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

Abschlussbericht
Teil 7: Lüftung und Erdwärmeübertrager

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 0327430O
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 0327430O
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.
Matthias Lange, M. Eng.
Adrian Rehbein, M. Eng.
Martin Schneider, M. Eng.
Robert Schulze, M. Eng.
Azhar Soboh, M. Eng.
Normen Stottmeister, M. Eng.
Xiaoya Wang, M. Eng.

Datenstand:

Magdeburg, 30.09.2018

Inhalt

Impressum 3
1 Zusammenfassung 7
2 Funktionsschema und Kurzbeschreibung 21
3 Komponenten und Bauteile 23
3.1 Lüftungszonen und Luftführung 23
3.2 Zentralgeräte MENERGA 26
3.3 Küchenlüftung 30
3.4 Wohnungslüftung Hausmeister 34
3.5 Abluftanlage WCs 35
3.6 Volumenstromregler 36
3.7 Luftauslässe 38
3.8 Wärme- und Feuchterückgewinnung 44
3.9 Kanalnetz und Dämmung 46
4 Luftmengen- und Netzplanung 49
4.1 Volumenströme 49
4.2 Pläne 51
4.3 Planung der Netze und Bemessung der Ventilatoren 55
4.4 Erkenntnisse und Fazit 67
5 Regelung 69
5.1 Grundsätzliche Anlagenfunktionen 69
5.2 Funktionen der MENERGA-Anlagen 75
5.3 Regelschema Zentralanlage Klassentrakt 79
5.4 Regelschema Zentralanlage Verwaltungstrakt 85
5.5 Regelschemen andere Anlagen 88
5.6 Optimierung 90
5.7 Erkenntnisse und Fazit 93
6 Messergebnisse Energie 95
6.1 Messorte und Messtechnik 95
6.2 Wärmeenergiebilanz 102
6.3 Hilfsenergiebilanz 105
6.4 Temperatur- und Feuchtewirkungsgrad 107
6.5 Ventilatorwirkungsgrade und SFP-Werte 114
6.6 Erkenntnisse und Fazit 120
7 Messergebnisse Funktion 121
7.1 Messorte und Messtechnik 121
7.2 Außenluft- und Erdreichtemperatur 123
7.3 Lufttemperaturen 123
7.4 Ventilatoren RLT Klassentrakt 132
7.5 Ventilatoren RLT Verwaltungstrakt 141
7.6 Volumenströme im Zentralgerät 149
7.7 Raumregelung 155
7.8 Regelungsfunktionen der Zentralanlage Klassentrakt 160
7.9 Regelungsfunktionen der Zentralanlage Verwaltungstrakt 165
7.10 Wärmerückgewinnung 169
7.11 Schlechtpunktregelung 174
7.12 Druckverluste der Filter 175
7.13 Andere Anlagen 185
7.14 Erkenntnisse und Fazit 187

8 Erdwärmeübertrager 189
8.1 Anlagenbeschreibung 189
8.2 Simulationsergebnisse 191
8.3 Messorte und Messtechnik 192
8.4 Messergebisse 192
8.5 Erkenntnisse und Fazit 196
9 Anhang 199
9.1 Literatur 199
9.2 Nomenklatur 200
9.3 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis 202
9.4 Weitere Auswertungen 207
9.5 Planer, Ausführende, Projektbeteilige 237
9.6 Überblick über separate Anhänge 237

1 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht gibt im ersten Schritt einen Überblick über die Lüftungszonen und Luftführung sowie die verschiedenen Lüftungszentralgeräte mit ihren wesentlichen Funktionen. In Tabellen, Bildern und Schemata werden die Eigenschaften der Luftauslässe, Kanalnetze und Volumenstromregler vorgestellt.

Der zweite Abschnitt widmet sich der Planung. Auf Basis der raumweisen Volumenströme erfolgt eine Netzberechnung mit Ventilatorauslegung. Ein Abgleich zwischen Planung und Ausführung wird gezogen. Darüber hinaus werden die Regelungskonzepte incl. der Zeitprogramme vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt auf den beiden Lüftungszentralgeräten für Klassen- und Verwaltungstrakt, welche mehr als 80 % des Gebäudes versorgen.

Der dritte Abschnitt widmet sich den Ergebnissen der Energiebilanzierung. Die mit Wärmerückgewinnung nutzbare gemachten Energiemengen werden angegeben. Darüber hinaus die Hilfsenergiebilanzen für die Ventilatoren aufgestellt. Anhand von Kennwerten für die Rückwärmzahl und die Ventilatoreffizienz wird der Abgleich zu den Prognosewerten hergestellt.

In der sich anschließenden Funktionsauswertung werden Messwerte herangezogen, um einzelne Themen der Anlagenfunktion näher zu beleuchten, z.B. das Regelkonzept bei der morgendlichen Gebäudeaufheizung, die sommerliche Nachtlüftung, aber auch die optimale Filterwartung.

Dem Erdreichwärmeübertrager wird zum Schluss ein eigenes Kapitel gewidmet. Seine Funktion wird erläutert sowie Simulations- und Messergebnisse miteinander verglichen. Auf Basis der Betriebserfahrungen wird die Anlage technisch und wirtschaftlich bewertet.

Die nachfolgende Zusammenfassung folgt dem Schema des Hauptberichtes. Aufgrund der Verkürzung ergeben sich die Themenblöcke: Anlagenkonzept und Plandaten, Erkenntnisse aus der Energiebilanzierung, Regelung und Funktionsauswertung.

Anlagenübersicht und Lüftungszonen

e Systematik der Lüftungszonierung des Gebäudes zeigen Abbildung 1-1 bis Abbildung 1-3 für das Erdgeschoss. Es wurde eine klare Trennung zwischen dem westlichen und östlichen Gebäudeteil vorgenommen, vor allem durch die brandschutztechnische Trennung beider Gebäudeteile motiviert.

