



Energieoptimiertes Bauen – EnEff:Schule  
Neubau der St. Franziskus-Grundschule in Halle (Saale)  
als Nullenergiehaus in Holzbauweise

## **Abschlussbericht**

### **Teil 1: Überblick**

Prof. Dr.-Ing. K. Jagnow  
Dipl.-Ing. (FH) K. Gebhardt, M. Eng.

Die Verantwortung für den Inhalt  
des Berichtes liegt bei den Verfassern.

Magdeburg, September 2018

unter dem Förderkennzeichen  
FKZ 03274300  
gefördert durch das:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



# Impressum

## **Projektförderung:**

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie  
unter dem Förderkennzeichen FKZ 03274300  
Im Förderprogramm Energieoptimiertes Bauen (EnOB) – EnEff: Schule

## **Projektträger:**

Projektträger Jülich (PTJ)  
Wilhelm-Johnen-Straße  
52428 Jülich

## **Projektlaufzeit:**

01.04.2013 - 31.03.2018

## **Fördermittelnehmer und Forschungskooperationspartner:**



Edith-Stein-Schulstiftung des Bistums Magdeburg  
Max-Josef-Metzger-Str. 1  
39104 Magdeburg

## **Verantwortliche Berichtverfasser:**



Prof. Dr.-Ing. Kati Jagnow  
Dipl.-Ing. (FH) Katharina Gebhardt, M. Eng.  
Fachbereich Wasser, Bau, Umwelt und Sicherheit  
Hochschule Magdeburg/Stendal  
Breitscheidstraße 2, 39114 Magdeburg

## **Projektbearbeiter:**

Prof. Dr.-Ing. Kati Jagnow  
Dipl.-Ing. (FH) Katharina Gebhardt, M. Eng.

## **Datenstand:**

Magdeburg, 30.09.2018



## Inhalt

<b>Impressum</b> .....	<b>3</b>
<b>I. Teil I Kurzdarstellung</b> .....	<b>7</b>
I.1 Aufgabenstellung.....	7
I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	7
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	9
I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde .....	11
I.4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt worden sind .....	11
I.4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste.....	11
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	11
<b>II. Teil II Eingehende Darstellung</b> .....	<b>15</b>
II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....	15
II.1.1 Projektvorstellung .....	15
II.1.2 Gebäude, Nutzung und Ausstattung .....	17
II.1.3 Bilanzen.....	22
II.1.4 Messtechnik.....	30
II.1.5 Raumklima und Behaglichkeit.....	38
II.1.6 Baukonstruktion .....	51
II.1.7 Lüftung und Erdwärmeübertrager .....	65
II.1.8 Solarthermie und Latentwärmespeicher.....	78
II.1.9 Wärmeversorgung, Heizung, Hydraulik.....	84
II.1.10 Photovoltaik, Windkraft und Batterie .....	94
II.1.11 Beleuchtung und Verschattung .....	106
II.1.12 Frisch-, Regen- und Abwasser.....	114
II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	123
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	123
II.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes .....	124
II.5 Während der Durchführung dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	124
II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses .....	124
<b>Anhang</b> .....	<b>127</b>
Literaturangaben.....	127
Nomenklatur.....	130
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis .....	133
Überblick über separate Anhänge.....	135



# Teil I Kurzdarstellung

## **1.1 Aufgabenstellung**

Die St. Franziskus-Grundschule Halle wurde im Februar 2014 nach mehr als zweijähriger Bauzeit eröffnet. Der nach den Plänen des Büros Steinblock Architekten aus Magdeburg entstandene, dreigeschossige Neubau in Holzbauweise hebt sich von den konventionellen Schulbauten im Land Sachsen-Anhalt nicht nur durch die Passivhausbauweise, sondern auch durch den Fokus auf die Ökologie der Baustoffe ab.

Die Hochschule Magdeburg-Stendal ist seit Frühjahr 2011 durch die Planungsberatung in das Projekt involviert gewesen. Diese Kooperation mündete im Oktober 2012 im vorliegenden Monitoringprojekt im Auftrag der Edith-Stein-Schulstiftung des Bistums Magdeburg mit Förderung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (FKZ 03274300).

Der Schwerpunkt des Forschungsprojekts bestand in der messtechnischen Begleitung der Inbetriebnahme und ersten Nutzungsjahre der St. Franziskus-Grundschule. Ziel war es, die Betriebserfahrungen aus dem Pilotvorhaben neutral so aufzubereiten, dass sie anderen Bauträgern bzw. Betreibern von Bildungseinrichtungen zur Verfügung stehen.

Das Projekt soll außerdem klären, welche Parameter (Licht, Luft, Temperaturen) sich hinsichtlich der Nutzung des Gebäudes sowie der Energieeffizienz diverser erneuerbarer Energien als sinnvoll erweisen. Außerdem wurden die Wechselwirkungen zwischen der Passivhausbauweise, der Schulnutzung (und als Sonderfall der Küchennutzung) und der eingesetzten Technologien erforscht. Es werden Rückschlüsse zur Optimierung des speziellen Energiekonzeptes gezogen und Erkenntnisse gewonnen, wie künftig verbesserte Energiekonzepte vergleichbarer Objekte entwickelt werden sollen.

## **1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Während der Vorplanungsphase förderte die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) die Erarbeitung eines ökologischen Konzeptes (AZ: 28080). Für die Umsetzung und das anschließende Monitoring konnte eine Förderung des BMWi erlangt werden (FKZ 0327 430 O). Die St. Franziskus-Grundschule ist Teil des bundesweiten Querschnittsprojektes EnEff:Schule.

Die Hochschule Magdeburg-Stendal ist im Frühjahr 2011 erstmals im Rahmen einer Masterarbeit zur Qualitätssicherung der Planung und Erstellung des Monitoringkonzeptes mit dem Projekt in Kontakt gekommen. Aus der weiteren Zusammenarbeit ergab sich die Forschungskooperation, welche im Oktober 2012 unterzeichnet wurde.

Das Monitoring wurde von der Hochschule Magdeburg-Stendal – namentlich von den Autoren und studentischer Unterstützung – durchgeführt. Ziele der Datenauswertung sind einerseits die Benennung konkreter Handlungsempfehlungen für den Bauherrn und Betreiber zur Betriebsverbesserung, andererseits aber auch die Verallgemeinerung der Erkenntnisse für künftige Schulbauten in Deutschland.

Zum Zwecke des Monitorings wurden jeweils monatlich Daten aus fünf Quellen zusammengeführt: einem zentralen Monitoringserver, der alle Messstellen enthält, die extra für das Projekt installiert wurden (405 Datenpunkte), den ohnehin vorhandenen Speichereinheiten der beiden zentralen Lüftungsanlagen (232 Messpunkte), der Solarthermie (32 Messpunkte) und der Photovoltaik (7 Messpunkte). Zusätzlich werden Stromzählerdaten der Stadtwerke Halle (3 Datenpunkte) implementiert.

Abgedeckt sind folgende Themengebiete: Erstellung von jährlichen Übersichten zum Energie- und Medienfluss, Auswertung von Raumklimaparametern mit Tiefenanalyse zweier Klassenräume und der Aula, Effizienzmessungen für die regenerativen Energien und Raumlufttechnik, Messungen der Gebäudehülle sowie Nutzerbefragungen.

Aufgrund der Insolvenz des Hauptplaners mitten in der Bauphase gingen viele Fachplanungsdetails verloren bzw. waren nur noch als PDF oder Papier vorhanden. Das Monitoring umfasst daher – unvorhergesehen – auch die Wiederherstellung von CAD-Plänen, fast die komplette Nach- oder Neuplanung der TGA, EnEV-, Passivhaus- und Wärmebrückennachweise sowie des sommerlichen Wärmeschutzes. Auch alle Simulationen für die regenerativen Energien wurden neu erstellt. Im Rahmen der Bearbeitung wurden 34 Abschlussarbeiten abgeschlossen, siehe Kapitel I.5.

## **Begleitforschung**

Am 29.10.2013 fand der erste Vor-Ort-Termin mit dem Begleitforschungsteam EnEff:Schule statt. Es erfolgte ein reger und konstruktiver Austausch zu den Frage- und Zielstellungen der beteiligten Institutionen. Im Nachgang konnte die erste Nutzerbefragung durch das Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES GmbH) umgesetzt werden.

Am 27./28.10.2014 fand der Workshop der Begleitforschung „Energieeffiziente Schulen“ am Max-Steenbeck-Gymnasium Cottbus statt, bei dem auch die St. Franziskus-Grundschule vorgestellt wurde. Es erfolgte ein konstruktiver Austausch unter den Monitoringteams.

Am 14. April 2015 erfolgte eine Beteiligung an den Gruppendiskussionen im Rahmen der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung. Die umfangreichen Mitschriften aus den Gesprächen mit Schülern und Lehrern wurden dem IREES, Karlsruhe, zur Verfügung gestellt.

Die gewünschten Informationen und Messdaten wurden regelmäßig an die Begleitforschung weitergegeben. Die Schule ist auf den Homepages von EnEff-Schule und EnOB dargestellt:

- <https://www.eneff-schule.de/index.php/Demonstrationsobjekte/Plusenergieschulen/plusenergie-grundschule-mit-hort-in-halle.html>
- <http://www.enob.info/de/neubau/projekt/details/nullenergie-grundschule-in-holzbauweise/>

Die Verbräuche sind veröffentlicht unter:

- <http://daten.eneff-schule.de/Halle.aspx>

Die Schule ist des Weiteren durch die Begleitforschung an folgender Stelle vorgestellt worden und hier sogar „Highlighted Case March 2017“ auf der EU-Plattform geworden:

- <http://www.buildup.eu/en/practices/cases/plus-energy-st-franziskus-elementary-school-halle-germany-0>

### **1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

#### **Vorprojekt DBU**

Während der Vorplanungsphase förderte die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) die Erarbeitung eines ökologischen Konzeptes (AZ: 28080). Die Ergebnisse sind in [1] dokumentiert.

#### **Planung und Bauablauf**

Parallel zur Bauantragsphase wurde 2011 das Monitoringkonzept erstellt. Baubeginn war im September 2011.

Im März 2012 wurde bekannt, dass das Fachplanungsbüro für Statik, TGA und Energiekonzept als wichtigster Fachplaner Insolvenz angemeldet hat und nicht mehr als Ansprechpartner zur Verfügung steht. Dies führte zu erheblichen Schwierigkeiten, da erst ein neuer Planer für TGA gefunden werden musste, welcher dann bei lückenhafter Planungsdatenlage direkt in die Leistungsphasen 7 und 8 einsteigen musste.

Die Installation der Messtechnik erfolgte teils parallel zur Bauphase, teils auch erst nach der tatsächlichen Inbetriebnahme des Gebäudes am 26. Februar 2014. Die bauordnungsrechtliche Abnahme fand am 30. Januar 2014 statt. Die Inbetriebnahme der Schulküche erfolgte erst zum 2. Mai 2014.

Die BMWi-Förderung des Monitorings begann bereits im April 2013 kurz vor dem eigentlich geplanten Bezug der Nutzer. Zeitliche Verzögerungen beim Bau, vor allem ausgelöst durch die Insolvenz des Hauptfachplaners, führten zu mehrfach notwendigen Verlängerungen der Monitoringphase.

Der Salzhydratspeicher wurde im November 2014 in Betrieb genommen, der Solarcarport im Oktober/November 2014 aufgestellt, die Installation der Solarbatterie erfolgte erst im Frühsommer 2015. Für das Windrad konnte keine Baugenehmigung erzielt werden, daher ist die im Juni 2015 aufgestellte Anlage bis heute als mobile Testanlage deklariert.

#### **Inbetriebnahme und Start des Monitorings**

Der Dienstleister zur Installation der Messtechnik befand sich auch ein Jahr nach Inbetriebnahme des Gebäudes noch stark in Verzug. Es wurde mehrfach ein Soll-Ist-Abgleich des Installationsstandes vorgenommen und intensiv über Probleme und Lösungsansätze gesprochen.

Ursächlich für die Verzögerung waren neben dem allgemeinen Bauverzug der intensive gewerkeübergreifende Abstimmungsbedarf im Bauablauf, in dessen Folge es teils zur Zerstörung von Installationen kam oder das Zeitfenster zum Einbau der Messtechnik im Innenausbau verpasst wurde. Weiterhin traten Probleme bei der Datenübertragung auf, Störquellen mussten identifiziert oder die mangelnde Kompatibilität von Komponenten durch Austausch behoben werden. Seit Ende 2015 läuft die reguläre Datenerfassung.

Daher sind die Jahre 2014 und 2015 als Phasen mit Grobmonitoring (manuelle Zählerablesungen) konzipiert, die Jahre 2016 und 2017 sind die Phasen des Intensivmonitorings (auf Basis aller Messfühler im 10-Minuten-Intervall).

#### **Probleme und Lösungen**

Durch die Verzögerung bei der Inbetriebnahme hätte sich die effektive Monitoringphase – bezogen auf das regulär geplante Projektende mit 28.02.2015 – auf maximal 12 Monate verkürzt, was zu einer sehr eingeschränkten Aussagefähigkeit der Ergebnisse geführt hätte.

Aus Sicht einer sinnvollen Datenauswertung und vor allem Betriebsoptimierung wurden daher Möglichkeiten gesucht, die Projektzeit kostenneutral zu verlängern, um 2 bis 2,5 Jahre Monitoring gewährleisten zu können.

Umgesetzt wurde dies auf verschiedenen Wegen. Zum einen ergab sich die Möglichkeit, die Projektmitarbeiterin (50 % wiss. Mitarbeiterin) verstärkt in einem anderen Forschungsprojekt einzusetzen und für das Monitoring auf eine 10 %-Stelle herabzusetzen. Der dennoch fehlende Mittelbedarf von ca. 32.000 Euro konnte durch den Verzicht auf zwei Windräder und die Elektromobilität – und somit durch Umwidmung der Gelder – sichergestellt werden.

Ein weiterer Umstand, der zu einer kostenneutralen Projektzeitverlängerung führte, war die einjährige Elternzeit der Projektmitarbeiterin, sodass insgesamt eine Verlängerung des Monitoringprojektes bis zum 31.03.2018 möglich war.

## **Optimierung**

Aufgrund der Insolvenz des Fachplaners für TGA mitten in der Bauphase im Frühjahr 2012 gingen viele Fachplanungsdetails verloren bzw. waren nur noch als PDF oder Papier vorhanden. Zwar gab es in der Phase der Ausführung und Inbetriebnahme einen neuen TGA-Planer, der jedoch keine Planung durchgeführt hat. Engagiert wurde er auf Basis der vorhandenen Datenlage für die HOAI-Phasen 8 und 9.

Das Monitoring umfasst daher – unvorhergesehen – auch die Wiederherstellung von CAD-Plänen, fast die komplette Nach- oder Neuplanung der TGA, EnEV-, Passivhaus- und Wärmebrückennachweise sowie des sommerlichen Wärmeschutzes. Auch alle Simulationen für die regenerativen Energien wurden neu erstellt. Dies war personell nur durch sehr umfangreiche studentische Unterstützung zu leisten.

Nach dem ersten Betriebsjahr zeigte sich, dass der Zugriff auf den Fachplaner und die Originaldaten enorm wichtig gewesen wäre, um notwendige regelungstechnische Einstellungen und Feinoptimierungen, die sich in der Zwischenzeit ergeben hatte, vornehmen zu können (Umschaltung Fernwärme auf Vorlauf, Schaltprogramme Lüftungsanlage, Nachjustierung der Volumenstromregler und Beleuchtung). Mit allen Fachplanern der technischen Gewerke wurden intensive Gespräche zur Funktionsweise der Steuerungs- und Regelungsanlagen geführt und somit die Grundlagen für die Optimierung der Anlagen gelegt.

Weiterhin wurde deutlich, wie enorm wichtig eine sorgfältige Dokumentation der Ausführung und des Bauzustandes ist. Insbesondere das Zusammentragen der notwendigen Daten für eine realitätsnahe energetische Bilanzierung erwies sich als sehr zeitintensiv, da zwar Planungsdaten vorlagen, jedoch die Planfortschreibung zur Fertigstellung nicht erfolgte.

Nachdem Optimierungsmöglichkeiten aufgedeckt waren, erwiesen sich die angesprochenen Fachbetriebe nicht immer als besonders interessiert und/oder kompetent, um Nachjustierungen vorzunehmen. Monteure sind über die klassische Installation hinaus häufig nicht mit den Möglichkeiten von Nachregulierungen vertraut.

Insgesamt wurde deutlich, dass ohne ein (mindestens Minimal-)Monitoring einige Missstände nicht aufgedeckt worden wären. Auch hätte z. B. ein mit der Leistungsphase 9 beauftragter Fachplaner TGA den im Rahmen des Forschungsprojektes betriebenen Aufwand für den in der HOAI angesetzten prozentualen Honoraranteil von 3 v. H. nicht leisten können. Hierfür braucht es Zeit und – aus Sicht des Bauherrn – im Jahr 2 oder 3 nach Inbetriebnahme erneut Geld für diese Optimierung.

Eine wesentliche Rolle für die Problemlösung vor Ort spielt der Hausmeister, der sich bestenfalls als Energiemanager versteht. Beschwerden werden zunächst an ihn herangetragen, weshalb ein technisches Interesse und überdurchschnittliches Verständnis für die installierte Technik und regelungstechnische Zusammenhänge wichtig sind.

#### ***1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde***

Die Passivhausbauweise findet immer häufiger Anwendung. Die Niedrigstenergiebauweise und ihre Nutzung werden spätestens 2020 durch die Umsetzung der EU-Gebäuderichtlinie Pflicht. Nullenergie- sowie Plusenergiegebäude sind bereits technisch möglich, es besteht hier jedoch noch ein hoher Forschungsbedarf, um die Technologien in die breite Anwendung zu bringen.

Im vorliegenden Forschungsprojekt wurden durch die messtechnische Begleitung der Inbetriebnahme und ersten Nutzungsjahre der St. Franziskus-Grundschule wertvolle Erkenntnisse zu Besonderheiten der Passivhausbauweise in Bildungsgebäuden gewonnen. Betriebserfahrungen wurden ausgewertet und neutral so aufbereitet, dass sie anderen Bauträgern bzw. Betreibern von Bildungseinrichtungen zur Verfügung stehen.

Das Projekt hat sich intensiv damit auseinandergesetzt, welche Parameter (Licht, Luft, Temperaturen) sich hinsichtlich der Nutzung des Gebäudes sowie der Energieeffizienz diverser erneuerbarer Energien als sinnvoll erweisen. Die Wechselwirkungen zwischen der Passivhausbauweise, der Schulnutzung (und als Sonderfall der Küchennutzung) und der eingesetzten Technologien wurde erforscht.

Es wurden Rückschlüsse zur Optimierung des speziellen Energiekonzeptes gezogen und Erkenntnisse gewonnen, wie künftig verbesserte Energiekonzepte vergleichbarer Objekte entwickelt werden sollen. Teilweise wurden am Objekt erfolgreich Optimierungen durchgeführt oder sind noch geplant.

##### ***1.4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt worden sind***

Keine.

##### ***1.4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste***

Zur Anwendung kamen hauptsächlich die einschlägigen Normen der bearbeiteten Themengebiete sowie die Technische Regeln für Arbeitsstätten des Ausschusses für Arbeitsstätten (ASTA). Darüber hinaus wurden regelmäßig die Protokollbände des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser des Passivhaus Institutes Darmstadt herangezogen.

#### ***1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen***

Es bestand eine Forschungs Kooperation zwischen der Edith-Stein-Schulstiftung des Bistums Magdeburg und der Hochschule Magdeburg/Stendal, Fachbereich Wasser, Bau, Umwelt und Sicherheit.

#### **Projektbeteiligte**

Eine Auswertung der Korrespondenz der letzten Jahre ergab, dass im Rahmen des Monitorings Kontakt zu 196 Personen aus den Bereichen Bauherr, Nutzer/Betreiber, Planer/Fachplaner, Förderer, Begleitforschung, Bauamt, Energieversorger, Fachfirmen, Hersteller und Studierenden bestand.

Eine Auswahl der wichtigsten Projektbeteiligten wird in Tabelle I-1 vorgenommen.

**Tabelle I-1: Projektbeteiligte**

<b>Kurz</b>	<b>ausführliche Angabe</b>	<b>Gewerk/ Verantwortlichkeit</b>
BISTUM	Edith-Stein-Schulstiftung des Bistums Magdeburg Herr Quecke, Herr Lipowski, Herr Brause, Herr Jeschke Max-Josef-Metzger-Str. 1 39104 Magdeburg	Bauherr
BMWI	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie Scharnhorststr. 34-37 10115 Berlin	
PTJ	Projektträger Jülich (PTJ) Wilhelm-Johnen-Straße 52428 Jülich	
HOLLENBACH	Sachverständigenbüro Herr Hollenbach Karlstraße 14 39261 Zerbst	Projektsteuerer
STEINBLOCK	Steinblock Architekten GmbH Herr Tietze Porsestraße 19 39104 Magdeburg	Architektur
BANKERT	Bankert & Menn Frau Bankert-Hahn Große Gosenstraße 15 06114 Halle/ Saale	Landschaftsarchi- tektur
N+S	Ingenieurbüro Naumann + Stahr Arnoldstraße 26 04299 Leipzig	HLS alt, Planer
TUK	Theurich+Klose Ingenieurgesellschaft mbH Vahrenwalder Str. 117 30165 Hannover Herr Adolf, Herr Gierlich, Hr. v. Goldammer	HLS neu, Planer
AIB	AIB GmbH Architekten Ingenieure Bautzen Herr Medack, Herr Hoffmann Liselotte-Herrmann-Str. 4 02625 Bautzen	Elektrotechnik, Planer
GEDES	Gedes e.V. Herr Döring, Herr Riedel Promenadenring 8 02708 Löbau	Messtechnik, Ausführung

**Einbindung in die Hochschullehre**

Es wurden 34 Abschlussarbeiten zu verschiedenen Aspekten in den Studiengängen Bachelor „Bauingenieurwesen“, Master „Energieeffizientes Bauen“ und Master „Regenerative Gebäudeenergiesysteme“ betreut und deren Ergebnisse in das Projekt integriert. Themen der Arbeiten waren (Reihenfolge nach Bearbeitungsjahr):

- Masterarbeit „Qualitätssicherung für die Planung und Erstellung eines Monitoringkonzeptes“ [2]
- Masterarbeit „Nutzerorientierte und witterungsbedingte Simulationen sowie die Erstellung einer Strombilanz am Neubau der Sankt Franziskus Grundschule in Halle (Saale)“ [3]
- Bachelorarbeit „Vergleich der Ergebnisse der Heizlastberechnung für eine Passivhausschule nach verschiedenen Verfahren für die St. Franziskus-Grundschule in Halle (Saale)“ [4]
- Bachelorarbeit „Vergleich stationärer und instationärer Temperatur- und Feuchteberechnungen für die Gebäudehülle einer Passivhausschule“ [5]
- Bachelorarbeit „Simulation einer Solarthermieanlage für den Küchenbetrieb in einer Passivhausschule“ [6]
- Bachelorarbeit „Stromanalyse der Großküche einer Passivhausschule - für die St. Franziskus-Grundschule in Halle“ [7]
- Bachelorarbeit „Berechnung und Optimierung der Lüftungsanlagen einer Passivhausschule zur Energiebilanzierung“ [8]
- Bachelorarbeit „Zertifizierung der Grundschule Sankt Franziskus als Passivhausschule“ [9]
- Masterarbeit „Vergleichende energetische Bewertung nach verschiedenen Bilanzmethoden für eine Grundschule in Passivhausbauweise anhand der St. Franziskus-Grundschule in Halle (Saale)“ [10]
- Bachelorarbeit "Stromanalyse der Hausmeisterwohnung in einer Passivhausschule" [11]
- Bachelorarbeit "Vergleich Sommerlicher Wärmeschutz nach DIN 4108-2 [2003] und 4108-2 [2013] am Beispiel der St. Franziskus Grundschule in Halle" [12]
- Masterarbeit "Untersuchung der Wärmebrückenfreiheit einer Passivhausschule in Holzbauweise" [13]
- Masterarbeit "Ökologische Bewertung einer Passivhausschule" – Schwerpunkt Bauhülle" [14]
- Masterarbeit "Energetische Bewertung der Beleuchtung in einer Passivhausschule" [15]
- Masterarbeit "Aufbereitung, Plausibilitätsprüfung und anschließende Auswertung von Messwerten des Monitorings mit Abgleich der geplanten Effizienzen, Bedarfswerte und Komfortkriterien " [16]
- Masterarbeit "Vergleich von Energiebedarfsbilanzen und Verbrauchsdaten für eine Passivhausschule" [17]
- Bachelorarbeit "Überprüfung der Trink- und Brauchwasserplanung für eine Passivhausschule" [18]
- Bachelorarbeit "Überprüfung der Trinkwasserplanung für die Sankt Franziskus Grundschule in Halle " [19]
- Bachelorarbeit "Ökologische Bewertung einer Passivhausschule mit Schwerpunkt technische Gebäudeausrüstung (TGA)" [20]
- Masterarbeit "Optimierung der Photovoltaikanlage auf Basis von Messdaten für eine Passivhausschule" [21]
- Masterarbeit "Optimierung der Solarwärmenutzung für eine Schulküche auf Basis von Messdaten" [22]
- Bachelorarbeit "Untersuchungen zum sommerlichen Wärmeschutz und zur Temperaturbehaglichkeit in der Aula einer Passivhausschule in Halle" [23]
- Bachelorarbeit „Schallschutz und Raumakustik in einer Grundschule“ [24]
- Masterarbeit "Qualitätssicherung einer Passivhausschule in Holzbauweise mithilfe ingenieurtechnischer Messverfahren" [25]
- Masterarbeit „Ökobilanz für den Innenausbau einer Passivhausschule“ [26]

- Masterarbeit „Ökobilanz für die technische Gebäudeausrüstung einer Passivhausschule“ [27]
- Masterarbeit „Ökobilanz für die Elektroausstattung einer Passivhausschule“ [28]
- Masterarbeit „Energetische und wirtschaftliche Bewertung regenerativer Einsparmaßnahmen für eine Grundschule in Passivhausbauweise“ [29]
- Masterarbeit „Optimierung der Verschattungs- und Beleuchtungsanlagen für eine Passivhausschule“ [30]
- Masterarbeit „Untersuchungen zu Behaglichkeitskriterien, zur Raumluftqualität und zum Lüftungsverhalten in einer Passivhausschule“ [31]
- Masterarbeit „Detailanalyse für eine elektrisch versorgte Wohnung in Passivhausbauweise“ [32]
- Masterarbeit „Analytische Auswertung der St. Franziskus-Grundschule“ [33]
- Masterarbeit "Energiebilanzierung mit verschiedenen Energiebilanzverfahren für eine Passivhausschule" [34]
- Masterarbeit „Untersuchung und Optimierung der Luftheizung- und Luftkühlung für eine Passivhausschule“ [35]

## Teil II Eingehende Darstellung

### **II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele**

#### **II.1.1 Projektvorstellung**

##### **Eigentümer**

Bauherrin und Betreiberin der St. Franziskus-Grundschule ist die Edith-Stein-Schulstiftung des Bistums Magdeburg. In Trägerschaft der Edith-Stein-Schulstiftung befinden sich vier Grundschulen, eine Sekundarschule und drei Gymnasien. Die Edith-Stein-Schulstiftung ist damit der größte freie Schulträger im Land Sachsen-Anhalt.

Anlass für den Neubau der St. Franziskus-Grundschule war die jahrelang unbefriedigende bauliche Situation am alten Standort. Nachdem die Schule 2001 provisorisch in Containern gegründet wurde, erfolgte 2003 der Umzug in einen maroden DDR-Plattenbau in der Jamboler Straße.

Im Jahr 2011 erfolgte der erste Spatenstich am neuen Standort in der Murmansker Straße, nur 300 m vom alten Standort entfernt und direkt gegenüber vom Elisabeth-Gymnasium, welches sich ebenso in Trägerschaft der Edith-Stein-Schulstiftung befindet. Die Eröffnung für den Schulbetrieb mit ca. 180 – 200 Schülern in 8 Schulklassen fand im Februar 2014 statt.

In einem weiteren Bauabschnitt ist noch der Bau einer Turnhalle sowie einer Sekundarschule vorgesehen.

Die Entscheidung für eine ökologische und nachhaltige Bauweise entstand aus der Überzeugung des Schulträgers, diese Aspekte den Schülern im Sinne der Vorbildwirkung vermitteln zu wollen und in das pädagogische Konzept einfließen zu lassen. Darüber hinaus spielte der hohe Lernkomfort unter überschaubaren Betriebskosten eine wesentliche Rolle.

##### **Kostenzusammenstellung**

Die Baukosten betragen ca. 8,2 Mio. Euro brutto. In Tabelle II-1 sind die Gesamtkosten nach Kostengruppen aufgegliedert dargestellt. Tabelle II-2 zeigt die Kosten der KG 300 (Baukonstruktion), Tabelle II-3 die Kosten der KG 400 (Technische Gebäudeausstattung).

Mit netto 1479 €/m<sup>2</sup> (1295 €/m<sup>2</sup> unter Berücksichtigung der Förderung) für die Kostengruppen 300 und 400 liegt das Projekt im Schnitt der in EnEff:Schule begleiteten Bildungsbauten [36].

**Tabelle II-1: Kostenzusammenstellung nach Kostengruppen**

KG	Kostengliederung nach DIN 276	Kosten brutto [€]	Kosten netto [€]	flächenbezogene Kosten netto [€/m² NGF]
100	Grundstück	0,00	0,00	0,00
200	Herrichten und Erschließen	180.962,96	152.069,71	49,28
300	Bauwerk - Baukonstruktion	4.075.856,30	3.425.089,33	1.109,88
400	Bauwerk - TGA	1.356.480,24	1.139.899,36	369,38
500	Außenanlagen	644.573,79	541.658,65	175,52
600	Ausstattung und Kunstwerke	474.943,93	399.112,55	129,33
700	Baunebenkosten	1.468.446,08	1.233.988,30	399,87
	<b>Summe</b>	<b>8.201.263,30</b>	<b>6.891.817,90</b>	<b>2.233,26</b>
<b>Nettogrundfläche NGF: 3085,99 m²</b>				

**Tabelle II-2: Kostenzusammenstellung für KG 300**

Gewerk KG 300	Nettokosten [€]	Nettokosten ohne innovative Maßnahmen [€]	flächenbezogene Nettokosten ohne innovative Maßnahmen [€/m² NGF]
Baustelleneinrichtung	73.670,41	73.670,41	23,87
Rohbau	213.967,93	213.967,93	69,34
Zimmerer	1.213.176,03	1.009.121,11	327,00
Einblasdämmung	131.966,17	131.966,17	42,76
Gerüstbau	34.533,76	34.533,76	11,19
Fenster/Außentüren	424.891,18	278.139,82	90,13
Dachabdichtung	59.108,31	59.108,31	19,15
Fassade	219.467,03	219.467,03	71,12
Trockenbau	529.411,76	506.034,41	163,98
Schlosser	64.461,87	64.461,87	20,89
Brandschutzelemente	119.724,00	119.724,00	38,80
Innentüren	52.610,08	52.610,08	17,05
Fliesen	72.159,04	72.159,04	23,38
Maler	35.723,93	35.723,93	11,58
Bodenbelag	62.032,68	62.032,68	20,10
Mobile Trennwand	7.857,00	7.857,00	2,55
Aufzug	28.780,68	28.780,68	9,33
Reinigung, Feuerlöscher, sonstiges	81.547,45	81.547,45	26,43
<b>Summe KG 300</b>	<b>3.425.089,31</b>	<b>3.050.905,68</b>	<b>988,63</b>
<b>Nettogrundfläche NGF: 3085,99 m²</b>			

**Tabelle II-3: Kostenzusammenstellung für KG 400**

Gewerk KG 400	Nettokosten [€]	Nettokosten ohne innovative Maßnahmen [€]	flächenbezogene Nettokosten ohne innovative Maßnahmen [€/m² NGF]
Sanitär/Lüftung	315.126,05	299.766,39	97,14
Erdwärmetauscher/Fernwärme	229.704,27	194.410,15	63,00
Starkstrom	230.158,07	167.586,27	54,31
Schwachstrom	98.428,48	98.428,48	31,90
Solaranlage	41.179,33	41.179,33	13,34
Salzspeicher	38.001,68	0,00	0,00
Windkraftanlage	10.979,72	0,00	0,00
Elektromobile	21.008,40	0,00	0,00
Wetterstation	9.210,00	0,00	0,00
Photovoltaikanlage	146.103,36	146.103,36	47,34
<b>Summe KG 400</b>	<b>1.139.899,36</b>	<b>947.473,97</b>	<b>307,02</b>
<b>Nettogrundfläche NGF: 3085,99 m²</b>			

## II.1.2 Gebäude, Nutzung und Ausstattung

### Lage

Die St. Franziskus-Grundschule befindet sich in der Hallenser Südstadt an der Murmansker Straße 13. Das Grundstück erstreckt sich über ein Areal von 27.165 m<sup>2</sup>, welches im weiteren Verlauf noch mit der Turnhalle und der Sekundarschule bebaut werden soll. Auf der gegenüberliegenden Straßenseite befindet sich das Elisabeth-Gymnasium in gleicher Trägerschaft.

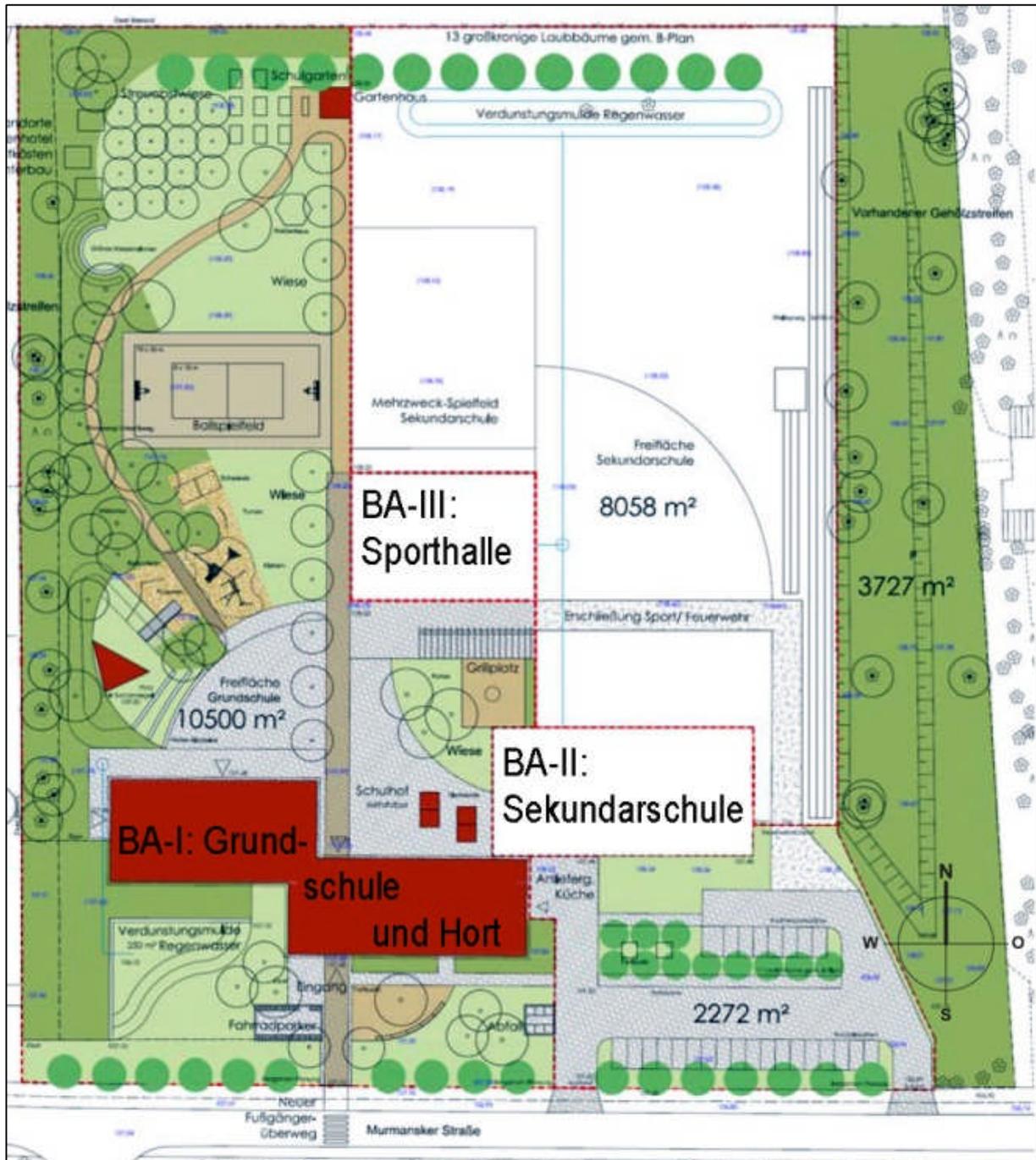


Abbildung II-1: Lageplan [37]

## Baubeschreibung

Das nicht unterkellerte, kompakte Schulgebäude (siehe Abbildung II-2) verfügt über drei Geschosse mit einer Nettogrundfläche von 3085,99 m<sup>2</sup>. Es handelt sich um zwei zueinander versetzte fast gleich große Quader – den westlich gelegenen Klassen- und Horttrakt (Gebäudeteil B, links im Bild mit rötlicher Fassadengestaltung) sowie den Verwaltungstrakt im östlichen Gebäudebereich (Gebäudeteil A, rechts im Bild mit gelblicher Fassadengestaltung) mit Hausmeisterwohnung (113 m<sup>3</sup>) und Schulküche (82 m<sup>2</sup>).



**Abbildung II-2: Visualisierung. Links: Klassenbereich, Rechts: Eingang Verwaltungsteil**

Die gesamte thermische Hülle ist als Holzrahmenbau erstellt worden. Lediglich die beiden innenliegenden, notwendigen Treppenhauskerne sind in Stahlbeton errichtet worden. Hauptsächlich kamen doppelflügelige Kastenfenster des gleichen Typs zum Einsatz. Lediglich im Eingangsbereich und der Aula gibt es eine Pfosten-Riegel-Fassade, in die sich die Solarkollektorfassade optisch gut einfügt.

Der Heizwärmebedarf der Grundschule ist aufgrund der Passivhausbauweise sehr gering. Der verbleibende Energiebedarf wird durch die Anbindung an den Fernwärmerücklauf des gegenüberliegenden Gymnasiums gedeckt. Die für Passivhäuser obligatorischen Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung – getrennte Systeme für die verschiedenen Nutzungszonen – versorgen das Gebäude mit Luft und Wärme. Weiterhin erzeugt die Schule ihren eigenen Strom durch zwei insgesamt 461 m<sup>2</sup> große Photovoltaikanlagen.



**Abbildung II-3: Blick auf Schulhof und Nordseite des Klassenflügels, im EG der Hort**



**Abbildung II-4:** Links: Blick von Südwesten auf Gebäudeteil B, Rechts: Blick von Südosten, Gebäudeteil A



**Abbildung II-5:** Links: Unterrichtsbereich Raum 1.02, Rechts: Blick zur Flurwand



**Abbildung II-6:** Links: Kindercafé im Hort; Rechts: Werkstatt im Hort

### **Belegung und Zeiten**

Die feierliche Eröffnung der St. Franziskus-Grundschule erfolgte am 26. Februar 2014. Die Inbetriebnahme der Schulküche konnte erst am 2. Mai 2014 stattfinden.

Die Schule ist zweizügig, das heißt, in den Klassenstufen 1 bis 4 gibt es jeweils zwei Klassen mit Klassenstärken von ca. 24 Schülern. Insgesamt hat die Schule ca. 180 bis max. 200 Schüler und darüber hinaus einen Personalstamm von 43 Lehrern, Hortpersonal und Mitarbeitern.

Der Schulunterricht beginnt um 7:30 Uhr und endet je nach Wochentag und Klassenstufe zwischen 12:15 Uhr und 13:45 Uhr. Der Hort sichert die Betreuung der Kinder zwischen 6:00 und 17:00 Uhr ab. In den Sommerferien gibt es stets eine zweiwöchige Schließzeit, in der auch der Hort und die Küche geschlossen bleiben. Ebenso in den Weihnachtsferien.

In der integrierten Schulküche wurden mit dem ersten Pächter von der Inbetriebnahme bis Juli 2017 insgesamt jährlich 61.000 Essen frisch zubereitet (täglich 300 Essen an Schultagen sowie 65 ... 100 an Ferienhorttagen). Seit 2017 ist die Küche mit dem derzeitigen Pächter eine Aufwärmküche, in der nur noch teilweise selbst gekocht wird, Ein Teil der Essen wird von Schülern der benachbarten Sekundarschule eingenommen.



Abbildung II-7: Links: das Foyer; Rechts: Aula in Gebäudeteil A

Über das Jahr betrachtet ergeben sich in Tabelle II-4 dokumentierten Anzahlen der jährlichen Nutzungstage. Das Jahr 2014 zählt nur die Tage nach dem Bezug der Schule im Februar. Als 'große Ferien' zählen die letzten 2,5 Wochen der Sommerferien. Alle anderen Ferien sind 'kleine Ferien'. Die im Mittel 127 Schließtage umfassen u. a. die ca. 104 ... 105 Wochenendtage sowie die Tage über den Jahreswechsel und 2 Wochen Sommerferien.

Tabelle II-4: Anzahl der verschiedenen Arten von Nutzungstagen

Jahr	gesamt	Schließtage	Schultage	Ferienhort		
				gesamt	große Ferien	kleine Ferien
2014	334	119	168	47	13	34
2015	365	126	188	51	13	38
2016	366	126	184	56	13	43
2017	365	125	191	49	13	36
2018	365	130	187	48	13	35
Ø	<b>365</b>	<b>127</b>	<b>188</b>	<b>51</b>	<b>13</b>	<b>38</b>

Tabelle II-5 fasst die Erkenntnisse zu Nutzungszeiten und Nutzungszahlen zusammen. Während der Wochenenden und Schließzeiten sind – bis auf die vierköpfige Familie des Hausmeisters – keine Nutzer anwesend.

Tabelle II-5: Nutzungszeiten und Nutzungszahlen

Uhrzeit	Schultag				Kleine Ferien			Große Ferien		
	Hort	Klassen	Verwaltung	Küche	Hort	Verwaltung	Küche	Hort	Verwaltung	Küche
6:00 – 6:30	30 + 3			3						
6:30 – 7:30					10 + 2			20 + 3		
7:30 – 9:00	0 + 7	190 + 10	4	3	20 + 2	3	1	35 + 7	2	2
9:00 – 12:00	0 + 11				35 + 5			70 + 10		
12:00 – 15:00	120 + 11		10							
15:00 – 16:00	30 + 11			20 + 2				35 + 7		
16:00 – 16:30	30 + 3		4					20 + 3		
16:00 – 17:00										

## Flächen und Volumina

Einen Überblick über die Flächen und Volumina gibt folgende Tabelle II-6.

**Tabelle II-6: Flächen und Volumina**

	Erläuterung	Wert	
		gesamt	beheizt
		incl. der thermisch nicht aktiv konditionierten Treppenhäuser/Aufzugschächte PHPP	ohne die thermisch nicht aktiv konditionierten Treppenhäuser/Aufzugschächte EnEV
<b>Grundflächen</b>			
Bruttogrundfläche $A_{BGF}$	Außenmaße	3.737,78 m <sup>2</sup>	3.587,03 m <sup>2</sup>
Nettogrundfläche $A_{NGF}$	lichte Innenmaße; Bezugsfläche für DIN V 18599	3.085,99 m <sup>2</sup>	2.962,95 m <sup>2</sup>
Energiebezugsfläche $A_{EB}$	lichte Innenmaße; Flächen teilweise mit Faktoren nach unten korrigiert aufgrund geringerer Nutzungsintensität; Bezugsfläche für PHPP	2.615,13 m <sup>2</sup>	---
<b>Hüllflächen</b>			
Hüllfläche A	Außenmaße	4.597,28 m <sup>2</sup>	4.835,55 m <sup>2</sup>
<b>Volumina</b>			
Bruttovolumen $V_e$	Außenmaße	13.307,60 m <sup>3</sup>	12.770,83 m <sup>3</sup>
Nettovolumen V	lichte Innenmaße; Luftvolumen	9.836,90 m <sup>3</sup>	9.425,10 m <sup>3</sup>
PHPP-Nettovolumen $V_L$	lichte Innenmaße; Luftvolumen; auf Basis der Energiebezugsfläche des PHPP	8.337,03 m <sup>3</sup>	---
<b>Höhen</b>			
Geschosshöhe $h_G$	Außenmaße	3,560 m	3,560 m
Raumhöhe $h_{licht}$	lichte Innenmaße	3,188	3,181 m
<b>Kennwerte</b>			
$A/V_e$	Kompaktheitsgrad	0,345 1/m	0,379 1/m
$V/V_e$	Volumenumrechnung netto/brutto	0,739	0,738
$A_{NGF}/A_{BGF}$	Flächenumrechnung netto/brutto	0,826	0,826

Die Schule wurde detailliert als Mehrzoner bilanziert. Die Räume wurden in 11 Zonen eingruppiert, die 7 verschiedenen Nutzungsprofilen nach DIN 18599 zugeordnet wurden.

### Anmerkungen zum Entwurf

Bei der St. Franziskus-Grundschule handelt es sich um einen kompakten Baukörper mit einem sehr guten Verhältnis von Hüllfläche zu umbautem Volumen mit  $A/V_e = 0,345 \text{ m}^{-1}$ , was aus energetischer Sicht sehr positiv ist.

Die Spiegelung der Klassenräume führt nicht zu Problemen aufgrund des unterschiedlichen Lichteinfalls, da die Arbeitstische der Kinder in vielen Räumen als Inseln anstelle der Frontalbestuhlung aufgestellt sind. Jedoch wurde von den Lehrern bemängelt, dass die Position des Lehrertisches aufgrund der Verkabelung über den Fußboden nicht flexibel ist. Die Tische dürfen zwar gedreht, jedoch nicht verrückt werden. Dies fällt insbesondere dann ins Gewicht, wenn auf dem Laptopbildschirm der Lehrerin eine Spiegelung auftritt.

Aufgrund der Temperaturunterschiede zwischen nord- und südorientierten Räumen wäre es günstiger gewesen, den südorientierten Bewegungsraum im Hort nach Norden auszurichten und stattdessen den Kreativraum 0.01 auf der Südseite anzuordnen. Dies würde besser zu den Aktivitätsgraden der Kinder passen.

Die Hausanschluss- und Abstellräume (insbesondere 0.18) sind hinsichtlich ihrer Grundfläche extrem knapp bemessen. Der Aufstellraum u. a. des Solarpufferspeichers 0.33b wurde von der Küchenfläche abgezweigt, es entfielen Flächen für Tellerwagen, Geschirr und die Warmhaltetechnik, wofür nun das Stuhllager 0.30 genutzt wird. Hier befindet sich jedoch auch die Küchenlüftungs- und Kältetechnik. Dadurch fehlt wiederum Stellfläche für Tische und Stühle. Diese sind zeitweilig im hinteren Bereich des Flurs 0.19 zwischengelagert, der im nächsten Bauabschnitt als Durchgang zur Sekundarschule dienen soll. In Folgeprojekten mit ähnlich umfangreicher Technikausstattung sollte für die Komponenten mehr Platz eingeplant werden.

Der Elektroanschluss- und Serverraum wird insgesamt gekühlt. Eine energetische Verbesserung wäre gegeben, wenn nur der Server gekühlt würde. Es wird im jetzigen Konzept auch Wärme abgeführt, die ohne Probleme im Gebäude hätte verbleiben können (Standby-Verlust der Sicherungsanlagen usw.)

Die Lüftungszentralen sind ansonsten ausreichend groß bemessen.

Insbesondere im Nachmittagsbetrieb steht recht häufig die hintere Hauseingangstür zum Schulhof offen. Einen Windfang gibt es an dieser Stelle nicht, was dazu führt, dass der Gebäudeteil A über längere Zeit mit der Außenluft verbunden ist. Aus energetischer Sicht ist dies ungünstig.

Für die Lehrer gibt es insgesamt 5 Vorbereitungs- und Lehrmittelräume (je 20 ... 27 m<sup>2</sup>), dezentral/verstreut im Gebäude in den beiden Obergeschossen angeordnet. Es ist kein Raum vorhanden, in den das gesamte Kollegium passt, so dass für Versammlungen der Kunstraum verwendet wird. Aus energetischer Sicht – und nach Ansicht der Berichtverfasser auch aus konzeptioneller – wäre ein größerer Lehrerraum an zentraler Stelle günstiger.

Die Anordnung der Kühlzellen im Gebäudeinneren – und insbesondere neben dem sehr warmen Stuhllager – ist energetisch ungünstiger als an einer Außenecke, weil die mittleren Grenztemperaturen der Nebenräume höher sind (hier ca. 18 ... 25°C) als im Jahresmittel nach außen (8 ... 10°C).

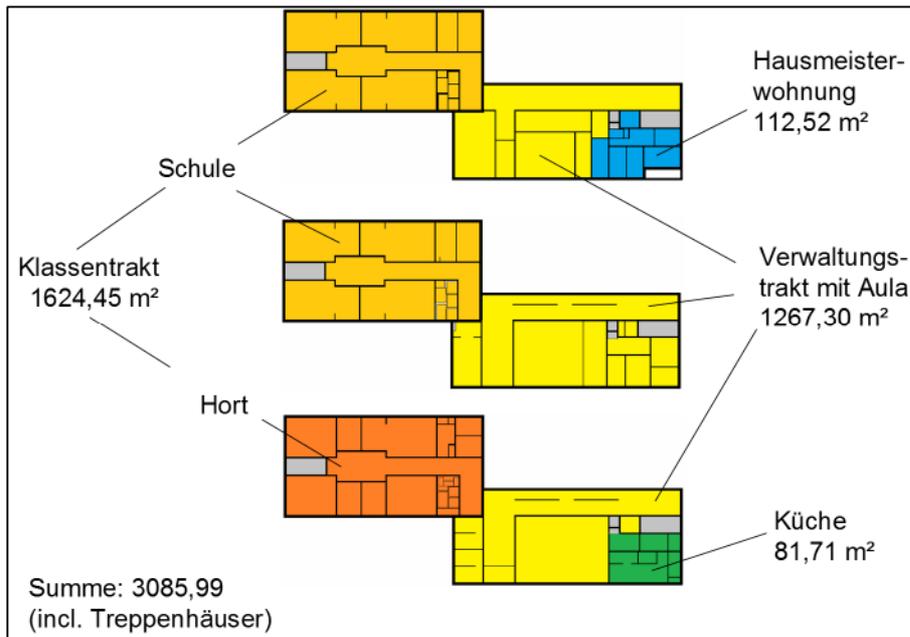
### **Elektrogeräteausstattung und Küchennutzung**

Im Zuge einer raumweisen Begehung des gesamten Gebäudes wurden alle elektrischen Geräte erfasst und über Typenschilder und weitere Recherchen die technischen Daten erhoben.

Weitere allgemeine Informationen zum Gebäude sind **Abschlussbericht Teil 2** zu entnehmen.

### **II.1.3 Bilanzen**

Das Gebäude wird bei der Angabe überwiegend geteilt in die drei Bereiche: Hausmeisterwohnung (blau), Küche (grün) sowie Schule mit Hort und Verwaltung (Restflächen, gelb/orange).

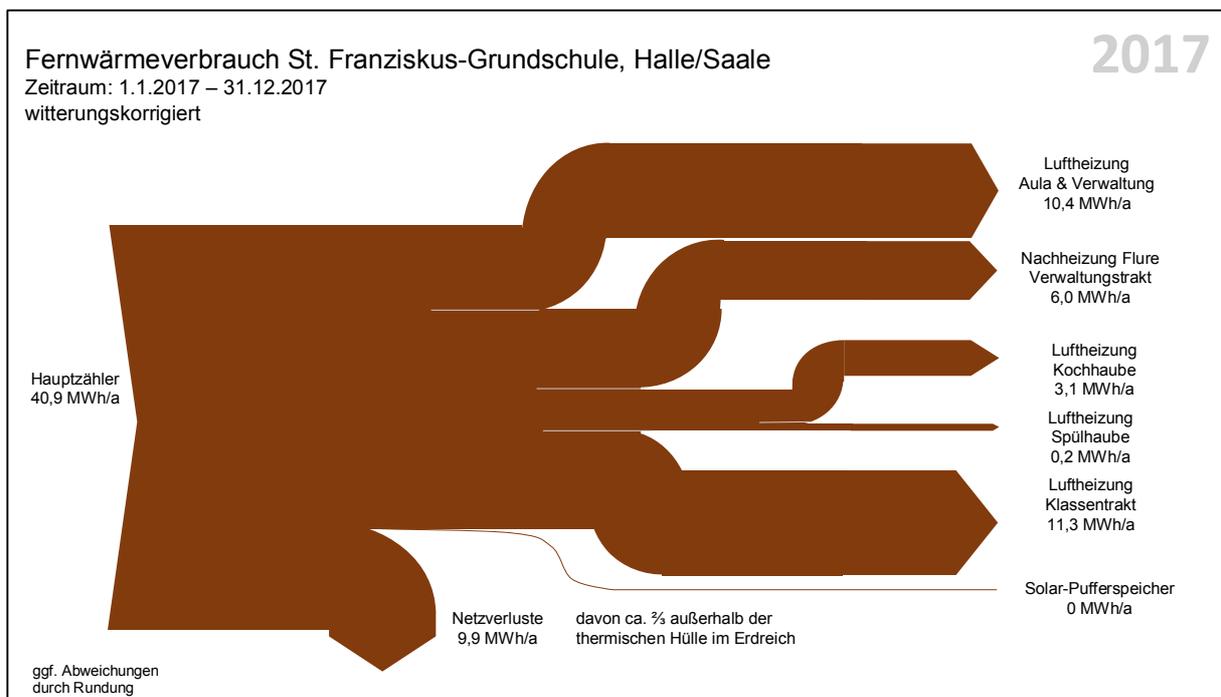


**Abbildung II-8: Flächensummenplan NGF zur Kennwertbildung**

### Fernwärmeverbrauch

Die Fernwärme versorgt in dem Gebäude im Wesentlichen die Luftheizanlagen. Ein Beitrag zur Trinkwassererwärmung durch Nachheizung des Solar-Pufferspeichers ist entgegen der ursprünglichen Planung nicht gegeben. Abbildung II-9 zeigt beispielhaft den Energiefluss für die Fernwärme für das Jahr 2017.

Hauptabnehmer ist die Luftheizanlage für die Aula & Verwaltung mit Nachheizung für die Flure mit einem jährlichen Anteil von in Summe ca. 40 % des Gesamtverbrauchs. Auf die Küche entfallen knapp 10 %. Der Klassentrakt verbraucht etwas mehr als 25 %. Das restliche Viertel sind Verluste über das Rohrnetz (im Erdreich und im Gebäude).



**Abbildung II-9: Sankeydiagramm witterungskorrigierter Fernwärmeverbrauch 2017**

Es ergeben sich als Mittelwerte der drei Monitoringjahre 2015 bis 2017 Verbrauchskennwerte von 11,3 kWh/(m²a) bezogen auf die Gesamtfläche (3085,99 m²) bzw. bezogen auf die Fläche mit Fernwärmeversorgung (2973,47 m²) 11,7 kWh/(m²a).

Die VDI 3807 gibt Vergleichskennwerte an [38]. Der Mittelwert für den Heizenergieverbrauch von Grundschulen liegt bei 123 kWh/(m²a), ein Richtwert für Modernisierungen bei 73 kWh/(m²a). Die St. Franziskus-Grundschule schneidet im Bereich Wärme somit sehr gut ab. Der gemessene Verbrauchskennwert liegt unter 10 % des Wertes einer mittleren deutschen Grundschule.

## Stromverbrauch

Ein Stromverbrauch ist in allen Zonen gegeben, in der Hausmeisterwohnung wird er auch zum Heizen genutzt. Abbildung II-10 zeigt exemplarisch das Energieflussbild für 2017.

Der Stromverbrauch für das Schulgebäude beläuft sich im Mittel der Messperiode 2015 bis 2017 auf 112,1 MWh/a (incl. Haumeisterwohnung). Davon werden knapp  $\frac{2}{3}$  aus dem Netz bezogen und  $\frac{1}{3}$  selbst produziert (Autarkiegrad). Die Photovoltaik-Anlage erzielt einen jährlichen Stromertrag von 78,9 MWh/a. Die Selbstnutzungsquote des erzeugten Stroms liegt bei 52 %. Der Rest wird ins Netz zurückgespeist. Bilanzuell ergibt sich ein Nettostromverbrauch von 74,1 MWh/a (Strombezug aus dem Netz minus Rückspeisung in das Netz).

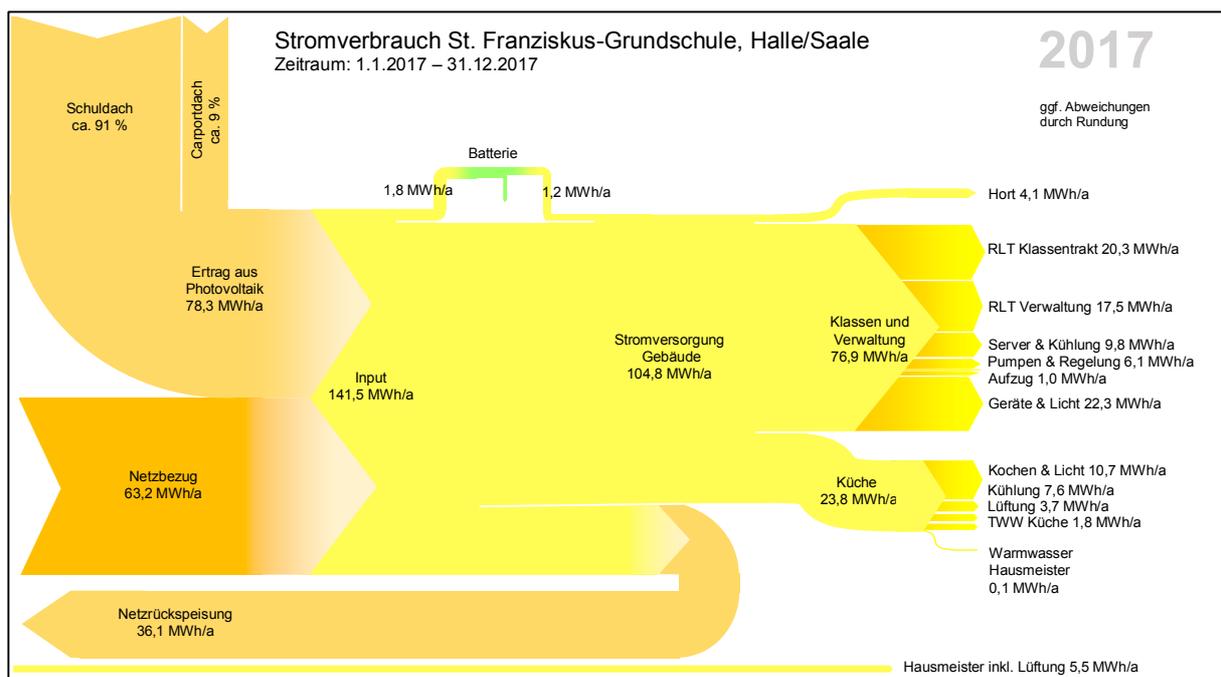


Abbildung II-10: Sankeydiagramm Stromverbrauch 2017

Hauptverbraucher ist der Klassentrakt mit etwa  $\frac{2}{3}$  des Verbrauchs. Die Schulküche verbraucht etwa 25 %, der Hausmeister in seiner Wohnung 5 %, der Hort liegt als kleinste Nutzungseinheit bei 4 %.

Hauptverbraucher ist der Klassentrakt mit etwa  $\frac{2}{3}$  des Verbrauchs. Die Schulküche verbraucht etwa 25 %, der Hausmeister in seiner Wohnung 5 %, der Hort liegt als kleinste Nutzungseinheit bei 4 %.

Es ergibt sich folgender Verbrauchskennwert ohne Berücksichtigung der Eigenproduktion als Mittelwert der Jahre 2015 bis 2017: 36,3 kWh/(m<sup>2</sup>a) (bezogen auf die Gesamtfläche 3085,99 m<sup>2</sup>). Wird die PV-Produktion abgezogen und voll gegen den Verbrauch angerechnet, ergibt sich bezogen auf die Gesamtfläche ein Kennwert von 10,8 kWh/(m<sup>2</sup>a).

Die VDI 3807 gibt Vergleichskennwerte an [38]. Der Mittelwert für den Stromverbrauch von Grundschulen liegt bei 10 kWh/(m<sup>2</sup>a), ein Richtwert für Modernisierungen bei 6 kWh/(m<sup>2</sup>a).

Die St. Franziskus-Grundschule schneidet im Bereich Strom – je nach Betrachtung – durchschnittlich bis schlecht ab. Der bilanzielle Kennwert (Verbrauch minus Produktion) ist vergleichbar mit dem durchschnittlichen Bestand.

Der eigentliche Verbrauch ist mehr als 3 Mal so hoch und ergibt sich aus der nicht durchschnittlichen Ausstattung mit Lüftungstechnik, Server, Küche etc. Mit einer weiteren Lüftungs-optimierung werden ab 2019 noch weitere Stromersparungen erwartet.

## Wasserverbrauch

Abbildung II-11 zeigt exemplarisch für die gesamte Monitoringphase das Flussbild für Wasser für 2017. Der Wasserverbrauch des gesamten Gebäudes beläuft sich auf 817 m<sup>3</sup>/a, wovon 75 % als Trinkwasser gekauft werden und 25 % als Regenwasser aufgefangen und als Brauchwasser für die WC-Anlagen genutzt werden.

Es ergibt sich bezogen auf die gesamte Nettogrundfläche (3085,99 m<sup>2</sup>) als Mittelwert der drei Jahre 2015 bis 2017 ein Verbrauchskennwert von 265 l/(m<sup>2</sup>a). Klammert man das Regenwasser aus, sinkt der Kennwert auf 197 l/(m<sup>2</sup>a). Ohne Küche und Hausmeisterwohnung liegt der Verbrauchskennwert bei 158 l/(m<sup>2</sup>a).

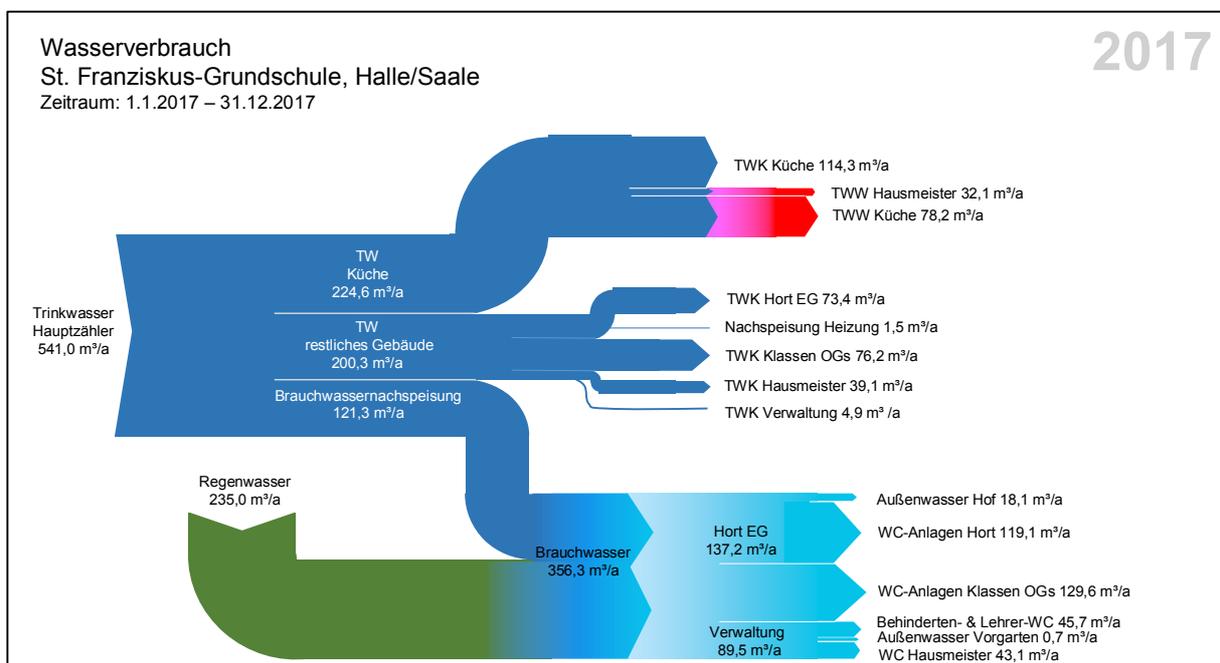


Abbildung II-11: Sankeydiagramm Wasserverbrauch 2017

Die VDI 3807 gibt Vergleichskennwerte an [38]. Der Mittelwert für den Wasserverbrauch von Grundschulen liegt bei 140 l/(m<sup>2</sup>a), ein Richtwert für Modernisierungen bei 81 l/(m<sup>2</sup>a). Die St. Franziskus-Grundschule schneidet im Bereich Wasser – je nach Betrachtung – durchschnittlich bis mittelmäßig ab.

Es wird davon ausgegangen, dass einerseits die Küche eine überdurchschnittliche Ausstattung für eine Schule ist, andererseits in Halle gleichzeitig eine überdurchschnittliche Nutzungsintensität (Hort, Ferienbetreuung) vorliegt. Es ist also nicht verwunderlich, dass der Wasserverbrauch bei fast dem Doppelten des Durchschnitts liegt. Auch der Wasserbezug vom Versorger liegt noch 40 % über dem Schnitt. Erst nach Bereinigung um Hausmeisterwohnung und Küche ergibt sich ein fast durchschnittlicher Wasserverbrauch des Schulgebäudes.

In der Hausmeisterwohnung wird personenbezogen mit 77 l/(Person · d) sehr wenig Wasser verbraucht.

### Bedarf nach Passivhausprojektierung

Während der Projektlaufzeit wurde der Passivhausnachweis 2011 erstmalig erstellt und anschließend mehrfach aktualisiert. Die letzte Aktualisierung erfolgte am Ende der Monitoringphase 2018. Es kann festgestellt werden, dass die St. Franziskus-Grundschule in allen energetischen Bewertungskriterien dem Passivhausstandard entspricht, siehe Abbildung II-12.

Es hat nach Wunsch der Bauherrin aber keine Zertifizierung des Gebäudes durch das Passivhaus Institut Darmstadt stattgefunden. Man entschied sich für ein Passivhaus-Zertifikat des Niedrig-Energie-Instituts Detmold.

Zusammenfassend ist als Fazit der PHPP-Bilanzierung festzuhalten, dass insbesondere die Mischnutzung aus Wohn- und Nichtwohnbau die Berechnung unübersichtlicher machte. Auch einzelne Kennwerte der Wohnbauberechnung erwiesen sich als unpassend für eine Bilanzierung im Nichtwohnungsbau, z. B. zur Bewertung der Schulküche.

