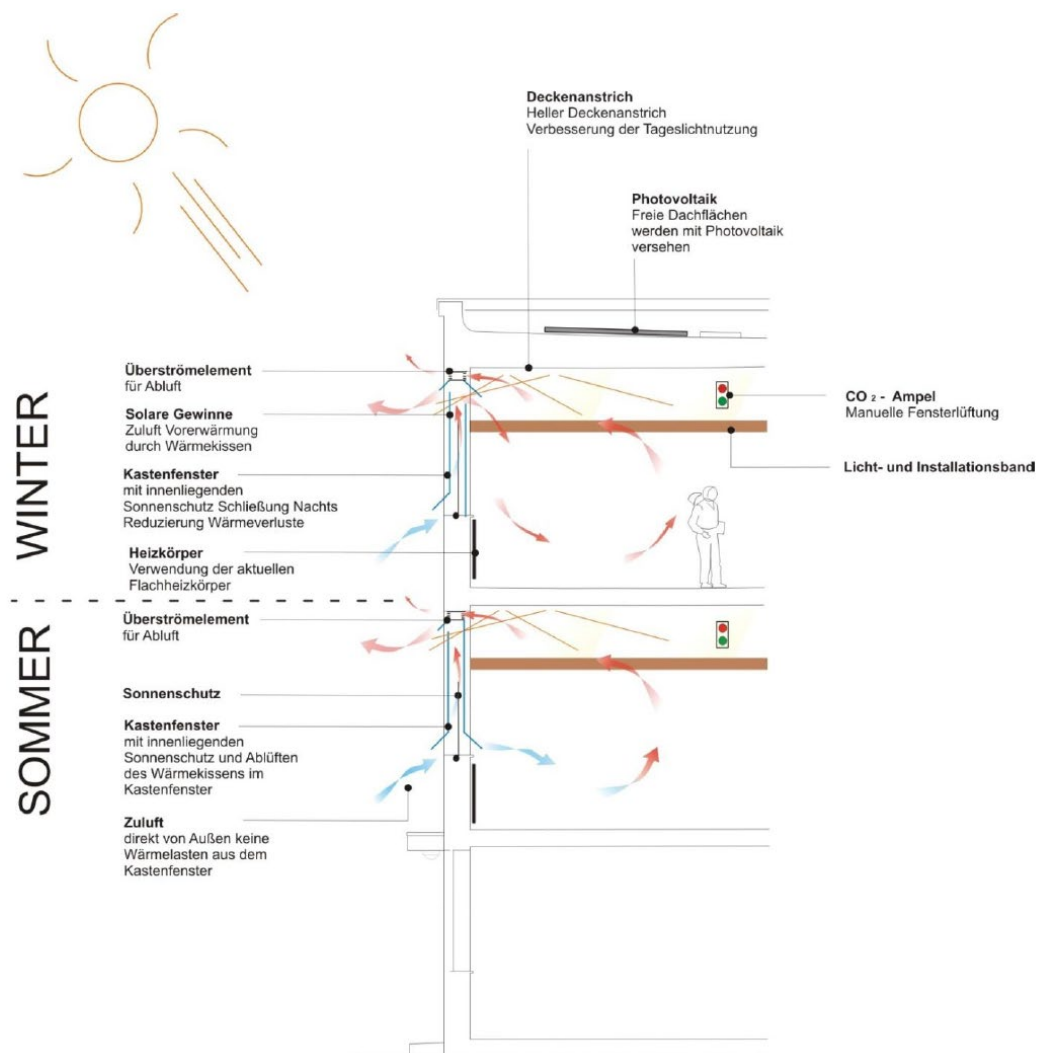
Fotoquelle Otto Haesler Stiftung

Die historischen Kastenfenster sollten ganz in der Philosophie des Bauhauses einerseits viel Tageslicht in die Klassenzimmer bringen und andererseits das Problem des Kälteeintrages an einer Einfachverglasung lösen.

Manuell mit einer grossen Kurbel bediente Oberlichtklappen oben innen und oben aussen entlang der gesamten Fassade erlaubten eine Grundlüftung der Klassenzimmer, während Drehflügel in jedem dritten Fassadenfeld in der inneren und äusseren Fassade für Stoßlüftung in den Pausen genutzt werden konnten.

Der Sonnenschutz wurde über innenliegende Vorhänge gelöst, die wie im oberen Bild erkennbar mit den inneren Fassadenklappen kollidierten und auch zu zusätzlichem Wärmeeintrag in den Klassenzimmern führten.

## Das Sanierungskonzept



### Lüftungskonzept des angepassten Kastenfenster

Das Wiedereinsetzen von Kastenfenstern ist wesentlicher Bestandteil der denkmalgerechten Sanierung und dem Energiekonzept für die Klassenräume der Altstädter Schule. In den Kastenfenstern entsteht im Winter durch die Absorption der solaren Einstrahlung auf den Sonnen-/Blendschutz ein Wärmekissen im Zwischenraum der Verglasungen. Durch dieses Wärmekissen wird die Zuluft vortemperiert und dem Klassenraum zugeführt. Hierzu wird in der äußeren Verglasung im unteren Bereich sowie im oberen Bereich der inneren Verglasung des Kastenfensters ein Öffnungsflügel betätigt. Im Sommer werden manuell nur im unteren Bereich der inneren Fassade Öffnungsflügel betätigt um ein direktes Einströmen der Außenluft zu erhalten und eine Vorerwärmung der Zuluft zu vermeiden

Um die Transmissionswärmeverlust während der Nacht weiter zu verringern kann der im Zwischenraum des Kastenfensters befindende Blend-/ Sonnenschutz mit beidseitiger low-e Beschichtung auch nachts geschlossen werden. Der Sonnenschutz besitzt eine Resttransparenz um auch im geschlossenen Zustand eine Aussenverbindung zu gewährleisten und muß im geschlossenen Zustand unten und oben ausreichende Zwischenräume zur Durchlüftung sicherstellen. Die automatische Sonnenschutzsteuerung schließt den Sonnenschutz nur bei direkter Einstrahlung auf die jeweilige Fassade oder kann manuell vom Lehrer geschlossen werden. In Verbindung mit einem sehr hellen Deckenanstrich kann so auch bei geschlossenem Sonnenschutz eine Tageslichtnutzung ermöglicht werden und verbessert so die natürliche Belichtung des Innenraums.

Eine CO<sub>2</sub>-Ampel signalisiert den Nutzern des Klassenraumes, dass der CO<sub>2</sub> Gehalt in der Luft zu hoch ist und gelüftet werden muss. Eine Lüftung des Klassenraums erfolgt durch manuelles Öffnen der mittleren Drehflügel – Stoßlüften - oder eine Ansteuerung der Öffnungsflügel. Die unteren inneren Klappen des Kastenfensters werden im Sommer manuell aktiviert, um ein Eindringen von warmer Luft aus dem Kastenfenster im Sommer zu reduzieren und direkt Frischluft von Aussen zu erhalten. Dann sind die Klappen oben innen geschlossen oder nur minimal geöffnet.

Ein Licht- und Installationsband ermöglicht die Verlegung aller nötigen Medien im Klassenraum. Um den Primärenergiebedarf und den Wärmeeintrag durch Kunstlicht zu reduzieren wird hocheffiziente LED-Beleuchtung vorgesehen. Die freien Dachflächen sollten mit Photovoltaik bedeckt werden, durch die Solarstrom gewonnen wird. Einen Konflikt mit dem Denkmalschutz sollte es nicht geben, da auch im Bauhaus Dessau eine dachgleiche PV Anlage installiert wurde. Der Heizbedarf wird weiterhin über die im Klassenraum befindenden Heizkörper gedeckt. Diese sind an der neuwertigen Heizzentrale angeschlossen.



Dachgleiche Photovoltaikanlage auf dem Bauhaus Dessau

## Umsetzung

Bei der Umsetzung des Konzeptes kamen auch gestützt aus den Erfahrungen der Corona Pandemie die Anforderungen nach einer automatischen Steuerung des natürlichen Lüftungssystem.

Da es für mechanische Fensterbeschläge kaum noch Hersteller gibt, wurden Kettenmotoren zum Antrieb der Fassadenklappen eingesetzt, und eine logische Steuerung ergänzt, die in Abhängigkeit vom CO<sub>2</sub> Gehalt im Klassenzimmer die Klappen ansteuern sollte, aber auch Witterungseinflüsse und Aussentemperaturen in die Logik einbinden konnte. Auch der Sonnenschutz wird über die Logik gesteuert.

Da das überarbeitete Kastenfensterkonzept nur motorische Klappen auch unten aussen vorsah, wurden die Anzahl der Klappen überprüft und nach den Anforderungen der Arbeitsstättenrichtlinien ausgelegt. Einschließlich der manuellen Drehflügel in Innen- und Aussenfassade, waren jeweils 6 Klappen für jede Reihe notwendig, um die 4.3 m<sup>2</sup> Öffnungsfläche zu erreichen. Somit wird nur jeder zweite Fassadenflügel in der oberen und unteren Reihe als Klappflügel ausgebildet, die anderen sind Festverglasung.



Fassadenklappen mit Kettenmotoren sowie Sonnenschutzrollo oben im Kastenfenster

## Steuerungsanforderungen Fassadenklappen und Sonnenschutz

### Eingangsgrößen:

- Zeitprofil Nutzungszeit – Wochentag von 8 bis 16 Uhr
- Unterrichtspausen mit Signal für Reset Sonnenschutz und Stoßlüftung
- CO2 Level Innenraum
- Globetemperatur Klassenraum
- Einstrahlung auf die Fassade –realisiert über Helligkeit vor der Fassade
- Windgeschwindigkeit
- Regenwächter - optional
- Aussentemperatur
- Raumlufftemperatur
- Fassadenzwischenraum Lufttemperatur

### Stellgrößen:

- Sonnenschutz, auf oder zu
- Fassadenklappen auf/zu, Aussen oben
- Fassadenklappen auf/zu, Aussen unten
- Fassadenklappen auf/zu, Innen oben
- Fassadenklappen auf/zu, Innen unten – nur manuell um Einklemmgefahr auszuschießen

### Regellogik:

#### 1. Sonnenschutz

Wenn die Einstrahlung auf die Fassade während der Nutzung über 22.000 Lux in der Fassadenebene ansteigt, schließt der Sonnenschutz

Unterschreitet die Einstrahlung nach einen Zeitglied - einstellbar von 5 bis 45 Minuten oder auf Unterrichtspausen – 16.000 Lux öffnet der Sonnenschutz

Ausserhalb der Nutzung wird der Sonnenschutz in der Heizperiode – mittlere 24h Aussentemperatur unter 12°C – unabhängig von der solaren Einstrahlung in Abhängigkeit von der Raumlufftemperatur optional Globetemperatur gesteuert. Steigt dann diese Bezugstemperatur über 24°C an wird der Sonnenschutz geschlossen. Fällt die Raumlufftemperatur unter 21°C ab wird der Sonnenschutz wieder geöffnet.

Sonnenschutz als temporärer Wärmeschutz – ausserhalb der Nutzung in der Heizperiode – Aussentemperatur unter 12°C – wird der Sonnenschutz bei Einstrahlungen unter 11.000 Lux geschlossen zur U-Wertverbesserung der Fassade.

Windschutz des Sonnenschutzes – bei Überschreiten einer Windgeschwindigkeit von 8 m/s vor der Fassade und offenen äußeren Fassadenklappen sollte der Sonnenschutz zum Schutz vor Windschäden geöffnet werden.



## 2. Ansteuerung der Fassadenklappen

Die Fassadenklappen dienen der Frischluftzufuhr- und abfuhr für den Klassenraum, der Hinterlüftung des Sonnenschutzes im Fassadenzwischenraum und dem Ablüften von Überschuwärme aus dem Klassenraum während und nach der Nutzung

Grundlüftung Winter - Aussentemperatur 24 h mittel unter 12°C

Fassadenklappen aussen unten AU offen, Fassadenklappen innen oben IO offen, AO bleiben geschlossen

Steuerung über Luftqualität im Raum

- überschreitet die CO<sub>2</sub> Konzentration im Raum 600 ppm, werden die Klappen AU und IO geöffnet

- unterschreitet die CO<sub>2</sub> Konzentration im Raum 400 pp., werden die Klappen geschlossen

Überschreitet im Grundlüftungsmodus die Fassadenzwischenraumtemperatur die Grenze von 22°C werden zusätzlich die Fassadenklappen aussen oben AO geöffnet, um eine besseren Wärmeabfuhr im Fassadenzwischenraum zu gewährleisten.

Überschreitet der Fassadenzwischenraum auch ausserhalb der Nutzung oder Grundlüftung die Grenze von 26°C werden die Klappen aussen oben und unten geöffnet, bis der Fassadenraum wieder unter 24°C abgekühlt ist.

Grundlüftung Sommer - Aussentemperatur 24 h mittel über 12°C

Stoßlüftung

Fassadenklappen aussen unten AU offen, aussen oben AO offen ,

Fassadenklappen innen oben IO motorisch und innen unten IU manuell offen

dazu Sonnenschutz öffnen, danach wieder in Steuerungsposition

Steuerung über Luftqualität im Raum

- überschreitet die CO<sub>2</sub> Konzentration im Raum 600 ppm, werden die Klappen IO, AU und AO geöffnet

- unterschreitet die CO<sub>2</sub> Konzentration im Raum 400 pp., werden die Klappen IO, AU und AO geschlossen

Ablüften im Sommer - Aussentemperatur 24 h mittel über 12°C

Steigt die Raumlufttemperatur über 24°C und liegt die Aussenlufttemperatur unter 20°C, und die Temperatur des Fassadenzwischenraumes unter 22°C so gibt es ein natürlich Ablüftungspotential, das über ein Öffnen aller Fassadenklappen genutzt werden kann.

Überschreitet der Fassadenzwischenraum auch ausserhalb der Nutzung die Grenze von 24°C werden die Klappen aussen oben und unten geöffnet, bis der Fassadenraum wieder unter 20°C abgekühlt ist.

Liegt der Fassadenzwischenraum über 26°C wird die Klappe IO geschlossen und nur zur Stoßlüftung aktiviert, um keinen zusätzlichen Wärmeeintrag zu erzeugen.

Ablüften Fassadenzwischenraum Winter

Stoßlüften in den Pausen

Öffnen aller Fassadenklappen in den Unterrichtspausen unabhängig von der Steuerungslogik, Sonnenschutz dabei öffnen für bessere Lüftungseffizienz

Witterungsschutz bei Regen und Starkwind

Überschreitet die Windgeschwindigkeit vor der Fassade 12 m/s und der Regensensor meldet Regen werden die äußeren Fassadenklappen oben AO geschlossen. Die Fassadenklappen aussen unten AU bleibt in der Nutzung als Frischluftversorgung aktiviert.

Wegen Kollisionsmöglichkeit brauchen die äusseren manuellen Öffnungsflügel Öffnungskontakte, die den motorischen Sonnenschutz deaktivieren, wenn die Flügel nach Innen geöffnet sind. Muss für die Umsetzungsvariante nachgerüstet werden. Im Testaufbau an einem Flügel in Verbindung mit der betreffenden Sonnenschutzgruppe als Demonstrator installieren.

Alle Regelgrößen wie Schaltgrenzen in Temperatur, Einstrahlung, CO2 level etc. sollten leicht veränderbar sein.

Für alle 4 Stellsignale, Sonnenschutz auf/zu, Fassadenklappen AO, AI und IO sollte es einen manuellen Schalter zur Übersteuerung der Regelung geben, um unabhängig von der automatischen Steuerung Regelungssituationen untersuchen zu können.



Regelungskasten mit 3 x 6 Aktoren für die Fassadenklappen und 3 Aktoren für die Sonnenschutzsteuerung, sowie der Logik S1 unten, alle mit Netzgeräte

### **Erwartete Antworten aus dem Testraum**

Durch die Errichtung des Prototyptraums und dessen Betrieb samt Monitoring wollte man Erkenntnisse gewinnen, die deutlich über die Ergebnisse von Simulationen hinausgehen:

- Ziel ist trotz der bauhistorischen Bedeutung der Altstädter Schule in Celle und den damit einhergehenden Denkmalaufgaben ein zukunftsorientiertes Fassadensystem mit größtmöglichem Nutzerkomfort vor allem in den Klassenräumen zu entwickeln. Am Prototyptraum kann die neue Fassade im Maßstab M1:1 anschaulich in optischer Hinsicht bewertet und mit der historischen Fassade, die nur im oberen Bereich der Kastenfenster eine Klappe hatte, verglichen werden.
- An der Fassade im Prototyptraum können die komplexen Anforderungen an Sonnenschutz und Lüftung, mechanische Bedienbarkeit, Ästhetik, Innen-Außenbezug, Kondensation u.a.m. abgeglichen werden.
- Der Prototyptraum wird maßgeblich dazu beitragen, oft auftretende unvorhergesehene Probleme beim Sanieren und Bauen im Bestand zum Beispiel durch falsche Einschätzung der Bausubstanz zu minimieren.
- Der Prototyptraum wird für Umsetzung der Gesamtbaumaßnahme Erkenntnisse mit sich bringen, die die Eingriffe in die Bausubstanz auf das allernötigste minimieren.
- Mit Hilfe eines Prototyptraums kann die maximal mögliche formale Integration von innovativer Technik und Gebäudeausrüstung in ein Denkmal sichergestellt werden.
- Im Prototyptraum können alle planerischen Entscheidungen hier vor Umsetzung der Gesamtbaumaßnahme überprüft werden, was Planungssicherheit und Kostensicherheit mit sich bringt.
- optionale Vereinfachung des System in der Regelung aber auch in der Mechanik

## Meßaufbau

Zur Dokumentation der Witterungseinflüsse auf das Raumverhalten in Temperatur und Lüftungseffizienz mußte eine komplette Wetterstation vor der Fassade installiert werden.