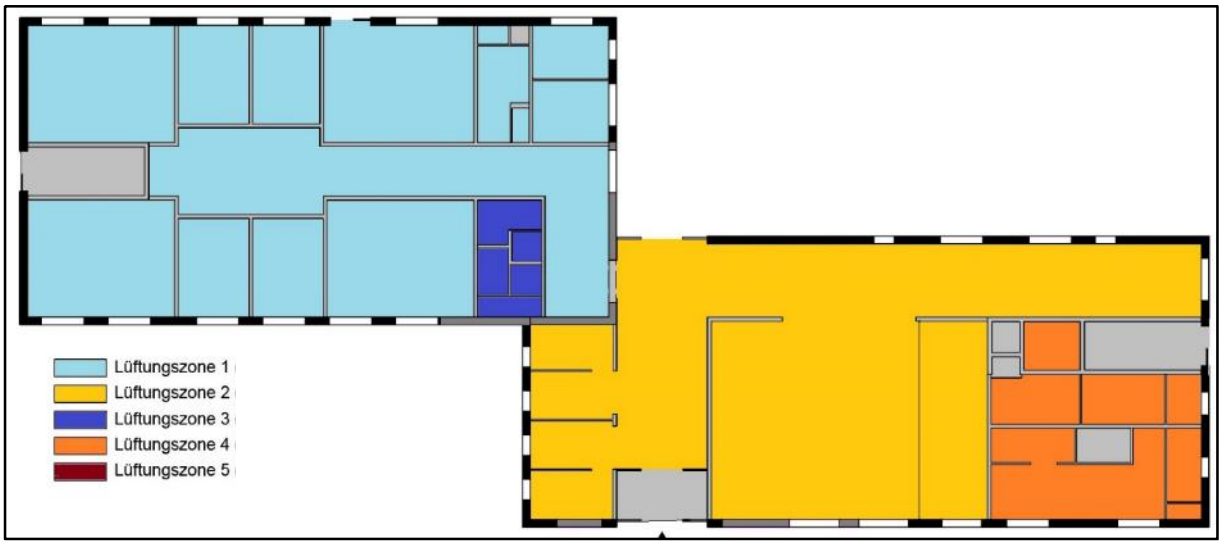

Abbildung 1-1: Lüftungszonierung EG

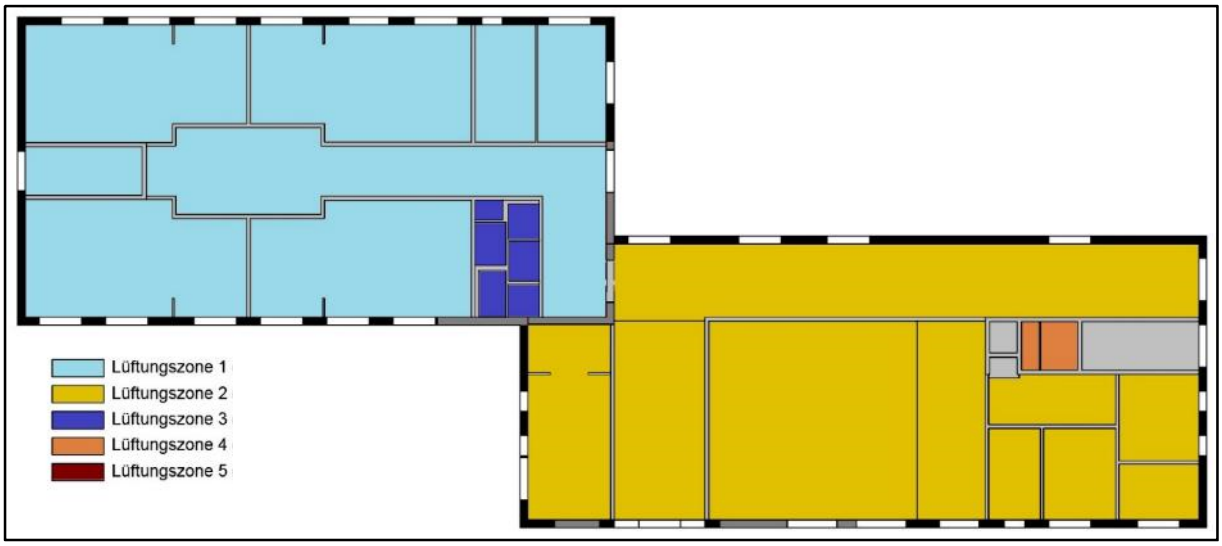

Abbildung 1-2: Lüftungszonierung 1. OG

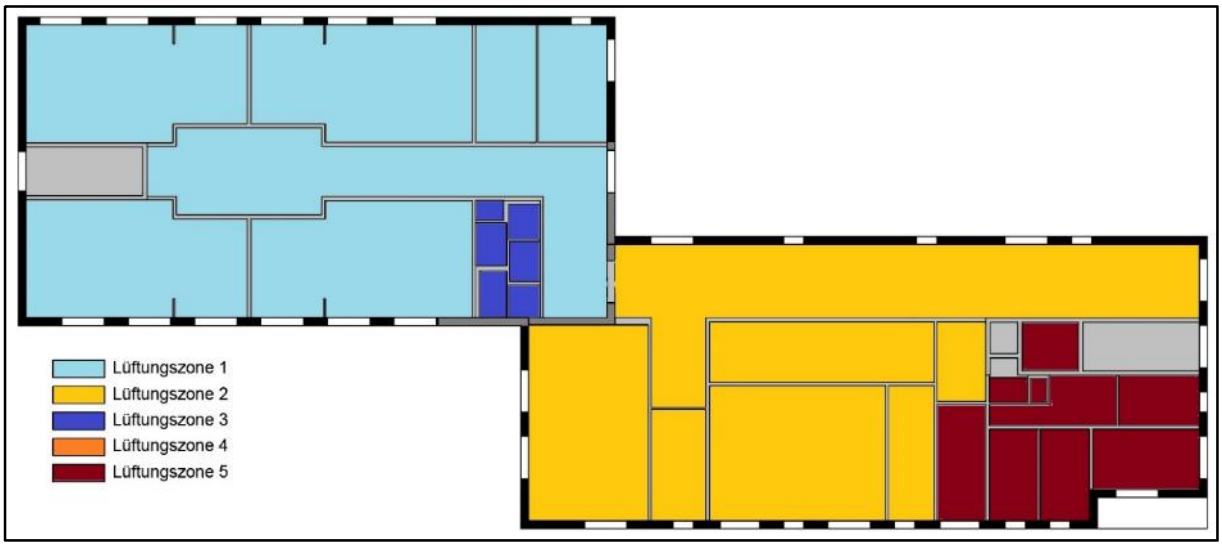

Abbildung 1-3: Lüftungszonierung 2. OG

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 1-1 fasst die Lüftungsgeräte und deren Nennvolumenströme zusammen.

