

Bericht zum Förderprojekt

## Entwicklung einer solaren Kollektorfassade und Umsetzung des Modellvorhabens Kollektorfassade / Porenlüftungs- fassade

gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt  
unter der Fördernummer AZ 21852-3

Abschlussbericht / Teilbericht 5 -  
Entwicklungsarbeit vom 11. September 2013 - 30. Juni 2015

Verfasser:

Arthur Schankula, Sebastian Pint, Magdalena Pfeffer / SCHANKULA Architekten

Michael Eiber / Bau-Fritz GmbH & Co. KG

Prof. Dr.-Ing. Hans Quasnitza / Hochschule Biberach, Labor für Vermessung

Wolfram Schröder / B&O Wohnungswirtschaft

Prof. Uli Spindler, Rafael Botsch, Florian Alscher, Andreas Hack, Christian Maack / Hochschule  
Rosenheim, Abteilung Forschung & Entwicklung

München, Dezember 2015



**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>21852-3</b>	Referat	Fördersumme	<b>373.649,00€</b>
----	----------------	---------	-------------	--------------------

**Antragstitel**                      **Entwicklung einer solaren Kollektorfassade und Umsetzung des Modellvorhabens Kollektorfassade / Porenlüftungsfassade**

**Stichworte**                      Ökobau, Baubestandspflege, Solares Heizen, alternatives Heizen, Luftkollektor, Lüftungsfassade, Haustechnik, integrale Bausysteme, energieeffizientes Bauen

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>6 Jahre und 7 Monate</b>	<b>10.12.2008</b>	<b>30.06.2015</b>	

**Zwischenberichte**              Teilberichte 1-4

<b>Bewilligungsempfänger</b>	B&O Stammhaus GmbH & Co. KG	Tel	089 - 28805521
	Dietrich-Bonhoeffer-Straße 14	Fax	089 - 28805591
	83043 Bad Aibling	Projektleitung	Arthur Schankula
		Bearbeiter	Magdalena Pfeffer

**Kooperationspartner**

- SCHANKULA Architekten, München
- Hochschule Biberach, Labor für Vermessung
- Baufritz GmbH & Co KG, Erkheim
- Hochschule für angewandte Wissenschaften - Fachhochschule Rosenheim, Abteilung Forschung und Entwicklung

### **Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens**

Das Projekt „Solare Kollektorfassade“ befasst sich mit der Entwicklung von vorgefertigten Fassadenteilen aus gedämmten Holzständerelementen, die neben der Verbesserung der Gebäudehülle auch Lüftung mit Wärmerückgewinnung sowie Aufwärmung der Zuluft durch einen Luftkollektor leisten können. Zusätzlich zum Einsatz als Fassade in Neubauten ist besonders die Verwendung als Vorsatzschale bei Sanierungen interessant, wo das Fassadensystem eine Alternative zu konventionellen Wärmedämmverbundsystemen darstellen, aber auch einen Lösungsansatz für die nachträgliche Integration einer Lüftungsanlage anbieten könnte. Darüber hinaus galt es, die Wirkungsweise einer solaren Kollektorfunktion zu prüfen. Letztendlich sollten beide Systeme im Rahmen eines Pilotprojekts an einem bestehenden Gebäude umgesetzt werden.

Nach Abschluss der Testphasen mit den umgebauten Testelementen aus Projekt 21852-2 (siehe Teilberichte) sollte das Konzept erstmalig an einer kompletten Fassade an einem bestehenden Gebäude umgesetzt werden. Besonderes Augenmerk lag auf einer konkreten Betrachtung des energetischen Nutzens des Luftkollektors.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

In einem ersten Arbeitsschritt wurde ein Konzept zum berührungslosen Aufmaß erstellt und durch die Hochschule Biberach durchgeführt. Das Ergebnis des Aufmaßes bildete die Grundlage für die nachfolgende Planung.

Anhand dessen wurde das Gesamtkonzept für die Sanierung des Gebäuderiegels inklusive aller wesentlichen Leitdetails für die Fassadenelemente erstellt. Besonderes Augenmerk wurde zudem auf die Gestaltung der Fassade gelegt. Durch die Holzbaufirma wurde eine detaillierte Werkstattplanung der Fassadenelemente erstellt. Nach Abschluss der Planung wurden die Fassadenelemente gefertigt und montiert.

Parallel dazu wurde ein Konzept für die automatische Lüftungssteuerung und das umfassende Monitoring erstellt und die Fassade anschließend in Betrieb genommen. Während des Betriebs wurden umfassende Daten erhoben, anhand derer die Berechnungen zum energetischen Nutzen angestellt werden konnten. Nach der Beendigung des Betriebs wurden die Nutzer der Kollektorfassade zu ihren Erfahrungen und subjektiven Empfindungen befragt.

## **Ergebnisse und Diskussion**

### **Lüftungskonzept:**

Es wurde ein System zur effizienten Nutzung der Kollektorfassade entwickelt, bestehend aus Standardbetrieb mit Wärmerückgewinnung und Kollektorbetrieb. Der Standardbetrieb sichert an trüben Tagen oder in der Nacht eine Versorgung der Räume mit Frischluft. Wenn die Temperatur im Luftkollektor hoch genug ist, wird in den südlichen Räumen anstatt der Abluft aus den Räumen die durch die Kollektorfunktion der Elemente erwärmte Luft im Wärmetauscher der Lüftungsgeräte zur Temperierung der Zuluft genutzt. Die so dem Raum zugeführte Wärme wird durch ein Überströmen der Luft auch in die nördlichen Zimmer verteilt.

### **Fassadenelemente:**

In Zusammenarbeit mit der Holzbaufirma sowie einer Lüftungsfirma wurden durch das Architekturbüro Fassadenelemente auf Basis von Holzrahmenelementen entwickelt, die im Werk inklusive aller Lüftungskanäle und -geräte vorgefertigt werden und vor Ort in kürzester Zeit montiert werden können. Auf diese Weise konnten die Elemente in zwei Tagen montiert werden, die gesamten Arbeiten der Holzbaufirma waren in vier Tagen abgeschlossen. Die Anschlüsse an den Bestand wurden so vereinfacht, dass die Beeinträchtigung der Nutzer durch die Bauarbeiten deutlich verringert werden konnte.

### **Auswertung Messdaten:**

Bei der Auswertung der Messergebnisse wurden vor allem ähnliche Tage mit Standard- und Kollektorbetrieb hinsichtlich des Energieeintrags über die Zuluft verglichen. An sonnigen Tagen steht durch Nutzung der solar erwärmten Kollektorluft bis zu ungefähr dem Dreifachen des Energiebedarfs der Fassade zur Verfügung. Das heißt, dass damit die Transmissionsverluste über die Außenwände ausgeglichen werden können und gleichzeitig sogar noch eine zusätzliche Wärmemenge zur Kompensation der Wärmeverluste über Dach und Keller oder als gespeicherte Wärme für darauffolgende Tage zur Verfügung steht.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Das Gebäude steht auf dem Gelände der B&O-Gruppe in Bad Aibling, wo innovative Konzepte für Sanierung, Ersatzbauten und Nachverdichtung in der Wohnungswirtschaft anhand von Musterbauten entwickelt werden. Es werden regelmäßige Führungen durchgeführt, in denen unter anderem die Kollektorfassade vorgestellt wird.

Eine Anmeldung für das internationale Holzbau-Forum ist erfolgt. Im Rahmen von Werkberichten zum Thema Holzbau oder auf Fachtagungen zum Thema Fassade wurde und wird die Kollektorfassade vorgestellt. Zudem erschienen in wichtigen Fachzeitschriften Beiträge über das Projekt, u.a. in „Fasadentechnik“ (Ausgabe 06/09, Dezember 2009), „Zuschnitt“ (Ausgabe 34, Juni 2009) und „DETAIL“ (Ausgabe 7+8/2010, Juli 2010).

## **Fazit**

Es wurde gezeigt, dass die Lüftungsfassade eine gute Möglichkeit darstellt, bei Geschossbauten nachträglich eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung zu integrieren und dass das darauf aufbauende Konzept der solaren Kollektorfassade neben der komfortablen Lüftung einen Beitrag zur Heizung einer Wohnung beitragen kann, ja sogar dass an sonnigen Tagen komplett auf die konventionelle Heizung verzichtet werden kann.

Sowohl die Lüftungsfassade als auch die Kollektorfassade basieren auf dem rein passiven System für die Sanierung von Gebäuden mittels vorgefertigter Holzständerelemente. Zusammen stehen sie als dreistufiges Konzept zur Verfügung:

Stufe 1 – Sanierung der Fassade (neue Fassade einschließlich neuer Fenster, Dämmung)

Stufe 2 – Stufe 1 mit Lüftungsfunktion für die nachträgliche Integration einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung

Stufe 3 – Stufe 2 mit zusätzlicher Kollektorfunktion zur Unterstützung der Gebäudeheizung durch Temperierung der Zuluft durch solare Strahlung

Das Konzept kann je nach Wunsch in einer der drei Stufen bei der Sanierung von mehrgeschossigen Gebäuden umgesetzt werden. Letztlich konnte im Pilotprojekt gezeigt werden, dass selbst ein kompletter Gebäuderiegel problemlos mit dem Fassadensystem ausgestattet werden kann.

# Inhaltsverzeichnis

## **Berichtteil A**

Projektpartner SCHANKULA Architekten

1.	Weiterentwicklung der solaren Kollektorfassade .....	1
1.1	Einleitung .....	1
1.2	Konzept Solare Kollektorfassade .....	1
1.2.1	Dreistufiges Konzept zur Fassadensanierung mit Holzständerelementen .....	1
1.2.2	Lüftungskonzept .....	2
1.3	Umsetzung im Pilotprojekt DFI Bad Aibling .....	4
2.	Praktische Umsetzung .....	5
2.1	Aufmaß .....	5
2.1.1	Strategie .....	5
2.1.2	Aufmaßvarianten .....	5
2.1.3	Bewertung .....	6
2.2	Planung.....	6
2.2.1	Gesamtkonzept.....	6
2.2.2	Lüftungskonzept .....	9
2.2.3	Steuerung .....	10
2.2.4	Monitoring.....	13
2.2.5	Details Fassadenelemente.....	14
2.2.6	Technische Ausstattung .....	17
2.2.7	Fassadengestaltung .....	20
2.2.8	Brandschutz/Schallschutz.....	24
2.2.9	Randbereiche.....	26
2.3	Fertigung.....	29
2.3.1	Werkstattplanung .....	29

2.3.2	Details Fassadenelemente.....	31
2.3.3	Technische Ausstattung .....	34
2.3.4	Fertigung Elemente im Werk.....	36
2.4	Montage.....	40
2.4.1	Vorarbeiten.....	40
2.4.2	Montage Fassadenelemente .....	40
2.4.3	Installation und Einrichtung Lüftung .....	42
3.	Auswertung.....	45
3.1	Auswertung Messdaten.....	45
3.1.1	Allgemeines zur Auswertung der Daten .....	45
3.1.2	Vergleich Standardbetrieb und Kollektorbetrieb .....	47
3.1.3	Berechnung Energieeintrag .....	54
3.1.4	Temperaturverteilung Außenwand .....	59
3.1.5	Vergleich Energieeintrag Kollektorfassade zu Verlust über Außenwände .....	62
3.1.6	Abhängigkeit Wetter.....	65
3.1.7	Stromverbrauch .....	68
3.2	Nutzerbefragungen.....	69
3.2.1	Befragung Internatsleitung .....	69
3.2.2	Befragung Nutzer.....	69
3.3	Kostenbetrachtung.....	71
4.	Fazit .....	74
5.	Quellen.....	74

## **Berichtteil B**

Hochschule Biberach, Labor für Vermessung

1.	Einleitung .....	3
2.	Aufmaß .....	4
2.1	Beschreibung des Aufmaßobjekts .....	4
2.2	Vorbereitung der Aufnahme .....	4
2.3	Laserscanning .....	5
2.3.1	Eingesetzter Laserscanner .....	5
2.3.2	Aufnahmekonfiguration Laserscanning .....	5
2.3.3	Auswertung Punktwolke .....	7
2.4	Tachymetrische Aufnahme .....	9
2.5	Photogrammetrische Aufnahme .....	11
3.	Vergleich der Messverfahren .....	13
3.1	Bewertung der Messverfahren .....	13
4.	Modellierung Fassade .....	15

## **Berichtteil C**

Hochschule Rosenheim, Abteilung Forschung und Entwicklung

1.	Einleitung .....	2
2.	Messdatenpunkte .....	2
3.	Messtechnik .....	2
3.1	Stromzähler .....	2
3.2	Außenlufttemperatur .....	3
3.3	Lufttemperatursensoren in Frisch-, Zuluftkanal und im Fassadenkollektor .....	3
3.4	Kanalfühler zur Erfassung der Ablufttemperatur der Südräume .....	3
3.5	Oberflächentemperatursensoren .....	4
3.6	Raumluftqualität .....	4

3.7	Luftvolumenströme.....	4
3.8	Solarstrahlung .....	4
4.	Datenerfassung und -übertragung.....	5
5.	Datenbereitstellung über Monisoft .....	6
6.	Anhang .....	7

## **Berichtteil D**

B&O Wohnungswirtschaft

1.	Überblick über die Komponenten der Lüftungsfassade.....	1
1.1	Fassadenlüftungsgerät Süd.....	1
1.2	Verteilerklappe.....	5
1.3	Deckenlüftungsgerät Nord.....	2
1.4	Überströmkanäle und -klappe .....	3
2.	Lüftungssteuerungskonzept .....	7
2.1	Betriebsmodi Fassadenwohnungen SÜD .....	7
2.2	Betriebsmodus Warmluftzufuhr Überströmfunktion zum Energieaustausch in Wohnungen Nord.....	8
2.3	Internet Visualisierung.....	9
3.	Erfahrungen zur Lüftungsinstallation .....	9
4.	Erfahrungen Steuerung.....	10
5.	Erfahrungen durch die Zimmernutzung.....	10



Entwicklung einer solaren Kollektorfassade und Umsetzung des Modell-  
vorhabens Kollektorfassade / Porenlüftungsfassade

## **Berichtteil A**

SCHANKULA Architekten



## 1. Weiterentwicklung der solaren Kollektorfassade

### 1.1 Einleitung

Das Forschungsprojekt „Solare Kollektorfassade“ befasst sich mit der Aufgabenstellung, vorgefertigte Fassadenteile aus gedämmten Holzständerelementen zu entwickeln, die neben der Verbesserung der Gebäudehülle auch Lüftung sowie Aufwärmung der Zuluft durch einen Luftkollektor leisten können. Zusätzlich zum Einsatz als Fassade in Neubauten ist besonders die Verwendung als Vorsatzschale bei Sanierungen interessant, wo das Fassadensystem eine Alternative zu konventionellen Wärmedämmverbundsystemen darstellen, aber auch einen Lösungsansatz für die nachträgliche Integration einer Lüftungsanlage anbieten könnte. Darüber hinaus galt es, die Wirkungsweise einer solaren Kollektorfunktion zu prüfen. Letztendlich sollten beide Systeme im Rahmen eines Pilotprojekts an einem bestehenden Gebäude umgesetzt werden.

In diesem abschließenden Bericht geht es um die Umsetzung der beiden Konzepte - Lüftungsfassade und Kollektorfassade - an der Außenwand eines bestehenden Gebäudes. Die praktische Umsetzung gliedert sich in Planung, Ausführung und Betrieb, sowie die Auswertung der erhobenen Daten. Die einzelnen Planungsschritte und Abläufe sollen in diesem Zusammenhang detailliert dokumentiert und bewertet werden, vor allem auch in Hinblick auf die Optimierung des Systems für zukünftige Anwendungen. Besonderer Augenmerk liegt auf einer konkreten Betrachtung des energetischen Nutzens des Luftkollektors. Dafür sollen anhand verschiedener Sensoren Messwerte erhoben und ausgewertet werden.

### 1.2 Konzept Solare Kollektorfassade

#### 1.2.1 Dreistufiges Konzept zur Fassadensanierung mit Holzständerelementen

Die solare Kollektorfassade basiert auf einem dreistufigen System von Fassadenelementen auf Basis einer Holzständerkonstruktion. Im Gegensatz zu konventionellen WDVS-Systemen sollen mit Holzprofilen und natürlichen Dämmstoffen nachhaltige Materialien zum Einsatz kommen. Durch den hohen Vorfertigungsgrad und kurze Bauzeiten vor Ort wird eine hohe Planungssicherheit erreicht. Die Holzständerelemente sind zudem wenig anfällig für Beschädigungen und den Verlust der Dämmwirkung.

Stufe 1 beinhaltet gedämmte Holzständerelemente, ähnlich der Elemente, die häufig im modernen Holzbau zum Einsatz kommen. Sie eignen sich zur energetischen und ästhetischen Optimierung von Bestandsfassaden, da die Elemente wirtschaftlich im Werk - gegebenenfalls inklusive neuer Fenster - vorgefertigt und vor Ort in kurzer Zeit montiert werden können. Meist kann sogar auf den Einsatz eines Gerüsts verzichtet und der Montageaufwand vor Ort und somit auch die Beeinträchtigungen der Nutzer deutlich verringert werden.

Stufe 2 reagiert auf die Problemstellungen, die sich aus der hohen Dichtigkeit der Außenwände und Fenster vieler neuer und sanierter Bauten ergibt. Während dadurch einerseits Wärmeverluste durch undichte Gebäudeteile oder Wärmebrücken minimiert werden, wird auch gleichzeitig die natürliche Durchlüftung der Aufenthaltsräume verhindert. Dies kann mit einer erhöhten Schadstoffbelastung und der Gefahr von Schimmelbildung einhergehen. Allein durch Fensterlüftung ist diesem Problem nur unzureichend beizukommen. Zudem geht vor allem bei gut gedämmten Fassaden ein nicht unerheblicher Anteil an Wärme über die Fensterlüftung verloren. Die Lösung hierfür ist eine mechanische Lüftung, die aber vor allem bei der Sanierung mit erheblichem Aufwand verbunden ist und nicht zuletzt auch häufig zu unzureichenden Ergebnissen führt. In Stufe 2 sollen deshalb zusätzlich dezentrale Lüftungsbausteine in die Fassadenelemente eingebaut werden. Lüftungsleitungen in den Elementen sorgen dafür, dass - im Gegensatz zu herkömmlichen dezentralen Lüftungssys-

temen - mit einem Gerät mehrere Räume mit der notwendigen Frischluft versorgt werden können. Auf eine Verlegung von Lüftungsleitungen in der Wohnung kann somit verzichtet werden. Ein Wärmetauscher im Lüftungsbaustein ermöglicht die Wärmerückgewinnung aus der Abluft.

Bei Wohnungen mit entsprechender Ausrichtung können in Stufe 3 zusätzlich Luftkollektoren zur Vortemperierung der Zuluft in die Fassadenelemente integriert werden. Bei der solaren Kollektorfassade wird die Luft im Kollektor durch die Sonneneinstrahlung erwärmt und kann dann mittels Wärmetauscher zur Erwärmung der Zuluft genutzt werden. Dem Wärmetauscher wird dazu ein Umschaltgerät vorgeschaltet, das über zwei Klappenstellungen je nach Außentemperatur und Sonneneinstrahlung entweder die Abluft aus dem Raum oder die solar erwärmte Kollektorluft durch den Wärmetauscher leitet. Eine automatische Steuerung soll zwischen diesen beiden Betriebszuständen automatisch wechseln.

Zusätzlich sorgt die solare Einstrahlung und damit die Aufheizung des Kollektors dafür, dass sich die Temperatur der Außenwand erhöht, indem sie die Sonnenenergie speichert. Vor allem an kalten, aber sonnigen Tagen wird so eine Transmission durch die Außenwand deutlich verringert, teilweise sogar komplett verhindert.

Obwohl es einige andere Systeme zur Fassadensanierung gibt, die entweder auf eine Verbesserung der Gebäudehülle oder auch auf Energieerzeugung über die Fassade abzielen, ist die Kombination aller drei Funktionen Dämmen, Lüften und solares Heizen Alleinstellungsmerkmal der solaren Kollektorfassade.

### 1.2.2 Lüftungskonzept

Zentraler Aspekt des Modellvorhabens ist die Umsetzung des Lüftungskonzepts, welches auf den Ergebnissen der vorangegangenen Projektstufen basiert und an die reelle Bestandssituation angepasst wurde. Je nach Außentemperatur sollen die jeweils richtigen Einstellungen automatisch gewählt werden, um die Kollektorfassade möglichst effizient und sinnvoll nutzen zu können. Daraus wurde ein System mit zwei grundlegenden Betriebsmodi - Standardbetrieb mit Wärmerückgewinnung und solarer Kollektorbetrieb - entwickelt, zwischen denen anhand der automatisierten Auswertung der erhobenen Daten gewechselt wird.

Voraussetzung für das System sind Wohnungen oder Nutzungseinheiten mit ausreichender solarer Einstrahlung, was im Wesentlichen unbeschattete Standorte mit Südwest- bis Südost-Ausrichtung bedeutet. Im Geschosswohnungsbau ist dies häufig der Fall, wobei sich Richtung Süden Aufenthaltsräume und im Norden häufig Nebenräume wie Küche oder Nasszellen befinden. Vor die Südfassade werden die Kollektorelemente mit eingebauten Lüftungsgeräten montiert. Die Nordfassade wird ebenfalls mit gedämmten Fassadenelementen und Lüftungsgeräten, aber ohne Luftkollektoren ausgestattet, da die Teststände nahe legten, dass sich dort der Einsatz von Kollektorelementen aufgrund mangelnder direkter Sonneneinstrahlung nicht lohnt. Die Nordräume profitieren natürlich trotzdem von der Dämmung der Fassade.

Bei unzureichender Sonneneinstrahlung - nachts oder an trüben Tagen - arbeiten die Lüftungsgeräte sowohl im Norden als auch im Süden im Standardbetrieb mit Wärmerückgewinnung. Jeder Raum wird dabei über die dezentralen Lüftungsgeräte mit Frischluft versorgt. Der Energiegehalt der Abluft wird dabei genutzt, um die Zuluft auf ein höheres Temperaturniveau zu bringen.

Bei ausreichender Sonneneinstrahlung soll der Luftkollektor dafür genutzt werden, möglichst viel Energie über die vorgewärmte Zuluft in die Aufenthaltsräume im Süden einzubringen. Wenn die Temperatur im Kollektor höher ist als die Innenraumtemperatur, lohnt es sich, die warme Luft im Kollektor anstatt der Abluft aus den Räumen zur Erwärmung der Zuluft zu nutzen. Die Zuluftventilatoren laufen auf einer höheren Leistung, um durch ein größeres Luftvolumen eine möglichst große Energieausbeute zu erzielen.

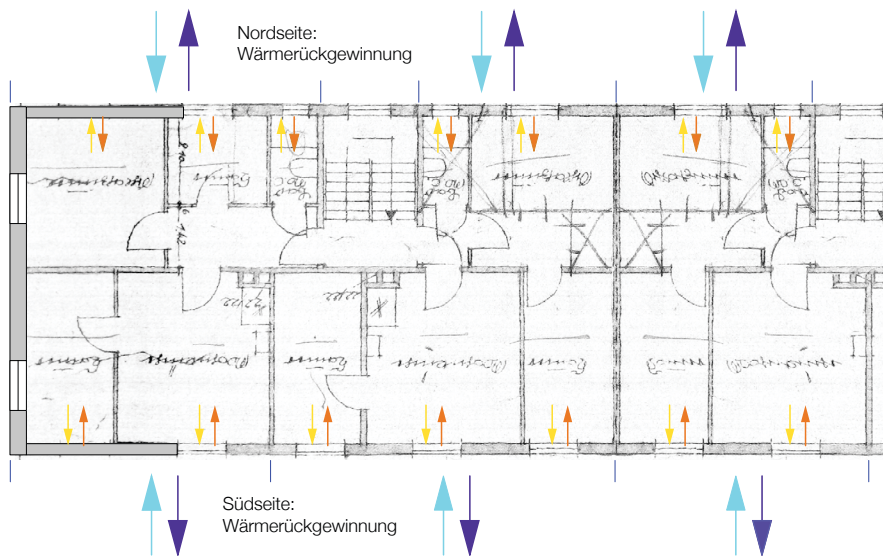


Abb. 1 Standardbetrieb mit Wärmerückgewinnung

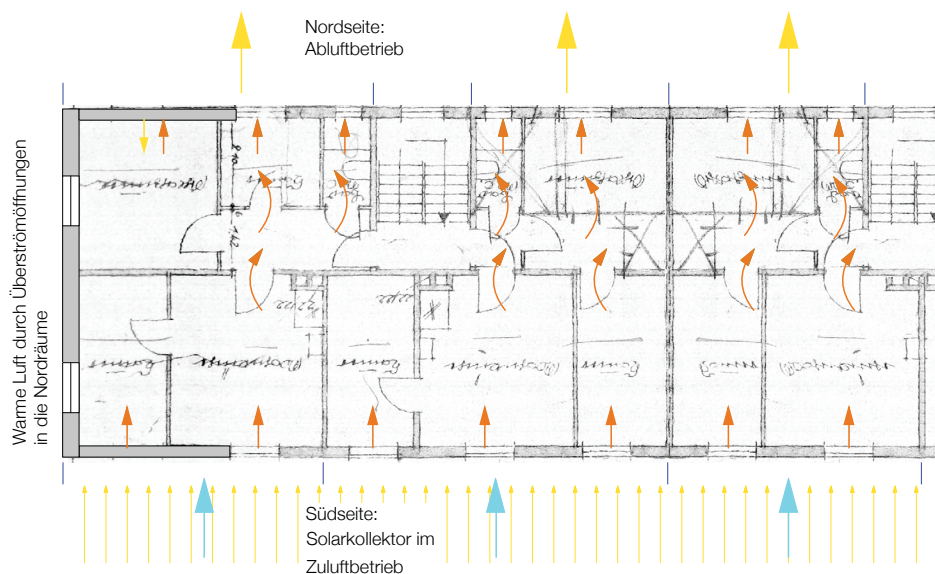


Abb. 2 Kollektorbetrieb

Da vor allem an sonnigen Tagen über die solare Einstrahlung eine große Menge Energie bereitsteht, können auch die Nordräume, die nicht von der direkten Sonneneinstrahlung profitieren, mit der Wärme aus den Kollektoren versorgt werden. Überschüssige Wärme aus den Südräumen soll über Überströmöffnungen, beispielsweise ein etwas breiterer Spalt zwischen Türblatt und Boden, den Nordräumen zugeführt werden. Die Zuluftventilatoren im Lüftungsgerät in den Südräumen arbeiten dann mit erhöhten Luftförderraten, während die Räume im Norden so eingestellt sind, dass sie erhöhte Abluftraten aufweisen. Auf diese Weise stellt sich ein Luftstrom von den Süd- zu den

Nordräumen ein. Die Nordräume werden dabei nach dem Prinzip der „Querlüftung“ zu „Abluft-räumen“ die mit Luft aus den Südräumen, der sogenannten „Sekundärluft“, durchlüftet werden. Nach diesem Prinzip wird davon ausgegangen, dass deren Qualität für die Belüftung ausreicht, zumal es sich um Räume wie Küche und Bäder handelt. Im Modellvorhaben ist die Luftqualität deutlich besser als bei der klassischen Querlüftung, da die Lüftungsgeräte in diesem Modus mit doppelter Luftrate laufen.

### 1.3 Umsetzung im Pilotprojekt DFI Bad Aibling

Nach Beendigung der Testphasen und der theoretischen Entwicklung konnte Ende 2014 mit der Umsetzung des Modellvorhabens begonnen werden. Dafür wurde ein ehemaliges Kasernengebäude in Bad Aibling gewählt, das momentan für das Deutsche Fußball-Internat (DFI) genutzt wird.

Zusammen mit dem Mieter, dem Fußballinternat, wurde untersucht, wie die Räume tatsächlich genutzt werden und anhand dessen das Lüftungskonzept präzisiert. Obwohl die Nutzung als Wohnheim nicht primär der Hauptzielgruppe Geschosswohnungen entspricht, eignet sich der gewählte Gebäudeteil strukturell als Modell für herkömmliche Nord-Süd-orientierte Wohnungen: Im Süden befinden sich die Wohnräume der Jugendlichen, die sich durch die Nutzung als Aufenthaltsräume gut für Zulufräume eignen. Jenseits des Mittelflurs befinden sich im Erdgeschoss vor allem Sanitärräume. Diese wurden ebenfalls mit Lüftungsgeräten ausgestattet und sollen wie im vorherigen Kapitel beschrieben in das übergeordnete Lüftungskonzept einbezogen werden.

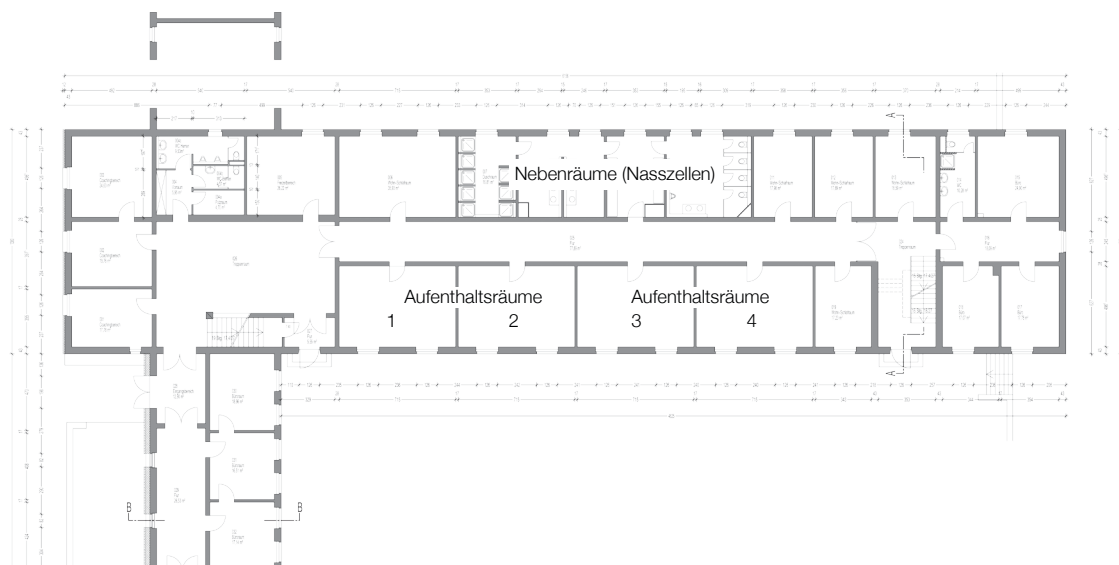


Abb. 3 Grundriss Erdgeschoss

Für die Lüftung mit Sekundärluft sind die Sanitärräume gewählt worden. Die gegenüberliegenden Aufenthaltsräume werden mit Primärluft versorgt. Im Gegensatz zu den kleinen Zimmern im Obergeschoss sind die Räume im Erdgeschoss groß genug, um als Modell für eine normale Wohnung fungieren zu können. Aus diesen Gründen wurden diese Raumpaare ausgewählt und mit dem Lüftungssystem ausgestattet. Jede der Raumgruppen steht stellvertretend für eine kleine Wohnung mit Aufenthaltsräumen im Süden und Nebenräumen im Norden. Die restlichen Räume im Erdgeschoss und alle Räume im Obergeschoss, wurden mit passiven Elementen (Stufe 1 gemäß Kapitel 1.2.1 ) ausgestattet.

Für Lüftungssteuerung und Monitoring wurden die Räume mit verschiedenen Sensoren zur Erfassung von Temperatur, Luftfeuchtigkeit, CO<sub>2</sub>-Gehalt, Sonneneinstrahlung, geförderten

Luftmengen sowie Verbrauch, Leistung und Aktivitätszuständen der Lüftungsgeräte ausgestattet. Die Ziele des Monitorings sind vorrangig die Überprüfung der Funktionsfähigkeit der Lüftungssteuerung, sowie letztendlich die Ermittlung von Energieeinträgen. Anhand des Vergleichs dieser Räume lassen sich Rückschlüsse auf den Einfluss verschiedener Parameter ziehen, beispielsweise von vor der Fassade stehenden Bäume oder der Lage der angrenzenden Gebäudeteile, sowie Abhängigkeiten vom Nutzerverhalten.

## 2. Praktische Umsetzung

### 2.1 Aufmaß

#### 2.1.1 Strategie

Für die Anwendung der Kollektorfassade an einer Bestandswand ist ein detailliertes Aufmaß Voraussetzung. Um die Fassadenelemente vorfertigen zu können, ist nicht nur die genaue zweidimensionale Geometrie der Fassadenfläche erforderlich, sondern auch die Qualität der Fläche in Bezug auf dreidimensionale Verformungen. Ziel der Aufmaßstrategie ist es daher, eine effiziente Vorgehensweise zu entwickeln, um ein möglichst präzises, dreidimensionales Bild der Fassade bei gleichzeitig geringem Arbeitsaufwand zu erstellen. Vor allem in Anbetracht der Wirtschaftlichkeit der Kollektorfassade ist dies von hoher Bedeutung. Da im Modellvorhaben die Fassadensanierung als Einsatzgebiet der Kollektorfassade fokussiert wurde und die Objekte in den meisten Fällen auch während der Planung und Ausführung genutzt werden, ist ein berührungsloses Aufmaß essentiell, um Beeinträchtigungen zu minimieren.

An der Hochschule Biberach wurde für das Modellvorhaben unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans Quasnitza eine Strategie zum Aufmaß entwickelt. Es wurden verschiedene Systeme in Betracht gezogen und letzten Endes auf Ihre Gebrauchstauglichkeit im vorliegenden Fall untersucht. Besonders die Lage der Fenster und die exakte Geometrie der Fensterlaibungen waren entscheidend für die Werkstattplanung der Fassadenelemente.

#### 2.1.2 Aufmaßvarianten

Im Modellvorhaben wurden sowohl Laserscanner als auch Tachymeter zum Aufmaß verwendet. Die Photogrammetrie ergänzte die beiden Methoden.

Beim Aufmaß mit Laserscanner wurde von vier Standpunkten aus gemessen. Ergebnis ist ein aus Einzelpunkten bestehendes digitales 3D-Modell des Gebäudes. Nachteilig auf das Ergebnis wirkte sich die Oberflächenbeschaffenheit des Putzes und die teils unpräzise Geometrie von Putzkanten aus, was vor allem im Laibungsbereich zu Ungenauigkeiten führte. Für eine praktische Nutzung des 3D-Modells war es deshalb notwendig, anhand der gemessenen Punkte Ebenen und Ebenenverschneidungen zu generieren, um die Kanten der Fenster exakt zu beschreiben. Dies war auch notwendig, um aus den immensen Datenmengen der Punkterfassung ein praktikables, nutzbares 3D-Modell zu erstellen.

Dieses Verfahren der Nachbearbeitung ist allerdings sehr aufwändig, und außerdem auf eine hohe Auflösung des Scanners angewiesen. Nützlich kann es allerdings sein, das entstehende Modell - als eine Art „Bild“ in Graustufen - mit anderen Verfahren, beispielsweise der Photogrammetrie, zu kombinieren, um eine Visualisierung des Gebäudes zu erzeugen.

Als weitere Variante wurde das Aufmaß mit Tachymetern angewendet. Da die Tachymeter sehr richtungsgenau sind, war die Problematik nicht instrumenteller Natur, sondern lag in der Schwierigkeit der optischen Punktdefinition. Bestimmte Punkte, wie beispielsweise die unteren Fenste-

recken, die durch die Fensterbleche verdeckt wurden, konnten nicht direkt vermessen, sondern nur indirekt über eine Verlängerung der Ecke nach außen angepeilt werden. Auch bei der Einmessung von Kanten und geneigten Flächen erhält man zum Teil nicht tolerable Abweichungen. Die ermittelten Punkte wurden über ein spezielles Programm ausgewertet und auf Genauigkeit geprüft.

Als dritte Möglichkeit wurde das Gebäude photogrammetrisch erfasst, um die beiden vorangegangenen Methoden zu ergänzen.

### 2.1.3 Bewertung

Ein abschließender Vergleich in Bezug auf die Qualität der Ergebnisse beider Verfahren bestätigte dem Laserscanner und den Tachymetern eine vergleichbare Eignung für das Aufmaß beim Modellvorhaben. Vorteil des Laserscanners ist die schnelle, automatische Arbeit vor Ort, was jedoch durch eine komplizierte, zeitintensive Auswertung der Daten relativiert wird. Bei den Tachymetern liegt der Aufwand vor Ort deutlich höher, dafür kann die Auswertung automatisiert erfolgen.

Bei der vorliegenden Fassade des Internats konnten anhand des Punktmodells keine erheblichen Verformungen der Fassade festgestellt werden. Der mittlere Abstand der gemessenen Punkte von den errechneten Ebenen lag in der Regel unter 3 mm. Dies erleichterte die nachfolgende Planung immens, da man sich auf eine zweidimensionale Ebene beschränken und dreidimensionale Verformungen außer Acht lassen konnte. Ein generalisiertes Flächenmodell (CAD) als Ergebnis des Aufmaßes wurde den beteiligten Planern zur Verfügung gestellt.

Beim Aufmaß wurden auch generelle, wichtige Erkenntnisse erlangt: Da die ausführende Holzbau-firma für die Werkstattplanung in hohem Maße auf das Aufmaß angewiesen ist, sollte vor Beginn der Arbeiten eine Abstimmung stattfinden. Dies betrifft vor allem, welche Maße benötigt werden und wie bestimmte Punkte gemessen werden sollen. Besonders bei den Fenstern, die auch durch die unterschiedlichen Elemente wie Fensterbänke, Sonnenschutz oder Fensterprofile sehr komplex sein können, ist es wichtig, genau zu dokumentieren, welche Punkte gemessen wurden. Eine detaillierte Fotodokumentation sollte begleitend durchgeführt werden.

Eine detaillierter Bericht zum Aufmaß im Modellvorhaben kann im Berichtteil B der Hochschule Biberach eingesehen werden.



## 2.2 Planung

### 2.2.1 Gesamtkonzept

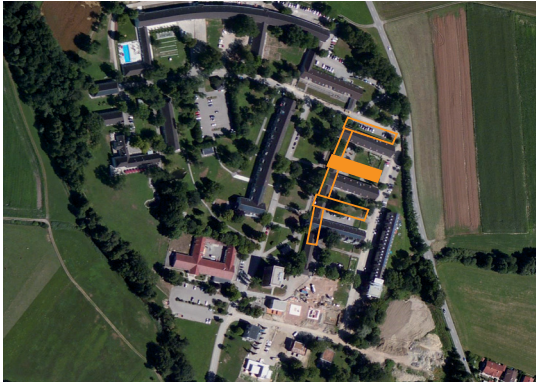


Abb. 4 Lageplan B&O-Gelände Bad Aibling mit DFI und Ansicht Bestandsgebäude

Das Modellvorhaben sah vor, nach den kleinen Testelementen einen kompletten Riegel des ehemaligen Kasernengebäudes, in welchem momentan das Fußballinternat untergebracht ist, auf der Südseite mit den Kollektorelementen zu versehen. Auf diese Weise lässt sich das System erstmalig auch mehrgeschossig und in einer reellen Bestandssituation testen. Vor allem Themen wie der Anschluss der Kollektorfläche an den Randbereichen wie Dach oder Sockel oder die farbliche Gestaltung einer so großen Fläche waren dabei von besonderer Bedeutung.

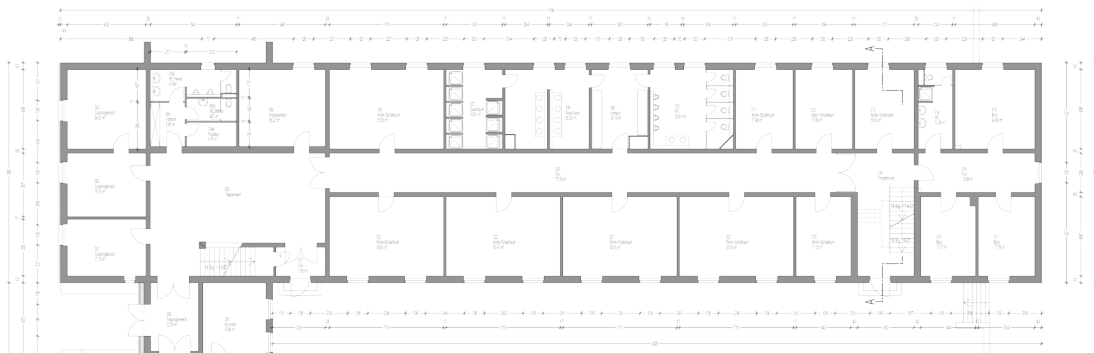


Abb. 5 Bestand Grundriss Erdgeschoss



Abb. 6 Ansicht Südfassade

Der gewählte Gebäudeteil liegt als Querriegel orthogonal zu den niedrigeren Riegeln im Westen. Er besteht aus zwei Geschossen und zusätzlichem, ausgebauten Dachgeschoss unter einem steilen Satteldach. Typisch für eine solche Kaserne gibt es eine Mittelflurschließung mit beidseitig liegenden Räumen.

Wie bereits vorher erwähnt, befinden sich in den südlichen Zimmern meist Aufenthaltsräume, die Sanitäräume befinden sich im Norden. Im Gegensatz zum Erdgeschoss sind die Zimmer im Obergeschoss mit etwa 17 m<sup>2</sup> sehr klein, was eine Nutzung der Kollektorfassade dort nicht effizient gemacht hätte, da jedes Zimmer über einen eigenen Lüftungsbaustein verfügen muss.

Der gewählte Riegel ist etwa 48 m lang und bis zur Traufe circa 7 m hoch. Die geschosshohen Fassadenelemente aus Holzständerwänden und Profiliglas bedecken annähernd die gesamte Fläche der Südfassade, das sind insgesamt knapp 300 m<sup>2</sup>. Im Gegensatz zu den Testelementen entschied man sich, auch die Brüstungs- und Sturzbereiche mit dem gleichen Material zu belegen, um die größtmögliche Kollektorfläche und gleichzeitig bestmögliche Homogenität zu erreichen. Die äußere Beplankung der Holzelemente trägt durch eine farbige Beschichtung maßgeblich zum Gesamteindruck bei. Die Lüftungselemente werden in die Fensterlaibungen integriert und mit einer abnehmbaren Blende versehen.

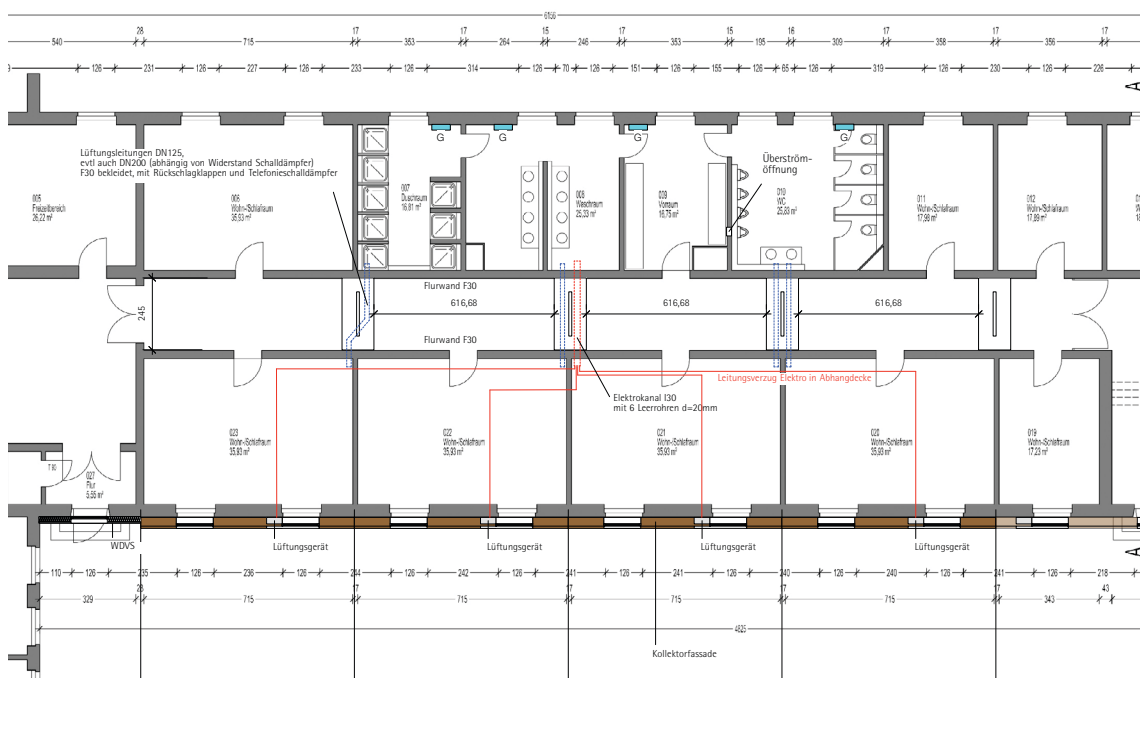


Abb. 7 Grundriss mit Kollektorfassade und Überströmkanälen

Die Aktivtechnik wurde, wie vorher erwähnt, in den Elementen der großen Räume auf der Südseite des Erdgeschosses montiert. Das Obergeschoss wurde mit passiven Elementen mit Wärmedämmung ausgestattet, was dann der Stufe 1 des „Dreistufigen Konzepts zur Fassadensanierung mit Holzständerelementen“ entspricht. Das Obergeschoss profitiert so von der verbesserten Hülle, indem zum einen die Wärmeverluste über die Außenwand verringert und zum anderen die Trans-

missionswärmeverluste durch die Aufheizung der Fassade hinter den Glaselementen reduziert werden.

Aufgrund der baulichen Situation mit Mittelflur mussten die messtechnisch gekoppelten Räume im Norden und Süden mittels Überströmkanälen im Flur verbunden werden. Diese wurden auch gleichzeitig zum Verlegen von Leitungen, u.a. für die messtechnische Erfassung, genutzt und in das neue Beleuchtungskonzept des Flurs integriert. In einer herkömmlichen Wohnung würden Türschlitze oder Überströmöffnungen ausreichen, um eine Querlüftung zu ermöglichen.