### Aufbau der Messung

Sensoren im Außenraum



- 1 Wetterstation  
→ Außenlufttemperatur  $t_{amb}$ ,  
Windgeschwindigkeit m/s,  
Windrichtung, max.  
Windgeschwindigkeit, relative  
Luftfeuchte, Regenmenge,  
Luftdruck
- 2 Pyranometer  
→ Solare Einstrahlung  $W/m^2$  auf  
die Fassade
- 2 Digitaler Kohlendioxid  
(CO<sub>2</sub>) Fühler  
→ CO<sub>2</sub> Konzentration ppm,  
Lufttemperatur °C und  
Luftdruck mbar

Für die Erfassung der komforttechnischen Raumparameter wurden Temperaturen, Feuchten, CO<sub>2</sub> Konzentrationen in verschiedenen Raumpositionen und Raumhöhen aufgezeichnet.

Ergänzt wurden:

Energiezähler für elektrische Heizkörper

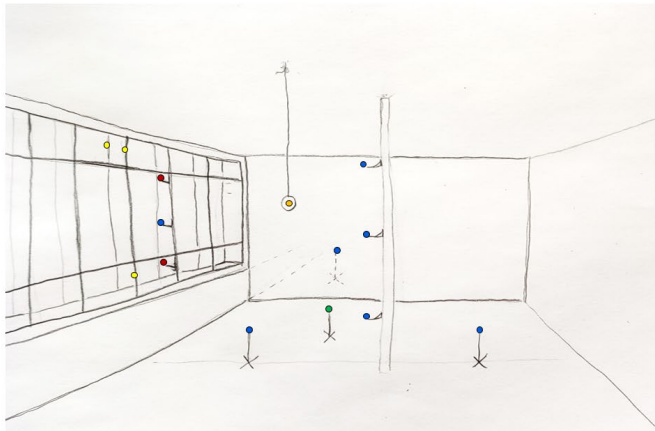
Reedkontakte an Referenzklappen für jede Klappengruppe

Sonnenschutzstellung wurde über die Innenhelligkeit in der Fassadenebene gemessen, die im Vergleich zur Aussenhelligkeit die Stellung des Sonnenschutzes ob offen oder geschlossen ablesen läßt

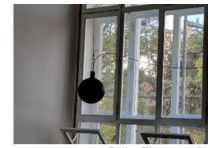
Die Schüler wurden jeweils über 1 m hohe Metallrohre mit einer inneren Wärmequelle von 45 Watt repräsentiert, der Feuchteeintrag über Verdampfer und der CO<sub>2</sub> Eintrag über eine CO<sub>2</sub> Flasche mit elektromagnetischem Ventil und Massenstromregler. Eine Zeitschaltuhr aktiviert diese interne Quellen während des Unterrichts von 8 bis 12 Uhr und von 16 bis 17 Uhr, um der Raumausrichtung nach Westen mit später Nachmittagssonne gerecht zu werden.

### Aufbau der Messung

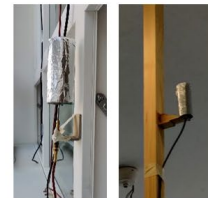
#### Sensoren im Innenraum



- **Globe Thermometer mit Pt100 Fühler**  
→ operative Temperatur  $t$  °C
- **Digitaler Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) Fühler**  
→ CO<sub>2</sub> Konzentration ppm, Lufttemperatur °C und Luftdruck mbar
- **Digitaler Kombi Fühler**  
→ Temperatur  $t$  °C, relative Luftfeuchte  $U_w$  % r.F., Taupunkt  $t_d$  °C und Absolutdruck  $p$  mbar
- **Mantelwiderstandsfühler Pt100**  
→ Temperatur  $t$  in °C
- **Magnetkontakt an Fensterklappen**  
→ Zu oder auf



Globe Thermometer



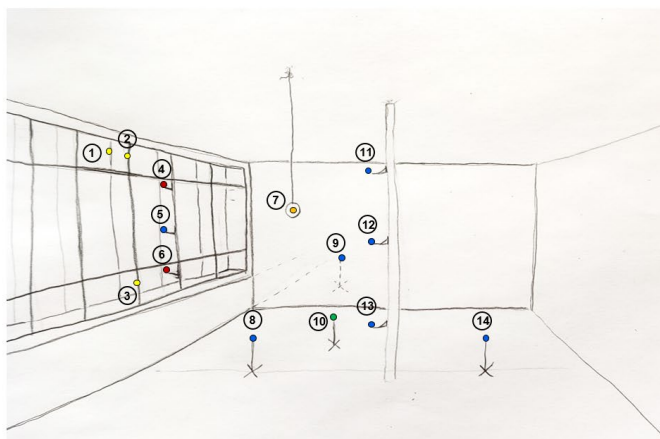
Mantelwiderstandsfühler\*

Digitaler Kombi Fühler\*

\*Temperatursensoren haben einen Strahlungsschutz aus Alufolie, welcher oben und unten geöffnet ist um Luftaustausch um den Sensor zu ermöglichen

### Aufbau der Messung

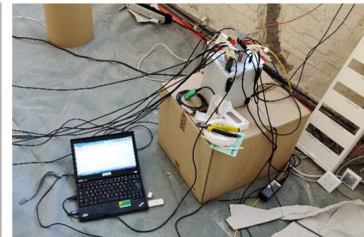
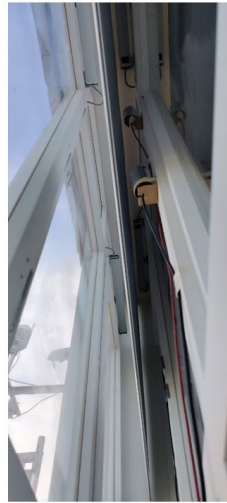
#### Sensoren im Innenraum



- ① Klappe außen oben (a.o.)
- ② Klappe innen oben (i.o.)
- ③ Klappe innen unten (i.u.)
- ④ Fassadenzwischenraum Oben  
→ 5 cm Abstand von der inneren Verglasung, Höhe von Brüstung ca. 1,5 m
- ⑤ Fassadenzwischenraum Mitte  
→ 5 cm Abstand von der inneren Verglasung, Höhe von Brüstung ca. 1 m
- ⑥ Fassadenzwischenraum Unten  
→ 5 cm Abstand von der inneren Verglasung, Höhe von Brüstung ca. 0,3m
- ⑦ Globe Thermometer  
→ Raummitte, Höhe 1,8 Meter
- ⑧ Temperatur vor Fassade  
→ Raummitte, Höhe 0,8 Meter, 1,3 Meter von Fassade
- ⑨ Temperatur Referenzraum
- ⑩ CO<sub>2</sub> Innen  
→ Im vorderen Raumdrittel, direkt neben CO<sub>2</sub> Sensor für Fenstersteuerung
- ⑪ Temperatur Raummitte Oben → Höhe 3 Meter
- ⑫ Temperatur Raummitte Mitte → Höhe 2 Meter
- ⑬ Temperatur Raummitte Unten → Höhe 1 Meter
- ⑭ Temperatur vor Wand zum Flur → Höhe 0,8 Meter

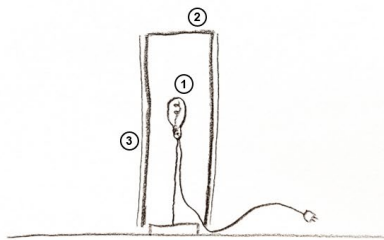
### Aufbau der Messung

Bilder des Messaufbaus



### Interne Lasten

Wärmeabgabe der Schüler



- ① 40 W Glühbirne
- ② Metallrohr mit Deckel (d=200mm, h=1000mm)
- ③ Braunes Paketpapier

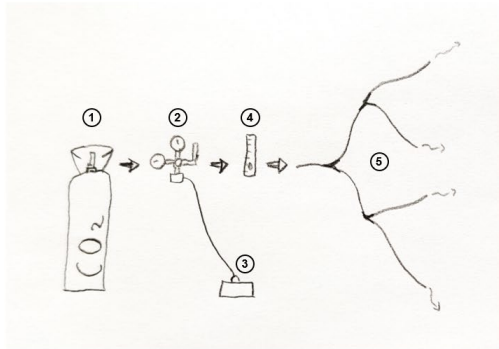
Die Wärmeabgabe bei statischer Tätigkeit im Sitzen ist für einen Erwachsenen 75 W. Für die Schulkinder wird hier 40 W angenommen, was durch die Glühbirne dargestellt werden soll. Die Oberfläche des Metallrohres ist gleich der eines Kindes über welche die Wärme in den Raum abgegeben wird. Bei 20 Kinder und einem Erwachsenen sind das in Summe 875 W Wärmeeintrag.

Dieser Wärmeeintrag wird über eine Zeitschaltuhr mit den folgenden Unterrichtsstunden gesteuert: 8:00-8:30, 8:35-9:20, 9:40-10:25, 10:30-11:15, 11:35-12:00 und 16:00-17:00



## Interne Lasten

### CO<sub>2</sub> Eintrag



- ① Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) Flasche 10 kg
- ② Druckminderer mit Magnetventil
- ③ Zeitschaltuhr
- ④ Volumenstrommesser
- ⑤ 4mm Schlauch zur Verteilung im Raum

Es wird bei dem CO<sub>2</sub> Eintrag davon ausgegangen, dass ein Erwachsener Lehrer 20 l CO<sub>2</sub> pro Stunde ausatmet und die 20 Schüler etwa die Hälfte, also 10 l/h. Somit ist der Gesamteintrag pro Schulstunde 220 l/h oder 3,66 l/min.

Dieser Volumenstrom wurde über den Volumenstrommesser an der Gasflasche eingestellt und wird über die Zeitschaltuhr und das Magnetventil immer zu den Unterrichtszeiten von 8:00-12:00 Uhr und 16:00-17:00 Uhr eingebracht. Ausgenommen sind die Pausen zwischen den Unterrichtsstunden.

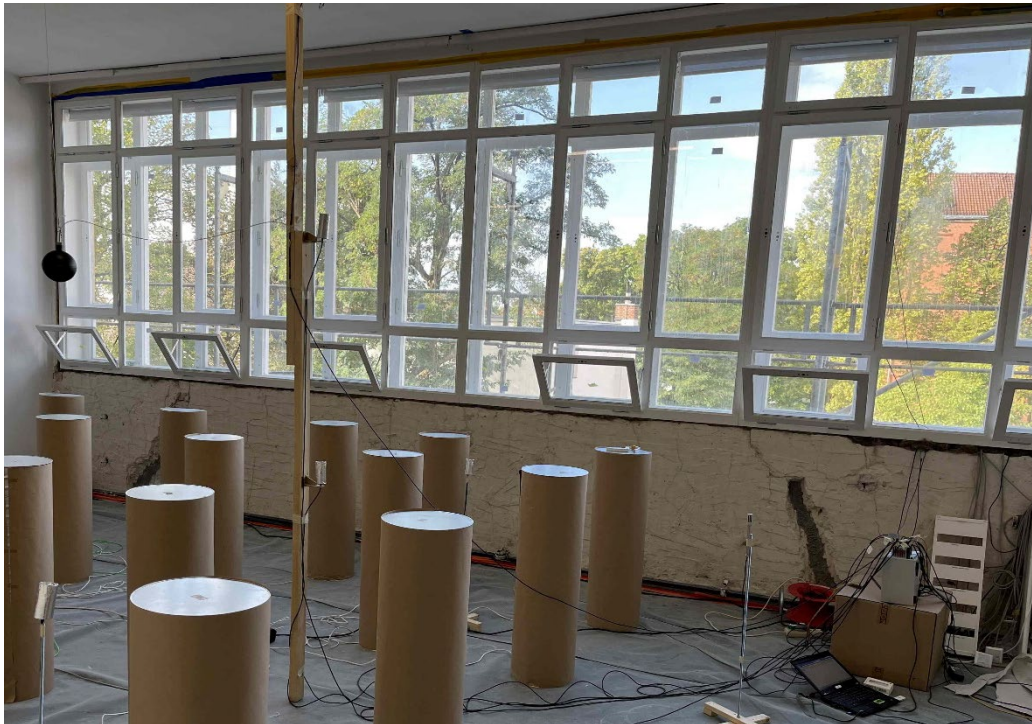


Gasflasche und grüne Verteilerschläuche

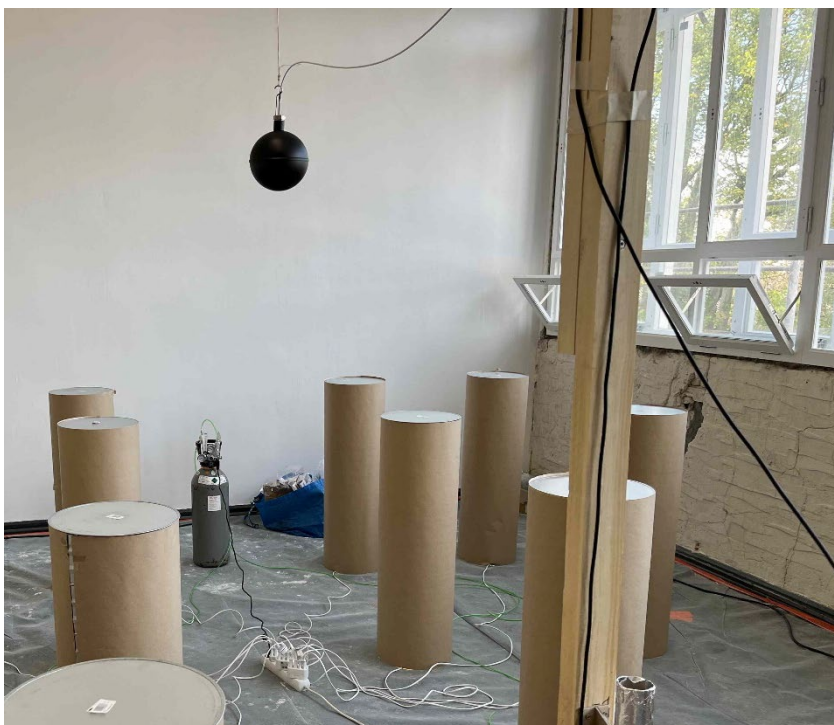


Druckminderer und Volumenstrommesser

Meßfassung



Meßfassung – kleine grau Box an rechten Rand mit Meßrechner – «Schüler» als lokale Wärmequelle



CO2 Eintrag über CO2 Flasche mit Ventilsteuerung entsprechend dem Belegungsplan

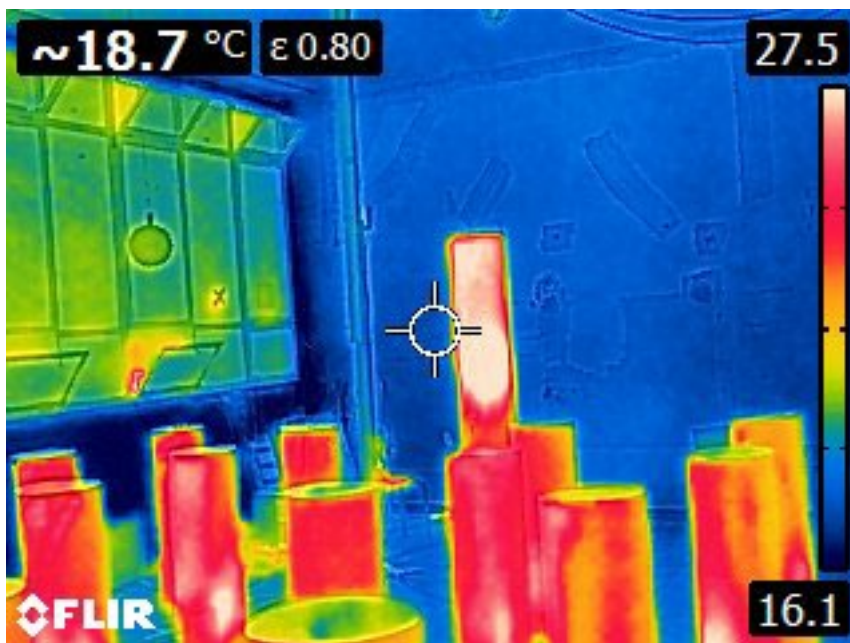


**Meßergebnisse**

IR Aufnahmen Sommermessung Ende September, Aussentemperaturen bis 20°C und sonnig



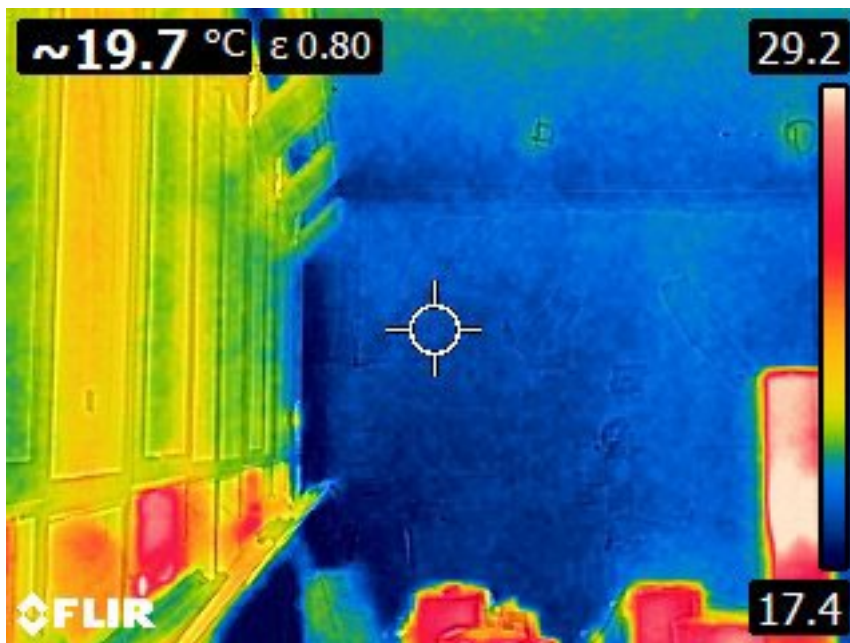
Klassenzimmer mit «Schülern» und «Lehrer» mit Sommerlüftung – Klappen innen unten offen