Tabelle 1-1: 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 Helios MBW 400/4 TK	Zuluft Küche Kochblock Abluft Küche Kochblock	4000	4000
	Helios KVW 250/4/50/30 Helios MBW 200/4 TK	Zuluft Spülküche Abluft Spülküche	1500	1500
5	Paul Santos (F) 370 DC	Verwaltungstrakt (Gebäudeteil A, BTA): Hausmeister-wohnung	214	214

Messtechnik

Abbildung 1-4 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.

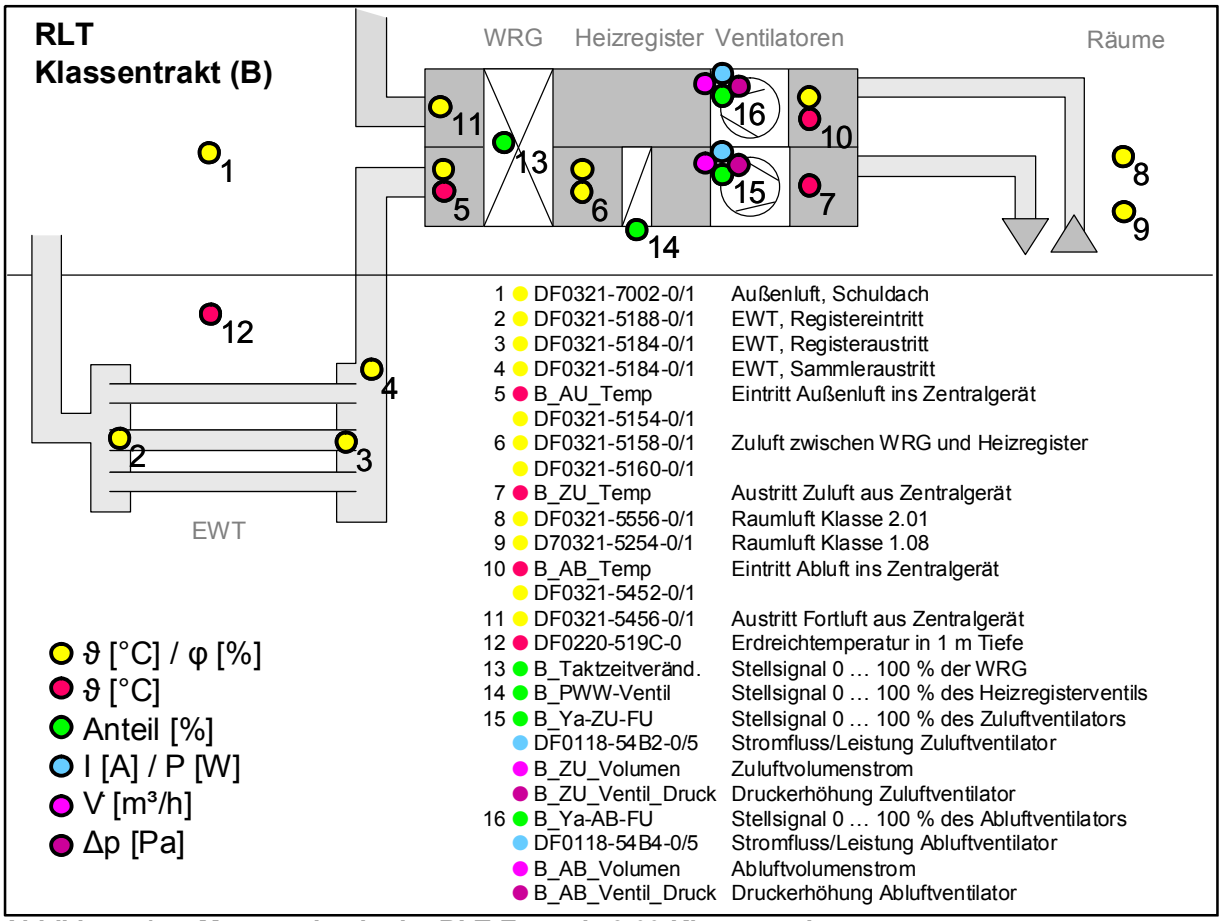

Abbildung 1-4: Messpunkte in der RLT-Zentrale 2.03 Klassentrakt

Luftmengenplanung

Die Klassenräume sind auf einen Volumenstrom von jeweils 480 m³/h ausgelegt. Das entspricht Luftwechseln von 1,8 … 1,9 h^{-1}. 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_2-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 m³/(h · 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 h^{-1}. Es ist eine CO_2-abhängige Anpassung des Volumenstroms vorgesehen, d.h. ausgehend vom Maximalwert wird heruntergeregelt, so dass eine CO_2-Konzentration von 1000 ppm nicht überschritten wird. Die Messwerte bestätigen diese Funktion.

In der Hausmeisterwohnung wurde mit 53,5 m³/(h · Person) geplant. Das entspricht einem mittleren Luftwechsel von 0,64 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 m³/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 m³/h und der Luftwechsel ergibt sich zu 22 h^{-1}. Die Koch- und Spülhauben werden manuell vom Nutzer bedient. Die Grundlüftungsanlage führt zu einem Luftwechsel von 1,2 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 Ventilatordruck 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 Erdwärmeübertrager 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 beider 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 1-5 zeigt die Ergebnisse der Energiebilanz. Insgesamt verbessern die Erdreichwärmeübertrager 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. -vorwärmeffekte konnten nachgewiesen werden.

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.