### 2.2.2 Lüftungskonzept

Jeder der Wohnräume im Süden mit ca. 36 m<sup>2</sup> wurde mit Kollektorelementen inklusive Lüftungsgerät und Wärmetauscher versehen. Zusammen mit Elementen für Steuerung und Monitoring befinden sich diese neben den Fenstern in den Fassadenelementen. Laut Konzept würde man die Nordräume ebenfalls mit passiven Fassadenelementen ausstatten. Aus Kostengründen wurden dort allerdings lediglich Lüftungsgeräte installiert. Die Fabrikate sind dieselben wie im Süden, jedoch sind sie in der Abhangdecke mit Leitungsdurchführungen in der Außenwand eingebaut.

Im Standardmodus laufen die Lüftungsgeräte im Süden und Norden im Wärmerückgewinnungsmodus. Die angesaugte Frischluft wird dabei durch die Abluft aus dem Innenraum mittels Wärmetauscher auf ein höheres Temperaturniveau gebracht. Die Lüftung von Süd- und Nordraum funktioniert unabhängig voneinander, da eine Klappe im Kanal im Flur ein Überströmen verhindert. Dieser Modus wird genutzt, wenn die Luft im Kollektor nicht warm genug ist um die Zuluft aufwärmen zu können oder die Innenraumtemperatur bereits hoch genug ist.

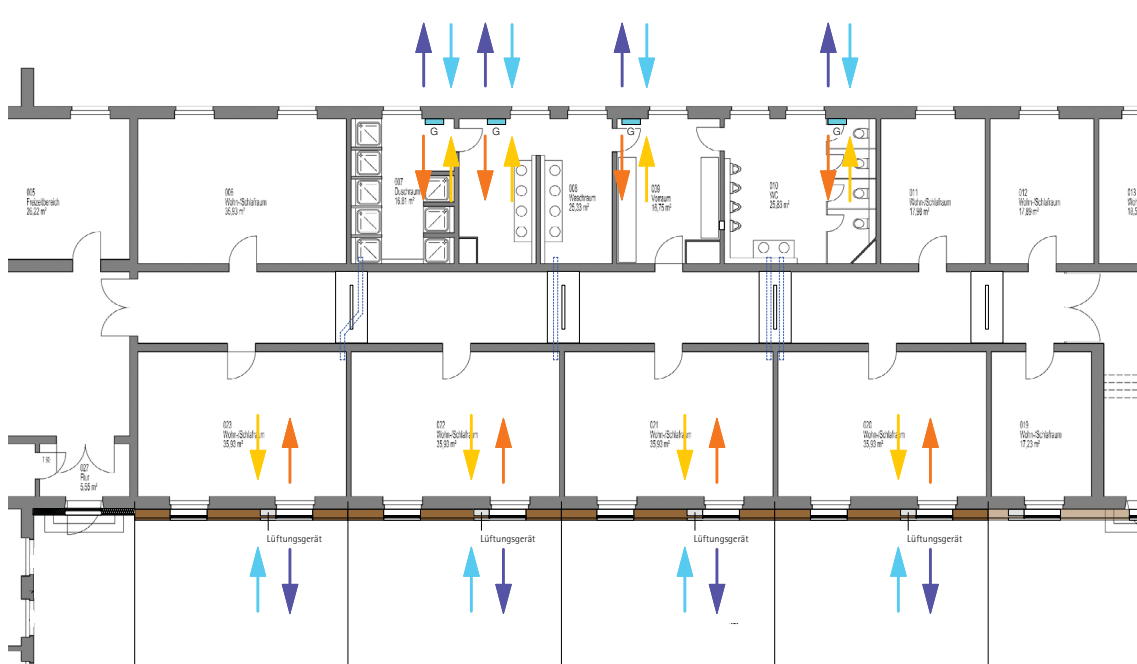


Abb. 8 Standardbetrieb mit Wärmerückgewinnung im Norden und Süden

Wenn die Luft im Kollektor eine entsprechende Temperatur aufweist, schaltet das Lüftungsgerät auf Kollektorbetrieb um. Dafür wird eine Klappe so umgestellt, dass die Luft aus dem Kollektor zur Erwärmung der Zuluft genutzt wird anstatt der Abluft aus dem Raum.

Gleichzeitig öffnet sich die Klappe im Überströmkanal, um einen Luftaustausch zwischen Nord- und Südraum zu ermöglichen. Das Lüftungsgerät in den Aufenthaltsräumen wird nun auf Überdruck und das Gerät im Nordraum auf Unterdruck betrieben. Aufgrund dessen stellt sich ein Volumenstrom zwischen Süd- und Nordraum ein. Überschüssige Wärme aus den Wohnräumen kann so den Nasszellen zugeführt werden.

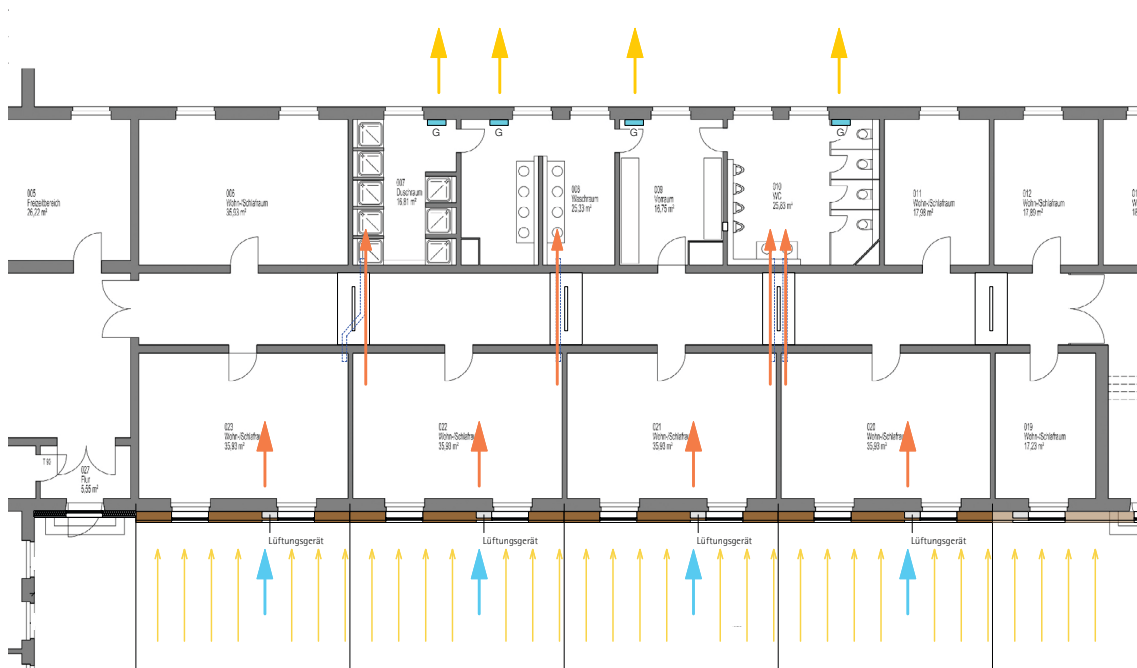


Abb. 9 Kollektorbetrieb mit Zuluftbetrieb im Süden und Abluftbetrieb im Norden

### 2.2.3 Steuerung

#### - Ziele der Steuerung

Der Sinn der Steuerung ist es, automatisch zwischen den unterschiedlichen Betriebsmodi zu wechseln, um zu jeder Zeit eine effiziente und sinnvolle Funktionsweise der Kollektorfassade zu garantieren. Dafür muss die Steuerungsautomatik auf die verschiedenen gemessenen Temperaturen reagieren, um den entsprechenden passenden Modus auszuwählen. Beeinflussende Parameter bei der Entwicklung der Steuerung sind die Effizienz der Lüftung und des Wärmetauschers, die Behaglichkeit im Wohnbereich sowie technische Aspekte wie die maximale und minimale Betriebstemperatur des Wärmetauschers.

Auf der folgenden Seite ist das Prinzip der Steuerung als Flussdiagramm dargestellt, anhand dessen sich die Abhängigkeiten der Betriebsmodi von bestimmten Parametern und die Steuerungsvorgänge ablesen lassen.

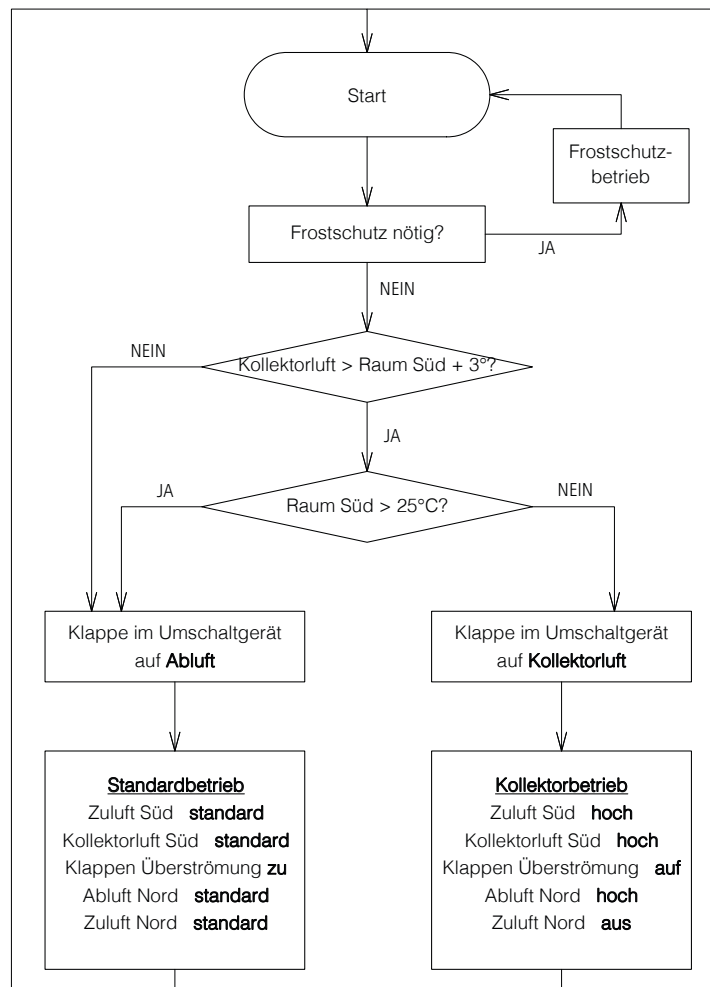


Abb. 10 Steuerungskonzept Flussdiagramm

#### - Standardbetrieb

Im Standardbetrieb laufen sowohl in den Süd- als auch in den Nordräumen die Zu- und Abluft-Ventilatoren auf Standard-Betriebsspannungen. Die Klappe im Umschaltgerät ist so eingestellt, dass die Abluft aus dem Raum mittels Ventilator durch den Wärmetauscher strömt. So wird die Energie der Abluft genutzt, um die Frischluft anzuwärmen. Da die Klappen zwischen Süd- und Nordraum geschlossen sind, findet kein Luftaustausch statt und beide Räume fungieren als getrennte Systeme.

Der Standardbetrieb ist dann aktiv, wenn die Temperatur im Kollektor nicht hoch genug ist, als dass sich eine solare Heizung des Raums lohnen würde. Dies ist der Fall, wenn sie kälter oder nur geringfügig höher ist als die Raumtemperatur ( $\text{Kollektorluft} < \text{Raum Süd} + 3 \text{ K}$ ), da ein nur geringer Wärmeüberschuss beim Erwärmen des Kanalsystems verloren geht. Wenn die Temperatur im Innenraum eine bestimmte Grenztemperatur bereits erreicht hat ( $\text{Raum Süd} > 25^\circ\text{C}$ ), läuft die Fassade ebenfalls auf Standardbetrieb, um zu hohe Innentemperaturen zu vermeiden.

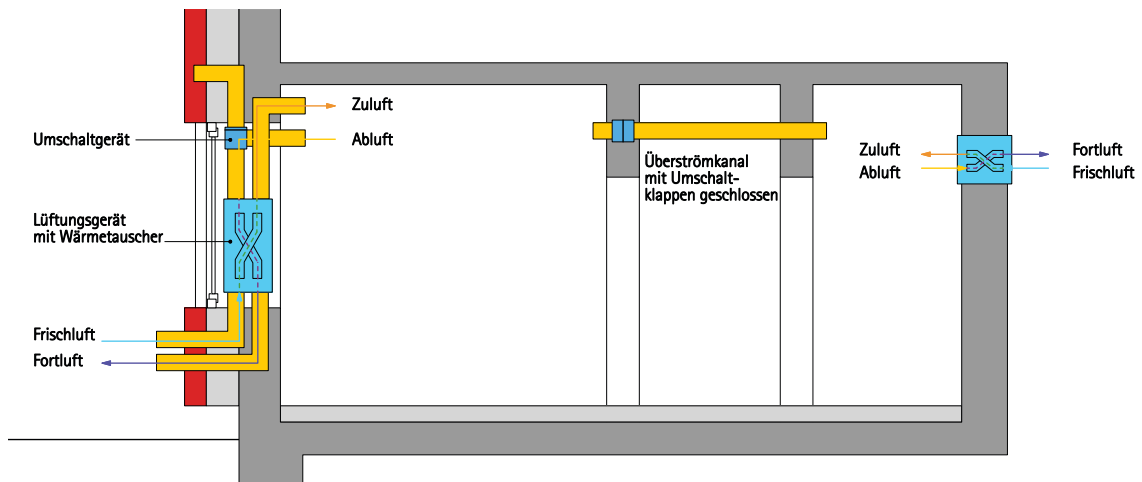


Abb. 11 Schema Standardbetrieb mit Wärmerückgewinnung

- Kollektorbetrieb

Wenn hingegen die Lufttemperatur im Kollektor hoch genug ist, lohnt sich die Nutzung der Kollektorluft zur Temperierung der Frischluft. Wenn sie 3 K höher ist als die Innenraumtemperatur, ist zu erwarten dass auch trotz etwaiger Verluste im Kanalsystem die Zuluft höher ist als die Innenraumtemperatur. Falls bei der abschließenden Abfrage über die Innenraumtemperatur die eingestellte Grenztemperatur noch nicht erreicht ist (Raum Süd < 25°C), wird durch Umstellen der Klappe im Umschaltgerät die solar erwärmte Kollektorluft anstatt der Abluft aus dem Raum dem Wärmetauscher zugeführt. Gleichzeitig wird die Klappe im Überströmkanal nach Norden geöffnet, um einen Luftaustausch zu ermöglichen.

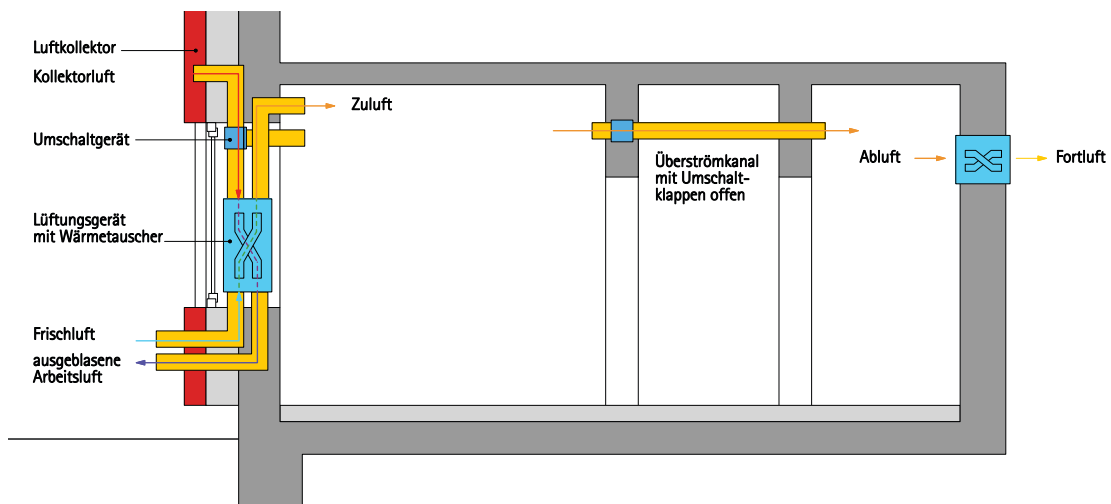


Abb. 12 Schema Kollektorbetrieb

Im Kollektorbetrieb arbeiten beide Ventilatoren im südlichen Lüftungsgerät auf hohen Betriebsspannungen, um durch große geförderte Luftvolumen eine hohe Energieausbeute zu generieren. Der Zuluft-Ventilator führt dem Raum ein möglichst großes Volumen an Frischluft zu, während der vorherige Abluft-Ventilator dann die Kollektorluft dem Wärmetauscher zuführt. Infolgedessen wird die Abluft in diesem Fall nicht über die südliche Fassade abgegeben und es entsteht somit ein leichter Überdruck im Wohnraum. Im Gegensatz dazu arbeitet das Lüftungsgerät in den Nasszellen

auf einer hohen Abluftrate, wohingegen die Zuluft komplett ausgeschaltet wird. Durch den Überdruck im Südraum und den Unterdruck im Nordraum stellt sich eine Querlüftung zwischen beiden Räumen ein, die gleichzeitig die von der Kollektorfassade erwärmte Luft von Süden nach Norden transportiert.

- Frostschutzmodus

Wenn die Außentemperatur unter einen bestimmten Wert sinkt, ist es nötig, den Wärmetauscher vor Vereisung zu schützen. Dafür kann entweder die Abluft aus dem Raum oder falls möglich die etwas wärmere Kollektorluft genutzt werden.

#### 2.2.4 Monitoring

- Messpunkte/Sensoren

Nicht nur zur Steuerung, sondern auch zur umfassenden Analyse des Projekts wurden in den einzelnen Raumgruppen verschiedene Sensoren zur Erhebung wichtiger Parameter installiert. Die Sensoren, mit denen die Raumgruppen ausgestattet wurden und die für unsere Betrachtungen und Berechnungen wichtig sind, können im folgenden Prinzipschnitt abgelesen werden. Eine komplette Messpunktliste sowie weitere Sensoren können im Teilbereich zum Monitoring der HS Rosenheim eingesehen werden.

Folgende Parameter wurden einmal allgemein erfasst:

GA Solare Einstrahlung ( $W/m^2$ )  
Te Außentemperatur ( $^{\circ}C$ )

Je einmal pro Raumgruppe wurden folgende Parameter erfasst:

Ti Innenraumtemperatur ( $^{\circ}C$ )  
T-Kol Lufttemperatur im Kollektor auf mittlerer Höhe ( $^{\circ}C$ )  
T-Aul Temperatur in Ansaugöffnung Frischluft ( $^{\circ}C$ )  
T-Fort Temperatur in Ausblasöffnung Fortluft ( $^{\circ}C$ )  
T-Ab Temperatur in Ansaugöffnung Abluft ( $^{\circ}C$ )  
T-Zu Temperatur in Ausblasöffnung Zuluft ( $^{\circ}C$ )  
Tse Temperatur im Zwischenraum Bestandswand und Fassadenelement ( $^{\circ}C$ )  
Tsi Oberflächentemperatur Innenseite Außenwand ( $^{\circ}C$ )  
EZ.W Arbeit Lüftungsgerät gesamt (Wh)  
EZ.P Leistung Lüftungsgerät gesamt (W)  
EZ.U Spannung Lüftungsgerät gesamt (V)  
EZ.I Stromstärke Lüftungsgerät gesamt (A)  
K-KOL Betriebszustände Klappen im Umschaltgerät Lüftungsbaustein

Durch die Hochschule Rosenheim wurden auch  $CO_2$ -Konzentration und Luftfeuchte zur Überwachung der Luftqualität erfasst. Vor allem zur Überprüfung der Betriebsmodi für die Steuerung wurden die Betriebszustände der Klappen im Lüftungselement und im Überströmkanal erfasst.

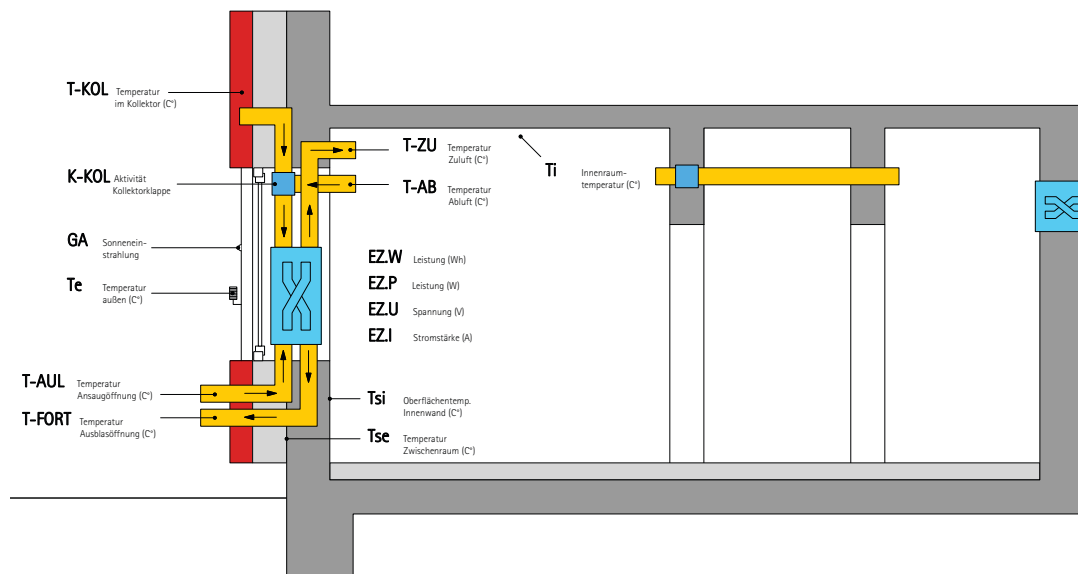


Abb. 13 Schemaschnitt mit Messpunkten

#### - Auswertung Daten

Die Sensoren sind in zwei Gruppen eingeteilt: Ein Teil der Sensoren wurde von B&O selbst installiert, hauptsächlich für die Steuerung und die Überwachung ihrer Funktionsfähigkeit. Diese Sensoren sind unabdingbar für eine funktionierende Steuerung und müssten so oder in leicht abgewandelter Form bei zukünftigen Projekten installiert werden. Der andere Teil der Sensoren wurde durch die HS Rosenheim bereit gestellt, im Hinblick auf ein ausführliches Monitoring zur Kontrolle und Beurteilung des Betriebs der Kollektorfassade. Daraus ergeben sich teilweise Überschneidungen und die doppelte Erfassung einiger Parameter, was eigentlich so nicht notwendig gewesen wäre.

Die Lüftungsgeräte im Norden und Süden sind zur Steuerung mittels M-BUS gekoppelt und zusätzlich mit Internetanbindung ausgestattet. Alle Sensoren sind entweder analog oder digital mit einem Ethernet-Controller verbunden, der die Daten umrechnet und letztendlich über einen Switch auf dem B&O-Gelände automatisiert an die HS Rosenheim übermittelt. Anschließend werden die Daten in eine MySQL-Datenbank geschrieben, auf die das zum Monitoring verwendete Programm MoniSoft zugreifen kann.

Ausführlichere Angaben zum Monitoring können im Teilbericht D der Hochschule Rosenheim nachgelesen werden.

#### 2.2.5 Details Fassadenelemente

##### - Holzrahmenelemente

Die Grundkonstruktion der Kollektorfassade stellen wärmegeämmte Holzständerelemente aus stehenden Kanthölzern, sowie Rähm und Schwellenholz dar. In Abstimmung mit der ausführenden Firma wurde vorab die Elementtiefe festgelegt. Aus Kostengründen wurden bei den Stehern Standardmaße gewählt, sodass diese Maße letztendlich die Tiefe von 240mm bei der Konstruktion bestimmten.



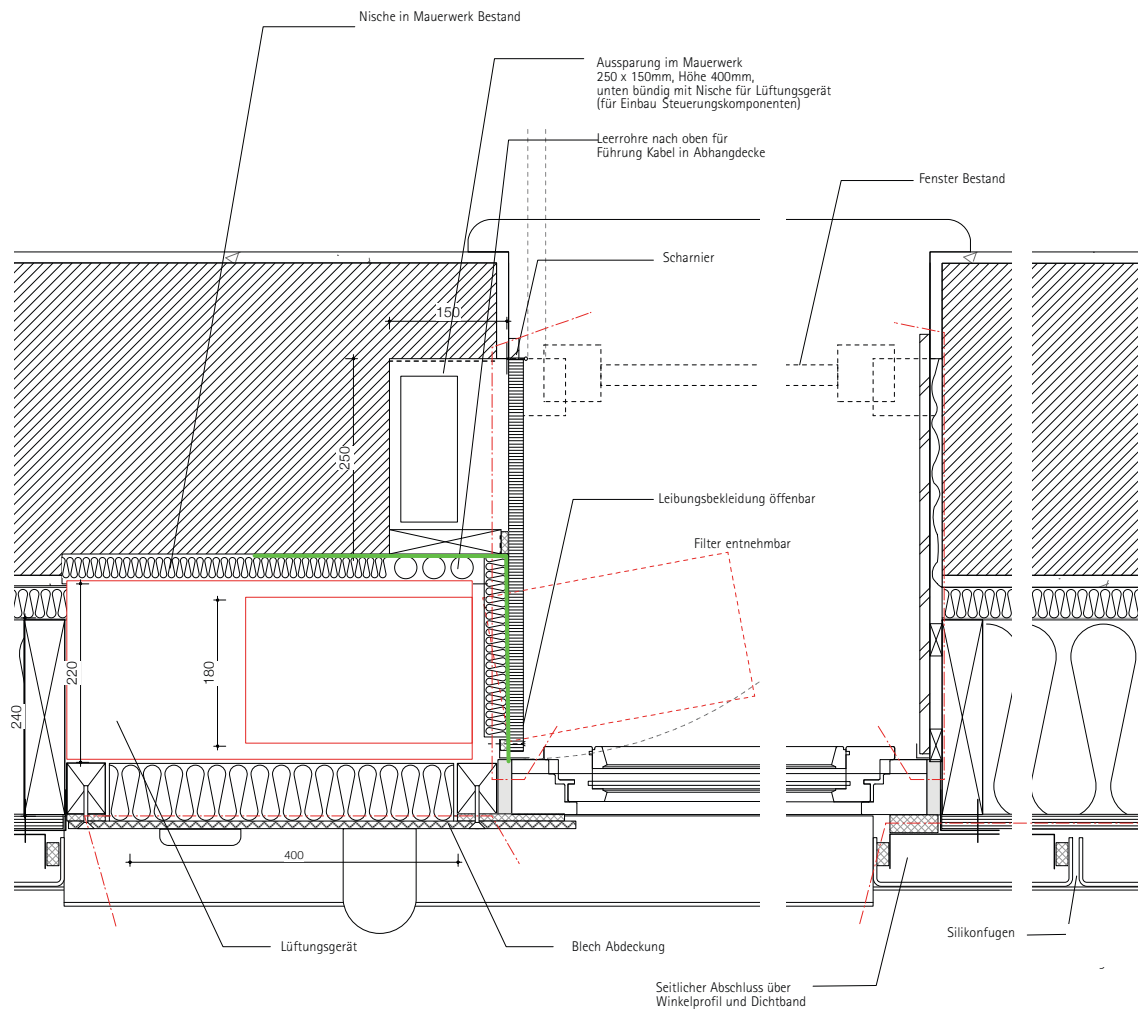


Abb. 14 Horizontalschnitt Fenster

#### - Fenster

Für die Fenster war vor allem hinsichtlich der Qualität der Bestandsfenster früh klar, dass diese komplett entfernt und durch neue ersetzt werden sollten, die man dann bereits im Werk in die Holzständerelemente einbauen könnte. Dies hat vor allem den Vorteil, dass die Fenster dann im Hinblick auf Wärmebrücken sinnvoll in der Dämmebene sitzen und außerdem auch deutlich einfacher und sauberer abgedichtet werden können. Die tiefere Laibung innen erlaubt es außerdem, das Lüftungselements von innen beispielsweise für den Filterwechsel leicht zu erreichen.

Insgesamt reduziert dies vor allem auch die Arbeit vor Ort in erheblichem Maße, lediglich einige Andichtungsarbeiten, sowie die Verkleidung der Laibungen müssten dann noch vor Ort vorgenommen werden.

#### - Wärmeschutz

Wichtiger Aspekt der Kollektorfassade ist neben der Lüftung auch die Verbesserung der energetischen Eigenschaften der Gebäudehülle; Die Anforderungen der EnEV für Gebäudesanierungen

mussten eingehalten werden. Geringere Transmissionsverluste durch die Außenfassade und gleichzeitig eine höhere Dichtigkeit sind außerdem Voraussetzungen für eine effiziente Nutzung der Wärmerückgewinnung und des Luftkollektors.

Für die Fassadenelemente wurde dafür entsprechend der Konstruktionstiefe eine 24 cm starke Dämmschicht geplant. Mit einem U-Wert von 0,15 W/m<sup>2</sup> K werden die Anforderungen der EnEV 2014 an die Außenwand deutlich unterschritten.

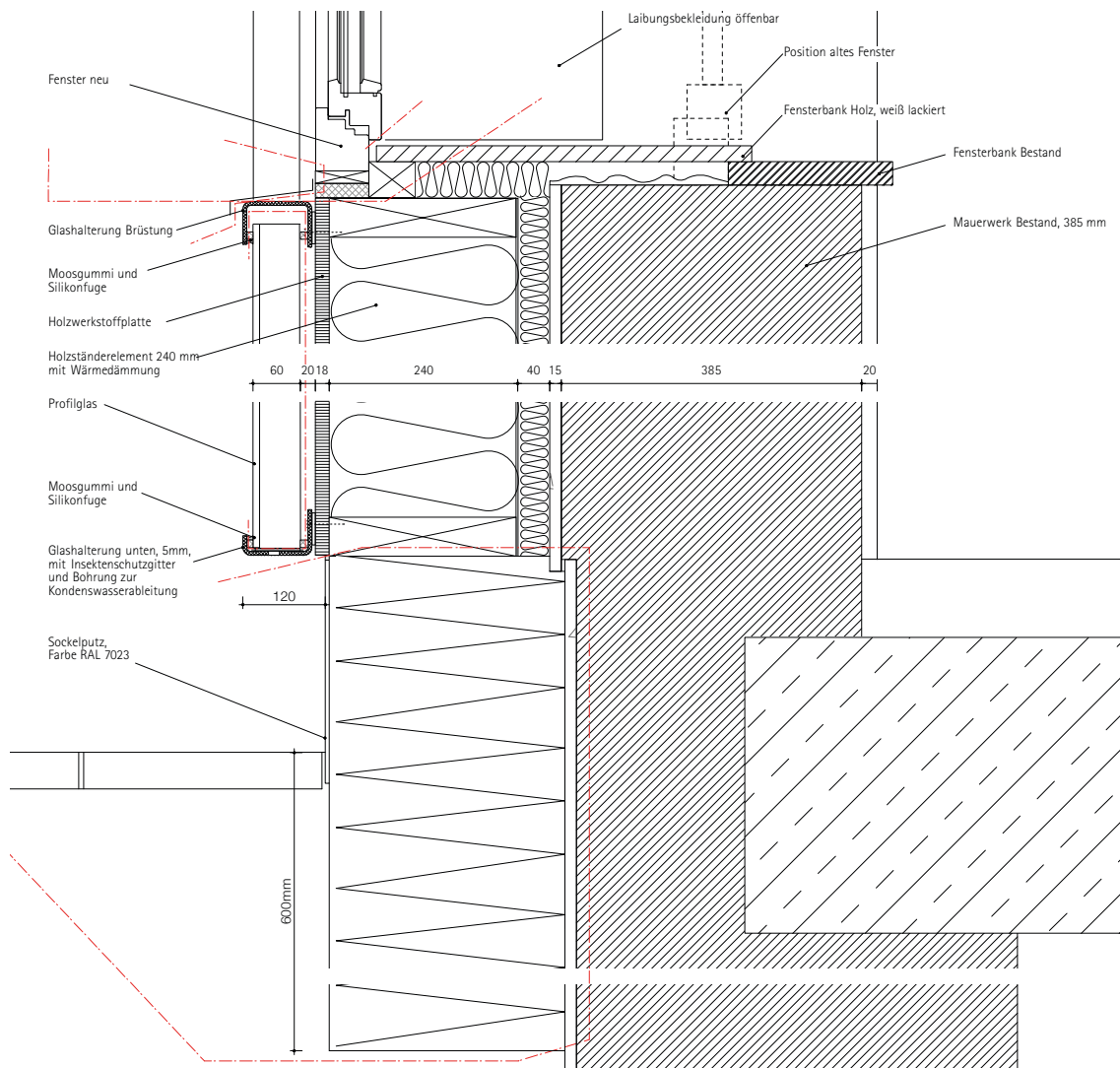


Abb. 15 Detail Fenster unten

#### - Luftkollektor

Aus den im Teilbericht 3 bereits erläuterten ästhetischen und bautechnischen Gründen soll nun Profilglas anstatt Floatglas verwendet werden. Gewählt wurde Profilglas (Erläuterung zur Produktauswahl siehe „3.2.7 Fassadengestaltung“) mit 60 mm breiten Flanschen in drei verschiedenen Breiten (230, 260 und 330 mm).

Im Vergleich zu den Testelementen soll die Glashalterung deutlich vereinfacht und somit für die wirtschaftliche Vorfertigung und Montage optimiert werden. Gehalten werden die Profilgläser

oben und unten von u-förmigen Stahlprofilen aus gekanteten Blech, die werkseitig direkt auf die Holzständerkonstruktion geschraubt werden. Die Verschraubung erfolgt in die horizontalen Leisten der Holzelemente unter Beilegung von Moosgummiprofilen.

In die U-Profile muss das Glas unter Beilegung von Kunststoffprofilen nur eingestellt werden. Silikonfugen oben und unten, sowie zwischen den einzelnen Glasprofilen stellen eine dauerelastische Abdichtung des Luftkollektors her. Das untere Stahlprofil ist außerdem mit Bohrungen und Insektenschutzgitter zur Belüftung und Kondenswasserableitung versehen.

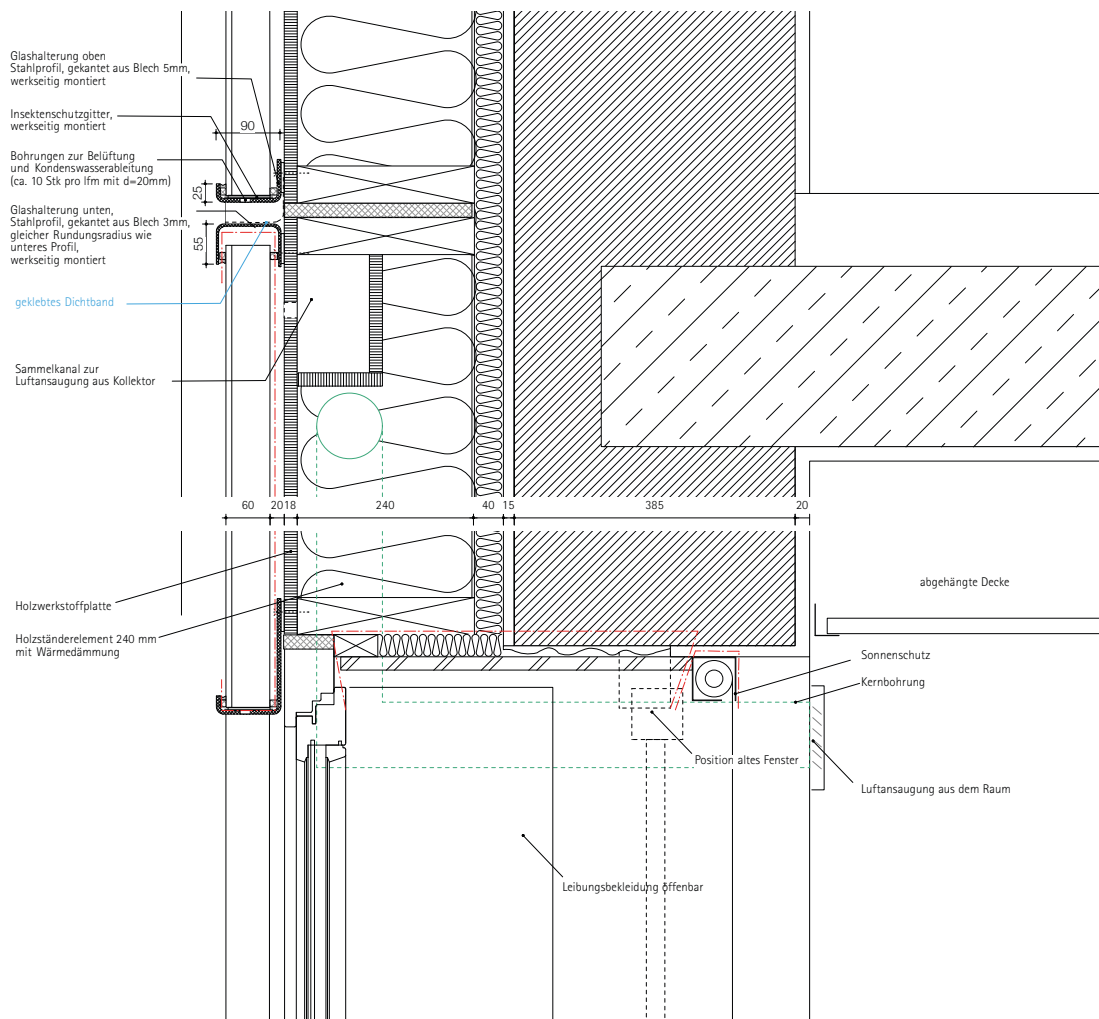


Abb. 16 Detail Fenster oben

## 2.2.6 Technische Ausstattung

Ziel der Planung war es, die technischen Installationen so in die Fassadenelemente zu integrieren, dass sie mit den Holzständerelementen im Werk vorgefertigt werden können und möglichst wenige, einfache Anschlüsse zum Installieren vor Ort besitzen. Der Lüftungsbaustein befindet sich jeweils neben einem Fenster und enthält den Wärmetauscher inklusive vorgeschaltetem Umschaltgerät sowie die Auslässe für Frisch- und Fortluft. Vorteil hierbei ist, dass das Lüftungsgerät auf diese Weise einfach über eine öffnbare Klappe in der Fensterlaibung zugänglich ist, um beispielsweise den Filter zu wechseln. Bei Bedarf lässt sich die Blechblende außen entfernen, um auf das

komplette Lüftungsgerät zugreifen zu können.

An den Wärmetauscher schließen Lüftungsleitungen für die Abluft aus dem Raum, die Zuluft und die Kollektorluft an. Bei Zu- und Abluft gibt es jeweils zwei Auslässe im Raum, sodass immer zwei DN90-Rohre über ein spezielles Profil zu einem DN126-Rohr zusammengefasst und an den Wärmetauscher angeschlossen werden. Die Kollektorluft wird über den Sammelkanal oben im Holzständerelement und über ein kurzes Rohrstück an den Wärmetauscher angeschlossen. Ein Umschaltgerät wird zwischen Wärmetauscher und Abluft, bzw. Kollektorluft geschaltet, um bei Bedarf entweder die eine oder die andere dem Wärmetauscher zuführen zu können.

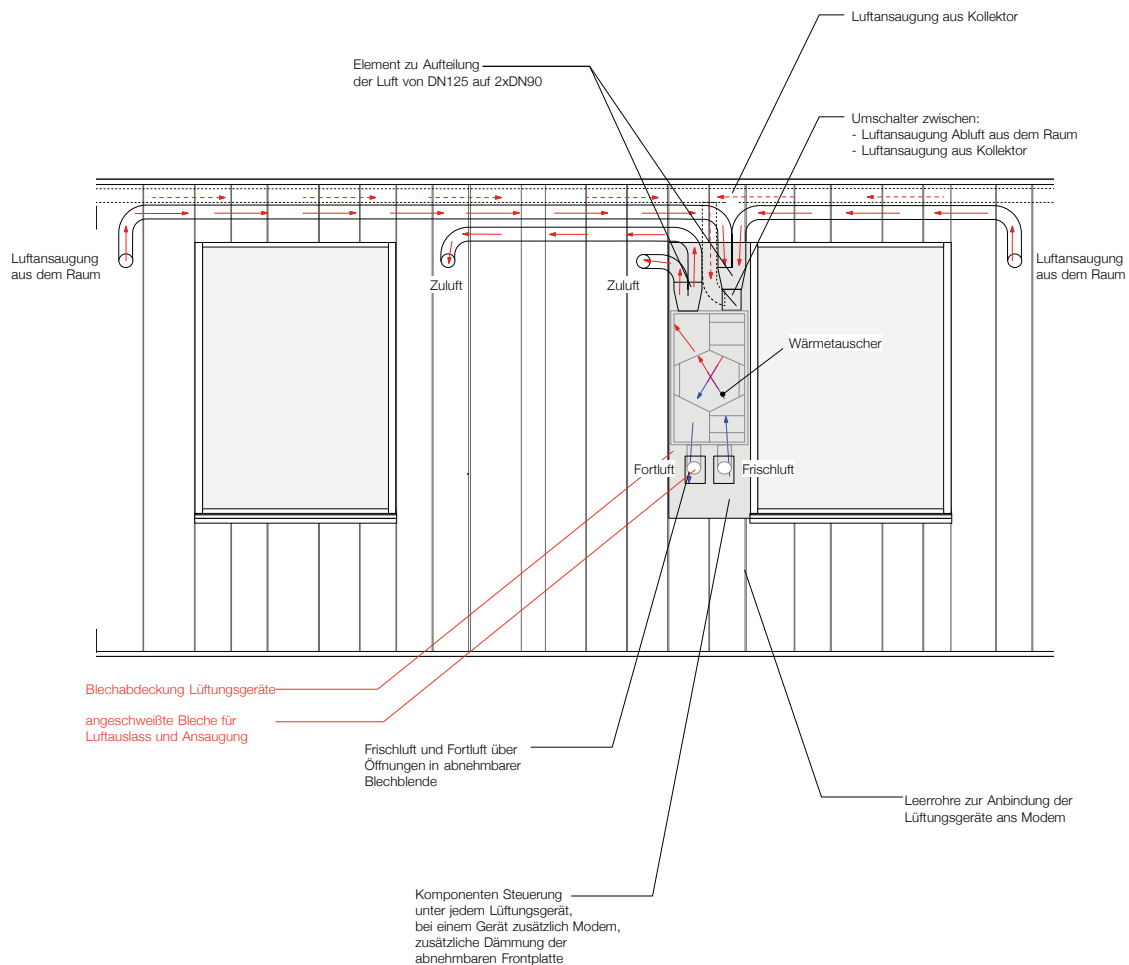


Abb. 17 Ansicht Fassade mit Lüftungselementen

Fortluft- und Frischluftauslass sitzen über kurze Rohre mit dem Wärmetauscher verbunden unten im Lüftungsbaustein. Über spezielle Auslässe wird ein Kurzschluss zwischen beiden Luftströmen verhindert.

Am oberen Abschluss der Elemente befindet sich bei Nutzung als Kollektorelement ein Sammelkanal, durch den die Luft aus den Glaszwischenräumen dem Wärmetauscher zugeführt wird. Über schmale Schlitze in der äußeren Beplankung wird die Luft aus den Kollektoren in den Kanal gesaugt. Um über die gesamte Länge des Kanals eine gleichmäßige Luftansaugung zu gewährleisten, müssen die Schlitze unterschiedliche Breiten haben. Je weiter entfernt vom Ventilator, desto größer muss der Schlitz und infolgedessen desto geringer muss der Luftwiderstand sein,

damit nicht nur direkt neben dem Ventilator angesaugt wird. Da diese Parameter vorher allerdings nicht berechnet werden konnten, wurde ein System entwickelt, mit dem sich die Schlitzbreite im Nachhinein noch manuell verändern ließ. Dafür wurde ein Winkel über Langlochschaublen am Schlitz befestigt, der bei Bedarf den Schlitz mehr oder weniger schließen konnte.

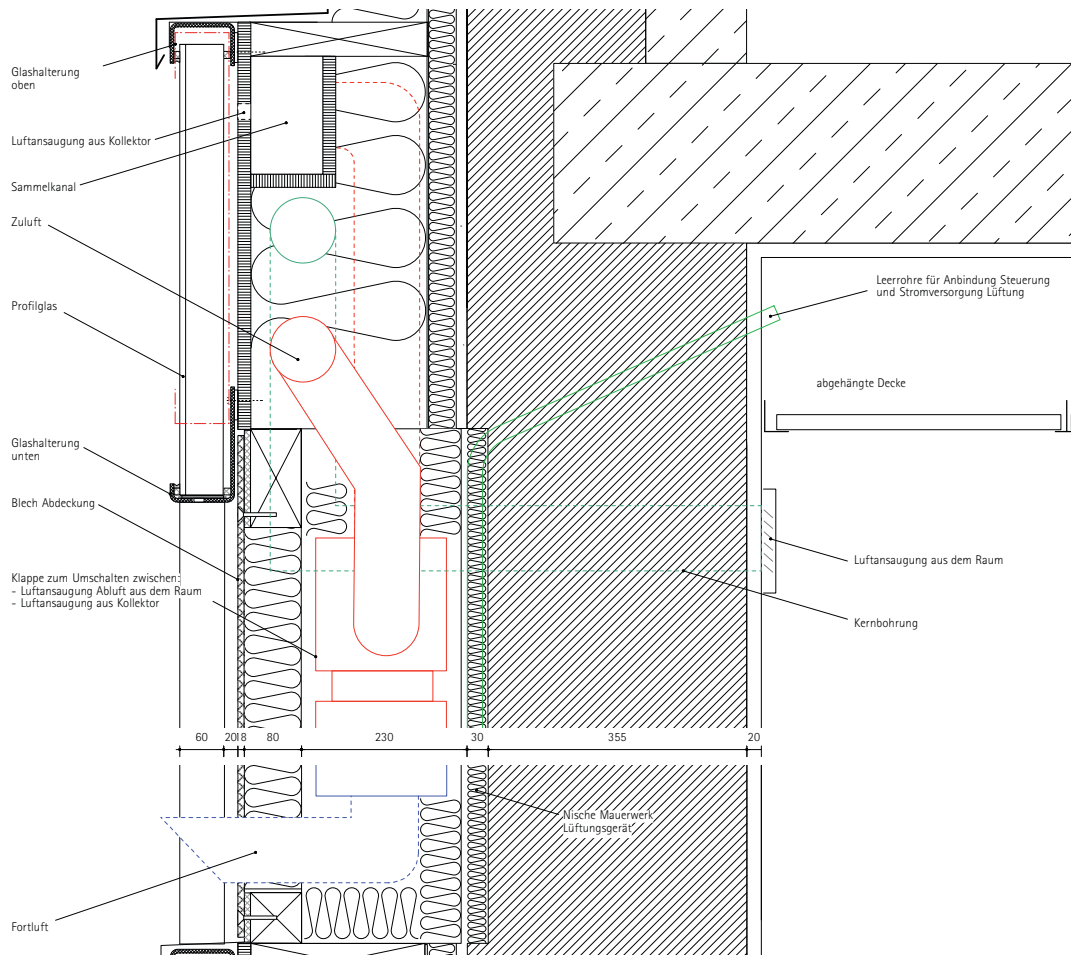


Abb. 18 Detail Schnitt Lüftungskasten

Wichtiges Kriterium bei der Auswahl der Geräte war die Größe der Bauteile, die durch die vorher bereits festgelegte Tiefe der Holzständerwände beschränkt wurde. Beim Lüftungsgerät erwies es sich als problematisch, ein so flaches Gerät zu finden, das mit Dämmung die 240 mm der Holzständerkonstruktion nicht überschreitet. Letztendlich wurde mit der B&O-Gruppe ein Lüftungsgerät entwickelt, das durch seine geringe Einbautiefe von 22 cm auch in den Nordräumen in der Abhangdecke verwendet werden konnte.