45 Watt Wärmequellen der «Schüler» und 75 Watt Wärmequelle des «Lehrers» führen zu hohen Oberflächentemperaturen im Bereich Hauttemperatur

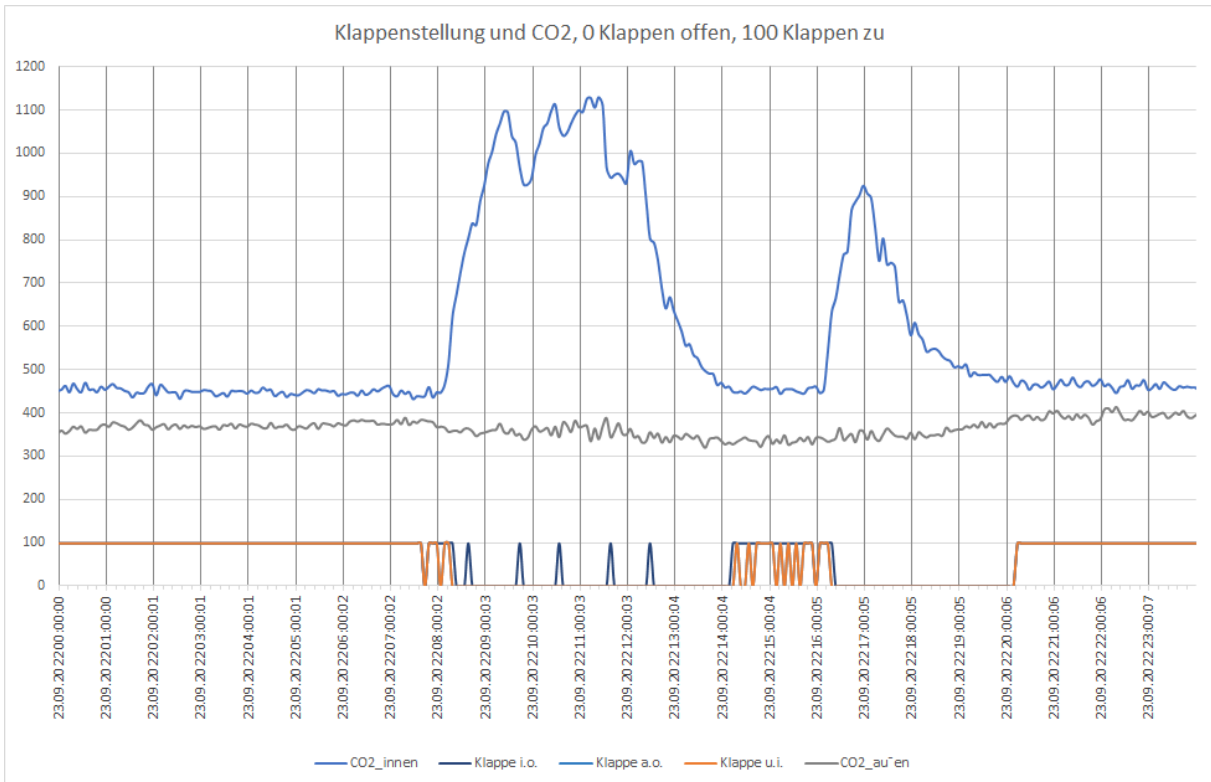


Fassade mit geschlossenem Sonnenschutz

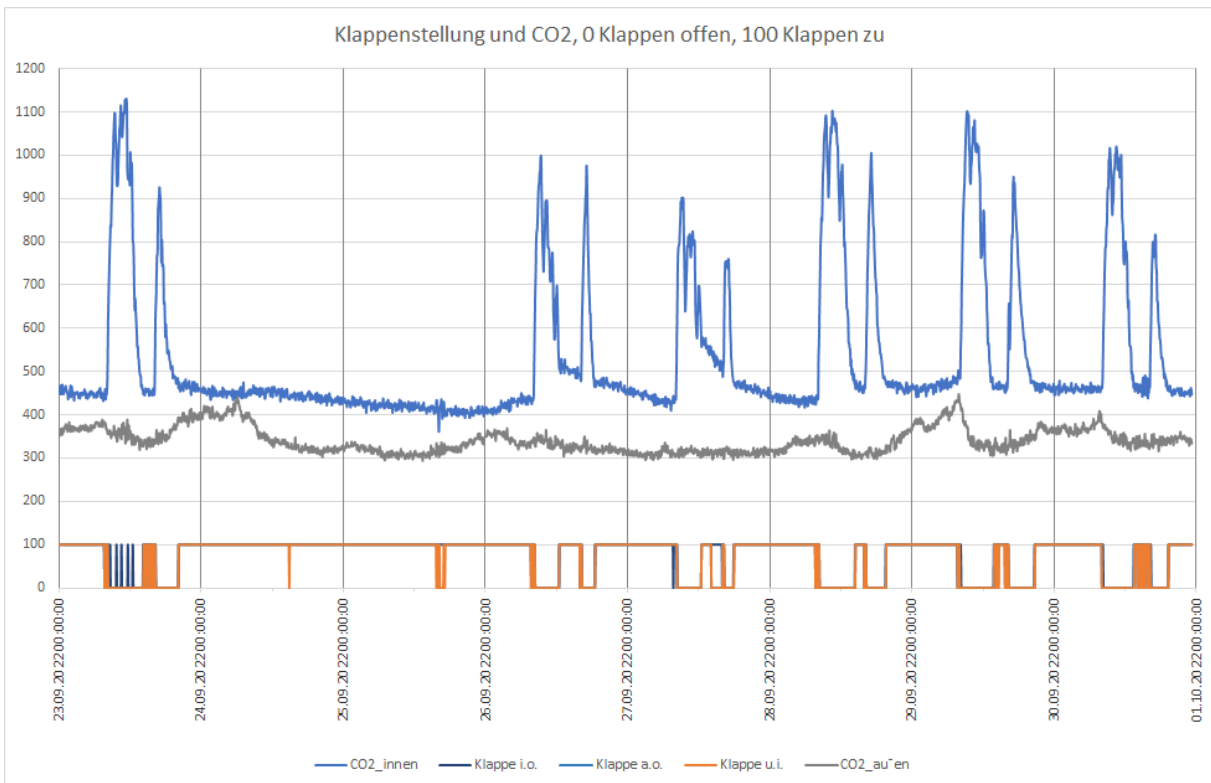


Erhöhte Temperaturen im Kastenfenster, allerdings geringer Effekt auf Raumtemperaturen, wenig Wärmeeintrag an den oberen Klappen

Typischer Schultag mit Unterricht von 8 bis 12 Uhr – mit Pausen mit automatischer Stoßlüftung über die motorischen Fassadenklappen

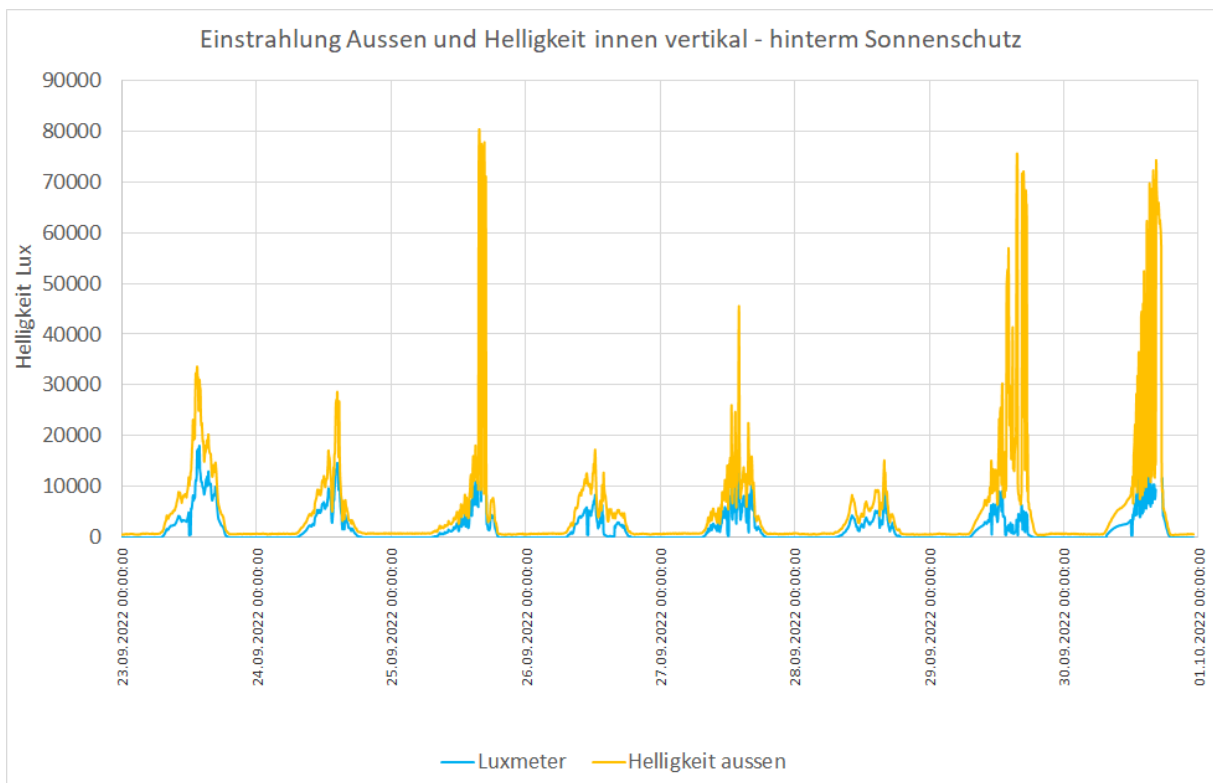
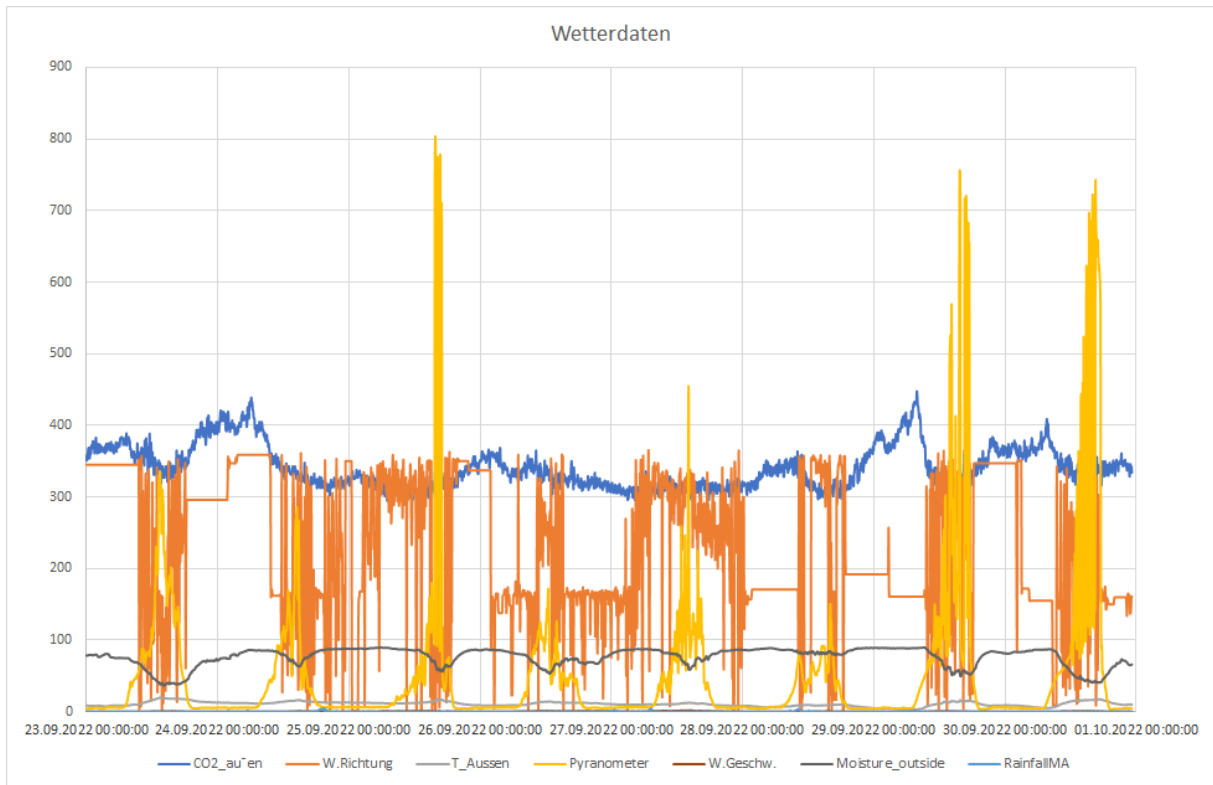


Fokus 23.9.Klappensteuerung und CO2 Level



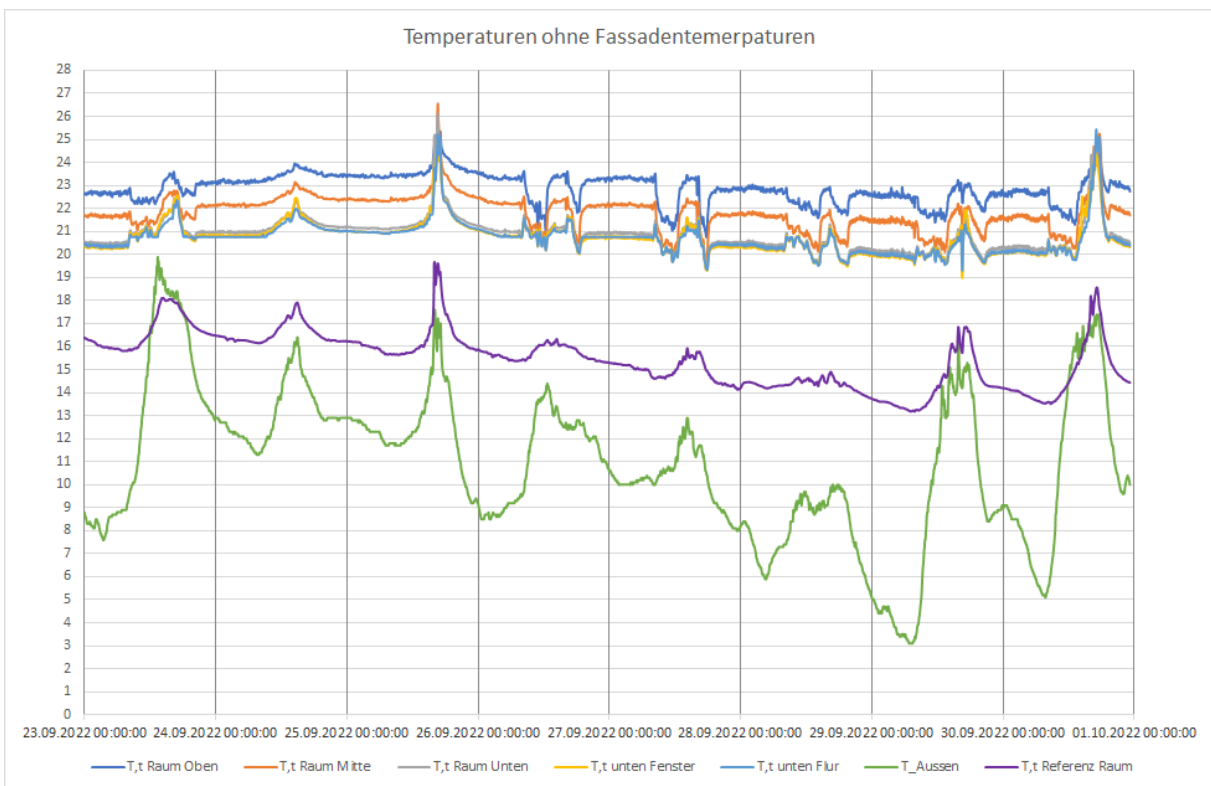
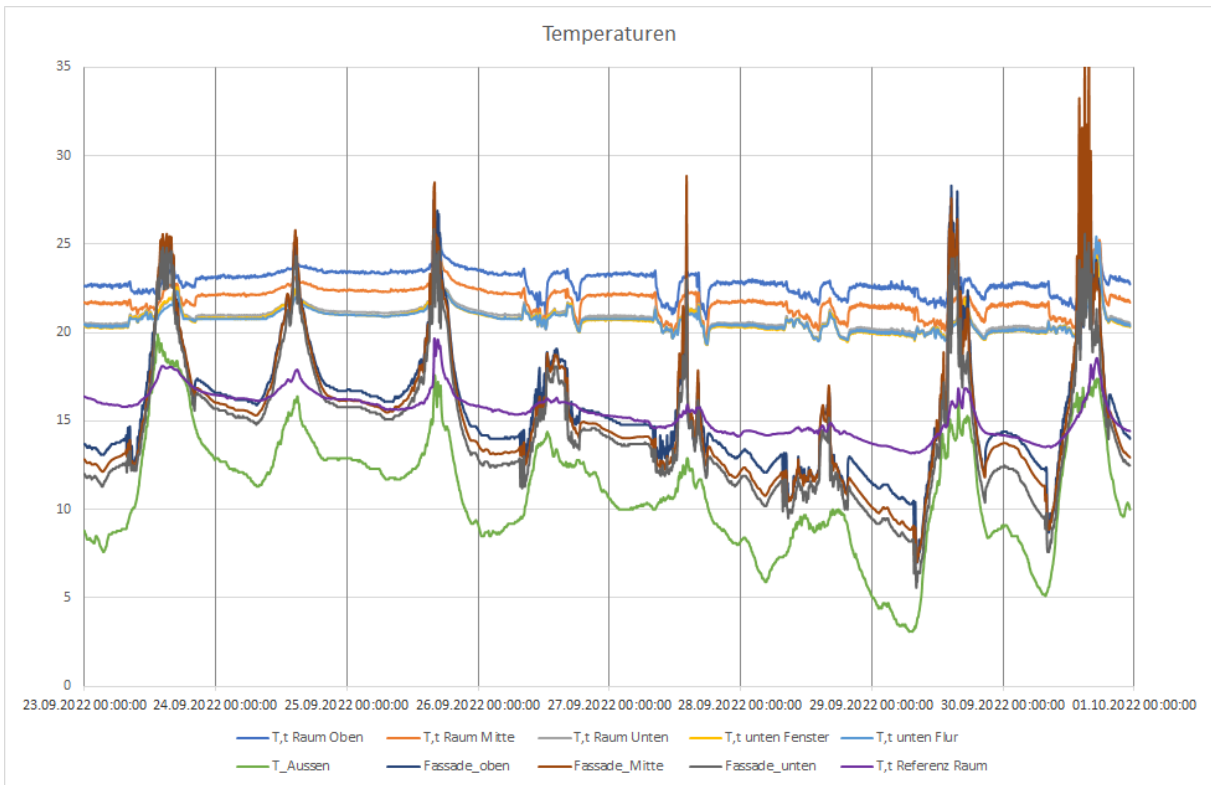
Schulwoche mit Wochenende am 24. und 25.9. ohne Unterricht, d.h. ohne CO2 Eintrag