Baujahr:	2014	Innentemperatur:	20,0 °C
Zahl WE:	1	Interne Wärmequellen:	3,5 W/m <sup>2</sup>
Umbautes Vol. V <sub>e</sub> :	13307,6 m <sup>3</sup>	mittlere Geschosshöhe:	3,56 m
Personenzahl:	234,0		

Gebäudekennwerte mit Bezug auf Energiebezugsfläche und Jahr		verwendet: Monatsverfahren	
	Energiebezugsfläche	2615,1 m <sup>2</sup>	
<b>Heizen</b>	Heizwärmebedarf	7,5 kWh/(m <sup>2</sup> a)	15 kWh/(m <sup>2</sup> a) ja
	Heizlast	9,6 W/m <sup>2</sup>	10 W/m <sup>2</sup> ja
<b>Kühlen</b>	Kühlbedarf gesamt	kWh/(m <sup>2</sup> a)	-
	Kühllast	W/m <sup>2</sup>	-
	Übertemperaturhäufigkeit (> 25 °C)	0,0 %	-
<b>Primärenergie</b>	Heizen, Kühlen, Entfeuchten, WW, Hilfs- und Haushaltsstrom	113 kWh/(m <sup>2</sup> a)	120 kWh/(m <sup>2</sup> a) ja
	WW, Heizung und Hilfsstrom	48 kWh/(m <sup>2</sup> a)	-
	PE-Einsparung durch solar erzeugten Strom	58 kWh/(m <sup>2</sup> a)	-
<b>Luftdichtheit</b>	Drucktest-Luftwechsel n <sub>50</sub>	0,26 1/h	0,6 1/h ja

\* leeres Feld: Daten fehlen; '!': keine Anforderung

<b>Passivhaus?</b>	ja
--------------------	----

Abbildung II-12: Passivhausnachweis 2018

Die Freiheitsgrade bei der Berechnung sind sehr groß, so dass das Endergebnis sehr beliebig werden kann. Der Umfang der zu bilanzierenden elektrischen Geräte in einer Schule ist nicht eindeutig – zumal davon das Endergebnis entscheidend abhängt (Stichwort: Stromverbrauch für Regenwassernutzung, Sicherheitstechnik, Aufzug). Zudem ergeben sich aufgrund von Teilbenutzungsfaktoren (Beleuchtung, Lüftung, Geräte) sehr starke Varianzen beim Endergebnis.

Die finale Berechnung nach dem PHPP ergibt einen Fernwärmebedarf von 28,0 MWh/a sowie 111,3 MWh/a für Strom (ohne Berücksichtigung von Eigenstromerzeugung).

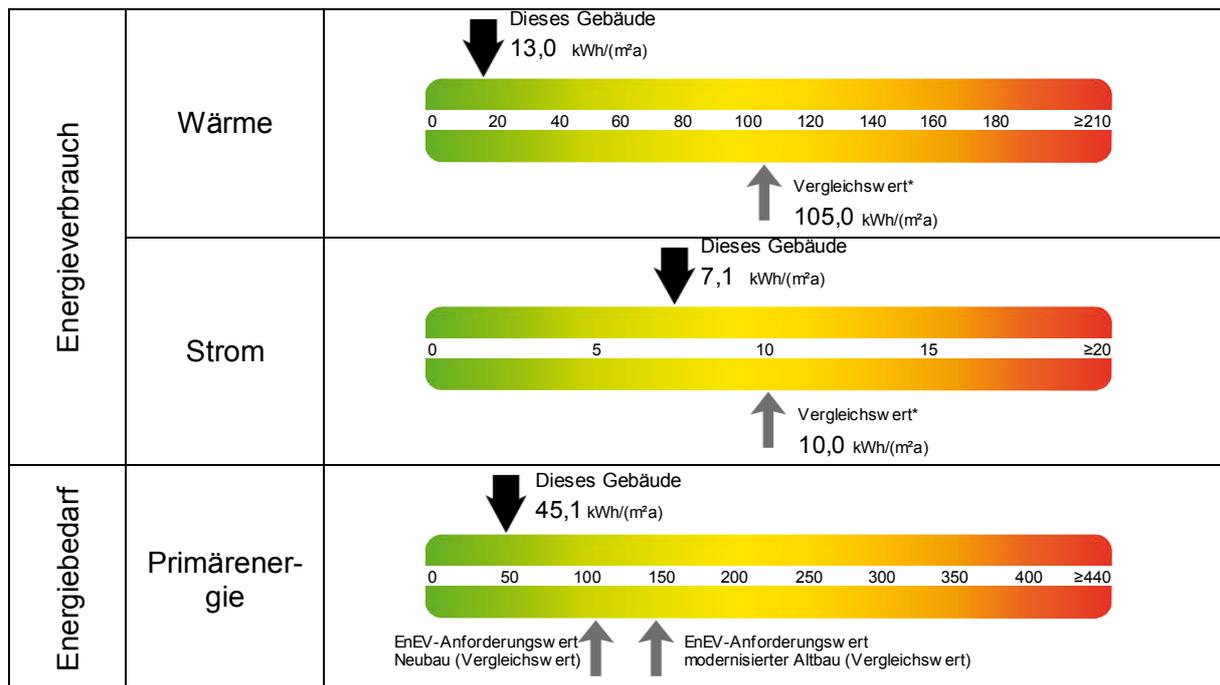
Der errechnete Fernwärmebedarf liegt bei nur 70 % des Messwertes von 39,4 MWh/a. Die Differenz wird kleiner, wenn eine entsprechend realistischere Innentemperatur von z. B. 23°C angesetzt wird (Bedarf dann 38,6 MWh/a). Der Stromkennwert ist fast eine Punktlandung – der Verbrauch beträgt 112,0 MWh/a. Die Randdaten der Bedarfsberechnung 2018 wurden möglichst realistisch gewählt, so dass dieses Ergebnis nicht überrascht.

### Bedarf nach DIN V 18599

Die St. Franziskus-Grundschule wurde ebenfalls mehrfach nach der DIN V 18599 bewertet. Einerseits liegt der energetische Nachweis aus dem Bauantrag vor. Er wurde erneut nach Fertigstellung und bei Projektende erstellt. Darüber hinaus wurden Variantenberechnungen durchgeführt, um beispielsweise die Auswirkungen detaillierter oder vereinfachter Datenerhebung zu testen.

Es ist festzustellen, dass das Gebäude die EnEV 2009 einhält, die aufgrund des Bauantrags offiziell gilt. Auch die bei Projektende geltende EnEV 2016 wird immer noch deutlich erfüllt. Die Ergebnisse der Energiebedarfsberechnung sowie der Verbrauchseinschätzung des EnEV-Energieausweises 2018 zeigt Abbildung II-13.

Die Randdaten der EnEV-Bedarfsberechnung 2018 führen zu einem Fernwärmebedarf von 80,2 MWh/a sowie einem Strombedarf von 122,8 MWh/a (ohne Eigennutzung von PV-Strom).



**Abbildung II-13: Ergebnisse des Energieausweises 2018**

Der tatsächliche Fernwärmeverbrauch von 39,4 MWh/a wird um den Faktor 2 deutlich überschätzt. Die Detailuntersuchung zeigt, dass die Luftheizung insbesondere in der Küche (hoher Luftwechsel) sowie den Verkehrsflächen falsch berechnet wird. Sie liefert rechnerisch teils deutlich mehr Wärme an das Gebäude als es dem Heizwärmebedarf entspricht. Es ist dies eine Schwäche des Bilanzansatzes bei Gebäuden mit sehr gutem Standard, aber hoher Nutzungsintensität.

Hinsichtlich des Strombedarfs ergibt sich ein ähnliches Bild. Der bilanzierte Strombedarf ohne Berücksichtigung der PV-Produktion liegt in etwa bei dem Verbrauchswert von 112,0 MWh/a. Allerdings bilanziert die Norm keinen Anwendungsstrom (PCs, Medientechnik, Kühlschränke usw.), sondern nur TGA-Strom (Beleuchtung, Ventilatoren, Pumpen). Anhand der Detailauswertung der Strombilanz ergibt sich ein Anteil des gemessenen Stroms von ca. 72 MWh/a für die Verbraucher, welche in der DIN V 18599 bilanziert werden. Damit liegt der Bilanzwert um etwa den Faktor 1,7 über dem Messwert.

Die Erkenntnisse werden in die Normung zurückgespeist.

### **Fazit zum "Nullenergiestandard"**

Eine einheitliche Definition des "Nullenergiestandards" gibt es nicht. Die Fachliteratur schwankt zwischen Betrachtungen von End- oder Primärenergie und ist sich ebenso uneinig, ob alle Stromverbraucher in die Betrachtung einbezogen werden oder der Nutzerstromverbrauch ausgeklammert wird.

Für die St. Franziskus-Grundschule sind folgende relevante Verbrauchskennwerte für die Endenergie gegeben, welche in Primärenergie umgerechnet werden können:

- |                     |   |                      |   |
|---------------------|---|----------------------|---|
| 1. Stromproduktion: | $q_E = 25,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ | → mit $f_P = 1,8$ :  | $q_P = 45,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ |
| 2. Fernwärme        | $q_E = 11,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ | → mit $f_P = 0,21$ : | $q_P = 2,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  |
| 3. Stromverbrauch   | $q_E = 36,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ | → mit $f_P = 1,8$ :  | $q_P = 65,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ |
| 4. Strom für TGA    | $q_E = 22,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ | → mit $f_P = 1,8$ :  | $q_P = 41,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ |

Der gemessene Gesamtstromverbrauch wurde anhand der Strombedarfsbilanz aufgeteilt. Etwa 63 % des Stromeinsatzes fällt auf Anwendungen der Heizung, Lüftung, Beleuchtung, Trinkwassererwärmung und Kälte (siehe Abschlussbericht Teil 10).

Anhand der Verbrauchswerte lässt sich folgendes erkennen: die St. Franziskus-Grundschule erreicht den anvisierten Standard "Nullenergie" nicht, wenn auf Endenergieebene  $q_E$  bilanziert wird und alle Endenergien berücksichtigt werden (1. minus 2. + 3.). Es fehlen  $22,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  bis zur "Nullenergielinie".

Wenn ausschließlich der TGA-Strom berücksichtigt wird und zudem eine Primärenergiebilanz erfolgt ( $q_P$ ), wird der "Nullenergiestandard" erreicht. Es ergibt sich ein Überschuss von  $2,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  (1. minus 2. + 4.).

Die St. Franziskus-Grundschule liegt im guten Mittelfeld der EnEff:Schule Projekte [36].

In jedem Fall ist festzuhalten, dass der gewählte Standard – gegenüber dem üblichen Schulneubau oder gar dem Bestand – sehr energieeffizient ist. Betrachtet man die gewählten Baustoffe, gilt dieses umso mehr. Dass es Optimierungspotential v. a. im Bereich des Heizung- und Lüftungskonzeptes gibt, steht außer Frage. Eine optimale Schule könnte – mit überschaubaren Änderungen am Konzept – tatsächlich die "Nullenergie" erreichen.

### **Ökologische Baustoffbilanz**

Der Jahresenergieverbrauch bei der Gebäudenutzung ist nur ein Teil der im Lebenszyklus anfallenden Verbräuche. Darüber ergibt sich die in der Literatur oft als "graue Energie" benannte Energie für die Herstellung von Produkten, den Transport, die Lagerung und letztendlich die Entsorgung. Für die St. Franziskus-Grundschule wird im Rahmen der Ökobilanzierung nur der Herstellungsaufwand bestimmt.

Bilanziert wird das Gebäude mit den technischen Anlagen zur Energieerzeugung, -speicher und -verteilung innerhalb und außerhalb der thermischen Hülle. Die Baustoffdaten werden erhoben und mit geschätzten Lebensdauern ein anteiliger jährlicher Herstellungsaufwand ermittelt. Nicht bewertet werden aufgrund fehlender Bewertungsgrundlagen: die elektrischen Durchlauferhitzer, die Batteriespeicheranlage, die Regenwassernutzungsanlage (Zisterne und Zwischenspeicher), diverse Einbauten in die technischen Anlagen (Rauchmelder, Bewegungsmelder, Luftauslässe, Absperrarmaturen, Messfühler usw.). Darüber hinaus ist die mobile Innenausstattung (Tische, Schränke, PCs usw.) nicht Teil der Untersuchung.

Im Rahmen der Bilanzierung werden folgende Größen auf Basis der Kennwerte der ÖKOBAUDAT bestimmt:

- Sachbilanz
  - total erneuerbare Primärenergie (PERT)
  - total nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT)
  - Einsatz von Süßwasserressourcen (FW)
- Wirkungsbilanz
  - Treibhauspotenzial (GWP)
  - Ozonabbaupotenzial (ODP)
  - Versauerungspotenzial (AP)
  - Eutrophierungspotenzial (EP)
  - Photooxidantienbildungspotenzial (POCP)

Tabelle II-7 zeigt die zusammengefassten Ergebnisse. Neben der Summenbildung sind Aufteilungen nach Gewerken erfolgt.

**Tabelle II-7: Ergebnisse der Ökobilanzierung mit Gewerke- und Stoffgruppensummen**

Bauteile	Sachbilanz				Wirkungsabschätzung				
	Total Erneuerbare Primärenergie (PERT)	Total Nicht-erneuerbare Primärenergie (PENRT)	Totale Primärenergie (PE)	Einsatz von Süßwasserressourcen (FW)	Globales Erwärmungspotenzial (GWP)	Abbau Potenzial der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)	Versauerungspotenzial von Boden und Wasser (AP)	Eutrophierungspotenzial (EP)	Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon
	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[m³]	[kg CO <sub>2</sub> -Äqv]	[kg CFC11-Äqv]	[kg SO <sub>2</sub> -Äqv]	[kg Phosphat-Äqv]	[kg Ethen-Äqv]
Summe	12.018.518	15.951.925	27.970.443	341.399	68.931	0,01069	3010,8	498,9	352,2
<b>Aufteilung nach Gewerken</b>									
Fundament und Außenhülle	5.698.024	5.391.261	11.089.285	151.675	-172.931	0,00585252	888,4	141,9	96,59
Innenausbau und Treppen	3.636.135	4.032.564	7.668.700	184.635	-34.946	0,00379973	805,3	101,0	97,37
Bodenbeläge und Wandfarben	2.038.026	2.164.637	4.202.663	3.322	37.032	0,00100786	467,5	187,0	49,09
Sanitärausstattung und Solarthermie	30.220	249.369	279.589	96	17.540	0,00000171	96,3	5,7	6,42
Lüftung, Heizung und Pumpen	125.962	2.403.860	2.529.822	505	109.193	0,00000445	329,8	29,2	46,78
Elektroausstattung, Beleuchtung und PV	490.150	1.710.235	2.200.385	1.167	113.043	0,00002441	423,6	34,1	56,24

Aufgrund der installierten Massen bzw. Volumina führt die Gebäudehülle samt dem Innenausbau zum größten Energie- und Süßwasseraufwand. Bei den Wirkungsabschätzungen kehrt sich das Bild allerdings um. Das globale Erwärmungspotenzial ist bei den TGA-Anlagen aufgrund des hohen Metalleinsatzes am größten. Die Bodenbeläge und Wandfarben des Innenaufbaus haben unter den Gewerkegruppen das größte Eutrophierungspotenzial.

Die Erstellung des Gebäudes führt unter Beachtung der Lebensdauern der einzelnen Baustoffe und Bauteile zu einem gesamten Primärenergieeinsatz von 60,1 kWh/(m<sup>2</sup>a). Davon sind **35,0 kWh/(m<sup>2</sup>a)** nicht erneuerbar. Zum Vergleich: das Gebäude hat im Betrieb einen jährlichen Endenergieverbrauch von 22,1 kWh/(m<sup>2</sup>a) für Fernwärme und Strom, was einem Verbrauch an nicht erneuerbarer Primärenergie von **21,8 kWh/(m<sup>2</sup>a)** entspricht.

Im Vergleich ist festzustellen, dass der auf die Lebensdauer umgelegte Primärenergieeinsatz für die Erstellung des Gebäudes etwa 60 % oberhalb der Menge des laufenden Betriebs liegt. Wäre das Gebäude als Massivbau ohne Holz- und Zelleuloseinsatz als Massivbau erstellt worden, läge der Herstellungsaufwand noch weit deutlicher über dem des laufenden Verbrauchs.

Die Herstellung des Gebäudes ist zudem mit einem sehr großen Süßwasserverbrauch verbunden. Dabei fallen insbesondere Metalle, aber auch die Zellulosefasern als entscheidende Positionen auf. Die Bilanzierung führt zu einem auf die Zeit umgelegten Wassereinsatz von **6.646 m<sup>3</sup>/a**. Dem gegenüber steht ein Trinkwassereinsatz in der Nutzung von nur ca. **609 m<sup>3</sup>/a**. Damit ist die Nutzungsdauer für den Lebenszyklus nicht entscheidend. Dies bedeutet natürlich nicht, dass während der Nutzungszeit mit der Ressource Wasser verschwenderisch umgegangen werden soll. Jedoch zeigt es, dass die Produktionsprozesse für das Gebäude entscheidend sind.

Der Vorteil des Holzbaus sowie die Verwendung von teilweise recycelten Materialien zeigt sich am besten bei der Betrachtung der äquivalenten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Der auf die Lebensdauer umgelegten Menge aus der Gebäudeerstellung von **1,3 kg/(m<sup>2</sup>a)** stehen **7,9 kg/(m<sup>2</sup>a)** in der Nutzung gegenüber. Hier lässt sich in der Nutzungsphase noch deutliches Einsparpotential generieren, wenn der Strom ökologischer wird – egal ob Netzstrom oder selbst produzierter Strom. Darüber hinaus ist der sehr geringe Wärmeverbrauch des Gebäudes von Vorteil, am Strom könnte es noch Ersparnisse geben.

Weitere Informationen zu den Energiebilanzen sind [Abschlussbericht Teil 3](#) zu entnehmen.

## **II.1.4 Messtechnik**

### **Messziele**

Für die St. Franziskus-Grundschule in Halle umfasst das Monitoring folgende Teilaspekte:

- Auswertung der Gesamtverbräuche für Wärme, Strom, Wasser und Regenwasser sowie wichtiger Hauptverbraucher (Klassen, Hort, Hausmeister, Küche, Verwaltung),
- Untersuchen des Daches, der Nordwand und der Bodenplatte hinsichtlich erreichter Dämmwirkung, Feuchteverteilung im Bauteil und Luftdichtheit,
- Untersuchung der Kastenfenster in den verschiedenen Jahreszeiten auf erreichte Nutzung von Solarwärme bzw. Schutz vor Überhitzung,
- Untersuchung der Solarwand auf mögliche Überwärmung des jeweils hinterliegenden Innenraums, d. h. Aula und Raum der Stille,
- Untersuchung von zwei baugleichen Kinderzimmern in der Hausmeisterwohnung, wobei eines mit PCM-Deckenplatten (phase change material) ausgestattet ist, welche die sommerliche Überwärmung verzögern sollen,
- Untersuchungen des Stromverbrauchs für Zusatzaggregate, z. B. der Pumpen,
- Untersuchungen von großen Stromverbrauchern, z. B. des Aufzugs, der Serveranlage mit Kühlung, der Küche mit Kühlzellen, der Beleuchtung, der Ventilatoren.

- Untersuchungen zu Erträgen und Effizienz des Windrades und der Photovoltaik,
- Untersuchungen zur Batterieanlage, deren Regelung und des Lastmanagements,
- Untersuchungen zur Solarthermieanlage auf erreichte Erträge, der Speicher auf Wärmeverluste sowie der zugehörigen Regelung der Nachheizung an solarmarmen Tagen,
- Untersuchung des Erdwärmetauschers auf erreichte Lufttemperaturänderungen,
- Untersuchungen zur Regelung der beiden Hauptlüftungsanlagen in allen Jahreszeiten, insbesondere die winterliche Frühaufheizung und die sommerliche Nachtlüftung,
- Untersuchungen der erreichten Wärmerückgewinnung sowie bei den Hauptlüftungsanlagen auch der erreichten Feuchterückgewinnung sowie der Nachheizung per Fernwärme,
- Untersuchungen zur Regenwassernutzungsanlage incl. deren Dimensionierung,
- Untersuchungen des Nutzerverhaltens im Umgang mit der Beleuchtung, Verschattung, der Kastenfenster sowie Nutzung elektrischer Geräte,
- Untersuchungen zum Raumklima mit den Parametern Temperatur, Feuchte, CO<sub>2</sub> auf Einhaltung der Grenzwerte sowie Überschreitungshäufigkeiten bei Nichteinhaltung.

Die Monitoring-Ziele müssen bekannt sein, bevor die Ausschreibungen der anderen Gewerke erfolgen, so dass insbesondere die Gewerke für Rohbau und Ausbau frühzeitig entsprechende Kenntnis haben.

### Erfasste Messgrößen und technische Ausstattung mit Sensoren

Insgesamt ergab sich für das Projekt eine Messtechnikdatenbank mit 715 Messpunkten. Der projektbezogen aufgebauten Messtechnik der Fa. GEDES entstammen 404 Messpunkte. Aus dem Regelungsmodul der Solarthermie stellt die Fa. SETSOLAR weitere 33 Messpunkte zur Verfügung. Der internen Regelung der beiden Hauptlüftungsanlagen von Fa. MENERGA werden 232 Messpunkte entnommen. Für die Photovoltaik liefert SMA 9 Werte. Die Stadtwerke Halle liefern 3 Datenpunkte.

**Tabelle II-8: Erfasste Messgrößen**

Messgröße	Einheit	typischer Anwendungsfall	Anzahl
Temperatur	°C	diverse Medientemperaturen	204
Anteilswerte	%	relative Baustoff- und Luftfeuchten, Zustand von Regelventilen, Frequenzumrichtern Volumenstromreglern und Klappen	164
Elektrische Leistung	kW	phasenweise Erfassung der Elektroverbraucher	100
Stromstärke	A	phasenweise Erfassung der Elektroverbraucher	79
Druckdifferenz	Pa	Druckerhöhungen der Ventilatoren in den zentralen Lüftungsanlagen, Druckverluste von Filtern, Differenzdrücke am Anlagenschlechtpunkt	45
Energiemenge	kWh, MWh	Energieverbrauchsähler für Strom und Wärme für Haupt- und Nebenverbraucher	27
Betriebszustände	bits	Öffnungszustände von Fenstern über Kontaktmessung	21
Meldungen	-	Wartungs-, Störmeldungen der Lüftungsanlagen	20
Schaltzustände	0/1	Schalt- und Betriebszustände von Pumpen und Nachheizpatronen	14
Durchfluss	m <sup>3</sup> /h, l/h	Volumenströme der zentralen Lüftungsanlagen, Durchflüsse Solarfluid	13
Wassermenge	m <sup>3</sup>	Wasserzähler für Regenwasser, Kalt- und Warmtrinkwasser für Haupt- und Nebenverbraucher	13
Konzentration	ppm	CO <sub>2</sub> -Menge in Referenzklassenräumen und Aula	9
Leistungsdichte	W/m <sup>2</sup>	Solarstrahlung	2
Himmelsrichtung	°	Windrichtung	1
Geschwindigkeit	km/h	Windgeschwindigkeit	1
Druck	kPa	Luftdruck	1
Niederschlagshöhe	mm/h	Regenmenge	1

Aus allen vorgenannten Werten wurden 34 virtuelle Zähler angelegt. Tabelle II-8 gibt einen Überblick über erfasste Größen.

Die Kosten der Messtechnik betragen insgesamt knapp 78.000 € (brutto). Davon waren anteilig zu verzeichnen: 39 % für Sensoren, 35 % für die Übertragungstechnik, 33 % für die Montage sowie 11 % für Datenhaltung und Servernutzung.

Die Sensoren sowie die gesamte Übertragungstechnik entstammt der Produktfamilie 'simLine' des ausführenden Messtechnikunternehmens GEDES. Es handelt sich dabei um ein Komplettsystem zur Datenerfassung. Alle Bauteile werden auf Standard-Hutschienen (35 x 5 mm) in der Elektroverteilung aufgesteckt. Die Datenkommunikation erfolgt über ein Bussystem oder auch über Ethernet. Die Verkabelung in einem Schaltkasten besteht i. d. R. aus einem Datenerfassungsmodul für Sensorauswertung und ggf. -steuerung (simControl5), einem Modul für die Spannungsversorgung (simPower) und einem Modul für die Datenspeicherung per Speicherkarte oder als Netzwerkanbindung (simEthernet). In das System können auch bauseits vorhandene Zähler per Impuls- oder Datenschnittstelle integriert werden.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die räumliche Anordnung der Messtechnik. In den entsprechenden Räumen befinden sich Schaltkästen (separat installiert oder in der Elektroverteilung mit untergebracht), in denen die Messtechnik gebündelt wird.

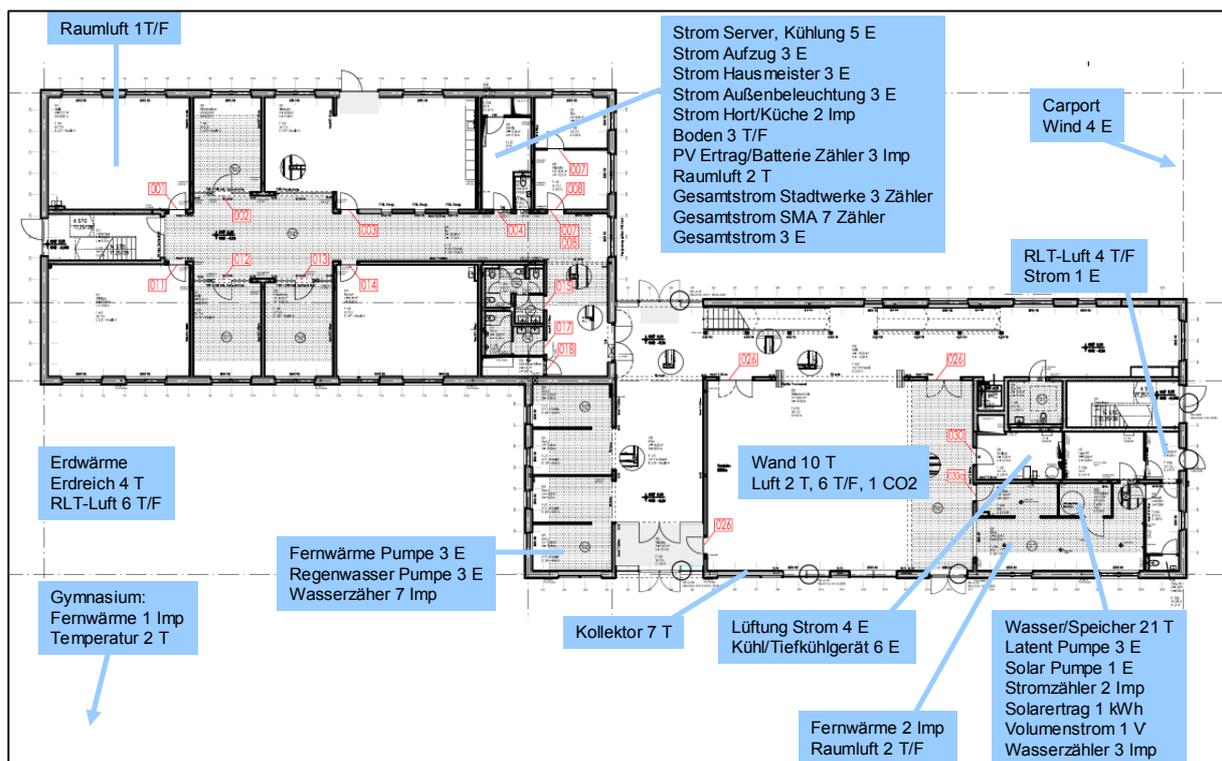
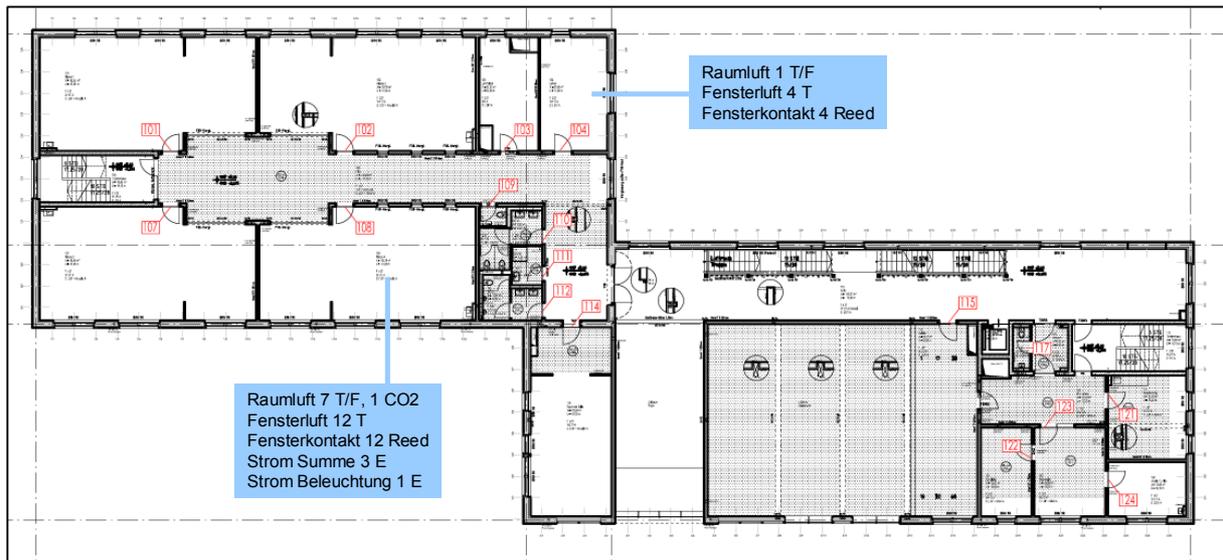
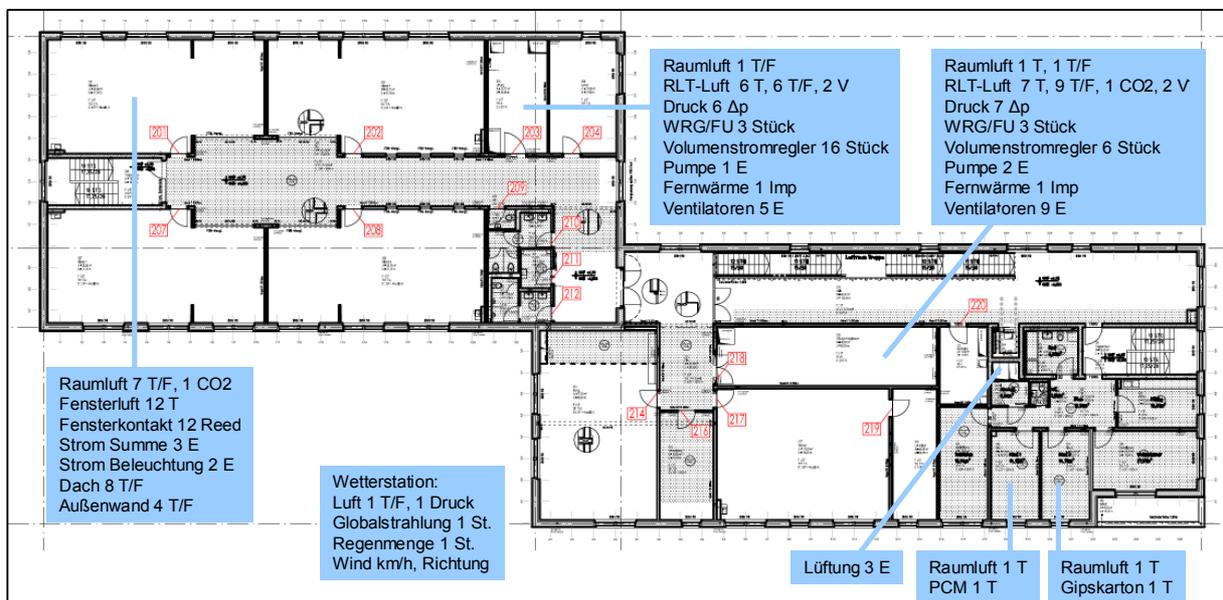


Abbildung II-14: Anordnung der Messtechnik im Erdgeschoss



**Abbildung II-15: Anordnung der Messtechnik im 1. Obergeschoss**



**Abbildung II-16: Anordnung der Messtechnik im 2. Obergeschoss**

Aus dem Systemaufbau für die St. Franziskus-Grundschule ergeben sich folgende Erkenntnisse für ähnliche Projekte:

- Die Impuls-Aufschaltung von Wärme-, Strom- und Wasserzählern führt zu guten Ergebnissen; die manuell zusätzlich möglichen Ablesungen sichern die Datenlage deutlich ab, so dass diese Ausstattung Selbstbau- und Eigenlösungen vorzuziehen ist – jeweils für die Messorte, an denen ohnehin Zwischenzähler vorgesehen sind.
- Insbesondere bei der Auswahl von Wärmemengenzählern ist darauf zu achten, dass Datenschnittstellen vorhanden sind.
- Bei Komponenten und Anlagen, bei denen die Richtung des Stromflusses unklar ist (Windkraft, Photovoltaik) sind Messgeräte zu verwenden, mit denen dies eindeutig festgestellt werden kann; richtungsunabhängige Stromflussmessungen sind nicht zielführend.
- Bei den Stromflussmessungen ist zu beachten, dass keine Separierung in Wirk- und Blindleistung erfolgen kann; zudem erfolgt eine Beeinflussung der Messung durch elektromagnetische Felder im Umfeld des Sensors, die zu Datensprüngen und -ausfällen führen kann.
- Bei der Kostenkalkulation ist zu berücksichtigen, dass Fühler im Erdreich oder in Konstruktionen nicht zugänglich sind und daher – auf der sicheren Seite liegend – doppelt angeschafft werden.

- Frühzeitig ist zu klären, welche Kompakt-Aggregate, Regelung, Zentralgeräte ohnehin ein Monitoring aufweisen, welche Werte dabei erfasst werden, welches Datenformat vorliegt und ob die Daten zweitverwertet werden können.
- Sofern die Innenbeleuchtung separat erfasst werden soll, sind in Absprache mit dem Elektroplaner geeignete Stromkreise zu konzipieren oder es ist davon auszugehen, dass sehr viele Einzelmessgeräte erforderlich sind.
- Sofern die Messtechnik außerhalb des Gebäudes einen Stromanschluss benötigt, ist dies vor Herstellung einer dichten Gebäudehülle bzw. bei der Planung der Elektroverteilung bekanntzugeben.
- Für Räume mit Intensivmonitoring sind eigene Schaltkästen ausschließlich für die Messtechnik vorzusehen; die ausführenden Elektroinstallateure müssen diese freihalten.
- Temperatursensoren mit der Messgenauigkeit von  $\pm 2$  K sollten in künftigen Projekten nicht eingesetzt werden.

## Gesamtaufbau und Ablauf des Monitorings

Den Aufbau des gesamten Monitoring-Systems mit relevanten Datenflüssen zeigt Abbildung II-17. Erfasst werden die bauseits vorhandene Zähler, aber auch die extra für das Monitoring installierten Messfühler. Alle weiteren Datenspeicherungen, welche sich aus der RLT, Solarthermie und Photovoltaik ergeben, werden genutzt. Die Daten lagern auf mehreren Datenservern, teils innerhalb des VPN-Netzes der Schule, teils außerhalb. Der Zugang zum schulinternen Netz ist nur für eingetragene Benutzer mit Passwort möglich.

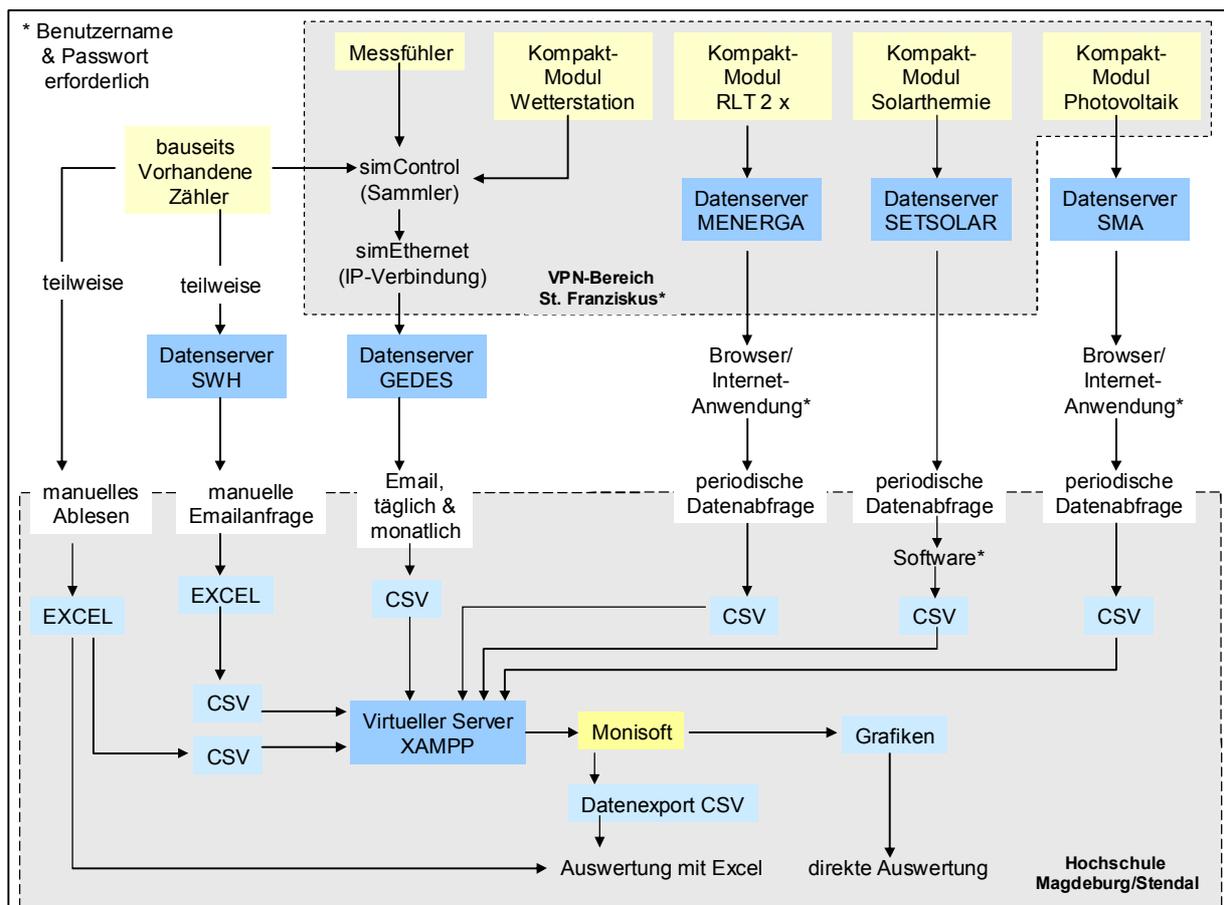


Abbildung II-17: Gesamtsystemaufbau der Datenerfassung und Auswertung

Die Messdaten vom GEDES-Datenserver werden der Hochschule automatisch als Datei per E-Mail zugestellt. Alle anderen müssen aktiv (in selbst gewählten Zeitintervallen) von den jeweiligen Servern geladen werden. Dazu ist Zusatzsoftware oder ein Zugang zu bestimmten Browseranwendungen notwendig.

In jedem Fall sind die Daten nur für eingetragene Benutzer mit Passwort abzurufen. Lediglich die Werte der Stadtwerke Halle (Stromzähler) werden auf Nachfrage per E-Mail zugesendet. Zur Kontrolle und Sicherheit werden alle bauseits vorhandenen Zähler auch manuell vor Ort abgelesen, sofern eine Ablesemöglichkeit gegeben ist.

Alle Daten liegen final als CSV-Dateien vor. Falls das Ausgangsformat EXCEL ist, muss die Datei als CSV abgespeichert werden, um nachfolgend in den Gesamtserver der Hochschule eingelesen zu werden. Dieser virtuelle Server wird mit der Software XAMPP erzeugt und speichert die Werte aller Datenquellen zusammengefasst in Form einer MySQL-Datenbank. Die Datenpflege erfolgte in der Regel monatlich bzw. nach dem Eintreffen neuer Daten-CSV.

Für die Datenauswertung wird das Programm MONISOFT verwendet. Es ermöglicht eine Datenaggregation von Einzelwerten zu längeren Zeitintervallen (Umwandlung von 10-Minuten-Werten zu Tageswerten o. ä.), aber auch eine direkte grafische Auswertung. Andererseits können die Originaldaten oder aggregierte Werte auch exportiert und mit EXCEL ausgewertet werden.

Der Systemaufbau mit mehreren Datenservern unterschiedlicher Lieferanten sowie separatem virtuellen Server ist zwar nicht optimal, aber vertretbar. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass eine sehr große Datenmenge praktisch kostenlos zur Auswertung zur Verfügung steht.

Die zeitliche Verzögerung, welche sich aus dem Datenfluss ergab, lag bei mehr als einem Monat. Allerdings war dies akzeptabel. Das zur Verfügung stehende Personal hatte ohnehin keine Kapazität, zeitnah Daten tatsächlich intensiv auszuwerten und auf Fehler im Anlagenbetrieb hin zu untersuchen. Teils wurden einzelne Themengebiete überhaupt erst bearbeitet, nachdem ein Betriebsjahr zur Verfügung stand. Das projektbezogene Monitoring im Rahmen der Forschung darf hier nicht mit einem professionellen Betriebsmonitoring verwechselt werden.

Die Software MONISOFT ist eindeutig für andere Messprojekte weiterzuempfehlen, vor allem als Mittel zur Datenpflege und Datenaggregation. Die eigentliche Auswertung, Erstellung von Grafiken, Ausgleichsfunktionen etc. kann nach einem Datenexport sehr viel schneller und vielseitiger mit EXCEL erfolgen.

### **Datenerfassungsintervalle**

Die projektbezogene Datenerfassung der Fa. GEDES erfolgt im Takt von 10 min. Ursprünglich war geplant, dieses Intervall nach einer Testphase anzupassen. Darauf wurde verzichtet. Da es sehr mühsam war, das System überhaupt aufzubauen und einen stabilen Datenfluss sicherzustellen, sollten – nachdem alles funktionierte – keine Rückschritte provoziert werden.

Die Speichermodule der beiden MENERGA-Lüftungsanlagen liefern Werte in verschiedener Auflösung. Das kleinste verfügbare Intervall sind Minuten. Bei der Solarthermie wurden bis Ende 2016 Werte im Minutentakt zur Verfügung gestellt, danach im 10-Sekunden-Takt. Die Photovoltaikwerte der Fa. SMA liegen im 15-Minuten-Intervall vor.

Die Daten der Hauptstromzähler für Netzbezug, Einspeisung und Stromproduktion wurden per E-Mail direkt bei der Energieversorgung Halle Netz GmbH abgefragt. Aus Datenschutzgründen wurden diese zunächst an den Schulbetreiber als Vertragspartner gesandt und dann der Hochschule Magdeburg-Stendal für das Monitoring zur Verfügung gestellt. Die Messung des Netzstrombezugs sowie der Rückspeisung erfolgte alle 15 Minuten, der produzierte PV-Ertrag liegt als Tageswert vor.

Bei 20 Vor-Ort-Terminen wurden jeweils konsequent alle Zähler manuell abgelesen, siehe Zählerschema in Abbildung II-18 und Abbildung II-19.

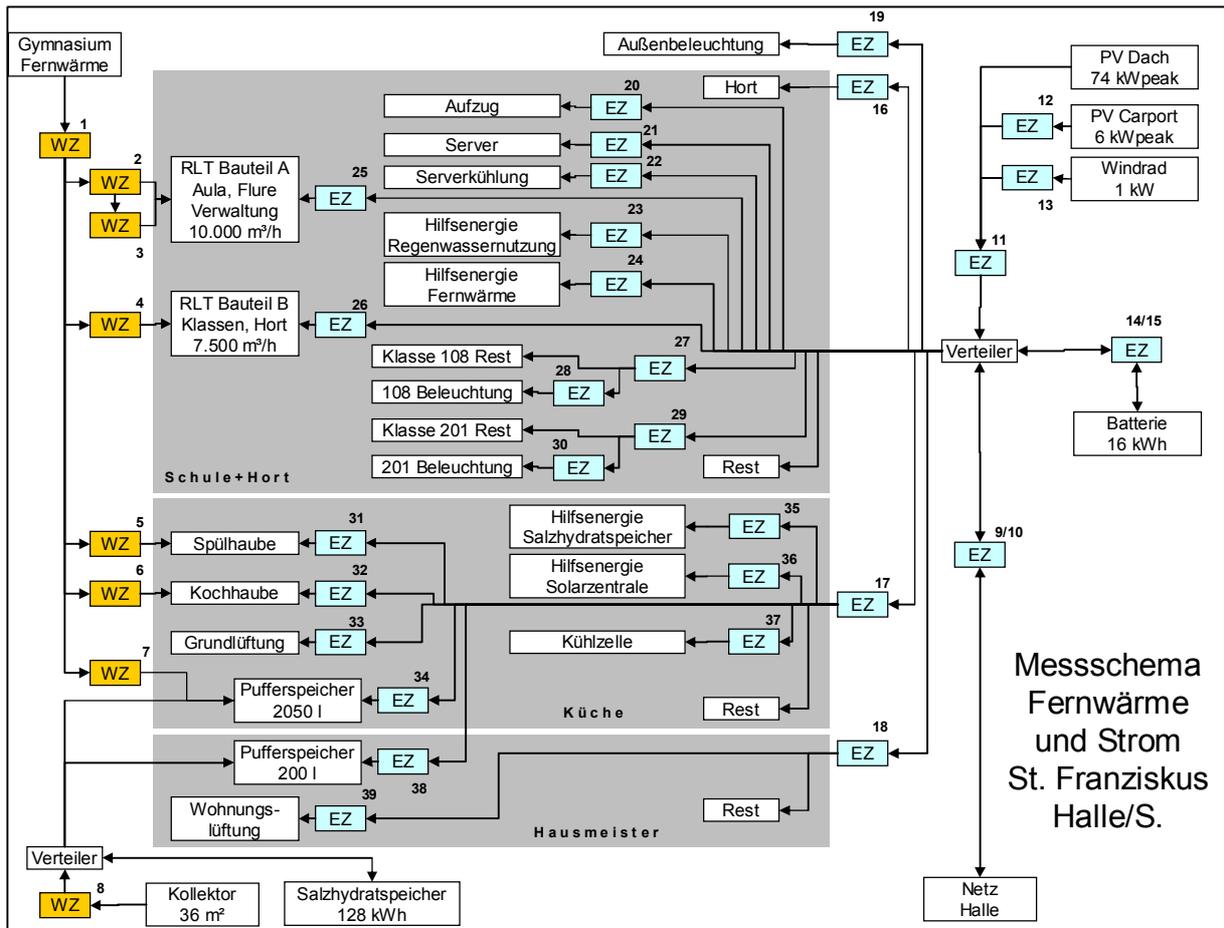


Abbildung II-18: Zählerschema für Fernwärme und Strom

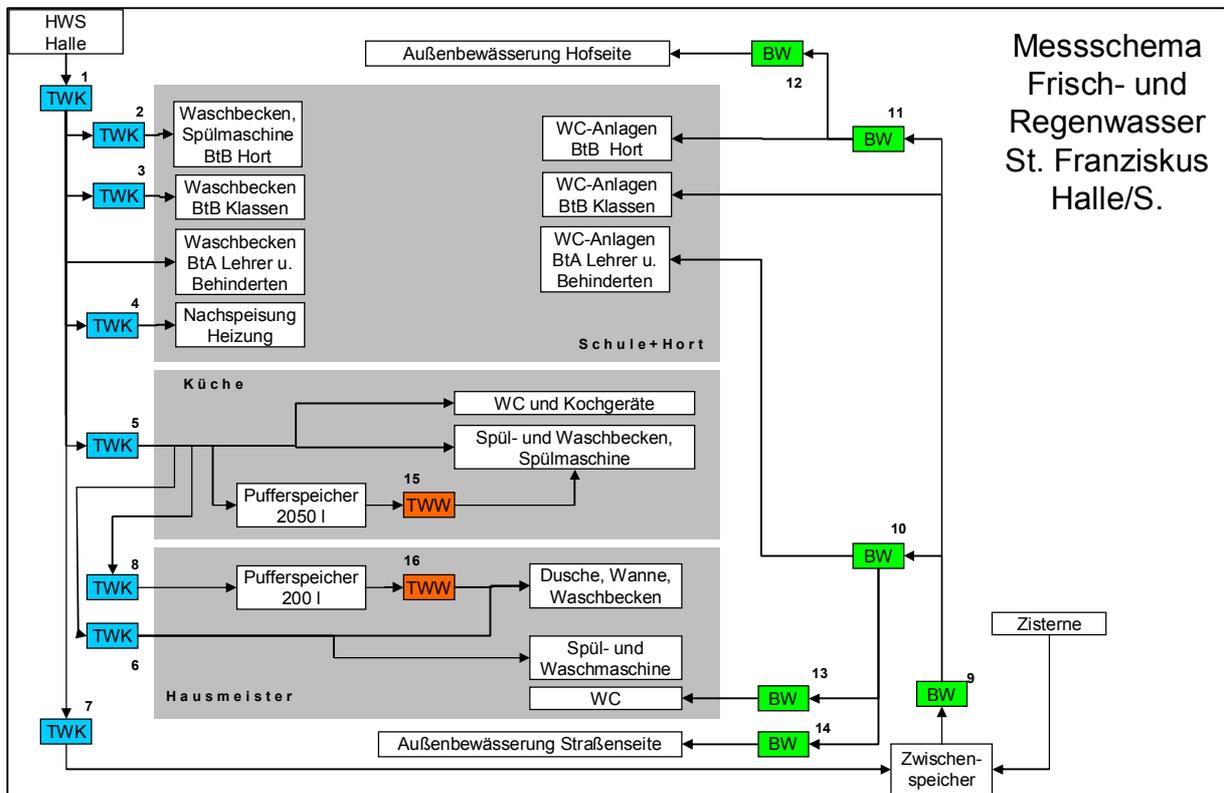
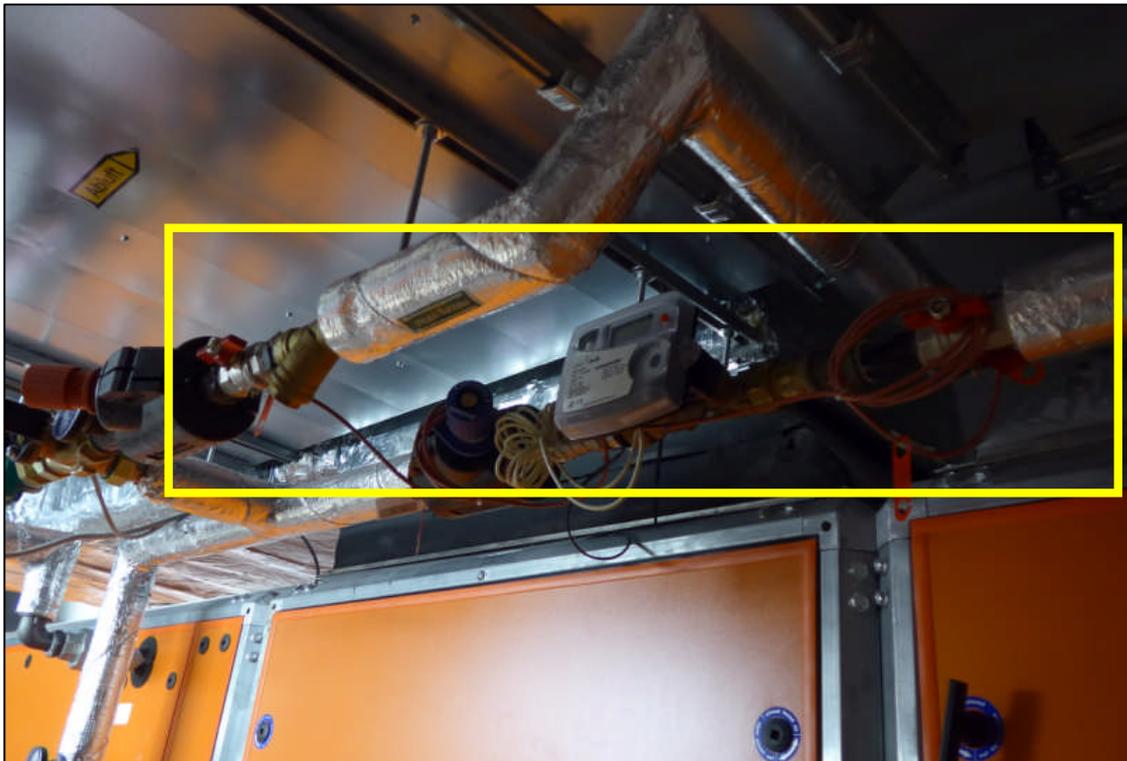


Abbildung II-19: Zählerschema für Regen- und Trinkwasser

Darüber hinaus konnten alle Wärmemengenzähler (Abbildung II-20) mit Speicherwert bei den Vor-Ort-Terminen ausgelesen werden. Daher liegen weitere 48 Stichtagswerte jeweils zum Monatsende für die Fernwärmemengen vor. Die Werte dienten als Rückfallebene – vor allem während das Monitoring noch im Aufbau befindlich war. Später wurden die Werte verwendet, um die Umrechnungsfaktoren für die digitale Zählererfassung (Impulsübertragung) zu bestimmen.



**Abbildung II-20: Wärmemengenzähler frei zugänglich in der Lüftungszentrale**

Die manuelle Ablesung aller bauseits vorhandener Zähler ist empfehlenswert. So bietet sich die Chance, die Gesamtzahl der gezählten Impulse mit dem Zählerstand zu vergleichen und individuelle Umrechnungsfaktoren zu ermitteln, die sich aufgrund von Fehlmessungen nicht vermeiden lassen. In Halle ist dies für Strom- und Wasserzähler erfolgt.

Nach der Auswertung der Zahlenwerte ergeben sich folgende Empfehlungen für sinnvolle Datenerfassungsraten für ein Langzeitmonitoring, wie es in der St. Franziskus-Schule erfolgt ist:

- 1 Tag: Bauteiltemperaturen
- 1 Stunde: Erdwärmeübertrager, Solarthermie, Wind, Fernwärme, Außenbeleuchtung, Pumpen, Ventilatoren, Server, Aufzug, Wasserverbrauch, Außenklima ohne Strahlung
- 10 Minuten: Kastenfenster, Raumtemperatur/-feuchte, CO<sub>2</sub>, zentrale Lüftung
- 1 ... 10 Minuten: Globalstrahlung, Photovoltaik, Innenbeleuchtung

Für kurze Zeiträume können zum Zwecke der Betriebsanalyse auch kurze Intervalle gewählt werden, z. B. für den Aufzug.

Weitere Informationen zur Messtechnik sind [Abschlussbericht Teil 4](#) zu entnehmen.

## II.1.5 Raumklima und Behaglichkeit

Besonders in Schulen ist die Behaglichkeit der Räume ein wichtiger Faktor, der das geistige Aufnahmevermögen der Schüler und das Arbeitsumfeld der Lehrer beeinflusst. Eine Vollüberwachung des Gebäudes im Rahmen des Monitorings war weder gewünscht noch finanzierbar. Daher beschränken sich die intensiven Untersuchungen zur Behaglichkeit auf wenige exemplarische Räume:

- Klassenraum 2.01 auf der Nordseite, obere Etage, Ecklage mit 3 Außenseiten
- Klassenraum 1.08 auf der Südseite, mittlere Etage, Innenlage mit 1 Außenseite
- Hortraum 0.01 auf der Nordseite, Erdgeschoss, Ecklage mit 3 Außenseiten
- Lehrerzimmer 1.04 auf der Nordseite, mittlere Etage, Ecklage mit 2 Außenseiten
- Aula 0.26 im Erdgeschoss auf der Südseite

### Sommerlicher Wärmeschutz

Die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz wurden von einigen Räumen sowohl nach DIN 4108-2:2003 [39] (28 Räume) als auch nach DIN 4108-2:2013 [40] (12 Räume) nicht erfüllt. Die rechnerische Verbesserung nach neuer Norm gegenüber der Version von 2003 liegt insbesondere an der Anrechenbarkeit der Nachtlüftung.

Hauptursache für die Nichterfüllung der Anforderungen ist die Wahl des zwischenliegenden Sonnenschutzes (Abbildung II-21), für den im Bestand ein  $F_C$ -Wert von 0,7 bzw. 0,75 anrechenbar ist.



**Abbildung II-21: Blick in den Fensterkasten, hochgefahrenere Jalousie rechts am Innenflügel**

Nach der Normversion von 2003 hätte ein außenliegender Sonnenschutz mit  $F_C \leq 0,5$  (Markise) bereits für die meisten Räume – so auch für die drei betroffenen Klassenräume 1.07, 1.08 und 2.08 – zur Erfüllung der Anforderungen geführt. Das Büro 0.08, das Foyer 0.21 sowie das Schlafzimmer 2.25 und das Wohnzimmer 2.28 der Wohnung hätten mit  $F_C \leq 0,3$  eine wirksamere Sonnenschutzvorrichtung benötigt (z. B. Außenrolläden, Fensterladen).

Nach neuer Norm (2013) wäre für den Personalraum 0.34, das Büro 0.07 und das Sekretariat 1.23 mit einem  $F_C$ -Wert von 0,5 die Norm erfüllt. Während das Archiv 1.24 und das Büro 0.08 mit  $F_C \leq 0,3$  ausgestattet werden könnten, wäre beim Foyer 0.21 ein Sonnenschutz mit  $F_C \leq 0,25$  notwendig. Kritisch bleibt das Wohnzimmer 2.28 der Hausmeisterwohnung: hier würde selbst ein außenliegender Sonnenschutz mit  $F_C \leq 0,25$  das Problem nicht lösen, jedoch deutlich verbessern. Dies hätte von vornherein durch einen geringeren Fensterflächenanteil ( $f_{WG,ist} = 50\%$ ) vermieden werden können. Der Hausmeister selbst ist jedoch nach eigener Aussage zufrieden.

Allein unter dem Aspekt des sommerlichen Wärmeschutznachweises hat der zwischenliegende Sonnenschutz rechnerische Nachteile und führt teilweise zur Nichterfüllung des Nachweises. Der Gedanke, die Jalousien witterungs- und vandalismusgeschützt im Fensterkastenbereich unterzubringen, ist grundsätzlich gut und nachvollziehbar. Jedoch führt die hier gewählte Ausführung dazu, dass sich der Fensterkastenbereich aufheizt. Dies wäre nur mit einem außenliegenden Sonnenschutz vermeidbar gewesen. Die sommerlichen Problemfälle werden ab Seite 40 anhand des Klassenraumes 1.08 ausführlicher beschrieben.

Ein Kritikpunkt der Nutzer ist, dass bei der geringen Lamellenbreite von 25 mm die Sicht nach draußen stark eingeschränkt ist. Insbesondere in den südorientierten Klassenräumen müssen die Jalousien aufgrund des Wärmeschutzes und der Blendung fast immer heruntergefahren werden. Es kam häufiger die Aussage, man fühle sich „eingesperrt“. Jalousien mit 50-60 mm breiten Lamellen hätten automatisch in horizontaler Stellung einen deutlich größeren Lamellenzwischenraum, durch den die Nutzer hindurchschauen könnten. Diese Ausführung war jedoch aufgrund der Platzeinschränkungen im Fensterkastenbereich nicht möglich.

Nachdem es im ersten Betriebsjahr mehrfach zu Spannungsrissen in Fensterscheiben und Problemen mit der Motorsteuerung der Jalousieantriebe gekommen war, kam erschwerend seitens des Schulträgers die Anweisung hinzu, die Jalousien nicht mehr in Zwischenstellung (halbhoch) zu betreiben. Die Nutzer fügen sich dieser Anweisung, obwohl sie sich dadurch eingeschränkt fühlen. Häufig besteht das Bedürfnis, die Jalousien nur anteilig herunterzufahren, um zwar Blendschutz zu gewährleisten, jedoch Tageslichtnutzung und Außenbezug im unteren Bereich beizubehalten. Aus Sicht des Monitorings sollte die halbhohe Stellung erlaubt werden, um die Nutzerzufriedenheit zu erhöhen. Da i. d. R. im Sommer das Öffnen des äußeren Fensterflügels vorgesehen ist, um Stauwärme abzuführen, sollte es nicht zu temperaturbedingten Problemen kommen.

### Oberflächentemperaturen der Aula

Hinsichtlich der Oberflächentemperaturen der Aula ist von einem Messfehler an der Wandoberfläche raumseitig der Solarwand auszugehen, der im Bereich von etwa 3 K liegt. Zwar ist dennoch messtechnisch erkennbar, dass die Solarwand zeitweise wärmer ist als die Referenzwand. Da sich dies jedoch kaum in der Entwicklung der Raumlufthtemperatur widerspiegelt und es von Nutzern keine negativen Rückmeldungen gibt, besteht aus dieser Hinsicht kein Handlungsbedarf. Der U-Wert der Solarwand ist mit  $0,161 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  bereits sehr gut, wodurch einem Wärmestrom von außen nach innen bereits bestmöglich entgegengewirkt wurde.

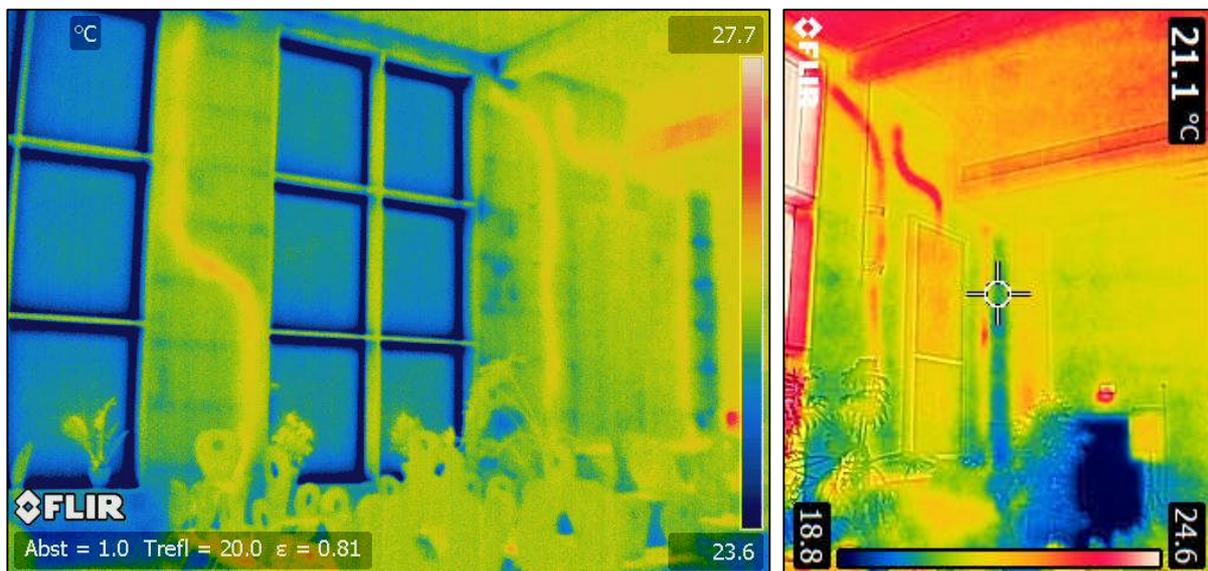


Abbildung II-22: Innenthermographie der Solaraußenwand

Entgegen der anfänglichen Befürchtungen, die Aula würde aufgrund der Solarkollektorwand in Kombination mit dem großen Fensterflächenanteil allgemein zu Überhitzung neigen, konnte festgestellt werden, dass es in der Nutzungszeit nur zu geringen Temperaturüberschreitungen kommt und behagliche Raumlufthtemperaturen herrschen. Dies ist insbesondere auf die effektive Nachlüftung zurückzuführen, aber auch auf die – unfreiwillig – dauerhaft heruntergefahrenen Jalousien. Positiv ist zwar, dass der Sonnenschutz in der Pfosten-Riegel-Fassade im Scheibenzwischenraum vor Witterung geschützt ist. Jedoch ist er im Reparaturfall – welcher bereits aufgetreten ist – schwer zugänglich.

Aus dieser Erfahrung resultiert die Anweisung, die Sonnenschutzvorrichtung dauerhaft heruntergefahren zu betreiben. Die Anlage wird nur noch eingeschränkt bedient, aus Angst, einen Defekt auszulösen. Dies kann nicht das Ziel des Wärmeschutz- oder Beleuchtungskonzeptes gewesen sein.

## Raumtemperatur

Klammert man den betriebsbedingt warmen Küchenbereich aus, so zeigt der südorientierte Klassenraum 1.08 hinsichtlich des sommerlichen Temperaturverhaltens die größten Probleme. Übertemperaturen von  $> 26\text{ °C}$  traten im Jahr 2016 in 9,9 % der Nutzungszeit und im Jahr 2017 in 6,3 % der Nutzungszeit auf. Die sommerliche Behaglichkeit in einer Passivhaus-schule sollte laut Feist in [41] auf  $h_{\geq 25}$  unter 10 % begrenzt werden. Für den Klassenraum 1.08 beträgt jedoch der Anteil der Stunden, in denen der Wert überschritten wurde, 23,5 % (2016) bzw. 19,8 % (2017). Selbst für den nordorientierten Klassenraum 2.01 lag der Wert im Jahr 2016 mit 12,2 % etwas über der Empfehlung.

Abbildung II-23 zeigt die Stundenwerte der Raumtemperaturen an Schultagen von 7 bis 15 Uhr für die beiden messtechnisch begleiteten Klassenräume und den Hortraum im Jahr 2016. Im Allgemeinen ist die Temperatur im nordorientierten Klassenraum 2.01 deutlich niedriger als im südorientierten Klassenraum 1.08. Der Hort ist noch kühler als die Klassenräume. Die Mittelwerte der Raumlufttemperaturen liegen bei  $23,95\text{ °C}$  (Klassenraum 1.08),  $22,6\text{ °C}$  (Klassenraum 2.01) bzw.  $21,4\text{ °C}$  (Hortraum 0.01).

Der Temperaturunterschied zwischen Nord und Süd von ca. 2 K führt insbesondere in der Heizperiode zu unbehaglichen Zuständen in den Nordräumen und zu berechtigten Nutzerbeschwerden.

Besonders groß sind die Defizite in der Behaglichkeit des nördlichen Hortbereiches, welcher messtechnisch durch den Hortraum 0.01 repräsentiert wird. Im Jahr 2016 war in 13,6 % der Zeit die Solltemperatur unterschritten, im Jahr 2017 noch in 11,3 % der Zeit. Auch im nordorientierten Klassenraum 2.01 liegt die Anzahl der Stunden mit Raumtemperaturen  $< 20\text{ °C}$  in 9,8 % der Nutzungszeit auf einem Niveau, welches Optimierungsmaßnahmen erfordert.