Trotzdem musste im Bereich des Lüftungsgeräts eine etwa 25 mm tiefe Nische in der Bestandswand hergestellt werden, um zusätzlich noch eine Dämmschicht unterzubringen und genügend Toleranzen zur Bestandswand zu haben. Mit tieferen Stehern in den Holzrahmenelementen oder einer stärkeren Dämmschicht zwischen Elementen und Bestand hätte man auf diese Nische verzichten können. Die Nische war im Pilotprojekt akzeptabel, prinzipiell sind jedoch Stegräger zu verwenden, da sie die nötige Tiefe herstellen und zusätzlich die Wärmebrücken im Ständerwerk reduzieren können.



Abb. 19 Stegträger Finnjoist Metsä Wood (Foto: <http://www.bischoff-schaefer.de/Stegtraeger.204.0.html>)

Für die Steuerungskomponenten war es ebenfalls notwendig, eine kleine Nische im Mauerwerk zu erstellen. Dies hat vor allem damit zu tun, dass die gewählten technischen Komponenten für den Einsatz im Innenraum gedacht sind und außerdem so auch komfortabler von innen zugänglich sind. Wenn das Fenster allerdings in einer anderen Einbausituation beispielsweise höher ist, könnte man diese Komponenten unter dem Lüftungsgerät unterbringen und dazwischen dämmen und somit auf die Nische verzichten.

Für die Zu- und Abluft im Raum müssen Kernbohrungen sowie Bohrungen für Leerrohre zur Anbindung der Steuerung erstellt werden. Über Steckverbindungen kann die Lüftung dann von innen angeschlossen werden.

### 2.2.7 Fassadengestaltung

#### - Farbigkeit

Bei einem großflächigen Einsatz der Kollektorfassade im gebauten Umfeld ist die Farbgebung - auch in Hinblick auf die Akzeptanz seitens der Nutzer - ein entscheidender Faktor. Verschiedene Farben, sowie eine grafische Gestaltung, beispielsweise mit Streifen oder Farbfeldern sind denkbar. Beim Profilglas kann man ebenfalls zwischen verschiedenen Oberflächen wählen, um in Verbindung mit der dahinter liegenden farbigen Fläche unterschiedliche Erscheinungsbilder zu erzielen.

Für das Fußballinternat wurden verschiedene Farben und Farbkombinationen für die farbige Gestaltung der Holzrahmenelemente getestet, wobei die Grundtöne aufgrund des Gesamtkonzepts der Anlage in den Bereichen grau und rot lagen. Da es sich um eine pädagogische Einrichtung handelt, wurden auch diverse Varianten mit Streifen erarbeitet, um eine lebhaftere Fassade zu erreichen. Anhand von Ansichten und Fotomontagen wurden die unterschiedlichen Varianten untersucht.

Letztendlich entschied man sich für eine einfarbige Ausführung, da der Bauherr sich einerseits eine ruhige Fassade wünschte, und andererseits auch um die Kosten durch eine Verringerung des Arbeitsaufwandes zu senken. Die Verwendung von unterschiedlich breiten Glasprofilen sorgt trotzdem für eine Belebung der Fassadenfläche. Als Farbton wurde ein sattes Rot gewählt, um auf dem Parkgelände einen Farbakzent zu setzen.

Die Fensterrahmen, sowie die Abdeckungen der Lüftungsgeräte und die Glashalteleisten sind in neutralen, mittleren Grautönen gehalten, um in der Gesamterscheinung eher in den Hintergrund zu treten.



Abb. 20 Ansichten Farbvarianten

- Profilglas

Anhand von kleinen Testelementen wurden unterschiedliche Glasarten bei verschiedenen Lichtverhältnissen geprüft. Vor allem im Zusammenhang mit der farbigen Gestaltung der rückseitigen Kollektorverkleidung spielen Oberflächenbeschaffenheit, Reflexionsgrad und Farbe des Profilglases eine entscheidenden Rolle.



Abb. 21 Testelemente Profilglas und farbige Beschichtung

Nach der Entscheidung des Bauherren für ein sattes Rot kam der Eigenfarbe des Profilglases eine größere Bedeutung zu. Floatglas besitzt grundsätzlich einen leichten Grünschimmer. Da die Gläser verschiedener Hersteller unterschiedliche Tönungen aufweisen, was es nötig, anhand von Mustern zu vergleichen und auszuwählen. Dies war besonders im Zusammenhang mit der roten Absorberfarbe wichtig. Eine Alternative wäre weißes, eisenarmes Profilglas, welches aber deutlich teurer ist als die Standardausführung. Hinzu kommt, dass dieses nicht immer auf Lager ist, weil es nur unregelmäßig und nur in bestimmten Mengen produziert wird. Dies hätte dazu führen können, dass es nicht möglich gewesen wäre, das Profilglas überhaupt oder in der gewünschten Menge zu bekommen, geschweige denn in den unterschiedlichen Profillbreiten. Für eine Sonderproduktion war das Modellvorhaben zu klein.

Grundsätzlich stehen unterschiedliche Oberflächenstrukturen zur Verfügung, welche unterschiedliche Effekte in Bezug auf die Gestaltung der Fassadenelemente dahinter erzeugen und in verschiedenen Einbausituationen unterschiedlich gut geeignet sind. Man entschied sich für eine Oberfläche, die leicht strukturiert ist, und somit einerseits konstruktive Elemente hinter dem Glas weniger sichtbar macht aber andererseits auch genügend Farbe durchlässt.

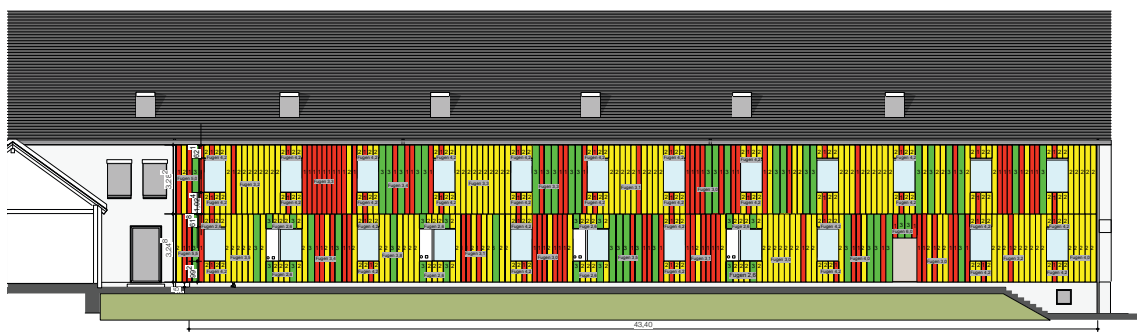


Abb. 22 Glasverlegeplan



Da das Fassadensystem darauf ausgelegt ist, die vorhandenen Fensteröffnungen zu nutzen, schränkt dies die Verteilung der Glasprofile auf der Fassade stark ein. Beim Aufmaß ergab sich noch dazu, dass - wie bei vielen Sanierungsobjekten - die Abstände zwischen den Fenstern, sowie die Fensterbreiten selbst leicht variierten. Da das Profilglas längs nur schwer zu teilen ist und dies ästhetisch auch nicht sinnvoll ist, muss man mit ganzen Profilen auskommen.

Aus diesen Gründen wurde ein System entwickelt, die Flächen möglichst effizient mit Profilglas zu belegen. Ergebnis ist die Kombination von drei unterschiedlichen Glasbreiten: 22, 26 und 32 cm. Mittels einer Excel-Tabelle wurden sämtliche Kombinationsmöglichkeiten der Glasprofilbreiten ermittelt und nach Gesamtbreite sortiert. Bei bekannter Breite des Elements konnte dann anhand der Liste eine passende Kombination von Glasprofilen ausgewählt werden, die der gewünschten Breite am nächsten kam. Über eine geringfügige Varianz der Fugenbreite lässt sich dann die erforderliche Breite exakt erreichen. Die Untersuchung der Kombinationsmöglichkeiten ergab, dass ab ca. 100 cm nahezu jede beliebige Breite mit den drei gewählten Profilen erreicht werden kann.

Anzahl 23 cm		Anzahl 26 cm		Anzahl 33 cm		Fugen	Gesamtbreite
4	928	0	0	0	0	9	928
3	696	1	262	0	0	9	958
2	464	2	524	0	0	9	988
0	0	0	0	3	993	6	993
1	232	3	786	0	0	9	1.018
3	696	0	0	1	331	9	1.027
0	0	4	1048	0	0	9	1.048
2	464	1	262	1	331	9	1.057
1	232	2	524	1	331	9	1.087
0	0	3	786	1	331	9	1.117
2	464	0	0	2	662	9	1.126
1	232	1	262	2	662	9	1.156
5	1160	0	0	0	0	12	1.160
0	0	2	524	2	662	9	1.186
4	928	1	262	0	0	12	1.190
3	696	2	524	0	0	12	1.220
1	232	0	0	3	993	9	1.225
2	464	3	786	0	0	12	1.250
0	0	1	262	3	993	9	1.255

Abb. 23 Auszug Tabelle Glasverteilung

Bei der Auswahl der Profile wurde zudem darauf geachtet, nach Möglichkeit viele unterschiedliche Bahnbreiten zu nutzen, um eine Durchmischung zu erreichen. Dies kommt zudem der gewünschten Ästhetik der Fassade entgegen - vor allem hinsichtlich der monochromen Ausführung - indem es einen lebendigeren und weniger technischen Eindruck schafft.

Für die Ausführung wurde anschließend ein Farbcode genutzt, bei dem eine Farbe für eine bestimmte Glasbreite steht. Auf diese Weise sind auch für die Glasbaufirma die Bahnen ohne Probleme zu verlegen.

## 2.2.8 Brandschutz/Schallschutz

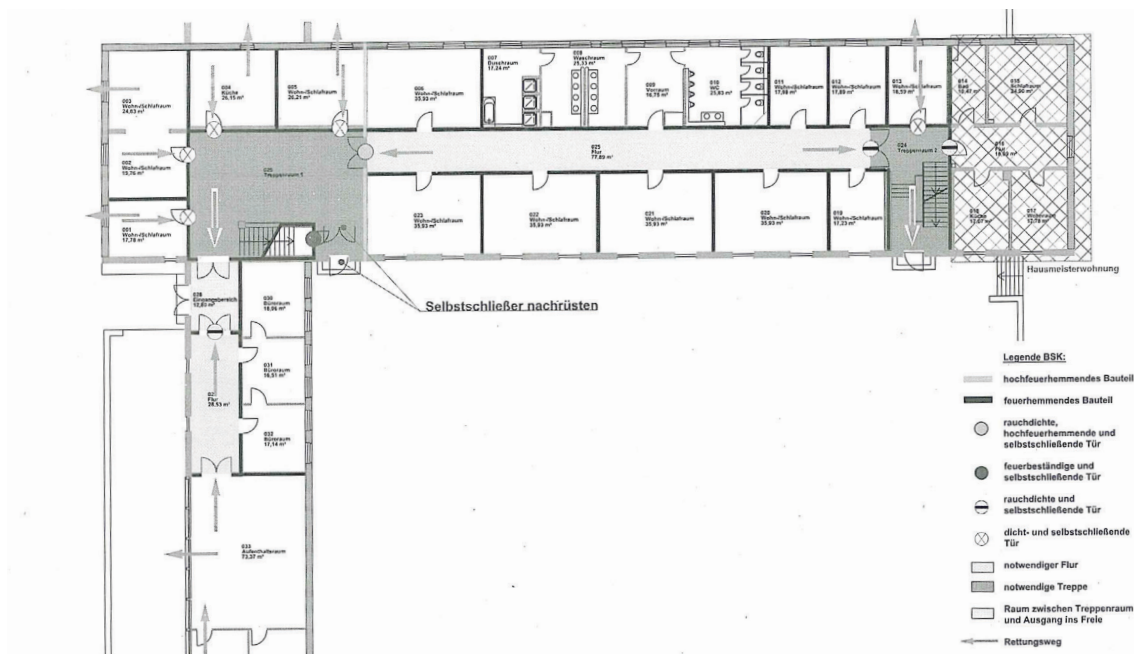


Abb. 24 Ausschnitt Brandschutznachweis

### - Überströmkanäle

Die besondere brandschutztechnische Situation im Internat erforderte entsprechende, teils aufwändige Maßnahmen, die im herkömmlichen Wohnungsbau normalerweise nicht oder nicht in solchem Ausmaß vonnöten sind. Wie im Brandschutznachweis zu erkennen ist, sind die tragenden Flurwände feuerhemmend. Da in Wohnheimen jedes Zimmer eine unabhängige Wohneinheit bildet, müssen auch die Zimmertrennwände feuerhemmend ausgeführt werden.

Da das Lüftungskonzept ein Überströmen der Luft von den Aufenthaltsräumen im Süden zu den Nasszellen im Norden vorsieht, wurden diese über den Flur mittels Überströmkanälen verbunden. Aufgrund der Durchdringung der F30-Flurwände mussten die Kanäle mit Brandschutzklappen ausgestattet werden.

In einer normalen Geschosswohnung könnte man auf die aufwändige Installation der Kanäle verzichten und auf Türschlitze, sprich eine etwas größere Spalte zwischen Türblatt und Fußboden, oder wenn nötig auf Überströmöffnungen zurückgreifen, um die gewünschte Querlüftung zur Weitergabe der erwärmten Luft in die Nordräume zu erzeugen.

### - Brandschutz

Ein besonderes Augenmerk bei der Planung einer vorgehängten Fassade ist auf die Unterbindung der Ausbreitung von Feuer und Rauch zwischen den einzelnen Nutzungseinheiten oder Wohnungen über die Fassadenelemente oder die Zwischenräume des Profilglases zu legen.

In konventionellen Wohngebäuden bildet jede Wohnung brandschutztechnisch gesehen eine Einheit, sodass auch raumübergreifende Maßnahmen möglich sind. Das Einblasen der vorgewärmten Luft aus einem Lüftungsgerät könnte somit auch in zwei getrennte Räume über zusätzliche Lüftungsleitungen erfolgen.

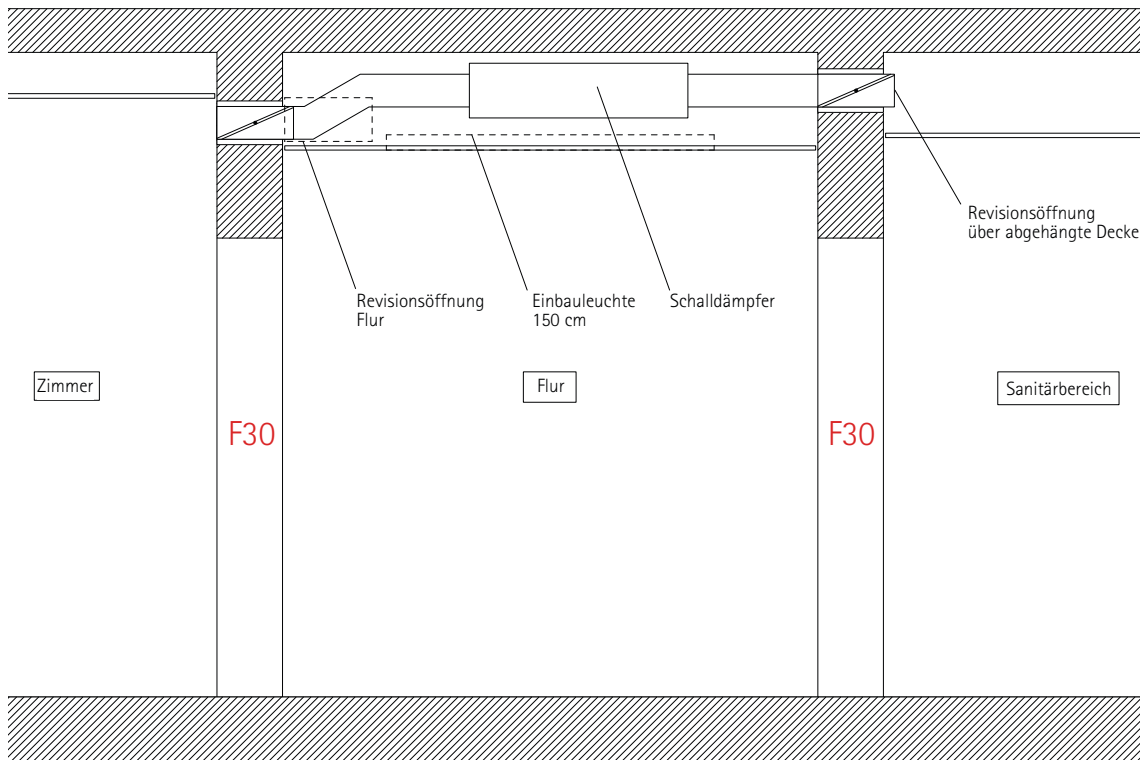
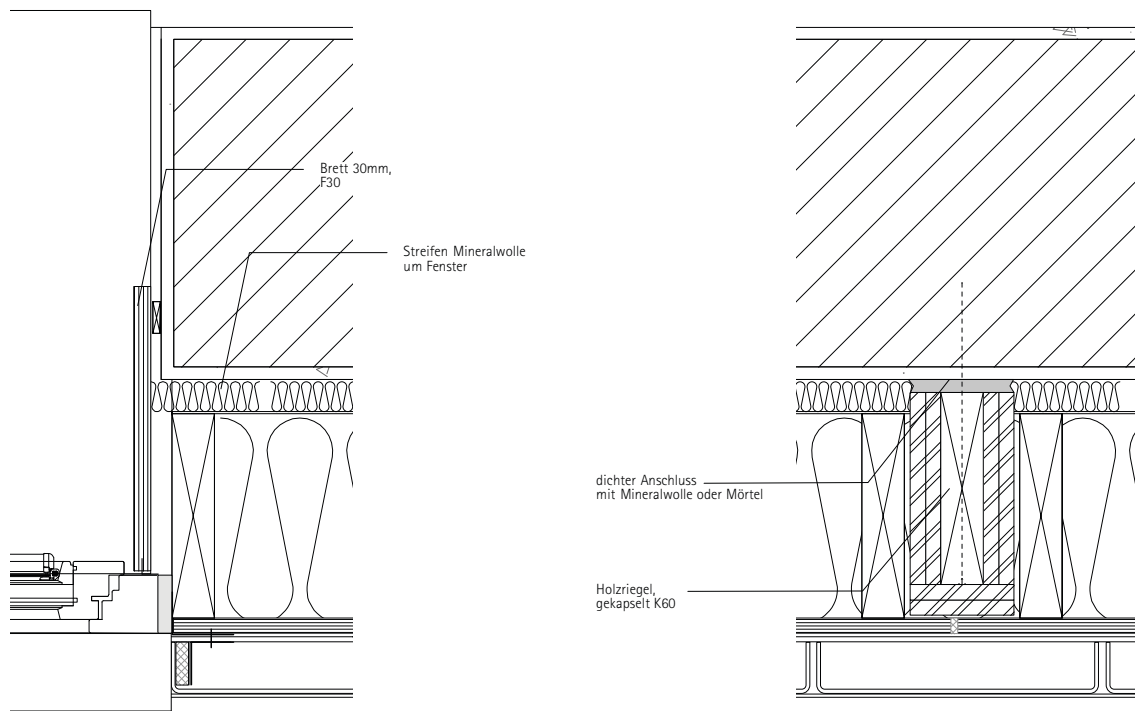


Abb. 25 Schnitt Flur mit Überströmungskanal

In der vorliegenden Situation, bildet wie vorher erwähnt jedes Zimmer eine eigene Nutzungseinheit, für die jeweils ein separates Lüftungsgerät vorgesehen werden muss. Anhand dessen wurde die Kollektorfläche in einzelne, voneinander abgeschottete Abschnitte aufgeteilt, um eine Ausbreitung von Rauch und Feuer von Zimmer zu Zimmer über die Fassade zu verhindern.



Abb. 26 Brandschutzkonzept Fassade



Abschottung F30 um Fenster  
(Elemente ohne Lüftung)

Abschottung bei Wand F60  
anstelle einer Brandwand

Abb. 27 Details Brandschutz

Im Modellvorhaben müssen die Brandwände im Gebäude über die komplette Fassadenhöhe durch Herstellung von F60-Schottungen in den Holzständerelementen ergänzt werden. Dafür wird ein Holzriegel mit Gipsfaserplatten nach Holzbaurichtlinie für hochfeuerhemmende Bauteile verkleidet. Dort wo keine Kollektorelemente installiert sind, sollen F30-Laibungsbretter in den Fenstern verbaut werden, um ein Überspringen von Feuer und Rauch in die Zimmer zu verhindern.

#### - Schallschutz

Besonders im Wohnungsbau ist einem guten Schallschutz bei der Planung vorgehängter Fassaden Rechnung zu tragen, um die Übertragung von Körperschall über die Fassadenelemente oder Telefonieeffekte über die Zwischenräume zu vermeiden.

Da bei der Kollektorfassade wie vorher erwähnt wurde, je ein Fassadenelement mit einem Lüftungsgeschoss pro Nutzungseinheit installiert werden muss, wird man den Anforderungen an den Schallschutz gerecht. Die Elemente sind voneinander abgeschottet, sodass kein Schall von Element zu Element übertragen werden kann.

### 2.2.9 Randbereiche

#### - Fensterlaibungen

Für die Ausführung der Fensterlaibungen und somit den Anschluss der Kollektorfassade an den Bestand gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Generell können über die Laibungsverkleidungen Toleranzen ausgeglichen werden, die vor allem bei der nie ganz exakten Geometrie der Fensterlai-

bungen auftreten.

Eine ästhetisch anspruchsvolle Lösung wäre beispielsweise eine umlaufende Laibung aus Massivholz oder Holzwerkstoffplatten, die gleichzeitig als Sitznische genutzt werden könnte. Die Revisionsöffnung für den Filter und die Steuerungskomponenten könnte dann fast unsichtbar integriert werden. Letztlich entschied man sich jedoch für eine kostengünstigere Verkleidung aus weiß gestrichenem Gipskarton mit einer herkömmlichen Fensterbank.

#### - Sockel

Der Sockel kann je nach Gesamtkonzept unterschiedlich ausgeführt werden. Verschiedene Blechabdeckungen, was einen etwas technischeren Eindruck erzeugt, oder WDVS, was sich eher an konventionellen Putzfassaden orientiert, sind denkbar. Beim Modellvorhaben wurde ein WDVS gewählt, um den Sockel an die Gestaltung der restlichen Fassade anzugleichen. Die Putzfarbe wurde entsprechend ausgewählt. Die zusätzliche Dämmung komplettiert außerdem die neue Gebäudehülle, indem die Dämmung ein Stück an der Kelleraußenwand heruntergeführt wird.

#### - Dach und Gauben

Beim Anschluss der Kollektorfassade spielt vor allem die Entwässerung des Dachs und somit die Lage der Dachrinne und der Fallrohre eine entscheidende Rolle. Der geringe Dachüberstand soll entfernt werden, um einen sinnvolleren oberen Anschluss an die Kollektorelemente herstellen zu können. Da die Vorderkante der Außenwand durch die Fassadenelemente nun deutlich weiter vorne sitzt, muss auch die Regenrinne dementsprechend weiter außen sitzen. Man entschied sich, diese in die Ebene der Elemente zu legen anstatt davor, damit diese von unten weniger sichtbar ist. Die Dachfläche wird dafür entsprechend ergänzt.

Die Lage des Regenfallrohrs ist in diesem Zusammenhang ein wichtiger Faktor. Ursprünglich war es geplant, das Fallrohr in die Kollektorebene zu legen (siehe Abb. 28), damit es von außen weniger in Erscheinung tritt. Dies ist möglich, allerdings ist es dann sinnvoll, das Fallrohr bereits im Werk in die Elemente zu integrieren und die restlichen Anschlüsse vor Ort zu machen. Letztlich entschied man sich jedoch aus Gründen der Erreichbarkeit und Wartung, die Fallrohre wie in Abbildung 29 vor die Fassade zu setzen.

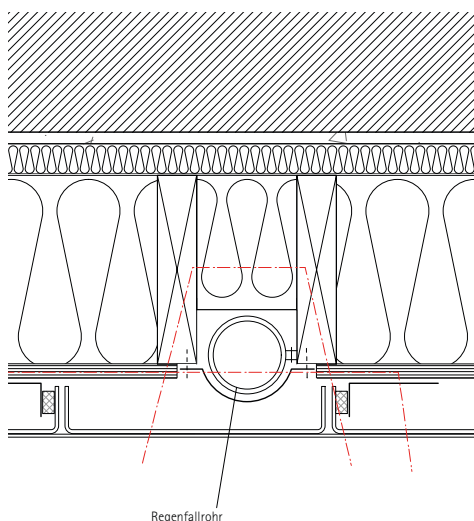


Abb. 28 Mögliches Horizontaldetail Regenfallrohr

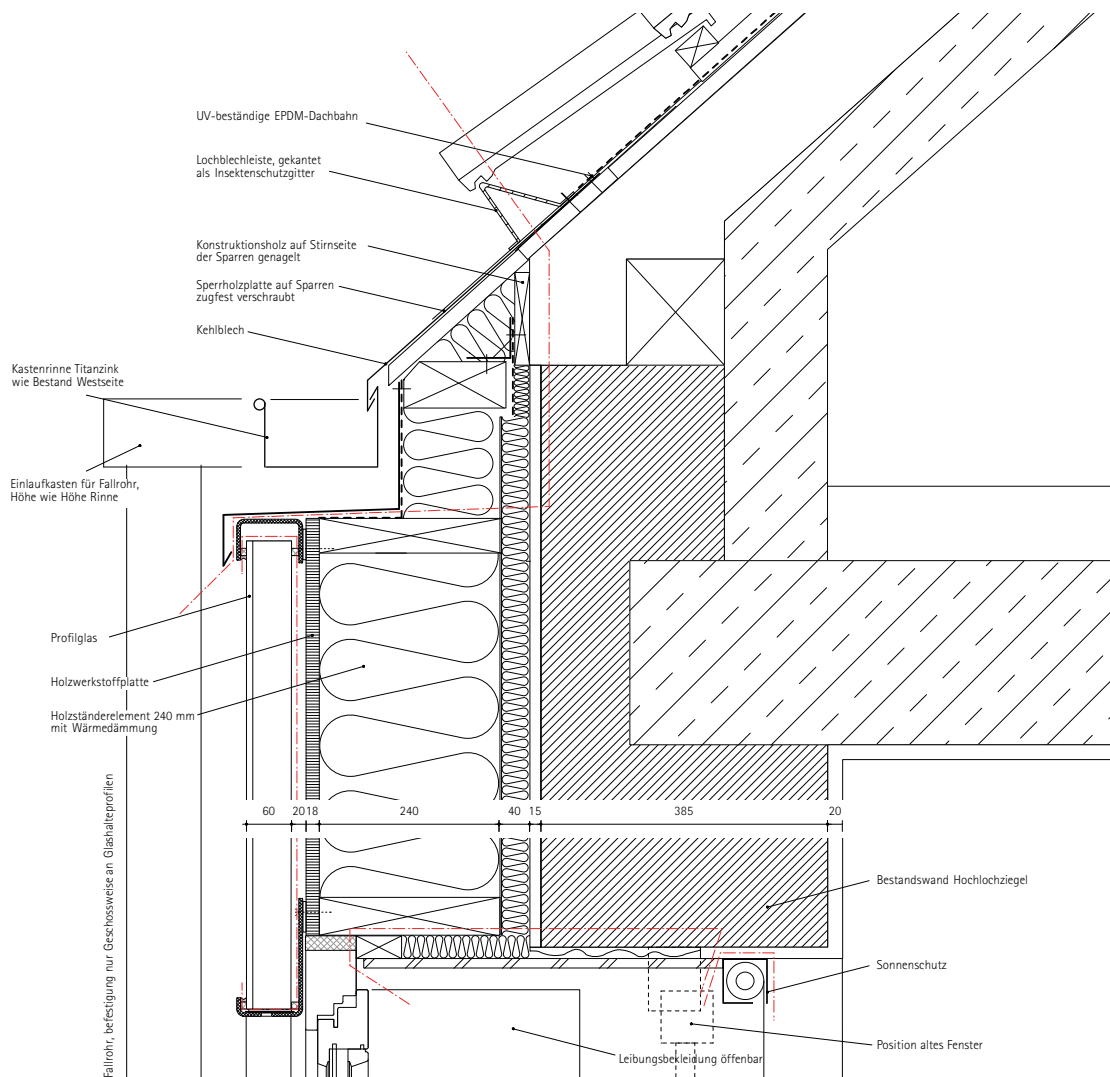


Abb. 29 Detail Dachrand

#### - Seitlicher Anschluss

Seitlich werden die Kollektorelemente, wie in der Ansicht (siehe Abb. 6) zu erkennen, durch WDVS-Flächen begrenzt. Winkelprofile bilden den Abschluss der Kollektorelemente und ermöglichen ein sauberes Anschließen der WDVS-Elemente. Über Dichtbänder werden die Glasprofile seitlich abgedichtet. Da die Dämmelemente etwas weniger tief als die Kollektorelemente sind, kann in der entstehenden Ecke noch ein Regenfallrohr untergebracht werden.

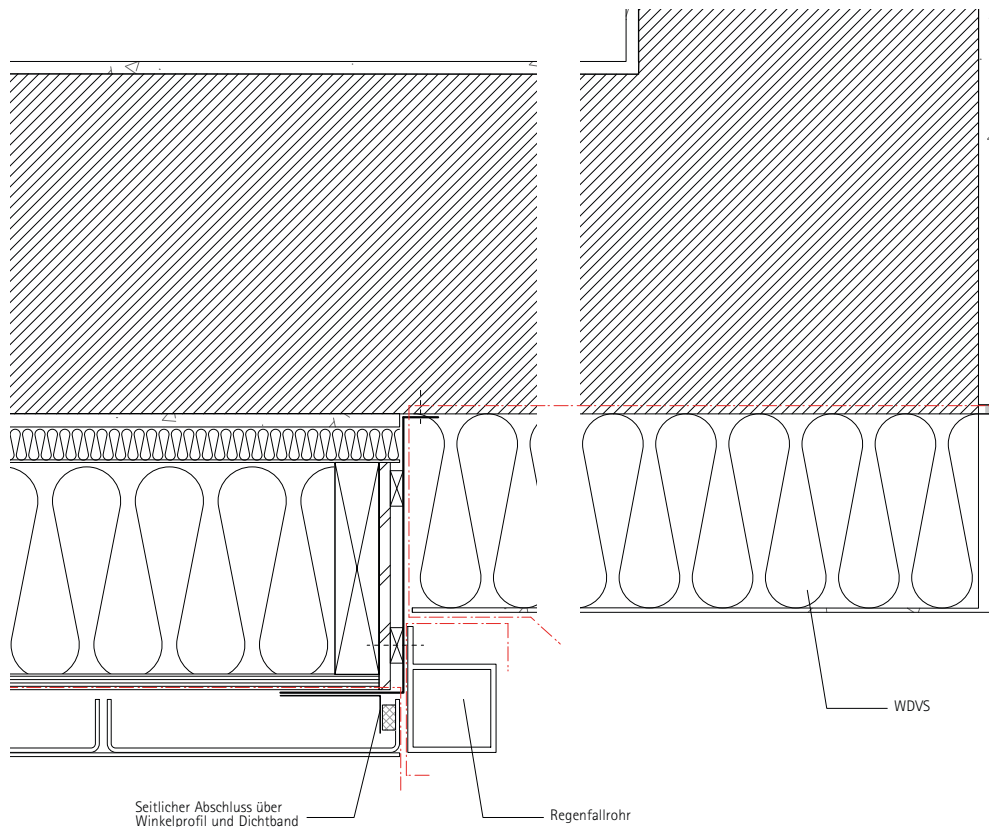


Abb. 30 Horizontalschnitt seitlicher Abschluss und Gebäudeecke mit WDVS

## 2.3 Fertigung

### 2.3.1 Werkstattplanung

#### - Elementteilung

Da es sich bei der Kaserne um ein Bestandsobjekt mit laufendem Betrieb handelt, wurden für die Hauptarbeiten der Montage die Herbstferien gewählt. Da ein Zeitfenster von einer Woche für die komplette Montage relativ kurz ist, war es umso wichtiger, die Elemente anhand des Aufmaßes passgenau zu planen. Um einen möglichst hohen Vorfertigungsgrad zu erreichen und die Arbeit vor Ort zu reduzieren, sollten die Fassadenelemente samt Lüftungsbaustein, sowie alle nötigen Leitungen bis zum Anschluss an die Bestandswand, im Werk vorgefertigt werden. Auch die Fenster sollten bereits im Werk montiert und die Dämmung in die Elemente eingebracht werden.

Belange des Transports und der Montage bestimmten letztlich die Größe der Einzelemente. Man entschied sich gegen Elemente, die über zwei Geschosse gehen, da die Elemente liegend hätten transportiert werden müssen, was den Transport deutlich teurer gemacht hätte und nur 3 m breit hätten sein können. Zudem hätten die großen, sperrigen Elemente die Montage deutlich erschwert. Aus diesen Gründen legte man eine horizontale Teilung der Fassade fest, bei der die Elemente jeweils nur über ein Geschoss gehen. Außerdem kann dann der Brandriegel zwischen den Geschossen vorher montiert und dem Brandschutz entsprechend einfacher vermörtelt oder mit Mineralwolle abgedichtet werden.

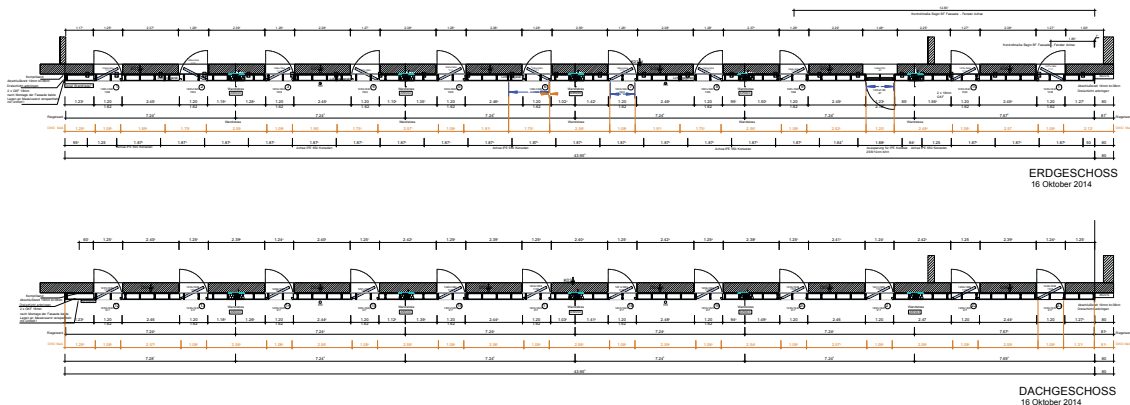


Abb. 31 Horizontalschnitte Holzständerelemente (Zeichnung: BAUFRITZ)

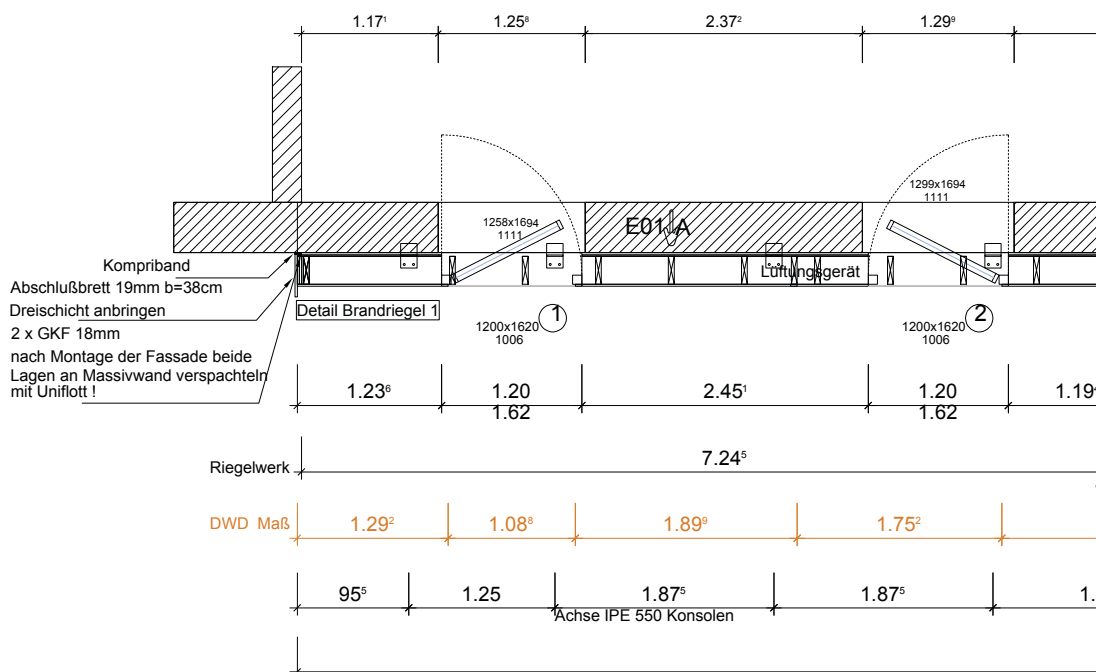


Abb. 32 Ausschnitt Horizontalschnitt (Zeichnung: BAUFRITZ)

Entgegen dem ursprünglichen Plan, die kompletten Elemente samt Profilglas vorzufertigen, wurden schließlich nur die Glashalteprofile im Werk montiert, um das Glas vor Ort einzusetzen. Das Glas hätte durch das zusätzliche Gewicht und die Empfindlichkeit gegenüber Beschädigungen die Kosten für den Transport deutlich erhöht. Das niedrigere Gewicht erlaubte es, die Elemente mit einem einfachen Autokran zu montieren.

- Statik

Für die Lastabtragung der Elemente stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Die Lasten können entweder eine eigene Fundamentierung erhalten oder über die Bestandswand abgetragen werden. Man entschied sich für die zweite Variante, um auf eine zusätzliche Fundamentierung zu verzichten. Ein separates Fundament hätte durch zusätzliche, aufwändige Arbeiten weitere Beeinträchtigungen der Nutzer und eine Verlängerung der Montagezeit bedeutet.



Im vorliegenden Fall kann das Gewicht der Elemente im Obergeschoss an den horizontalen Elementstößen nicht in die Bestandswand eingeleitet werden, sodass die vertikalen Lasten komplett nach unten bis auf die Kellerwand abgetragen werden müssen. Speziell angefertigte, am Element vormontierte Konsolen leiten die Lasten über kleine Taschen im Mauerwerk auf die Betonkellerdecke ein.

Ein konstruktiv erforderliches Kantholz an der Schwelle sorgt für eine bessere Lastverteilung auf die Auflagerkonsolen. Das Kippmoment der Auflagerkonsolen wird außerdem in die Elementschwelle eingeleitet. Zudem werden die einzelnen Elemente an den Fußpunkten über die Schwelle, sowie im Obergeschoss über das Abschlussrähm mit dem Mauerwerk verschraubt, was ein Kippen der Fassade verhindert. Das Verschrauben dient gleichzeitig auch der Einleitung der horizontalen Windlasten in die Bestandswand. Da die Schwelle im Obergeschoss und das Rähm im Untergeschoss mit dem horizontalen Brandriegel verschraubt werden, kann dieser ebenfalls zur Einleitung der horizontalen Lasten in die Bestandsmauer genutzt werden.

### 2.3.2 Details Fassadenelemente

Die vorab geplanten Details wurden von der ausführenden Firma hinsichtlich fertigungs- und montagebedingter Aspekte angepasst. Vor allem auch spezifische Anforderungen in Anbetracht der Größe der Fertigungsanlagen oder der Verfügbarkeit von Materialien mussten dabei berücksichtigt werden.

#### - Holzrahmenelemente

Die Grundkonstruktion besteht wie geplant aus einfachen Holzrahmenelementen. Um Standardmaße nutzen zu können, wurde die Tiefe der Elemente von 240 mm bereits im frühen Planungsprozess bestimmt. Problematisch waren allerdings die relativ großen Geschosshöhen des Internats. Da die Baufirma auf herkömmliche Neubauten spezialisiert ist, reichten die Anlagen nicht aus, um die komplette Geschosshöhe als ein Element zu fertigen. Deshalb mussten Maßnahmen getroffen werden, um die fehlende Elementhöhe auszugleichen. Die Elemente wurden so groß wie möglich geplant, sodass sie noch mit den vorhandenen Maschinen gefertigt werden konnten. Die fehlende Elementhöhe wurde dann durch Anbringen von zusätzlichen Schwellen- und Rähmhölzern erreicht.

Der horizontale Elementstoß ist als Koppelstoß konzipiert. Ein horizontaler 12 x 24 cm starker Balken wird vorab mit der Bestandswand verschraubt und der Zwischenraum mit Mineralwolle ausgestopft oder mit Mörtel abgedichtet. So kann er gleichzeitig brandschutztechnische Anforderungen erfüllen. Bei der Montage werden die Elemente dann über Schwellen- oder Rähmholz mit dem Balken verschraubt, wobei dieser gleichzeitig der Ausrichtung der Elemente dient.

Die Holzrahmenelemente werden außen mit DWD-Platten verkleidet, welche sich gut für die freie Bewitterung während der Bauphase eignen.

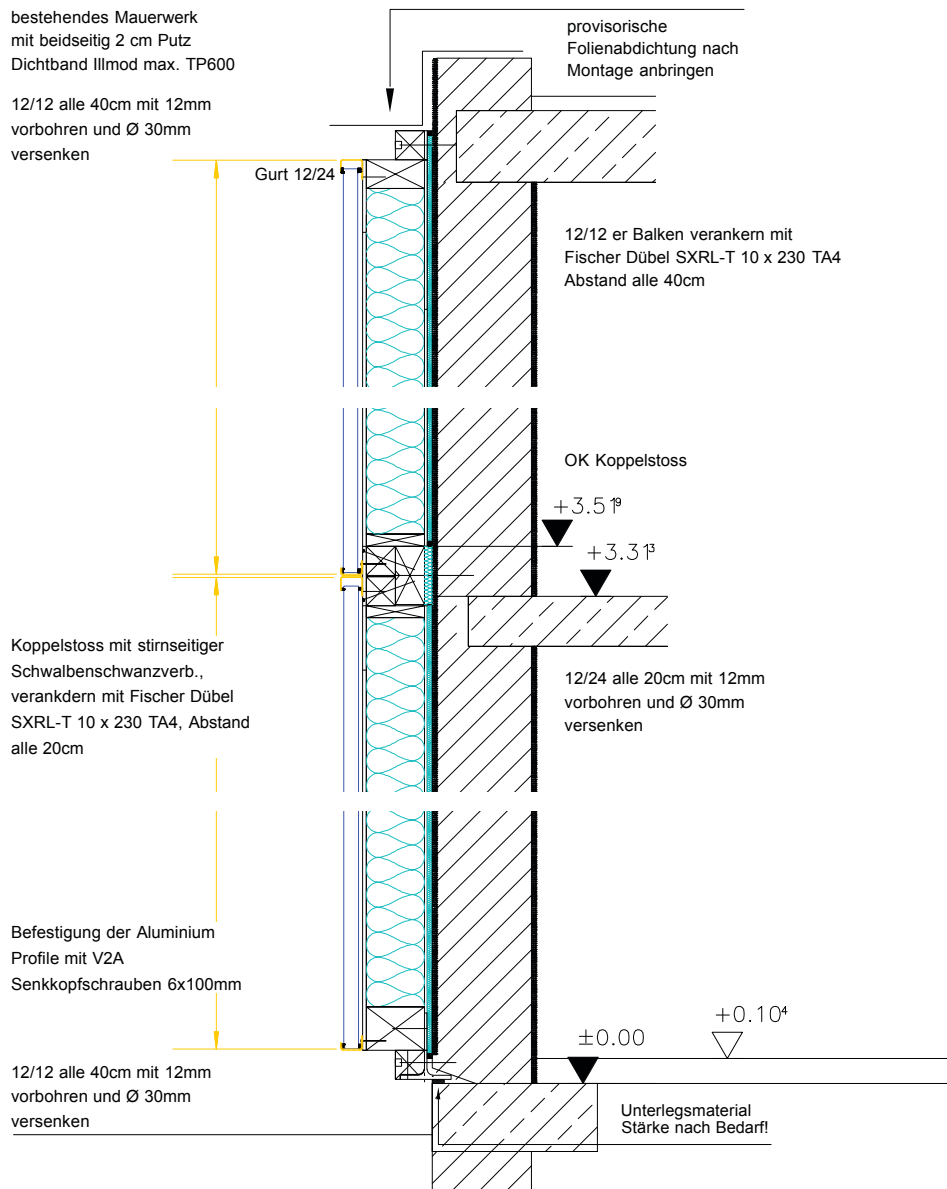


Abb. 33 Fassadenschnitt Holzständerelemente Werkstattplanung (Zeichnung: BAUFRTZ)

#### - Fenster

Die Fenster wurden wie vorher erwähnt, bereits im Werk in die Fassadenelemente eingebaut. Um beim Anschluss an den Bestand einen Toleranzausgleich zu ermöglichen, wurde die Fensteröffnung in den Holzelementen leicht angepasst. Durch die inneren Laibungsverkleidungen können etwaige Toleranzen ausglich werden. Ein auf den Fensterstock geklebtes Vierkantrohr schließt die Fuge zwischen Fensterrahmen und Glasprofilen und schützt die Stirnseite der DWD-Platte vor Bewitterung. Ein Winkelprofil ermöglicht eine Abdichtung des Luftkollektors.