Wetterdaten insbesondere solare Einstrahlung in der Westfassadenebene



Helligkeitsmessung zur Funktionsdokumentation Sonnenschutz

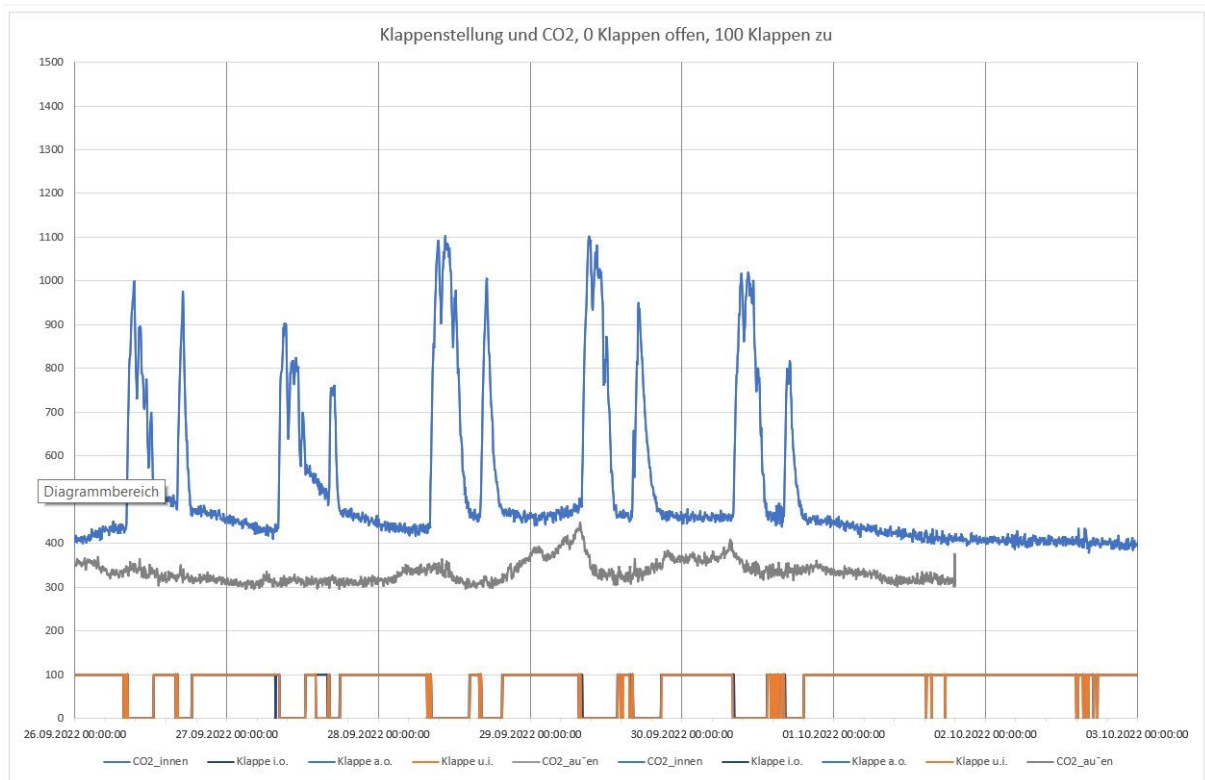
Temperaturen in der Spätsommerwoche – Fokus Fassade und Raum



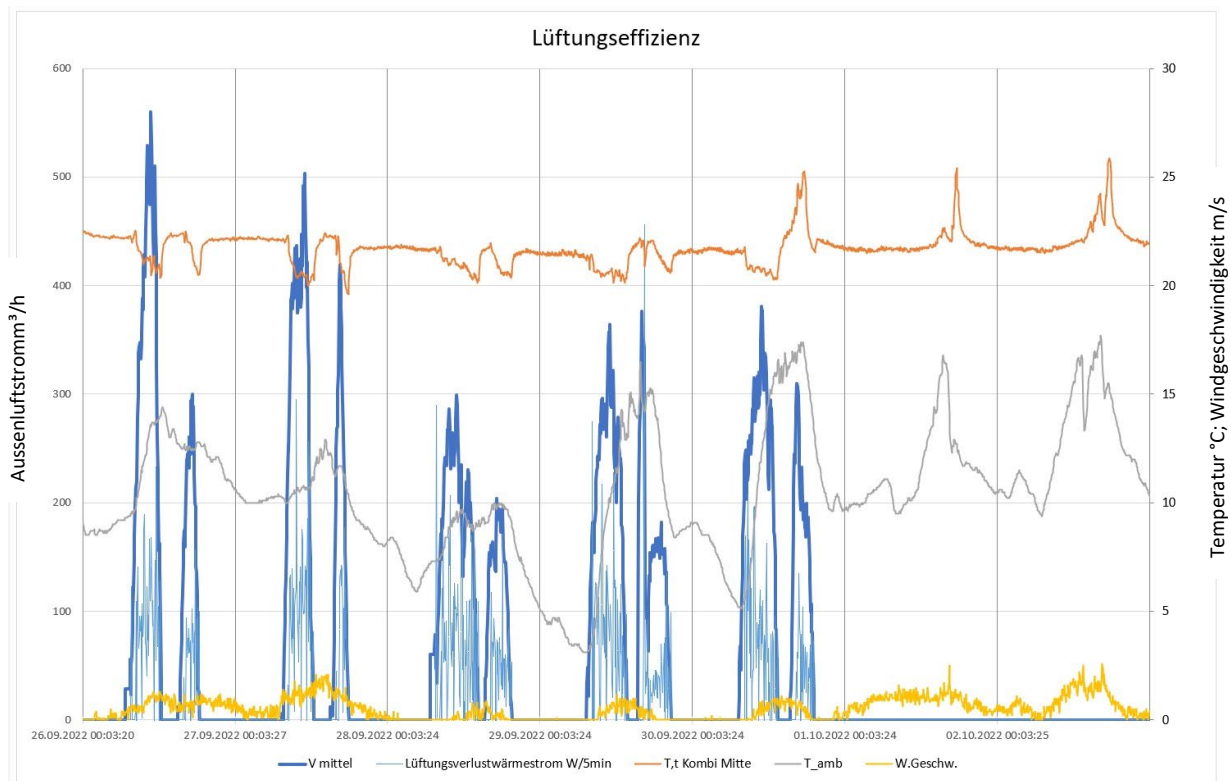
Temperaturverlauf letzte Septemberwoche – Fokus Raumtemperaturen

### Auswertung der Lüftungseffizienz

Sommermessung, Klappen aussen unten und oben aktiv – Durchlüftung Kastenfenster und Klappen innen oben aktiv

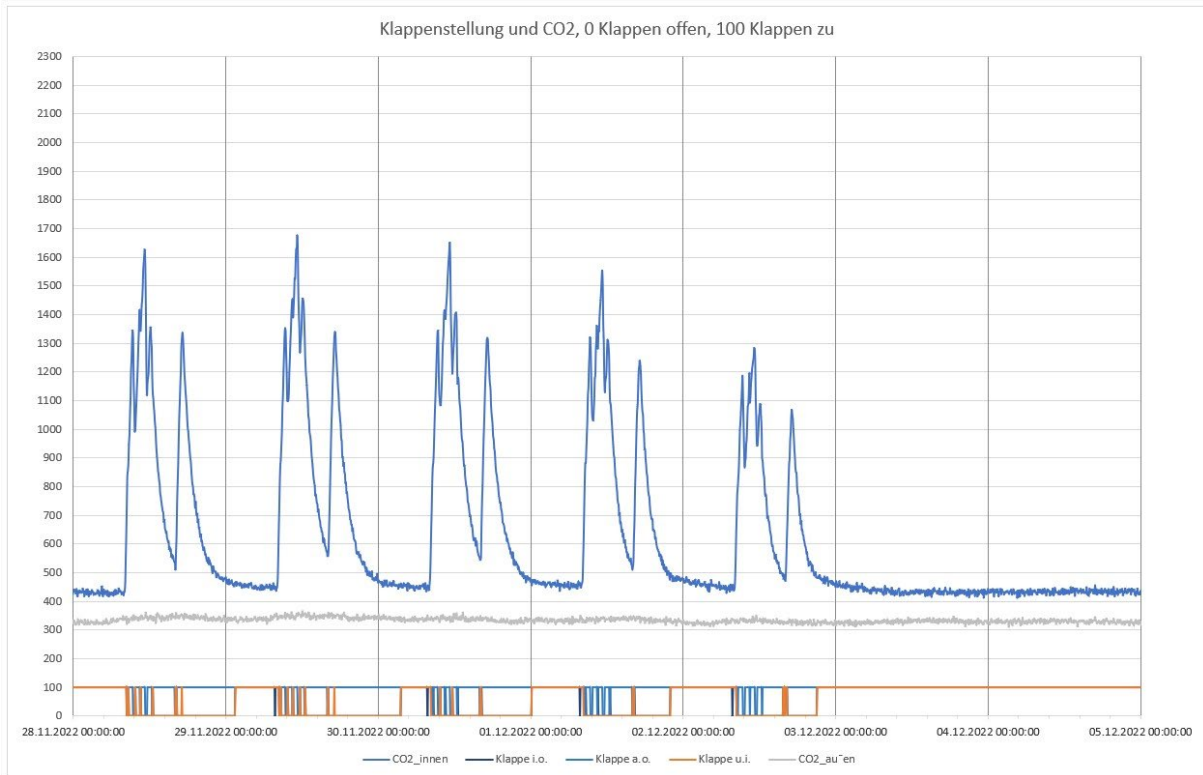


### CO2 Level innen und aussen, sowie Klappenstellung

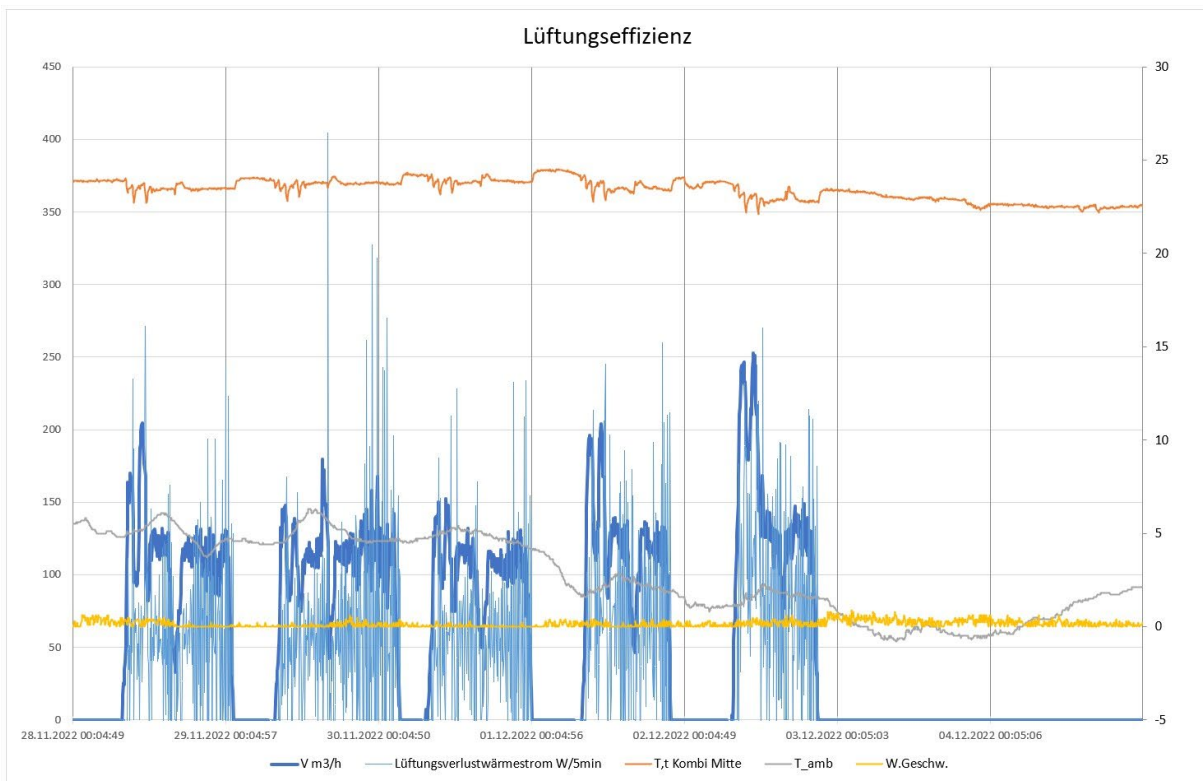


### Auswertung des Aussenluftstroms aus der CO2 Bilanz

Wintermessungen – Klappen aussen oben geschlossen durch Winterbedingung mittlere Aussentemperatur über 24h unter 12°C – reduzierter Luftwechsel auch durch geschlossenen Sonnenschutz

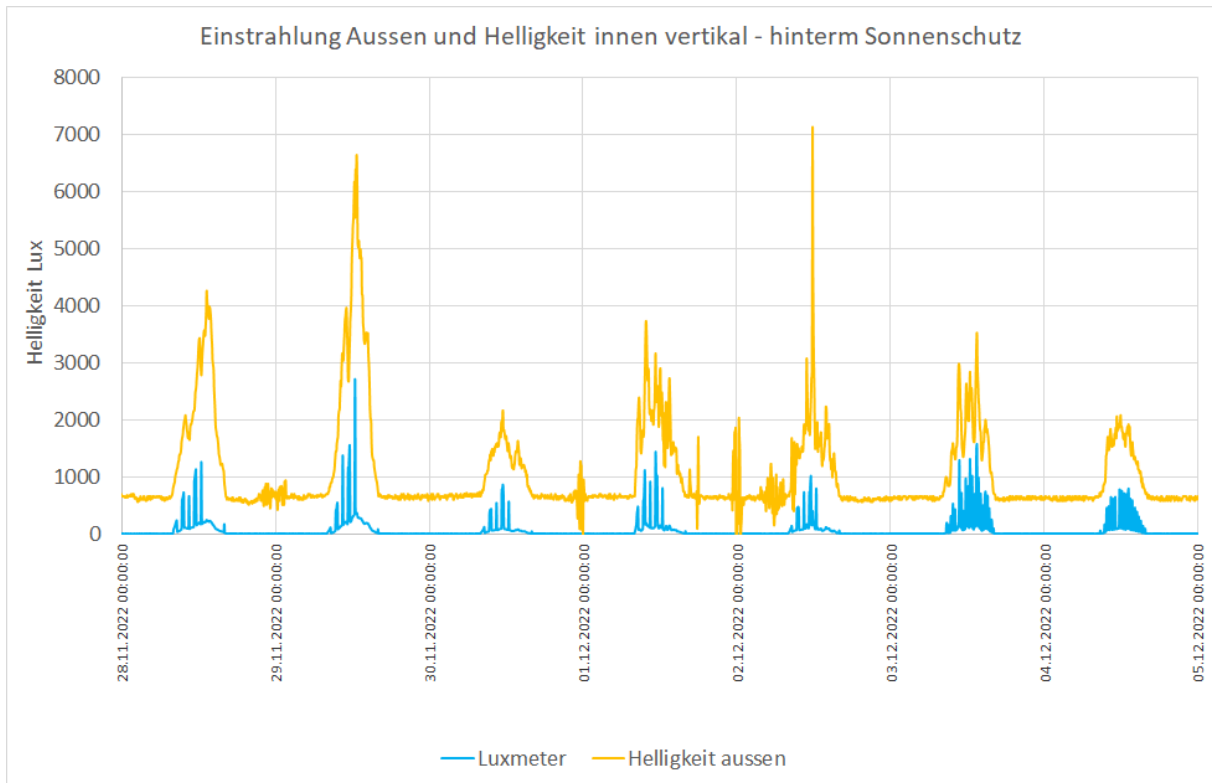


Erhöhte CO2 Konzentrationen belegen die reduzierte Lüftung, dennoch liegen die maximalen Werte nur kurzfristig bei 1600 ppm und typischerweise bei 1200 bis 1400 ppm