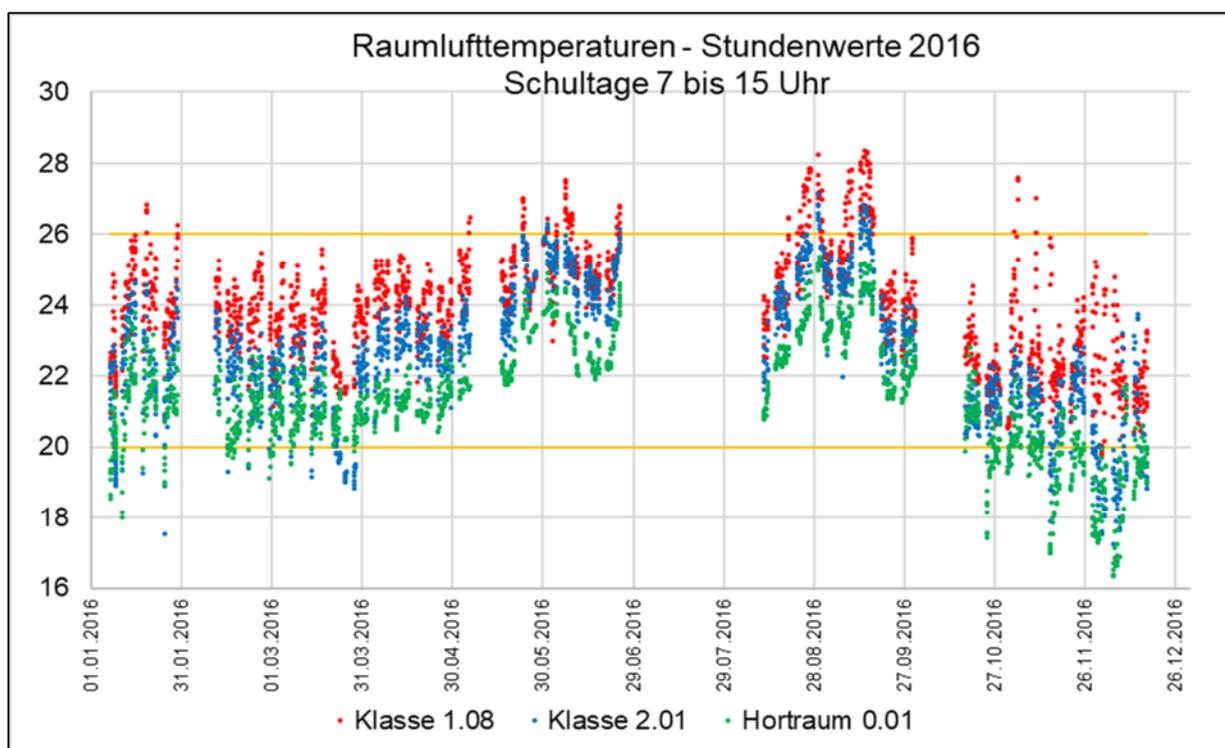


Abbildung II-23: Vergleich der Raumlufttemperaturen der Klassenräume und des Hortes

Die nachfolgende Tabelle II-9 fasst die auf Basis der Messdaten errechneten Über- bzw. Untertemperatur(grad)stunden für die Jahre 2016 und 2017 zusammen.

Die Übertemperaturgradstunden über 27 °C für die Sommerklimaregion C, in der die Stadt Halle liegt, wurden stets in Bezug auf die Normnutzungszeit (Montag bis Freitag von 7 bis 18 Uhr) nach DIN 4108-2 auf Basis der gemessenen Temperaturen errechnet. Der Anforderungswert beträgt dabei für Nichtwohngebäude maximal 500 Kh/a.

Alle weiteren Über- bzw. Untertemperaturen (> 26 °C, > 25 °C, < 20 °C) wurden in Bezug auf die in der ersten Spalte angegebene, reale Nutzungszeit errechnet. Die Messtechnik in Raum 2.01 war im Jahr 2017 leider von Datenausfall betroffen.

Der Grenzwert von 27 °C wurde im Fall der Klassenräume 1.08 und 2.01, des Hortraumes 0.01, des Lehrerzimmers 1.04 und der Aula 0.26 deutlich unterschritten und somit eingehalten. Lediglich die Spülküche und die Kochküche erfüllen die Anforderungen mit einer drei- bis vierfachen Überschreitung des Grenzwertes betriebsbedingt nicht. Dies ist jedoch nicht auf einen mangelnden sommerlichen Wärmeschutz zurückzuführen, sondern wird durch die enorme Abwärme der Küchentechnik verursacht.

**Tabelle II-9: Übertemperaturgradstunden [Kh] sowie Über- und Untertemperaturstunden [h]**

	Jahr 2016				Jahr 2017			
	> 27 °C [Kh]	> 26 °C [h]	> 25 °C [h]	< 20 °C [h]	> 27 °C [Kh]	> 26 °C [h]	> 25 °C [h]	< 20 °C [h]
<b>Raum 1.08 (Süd)</b> <i>Nutzungszeit 7-15 Uhr</i>	56	169	399	5	22	110	346	38
		9,9%	23,5%	0,3%		6,3%	19,8%	2,2%
<b>Raum 2.01 (Nord)</b> <i>Nutzungszeit 7-15 Uhr</i>	0,1	35	208	166	Datenlücken			
		2,1%	12,2%	9,8%				
<b>Hort 0.01 (Nord)</b> <i>Nutzungszeit 6-17 Uhr</i>	0	0	51	393	0	0	22	322
			1,8%	13,6%		0,0%	0,8%	11,3%
<b>Spülküche 0.33a</b> <i>Nutzungszeit 6-15 Uhr</i>	2011	790	1064	75	2091	925	1240	212
		32,8%	44,1%	3,1%		38,9%	52,1%	8,9%
<b>Kochküche 0.33</b> <i>Nutzungszeit 6-15 Uhr</i>	1564	30	154	200	1386	702	998	233
		1,8%	9,1%	11,8%		29,5%	41,9%	9,8%
<b>Lehrer 1.04 (Nord)</b> <i>Nutzungszeit 7-15 Uhr</i>	2	30	154	200	0,1	56	124	113
		1,8%	9,1%	11,8%		3,2%	7,1%	6,5%
<b>Aula 0.26 (Nord)</b> <i>Nutzungszeit 7-17 Uhr</i>	4	36	93	65	0	1	26	117
		1,7%	4,5%	3,1%		0,1%	1,5%	6,7%

Nach monatelangen Versuchen, mit dem Hersteller der Lüftungstechnik einen Vor-Ort-Termin zur Problembearbeitung im Gebäudeteil B (Klassen) zu vereinbaren, gelang im Juni 2018 endlich eine zweitägige Zusammenkunft mit intensiver Diagnostik. Dabei wurden etliche Fehleinrichtungen aufgedeckt und behoben:

- Zum einen wurde festgestellt, dass die Nachtlüftung von 1:00 bis 5:00 Uhr zwar korrekt angelegt war, jedoch in der Bedienoberfläche im Gebäudeteil B (Klassen) der Haken zur Aktivierung nicht gesetzt war. Die Nachtlüftung hat daraufhin am 5.6.2018 erstmals ab 1:00 Uhr funktioniert.
- Es wurde von einer Konstantregelung auf eine Kaskadenregelung umgestellt.
- In der Regelungsoberfläche waren im Fall des Hortes sämtliche Räume der falschen Himmelsrichtung zugeordnet. Es war schlichtweg Nord und Süd vertauscht. Dies wurde behoben.
- Der Temperaturfühler des Raumes 0.01 befand sich nicht frei im Raum, sondern wurde in der Elektrounterverteilung gefunden. Da dieser Fühler als Regelfühler für alle nordorientierten Räume dient, war diese Lage unpassend. Der Fühler wurde freigelegt, sodass er nun die Temperatur im Raum 0.01 wiedergibt.

Wie sich die Veränderungen in der Anlagenregelung auf die Situation auswirken, bleibt abzuwarten. Da Süd- und Nordräume lüftungstechnisch aneinander gekoppelt sind, lässt sich das Problem der unterschiedlichen Raumlufttemperaturen mit obigen Maßnahmen nicht auflösen. Sollten weiterhin große Differenzen zwischen nord- und südorientierten Räumen auftreten, wird eine Nachregulierung über die Volumenströme angestrebt. Die Nordräume sollen in dem Fall einen leicht überhöhten Luftvolumenstrom bekommen (im Winter zur besseren Heizungsversorgung), während in den Südräumen ein wenig gedrosselt wird.

Das führt allerdings auch dazu, dass die Luftqualität in den Nordräumen noch etwas besser wird, in den Südräumen etwas schlechter. Daher sind dieser Optimierungsmaßnahme Grenzen gesetzt. Weiteres siehe [Abschlussbericht Teil 7 – Lüftung](#).

Grundsätzlich ist die Behaglichkeit in der Passivhausschule als sehr gut einzustufen. Die Luftschichtung in den Klassenräumen ist unabhängig von der Ausrichtung (Nordseite/Südseite) sehr homogen, wesentliche Unterschiede sind nicht erkennbar. Der Grenzwert von max. 2 K Temperaturdifferenz zwischen Fußboden und Kopf- oder Arbeitsebene wird nicht überschritten. Im südorientierten Klassenraum ist gelegentlich die Temperatur in Fußbodennähe höher als in 0,8 oder 1,7 m Höhe, was das Behaglichkeitsempfinden im Allgemeinen noch steigert.

Ein großes Problem stellt die grundlegende Konzipierung der raumluftechnischen Anlage dar. Bereits in der Planungsphase wurde seitens der Hochschule Magdeburg-Stendal angemerkt, dass die Versorgung aller Räume des Gebäudeteils B mit der gleichen Lufttemperatur unabhängig von der Himmelsrichtung zu Problemen führen wird und eine Trennung in Nord/Süd notwendig sei. Der verantwortliche Planer ging von einem sehr gut funktionierenden Sonnenschutz in den Südräumen aus, der zu keinen nennenswerten Temperaturunterschieden führen würde. Zudem sei die thermische Kopplung zwischen den Räumen so gut wirksam, dass sich dies ggf. ausgleichen werde.

Die Praxis zeigt nun die vorbeschriebenen Schwierigkeiten mit ganzjährigen Übertemperaturen im südorientierten Klassenraum und unbehaglich kalten Zuständen im nordorientierten Bereich während der Heizperiode. Es hat sich eingebürgert, die Klassenraamtüren so oft wie möglich – auch während des Unterrichts – offen zu lassen, um einen Luftaustausch zu erreichen. Die Reinigungskräfte schließen am Nachmittag die Türen, der Hausmeister sorgt anschließend dafür, dass über Nacht wieder alle Türen offenstehen. Diese Umstände können nicht Ziel des Heizungs- und Lüftungskonzeptes gewesen sein. Jedoch: es ist absehbar, dass die Behebung der aufgedeckten Fehleinstellungen in der Regelung zu einer deutlichen Verbesserung der Behaglichkeit führen.

Dass die Nachtlüftung grundsätzlich zur Auskühlung der Räume in den Sommermonaten funktioniert, obwohl der Erdwärmeübertrager nicht umgangen werden kann, zeigen die zufriedenstellenden Messwerte aus der Aula. Für den Gebäudeteil B und die betroffenen Klassenräume hatte der geringe Auskühleffekt durch die Nachtlüftung regelungstechnische Ursachen in der Lüftungsanlage und teilweise funktionale Ursachen an den Volumenstromreglern. Diese Schwierigkeiten wurden im Rahmen der Lüftungsoptimierung am 5.6.2018 behoben, siehe [Abschlussbericht Teil 7](#).

Das Anlagenkonzept ohne Einzelraumregelung bzw. im mindestens Zonenregelung für Raumgruppen kann für künftige Projekte nicht empfohlen werden.

## **Raumluftfeuchte**

Die Auswertungen haben gezeigt, dass die Raumluftfeuchten im gesamten Gebäude häufig deutlich zu niedrig sind, was dazu führt, dass die Nutzer die Luft als zu trocken empfinden und Zimmerpflanzen aufstellen, um dieser Problematik ein wenig entgegenzuwirken.

Dies ist hauptsächlich auf die hohen Luftwechselraten in den Räumen zurückzuführen, die insbesondere in der kühlen Jahreszeit durch das stetige Einbringen von trockener Außenluft zu einer weiteren Entfeuchtung der Raumluft führen. Die Messwerte zeigen, dass die Raumluftfeuchten bei ausgeschalteter Lüftungsanlage (nachts und am Wochenende) ansteigen und morgens mit Beginn des Lüftungsbetriebes deutlich abfallen. Diesen Effekt kann auch die Anwesenheit der Nutzer nicht aufhalten. Da sich die Luftwechselraten am Frischluftbedarf der Personen und der Vermeidung zu hoher CO<sub>2</sub>-Konzentrationen orientieren, ist eine Reduktion der Volumenströme in den meisten Räumen keine Option – mit Ausnahme der Aula, die in der meisten Zeit aufgrund eines zu hohen Minimalvolumenstroms bei geringer Belegung deutlich überversorgt ist. Die vorhandene Feuchterückgewinnung in den RLT-Anlagen mindert das Problem, kann es aber nicht verhindern.

Relative Feuchten über der Behaglichkeitsgrenze von 70 % kommen ausschließlich im Küchenbereich vor. In allen anderen Räumen werden keine kritischen Grenzwerte erreicht, sodass auch die Bausubstanz in keinem Bereich gefährdet ist.

Tabelle II-10 stellt die Anzahl der Stunden, in denen die Raumluftfeuchte während der angegebenen Nutzungszeit des Raumes unter 35 % bzw. über 70 % betrug, für die ausgewerteten Jahre 2016 und 2017 dar. Leider waren (und sind) sämtliche Fühler in Raum 2.01 seit Sommer 2017 von Datenausfall betroffen.

**Tabelle II-10: Anzahl der Stunden mit relativen Feuchten < 35 % bzw. > 70 % und prozentualer Anteil an der Nutzungszeit**

	Jahr 2016		Jahr 2017	
	< 35 % [h]	> 70 % [h]	< 35 % [h]	> 70 % [h]
<b>Raum 1.08</b>	747	0	477	0
<i>Nutzungszeit 7-15 Uhr</i>	44%	0%	27%	0%
<b>Raum 2.01</b>	588	0	Datenlücken	
<i>Nutzungszeit 7-15 Uhr</i>	35%	0%		
<b>Hort 0.01</b>	1092	0	480	0
<i>Nutzungszeit 6-17 Uhr</i>	38%	0%	17%	0%
<b>Spülküche 0.33a</b>	286	29	167	4
<i>Nutzungszeit 6-15 Uhr</i>	12%	1%	7%	0%
<b>Kochküche 0.33</b>	306	50	192	201
<i>Nutzungszeit 6-15 Uhr</i>	13%	2%	8%	8%
<b>Lehrer 1.04</b>	754	0	491	0
<i>Nutzungszeit 7-15 Uhr</i>	44%	0%	28%	0%
<b>Aula 0.26</b>	979	0	667	0
<i>Nutzungszeit 7-17 Uhr</i>	47%	0%	31%	0%

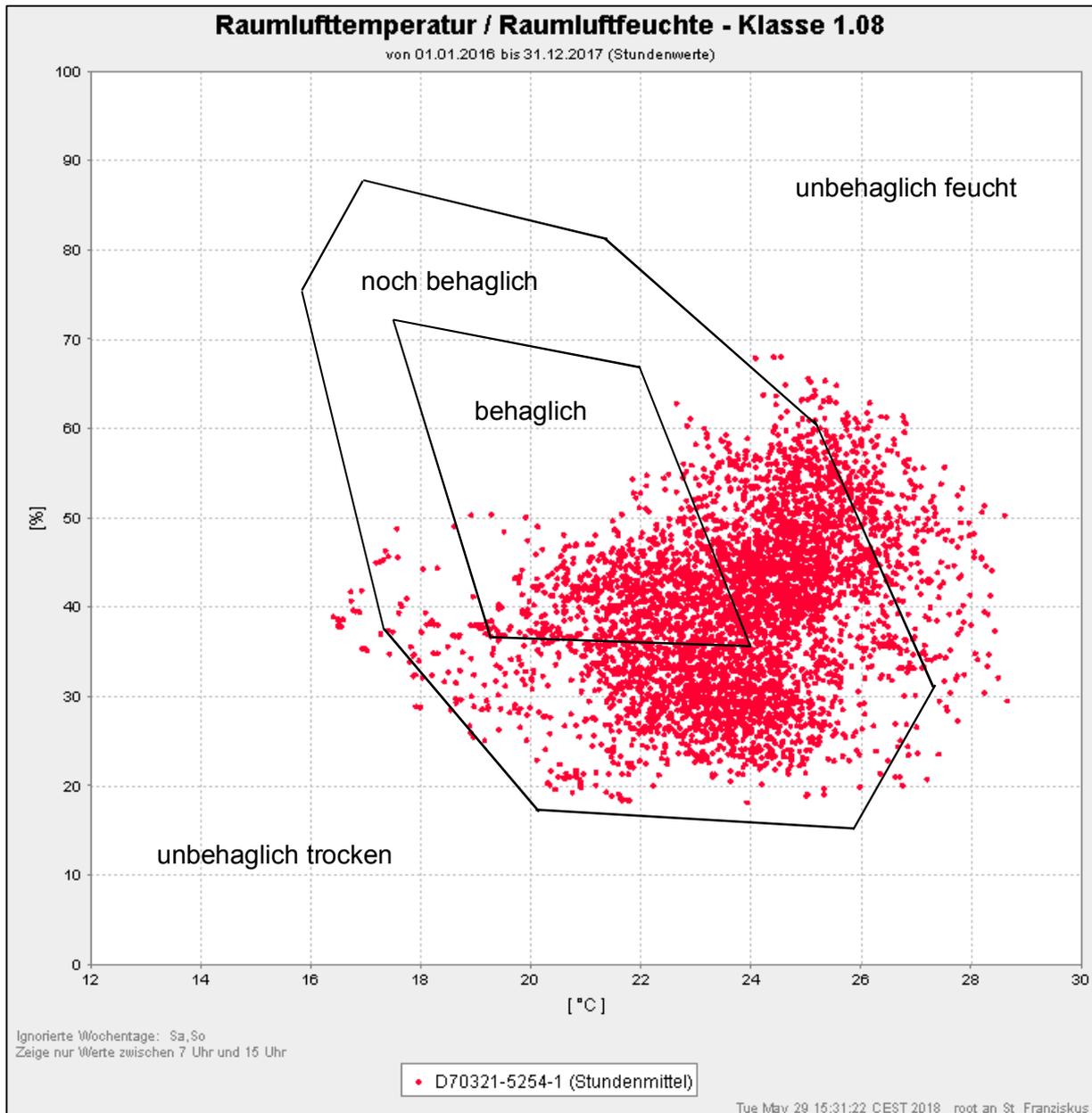
Besonders trocken ist die Raumluft in der Aula, jedoch wird diese im Wesentlichen nur während der Mittagszeit als Speisesaal genutzt – dann mit einer Belegungsdichte von ca. 100 Personen. Der Raum ist gekennzeichnet durch sehr hohe Luftwechselraten bis 5,8 h<sup>-1</sup> (Volumenstrom bis 6500 m<sup>3</sup>/h). Auch während der Abwesenheit der Nutzer ist der eingestellte, minimale Luftvolumenstrom zu hoch, was insbesondere in der Heizperiode zu einer Raumluftentfeuchtung führt. Leider konnte bis zum Ende der Projektlaufzeit keine Optimierung der Volumenströme erzielt werden. Weiteres zu dieser Problematik siehe **Abschlussbericht Teil 7 - Lüftung**.

Bezüglich der Klassenräume hat die am 5.6.2018 vorgenommene Optimierung der Lüftungsregelung auch Auswirkungen auf die relativen Feuchten. Erwartet wird im südorientierten Raum 1.08 eine deutliche Minderung der Raumtemperaturspitzen, was zu einem Anstieg der relativen Feuchte führen wird.

In den im Winter zu kühlen, nordorientierten Räumen 2.01, 0.01 und 1.04 wird eine Anhebung der Raumtemperatur bei ansonsten gleichen Nutzungsbedingungen zu eher trockenerer Luft als bisher führen.

## Behaglichkeit

Die Darstellungen in Abbildung II-24 und Abbildung II-25 nach [42] verdeutlichen die behaglichen oder noch behaglichen Bereiche bei sitzender Beschäftigung und einer Luftgeschwindigkeit unter 20 cm/s [43]. Die Wertepaare wurden im Stundenmittel aufgetragen.

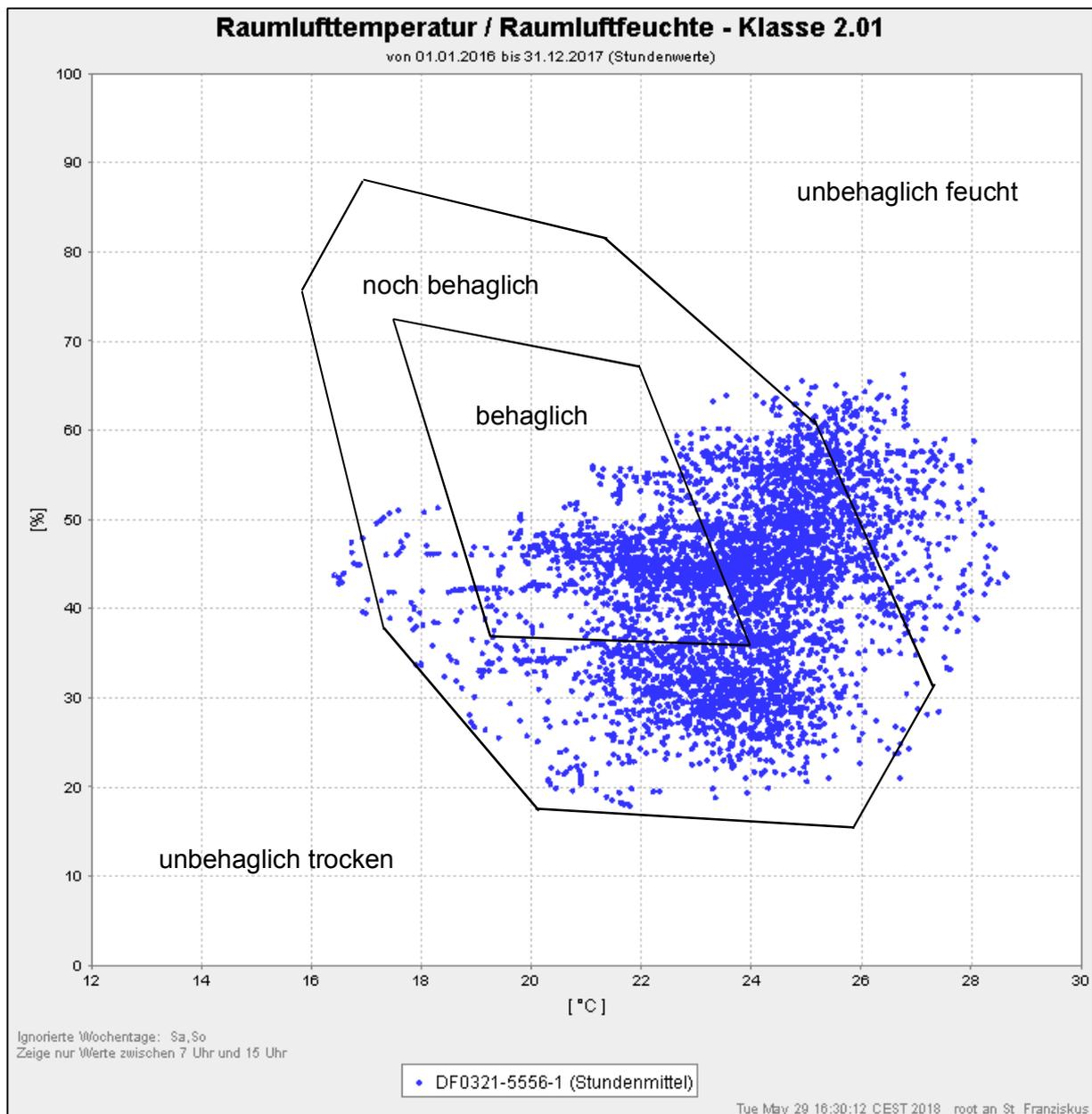


**Abbildung II-24: Temperatur und Feuchte im südorientierten Klassenraum 1.08 nach [42] – Jahre 2016 und 2017, Mo bis Fr von 7 bis 15 Uhr**

In beiden Klassenräumen befindet sich die Mehrzahl der Wertepaare im behaglichen oder noch behaglichen Bereich. Jedoch fallen zahlreiche feuchtwarme Zustände auf, die im Wesentlichen auf die beschriebenen sommerlichen Problemfälle zurückzuführen sind. Eine geringe Anzahl von Nutzungsstunden ist durch unbehaglich trocken-kühle Raumluff gekennzeichnet. Insgesamt ist die Behaglichkeit zufriedenstellend.

Durch die am 5.6.2018 vorgenommenen Veränderungen an der Lüftungsregelung im Gebäudeteil B wird insgesamt eine deutliche Verbesserung der Situation erwartet. Insbesondere in den südorientierten Klassenräumen ist eine bessere Effizienz der Nachtlüftung festzustellen, da diese seit 5.6.2018 früher beginnt – um 1:00 Uhr statt 3:00 bzw. 4:00 Uhr – und nun auch niedrigere Zulufttemperaturen bei Betriebsbeginn ermöglicht werden.

Hinsichtlich der unbehaglich kühlen Zustände wird eine Verbesserung der Situation angestrebt, da nun anstelle der manuell gewählten Zulufttemperatur durch die aktivierte Kaskadenregelung angepasste Übertemperaturen zur Beheizung der Räume möglich sind.



**Abbildung II-25: Temperatur und Feuchte im nordorientierten Klassenraum 2.01 nach [42] – Jahre 2016 und 2017, Mo bis Fr von 7 bis 15 Uhr**

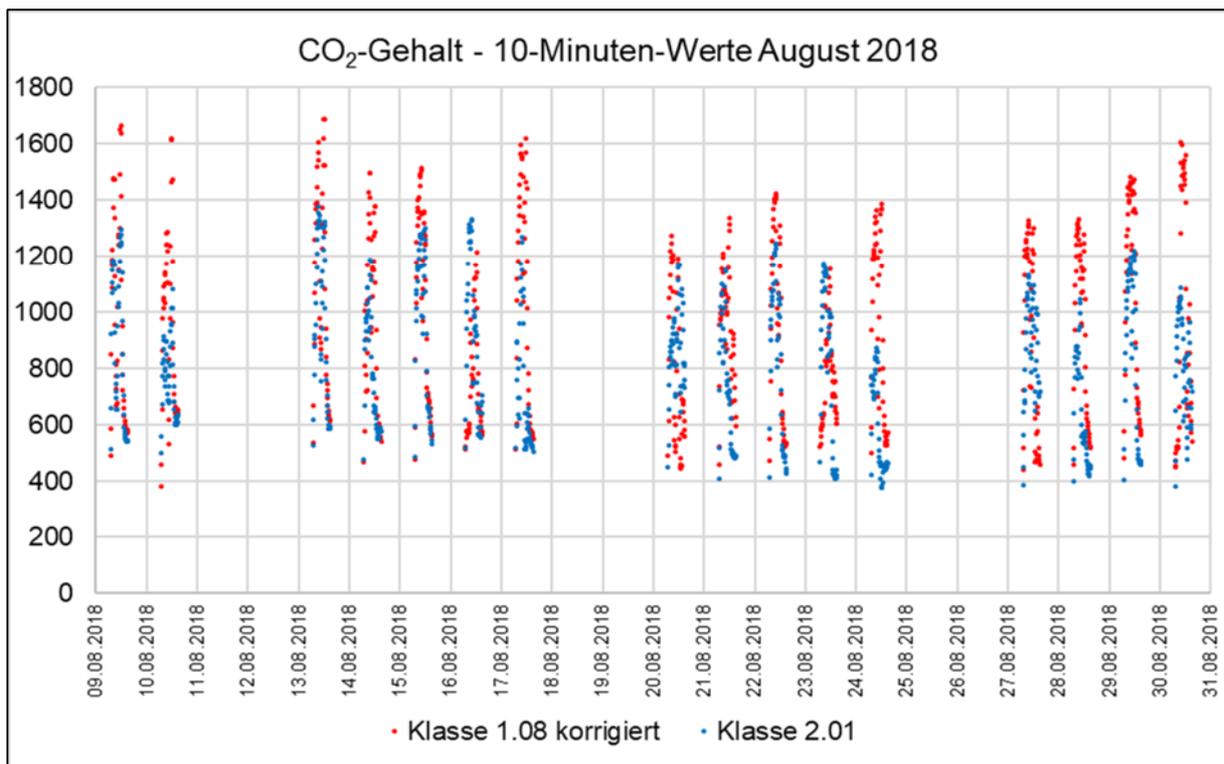
## CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft

Die Luftqualität der Klassenräume ist mit CO<sub>2</sub>-Stundenmittelwerten während der Nutzungszeit von 676 bis 826 ppm als sehr gut einzustufen. Überschreitungen der Pettenkofer-Grenze traten zwar in bis zu 41 % der Nutzungszeit auf, jedoch blieben die Werte dann meist unter 1500 ppm, was – insbesondere verglichen mit manuell belüfteten Schulen – einer guten Luftqualität entspricht. Da das regelungstechnische Konzept sowie die Anlagenauslegung identisch für alle Klassenräume sind, sind die Ergebnisse der beiden untersuchten Klassenräume 1.08 und 2.01 auf den Rest des Klassentraktes übertragbar.

Es ist davon auszugehen, dass alle südorientierten Räume die am Beispiel des Raumes 1.08 dargestellten Probleme mit erhöhten Raumtemperaturen haben und die Nutzer dadurch die Luft als stickiger empfinden, wie in der Nutzerbefragung angemerkt wurde.

Nach der beschriebenen Lüftungsoptimierung vom 5.6.2018 wird zunächst abgewartet, wie die Werte sich entwickeln. Sollte für die Angleichung der Temperaturen zwischen Nord und Süd eine leichte Absenkung der Volumenströme im Süden erfolgen, wird dies eine Verschlechterung der CO<sub>2</sub>-Gehalte in den Südräumen zur Folge haben.

Abbildung II-26 zeigt die CO<sub>2</sub>-Gehalte der Klassenräume 1.08 und 2.01 im Monat August für alle Nutzungsstunden im 10-Minuten-Intervall. Der Grenzwert von 1500 ppm wird selten überschritten.



**Abbildung II-26: CO<sub>2</sub>-Gehalte der Klassenräume 1.08 und 2.01 im August 2018 – 7 bis 15 Uhr**

In der Aula sind die CO<sub>2</sub>-Gehalte meist so gering, dass von einer lüftungstechnischen Überversorgung gesprochen werden kann. Es ist bekannt, dass die Aula auf einer zu hohen Grundleistungsstufe läuft, d. h. der werksseitig eingestellte minimale Volumenstrom zu hoch gewählt wurde. Diese hohen Volumenströme von max. 6500 m<sup>3</sup>/h sind nur bei hoher Belegungsichte notwendig und haben hohe Ventilatorstromkosten zur Folge. Leider ist es während der Projektlaufzeit nicht gelungen, eine Fachfirma zur Nachkorrektur des Minimalwertes zu engagieren. Eine Lüftungsoptimierung ist für den Winter 2018/19 vorgesehen. Sie wird dann durch die Hochschule Magdeburg-Stendal und den Hausmeister vorgenommen, siehe [Abschlussbericht Teil 7](#).

Die Messwerte für CO<sub>2</sub> in den beiden intensiv untersuchten Klassenräumen und der Aula zeigen sehr gute Ergebnisse. Innerhalb der Anwesenheit von Personen ergeben sich nur vernachlässigbar geringe Überschreitungen des Grenzwertes von 1500 ppm – im Jahr 2016 unter 1 % der Zeit, im Jahr 2017 unter 4 %, siehe Tabelle II-11.

**Tabelle II-11: Anzahl der Nutzungsstunden mit erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen**

	Jahr 2016		Jahr 2017		01.01.-31.08.2018	
	> 1000 ppm [h]	> 1500 ppm [h]	> 1000 ppm [h]	> 1500 ppm [h]	> 1000 ppm [h]	> 1500 ppm [h]
<b>Raum 1.08</b>	307	3	515	67	332	60
	18,0%	0,2%	29,5%	3,8%	30,2%	5,5%
<b>Raum 2.01</b>	125	0	Datenlücken		445	89
	7,3%	0,0%			41%	8%
<b>Aula 0.26</b>	14	0	1	0	2	0
	0,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%

Die Bemessung der Lüftungsanlage mit nur 18 m<sup>3</sup>/h je Schüler war demzufolge ausreichend. Und auch das Regelungskonzept – allein nach Präsenzmelder entweder offene oder geschlossene Volumenstromregler – war zielführend. Nach einer Einregulierungsphase im Jahr 2015 gab es keine Nutzerbeschwerden mehr hinsichtlich der Luftqualität.

Das Regelungskonzept der Aula ist grundsätzlich empfehlenswert, allerdings nur mit einem ausreichend gering eingestellten Minimalvolumenstrom. Da dies in der St. Franziskus-Grundschule nicht der Fall ist, werden innerhalb der Nutzungszeit nie die maximal zulässigen CO<sub>2</sub>-Grenzwerte erreicht, sodass ein automatisches Nachregulieren der Anlage nicht stattfindet und somit nicht untersucht werden kann. Nach der Anpassung des minimalen Volumenstromes werden die CO<sub>2</sub>-Gehalte steigen, jedoch aufgrund der fortbestehenden Grundlüftung im akzeptablen Bereich bleiben.

### Fensteröffnung

Positiv ist, dass aufgrund der vorhandenen maschinellen Lüftung eine häufige manuelle Bedienung der Fenster nicht zwingend notwendig ist. Grundsätzlich ist es zu begrüßen und in Folgeprojekten unbedingt zu empfehlen, dass das Öffnen der Fenster trotz der Passivhausbauweise ermöglicht wird. Dies trägt maßgeblich zur Nutzerzufriedenheit bei.

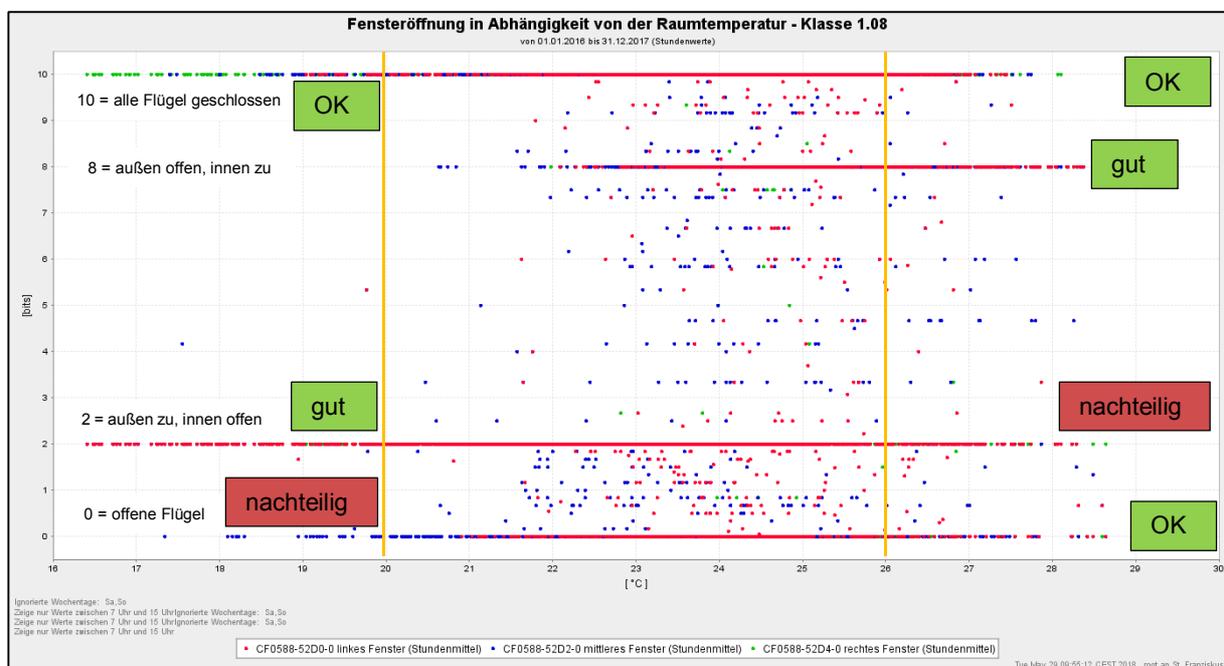
Eine anderslautende Darstellung in der Lokalpresse, in der der Journalist zum Zeitpunkt des Einzuges über die Schule berichtete, man dürfe die Fenster nicht öffnen, führte zu vielen Nachfragen durch besorgte Eltern und zu noch immer anhaltender Verunsicherung in der Lehrerschaft.

Das Kastenfensterkonzept sieht vor, dass im Sommer der äußere Flügel zum Abführen von Stauwärme aus dem Kastenbereich angekippt wird, während der innere Flügel geschlossen bleibt. Im Winter soll umgekehrt die Wärme des Kastenbereiches genutzt werden, indem der äußere Flügel geschlossen bleibt und der innere geöffnet wird. Die Fensterstellung wurde im Monitoring durch Kennzahlen in bit erfasst: 0 bit = mindestens ein offener Flügel jeweils innen und außen, 2 bit = Winterfall, 8 bit = Sommerfall, 10 bit = alles geschlossen.

Abbildung II-27 stellt exemplarisch die registrierte Fensteröffnung für alle drei Fenster im südorientierten Klassenraum 1.08 für die Jahre 2016 und 2017 dar, hier in Abhängigkeit von der gemessenen Raumlufttemperatur in Klasse 1.08. In der Darstellung wurde eine Beschränkung auf die Nutzungszeit von Montag bis Freitag 7 bis 15 Uhr vorgenommen, da die Nutzer nur in dieser Zeit aktiv Einfluss auf die Fenster nehmen können.

Betrachtet man den linken Bereich, in dem die Solltemperatur von 20 °C unterschritten wurde, so ist positiv anzumerken, dass der Winterfall (2 bit), der die Ausnutzung der Stauwärme aus dem Kastenbereich ermöglichen soll, korrekt umgesetzt wurde. Auch wurde an kühleren Tagen offenbar häufig zu der Maßnahme gegriffen, alle Flügel komplett zu schließen (10 bit). Ob in dieser Zeit theoretisch Wärmegewinne aus dem Kastenbereich möglich gewesen wären, lässt sich hier nicht ablesen. Diese Thematik wurde in [Abschlussbericht Teil 6](#) an Beispielen untersucht.

In Bezug auf den Übertemperaturbereich (rechts im Bild) ist zunächst positiv anzumerken, dass die sommerliche Einstellung der Fenster (8 bit, Außenflügel offen, Innenflügel zu) zur Abführung von Stauwärme häufig korrekt umgesetzt wurde. Auch die Komplettöffnung der Fenster ist hier nachvollziehbar, wenngleich dies bei ähnlich hohen Außentemperaturen kaum zu einer Verbesserung der Behaglichkeit führt – was in dieser Darstellung nicht überprüft werden kann. Jedoch: die Winterposition (2 bit) sollte bei einer ohnehin zu hohen Raumtemperatur künftig vermieden werden, da diese zusätzlich die Wärme aus dem Kastenbereich in den Raum lässt. Sofern die Überhitzung auf eine hohe solare Einstrahlung zurückzuführen ist, sollte auch eine komplette Schließung der Fenster nicht erfolgen, da diese zu einer Aufheizung des Kastenbereiches führt.



**Abbildung II-27: Fensteröffnung in Abhängigkeit von der Raumtemperatur – Jahre 2016 bis 2017**

Während eines Vor-Ort-Termins im Raum 1.08 wurden am 29.09.2017 erhebliche Unstimmigkeiten beim Monitoring aller Fensterkontakte der drei Kastenfenster in Raum 1.08 festgestellt. Alle Innenflügel der Kastenfenster waren an dem Tag offen und alle Außenflügel zu. Bei einem anschließenden Blick auf die entsprechende Tagesdatei zeigte sich jedoch, dass das Monitoring für diesen Tag genau gegenteilige Zustände meldete. Daraufhin wurden am 05.01.2018 alle Kontakte systematisch überprüft.

Trotz einiger dabei festgestellter Unstimmigkeiten bei der Erfassung der Öffnungszustände ergibt sich insgesamt ein schlüssiges Bild. Jedoch: ein Monitoring des Fensteröffnungsverhaltens in der hier umgesetzten Form ist nicht weiterzuempfehlen. Das System erwies sich als sehr fehleranfällig und war zudem aufgrund der Parallelschaltung von Kontakten nicht in der Lage, alle möglichen Zustände der vier Flügel abzubilden, sondern nur vier Zustände.

Der Nutzereinfluss – und damit eine mögliche Verbesserung des Raumklimas – durch Ausschöpfen aller gegebenen Optionen (Öffnen/Schließen der Fenster, Einstellen der Jalousien) ist größer als die meisten befragten Nutzer dies vermuten. Um dem Nutzer eine Hilfestellung zu geben, ob die Fensterlüftung sinnvoll ist, wurde im Mai 2018 eine Gebrauchsanleitung entworfen, die die weitere Bedienung abhängig von den vorherrschenden Temperaturen außen, im Fensterkasten und im Raum darstellt.

Im Fall, dass es den Nutzern zu kalt ist (Abbildung II-28, links), wird die Fensterkastentemperatur (oben im Display) mit der Raumlufttemperatur (unten im Display) verglichen, um eine Entscheidung zu ermöglichen, ob der „Wintergarteneffekt“ durch Öffnen des Innenflügels genutzt werden kann.

Im Fall des zu warm empfundenen Raumes (Abbildung II-28, rechts) wird die Außentemperatur (oben im Display) mit der Raumtemperatur (unten im Display) verglichen, um bei der Entscheidung zu helfen, ob das Öffnen der Fenster etwas bringt. Zum Einsatz kommen hierfür Funkthermometer im unteren Preissegment.



Abbildung II-28: Entwurf Bedienungsanleitung: Links „zu kalt“, Rechts: „zu warm“

### Nachhallzeit und Raumakustik

In den Unterrichtsräumen wurde insgesamt ein hohes Qualitätsniveau hinsichtlich der Nachhallzeit umgesetzt. Hierfür wurden in den Klassenräumen schallabsorbierende Holzwolleplatten vom Fabrikat Heradesign über dem Sitzbereich der Schüler installiert, was jedoch gemäß DIN 18041 hinsichtlich der Anordnung als ungünstig bewertet wird [44]. Die Absorption tieffrequenter Schallsignale sollte nach [45] idealerweise „in der Nähe der Schallquelle sowie in Raumecken und an Raumkanten“ erfolgen.

Tatsächlich zeigen die Messungen in den Räumen 1.08 und 2.01 Überschreitungen der Nachhallzeit im niederfrequenten Bereich, siehe Abbildung II-30. Die Nutzerbefragung mit der Begleitforschung am 14. April 2015 hat ergeben, dass die Lehrer die Räume trotz ihrer Länge als still und die Akustik als sehr gut empfinden. Das Klima trage zu einem konzentrierten Arbeiten bei. Auch in einer erneuten Nutzerbefragung am 29.09.2017 wurde die gute Sprachverständlichkeit gelobt.



Abbildung II-29: Messtechnik und Bildschirmdarstellung im Verlauf einer Messung

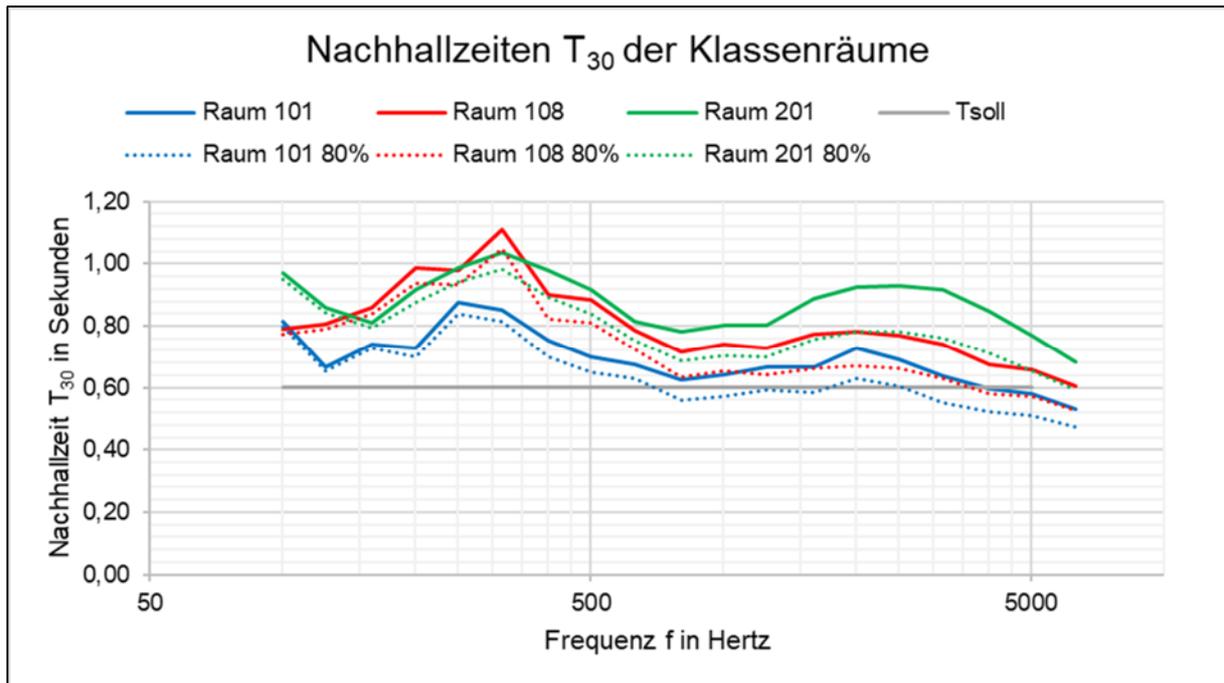


Abbildung II-30: Nachhallzeiten der Klassenräume im Vergleich

## Befragungen

Sporadisch zu bestimmten Themen durchgeführte Befragungen zeigten ein gemischtes Bild zur Kenntnis der Nutzer über die Zusammenhänge zwischen Anlagen- bzw. Gebäudebedien- und Auswirkungen auf das Raumklima. Insbesondere die kombinierte Bedienung der Jalousien, Kastenfenster und Beleuchtungsregelung (siehe Abschlussbericht Teil 12) ist offensichtlich nicht selbsterklärend.

Die Gebäudenutzer können aktiv Einfluss nehmen auf die:

- Raumlufttemperatur durch Öffnen der Kastenfenster (ein oder beide Flügel) sowie Einstellungen der Jalousien (schwarz/silber, hoch/runter, geschlossen/geöffnet),
- Blendung und Tageslichtversorgung durch Einstellungen der Jalousien (schwarz/silber, hoch/runter, geschlossen/geöffnet),
- Beleuchtungsstärke durch Kunstlicheinstellungen (Programme, Übersteuerung) sowie Einstellungen der Jalousien (hoch/runter, geschlossen/geöffnet).

Weitere Informationen zum Thema Behaglichkeit sind [Abschlussbericht Teil 5](#) zu entnehmen.

## II.1.6 Baukonstruktion

### Messziele

Für die St. Franziskus-Grundschule in Halle umfasst das Monitoring der Baukonstruktion folgende Teilaspekte:

- Untersuchen des Daches, der Nordwand und der Bodenplatte hinsichtlich erreichter Dämmwirkung, Feuchteverteilung im Bauteil und Luftdichtheit,
- Untersuchung der Kastenfenster in den verschiedenen Jahreszeiten auf erreichte Nutzung von Solarwärme bzw. Schutz vor Überhitzung,
- Untersuchung von zwei baugleichen Kinderzimmern in der Hausmeisterwohnung, wobei eines mit PCM-Deckenplatten (phase change material) ausgestattet ist, welche die sommerliche Überwärmung verzögern sollen.

### Baukonstruktion

Das zur Ausführung gekommene Holzbausystem wurde vom ehemaligen Ingenieurbüro Naumann & Stahr aus Leipzig entwickelt, welches im Zuge der Bauphase Insolvenz anmeldete. Die Bauteile wurden im Werk als Halbfertigteile (einseitig offen) vorgefertigt und auf der Baustelle montiert, geschlossen und später mit Zellulose ausgeblasen.

Das Bausystem der Außenwand basiert auf einem Holzrahmentragwerk mit doppelten Holzträgern in einem Rastermaß von 1,28 m. Die Gurte der Träger bestehen aus Konstruktionsvollholz, der Steg aus einer 30 mm OSB-Platte. OSB-Platten bilden auch die Wandscheiben. Zwischen Trägergurt und der aussteifenden Platte befindet sich eine Dichtung aus Butylkautschuk, weiterhin wird die Luftdichtheit der Plattenstöße durch Dichtbänder hergestellt. Die Gurte der Träger werden zur Wärmebrückenreduzierung mit 30 mm starken Holzweichfaserplatten überdämmt. Gefache und Installationsebene sind vollständig mit Zellulose ausgeblasen.

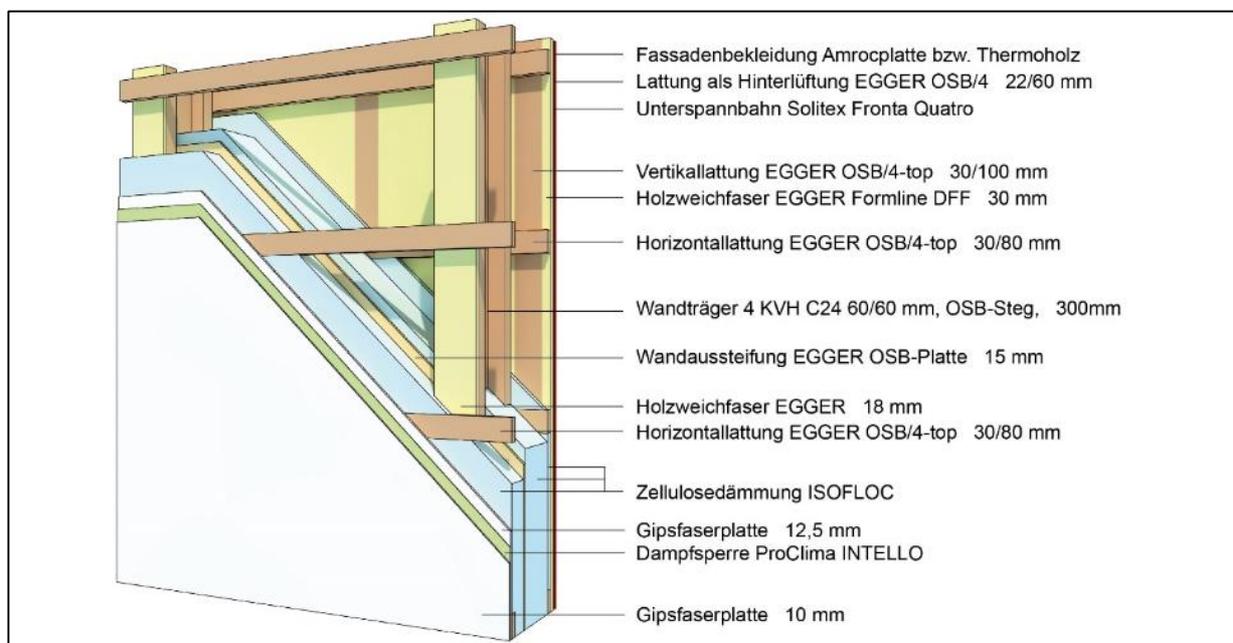


Abbildung II-31: Detail Außenwand [13]

Die Unterkonstruktion für die raumseitige Bekleidung besteht aus 30 x 80 mm OSB/4-Elementen. Die Wandinnenseite ist mit Fermacell-Gipsfaserplatten doppelt beplankt, dazwischen liegt eine feuchtevariable Dampfbremse (pro clima Intello).

Diese war in der Planung des Büros Naumann & Stahr ursprünglich nicht vorgesehen. Nachdem sie aufgrund des beauftragten Feuchteschutzgutachtens im Flachdach zum Einbau empfohlen wurde, kam sie auch im Wandbereich zum Einsatz.

An der Außenseite weist die Fassade eine hinterlüftete Beplankung mit bunten Faserzementplatten bzw. eine horizontale Thermoholzbekleidung aus Ulme auf. Bei der Unterkonstruktion der Fassadenbekleidung kamen OSB-Streifen zum Einsatz, die Hinterlüftung wird durch eine Unterspannbahn Solitex Fronta Quattro begrenzt.

Es kommen fünf verschiedene Außenwandtypen vor, die sich in ihrem Aufbau unterscheiden: Außenwand Standard, Brandwand, Verlängerung der Brandwand, Solarkollektorwand und die Außenwand der Verkehrsflächen.

Ähnlich der Außenwände gibt es eine Vielzahl an verschiedenen Innenwandtypen. Sie unterscheiden sich in nichttragende und tragende Holzbauwände, Gipskarton-Ständerwände und die Stahlbetonwände des Treppenhauses.



**Abbildung II-32: Foto Südseite, Gebäudeteil B (Foto: HS MD)**

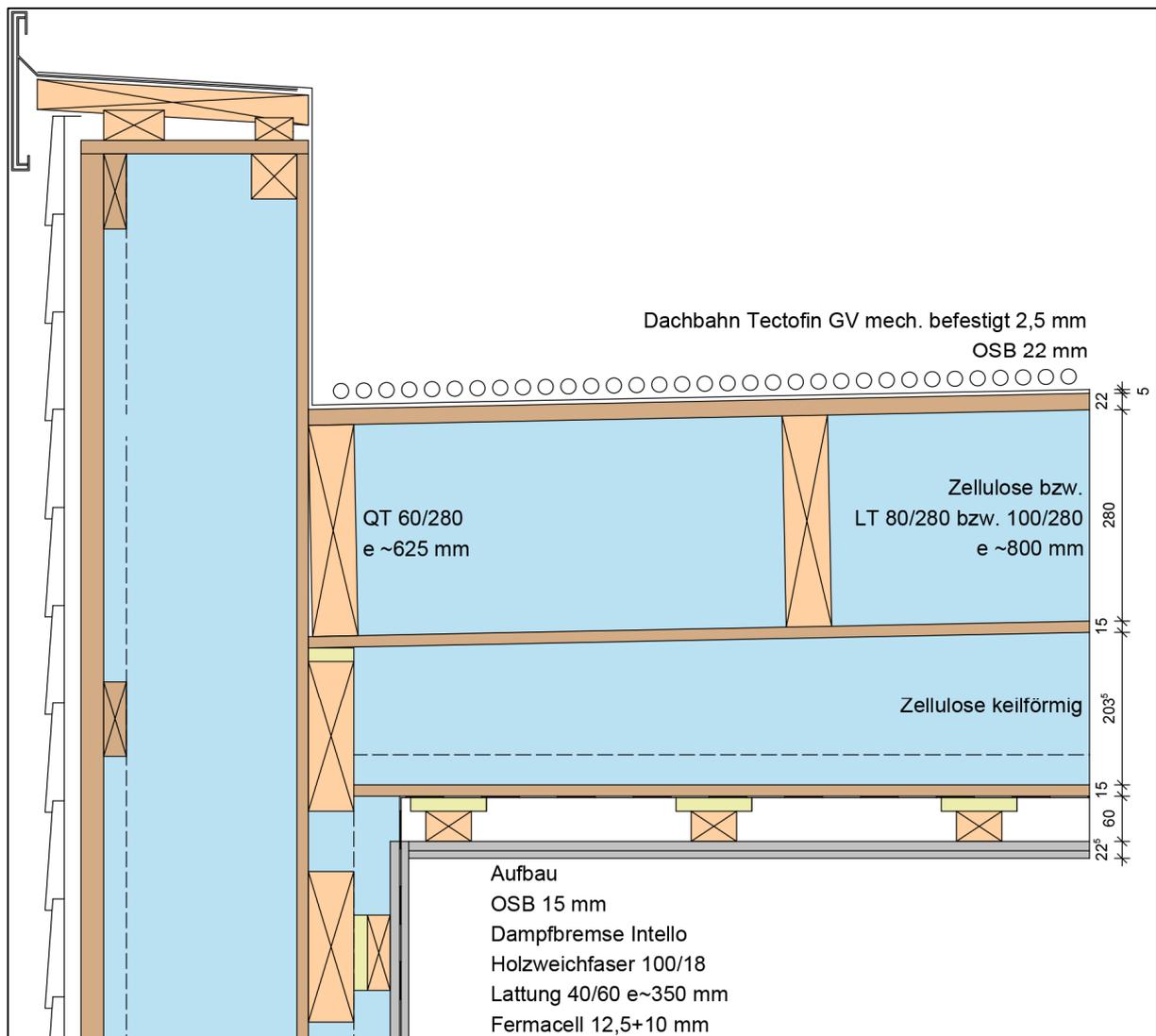
Beim Dach (Abbildung II-33) handelt es sich um ein bekiestetes Flachdach mit einem Gefälle von 2 %. Die Dämmstärken liegen zwischen 40 und 70 cm, als Abdichtung kam das Fabrikat Tectofin GV von Wolf in 1,5 mm Stärke zum Einsatz.

Innerhalb des oberen Holzrahmenaufbaus mit Zelloseschicht befinden sich Längs- und Querträger aus Brettschichtholz unterschiedlicher Maße. Der Regelquerschnitt der Längsträger beträgt 100/280 mm, abweichende Querschnitte mit Maßen von 60/280 und 80/280 können je nach Statik vorkommen. Der Querschnitt der Längsträger im Bereich über der Aula beträgt 160/360 mm.

Unterhalb dieser geneigten Trägerebene befindet sich zum Ausgleich eine waagerechte OSB-Lage, welche eine keilförmige Dämmung aus Zellulose (im Mittel 183 mm) aufnimmt.

Zwei Gipsfaserplatten mit einer Unterkonstruktion bilden die Installationsebene und gleichzeitig den raumseitigen Abschluss. In den Arbeitsbereichen der Klassenräume ist die Deckenunterseite zusätzlich mit Akustikplatten („Sauerkrautplatte“) beplankt.

Es liegt eine Untersuchung der Flachdachkonstruktion im Hinblick auf den klimabedingten Feuchteschutz vor, durch welche der Einbau einer ursprünglich nicht vorgesehenen Dampfbremse (pro clima Intello) initiiert wurde [46], deren Einbau sich daraufhin auch in der Außenwand fortsetzte.

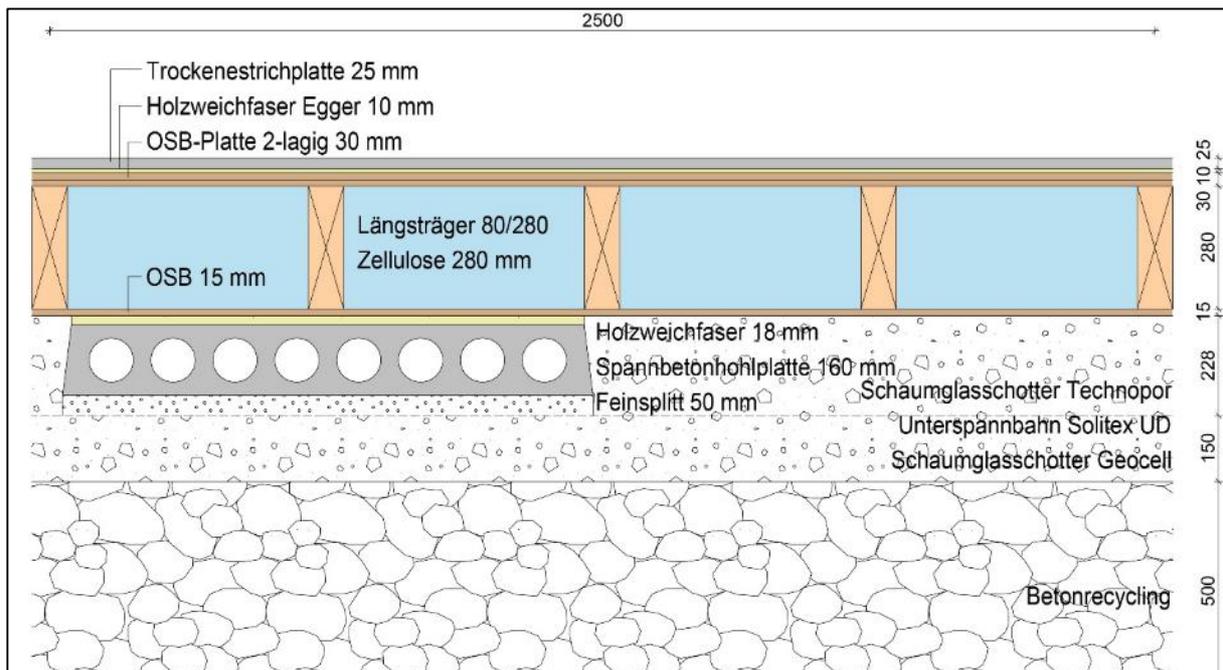


**Abbildung II-33: Detail Dach**

Bei den Innendecken wird zwischen schallentkoppelten Decken und nicht entkoppelten Decken sowie jeweils zwischen F30- und F90-Decken unterschieden, wobei die Deckenstärke zwischen 392,5 mm und 404,5 mm beträgt.

Bei den Geschossdecken über dem EG und dem 1. OG im Gebäudeteil B (Hort und Klassen) und der Decke über dem 1. OG des Gebäudeteils A (Verwaltungstrakt) handelt es sich um schallentkoppelte Decken (außer Erschließungshalle). Im Rahmen des Monitorings wurden die Luftschalldämmung und der Trittschall der Geschossdecke gemessen.





**Abbildung II-36: Detail Bodenplatte**

Auch die eingesetzten Kastenfenster sind eine Entwicklung des ehemaligen Büros Naumann & Stahr aus Leipzig. Sie kommen in allen Räumen außer der Aula (hier: Pfosten-Riegel-Fassade) zum Einsatz. Die Fenster können jederzeit geöffnet werden. Bei den Kastenfenstern handelt es sich um zwei zweifach- und wärmeschutzverglaste Flügel, sodass insgesamt eine Vierfachverglasung vorliegt. Das am häufigsten vorkommende Öffnungsmaß beträgt 2,53 x 1,86 m (vierflügelig) bzw. 1,25 x 1,86 m (zweiflügelig).



**Abbildung II-37: Links: Kastenfenster; Rechts: Pfosten-Riegel-Fassade Aula**

### **Wärmedurchgangskoeffizienten und Temperaturmessungen im Bauteil**

Die Wärmedurchgangskoeffizienten der opaken Außenbauteile liegen auf Passivhausniveau zwischen 0,10 und 0,16 W/(m<sup>2</sup>K) – etwa doppelt so gut wie nach geltender EnEV gefordert. Lediglich die Solarwand übersteigt die Anforderungen an Passivhausstandard.

Die Bauteilmessungen erfolgten an der Außenwand Nord und dem Dach im Klassenraum 201 mit Sensoren des Typs HYT. Die Messung der Bodenplatte erfolgt im Stromanschlussraum 004. Für die Messungen im Erdreich kamen Temperatursensoren vom Typ LM 75 zum Einsatz, für Messungen innerhalb der Bauteilschichten und für das Raumklima Sensoren vom Typ HYT.

**Tabelle II-12: Übersicht der Wärmedurchgangskoeffizienten**

Bauteil	U-Wert St. Franziskus- Grundschule [W/m <sup>2</sup> K]	Vergleichswert (EnEV 2016) [W/m <sup>2</sup> K]	Vergleichswert (Passivhaus- Anforderung) [W/m <sup>2</sup> K]
Bodenplatte	0,092	0,35	0,15
Bodenplatte Treppenhaus	0,125	0,35	0,15
Außenwand Standard	0,117	0,28	0,15
Außenwand Brandwand	0,110	0,28	0,15
Außenwand in Verlängerung der Brandwand	0,103	0,28	0,15
Außenwand als Solarwand	0,161	0,28	0,15
Dach	0,104	0,20	0,15
Dach an Balkon	0,135	0,20	0,15

Das Monitoring des Temperaturverlaufs in den Bauteilen zeigte keine Probleme und bestätigt die guten U-Werte. Es ist von korrekter und korrekt wirkender Dämmung und Dichtung auszugehen. Die gewählte Holzrahmenkonstruktion kann hinsichtlich ihrer wärmeschutztechnischen Eigenschaften wieder so errichtet werden und eignet sich hervorragend, um die Anforderungen an die Passivhausbauweise zu erfüllen.

Für die Nutzung als Schule sei gesagt, dass aufgrund der sehr hohen inneren Wärmequellen/Wärmelasten während der Belegungszeit in Kombination mit den solaren Gewinnen auch während der Heizperiode in den südorientierten Klassenräumen eher ein Wärmeüberangebot vorherrschte. In diesem Bereich wäre sogar aus winterlicher Sicht ein geringerer Wärmedämmstandard denkbar gewesen. Mit den Ergebnissen der Untersuchungen zu den Raumlufttemperaturen befasst sich der [Abschlussbericht Teil 5](#) ausführlich.

### Wärmebrücken

Für das Holzbausystem lag während der Planungsphase ein Zertifikat des Passivhausinstitutes Darmstadt als „Passivhaus geeignete Komponente – wärmebrückenfreier Anschluss“ vor. Durch die Insolvenz des Fachplaners sind während der Bauphase sämtliche Wärmebrückenberechnungen für das Projekt verloren gegangen sowie das Zertifikat des Passivhausinstitutes erloschen. Es war zwar bekannt, dass die Konstruktionsdetails aus energetischer Sicht hochwertig sind, jedoch mangelte es an einer konkreten Verifizierung des Wärmebrückenzuschlages  $\Delta U_{WB}$ .

Für den korrekten Ansatz des Wärmebrückenzuschlags in der Energiebilanzierung des Gebäudes wurden diese Daten im Rahmen einer Masterarbeit [13] wiederhergestellt. Abbildung II-38 zeigt anhand des Erdgeschosses die Fülle der betrachteten Anschlusspunkte.

Die Zusammenstellung der Ergebnisse für alle 60 betrachteten Wärmebrücken ergab einen spezifischen Wärmebrückenzuschlag  $\Delta U_{WB}$  von  $-0,001 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , was einem hervorragenden Wert entspricht.



## Feuchteschutz und relative Feuchten im Bauteilquerschnitt

Zunächst wurden stationäre Berechnungen mit Hilfe der Software DÄMMWERK vorgenommen, instationäre Berechnungen erfolgten mit WUFI. Dies fand stets sowohl für den Gefach als auch für den Rahmenanteil statt. Bei instationären Temperatur- und Feuchteberechnungen wird mit realen Bedingungen und folglich mit schwankenden Temperaturen für das Innen- wie Außenklima sowie Aufheiz- und Abkühlvorgängen gerechnet. Die Wärmeleitung wird genauso wie Sonnenstrahlung berücksichtigt. Während bei der stationären Berechnung nur die Wasserdampfdiffusion berücksichtigt wird, werden bei der instationären Berechnung auch die Kapillarleitung und Oberflächendiffusion berücksichtigt.

Neben der Auswertung der Bauteiltemperaturen erfolgte auch eine eingehende Betrachtung der Bauteilfeuchten für die Regelbauteile Bodenplatte, Außenwand (Standard) und Dach.

Die Berechnungen zur **Bodenplatte** ergaben zunächst, dass diese tauwassersicher konstruiert ist. Die Messergebnisse der Bodenplatte liegen jedoch höher als die Simulationswerte. Die Ursache ist nicht bekannt. Da ein Messfühler ab Dezember 2016 einen unplausiblen Verlauf zeigt, liegt u. U. allgemein ein messtechnisches Problem vor.