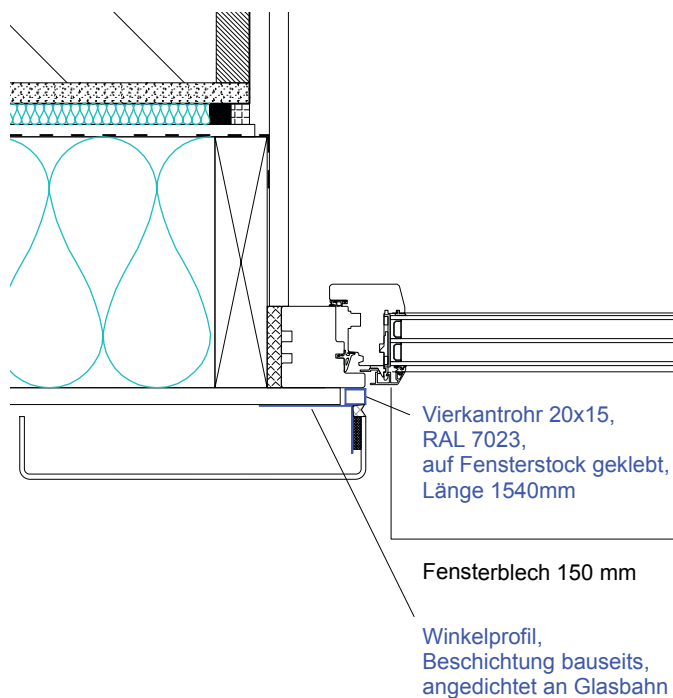


Abb. 34 Horizontaldetail Fenster (Zeichnung: BAUFRTZ)

- Wärmeschutz

Als Dämmung wurde aufgrund der unregelmäßigen Geometrie durch die Installationen eine Hobelspandämmung verwendet, mit der alle Hohlräume effizient gefüllt werden können. Für den Hohlraum zwischen Bestand und Fassadenelementen wurde ein Schafwollvlies vorgesehen. Dadurch können die bereits vorher ermittelten kleinen Abweichungen in der Ebenengeometrie der Fassade ausgeglichen werden, die zwischen 1 und 4 cm schwankten. Schafwolle zeichnet sich zusätzlich durch eine hohe Beständigkeit gegen Feuchte aus und verhindert eine Konvektion im Spalt. Durch die gewählte Dämmung werden ohne Betrachtung der Gewinne durch die solare Heizung die Anforderungen der EnEV 2014 bezüglich der U-Werte der Außenwand erfüllt.

- Luftkollektor

Für die Halterung der Glasprofile wurden spezielle Profile berechnet und konstruiert. Wie geplant wurden die unteren Profile mit Bohrungen versehen, um eventuell eindringendes Wasser und anfallendes Kondensat abzuleiten.

Wie im Kapitel „2.2.7 Fassadengestaltung“ bereits erläutert, wurde anhand der Elementgeometrie der Werkstattplanung die Aufteilung der Glasprofile festgelegt.

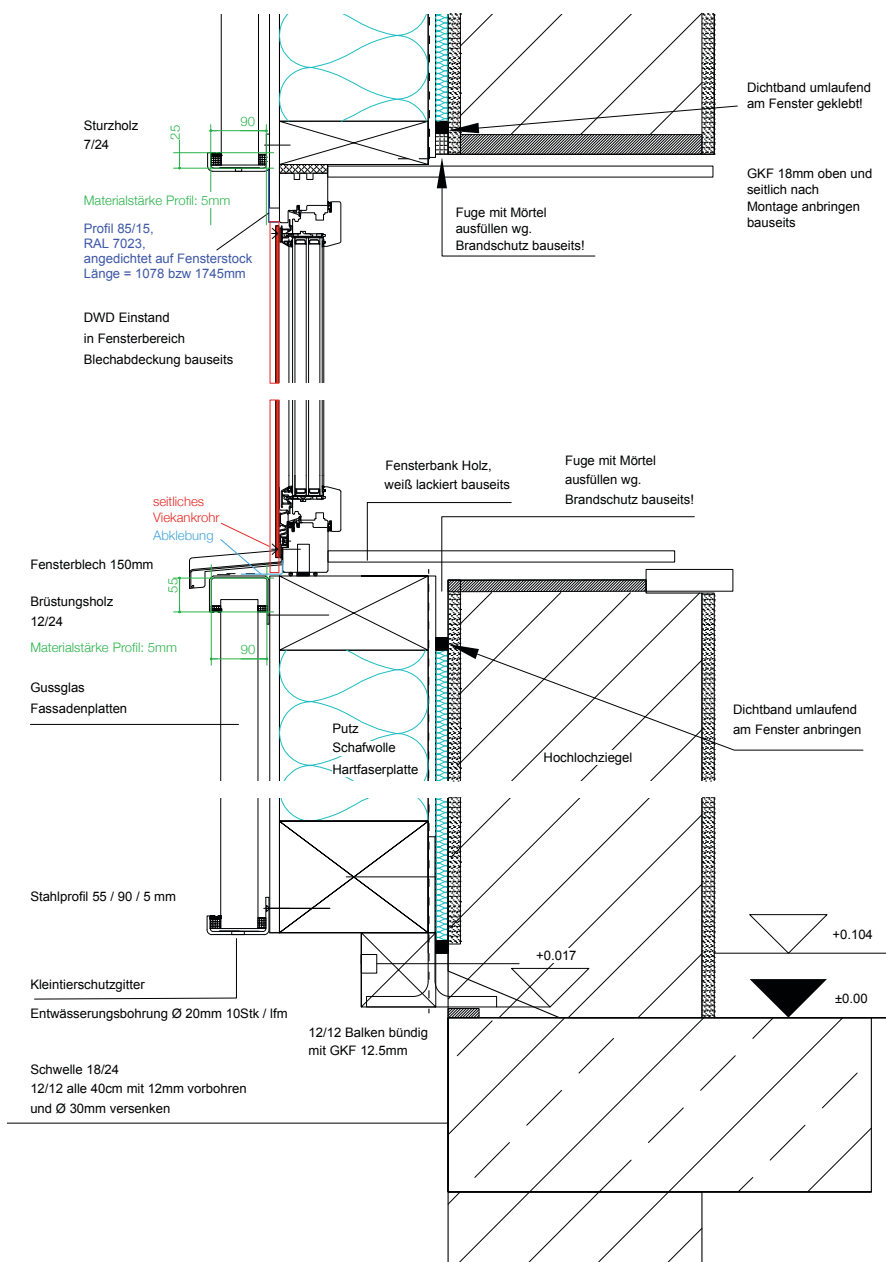


Abb. 35 Vertikaldetails Fenster Werkstattplanung (Zeichnung: BAUFRTZ)

### 2.3.3 Technische Ausstattung

Wichtiger Bestandteil des Konzepts der Kollektorfassade ist die Einbringung der Installationen in die Holzständerelemente. Nach der prinzipiellen Planung der Installationen galt es, detaillierte Pläne zum Verlegen der Lüftungsrohre im Element, sowie zum Anschluss der Elemente nach der Montage zu entwickeln. In enger Zusammenarbeit dem Gerätehersteller der Lüftungsanlage wurden Details entwickelt, die vor allem der Tatsache Rechnung trugen, dass ein Großteil der Installationen nach der Fertigung der Elemente nicht mehr zugänglich waren. Die verschiedenen Anschlusspunkte, an das Lüftungsgerät und die Bestandwand, sowie zur Installation der Steuerungs- und Monitoringkomponenten, waren dabei essentiell.

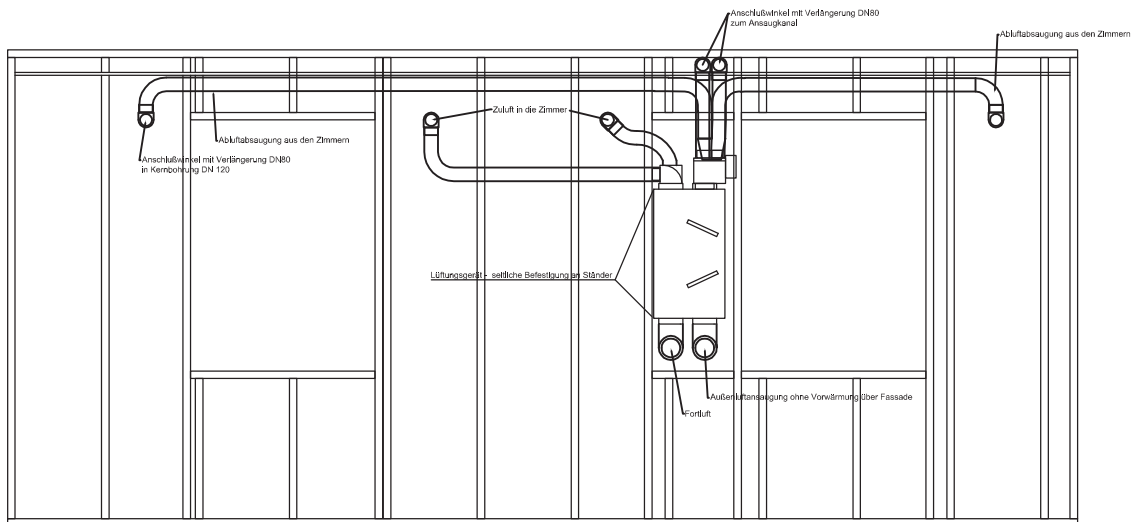


Abb. 36 Werkstattplanung Element mit Lüftungsleitungen (Zeichnung: BAUFRITZ)

In enger Abstimmung mit der Lüftungsplanung wurde der Leitungsverlauf im Element festgelegt. Das Umschalteteil und die Komponente zum Zusammenführen zweier Leitungen sind eigens gefertigte Teile, ansonsten wurde auf herkömmliche Leitungen und Verbindungen zurückgegriffen.

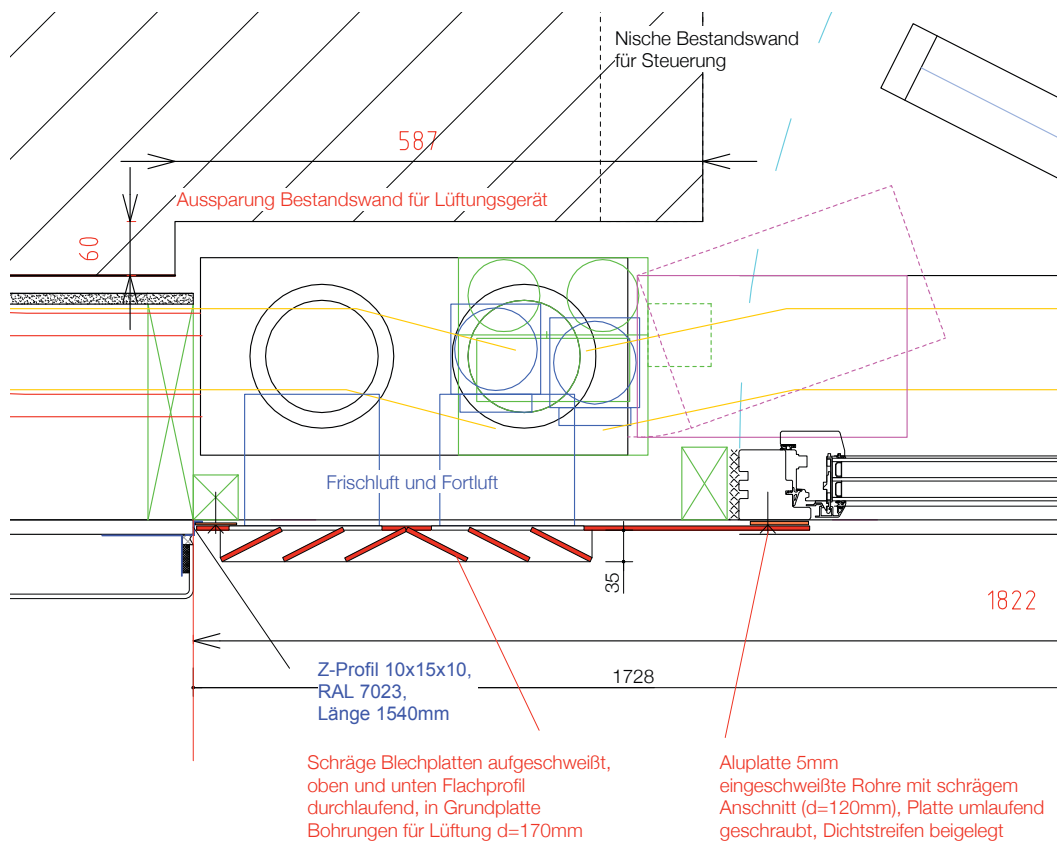


Abb. 37 Horizontaldetail Lüftungsgerät mit Blechabdeckung (Zeichnung: BAUFRITZ)

Wie bereits im Kapitel Planung erläutert, konnte im Modellvorhaben auf die Nischen für das Lüftungsgerät und die Steuerungskomponenten nicht verzichtet werden.

Genauere Angaben zu den verbauten technischen Geräten finden sich im Teilbericht C „Fassadenlüftungskomponenten und Steuerung“ von B&O.

#### 2.3.4 Fertigung Elemente im Werk

Die Elemente wurden im Werk der Firma BAUFRITZ gefertigt. Durch eine Montage an liegenden Elementen kann eine hohe Präzision erreicht werden, ebenso wird die Arbeit für die Montagearbeiter erleichtert. Das Konzept sieht es vor, die komplette Verrohrung und die technischen Komponenten im Lüftungsbaustein im Werk bereits einzubauen, um die Arbeiten vor Ort möglichst gering zu halten und das enge Zeitfenster für die Montage einhalten zu können. Durch eine exakte Planung konnten die Aussparungen für Installationen und technische Geräte vor dem Zusammenbau der Holzrahmenelemente computergestützt erstellt werden. Da in Abstimmung mit der Lüftungsfirma eine detaillierte Planung der Leitungsführung erfolgte, konnte die Installation im Werk dann auch durch nicht lüftungstechnisch geschultes Personal erfolgen.

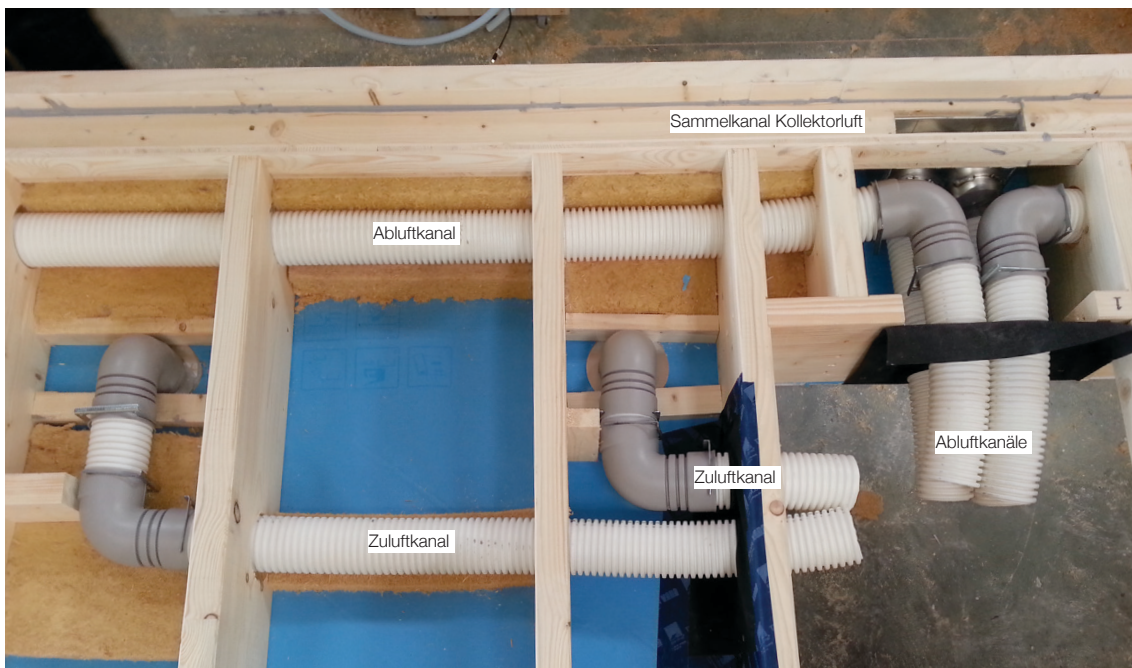


Abb. 38 Holzrahmenelement mit Lüftungsleitungen (Foto: BAUFRITZ)

Die Lüftungsrohre wurden dort, wo es möglich ist, bereits abgedichtet, da im Werk eine höhere Qualität der Abdichtungen erreicht werden kann. Lüftungsleitungen und Leerrohre wurden im Bereich des Lüftungsgeräts gebündelt, sodass sie später bei der Installation leicht zugänglich waren. Die durch die Lüftungsfirma speziell angefertigten Profile zum Aufteilen der Rohre, beispielsweise um die beiden Zuluftkanäle zu bündeln, und das Umschaltgerät wurden ebenfalls im Werk installiert. Laut Konzept ist es vorgesehen, das Lüftungsgerät ebenfalls im Werk einzubauen, dieses wurde aber im Pilotprojekt zu spät geliefert und musste vor Ort nachinstalliert werden. Die vorlegten Leerrohre wurden mit Zugdrähten versehen, um vor Ort Sensoren und Kabel installieren zu können.

Für das spätere Einbringen der Dämmung ungünstige Zwischenräume wurden bereits beim Einbau der Installationen mit Dämmplatten versehen.

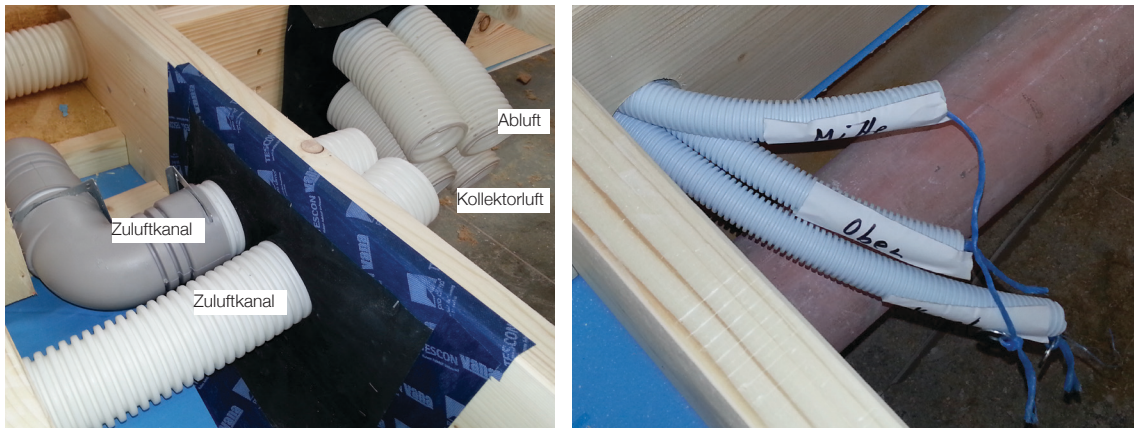


Abb. 39 Details Lüftungsleitungen und Leerrohre (Fotos: BAUFRITZ)



Abb. 40 Aufteilungsprofil (Foto: BAUFRITZ)



Abb. 41 Einbringen Hobelspandämmung (Foto: BAUFRTIZ)



Abb. 42 Montage der Auflagerkonsolen und Aufbringen des Schafwollvlieses (Foto: BAUFRTIZ)





Abb. 43 Montage Fenster und Detail Brüstung mit Fensterbank und Glashalteprofil (Fotos: BAUFRTIZ)



Abb. 44 Fertiges Wandelement (Foto: BAUFRTIZ)

## 2.4 Montage

### 2.4.1 Vorarbeiten

Vor der Montage der Fassadenelemente waren einige Arbeiten vonnöten, um später einen reibungslosen Ablauf zu gewährleisten. Es wurde ein Gerüst aufgestellt, um beispielsweise den Dachüberstand zu entfernen, sowie weitere Rückbaumaßnahmen vorzunehmen. Für das Lüftungsgerät musste die Nische außen neben den Fenstern erstellt werden, ebenso innen in der Fensterlaibung für die Steuerungskomponenten. Für die Lüftungsleitungen mussten pro Zimmer vier Kernbohrungen und kleinere Bohrungen für die Leerrohre erstellt werden, deren genaue Lage anhand der Werkstattpläne eingemessen wurde. Am Vortag des Montagebeginns der Holzrahmenelemente wurden außerdem die Brandriegel montiert und verspachtelt, sowie die Aussparungen im Bestandsmauerwerk zur Auflagerung der Konsolen auf der Kellerdecke erstellt.

### 2.4.2 Montage Fassadenelemente



Abb. 45 Montage mit Autokran (Foto rechts: BAUFRITZ)

Die Elemente wurden anschließend mittels Autokran in den Spalt zwischen Bestandswand und Gerüst eingefädelt. Die Bestandsfenster wurden erst kurz vor dem Einbau der Elemente entfernt, sodass auf einen temporären Witterungs- und Einbruchschutz verzichtet werden konnte.

Die Elemente wurden aus statischen Gründen von unten nach oben montiert. Wie im Kapitel zur Werkstattplanung erläutert, wird die Last aus den Elementen hauptsächlich über das Schwellenholz und die Konsolen in die Kellerdecke eingeleitet. Die Konsolen wurden dafür in die vorher gefertigten Taschen im Bestandsmauerwerk eingestellt. Zum Ausgleich der Höhenunterschiede der Kellerdecke wurde Quellmörtel genutzt. Während der Montage wurden die Elemente bis zu dessen

Aushärten vorübergehend auf dem Boden abgelastet. Zur Lagesicherung und Aufnahme von Horizontallasten wurde jedes Element an Schwelle und Rähm mit der Bestandswand verschraubt. Die Elemente sind miteinander an den vertikalen Stößen über Schwalbenschwanzverbindungen gekoppelt, sowie mit dem vorher montierten horizontalen Brandriegel verschraubt. Die Haustüren wurden erst vor Ort eingebaut, da für den Einbau die Schwelle des Fassadenelements im Bereich der Tür entfernt werden musste.

Während Transport und Montage wurden die Elemente mit Folien abgedeckt, um ein Eindringen von Wasser in oder hinter die Elemente zu verhindern. Die DWD-Platten als Verkleidung der Elemente, sowie das Schafwollvlies bieten durch eine natürliche Beständigkeit gegen Feuchtigkeit zusätzliche Sicherheit gegen Beschädigungen durch eindringende Feuchtigkeit während der Montage.



Abb. 46 Horizontaler Elementstoß und Dachabschluss (Foto links: BAUFRTITZ)

Durch den hohen Vorfertigungsgrad bleibt der Arbeitsaufwand und die Beeinträchtigungen der Nutzer gering. Die Fassadenelemente konnten innerhalb von 2 Tagen montiert werden, die Arbeiten durch den Holzbaubetrieb konnten nach insgesamt 4 Tagen fertig gestellt werden. In einer abschließenden Überprüfung wurde festgestellt, dass durch das genaue Aufmaß und die präzise Fertigung und Montage alle Anschlüsse innerhalb der Toleranzen lagen.

Nach der Montage der Holzständerelemente wurden die DWD-Platten von einem Maler in einem satten Rot gestrichen, was allerdings theoretisch bereits im Werk hätte gemacht werden können.



Abb. 47 Situation Zimmer während der Bauarbeiten (Foto: BAUFRTIZ)

#### 2.4.3 Installation und Einrichtung Lüftung



Abb. 48 Lüftungsbaustein vor Montage der Abdeckung (Foto: BAUFRTIZ)

Nach der Montage der Holzrahmenlemente wurden die später gelieferten Lüftungsgeräte angeschlossen. Da alle weiteren Rohre und Elemente bereits installiert waren, war der Arbeitsaufwand hierfür sehr gering. Das Lüftungsgerät wurde dazu in die Nische in den Holzständerlementen eingebracht und an die aus der Konstruktion herausstehenden Lüftungsleitungen angeschlossen.

Die Steuerungselemente wurden in der Nische in der Fensterlaibung installiert und Kabel und Sensoren über die Leerrohre installiert und eingerichtet.



Abb. 49 Kernbohrung mit Lüftungsstutzen Fassadenelement (Foto: BAUFRITZ)

Da die Holzrahmenelemente bereits komplett mit den Leitungen versehen waren, mussten nur noch die Anschlüsse durch die Bestandswand auf der Baustelle hergestellt werden. Durch eine exakte Planung konnten diese durch die vorher erstellten Kernbohrungen hergestellt werden, indem von innen Verlängerungen auf die Lüftungsstutzen am Fassadenelement gesteckt wurden.



Abb. 50 Anpassung der Luftgeschwindigkeiten mittels Anemometer und Kontrolle der Dichtigkeit

Wie bereits vorher erwähnt, wurde der Sammelkanal mit einer Vorrichtung zur nachträglichen Anpassung der Luftgeschwindigkeiten ausgestattet. Mit Anemometern zur Überprüfung der Luftgeschwindigkeiten wurden die Schlitzbreiten vor Ort manuell eingestellt, indem der Winkel so in Position gebracht wurde, dass sich an allen Stellen im Kanal annähernd gleiche Luftgeschwindigkeiten ergaben.

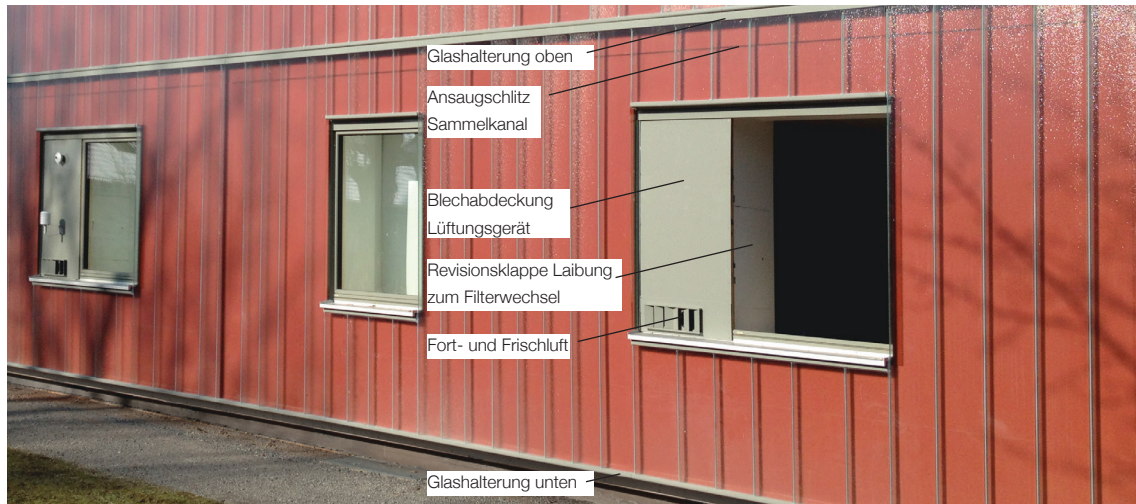


Abb. 51 Detailansicht Fassade



Abb. 52 Fertige Fassade



Abb. 53 Flur mit Überströmkanälen

### 3. Auswertung

#### 3.1 Auswertung Messdaten

##### 3.1.1 Allgemeines zur Auswertung der Daten

Die einzelnen Messpunkte, sowie deren Lage wurde im Kapitel „2.2.4 Monitoring“ ausführlich erklärt. Wie dort bereits erläutert, wurden die Messergebnisse aller Sensoren letztendlich über die Hochschule Rosenheim in eine Datenbank eingepflegt. Über das Programm MoniSoft ließen sich die Messdaten auswerten und auf verschiedene Art und Weise visualisieren, z.B. als Balken- oder Teppichdiagramm.

Für die Auswertung müssen zunächst einige grundlegende Aspekte untersucht werden. Abbildung 55 zeigt in einem repräsentativen Zeitraum die Kollektortemperaturen der vier verschiedenen Raumgruppen. Beim Vergleich fällt auf, dass es eine regelmäßige Abweichung zwischen den einzelnen Räumen gibt. Besonders bei den Peaks der Kollektortemperaturen fallen charakteristische Muster auf. Während bei Raum 3 die Temperatur in der zweiten Hälfte sinkt, ist bei Raum 4 das Gegenteil zu beobachten. Beeinflussende Faktoren sind vor allem die vor der Fassade stehenden Bäume, sowie die angrenzende Bebauung. Die weiter westlich liegenden Räume werden in diesem Fall weniger durch die Bäume verschattet und weisen deshalb zum Teil deutlich höhere Kollektortemperaturen auf. Der geringere Einfluss von äußeren Faktoren ist der Grund, warum letztlich Gruppe 1 gewählt wurde, um anhand dieser die nachfolgenden Auswertungen vorzunehmen.

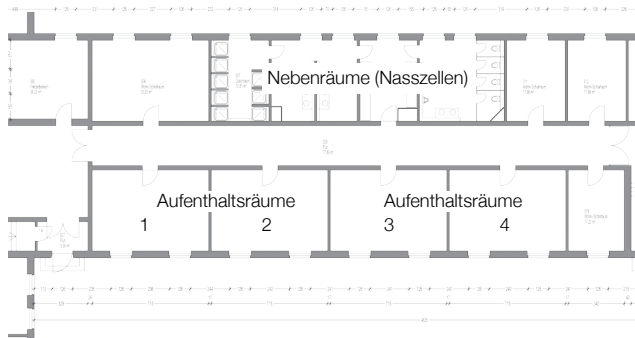


Abb. 54 Übersicht Nummerierung Räume

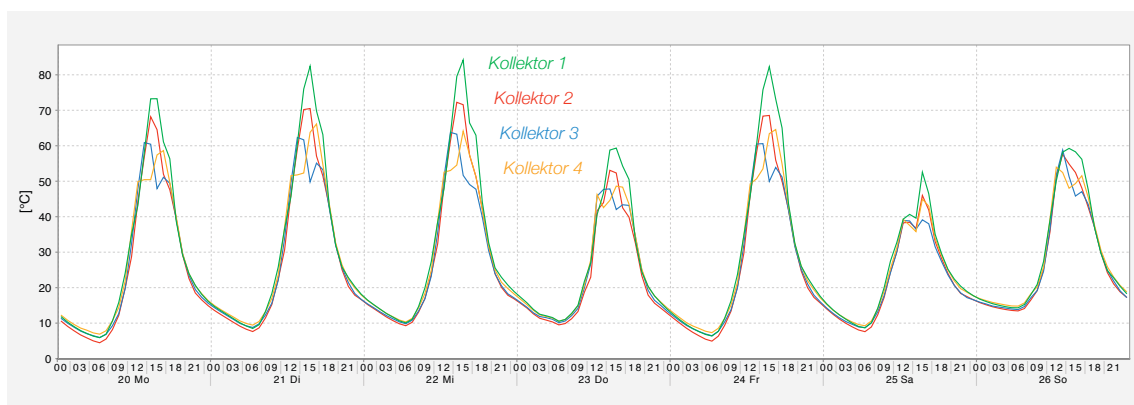


Abb. 55 Vergleich Kollektortemperaturen Räume 1 - 4 (Zeitraum 20.04. - 26.04.)

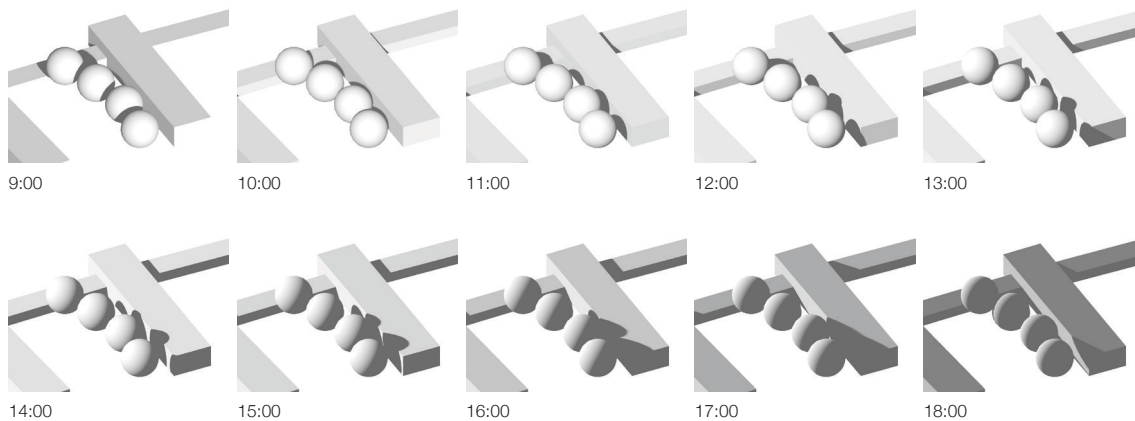


Abb. 56 Simulation der Verschattung mit Modellbäumen (geschlossene Kugeln zur Verdeutlichung)

Ungünstig dabei ist, dass das einzige Pyranometer zur Erfassung der Sonneneinstrahlung vor Raum 3 liegt, und deshalb die Kurven der Sonneneinstrahlung in den nachfolgenden Diagrammen eine ähnliche Kurve wie die Kollektortemperaturen von Raum 3 beschreiben. Bei der Auswertung der Diagramme sollte dies berücksichtigt werden. Dort ist deshalb eine grobe theoretische Kurve der angenommenen Sonneneinstrahlung für Raum 1 eingezeichnet.

Bei genauerer Betrachtung des Diagramms fällt außerdem auf, dass die Maximalwerte der Kolle-



tortemperaturen nicht wie zu erwarten um 13:00 (Sommerzeit) auftreten, sondern erst circa. 2 Stunden später. Abbildung 4 im Kapitel Planung zeigt die Ausrichtung der Kaserne und damit die Erklärung für die Abweichung. Der gewählte Gebäuderiegel ist um ca. 18° zur Ost-West-Achse Richtung Westen verdreht, sodass die Sonne erst gegen 14:00 orthogonal auf die Fassade scheint und eine maximale Energieausbeute im Kollektor ermöglicht.

### 3.1.2 Vergleich Standardbetrieb und Kollektorbetrieb

- Erläuterung Diagramm

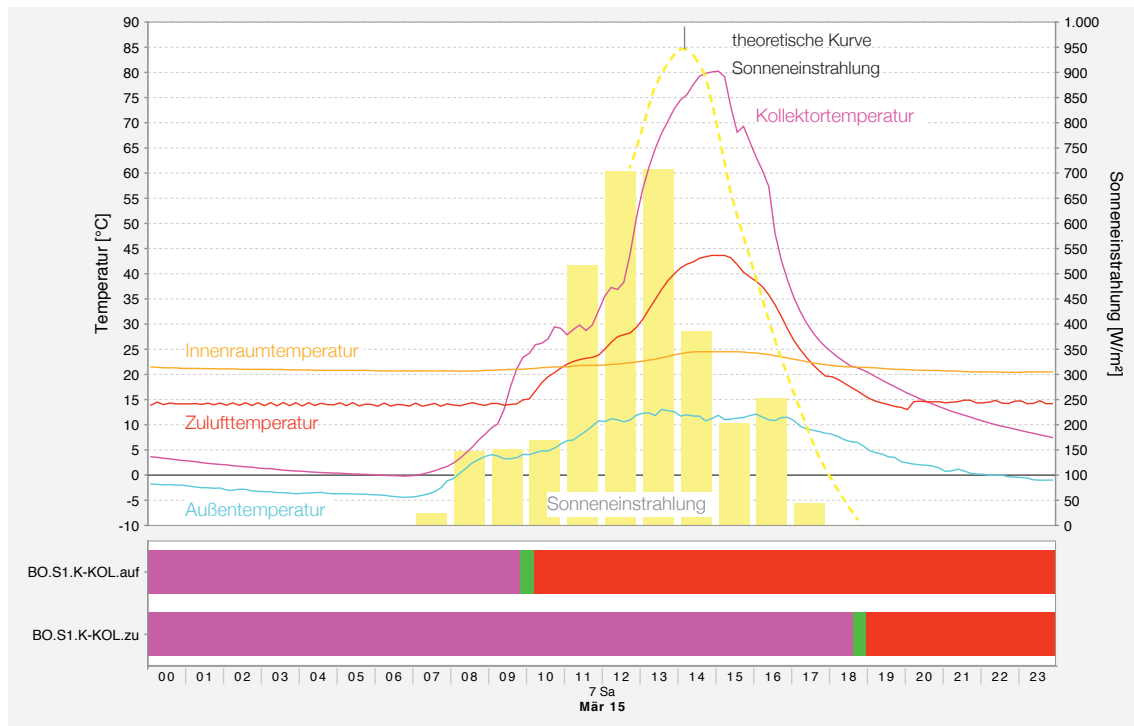


Abb. 57 Tagesübersicht 07.03.2015 (Raum1)

Das Diagramm in Abbildung 57 zeigt beispielhaft die grafische Auswertung einiger erhobener Daten durch das Programm MoniSoft. Die Kurven stellen die Messergebnisse für die Innen- und Außentemperatur, sowie für die Zuluft- und Kollektortemperatur dar. Die gelben Balken zeigen die solare Einstrahlung in  $W/m^2$ . Die unteren Balken zeigen Aktivitäten der Klappen im Umschaltgerät als grüne Balken, stellen also eine Umschaltung des Betriebszustandes dar. Pink bedeutet, dass es vor dem ersten Ereignis in grün im ausgewählten Zeitraum kein Ereignis, also kein Umschalten gibt.

Anzumerken ist, dass die scheinbare Diskrepanz zwischen Temperatur und Sonneneinstrahlung zwischen 14:00 und 17:00 wahrscheinlich wie im vorherigen Kapitel erläutert, durch vor der Fassade stehende Bäume und durch die Ausrichtung des Gebäuderiegels erzeugt wird. Der zu erwartende (unverschattete) Verlauf der Kurve für Raum 1 ist deshalb zum besseren Verständnis angedeutet.

- Erläuterung Steuerung

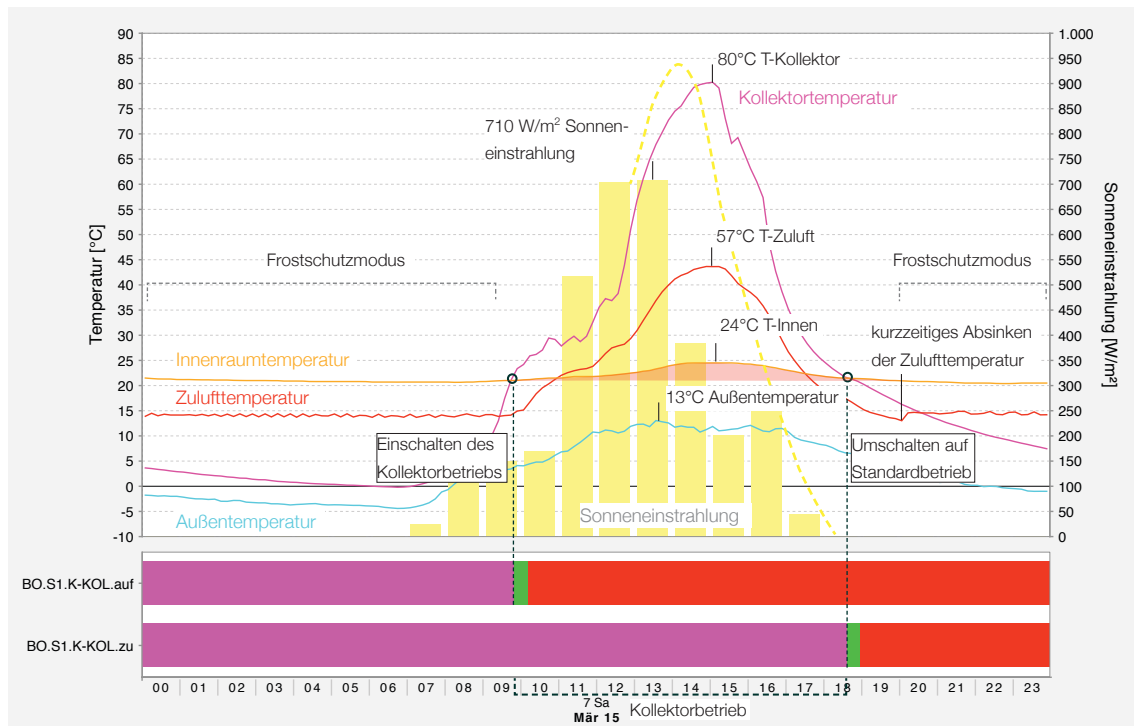


Abb. 58 Tagesübersicht 07.03.2015 (Raum 1) mit Erläuterungen

Anhand des Diagramms in Abbildung 57 kann man gut die in Kapitel 2.2.3 beschriebene Steuerung erläutern.

Abbildung 58 zeigt das gleiche Diagramm mit Erläuterungen zu den Betriebszuständen und zur Steuerung. Die grünen Bereiche in den Balken unten zeigen um 9:45, dass die Klappen im Umschaltgerät auf Kollektorluft umgestellt wurden. Auslöser für das Ereignis war, dass die Temperatur im Kollektor erstmalig höher lag als die Innentemperatur, während die Innentemperatur unter der eingestellten Grenztemperatur von 25°C lag. Dann wurde in den Kollektorbetrieb umgeschaltet. An diesem Tag konnte eine Steigerung der Innenraumtemperatur von 3-4 K auf bis zu 25°C verzeichnet werden. Die farbige Fläche unter der Kurve visualisiert den Zeitraum und die Dimension der Änderung der Innentemperatur während des Kollektorbetriebs.

Um ca. 18:30 zeigen die Klappen eine erneute Aktivität im Umschaltgerät und ein Zurückschalten in den Standardbetrieb. Ausgelöst wurde das Umschalten durch ein Sinken der Kollektortemperatur unter die Innenraumtemperatur, die Voraussetzung „Kollektorluft > Raum Süd“ wurde also nicht mehr erfüllt. Nach Umschalten auf Standardbetrieb sank die Zulufttemperatur kurzzeitig weiter ab, vermutlich wegen des noch kalten Kanalsystems. Um dies zu vermeiden, wäre eine Umstellung auf „Kollektorluft > Raum Süd + 3°“ - wie im Steuerungskonzept beschrieben - sinnvoll.

Morgens bis ca. 9:00 und abends ab ca. 20:00 ist bei der Zulufttemperaturkurve ein charakteristisches Stagnieren bei etwa 14°C zu erkennen. Hier griff der Frostschutzmodus, welcher bei niedrigen Außentemperaturen ein Einfrieren des Wärmetauschers und zu niedrige Zulufttemperaturen verhindert.

- Vergleich Betriebsmodi

An einigen Tagen wurde die Lüftung testweise nur im Standardmodus betrieben, indem das Umschalten der Klappen auf Kollektorluft abgestellt wurde. Nun kann man Tage mit und ohne Kollektorbetrieb direkt vergleichen um den energetischen Vorteil des Kollektorbetriebs rechnerisch ermitteln zu können.

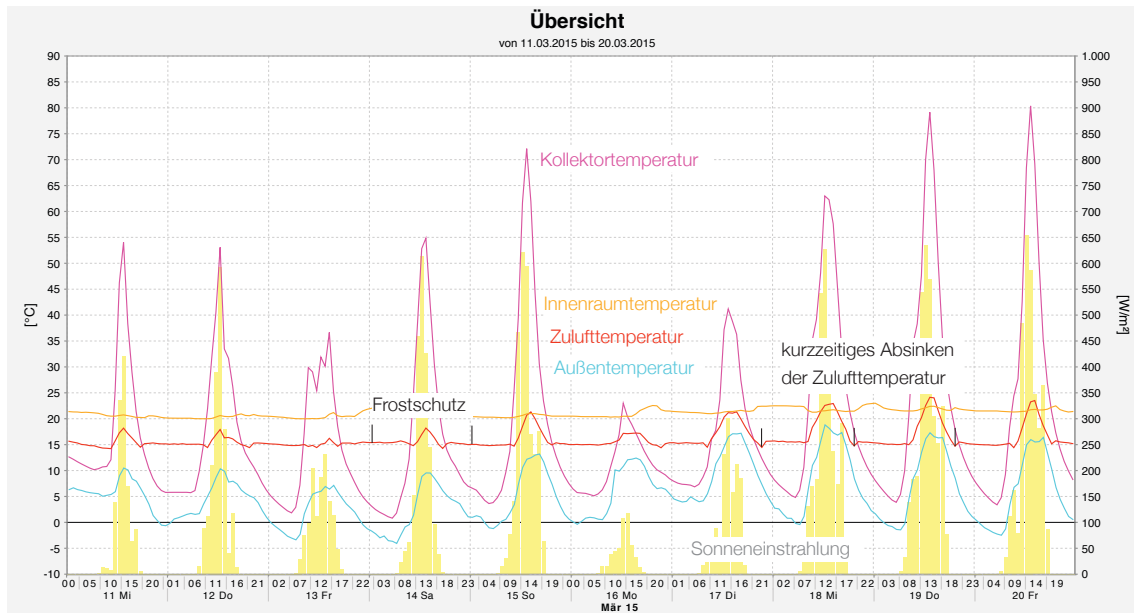


Abb. 59 Übersicht 11.03. - 20.03. mit Standardbetrieb (Raum1)

Das Diagramm in Abbildung 59 zeigt einen Zeitraum ohne Kollektorbetrieb. Es fand im Lüftungsgerät kein Umschalten vom Wärmerückgewinnungsbetrieb auf Kollektorbetrieb statt. Die Außentemperaturen stiegen an einigen Tagen bis auf über 15°C, die Sonneneinstrahlung erreichte teilweise 600 W/m<sup>2</sup> - vermutlich wie vorangegangen erläutert vor Raum 1 sogar noch mehr. Entsprechend wurden im Kollektor Spitzentemperaturen bis zu 80°C gemessen.