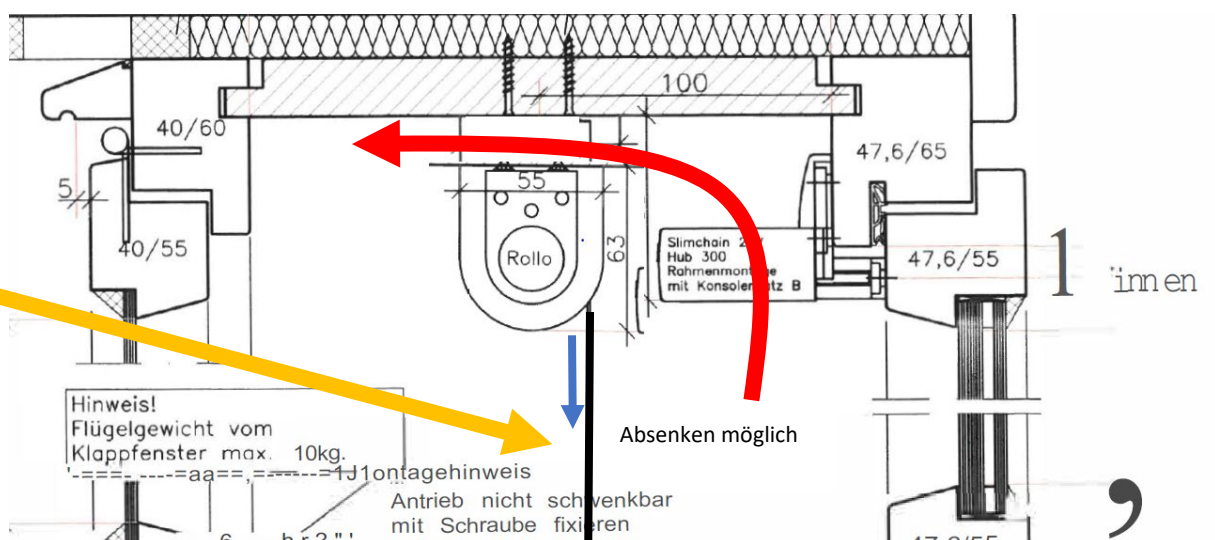


Frischlufmengen von 150 bis 200 m<sup>3</sup>/h

Zusätzliche Problematik ergibt sich durch den in der hier ausgewerteten Woche zeitlich fast durchgehend geschlossenen Sonnenschutz – Fehler in der Steuerung - und dem kleinen Abstand zwischen Rollowelle und oberem Abschluß des Kastenfenster.



Sonnenschutz öffnet zur Stoßlüftung in den Pausen, schließt aber ungewollt im Betrieb auch ohne hohe Strahlungsintensitäten auf die Fassade.



Begrenzte Hinterlüftung des geschlossenen Sonnenschutzes

Prüfung wegen Blendschutz im Klassenraum ergab, dass für eine bessere Hinterlüftung im geschlossenen Zustand die Position des Rollos abgesenkt werden kann ohne dass es oberhalb der Rollowelle zu direktem Strahlungsdurchgang und damit Blendung im Raum kommt,



Sonnenschutzregelung wird überprüft um nur bei Blendungsgefahr oder zum Überhitzungsschutz den Rollo zu schliessen und somit eine reduzierte Lüftungswirkung zu bedingen.

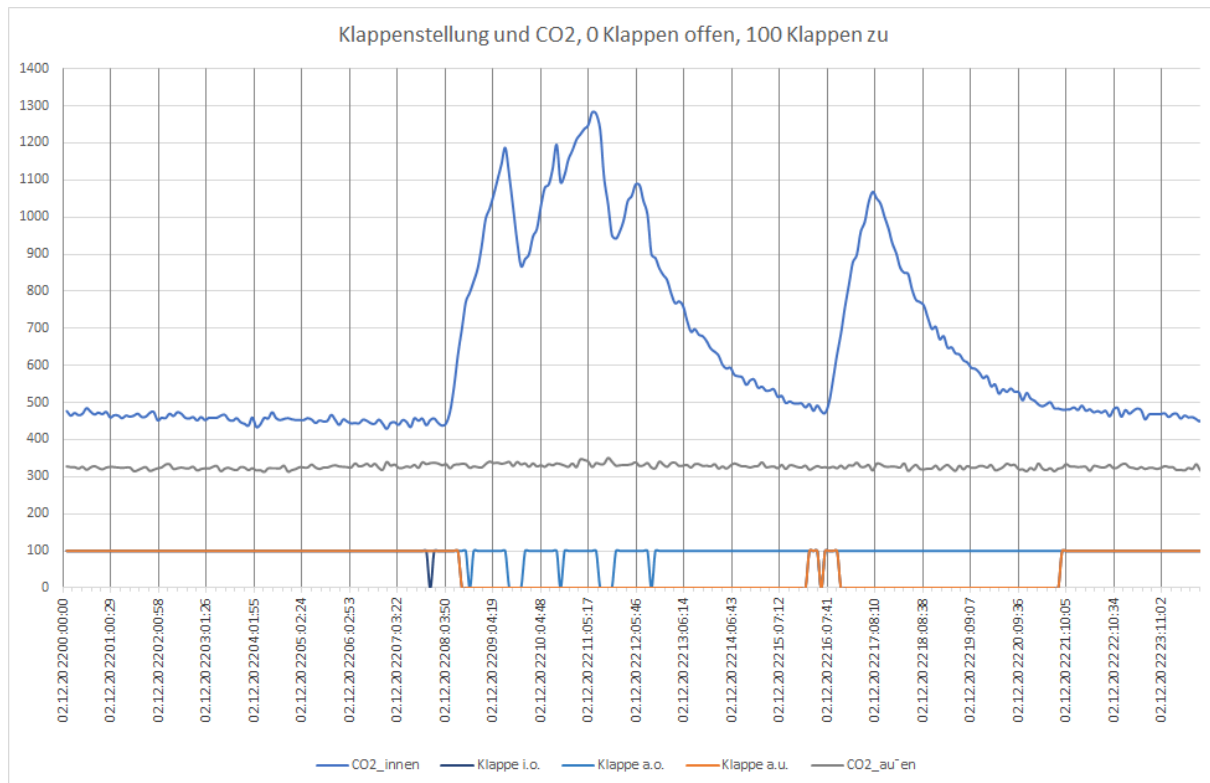
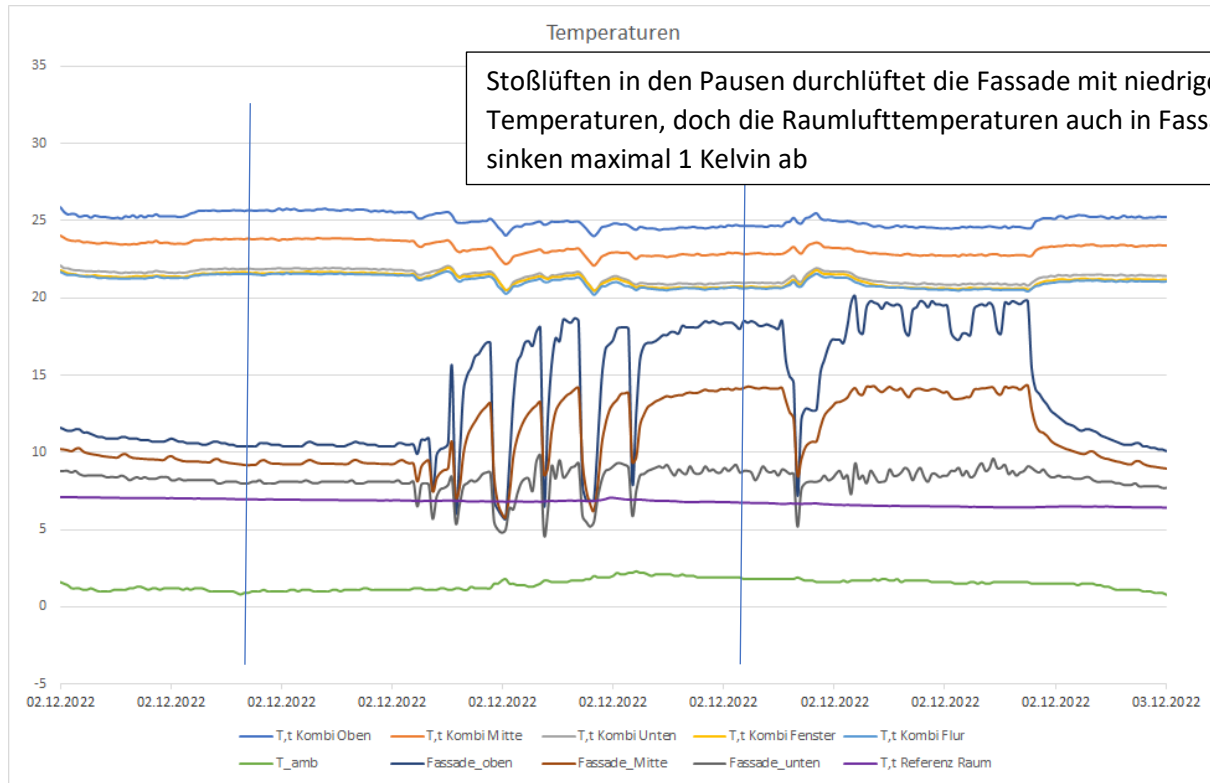


Um diese Einschränkung der Hinterlüftung des Kastenfensters bei geschlossenem Sonnenschutz zu reduzieren, wurde ein zusätzliches Distanzstück eingebaut das ohne ein Blendungsproblem zu erzeugen einen Lüftungsspalt von 10 cm oberhalb der Rollwelle erlaubt. Damit kann jetzt auch bei geschlossenem Sonnenschutz ein durchgehender Lüftungsspalt gesichert werden.



Die nun erzielbare Lüftungseffizienz konnte in den Wintermessungen verifiziert werden.

Wärmerückgewinnung im Kastenfenster – Celle

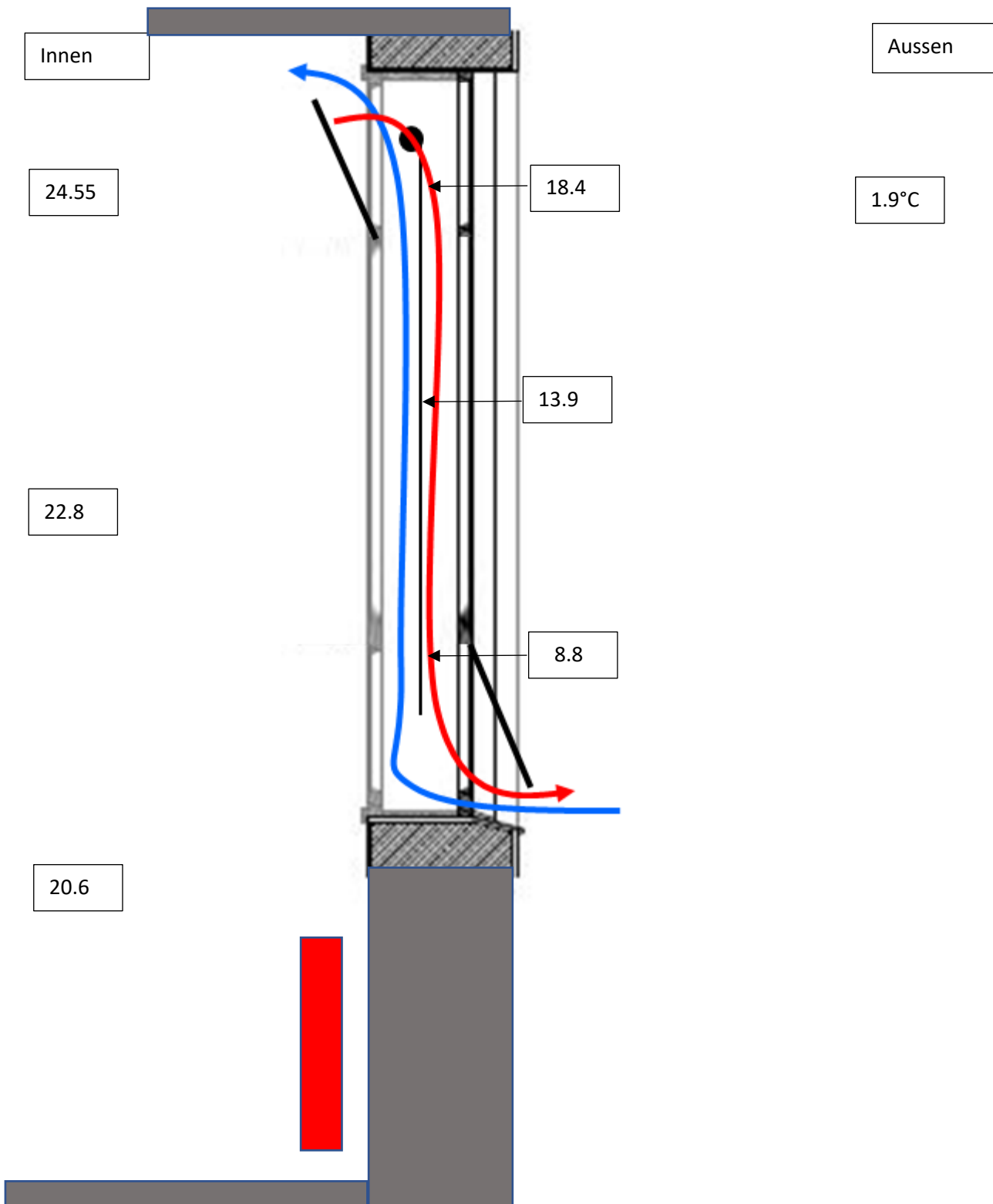


Stoßlüften in den Unterrichtspausen öffnet auch im Wintermodus die Klappen aussen oben und führt zu einer starken Durchlüftung des Kastenfensters und ein starkes Absinken der Temperaturen.

Temperaturaufnahme: Lüftungsstatus Winter Klappen oben Innen und Aussen unten geöffnet

14:05, 2.12.2022

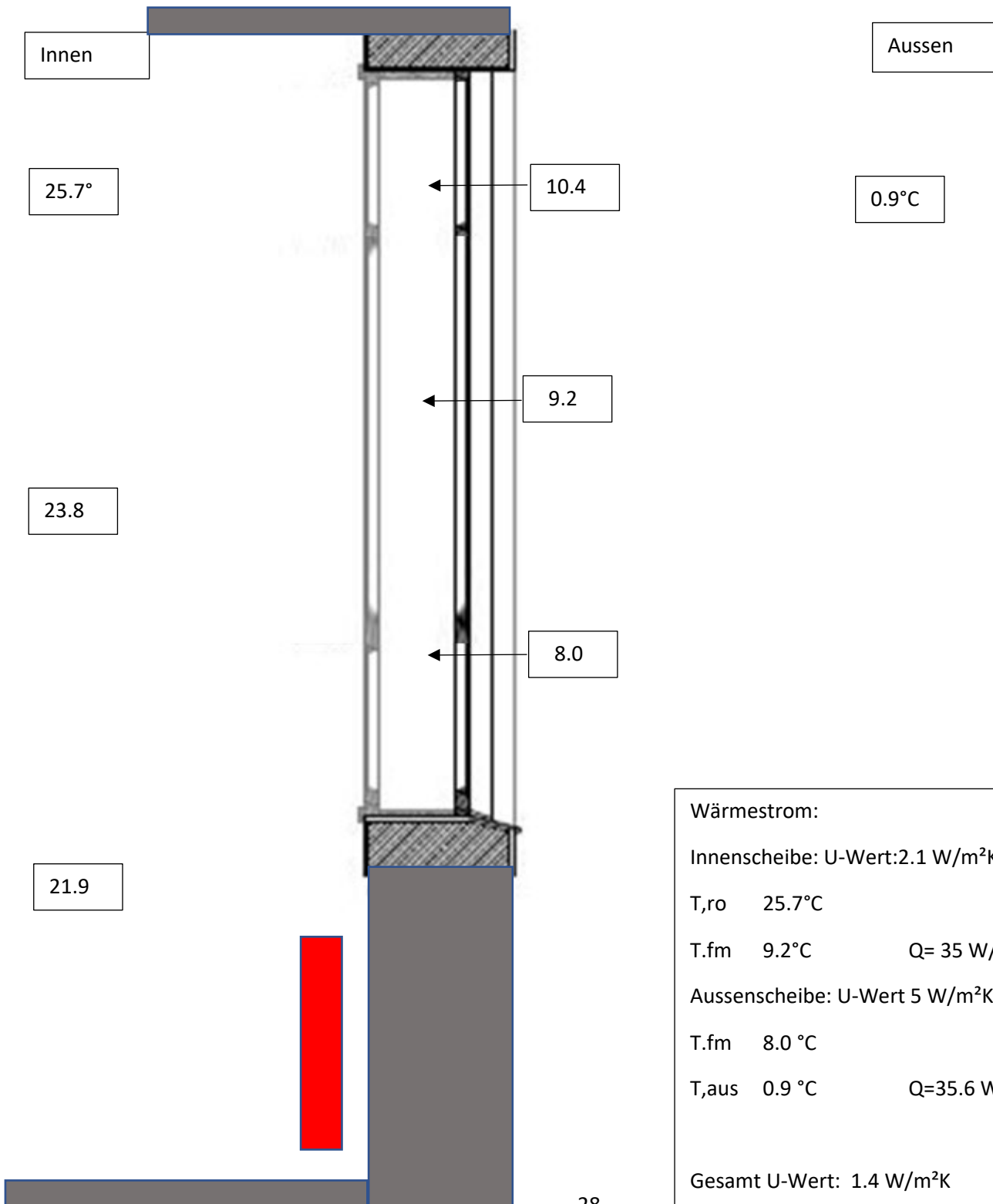
T, t Raum Ob	T, t Raum Mit	T, t Raum Unt	T, t unten Fen	T, t unten Flur	T_Aussen	Fassade_ob en	Fassade_Mi tte	Fassade_unt en
24.55	22.8	20.94	20.67	20.6	1.9	18.4	13.98	8.8



Temperaturaufnahme: Lüftungsstatus Winter nachts, alles geschlossen

4:05, 2.12.2022

T, t Raum Ob	T, t Raum Mit	T, t Raum Unt	T, t unten Fen	T, t unten Flur	T_Aussen	Fassade_ob en	Fassade_Mi tte	Fassade_unt en
25.69	23.86	21.91	21.66	21.55	0.9	10.4	9.18	8



Wärmestrom:  
 Innenscheibe: U-Wert: 2.1 W/m<sup>2</sup>K  
 T,ro 25.7°C  
 T.fm 9.2°C            Q= 35 W/m<sup>2</sup>  
 Aussenscheibe: U-Wert 5 W/m<sup>2</sup>K  
 T.fm 8.0 °C  
 T,aus 0.9 °C            Q=35.6 W/m<sup>2</sup>  
 Gesamt U-Wert: 1.4 W/m<sup>2</sup>K

### Testbetrieb mit erhöhtem CO2 Eintrag und Stoßlüften

Randbedingungen:

Raumtemperaturen war unter Solltemperaturen von 20°C wegen versehentlichem Abschalten der Stromversorgung und fehlendem Reset der Heizelemente. Neben den bisher installierten 3.2 kW wurden noch zusätzliche 2 kW Heizleistung installiert.