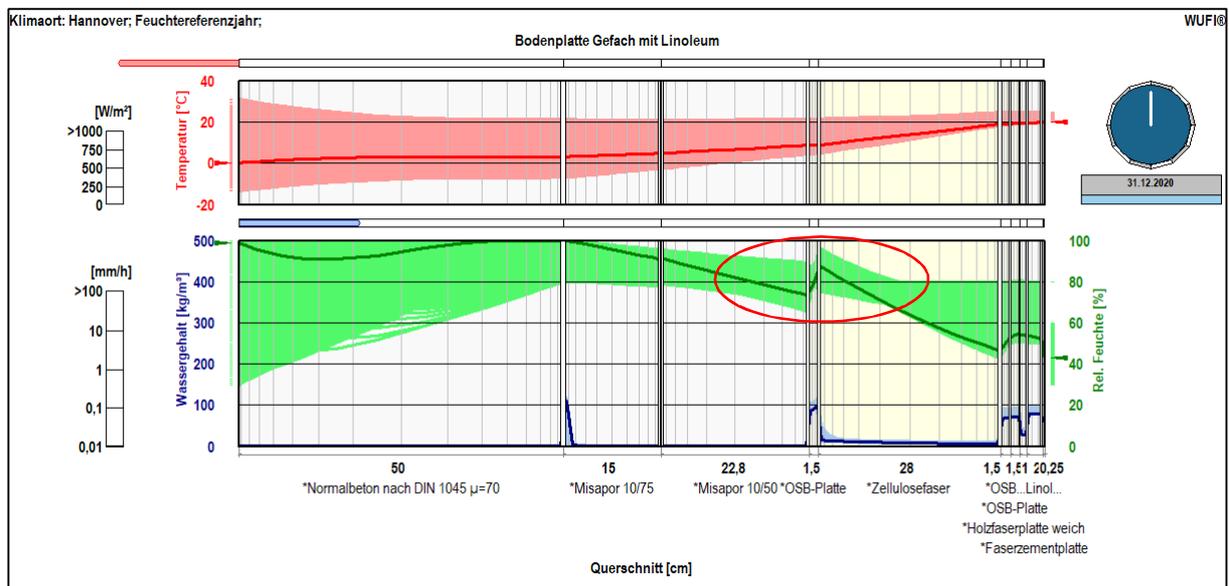


Abbildung II-39: Temperatur- und Feuchteverlauf der Bodenplatte im Gefach [50]

Ob die hohen relativen Feuchten innerhalb der Bodenplatte darauf zurückzuführen sind, dass auf eine Abdichtung nach DIN 18195-4 verzichtet und lediglich eine Unterspannbahn gegen aufsteigende Feuchte eingebracht wurde, kann nicht abschließend geklärt werden. Ein weiteres kritisches Detail ist der geländegleiche Einbau mit OK Gelände = OK Rohfußboden, bei dem die Stirnseiten des Holzbauteils gegen seitlich eindringendes Niederschlagswasser abgedichtet sein müssen. Es wird empfohlen, die bauphysikalischen Gegebenheiten innerhalb der Bodenplatte auch in den Folgejahren nach Ablauf des Monitoringprojektes zu beobachten.

Das Monitoring des Feuchteverlaufs in der **Außenwand** bestätigt einen sicheren Bauteilaufbau, welcher hinsichtlich der feuchteschutztechnischen Eigenschaften wieder so errichtet werden kann.

Beim Schichtenaufbau der Außenwand Standard ist kritisch anzumerken, dass die Dampfbremse pro clima Intello zwischen den beiden Gipsfaserplatten raumseitig der Installationsebene liegt. Dadurch ist eine Beschädigung der Dampfbremse durch den Einsatz von Öffnungen, wie zum Beispiel Steckdosen, unvermeidbar. Dies widerspricht dem Sinn und Zweck einer Luftdichtheitsebene und ist grundsätzlich zu vermeiden, um das Einströmen feuchter Raumluft in den Bauteilquerschnitt zu unterbinden.

Mit dem Glaserverfahren wurde deshalb überprüft, ob ein Verzicht auf die Dampfbremse für das untersuchte Bauteil nachteilig gewesen wäre. Im Ergebnis zeigt sich, dass das Bauteil auch ohne den Einbau der Dampfbremse tauwassersicher funktioniert hätte.

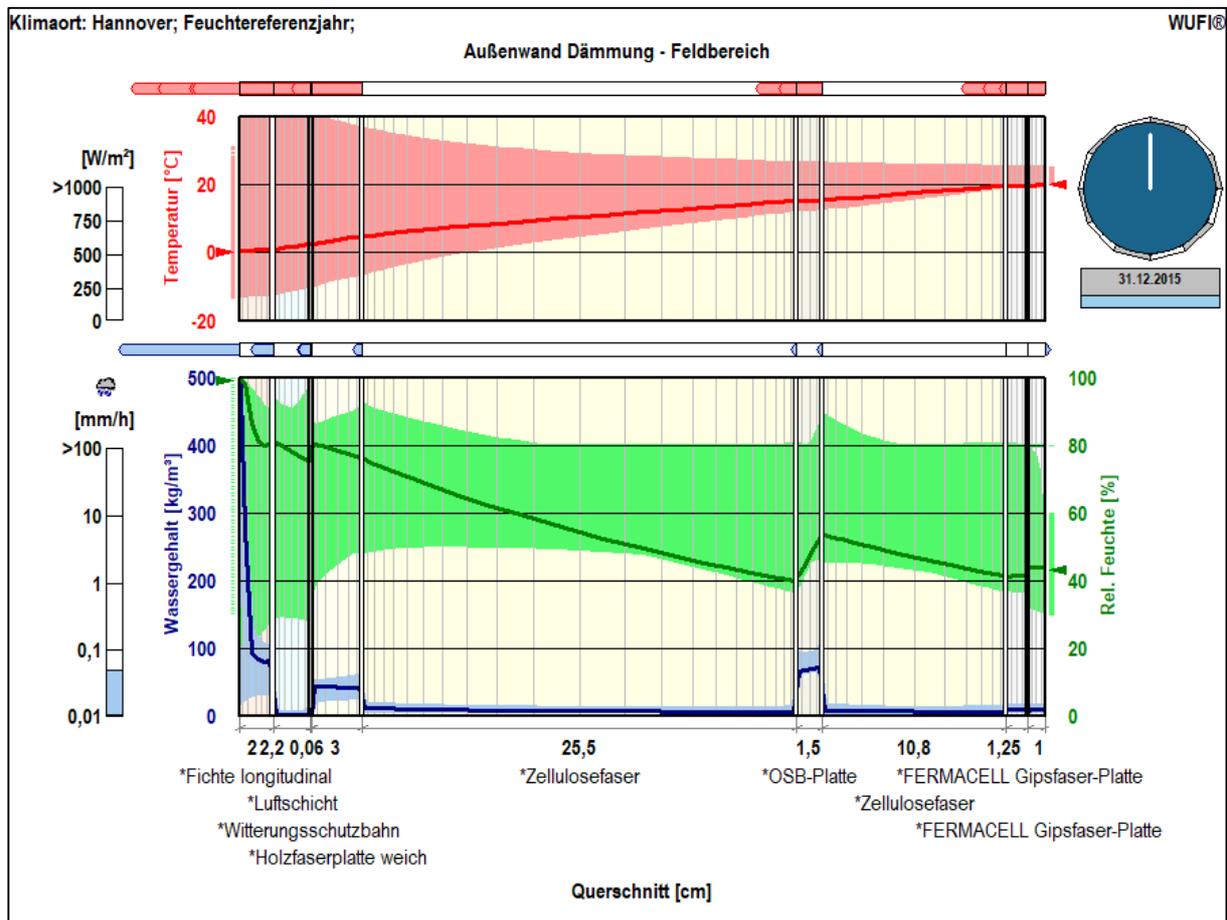


Abbildung II-40: Temperatur- und Feuchteverlauf der holzverkleideten Außenwand im Gefach [50]

Die Simulation des **Daches** mit WUFI ergab Wassergehalte im Bereich der oberen OSB-Lage mit zeitweise 19,5 Masse-%, welche als grenzwertig hoch einzustufen sind. Insgesamt bleiben die Werte unter den kritischen 20 Masse-%.

Es kann jedoch seitens des Monitorings keine Aussage über die reale Einbaufeuchte der kritischen OSB-Lage des Daches getroffen werden (Annahme: 15 Masse-%). Lag diese zum Zeitpunkt der Bauausführung schon höher oder war sie feuchter Witterung ausgesetzt, so kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Feuchtigkeit nicht ausreichend austrocknen kann und dies zu Holzschädigungen führt.

Im Hinblick auf die Empfehlungen für unbelüftete Flachdächer in Holzbauweise [51] erfüllt das Dach die Anforderung: der  $s_d$ -Wert raumseitig der Dämmung fällt dank der feuchteadaptiven Dampfbremse (deutlich) kleiner als 100 m aus und die sommerliche Umkehrdiffusion zur Austrocknung nach innen ist möglich. Darüber hinaus gibt es keine bekannten, unkontrollierbaren Hohlräume und eine geprüfte Luftdichtheit. Deckschichten wie die vorhandene Bekiesung oder andere Verschattungen (Solarmodule) werden jedoch nicht empfohlen, die Strahlungsabsorption der Dachhaut sollte  $a \geq 80\%$  betragen, was hier nicht gegeben ist.

Dass die Dachhaut tatsächlich keine Sonneneinstrahlung absorbiert, zeigt sich daran, dass die Temperaturen in der oberen OSB-Lage ganzjährig in etwa den Außentemperaturen entsprechen oder max. 4 K darüber liegen. Die Bekiesung verhindert messbar eine Erwärmung der Dachhaut durch Sonneneinstrahlung.

Ob die Holzfeuchten von Tragwerk und Schalung dokumentiert wurden, ist nicht bekannt. Dies sei bei Folgeprojekten dringend empfohlen.

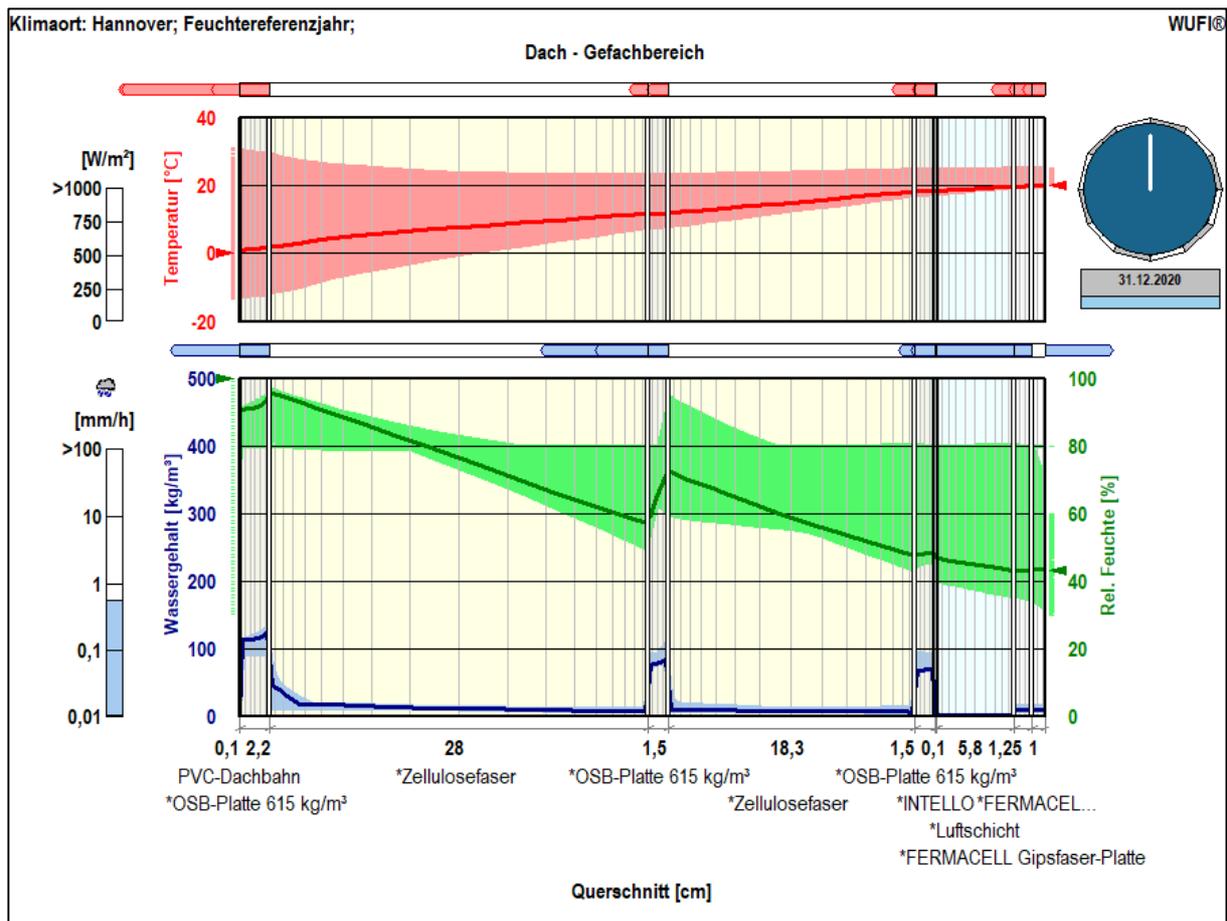


Abbildung II-41: Temperatur- und Feuchteverlauf im Dach - Gefachenteil [50]

Die gemessenen Feuchtwerte bestätigen die Befürchtungen zunächst nicht. Der Dachaufbau sollte nach Projektabschluss jedoch unbedingt messtechnisch weiterverfolgt werden. Die Messwerte in der oberen OSB-Lage sind derzeit unbedenklich, entscheidend ist jedoch die bauschadensfreie Entwicklung über die kommenden Jahre.

Ggf. sollte an geeigneter Stelle durch eine Bauteilöffnung die Bauteilfeuchte an den kritischen Ebenen (obere OSB-Lage) nachgemessen werden.

Positiv ist in jedem Fall, dass die hervorragenden Ergebnisse der Luftdichtheitsprüfung einen Feuchteintrag durch Konvektion sehr unwahrscheinlich machen. Die berechneten Feuchtegehalte des Flachdaches zeigen jedoch, wie wenig Spielraum bei Flachdachaufbauten dieser Art bleibt.

### Luftdichtheit

Die Luftdichtheitsebene wird im Wand-, Boden und Deckenbereich durch OSB-Platten raumseitig der Dämmung gebildet. Um die luftdichte Ebene nicht durch haustechnische Durchdringungen (Rohre, Kabel, Steckdosen etc.) zu beschädigen, wurde eine raumseitige Installationsebene vorgesehen, welche ebenfalls mit Zellulose gedämmt und mit Gipsfaserplatten bekleidet wurde.

Die Fugen an den Plattenstößen, Decken- und Dachanschlüssen sowie an Fenster- und Türanschlüssen wurden mit einem 6 cm breiten Dichtband luftdicht verklebt. Die Anbindung der OSB-Platten an die Träger der Außenwand erfolgte durch eine vernagelte Pressfuge, in die eine Butylkautschukdichtung eingelegt ist.

Um die Dauerhaftigkeit der Luftdichtheit zu überprüfen, wurde drei Jahre nach Baufertigstellung eine erneute Differenzdruckmessung des Gebäudes durchgeführt. Die Ergebnisse der beiden Messungen liegen sehr dicht beieinander:

Messung am 28.01.2014:  $n_{50} = 0,24$  1/h (Baufertigstellung)

Messung am 06.01.2017:  $n_{50} = 0,26$  1/h (Nachmessung im Rahmen des Monitorings)

Die Gebäudehülle der St. Franziskus Grundschule in Halle (Saale) weist für die vorhandene Hüllfläche von 4.610 m<sup>2</sup> während des konstanten Unterdruckes von 50 Pascal wenige Leckagen auf. Es gibt keine nennenswerten Veränderungen, beide Ergebnisse liegen weit unter den Anforderungen an Passivhäuser mit  $n_{50} < 0,60$  1/h und verdeutlichen das gute Luftdichtheitskonzept der Planer. Das Holzbausystem hat sich hinsichtlich der Qualität der Planung und der Ausführung als sehr anspruchsvoll und aus jetziger Sicht dauerhaft erwiesen.



Abbildung II-42: Links: Präparation der Fortluftöffnungen des Gebäudeteils A [25]

## Schallschutz

Am 14. Oktober 2016 wurde im Rahmen des Monitorings das Luftschalldämmmaß von ausgewählten Wänden und Decken gemessen. Eine Trittschallmessung komplettierte die Untersuchungen. Folgende Bauteile wurden gemessen:

- die Wand zwischen den Klassenräumen 2.01 und 2.02
- die Decke zwischen den Klassenräumen 2.01 und 1.01 (auch Trittschallmessung)
- die Decke zwischen dem Raum der Stille und dem oberseitigen Kunstraum 2.14

Das bewertete Schalldämmmaß der schallentkoppelten Innenwand zwischen Raum 1.01 und 1.02 beträgt  $R'_w = 54$  dB > 47 dB. Damit erfüllt die Wand einen hohen Schallschutzstandard.

Auch die schallentkoppelte Decke zwischen Raum 1.01 und 2.01 erfüllt mit einem bewerteten Schalldämmmaß von  $R'_w = 65$  dB den Anforderungswert von 55 dB bei weitem. Die Decke über dem Raum der Stille bestätigt diese hervorragende Ausführung auf ähnliche Weise – hier lag der gemessene Wert bei  $R'_w = 63$  dB.

Hinsichtlich des Trittschalls wurde ein guter Standard erreicht. Der bewertete Norm-Trittschallpegel der Decke ist mit  $L'_{n,w} = 52$  dB kleiner als der zulässige Pegel von 53 dB.

Alle gemessenen Bauteile sind demnach sehr gutschallgedämmt.

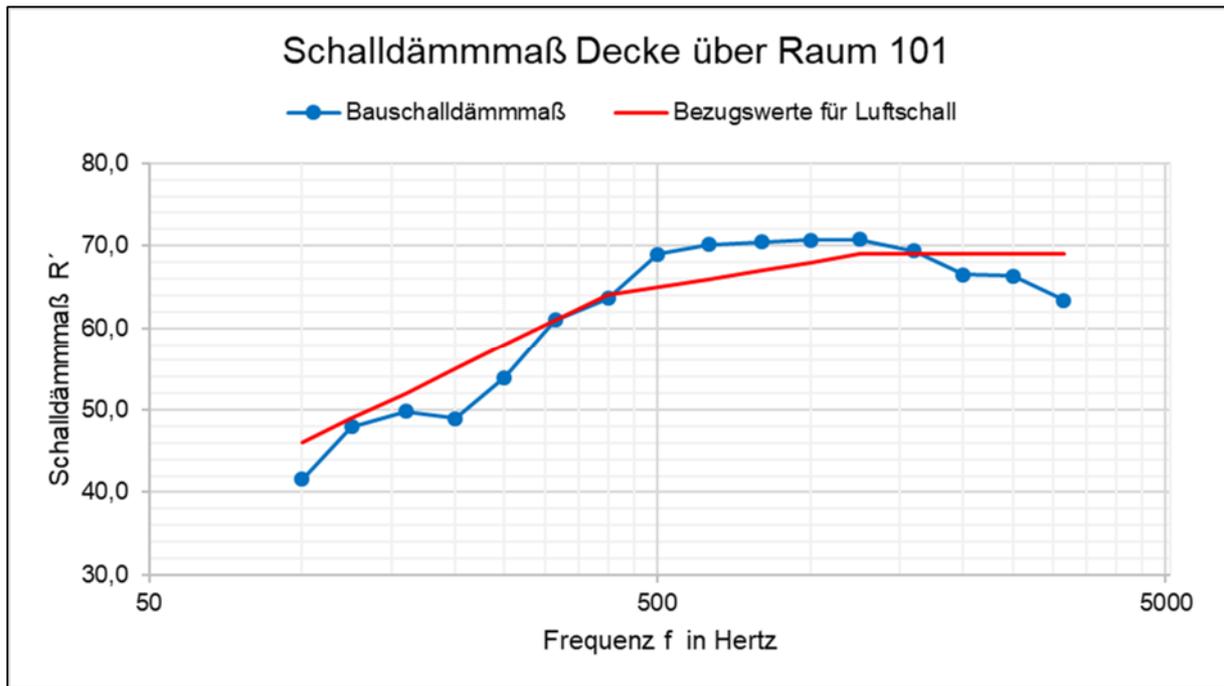


Abbildung II-43: Schalldämmmaß der Decke über Raum 1.01 (verschobene Bezugskurve) [24]

### Kastenfenster

Das Konzept der Kastenfenster basiert im Wesentlichen auf zwei Einstellungsmöglichkeiten der Öffnungsflügel: Der Sommerbetrieb sieht eine Öffnung des äußeren Flügels vor, um Stauwärme im Kasten zu vermeiden. Der Winterbetrieb setzt auf eine Öffnung des inneren Flügels, um Wärmeeinträge aus dem Kastenbereich für den Raum nutzen zu können. Jegliche Öffnung der Fenster hat manuell zu erfolgen.

Im Kastenbereich befindet sich am inneren Flügel eine elektrisch angetriebene mit einer Lamellenbreite von 25 mm. Wird der innere Fensterflügel geöffnet, bewegt sich demnach auch die Verschattung mit. Mit dieser Anordnung wird die Verschattungsanlage vor Witterungseinflüssen geschützt. Die Jalousetten weisen eine Absorberseite (schwarz) und eine Reflektorseite (reflektierend) auf, sodass entsprechend der Kippstellung der Lamellen die Sonneneinstrahlung absorbiert bzw. reflektiert werden kann.

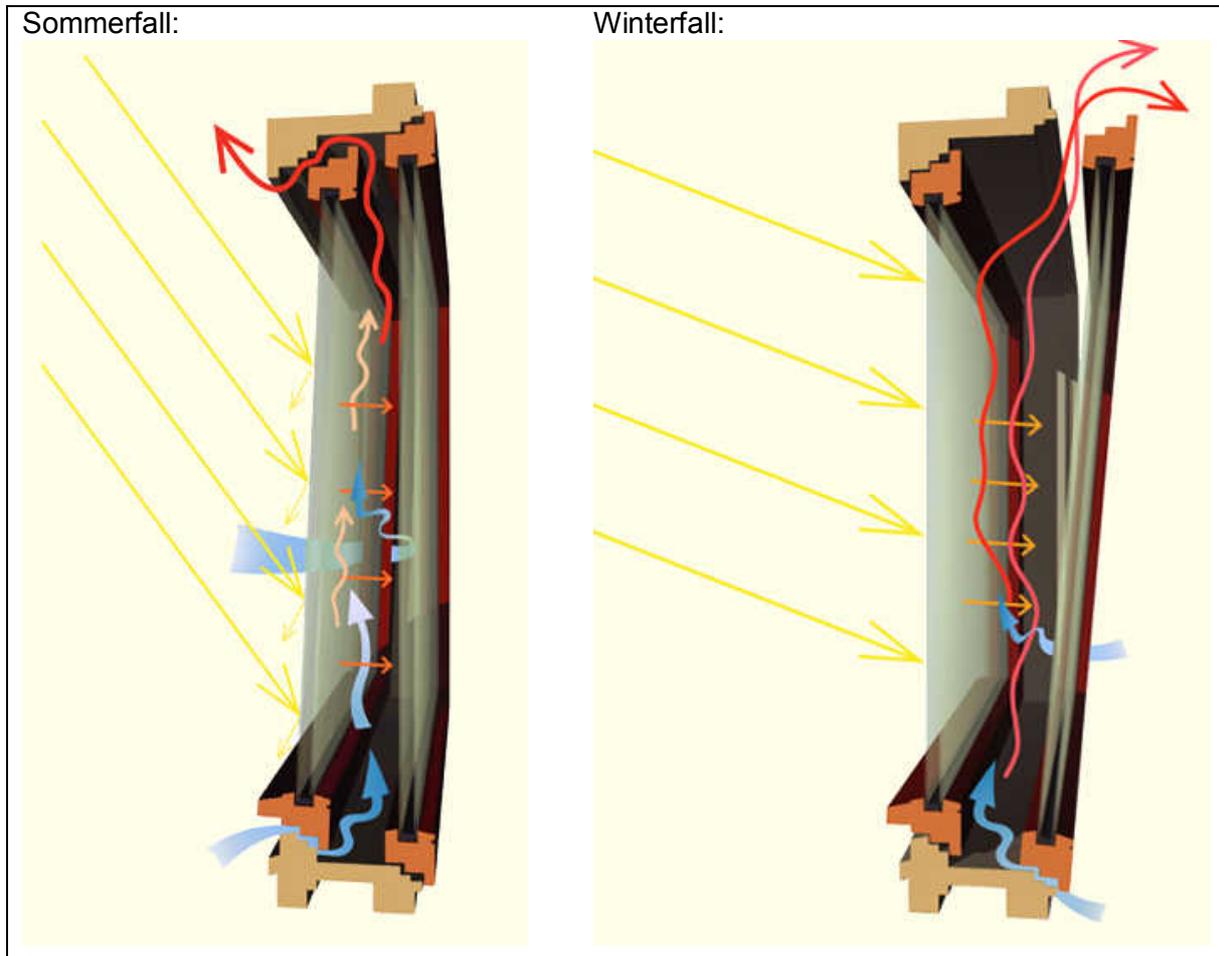
Im Sommer soll die metallisch reflektierende Oberfläche zum Tragen kommen, welche den Wärmeeintrag in den Innenraum mindert. Um die solaren Gewinne im Winterfall zu generieren, soll die schwarze Oberfläche nach außen positioniert werden, um die Wärme zu absorbieren.

Ziel war die Messung der Zwischenraumtemperatur im Kastenbereich und der Abgleich mit dem Öffnungszustand der Fenster (Fensterkontakte), um Aussagen über die Nutzung des Wintergarteneffektes treffen zu können.

Die winterliche Wärmepufferung des Fensterkastens ist messtechnisch nachweisbar. Kritisch ist der Sommerfall: wird das äußere Fenster nicht rechtzeitig geöffnet, steigt die Temperatur im Kasten auf so hohe Werte ( $> 60\text{ °C}$ ), dass die Fenstergriffe des äußeren Flügels nicht mehr gefahrlos angefasst werden können. Dieser Fall tritt auch an sehr sonnigen Wintertagen auf.

Hinsichtlich der Ausnutzung des Wintergarteneffektes (Winter) oder des Abführens von Stauwärme (Sommer) kann den Lehrern ein ständiges Öffnen und Schließen nach Wetterlage nicht zugemutet werden. Der Realbetrieb sieht daher so aus, dass der Hausmeister mit dem pauschalen Öffnen der Außenflügel im Frühjahr den Sommer einleitet – unabhängig vom wirklichen Bedarf.

Im Herbst erfolgt die Einstellung auf den Winterfall. Die Nutzer sind hinsichtlich eigenmächtiger Veränderungen dieser Einstellungen verunsichert. Nicht alle haben das energetische Prinzip der Kastenfenster verstanden. Eine Automatisierung wäre jedoch viel zu aufwändig.

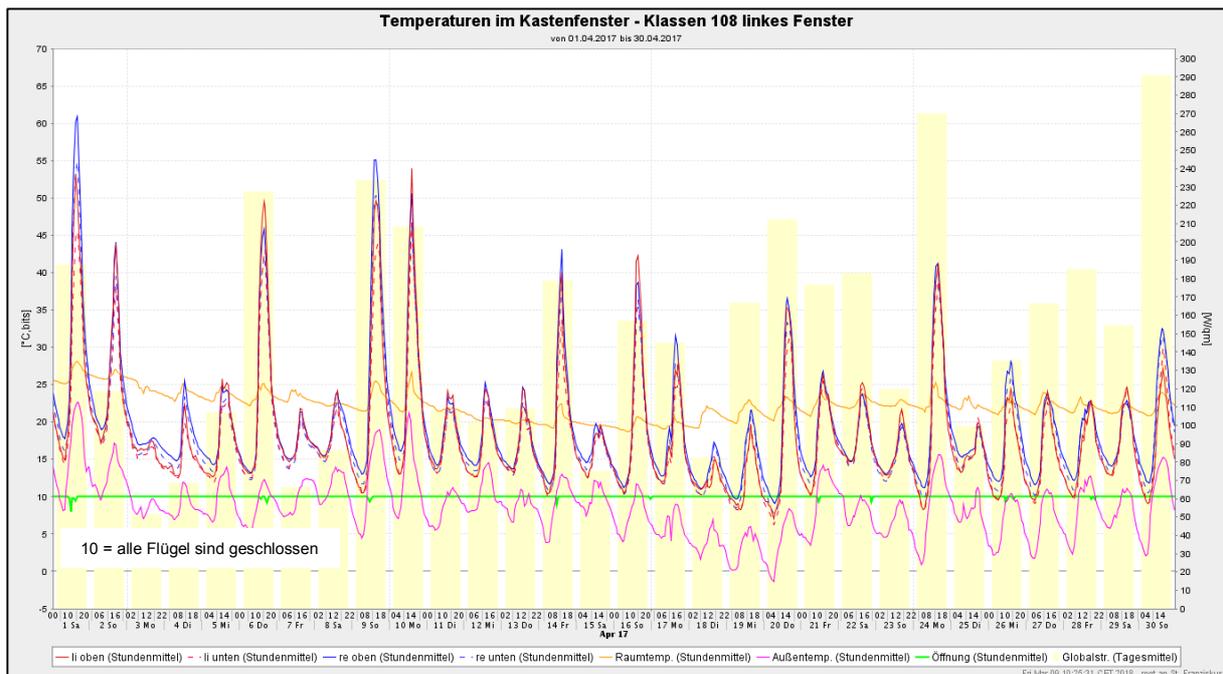


**Abbildung II-44: Links: Sommerfall, Rechts: Winterfall [47]**

Es ist zu beobachten, dass die Temperaturen im Kastenbereich der südorientierten Fenster (Messung in Raum 1.08) sehr viel höher als die Temperaturen der Fenster in Nordrichtung (Messung in Raum 2.01) sind.

Der Wintergarteneffekt tritt im nordorientierten Bereich praktisch nicht auf, weshalb die Einstellungen für den Sommer- bzw. Winterfall hier kaum relevant sind. Es gibt keine signifikanten Unterschiede der Temperaturen vom oberen zum unteren Teil des Fensters. Lediglich zwischen links und rechts gibt es kleinere Temperaturunterschiede innerhalb der Fenster. Als mögliche Ursachen sind dabei der Einfallswinkel der Sonnenstrahlen auf das Fenster und eventuelle Verschattungen zu benennen.

Die Empfehlung zur Nachahmung der Kastenfenster ist zwiesgespalten. Die Kastenfenster werden durch die Größe der Fensterflügel und ihr hohes Gewicht nach Aussage der Nutzer ungern bedient. Dies bestätigt auch das Monitoring des Fensteröffnungsverhaltens, welches teilweise über mehrere Wochen keine Bedienung der Fenster registriert. Positiv ist, dass aufgrund der maschinellen Lüftung eine häufige manuelle Bedienung der Fenster nicht zwingend notwendig ist. Grundsätzlich ist es zu begrüßen und in Folgeprojekten unbedingt zu empfehlen, dass das Öffnen der Fenster trotz der Passivhausbauweise ermöglicht wird. Dies trägt maßgeblich zur Nutzerzufriedenheit bei. Eine anderslautende Darstellung in der Lokalpresse, in der der Journalist zum Zeitpunkt des Einzuges über die Schule berichtete, man dürfe die Fenster nicht öffnen, führte zu vielen Nachfragen durch besorgte Eltern und zu langanhaltender Verunsicherung in der Lehrerschaft.



**Abbildung II-45: Temperaturen im Kastenfenster Klasse 108 linkes Fenster – April 2017**

In Gebäuden ohne Lüftungstechnik wäre der gewählte Fensteraufbau hinsichtlich der Bedienerfreundlichkeit nicht nur aufgrund der Größe und des Gewichtes weniger zu empfehlen, sondern auch aufgrund der Notwendigkeit, stets Innen- und Außenflügel bedienen zu müssen.

Zwar sind großformatige Fenster bezüglich der Investitionskosten von Vorteil. Hinsichtlich der in der St. Franziskus-Grundschule vorhandenen Flügelbreite von ca. 1,25 m berichteten die Schüler jedoch, dass bei Stoßlüftungen die Gefahr besteht, dass sich die Nutzer an den in den Raum ragenden Flügeln stoßen. In Folgeprojekten, deren Lüftungskonzept eine manuelle Fensterlüftung (auch anteilig) vorsieht, sollte es daher einen ausgewogenen Mix aus breiten und schmalen Öffnungsflügeln geben, die leicht bedienbar sind und nicht weit in den Raum schwenken. Dies verbessert auch die Möglichkeit, die Schule im Sommer auch durch natürliche Belüftung anstelle der mechanischen Belüftung mit Frischluft zu versorgen.

Nachteilig bei zusätzlichen Unterteilungen der Fensterflächen ist jedoch, dass sich durch die Zunahme des Randverbundes die Wärmebrückenverluste der Fenster erhöhen und durch einen höheren Rahmenanteil die transparente Fläche verkleinert.

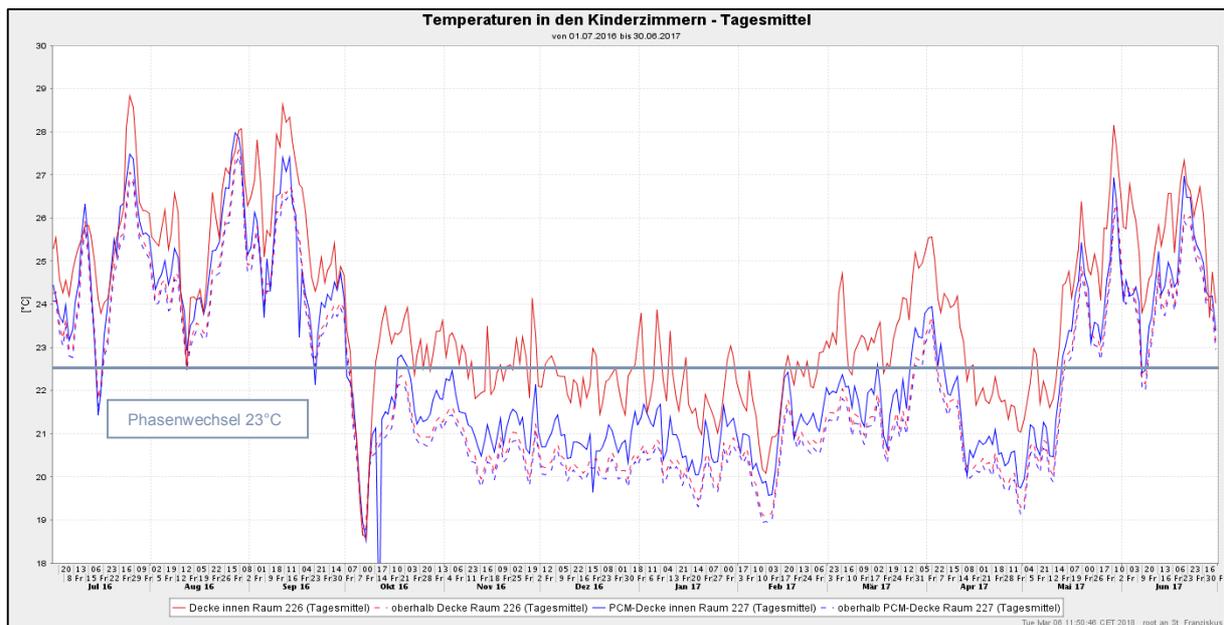
Der Fensterkastenbereich ist leider so konstruiert, dass bei einigen Fenstern das Schließen des Innenflügels auch zu einem Zudrücken des Außenflügels führt. Der lichte Abstand zwischen dem Innenflügel und dem Griff des Außenflügels ist so knapp bemessen (für den Griff gibt es sogar eigens eine Aussparung im Rahmen des Innenflügels), dass er bei Maßtoleranzen vereinzelt nicht ausreicht und der Außenflügel ungewollt zufällt. Würde man bei Folgeprojekten mit diesem Bausystem eine Verbreiterung des Fensterkastens anstreben, müsste man jedoch schon am Grundaufbau der Außenwand ansetzen, da der äußere Flügel bereits außen bündig und der innere Flügel bereits innen bündig (mit der Luftdichtheitsebene) sitzt.

Positiv ist, dass der Fensterkasten die Jalousie vor Wind und Vandalismus schützt. Jedoch schränkt er damit die Wahl und die Dimension des Sonnenschutzes entsprechend ein. Die Nutzer hätten sich Jalousien mit einer größeren Lamellenbreite gewünscht, da diese auch maßgeblich für die entstehenden Zwischenräume – und somit den Blick nach außen – in waagerechter Lamellenstellung ist.

Dass dieser Außenbezug maßgeblich für die Nutzerzufriedenheit ist, zeigt sich auch in der Kritik, dass die Lamellen zur Vermeidung von thermischen Spannungen im Glas nicht halbhoch gefahren werden dürfen. Grundsätzlich sollte der gewählte Sonnenschutz hier keine Einschränkungen zur Folge haben.

## PCM

Als Phase Change Material (PCM) kam das Fabrikat Alba balance der Firma Rigips zur Ausführung. Hierbei handelt es sich um 25 mm starke Vollgipsplatten mit eingelassenen Paraffinen. Die Wärmespeicherkapazität  $c_{\text{wirk}}$  beträgt  $83 \text{ Wh/m}^2$  entsprechend  $300 \text{ kJ/m}^2$ . [52] Die PCM-Platten wurden im Kinderzimmer 2.27 vollflächig an der Decke ( $15 \text{ m}^2$ ) und den Wänden ( $44,5 \text{ m}^2$ ) als innere Beplankung verbaut.



**Abbildung II-46: Deckentemperaturen in den Kinderzimmern, 01.07.16 - 30.06.17 - Tagesmittel**

Ziel ist es, durch die Aggregatzustandsänderung der Paraffine bei einem Schmelzpunkt von  $23 \text{ °C}$  thermische Energie aufzunehmen und Temperaturspitzen abzufangen (Peakshifting), bis der Prozess abgeschlossen ist.

Die Messergebnisse haben für den Raum mit PCM-Decke im gesamten Jahresverlauf überwiegend geringere Raumtemperaturen gezeigt als im Referenzraum. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Platten im Bereich des Phasenübergangs über längere Zeit ihre Temperatur konstant gehalten haben und das Prinzip der latenten Wärmespeicherung grundsätzlich funktioniert.

Weitere detaillierte Informationen zur Baukonstruktion des Gebäudes sind [Abschlussbericht Teil 6](#) zu entnehmen.

## II.1.7 Lüftung und Erdwärmeübertrager

### Anlagenübersicht und Lüftungszonen

Die Systematik der Lüftungszonierung des Gebäudes zeigen Abbildung II-47 bis Abbildung II-49 für das Erdgeschoss. Es wurde eine klare Trennung zwischen dem westlichen und östlichen Gebäudeteil vorgenommen, vor allem durch die brandschutztechnische Trennung beider Gebäudeteile motiviert.

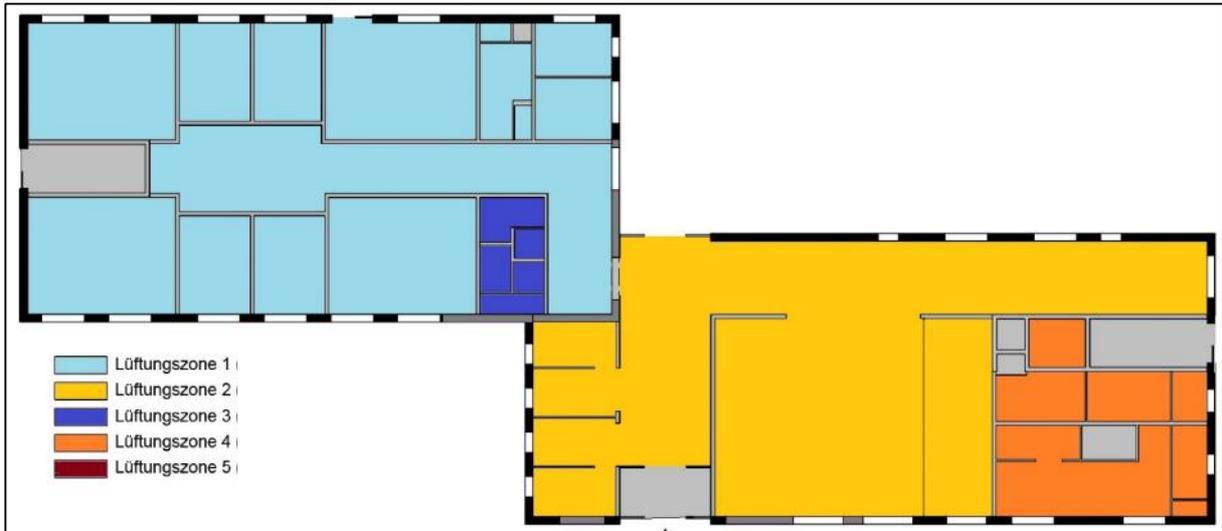


Abbildung II-47: Lüftungszonierung EG

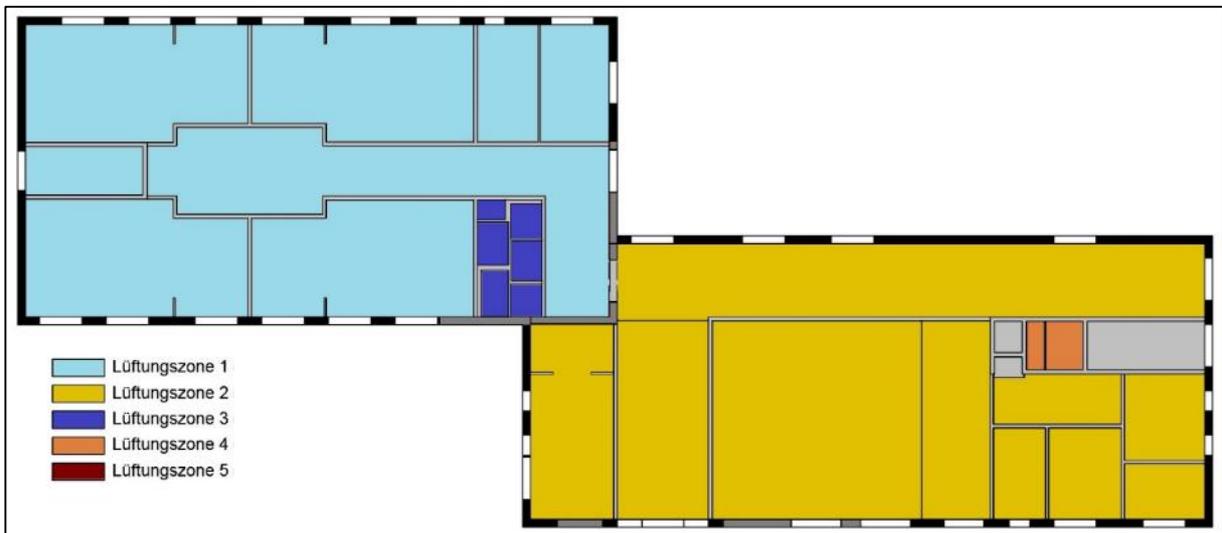


Abbildung II-48: Lüftungszonierung 1. OG

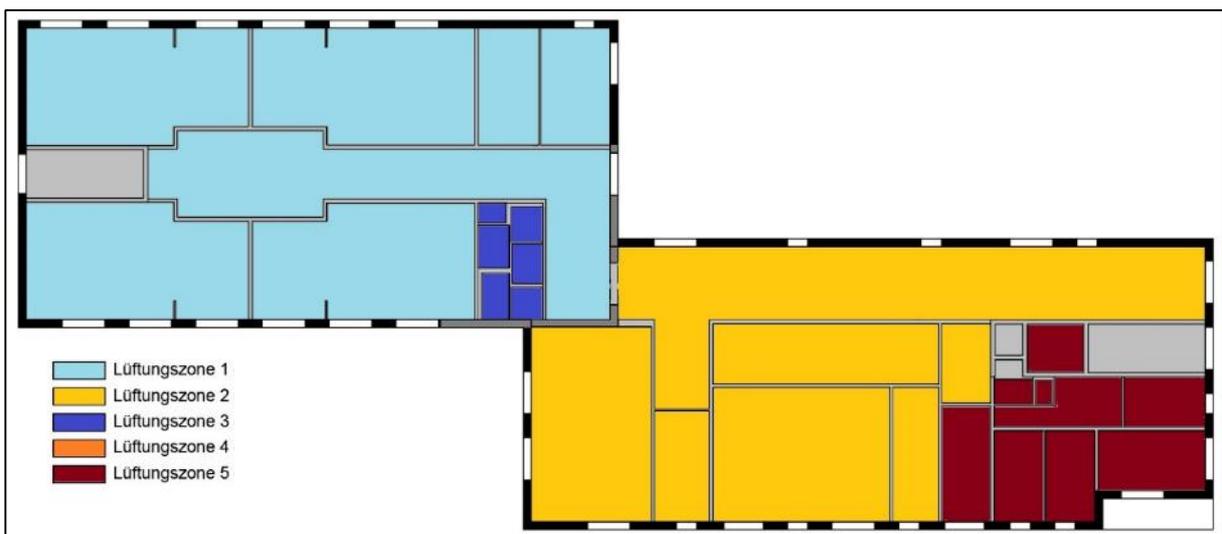


Abbildung II-49: Lüftungszonierung 2. OG

Jede der 5 Zonen ist in sich ausbalanciert, d.h. es gibt gleich hohe Zu- und Abluftvolumenströme, so dass es nicht zu Über- oder Unterdrücken im Gebäude kommt. Eine Ausnahme bilden die Lüftungszonen 1 und 3, die zusammen betrachtet ein Volumenstromgleichgewicht aufweisen. In der Lüftungszone 1 (Klassentrakt) herrscht ein Überschuss an Zuluft, welcher über die Abluftanlage in Zone 3 ausgeglichen wird.

In der Küche (Lüftungszone 4) können neben der Grundlüftungsanlage zwei Prozesslüftungsanlagen individuell zugeschaltet werden. Die Hausmeisterwohnung mit Lüftungszone 5 weist eine separate Wohnungslüftungsanlage auf.

Die Lüftungsanlagen übernehmen jeweils auch die aktive Heizfunktion – als Luftheizungen. Es gibt keine klassische Pumpenwarmwasserheizung mit Heizkörpern oder Flächenheizung in der Schule.

Die Luft wird in einem Erdreichwärmeübertrager vortemperiert. Die Lüftungszentralgeräte weisen jeweils eine Wärmerückgewinnung auf, die Zentralgeräte für die Zonen 1 und 2 auch eine Feuchterückgewinnung. Falls eine weitere Nacherwärmung notwendig ist, wird über zentrale Heizregister mit Fernwärme nachgeheizt. Nur in der Lüftungszone 5, der Hausmeisterwohnung werden abweichend raumweise elektrische Luftheizregister verwendet.

Tabelle II-13 fasst die Lüftungsgeräte und deren Nennvolumenströme zusammen.

**Tabelle II-13: Übersicht über die Lüftungsgeräte**

Zone	Gerät(e)	Gebäudeteil und Raumfunktion	Zuluft [m³/h]	Abluft [m³/h]
1	Menerga Resolair 640701	Klassentrakt (Gebäudeteil B, BTB): Klassenzimmer, Lehrerzimmer/Teamräume, Flure, Hort	7700	7380
2	Menerga Resolair 643001	Verwaltungstrakt (Gebäudeteil A, BTA): Aula, Kunst- und Werkraum, Raum der Stille, Verwaltungsräume, Lehrerzimmer, Flure, Umkleiden	10400	10400
3	Helios SVS 160 K	Klassentrakt (Gebäudeteil B, BTB): Sanitärräume, Putzmittel, Dusche	---	320
4	Paul Santos (F) 370 DC	Verwaltungstrakt (Gebäudeteil A, BTA): Sanitärräume, Küchentrakt (Grundlüftung)	319	319
	Helios SKR D 450/4/70/40	Zuluft Küche Kochblock	4000	4000
	Helios MBW 400/4 TK	Abluft Küche Kochblock		
	Helios KVW 250/4/50/30	Zuluft Spülküche	1500	1500
Helios MBW 200/4 TK	Abluft Spülküche			
5	Paul Santos (F) 370 DC	Verwaltungstrakt (Gebäudeteil A, BTA): Hausmeisterwohnung	214	214

## Messtechnik

Abbildung II-50 gibt einen grafischen Überblick der messtechnischen Ausstattung der zentralen RLT-Anlage "Klassentrakt". Die Messtechnik der RLT-Anlage "Verwaltungstrakt" ist vergleichbar. Die überwiegende Anzahl von Messeinrichtungen ist bauseits in den Zentralgeräten bereits vorhanden. In den untergeordneten Lüftungsanlagen werden nur die Ventilatoren messtechnisch überwacht. Auf Basis der Messtechnik erfolgt die Erstellung der Energiebilanzen und die Funktionsüberprüfung.

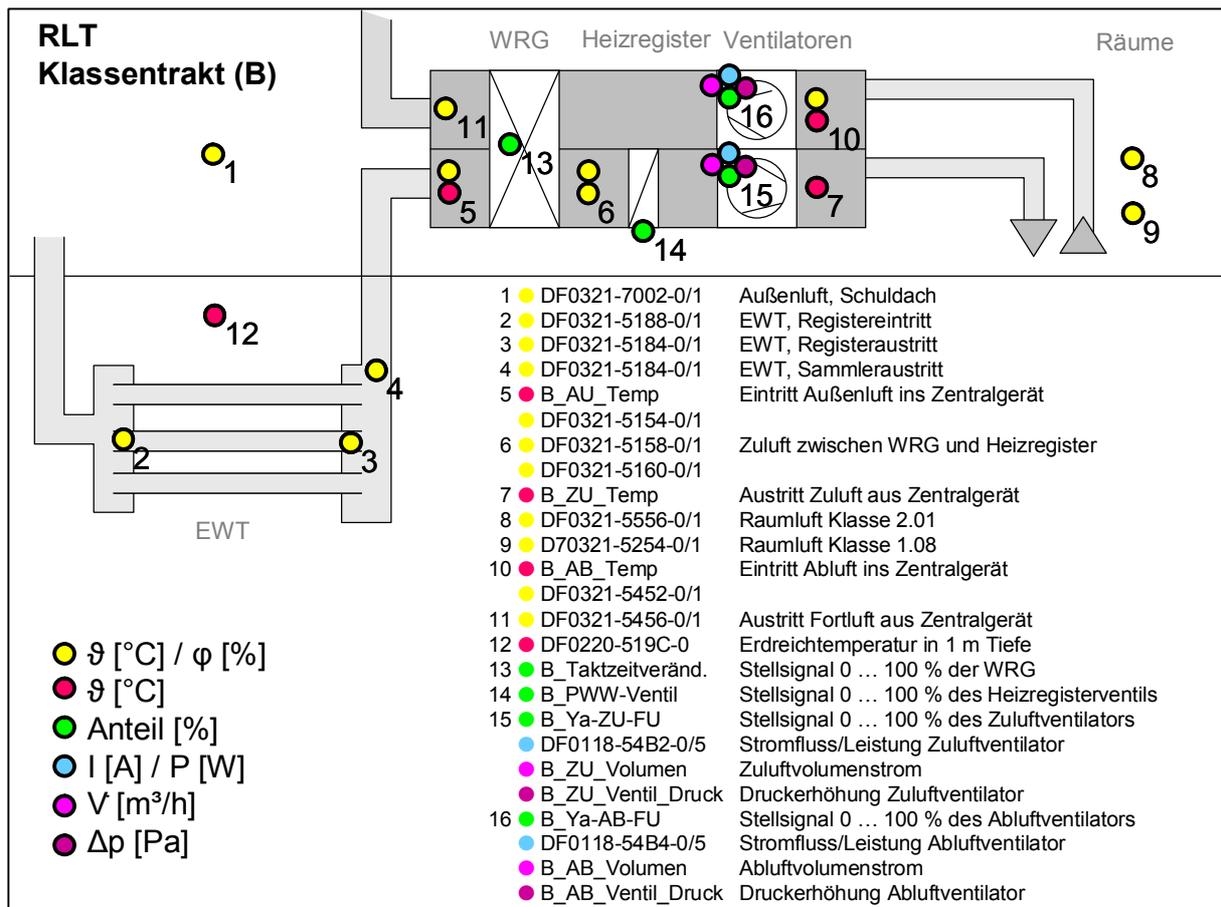


Abbildung II-50: Messpunkte in der RLT-Zentrale 2.03 Klassentrakt

## Luftmengenplanung

Die Klassenräume sind auf einen Volumenstrom von jeweils 480 m³/h ausgelegt. Das entspricht Luftwechseln von 1,8 ... 1,9 h<sup>-1</sup>. Damit liegt der personenbezogene Volumenstrom bei 18 ... 19 m³/h. Für die Büros, Verwaltung und andere büroähnliche Anwendungen wurde mit 30 m³/h je Person geplant.

Eine Kopplung der Lüftungsanlage mit den ohnehin vorhandenen Präsenzmeldern der künstlichen Beleuchtung wird in den 8 Klassenräumen und einigen Horträumen praktiziert. Es gibt jedoch keine Regelung, sondern nur zwei Zustände: Nennlüftung bzw. Totalabschaltung. Insbesondere die sehr gering frequentierten Horträume, der Kunstraum und die Lehrervorbereitungsräume würden ohne permanenten Zuluftvolumenstrom im Winter auskühlen. Daher sind in diesen Räumen reine Zeitschaltprogramme ohne Präsenzmeldereinbindung vorgesehen. Es ergeben sich dadurch jedoch deutlich höhere Luftwechsel als nach der Belegung notwendig wären.

Als Fazit ist festzuhalten: die exemplarische Überwachung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in zwei Klassenräumen zeigt, dass die Luftvolumenströme grundsätzlich ausreichend zur Wahrung einer guten Raumluftqualität gewählt wurden.

Bei den restlichen Klassenräumen sind aufgrund der ähnlichen Nutzung vergleichbare Ergebnisse zu erwarten. Die rein über Bewegungsmelder gesteuerte Zu- und Abschaltung der Lüftungsanlage – ohne bedarfsgeführte Regelung – hat in der St. Franziskus-Grundschule zu guten bis sehr guten Raumluftqualitäten geführt. Sie wird zur Nachahmung empfohlen und ist für eine Grundschule ausreichend.

Allerdings könnte der Betrieb energiesparender (Ventilatorenergie) sein. Würden die Lüftungs- und Heizfunktion entkoppelt, könnte in fast allen Räumen eine Präsenzsteuerung der Lüftung anstelle der reinen Zeitschaltprogramme realisiert werden.

In der Aula wurde mit  $15 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{Person})$  geplant und von einer sehr hohen Maximalanzahl von 430 Personen ausgegangen, die nur selten zu erwarten sind. Der Luftwechsel beträgt im Auslegungsfall daher  $5,8 \text{ h}^{-1}$ . Es ist eine  $\text{CO}_2$ -abhängige Anpassung des Volumenstroms vorgesehen, d.h. ausgehend vom Maximalwert wird heruntergeregelt, so dass eine  $\text{CO}_2$ -Konzentration von 1000 ppm nicht überschritten wird. Die Messwerte bestätigen diese Funktion.

In der Hausmeisterwohnung wurde mit  $53,5 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{Person})$  geplant. Das entspricht einem mittleren Luftwechsel von  $0,64 \text{ h}^{-1}$  in der Wohnung. Beide Werte sind als sehr hoch einzustufen. Über die planerischen Hintergründe der sehr großzügig bemessenen Lüftungsanlage in der Hausmeisterwohnung sind keine Informationen bekannt. Der Realbetrieb zeigt, dass die Anlage mit fast ganzjährig auf niedriger Stufe (ca.  $100 \text{ m}^3/\text{h}$ ) läuft und nur selten höhergeschaltet wird. Die erreichte Luftqualität wird nicht erfasst.

Die Luftvolumenströme der Küche ergeben sich aus Abwärmemengen der Küchengeräte und wurden separat im Rahmen der Küchenplanung ermittelt. Sofern die beiden Prozesslüftungsanlagen auf Nennlast in Betrieb sind, liegt der Volumenstrom bei  $5500 \text{ m}^3/\text{h}$  und der Luftwechsel ergibt sich zu  $22 \text{ h}^{-1}$ . Die Koch- und Spülhauben werden manuell vom Nutzer bedient. Die Grundlüftungsanlage führt zu einem Luftwechsel von  $1,2 \text{ h}^{-1}$ . Sie lief zunächst im Dauerbetrieb. Im Zuge der Lüftungsoptimierung wurde ein Betrieb von Montag bis Freitag, 5 ... 12 Uhr eingestellt. Die Prozesslüftung und die Grundlüftung erfüllen ihren geplanten Zweck. Es fehlte eine schriftliche Kurzanweisung für das Küchenpersonal. Sie wurde im Zusammenhang mit dem Monitoringprojekt erstellt.

### **Volumenstromregler**

Ein Großteil der Räume ist mit Volumenstromreglern (VSR) ausgestattet. Sie werden vom Hersteller mit einer vorprogrammierten Einstellung ausgeliefert. Es sind jeweils ein Minimal- und ein Maximalwert mechanisch oder elektronisch (je nach Modell) vorzugeben. Im Rahmen des Monitorings wurde ein Teil der VSR (ca. 25 Stück der elektronischen Regler) auf die korrekte Einstellung hin geprüft. Es zeigte sich, dass der eingestellte Maximalwert bei keinem der Regler dem Planwert entsprach und alle Regler zu hoch eingestellt waren.

Das ist als Fehler der Ausführung, aber auch des Planers bei der Abnahme anzusehen. Sofern möglich, wurden im Rahmen einer Optimierung im August 2018 alle Volumenstromregler des Klassentraktes auf die korrekten Werte eingestellt. Im Zuluftweg werden die Volumenströme nach der Einregulierung weitgehend erreicht. Allerdings reicht der Vordruck des Ventilators nur sehr knapp aus. Nur wenige Regler sind im Modus der Drosselung. Daher war auch vorher – mit falsch eingestellten Volumenstromreglern – keine Überversorgung eingetreten.

In der Abluftanlage wird allerdings in praktisch keinem Raum der Sollvolumenstrom erreicht. Die Differenz zur Zuluft ist mit 20 % vergleichsweise groß, so dass unklar bleibt, wo die Restmenge an Zuluft verbleibt. Das Phänomen wird im Zuge einer weiteren Lüftungsoptimierung in der Heizperiode 2018/19 geklärt und ggf. in diesem Zusammenhang auch der Ventilator- druck erhöht.

### **Bewertung des Erdwärmeübertragers**

Zur Luftvorerwärmung (im Winterbetrieb) bzw. Luftkühlung (im Sommerbetrieb) kommt ein Erdwärmeübertrager bzw. Erdwärmetauscher (EWT) zum Einsatz. Dieser besteht aus 650 m langen erdreichtauglichen, druckfesten Entwässerungsrohren mit glatten, schmutzabweisenden Innenoberflächen.

Der Erdwärmübertrager liegt vollflächig jeweils unter den Bodenplatten der beiden Gebäudeteile. Er ist in zwei Teile gegliedert und versorgt getrennt den westlichen Klassentrakt bzw. den östlichen Gebäudeteil mit Verwaltungstrakt, Küche und Hausmeisterwohnung.

Im Rahmen der Planung wurde eine Simulation der Erträge erstellt. Als Gesamtergebnis bei der Anlagen lässt sich festhalten: es wird eine winterliche Wärmeaufnahme aus dem Erdreich von 29,6 MWh/a prognostiziert; darüber hinaus erfolgt eine sommerliche Kühlung in Höhe von 1,2 MWh/a.

Die messtechnische Nachverfolgung liefert die Erkenntnis: die gemessenen Temperaturen nach dem Wärmeübertrager liegen im Bereich 2 ... 25°C. Im Winter wird somit die Frostsicherheit gewährleistet. Für den Klassentrakt ergibt sich eine maximale Temperaturerhöhung von etwa 5 K im Dezember sowie eine maximale Temperaturabsenkung von 3 K im Juni. Im Verwaltungstrakt liegen die sommerlichen Werte etwas darunter mit 2 K Temperaturabsenkung im Juni. Im Winter sind ebenfalls 5 ... 6 K Temperaturerhöhung festzustellen.

Abbildung II-51 zeigt die Ergebnisse der Energiebilanz. Insgesamt verbessern die Erdreichwärmübertrager die Energiebilanz des Gebäudes deutlich. Es werden im Winter 27,9 MWh/a Wärme passiv nutzbar gemacht, im Sommer sind es 18,0 MWh/a. Die Anlagen funktionieren wie geplant bzw. im Sommer sogar deutlich besser. Die prognostizierten Luftkühl- bzw. -vorwärmeeffekte konnten nachgewiesen werden.

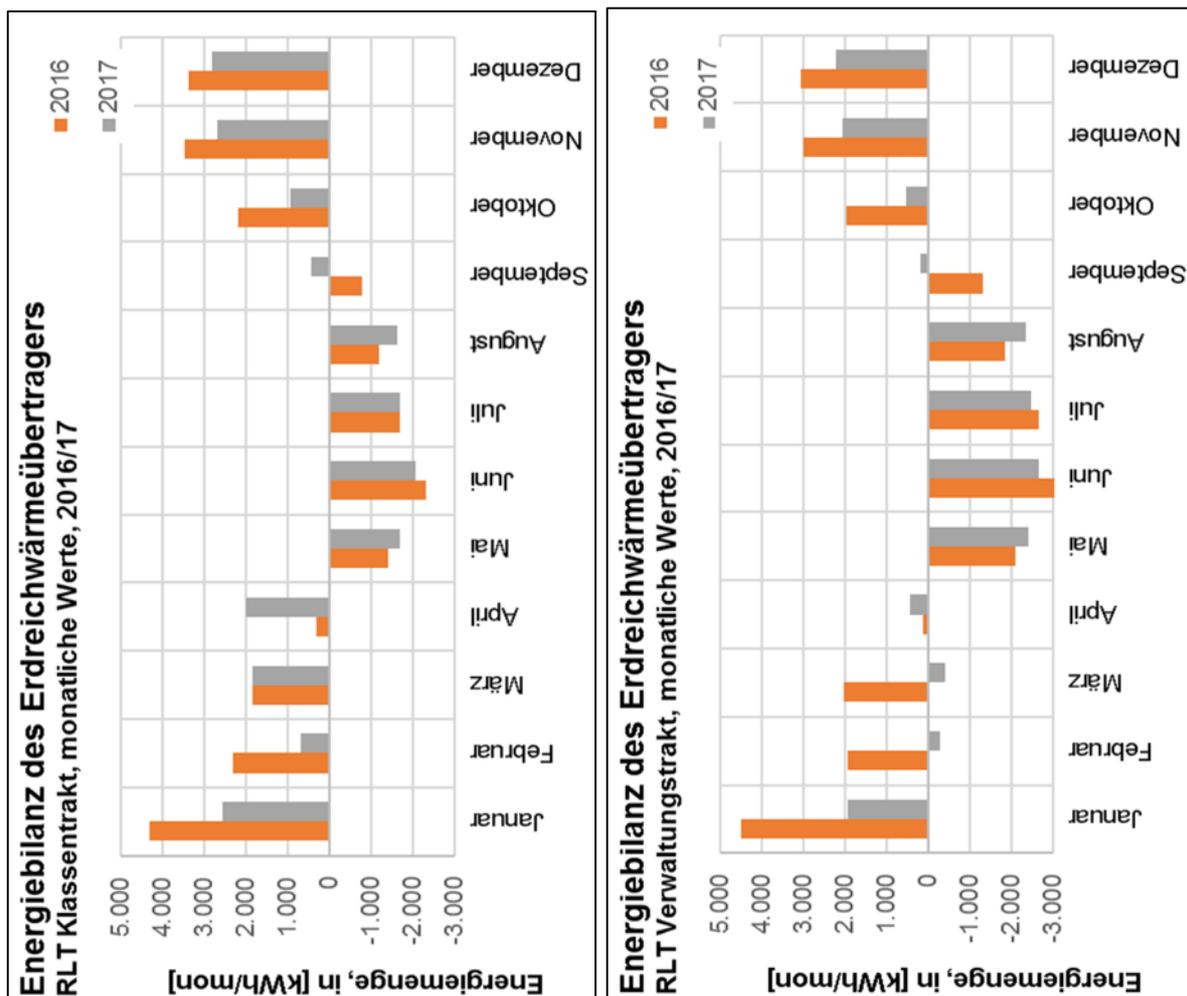


Abbildung II-51: Energiebilanz des Erdwärmübertragers

Die Investitionskosten beliefen sich incl. Baunebenkosten auf etwas mehr als 196.000 € für beide Anlagen.

Während der Installation ergab sich ein Wassereinbruch in den EWT. Da zu diesem Zeitpunkt die Rohre bereits nicht mehr frei zugänglich waren, musste noch vor der eigentlichen Inbetriebnahme eine aufwändige und teure Sanierung stattfinden. Die Reparatur des Wassereinbruchs führte zu weiteren knapp 221.000 €.

Da ein großer Teil der Investitionsmittel aus Fördermitteln stammt, kann die Anlage in der St. Franziskus-Grundschule wirtschaftlich betrieben werden. Allerdings sind künftige Kosten für die Wartung und Instandhaltung zu veranschlagen.

Es darf angesichts der Preisstruktur (Investitionskosten, Energiekosten, Wartung) jedoch geschlussfolgert werden, dass diese Art der regenerativen Luftkühlung bzw. -heizung für andere Schulträger wirtschaftlich uninteressant ist. Insbesondere eine Vortemperierung der Luft (keine Vollkühlung!) lässt sich beispielsweise mit Kompressionskälte deutlich günstiger erreichen. Unter Nutzung von Photovoltaikstrom ist ebenfalls eine voll- oder zumindest teilregenerative Kühlung zu erreichen. Ebenfalls gegen das Konzept spricht die sehr kostenintensive Schadensbeseitigung.

### Bewertung der Wärmerückgewinnung

Abbildung II-52 zeigt die mit der Wärmerückgewinnung in den Jahren 2016 und 2017 nutzbar gemachte Energie im Klassen- und Verwaltungstrakt. Im Mittel werden im Klassentrakt 42,9 MWh/a an Energie von der Abluft auf die Zuluft übertragen, im Verwaltungstrakt sind es 62,4 MWh/a. Im gleichen Zeitraum beträgt der witterungskorrigierte Fernwärmeverbrauch dieser Anlage nur 8,7 bzw. 16,9 MWh/a. Die Wärmerückgewinnung ist technisch und wirtschaftlich sinnvoll.