Die Zulufttemperaturen waren insgesamt höher als die Außentemperaturen, im Maximum um etwa 8 K. Diese Niveauerhöhung wurde durch den funktionierenden Betrieb der Wärmerückgewinnung erreicht, wodurch die Frischluft durch die Abwärme aus dem Innenraum vortemperiert wurde. Auffällig sind bei der Zuluft-Kurve die Bereiche, in denen sich durch den Frostschutzmodus die Temperatur um die 15°C bewegt. Abgesehen von diesen Bereichen ist beim Vergleich der Kurven von Außen- und Zulufttemperatur eine deutliche Korrelation erkennbar. Ein Einfluss der sehr hohen Kollektortemperaturen sowohl auf die Zulufttemperatur als auch in Konsequenz auf die Innentemperatur ist jedoch nicht zu erkennen.

Leichte Veränderungen bei der Innenraumtemperatur scheinen nicht durch die solare Einstrahlung hervorgerufen worden zu sein und sind wahrscheinlich eher auf eine konventionelle Heizung in der Nacht zurückzuführen. Da trotz der mittelhohen Sonneneinstrahlung kein nennenswerter Einfluss auf die Innenraumtemperatur zu verzeichnen ist, deutet dies auch darauf hin, dass der Energieeintrag durch die Fenster bei den nachfolgenden Betrachtungen vernachlässigt werden kann.

Auffällig sind außerdem die Bereiche, beispielsweise am 18. und 19. März, an denen die Zulufttemperatur über der Innenraumtemperatur lag. Durch einen regulären Betrieb des Wärmetauschers

ist dies nicht möglich. Es könnte allerdings daran liegen, dass die Zuluftkanäle in der Dämmung liegen, die bei hohen Kollektortemperaturen so stark aufgeheizt wird, dass die Zuluft durch die warmen Kanäle leicht erwärmt wird.

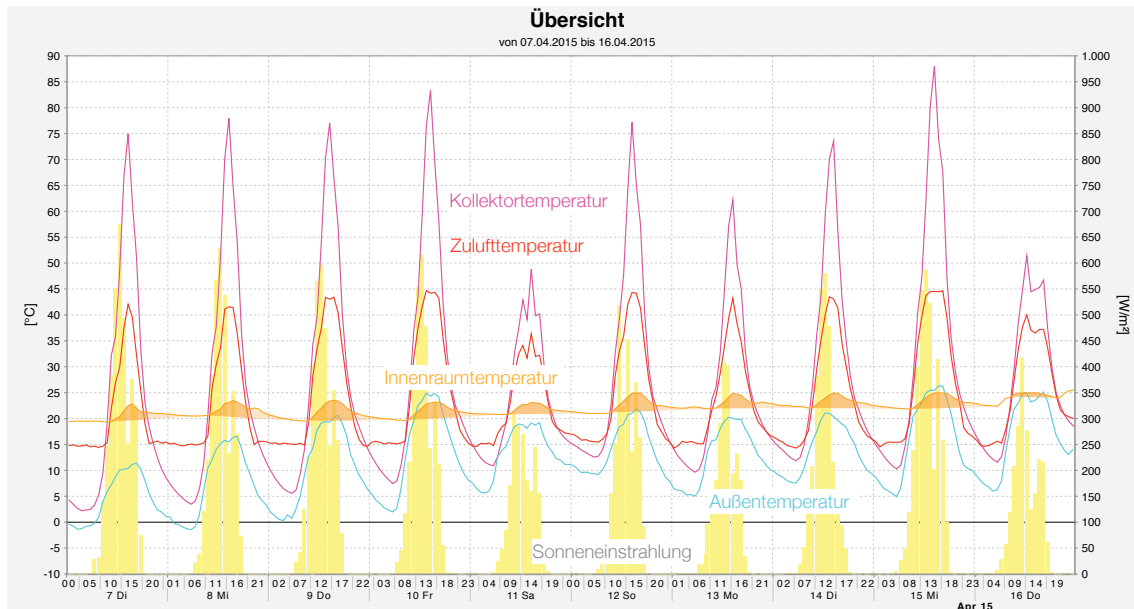


Abb. 60 Übersicht 07.04. - 16.04. mit Kollektorbetrieb (Raum 1)

Als Vergleich zu dem vorangegangenen erläuterten Zeitraum ohne Umschalten fand in der Zeitspanne in Abbildung 60 ein geregeltes Umschalten von Standard- zu Kollektorbetrieb statt. Die Außentemperaturen und solare Einstrahlung liegen etwas höher als beim vorher betrachteten Zeitraum, sind aber insgesamt vergleichbar.

Deutlich erkennbar sind die hohen Zulufttemperaturen, die an manchen Tagen bei bis zu 45°C lagen und eine eindeutige Korrelation zu den Kollektortemperaturen aufweisen. Anders als beim vorherigen Intervall ist auch eine deutliche, zyklische Änderung der Innenraumtemperatur zu erkennen. Diese steigt ab dem Umschalten auf Kollektormodus, wenn die Kollektortemperatur über die Innenraumtemperatur steigt. Da man auf eine Heizung der Räume während des Testlaufs nicht verzichten wollte und deshalb die mittlere Innenraumtemperatur generell hoch war, liegt der maximale Temperaturanstieg bei nur ca. 4 K. Besonders am 12.04. ist zu erkennen, dass die Kurve aufgrund der eingestellten maximalen Innenraumtemperatur leicht abgeflacht ist. Eine gewisse Steigerung bei Verzicht auf diese Steuerung könnte bei Bedarf erreicht werden.

Zu erkennen ist, dass die Innenraumtemperatur im Laufe des Vormittags bei steigender Sonneneinstrahlung meist steiler ansteigt, als sie nachmittags wieder abfällt. Über Nacht sinkt die Temperatur langsam wieder auf etwa Ausgangsniveau. Es ist zu vermuten, dass die massiven Zimmerwände einen Teil der Wärme speichern und dann erst langsam wieder an den Raum abgeben. Zudem gelangt die durch den Kollektor eingefangene Wärme erst langsam durch die Außenwand nach innen und wird erst nachts an die Raumluft abgegeben. Dies wird im Kapitel „3.1.4 Temperaturverteilung Außenwand“ näher untersucht.

Im Folgenden sollen jeweils zwei Tage mit ähnlichen Außentemperaturen und solarer Einstrahlung jeweils einer mit Kollektorbetrieb und einer mit Standardbetrieb - verglichen werden.

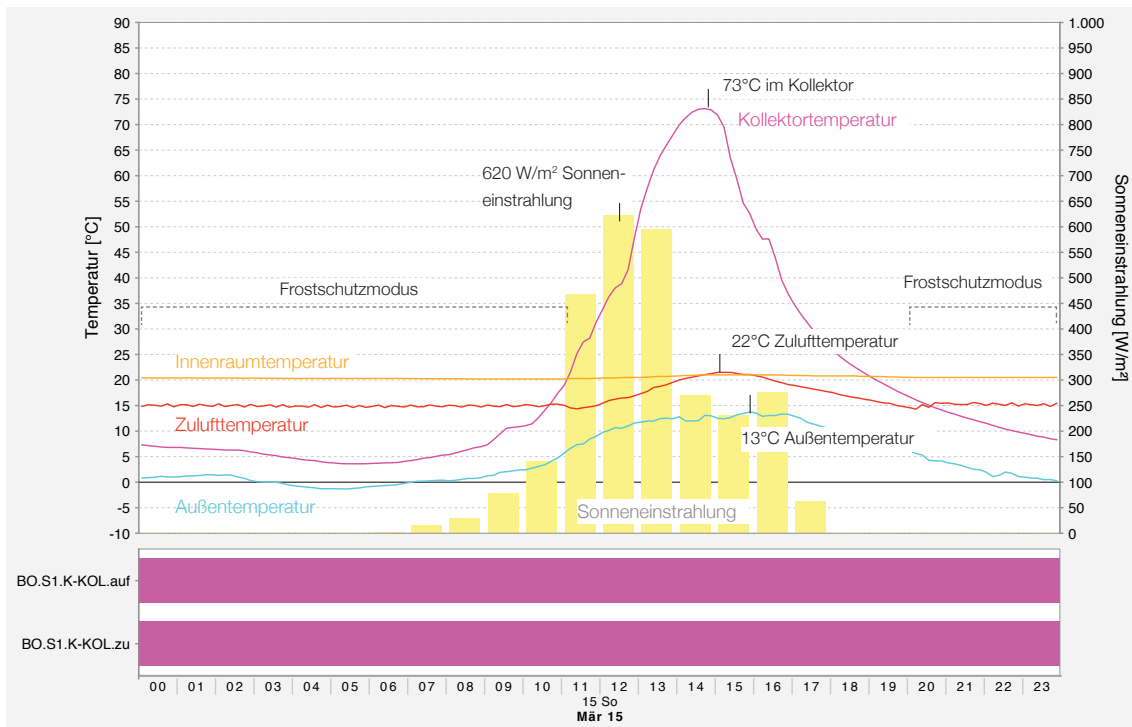


Abb. 61 15.03.2015 - Standardbetrieb mit Wärmerückgewinnung (Raum 1)

Abbildung 61 zeigt detaillierter einen Tag, an dem kein Umschalten auf Kollektorbetrieb erfolgte. Stattdessen fand reguläre Lüftung mit Wärmerückgewinnung statt.

Gut zu erkennen ist der Frostschutzbetrieb von 0:00 - 11:00 und 20:00 - 0:00, da die Außenraumtemperaturen zu dieser Zeit sehr niedrig lagen, teilweise sogar unter 0°C.

Ab 11:00 stieg die Zulufttemperatur entsprechend der Außentemperatur, abhängig vom Wärmerückgewinnungsgrad des Lüftungsgeräts. Man erkennt deutlich die Funktion des Wärmetauschers, der bei größeren Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen die Zulufttemperatur entsprechend mehr aufheizt. Je geringer die Differenz, desto niedriger ist relativ gesehen auch der Energiegewinn durch den Wärmetauscher.

Die Innenraumtemperatur blieb über den Tag hinweg mehr oder weniger konstant, obwohl die Temperatur im Kollektor auf Werte um die 80°C anstieg. Ein Energieeintrag durch die Fenster und damit eine verbundene Aufheizung des Innenraums ist somit, wie auch vorher bereits vermutet, nicht zu erkennen und kann bei den nachfolgenden Berechnungen vernachlässigt werden.

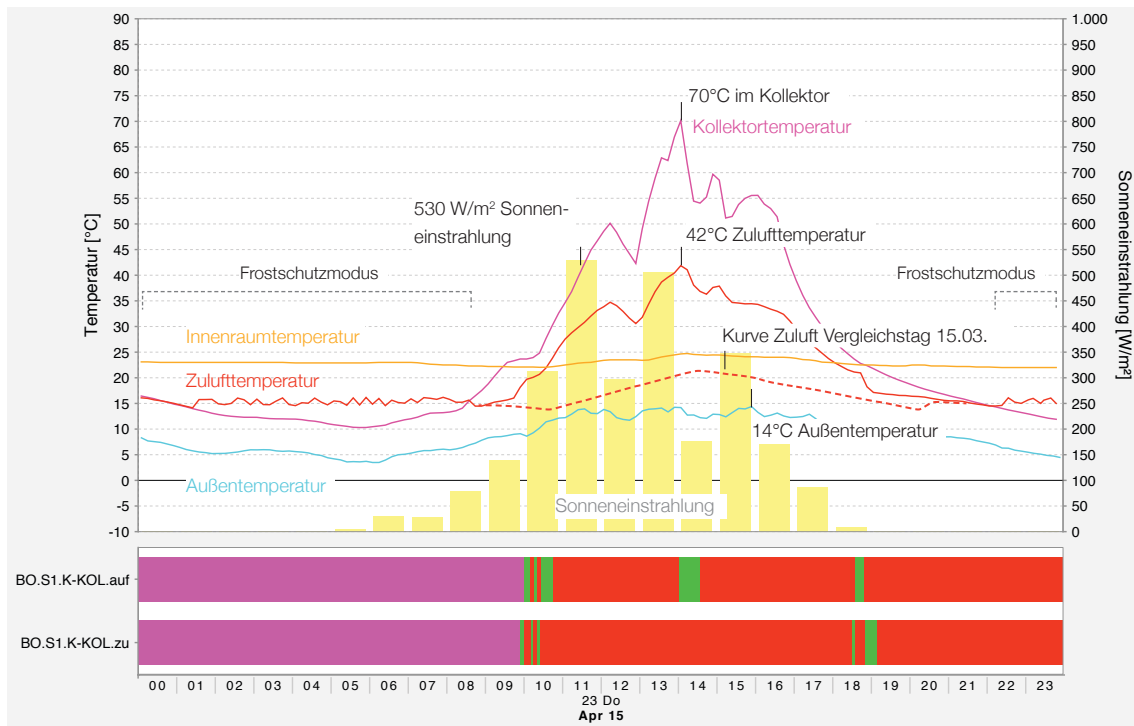


Abb. 62 23.04.2015 - Kollektorbetrieb (Raum 1)

Als Vergleichstag wurde ein Tag mit vergleichbarer solarer Einstrahlung und Außentemperaturen gewählt. Am Diagramm der Klappenaktivitäten ist ein Umschalten von Standardbetrieb auf Kollektorbetrieb gemäß Steuerung erkennbar.

Um ca. 10:00 wurde durch Umstellen der Klappen in den Kollektormodus geschaltet. Dementsprechend ist ab diesem Zeitpunkt bei der Zulufttemperatur ein deutlicher Anstieg zu verzeichnen. Zur Verdeutlichung zeigt die gestrichelte Kurve den Verlauf der Zuluft am Vergleichstag (Abbildung 61). Die Differenz der Zulufttemperatur zwischen beiden Tagen beträgt bis zu circa 20 K.

Vergleicht man die Flächen zwischen Zuluft- und Außenlufttemperaturkurve an beiden Tagen, kann anhand der geförderten Luftmengen ein Vergleich zwischen Standard- und Kollektorbetrieb angestellt werden (siehe Kapitel „3.1.3 Berechnung Energieeintrag“).

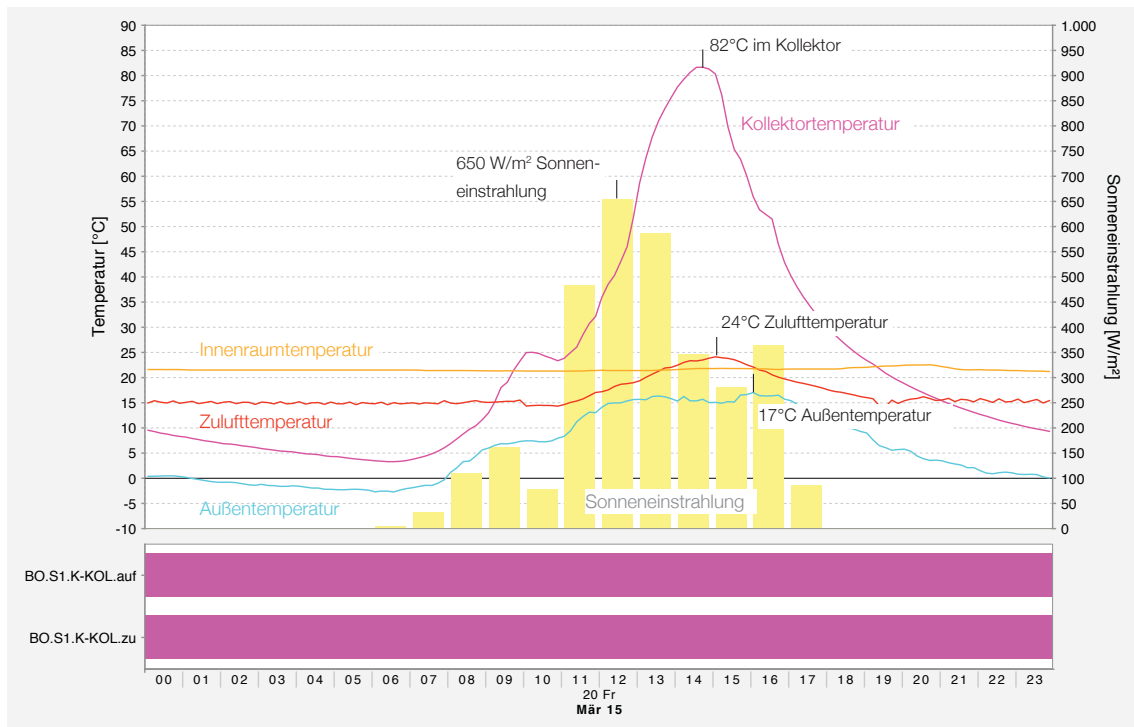


Abb. 63 20.03.2015 - Standardbetrieb mit Wärmerückgewinnung (Raum 1)

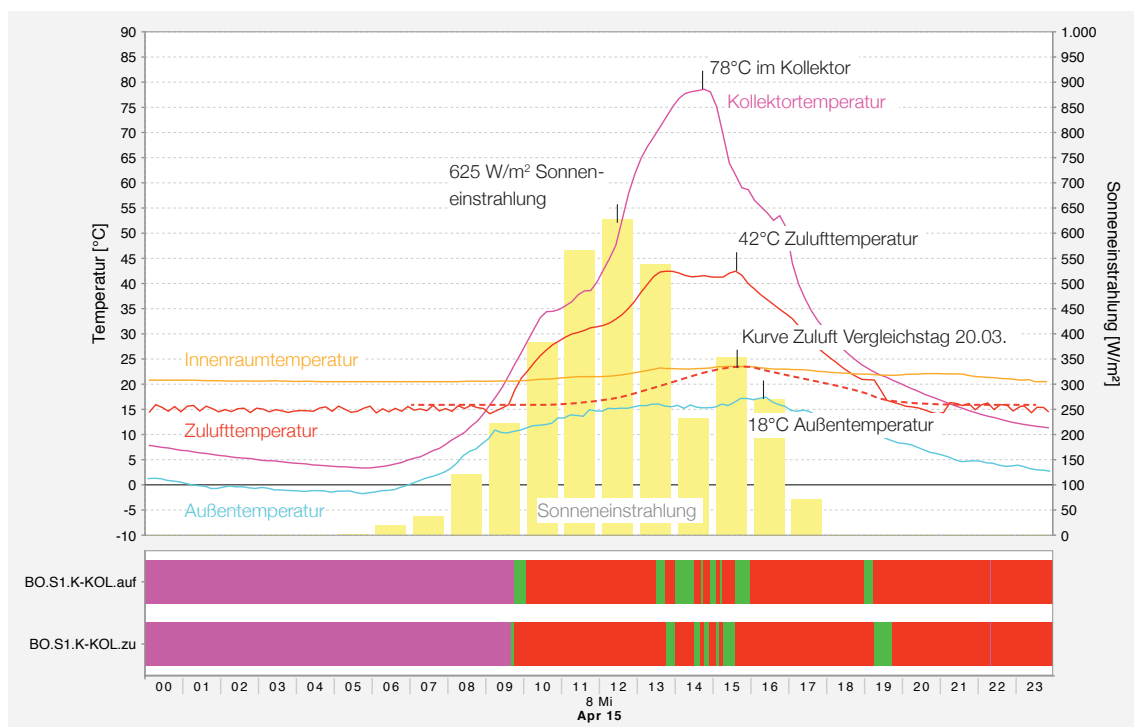


Abb. 64 08.04.2015 - Kollektorbetrieb (Raum 1)

Im Folgenden ist ein weiteres Tages-Paar zum Vergleichen der Effekte der beiden Betriebsmodi dargestellt. Die Parameter Außentemperatur und solare Einstrahlung sind auch hier vergleichbar.

Deutlich fällt die Differenz zwischen den Zulufttemperaturen auf, die bis zu 18 K beträgt. In Abbildung 64 ist beim Kollektorbetrieb entsprechend der hohen Zulufttemperaturen eine Steigerung der Innenraumtemperatur um circa 3 K zu erkennen. Im Diagramm in Abbildung 63 hingegen änderte sich die Innenraumtemperatur tagsüber kaum, erst gegen Abend stieg sie etwas an, vermutlich durch ein Aufdrehen der Heizung durch die Nutzer.

In Abbildung 64 ist eine abgeflachte Zuluft-Kurve zu erkennen, obwohl die eingestellte Grenztemperatur von 25°C noch nicht erreicht war. Bei einer kontinuierlichen Öffnung der Kollektorklappen hätten die 25°C Innenraumtemperatur wahrscheinlich auch erreicht werden können.

Zu Abbildung 63 ist außerdem anzumerken, dass auch hier (wie in Abbildung 59) die Zulufttemperatur über die Innenraumtemperatur stieg, was mit reiner Wärmerückgewinnung nicht möglich ist. Wie vorher bereits erwähnt, kann dies an einer Aufheizung der Kanäle durch die hohen Temperaturen im Kollektor liegen.

### 3.1.3 Berechnung Energieeintrag

Für die Bewertung der Kollektorfassade und zum Vergleich mit anderen Systemen soll nun der energetische Nutzen berechnet werden. Dafür wird die Energiemenge berechnet werden, die während des Kollektorbetriebs über die Zuluft eingebracht wird. Indem man die Zulufttemperatur in Relation zur Außentemperatur setzt, kann man die Innenraumtemperatur vernachlässigen. Dies ist von Vorteil, da der Raum während des Betriebs der Kollektorfassade weiterhin konventionell geheizt wurde und dies somit die Ergebnisse verfälscht hätte. Anschließend wird der Energieeintrag während des Kollektorbetriebs ins Verhältnis zu den Wärmeverlusten über die Außenwand am ganzen Tag gesetzt.

- Ermittlung Volumenstrom Zuluft

Für die Berechnungen mussten zunächst die reellen Volumenströme des Lüftungsgeräts in dieser Einbausituation ermittelt werden. Die Hochschule Rosenheim wurde damit beauftragt und führte die entsprechenden Messungen vor Ort durch. Die Ergebnisse sind im „Messprotokoll im Vorschungsvorhaben „Kollektor-Fassade“ festgehalten.

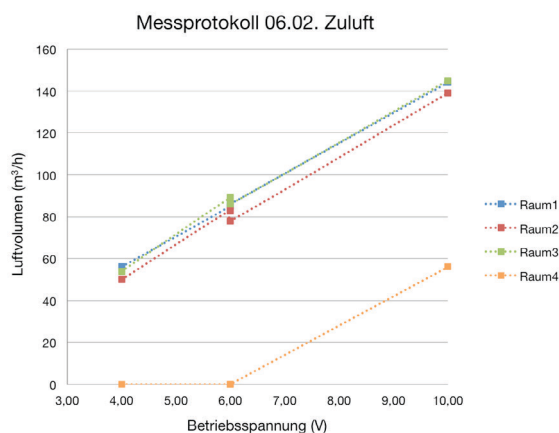


Abb. 65 Auswertung Messprotokoll



Es wurden verschiedene Kombinationen von Betriebsspannungen für die Zu- und Abluftventilatoren getestet und die sich ergebenden Volumenströme ermittelt. Das Diagramm in Abbildung 65 zeigt die Ergebnisse der für die Berechnungen relevanten Zuluftströme.

Die Messwerte der Räume 1 bis 3 weisen eine hohe Konsistenz auf und lassen eine deutliche Proportionalität zwischen Betriebsspannung und Luftvolumen erkennen. Raum 4 weicht stark von den anderen Ergebnissen ab, weil dort der Ventilator bei niedrigen Betriebsspannungen nicht in Betrieb ging. Er wird deshalb bei der Berechnung nicht betrachtet. Anhand der restlichen Räume ergibt sich im Mittel ein Proportionalitätsfaktor von 13,9, das heißt pro 1,0 V Spannung werden ca. 13,9 m<sup>3</sup>/h Luft transportiert. So lassen sich auch für andere Spannungen als die durch die Hochschule getesteten die entsprechenden Volumenströme ermitteln.

Da die einzelnen Betriebsspannungen im Lüftungsgerät nicht als Datensammlung vorliegen, muss die Betriebsspannung über die Leistung des Lüftungsgeräts abgeleitet werden. In Abstimmung mit B&O wurden diese Abhängigkeiten geklärt. Bei einer gemessenen Leistung von 30,0W beispielsweise liefen Zu- und Abluft-Ventilator auf jeweils 8,0V Betriebsspannung, wobei davon 2-3 W auf die Steuerungs- und Monitoringvorgänge entfallen. Dabei wird dann beispielsweise - berechnet über den vorher ermittelten Proportionalitätsfaktor - in etwa ein Volumen von 110 m<sup>3</sup>/h transportiert.

- Berechnung Energieeintrag

Zum Vergleich eines Tages mit Kollektorheizung mit einem Tag mit regulärer Lüftung mit Wärmerückgewinnung soll der jeweilige Energieeintrag berechnet werden. Dafür soll vor allem die Energie ermittelt werden, die zum Aufheizen der Außenluft durch den Wärmetauscher mittels Abluft aus den Räumen oder mittels Kollektorluft benötigt wird, und die somit effektiv als Wärme dem Raum zugeführt wird. Als Temperaturänderung  $\Delta T$  wird hierfür die Differenz zwischen Zulufttemperatur und Außenluft betrachtet. Dafür wurde für die einzelnen Tage anhand der vom Monitoring ausgegebenen Werte in Excel der Mittelwert der Differenz berechnet.

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

Dabei ist:

Q = Wärmemenge [kJ] oder [kWh]

c = spezifische Wärmekapazität;  $c_{\text{Luft}} = 1,005 \text{ kJ}/(\text{kgK})$

m = Masse [kg]; Luft: 1,2 kg/m<sup>3</sup>

$\Delta T$  = Temperaturveränderung [K]

$$P = Q / t$$

Dabei ist

P = Leistung [kW]

Q = Energie [kWh]

t = Zeit [h]

Zunächst errechnet man anhand der vorher ermittelten Werte für das geförderte Luftvolumen aus dem Messprotokoll das tatsächlich geförderte Volumen während der betrachteten Zeit. Diese beginnt mit dem Öffnen der Klappen im Lüftungsgerät und endet mit deren Schließen. Anhand der oben genannten Formel kann unter Einsetzung aller Werte die Wärmemenge Q errechnet werden. Wenn man diesen Wert nun in Relation zur Zeit setzt, erhält man die im gewählten Zeitraum erbrachte Leistung in kW.

- Berechnung Energieeintrag Abbildung 66:

$$\begin{aligned}
 V &= 8,17 \text{ h} \cdot 70 \text{ m}^3/\text{h} \\
 &= 572 \text{ m}^3 \\
 Q &= 1,005 \text{ kJ}/(\text{kgK}) \cdot (1,2 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 572 \text{ m}^3) \cdot 9,3 \text{ K} \\
 &= 6.415 \text{ kJ} \\
 &= \mathbf{1,78 \text{ kWh}} \\
 P &= 1,78 \text{ kWh} / 8,17 \text{ h} \\
 &= 0,22 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

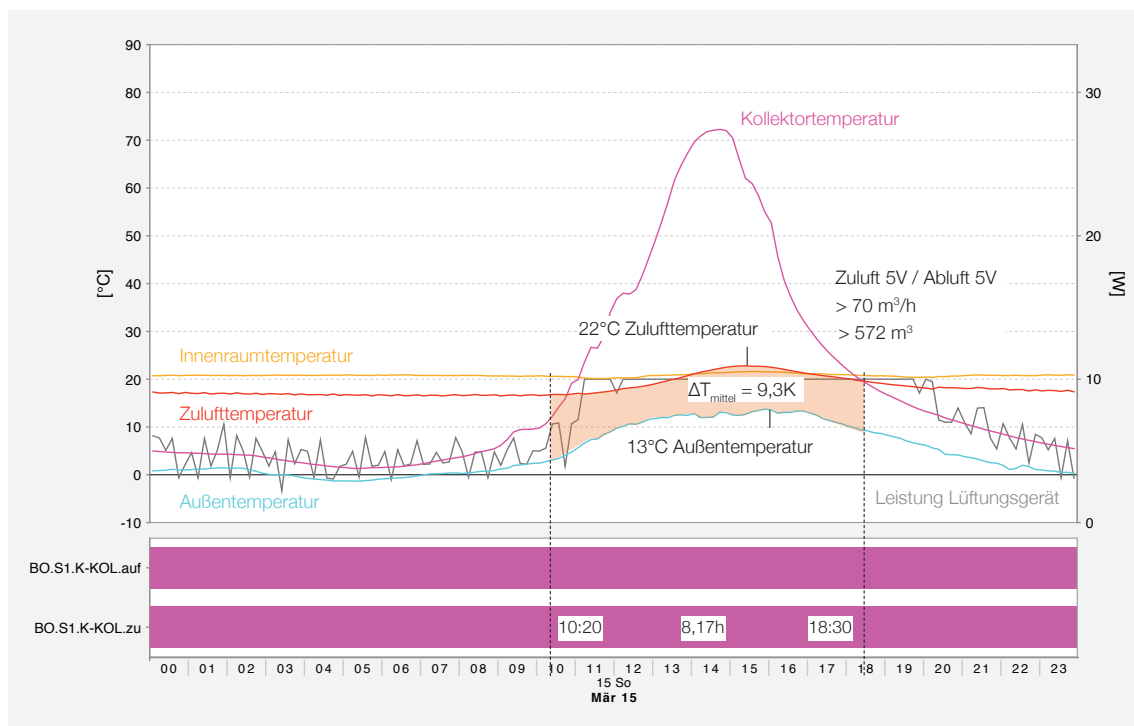


Abb. 66 15.03. Diagramm zur Berechnung Energieeintrag (Raum 1)

- Berechnung Energieeintrag Abbildung 67:

$$\begin{aligned}
 V &= 8,17 \text{ h} \cdot 110 \text{ m}^3/\text{h} \\
 &= 899 \text{ m}^3 \\
 Q &= 1,005 \text{ kJ}/(\text{kgK}) \cdot (1,2 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 899 \text{ m}^3) \cdot 20,2 \text{ K} \\
 &= 21.901 \text{ kJ} \\
 &= \mathbf{6,08 \text{ kWh}} \\
 P &= 6,08 \text{ kWh} / 8,17 \text{ h} \\
 &= 0,74 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Die Differenz zwischen beiden Tagen beträgt somit  $0,74 \text{ kW} - 0,22 \text{ kW} = 0,52 \text{ kW}$ . Beim Kollektor-

betrieb wird also mehr als das Dreifache an Wärme als bei regulärem Lüftungsbetrieb eingetragen. Anzumerken ist zudem, dass die Zulufttemperatur zeitweise sogar über der Innenraumtemperatur lag, was nicht dem Wärmerückgewinnungsbetrieb geschuldet war, sondern vermutlich der Aufwärmung der Dämmung. Der Energieeintrag durch reine Wärmerückgewinnung liegt also vermutlich noch etwas unter dem berechneten Wert.

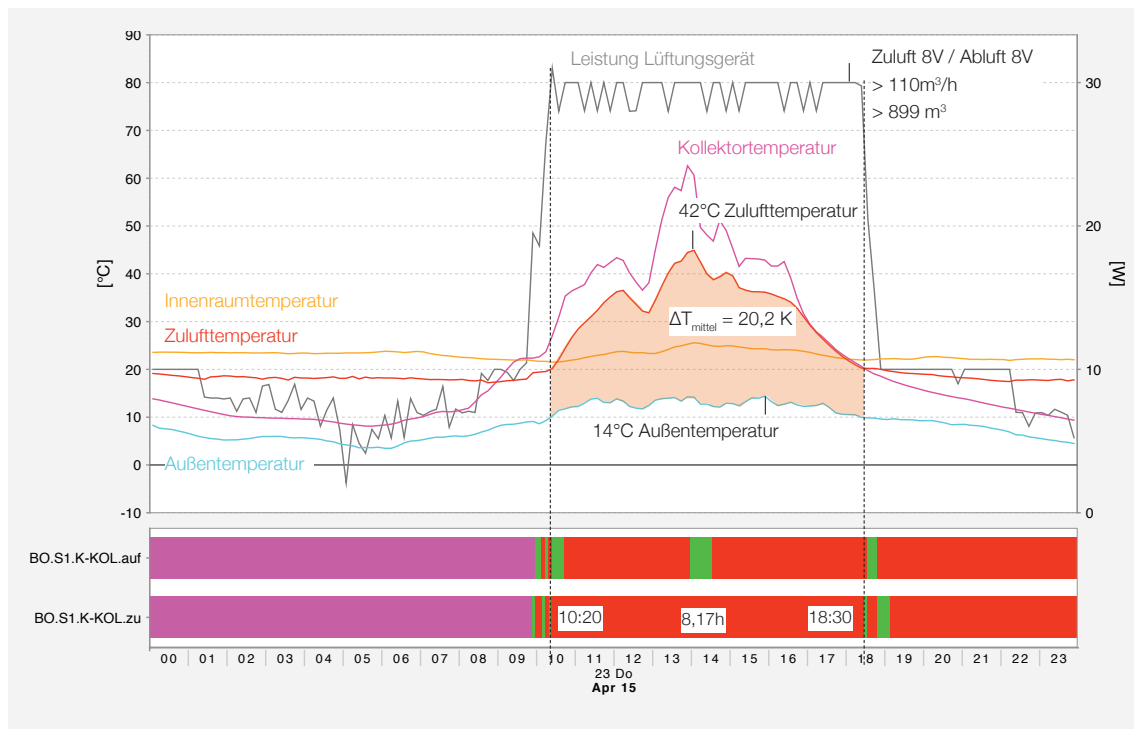


Abb. 67 23.04. Diagramm zur Berechnung Energieeintrag (Raum 1)

- Berechnung Energieeintrag Abbildung 68:

$$V = 9,67 \text{ h} \cdot 70 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$= 677 \text{ m}^3$$

$$Q = 1,005 \text{ kJ}/(\text{kgK}) \cdot (1,2 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 677 \text{ m}^3) \cdot 8,1 \text{ K}$$

$$= 6.613 \text{ kJ}$$

$$= \mathbf{1,84 \text{ kWh}}$$

$$P = 1,84 \text{ kWh} / 9,67 \text{ h}$$

$$= 0,19 \text{ kW}$$

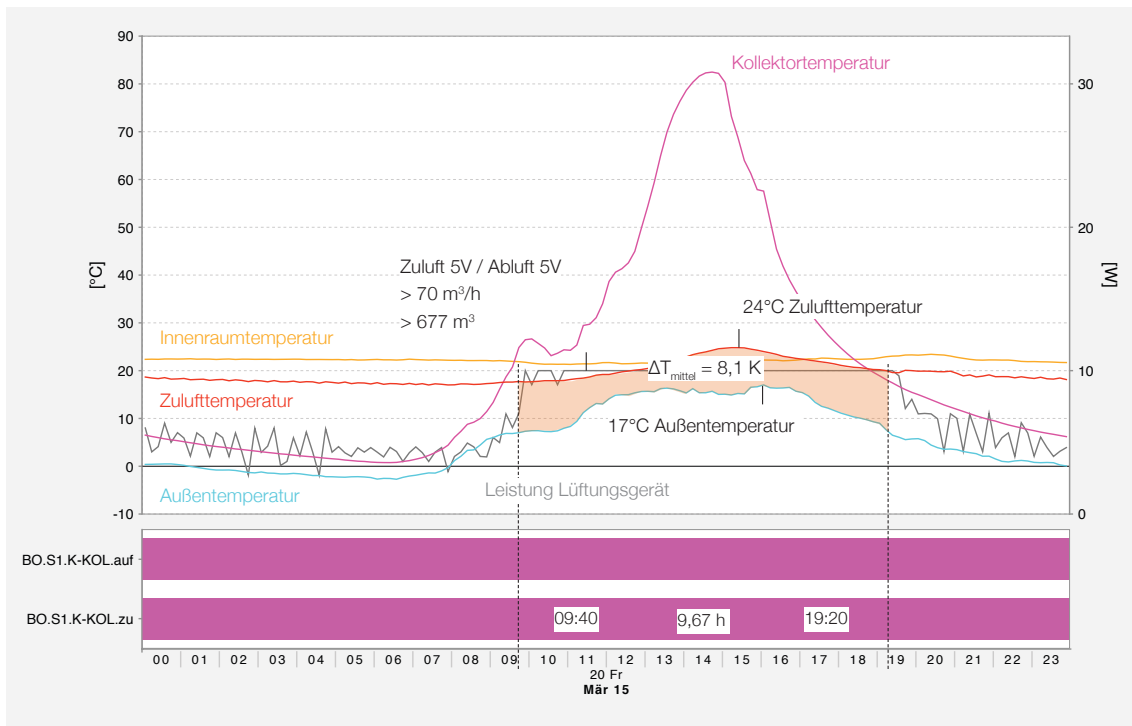


Abb. 68 20.03. Diagramm zur Berechnung Energieeintrag (Raum 1)

- Berechnung Energieeintrag Abbildung 69:

$$V = 9,67 \text{ h} \cdot 110 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$= 1.064 \text{ m}^3$$

$$Q = 1,005 \text{ kJ}/(\text{kgK}) \cdot (1,2 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 1.064 \text{ m}^3) \cdot 19,7 \text{ K}$$

$$= 25.279 \text{ kJ}$$

$$= \mathbf{7,02 \text{ kWh}}$$

$$P = 7,02 \text{ kWh} / 9,67 \text{ h}$$

$$= 0,73 \text{ kW}$$

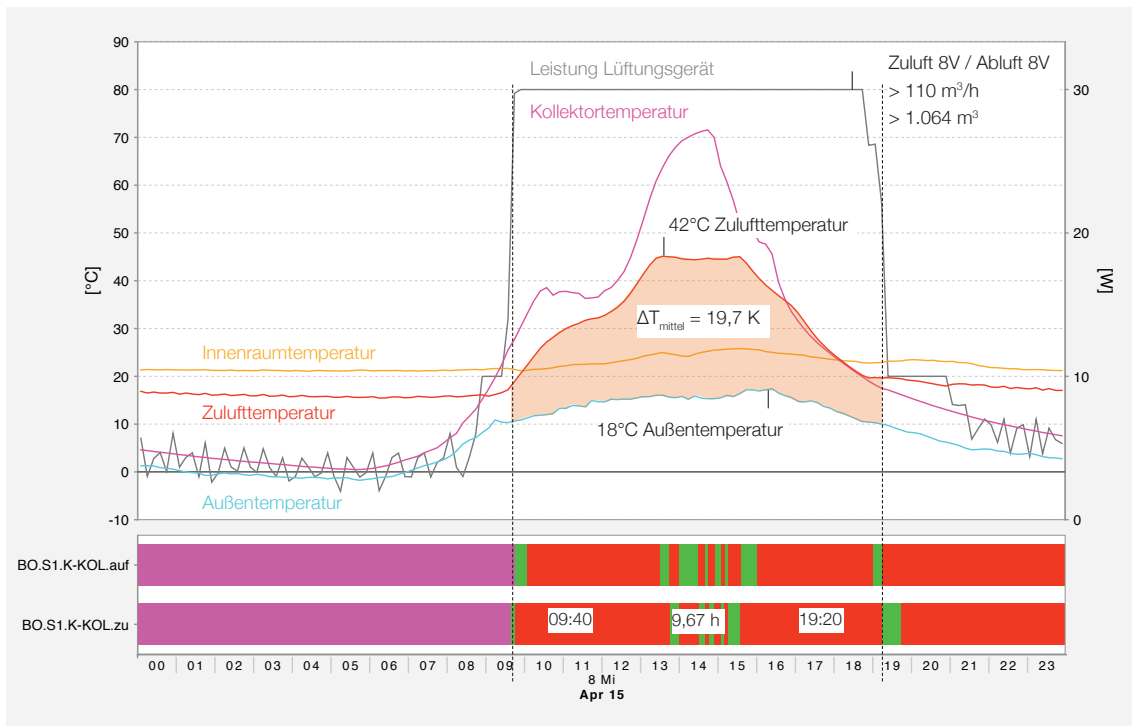


Abb. 69 08.04. Diagramm zur Berechnung Energieeintrag (Raum 1)

### 3.1.4 Temperaturverteilung Außenwand

In Bezug auf den berechneten energetischen Eintrag aus den vorangegangenen Kapiteln ist es interessant, die Leistung der Kollektorfassade in Relation zu den Wärmeverlusten im Laufe eines Tages zu setzen. Da die Energie in der warmen Kollektorluft quasi kostenlos zur Verfügung steht, benötigt man lediglich die elektrische Energie zum Betätigen der Klappen und Betreiben des Motors auf höherer Leistung. Im Folgenden soll überprüft werden, ob an Tagen mit ausreichend solarer Einstrahlung über die Kollektorfassade in den paar Stunden des Betriebs so viel Energie eingetragen wird, wie durch die Außenwände im Verlauf des ganzen Tags verloren geht.

Die folgenden Diagramme zeigen einige ausgewählte Tage mit den Werten für die innere Oberflächentemperatur der Außenwand, sowie die Temperatur im Zwischenraum zwischen Bestandswand und neuem Fassadenelement. Man erkennt deutlich, dass beide Werte trotz der stark schwankenden Außentemperaturen im Laufe der Tage nur sehr leicht variieren. Aufgrund der Trägheit des Systems treten Temperaturänderungen meist zeitverzögert und langsam ein. Vom 16. bis zum 20.03. beispielsweise steigt die Temperatur vermutlich durch die drei Tage mit hoher Einstrahlung langsam um etwa 4 K an. Die folgenden kalten Tage lassen die Werte wieder langsam sinken.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Differenz zwischen Innenraumtemperatur und Temperatur im Zwischenraum meist bei maximal 5 K zu liegen scheint. Durch die gut gedämmte Außenwand (U-Wert 0,15 W/m²K) und die teils sehr hohen Kollektortemperaturen ist also sogar nachts oder an kalten Tagen ein wenn überhaupt nur sehr geringer Transmissionsverlust zu erwarten.

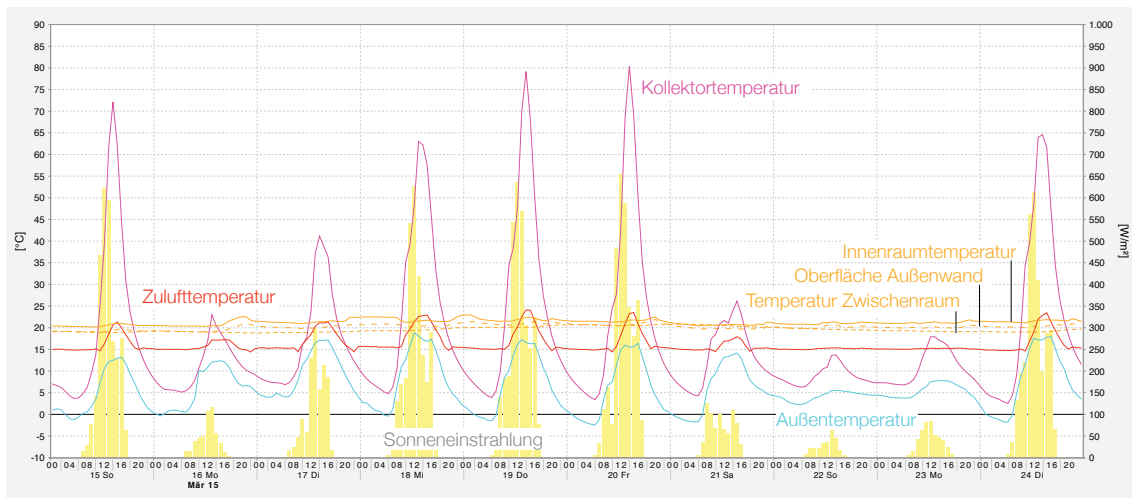


Abb. 70 Übersicht 15.03. - 24.03. mit Temperaturen Außenwand (Raum 1)

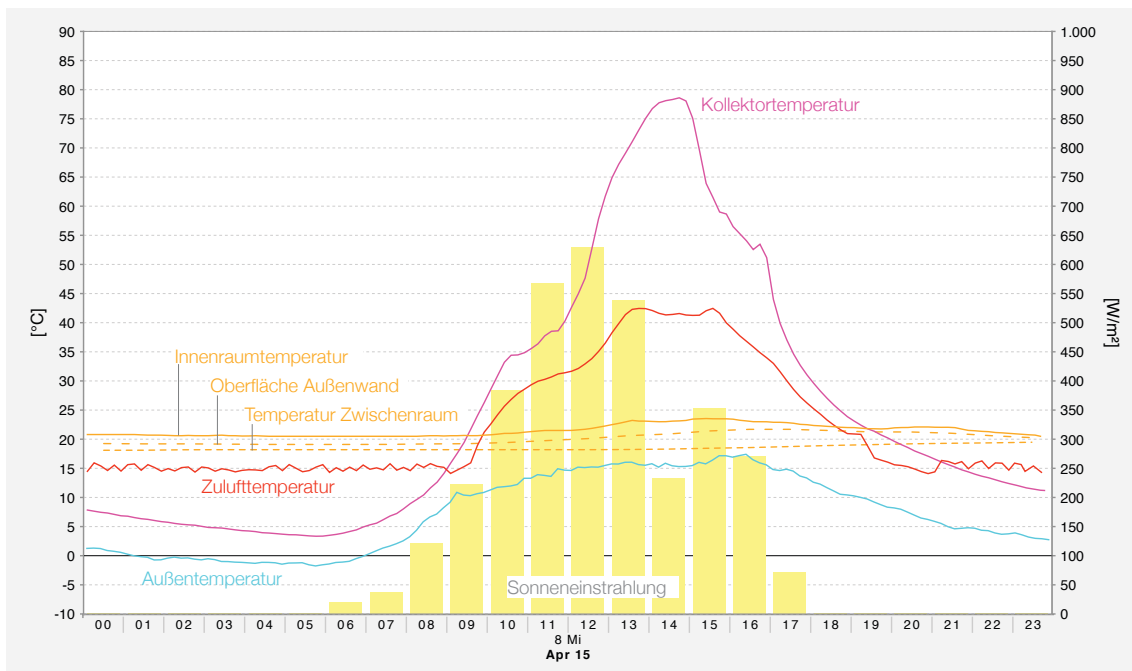


Abb. 71 08.04. RG 1: Übersicht Temperaturen Außenwand und Zwischenraum Fassadenelement (Raum 1)

Das Diagramm in Abbildung 71 zeigt einen einzelnen Tag mit den Temperaturen der Oberfläche Außenwand und Zwischenraum Fassadenelement. In den Diagrammen Abbildung 72 - 75 sind die aus dem Diagramm entnommenen Temperaturen in der Außenwand zu unterschiedlichen Tageszeiten dargestellt. Obwohl die Temperatur im Kollektor tagsüber stark ansteigt, hat dies durch die gute Dämmung zunächst keinen messbaren Effekt auf die Temperatur im Zwischenraum. Erst gegen Abend steigt sie leicht an und erreicht knapp 20°C. Die Oberflächentemperatur der Außenwand steigt entsprechend der Innenraumtemperatur zeitverzögert leicht an. Dies könnte ein Grund sein, warum die Innenraumtemperatur nach Abkühlen der Kollektor- und Zuluft verhältnismäßig langsam wieder sinkt (siehe auch Abb. 60).