Gesamtes Gebäude war stark ausgekühlt, siehe Referenzraum, teilweise unter Aussentemperatur.

Klassenbetrieb plus zusätzlichen 3 bis 5 Personen im Raum – 10 bis 12 Uhr- damit erhöhter CO2 Eintrag.

Klappen oben Aussen eigentlich im Winterbetrieb in der Grundlüftung blockiert, teilweise manuell aktiviert für erhöhte Lüftungseffizienz

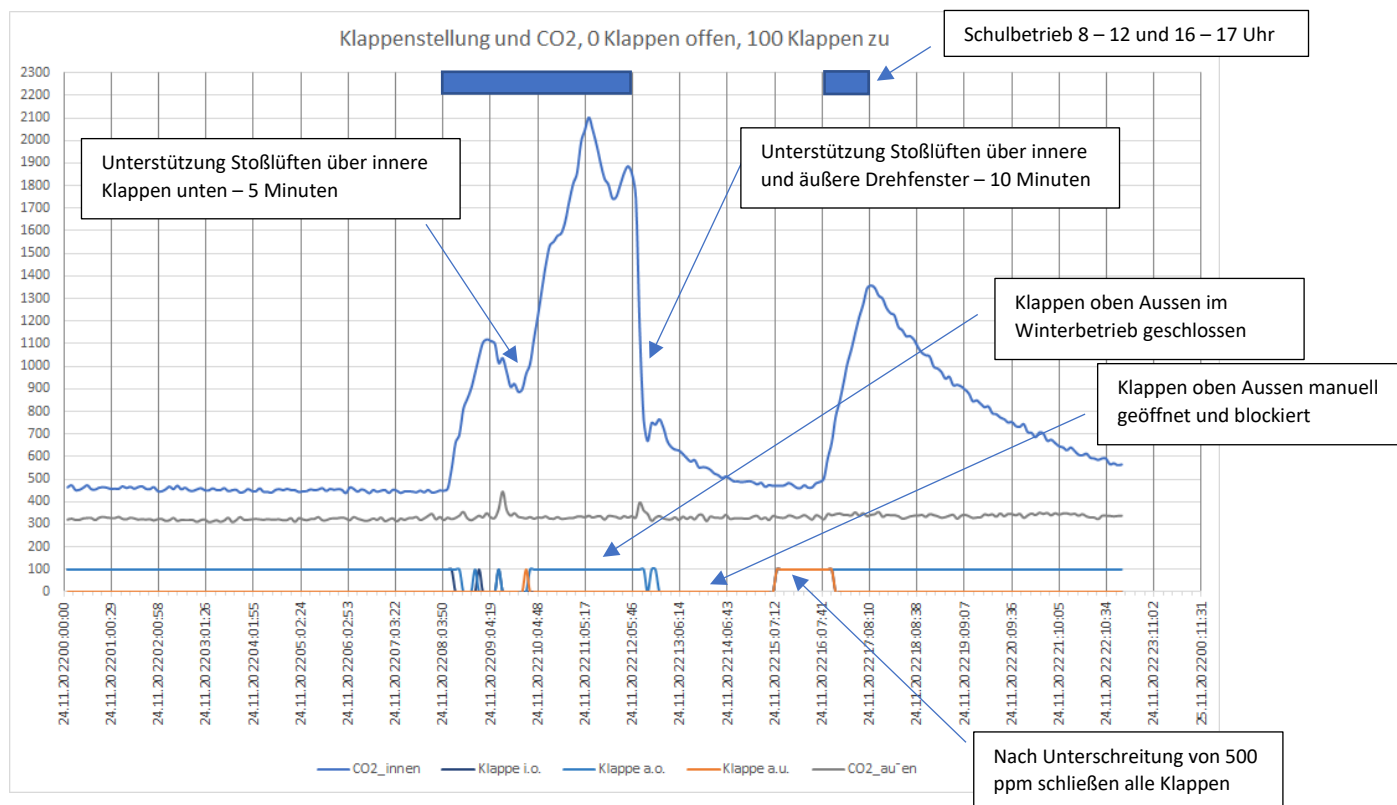
Stoßlüftung am Vormittag 9:10 bis 9:15 durch manuelles Öffnen der inneren unteren Klappen

Stoßlüftung am Mittag 12:10 bis 12:20 durch manuelles Öffnen der inneren und äußeren Drehfenster

Die Meßdaten in den beiden folgenden Diagramm zeigen mit dem erhöhten CO2 Eintrag ein Überschreiten des Mak-Wertes von 1500 ppm, der allerdings durch manuelle Stoßlüftung über die inneren unteren Klappen oder ein Öffnen der inneren und äußeren Drehflügel in 5 bzw 10 Minuten zu einem deutlichen Absinken der erhöhten CO2 Level führt.

Dies belegt, dass mit den beiden manuellen Eingriffsmöglichkeiten zusätzliche Lüftungsoptionen zu Verfügung stehen, wenn die CO2 Ampel in den roten Bereich wechseln sollte.

Meßdaten



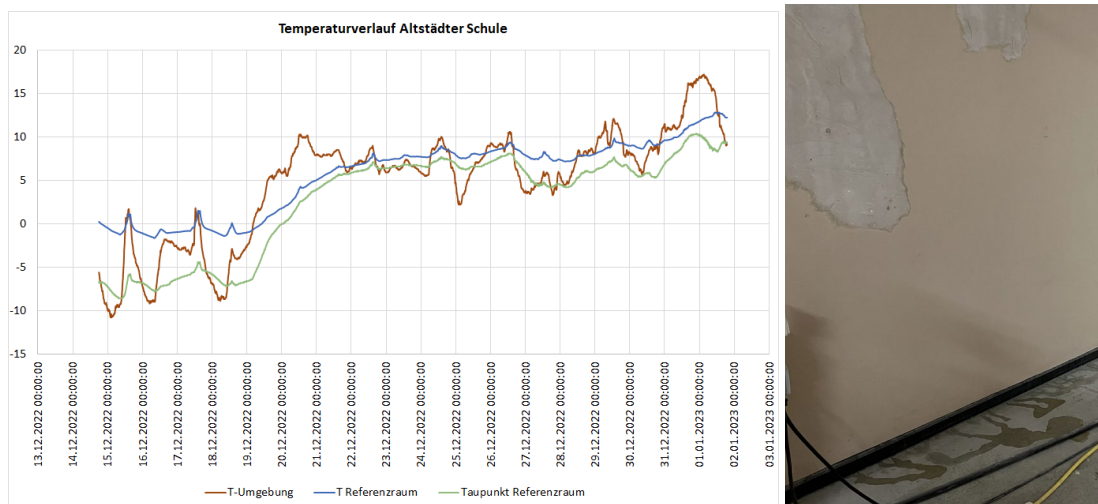
Einfluss von manuelle Stoßlüftung auf die CO2 Konzentration im Raum auch bei erhöhtem Eintrag

## Heizwärmebilanz

Während dem gesamten Testbetrieb von September 2022 bis Juni 2023 wurde der Stromverbrauch im Raum gemessen. Dieser schließt die «Heizwärme» der Personen und die Datenerfassung ein, die zur Ermittlung eines Heizwärmebedarfes abgezogen werden müssen.

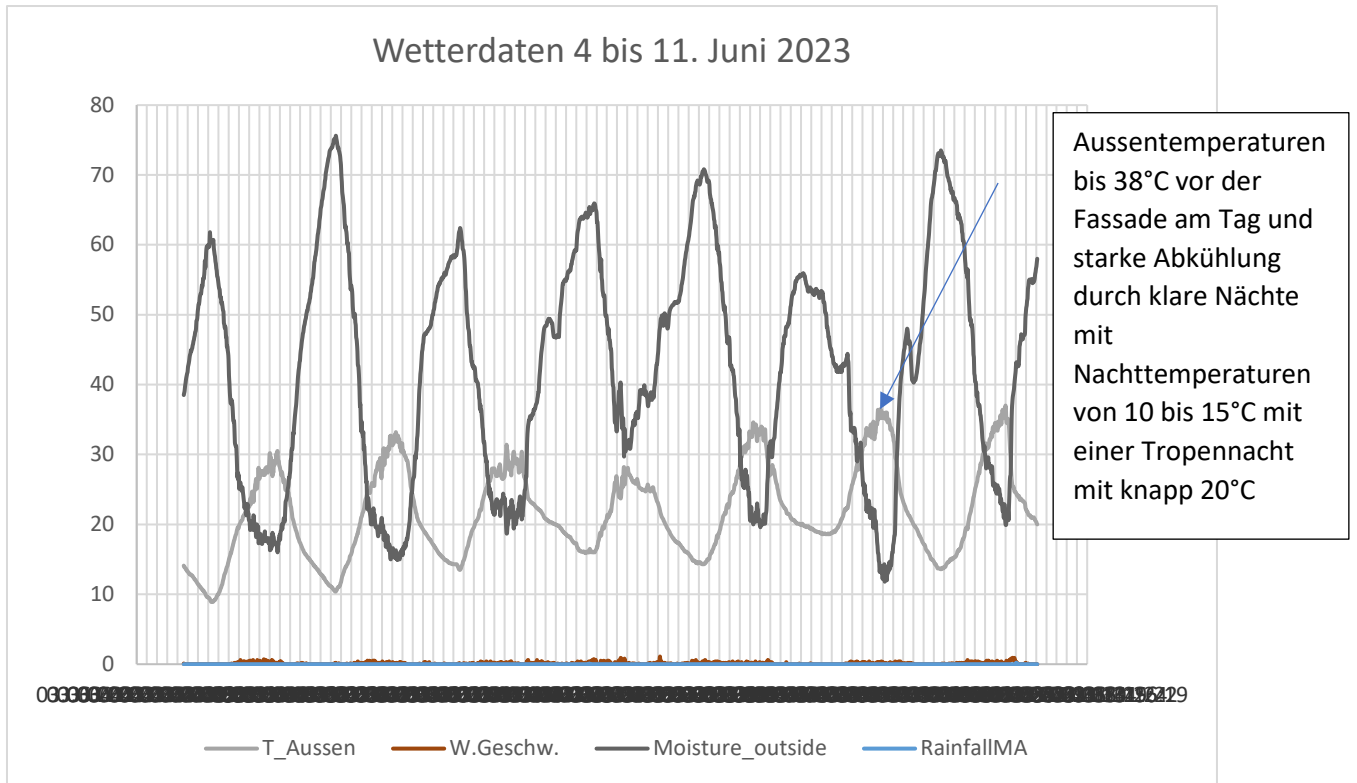
Strombedarf	5410 kWh
Personenwärme 20 x 45 Watt und 1 x 90 Watt, 5 h pro Tag, 5 Tage die Woche über 10 Monate	1072 kWh
Meßfassung 40 Watt aus Laptop und Datenkanalgerät	290 kWh
Befeuchtung	
Heizwärmebedarf	4048 kWh
Bezugsfläche Klassenzimmer	35 m <sup>2</sup>
Spezifischer Wärmeverbrauch	115 kWh/m <sup>2</sup>

Dieser sehr hohe Wert ist den ungedämmten Wänden gegenüber den beiden nachbarräumen und der Flurbereich der Schule geschuldet, die ohne eine richtige Fassade und nur mit Holzverschalung in den Fassadenöffnungen im Winter teilweise auf knapp Gefrierpunkt absanken, siehe Diagramm unten. Bei schnellen Veränderungen der Aussentemperatur wie im Dezember 2022 - 18. – 22.12. – führte dies im Innenbereich der Schule zu starkem Kondensatausfall, da die thermische Masse noch auf sehr niedrigen Temperaturen lag und ein geschlossener Anstrich der Backsteinwände eine Feuchtaufnahme der Wandflächen verhinderte.

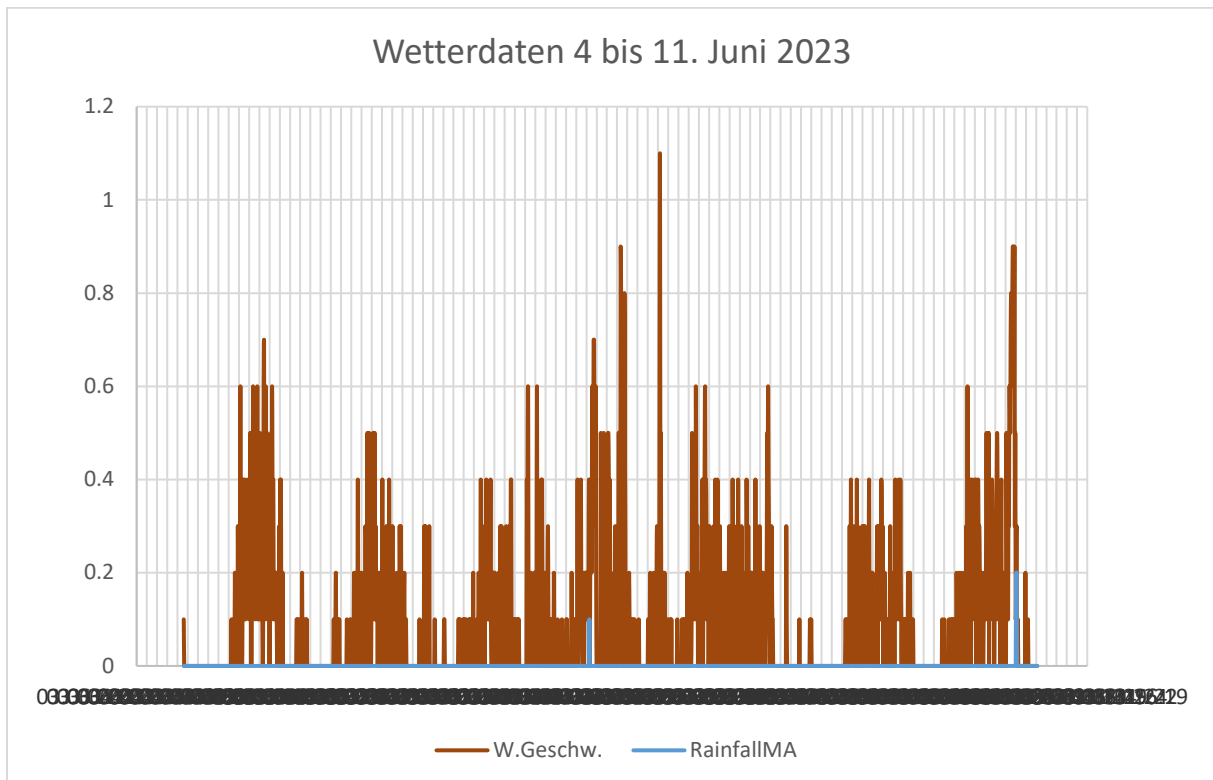


Unter Berücksichtigung diese zusätzlichen Wärmeverluste über die 3 Seitenwände und den Boden gegen unbeheizte Räume ohne richtige Fassade, sowie das Dach vor seine wärmetechnischen Sanierung liegt der gemessene Wärmebedarf sogar erstaunlich niedrig, ist aber leider nicht exakt zu bewerten.