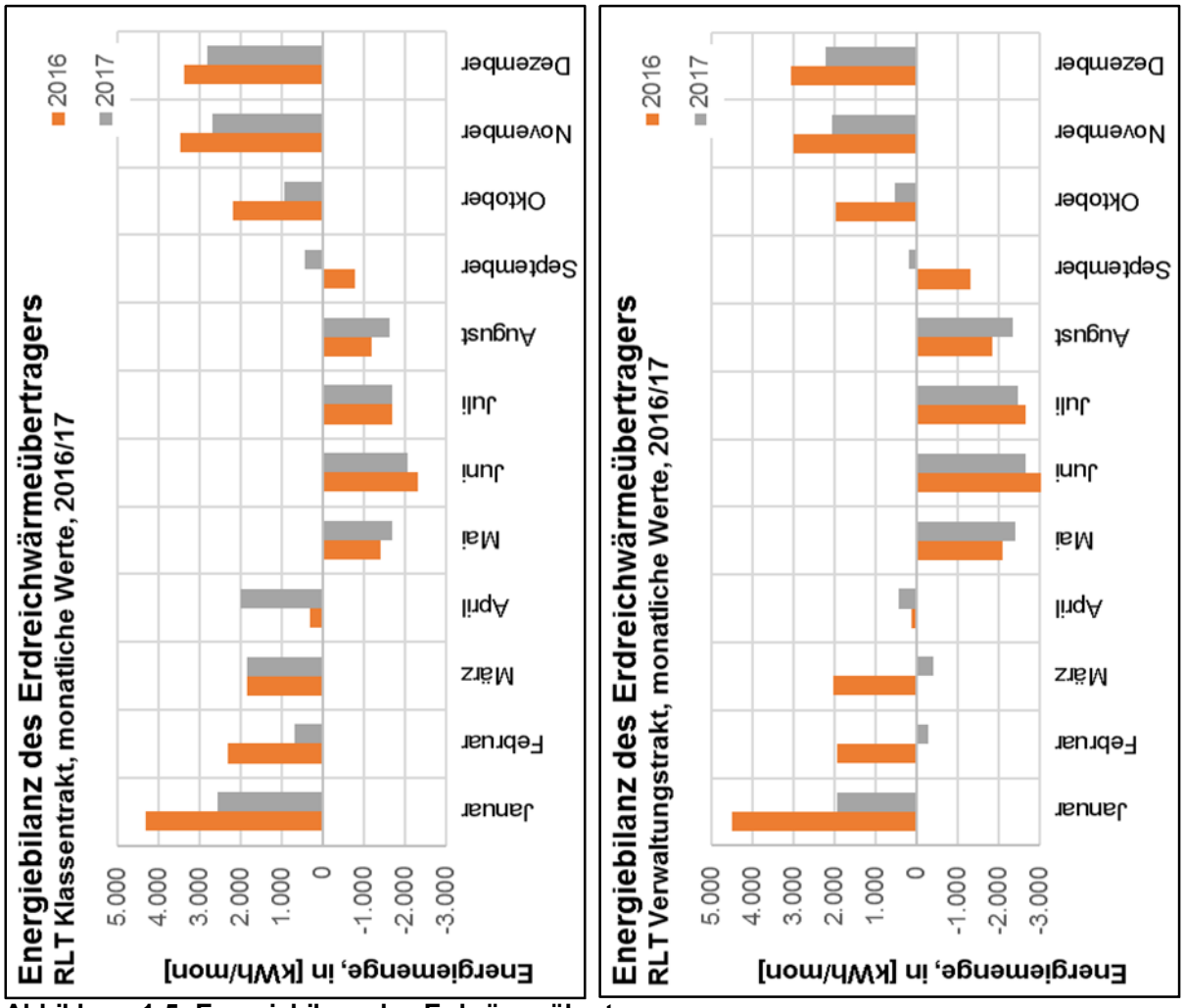

Abbildung 1-5: Energiebilanz des Erdwärmeübertragers

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 1-6 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.

In den beiden Zentralgeräten der Fa. MENERGA erfolgt eine Wärmerückgewinnung durch Umschaltspeicher. 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 %.