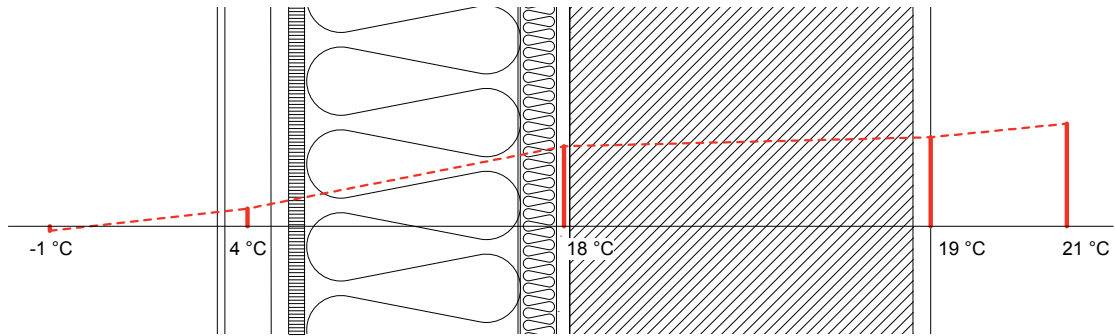


Abb. 72 08.04. 05:00

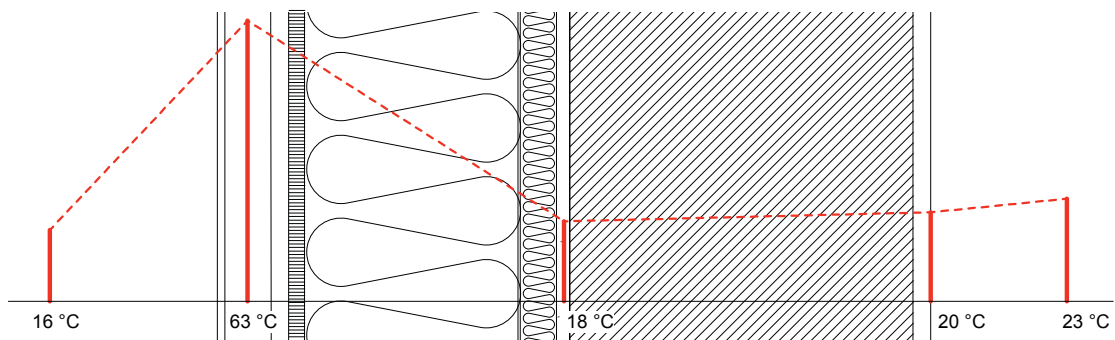


Abb. 73 08.04. 13:00

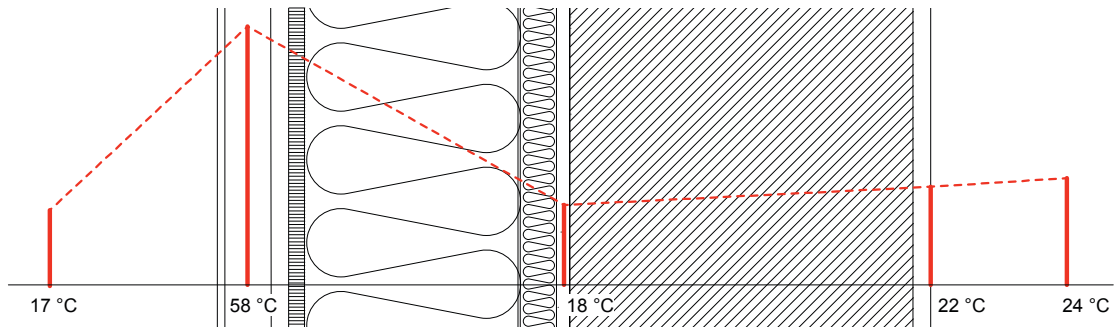


Abb. 74 08.04. 16:00

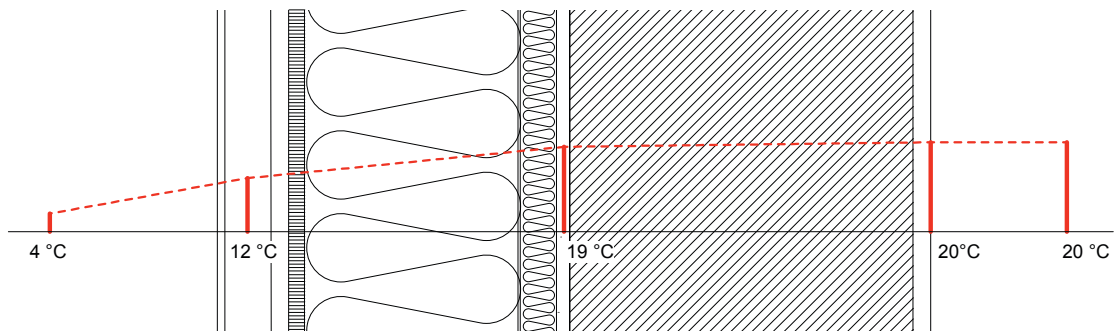


Abb. 75 08.04. 23:00

### 3.1.5 Vergleich Energieeintrag Kollektorfassade zu Verlust über Außenwände

Interessant ist es nun, die vorher ermittelten Energie- und Leistungswerte in Relation zum tatsächlichen Energiebedarf zu setzen. Eine wesentliche Größe ist hierbei der Energieverlust über die Außenwand, da dieser bei gut gedämmten Gebäuden maßgeblich den Heizwärmebedarf bestimmt. Verluste nach unten oder oben sind im Geschosswohnungsbau meist sehr gering und werden deshalb hier nicht betrachtet. Wenn nun der Energieeintrag über die Kollektorfassade groß genug ist, um die Verluste über die Außenwand auszugleichen, könnte man an einigen Tagen komplett auf eine konventionelle Heizung verzichten. Die eingebrachte Wärmemenge würde dann ausreichen, um den Wärmeverlust auszugleichen und die Innentemperatur konstant zu halten.

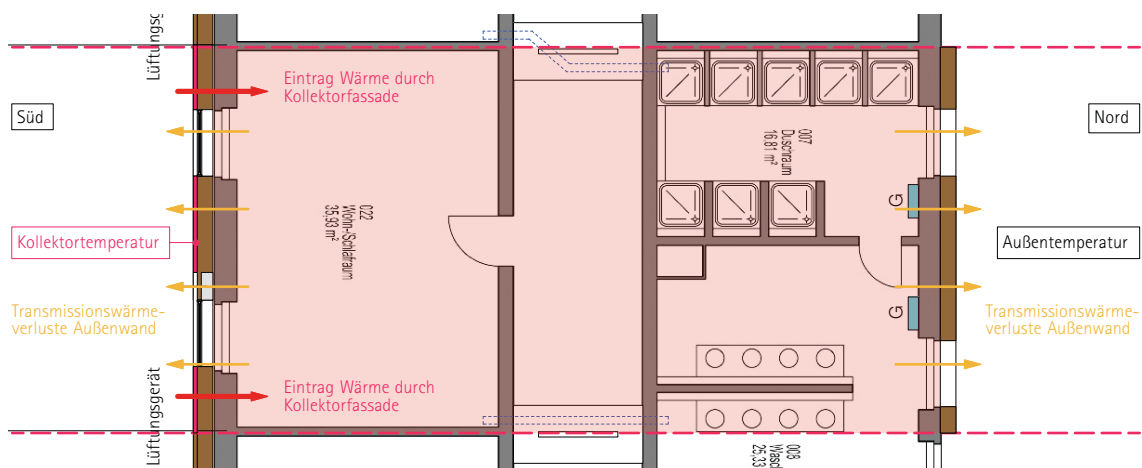


Abb. 76 Schema Berechnung Transmissionsverluste

Um dies zu ermitteln, soll der Wärmeverlust über Außenwand inklusive Fenster über 24 Stunden hinweg berechnen werden. Hierzu betrachtet man auch die Fassade im Norden, für die gemäß Konzept ebenso eine Sanierung mit gleichwertigen Holzständererelementen, jedoch ohne Luftkollektor, angenommen wird. Für die neue Fassade wurde ein U-Wert von  $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$  (ohne Einbeziehung des Luftkollektors) berechnet, für die Fenster  $1,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Mithilfe des U-Werts, dem rechnerisch bestimmten mittleren  $\Delta T$ -Wert und der Fläche der Außenwände berechnet man zunächst den Transmissionswärmestrom in W, bzw. kW. Über die Zeit  $t$ , in diesem Fall 24 h, kann man nun die absolute Energiemenge in kWh berechnen, die rein rechnerisch an diesem Tag über die Außenwände verloren geht. Diese Energie  $Q$  kann man anschließend mit der Wärmemenge  $Q$  aus den vorangegangenen Rechnungen vergleichen.

$$Q_T = U \cdot A \cdot \Delta T$$

dabei ist

$Q_T$  = Transmissionswärmestrom [W]

$U$  = Wärmedurchgangskoeffizient [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]

$A$  = Fläche wärmeübertragendes Bauteil [ $\text{m}^2$ ]

$\Delta T$  = Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft [K]

$$Q = Q_T \cdot t$$

dabei ist:



Q = Energie [kWh]  
 $Q_T$  = Transmissionswärmestrom [kW]  
 t = Zeit [h]

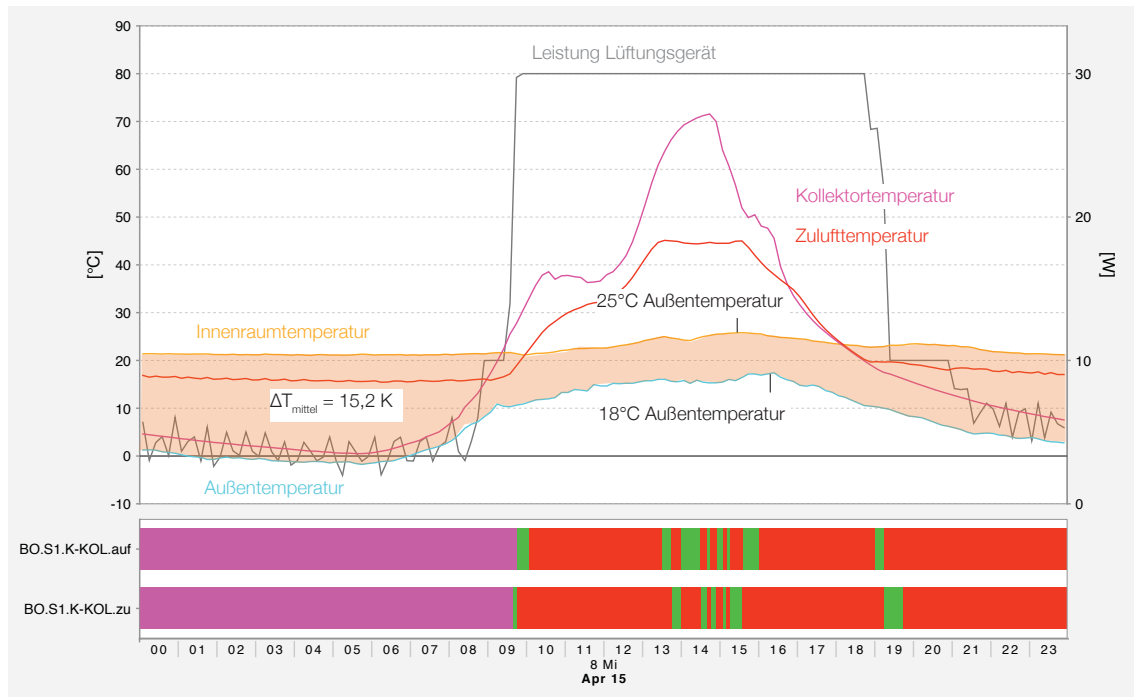


Abb. 77 Diagramm 08.04. mit  $\Delta T$  zwischen innen und außen (Raum 1)

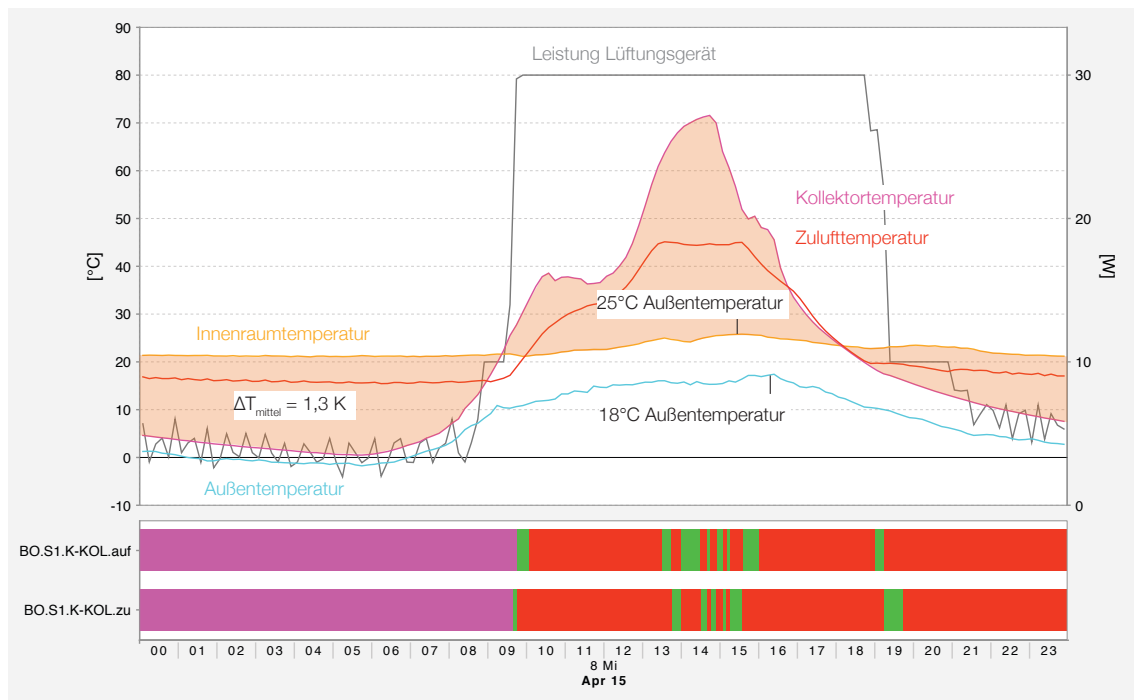


Abb. 78 Diagramm 08.04. mit  $\Delta T$  zwischen innen und Kollektortemperatur (Raum 1)

Die hohen Temperaturen im Kollektor haben neben dem aktiven Effekt durch Nutzung zur Wärmerückgewinnung auch einen Nebeneffekt: Sobald sie höher liegen als die Innenraumtemperaturen, verhindern sie die Transmission durch die Außenwand. An sonnigen Tagen könnte somit über einen langen Zeitraum keine Transmission stattfinden, sogar ein Energieeintrag ist denkbar. Die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  der folgenden Formel wird also für die Südseite mit Luftkollektor als Differenz zwischen Innen- und Kollektortemperatur angenommen werden. Da im Norden kein Luftkollektor angenommen wird, wird dort stattdessen die gemessene Außenlufttemperatur verwendet.

- Berechnung für 08.04.:

$$\begin{aligned} A_{\text{Wand}} &= 7,10 \text{ m} \cdot 2,95 \text{ m} - (1,55 \text{ m}^2 \cdot 2) \\ &= 17,8 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{\text{Fenster}} &= 2 \cdot 1,55 \text{ m}^2 \\ &= 3,10 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\Delta T_{\text{Nord}} = 15,2 \text{ K (rechnerisch ermittelt)}$$

$$\Delta T_{\text{Süd}} = 1,3 \text{ K (rechnerisch ermittelt)}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{T,Nord}} &= (0,15 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 17,8 \text{ m}^2 \cdot 15,2 \text{ K}) + (1,10 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 3,10 \text{ m}^2 \cdot 15,2 \text{ K}) \\ &= 40,58 \text{ W} + 51,83 \text{ W} \\ &= 92,41 \text{ W} \\ &\approx 0,09 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{Nord}} &= 0,09 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h} \\ &= \mathbf{2,21 \text{ kWh}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{T,Süd}} &= (0,15 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 17,8 \text{ m}^2 \cdot 1,3 \text{ K}) + (1,10 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 3,10 \text{ m}^2 \cdot 1,3 \text{ K}) \\ &= 3,47 \text{ W} + 4,43 \text{ W} \\ &= 7,9 \text{ W} \\ &\approx 0,008 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{Süd}} &= 0,008 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h} \\ &= \mathbf{0,19 \text{ kWh}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{T,ges}} &= 0,09 \text{ kW} + 0,008 \text{ kW} \\ &= 0,098 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{ges}} &= 2,21 \text{ kWh} + 0,19 \text{ kWh} \\ &= \mathbf{2,40 \text{ kWh}} \end{aligned}$$

Wie bereits vorher vermutet wurde, gab es an der Südseite durch die hohen Kollektortemperaturen auf die 24 Stunden gesehen nur sehr geringe Transmissionsverluste. Insgesamt gingen über die Außenwände 2,40 kWh über Transmission verloren. Dem entgegen steht ein Wärmeeintrag

von 7,02 kWh über die Kollektorfassade, also knapp das Dreifache. Die Kollektorfassade konnte also an diesem Tag in etwa 8 Stunden die Transmissionsverluste der kompletten 24 Stunden ausgleichen und dem Raum sogar noch zusätzliche Wärme zuführen. Von Vorteil hierbei sind die massiven raumabschließenden Wände, welche die Energie speichern und nach und nach über Strahlung wieder abgeben können. Im Gegensatz zur Luft können sie auch kleinere Schwankungen wie ein kurzes Lüften ohne nennenswerten Energieverlust bewältigen.

### 3.1.6 Abhängigkeit Wetter

Im folgenden sollen Tage mit unterschiedlichem Wetter verglichen werden. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf Außentemperatur und solarer Einstrahlung, die maßgeblich die Kollektortemperaturen und somit die eingetragenen Energiemengen bestimmen. Exemplarisch wurden einige  $\Delta T$ -Werte ermittelt, sowie der entsprechende Energieeintrag.

- Hohe Sonneneinstrahlung, niedrige Temperaturen

Bei der Betrachtung der erreichten  $\Delta T$ -Werte und dem entsprechenden Energieeintrag fällt auf, dass vor allem an kalten, sonnigen Tagen hohe Energieeinträge erreicht werden. Das nachfolgende Diagramm in Abbildung 79 zeigt exemplarisch fünf Tage, von denen an vier Tagen sehr hohe Differenzen zwischen Außenluft- und Zulufttemperatur erreicht wurden, im Mittel betrug diese circa 25 K, erreicht aber temporäre Spitzenwerte von um die 36 K. Obwohl die Außenluft 10°C teilweise nicht überschritt, erreichte die Zulufttemperatur am 19. Februar beispielsweise 44°C. Die Raumlufttemperatur zeigt dabei eine deutliche Korrelation von der Zuluft durch eine Erhöhung um bis zu 5 K.

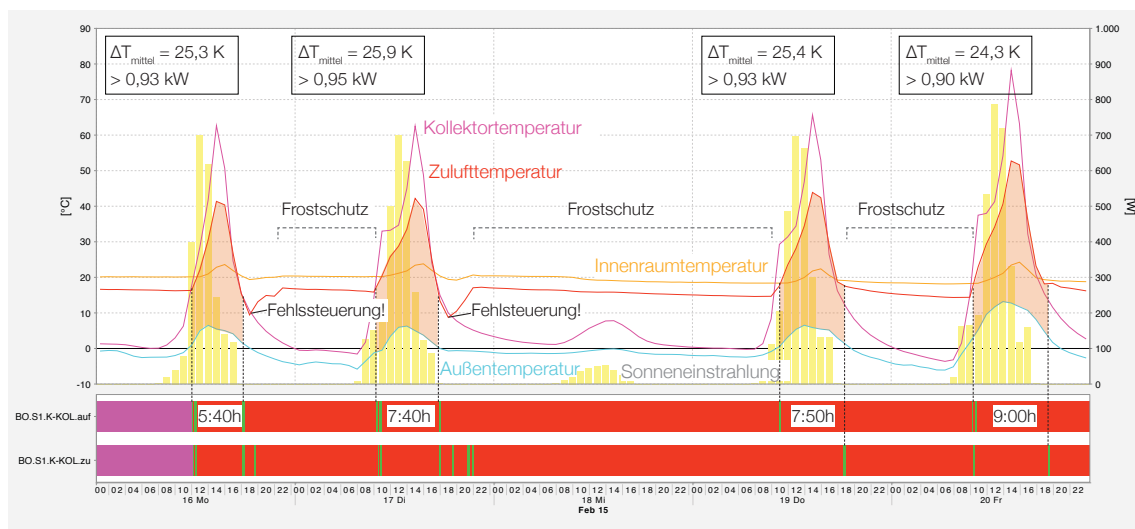


Abb. 79 16.02. - 20.02.

Vorteilhaft in den Wintermonaten ist für die Aufheizung der Kollektorluft auch der günstigere Einstrahlwinkel der Sonne, sowie das Fehlen von Laub an den vor der Fassade stehenden Bäumen.

Es ist zu erwähnen, dass am 16. und 17. Februar die Steuerung nicht richtig zu funktionieren schien, sodass die Zulufttemperatur teilweise unter 15°C fiel. Sogar die Innenraumtemperatur lässt eine kurzzeitige, leichte Absenkung durch die niedrigen Innenraumtemperaturen erkennen. Dies lag vermutlich an den kalten Lüftungskanälen. Durch die eingestellte Übertemperatur von Kolle-

tortemperatur gegenüber der Innenraumtemperatur (Kollektorluft > Raum Süd + 3K) sollte dies eigentlich nicht der Fall sein. Gegebenenfalls sollte bei sehr niedrigen Außentemperaturen der Wert sogar noch angehoben werden.

- Hohe Sonneneinstrahlung, hohe Temperaturen

Das folgende Diagramm zeigt fünf Tage im April. Die Außentemperaturen überschreiten hier teilweise bereits die 20°C, die Sonneneinstrahlung ist mit über 500 W/m<sup>2</sup>K relativ hoch. An ohnehin schon warmen Tagen wird sogar bei relativ geringer Sonneneinstrahlung die eingestellte Höchsttemperatur im Innenraum so schnell erreicht, dass auf normalen Wärmerückgewinnungsbetrieb und auch auf ein geringeres Luftförderolumen zurückgeschaltet wird. Man erkennt deutlich die abgeflachten Zuluft-Kurven. Die eingestrichelten Kurven deuten die theoretischen Zulufttemperaturen an, wenn keine Regulierung durch die Steuerung stattgefunden hätte.

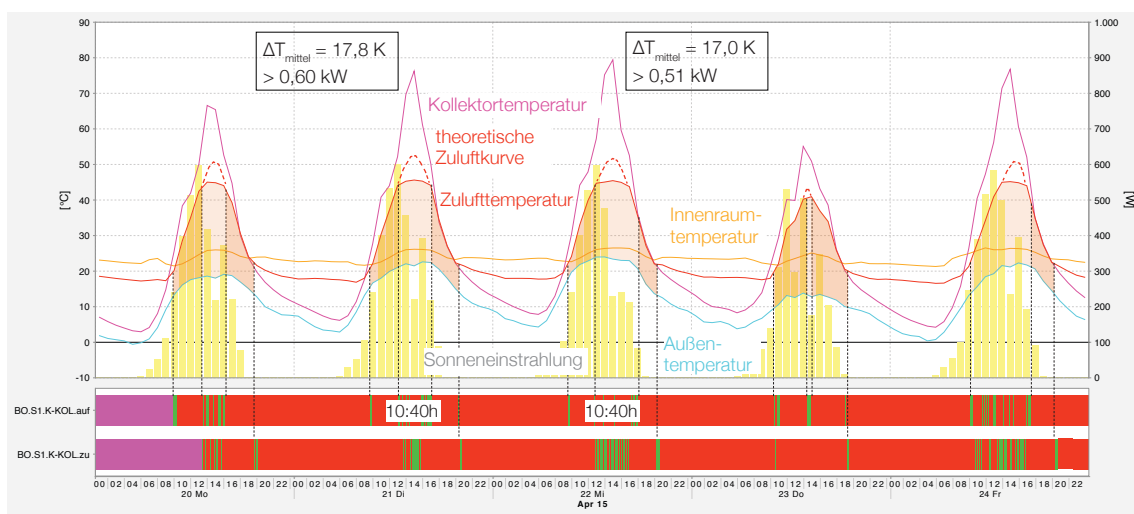


Abb. 80 20.04. - 24.04.

- Geringe Sonneneinstrahlung, niedrige Temperaturen

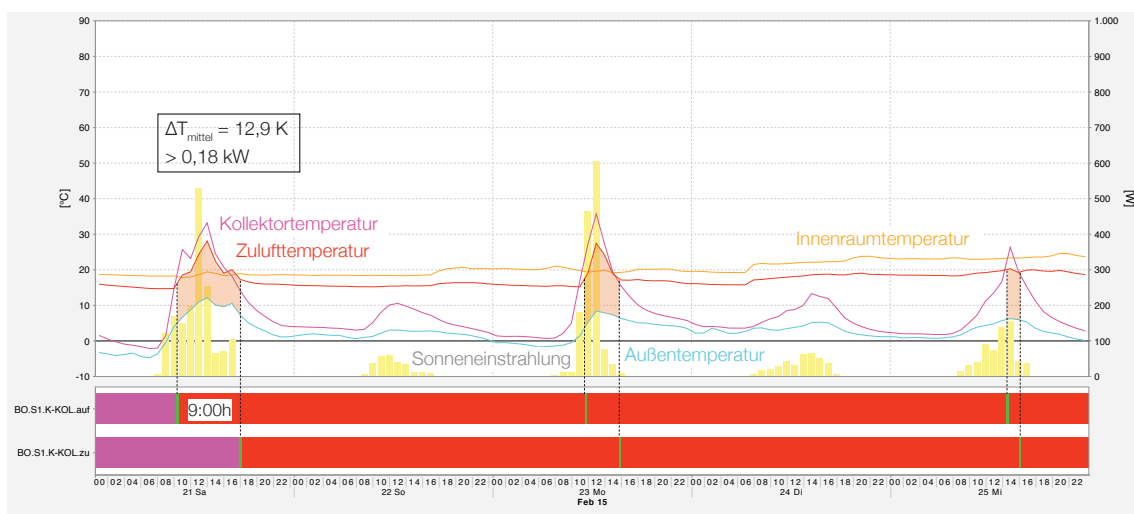


Abb. 81 21.02. - 25.02.

An Tagen mit geringer Sonneneinstrahlung fällt sofort auf, dass die Temperaturen im Kollektor deutlich geringere Temperaturen aufweisen. Sind die Außentemperaturen zusätzlich noch sehr gering, steigen sie meist noch nicht einmal über die Innenraumtemperatur. Wie zu erwarten, lohnt sich der Kollektorbetrieb an solchen Tagen nicht, sodass die Lüftung nur auf Wärmerückgewinnung aus der Abluft betrieben wird. Sobald es jedoch eine mittlere Sonneneinstrahlung gibt, steigen die Temperaturen im Kollektor schnell an, sodass wenigstens für ein paar Stunden der Kollektor zugeschaltet werden kann.

- Geringe Sonneneinstrahlung, hohe Temperaturen

Wenn die Temperaturen jedoch hoch genug sind, bewirken auch geringe Differenzen zwischen Außenlufttemperatur und Kollektortemperaturen, dass die Zuluft wärmer ist als die Innenraumtemperatur. Laut Steuerung lohnt sich somit der Kollektorbetrieb. Da die Innenraumtemperaturen allerdings bereits ebenfalls relativ hoch sind, wird der Kollektorbetrieb häufig schnell wieder abgeschaltet.

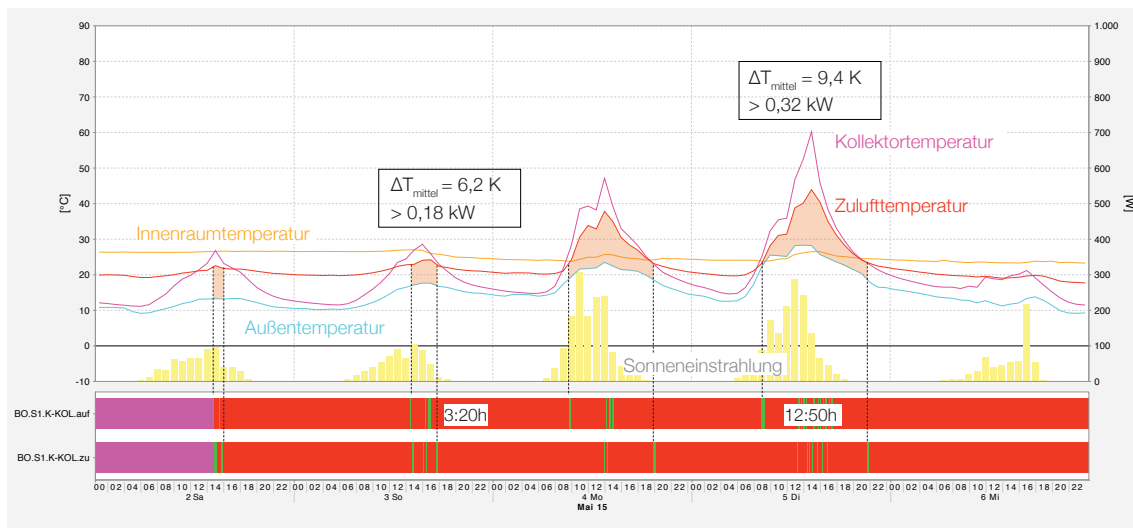


Abb. 82 02.05. - 06.05.

Wie zu erwarten war, lohnt es sich also vor allem in den Wintermonaten, die Kollektorfassade als Ergänzung zu konventionellen Heizsystemen einzusetzen. An ohnehin warmen Tagen schaltet das System bald auf Standardlüftung mit Wärmerückgewinnung zurück, um eine Überhitzung des Innenraums zu vermeiden.

Der Vergleich zeigt, dass unabhängig von der Temperatur eine bestimmte Menge an Sonneneinstrahlung benötigt wird, um die Luft im Kollektor ausreichend aufheizen zu können. Da sich die Außentemperaturen ja ohnehin kaum beeinflussen lassen, sollten bei der Evaluierung, ob sich eine Kollektorfassade lohnt, unbedingt Belange der Sonneneinstrahlung und Verschattung betrachtet werden. Eine Sonnenstudie kann Hinweise darauf geben, wieviel Prozent der Fassade im Tagesverlauf - beispielsweise durch Angrenzende Bauteile, Nachbarbebauung oder Bäume - übers Jahr hinweg verschattet werden.

### 3.1.7 Stromverbrauch

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln der Energieeintrag über die Fassade berechnet wurde, ist es wichtig, diesen mit dem Stromverbrauch des Lüftungsgeräts zu vergleichen.

#### - Standardbetrieb

An einem Tag, wo die Fassade nicht auf Kollektorbetrieb umschaltet, also nur im Standardmodus läuft, laufen die Lüftungsgeräte im Norden und Süden jeweils mit 5,0 V Betriebsspannung und verbrauchen dabei 10,0 W, wobei davon 2-3 W auf Steuerungskomponente und Monitoring entfallen. Insgesamt wird dabei ein Luftvolumen von jeweils 70 m<sup>3</sup>/h gefördert. Dies entspricht einem Stromverbrauch pro gefördertem Luftvolumen von 0,14 W/m<sup>3</sup>/h.

Verbrauch 24 h Standardbetrieb

$$\begin{aligned} W &= 24 \text{ h} \cdot 10 \text{ W} \cdot 2 \\ &= 480 \text{ Wh} \\ &= \mathbf{0,48 \text{ kWh}} \end{aligned}$$

Unter Einbeziehung des Primärenergiefaktors von 2,4 (allgemeiner deutscher Strommix) ergeben sich daraus 1,15 kWh pro Tag.

#### - Kollektorbetrieb

Im Kollektorbetrieb laufen beide Ventilatoren im Süden mit 8,0 V Betriebsspannung, was (inkl. Steuerung und Monitoring) 30 W Leistung entspricht. Der Stromverbrauch bezogen auf das geförderte Luftvolumen beträgt dann im Süden 0,27 W/m<sup>3</sup>/h. Im Norden läuft nur der Abluftventilator auf 8,0 V, was in etwa 16 W entspricht. Wenn an einem Tag der Kollektorbetrieb 8 Stunden läuft, ergibt sich folgender Stromverbrauch.

Verbrauch 16 h Standardbetrieb, 8 h Kollektorbetrieb

$$\begin{aligned} W &= 16 \text{ h} \cdot 10 \text{ W} \cdot 2 + 8 \text{ h} \cdot 30 \text{ W} + 8 \text{ h} \cdot 16 \text{ W} \\ &= 320 \text{ Wh} + 240 \text{ Wh} + 128 \text{ Wh} \\ &= 688 \text{ Wh} \\ &= \mathbf{0,67 \text{ kWh}} \end{aligned}$$

Unter Einbeziehung des Primärenergiefaktors von 2,4 (allgemeiner Strommix) ergeben sich daraus 1,61 kWh pro Tag. Da die Lüftung hierbei als notwendig erachtet wird, ist dem Kollektorbetrieb nur die Differenz von 0,46 kWh geschuldet, was aus dem höheren Verbrauch der Lüftungsgeräte bei höheren Betriebsspannungen resultiert.

## 3.2 Nutzerbefragungen

Neben der Bewertung von Planung und Ausführung, sowie der Auswertung der Messergebnisse sollten auch die Meinungen und Eindrücke der Nutzer in die Bewertung der Kollektorfassade einbezogen werden. Einerseits wurde dafür die Internatsleitung einbezogen, andererseits sollten die Bewohner der Zimmer direkt nach ihren Erfahrungen befragt werden.

### 3.2.1 Befragung Internatsleitung

Bereits während der Montage und des Betriebs bestand ein enger Kontakt zur Leitung des Fußballinternats. Neben dem wichtigen Thema Behaglichkeit in den Zimmern standen vor allem Probleme und Herausforderungen beim Betrieb im Vordergrund der Gespräche, um Erkenntnisse für die Weiterentwicklung der Fassade zu erlangen. Dabei galt es herauszufiltern, welche Probleme allgemeiner Natur waren und welche durch die speziellen Verhältnisse (Internatsnutzung, spezielle Nutzung der Räume, Alter der Nutzer) entstanden sind.

Nach Aussage der Internatsleitung schlafen jeweils vier Jungen zwischen 11 und 15 Jahren in den mit Kollektorelementen ausgestatteten Zimmern. Da die Schüler fast den ganzen Tag im Unterricht oder beim Sport sind, verbringen sie tagsüber kaum Zeit in ihren Zimmern, nur jeweils eine halbe Stunde in den Pausen mittags und nachmittags. Ab ca. 18:30 sind sie meist wieder auf ihren Zimmern, zwischen 21:00 und 7:00 ist Nachtruhe.

Das Personal im Internat wurde früh in den Planungsprozess der Kollektorfassade einbezogen und fühlt sich dementsprechend gut darüber informiert. Es wurde ein Infoblatt konzipiert und an die Kinder verteilt, um sie über die Funktionsweise aufzuklären.

Bezüglich der Behaglichkeit in den Zimmern gab es keine Beschwerden, ebenso konnten kaum Veränderungen wahrgenommen werden. Wie bereits vorher erwähnt, wurden die Zimmer während des Betriebs der Fassade weiterhin geheizt, und ebenso - vermutlich auch aus Prinzip - weiterhin regelmäßig über die Fenster gelüftet.

Die einzigen Beschwerden durch die Kinder betrafen die Geräuschentwicklung der Lüftungsgeräte. Nach Rücksprache mit dem Projektleiter wurde dies jedoch zeitnah behoben, indem die Ventilatorleistung nachts reduziert wurden.

In Hinblick auf die Montage der Fassade war die Meinung zweigeteilt. Die Arbeit der Holzbau-firma bewertete man als positiv, die Arbeit der Gewerke Abbruch und Trockenbau jedoch als eher negativ, da viel Dreck bei den Innenbaumaßnahmen verursacht wurde.

Sehr positiv fielen die Rückmeldungen bezüglich der Optik der neuen Fassade aus. Sowohl Kinder als auch deren Eltern äußerten sich sehr positiv über die Gestaltung.

### 3.2.2 Befragung Nutzer

Zusätzlich zu den Meinungen der Internatsleitung sollten auch die Schüler direkt, die in den mit Kollektorelementen ausgestatteten Zimmern wohnen, befragt werden. Da es sich in diesem Fall bei um Schüler zwischen 11 und 15 Jahren handelt, wurde ein spezieller Fragebogen ausgearbeitet, um Meinungen zu Themen wie Geräuschbelastung durch das Lüftungsgerät, Behaglichkeit im Zimmer und Eindrücke zur Montage mittels einfacher, direkter Fragen zu erhalten. Insgesamt kamen 14 ausgefüllte Fragebögen zurück.

Die Ergebnisse lassen erkennen, dass es für die Schüler nicht ganz einfach war, die Fragen zu beantworten. Bei 7 Fragen wurde am häufigsten das mittlere Kästchen angekreuzt, was darauf hindeutet, dass die Schüler unsicher bei der Beantwortung waren oder eventuell keine dezidierte Meinung dazu hatten. Bei der Frage nach dem Nutzen der Kollektorfassade war neben der

mittleren Antwort (47%) keine Antwort mit 37% am zweithäufigsten.

Bei der Frage nach der Beeinträchtigung während der Montage geht die Tendenz in die Richtung, dass die Schüler sich wenig bis gar nicht durch die Arbeiten gestört fühlten. Wie im Kapitel Montage bereits erläutert wurde, konnten die Hauptarbeiten in der Woche der Herbstferien ausgeführt werden, sodass nur noch kleinere Arbeiten, vor allem in den Fluren, im Nachhinein getätigt werden mussten.

1. Wie hast Du den **Aufbau** der Fassade erlebt?

35%	10%	39%	7%	10%	0%
<i>ich habe davon gar nichts mitbekommen</i>				<i>der Aufbau war sehr störend</i>	

2. Wie empfindest Du die **Geräusentwicklung** durch das Lüftungselement **tagsüber**?

41%	11%	10%	28%	10%	0%
<i>das Lüftungsgerät macht keine Geräusche</i>				<i>das Lüftungsgerät ist sehr laut</i>	

3. Wie empfindest Du die **Geräusentwicklung** durch das Lüftungselement **nachts**?

17%	14%	7%	22%	34%	7%
<i>das Lüftungsgerät macht keine Geräusche</i>				<i>das Lüftungsgerät ist sehr laut</i>	

4. Wie ist die **Temperatur** durchschnittlich bei Dir im Zimmer?

27%	28%	41%	4%	0%	0%
<i>es ist zu warm</i>		<i>ok</i>		<i>es ist zu kalt</i>	

5. Hat sich die durchschnittliche **Temperatur** seit der Installation der Kollektorfassade verändert??

10%	22%	44%	4%	0%	20%
<i>es ist wärmer geworden</i>		<i>nein</i>		<i>es ist kälter geworden</i>	

6. Wie ist die **Luftqualität** im Raum **tagsüber**?

20%	23%	22%	25%	10%	0%
<i>sehr gut</i>		<i>ok</i>		<i>sehr schlecht</i>	

7. Wie ist die **Luftqualität** im Raum **nachts**?

10%	0%	45%	39%	0%	7%
<i>sehr gut</i>		<i>ok</i>		<i>sehr schlecht</i>	

8. Hat sich die **Luftqualität** seit der Installation der Kollektorfassade verändert?

0%	20%	55%	8%	7%	10%
<i>ja, besser</i>		<i>nein</i>		<i>ja, schlechter</i>	

9. Wie oft lüftet Ihr am Tag über die **Fenster**?

0%	0%	41%	29%	31%	0%
<i>nie</i>	<i>1x</i>	<i>2x</i>	<i>3x</i>	<i>die Fenster sind immer geöffnet/gekippt</i>	

10. Wie groß schätzt Du insgesamt den **Nutzen** der Kollektorfassade sein?

0%	0%	47%	17%	0%	37%
<i>die Fassade hat einen sehr großen Nutzen</i>				<i>die Fassade hat gar keinen Nutzen</i>	

Abb. 83 Auswertung Fragebögen Schüler



Hinsichtlich der Geräuscentwicklung durch das Lüftungsgerät ist eine eindeutige Tendenz erkennbar. Tagsüber empfinden zwei Drittel der Schüler die Lautstärke des Lüftungsgeräts als wenig bis gar nicht störend. Nachts hingegen ist die Situation umgekehrt und die Geräusche des Lüftungsgeräts scheinen die Schüler teilweise sehr beeinträchtigt zu haben. Dies deckt sich mit den Aussagen der Internatsleitung, die vor allem zu Beginn der Nutzung Beschwerden bezüglich der Lautstärke meldete. Mit der Zeit ließen laut Internatsleitung diese Beschwerden nach. Grund für die unangenehme Situation könnte allerdings gewesen sein, dass die Schüler teils in Stockbetten schlafen und einige Schüler somit nachts in unmittelbarer Nähe zu den Ausblasöffnungen liegen. Bei einer herkömmlichen Wohnung wäre dies kaum der Fall, beziehungsweise hätte man die Möglichkeit, mit der Möblierung auf die Ausblasöffnungen oder umgekehrt mit den Öffnungen auf die geplante Möblierung zu reagieren.

In Bezug auf die Bewertung der Behaglichkeit in den Räumen ist es schwierig, eindeutige Aussagen zu treffen. Da die Räume auch während des Betriebs der Kollektorfassade weiterhin konventionell geheizt wurden, und auch aus pädagogischen Gründen weiterhin jeden Morgen gelüftet wurde, war abzusehen, dass sich Temperatur und Raumlufqualität nur unerheblich ändern würden. Tendenziell fanden es die Schüler nach Installation der Fassade etwas wärmer als vorher, im Schnitt waren sie mit der Durchschnittstemperatur zufrieden.

Dass trotz mechanischer Lüftung mehr als zweimal pro Tag gelüftet wurde, hängt einerseits mit der Nutzung und Belegung der Zimmer zusammen (vier Sport treibende Teenager) als auch mit der Tatsache, dass es wohl geregelte, weiterhin praktizierte Lüftungsroutinen gibt.

### 3.3 Kostenbetrachtung

Das Pilotprojekt bot die Gelegenheit, zum ersten Mal auch die Kosten des untersuchten Systems auf Basis von realen Preisen zu bewerten. Nach Abzug der projektspezifischen Kosten (z.B. Erneuerung Regenrinne) sowie Kosten von Nebenarbeiten, die bei jeder anderen Sanierung ebenfalls anfallen würden (z.B. Austausch der Fenster) ergab sich für die Kollektorfassade selbst im Pilotprojekt folgende Kostenwerte:

Kosten Kollektorfassade Pilotprojekt  
(bereinigt um projektspezifische Nebenarbeiten)

	Gesamtsummen Projekt	qm bzw. Stk	Kosten pro qm bzw. Stk
Fassadenelemente inkl. Leitungen	69.020	298	232
Profilglas	33.320	298	112
Anstrich Oberfläche Fassade	4.479	298	15
Lüftung inkl. Steuerung	23.492	8	2.937
Kernbohrungen	1.523	8	190

Auf Basis der ermittelten Einzelpreise wurden die Kosten aus der beschriebenen Konstellation des Pilotprojektes (mit Unterkunftsräumen / Flur / Sanitäranlagen) auf die Anwendung des Systems an einer typischen Wohnung hochgerechnet. Betrachtet wurde dafür eine Wohnung mit 9 lfm Fassade auf der Südseite (belegt mit Kollektorfassade) und 9 lfm Fassade auf der Nordseite (mit Holzschalung belegt) bei einer Wohnfläche von ca. 90qm:

Umrechnung auf Kosten pro Wohnung - Kollektorfassade  
(je 9lfm Fassade an Nord- und Südseite)

	Kosten pro qm bzw. Stk	qm bzw. Stk	Summe
Fassadenelemente inkl. Leitungen	232	51	11.812
Profilglas Südseite	112	25,5	2.851
Anstrich Oberfläche hinter Glas	15	25,5	383
Holzschalung Nordseite	100	25,5	2.550
Lüftung inkl. Steuerung	2.937	1	2.937
Kernbohrungen	190	1	190
		Summe:	20.724
		pro qm Fassadenfläche:	406

Zum Vergleich des Kostenwertes mit dem für eine reine Lüftungsfassade ohne Kollektornutzung wurde die Verglasung auf der Südseite durch eine Holzschalung ersetzt sowie die Kosten für eine vereinfachte Lüftung (mit einfacherer Steuerung und ohne integrierte Umschaltetelement) eingesetzt. Es ergibt sich so eine relativ geringe Kostendifferenz zwischen Kollektorfassade und reiner Lüftungsfassade:

Umrechnung auf Kosten pro Wohnung - Lüftungsfassade  
(je 9lfm Fassade an Nord- und Südseite)

	Kosten pro qm bzw. Stk	qm bzw. Stk	Summe
Fassadenelemente inkl. Leitungen	232	51	11.812
Profilglas	112	entfällt	
Anstrich Oberfläche hinter Glas	15	entfällt	
Holzschalung Nord- und Südseite	100	51	5.100
Lüftung inkl. Steuerung	2.437	1	2.437
Kernbohrungen	190	1	190
		Summe:	19.539
		pro qm Fassadenfläche:	383

Bei rein energetischer Betrachtung kann daraus eine Amortisationszeit der Mehrkosten von ca. 34 Jahren ermittelt werden.