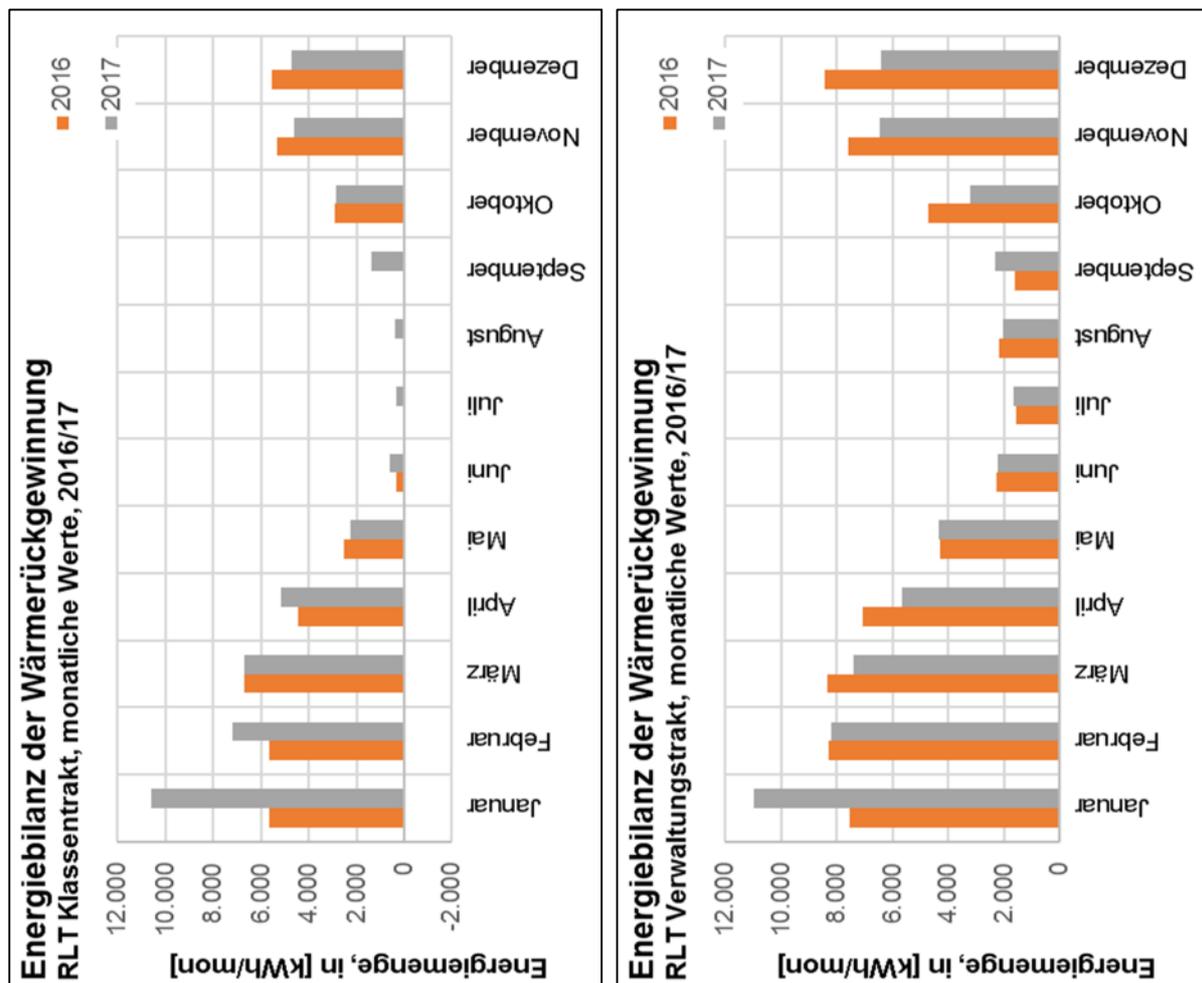


Abbildung II-52: Energiebilanz Wärmerückgewinnung, 2016/17

In den beiden Zentralgeräten der Fa. MENERGA erfolgt eine Wärmerückgewinnung durch Umschalt Speicher. Hierbei wird der Wärmeübertrager im Wechsel von kalter Außenluft und warmer Fortluft durchströmt. Die Wärme der Fortluft wird an die Speichermasse abgeführt und danach von der Außenluft aufgenommen. Der Vorteil ist, dass hierbei auch eine Feuchterückgewinnung erfolgt. Die Geräte verfügen laut Herstellerangaben über einen Temperaturwirkungsgrad von maximal 92 %.

Die messtechnische Untersuchung zeigt: es ist ein guter Zusammenhang zwischen der Taktzeitveränderung des Umschalt Speichers und dem Temperaturwirkungsgrad zu erkennen. Ein gemessenes Maximum liegt bei etwa 82 % in der RLT-Anlage "Klassentrakt". Für die RLT-Anlage "Verwaltungstrakt" sind maximale Temperaturwirkungsgrade um 85 % feststellbar. Die Regelung durch Änderung der Taktzahl des Umschalt Speichers ist gut messtechnisch nachweisbar. Die Herstellerwerte konnten nicht ganz erreicht werden, dennoch ist das Ergebnis zufriedenstellend.

Der Feuchtwirkungsgrad konnte in der RLT-Anlage "Klassentrakt" grundsätzlich bestimmt werden, jedoch ergeben sich keine interpretierbaren Ergebnisse.

### **Bewertung der Ventilatoren**

Im Rahmen des Monitorings wurden alle Kanalnetzrechnungen neu erstellt und die Ventilatorbemessung überprüft. Es zeigte sich, dass – bis auf die zu groß bemessenen Ventilatoren der Spülhaube – alle Anlagen passend dimensioniert sind.

Für die folgenden Anlagen liegen Messwerte zum Stromverbrauch der Ventilatoren und Nebenaggregate (Volumenstromregler, Schaltschränke, Frostschutz) vor:

- RLT Klassentrakt: 16,3 MWh/a, Klasse SFP3, 1128 bzw. 1163 W/(m<sup>3</sup>/s)
- RLT Verwaltungstrakt: 19,7 MWh/a, Klasse SFP3, 1256 bzw. 814 W/(m<sup>3</sup>/s)
- Wohnungslüftung: 0,95 MWh/a
- Küchengrundlüftung: 1,3 MWh/a
- Koch- und Spülhaube: 2,2 MWh/a

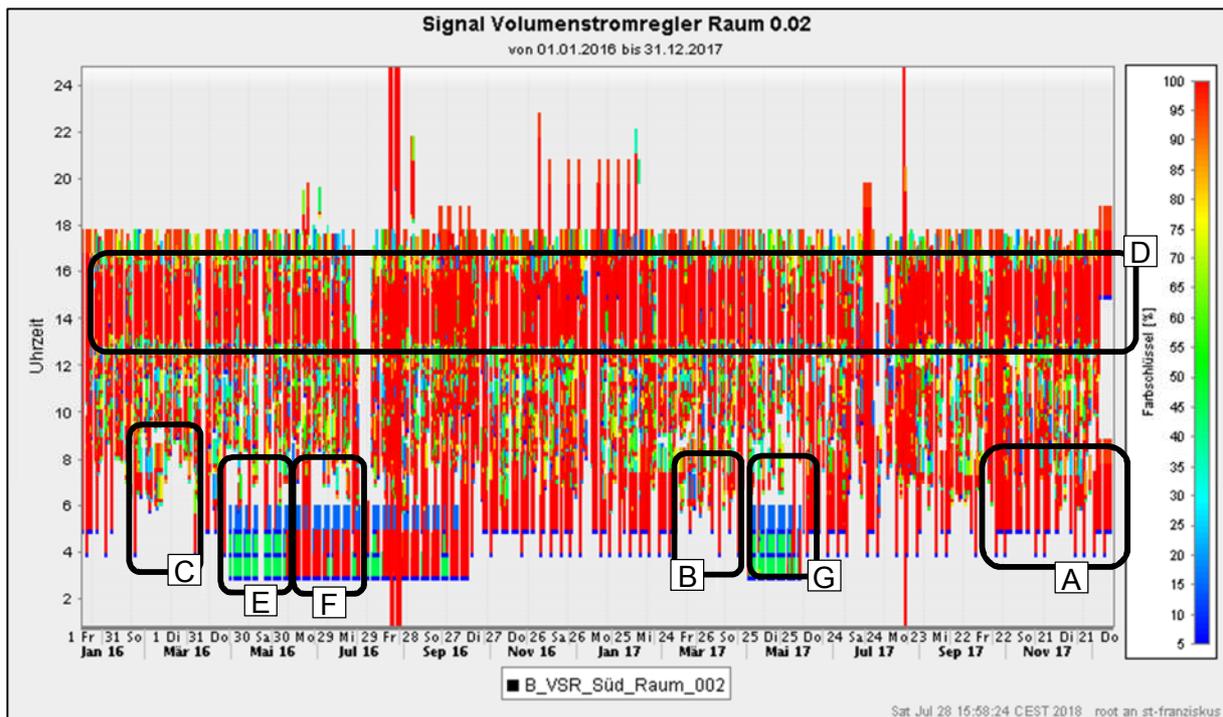
Die vier Ventilatoren der beiden Zentralanlagen entsprechen alle der Klasse SFP3 der DIN EN 13779. Die erreichte Effizienz entspricht etwa den Kennwerten des Referenzgebäudes der EnEV 2016. Die Messwerte sind besser als die Standardwerte der DIN V 18599, welche bei der Energiebilanzierung im Neubau verwendet werden, falls reale Randdaten nicht vorliegen.

Für die untergeordneten Lüftungsanlagen konnten – mangels messtechnischer Ausstattung – keine weiteren Kennwerte bestimmt werden.

### **Ergebnisse der Funktionsüberwachung und konzeptionelle Erkenntnisse**

Anhand der Messfühler können die verschiedenen Betriebsphasen der Lüftungsanlage untersucht werden: die Vorspül- und Aufheizphase der Räume, der Regelbetrieb sowie die sommerliche Nachtlüftung. Die Vorgänge werden nachfolgend anhand von Beispielräumen erläutert und bewertet. Basis sind Carpetplots für einen Hortraum und zwei Klassenzimmer.

Dargestellt ist das Stellsignal des Volumenstromreglers durch eine Farbintensität zwischen blau (5 % offen) bis rot (100 % offen). Auf der Abszisse X sind alle Tage nebeneinander dargestellt, auf der Ordinate Y die einzelnen Stunden eines Tages.



**Abbildung II-53: Volumenstromregler des Hortraums 0.02 – Märchenzimmer**

Abbildung II-53 zeigt die Ansteuerung des Volumenstromreglers im Märchenzimmer, einem der kleineren Horträume. Die Lüftung wird über Präsenzmelder angesteuert.

Um 4 Uhr (Mo) bzw. 5 Uhr (Di-Fr) läuft die Lüftungsanlage im Vollbetrieb an, alle Präsenzmelder werden in der Vorspül- und Aufheizphase übersteuert und voll geöffnet. Diese morgendliche Lüftungsphase dient u. a. der Sicherstellung von hygienischen Luftzuständen, bevor die Nutzer eintreffen. Schadstoffe, die sich im Laufe der Nacht evtl. angesammelt haben, werden abgeführt.

Ein Ende des Aufheizfalles und damit der Übergang zur normalen Betriebszeit ergibt sich im Klassentrakt getrennt zonenweise für die Nord- und Südräume. Sobald die Raumtemperatur im jeweiligen Referenzraum erreicht ist, ist in allen Räumen dieser Zone gemeinsam die Aufheizung beendet. Die andere Seite bleibt in Betrieb, bis hier ebenfalls die eingegebenen Temperatursollwerte erreicht werden. Der Hausmeister kann in Abhängigkeit von der Außentemperatur die zu erreichenden Sollraumtemperaturen in den Referenzräumen ändern.

Die Aufheizung des Märchenzimmers ist in vielen Wochen erkennbar (z.B. im Bereich A). In etlichen Wochen der Übergangszeit ist der Montag der einzige Aufheizmorgen; an den anderen Tagen der betreffenden Wochen reicht die Restwärme vom Vortag (siehe Bereich B).

Entgegen der Planung gibt es keinen festen Betriebsbeginn. Ursprünglich war dieser mit 6 Uhr (Hort) bzw. 8 Uhr (Klassen, Büros) vorgesehen und die Anlage sollte nach der Aufheizung komplett ausschalten. Das passiert nicht. Das Ende der Vorspül- und Aufheizphase ist in den Räumen mit Präsenzregelung gekennzeichnet durch eine Freischaltung der Bewegungsmelder, so dass die Volumenstromregler nun von diesen abhängig angesprochen werden.

Wenn zum Nutzungsbeginn immer noch keine Sollwerterreichung eingetreten ist, wird der Aufheizvorgang fortgeführt. Im Winter dauerte die Aufheizung oft bis nach 8 Uhr – vermutlich waren schon Personen abwesend. Dies sind die Zeiten, in denen Nutzerbeschwerden zu erwarten sind (Bereich A).

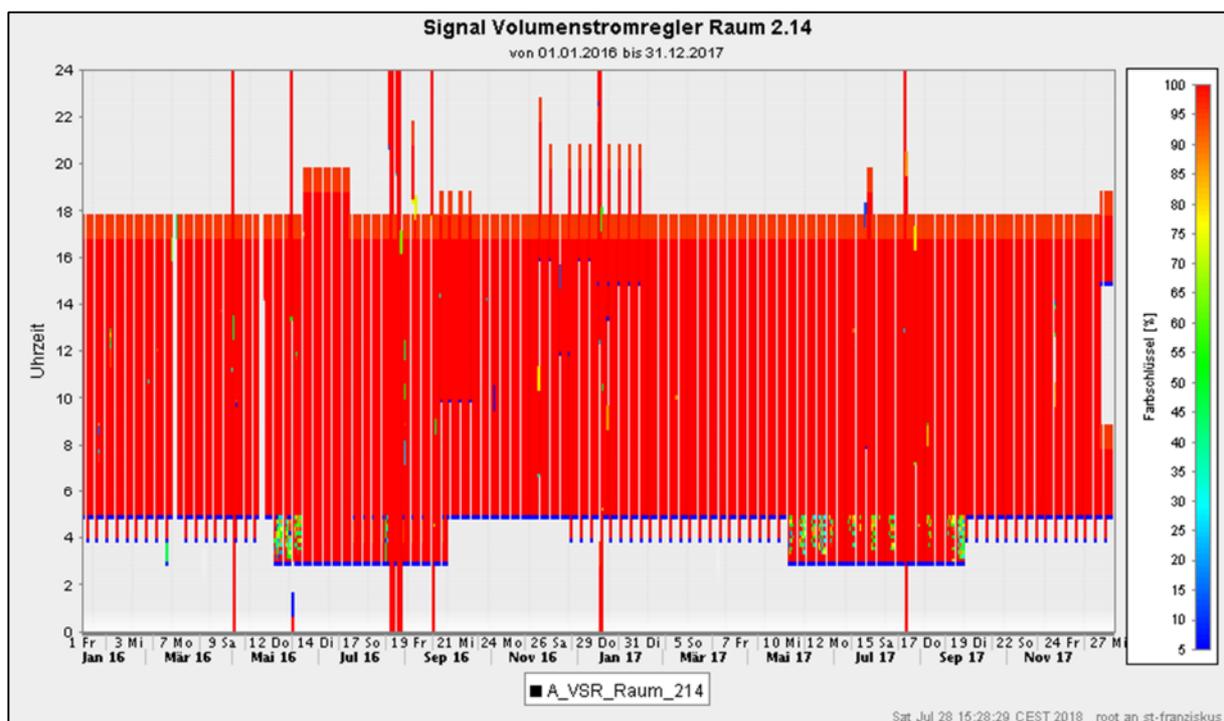
An den Tagen ohne morgendliche Aufheizung (Bereich C) ist der eigentliche Nutzungsbeginn erkennbar. Er liegt zwischen 6 und 8 Uhr mit dem ersten Auslösen der Bewegungsmelder. Die Hauptnutzungszeit ist erwartungsgemäß der Zeitraum 13 – 16 Uhr (Bereich D).

Eine Heizgrenze von 16°C, welche in der Planung vorgesehen war, gibt es nicht. Der morgendliche Aufheiz- und Lüftungsvorgang ist prinzipiell ganzjährig aktiv (je nach Notwendigkeit mit oder ohne Heizfunktion) und wird nur von der sommerlichen Nachtlüftung übersteuert. Sie ist in beiden zentralen RLT-Anlagen aktiv. In der RLT-Anlage "Klassentrakt" wurde sie unbeabsichtigt im Mai 2017 deaktiviert (Bereich G) und erst im Juni 2018 wieder aktiviert, als der Fehler im Rahmen der Optimierung auffiel.

Im Märchenzimmer ist erkennbar, dass die sommerliche Nachtlüftung in dem freigeschalteten Zeitfenster des Jahres nicht immer durchgeführt wird (Bereich E). Eine der Betriebsbedingungen ist nicht erfüllt, z.B. die Räume sind nicht überhitzt. Erst ab Juni wurde sie tatsächlich notwendig (Bereich F). Nach der Nachtlüftung erfolgte im Sommer häufig ein Schließen der Volumenstromregler, weil keine Personen anwesend waren. Wenn eine Nachtauskühlung stattgefunden hat, bleibt der Heizungsausgang der Anlage für drei Stunden gesperrt, so dass das Heizregister nicht angesprochen werden kann.

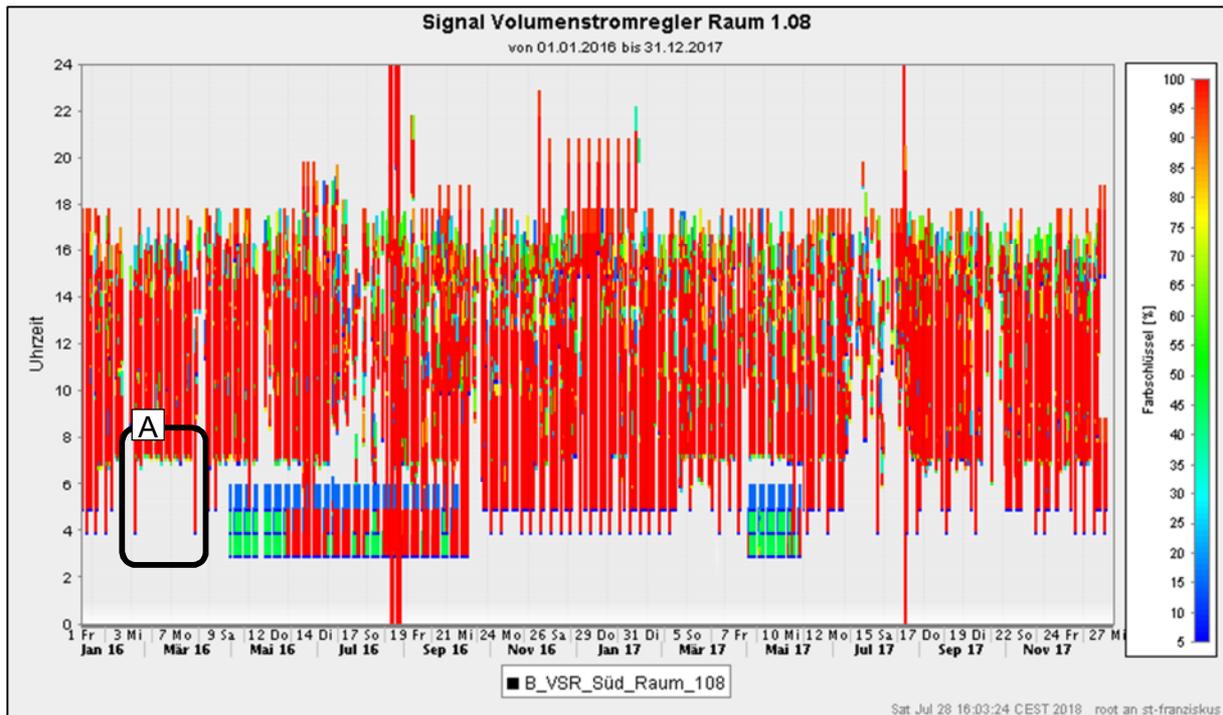
In den Räumen ohne Präsenzregelung sind die Start- und Endzeiten des Betriebs grundsätzlich identisch. Allerdings geht die Aufheizung bzw. die sommerliche Nachtlüftung fließend in die Betriebszeit über. Die Volumenstromregler sind und bleiben offen, siehe Abbildung II-54 am Beispiel des Kunstraumes.

Die nicht vorhandene Möglichkeit (bzw. umgesetzte Programmierung) einer Anlagenabschaltung nach der Vorspül- oder Aufheizungsphase ist energetisch nicht sinnvoll. Ist die Raumtemperatur erreicht und die Räume sind mit einem 2-fachen Luftwechsel durchspült (Dauer im Klassentrakt ca. 1 Stunde) könnte bis zum Eintreffen der Nutzer die Anlage ausgeschaltet oder in einen absoluten Minimalzustand versetzt werden.



**Abbildung II-54: Volumenstromregler des Kunstraumes 2.14**

Den Signalverlauf für einen der beiden intensiv überwachten Klassenräume zeigt Abbildung II-55. Die Erkenntnisse sind vergleichbar mit dem Hortraum.



**Abbildung II-55: Volumenstromregler des Klassenraumes 1.08**

Ungünstig ist, dass die Klassenräume morgens nicht durchlüftet werden, wenn kein Heizbedarf besteht und keine Nachtlüftung erfolgt ist (Bereich A). Das betrifft jedoch nur die Räume mit Präsenzregler. Wenn die ersten Nutzer eintreffen, wird erstmalig Frischluft zugeführt. Das widerspricht der Raumhygiene – wenn auch keine langen Zeiträume verstreichen, bis die frische Luft eintrifft. Im Rahmen der Lüftungsoptimierung wurde dieses Problem im Juni 2018 behoben. Die morgendliche Anfahrtschaltung beginnt in jedem Fall mit einer Lüftungsphase.

Die zeitlichen und regelungstechnischen Abläufe im Verwaltungstrakt sind vergleichbar. Der Verwaltungstrakt ist bei der Aufheizung jedoch nicht in Zonen geteilt. Ein bei der Lüftungsoptimierung (des Klassentraktes) im Juni 2018 am Rande erkanntes Problem ist: die Regelung setzt für die Aula Raumtemperatur- und Zulufttemperatursollwert gleich, wodurch der Raum-sollwert nie erreicht werden kann. Dadurch kommt es zu unnötigen Betriebszeiten und damit einhergehend zu unnötigen Energieverbräuchen (Ventilatorstrom und Heizenergie). Dies soll im Zuge einer weiteren Optimierung im Winter 2018/19 behoben werden.

In weiten Teilen der St. Franziskus-Grundschule werden einheitliche Zulufttemperaturen verwendet, die für alle Räume der jeweiligen Lüftungszone identisch sind. Insbesondere der Klassentrakt incl. Hort fällt darunter. Eine Unterscheidung zwischen nach Norden bzw. nach Süden orientierten Klassenräumen wurde nicht getroffen. Der erste Fachplaner war davon ausgegangen, dass die solaren Wärmegegewinne im Süden durch die Lüftungsfunktion der Kastenfenster sehr gering ausfallen bzw. durch die Verschattung weitestgehend eliminiert werden können [47]. Auch sehr frühe Hinweise des Monitoring-Teams auf andere Projekte mit negativen Erfahrungen änderten die Planung nicht [2]. Es kam und kommt im Betrieb zu Problemen mit der Behaglichkeit. Der ursprüngliche Fachplaner war an der Umsetzung von Verbesserungsvorschlägen und nachträglichen Optimierung des Betriebs nicht beteiligt, da er bereits während der Bauausführung Insolvenz angemeldet hatte.

Temperaturunterschiede zwischen Nord und Süd sowie unterschiedlichen Raumnutzungsarten können nur durch eine gute thermische Kopplung der Räume untereinander – hier: Öffnen der Türen – kompensiert werden. Dies wird in Teilen in der St. Franziskus-Grundschule praktiziert, indem auch während des Unterrichts alle Türen zum Flur offenstehen. Allerdings ist dieses aus der Not heraus geborene Konzept nicht geeignet für alle Räume (Lehrerzimmer, Verwaltung) und auch nicht zur Nachahmung bei anderen Schulen empfohlen.

Es kann in den Zentralgeräten zwischen einer Zuluft-Konstant-Regelung oder einer Zuluft-Kaskadenregelung gewählt werden. In beiden RLT-Anlagen war von der Inbetriebnahme bis Juni 2018 die Zuluft-Konstant-Regelung aktiviert. Die Sollwertvorgabe erfolgt durch den Hausmeister (als Reaktion auf Nutzerbeschwerden). Dies ist im Klassentrakt nicht praktikabel und auch nicht zur Nachahmung in anderen Objekten empfohlen.

Die im Zuge der Lüftungsoptimierung im Juni 2018 in Betrieb genommene Zuluft-Kaskadenregelung wird als sinnvoller erachtet, um die Beheizung insgesamt an die Witterung anzupassen. Anhand der Raumtemperaturen (nördlicher und südlicher Referenzraum) wird der Sollwert der Zulufttemperatur abgesenkt oder angehoben. Diese Art der Regelung vermindert allerdings nicht das Problem der Ungleichbeheizung, welches sich durch die Zusammenfassung des gesamten Klassentraktes zu einer Lüftungszone ergibt.

Es ergibt sich folgendes Fazit zur Vermeidung der genannten Probleme (ungleichmäßige Beheizung der Räume, Lüftung trotz nicht anwesender Nutzer über lange Zeiten):

- eine Entkopplung von Heizung und Lüftung ist empfehlenswerter als das untersuchte Luftheizungskonzept,
- alle Räume der Hauptnutzung könnten dann konsequent mit Volumenstromreglern ausgestattet werden, so dass kein unnötiger Volumenstrom bei Nutzerabwesenheit entsteht,
- alle Flure und Nebenräume würden dauerhaft durchlüftet, aber auf sehr viel geringerem Niveau, weil der Volumenstrom sich nicht nach dem Heizbedarf richten müsste,
- eine Übersteuerung für die Zeit einer gebäudeweiten Vorspülung kurz vor Eintreffen der Nutzer könnte erfolgen – anhand der Volumenstromregler auch zeitlich gestaffelt für Hort, Büro und Klassenräume,
- mit raumweise notwendigen Heizflächen (Heizkörpern) ließe sich in jedem Raum eine Einzelraumregelung realisieren.

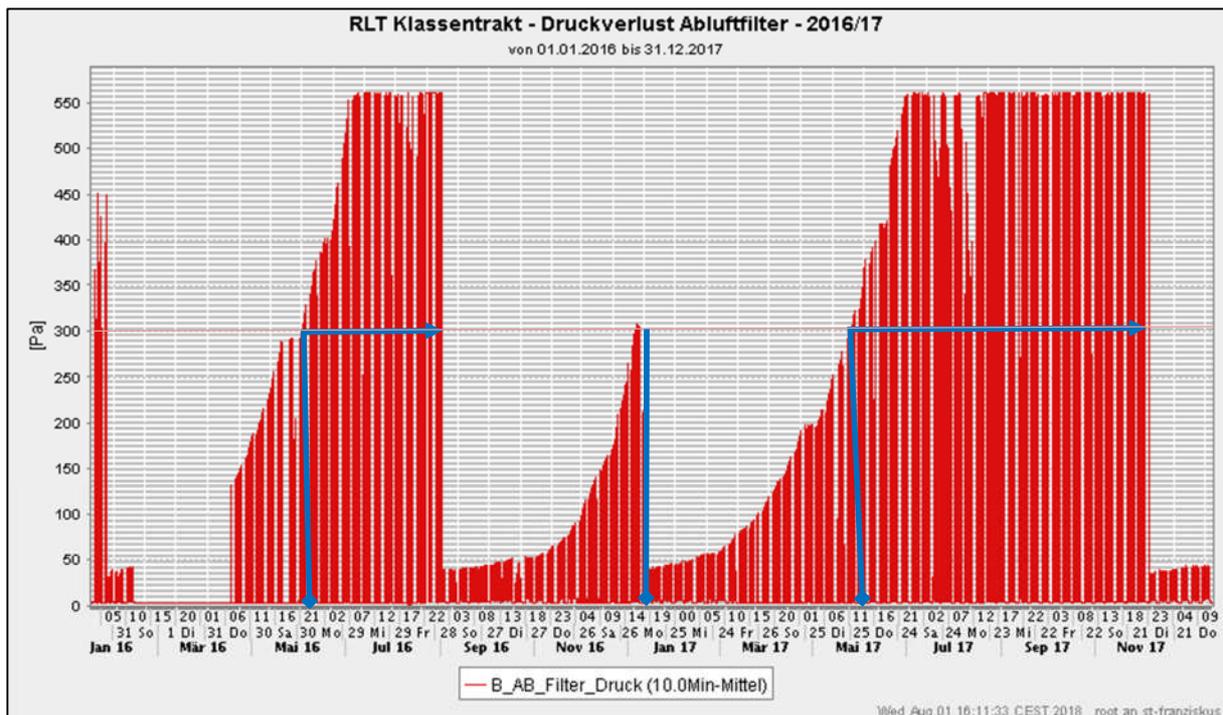
Dies entspricht den Empfehlungen zum wirtschaftlichen Bauen der Stadt Frankfurt am Main (u.a. für Schulen in Passivhausbauweise) [53].

Die sommerliche Nachtlüftung hingegen kann – wie in der St. Franziskus-Grundschule erfolgt – so auch in anderen Schulen praktiziert werden. Die Auswertung der Aula sowie des Flures im Verwaltungstrakt zeigt: es wurden Temperaturabsenkungen von 3 K (Flur) bis 6 K (Aula) erreicht. Die Nachtkühlung funktioniert sehr gut, dennoch wurde sie im Zuge der Lüftungsoptimierung noch zeitlich ausgedehnt. Bis Mitte 2017 war sie im Zeitraum 3 bis 4 Uhr (Mo) bzw. 5 Uhr (Di-Fr) in den Monaten Mai – August aktiv. Seit Juni 2018 ist sie an Wochentagen zwischen 1 und 5 Uhr aktiv geschaltet. Der Zeitraum mit aktiver Nachtlüftung wurde verlängert von April bis Oktober.

### **Druckverluste der Filter**

Die Druckverluste aller Filter sowie die Grenzwerte bis zu einer Fehlermeldung werden im Monitoring permanent erfasst, beispielhaft siehe Abbildung II-56. Der erste Filterwechsel im dargestellten Zeitraum wurde per Fehlermeldung Anfang Juni 2016 gemeldet. Der neue Abluftfilter wurde 3 Monate später eingebaut. Der zweite Tausch erfolgte zeitnah. Beim dritten Mal dauerte es 5 Monate. Jeweils etwa 1 Monat nach der ersten Fehlermeldung kam die Anlage an ihre Grenzen und der Druck wurde nicht weiter erhöht. Dies führt zu einer Verminderung des geförderten Volumenstroms.

Im Lauf der Zeit ergibt sich mit der Verschmutzung ein immer höherer Druckverlust, zusammen mit dem Abluftvolumenstrom eine Steigerung der anteiligen hydraulischen Leistung (die der Ventilator erzeugt) und damit der elektrischen Leistung (die er aufnimmt). Es kann daher anhand der Filterkosten bestimmt werden, bis zu welchem Grenzdruckverlust dieser in der Anlage bleiben darf. Für die Abluftfilter der RLT-Anlagen in Halle ergeben sich 220 Pa.



**Abbildung II-56: Druckverlust Abluftfilter – RLT Klassentrakt**

Unter den Randdaten der St. Franziskus-Grundschule ergibt sich folgende Handlungsweise, die dem Hausmeister über ein Merkblatt kommuniziert wurde: drei Mal im Jahr wird in der Klassentraktanlage somit künftig der Abluftfilter gewechselt (alle ca. 1100 Betriebsstunden), halb so häufig der Filter in der Verwaltungstraktanlage (alle ca. 2500 Betriebsstunden). Außenluft- und Zuluftfilter werden einmal jährlich getauscht werden; das entspricht der bisherigen Praxis des Hausmeisters.

### **Abweichung Planung/Ausführung und Dokumentation**

Zunächst ist festzuhalten, dass die Lüftungsregelung aller Anlagen grundsätzlich in der Lage ist bzw. wäre, alle Regeloptionen und Funktionen abzubilden, die vor Errichtung des Gebäudes gewünscht waren. Allerdings wurde dies zwischen Planung und Ausführung sowie zwischen Ausführung und Anlagenhersteller nicht genügend kommuniziert. Nur ein Teil der Reibungsverluste ist auf die Insolvenz des ersten Planers zurückzuführen.

Teils weichen die von den verschiedenen Stellen kommunizierten Sollfunktionen, Sollwerte und Zeitschaltprogramme jeweils deutlich voneinander ab. Das betrifft die Aussagen der Planer, der Ausführung und die gegebenen Anlagenbeschreibungen der Hersteller.

Die Regelungsbeschreibung der Fa. MENERGA ist sehr gelungen und musste nur an einer Stelle korrigiert werden. Für die anderen Anlagen liegen keine auf das Projekt hin personalisierten Beschreibungen (mit Angaben von Zeitprogrammen, Sollwerten, konkreten Umschaltbedingungen u. ä. aus der Inbetriebnahmephase) vor. Dies ist bei der Baubegleitung künftiger Projekte besser zu gestalten. Hilfen gibt u.a. die Stadt Frankfurt am Main in ihrem Leitfadens zum wirtschaftlichen Bauen [53].

Wie im EnEff:Schule-Projekt Cottbus ebenfalls festzustellen ist, das Thema Lüftung ist so komplex, dass vor Ort eine kompetente Betreuung unerlässlich ist. Der Hausmeister muss eine tiefgehende Einweisung erhalten, im optimalen Falle aus einer technischen Fachrichtung kommen oder sich persönlich für die technischen Belange interessieren.

Weitere detaillierte Informationen zur Lüftungstechnik sind **Abschlussbericht Teil 7** zu entnehmen.

## II.1.8 Solarthermie und Latentwärmespeicher

### Systembeschreibung Solarthermie

Für die Trinkwassererwärmung sind als Zentralgeräte eine Solarthermieanlage mit Pufferspeicher (Nutzer: Küche), einem Trinkwasserspeicher (Nutzer: Hausmeister) sowie mehrere Nachheizungen über Strom oder Fernwärme vorhanden. Abbildung II-57 zeigt eine Prinzipskizze mit den wesentlichen Komponenten.

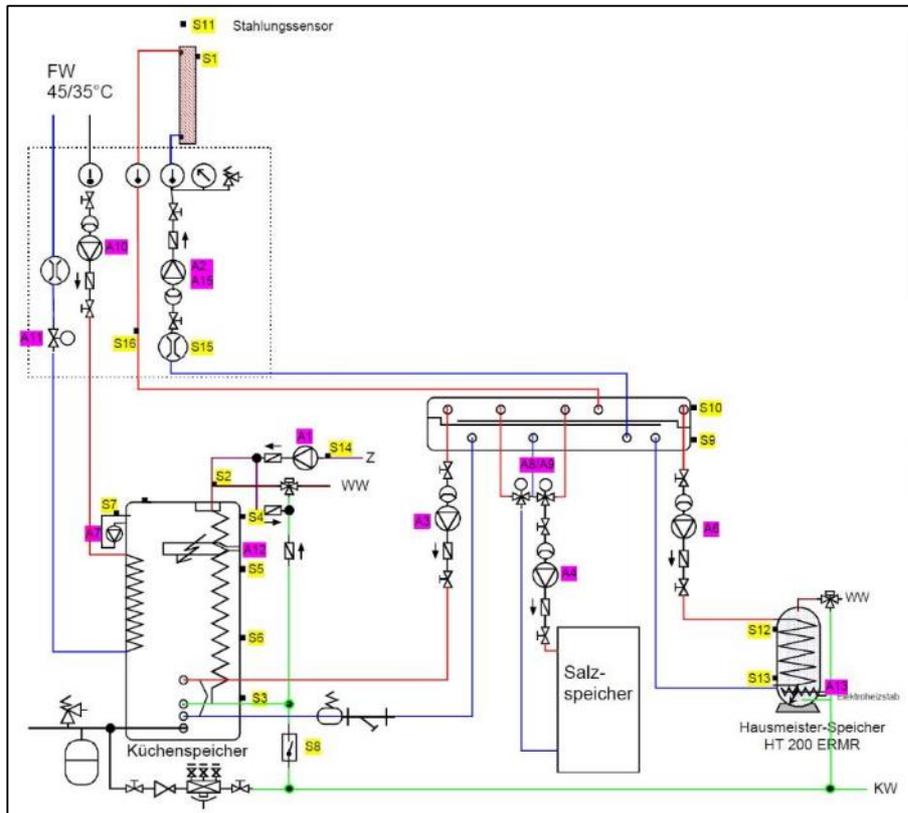


Abbildung II-57: Hydraulikschema nach [54]

In der südlichen Fassade des Gebäudes sind senkrecht 36 m<sup>2</sup> (brutto) Solarthermiekollektoren angeordnet. Sie bilden drei Kollektorfelder links und rechts vom Eingang. In dem Kollektorfeld strömt eine Mischung aus Wasser und Frostschutzmittel als Solarfluid.

Das System weist darüber hinaus einen zentralen Verteiler und Sammler auf, an dem drei Speicher angeschlossen sind.

Der größte Abnehmer ist der Küchenspeicher. Der Speicher hat ca. 2000 l Fassungsvermögen und ist als Pufferspeicher ausgebildet, der das Solarfluid bevorratet. Eine Trinkwassererwärmung erfolgt über einen innenliegenden Wärmeübertrager. Der zweite Abnehmer ist der Hausmeisterspeicher mit 200 l Volumen. Das Solarfluid erwärmt über einen innenliegenden Wärmeübertrager das im Speicher befindliche Trinkwasser. Der letzte Abnehmer ist ein Latentwärmespeicher – hier ein Salzhydratspeicher, in dem weitere Wärme eingelagert werden kann. Er hat eine latente Wärmespeicherkapazität von 128 kWh. Das entspricht etwa dem Küchenspeicher.

Die drei Kreise sind so geschaltet, dass bei Anfall von Solarwärme die Küche den Vorrang hat, dann der Hausmeisterspeicher geladen wird und nur bei weiterem Überschuss der Latentwärmespeicher benutzt wird.



**Abbildung II-58: Ansicht Solarwand mit den 3 Kollektorfeldern (Foto: HS MD)**

Das vorgewärmte Trinkwarmwasser aus dem Hausmeisterspeicher (im Erdgeschoss) wird in der Hausmeisterwohnung (im 2. Obergeschoss) mit Durchlauferhitzern nacherwärmt. An der Zapfstelle wird jeweils 60°C erreicht, egal wie hoch die Solarthermieanlage das Wasser vorwärmen konnte. Einmal in der Woche erfolgt auch im Speicher eine elektrische Nachheizung zum Legionellenschutz.

Der Küchenpufferspeicher versorgt im Wesentlichen die Spülmaschine. Sollte die Solarthermieanlage keine Erwärmung auf 60°C möglich machen, erfolgt eine Nachheizung mit Fernwärme (nicht in Betrieb) oder Strom.

### **Energiebilanz nach Messung und Simulation**

Der Ertrag des Kollektorfeldes liegt in den drei Untersuchungsjahren 2015 bis 2017 bei 6900 kWh/a, 7100 kWh/a und 6400 kWh/a. Die zugehörigen Globalstrahlungen gibt der Deutsche Wetterdienst mit 1130 kWh/a, 1050 kWh/a und 1050 kWh/a an [55]. Der Strahlungsdurchschnitt für Halle liegt bei 1050 kWh/a [55]. Damit sind die Jahre 2016 und 2017 durchschnittlich, was das Solarangebot angeht. Im Jahr 2015 war die Solarstrahlung 8 % höher. Der simulierte Solarertrag liegt bei knapp 6700 kWh/a und etwas unter den Messwerten.

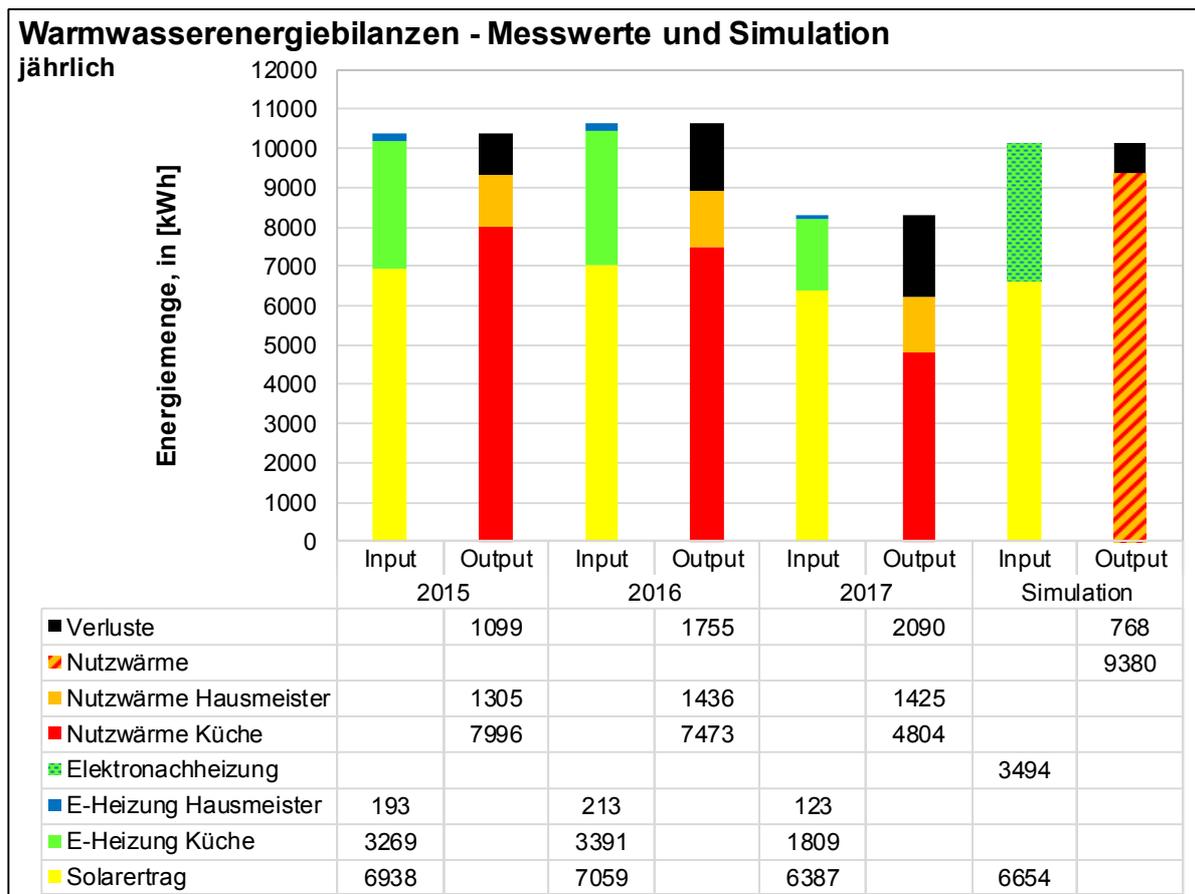
Der Ertrag des ersten Betriebsjahres hätte daher etwas höher ausfallen können. Da aber insbesondere auch die Lage der Sommerferien von Relevanz ist, besteht keine erkennbare Korrelation zwischen Strahlungsangebot und Kollektorertrag. Wohl aber ist die sinkende Nutzwärmemenge im Jahr 2017 zu erkennen. Sie führte dazu, dass deutlich weniger Solarenergie nutzbar gemacht werden konnte. Trotz gleichen Strahlungsangebotes sank der Kollektorkreis-ertrag um etwa 10 %. Es ergab sich mehr ungenutztes Solarangebot.

Der Ertrag je Kollektorfläche liegt bei 214 kWh/(m<sup>2</sup>a) bezogen auf die Aperturfläche bzw. bei 163 kWh/(m<sup>2</sup>a) bezogen auf die Bruttokollektorfläche. Damit liegt er etwas über der Simulationsprognose.

Der elektrische Nachheizbedarf wird auf 3500 kWh/a in der Simulation beziffert und mit 3500 ... 3600 kWh/a gemessen.

Die Verluste werden in der Simulation mit knapp 800 kWh/a ausgewiesen. Die Messwerte liegen an dieser Stelle höher. Sie können anhand der Herstellerkennwerte der Speicher plausibilisiert werden. Eine Dauerverlustleistung von 169 W (beide Speicher unter angepassten Temperaturen) ergibt innerhalb eines Jahres eine Energiemenge von 1480 kWh/a. Die Verlustleistungen der Rohre könnten ähnlich bestimmt werden. Es wird darauf verzichtet, denn der Messwert für die Jahre 2015 bis 2017 belaufen sich auf im Mittel 1650 kWh/a und werden als plausibel eingeschätzt.

Die der Simulation zugrundeliegende Nutzenergiemenge entstammt der Messung, daher sind die Werte nahezu identisch. Allerdings ist der Wechsel des Küchenbetreibers ab Mitte 2017 in den Messwerten deutlich zu erkennen. Es wird weit weniger Warmwasser benötigt. Abbildung II-59 zeigt die Jahresbilanzen.



**Abbildung II-59: Jahresbilanzen – Messwerte und Simulation**

Insgesamt kann daher festgehalten werden, dass die Simulation nachvollziehbare Ergebnisse liefert, solange die Nutzwärmemenge korrekt vorgegeben wird. Sogar die Tatsache, dass in der Realität eine 5-Tage-Woche gegeben ist (für die Küche), aber eine 7-Tage-Woche simuliert wurde, verfälscht das Ergebnis nicht nennenswert. Lediglich die technischen Verluste – insbesondere des Speichers – werden unterschätzt.

### Latentwärmespeicher

Aus Sicht des Monitorings wurden während der Planungs- und Ausführungsphase mehrfach die Bedenken geäußert, dass der Latentwärmespeicher für das Ziel der Nullemission nicht maßgeblich notwendig sei. Zudem wurde das Kollektorfeld auf die Wassermenge der Küche hin bemessen, so dass keine nennenswerte solare Überschusswärme vorhanden sein werden. Dies haben die Messwerte bestätigt.



**Abbildung II-60: Eingangsluke zum unterirdischen Speicherraum, Speicherzellen**

Die Beladung des Speichers hat 2016 nur einmal ausgelöst: am Freitag, 15.04. um 15:24. Allerdings nur für 12 Minuten. Es ist davon auszugehen, dass es nicht zu einer Vollladung kam, da dazu 3 Stunden notwendig sind. Entladungen sind im selben Jahr nicht zu erkennen. Im Jahr 2017 gab es keine Auslösung.

Der Salzhydratspeicher arbeitet vermutlich grundsätzlich korrekt, wie aus den Daten der Inbetriebnahme zu schließen ist. Auch das gewählte Konzept, alle 16 Zylinder einzeln starten zu können und so in Dosen von 8 kWh zu entleeren ist nachvollziehbar und sinnvoller als in der Planungsphase vermutet. Die Bedenken, zu viel Wärme auf einmal auszulösen, konnten damit ausgeräumt werden.

### **Anlagenhydraulik und Betriebsverbesserungen**

Grundsätzlich ist der Solarbetrieb aus technischer Sicht als zufriedenstellend einzuschätzen. Die Zeitschaltprogramme sind nachvollziehbar, die Zeitprogramme auf den Bedarf optimiert, der Pufferspeicher geschichtet. Ein nennenswertes Problem ergibt sich lediglich aus der Nachheizung des Pufferspeichers mit Strom.

Die St. Franziskus-Grundschule ist über einen Wärmeübertrager im Rücklauf des Elisabeth-Gymnasiums eingebunden (Reihenschaltung, Regelbetrieb). Eine Umschaltung auf den Vorlauf (Parallelschaltung) ist möglich. Der Regelbetrieb ist gekennzeichnet von einer Auslegung auf 45/35°C auf der Abnehmerseite. Die Nachheizung des Solarpufferspeichers könnte grundsätzlich mit Fernwärme erfolgen. Allerdings ist unter den geschilderten Randdaten keine nennenswerte Erwärmung des Puffers zu erwarten, da die Temperaturen zu gering sind.

Anhand der Messwerte ist daher erkennbar, dass von 2015 bis 2017 keine Puffererwärmung mit Fernwärme stattfand. Es fehlt an einer – bedarfs- oder zeitgesteuert herbeigeführten – Umschaltung in den Parallelbetrieb mit hohen Fernwärmeparametern. Die technischen Gegebenheiten für eine Umschaltung auf Hochtemperaturbetrieb (z. B. 70/50°C) sind vorhanden.

Ein Vorschlag für ein Zeitschaltprogramm wurde im Rahmen einer Masterarbeit erarbeitet [22]. Zunächst wurden die Zeitfenster festgestellt, in denen besonders großer Nachheizbedarf besteht – erkennbar an der zeitlichen Verteilung der Elektroenergie. Anschließend wurde abgeschätzt, welche Leistungserhöhung sich ergibt, wenn die Fernwärme mit 70/50°C zur Verfügung steht. Das im Pufferspeicher vorhandene Nachheizregister wurde auf Systemtemperaturen von 45/35°C ausgelegt. Die Leistungserhöhung verkürzt die notwendige Ladezeit und damit das Zeitfenster für eine Umschaltung.

Folgende Zeitfenster ergeben sich als Empfehlung für die Umschaltung der Fernwärme auf Hochtemperaturbetrieb: 6:00-6:40 und 11:50-13:50 Uhr. Eine Totzeit von 10 Minuten zwischen Elisabeth-Gymnasium bis zum tatsächlichen Ladebeginn sind berücksichtigt.

Die geplante Umschaltung kollidiert zeitlich nicht mit den morgendlichen Wiederaufheizphasen für die beiden Schulen, die dann bereits abgeschlossen sind. Allerdings ist festzustellen, dass die erhöhten Vorlauftemperaturen in den Umschaltzeiten die Nachheizung der Luftheizregister beeinflussen werden. Da diese ebenfalls mit 45/35°C projektiert sind, ergibt eine Vorlauftemperaturerhöhung auf 70°C sehr geringe Volumenströme. Die Regelventile sind dann deutlich überdimensioniert und müssen stark schließen.

Es wird vorgeschlagen, die Verbesserung der Hydraulik in die Realität umzusetzen, wenn die Turnhalle errichtet wird. Da die Turnhalle hinsichtlich der Wärmeversorgung ebenfalls im Rücklauf des Elisabeth-Gymnasiums angeordnet ist, muss das Umschaltproblem spätestens dann ohnehin gelöst werden. Auch dort werden Speicher zum Einsatz kommen, die voraussichtlich zwischen 15 und 18 Uhr geladen werden müssen.

### Wirtschaftliche Bewertung

Die Kosten des Solarsystems incl. Speicher und Kollektorfeld (jedoch ohne Salzhydratspeicher) belaufen sich auf 87.500 €. Ohne Berücksichtigung von Zinsen liegt die jährliche Rate für 20 Jahre Lebensdauer bei 4.375 €/a.

Die Energiemengen ergeben sich aus der gemessenen Bilanz. Zur wirtschaftlichen Einordnung des Systems müssen Energiepreise für Fernwärme, Stromeinkauf und Stromverkauf definiert werden. Der Küchenspeicher wird – aus den Messwerten abgeleitet – zu 35 % mit selbst erzeugtem PV-Strom und zu 65 % mit Netzstrom nachgeheizt. Dies ist kostenrelevant.

Die Ergebnisse des reinen Energiekostenvergleichs für die heutige Betriebsvariante sowie zwei Alternativen mit Fernwärme zeigt Tabelle II-14.

**Tabelle II-14: Energiekostenvergleich mit reiner Fernwärmeversorgung**

Version	Solar/Strom (Ist)	Solar/Fernwärme	Fernwärme	Preise
Bilanzposten	Menge in [kWh/a]	Menge in [kWh/a]	Menge in [kWh/a]	in [€/kWh]
<b>Bedarfe</b>				
Nutzen	+ 8.850	+ 8.850	+ 8.850	
Verluste	+ 1.650	+ 1.650	+ 650	
Summe	= 10.500	= 10.500	= 9.500	
<b>Deckung</b>				
Solarertrag	+ 7.000	+ 7.000	+ 0	0,00
Stromeinkauf	+ 3.500 · 0,65	+ 0	+ 0	0,27
Stromerzeugung	+ 3.500 · 0,35	+ 3.500 · 0,35	+ 3.500 · 0,35	0,00
Stromverkauf	- 0	- 3.500 · 0,35	- 3.500 · 0,35	0,12
Fernwärmeinkauf	+ 0	+ 3.500	+ 9.500	0,06
Summe	= 10.500	= 10.500	= 9.500	
Kosten	614 €/a	63 €/a	423 €/a	

Allein auf Basis der Energiekosten schneidet die reine Fernwärmelösung (ohne Solarthermie) etwas besser ab als der heutige Betrieb mit elektrischer Nachheizung. Noch besser ist aus Sicht der Energiekosten der kombinierte Solar-/Fernwärmebetrieb.

Unter Berücksichtigung der Investitionskosten, den bislang vernachlässigten Wartungskosten und der Hilfsenergien für Pumpen ist absehbar, dass die reine Fernwärmelösung am wirtschaftlichsten ist. Bei den beiden Solar-Lösungen sind die o.g. Kapitalkosten von 4.375 €/a. zu addieren.

## **Fazit aus Sicht der St. Franziskus-Grundschule**

Die Solarthermie liefert – in Anbetracht der Kollektorfeldgröße und Neigung – die erwarteten Erträge. In den ersten beiden Betriebsjahren wurden 7.000 kWh/a erreicht. Es sind keine technischen Probleme bekannt.

Die Wirtschaftlichkeit ließe sich jedoch verbessern, wenn anstelle des Stroms (anteilig oder vollständig) Fernwärme zur Nachheizung des Küchenpuffers verwendet würde. Da die Investition in die Anlage staatlich gefördert wurde, zählt für die St. Franziskus-Grundschule der laufende Betrieb – nicht der Kapitalkostenanteil.

Mit dem vorgeschlagenen Umschaltprogramm für die Fernwärme ergibt sich eine Nachheizung zu etwa  $\frac{1}{3}$  aus Strom und  $\frac{2}{3}$  aus Fernwärme. In Summe könnten so jährlich 300 ... 350 €/a Energiekosten gespart werden. Dazu muss die vorhandene Regelung lediglich so umprogrammiert werden, dass in dem genannten 4-Stunden-Zeitfenster eine Umschaltung auf den Fernwärmeverlauf besteht. Die Komponenten sind bauseits alle vorhanden.

Der Salzhydratspeicher kommt nicht zum Einsatz. Auch dies ist für die St. Franziskus-Grundschule zunächst kein wirtschaftlicher Verlust, da die Anlage gefördert wurde. Es können keine kurzfristigen Empfehlungen ausgesprochen werden, den Zustand ohne Speichernutzung abzustellen – das Kollektorfeld liefert keine Überschüsse. Der Speicher sollte im Zusammenhang mit dem Turnhallenneubau verwendet und in das dortige Versorgungskonzept eingebunden werden.

Bis dies soweit ist, wäre zu überlegen, das System komplett stromlos zu schalten, um die mehr als 500 kWh/a Hilfsstromverbrauch einzusparen.

## **Fazit aus Sicht anderer Schulen**

Die jährlichen Kapitalkosten für die Solarthermieranlage (ohne Salzhydratspeicher) liegen bei 4.375 €/a über 20 Jahre. Mit diesem Geld werden 7000 kWh/a Solarertrag generiert. Das führt zu einem äquivalenten Energiepreis von 0,625 €/kWh und damit einer Unwirtschaftlichkeit gegenüber anderen Energieträgern. Unberücksichtigt sind bei der Betrachtung die Wartungskosten, die das Problem verschlechtern.

Sofern die Investitionen nicht zu wenigstens 80 % gefördert sind oder entsprechend von Vornherein niedriger liegen, muss aus wirtschaftlicher Sicht von dieser Technik abgeraten werden. Ähnliche Randdaten hinsichtlich der Nutzenergiemenge der Schulküche vorausgesetzt. Wenn auch das Gebäude natürlich dem Nullenergieniveau mit dieser Technologie nähergebracht wird.

Die Investitionskosten für den Salzhydratspeicher liegen bei 14.000 € (ohne Erdbauwerk). Geht man von einer Lebensdauer von 20 Jahren aus und setzt weder Wartung noch Hilfsenergie für die Pumpen und Regelung an, dann ergeben sich jährlich 700 €/a als Kapitalkostenanteil, der erwirtschaftet werden muss. Sofern knapp 12.000 kWh/a Wärmeenergie mit dem Speicher nutzbar gemacht werden könnte, die anderenfalls ungenutzt bliebe, wäre ein wirtschaftlicher Vorteil gegenüber anderen Energieträgern erkennbar. Die eingespeicherte Energie kostet dann knapp 0,06 €/kWh. Diese Randdaten dürften in einer Schule i.A. nicht gegeben sein.

Weitere Informationen zur Solarthermie und zum Latentwärmespeicher sind [Abschlussbericht Teil 8](#) zu entnehmen.

## **II.1.9 Wärmeversorgung, Heizung, Hydraulik**

### **Verbraucher und Heizflächen**

Die Fernwärme dient der Nachheizung der Luft über Heizregister in den beiden Hauptlüftungsanlagen (Klassentrakt, Verwaltungstrakt), der Küchenlüftung sowie zur Nachheizung des Solarpufferspeichers in der Schulküche (theoretisch, praktisch aber nicht in Betrieb).

In allen Nutzungsbereichen liegt eine reine Luftheizung vor, d. h. im Gebäude gibt es keine Pumpenwarmwasserheizung mit Heizkörpern oder Flächenheizung. Die Luftherwärmung erfolgt im Winterhalbjahr zunächst über den Erdwärmeübertrager (Vorwärmung um wenige Grad), anschließend über die Wärmerückgewinnung aus der Abluft, wobei bereits fast Raumlufttemperatur erreicht wird. Für die ggf. notwendige Restheizung mit Lufttemperaturen von maximal 35°C kommt entsprechend die Fernwärme zum Einsatz.

Alle Räume, die einer Lüftungsanlage zugeordnet sind, werden mit Luft derselben Temperatur versorgt, was im laufenden Betrieb nicht optimal ist. Einzelne ungünstig gelegene Räume oder Räume mit geringer Fremdwärme, z. B. das wenig frequentierte Lehrerzimmer an der Nordostecke des Gebäudes, sind daher zusätzlich mit Elektroheizkörpern ausgestattet.

Die Lüftungsanlage der Hausmeisterwohnung hat keine Beheizung mit Fernwärme, hier gibt es vier elektrische Nachheizregister (zu je 400 W), damit die Temperatur in jedem Raum einzeln gewählt werden kann. Das Bad ist mit einer elektrischen Fußbodenheizung ausgestattet.

### **Auslegungstemperaturen und Leistungen der Fernwärme**

Das neue Netz ist mit einem Wärmeübertrager vom Altbestand getrennt. Die Anschlussleistung einschließlich Ausbaureserve für die in Planung befindliche Turnhalle und Sekundarschule liegt bei 220 kW.

Hauptverbraucher in der Grundschule sind 6 Heizregister. Sie versorgen die beiden Hauptlüftungsanlagen für den Klassentrakt (15 kW) und den Verwaltungstrakt (21 kW) mit Nacherhitzer für den Flur (10 kW). Darüber hinaus sind die Luftherhitzer der Küche (11 kW, 18 kW, 18 kW) an das Netz angeschlossen. Alle Heizregister sind mit eigenen Pumpen und Mischventilen versehen, siehe Hydraulikschema in Abbildung II-61.

Grundsätzlich ist das Fernwärmenetz auch für die Nacherwärmung des Solarpuffers der Küche vorgesehen. Es ist ein Heizregister mit 25 kW Leistung im Speicher installiert. Allerdings wird diese Möglichkeit – aufgrund des geringen Temperaturniveaus der Fernwärme – nicht genutzt. Eine weitere Vertiefung der Thematik ist in [Abschlussbericht 8](#) gegeben.

Die Auslegung aller Verbraucher erfolgte mit der Temperatur 45/35°C. Eine witterungsgeführte Regelung ist nicht erkennbar; es ist ein Festwert von 45°C in der Heizperiode vorgegeben, der um bis zu 7 K unterschritten werden darf, ohne dass eine Umschaltung auf den Vorlauf der Fernwärme erfolgt. Das Monitoring zeigt, dass oberhalb von etwa 15°C (Heizgrenze des Elisabeth-Gymnasiums) jeweils nur der Minimalwert von 38°C erreicht wird.

Die Fernwärme Halle wird an diesem Standort mit einem Primärenergiefaktor von  $f_p = 0,21$  und einem CO<sub>2</sub>-Äquivalent von 169,63 g/kWh geliefert [56]. Der Versorger EVH GmbH Halle erzeugt die Fernwärme in eigenen Kraftwerken in Kraft-Wärme-Kopplung, unter anderem in einem Gas- und Dampfturbinen-Heizkraftwerk.



## Elektrische Heizung

Die Lüftungsanlage der Hausmeisterwohnung hat keine Beheizung mit Fernwärme, hier gibt es raumweise elektrische Heizregister in den Lüftungskanälen der Zulufräume. Installiert wurden 4 Heizregister mit 400 W Leistung. Außerdem hat das Hauptbadezimmer des Hausmeisters eine elektrische Fußbodenheizung (manuell einzuschalten) mit Zeitschaltprogramm. Raumregler für die Luftheizung sind vorhanden (elektronisch), aber zusätzliche Zeitschaltprogramme wären wünschenswert gewesen.

Bereits in der Planungsphase wurde davon ausgegangen, dass einzelne Räume bei Bedarf Elektroheizkörper erhalten werden. Nach dem ersten Betriebsjahr wurden Anfang 2015 in folgenden Räumen Heizkörper nachgerüstet:

- Raum 0.07 (Hortbüro, EG, Nordost)
- Raum 0.08 (Hortbüro, EG, Ost)
- Raum 2.04 (Teamraum, 2. OG, Nordost)
- Raum 2.16 (Vorbereitungsraum, 2. OG, Süd)

Die Heizkörper wurden in der Nähe der Sitzplätze angeordnet, i. d. R. unter dem Schreibtisch. Eine Zeitschaltuhr mit 120 Minuten Laufzeit wurde installiert. Eine Temperaturregelung gibt es nicht. Alle anderen Büroräume, bei denen eine mögliche Unterversorgung vermutet wurde, haben sich als unkritisch erwiesen.

Im Hort waren auch im dritten Betriebswinter immer wieder zu niedrige Temperaturen festzustellen – insbesondere zu Tagesbeginn und besonders ausgeprägt zu Wochenbeginn nach der Absenkephase. Durch die fehlenden internen Lasten und die suboptimale Zulufttemperaturregelung erreichten Raumtemperaturen teils nicht einmal 18°C. Ein mobiles Heizgerät mit 3,3 kW Leistung wurde angeschafft. Es ersetzt die fehlende Einzelraumregelung. Der Stromverbrauch wird nicht einzeln erfasst.

Es ist anzumerken, dass die Nutzer das Gerät bzw. den notwendigen Einsatz als "altertümlich" empfinden. Es deckt sich nicht mit der Vorstellung, welche Technik in einem modernen Gebäude erwartet wird.

Insofern deckt sich die Meinung der Nutzer mit der Erkenntnis aus dem Monitoring: eine Einzelraumregelung oder zumindest Zonenregelung ist in künftigen Bauprojekten sinnvoll. Es darf erwartet werden, dass zum Betriebsbeginn die Räume 20°C erreicht haben. Auch darf erwartet werden, dass es keine Ungleichbeheizung von bis zu 5°C innerhalb eines Gebäudes gibt.

Der Einsatz einer elektrischen Nachheizung als solches ist jedoch durchaus sinnvoll. Die Auswertung der Verbrauchswerte zeigen einen Heizwärmebedarf von durchschnittlich etwa 10 kWh/(m<sup>2</sup>a) im Klassentrakt.

Es wäre durchaus vorstellbar gewesen, eine zentrale Vortemperierung der Luft mit Fernwärme vorzunehmen (Erwärmung auf eine Temperatur in der Nähe von 20°C, Ausgleich der Lüftungslast, geschätzt 50 % des Bedarfs) und eine lokale elektrische Nachheizung im Sinne einer Einzelraumregelung (die anderen 50 % des Bedarfs, Deckung der lokal unterschiedlichen Transmissionslasten) zu installieren. Dann allerdings als elektrische Luftheizregister mit Einzelraumregelung analog der Installation in der Hausmeisterwohnung.

In den 4 großen Horträumen sind jeweils Transmissionsheizlasten (Auslegungsfall) im Bereich von 360 ... 590 W festzustellen.

## Raumweise Heizlast, Zuluft- und Innenraumtemperaturen

Im Rahmen des Monitorings wurde die Heizlastberechnung parallel zur Inbetriebnahme des Gebäudes erneut berechnet. Im Rahmen der Bachelorarbeit erfolgten nachträgliche Berechnungen nach der DIN EN 12831 im ausführlichen Verfahren und dem vereinfachten Verfahren sowie in Anlehnung an das PHPP unter Berücksichtigung von Wärmegewinnen.

Die interne Gewinnleistung aus Personen, Geräten und Beleuchtung wurden anhand der Belegung und Ausstattung betroffen. Es werden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt: geringe Gewinne (zeitliche Mittelung der Gewinne; Jahresmittelwert) oder realistische Gewinne (Momentaufnahme eines Tages mit typischer Nutzung).

Es wurde theoretisch berechnet, welche Raumtemperatur sich einstellt, wenn von einer identischen Zulufttemperatur innerhalb einer Lüftungszone auszugehen ist. Für dieses Rechenbeispiel wird sie so gewählt, dass sich eine mittlere Ablufttemperatur von 23°C aller an eine Anlage angeschlossenen Räume ergibt. Tabelle II-15 zeigt die Ergebnisse für folgende Fälle:

- Heizlast ohne Gewinne, DIN EN 12831
- Heizlast mit solaren sowie jahresmittleren internen Gewinnen, PHPP
- Heizlast mit solaren sowie nutzungstypischen internen Gewinnen, PHPP.

Die drei Auswertungen zur Raumheizlast sowie daraus resultierenden notwendigen Zulufttemperatur zeigen: prinzipiell wäre eine raumweise Einzelraumregelung sinnvoll. Jeder Raum erhielte eine passende Zulufttemperatur zur jeweiligen Lastdeckung. Diese regelungstechnische Ausstattung ist vor Ort aber nicht bzw. nur in wenigen Räumen (Wohnräume der Hausmeisterwohnung, Aula, Haupträume der Küche, Halle/Flur BTA) gegeben.