Heiße strahlungsreiche Sommerwoche – Aussentemperatur und Aussenfeuchte



Heiße strahlungsreiche und windwarme Sommerwoche – Windgeschwindigkeit und Niederschlag



**Raumtemperaturen in der heißen Sommerwoche – Vergleich zum Referenzraum**

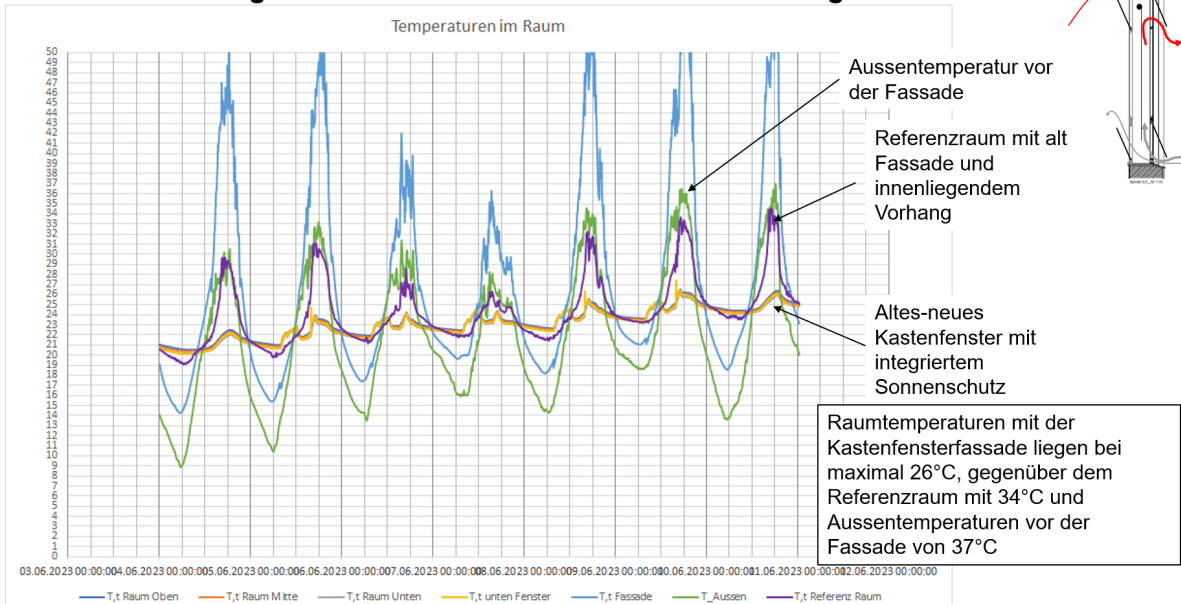


Kastenfenster offen und zu

Referenzraum mit alter Fassade

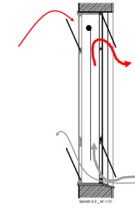
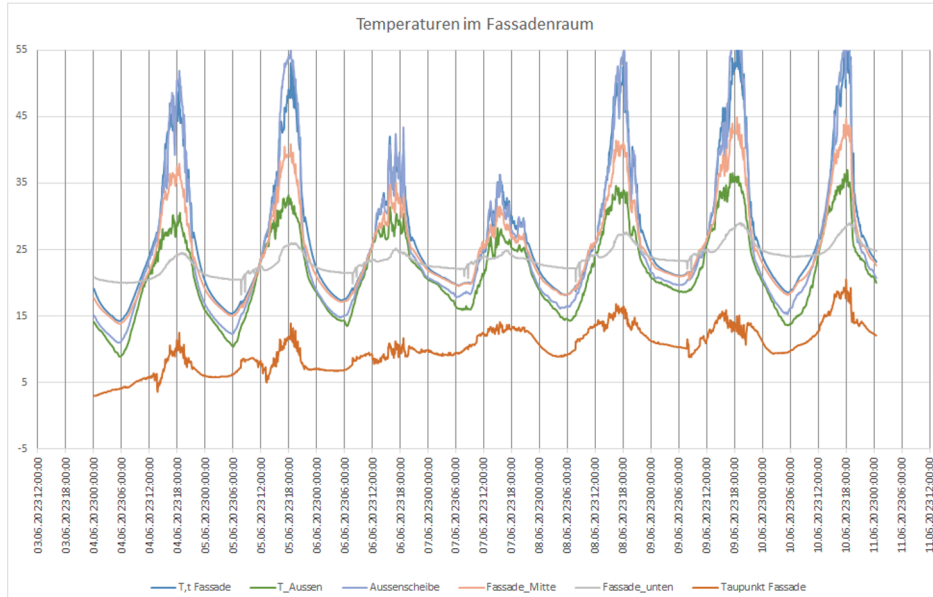
Im Lüftungsbetrieb Sommer sind alle Klappen geöffnet, um einerseits eine optimale Durchlüftung des Kastenfenster sicherzustellen und andererseits die Zuluft über die untere manuelle Klappe im Bypass zu Kastenfenster und ohne dessen Wärmelasten in den Klassenraum zu bekommen.

**Sommermessung – heiße windarme Woche mit 5 Sonnentagen**



Raumtemperaturen in Testraum und im Referenzraum mit 6 bis 8 K Differenz!

**Sommermessung – heiße windarme Woche mit 5 Sonnentagen**



Starke Temperaturschichtung im Kastenfenster mit bis zu 20 Kelvin Übertemperatur oben.

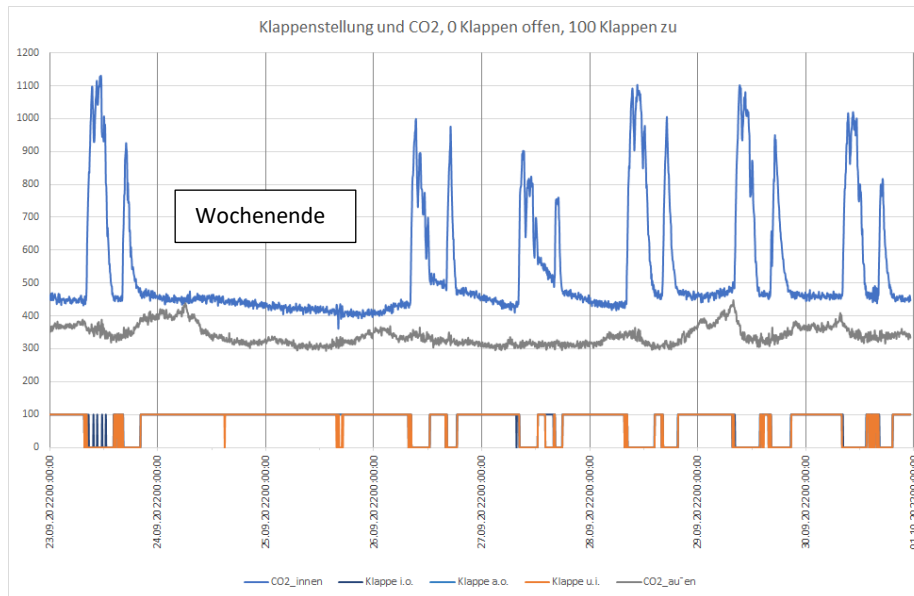
Temperatur unten in der Fassade nahe der Aussentemperatur

Zuluft eintritt unten mit manuelle Innenklappen Unabhängig von den hohen Temperaturen oben im Kastenfenster.

Erhöhte Fassadentemperaturen durch begrenzte Durchlüftung mit den 6 Klappen unten und oben

## Vereinfachte Lüftungssteuerung mit mechanischem Lüftungsklappenantrieb

Nachdem die Funktion der kontrollierten natürlichen Lüftung für die Sommer- als auch für die Winterlüftung nachgewiesen werden konnte mit maximalen 1500 ppm CO<sub>2</sub>, wie nach DIN 1946-2 als Grenzwert für gute Luftqualität gefordert, wurde das aufwendige Konzept mit den hochwertigen Kettenmotoren hinterfragt.



Konzentration über 8 Tage mit Wochenende

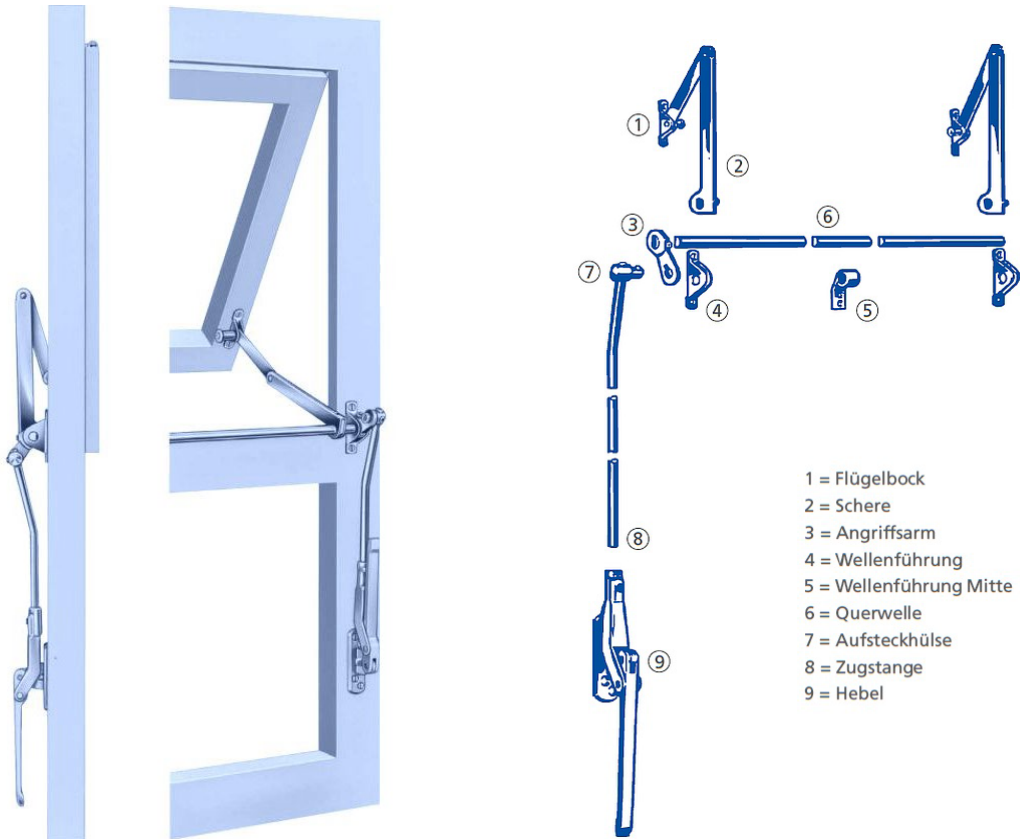
Die Messungen hatten gezeigt, dass Zwischenpositionen der Lüftungsklappen nicht notwendig sind und der Witterungsschutz des Fassadenraumes auch bei offenen Klappen gewährleistet ist, womit eine Ansteuerung über einen Regenwächter obsolet macht.

Damit sind die hochwertigen Kettenmotoren der Firma GEZE, die pro Motor einen KNX Bus Aktor benötigen, in ihrer Funktion unterfordert und es stellt sich die Frage ob die im Testraum ausgeführte komplexe technische Lösung dem historisch manuellen Lüftungsprinzip gerecht wird.



Kettenmotoren und komplexes Steuerungssystem

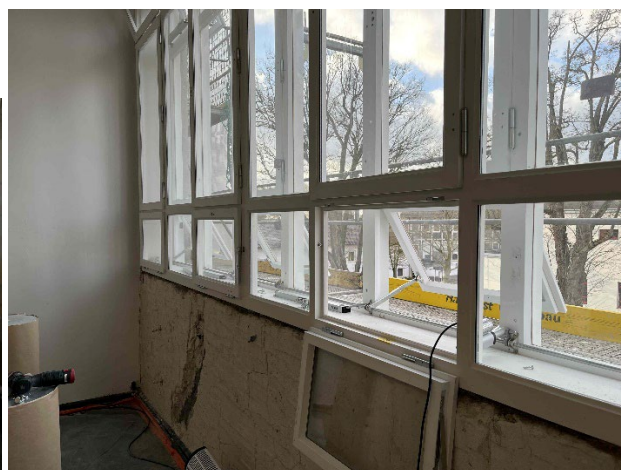
Deshalb wurde zusammen mit den Architekten eine einfach mechanische Ansteuerung der Lüftungsklappen mit Scherenbeschlägen und Hebelantrieb untersucht, der für eine automatische Steuerung dann mit einem Linearmotor ausgerüstet werden sollte. Der Sextan Beschlag der Firma GSG bietet diese Möglichkeit und läßt auch zu alle 6 Klappen einer Lüftungsebene -also z.B. Innen oben – mit einer langen Querwelle anzutreiben. Dies wurde in einem Probeaufbau und dann auch vor Ort mit 3 Klappen nachgewiesen.



Motorisch betriebener mechanischer Lüftungsklappenantrieb



Linearmotor als Antrieb



3.5 m lange Querwelle als Antrieb für 3 Klappen

## Lüftungssteuerung

Einfaches CO<sub>2</sub> Steuerungsgerät mit visueller Lüftungsampel steuert die Lüftungsklappen an.

Ein manueller Eingriff auf die Lüftungsklappen mit Schlüsselschalter durch den Lehrer ist möglich. Der Schlüsselschalter hat 3 Stellungen, auf, auto und zu.

Im Winter bei Aussentemperaturen unter 5°C sind die oberen äusseren Lüftungsklappen blockiert. Eine Temperaturüberwachung des Kastenfensters stellt sicher, dass bei Überschreitung von 28°C die äusseren Klappen unten und oben zum Ablüften des Fassadenraumes geöffnet werden. Dafür werden 2 Thermostate je Klassenzimmer eingebunden.

Ein Anbindung an einen zentralen KNX Bus ist denkbar, zum Beispiel zum zentralen Schliessen aller Lüftungsklappen bei Sturm. Eine Anbindung an einen zentralen KNX Bus kann auch für die Sonnenschutzsteuerung genutzt werden, diese kann aber auch lokal mit einer Helligkeitssteuerung mit manueller Eingriffsmöglichkeit durch Schlüsselschalter erfolgen.



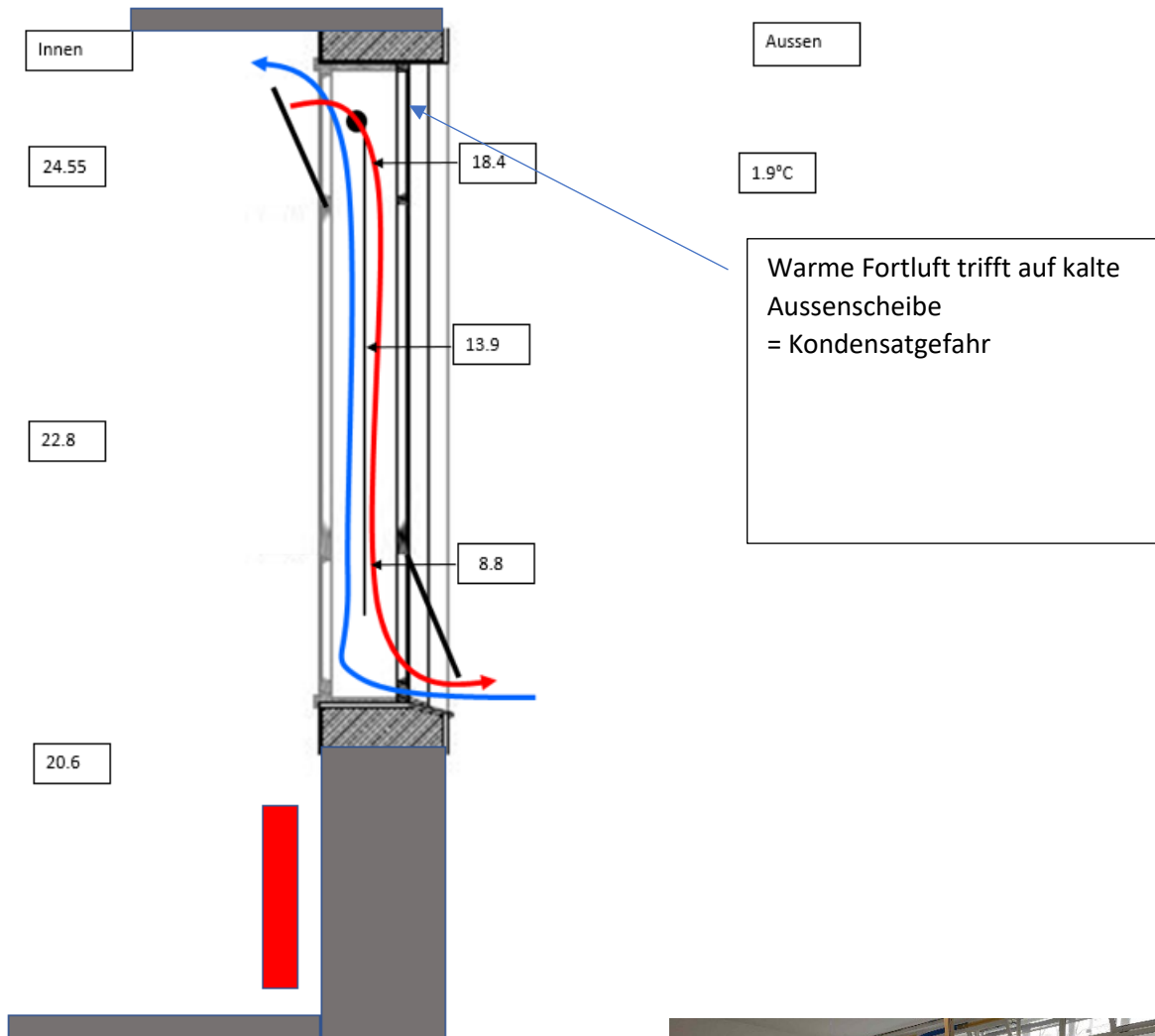
Öffnen bei > 800 ppm, Schliessen < 750 ppm