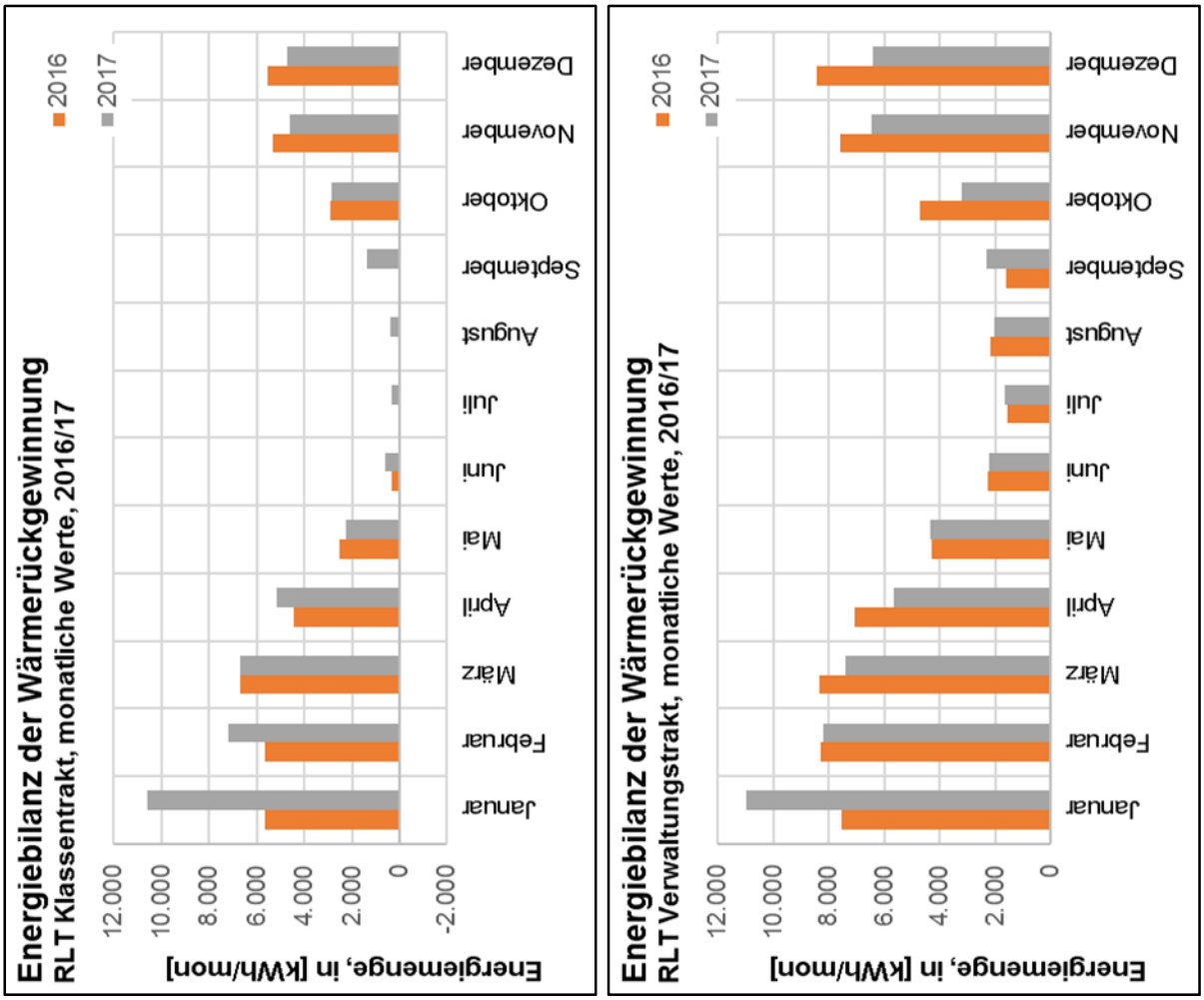

Abbildung 1-6: Energiebilanz Wärmerückgewinnung, 2016/17

Die messtechnische Untersuchung zeigt: es ist ein guter Zusammenhang zwischen der Taktzeitveränderung des Umschaltspeichers 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 Umschaltspeichers ist gut messtechnisch nachweisbar. Die Herstellerwerte konnten nicht ganz erreicht werden, dennoch ist das Ergebnis zufriedenstellend.

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

Bewertung der Ventilatoren

Im Rahmen des Monitorings wurden alle Kanalnetzberechnungen 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/(m³/s)
- RLT Verwaltungstrakt: 19,7 MWh/a, Klasse SFP3, 1256 bzw. 814 W/(m³/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.

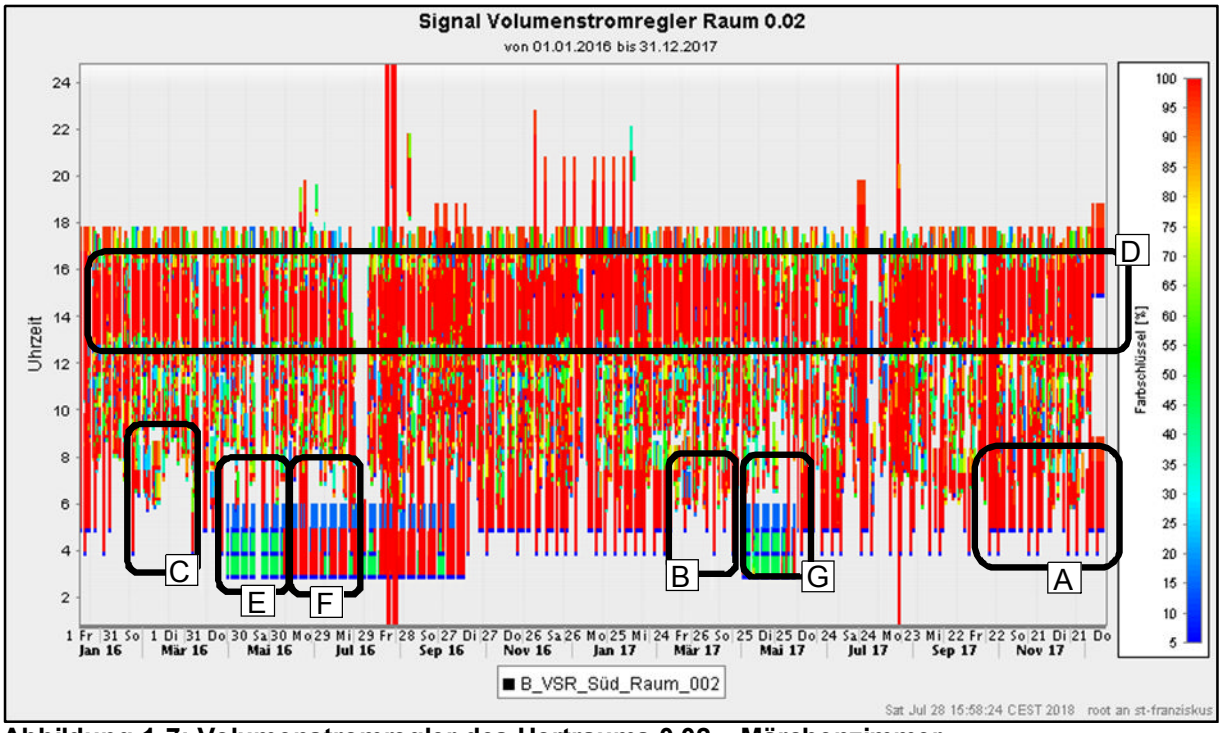

Abbildung 1-7: Volumenstromregler des Hortraums 0.02 – Märchenzimmer

Abbildung 1-7 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 1-8 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.