**Tabelle II-15: Resultierende Raumlufttemperaturen auf Basis von Heizlastberechnungen mit unterschiedlichen Ansätzen (DIN EN 12831, PHPP)**

Zone	Raum		Funktion	Fläche, in [m <sup>2</sup> ]	keine Gewinne		solare und mittlere interne Gewinne		solare und typische interne Gewinne	
					$\vartheta_{zu}$ [°C]	$\vartheta_i$ [°C]	$\vartheta_{zu}$ [°C]	$\vartheta_i$ [°C]	$\vartheta_{zu}$ [°C]	$\vartheta_i$ [°C]
<b>RLT Klassentrakt</b>										
			Gesamt/Mittelwerte		27	23	24,8	23	15	23
1	001	EG	Atelier (Nord)	57,57	27,0	24,3	24,8	23,1	15,0	18,7
1	002	EG	Märchenzimmer (N.)	24,04	27,0	24,1	24,8	22,2	15,0	19,9
1	003	EG	Kindercafé (Nord)	82,58	27,0	23,9	24,8	25,7	15,0	31,0
1	006	EG	WC	1,98	23,9	23,7	21,7	21,1	14,1	13,7
1	007	EG	Büro (Nord)	15,84	27,0	20,1	24,8	18,6	15,0	16,7
1	008	EG	Mitarbeiter (Nord)	15,84	27,0	20,1	24,8	18,8	15,0	22,5
1	009	EG	Flur	120,34	27,0	23,9	24,8	21,7	15,0	14,1
1	011	EG	Spielraum (Süd)	57,53	27,0	23,6	24,8	24,0	15,0	18,4
1	012	EG	Medien (Süd)	24,04	27,0	24,1	24,8	23,2	15,0	16,9
1	013	EG	Entspannung (Süd)	24,04	27,0	24,1	24,8	23,2	15,0	16,9
1	014	EG	Bauraum (Süd)	57,63	27,0	24,3	24,8	24,4	15,0	19,0
1	101	1. OG	Klasse 1 (Nord)	82,65	27,0	23,8	24,8	23,5	15,0	27,8
1	102	1. OG	Klasse 2 (Nord)	82,78	27,0	24,3	24,8	23,7	15,0	28,1
1	103	1. OG	Lehrmittel (Nord)	21,00	22,6	21,2	21,1	20,0	18,5	17,7
1	104	1. OG	Lehrer (Nord)	27,09	27,0	22,6	24,8	21,1	15,0	18,5
1	105	1. OG	Flur	120,66	27,0	25,2	24,8	25,1	15,0	26,5
1	107	1. OG	Klasse 3 (Süd)	82,65	27,0	23,8	24,8	24,5	15,0	24,7
1	108	1. OG	Klasse 4 (Süd)	82,87	27,0	24,3	24,8	25,1	15,0	25,3
1	201	2. OG	Klasse 5 (Nord)	82,58	27,0	21,9	24,8	21,7	15,0	25,8
1	202	2. OG	Klasse 6 (Nord)	82,71	27,0	22,4	24,8	22,2	15,0	26,3
1	204	2. OG	Lehrer (Nord)	27,09	27,0	20,8	24,8	19,6	15,0	16,2
1	205	2. OG	Flur	121,16	27,0	20,7	24,8	20,7	15,0	21,9
1	207	2. OG	Klasse 7 (Süd)	82,58	27,0	21,8	24,8	23,5	15,0	23,7
1	208	2. OG	Klasse 8 (Süd)	82,70	27,0	22,4	24,8	23,2	15,0	23,3

Zone	Raum		Funktion	Fläche, in [m <sup>2</sup> ]	keine Gewinne		solare und mittlere interne Gewinne		solare und typische interne Gewinne	
					$\vartheta_{zu}$ [°C]	$\vartheta_i$ [°C]	$\vartheta_{zu}$ [°C]	$\vartheta_i$ [°C]	$\vartheta_{zu}$ [°C]	$\vartheta_i$ [°C]
<b>RLT Verwaltungstrakt</b>										
			Gesamt/Mittelwerte		25,5	23	25,0	23	21,6	23
2	019	EG	Halle	145,22	25,5	20,1	25,0	19,2	21,6	16,5
2	021	EG	Foyer	46,20	20,1	19,0	19,2	18,8	16,5	16,2
2	022	EG	Garderobe 1	13,38	19,0	17,8	18,8	17,6	16,2	15,1
2	023	EG	Garderobe 2	13,38	19,0	18,3	18,8	18,1	16,2	15,6
2	024	EG	Garderobe 3	13,38	19,0	18,3	18,8	18,1	16,2	15,6
2	025	EG	Garderobe 4	12,19	19,0	18,3	18,8	17,9	16,2	15,4
2	026	EG	Aula	183,45	25,5	24,9	25,0	24,7	21,6	24,3
2	113	1. OG	Halle	145,27	25,5	21,3	25,0	21,0	21,6	18,0
2	114	1. OG	Raum d. Stille	52,84	25,5	23,2	25,0	23,3	21,6	22,0
2	115	1. OG	Aula/Galerie	43,27	24,9	24,7	24,7	24,6	24,3	24,4
2	120	1. OG	Flur Lehrer	21,03	21,7	21,7	24,3	24,3	29,6	29,6
2	121	1. OG	Besprechung	23,00	25,5	24,0	25,0	24,0	21,6	25,8
2	122	1. OG	Schulleiter	15,87	25,5	21,7	25,0	24,3	21,6	29,6
2	123	1. OG	Sekretariat	22,09	25,5	20,9	25,0	23,7	21,6	26,2
2	124	1. OG	Archiv/1.Hilfe	14,80	25,5	10,9	25,0	14,5	21,6	21,2
2	213	2. OG	Halle	94,00	25,5	18,4	25,0	18,1	21,6	15,4
2	214	2. OG	Kunst	77,03	25,5	20,7	25,0	21,6	21,6	27,5
2	216	2. OG	Vorbereitung	20,25	25,5	20,4	25,0	21,1	21,6	24,9
2	217	2. OG	Werken	79,56	25,5	21,5	25,0	22,5	21,6	28,4
2	219	2. OG	Lehrmittel	20,48	21,5	20,6	22,5	21,8	28,4	27,5
2	220	2. OG	Hausmeister	13,04	25,5	20,8	25,0	21,1	21,6	29,8
<b>Abluftanlage</b>										
3	015	EG	WC Mädchen	10,07	23,9	22,7	21,7	19,7	14,1	23,3
3	017	EG	WC Jungen	7,60	23,9	23,4	21,7	20,8	14,1	20,1
3	109	1. OG	WC	1,92	25,2	25,2	25,1	25,1	26,5	26,5
3	110	1. OG	WC Mädchen	8,35	25,2	25,2	25,1	25,5	26,5	38,3
3	111	1. OG	Dusche	4,14	25,2	25,2	25,1	25,1	26,5	26,5
3	112	1. OG	WC Jungen	7,83	25,2	21,9	25,1	22,2	26,5	33,8
3	209	2. OG	WC	1,97	20,7	20,0	20,7	20,6	21,9	21,8
3	210	2. OG	WC Mädchen	8,41	20,7	17,7	20,7	17,9	21,9	29,3
3	211	2. OG	Putzen	4,18	20,7	19,3	20,7	21,9	21,9	25,0
3	212	2. OG	WC Jungen	7,88	20,7	15,1	20,7	15,3	21,9	25,7

Der Realbetrieb liegt im Winter vermutlich zwischen den beiden untersuchten Fällen mit Gewinnen. Es ist innerhalb einer Lüftungszone mit Differenzen der resultierenden Raumtemperaturen von bis zu 10 K zu rechnen. Dabei liegen die Büros jeweils deutlich unter den Klassenräumen. Die Klassenräume sehen sich untereinander sehr ähnlich. Zu den Horträumen ergibt sich aber eine Differenz von mehr als 5 K. Das bestätigt sich auch durch Messungen, siehe Abschlussbericht 5.

Der Temperatenausgleich durch offenstehende Türen zwischen den Räumen ist nur bedingt möglich, vor allem wegen der fest definierten Luftströmungsrichtungen bei laufenden Lüftungsanlagen. Die Räume mit ausgeglichener Volumenstrombilanz (Zuluft = Abluft, z. B. Klassenräume, aber auch Büros) können eine starke Überwärmung im Winter lediglich durch manuelles Fensterlüften ausgleichen (z. B. Südklassenräume). Die Unterversorgung ergibt sich, da die Zulufttemperatur zu gering ist bzw. interne Gewinne fehlen (z. B. Nordbüros). Daran ändern auch offenstehende Türen zum Flur wenig, da von dort kaum Wärme zu erwarten ist. Die ggf. nicht ausreichend temperierten WCs erhalten bereits derzeit Zuluft aus dem Flur, was auch durch eine offenstehende Tür nicht verändert wird.

## Alternative Versorgungssysteme

Das gesamte Problem lässt sich nur durch Einzelraumregelung oder zumindest Zonenregelung vermeiden. Dabei ist nicht zwangsläufig nur in Nord/Süd-Richtung zu unterscheiden, sondern vor allem die Nutzung (Hort, Schule) zu beachten.

Zusammengefasst werden sinnvollerweise auch Räume mit ähnlichen Luftwechselln (Luftvolumenstrom je Fläche bzw. Raumvolumen) und internen Wärmelasten, also Klassenräume untereinander sowie Büros. Der Grundriss ist entsprechend sinnvoll zu konzipieren (keine im Gebäude verstreuten Büros).

Im Vergleich von zentraler und dezentraler Wärmezufuhr ist zunächst folgendes festzustellen: ein wirtschaftlicher Vorteil der Systeme mit Einzelraumregelung gegenüber der zentralen Variante ist nicht darstellbar. Die dezentralen Systeme sind deutlich teurer; für sie spricht nur die Behaglichkeit.

Vergleicht man jeweils untereinander eine Heizungsvariante auf Basis von Fernwärme mit der (direkten) elektrischen Heizung ergibt sich folgendes unter den Randdaten der St. Franziskus-Grundschule (örtlicher Strompreis- und Fernwärmepreis):

- die Ausstattung des Gebäudes mit einfachen raumweisen Heizkörpern ist aus wirtschaftlicher Sicht der dezentralen direkt-elektrischen Luftbeheizung vorzuziehen.
- auch im Falle der zentralen Versorgung über Luftheizregister schneidet die Fernwärme kostengünstiger ab – vor allem, weil in Phasen mit Heizwärmebedarf davon ausgegangen werden muss, dass kein selbst produzierter PV-Strom zur Verfügung steht.

Die Untersuchung einer Flächenheizung entfällt, da ein schnell reagierendes System benötigt wird, um die schnell veränderlichen lokalen Lasten auszugleichen.

## Jahresfernwärmeverbrauch

Abbildung II-62 und Abbildung II-63 zeigen den jährlichen Fernwärmeverbrauch, wie er aus den Wärmemengenzählern ausgelesen werden konnte. Es handelt sich zum einen um die Rohdaten vor der Witterungskorrektur, zum anderen um witterungskorrigierte Werte auf Basis der Durchschnittsklimadaten von Halle/Leipzig (Wetterstation des DWD).

Im gesamten Messzeitraum von 1.1.2015 bis 1.1.2018 war es verglichen mit dem Durchschnittsklima (der DWD-Messstation Halle/Leipzig) zu warm. Es war in der Winterperiode 2015 etwa 28 % zu warm, 2016 etwa 10 % und 2017 etwa 17%. Als Heizperiode zählen alle Tage unterhalb einer Heizgrenztemperatur von 10°C. Das ist bei der Interpretation der Balkendiagramme zu berücksichtigen.

Das Jahr 2014 wird nicht weiter ausgewertet. Die Datenerfassung startete erst im April, so dass etwa 3 von zu erwartenden 5 Heizmonaten bereits vorbei waren. Im Jahr 2015 ist vor allem zu erkennen, dass der Verbrauch des Klassentraktes extrem gering ausgefallen ist. Dies liegt daran, dass die Regelung der RLT falsch programmiert war. Der Fehler wurde erst im Januar 2016 behoben. Die Zuordnung von Nord- und Südräumen in der morgendlichen Aufheizphase erfolgte vertauscht. Daher wurde die Heizung regelmäßig beendet, sobald im Süd-Referenzraum die Solltemperatur erreicht wurde. Das führte zu regelmäßigen Unterschreitungen der Raumtemperaturen.

Wäre das Jahr 2015 nicht so warm gewesen (30 % weniger Verbrauch allein aufgrund der milden Witterung), hätte es deutlich mehr Beschwerden gegeben. So wurde der Fehler erst Ende 2015 überhaupt erkannt. Ab 2016 stabilisieren sich die Verbrauchswerte auch im Klassentrakt.

**Fernwärmeverbrauch  
ohne Witterungskorrektur,  
Jahreswerte, 2014 (tw.) bis 2017**

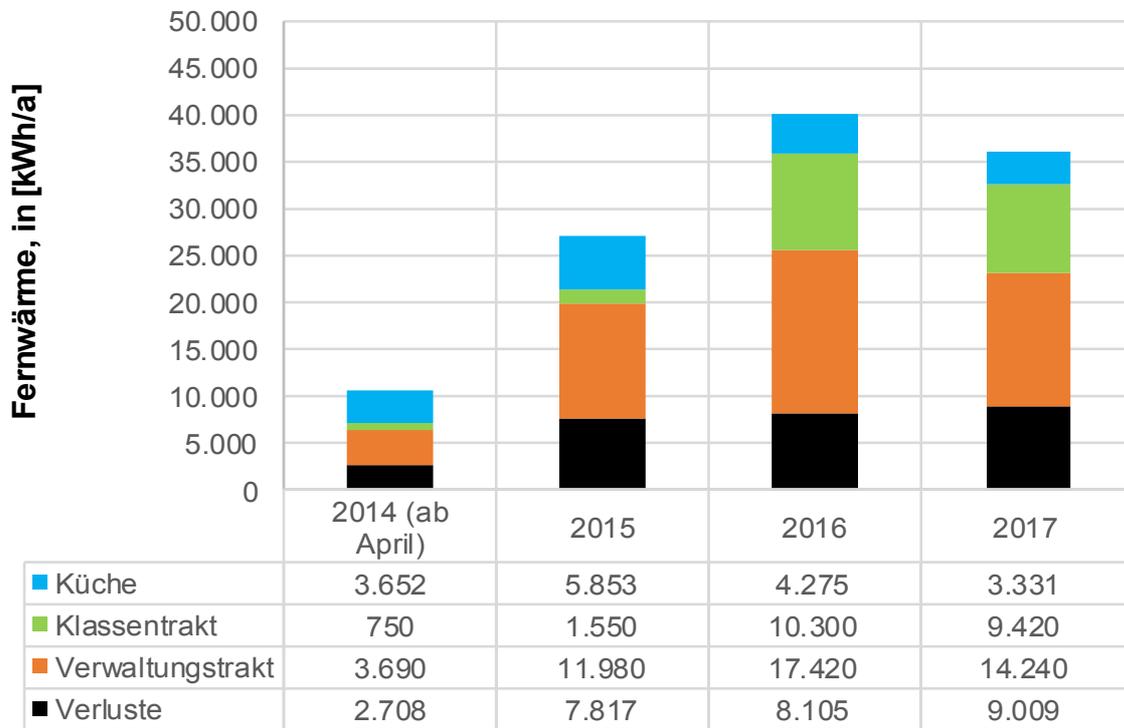


Abbildung II-62: Jahresfernwärmeverbrauch ohne Witterungskorrektur

**Fernwärmeverbrauch  
mit Witterungskorrektur,  
Jahreswerte 2015 - 2017 und Mittelwert**

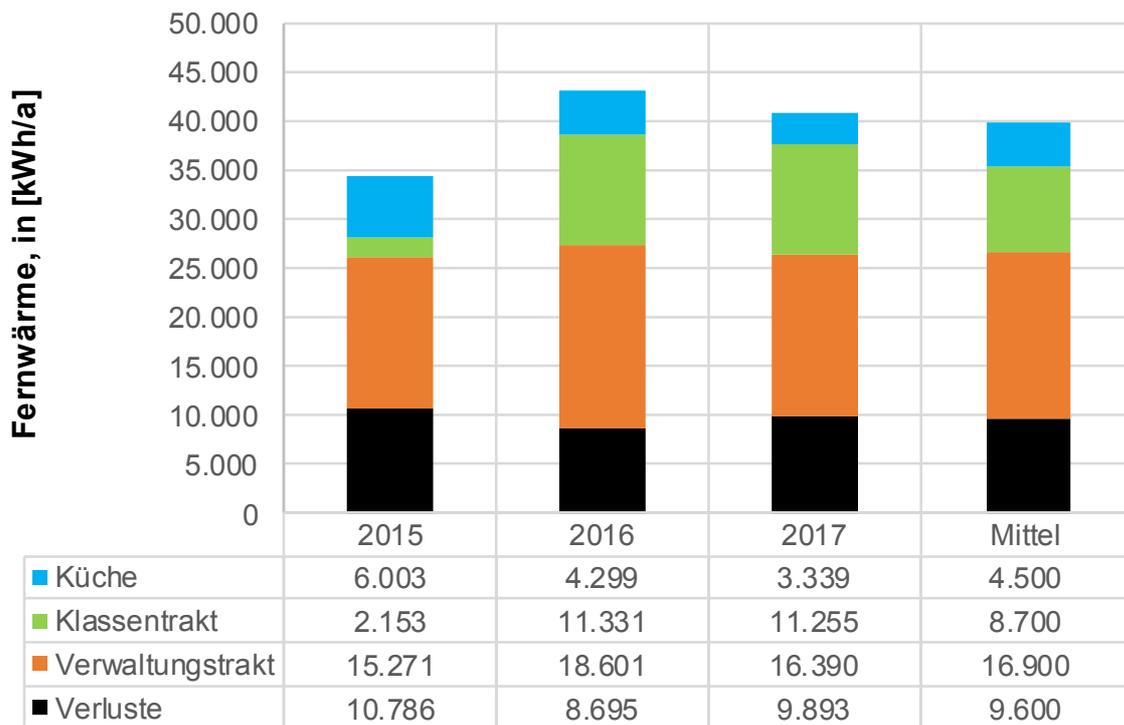


Abbildung II-63: Jahresfernwärmeverbrauch mit Witterungskorrektur

Der Netzverlust von 9600 kWh/a entspricht bei 70 m Trassenlänge im Erdreich (zwischen beiden Schulen) einem Verlustkennwert von  $137 \text{ kWh}/(\text{m}_{\text{Trasse}} \cdot \text{a})$ . Werden alle Leitungen berücksichtigt, ergeben sich 203 m Trassenlänge sowie  $47 \text{ kWh}/(\text{m}_{\text{Trasse}} \cdot \text{a})$ . Verglichen mit den üblichen Trassenverlusten neuer Netze von  $200 \text{ kWh}/(\text{m}_{\text{Trasse}} \cdot \text{a})$  bei Hochtemperaturbetrieb ( $80/60^\circ\text{C}$ ) ist der Wert gering.

### Energieanalyse des Verbrauchs

Da alle Zähler ein Speicherwerk aufweisen, kann problemlos eine Monatsauswertung der Messwerte erfolgen. Darüber hinaus können die Messwerte auch außentemperaturbezogen ausgewertet werden. In der Darstellung einer mittleren Leistung über der Außentemperatur ist die Witterungsabhängigkeit des jeweiligen Verbrauches erkennbar.

Werden die Monatsverbräuche am Hauptzähler durch die Anzahl der Monatsstunden dividiert, ergeben sich die in Abbildung II-64 aufgetragenen Leistungen. Eine Heizgrenze von etwa  $\vartheta_{\text{HG}} = 10,1^\circ\text{C}$  ist erkennbar, oberhalb der nicht mehr witterungsabhängig verbraucht wird.

In den witterungsunabhängigen Verbrauchssockel fallen 27 % des Verbrauchs, zum großen Teil für den Netzverlust, aber auch die Küche verbraucht witterungsunabhängig Energie. Die Dauerleistung beträgt 1,29 kW bzw.  $0,4 \text{ W}/\text{m}^2$ . Der flächenbezogene witterungsunabhängige Energiekennwert liegt bei  $3,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ .

Entsprechend fallen 73 % des Fernwärmeverbrauchs witterungsabhängig an. Die Steigung ergibt, dass je Grad Außentemperaturabfall die Heizleistung um 0,97 kW ansteigt. Je angeschlossener Fläche liegt der Kennwert bei  $h = 0,33 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Dieser Wert ist sehr gering und als sehr positiv einzuschätzen. Er ist besser als theoretisch vorab berechnet. Der Passivhausnachweis liefert den Kennwert aus einer Verlustrechnung (Gebäudehülle und Lüftungswärmeverlust) und kommt auf  $0,36 \dots 0,40 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  – im Rahmen der Berechnung des kältesten Tages bzw. des Jahresmittels.

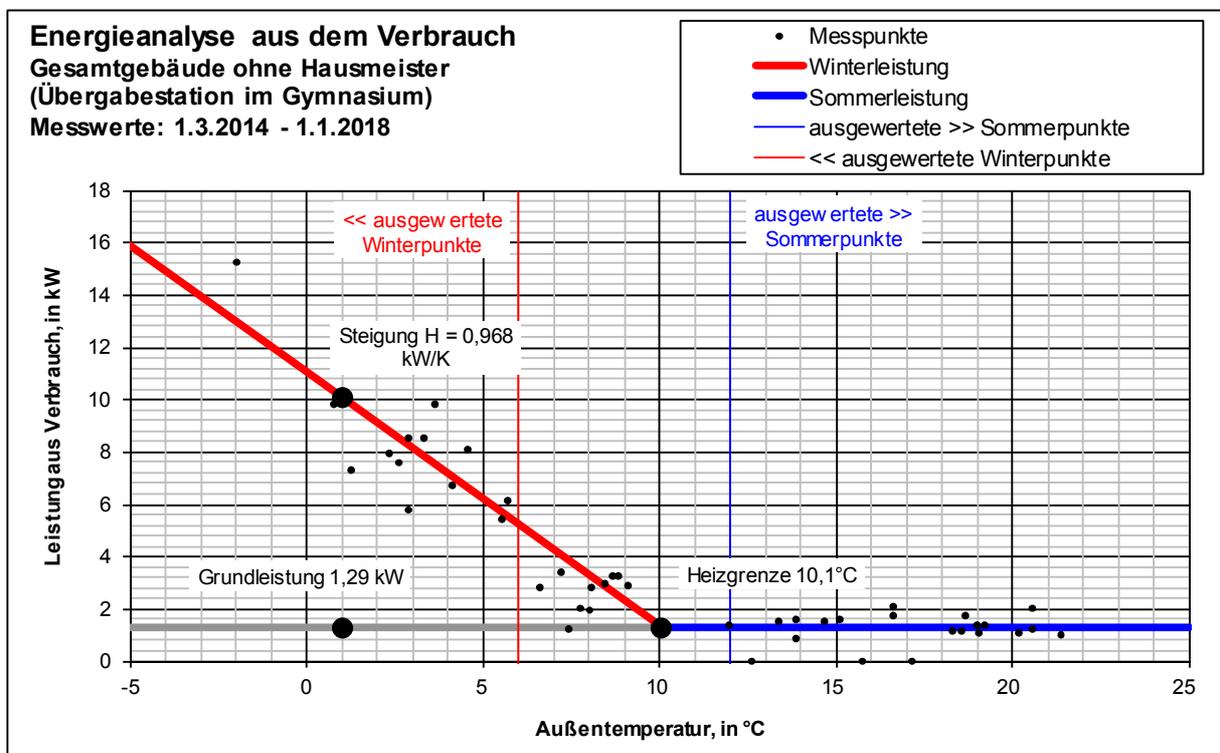


Abbildung II-64: Energieanalyse aus dem Verbrauch - Fernwärmeverbrauch Haupteinspeisung

Der Kennwert, welcher sich aus dem witterungsabhängigen Verbrauch ergibt, liegt witterungskorrigiert bei 10,1 kWh/(m<sup>2</sup>a). Das ergibt insgesamt einen Energiekennwert von 13,9 kWh/(m<sup>2</sup>a) – incl. aller Netzverluste. Damit ist der Zielwert des Passivhauses eingehalten. Er liegt bei 15 kWh/(m<sup>2</sup>a), jedoch ohne Netzverluste.

Die Heizlast am kältesten Tag liegt – extrapoliert bei -14°C minimaler Außentemperatur – bei nur 33 kW, deutlich unter den theoretischen Werten. Der flächenbezogene Kennwert liegt damit bei 11,1 W/m<sup>2</sup>. Der Grenzwert von 10 W/m<sup>2</sup> wird nur eingehalten, wenn die Netzverluste unberücksichtigt bleiben.

**Tabelle II-16: Kennwerte aus der Verbrauchsanalyse**

Nutzungszone	Fläche, [m <sup>2</sup> ]	Heizgrenze, [°C]	Energiekennwert, [kWh/(m <sup>2</sup> a)]		flächen- und temperaturbezogene Leistung, in [W/(m <sup>2</sup> K)]	flächenbezogene Heizlast bei -14°C, [W/m <sup>2</sup> ]
			witterungsabhängig	witterungsunabhängig		
Klassentrakt	1624,45	7,4	10,0	0,1	0,32	10,9
Verwaltungstrakt	1267,30	11,6	13,6	0,6	0,33	11,3
Küche	81,71	k. A.	0,0	60,2	k. A.	k. A.
Hausmeisterwohnung	112,53	14,3	31,1	16,2	0,40	13,6

Werden die anderen Fernwärmemessungen nach diesem Schema ausgewertet, ergeben sich die Kennwerte nach Tabelle II-16. Mit eingetragen ist auch die mit Strom beheizte Hausmeisterwohnung, wobei der witterungsunabhängige Verbrauch den gesamten Haushaltsstrom enthält.

Der Fernwärmebezug für das Gebäude ist erfreulich gering, dennoch sind regelungstechnische Optimierungen an der Lüftungsanlage vorgesehen bzw. wären sinnvoll:

- die Optimierung der morgendlichen Wiederaufheizung im Winter nach der Nachabsenkung mit dem Ziel einer gleichmäßigeren Aufheizung bis zum Eintreffen der ersten Personen; dies wird zu einer Erhöhung des Verbrauchs führen, aber die Nutzerzufriedenheit verbessern
- die Verbesserung der Wärmeverteilung zwischen Nord- und Südräumen während des Tagbetriebes, wobei hier Grenzen gesetzt sind, da für alle Räume die gelieferte Zuluft auf dieselbe Temperatur beheizt wird, eine geringe Variation der Volumenströme ist denkbar; dies wird den Verbrauch voraussichtlich nicht verändern, sondern nur umverteilen
- die Optimierung der minimalen Volumenströme in der Aula, wenn keine Personen anwesend sind von heute ca. 60 ... 80 % des Maximalwertes auf 20 ... 30 % (eine CO<sub>2</sub>-Regelung ist vorhanden)
- Einrichtung einer geregelten Sommer-/Winterumschaltung für den Anlagenbetrieb.
- die Verbesserung der sommerlichen Nachtkühlung mit dem Ziel, die Effekte der Nachtkühlung länger nutzen zu können (Abwägen zwischen Luftqualität und Raumtemperatur),

Die beiden letztgenannten Punkte werden im **Abschlussbericht Teil 7** vertieft.

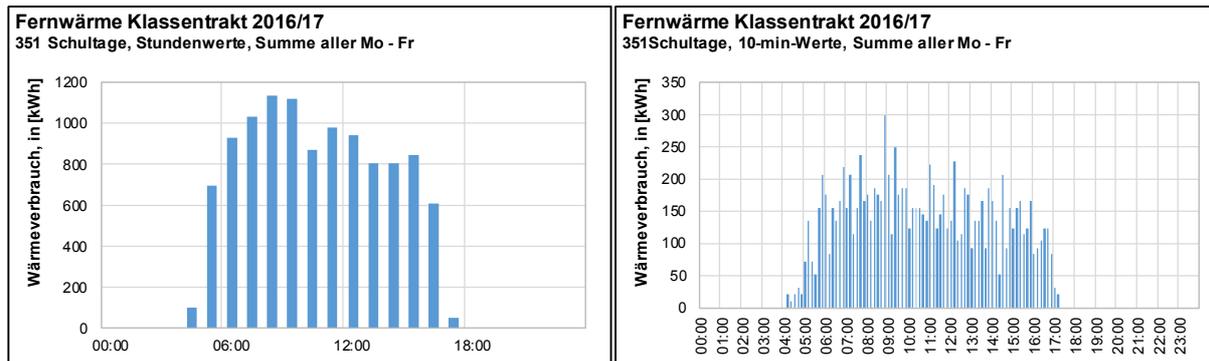
## Tagesprofile

Die Monitoringdaten der Wärmemengenzähler ermöglichen die Erstellung von Tagesprofilen. Sie zeigen, welche Wärmemengen zu welchen Tageszeiten benötigt werden. Die jeweiligen Grafiken sind durch Addition aller Tage einer Nutzungsart – Schultage, Ferienhorttage, Schließtage, Wochenende – entstanden. Die Anzahl der zur Verfügung stehenden Tage jeder Rubrik ist vermerkt. Ein typischer Tag kann abgeleitet werden, wenn die eingetragenen Balkenhöhen durch die Anzahl der Tage dividiert wird.

Abbildung II-65 zeigt exemplarisch die Ergebnisse für den Klassentrakt und die Schultage. Es ist – entgegen der Erwartung – keine ausgeprägte morgendliche Aufheizphase erkennbar. Das Maximum des Verbrauchs ergibt sich von 8 ... 10 Uhr.

Das ist die Phase, in der die Bewegungsmelder aller Klassenräume ausgelöst wurden. Dies deckt sich mit Erkenntnissen zur Lüftungsregelung, siehe **Abschlussbericht 7**. Aus Sicht der Nutzer ist dies zu spät. Im Rahmen der Lüftungsoptimierung wurde dies im Juni 2018 geändert.

Diese Erkenntnis wiederholt sich für alle anderen Gebäudezonen und Nutzungsprofile.



**Abbildung II-65: Fernwärme Klassentrakt – Stundenwerte – Schultage**

### Detailerkennnisse für die Küche

Eine Analyse der Messwerte in der Küche zeigt sehr geringe Spreizungen der Fernwärmepertemperaturen im Bereich 1 ... 2 K – entgegen der Beobachtungen an allen anderen Heizregistern. Das spricht für eine Unterdimensionierung der Lüftungshauben oder einen Betrieb mit zu hohen Volumenströmen, wovon hier ausgegangen wird.

Die Messwerte decken sich mit der Rückmeldung des Küchenpersonals zum Betrieb der Anlagen. Der Luftvolumenstrom wird nicht geregelt, es handelt sich um eine manuelle Vorgabe des Küchenpersonals. Insbesondere morgens werden zur Wiederaufheizung der Küche nach der Nachtlüftung (durch die Grundlüftungsanlage, ohne Heizfunktion) die Anlagen mit maximalem Volumenstrom in Betrieb genommen – nach dem Motto: viel hilft viel. Laufen beide Lüftungshauben in Vollast, ergibt sich ein 39-facher Luftwechsel in der Küche. Die Luftumwälzung ist riesig, die Erwärmung des Raumes allerdings nur marginal. Abhilfe kann nur eine Aufklärung des Bedienpersonals schaffen: sind die Küchengeräte (Herd, Spülmaschine usw.) ausgeschaltet, wird der minimale Volumenstrom verwendet, sind die Küchengeräte eingeschaltet, dann wird der Volumenstrom erhöht, ggf. bis zum Maximum.

### Detailerkennnisse für die Regelung

Die Leistungsaufnahme der Hauptpumpe und Heizregisterpumpen an den Hauptlüftungsanlagen sowie die Stellung der Regelventile und die Fernwärmepertemperaturen ermöglichen eine Betriebsanalyse, v. a. zu den Betriebszeiten und zur Funktion der Regelungsstrategien.

Insgesamt ist eine sehr gute Funktion der Rücklaufauskühlung gegeben. Dennoch sind Verbesserungsansätze für den künftigen Betrieb in der St. Franziskus-Grundschule erkennbar:

- der zeitliche Pumpenbetrieb aller Pumpen muss aneinander angeglichen werden; es ist nicht sinnvoll die Zentralpumpe außerhalb der Zeitfenster der Abnehmerpumpen laufen zu lassen und umgekehrt,
- die Sommer-/Winterumschaltung für die Zentralpumpe muss umgesetzt werden (insbesondere, da derzeit ohnehin keine Fernwärme für die Trinkwassererwärmung zum Einsatz kommt),

- die Nachlaufzeit der Verbraucherpumpen von 1 Stunde muss verkürzt werden, die nächtlichen Laufzeiten sollen gänzlich unterbunden werden,
- die gegenseitige Verriegelung von sommerlicher Nachtlüftung und Nachheizung muss geprüft und ggf. (wieder) hergestellt werden
- die Vorlauftemperatur von 45°C im Regelfall ist ausreichend, jedoch sollte überlegt werden, ob die Hysterese von 7 K (bevor die Umschaltung in Parallelbetrieb erfolgt) nicht verringert wird; mit im schlimmsten Falle 38°C Vorlauftemperatur sind die anvisierten Lufttemperaturen im Kernwinter kaum erreichbar; Vorschlag: 3 ... 4 K

Der Hausmeister muss geschult werden hinsichtlich der sinnvollen Wahl manuell eingestellter Sollwerte für Zuluft- und Raumtemperatur für die RLT-Anlagen.

Weitere Informationen zur Wärmeversorgung des Gebäudes sind **Abschlussbericht Teil 9** zu entnehmen.

### **II.1.10 Photovoltaik, Windkraft und Batterie**

Für die Stromversorgung der Schule gibt es drei Anlagen zur Selbsterzeugung sowie einen Hausanschluss von den Stadtwerken. Komplettiert wird das Versorgungssystem durch eine elektrochemische Batterie.

Wichtigstes Element des Konzeptes sind die 422 m<sup>2</sup> Photovoltaik-Paneele auf dem Schuldach. Sie sind nach Süden ausgerichtet und liegen flach (15° Neigung) auf dem Kiesbett des Flachdaches. Bei maximaler Sonneneinstrahlung produzieren sie eine Leistung von 70,8 kW (Peak), ansonsten je nach Strahlungsangebot. Es handelt sich um 289 Module aus polykristallinem Silizium. Der produzierte Gleichstrom wird in fünf Wechselrichtern in Wechselstrom mit 50 Hertz Frequenz umgeformt.

Das zweite Photovoltaikfeld mit 45 Modulen bzw. 40 m<sup>2</sup> Fläche und einer Peakleistung von 6,3 kW befindet sich auf dem Carport. Es ist ebenfalls nach Süden ausgerichtet, jedoch mit 20° Neigung aufgestellt. Auch dieses Feld besitzt zwei Wechselrichter und ist mit der Elektrozentrale verbunden.

Der letzte Produzent ist eine Mikro-Windkraft-Anlage. Sie hat bei höchst zulässiger Windgeschwindigkeit (bevor die interne Bremse einsetzt) eine Leistung von 1 kW. Der Generator liefert prinzipiell bereits Wechselstrom, jedoch besitzt auch diese Anlage zusätzlich Gleich- und Wechselrichter. Über ein Erdkabel ist auch das Windrad mit dem restlichen Netz verbunden.

Übersteigt die Produktion den Stromverbrauch, wird eine Batterie geladen. Ist diese voll, wird der Strom über einen Zähler ins Netz des Versorgers eingespeist. Übersteigt der Verbrauch die Produktion, wird zuerst die Batterie geleert und danach aus dem Versorgungnetz Strom entnommen und gezählt (Zwei-Wege-Zähler). Die Batterieanlage steht im Carport und ist mit einer eigenen Erdleitung zur Be- und Entladung mit der Zentrale verbunden. Sie hat 16 Module mit einer Gesamtspeicherkapazität von 25,6 kWh.

Der Hausmeister hat – wie jeder andere Einzelnutzer – einen eigenen Stromanschluss mit Zähler beim Versorger seiner Wahl. Seine Wohnung ist nicht mit der Photovoltaik verbunden.

#### **Photovoltaik**

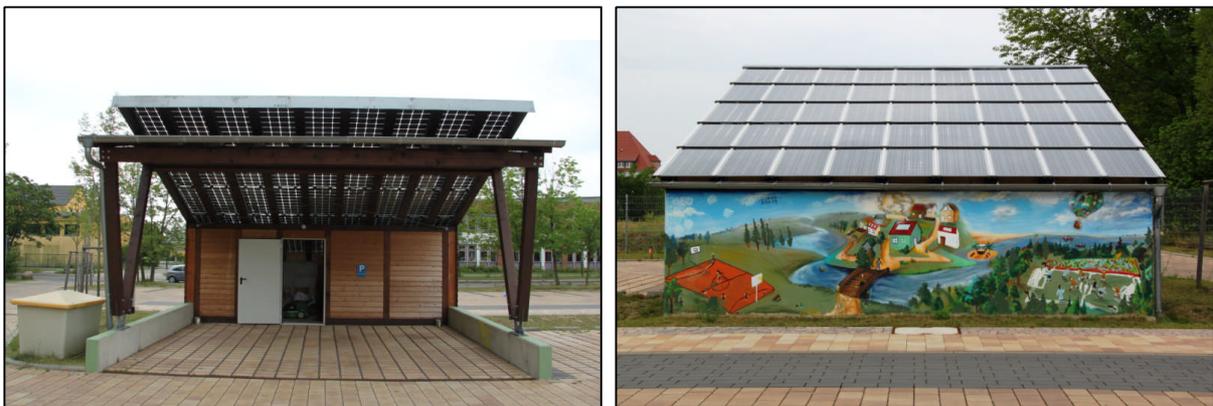
Die Photovoltaikanlage auf dem Dach wurde am 15.04.2014 in Betrieb genommen. Einen Eindruck der Anlage vor Ort gibt Abbildung II-66.

Die Module sind nach Süden gerichtet und haben eine Neigung von 15° sowie einen Wirkungsgrad von 15,1%. Die fünf Wechselrichter der Firma SMA (4 x Typ STP 15000TL-10, 1 x Typ STP 12000TL-10) sind aus Platzgründen auf dem Dach aufgestellt. Es handelt sich um Modelle ohne Transformator.



**Abbildung II-66: Photovoltaikanlage auf Dach**

Die PV-Anlage auf dem Carport hat nicht nur einen funktionalen Zweck. Sie wurde sichtbar gebaut, um von Schülern, Bewohnern der Umgebung sowie Besuchern wahrgenommen zu werden. Dadurch erfüllt sie einen pädagogischen Zweck: Die Nutzung regenerativer Energie zu zeigen und das Umweltbewusstsein zu stärken. Einen Eindruck gibt Abbildung II-67.



**Abbildung II-67: Nord- und Südansicht des Photovoltaik-Carports**

Die Anlage wurde am 01.11.2014 in Betrieb genommen. Auf dem Carport befinden sich 45 Module vom Typ 36MGlass des Herstellers Solarwatt. Ihr Wirkungsgrad beträgt 15,5 %. Die Module sind an zwei Wechselrichtern Typ STP 6000TL-20 von SMA Solar Technology angeschlossen.

Die Gesamtanlage erhält nach dem EEG Förderung für den rückgespeisten Strom. Die Vergütung liegt bei 12,0 Cent/kWh.

Im Verlaufe des Monitorings wurde die Anlage mehrfach berechnet, u. a. wurden 3 Simulationen durchgeführt: in der Phase der Vorplanung 2011, kurz nach der Inbetriebnahme 2014 und parallel zum Monitoring 2016. Auch eine Bedarfsermittlung im Zusammenhang mit dem EnEV-Nachweis liegt vor.

Die finale Simulation ergibt einen korrigierten Ertrag von 77,2 MWh/a. Der reale Ertrag der beiden Anlagen als Mittelwert der Jahre 2016 und 2017 liegt bei 79,9 MWh/a. Im Rahmen der Untersuchung wurde ein Wirkungsgrad von 14,7 % gemessen. In Anbetracht der noch zu erwartenden Alterung der Module (Degradation) sowie der Verschmutzung der kommenden Jahre sind die Prognosen eingetreten und die Anlage erfüllt die Erwartungen.

Es kann festgestellt werden, dass die Simulation sehr genaue Ertragsprognosen liefert, wenn die Anzahl der PV-Module sowie deren Fläche, Ausrichtung und Wirkungsgrad korrekt erfasst wird. Im EnEV-Nachweis mit Bilanzierung nach DIN V 18599 müssen Standardwirkungsgrade verwendet werden. Das führt zu einer deutlichen Unterschätzung des Ertrags mit nur 52 MWh/a.

Als Mittelwert der beiden Jahre 2016/17 ergibt sich eine Einspeisung von produziertem Überschussstrom ins Netz von 38,1 MWh/a. Das sind 48 % der PV-Produktion. Der Rest wird selbst genutzt. Aus dem Netz werden 63,7 MWh/a Strom zugekauft. Das sind 60 % des Gesamtnutzens. Der Rest wird selbst erzeugt.

Die PV-Anlage ist – von den in der St. Franziskus-Grundschule getesteten Effizienztechnologien – eine zur Nachahmung empfohlene.

### Windrad

Als Windrad kam eine vertikale Windturbine WW-1 Aerolus 1.3 zur Ausführung, siehe Abbildung II-68. Das Windrad wurde Mitte 2015 installiert. Geplant waren ursprünglich acht (Vorüberlegungen), dann drei (Projektantrag) dieser Modelle. Einerseits aus Kostengründen, andererseits aufgrund von Problemen bei der Baugenehmigung sowie aufgrund massiver Verzögerungen bei der Lieferung beschränkte sich die Untersuchung schließlich auf ein Gerät. Wie die PV-Anlage auf dem Carport dient es pädagogischen Zwecken.



**Abbildung II-68: Vertikale Windturbine**

Der Generator ist ein getriebeloser Permanent-Magnet-Scheiben-Generator mit einem kernlosen (eisenlosen) Stator. Der Rotor ist 3 Meter hoch und hat einen Durchmesser von 1 Meter. Die dem Wind ausgesetzte Turbinenfläche beträgt 3 m<sup>2</sup>. Die Nennleistung liegt bei 1000 Watt bei 180 Umdrehungen in der Minute, der Wirkungsgrad ist mit 85 % angegeben. Die Startgeschwindigkeit beträgt ab 0,5 m/s. Die Einschaltgeschwindigkeit zur Stromproduktion liegt bei 2,0 m/s.

Der produzierte Strom wird zunächst gleichgerichtet. Anschließend folgt eine Stromüberwachung mit zwei Halbleiter-Leistungsschaltern für die beiden Bremswiderstände. Der übrige Gleichstrom wird anschließend wieder über einen Wechselrichter geschickt. Warum der umständlich anmutende Verschaltungsweg gewählt wurde, ist im Rahmen des Monitorings nicht nachvollziehbar. Er führt jedoch zu erheblichen Stillstandsverlusten des Systems.

Während die Überlegungen zur Beseitigung des Problems noch nicht abgeschlossen waren, kam es zur Jahreswende 2017/18 zum Totschaden. Eine Stromproduktion ist ohne Reparaturen nicht mehr möglich. Aufgrund der technischen Probleme vorab sowie der nicht mehr vorhandenen Gewährleistung wird auf eine Reparatur verzichtet. Das Windrad ist nunmehr ausschließlich Werbeträger ohne technischen Nutzen.

Im Verlaufe des Monitorings wurde die Anlage mehrfach berechnet, u. a. wurden 2 Simulationen durchgeführt: kurz vor der Inbetriebnahme 2014 und parallel zum Monitoring 2016. Auch eine Bedarfsermittlung im Zusammenhang mit dem EnEV-Nachweis liegt vor. Die finale Simulation ergibt einen Ertrag von 0,59 Wh/a. Der EnEV-Nachweis liefert 0,39 MWh/a.

Ein realer Ertrag der Anlage ist messtechnisch nicht feststellbar. Insbesondere der Standby-Verbrauch der Wechselrichter und Sicherheitstechnik führt dazu, dass der Bedarf des Gerätes den Ertrag übersteigt.

Die Peripherie bezieht dauerhaft ca. 135 W Leistung als Eigenverbrauch, auch wenn kein Wind weht. Ab ca. 70 W produzierter Windleistung beginnt der Wechselrichter zu arbeiten, sodass der Verlust dann nur noch 65 W beträgt. Ab 135 W Windleistung ist der Verlust ausgeglichen, erst darüber entsteht ein Ertrag.

Im Verlaufe eines Jahres werden etwa 850 kWh Strom bezogen, aber nur 25 geliefert (Faktor 34!). Damit liegt die Nettobilanz bei einem Verbrauch von 825 kWh. Das Windrad wird in allen Auswertungen daher als Stromverbraucher eingestuft, nicht als Lieferant.

Eine Empfehlung zur Installation eines solchen Windrades aus wirtschaftlichen Erwägungen kann nicht ausgesprochen werden.

## **Batterie**

Die Inbetriebnahme der Batterie im Carport erfolgte erstmalig am 22.04.2015. Bei der Batterieanlage handelt es sich um 16 Einheiten Lithium-Eisenphosphat-Batterie (LiFePO<sub>4</sub>) Typ SP-LFP500AHA vom Hersteller Sinopoly. Die Gesamtspeicherkapazität liegt bei 25,6 kWh. Als Batteriesteuerung kommt das Gerät Sunny Island 6.0H der Firma SMA zum Einsatz. Das Gerät hat eine Fernwartung, so dass Softwareupdates vollautomatisch installiert werden. Ende 2015 zeigte sich nach mehreren Versuchen der Inbetriebnahme seitens des ausführenden Handwerkers, dass die Steuerung und die Batterie nicht kompatibel sind. Die Umprogrammierung der Ladesteuerung wurde jeweils mit dem nächsten Update von SMA überschrieben. Dies führte zum Ansprechen der Überlastsicherung beim nächsten Ladevorgang.

Abbildung II-69 gibt einen Eindruck der Einbausituation. Der im Carport gegebene weitere Platz sollte genutzt werden, um die Batterie im Zuge des Monitorings zu erweitern.

Der ausführende Elektrofachbetrieb entfernte die vorhandene Batterie nach mehrmonatigem ungelöstem Streit und mehreren Reparaturversuchen im Sommer 2016. Anschließend erfolgte die Umstellung auf eine Bleibatterie. Im Frühjahr 2017 wurde eine neue Batterie als Ersatz aufgestellt. Zwischen April und August 2017 lief das Ersatzmodell einwandfrei, seit dem 28.08.2017 ist die Batterieanlage defekt und musste aus noch ungeklärten Gründen erneut stillgelegt werden. Bis zum Ende des Monitorings wurde die Anlage nicht wieder in Betrieb genommen.

Die Batterieanlage kann nur in der Zeit vom 05.04.2017 bis 29.08.2017 untersucht werden. Im Mittel wurde der Batterie eine Energie von 12,6 kWh/d zugeführt, aber nur 8,5 kWh/d entnommen.



**Abbildung II-69: Komplettbatterie Lithium (links) und Bleigel (rechts)**

Gemessen wird in der Wechselstromebene, so dass alle Verluste der Gleichrichtung vor der Einspeicherung, die Speicherungsverluste selbst sowie die Wechselrichtungsverluste nach der Entnahme enthalten sind. Der tägliche Verlust beläuft sich auf 4,1 kWh/d. Der Nutzungsgrad des Teilsystems liegt bei 67 %, was nicht zufriedenstellend ist.

Der gegebene Betrieb war nicht wirtschaftlich und brachte technische Probleme sowie rechtliche Streitigkeiten mit sich. Das Konzept kann somit nicht weiterempfohlen werden, es sei denn deutlich andere Randdaten gelten. Für die St. Franziskus-Grundschule ist die Batterienutzung kein wirtschaftlicher Verlust, weil die Investitionskosten gefördert wurden.

### **Strombedarf des Gebäudes**

Es erfolgten insgesamt 3 Berechnungen des Strombedarfs für das Gebäude: 2014 kurz nach der Inbetriebnahme, 2016 nach Vorliegen von Messwerten des Grobmonitorings sowie 2018 die finale Bilanz mit Einbezug des Intensivmonitorings. Die Ergebnisse der Schlussbilanz werden nachfolgend kurz zusammengefasst. Wichtige Ergebnisse der einzelnen Nutzungszonen zeigt Tabelle II-17.

**Tabelle II-17: Ergebnisse der Energiebedarfsbilanz**

	Sani-tär	Aula	Hort	Ver-kehr	Büro	Klasse	Woh-nen	Küche	Tech-nik	Ge-bäude
Energiemenge, [kWh/a]	1265	1349	4397	7351	8334	10003	5324	13987	64382	116393
Fläche, [m <sup>2</sup> ]	76,8	226,7	327,4	1056,0	244,95	870,95	112,53	47,5	123,09	3086
Energiekennwert [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	16,5	6,0	13,4	7,0	34,0	11,5	47,3	294,5	523,0	37,7

Werden die Ergebnisse weiter zusammengefasst, ergibt sich folgendes:

- Schule ohne Küche und Hausmeisterwohnung
  - Energiebedarf: 97,1 MWh/a
  - davon Beleuchtung: 13,8 MWh/a
  - mechanische Belüftung: 39,6 MWh/a
  - alle anderen elektrischen Anwendungen (incl. TGA): 43,7 MWh/a
- Küche mit 61.000 Essen/Jahr
  - Energiebedarf: 24,6 MWh/a
  - davon Beleuchtung: 0,5 MWh/a
  - mechanische Belüftung: 3,6 MWh/a
  - alle anderen elektrischen Anwendungen (incl. TGA): 20,5 MWh/a
- Hausmeisterwohnung
  - Energiebedarf: 5,3 MWh/a
  - 24 % Heizung, 17 % Lüftung, 9 % Trinkwassererwärmung, 7 % Beleuchtung und der Rest für alle anderen Anwendungen

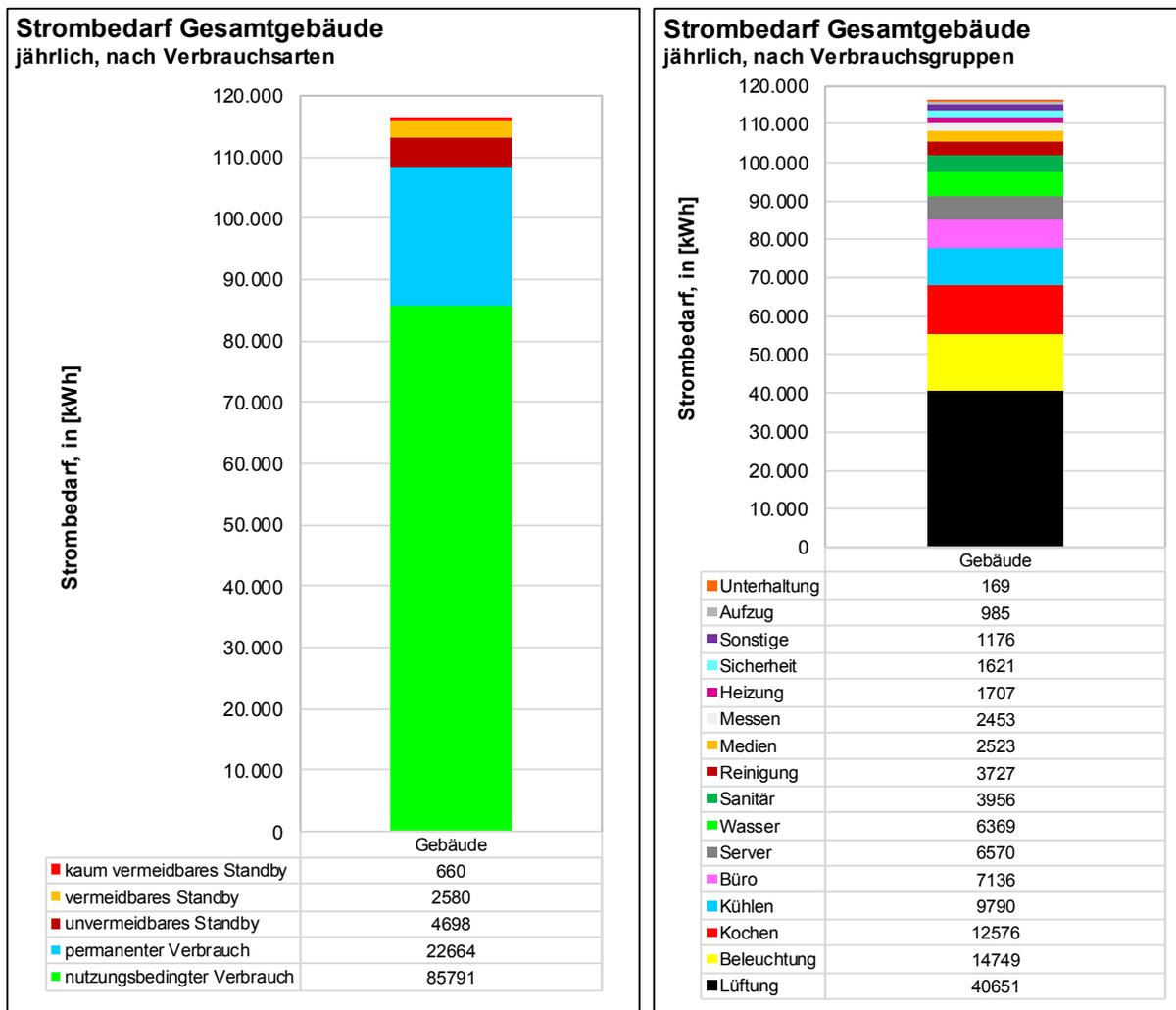
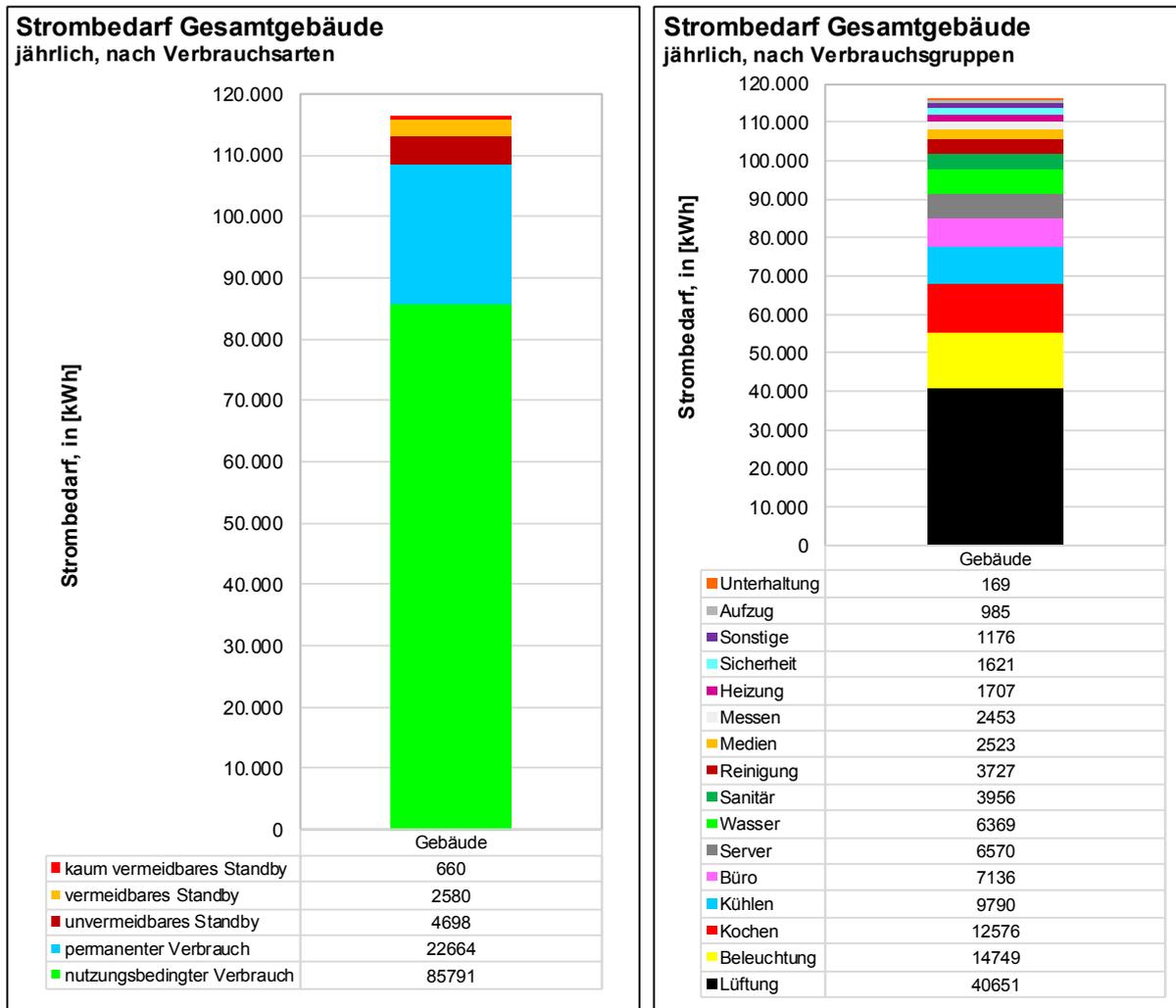


Abbildung II-70 zeigt den Strombedarf des Gesamtgebäudes nach Verbrauchsarten und -gruppen. Es entfallen 35 % auf die Lüftung und 12 % auf die Beleuchtung. Weitere insgesamt 22 % entfallen auf Koch-, Kühl- und Reinigungsanwendungen. Die restlichen TGA-Anwendungen belaufen sich auf 10 %. Der Rest (21 %) ergibt sich aus der Gerätenutzung sowie dem Betrieb von Mess- und Sicherheitstechnik.



**Abbildung II-70: Strombedarfsbilanz des Gesamtgebäudes – Verbrauchsarten und -gruppen**

Insgesamt gilt für das Objekt: 73 % des auftretenden Verbrauchs ist nutzungsbedingt, 20 % sind Dauerverbraucher, die restlichen 7 % sind Standby-Verbraucher. Nur etwa 2 % des Gesamtverbrauchs ist von Nutzern vermeidbar.

Die Energiebilanz des Bedarfs für Klein elektrogeräte und Beleuchtung kann hinreichend genau auf Basis von Leistungsangaben der Hersteller sowie Laufzeiten nach Befragung erfolgen. Ein Abgleich mit grob erfassten Haupt- und Unterzählern reicht hinsichtlich der Genauigkeit aus. Folgende Verbraucher können nicht ohne weiteres korrekt eingeschätzt werden:

- Server
- RLT-Anlagen
- Küchentechnik
- Solarspeichernachheizung
- Druckerhöhungsanlage

Hier sind genauere Messungen erforderlich. Allerdings muss kein Intensivmonitoring in 10-Minuten-Intervallen – wie in der St. Franziskus-Grundschule erfolgt – dazu aufgebaut werden. Entweder es werden handelsübliche (digitale) Stromzähler vorgesehen, die manuell abgelesen werden können. Alternativ erfolgt eine Kurzzeitmessung (Woche, Monat) mit einer mobilen Strommesszange und Datenlogger.

### Gemessener Verbrauch des Gesamtgebäudes

Abbildung II-71 zeigt den Stromverbrauch des Gesamtgebäudes mit seinen 4 Verbrauchern: der Hausmeisterwohnung (5 %), dem Hort (4 %), der Küche (23 %) sowie der eigentlichen Schule mit Verwaltungstrakt und Aula (68 % Verbrauchsanteil). Es ist dazu anzumerken: der Küchenverbrauch enthält zu einem sehr geringen Anteil auch Energiemengen, die eigentlich der Hausmeisterwohnung zuzuschreiben wären (thermische Desinfektion des Speichers). Außerdem ist in der Menge des Hortes kein Energieaufwand für die Belüftung enthalten, da die Horträume an der zentralen RLT angeschlossen sind.

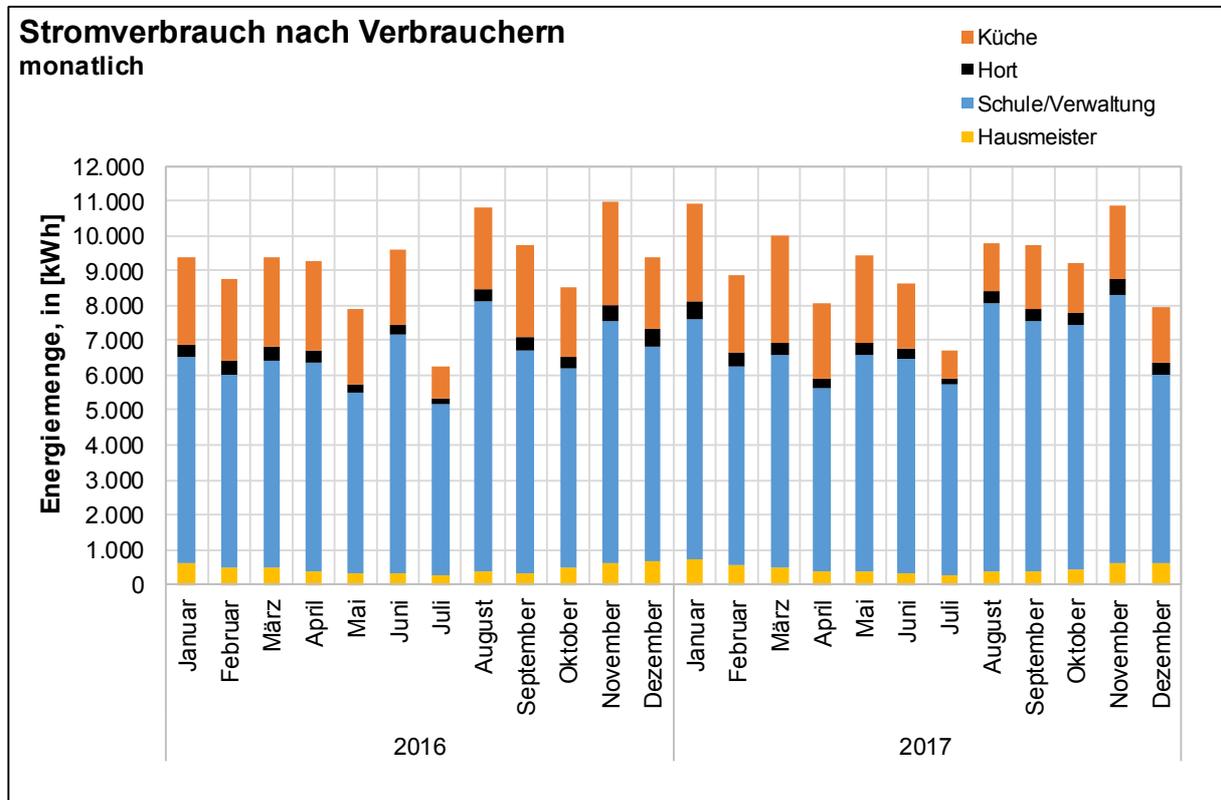


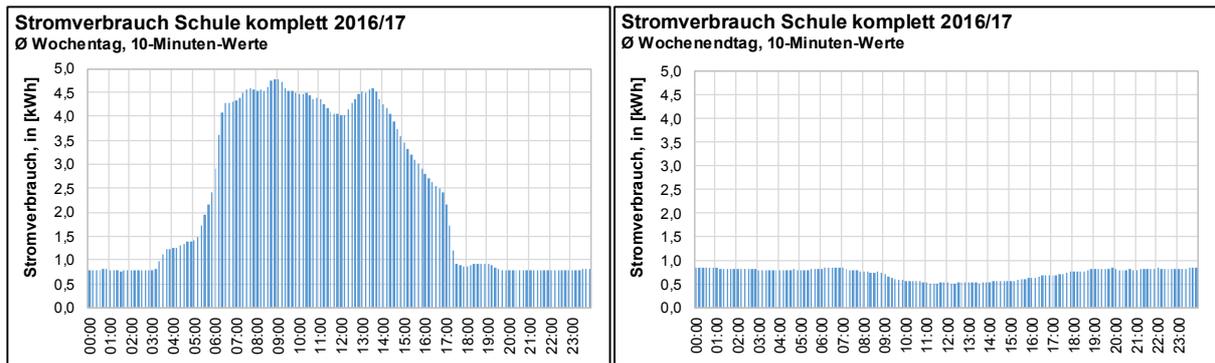
Abbildung II-71: Gesamtstromverbrauch nach Verbrauchern – 2016 und 2017

Der Jahresgesamtverbrauch beläuft sich auf 110,2 MWh/a. Das entspricht einem Energiekennwert von im Mittel 35,7 kWh/(m<sup>2</sup>a). Die Einzelkennwerte liegen bei:

- 48,1 kWh/(m<sup>2</sup>a) für die Hausmeisterwohnung
- 8,5 kWh/(m<sup>2</sup>a) für den Hort
- 312,7 kWh/(m<sup>2</sup>a) für die Küche
- 31,1 kWh/(m<sup>2</sup>a) für die Schule mit Verwaltung.

### Gemessener Verbrauch für Schule, Hort und Verwaltung

Abbildung II-72 zeigt das Tagesprofil der Schule (ohne Hausmeisterwohnung). Dargestellt ist der Gesamtverbrauch für Schule, Hort, Verwaltung und Küche, unabhängig von der Frage, ob er mit Netzstrom oder aus PV gedeckt wird.



**Abbildung II-72: Tagesprofil Stromverbrauch Schule o. Hausmeisterwohnung**

Deutlich erkennbar ist der Einfluss der Lüftungsanlage, welche ab 3 Uhr bzw. 5 Uhr den ersten Verbrauchssprung bewirkt. Das Eintreffen der Hort- und Küchenmitarbeiter sowie der ersten Kinder um 6 Uhr führt zum größten Einzelsprung des Tagesverlaufs. Bis 9 Uhr ist das Maximum erreicht. Lüftung, Beleuchtung und die Küche laufen maximal. In der Mittagspause gegen 12 Uhr gibt es einen kleinen Verbrauchsrückgang, da die Küche Essen verteilt und weder kocht, noch spült.

Auch in den Klassenräumen bewirken die Bewegungsmelder ein Abschalten der Beleuchtung und Belüftung. Nach dem Essen kommt noch eine Unterrichtsstunde sowie der Spülbetrieb in der Küche, so dass es erneut zu einem Anstieg gegen 13 ... 14 Uhr kommt.

Bis 17 Uhr verlassen die Kinder, Betreuer sowie das Küchenpersonal nach und nach die Schule. Dann wird die Lüftungsanlage abgeschaltet, was zum größten Rücksprung des Verbrauchs führt. Anschließend ist wieder Grundlastbetrieb gegeben. Es laufen die Grundlüftung der Küche, der Server mit jeglicher Sicherheitstechnik, die Kühltechnik der Küche sowie alle Standbyverbraucher.

Abbildung II-73 schlüsselt den Verbrauch der Schule mit Hort und Verwaltung nach Anwendungen auf – jeweils sofern diese messtechnisch erfasst sind.

Die größten Verbraucher sind mit 25 % bzw. 21 % des Stromverbrauchs die beiden RLT-Anlagen der Verwaltung/Aula (Gebäudeteil A) und des Klassentraktes/Hortes (Gebäudeteil B). Die zentralen Anlagen (Aufzug, Server und Serverkühlung) machen insgesamt 13 % des Verbrauchs aus. Die Pumpen und zugehörigen Regelungen führen zu knapp 7 % des Verbrauchs. Die nutzungsbedingten Aufwendungen für Elektrogeräte und Beleuchtung ergeben die restlichen 34 % des Verbrauchs. Eine Witterungsabhängigkeit sowie der Einfluss der Ferien ist zu erkennen.

### Stromverbrauch der Schule mit Hort und Verwaltung nach Anwendungen monatlich

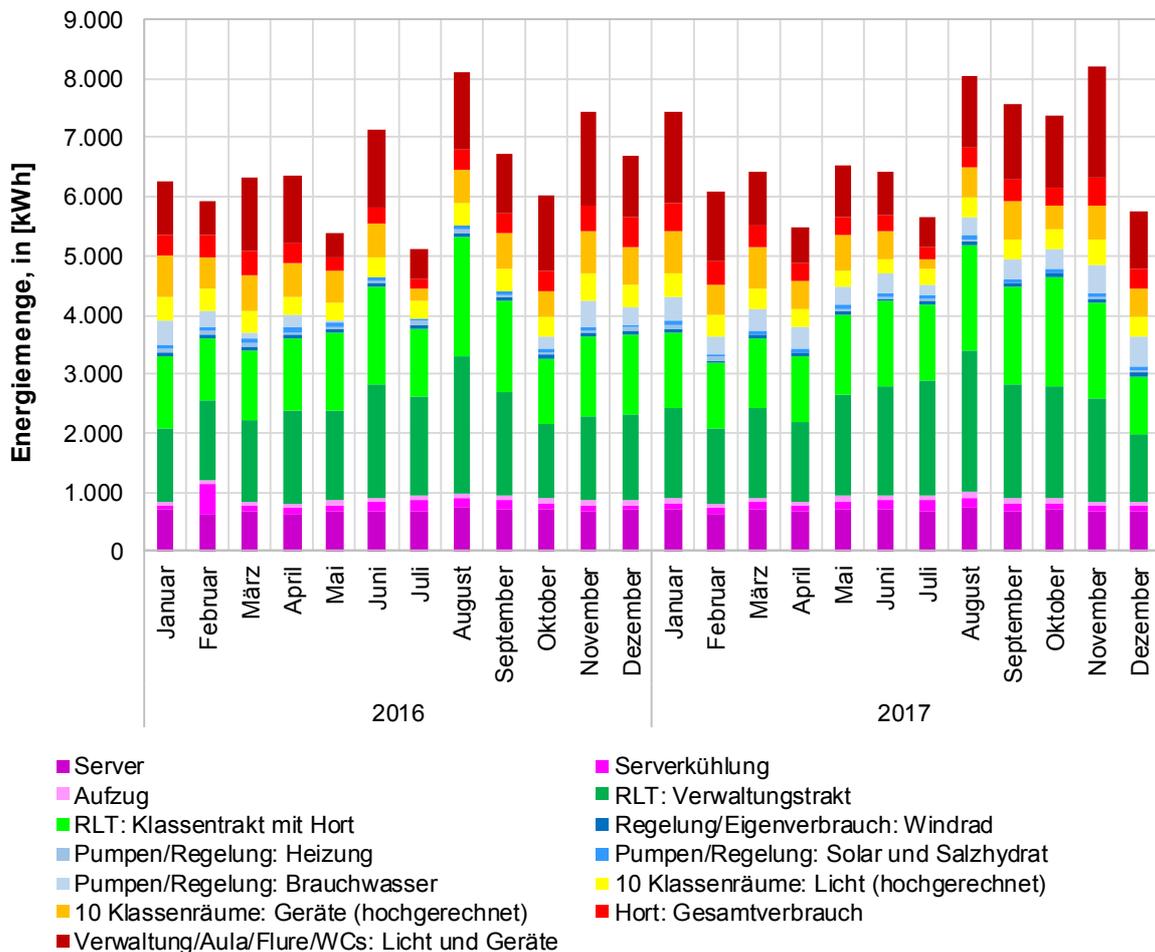


Abbildung II-73: Gesamtstromverbrauch Schule/Hort/Verwaltung nach Verbrauchern – 2016/17

### Gemessener Verbrauch der Küche

Abbildung II-74 zeigen den Lastverlauf der Küche. Mit dem Eintreffen des Personals um 6 Uhr werden die Lüftungsanlagen eingeschaltet, so dass es zu einer aktiven Beheizung (Winterhalbjahr) oder Kühlung (passiv im Sommerhalbjahr) kommt. Darüber hinaus wird der Pufferspeicher mit Strom nachgeheizt – je nachdem, welche Solarenergiemenge vom Vortag noch vorhanden ist. Bis etwa 11 Uhr wird gekocht. Kurz vor 12 Uhr bricht der Bedarf sehr leicht ein, weil das Essen nun ausgedient wird. Kurz nach 12 Uhr beginnt parallel der Spülbetrieb.