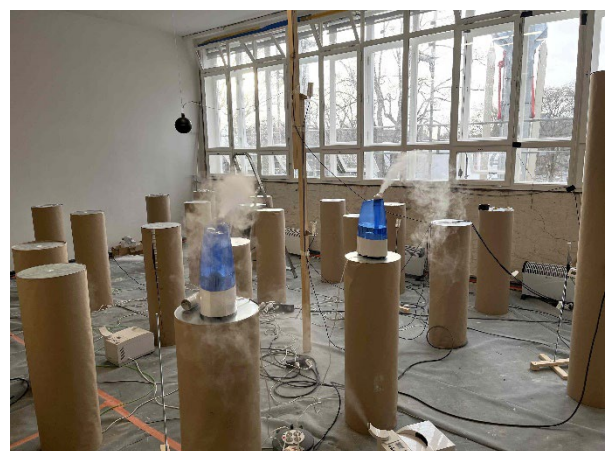
Schlüsselschalter für Lüftungs- und Sonnenschutzsteuerung

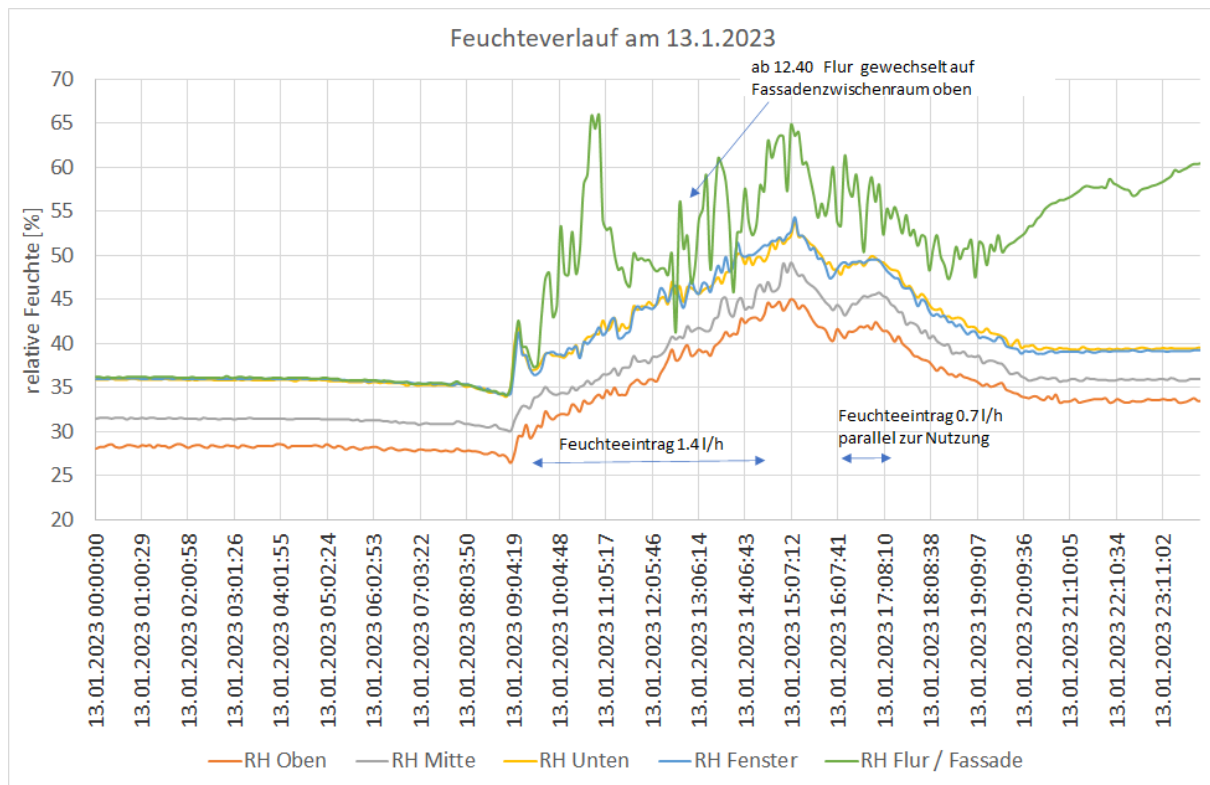
**Prüfung Kondensatanfall im Kastenfenster bei niedrigen Aussentemperaturen**

Durch die Fortluftführung mit geschlossener oberen Aussenklappe ins nach Aussen einfachverglaste Kastenfenster besteht im Winter die Gefahr einer Kondensatbildung an der Innenseite der Aussenscheibe.

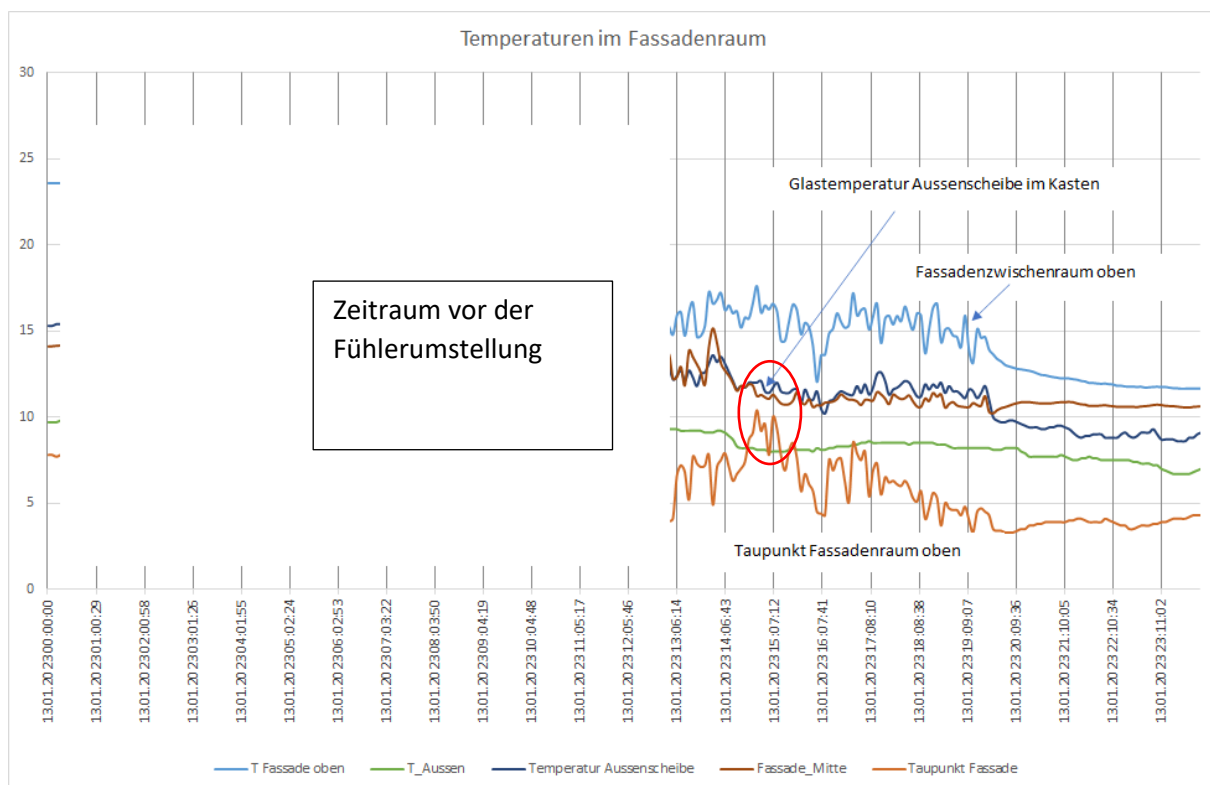


Zur Prüfung wurde die Raumfeuchte im Klassenzimmer über den üblichen Feuchteintrag durch die Schüler von ca. 0.7 l/h auf 1.4 l/h erhöht, so dass die relative Raumluftfeuchte über 45 - 55% je nach Raumhöhe erreichte.





Die gemessenen Raumluftfeuchten von 45 bis 55% mit erhöhtem Feuchteintrag entsprechen bei den dazugehörigen Raumlufttemperaturen von 19 bis 22°C einem Taupunkt von 10°C.



Bei Aussentemperaturen von ca. 8°C ergeben sich Scheibentemperaturen von 11 bis 12°C während der Nutzung und ein Taupunkt im Kastenfenster von 8 bis 10°C.

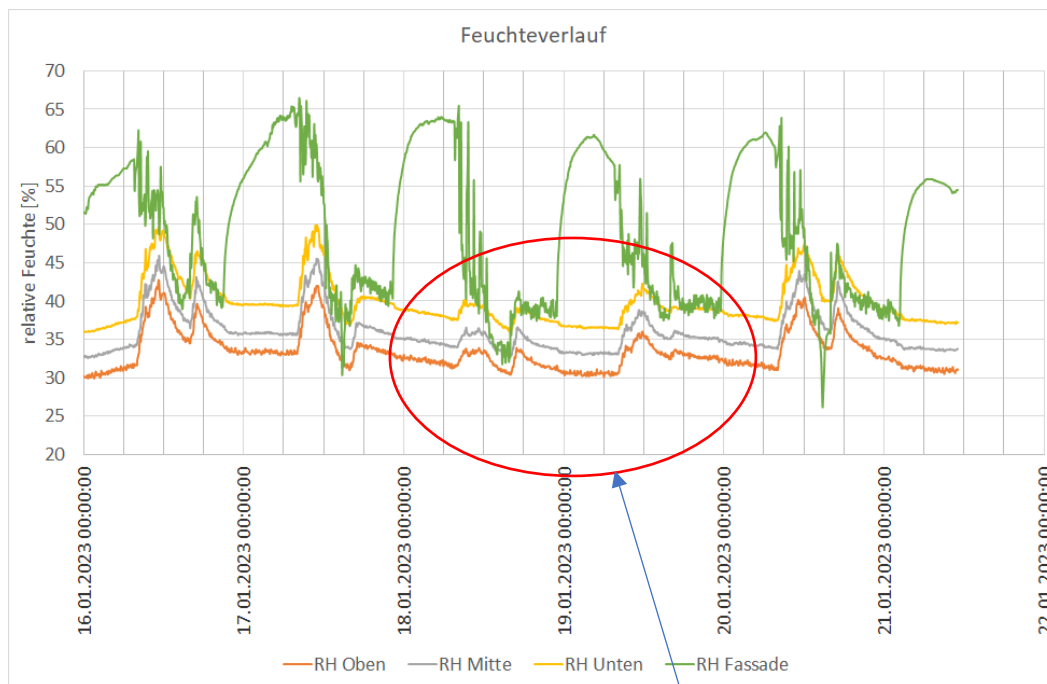
Untenstehendes Bild wurde ca. 15 Uhr aufgenommen und zeigt erste Kondensatbeschläge auf der Aussenscheibe im Kastenfenster oben, während der untere Teil der Scheibe klar bleibt.



Kondensatbildung unter Extrembedingungen von 55% Raumluftfeuchte im Winter

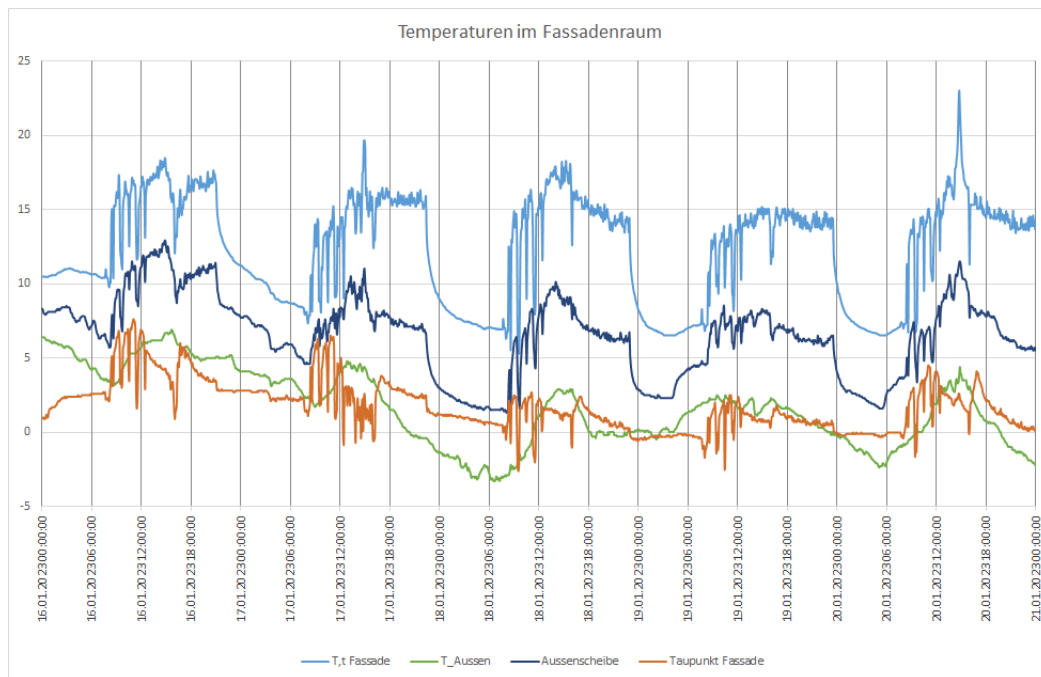
**Prüfung bei normaler Belegung mit 20 Schülern und einem Lehrer in 5 Tagen Schulbetrieb**

Bei normalem Feuchteeintrag durch Schüler und Lehrer erreichen die Raumluftfeuchten im Betrieb durch den Entfeuchtungseffekt der Aussenluft maximal 40% bei sehr kalten Aussentemperaturen sogar nur bei 35%.



Niedrige Aussentemperaturen und damit sehr trockene Aussenluft bedingen auch ein Absinken der relativen Feuchte im Raum durch den Trocknungseffekt der Aussenluft





Trotz Aussentemperaturen von unter  $0^{\circ}\text{C}$  und Aussenscheibentemperaturen von minimal  $2^{\circ}\text{C}$  bis  $4^{\circ}\text{C}$  im Lüftungsbetrieb nähern sich Taupunkt im Fassadenraum und Scheibentemperatur nur kurzzeitig an. In diesen Zeiträumen ist mit einem lokalen Kondensatbeschlagn insbesondere der oberen Scheiben zu rechnen, allerdings liegt der Taupunkt bei maximalen  $2^{\circ}\text{C}$  für Aussentemperaturen unter  $0^{\circ}\text{C}$ .

#### Fazit:

Angesichts der Vermischung von Aussenluft und Fortluft im Kastenfenster und dem Trocknungseffekt von kalter Aussenluft ist bei einer normalen Belegung der Klassenzimmer mit 20 Schülern und einem Lehrer nur von einem kurzzeitigen Beschlagn der oberen Scheiben im Kastenfenster zu rechnen und auch von keinen grossen Mengen von Kondensat im Kastenfenster.

## Gesamtfazit

Mit einer CO<sub>2</sub> abhängigen Klappensteuerung lässt sich ein Klassenzimmer mit dem weiterentwickelten Kastenfenster von Otto Hässler bei einer typischer Belegung von 20 Schülern und einem Lehrer ausreichend natürlich be- und entlüften und maximale CO<sub>2</sub> Werte von 1200 ppm sicherstellen.

In der Winterstellung mit reduzierter Fassadendurchlüftung auf Grund der geschlossenen oberen äußeren Fassadenklappe steigen die maximalen CO<sub>2</sub> Konzentration auf 1400 ppm an, wobei eine Stoßlüftung über die zeitweise Aktivierung der oberen äusseren Klappen während der kurzen und langen Pausen einen guten Reset zum Start der nächsten Unterrichtsstunde zulässt.

Die reduzierte Lüftungseffizienz in der Winterstellung der Lüftung – Klappen aussen unten offen und Klappen innen oben offen – die zu diesen erhöhen CO<sub>2</sub> Niveaus unter dem MAK Wert von 1500 ppm führt, beruht auf einer Durchmischung von Fortluft- und Zuluft im Kastenfenster, die allerdings auch ein grosses Komfortproblem der natürlichen Lüftung löst. Mit dieser Vermischung erfolgt eine Art «Wärmerückgewinnung», die das Komfortproblem der natürlichen Lüftung bei niedrigen Aussentemperaturen löst. Trotz Aussentemperaturen am Gefrierpunkt konnten als Eintrittstemperatur aus dem Kastenfenster in den Raum keine Temperaturen unter 14°C gemessen werden, die somit auch kein Komfortproblem für Personen in Fassadennähe darstellen.

Auch im Sommer zeigt das weiterentwickelte Kastenfenster mit dem integrierten Sonnenschutz und der manuellen Sommerklappe innen unten, auch in Hitzeperioden mit über 35°C aussen nur maximale Raumtemperaturen mit 26°C. Die ist sicher auch auf die hohen thermischen Massen in der Altstädter Schule zurückzuführen, die sich mit den gesteuerten Fassadenklappen über eine Nachtlüftung auch aktivieren lassen. Dies sollte in der Spezifizierung der Klappensteuerung noch berücksichtigt werden.

Eine Vereinfachung der Steuerung des System sollte unbedingt berücksichtigt werden, genauso wie eine visuelle Lüftungsampel für Lehrer und Schüler um manuell eingreifen zu können.

Quellen:

Historische Bilder, Otto Haesler Stiftung

Alle Fotos, Transsolar