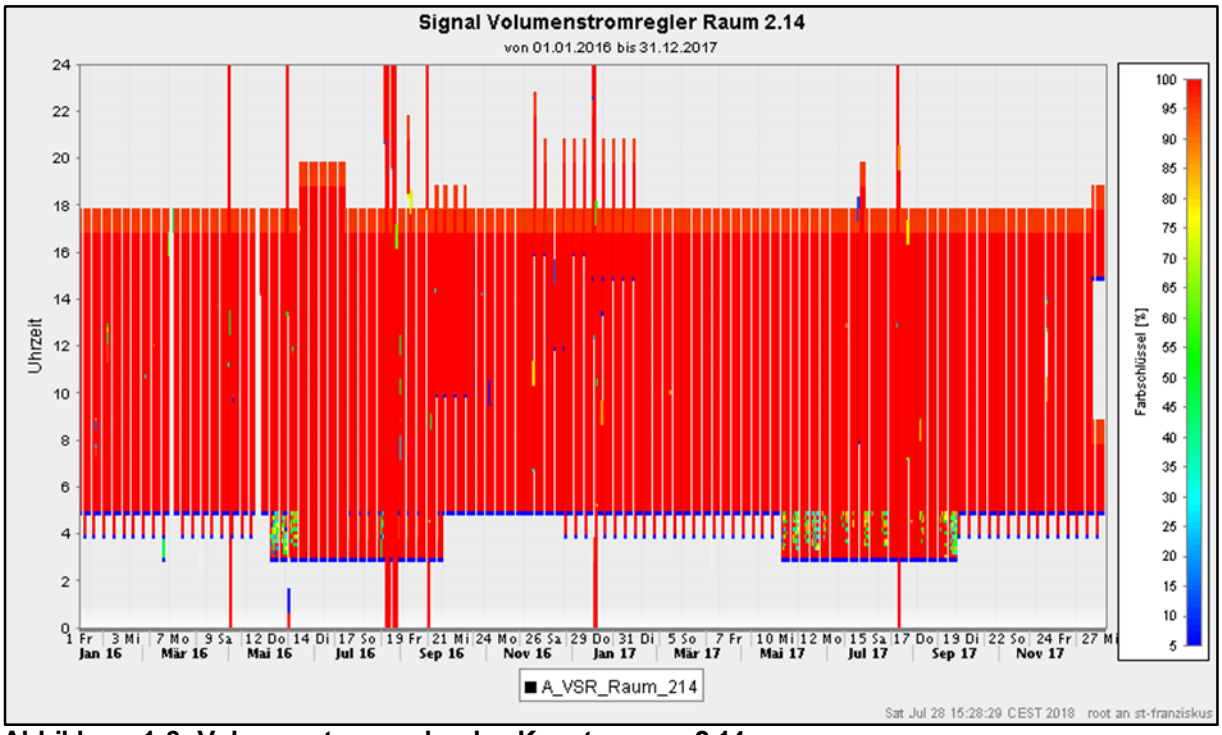

Abbildung 1-8: Volumenstromregler des Kunstraumes 2.14

Den Signalverlauf für einen der beiden intensiv überwachten Klassenräume zeigt Abbildung 1-9. Die Erkenntnisse sind vergleichbar mit dem Hortraum.

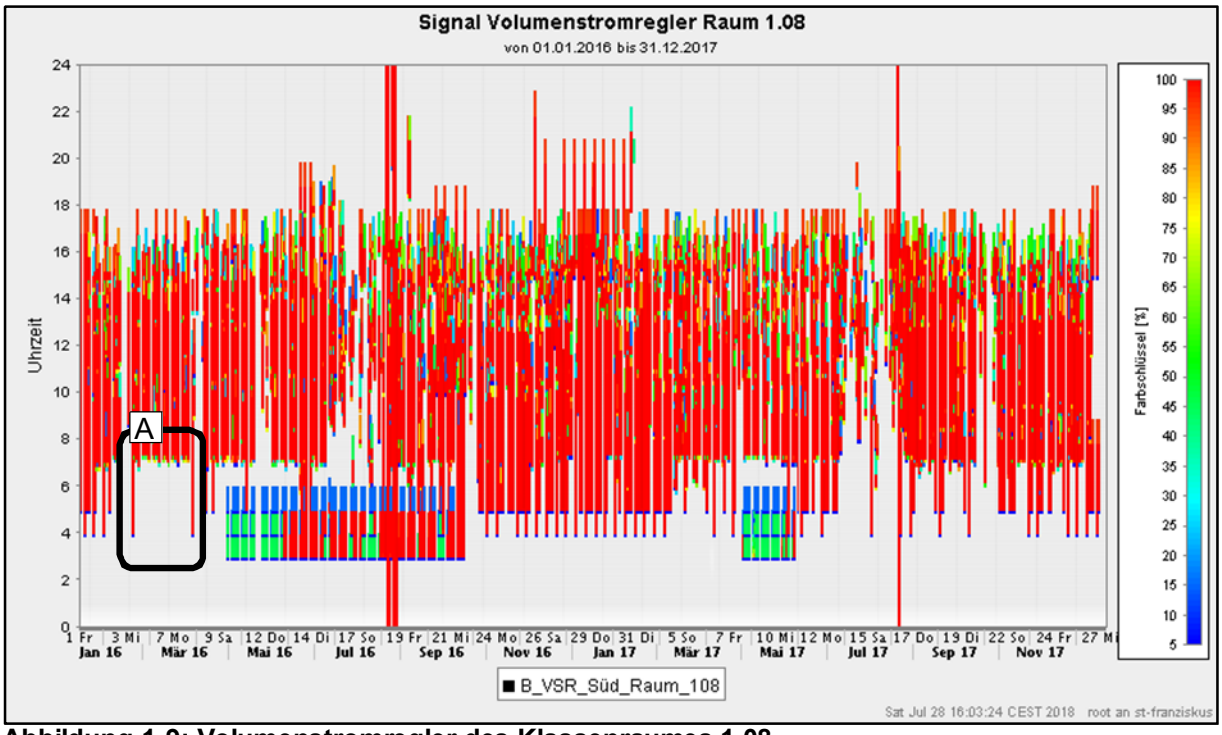

Abbildung 1-9: Volumenstromregler des Klassenraumes 1.08

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 Anfahrschaltung 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 Raumsollwert 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 Wärmegewinne im Süden durch die Lüftungsfunktion der Kastenfenster sehr gering ausfallen bzw. durch die Verschattung weitestgehend eliminiert werden können [1]. 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) [3].

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 1-10.