Am Nachmittag werden noch Vorbereitungen für den nächsten Tag getroffen, teilweise vorgekocht, teilweise nur geschält. Gegen 15 Uhr ist der Arbeitstag mit dem Reinigen des Bodens beendet. Die Lüftungsanlagen werden ausgeschaltet. Nachts laufen die Grundlüftung sowie die Kühlzellen.

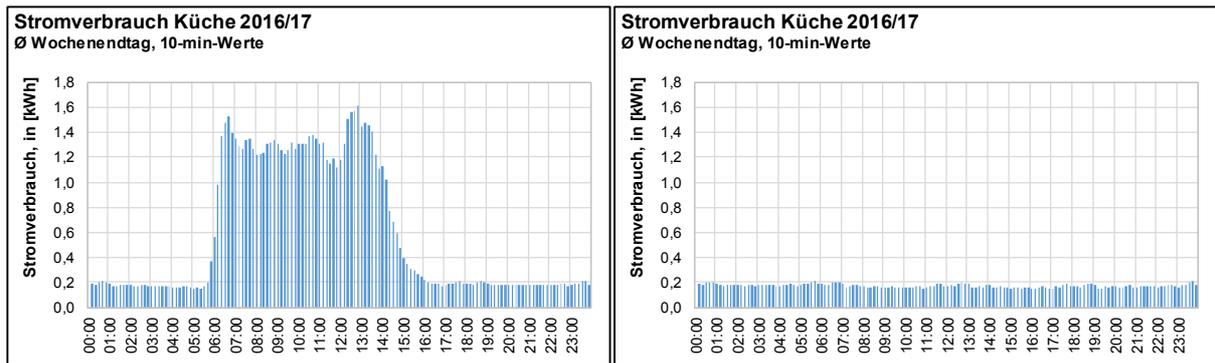


Abbildung II-74: Tagesprofil – Stromverbrauch Küche

Abbildung II-75 zeigt die detaillierte Energiebilanz der Küche. Die Kühlzellen, RLT-Anlagen und Trinkwassererwärmung werden separat beschrieben. Der sonstige Verbrauch ergibt sich aus dem eigentlichen Kochen. In den Zeiten der Sommerferien ist er sehr gering. Zum 01.08.2017 hat ein neuer Pächter die Küche übernommen. Er betreibt keine Kochküche mehr, sondern in weiten Teilen eine Aufwärmküche.

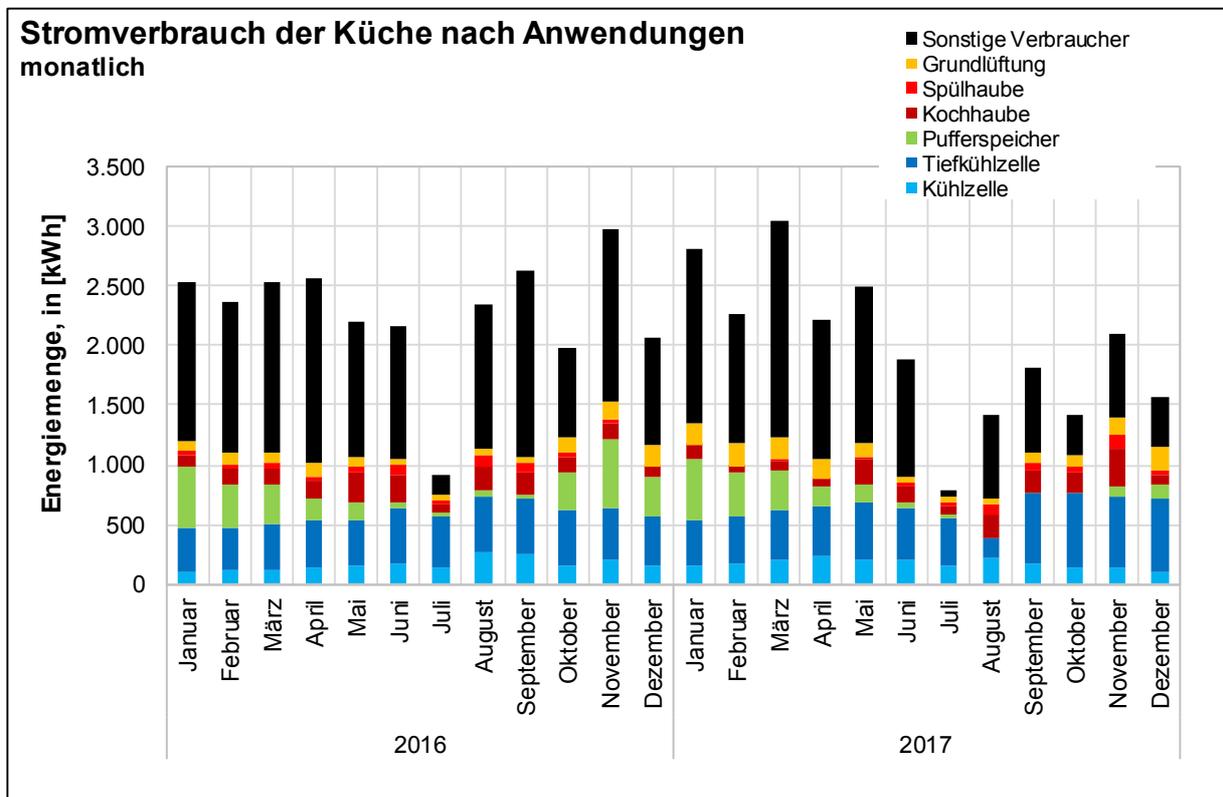


Abbildung II-75: Monatsbilanz Küchenbetrieb – 2016/17

Die Jahresbilanz für den ersten Pächter ergibt einen Gesamtverbrauch von etwa 27,6 MWh/a für Strom. Davon entfallen ca. 27 % auf die Kühlung, 11 % auf die Trinkwassererwärmung, 12 % auf die RLT und 50 % auf den eigentlichen Kochbetrieb sowie andere Anwendungen (z. B. Beleuchtung).

Die Hochrechnung für den neuen Pächter ergibt einen deutlich geringeren Gesamtverbrauch von nur noch 19,1 MWh/a. Die Verbrauchsanteile verschieben sich. Alle Aufwendungen, die mit dem Kochvorgang verbunden sind, nehmen anteilig ab. Für den neuen Pächter entfallen ca. 40 % auf die Kühlung, 3 % auf die Trinkwassererwärmung, 22 % auf die RLT und 35 % auf den eigentlichen Kochbetrieb sowie andere Anwendungen (z. B. Beleuchtung).

## Gemessener Verbrauch der Hausmeisterwohnung

Abbildung II-76 zeigt den Wochentags- und Wochenendverbrauch der Hausmeisterwohnung. Bereits vor 6 Uhr beginnt in der Woche der Tag. Es fallen Stromverbräuche für Beleuchtung, Küchengeräte, Warmwasserbereitung sowie die Fußbodenheizung des Bades an. Ab 8 Uhr ist die morgendliche Spitze vorbei. Erst mittags nach 12 Uhr, verstärkt nach 18 Uhr ergibt sich ein stetiger Anstieg bis etwa 20 Uhr. Danach sinkt der Verbrauch und erreicht 22 Uhr das Nachtniveau. Der Nachtverbrauch ergibt sich aus den Kühlgeräten, der Lüftungsanlage sowie allen Standbyverbräuchen. Im Winter wird auch geheizt, wenn auch im Nachtbetrieb.

An den Wochenenden beginnt der Tag erst zwischen 8 und 9 Uhr. Es zeigt sich nun eine ausgeprägtere Mittagsspitze – vermutlich aufgrund des Kochbetriebs. Das nachmittägliche Tief ist gegen 15 Uhr erreicht. Erst von 19 ... 20 Uhr ist aufgrund von Trinkwassererwärmung (Durchlauferhitzer) wieder ein Anstieg zu erkennen. Etwa um Mitternacht wird das Nachtniveau wieder erreicht.

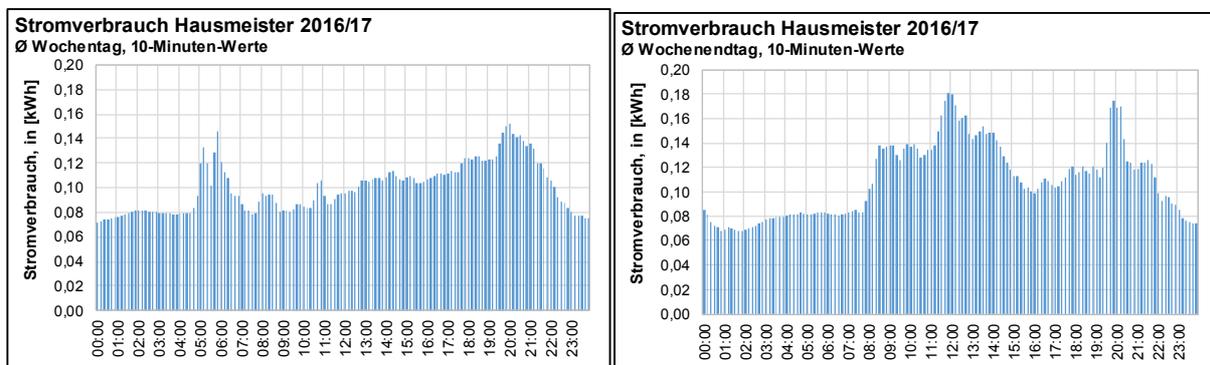


Abbildung II-76: Tagesprofil – Stromverbrauch Hausmeisterwohnung

Die Energiebilanz der Hausmeisterwohnung kann Abbildung II-77 entnommen werden.

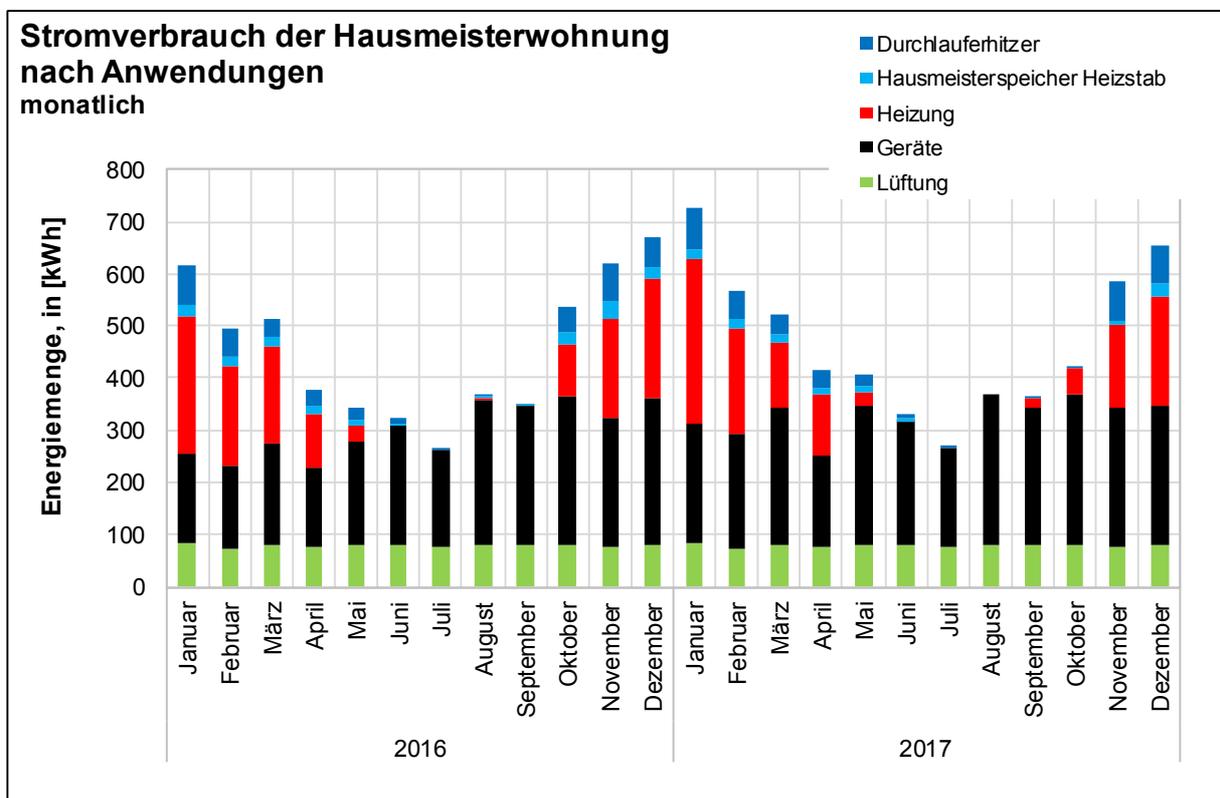


Abbildung II-77: Monatsbilanz Stromverbrauch der Hausmeisterwohnung – 2016/17

Der mittlere Jahresenergieverbrauch liegt bei 5,6 MWh/a. Davon entfallen 10 % auf die elektrische Trinkwarmwassernachheizung, 17 % auf die Lüftung, 23 % auf Heizung und 50 % auf den Anwendungsstromverbrauch. Der Heizungsanteil wurde mit der außentemperaturabhängigen Auftragung der Messwerte bestimmt.

In allen genannten Rubriken sind sehr niedrige Kennwerte erreicht worden. Der Stromverbrauch der nutzungsbedingten Anwendungen (Telefon, Licht usw.) liegt unter dem Bundesdurchschnitt und entspricht eher dem Wert einer 3-köpfigen Familie.

Weitere Informationen zur Photovoltaik, Windkraft und Batterieanlage sind **Abschlussbericht Teil 10** zu entnehmen.

## II.1.11 Beleuchtung und Verschattung

### Beleuchtungsplanung und Simulation

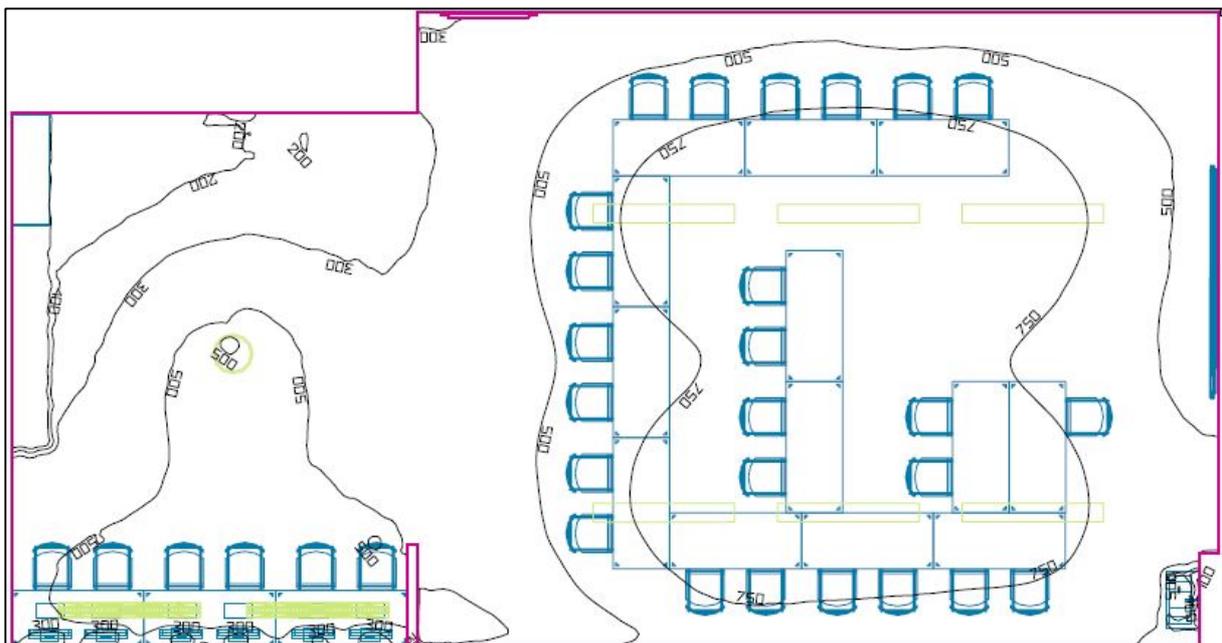
Die Beleuchtung der Gebäudebereiche erfolgt in Anlehnung an die in Tabelle II-18 aufgeführten Sollwerte für die Beleuchtungsstärken.

**Tabelle II-18: Beleuchtungsstärken der Bereiche [58] [59]**

Gebäudebereich	Beleuchtungsstärke
Klassenräume, Horträume	300 lx
Fachunterrichtsraum Werken 2.17	500 lx
Fachunterrichtsraum Kunst 2.14	750 lx
Sanitärräume	200 lx
Flure	100 lx

Die Simulationsergebnisse für die ausgewählten Klassenräume 1.08 und 2.01, das Mädchen-WC 1.10 sowie den Flur im Klassenbereich sind sehr zufriedenstellend.

Die empfohlenen Beleuchtungsstärken von 300 lx werden in den Klassenzimmern im Arbeitsplatzbereich mit Werten von im Mittel ca. 670 lx und Teilbereichen über 750 lx deutlich überschritten, siehe Abbildung II-78. Auch die PC-Arbeitsplätze und die allgemeine Umgebung sind heller als gefordert. Lediglich der Bereich der Mappenregale ist mit < 100 lx etwas schwächer ausgeleuchtet als für den Umgebungsbereich der Sehaufgabe gefordert (Sollwert 200 lx), jedoch wird dieser Bereich nur kurzzeitig zum Holen und Wegstellen von Dingen genutzt.



**Abbildung II-78: Ergebnisdarstellung Klasse 1.08 mit silbernen Jalousien raumseits**

Das simulierte Mädchen-WC 1.10 ergab überwiegend die empfohlene Beleuchtungsstärke von 200 lx. Lediglich im Bereich der Waschbecken waren zu geringe Beleuchtungsstärken zu verzeichnen, was im Bedarfsfall durch das Nachrüsten von Leuchten behoben werden könnte. Im messtechnisch untersuchten Mädchen-WC im Erdgeschoss zeigte sich dieses Problem jedoch nicht.

Der untersuchte Flur erfüllte die Anforderungen an eine Beleuchtungsstärke von 50 lx (Flure ohne Stufen) bzw. den Planwert von 100 lx (Flure inkl. Treppenhäuser) deutlich.

### Komponenten und Bauteile

Es wurden 403 Stück Leuchten im Innenbereich und 14 Stück im Außenbereich der Schule installiert, die sich auf 19 verschiedene Leuchtentypen reduzieren lassen. Überwiegend wurden Leuchtstoffröhren als Leuchtmittel eingesetzt, jedoch kamen auch LED zum Einsatz. Die Gesamtleistung der Leuchtmittel beträgt ca. 22 kW.

In den Klassenzimmern kann zwischen direkter Arbeitsplatzbeleuchtung und indirekter Raumbeleuchtung gewählt werden. Auch eine Kombination aus beidem ist möglich.

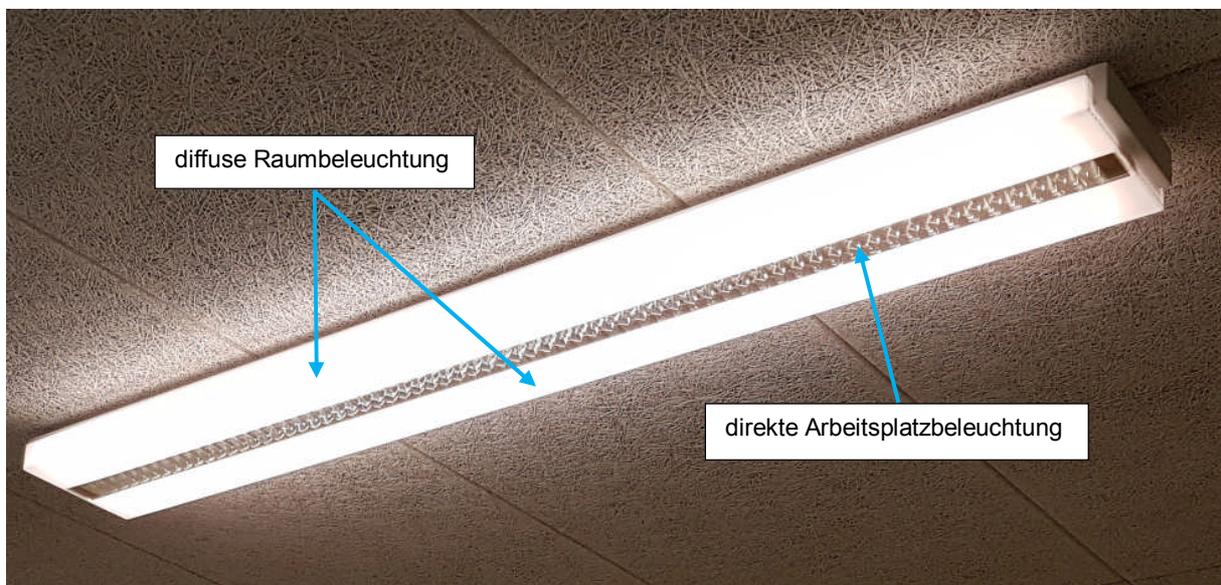


Abbildung II-79: L1 Trilux Valuco Active im Klassenzimmer

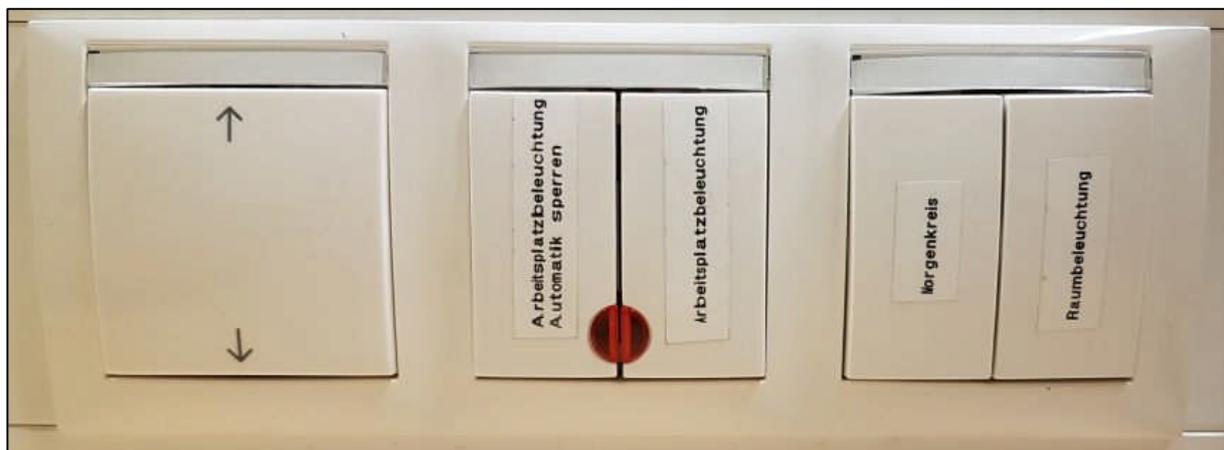


Abbildung II-80: diffuse Raumbelichtung minimal (links), Arbeitsplatzbeleuchtung minimal (rechts)

## Regelung und Steuerung

Damit das Ausschalten des Lichtes nach Verlassen der Räume oder nach Schulende nicht vergessen wird, ist die Schule mit Bewegungsmeldern ausgestattet. In den Klassenräumen erfolgt dabei eine tageslichtabhängige Konstantlichtregelung, während die Beleuchtung in Fluren und Sanitärbereichen lediglich automatisch ein- und ausgeschaltet wird. Die Lehrer können vom Lehrerpult aus zwischen einer direkten Arbeitsplatzbeleuchtung, einer diffusen Raumbeleuchtung oder einer Kombination aus beidem wählen, die Helligkeit hoch- und runterdimmen sowie die Lichtautomatik manuell übersteuern. Weiterhin befinden sich am Lehrertisch die Wippschalter für die Jalousien in den Kastenfenstern.

Das Personal hat teilweise Schwierigkeiten, die Bedienung der umfangreichen Beleuchtungsmöglichkeiten in den Klassenräumen mit nur zwei Tastern umzusetzen. Es wurde angemerkt, dass eine Aufteilung der Funktionen auf mehr als zwei Schalter besser verständlich wäre. Alternativ könnte es ein Bedienpanel geben, auf dem verschiedene Szenarien gespeichert sind und direkt angesteuert werden können. Da eine bauliche Veränderung der Bedienungssituation unwahrscheinlich ist, wird es eine erneute Einweisung und eine schriftliche Anleitung geben, die die Funktionen nochmals erklärt.



**Abbildung II-81: Bedienung Klassenraumbeleuchtung und Jalousien**

Die Beleuchtungsautomatik wird als sehr gut eingeschätzt und von einigen Lehrern dem manuellen Betrieb vorgezogen. Wird die Automatik jedoch übersteuert, passiert es gelegentlich, dass das Licht bei Verlassen des Raumes nicht ausgeschaltet wird, was aus energetischer Sicht ungünstig ist. Wird das Licht hingegen bei Unterrichtsschluss bei gesperrter Automatik manuell ausgeschaltet, so muss es auch morgens bei Betreten des Raumes manuell eingeschaltet werden. Im Winter muss demnach der Weg bis zum Lehrertisch im Dunkeln zurückgelegt werden. Dieses Problem wäre z. B. lösbar, indem eine zentrale Steuerung außerhalb der Nutzungszeit alle Einstellungen auf Automatik zurücksetzt. Dies wurde im Rahmen der Monitoringphase nicht umgesetzt.

Probleme mit den Bewegungsmeldern wurden lediglich durch die Reinigungskräfte berichtet. Im Einzugsbereich der großen Treppe im Gebäudeteil A befindet sich kein Bewegungsmelder, sodass die Beleuchtung nach 5 Minuten ausschaltet und die Reinigungskraft beim Wischen der Treppe plötzlich im Dunkeln steht. Sie selbst oder eine Kollegin müssen dann erst im Flur „Präsenz zeigen“, um das Licht wieder zu aktivieren. Da dies ein Sicherheitsrisiko darstellt, müsste ein Bewegungsmelder nachgerüstet oder die Beleuchtungsdauer – zumindest in der Zeit der Reinigung nachmittags – deutlich verlängert werden.

## Tageslicht- und Kunstlichtmessung

Aula: Die Aula verfügt über eine 6,15 m hohe Fensterfront, welche einen sehr guten Einfallswinkel für Tageslicht ermöglicht. Der gemessene Tageslichtquotient  $D$  von 3,65 % bedeutet, dass der Raum auch an bewölkten Tagen mit einer Außenbeleuchtungsstärke von 10.000 lx im Mittel mit noch etwa 365 lx in Höhe der Nutzebene versorgt wird (Sollwert 200 lx). Im Falle der untersuchten Kunstlichtvariante wurden mit einem Mittelwert von 257 lx sehr gute Ergebnisse nachgewiesen. Sowohl die durchschnittliche Beleuchtungsstärke als auch die Gleichmäßigkeit sind zufriedenstellend.



**Abbildung II-82: Pfosten-Riegel-Fassade Aula von innen bei geschlossenem Sonnenschutz**

Klassenraum 1.08: Die empfohlene Beleuchtungsstärke von 300 lx konnte bei der Tageslichtmessung im Arbeitsbereich im Mittel knapp, für einige Sitzplätze jedoch nicht erzielt werden, während eine Außenbeleuchtungsstärke von im Mittel 14500 lx (leicht bewölkt) vorlag, siehe Abbildung II-84. Die Tische in der Nähe der Flurwand des 6,78 m tiefen Klassenraumes waren nicht ausreichend ausgeleuchtet. Die tageslichtgeführte Beleuchtungsregelung sorgt jedoch in diesem Fall im Automatikmodus für eine konstant ausreichende Beleuchtung der Arbeitsplätze.

Während an bedeckten Tagen ein Stromverbrauch für Beleuchtung entsteht, führt an sonnigen Tagen die Blendung bzw. die Notwendigkeit des sommerlichen Wärmeschutzes zum Schließen der Jalousien, was ebenfalls ggf. das Einschalten der Beleuchtung nach sich zieht. Aus baulicher Sicht sind die Klassenräume bereits mit einem hohen Fensterflächenanteil von 17 % der Grundfläche ausgestattet. Die mögliche Sturzhöhe als maßgeblicher Faktor für den Einfallswinkel des Lichtes wurde mit 2,76 m ausgereizt.

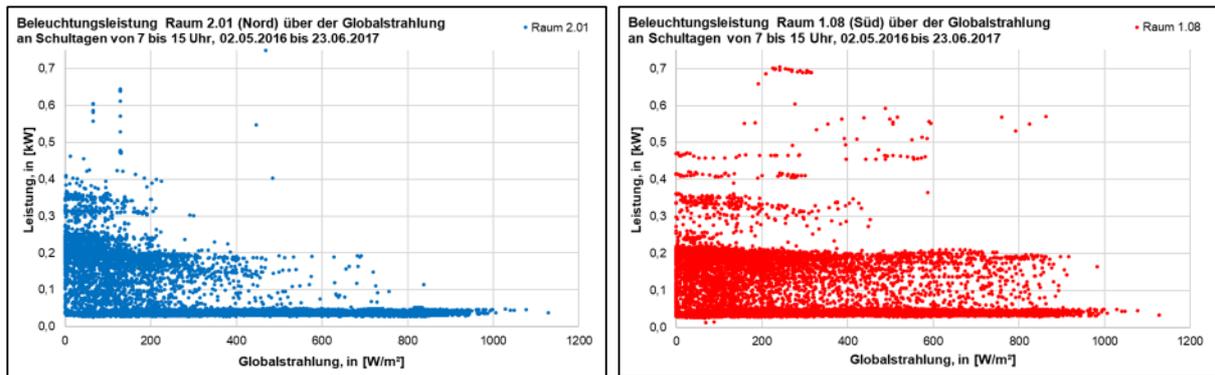


Abbildung II-83: Beleuchtungsleistung in Abhängigkeit von der Globalstrahlung, R. 2.01 und 1.08

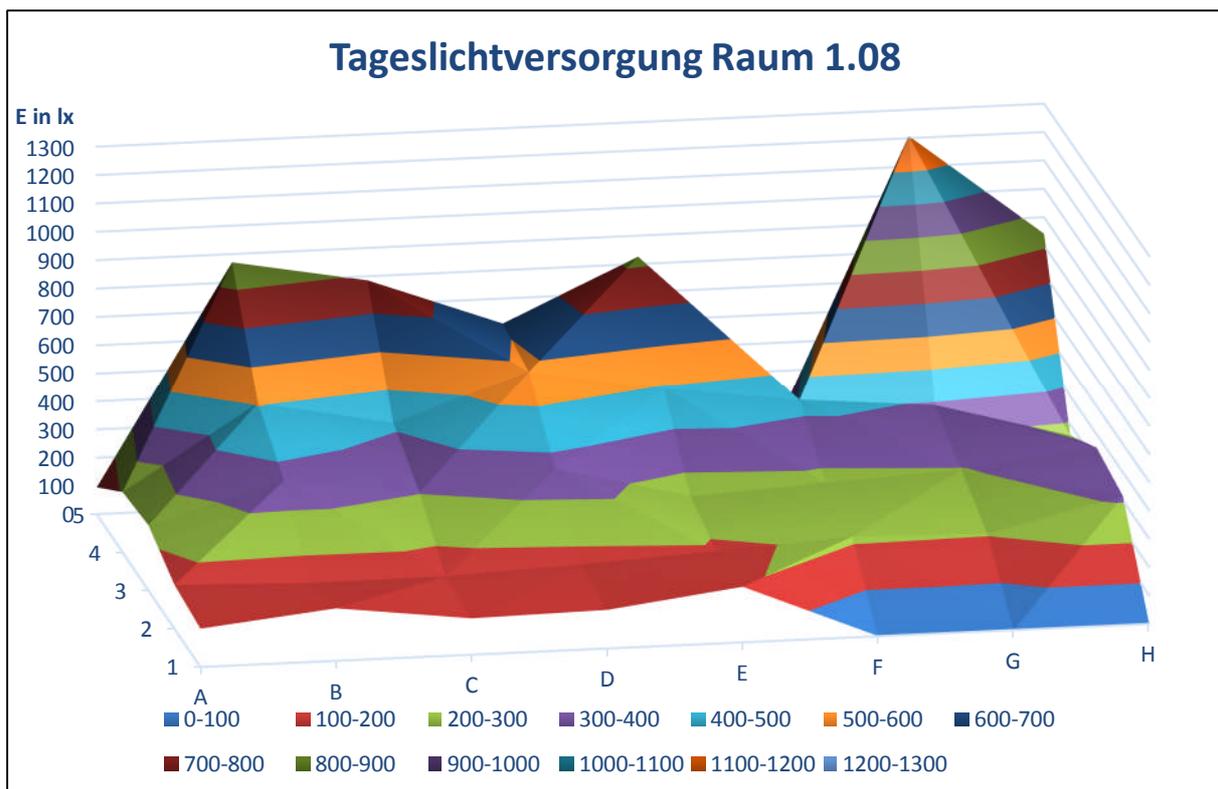


Abbildung II-84: 3D-Diagramm Tageslichtverteilung Klassenraum 1.08 [30]

Klassenraum 2.01: Zur Tageslichtversorgung kann festgehalten werden, dass diese im Raum 2.01 sowie höchstwahrscheinlich in allen nach Norden gelegenen Klassenräumen nicht ausreicht. Aus diesem Grund ist eine automatische Zuschaltung des Kunstlichts wahrscheinlicher als in den südlichen Klassenzimmern. Der Fensterflächenanteil ist jedoch auch hier bereits recht hoch, sodass baulich keine Verbesserungsvorschläge zu nennen sind. Der enorme Unterschied zwischen Nord- und Südklassenraum sollte als Anlass genommen werden, bei der Planung weiterer Schulen die Möglichkeit einer Ost-West-Ausrichtung zu prüfen.

Flure: Die Anforderungen an die Beleuchtungsstärke im Flurbereich sind mit einem Sollwert von 50 lx gering. Mit der installierten Beleuchtung werden diese so weit übererfüllt, dass der Fußboden im erweiterten Flurbereich mit einer mittleren Beleuchtungsstärke von 400 lx bei den Schülern für das stille Arbeiten sehr beliebt ist. Die eingesetzten Leuchtmittel besitzen mit 21 W eine recht geringe Leistung. Das Energieeinsparpotential ist daher vergleichsweise gering. Sehr positiv werden die großzügigen Verglasungen zu den Klassenräumen empfunden, wodurch die Flure zusätzliches Tageslicht erhalten.

WC Mädchen: Zwar ist die Beleuchtungsstärke im WC-Bereich mit einem Mittelwert von 380 lx annähernd doppelt so hoch wie notwendig, jedoch sind die installierten Deckeneinbauleuchten „Tecnolight DE 321“ mit 27 W starken Leuchtmitteln recht sparsam. Somit besteht zunächst kein Optimierungsbedarf.

Fazit: Die Messung der Tages- und Kunstlichtversorgung in den Räumen 1.08, 2.01 sowie in der Aula, im Flur und einem Sanitärraum ergibt eine mehr als ausreichende Beleuchtungsstärke sowie eine gute Wirksamkeit der Verschattung.

### Bedarfsprognose

Die Strombedarfsprognose ergab je nach Kenntnisstand der installierten Lampen (Stand 2015 bzw. Stand 2018) und je nach Bilanzierungsverfahren sehr unterschiedliche Werte – wobei nach DIN V 18599 trotz möglichst realitätsnaher Abbildung des Gebäudes und Anpassung des Nutzerverhaltens (Beratungsmodus) die höchsten Bedarfswerte zu verzeichnen sind, siehe Tabelle II-19.

Der spezifische Strombedarf für Beleuchtung – bezogen auf die Energiebezugsfläche von 3095,02 m<sup>2</sup> – bewegt sich zwischen 4,4...7,6 kWh/(m<sup>2</sup>a).

**Tabelle II-19: Vergleich der Strombedarfsprognosen verschiedener Verfahren**

Verfahren	Strombedarf [kWh/a]	spezifischer Strombedarf [kWh/(m <sup>2</sup> a)]
DIN V 18599 Mini-Tool, Stand 2015	23416,8	7,6
DIN V 18599, Stand 2015	19632,5	6,3
DIN V 18599 mit Norm-Nutzerprofil, Stand 2018	20231,5	6,8
DIN V 18599, Beratungsmodus, Stand 2018	20190,8	6,5
PHPP, Stand 2018	16683,2	5,6
Ingenieurmäßige Abschätzung, Stand 2018	14749,3	4,8

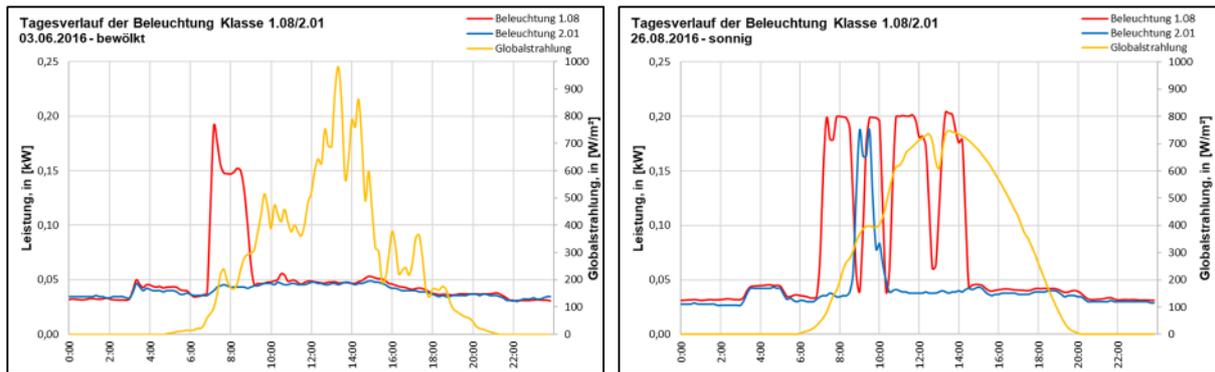
### Messergebnisse Funktion

Die Beleuchtungssituation ist insgesamt als sehr gut einzuschätzen und bietet zahlreiche Einstellungsmöglichkeiten für individuelle Nutzerwünsche. Jedoch gibt es Schwierigkeiten und Berührungspunkte bei der Bedienung der verschiedenen Funktionen, welche durch Aufklärung der Nutzer behoben werden können.

Die Tageslichtversorgung wird in den südorientierten Klassenräumen als mehr als genug eingeschätzt. In den nordorientierten Klassenräumen ist die Tageslichtversorgung gering, hier kommt das Kunstlicht an bewölkten Tagen häufiger zum Einsatz. Die hohe Tageslichtversorgung führt in den südorientierten Räumen dazu, dass die Jalousien meistens geschlossen bleiben müssen, damit das Tafelbild (Smartboard) erkennbar ist. In diesem Zusammenhang wäre es bei Folgeprojekten gut, wenn sich die Verdunkelung für jedes Fenster separat bedienen ließe und nicht automatisch alle Fenster des Raumes verdunkelt würden. So könnte man das Fenster in Tafelnähe verdunkeln und die Schülertische weiterhin mit Tageslicht versorgen (siehe Tagesverläufe im Sommer in Abbildung II-85).

Die Nutzererfahrungen zeigen, dass eine Mobilität des Lehrertisches von Vorteil ist. Nicht nur aufgrund der eigenen Gestaltungsvorlieben im Klassenraum, sondern im Fall der südorientierten Räume aufgrund der hier vorhandenen Blendung auf dem Lehrerlaptop. Die Lehrertische lassen sich aufgrund der Bodenverkabelung jedoch nur drehen, aber nicht verrücken.

Bei Vorortbesuchen fiel auf, dass die Türen zu den Sanitäräumen häufig offenstehen, da sie für Kinder schwer zu schließen sind. Dies führt dazu, dass das Licht angeht, wenn jemand auf dem Flur vorbeigeht. Die Türen sollten so eingestellt werden, dass sie leicht schließen.



**Abbildung II-85: Tagesverläufe im Sommer; Links: bewölkt, Rechts: sonnig**

Bezüglich der Jalousien besteht der große Wunsch der Nutzer, die Jalousien auch in halbhoher Stellung nutzen zu dürfen, sodass im oberen Bereich der Blendschutz genutzt wird, aber im unteren Bereich noch ein Außenbezug möglich ist. Diese Stellung ist aufgrund von in der Vergangenheit aufgetretenen Motorendefekten und gerissenen Scheiben untersagt.

Abbildung II-86 zeigt die Innenwirkung bei heruntergefahrenen Jalousien in den verschiedenen Lamellenstellungen anhand des Kunstraums.



**Abbildung II-86: Kunstraum 2.14, v.l.n.r. silber innen, 45°, 90°, 45°, schwarz innen**

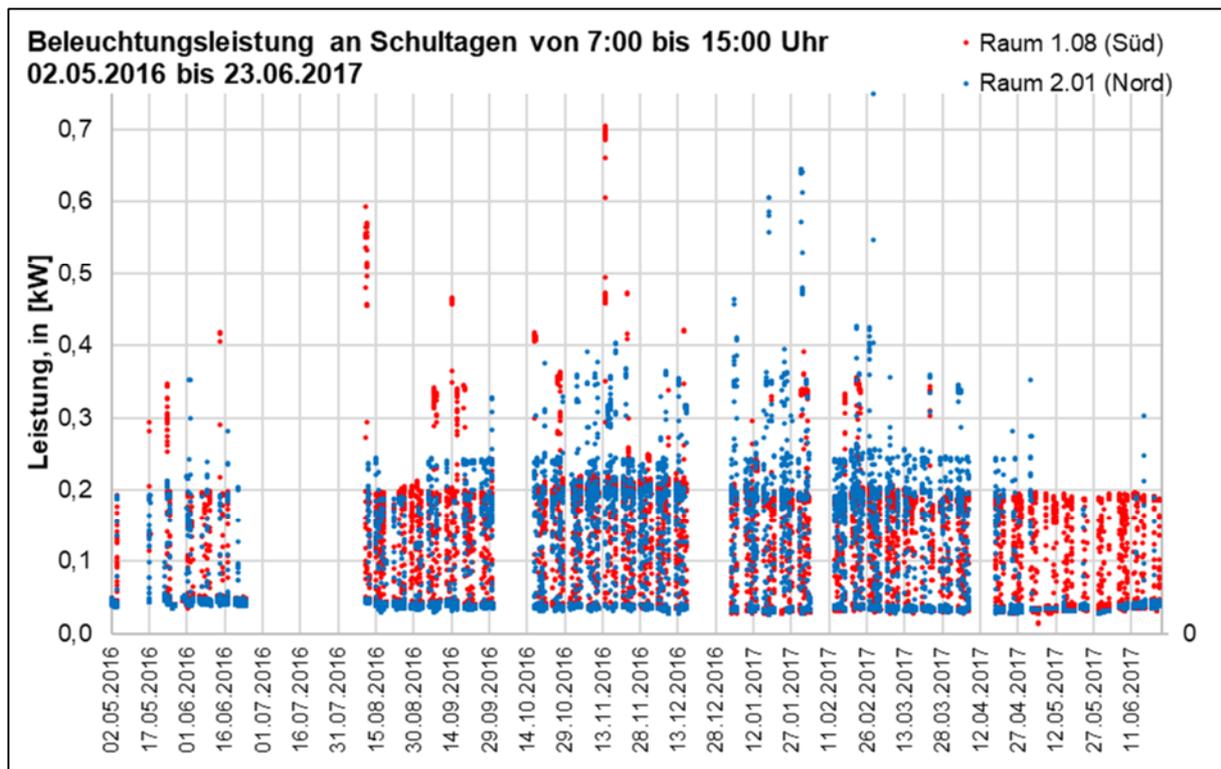
Laut Wartungsfirma der Jalousien nehmen die Motoren der Jalousien keinen Schaden bei Hitze. Die Defekte resultieren aus Überspannung – zwei Metallteile treffen aufeinander und es besteht kein korrekter Potentialausgleich. Insofern sollte diese Handlungsanweisung zurückgenommen werden. Dass der Außenbezug deutlich zum Wohlbefinden beiträgt, zeigt sich auch an der Kritik, dass die Lamellenbreite mit nur 25 mm zu dem Gefühl führt, „eingesperrt zu sein“. Hier hätten breitere Lamellen größere Zwischenräume für Durchblicke ermöglicht.

In Folgeprojekten sollten Jalousien dieser Bauart eine größere Lamellenbreite aufweisen, um den Außenbezug besser zu wahren.

## Messergebnisse Energie

Entgegen der Erwartungen hat der südorientierte Klassenraum 1.08 trotz der besseren Tageslichtversorgung einen höheren Stromverbrauch für Beleuchtung aufzuweisen als der nordorientierte Klassenraum 2.01. Die Untersuchung der Abhängigkeit von der Globalstrahlung ergab, dass es sich bei den Leistungsspitzen vor allem um sonnige Tage handelte, an denen demzufolge die Jalousien im Klassenraum geschlossen bleiben mussten, sodass das Kunstlicht zum Einsatz kam.

Möglicherweise ließe sich der Einsatz der Arbeitsplatzbeleuchtung an sonnigen Tagen reduzieren, wenn man den Nutzern eine halbhohe Stellung der Jalousien ermöglicht, sodass im unteren Bereich noch eine gewisse Tageslichtnutzung möglich ist. Dies ist von den Nutzern auch aufgrund des Außenbezuges gewünscht. Abbildung II-87 zeigt einen Jahresverlauf für die Nutzungszeit (Schultage 7 bis 15 Uhr) vom 02.05.2016 bis 23.06.2017.



**Abbildung II-87: Beleuchtungsleistung an Schultagen 7-15 Uhr, Klassenräume 1.08 und 2.01**

Aufgrund erheblicher Unstimmigkeiten bei den Messwerten im ausgeschalteten Zustand der Beleuchtung wurden zunächst hohe Stillstandsverluste durch Vorschaltgeräte, Präsenzmelder u. ä. vermutet (erfasste Dauerleistung von ca. 100 W). Eine professionelle Nachmessung ergab, dass neben der Wirkleistung in jedem Betriebszustand noch eine zusätzliche Blindleistung erfasst wurde, die zu einer zu hohen Scheinleistung führte. Für die Übertragung auf andere Monitoringprojekte ergibt sich: bei der Inbetriebnahme ist eine professionelle Einstufungsmessung (mit Bekanntgabe des Leistungsfaktors LF, am besten für verschiedene Lastzustände) sinnvoll, damit später keine falschen Schlüsse gezogen werden.

Die Messwerte für den Beleuchtungsstromverbrauch der Klassenräume lagen mit 380 ... 454 kWh/Jahr je Raum im Bereich der Erwartungen aus der ingenieurmäßigen Abschätzung mit 455 kWh/Jahr je Raum. Die Leistungsdaten zeigen zudem, dass die Beleuchtung überwiegend im tageslichtabhängigen Automatikmodus betrieben wird und selten Leistungsspitzen (z. B. durch händisches Hochdimmen) auftreten.

### **Außenbeleuchtung**

Bei der Auswertung der Monitoringdaten der Außenbeleuchtung musste festgestellt werden, dass die virtuellen Zähler, welche die Stromstärkemessungen in Leistungsangaben umrechnen, fehlerhaft programmiert waren. Für die Auswertungen konnten lediglich die Stromstärkemessungen genutzt werden.

Der Stromverbrauch für die Außenbeleuchtung ist mit 1393 kWh/a etwa 5 % geringer als in der Simulation mit 1459 kWh/a prognostiziert wurde. Während die Simulation in der dunkleren Jahreszeit etwas höhere Werte ergab, war hier ein möglicher Standby-Verbrauch nicht angesetzt worden. Beides gleicht sich in etwa aus. Da es sich um sehr sparsame Leuchten handelt und der Anteil der Außenbeleuchtung am Gesamtstromverbrauch der Schule vergleichsweise gering ist, wird kein Optimierungsbedarf gesehen.

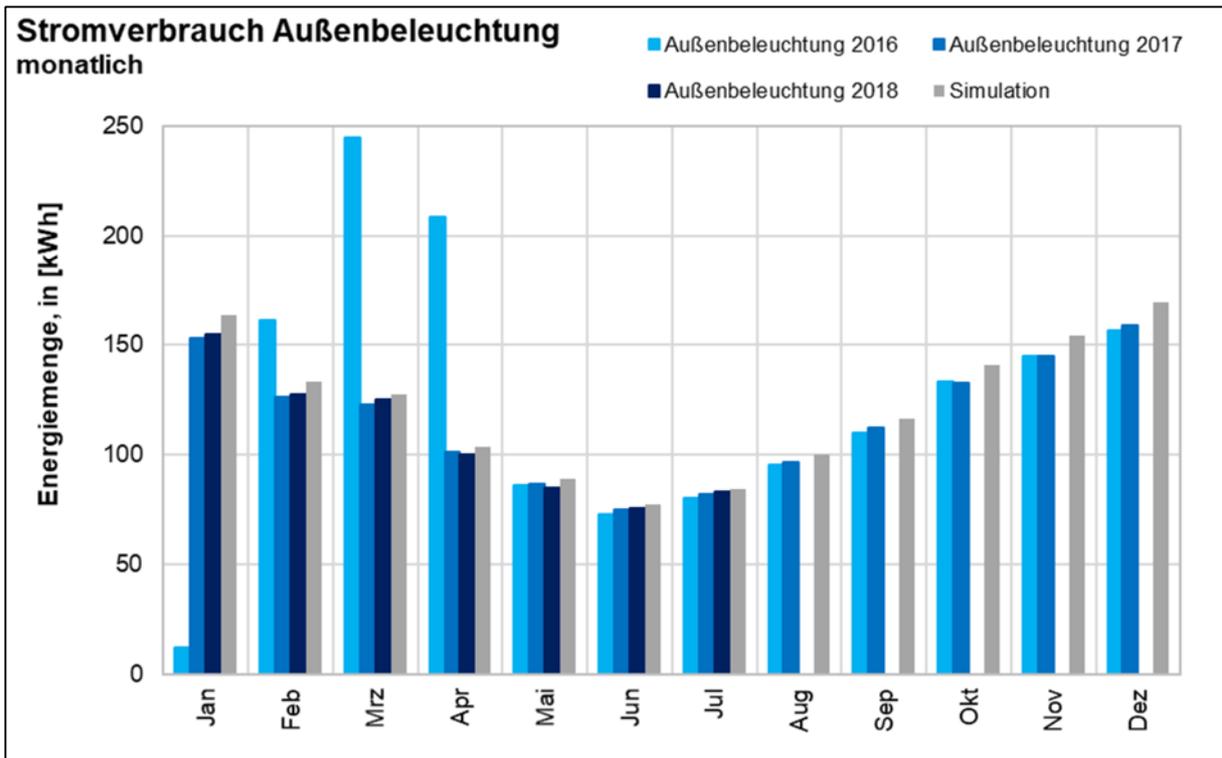


Abbildung II-88: Stromverbrauch Außenbeleuchtung im Jahr 2016 und 2017

Weitere Informationen zur Beleuchtung des Gebäudes sind [Abschlussbericht Teil 11](#) zu entnehmen.

### II.1.12 Frisch-, Regen- und Abwasser

Die St. Franziskus-Grundschule ist mit einem üblichen Trinkwasseranschluss an das Versorgungsnetz ausgestattet. Aus diesem Netz werden alle Waschbecken, Duschen/Wannen, Küchengeräte, Spül- und Waschmaschinen versorgt. Für die WCs und Urinale sind darüber hinaus eine Regenwassernutzungsanlage – siehe Abbildung II-89 – und ein separates Brauchwassernetz installiert.

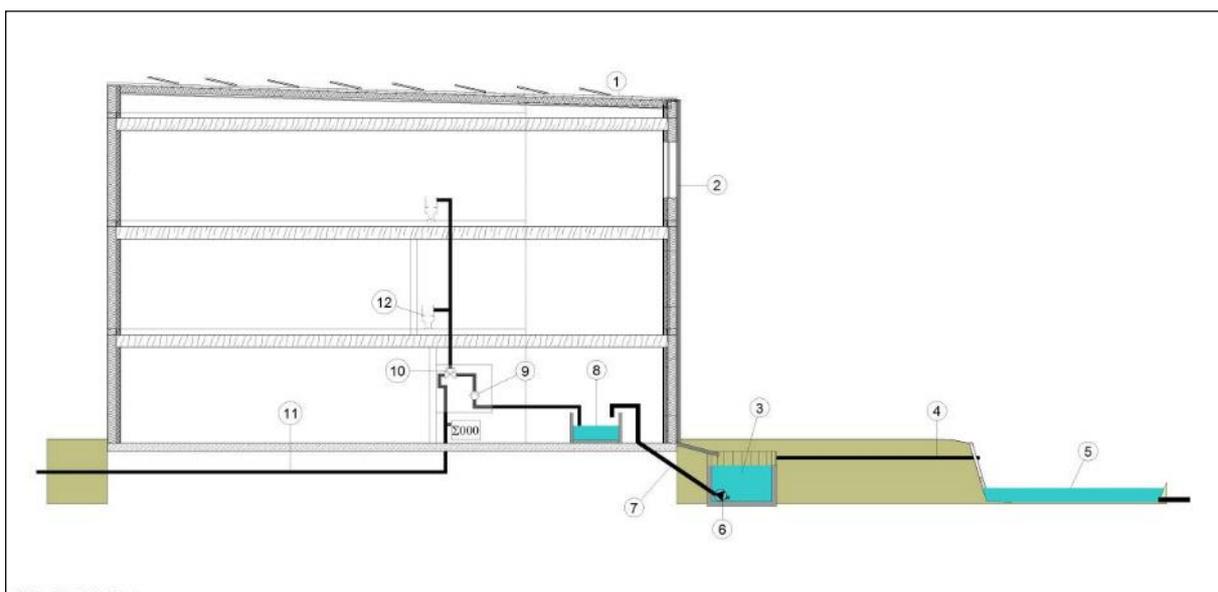


Abbildung II-89: Konzept Wasser- und Regenwassernutzung

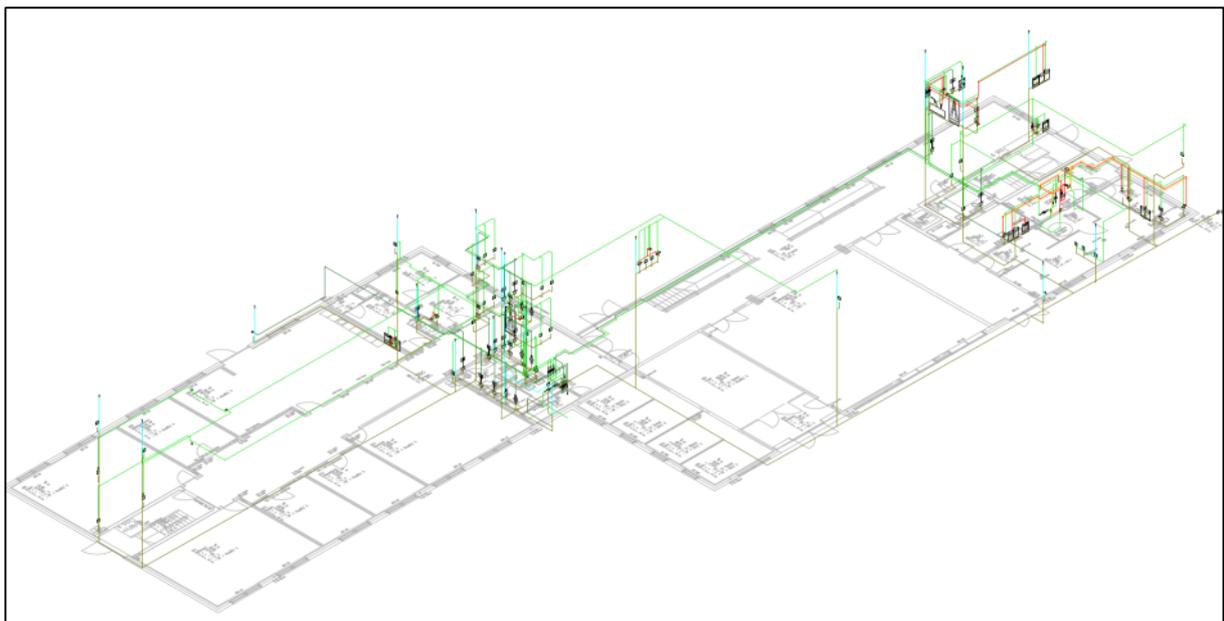
Das Regenwasser wird auf der 1250 m<sup>2</sup> großen Dachfläche gesammelt. Von dort strömt es in eine Regenwasserzisterne mit 20 m<sup>3</sup> Fassungsvermögen. Ist die Zisterne gefüllt, wird das überschüssige Regenwasser über eine unterirdische Leitung in den Überlaufteich geleitet. Dort kann es versickern oder verdunsten.

Für die Nutzung im Gebäude ist die Zisterne der Ausgangspunkt. Mit einer Tauchpumpe wird Regenwasser in einen Zwischenbehälter gepumpt. Er hat 350 Liter Fassungsvermögen und steht im Hausanschlussraum 0.18. Ist der Zwischenbehälter leer, weil auch die Zisterne leer ist, kommt das Toilettenspülwasser vom Versorger.

## Pläne und Planung

Aufgrund der Insolvenz des ersten Planers lagen sämtliche Originalpläne nur als PDF-Dateien aus der Bauantragsphase (2011) sowie Papierausdrucke aus der Ausführungsphase (2013) vor. Alle Änderungen bei der Ausführung wurden daher – wenn überhaupt – nur händisch festgehalten.

Daher wurden nach Baufertigstellung alle Planunterlagen im Rahmen des Monitorings neu als CAD-Dateien erstellt und Änderungen eingetragen. Ebenfalls wurde die komplette Planung der Frisch- und Brauchwasseranlage sowie der Abwasseranlagen erneut erstellt [18] [27] [19]. In diesem Zusammenhang wurden die Netze als Isometrien in entsprechender Planungssoftware modelliert, siehe Abbildung II-90.



**Abbildung II-90: Isometrie der Trinkwasser-, Brauchwasser- und Abwassernetze**

### Trinkwassernetz und -planung

Im Hausanschlussraum (0.18) befindet sich der Hauptzähler mit Trinkwasserfilter, die Verteilung und Absperrung der Trinkwasserzuleitung sowie die Anschlüsse von Grundschule, Hort, Verwaltung, Küche, Hausmeisterwohnung, Sekundarschule und Turnhalle. Die horizontale Trassenführung innerhalb des Gebäudes erfolgt in der abgehängten Decke in den Fluren. Einzelzuleitungen und Steigleitungen sind in den Zwischendecken bzw. in den Holzständerwänden zu den einzelnen Verbrauchsstellen verlegt.

Die Waschmaschinen und Geschirrspüler des Kindercafés, des Besprechungsraumes sowie der Hausmeisterwohnung sind an das Kaltwassernetz angeschlossen. Darüber hinaus alle Wasch- und Spülbecken, Duschen und die Badewanne in der Hausmeisterwohnung sowie ein Trinkwasserspender. Im Hort (0.06) und in der Küche (0.35) werden je ein Mitarbeiter-WC mit Kaltwassernetz versorgt, nicht wie sonst üblich über Brauchwasser.

Die Spüleinrichtungen in der Küche benötigen höhere Temperaturen und sind an ein – auf die Küche beschränktes – zentrales Warmwassernetz mit Zirkulation angeschlossen. Darüber hinaus gibt es mehrere dezentrale elektrische Durchlauferhitzer und einen Kleinspeicher. Die Hausmeisterwohnung wird zweistufig mit Trinkwarmwasser versorgt: über eine solare Vorwärmung (Speicher) und eine Nachheizung mit Durchlauferhitzer in der Nähe der Zapfstellen.

Für das Trinkwassernetz wurde Edelstahl als Steig- und Horizontalverteilungen (DN 12 ... DN 50, insgesamt 356 m Kaltwassernetz und 72 m Warmwassernetz) sowie Geberit-Verbundrohr für die Abnehmeranschlüsse (DN 12 ... 20, insgesamt 115 m Kaltwassernetz und 37 m Warmwassernetz) eingesetzt.

Die Dämmung der Edelstahlleitungen erfolgte mit alukaschierter Mineralwolle. Für die warmgehenden Leitungen mit 100 % des Rohrdurchmessers, die kaltgehenden mit 75 % - beides vorschriftsmäßig. Die Leitungsteile aus Verbundrohr weisen vermutlich durchgängig PE-Vlies-Dämmung auf. Die Dämmdicke entspricht nur 25 % des Durchmessers. Das ist nur im Bereich der Warmwasser- und Zirkulationsleitungen in der Küche zu gering.

Das Kaltwassernetz wurde – gegenüber der Nachrechnung – marginal überdimensioniert. Im Bereich der Steigleitungen sowie Versorgungsleitungen für mehrere Verbraucher wurde in einigen Fällen das Rohr um eine Dimension größer gewählt als der Planungsvorschlag (DN 20 statt DN 15, DN 15 statt DN 12). Die Einzelanschlüsse entsprechen der Planung.

Die berechneten Durchmesser des Trinkwarmwassernetzes stimmen ebenfalls in etwa mit der Ausführung; allerdings müssen für die Spülmaschine und die zugehörige Reinigungsbrause die vom Hersteller vorgesehenen Durchflüsse in der Software angesetzt werden. Die Standardwerte der Norm ("Küchenspüle") sind zu gering. Die Zirkulationsleitungen sind in der Realität mit DN 20 deutlich größer bemessen als der Vorschlagswert der Software (DN 12). Hier ist nicht nachvollziehbar, wieso diese Art der Ausführung gewählt wurde.

## **Brauchwassernetz und -planung**

Die Ableitung des Regenwassers vom Dach erfolgt über in der Außenwand befindliche Sammelleitungen bis zu einem Sammelschacht und von dort in 2 Zisternen. Die Falleitungen sind als PE-Rohr, die Außenleitungen als KG-Rohr ausgeführt.

Im Hausanschlussraum (0.18) befindet sich die Regenwasserzuleitung in DN 50 von der Zisterne, die Nachspeisung mit Trinkwasser sowie die zentrale Verteilung und Absperrung des Brauchwassernetzes. Die horizontale Trassenführung innerhalb des Gebäudes erfolgt in der abgehängten Decke in den Fluren. Einzelzuleitungen und Steigleitungen sind in den Zwischendecken bzw. in den Holzständerwänden zu den einzelnen Verbrauchsstellen verlegt.

An das Brauchwassernetz sind die WCs und Urinale angeschlossen. Zwei Ausnahmen gibt es: im Hort (0.06) und in der Küche (0.35) werden je ein Mitarbeiter-WC mit Kaltwassernetz versorgt, nicht wie sonst üblich über Brauchwasser. Bei der Küche ergibt sich dies aus Gründen der Hygiene. Für das Mitarbeiter-WC im Hort ist keine Begründung der Abweichung bekannt. Die Waschmaschinen wurden nicht an das Brauchwassernetz angeschlossen.

Das Brauchwassernetz wurde – was Rohr- und Dämmmaterialien angeht – analog dem Kaltwassernetz ausgeführt. Es kam Edelstahl zum Einsatz als Steig- und Horizontalverteilungen (DN 12 ... DN 32, insgesamt 148 m) sowie Verbundrohr für die Abnehmeranschlüsse (DN 12, insgesamt 40 m).



**Abbildung II-91: Hausanschlussraum 0.18 – Installationsphase und Endzustand**

Die Nachplanung ergibt folgendes Ergebnis: die Anschlussleitungen der WCs und Urinale ist identisch mit den vor Ort installierten Rohrleitungsdurchmessern. Die zentralen Verteilungen fallen in der umgesetzten Ausführung moderat größer aus als die Planung (meist ein DN größer). Die zentralen Leitungen im Hausanschlussraum wurden jedoch deutlich überdimensioniert (DN 50 statt berechneten DN 25).

### **Abwassernetz und -planung**

Es liegt Schwerkraftentwässerung vor, d. h. Falleitungen führen in Grundleitungen. Die Küchenentwässerung erfolgt mit geeignetem Rohrmaterial für fetthaltige Abwässer, in einen Fettabscheider außerhalb des Gebäudes. Die Falleitungen mit WC erhalten eine Hauptlüftung über Dach, die Falleitungen ohne WC erhalten Be- und Entlüftungsventile. Die Entlüftung der Küchenentwässerung erfolgt separat über Dach. Anschluss-Sammel- und Falleitungen sind aus verschweißtem PE-Rohr gefertigt. Die horizontale Trassenführung der Abwasserleitungen erfolgt weitgehend unter der Bodenplatte.

An das Netz sind alle Trink- und Brauchwasserzapfstellen angeschlossen. Darüber hinaus die Kondensatabläufe von vier Lüftungsanlagen (Hausmeisterwohnung, Grundlüftung Küche, Hauptlüftung Klassentakt, Hauptlüftung Verwaltungstrakt) sowie der Kühlzelle und die Bodeneinläufe in der Küche.

Für das Abwassernetz wurde Polyethylen-Rohr eingesetzt – insgesamt 268 m in DN 20 ... 100. Eine Dämmung für Leitungen in der Konstruktion kann aus Schallschutzgründen erfolgen. Die Vor-Ort-Begehung zeigte – bei allen sichtbaren Leitungen – keine Dämmung. Es ist davon auszugehen, dass dies auch für die Leitungen gilt, die in der Konstruktion untergebracht sind.

Die Fallrohre der Regenwasserentwässerung sind aus PE gefertigt. Sie sind nicht zugänglich. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sie mit einem 9 mm dicken PE-Schutzschlauch versehen sind.

Im Großen und Ganzen kann die Ausführung durch die Nachberechnung gut nachvollzogen werden. Es gibt systematische Abweichungen, welche mit den Datensätzen der Software erklärt werden können. Beispielsweise ergibt die Planung jeweils Leitungen in DN 80, die in der Realität in der Dimension DN 70 ausgeführt wurden. Die WC-Anschlussleitungen sind softwareseitig jeweils in DN 80 vorgesehen, was sich auch in den Fall- und Lüftungsleitungen wiederholt. In der Realität sind jeweils DN 100-Leitungen installiert.

Aus dem vorhandenen Strangschema wird deutlich, dass die Grundleitungen in dem untersuchten Gebäude nur mit Durchmesser DN 100 erstellt wurden. Das Planungsprogramm schlägt DN 80, 100 und 125 vor.