Mehrkosten pro Wohnung:				1.184 EUR
Reduzierung Energieverbrauch durch Kollektornutzung:	51 qm	x	6,9 kWh / qm a	= 351 kWh / a
Einsparung pro Jahr (Endenergiepreis von 10ct/kWh)	-0,1 EUR	x	351 kWh / a	= -35,1 EUR
			Amortisierung nach:	34 a

In der Praxis wird aber auch der größere Wartungsaufwand für die Holzfassade im Vergleich zur Glasfassade zum Tragen kommen, so dass sich die Amortisationszeit auf ca. 10 Jahre reduziert:

$$\begin{array}{rclcl} \text{zusätzliche Ersparnis wegen Entfall Anstrich alle 10 Jahre:} & 25,5 \text{ qm} & \times & -35 \text{ EUR / qm} & = & -892,5 \text{ EUR / 10a} \\ & & & & & -89,25 \text{ EUR / a} \\ & & & & & \text{Amortisierung nach:} & 10 \text{ a} \end{array}$$

Nicht berücksichtigt in dieser Betrachtung ist die insgesamt sicherlich kürzere Lebensdauer der Holzfassade, die sich bei einem Austausch nach spätestens 50 Jahren nochmal in einer jährlichen Kostenersparnis für die Kollektorfassade in Höhe von ca. 100 EUR pro Wohnung und Jahr niederschlagen würde. Allerdings wären in diesem Fall auch Wartungsarbeiten für die Glasfläche gegenzurechnen (z.B. Erneuerung der Silikonfugen, Austausch von defekten Gläsern), für deren genaue Bezifferung noch die Erfahrungswerte fehlen.

Auf Basis der Kostenwerte aus dem Pilotprojekt ließen sich auch für die einfachste Variante im Fassadensystem, die passive Fassade ohne Lüftung, relativ genaue Werte ermitteln. Es mussten hierfür nur die Mehraufwendungen für die Ausführung der Lüftungsleitungen und Sammelkanal herausgerechnet werden:

Umrechnung auf Kosten pro Wohnung - Lüftungsfassade  
(je 9lfm Fassade an Nord- und Südseite)

	Kosten pro qm bzw. Stk	qm bzw. Stk	Summe
Fassadenelemente inkl. Leitungen	232	51	11.812
Profilglas	112	entfällt	
Anstrich Oberfläche hinter Glas	15	entfällt	
Holzschalung Nord- und Südseite	100	51	5.100
Lüftung inkl. Steuerung	2.437	1	2.437
Kernbohrungen	190	1	190
		Summe:	19.539
		pro qm Fassadenfläche:	383

#### 4. Fazit

Insgesamt lieferte das Pilotprojekt wichtige Erkenntnisse, die für die Kollektorfassade von großer Bedeutung sind: Der erstmals getestete Montageablauf verlief ohne unerwartete Probleme reibungslos und in der gewünschten Geschwindigkeit, sodass von einer vergleichsweise geringen Beeinträchtigung der Nutzer gesprochen werden kann. Auch unter Berücksichtigung des Montageablaufs ergab sich eine große Zufriedenheit der Nutzer, deren Akzeptanz des Systems natürlich die wichtigste Voraussetzung für eine häufige Anwendung bei anderen Sanierungsvorhaben ist.

Technisch wichtige Erkenntnisse waren die Quantifizierung des energetischen Nutzens sowie die erfolgreiche Erprobung des Gesamtsystems inklusive zugehörigem Lüftungsgerät auf der Nordseite und der nötigen Steuerung. Da auch hinsichtlich dieser Aspekte die Funktionalität gewährleistet ist, soll nun in der Folgezeit verstärkt daran gearbeitet werden, das Konzept bei Sanierungsprojekten anzubieten und weitere Realisierungen zu ermöglichen.

Sowohl die Lüftungsfassade als auch die Kollektorfassade basieren auf dem rein passiven System für die Sanierung von Gebäuden mittels vorgefertigter Holzständerelemente. Zusammen stehen sie als dreistufiges Konzept zur Verfügung:

Stufe 1 – Sanierung der Fassade (neue Fassade einschließlich neuer Fenster, Dämmung)

Stufe 2 – Stufe 1 mit Lüftungsfunktion für die nachträgliche Integration einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung

Stufe 3 – Stufe 2 mit zusätzlicher Kollektorfunktion zur Unterstützung der Gebäudeheizung durch Temperierung der Zuluft durch solare Strahlung

Das Konzept kann je nach Wunsch in einer der drei Stufen bei der Sanierung von mehrgeschossigen Gebäuden umgesetzt werden. Letztlich konnte im Pilotprojekt gezeigt werden, dass selbst ein kompletter Gebäuderiegel problemlos mit dem Fassadensystem ausgestattet werden kann

Das Pilotprojekt wird von großem Nutzen sein, da es als Anschauungsbeispiel für Interessenten dienen wird. Zudem befindet es sich auf einem Gelände, auf dem zahlreiche innovative Lösungen für den Wohnungsbau durch die Firma B&O erprobt wurden (siehe auch Forschungsprojekt „Entwicklung eines Bausystems zur Errichtung von Geschossbauten in Holzbauweise“), so dass hier auch ein Multiplikator für die Verbreitung des Konzeptes vorhanden ist.

Im Laufe der Bearbeitung sind neben dem Anwendungsfall als Vorsatzschale bei der Sanierung im bewohnten Zustand diverse Überlegungen zur Erweiterung des Konzepts entstanden. Vor allem scheint die Anwendung des Fassadensystems bei einer umfassenden Sanierung sinnvoll zu sein, wo dann auch Balkone oder Loggien integriert werden können, indem sie im gleichen System zu Wintergärten oder ähnlichen Grundrisserweiterungen umgewandelt werden. Letztlich sind auch Aufstockungen eine Maßnahme, die im gleichen System der Holzrahmenbauweise erfolgen kann.

#### 5. Quellen

Alle Abbildungen wurden - sofern nicht anders angegeben - durch SCHANKULA Architekten erstellt.

Entwicklung einer solaren Kollektorfassade und Umsetzung des Modell-  
vorhabens Kollektorfassade / Porenlüftungsfassade

## **Berichtteil B**

Hochschule Biberach, Labor für Vermessung



Institut für Geo und Umwelt  
Labor für Vermessung

**Entwicklung einer solaren Kollektorfassade  
und Umsetzung des  
Modellvorhabens – Porenlüftungsfassade/Kollektorfassade**

**hier: Schlussbericht zum Berichtsteil „Aufmaßstrategie“**

Bearbeiter: Prof. Dr.-Ing. H. Quasnitza  
Im August 2015

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	2
1 Einleitung .....	3
2 Aufmaß .....	4
2.1 Beschreibung des Aufmaßobjekts .....	4
2.2 Vorbereitung der Aufnahme .....	4
2.3 Laserscanning.....	5
2.3.1 Eingesetzter Laserscanner .....	5
2.3.2 Aufnahmekonfiguration Laserscanning.....	5
2.3.3 Auswertung der Punktwolke .....	7
2.4 Tachymetrische Aufnahme .....	9
2.5 Photogrammetrische Aufnahme.....	11
3 Vergleich der Messverfahren.....	13
3.1 Bewertung der Messverfahren .....	13
4 Modellierung Fassade .....	15



Error! Style not defined.

---

## 1 Einleitung

Im ersten Zwischenbericht zum Berichtsteil „Aufmaßstrategie“ ist die Messaufgabe und die Modellierung der Fassade ausführlich beschrieben. Ferner sind Workflows der Scanner- und Tachymeterauswertung detailliert dargestellt. Auf diese Ausführungen wird hier ausdrücklich verwiesen.

Wichtig bleibt der Hinweis, dass das einfache, direkte Anklicken bzw. Anzielen der Fenstereckpunkte zwar das wirtschaftlichste wäre, aber wegen der regelmäßig anzutreffenden Abrundung der Fensterecken nicht zielführend ist!

Error! Style not defined.

## 2 Aufmaß

### 2.1 Beschreibung des Aufmaßobjekts

Das Aufmaßobjekt liegt in Bad Aibling (Bayern), südlich München. Das Gebäude ist zweigeschossig bei einer Höhe von ca. 8 m und einer Breite ca. 50 m. In die Fassade sind bereits zwei Testfassaden integriert, die nicht aufgenommen worden sind. Abbildung 1 zeigt die Fassade. Mit der realen Aufnahme sollen die im Vorfeld entwickelten Aufmaßstrategien validiert werden.



Abbildung 1: Panoramabild Fassade

### 2.2 Vorbereitung der Aufnahme

Zur Vorbereitung der Aufnahme wurde ein dreidimensionales, lokales Koordinatensystem definiert und durch fünf Referenzpunkte gesichert. Die Referenzpunkte wurden mit Dübeln dauerhaft vermarktet. So lassen sich alle Beobachtungen der verschiedenen Messmethoden einerseits millimetergenau reproduzieren. Andererseits ist so ein einfacher Ergebnisvergleich möglich, da alle angewandten Messverfahren über diese Referenzpunkte auf einen gemeinsamen Rahmen bezogen sind. Abbildung 2 zeigt das gewählte Koordinatensystem mit Referenzpunkten.



Abbildung 2: Koordinatensystem und Referenzpunkte

Error! Style not defined.

## 2.3 Laserscanning

### 2.3.1 Eingesetzter Laserscanner

Das Scanning wurde mit dem institutseigenen Laserscanner HDS 3000 der Fa. LEICA durchgeführt. Der Hersteller LEICA gibt die Einzelpunktgenauigkeit (3D) mit 6 mm auf 50 m an. Abbildung 3 zeigt den eingesetzten Laserscanner.

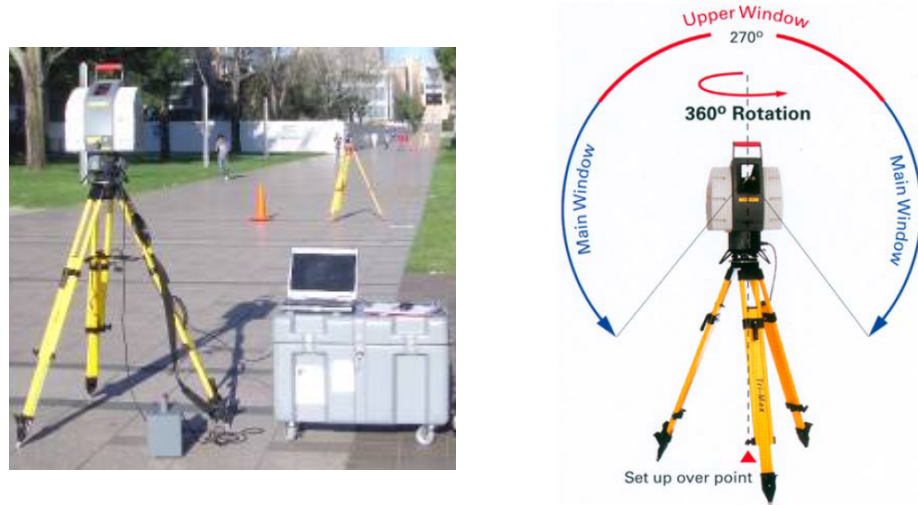


Abbildung 3: Laserscanner Leica HDS 3000

### 2.3.2 Aufnahmekonfiguration Laserscanning

Alle Scans wurden am 21.3.2014 in Bad Aibling durchgeführt. Als Auflösung (Punktabstand) am Objekt wurde ca. 5 mm gewählt. Abbildung 5 zeigt die Lage der vier Laserscannerstandpunkte. Drei Laserscannerstandpunkte wurden dicht an der Fassade gewählt, um für die spätere Auswertung möglichst viele Messpunkte zur Ebenenbestimmung auf den Fensterlaibungen zu platzieren (siehe Abbildung 4 und erster Zwischenbericht). Ein weiterer Standpunkt wurde in größerer Entfernung gewählt, um die Ebenheit der Fassade insgesamt nachzuweisen. Alle Punktwolken wurden über die 5 Referenzpunkte verknüpft und georeferenziert (siehe auch 2.2).

Error! Style not defined.



Abbildung 4: Sicht von Laserscannerstandpunkt 2 auf Fassade

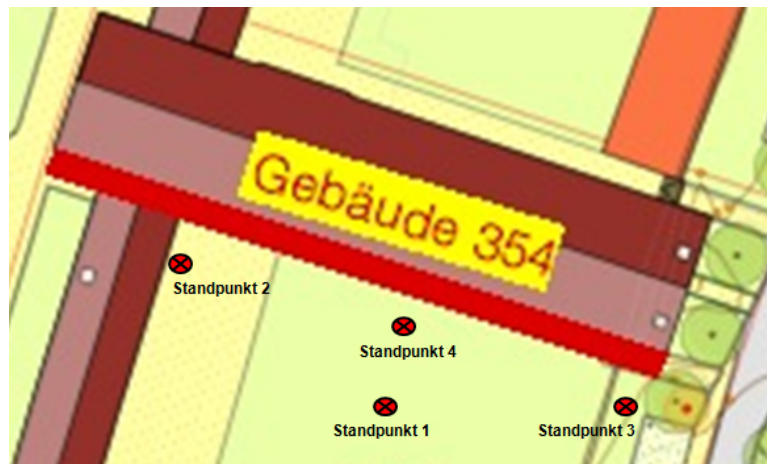


Abbildung 5: Laserscannerstandpunkte

Die Verknüpfung (Registrierung) der vier Punktwolken ergab eine mittlere Abweichung in den Referenzpunkten von 4 mm. Dieser Wert bestätigt die hohe Genauigkeit der vereinigten Punktwolke und die Eignung des Messverfahrens für diese Fragestellung. Abbildung 6 zeigt die bereinigte Punktwolke.

Error! Style not defined.

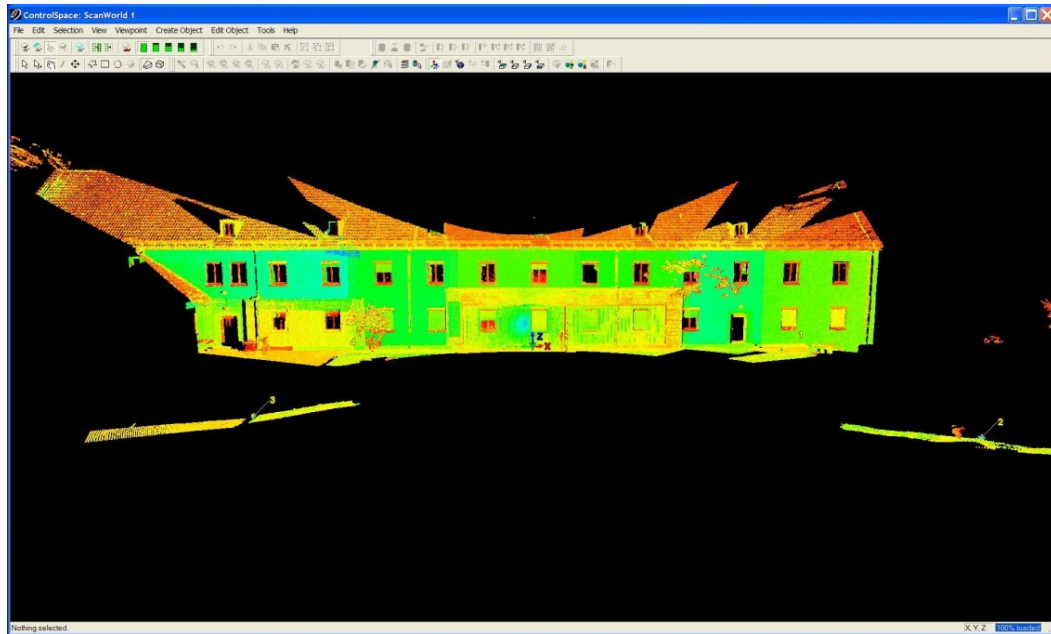


Abbildung 6: bereinigte Punktwolke

### 2.3.3 Auswertung der Punktwolke

Die Fassadenauswertung wurde mit dem Softwareprodukt PointSense der Fa. Faro 3D-Software (ehemals Kubit Software) durchgeführt.

Die Punktwolke wurde in der im Zwischenbericht dargestellten Weise ausgewertet. Zunächst wurden im Laibungsbereich drei ausgleichende Ebenen durch Teile der Punktwolke gelegt und diese Ebenen dann anschließend verschnitten. Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass eine Vielzahl von Punkten an der Schnittpunktberechnung beteiligt sind; einzelne singuläre Punkte verfälschen das Ergebnis nicht (Abbildung 7). Die Güte dieses Verfahrens hängt maßgeblich von der Anzahl der eine Ebene repräsentierenden Punkt ab. In der Laibung konnte der Scanner bei der Aufnahme in der Regel 500 bis 1000 Punkte platzieren.

Error! Style not defined.

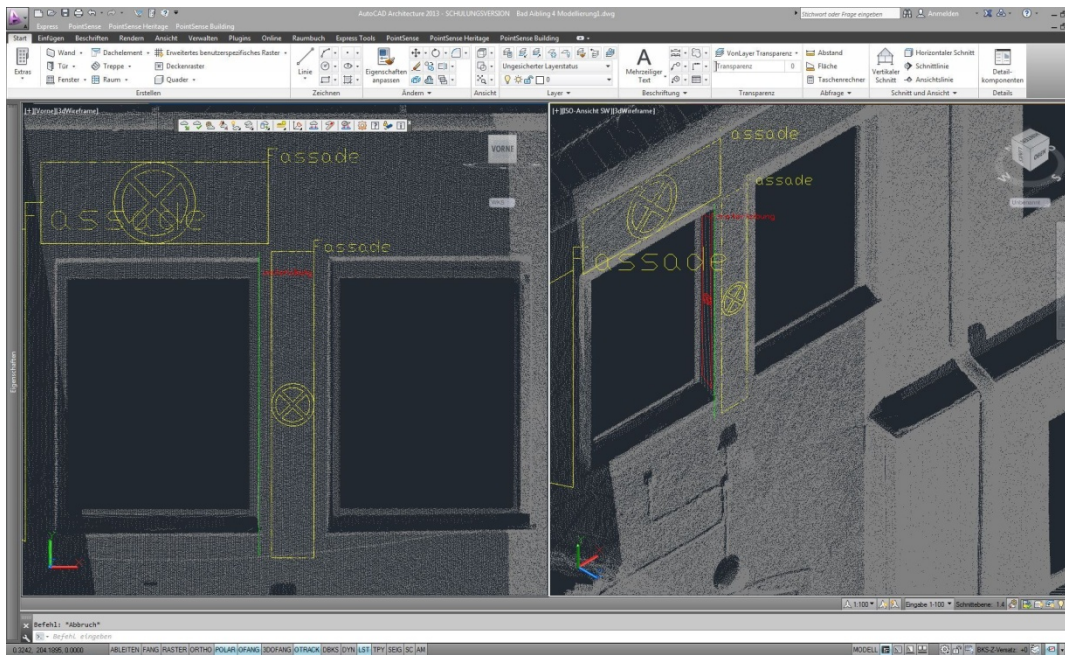


Abbildung 7: Schnittebenenauswertung

Der mittlere, aber auch größte Punktabstand von diesen Ebenen charakterisiert die Güte der Ebene. Neben der Aufnahmegenaugigkeit des Scanners ist hier die Rauigkeit des Putzes ursächlich. Insbesondere der mittlere Abstand kann zur Klassifizierung der Ebenen und damit zur Genauigkeitsvorhersage der Schnittpunkte hinzugezogen werden. Bei der durchgeführten Aufnahme lagen die mittleren Punktabweichungen von der Laibungsebene regelmäßig unter 2 mm, die größten Punktabweichungen bei weniger als 10 mm. Bei Punktzahlen unter 100 Punkten in einer Ebene führt das Verfahren zu nicht akzeptablen Ungenauigkeiten oder versagt gar. Dann sind entweder kombinierte Auswerteverfahren z.B. zusammen mit photogrammetrischen Auswertungen anzuwenden oder die Eckpunkte mit entsprechenden Genauigkeitsverlusten direkt aus der Punktwolke auszuwählen. Abbildung 8 zeigt die Ebeneneinteilung bei dieser Auswertung und veranschaulicht den großen Auswertaufwand.

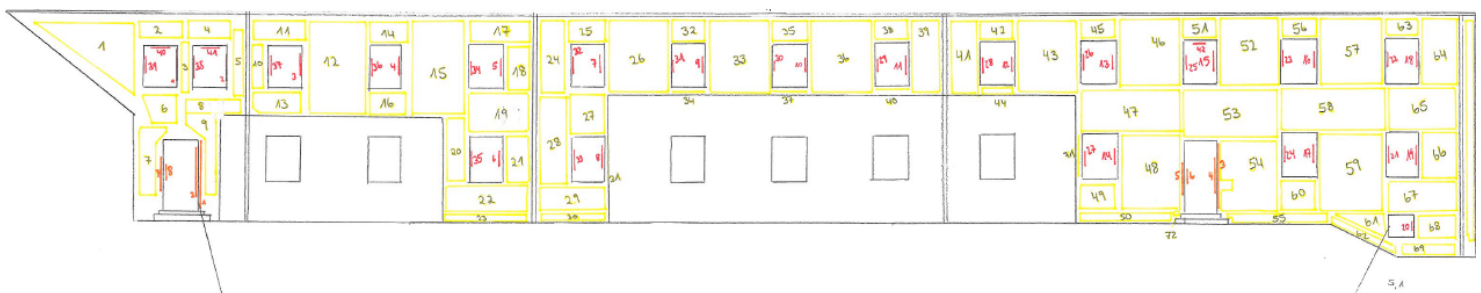


Abbildung 8: Ebeneneinteilung am Aufmaßobjekt

**Error! Style not defined.**

Das Abstandsmaß von der Ebene könnte auch dazu benutzt werden, das Verfahren zu modifizieren und zu verfeinern: Bei größeren Abweichungen von der Ebene z.B. verursacht durch mangelnde Ebenheit verputzter Flächen könnte man die Ebenen zur Auswertung verkleinern und auftrennen. In diesem Fall wäre ein Warmhinweis an die Fertigung der Vorsatzfassade zwingend!

Als Endergebnis ergibt sich eine überschaubare Anzahl von diskreten Punkten, die die Geometrie der Fassade punktweise beschreiben (Abbildung 9).

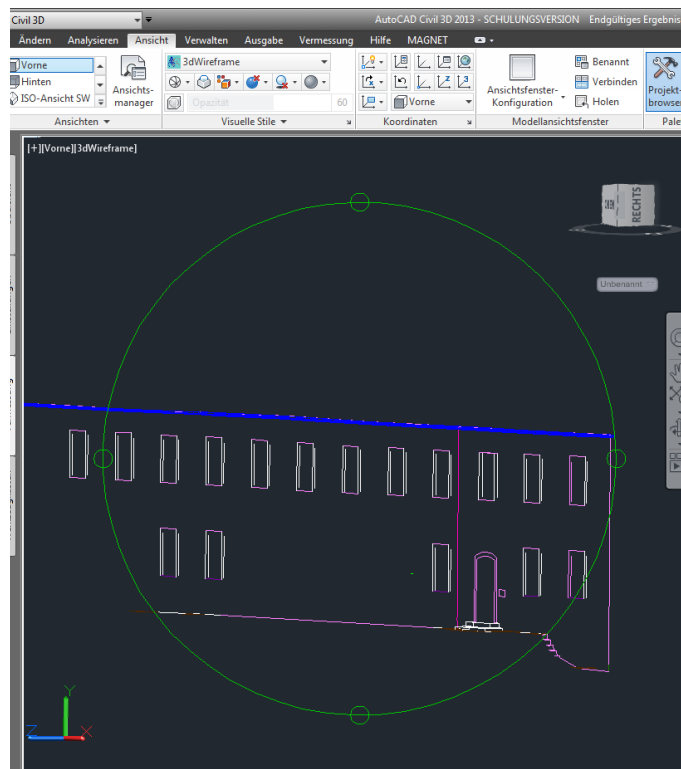


Abbildung 9: Endergebnis Scannerauswertung

## 2.4 Tachymetrische Aufnahme

Für die Tachymetermessung wurde der institutseigene Trimble M3 Ingenieur-Tachymeter ausgewählt. Dieser Tachymeter erreicht eine Richtungsgenauigkeit von 1 mgon und eine Distanzgenauigkeit von 3 mm. Mit diesen Spezifikationen ist er für diese Fragestellung geeignet.

**Error! Style not defined.**

---

Die gesuchten Fensterpunkte wurden nach dem im ersten Zwischenbericht beschriebenen Verfahren bestimmt. Die Aufnahme wurde am 21.3.2014 zusammen mit dem Scan mit insgesamt drei Tachymetern parallel durchgeführt. Die Tachymeter wurden in einem Abstand von ca. 10 m vor der Fassade zunächst frei mit den Referenzpunkten stationiert. Für die gesamte Fassade wurden sechs Tachymeterstandpunkte gewählt, um möglichst schleifende Schnitte mit der Fassade insbesondere im 1.OG zu vermeiden. Die instrumentelle Messunsicherheit des Verfahrens wird in erster Linie durch die Richtungsgenauigkeit des Tachymeters bestimmt: Eine Richtungsgenauigkeit von 1 mgon entspricht bei einer Entfernung von 10 m einer Messabweichung von Bruchteilen eines Millimeters. Der limitierende Faktor ist die optische Punktdefinition (Anzielgenauigkeit) der Kantenpunkte, nicht die instrumentelle Messunsicherheit.



Abbildung 10: Tachymeter Trimble M3

Nach der Stationierung wurden die rohen Messpunkte zunächst vor Ort erfasst und dann später mit der für dieses Projekt entwickelten Software ausgewertet. Abbildung 11 zeigt einen Auszug der Auswertung. Die Auswertung gibt Aufschluss über die Güte des Auswertungsprozesses, aber auch Informationen über die Vertikal- bzw. Horizontalstellung der entsprechenden Geraden. Als Ergebnis stehen die 4 Eckpunkte des Fensters jeweils mit Genauigkeitsangaben zu Verfügung.



Error! Style not defined.

Fenster	Eckpunkte				Ebene		Gerade												
		Y	X	Z	Genauigkeit	Abw. v. d. Vertikalen	Genauigkeit	L	Abw. v. d. Vertikalen	Genauigkeit	O	Abw. v. d. Horizontalen	Genauigkeit	R	Abw. v. d. Vertikalen	Genauigkeit	U	Abw. v. d. Horizontalen	
1	LO	4,913	0,005	6,686	0,003	mm/m	0,002	mm/m	0,001	mm/m	0,001	mm/m	0,001	mm/m	0,001	mm/m	0,001	mm/m	0,07
	RO	8,014	0,009	6,681		2,7		1,1		-1,5		-6		1,3					
	RU	8,028	0,017	4,394		Grad		Grad		Grad		Grad		Grad					
	LU	4,911	0,013	4,390		0,16		0,06		0,08		0,34		0,07					
2	LO	4,911	0,005	6,685	0,002	mm/m	0,001	mm/m	0,002	mm/m	0,001	mm/m	0,001	mm/m	0,001	mm/m	0,001	mm/m	0,06
	RO	8,014	0,009	6,680		3,3		-0,9		-1,6		-6,1		1					
	RU	8,028	0,018	4,395		Grad		Grad		Grad		Grad		Grad					
	LU	4,913	0,014	4,392		0,19		0,05		0,09		0,35		0,06					

Abbildung 11: Auszug Auswertung. hier Zusammenfassung

Die Unterkante des Fensters ist durch das Fensterblech verdeckt, eine direkte Anzielung unmöglich. Deshalb wurde vor der Messung die Unterkante des Blechs auf der Fassade nach Außen „verlängert“ und diese Markierung dann angemessen (siehe Abbildung 12).



Abbildung 12: Kennzeichnung Unterkante Fenster

## 2.5 Photogrammetrische Aufnahme

Für die photogrammetrische Aufnahme wurde die institutseigene, kalibrierte Kamera Nikon D300 verwendet. Die Aufnahmen wurden mit auf der Fassade befestigten Zielmarken entzerrt und ausgewertet (Abbildung 13). Insbesondere bei Auswertungen in der Fassadenebene bietet die photogrammetrische Auswertung Vorteile. Die photogrammetrische Auswertung sollte die zwei anderen Auswertestrategien ergänzen.

Error! Style not defined.

---



Abbildung 13: Aufnahmekamera, verwendete Zielmarken am Aufmaßobjekt

Error! Style not defined.

### 3 Vergleich der Messverfahren

Um die Güte und Eignung der Aufnahmemethoden zu vergleichen, wurden die Koordinaten der Fensterpunkte für jede Methode getrennt berechnet und dann verglichen. Hochgenaue „Sollkoordinaten“ der Fensterpunkte von einem anderen hochgenauen Messverfahren lagen nicht vor.

#### 3.1 Bewertung der Messverfahren

Zur Bewertung der Genauigkeit beider Verfahren wurde die 3D-Koordinatendifferenzen der Fensterpunkte berechnet. Beiden Verfahren wird in etwa gleiche Genauigkeit unterstellt. Der 3D-Koordinatenvergleich (in allen 3 Koordinatenrichtungen) der beiden Messverfahren ergab eine durchschnittliche quadratische Abweichung (RMS) der Fensterpunkte von 1 cm über die gesamte Fassadengeometrie. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei beiden Aufnahme- und Auswertemethoden völlig unabhängig voneinander mit unterschiedlichen Ausgangsdaten die Verschneidungen gerechnet werden. (Um hieraus die Verfahrensgenauigkeiten für ein Verfahren abzuleiten, müsste man statistisch streng die angegebene durchschnittliche quadratische Abweichung durch  $\sqrt{2}$  dividieren).

Abbildung 14 zeigt die einzelnen 3D-Koordinatendifferenzen zwischen der Scanaufnahme und der Tachymeteraufnahme. Diese Darstellung bestätigt die grundsätzliche Eignung beider Verfahren für ein derartiges Aufmaß.

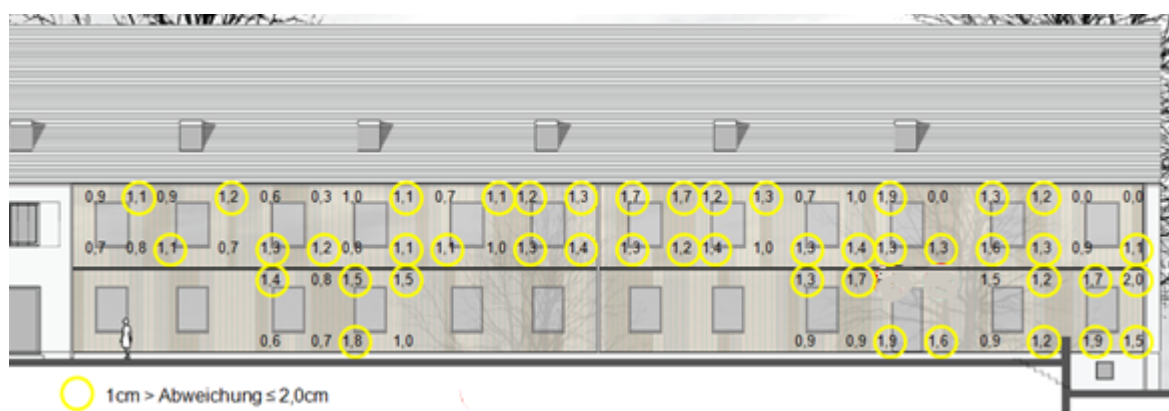


Abbildung 14: Koordinatenvergleich Scanner - Tachymeter

**Error! Style not defined.**

---

Vorteile des Scanning zeigen sich in der relativ kurzen Messdauer vor Ort (mit modernsten Scannern Gesamtmessdauer beim diesem Aufnahmeobjekt ca. 2h). Ferner ist die flächige Erfassung der Gesamtgeometrie als Vorteil anzuführen; auch weitere geometrische Auswertungen sind so an der Punktwolke möglich. Die Auswertung ist z.Zt. jedoch noch nicht automatisierbar und damit sehr zeitintensiv. Automatische Kantendetektionen könnten hier in Zukunft die Auswertung beschleunigen.

Bestimmte Fassadenbereiche können auf diese Art nicht oder nur schwer ausgewertet werden. Z.B. der Bereich oberhalb der Rolladenkästen (siehe Abbildung 15, der Bereich lässt keinen Blick in die Laibung zu!). Hier würde sich eine Kombination mit der Photogrammetrie anbieten, die Softwarehersteller auch programmtechnisch bereits umgesetzt haben und anbieten.



Abbildung 15: Problemstellen Scannerauswertung

Bei der modifizierten Tachymeteraufnahme ist der Messaufwand vor Ort erheblich; pro Fenster fallen ca. 20 Messpunkte an (siehe Zwischenbericht). Die von uns programmierte Excel- Auswertung der Aufnahme sorgt für eine nahezu vollautomatisierte Auswertung.

Error! Style not defined.

## 4 Modellierung Fassade

Für die Fertigung der Vorsatzfassade ist das Punktmodell der Fassade ausreichend. Dieses Modell generalisiert die reale Fassade maximal, vereinfacht also die reale Fassaden-geometrie bzw. auch die speicherintensive Scanwolke.

Aus dem Punktmodell kann ein Flächenmodell abgeleitet werden. Mit diesem Flächenmodell (oder CAD-Modell) können nun die orthogonalen Abstände der Scanwolke zu diesem berechnet werden. Mit Hilfe der Abstände kann die Qualität des Modells beurteilt und nachgewiesen werden. Die Abweichungen von Punktwolke und Modellierung sind in Abbildung 16 farblich differenziert dargestellt. Man erkennt im relevanten Bereich keine Abweichungen über 15 mm.

Über diese Analyse kann auch die Ebenheit der Fassade nachgewiesen werden. Das Flächenmodell verbindet im einfachsten Fall die einzelnen Fenster direkt. Verformungen der Fassade – abgebildet in der Scanwolke - würden hier sichtbar.

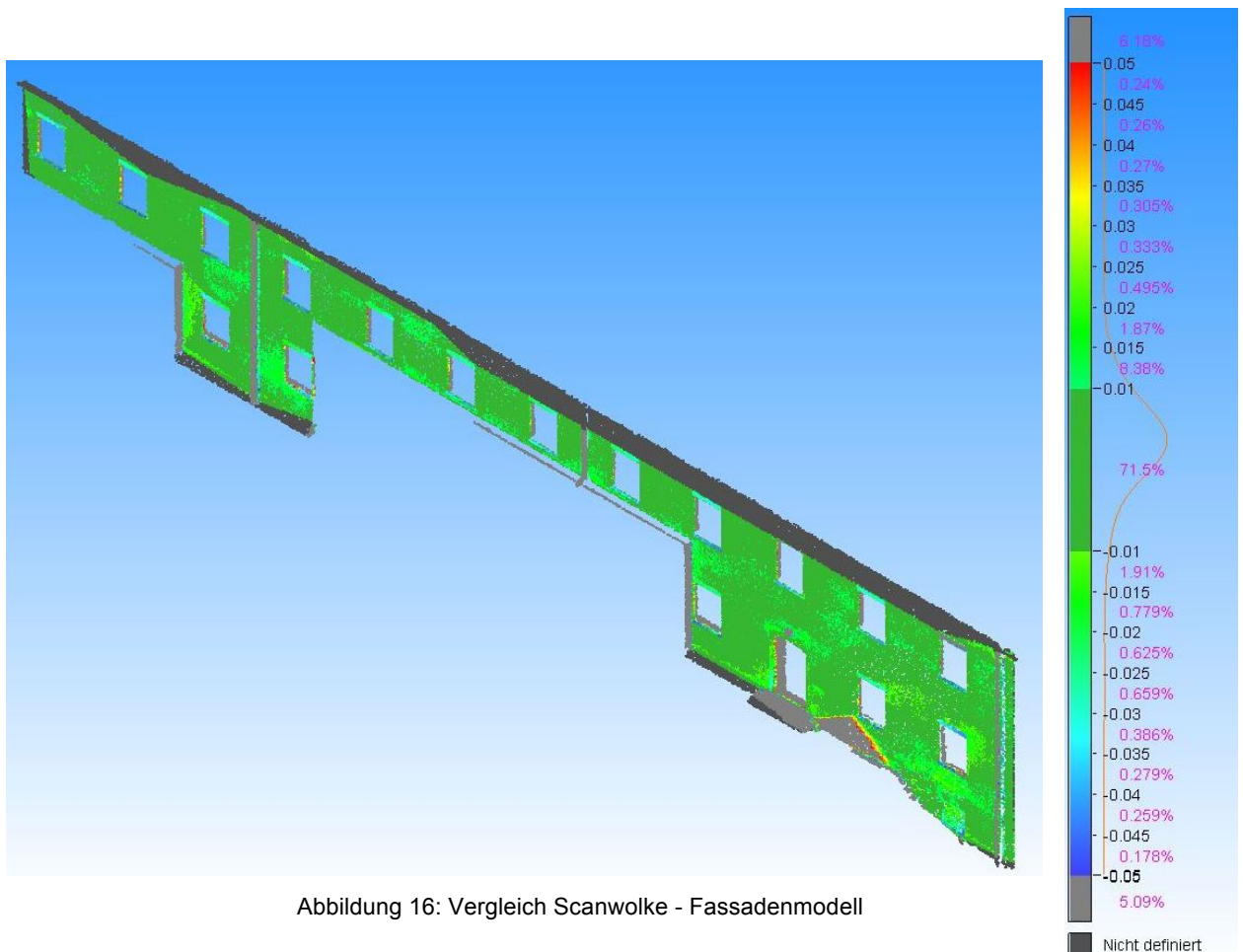


Abbildung 16: Vergleich Scanwolke - Fassadenmodell

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:Panoramabild Fassade.....	4
Abbildung 2: Koordinatensystem und Referenzpunkte .....	4
Abbildung 3: Laserscanner Leica HDS 3000.....	5
Abbildung 4: Sicht von Laserscannerstandpunkt 2 auf Fassade.....	6
Abbildung 5: Laserscannerstandpunkte .....	6
Abbildung 6: bereinigte Punktwolke .....	7
Abbildung 7:Schnittebenenauswertung .....	8
Abbildung 8: Ebeneneinteilung am Aufmaßobjekt.....	8
Abbildung 9: Endergebnis Scannerauswertung .....	9
Abbildung 10: Tachymeter Trimble M3.....	10
Abbildung 11: Auszug Auswertung. hier Zusammenfassung .....	11
Abbildung 12: Kennzeichnung Unterkante Fenster .....	11
Abbildung 13: Aufnahmekamera, verwendete Zielmarken am Aufmaßobjekt.....	12
Abbildung 14: Koordinatenvergleich Scanner - Tachymeter .....	13
Abbildung 15: Problemstellen Scannerauswertung .....	14
Abbildung 16: Vergleich Scanwolke - Fassadenmodell.....	15

Entwicklung einer solaren Kollektorfassade und Umsetzung des  
Modellvorhabens Kollektorfassade / Porenlüftungsfassade

## **Berichtteil C**

B&O Wohnungswirtschaft





# Fassadenlüftungskomponenten und Steuerung

---

## 1. Überblick über die Komponenten der Lüftungsfassade

Um die durch Sonneneinstrahlung erzeugte Erwärmung der Luft innerhalb der Kollektorfassade nutzbar zu machen, wurden in 4 Abschnitten des Erdgeschosses Lüftungsanlagen in der Fassade integriert. Jeder Abschnitt zeichnet sich durch einen Südraum mit Lüftungsgerät und einen Nordraum mit Lüftungsgerät aus, die durch einen Querluftverbindungskanal einen kommunizierenden Lüftungsverbund ergeben. Die Lüftungsgeräte wurden so ausgelegt entweder die hinter der Kollektorfassade liegenden Räume im Wärmerückgewinnungsprinzip zu belüften oder auch abhängig vom Lufttemperaturunterschied zwischen der Kollektorfassade und Zimmer die erwärmte Kollektorluft zu nutzen. Eine schaltbare Verteilerklappe ermöglicht die Absaugung der Kollektorluft anstatt der Abluft aus dem Wohnraum zum Abluftanschluss des Lüftungsgerätes und realisiert dadurch ein erhöhtes Temperaturniveau der Zuluft.

Bei Erreichen einer vorgegeben Grenztemperatur im belüfteten Zimmer wird die Warmluft auch über einen Überströmkanal in den kommunizierenden Nordraum weitergeführt. In diesem Betriebsfall wird der mit Lüftungsclappen gesteuerter Überströmkanal geöffnet. In diesem durch Querlüftung korrespondierenden Nordraum befindet sich seinerseits wiederum ein Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung, das den Überschussluftvolumenanteil aus dem Südraum mit erhöhten Abluftanteilen des Nordraums ausbalanciert. Dadurch wird eine Luft- und Energieverteilung von Südraum zu Nordraum erreicht.

### 1.1 Fassadenlüftungsgerät Süd

Das Fassadenlüftungsgerät Süd ist aufgrund der baulichen Anforderung ein für diesen Anwendungsfall angepasstes B&O Gruppe Lüftungsgerät, das sich durch seine kompakte Bauform (22cm Tiefe, 56cm Breite und 76cm Höhe) bei gleichzeitigem maximalem Luftvolumen 120 m<sup>3</sup>/h und geringer Geräuschemission (ca. 36 dBA) in vertikaler wandhängender Anordnung und einem direktem Kondensatablauf in der Fortluft auszeichnet. Das Gerät ist in der Fassade in der Fensterlaibung angeordnet (Bild 1 - Schnitt).

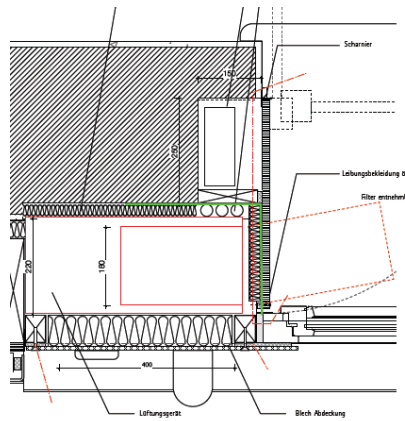


Bild 1: Schnitt

Die Steuerung und Messwertaufzeichnung ist hinter dem Lüftunggerät angeordnet und mit IP Anbindung zur Programmierung/Auslesung mit Internetanbindung ausgestattet (Bild 2).



Bild 2: Anordnung der Messwertaufzeichnung und Steuerung in der Fensterlaibung

Ebenso ist eine BUS-Kommunikation zwischen den Lüftungsgeräten zur Steuerung je Wohnungsabschnitt integriert. Als Lüftungsmotoren und der elektronischen Steuerung wurden Komponenten der Hersteller EBM Pabst, Technische Alternative sowie ein Kunststoff Kreuz/Gegenstrom Wärmetauscher RECAIR eingesetzt. Dadurch ist eine kosteneffiziente, wartungsfreundliche und vor allem langlebige Betriebsform sichergestellt. Alle Komponenten im Lüftunggerät sind leicht zu reinigen und austauschbar. Das Gehäuse des Lüftungsgerätes ist in EPP Schaum und Blech ausgeführt (siehe Bild 3 Schnitt Lüftungsggerät). Die Filter sind seitlich durch eine Wartungsklappe zugänglich.

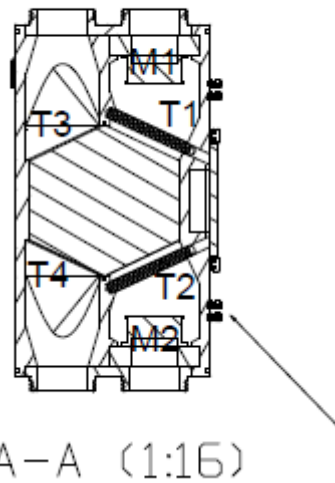


Bild 3: Schnitt Lüftungsgerät

Ein Filtertausch ist durch die Fensterlaibung im einfachen Zugriff zum Gerät ohne Demontage möglich (Bild 5 und Bild 6).

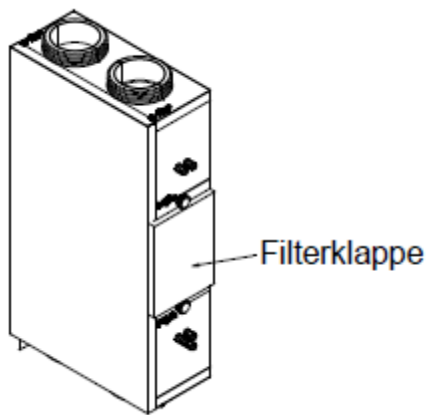


Bild 5: Filterklappe am Lüftungsgerät



Bild 6: Klappenöffnung in der Laibung

Die Anordnung des Lüftungsgerätes in der Südfassade ist nach unten mit einer direkten Fortluft- und einer Aussenfrischluftöffnung im unteren Bereich versehen. Strömungsteilungslamellen führen die Lüftströme in um 120° versetzte Richtungen und verhindern dadurch eine Durchmischung. Da das Lüftungsgerät vertikal hängend angeordnet ist, läuft eventuell auftretendes Kondensat direkt ab.