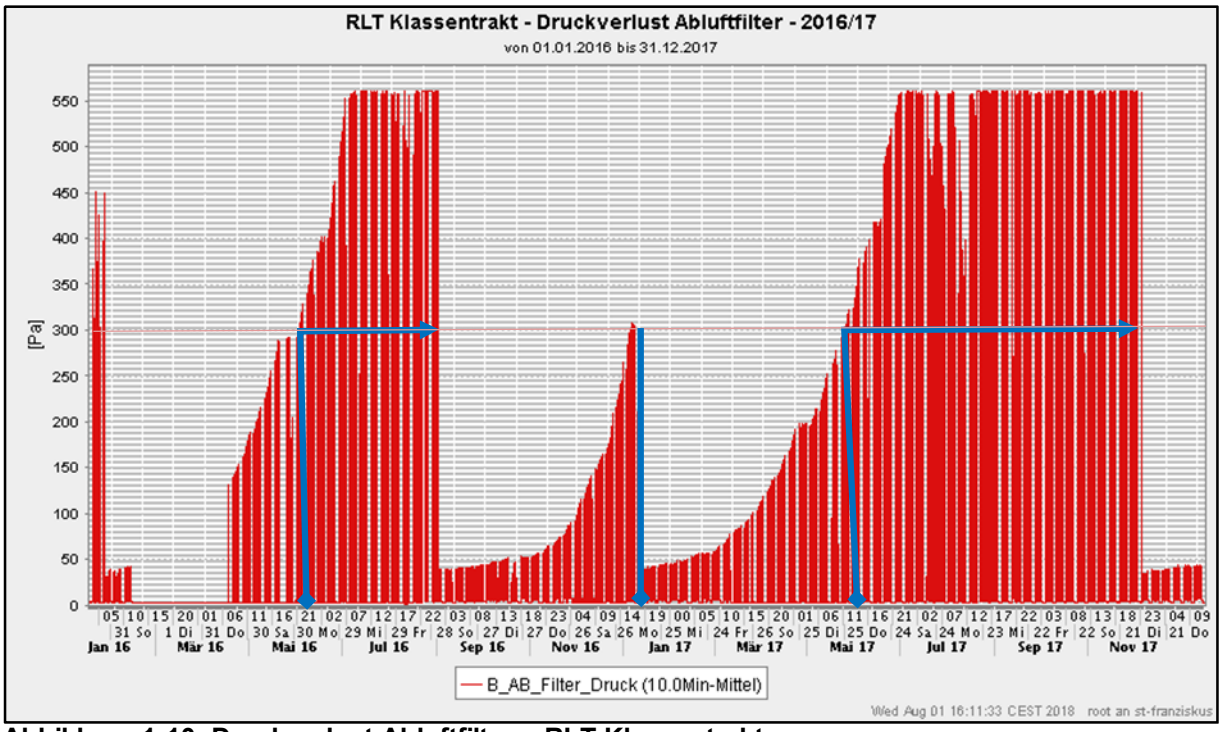

Abbildung 1-10: Druckverlust Abluftfilter – RLT Klassentrakt

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.

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 Leitfaden zum wirtschaftlichen Bauen [3].

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 tiefergehende Einweisung erhalten, im optimalen Falle aus einer technischen Fachrichtung kommen oder sich persönlich für die technischen Belange interessieren.

2 Funktionsschema und Kurzbeschreibung

Für die Lüftung des Gebäudes sind folgende 4 Anlagen vorgesehen: Klassentrakt, Verwaltungstrakt, Grundlüftungsanlage Küche und Wohnungslüftung Hausmeister. Darüber hinaus gibt es eine separate WC-Abluftanlage sowie 2 Prozesslüftungsanlagen in der Küche (über Herd und Spülmaschine).

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

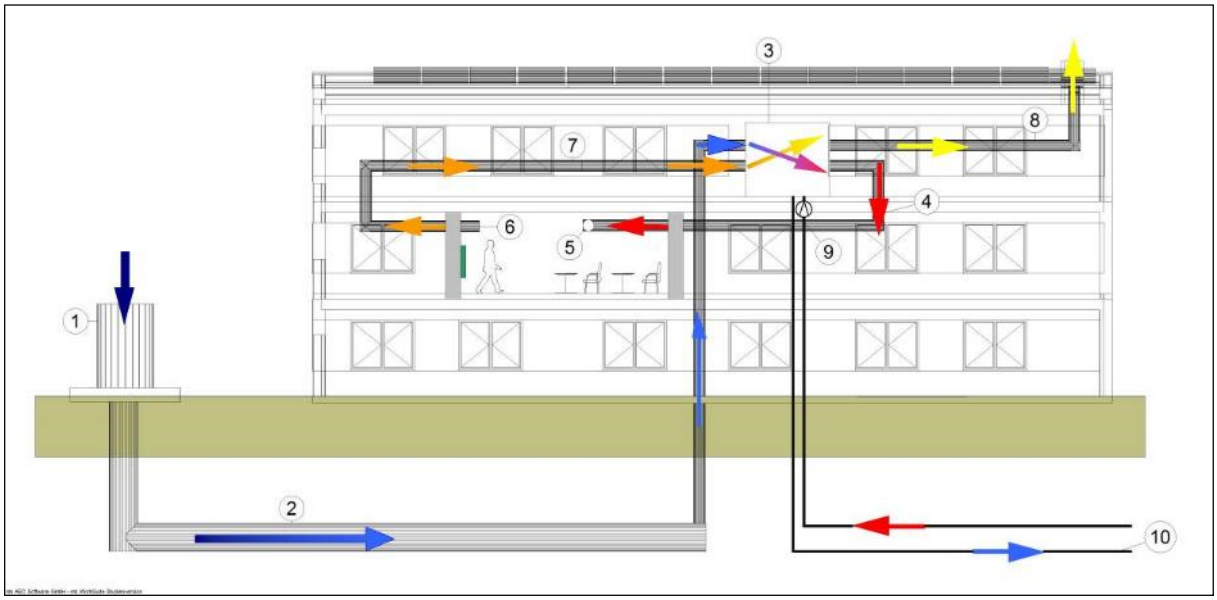

Abbildung 2-1: Heizungs- und Lüftungskonzept

Über die Luftansaugtürme (1) wird Außenluft angesaugt. Sie strömt durch den Erdwärmeübertrager (2), der eine Gesamtlänge von 650 m aufweist. Dort wird sie im Winter und Sommer vortemperiert. Die Temperaturänderung beträgt zwischen 3 und 5 K. Anschließend wird die Außenluft in eines von mehreren Lüftungszentralgeräten (3) geleitet. Herzstück ist die Wärme- und Feuchterückgewinnung. Mit Wärme und Feuchte aus der Abluft erfolgt die eigentliche Temperatur- und Feuchteerhöhung der Luft, die danach als Zuluft (4) im Gebäude über das Zuluftnetz verteilt wird.

Die Zuluft strömt aus Zuluftöffnungen in die Räume, jedoch nur in der Vorspülphase und morgendlichen Aufheizung sowie bei Anwesenheit der Nutzer. In vielen hochfrequentierten Räumen werden über Bewegungsmelder die Volumenstromregler (5) angesprochen. Ist jemand beispielsweise im Klassenraum, wird Luft eingelassen. Mit einer Nachlaufzeit von ca. 15 Minuten werden die Volumenstromregler nach dem Verlassen der Räume wieder geschlossen.

Bei den Räumen mit Büronutzung sind statt Bewegungsmeldern Zeitschaltprogramme vorgegeben. In diesen Räumen gibt es immer nur zwei Zustände: Luft strömt oder nicht (Volumenstromregler auf oder zu). Der einzige Raum, in dem dies nicht so ist, ist die Aula. Dort kann der Volumenstrom geregelt werden abhängig von der CO_2-Belastung, welche gemessen wird.