### **Trinkwassererwärmung**

Der Schulbetrieb nutzt nur im Ausnahmefall Warmwasser, welches dezentral in elektrischen Durchlauferhitzern mit 11 kW Leistung erwärmt wird. Sie sind zu finden im Kindercafé 0.03, der Mitarbeiterdusche 1.11, dem Besprechungsraum 1.21 sowie dem Kunstraum 2.14. Im Raum 0.06 wurde ein elektrisch beheizter 5-Liter-Kleinspeicher installiert. Die fehlende Ausstattung der Kinder-WCs mit Warmwasser fällt im Winter negativ auf. Vor allem wenn draußen Minusgrade herrschen und nach der großen Pause mit sehr kaltem Wasser die Hände gewaschen werden sollen. Eine energiesparende Alternativlösung ist nicht bekannt. Es wäre denkbar, Durchlauferhitzer einzusetzen und diese nur im Winterhalbjahr freizuschalten.

Die Hausmeisterwohnung verfügt über einen Anschluss an die zentrale Warmwasserbereitung und hat einen eigenen Trinkwasserspeicher mit einem Speichervolumen von 200 l. Für den Fall, dass die Warmwassertemperatur aufgrund der solaren Vorwärmung nicht ausreichend ist, erfolgt eine (Nach-)Erhitzung über Durchlauferhitzer mit 21 kW (Hauptgerät) sowie 11 kW (in der Küche). Die Geräte sind solartauglich, d. h. können mit Zulufttemperaturen von knapp 70°C versorgt werden. Soweit die Nutzeraussagen es erkennen lassen, ist von einer problemlosen zweistufigen Trinkwassererwärmung für den Hausmeister (solar zentral, elektrisch dezentral) auszugehen. Es traten keine Beschwerden auf.

Die Küche wird im separaten **Abschlussbericht Teil 8** näher beschrieben.

### **Wasserbilanzen**

Die Bilanzen des Trink- und Regenwassers für drei komplette Betriebsjahre zeigen Abbildung II-92 und Abbildung II-93.

Auf Grundlage der vorhandenen Zählerstruktur erfolgte eine Unterteilung der jeweiligen Gesamtmesswerte.

Der Hausmeisterverbrauch ist relativ konstant über die Jahre; das gilt auch für die Aufteilung auf Warm- und Kaltwasser. Der Kaltwasserverbrauch in der Küche ist 2016 aus nicht bekannten Gründen stark gegenüber 2015 gestiegen. Der Warmwasserverbrauch hat 2017 stark abgenommen, was mit der Übernahme des neuen Betreibers zu erklären ist (in der Monatsbilanz erkennbar).

Die Wassermengen für Hort, Schule und Verwaltung sind relativ konstant über die 3 Jahre.

Die Nachspeisung von Trinkwasser in das Brauchwassernetz ist 2017 deutlich geringer als in den beiden Jahren vorher, was durch die höhere Niederschlagsmenge einerseits und den schadensfreien Betrieb der Anlage andererseits erklärt werden kann.

## Trinkwasserbilanz 2015 - 2017 Jahreswerte

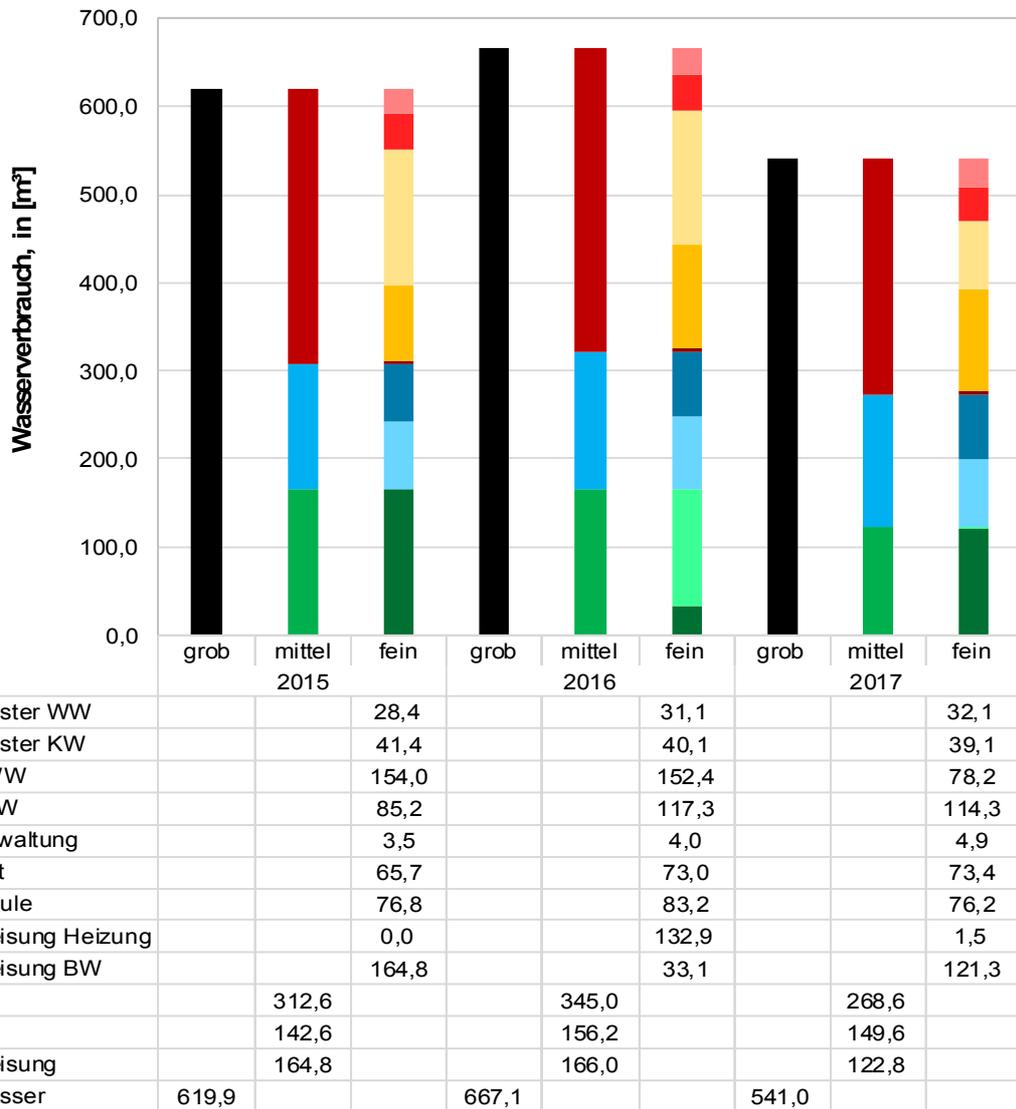


Abbildung II-92: Trinkwasserbilanz – Jahreswerte – 2015 bis 2017

In der Zeit des Schadens der Regenwassernutzung im Jahr 2016 wurde über den Zähler "Nachspeisung Heizung" eine Einspeisung von Trinkwasser realisiert

Die geringste Regenwassernutzung war im Jahr 2016 zu verzeichnen, da die Anlage von April bis Oktober defekt war. In der Zeit des Schadens der Regenwassernutzung im Jahr 2016 wurde über den Zähler "Nachspeisung Heizung" eine Einspeisung von Trinkwasser realisiert.

In der Verwaltung hat die Nutzung von Brauchwasser nach 2015 zugenommen. Die Gründe sind nicht bekannt. Der Hausmeisterverbrauch ist relativ konstant bis leicht steigend über die Jahre.

Der Verbrauch an Brauchwasser für die WCs in den Klassenraumetagen ist relativ konstant über die Jahre. Der Verbrauch im Hort hat nach 2015 stark abgenommen und ist dann konstant geblieben. Es sind keine Gründe dafür bekannt.

Die Regenwassernutzung zieht einen Pumpenenergieverbrauch nach sich. Einerseits für die Zisternenpumpe, andererseits für die Brauchwasser-Doppelpumpe im Gebäude. Diese muss auch das nachgespeiste Frischwasser aktiv pumpen, wenn das Regenwasser erschöpft ist. Die Summe beläuft sich im Jahr 2017 auf 4561 kWh/a. Im Jahr 2016 lag aufgrund des Anlagendefektes (April bis Oktober) der Wert entsprechend niedriger.

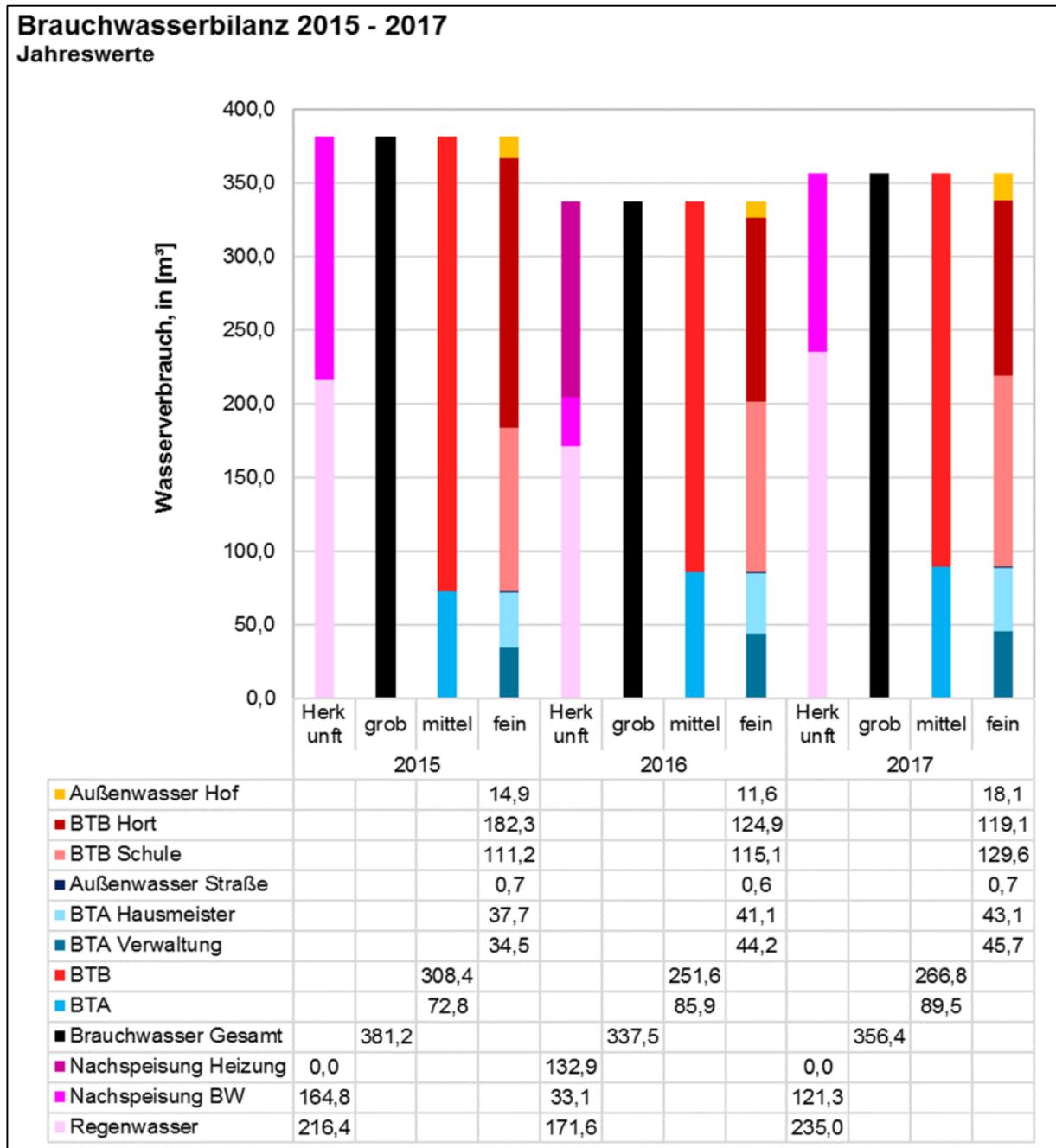


Abbildung II-93: Brauchwasserbilanz – Jahreswerte – 2015 bis 2017

### Fazit aus Sicht der St. Franziskus-Grundschule

Es sei angemerkt: die Dimensionierung der Anlage ist gut gelungen. Um mehr als 66 % Regenwasseranteil für die WC-Spülung zu erreichen, hätte die Zisterne deutlich größer ausgelegt werden müssen – was selbstverständlich die Investitionen erhöht hätte. Die angeschlossene Entwässerungsfläche (Dach) ist mehr als ausreichend für die zu versorgenden Zapfstellen.

Die Kosten der Regenwassernutzungsanlage belaufen sich auf 15.700 €. Zur wirtschaftlichen Einordnung des Systems ist ein Frischwasserpreis von 1,3 €/m<sup>3</sup> (plus 7 % MwSt.) sowie der Strompreis von 0,27 €/kWh (Netzstrom) bzw. 0,12 €/kWh (Mischkalkulation incl. PV-Strom) relevant. Es ist mit Wartungs- und Reparaturkosten zu rechnen. Der Arbeitsaufwand des Hausmeisters mit der Anlage ist nicht einzuschätzen, jedoch hat die Reparatur mit Nachrüstung von Filtern im Jahr 2016 knapp 790 € gekostet. Der Filtereinsatz selbst kostet deutlich unter 50 €/a.

Mit der Regenwassernutzungsanlage konnten im Jahr 2017 – welches schadensfrei ablief – etwa 30 % des Gesamtwassereinsatzes durch Regenwasser ersetzt werden (235 m<sup>3</sup>/a von 776 m<sup>3</sup>/a). Betrachtet man nur die WC-Spülung sowie die Bewässerung der Außenanlagen, so ist eine Regenwasserquote von 66 % erreicht worden (235 m<sup>3</sup>/a von 356 m<sup>3</sup>/a).

Der wirtschaftliche Vorteil ergibt sich nur dadurch, dass für diesen Anteil des Wassers keine Frischwasserkosten anfallen. Allerdings sind für die Pumpen sehr hohe Stromverbräuche festzustellen. Dies ergibt sich vor allem, da jegliches Wasser für die WC-Anlagen gepumpt werden muss – das Regenwasser sowie das Frischwasser. Dies ist durch die Wasserhygiene begründet.

Aus Sicht der St. Franziskus-Grundschule kann kein wirtschaftlicher Betrieb der Anlage festgestellt werden. Auch dann nicht, wenn der verminderte Strompreis aufgrund der Eigenstromerzeugung angesetzt wird sowie die Kapitalkosten gänzlich vernachlässigt werden, weil es sich um ein gefördertes Projekt handelt.

Es ist mit einem Verlust von mindestens 270 €/a zu rechnen. Dies spricht eher für eine Abschaltung der Anlage und der Verwendung von Trinkwasser für die WC-Anlagen. Die Zisterne kann weiterhin für die Bewässerung der Außenanlagen verwendet werden.

### **Fazit aus Sicht anderer Schulen**

Eine Regenwassernutzungsanlage ist vom Grundgedanken her sehr sinnvoll. Im Zusammenhang mit dem Schulbildungskonzept kann Kindern der nachhaltige Umgang mit Ressourcen beigebracht werden. Jedoch bedeutet die Anlage auch einen großen zusätzlichen technischen und finanziellen Aufwand bei der Umsetzung und vor allem im Betrieb.

Für künftige Projekte – bei denen nicht geförderte Investitionen unterstellt werden – müsste sich die Regenwassernutzung allein über Wasserkosteneinsparungen refinanzieren. Es ist nicht davon auszugehen, dass dies in absehbarer Zeit bei den gegebenen Kostenstrukturen (hoher Strompreis, geringer Wasserpreis, hohe Investitionskosten) wirtschaftlich machbar ist.

Es handelte sich nicht um ein knappes Verfehlen der Wirtschaftlichkeit, sondern um ein sehr deutliches. Daher kann eine solche Anlage für die breite Anwendung in Schulen nicht empfohlen werden – es sei denn außergewöhnlich günstige Randdaten liegen vor.

### **Trinkwasserhygiene im Warmwassernetz**

Im Trinkwarmwassernetz sind zwei Details näher zu untersuchen: die gesamte zweistufige Warmwasserversorgung für die Hausmeisterwohnung sowie die Zirkulation in der Küche.

Das Teilsystem zur Trinkwarmwasserversorgung in der Hausmeisterwohnung funktioniert wie folgt: solarer Vorwärmespeicher im EG, von dort aus eine Leitung ins 2. OG, dort die Durchlaufheizung, danach die Zapfstellen.

Sowohl des DVGW-Arbeitsblatt W 551 als auch die Norm DIN 1988-200 erläutern: "dezentrale Durchfluss-Trinkwassererwärmer können ohne weitere Maßnahmen verwendet werden, wenn das dem Durchfluss-Trinkwassererwärmer nachgeschaltete Leitungsvolumen 3 Liter nicht übersteigt." Das ist in der Hausmeisterwohnung gegeben.

Da der Solar-Vorwärmespeicher im EG nur einmal die Woche thermisch desinfiziert wird, ist der Durchlauferhitzer in der Wohnung so eingestellt, dass er eine Erwärmung des Trinkwassers auf  $\geq 60^{\circ}\text{C}$  erreicht, so dass jegliches Warmwasser – sollten Keime vorhanden gewesen sein – vor dem Zapfen thermisch desinfiziert wird.

Das System kann nur funktionieren, wenn der Haupt-Durchlauferhitzer (21 kW) für die Hausmeisterwohnung das Wasser immer auf über  $60^{\circ}\text{C}$  erwärmt. Er darf nicht nach unten geregelt werden (können), um so einer Vermehrung von z. B. Legionellen entgegen zu wirken.

In der Küche ist ausgehend vom Speicher eine Zirkulation vorgesehen. Allerdings ist davon auszugehen, dass sich keine Zirkulation ergibt, obwohl die entsprechende Pumpe in Betrieb ist. In der Realität ergibt sich hieraus aber ein potentiell – ggf. künftiges – Hygieneproblem. Bisherige Hygieneprüfungen führten jedoch nicht zum Nachweis einer Legionellenkontamination. Auch gibt es keine Beschwerden der Mitarbeiter bzgl. zu langer Wartezeiten bis das Warmwasser an der Armatur ist.

Die Warmwasserleitungen mit ca. 15 Liter Gesamtfüllvolumen werden jedoch an jedem Betriebstag mit  $60^{\circ}\text{C}$  Wasser jeweils mind. einmal durchspült. Es gibt prinzipiell keine Totleitungen. Hier wird das Kontaminationsrisiko als gering angesehen.

Fakt ist aber, dass insgesamt ca. 4 Liter Warmwasser in der Zirkulationsleitung ständig stagniert (ca. 31 m, DN 12). Diese Leitung liegt komplett im beheizten Bereich, ist teils nur schwach gedämmt und ist direkt neben der Warmwasserleitung angeordnet, so dass von Wassertemperaturen im Bereich von deutlich über  $20^{\circ}\text{C}$  ausgegangen werden kann. Ein Legionellenwachstum ist nicht ausgeschlossen.

Ein Rückbau der Zirkulation ist nicht zielführend. Zwar wäre dann die Totleitung entfernt und entsprechende Gefahrenquelle beseitigt. Jedoch entspricht das System nicht der DIN 1988-200 und dem DVGW Arbeitsblatt W 551, da mehr als 3 Liter Füllvolumen enthalten sind. Es wird daher – zur Einhaltung der gesetzlichen Auflagen – empfohlen, die Zirkulation in Betrieb zu nehmen.

### **Trinkwasserhygiene im Kaltwassernetz**

Im Trinkkaltwassernetz sind zwei Details näher zu untersuchen: die Mitarbeiterdusche und das Handwaschbecken im Atelier (Raum 0.01).

Grundsätzlich können Stillstandzeiten in der Trinkwasser-Installation nicht vermieden werden. Stagnationsbedingte Änderungen der Trinkwasserbeschaffenheit durch Aufnahme von Substanzen aus Installationswerkstoffen oder durch Bakterienvermehrung können jedoch durch geeignete Maßnahmen minimiert werden.

Eine Nichtnutzung der Anlagen über mehr als 72 Stunden stellt eine Betriebsunterbrechung dar und ist zu vermeiden. Soweit nachgewiesen werden kann, dass die Trinkwasserbeschaffenheit gemäß TrinkwV auch über einen längeren Zeitraum der Nichtnutzung erhalten bleibt und die Gebäude keinen besonderen Anforderungen unterliegen (z. B. Krankenhaus oder Pflegeeinrichtungen usw.), kann die o. g. Frist auf maximal 7 Tage verlängert werden.

Eine längere Betriebsunterbrechung wird als nicht bestimmungsgemäßer Betrieb der Trinkwasserinstallation bezeichnet und kann die Wasserbeschaffenheit, z. B. durch die Vermehrung von Mikroorganismen und in Lösung gehende Werk- und Betriebsstoffe, beeinträchtigen.

Im Raum 1.11 gibt es eine Dusche, welche nur sporadisch genutzt wird. Durch die unregelmäßige Nutzung der Dusche kann – nicht muss! – es hier zur Stagnation des Trinkwassers (Kaltwasser) und damit zur Vermehrung von Legionellen kommen. Hinsichtlich der genannten Dusche könnte darüber nachgedacht werden, ob diese zurückgebaut werden kann, um dem Risiko einer erhöhten Keimbelastung im Trinkwassernetz entgegen zu wirken. Sofern auf die Dusche nicht verzichtet werden kann oder soll, sollte die Installation einer automatischen Hygienespülung in Erwägung gezogen werden. Diese spült innerhalb eines beliebig bestimmbar Zeitintervalls die entsprechenden Leitungen.

Die Rohrleitung vom Hausanschlussraum 0.18 bis zum letzten Waschbecken im Atelier (Raum 0.01) wird bei der Nachplanung als zu lang erkannt. Durch zu große Wassermengen in den Leitungen besteht die Gefahr der Stagnation. Dies kann zur Vermehrung von Krankheitserregern führen, welche die Qualität des Trinkwassers erheblich verschlechtern.

Da diese Zapfstelle jedoch regelmäßig genutzt wird, stellt sich das reale Risiko sicherlich deutlich geringer ein als bei der Dusche. In Bestandsgebäuden sind regelmäßig solche Zapfstellen anzutreffen. Im Rahmen einer Neubauplanung hätte dieses Problem vermieden werden können. Sollte diese Zapfstelle im Rahmen der Hygieneprüfung auffällig werden, sollte die Installation einer automatischen Hygienespülung in Erwägung erfolgen.

Im Rahmen der Neubauplanung empfiehlt sich die Installation einer Ringleitung bzw. Reihenableitung (Durchschleifen) unter Vermeidung von Stichleitungen. Ausgehend von der Hauptleitung werden ausschließlich Stichleitungen mit jeweils weniger als 3 Liter Füllvolumen installiert. An der Wasserentnahmestelle des letzten Verbrauchers wird eine automatische Hygienespülung eingebaut. Bei Stillstandzeiten würde die Hygienespülung dafür sorgen, dass das Trinkwasser in der Leitung in regelmäßigen Abständen vollständig erneuert wird. Auch dies kann dazu beitragen, dass die Vermehrung von Bakterien im Leitungssystem gehemmt wird.

Weitere Informationen zur Wasserversorgung des Gebäudes sind [Abschlussbericht Teil 12](#) zu entnehmen.

## **II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind die entstandenen Ausgaben für die geförderten baulichen Komponenten.

Die ausführliche Darstellung der Kostenverwendung ist aus dem getrennt versandten Verwendungsnachweis ersichtlich.

## **II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Im Hinblick auf die Klimaschutzziele und den noch immer sehr hohen Anteil des Gebäudesektors am Energieverbrauch und den damit verbundenen Emissionen liegt ein sehr großes Potential in der Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden.

Insbesondere im Neubau können zu Planungsbeginn noch alle Weichen gestellt werden: es stehen vielfältige Konstruktionsmöglichkeiten und energieeffiziente Gebäudetechnik zur Verfügung. Werden in dieser Phase ungünstige Entscheidungen hinsichtlich des Entwurfs und des Energiekonzeptes getroffen, so ist davon auszugehen, dass die Folgen häufig unbemerkt bleiben und das Gebäude bis zum ersten Sanierungszyklus ineffizient betrieben wird.

Die im Projekt identifizierten Schwierigkeiten und deren umgesetzte Optimierungen wären ohne das Intensivmonitoring und die damit verbundene Ursachenforschung kaum möglich gewesen. Insbesondere im Bereich der Temperaturbehaglichkeit und der Funktion der Lüftungsanlage wurden massive Verbesserungen erzielt, aber auch einzelne Stromverbraucher konnten identifiziert und Einsparmaßnahmen vorgeschlagen werden.

Hält man sich vor Augen, wie viele Gebäude nach Fertigstellung keine messtechnische Überwachung haben, lässt sich das Optimierungspotential vieler versorgungstechnischer Anlagen erahnen. Deshalb sei für zukünftige energieeffiziente Schulprojekte – auch in der Bestandsanierung – unbedingt zumindest ein Minimalmonitoring der wesentlichen Komponenten empfohlen.

#### **II.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes**

Die messtechnische Begleitung der St. Franziskus-Grundschule hat während der ersten Betriebsjahre zur Aufdeckung von Missetänden und somit zu unverzichtbaren Betriebsoptimierungen, insbesondere der Lüftungstechnik, geführt. Das Monitoringteam war in verschiedenen Fragen zum Gebäudekonzept, zu technischen Komponenten und zum Nutzerverhalten ein gefragter Ansprechpartner für die Edith-Stein-Schulstiftung als Gebäudebetreiber und für die Schulleitung – stellvertretend für alle Nutzer des Gebäudes.

Über die unmittelbare Begleitung der Schule hinaus sind wertvolle Erkenntnisse für weitere energieeffiziente Schulgebäude und andere Nichtwohngebäude gewonnen worden. Dies betrifft insbesondere Aspekte zur technischen Gebäudeausstattung von Passivhausschulen in der Wechselwirkung mit der schultypischen Nutzung (hohe Belegungsdichte in begrenzten Nutzungszeiträumen).

#### **II.5 Während der Durchführung dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Artikel und Veröffentlichungen zu ähnlichen Projekten – insbesondere im Rahmen von EnEff:Schule – wurden während der Projektlaufzeit verfolgt, die baulichen Konzepte und Energiekonzepte anderer Pilotvorhaben sind jedoch kaum mit den Besonderheiten der St. Franziskus-Grundschule Halle vergleichbar.

#### **II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses**

##### **Artikel und Fachveröffentlichungen**

- Gebhardt, Uwe und Gebhardt, Katharina. 2015. Im grünen Bereich - Wärmebrückenfreiheit einer Passivhausschule in Holzbauweise. *Gebäudeenergieberater*. Oktober 2015, 10-2015, S. 24-29. [60]
- Jagnow, Kati und Gebhardt, Katharina. 2015. Studierende begleiten Sachsen-Anhalts erste Passivhaus-Schule in Holzbauweise. *Treffpunkt Campus*. Dezember 2015, S. 5. [61]
- Volksstimme. 2016. Studenten sind auf dem Holzweg. *Volksstimme*. 2016, 5. Januar 2016. [62]
- Bericht in der Fernsehsendung MDR Aktuell vom 29.11.2015
- BINE Informationsdienst. 2017. Passivhausschule überzeugt im Praxistest. *BINE Informationsdienst*. [Online] 3. Januar 2017. [Zitat vom: 3. Januar 2017.] [http://www.bine.info/index.php?id=39&no\\_cache=1&typ=30&artikel=3376&cHash=eee2fde067a21db01cd624e7b9bb7543](http://www.bine.info/index.php?id=39&no_cache=1&typ=30&artikel=3376&cHash=eee2fde067a21db01cd624e7b9bb7543). [63]
- Jagnow, Kati und Gebhardt, Katharina. 2017. Passivhausschule im Praxistest. SHT. Dezember 2017, S. 40 ff [64]

Weitere Veröffentlichungen im Zusammenhang sind geplant. Die dafür vorgesehenen Zeitschriften sind: Bauphysik, die neue quadriga, Der Gebäudeenergieberater, TGA Fachplaner.

## Kinderbuch

Die Nutzung regenerativer Energien sowie nachhaltiger Baustoffe und die Lüftungsthematik sind Teil des Schulkonzeptes, sodass viele Technologien sichtbar für die Schüler installiert sind.

Es gibt ein von Schülern und Lehrern selbst verfasstes Kinderbuch, in dem der heilige Franziskus – von Papst Johannes Paul II. zum Patron des Umweltschutzes und der Ökologie ernannt – das Gebäudekonzept kindgerecht erläutert.

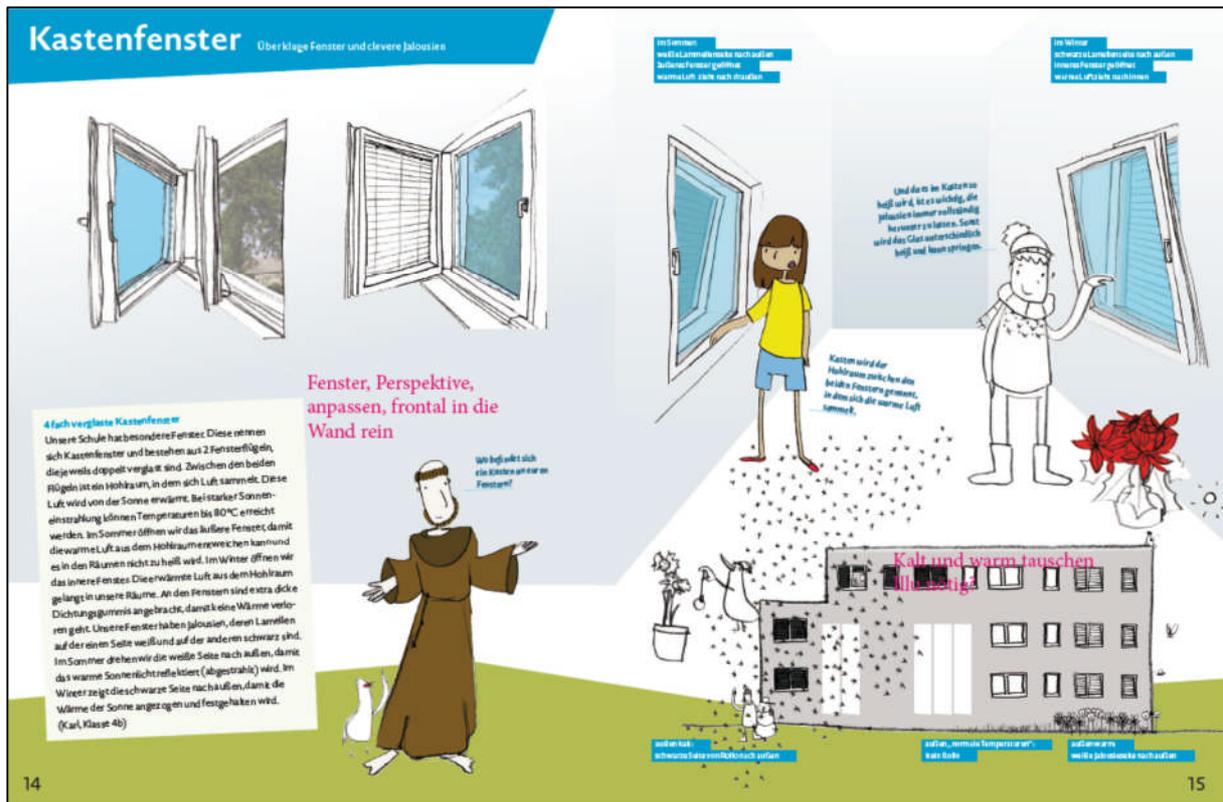


Abbildung II-94: Auszug aus dem Korrekturmanuskript des Kinderbuchs

## Auszeichnungen

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde eine Masterarbeit unter dem Titel "Untersuchung der Wärmebrückenfreiheit einer Passivhausschule in Holzbauweise" verfasst. Die Arbeit wurde am 5. Juni 2015 durch den Bauindustrieverband Sachsen/Sachsen-Anhalt e. V. (BISA) mit dem "Preis der Bauindustrie Sachsen-Anhalt" für herausragende Abschlussarbeiten im Bereich des Bauingenieurwesens gewürdigt. [13]

## Seminare und Tagungen

An folgenden Seminaren und Fachveranstaltungen wurde das Projekt vorgestellt bzw. haben die Projektbearbeiter teilgenommen:

Datum	Thema	Veranstalter
17.09.2013	Fachkongress Lüftung in Schulen, Leipzig	Fachverband Gebäude-Klima e.V.
18.02.2014	„Schulen der Zukunft - nachhaltig, energieeffizient und leistungsfördernd“, Bautec Messe Berlin	BMUB
08./09.05.2014	10. GRE-Kongress; Die Wärmewende: notwendig – machbar – attraktiv	GRE Gesellschaft für Rationelle Energieverwendung e.V.
21.10.2014	Fachtag „Meine Schule spart Energie“	Landesenergieagentur Sachsen-Anhalt GmbH
27./28.10.2014	Workshop der Begleitforschung „Energieeffiziente Schulen“ in Cottbus; Projektvorstellung	EnEff:Schule Begleitforschung
26./27.02.2015	EnOB:MONITOR-Workshop: "Wissenschaftliches Monitoring energieoptimierter Gebäude"	EnOB-Begleitforschung
17./18.04.2015	19. Internationale Passivhaustagung, Leipzig	Passivhaus-Institut Darmstadt
23./24.09.2015	Monisoft Workshop für Anfänger, Köln	organisiert durch die FHs Rosenheim und Köln
11./12.10.2016	EnEff:Schule, 5. Workshop mit dem Thema "Plusenergieschulen", Stuttgart	EnOB-Begleitforschung
20.12.2016	EnEff:Schule, Online-Meeting mit dem Thema "Schule der Zukunft"	EnOB-Begleitforschung
18.05.2017	Tagung „Energieeffizienz in kirchlichen Liegenschaften“, Münster	Bistum Münster
24.11.2017	9. EffizienzTagung Bauen+Modernisieren, Hannover	
13.03.2018	“EMPOWER – Analyse Workshop zur Konkretisierung eines Energiemonitoring und -management Systems (EMS) für STARK III Projekte in Sachsen-Anhalt	Investitionsbank Sachsen-Anhalt, Landesenergieagentur Sachsen-Anhalt

# Anhang

## Literaturangaben

- [1] Edith-Stein-Schulstiftung, „Abschlussbericht "Planung Neubau der St. Franziskus-Grundschule in Halle" über ein Planungsprojekt gefördert unter dem AZ: 28080 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt,“ Edith-Stein-Schulstiftung des Bistums Magdeburg, Magdeburg, 2011.
- [2] K. Gebhardt, „Masterarbeit "Qualitätssicherung für die Planung und Erstellung eines Monitoringkonzeptes für die St. Franziskus-Grundschule in Halle (Saale)",“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2011.
- [3] F. Hallensleben, „Masterarbeit "Nutzerorientierte und witterungsbedingte Simulationen sowie die Erstellung einer Strombilanz am Neubau der Sankt Franziskus Grundschule in Halle (Saale)",“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2014.
- [4] S. Jäger und F. Switala, „Bachelorarbeit "Vergleich der Ergebnisse der Heizlastberechnung für eine Passivhausschule nach verschiedenen Verfahren für die St. Franziskus-Grundschule in Halle (Saale)",“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2014.
- [5] M. Strahlendorff, „Bachelorarbeit „Vergleich stationärer und instationärer Temperatur- und Feuchte-berechnungen für die Gebäudehülle einer Passivhausschule“,“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2014.
- [6] F. Könnecke, „Bachelorarbeit "Simulation einer Solarthermieanlage für den Küchenbetrieb in einer Passivhausschule“,“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2014.
- [7] R. Mank, „Bachelorarbeit "Stromanalyse der Großküche einer Passivhausschule“,“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2014.
- [8] M. Lange, „Bachelorarbeit "Berechnung und Optimierung der Lüftungsanlagen einer Passivhausschule zur Energiebilanzierung“,“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2014.
- [9] S. Schlehf, „Bachelorarbeit "Zertifizierung der Grundschule Sankt Franziskus als Passivhausschule“,“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2014.
- [10] S. Bethke, „Masterarbeit "Vergleichende energetische Bewertung nach verschiedenen Bilanzmethoden für eine Grundschule in Passivhausbauweise anhand der St. Franziskus-Grundschule in Halle (Saale)",“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2014.
- [11] S. Herthum, „Bachelorarbeit "Stromanalyse der Hausmeisterwohnung in einer Passivhausschule“,“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2015.
- [12] S. Gauer, „Bachelorarbeit "Vergleich Sommerlicher Wärmeschutz nach DIN 4108-2 [2003] und 4108-2 [2013] am Beispiel der St. Franziskus Grundschule in Halle“,“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2015.
- [13] U. Gebhardt, „Masterarbeit "Untersuchung der Wärmebrückenfreiheit einer Passivhausschule in Holzbauweise anhand der St. Franziskus-Grundschule Halle (Saale)",“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2015.
- [14] M. Münch, „Masterarbeit "Ökologische Bewertung einer Passivhausschule“,“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2015.
- [15] I. Asmussen, „Masterarbeit "Energetische Bewertung der Beleuchtung in einer Passivhausschule“,“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2015.
- [16] R. Schulze, „Masterarbeit "Aufbereitung, Plausibilitätsprüfung und anschließende Auswertung von Messwerten des Monitorings mit Abgleich der geplanten Effizienzen, Bedarfswerte und Komfortkriterien“,“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2016.

- [17] S. Jäger und F. Switala, „Masterarbeit "Vergleich von Energiebedarfsbilanzen und Verbrauchsdaten für eine Passivhausschule",“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2016.
- [18] M. Erl, „Bachelorarbeit „Überprüfung der Trink- und Brauchwasserplanung für eine Passivhausschule“,“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2016.
- [19] L. Hoffmann, „Bachelorarbeit "Überprüfung der Trinkwasserplanung für die Sankt Franziskus Grundschule in Halle",“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2016.
- [20] H. Neumann und J. Wohlfahrt, „Ökologische Bewertung einer Passivhausschule mit Schwerpunkt technische Gebäudeausrüstung (TGA),“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2016.
- [21] A. Soboh, „Optimierung der Photovoltaikanlage auf Basis von Messdaten für eine Passivhausschule,“ Hochschule Magdeburg/Stendal, Magdeburg, 2016.
- [22] C. Zhang, „Masterarbeit "Optimierung der Solarwärmenutzung für eine Schulküche auf Basis von Messdaten",“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2016.
- [23] J. Stresing, „Bachelorarbeit "Untersuchungen zum sommerlichen Wärmeschutz und zur Temperaturbehaglichkeit in der Aula einer Passivhausschule in Halle",“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2017.
- [24] D. Kleer, „Bachelorarbeit "Schallschutz und Raumakustik in einer Grundschule",“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2018.
- [25] P. Weingart, „Masterarbeit "Qualitätssicherung einer Passivhausschule in Holzbauweise mithilfe ingenieurtechnischer Messverfahren",“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2017.
- [26] J. Song, „Masterarbeit "Ökobilanz für den Innenausbau einer Passivhausschule",“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2017.
- [27] X. Wang, „Masterarbeit "Ökobilanz für die technische Gebäudeausrüstung einer Passivhausschule",“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2017.
- [28] Y. Liu, „Masterarbeit „Ökobilanz für die Elektroausstattung einer Passivhausschule“,“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2017.
- [29] N. Stottmeister, „Masterarbeit "Energetische und wirtschaftliche Bewertung regenerativer Einsparmaßnahmen für eine Grundschule in Passivhausbauweise,“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2017.
- [30] J. Benn, „Masterarbeit "Optimierung der Verschattungs- und Beleuchtungsanlagen für eine Passivhausschule",“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2017.
- [31] L. Haferung, „Masterarbeit "Untersuchungen zu Behaglichkeitskriterien, zur Raumluftqualität und zum Lüftungsverhalten in einer Passivhausschule",“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2017.
- [32] Y. Guo, „Masterarbeit "Detailanalyse für eine elektrisch versorgte Wohnung in Passivhausbauweise",“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2018.
- [33] M. König, „Masterarbeit "Analytische Auswertung der St. Franziskus-Grundschule",“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2018.
- [34] K. Muschalla, „Masterarbeit "Energiebilanzierung mit verschiedenen Energiebilanzverfahren für eine Passivhausschule",“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2018.
- [35] A. Rehbein, „Masterarbeit "Untersuchung und Optimierung der Luftheizung und Luftkühlung für eine Passivhausschule",“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2018.
- [36] K. Voss und et al, Performance von Gebäuden, Karlsruhe: Fraunhofer IRB Verlag, 2016.
- [37] Steinblock Architekten, *Planungsunterlagen*, Magdeburg: Steinblock Architekten, 2013.

- [38] VDI 3807 Blatt 2, *Verbrauchskennwerte für Gebäude - Verbrauchskennwerte für Heizenergie, Strom und Wasser*, Berlin: Beuth, 2014.
- [39] DIN 4108-2:2003, „Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden,“ Beuth, Berlin, 2003.
- [40] DIN 4108-2, *Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden*, Berlin: Beuth, 2013.
- [41] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband 3: Passivhaus-Schulen, Darmstadt: Passivhaus Institut, 2006.
- [42] F. Leusden und H. Freymark, „Darstellungen der Raumbehaglichkeit für den einfachen praktischen Gebrauch,“ *Gesundheitsingenieur 72 Heft 16*, pp. 271-273, 1951.
- [43] K. Schild und W. M. Willems, *Wärmeschutz: Grundlagen – Berechnung – Bewertung*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [44] DIN 18041, *Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen*, Berlin: Beuth, 2004.
- [45] W. M. Willems, K. Schild, S. Dinter und D. Stricker, *Formeln und Tabellen Bauphysik*, Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010.
- [46] J.-H. Ritter, „Untersuchung einer Flachdachkonstruktion im Hinblick auf den klimabedingten Feuchteschutz,“ Ritter Bauphysik, Potsdam, 2012.
- [47] Ingenieurbüro Naumann & Stahr, *Planungsunterlagen*, Leipzig, 2011.
- [48] Steinblock Architekten, „Katholische Grundschule "St. Franziskus" in Halle,“ Präsentation auf der Holzbaufachtagung am 09. November 2012 in Dessau, 2012.
- [49] J.-H. Ritter, „Untersuchung einer Fußbodenkonstruktion gegen Erdreich im Hinblick auf den klimabedingten Feuchteschutz,“ Ritter Bauphysik, Potsdam, 2012.
- [50] WUFI, *WUFI Pro Ver. 5.2*, Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP.
- [51] R. Adriaans, R. Borsch-Laaks, C. Fülle, D. Kehl, H. Künzel, D. Zirkelbach, M. Mohrmann, O. Pankratz, U. Ruisinger, D. Schmidt, H. Schmidt, K. Schwaner, M. Teibinger, S. Winter und M. Zumoberhaus, „Konsens der Referenten des Kongresses „Holzschutz und Bauphysik“ am 10./11.02.2011 in Leipzig zum Thema: „Unbelüftete Flachdächer in Holzbauweise“,“ Leipzig, 2011.
- [52] Rigips AG, „Infobroschüre Alba balance, Version 2.0 a,“ Rigips AG, 2017. [Online]. Available: [http://ch.rigips.de/download/Alba\\_balance\\_dt.pdf](http://ch.rigips.de/download/Alba_balance_dt.pdf). [Zugriff am 22 August 2017].
- [53] Dezernat Planen, Bauen, Wohnen und Grundbesitz - Hochbauamt, „Leitlinien Nachhaltiges Bauen,“ Magistrat der Stadt Frankfurt am Main, Frankfurt, 2012.
- [54] SET Solar Energie Technik GmbH, *Schaltschema Solaranlage St. Franziskus-Grundschule Halle*, Schmalzgrube, 2016.
- [55] Deutscher Wetterdienst, „Solarstrahlungskarten Deutschland,“ Deutscher Wetterdienst, [Online]. Available: [https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/strahlungskarten\\_mi.html](https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/strahlungskarten_mi.html). [Zugriff am 23 Januar 2018].
- [56] EVH Energieversorgung Halle GmbH, „Primärenergiefaktor,“ 14 02 2014. [Online]. Available: <http://www.evh.de/EVH/Grosskunden/Waerme/Primaerenergiefaktor/>. [Zugriff am 14 02 2014].
- [57] Theurich+Klose, *Planungsunterlagen*, Hannover, 2013.
- [58] AIB GmbH, *Planungsunterlagen*, Bautzen: Architekten Ingenieure Bautzen, 2013.
- [59] Ausschuss für Arbeitsstätten (ASTA), „Technische Regeln für Arbeitsstätten ASR A3.4 – Beleuchtung,“ April 2011. [Online]. Available: [https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/ASR/pdf/ASR-A3-4.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/ASR/pdf/ASR-A3-4.pdf?__blob=publicationFile&v=2). [Zugriff am 2018].
- [60] U. Gebhardt und K. Gebhardt, „Im grünen Bereich - Wärmebrückenfreiheit einer Passivhausschule in Holzbauweise,“ *Gebäudeenergieberater*, Nr. 10-2015, pp. 24-29, Oktober 2015.

- [61] K. Jagnow und K. Gebhardt, „Studierende begleiten Sachsen-Anhalts erste Passivhaus-Schule in Holzbauweise,“ *Treffpunkt Campus*, p. 5, Dezember 2015.
- [62] Volksstimme, „Studenten sind auf dem Holzweg,“ *Volksstimme*, Nr. 5. Januar 2016, 2016.
- [63] BINE Informationsdienst, „Passivhausschule überzeugt im Praxistest,“ [www.bine.info](http://www.bine.info), 3 Januar 2017. [Online]. Available: [http://www.bine.info/index.php?id=39&no\\_cache=1&typ=30&artikel=3376&cHash=eee2fde067a21db01cd624e7b9bb7543](http://www.bine.info/index.php?id=39&no_cache=1&typ=30&artikel=3376&cHash=eee2fde067a21db01cd624e7b9bb7543). [Zugriff am 3 Januar 2017].
- [64] K. Jagnow und K. Gebhardt, „Passivhausschule im Praxistest,“ *SHT*, p. 40 ff., Dezember 2017.
- [65] BMWi Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, *Zuwendungsbescheid*, Bonn: BMWi, 2011.
- [66] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, „Energieeffiziente Kantinen und Gewerbeküchen,“ in *Protokollband 47*, Darmstadt, 2012.

## Nomenklatur

Tabelle 0-1: Lateinische Formelzeichen

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
A	Fläche	m <sup>2</sup>
A <sub>abs</sub>	äquivalente Schallabsorptionsfläche	m <sup>2</sup>
A <sub>EB</sub>	Energiebezugsfläche	m <sup>2</sup>
A <sub>N</sub>	Nutzfläche nach Energieeinsparverordnung	m <sup>2</sup>
A <sub>W</sub>	Fensterfläche (engl. window)	m <sup>2</sup>
c	spezifische Wärmekapazität	J/(kgK)
d	Schichtdicke	m
D	Tageslichtquotient	%
E	Beleuchtungsstärke	Lux, lx
F <sub>c</sub>	Abminderungsfaktor für Sonnenschutzvorrichtungen	-
f <sub>P</sub>	Primärenergiefaktor	-
f <sub>RH</sub>	flächenbezogener Leistungszuschlag für Wiederaufheizung	W/m <sup>2</sup>
F <sub>S</sub>	Teilbestrahlungsfaktor	-
f <sub>WG</sub>	Fensterflächenanteil bezogen auf die Grundfläche	-
F <sub>x</sub>	Temperaturkorrekturfaktor	-
g	Energiedurchlassgrad (von Fenstern)	-
g <sub>tot</sub>	Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung einschließlich Sonnenschutz	-
H	temperaturbezogene Leistung	W/K
h	temperatur- und flächenbezogene Leistung	W/(m <sup>2</sup> K)
H <sub>T</sub>	temperaturbezogene Transmissionsleistung	W/K
h <sub>g≥25</sub>	Zeit, in der die Raumtemperatur über 25 °C beträgt	h
L <sub>n</sub> <sup>i</sup>	Norm-Trittschallpegel	dB
L <sub>korr</sub>	Korrekturpegel	dB
L <sub>S</sub>	gemessener Schallpegel im Senderaum	dB
L <sub>sb</sub>	gemessener Empfangsraumpegel	dB
L <sub>b</sub>	gemessener Störpegel	dB
n, n <sub>50</sub>	Luftwechselrate	h <sup>-1</sup>
n <sub>min</sub>	Mindestluftwechselrate	h <sup>-1</sup>
p	Druck	Pa
P	Leistung	kW, W
Q	Energiemenge	kWh/a
Q	Energiemenge, Wärmeverlust	kWh/a
q	Energiemenge, flächenbezogen	kWh/(m <sup>2</sup> a)
Q	Wärmestrom, Leistung	W

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
$Q_d$	Wärmeverlust des Verteilnetzes	kWh/a
$Q_{HL,LoL}$	Heizlast ohne Lüftungsleistung	W
$Q_I$	interne Leistung	W
$Q_S$	solare Leistung	W
$Q_T$	Transmissionswärmeleistung	W
$q$	Energiemenge, flächenbezogen	kWh/(m <sup>2</sup> a)
$\dot{Q}$	Wärmestrom	W/m
$R$	Wärmedurchlasswiderstand	(m <sup>2</sup> K)/W
$R'$	Bauschalldämmmaß	dB
$R_w$	bewertetes Schalldämmmaß	dB
$S_{vorh}$	vorhandener Sonneneintragskennwert	-
$S_x$	anteiliger Sonneneintragskennwert	-
$S_{zul}$	zulässiger Sonneneintragskennwert	-
$T$	Nachhallzeit	s
$T_{besetzt}$	Nachhallzeit für den besetzten Raum	s
$T_{unbesetzt}$	Nachhallzeit für den unbesetzten Raum	s
$U$	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m <sup>2</sup> K)
$V$	Volumen	m <sup>3</sup>
$\dot{V}$	Volumenstrom	m <sup>3</sup> /h
$\dot{V}_R$	Berechnungsvolumenstrom	l/s
$\dot{V}_S$	Spitzenvolumenstrom	l/s
$x$	absolute Luftfeuchte	g/kg

**Tabelle 0-2: Griechische Formelzeichen**

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
$\Delta$	Differenz	verschieden
$\Delta p_{min,FI}$	Mindestfließdruck einer Armatur	mbar
$\Delta p_{min,V}$	Mindestversorgungsdruck am Hausanschluss	mbar
$\eta$	Wirkungs- oder Nutzungsgrad	-
$\vartheta$	Temperatur	°C, K
$\vartheta_e$	Umgebungstemperatur	°C
$\vartheta_{HG}$	Heizgrenztemperatur	°C
$\vartheta_i$	Innentemperatur	°C
$\vartheta_{R,prim}$	primäre Rücklauftemperatur der Fernwärmeversorgung	°C
$\vartheta_{RL}$	Rücklauftemperatur	°C
$\vartheta_{VL}$	Vorlauftemperatur	°C
$\vartheta_{ZU}$	Zulufttemperatur	°C
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	W/(mK)
$\rho$	Reflexionsfaktor	-
$\rho$	Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>
$\Phi$	Temperaturwirkungsgrad, Rückwärmzahl	-
$\varphi$	relative Luftfeuchte	%
$\Psi_a$	außenmaßbezogener linearer Wärmebrückenverlustkoeffizient	W/(mK)
$\Psi_i$	innenmaßbezogener linearer Wärmebrückenverlustkoeffizient	W/(mK)

**Tabelle 0-3: Abkürzungen**

Kürzel	Erläuterung
AB	Abluft
AGFW	Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK
AMEV	Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen
ASR	Technische Regeln für Arbeitsstätten
BTA	Bauteil/Gebäudeteil A, hier: Ostflügel, Verwaltungstrakt
BTB	Bauteil/Gebäudeteil B, hier: Westflügel, Klassentrakt
BW	Brauchwasser

Kürzel	Erläuterung
CFL	Kompaktleuchtstofflampe
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CSV	engl. "comma-separated values"; Dateiformat zur Speicherung einfach strukturierter Daten
d. J.	des Jahres
DIN	Deutsches Institut für Normung; deutsche Norm
DIN V	Deutsches Institut für Normung; deutsche Vornorm
DLE	Durchlauferhitzer
DN	engl. Diameter Nominal, Nennweite (von Rohren etc.)
DVGW	Deutscher Verband des Gas- und Wasserfaches
DWD	Deutscher Wetterdienst
EG	Erdgeschoss
EN	Europäische Norm
EnBau	(Forschung für) Energieoptimiertes Bauen im Neubau
EnEV	Energieeinsparverordnung (Jahr 2009)
EnOB	(Forschung für) Energieoptimiertes Bauen
EnSan	(Forschung für) Energieoptimiertes Bauen in der Sanierung
EVG	elektronisches Vorschaltgerät
EWT	Erdwärmetauscher
GFK	Glasfaserverstärkte Kunststoffe
GFZ	Geschossflächenzahl
GRZ	Grundflächenzahl
HS MD	Hochschule Magdeburg-Stendal
HT	Hochtarif
HV	Hauptverteilung
IDA	Indoor air (Klassifizierung der Raumluftqualität)
i. H. v.	in Höhe von
IP	engl. "internet protocol"
IREES	Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien, Karlsruhe
ISO	International Standardisation Organisation; internationale Norm
JAVA	eine objektorientierte Programmiersprache, die auf der gleichnamigen Softwaretechnik aufbaut
k. A.	keine Angabe
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LED	Lichtemittierende Diode (Light emitting diode)
LFL	stabförmige Leuchtstofflampe
LVK	Lichtverteilungskurve
M-Bus	Meter-Bus: Feldbus für die Verbrauchsdatenerfassung
MID	engl. "Measuring Instruments Directive"; europäische Messgeräte-Richtlinie 2004/22/EG
MySQL	ist eines der weltweit verbreitetsten Datenbankverwaltungssysteme basierend auf der Datenbanksprache SQL
NF	Nutzfläche
NGF	Nettogrundfläche
NT	Niedertarif
OG	Obergeschoss
OSB	Oriented Strand Board
PCM	Phase change material
PE-HD	Polyethylen „high density“ (hohe Dichte)
PHI	Passivhaus Institut Darmstadt
PHPP	Passivhaus Projektierungspaket
PP	Polypropylen
PV	Photovoltaik
PWT	Plattenwärmetauscher
RL	Rücklauf
RLT	Raumlufttechnik
SQL	engl. "structured query language"; strukturierte Abfrage-Sprache; Datenbanksprache zur Definition von Datenstrukturen in Datenbanken

Kürzel	Erläuterung
SZR	Scheibenzwischenraum
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
T/F	Temperatur und Feuchte (im Zusammenhang mit einem Sensor)
TF	Technikfläche
TWK	Trinkkaltwasser
TWW	Trinkwarmwasser
TWZ	Trinkwasserzirkulation
Ü	Überströmluft
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
UV	Unterverteilung
VDI	Verband Deutscher Ingenieure
VF	Verkehrsfläche
VL	Vorlauf
v.l.n.r.	von links nach rechts
VPN	engl. "virtual private network"; ein privates (in sich geschlossenes) Kommunikationsnetz
WC	Wasserklosett
WMZ	Wärmemengenzähler, Wärmezähler
WW	Warmwasser
ZU	Zuluft
ZVSHK	Zentralverband Sanitär-, Heizungs- und Klimatechnik

## Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung II-1: Lageplan [36].....	17
Abbildung II-2: Visualisierung. Links: Klassenbereich, Rechts: Eingang Verwaltungsteil .....	18
Abbildung II-3: Blick auf Schulhof und Nordseite des Klassenflügels, im EG der Hort .....	18
Abbildung II-4: Links: Blick von Südwesten auf Gebäudeteil B, Rechts: Blick von Südosten, Gebäudeteil A.....	19
Abbildung II-5: Links: Unterrichtsbereich Raum 1.02, Rechts: Blick zur Flurwand .....	19
Abbildung II-6: Links: Kindercafé im Hort; Rechts: Werkstatt im Hort .....	19
Abbildung II-7: Links: das Foyer; Rechts: Aula in Gebäudeteil A.....	20
Abbildung II-8: Flächenzusammenstellung NGF zur Kennwertbildung .....	23
Abbildung II-9: Sankeydiagramm witterungskorrigierter Fernwärmeverbrauch 2017.....	23
Abbildung II-10: Sankeydiagramm Stromverbrauch 2017 .....	24
Abbildung II-11: Sankeydiagramm Wasserverbrauch 2017 .....	25
Abbildung II-12: Passivhausnachweis 2018.....	26
Abbildung II-13: Ergebnisse des Energieausweises 2018.....	27
Abbildung II-14: Anordnung der Messtechnik im Erdgeschoss.....	32
Abbildung II-15: Anordnung der Messtechnik im 1. Obergeschoss.....	33
Abbildung II-16: Anordnung der Messtechnik im 2. Obergeschoss.....	33
Abbildung II-17: Gesamtsystemaufbau der Datenerfassung und Auswertung .....	34
Abbildung II-18: Zählerschema für Fernwärme und Strom .....	36
Abbildung II-19: Zählerschema für Regen- und Trinkwasser .....	36
Abbildung II-20: Wärmemengenzähler frei zugänglich in der Lüftungszentrale.....	37
Abbildung II-21: Blick in den Fensterkasten, hochgefahrte Jalousie rechts am Innenflügel .....	38
Abbildung II-22: Innenthermographie der Solaraußenwand .....	39
Abbildung II-23: Vergleich der Raumlufttemperaturen der Klassenräume und des Hortes .....	40
Abbildung II-24: Temperatur und Feuchte im südorientierten Klassenraum 1.08 nach [41] – Jahre 2016 und 2017, Mo bis Fr von 7 bis 15 Uhr.....	44
Abbildung II-25: Temperatur und Feuchte im nordorientierten Klassenraum 2.01 nach [41] – Jahre 2016 und 2017, Mo bis Fr von 7 bis 15 Uhr.....	45
Abbildung II-26: CO <sub>2</sub> -Gehalte der Klassenräume 1.08 und 2.01 im August 2018 – 7 bis 15 Uhr.....	46
Abbildung II-27: Fensteröffnung in Abhängigkeit von der Raumtemperatur – Jahre 2016 bis 2017.....	48
Abbildung II-28: Entwurf Bedienungsanleitung: Links „zu kalt“, Rechts: „zu warm“.....	49
Abbildung II-29: Messtechnik und Bildschirmdarstellung im Verlauf einer Messung .....	50
Abbildung II-30: Nachhallzeiten der Klassenräume im Vergleich.....	50
Abbildung II-31: Detail Außenwand [13].....	51
Abbildung II-32: Foto Südseite, Gebäudeteil B (Foto: HS MD).....	52
Abbildung II-33: Detail Dach.....	53

Abbildung II-34: Grundaufbau schallentkoppelte Decke [46] .....	54
Abbildung II-35: Montage der Bodenplatte [47] .....	54
Abbildung II-36: Detail Bodenplatte .....	55
Abbildung II-37: Links: Kastenfenster; Rechts: Pfosten-Riegel-Fassade Aula .....	55
Abbildung II-38: Grundriss Erdgeschoss – Wärmebrücken [13] .....	57
Abbildung II-39: Temperatur- und Feuchteverlauf der Bodenplatte im Gefach [49] .....	58
Abbildung II-40: Temperatur- und Feuchteverlauf der holzverkleideten Außenwand im Gefach [49] .....	59
Abbildung II-41: Temperatur- und Feuchteverlauf im Dach - Gefachanteil [49] .....	60
Abbildung II-42: Links: Präparation der Fortluftöffnungen des Gebäudeteils A [25] .....	61
Abbildung II-43: Schalldämmmaß der Decke über Raum 1.01 (verschobene Bezugskurve) [24] .....	62
Abbildung II-44: Links: Sommerfall, Rechts: Winterfall [46] .....	63
Abbildung II-45: Temperaturen im Kastenfenster Klasse 108 linkes Fenster – April 2017 .....	64
Abbildung II-46: Deckentemperaturen in den Kinderzimmern, 01.07.16 - 30.06.17 - Tagesmittel .....	65
Abbildung II-47: Lüftungszonierung EG .....	66
Abbildung II-48: Lüftungszonierung 1. OG .....	66
Abbildung II-49: Lüftungszonierung 2. OG .....	66
Abbildung II-50: Messpunkte in der RLT-Zentrale 2.03 Klassentrakt .....	68
Abbildung II-51: Energiebilanz des Erdwärmeübertragers .....	70
Abbildung II-52: Energiebilanz Wärmerückgewinnung, 2016/17 .....	71
Abbildung II-53: Volumenstromregler des Hortraums 0.02 – Märchenzimmer .....	73
Abbildung II-54: Volumenstromregler des Kunstraumes 2.14 .....	74
Abbildung II-55: Volumenstromregler des Klassenraumes 1.08 .....	75
Abbildung II-56: Druckverlust Abluftfilter – RLT Klassentrakt .....	77
Abbildung II-57: Hydraulikschema nach [53] .....	78
Abbildung II-58: Ansicht Solarwand mit den 3 Kollektorfeldern (Foto: HS MD) .....	79
Abbildung II-59: Jahresbilanzen – Messwerte und Simulation .....	80
Abbildung II-60: Eingangsluke zum unterirdischen Speicherraum, Speicherzellen .....	81
Abbildung II-61: Strangschema Heizung (ohne Solarthermie) [56] .....	85
Abbildung II-62: Jahresfernwärmeverbrauch ohne Witterungskorrektur .....	90
Abbildung II-63: Jahresfernwärmeverbrauch mit Witterungskorrektur .....	90
Abbildung II-64: Energieanalyse aus dem Verbrauch - Fernwärmeverbrauch Haupteinspeisung .....	91
Abbildung II-65: Fernwärme Klassentrakt – Stundenwerte – Schultage .....	93
Abbildung II-66: Photovoltaikanlage auf Dach .....	95
Abbildung II-67: Nord- und Südansicht des Photovoltaik-Carports .....	95
Abbildung II-68: Vertikale Windturbine .....	96
Abbildung II-69: Komplettbatterie Lithium (links) und Bleigel (rechts) .....	98
Abbildung II-70: Strombedarfsbilanz des Gesamtgebäudes – Verbrauchsarten und -gruppen .....	100
Abbildung II-71: Gesamtstromverbrauch nach Verbrauchern – 2016 und 2017 .....	101
Abbildung II-72: Tagesprofil Stromverbrauch Schule o. Hausmeisterwohnung .....	102
Abbildung II-73: Gesamtstromverbrauch Schule/Hort/Verwaltung nach Verbrauchern – 2016/17 .....	103
Abbildung II-74: Tagesprofil – Stromverbrauch Küche .....	104
Abbildung II-75: Monatsbilanz Küchenbetrieb – 2016/17 .....	104
Abbildung II-76: Tagesprofil – Stromverbrauch Hausmeisterwohnung .....	105
Abbildung II-77: Monatsbilanz Stromverbrauch der Hausmeisterwohnung – 2016/17 .....	105
Abbildung II-78: Ergebnisdarstellung Klasse 1.08 mit silbernen Jalousien raumseits .....	106
Abbildung II-79: L1 Trilux Valuco Active im Klassenzimmer .....	107
Abbildung II-80: diffuse Raumbeleuchtung minimal (links), Arbeitsplatzbeleuchtung minimal (rechts) .....	107
Abbildung II-81: Bedienung Klassenraumbeleuchtung und Jalousien .....	108
Abbildung II-82: Pfosten-Riegel-Fassade Aula von innen bei geschlossenem Sonnenschutz .....	109
Abbildung II-83: Beleuchtungsleistung in Abhängigkeit von der Globalstrahlung, R. 2.01 und 1.08 .....	110
Abbildung II-84: 3D-Diagramm Tageslichtverteilung Klassenraum 1.08 [30] .....	110
Abbildung II-85: Tagesverläufe im Sommer; Links: bewölkt, Rechts: sonnig .....	112
Abbildung II-86: Kunstraum 2.14, v.l.n.r. silber innen, 45 °, 90°, 45°, schwarz innen .....	112
Abbildung II-87: Beleuchtungsleistung an Schultagen 7-15 Uhr, Klassenräume 1.08 und 2.01 .....	113
Abbildung II-88: Stromverbrauch Außenbeleuchtung im Jahr 2016 und 2017 .....	114
Abbildung II-89: Konzept Wasser- und Regenwassernutzung .....	114
Abbildung II-90: Isometrie der Trinkwasser-, Brauchwasser- und Abwassernetze .....	115
Abbildung II-91: Hausanschlussraum 0.18 – Installationsphase und Endzustand .....	117
Abbildung II-92: Trinkwasserbilanz – Jahreswerte – 2015 bis 2017 .....	119
Abbildung II-93: Brauchwasserbilanz – Jahreswerte – 2015 bis 2017 .....	120
Abbildung II-94: Auszug aus dem Korrekturmanuskript des Kinderbuchs .....	125

Tabelle I-1: Projektbeteiligte .....	12
Tabelle II-1: Kostenzusammenstellung nach Kostengruppen .....	16
Tabelle II-2: Kostenzusammenstellung für KG 300 .....	16
Tabelle II-3: Kostenzusammenstellung für KG 400 .....	16
Tabelle II-4: Anzahl der verschiedenen Arten von Nutzungstagen .....	20
Tabelle II-5: Nutzungszeiten und Nutzungszahlen .....	20
Tabelle II-6: Flächen und Volumina .....	21
Tabelle II-7: Ergebnisse der Ökobilanzierung mit Gewerke- und Stoffgruppensummen.....	29
Tabelle II-8: Erfasste Messgrößen.....	31
Tabelle II-9: Übertemperaturgradstunden [Kh] sowie Über- und Untertemperaturstunden [h] .....	41
Tabelle II-10: Anzahl der Stunden mit relativen Feuchten < 35 % bzw. > 70 % und prozentualer Anteil an der Nutzungszeit.....	43
Tabelle II-11: Anzahl der Nutzungsstunden mit erhöhten CO <sub>2</sub> -Konzentrationen.....	47
Tabelle II-12: Übersicht der Wärmedurchgangskoeffizienten .....	56
Tabelle II-13: Übersicht über die Lüftungsgeräte .....	67
Tabelle II-14: Energiekostenvergleich mit reiner Fernwärmeversorgung .....	82
Tabelle II-15: Resultierende Raumlufttemperaturen auf Basis von Heizlastberechnungen mit unterschiedlichen Ansätzen (DIN EN 12831, PHPP) .....	87
Tabelle II-16: Kennwerte aus der Verbrauchsanalyse .....	92
Tabelle II-17: Ergebnisse der Energiebedarfsbilanz.....	98
Tabelle II-18: Beleuchtungsstärken der Bereiche [57] [58] .....	106
Tabelle II-19: Vergleich der Strombedarfsprognosen verschiedener Verfahren .....	111
Tabelle 0-1: Lateinische Formelzeichen .....	130
Tabelle 0-2: Griechische Formelzeichen.....	131
Tabelle 0-3: Abkürzungen .....	131

### **Überblick über separate Anhänge**

Der vorliegende Bericht (Teil 1) kann aufgrund des begrenzten Umfangs nur einen zusammenfassenden Überblick liefern. Die folgenden Teile 2 bis 12 befassen sich sehr detailliert mit den folgenden Teilaspekten:

- Teil 2 Gebäude, Nutzung und Ausstattung
- Teil 3 Bilanzen
- Teil 4 Messtechnik
- Teil 5 Raumklima und Behaglichkeit
- Teil 6 Baukonstruktion
- Teil 7 Lüftung und Erdwärmeübertrager
- Teil 8 Solarthermie und Latentwärmespeicher
- Teil 9 Wärmeversorgung, Heizung, Hydraulik
- Teil 10 Photovoltaik, Windkraft und Batterie
- Teil 11 Beleuchtung und Verschattung
- Teil 12 Frisch-, Regen- und Abwasser