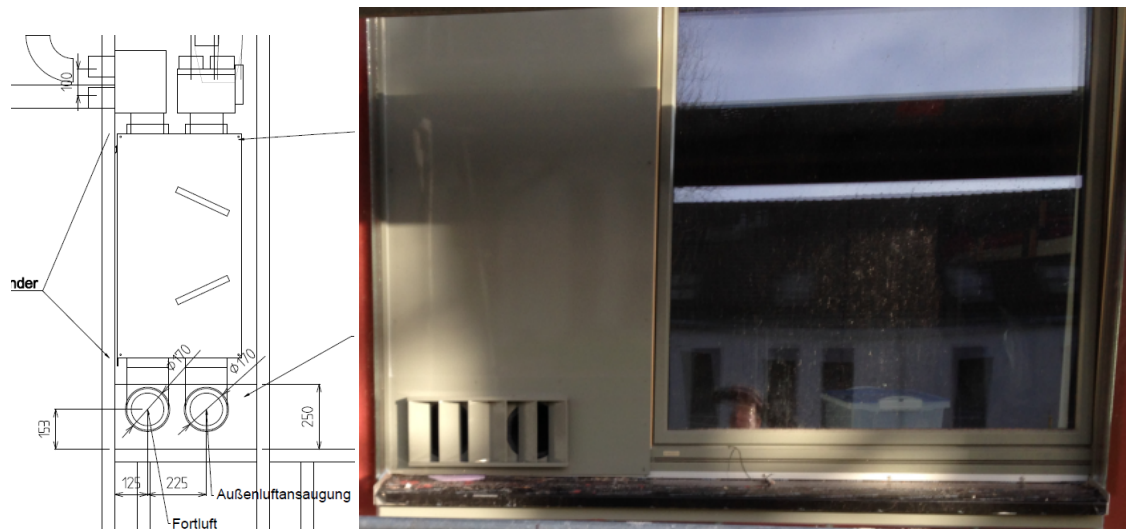


Bild 7: links Schema der Anschlüsse an das Lüftungsgerät und rechts Fort- und Frischlufttrennung

Oberhalb des Lüftungsgerätes ist die Abluft (rechts) mit vorgeschalteter Klappensteuerung und Zuluftanschluss (links) mit nachgeschalteter Verteilungsbox in zwei Zuluftstränge angeordnet.

Die Lüftungsgeräte wurden im Prüflabor HLK Stuttgart vermessen und weisen einen Wärmerückgewinnung von 87% auf. Der Stromverbrauch wurde bei  $90 \text{ m}^3/\text{h}$  als Nennvolumenstrom mit 22W ermittelt. Die max. Betriebstemperatur des Wärmetauschers ist mit  $50^\circ\text{C}$  limitiert.

Um eine Verteilung der erwärmten Fassadenluft auch in die nördlichen Gebäudezonen zu ermöglichen, wurde die Steuerung des Lüftungsgerätes so gestaltet, dass unterschiedliche Zuluftvolumenströme unter Führungsgröße der erreichten Fassadentemperatur bei gleichbleibender Abluftleistung möglich sind.

## 1.2 Verteilerklappe

Um zwischen der Raumabluft oder der erwärmten Fassadenluft als Wärmeaustauschmedium zur angesaugten Frischluft wählen zu können, wurde eine durch einen Stellmotor angetriebene Verteilerklappe dem Lüftungsgerät im Abluftanschluss vorgeschaltet. Die Dichtheit in den Endstellungen und Funktionssicherheit der Verteilerklappe ist wesentlich und als eine der Unsicherheitsfaktoren ermittelt worden. Es wurden zur eindeutigen Positionierungserkennung teilweise Endstellungsschalter in die Klappe nachgerüstet.



Bild 8: Verteilerklappe mit jeweils 2 Anschlüssen Fassade oder Raumabluft

### 1.3 Deckenlüftungsgerät Nord

Das Lüftungsgerät in der Nordzone des Gebäudes ist als deckenhängendes Gerät unter der Deckenverkleidung ausgeführt und kann entweder als normales WRG Lüftungsgerät arbeiten, oder im Fall eines Warmluftüberschusses aus der Südzone in eine erhöhte Saugleistung (Abluft) bei verringerter Zuluft geschaltet werden. Dies ermöglicht eine Luftverteilung von der Südzone in die Nordzone des Gebäudes. Auch hier sind die Komponenten der vorgenannten Hersteller (siehe Kap 1.1 Fassadenlüftungsgerät Süd) zum Einsatz gekommen und sind zur gemeinsamen Auswertung und Monitoring vernetzt worden.



Bild 9: Deckengerät Wohnungen Nord

### 1.4 Überströmkanäle und -klappe

Die Lüftungsklappe zur Steuerung der Luftverteilung Abluft ist durch einen Schrittmotor mit Endposition ausgestattet. Es werden je 2 Luftverteilungen aus dem Fassadenkollektor und 2 Luftverteilungen aus dem Südraum an die Klappe geführt. Je nach Temperatursituation dichtet die Klappe die beiden Leitungen entweder aus dem Fassadenkollektor oder aus dem Raum kommend ab. In der Überströmklappe ist ebenso eine motorische Brandschutzklappe integriert.



Bild 9 Überströmkanal mit Überströmklappe und Schrittmotor

## 2. Lüftungssteuerungskonzept

### 2.1 Betriebsmodis Fassadenwohnungen SÜD

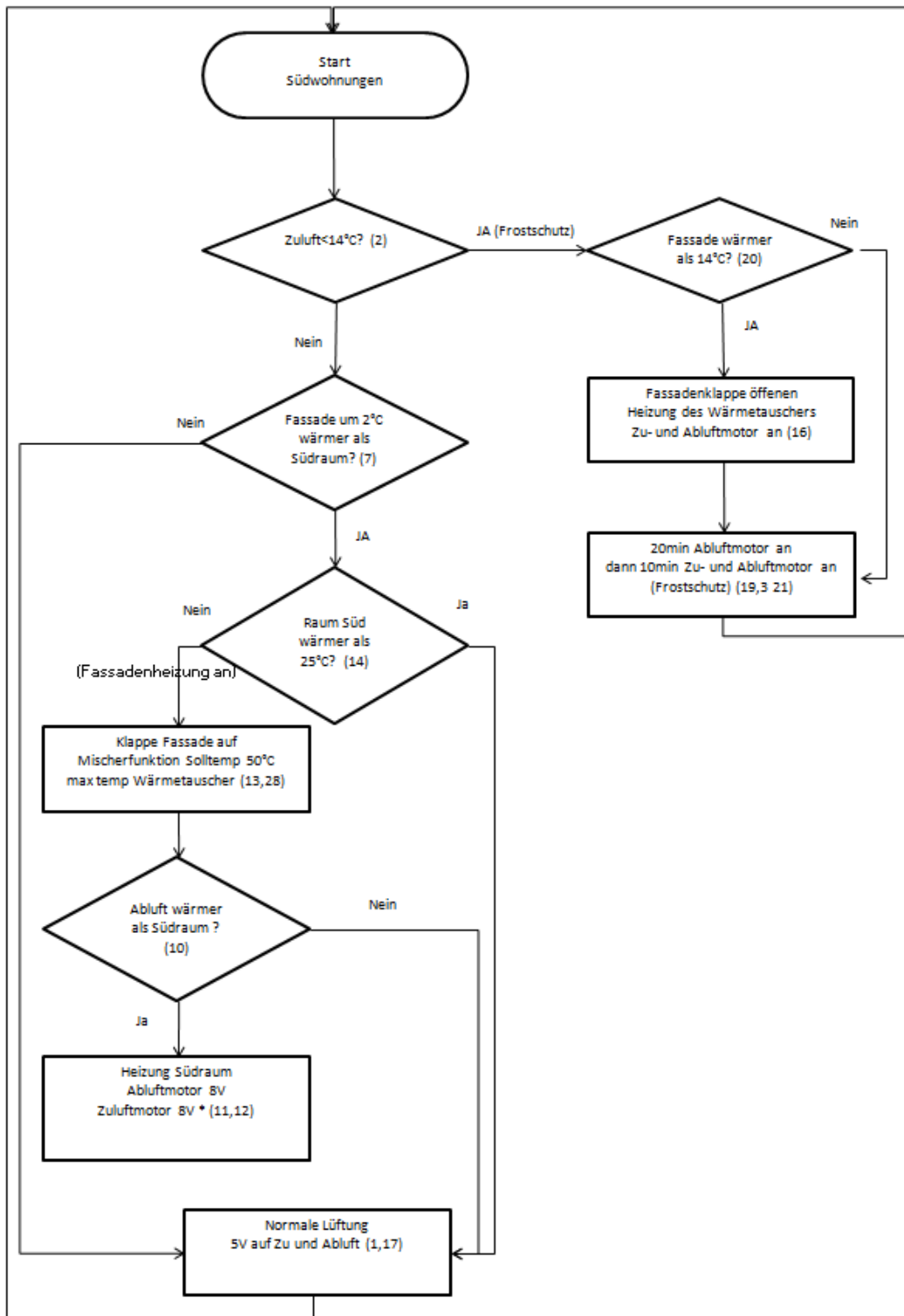


Bild 10: Steuerungschema Wohnungen Süd

Die Betriebsstrategie der Südwohnungen ist auf die maximale Energieausbeute zur Erwärmung des Südraumes ausgelegt. Dies wird bis zur maximal zulässigen Grenztemperatur des Wärmetauschers in Lüftungsgerät ausgeschöpft. Die Führungsgröße der Regelung ist die Zimmertemperatur des Südzimmers. Ab einer Temperatur von 20°C in der Fassade wird die 20 Fassadenluft zur Erwärmung der Frischluft genutzt. Diese Temperaturschwelle wird ebenso zur Ansteuerung der Überströmung in die Nordwohnung genutzt. Falls Nilzuluft unter Falls die Zuluft unter 14 Grad fällt wird geprüft ob die Fassade zur Frostschutzvermeidung beitragen kann.

## 2.2 Betriebsmodus Warmluftzufuhr Überströmfunktion zum Energieaustausch in Wohnungen Nord

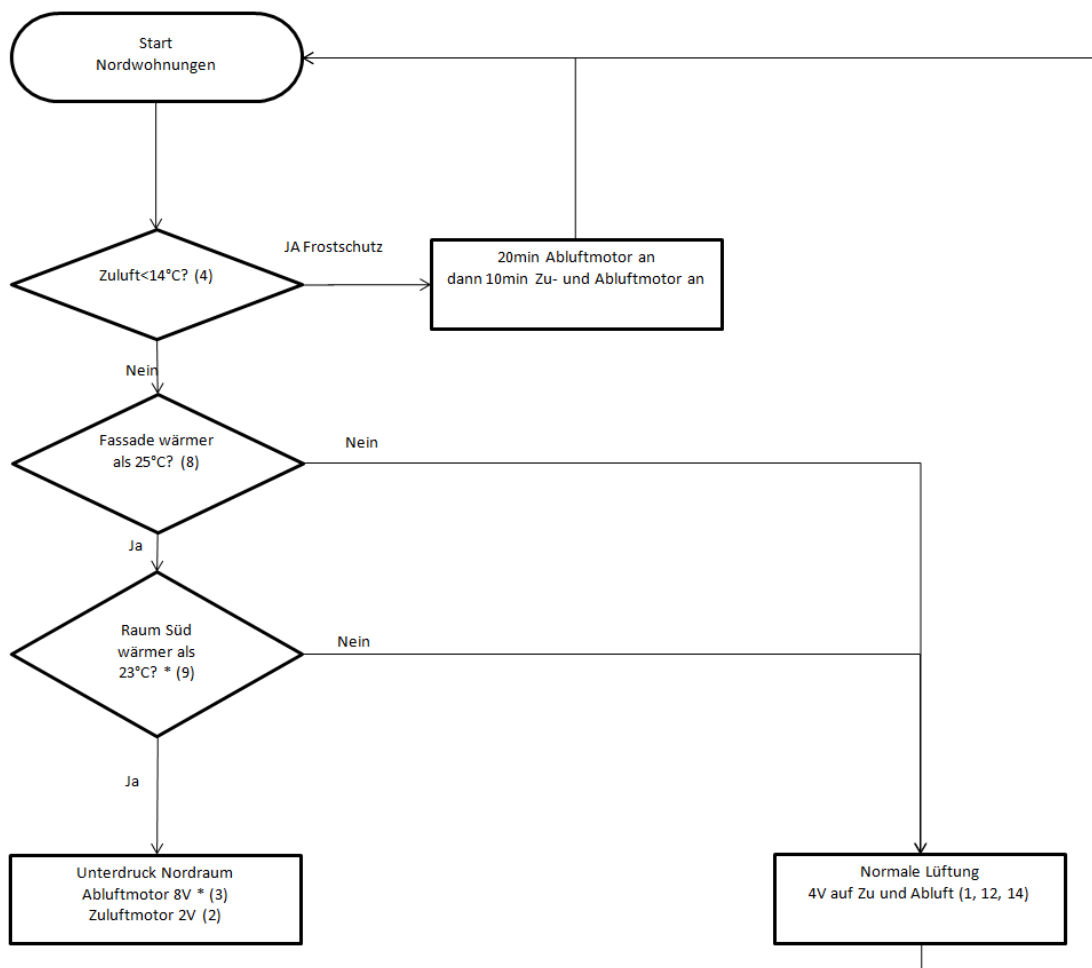


Bild 11: Steuerungsschema Wohnungen Nord

Die Standardbetriebsform ist die Lüftung im Wärmerückgewinnungsmodus. Im Fall einer Überschreitung der Temperatur von 25 °C in der oberen Luftschichtung der Südwohnung wird die Klappe zum Luftaustausch zwischen Nord- und Südwohnung geöffnet und die Lüftung Nord auf Unterdruck sowie die Lüftung im Südraum auf Überdruck betrieben.



## 2.3 Internet Visualisierung

Zur online Betriebsüberwachung wurde ein Internetportal eingerichtet das je Wohnungskombination sich/Wordzimmer den aktuellen Betriebszustand darstellt. Auf der linken Seite ist der Betriebszustand des Fassadenlüftungsgerätes in Volumenleistung (Spannungszustand der Motoren) sowie Betriebsmodus Manuell/Automatic als auch die aktuell en Temperaturen an den Ausgängen des Gerätes Zuluft / Abluft (oben) sowie Fort- und Frischluft (unten) dargestellt. Ebenso auf der linken Seite der Grafik ist die Temperatur des Fassadenkollektors ablesbar. Das Klappensymbol wird während der aktiven Veränderung durch den Status "EIN" dargestellt. Dies dient der Funktionskontrolle. Gleiches gilt für die Überströmklappe. Ebenso werden die aktuellen Raumtemperaturen und die Betriebsmodi Fortschutz, Frostschutz mit Fassadenunterstützung sowie Fassadenheizung zur Funktionskontrolle angezeigt. Auf der rechten Seite der Grafik ist symbolisch das Lüftungsgerät des Nordzimmers und dessen Betriebszustand in gleicher Logich dargestellt. Es finden sich wiederum die Temperaturen der Ein-und Ausgänge und Motorenbetriebsspannungen, die direkt proportional den Luftvolumen entsprechen.

## Fassadenkollektor Wohnung 3

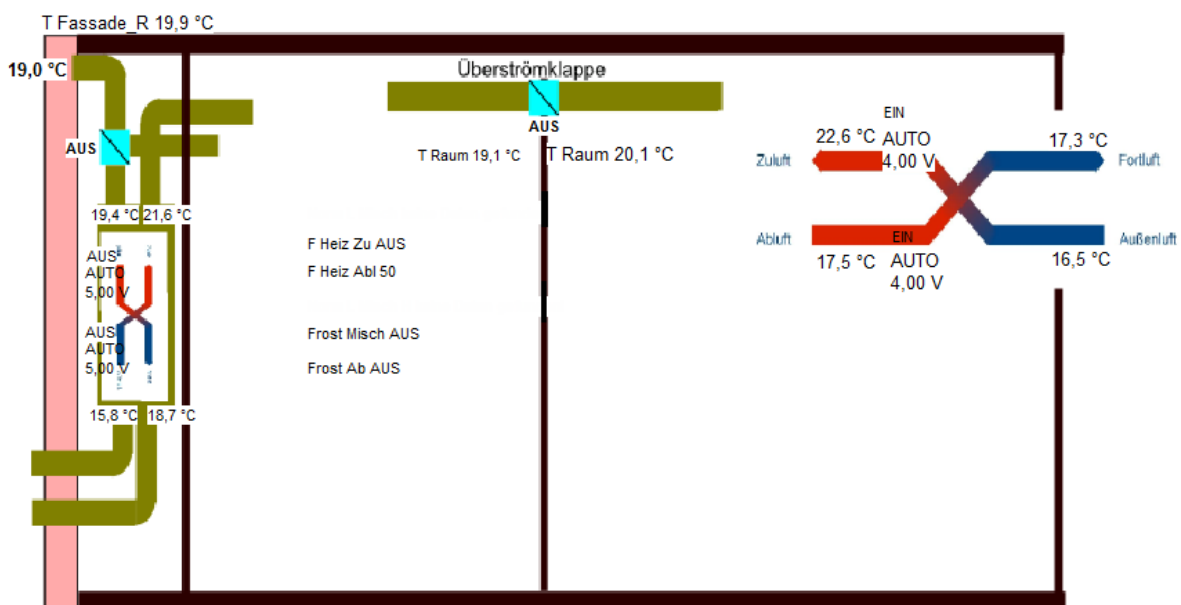


Bild 8: Internetvisualisierung des aktuellen Betriebszustandes der Wohnung 3 Süd und Nord

## 3. Erfahrungen zur Lüftungsinstallation

Aus den zu Beginn der Konzeption 4 Wohnungselementen mit je einem Süd-und Nordteil inklusive Überströmkanal konnten in der baulichen Umsetzung lediglich 2 komplett funktional umgesetzt werden. In der ersten Wohnung konnte der Nordteil nicht umgewidmet werden, da er bereits als Feuchtraum Mannschaftsdusche mit einer leistungsfähigen Auftauflage inkl. Feuchtestang

ausgestattet war. Diese konnte mit vertretbarem Aufwand nicht rückgebaut werden. Damit wurde die Lüftungsanlage nur bis zum Überströmkanal ausgebaut. Ein etwaiger Überdruck im Südzimmer bei Fassadenbetrieb wird in den angeschlossenen Gang abgeleitet.

Ebenso konnte in der Wohnung 4 aufgrund eines defekten Nordfensters in der Toilette keine sinnvolle Wärmerückgewinnung beobachtet werden. Die Toilette als Nordteil der Lüftungsanlage Wohnung 4 war damit grundsätzlich mit einem kalten Aussenfrischluftanteil versorgt. Ebenso konnte aufgrund des ständig geöffneten Fensters in der Nordseite der Wohnung 4 kein ausreichender Unterdruck zum Warmlufttransport über den Überströmkanal aufgebaut werden.

Die Wohnungen 2 und 3 wurden damit die funktionalen Erprobungsträger.

#### **4. Erfahrungen Steuerung**

Die Frostschutzsteuerung musste durch den wandhängenden Verbau des Lüftungsgräten und direkter Nähe zur Glasfassade angepasst werden. Durch diese Einbaukonfiguration konnten die Abtauzyklen des Wärmetauschers gegenüber dem deckenhängenden Verbau zeitlich verkürzt werden.

Ebenso ist die Sensorkalibrierung in den Steuerungen mit einer stetigen Veränderung beaufschlagt. Es ist eine regelmäßige Nachkalibrierung erforderlich.

#### **5. Erfahrungen durch die Zimmernutzung**

Die Zuluft- und Abluftöffnungen wurden mit demontierbaren Ventilen ausgestattet. Diese wurden durch die Nutzer teilweise abgenommen und Tischtennisbälle oder Glaswollestücke in die Leitungen geworfen. Dadurch wurden Ausfälle der Lüftungsanlage verursacht oder die Luftströmungen, wie die Funktion der Steuerungsklappe beeinträchtigt. Die Fehlersuche war meist recht aufwendig und hat die Messwerte entsprechend verfälscht. Als Massnahme mussten die Ein- und Auslassventile per Schraubverbindungen fixiert werden.

Im Nachtbetrieb wurden Beschwerden aufgrund zu lauter Lüftung geäußert. Bei Analyse der Beschwerden steht sich heraus, daß der Einbauort in der Fensterlaibung durchaus unauffällige Geräuschpegel Ca. 36-38 dBA verursacht, daß jedoch die Lüftungsauslassöffnungen direkt über dem Kopfende der Stockbetten sind. Dieser Situation wurde durch eine Nachtabsenkung der Lüftungsleistung Sorge getragen.

Entwicklung einer solaren Kollektorfassade und Umsetzung des Modell-  
vorhabens Kollektorfassade / Porenlüftungsfassade

## **Berichtteil D**

Hochschule Rosenheim, Abteilung Forschung und Entwicklung



---

Abteilung Forschung & Entwicklung  
Hochschulstraße 1  
83024 Rosenheim

# **Beschreibung der Messtechnik und Datenübertragung**

*im Forschungsvorhaben*

## **„Kollektor-Fassade“**

Projektmitwirkende: Hr. Prof. Uli Spindler/ Hochschule Rosenheim  
Hr. Rafael Botsch/ Hochschule Rosenheim  
Hr. Florian Alscher/ Hochschule Rosenheim  
Hr. Andreas Hack/ Hochschule Rosenheim  
Hr. Christian Maack/ Hochschule Rosenheim

## 1. Einleitung

Für das „Monitoring Kollektorfassade“ wurde die Hochschule Rosenheim mit der Beschaffung und Installation der Messtechnik, sowie der Programmierung und Inbetriebnahme der Datenerfassung beauftragt. Zuletzt erfolgte die Datenbereitstellung an die Projektpartner.

Dieser Kurzbericht soll einen kurzen Überblick über die von der Hochschule Rosenheim erbrachten Leistungen geben.

## 2. Messdatenpunkte

Um die für die Projektbewertung nötigen Energieströme und Zustände erfassen zu können, wurden in Absprache mit den Projektpartnern folgende Sensoren für das Monitoring festgelegt:

Sensoren Außen:

- Außentemperatur Südseite
- Solarstrahlung auf die Südfassade

Sensoren Testraum Südseite (4 mal):

- Raumtemperatur
- Luftfeuchte im Raum
- CO<sub>2</sub>-Konzentration im Raum
- Temperatur in Ansaugöffnung Frischluft
- Temperatur in Ausblasöffnung Zuluft
- Temperatur im Kollektor (hinter Glas; mittlere Höhe)
- Temperatur zwischen Außenwand Bestand und Kollektorelement (Außenoberfläche Bestandswand)
- Temperatur auf Wandoberfläche Innen (mittlere Höhe)
- Energieverbrauch Lüftungsgerät
- Temperatur im Überströmkanal
- Volumenstrom in Überströmkanal zwischen Süd- Nordräumen

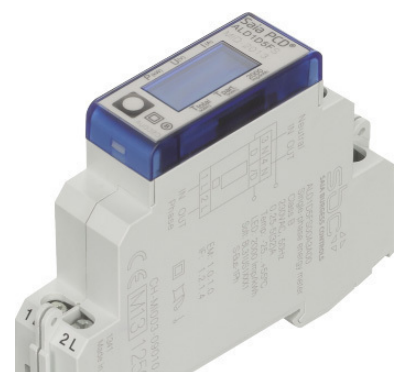
Im Anhang befindet sich die Messpunktliste, in der alle Datenpunkte mit Namenskürzel, Einheit und Beschreibung aufgeführt werden. Diese werden in einem Intervall von 1 Minute kontinuierlich erfasst.

## 3. Messtechnik

Von der Hochschule wurden zur Durchführung der Messaufgaben folgende Sensoren beschafft und eingebaut:

### 3.1 Stromzähler

Die Stromverbräuche der vier Lüftungsgeräte werden über 1-Phasen Energiezähler mit M-Bus Schnittstelle der Firma Saia-Burgess Controls AG erfasst. Sie sind mit einer 7-stelligen LCD-Anzeige ausgestattet. Die Werte Wirkleistung, Spannung und Strom werden mit der Genauigkeitsklasse B gemäß EN50470-3



bzw. Genauigkeitsklasse 1 gemäß IEC62053-21 erfasst. Die Zähler haben einen Einsatzbereich von 0,25 bis 32 A.

Die Montage erfolgte durch die Elektrofirma.

### 3.2 Außenlufttemperatur

Die Außentemperatur wird mit einem Pt1000 Platin-Widerstandsthermometer in 2-Leiter-Messung erfasst. Die Messtoleranz des Sensors entspricht DIN EN 60751 Klasse 1/3. Der Einsatzbereich des Sensors liegt zwischen  $-190^{\circ}\text{C}$  und  $105^{\circ}\text{C}$ .

Zum Schutz vor Strahlung und Regen ist der Sensor in einen Wetterschutzgehäuse eingebaut.

Der Messfehler aufgrund des Leitungswiderstandes wurde vor Ort gemessen und durch die Einstellung eines entsprechenden Offset-Wertes in der Messdatenerfassung berücksichtigt.



### 3.3 Lufttemperatursensoren in Frisch-, Zuluftkanal und im Fassadenkollektor

Die Temperaturen in den Lüftungskanälen sowie im Luftkollektor des Fassaden-systems werden mit Pt1000 Platin-Widerstandsthermometern in 2-Leiter-Messung erfasst. Die Messtoleranzen der Sensoren entsprechen DIN EN 60751 Klasse 1/3. Der Einsatzbereich der Sensoren liegt zwischen  $-35^{\circ}\text{C}$  und  $105^{\circ}\text{C}$ .

Der Messfehler aufgrund des Leitungswiderstandes wurde vor Ort gemessen und durch die Einstellung eines entsprechenden Offset-Wertes in der Messdatenerfassung berücksichtigt.



### 3.4 Kanalfühler zur Erfassung der Ablufttemperatur der Südräume

Die Temperaturen im Überströmkanal werden über Kanalsensoren mit Platin-Widerstandsthermometern des Typs Pt1000 in 2-Leiter-Messung erfasst. Die Messtoleranzen der Sensoren entsprechen DIN EN 60751 Klasse 1/3. Der Einsatzbereich der Sensoren liegt zwischen  $-50^{\circ}\text{C}$  und  $180^{\circ}\text{C}$ .

Der Messfehler aufgrund des Leitungswiderstandes wurde vor Ort gemessen und durch die Einstellung eines entsprechenden Offset-Wertes in der Messdatenerfassung berücksichtigt.



### 3.6 Oberflächentempersensoren

Die Oberflächentemperaturen der Bestandwand werden mit einem Pt 1000 Platin-Widerstandsthermometer in 2-Leiter-Messung erfasst. Die Messtoleranzen der Sensoren entsprechen DIN EN 60751 Klasse 1/3.

Der Messfehler aufgrund des Leitungswiderstandes wurde vor Ort gemessen und durch die Einstellung eines entsprechenden Offset-Wertes in der Messdatenerfassung berücksichtigt.

### 3.7 Raumluftqualität

Der Raumluftqualitätssensor RLQ der ELKA-Elektronik GmbH erfasst die Raumtemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit und CO<sub>2</sub>-Konzentration in den vier Testräumen. Die Sensoren wurden an der abgehängten Decke installiert.

Die Raumtemperatur kann im Bereich von 0°C bis 50°C erfasst werden. Im Bereich zwischen 18°C und 26°C liegt die Messgenauigkeit bei  $\pm 0,6^\circ\text{C}$ .

Die relative Luftfeuchte wird im Bereich von 10-95% erfasst. Im Bereich zwischen 20% und 80% liegt die Messgenauigkeit bei  $\pm 3\%$ .

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration wird zwischen 0 und 2000 ppm gemessen. Die Genauigkeit liegt bei  $\pm 50$  ppm zuzüglich 2% vom Messwert.



### 3.8 Luftvolumenströme

Die Luftvolumenströme zwischen Nord und Südräumen werden über das Gerät VMR von TROX erfasst.

Der Messbereich reicht von 54m<sup>3</sup>/h bis 540 m<sup>3</sup>/h.

Die Messgenauigkeit beträgt 5%.



### 3.9 Solarstrahlung

Die Solarstrahlung auf den Fassadenkollektor wird über ein das Pyranometer CMP 3 von Kipp&Zonen erfasst. Die Ausrichtung des Sensors entspricht der Fassadenausrichtung. Die eintreffende Strahlung wird im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 2800 nm erfasst. Die Messunsicherheit beträgt höchstens 10%.

Das Ausgangssignal von 0-30 mV wird über einen Messumformer in ein 4-20 mA Signal gewandelt welches über eine Analoge Klemme in die Datenerfassung integriert wird. Der Messbereich beträgt 0-1600 W/m<sup>2</sup>.

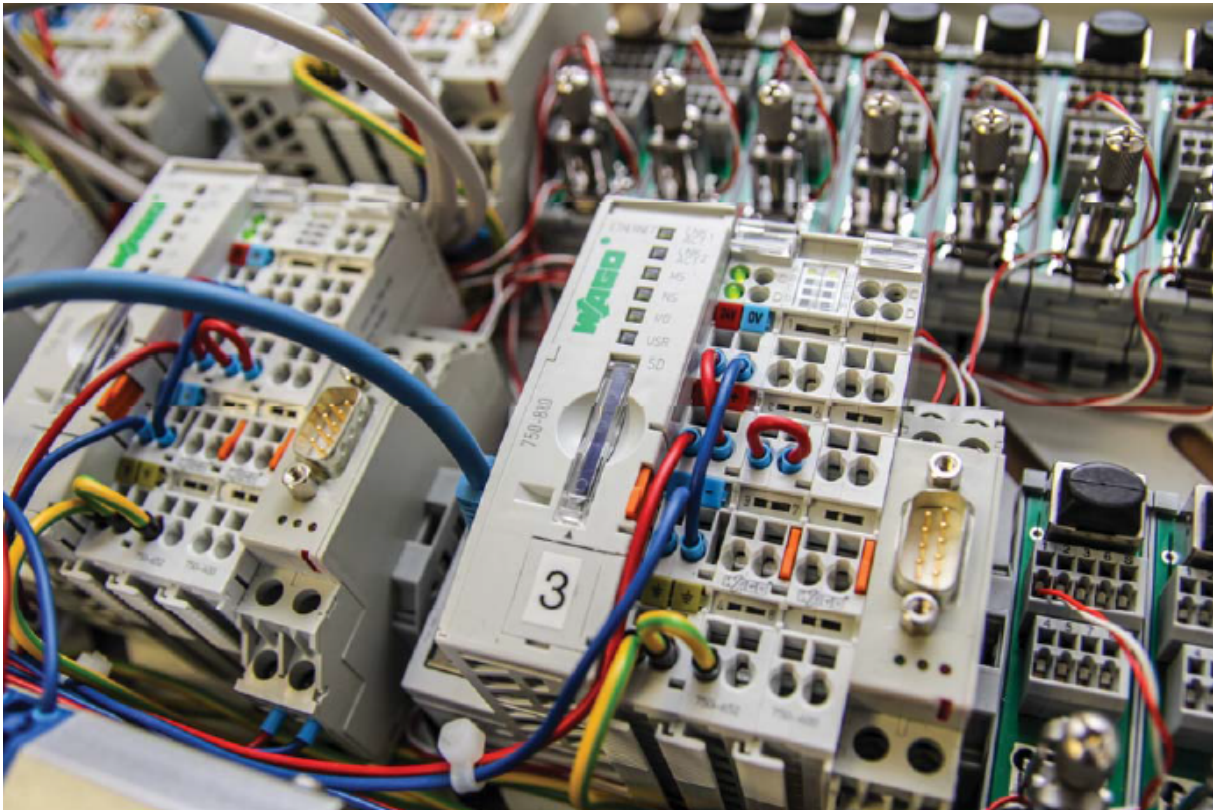


Die Leitungen für die Messsignale wurden bauseits von der Elektrofirma verlegt. Anschluss der Sensoren und Verbindung zur Datenerfassung erfolgte durch die Hochschule Rosenheim.

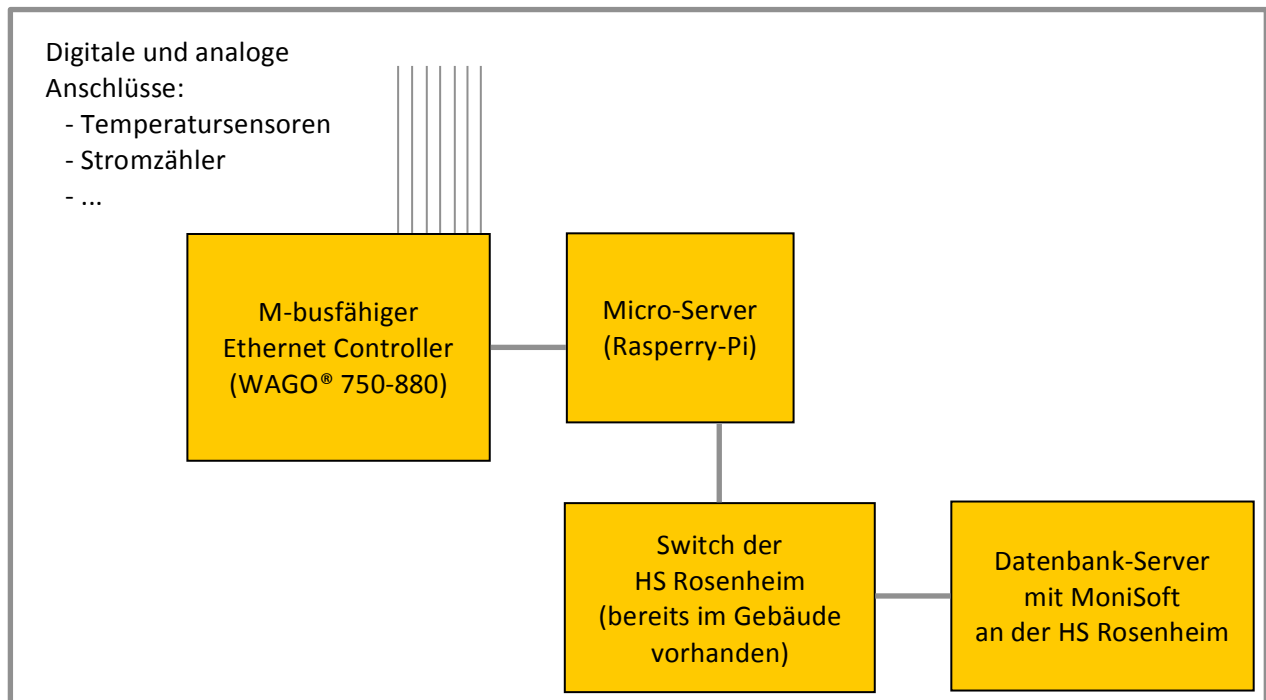


#### 4. Datenerfassung und-übertragung

Die Messdatenerfassung erfolgte in einem mehrstufigen Verfahren. Die Stromzähler wurden mittels M-Bus und über einen Pegelwandler mit einem WAGO® 750-880 Ethernet Controller verbunden, alle übrigen Sensoren wurden über dem jeweiligen Signal angepasste Messklemmen von diesem Controller erfasst. Die erforderlichen Klemmen können modular in der benötigten Anzahl angeschlossen werden.



Auf dem Controller werden die Signale in Messwerte umgerechnet und als Datenpakete zwischengespeichert. Dafür ist eine entsprechende Programmierung des Controllers in einer CoDeSys-Entwicklungsumgebung nötig.



Über einen Mikro-Server und einen durch das Monitoring des gesamten B&O-Parkgeländes ohnehin vorhanden Switch, werden die Datenpakete automatisiert an die Hochschule Rosenheim weitergeleitet. Die Hochschule Rosenheim betreibt einen eigenen auf die Datenauswertung angepassten Datenbankserver, der sich im Rechenzentrum auf dem Hochschulcampus befindet. Sämtliche Sicherheitsroutinen und Zugriffsrechte werden dort von der Administration des Rechenzentrums verwaltet. Der Monitoring-Server der Hochschule Rosenheim ruft die Messdaten zwei Mal pro Tag über eine gesicherte Internetverbindung (SSH) ab, erstellt eine Sicherungskopie und schreibt die erhaltenen Daten in eine MySQL-Datenbank. Auf diese Datenbank kann innerhalb des Hochschulnetzes, mit der zur Darstellung und Auswertung der Messdaten verwendeten Software MoniSoft, zugegriffen werden. Externe Zugriffe durch Projektbeteiligte können nach Bedarf eingerichtet werden.

## 5. Datenbereitstellung über MoniSoft

Zur Datenerfassung sowie Analyse und Auswertung der Messdaten wurde das Programm MoniSoft der Universität Karlsruhe (KIT) verwendet. Außerdem war die Software auf dem Server der HS Rosenheim für den automatischen Import der CSV-Dateien in die MySQL Datenbank zuständig. Da die Software speziell für das Gebäudemonitoring entwickelt wurde, ist eine direkte Darstellung der Ergebnisse in verschiedenen Grafiken und Diagrammen möglich. Sowohl die detaillierte Überprüfung als auch die Markierung ungültiger Messwerte erfolgt ohne Eingriff in die Rohdaten. Weitere Stärken der Software sind die freie Strukturierung der Messpunkte und deren logische Verknüpfung, Berechnung spezifischer Verbräuche über Flächenbezüge und die Bildung beliebiger virtueller Messpunkte über Formeln. Weiterhin haben die gewählten Maßeinheiten und angegebenen Wandlungsfaktoren Einfluss auf die Richtigkeit der Berechnungen, ebenso wie die Angaben zu den Bezugsgrößen. Wenn unplausible Werte identifiziert werden, können diese mit der Software MoniSoft in der Datenbank als ungültig markiert werden, womit sie bei zukünftigen Auswertungen ignoriert werden und dennoch in den Rohdaten erhalten bleiben. Falls die der Auswertung zugrundeliegenden Daten auf Zählerständen basieren, können von der Software etwaige Rücksprünge und einzelne Ausreißer nach oben automatisch identifiziert und zur Markierung als ungültig vormarkiert werden. Dem Projektpartner wurde ein Gastzugang auf die Datenbank des Projektes eingerichtet, sodass er damit direkt die Auswertung der Fragestellungen durchführen konnte.

## 6. Anhang

### Vollständige Messpunktliste

Beschreibung	Einheit	Messpunktkürzel	Messpunktschlüssel
Solarstrahlung vertikal; auf Fassade vor Raum 3	W/m <sup>2</sup>	FH.0.GA.0	Pyrano.001
Außentemperatur; vor Südfassade Raum 3	°C	FH.0.Te.0	PT.001
CO <sub>2</sub> -Konzentration im Innenraum 1 der 4 untersuchten Räume Süd	ppm	FH.S1.CO2.0	ELKA.CO2.001
Stromzähler Lüftungsanlage Südseite in Raum 1 der 4 untersuchten Räume	A	FH.S1.EZ.I	WHG-1-EZ1-I
Stromzähler Lüftungsanlage Südseite in Raum 1 der 4 untersuchten Räume	W	FH.S1.EZ.P	WHG-1-EZ1-P
Stromzähler Lüftungsanlage Südseite in Raum 1 der 4 untersuchten Räume	V	FH.S1.EZ.U	WHG-1-EZ1-U
Stromzähler Lüftungsanlage Südseite in Raum 1 der 4 untersuchten Räume	Wh	FH.S1.EZ.W	WHG-1-EZ1-W
Luftfeuchte im Innenraum 1 der 4 untersuchten Räume Süd	%	FH.S1.RH.0	ELKA.RLF.001
Temperatur im Überströmkanal 1 zu Nordräumen (=Raumtemp. Süd)	°C	FH.S1.T-AB.0	PT.024
Temperatur im Ansaugöffnung Frischluft Raum 1	°C	FH.S1.T-AUL.0	PT.006
Temperatur im Kollektor 1 (hinter dem Glas, mittlere Höhe)	°C	FH.S1.T-KOL.0	PT.005
Temperatur in Ausblasöffnung Zuluft in Südraum 1	°C	FH.S1.T-ZU.0	PT.004
Temperatur im Innenraum 1 der 4 untersuchten Räume Süd	°C	FH.S1.Ti.0	ELKA.T.001
Temperatur im Zwischenraum Bestandswand 1 und Fassadenelement bzw. Wandoberfläche Bestandswand	°C	FH.S1.Tse.0	PT.007
Temperatur auf der Innenoberfläche Südraum 1	°C	FH.S1.Tsi.0	PT.003
Überströmkanal zu Nordraum 1	V	FH.S1.V-AB.U	TROX.U.003
Volumenstrom in Überströmkanal zu Nordraum 1	m <sup>3</sup> /h	FH.S1.V-AB.V	FH.S1.V-AB.V_V
CO <sub>2</sub> -Konzentration im Innenraum 2 der 4 untersuchten Räume Süd	ppm	FH.S2.CO2.0	ELKA.CO2.002
Stromzähler Lüftungsanlage Südseite in Raum 2 der 4 untersuchten Räume	A	FH.S2.EZ.I	WHG-5-EZ1-I
Stromzähler Lüftungsanlage Südseite in Raum 2 der 4 untersuchten Räume	W	FH.S2.EZ.P	WHG-5-EZ1-P
Stromzähler Lüftungsanlage Südseite in Raum 2 der 4 untersuchten Räume	V	FH.S2.EZ.U	WHG-5-EZ1-U
Stromzähler Lüftungsanlage Südseite in Raum 2 der 4 untersuchten Räume	Wh	FH.S2.EZ.W	WHG-5-EZ1-W
Luftfeuchte im Innenraum 2 der 4 untersuchten Räume Süd	%	FH.S2.RH.0	ELKA.RLF.002
Temperatur im Überströmkanal 2 zu Nordräumen (=Raumtemp. Süd)	°C	FH.S2.T-AB.0	PT.025
Temperatur im Ansaugöffnung Frischluft Raum 2	°C	FH.S2.T-AUL.0	PT.010
Temperatur im Kollektor 2 (hinter dem Glas, mittlere Höhe)	°C	FH.S2.T-KOL.0	PT.009
Temperatur in Ausblasöffnung Zuluft in Südraum 2	°C	FH.S2.T-ZU.0	PT.011
Temperatur im Innenraum 2 der 4 untersuchten Räume Süd	°C	FH.S2.Ti.0	ELKA.T.002
Temperatur im Zwischenraum Bestandswand 2 und Fassadenelement bzw. Wandoberfläche Bestandswand	°C	FH.S2.Tse.0	PT.012
Temperatur auf der Innenoberfläche Südraum 2	°C	FH.S2.Tsi.0	PT.008
Überströmkanal zu Nordraum 2	V	FH.S2.V-AB.U	TROX.U.004

Volumenstrom in Überströmkanal zu Nordraum 2	m <sup>3</sup> /h	FH.S2.V-AB.V	FH.S2.V-AB.V_V
CO <sub>2</sub> -Konzentration im Innenraum 3 der 4 untersuchten Räume Süd	ppm	FH.S3.CO2.0	ELKA.CO2.003
Stromzähler Lüftungsanlage Südseite in Raum 3 der 4 untersuchten Räume	A	FH.S3.EZ.I	WHG-3-EZ1-I
Stromzähler Lüftungsanlage Südseite in Raum 3 der 4 untersuchten Räume	W	FH.S3.EZ.P	WHG-3-EZ1-P
Stromzähler Lüftungsanlage Südseite in Raum 3 der 4 untersuchten Räume	V	FH.S3.EZ.U	WHG-3-EZ1-U
Stromzähler Lüftungsanlage Südseite in Raum 3 der 4 untersuchten Räume	Wh	FH.S3.EZ.W	WHG-3-EZ1-W
Luftfeuchte im Innenraum 3 der 4 untersuchten Räume Süd	%	FH.S3.RH.0	ELKA.RLF.003
Temperatur im Überströmkanal 3 zu Nordräumen (=Raumtemp. Süd)	°C	FH.S3.T-AB.0	PT.022
Temperatur im Ansaugöffnung Frischluft Raum 3	°C	FH.S3.T-AUL.0	PT.018
Zemperatur im Kollektor 3 (hinter dem Glas, mittlere Höhe)	°C	FH.S3.T-KOL.0	PT.017
Temperatur in Ausblasöffnung Zuluft in Südraum 3	°C	FH.S3.T-ZU.0	PT.019
Temperatur im Innenraum 3 der 4 untersuchten Räume Süd	°C	FH.S3.Ti.0	ELKA.T.003
Temperatur im Zwischentraum Bestandswand 3 und Fassadenelement bzw. Wandoberfläche Bestandswand	°C	FH.S3.Tse.0	PT.020
Temperatur auf der Innenoberfläche Südraum 3	°C	FH.S3.Tsi.0	PT.021
Überströmkanal zu Nordraum 3	V	FH.S3.V-AB.U	TROX.U.001
Volumenstrom in Überströmkanal zu Nordraum 3	m <sup>3</sup> /h	FH.S3.V-AB.V	FH.S3.V-AB.V_V
CO <sub>2</sub> -Konzentration im Innenraum 4 der 4 untersuchten Räume Süd	ppm	FH.S4.CO2.0	ELKA.CO2.004
Stromzähler Lüftungsanlage Südseite in Raum 4 der 4 untersuchten Räume	A	FH.S4.EZ.I	WHG-4-EZ1-I
Stromzähler Lüftungsanlage Südseite in Raum 4 der 4 untersuchten Räume	W	FH.S4.EZ.P	WHG-4-EZ1-P
Stromzähler Lüftungsanlage Südseite in Raum 4 der 4 untersuchten Räume	V	FH.S4.EZ.U	WHG-4-EZ1-U
Stromzähler Lüftungsanlage Südseite in Raum 4 der 4 untersuchten Räume	Wh	FH.S4.EZ.W	WHG-4-EZ1-W
Luftfeuchte im Innenraum 4 der 4 untersuchten Räume Süd	%	FH.S4.RH.0	ELKA.RLF.004
Temperatur im Überströmkanal 4 zu Nordräumen (=Raumtemp. Süd)	°C	FH.S4.T-AB.0	PT.023
Temperatur im Ansaugöffnung Frischluft Raum 4	°C	FH.S4.T-AUL.0	PT.013
Zemperatur im Kollektor 4 (hinter dem Glas, mittlere Höhe)	°C	FH.S4.T-KOL.0	PT.015
Temperatur in Ausblasöffnung Zuluft in Südraum 4	°C	FH.S4.T-ZU.0	PT.002
Temperatur im Innenraum 4 der 4 untersuchten Räume Süd	°C	FH.S4.Ti.0	ELKA.T.004
Temperatur im Zwischentraum Bestandswand 4 und Fassadenelement bzw. Wandoberfläche Bestandswand	°C	FH.S4.Tse.0	PT.014
Temperatur auf der Innenoberfläche Südraum 4	°C	FH.S4.Tsi.0	PT.016
Überströmkanal zu Nordraum 4	V	FH.S4.V-AB.U	TROX.U.002
Volumenstrom in Überströmkanal zu Nordraum 4	m <sup>3</sup> /h	FH.S4.V-AB.V	FH.S4.V-AB.V_V