Durch das zweite Kanalnetz mit Abluftöffnungen (6) – ebenfalls mit Volumenstromreglern versehen – wird die verbrauchte Luft wieder aus den Räumen abgezogen. Sie strömt über das Abluftnetz (7) zurück zum Zentralgerät. Dort wird ihr in der Wärme- und Feuchterückgewinnung (3) entsprechend die Wärme und Feuchte entzogen. Schließlich gelangt sie als Fortluft (8) über Durchlässe in der Dachhaut zurück in die Umgebung.

Falls die Wärme aus der Abluft nicht ausreicht, um im Winter das Gebäude auf Temperatur zu halten, wird über zentrale Heizregister (9) die Luft mit Fernwärme nachgeheizt. Nur dann kann die Zuluft eine Temperatur oberhalb der Raumtemperatur erreichen. Dazu hat jedes Lüftungszentralgerät einen einzelnen Fernwärmeanschluss (10) mit Rohrleitungen, einem geregelten Kreis mit einem Dreiwegeventil (Beimischschaltung) und einer Pumpe.

Die Luftförderung erfolgt in jeder Lüftungsanlage mit 2 Ventilatoren – einer für die Zuluft, der andere für die Abluft. Sie sind im Zentralgerät (3) angeordnet Die Ventilatoren fahren in ihrer Leistung herunter, wenn einzelne Räume nicht belüftet werden müssen. Sie registrieren, wenn die Volumenstromregler in den Räumen geschlossen sind. Die maximalen Volumenströme der beiden großen Anlagen betragen 7500 m³/h (für Klassen/Hort, RLT-Zentrale in Raum 2.03) und 10.000 m³/h (für Aula/Verwaltung, RLT-Zentrale in Raum 2.18). Zum Vergleich: der Hausmeister hat in seiner Wohnung ein Lüftungsgerät mit einem maximalen Volumenstrom von etwa 210 m³/h.

Die Wärme- und Feuchterückgewinnung kann ebenfalls geregelt werden. Werden die Räume zu warm, dann wird zuerst das Fernwärmeheizregister abgeschaltet, danach die Wärmerückgewinnung von ihrem Maximalwert (ca. 92 % Rückgewinnung) bis auf 0 % heruntergefahren. Im Zustand ohne Wärme- und Feuchterückgewinnung strömt die Luft mit der Temperatur in die Räume, mit der sie aus dem Erdwärmeübertrager kommt.

Dieses Lüftungsprinzip ist in allen Lüftungsanlagen (Klassentrakt, Aulatrakt, Küchenlüftung, Hausmeisterwohnung) gleich. Jedoch hat der Hausmeister keine zentrale Erhitzung der Luft mit Fernwärme, sondern in fast jedem Raum eine Luftheizung mit einem elektrischen Nachheizregister.

Im Winter wird die Zeit am frühen Morgen (ab ca. 5 Uhr) vor jedem Schultag genutzt, um das Gebäude wiederaufzuheizen. In der Nacht wird ansonsten auf Heizung verzichtet. Die Volumenstromregler in den Räumen sind in dieser Aufheizphase vollständig geöffnet.

Im Sommer wird die Zeit zwischen ca. 1 Uhr und 6 Uhr nachts genutzt, um das Gebäude mit kühler Außenluft abzukühlen. Es werden dann ebenfalls alle Volumenstromregler in den Räumen geöffnet. Eine aktive Kühlung tagsüber gibt es nicht.

Diese morgendlichen Lüftungsphasen dienen auch der Sicherstellung von hygienischen Luftzuständen, wenn die Nutzer eintreffen. Schadstoffe, die sich im Laufe der Nacht evtl. angesammelt haben, werden abgeführt.

Die Fernwärme (10) wird dem Rücklauf des Elisabeth-Gymnasiums entnommen, welches bereits Wärme bei hohen Temperaturen genutzt hat. Für die Passivhausschule reichen die geringeren Temperaturen aus dem Rücklauf aus. Diese Maßnahme macht das Heizen preiswerter, weil kein eigener Anschluss mit Leistungspreis für die St. Franziskus-Grundschule bei den Stadtwerken bezahlt werden muss.

3 Komponenten und Bauteile

Die Schule ist mit insgesamt 7 Lüftungsanlagen ausgestattet, die in Tabelle 3-1 aufgeführt werden. Der nachfolgende Abschnitt gibt einen Überblick aller Geräte, deren technische Eigenschaften – insbesondere die Wärme- und Feuchterückgewinnung – sowie die zugehörigen Aufstellräume.

Tabelle 3-1: Übersicht über die Lüftungsgeräte

Nr.	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
5	Paul Santos (F) 370 DC	Verwaltungstrakt (Gebäudeteil A, BTA): Hausmeisterwohnung	214	214
6	Helios SKR D 450/4/70/40 Helios MBW 400/4 TK	Zuluft Küche Kochblock Abluft Küche Kochblock	4000	4000
7	Helios KVW 250/4/50/30 Helios MBW 200/4 TK	Zuluft Spülküche Abluft Spülküche	1500	1500

Der Zuluftvolumenstrom im Klassentrakt wird über zwei Anlagen abgeführt: über das Zentralgerät sowie die WC-Abluftanlage (3). Addiert man beide Anlage, ist die Volumenstrombilanz mit 7700 m³7h ausgeglichen.

Darüber hinaus werden die Lüftungszonierung des Gebäudes erläutert und die Luftauslässe tabellarisch aufgeführt. Zum Kanalnetz samt Dämmung werden wesentliche Randdaten benannt.

3.1 Lüftungszonen und Luftführung

Die Systematik der Lüftungszonierung zeigen Abbildung 3-1 bis Abbildung 3-3. Es wurde eine klare Trennung zwischen dem westlichen und östlichen Gebäudeteil vorgenommen. Der Vorteil dieser Trennung besteht in relativ kurzen Leitungslängen für jede der Anlagen, wodurch Wärmeverteilverluste reduziert werden. Zudem muss bei der geplanten Luftführung die Brandschutzwand (rot) von einem Gebäudeteil zum anderen nicht durchquert werden. Nachteilig sind die höheren Investitionskosten.

Abbildung 3-1: Lüftungszonierung EG

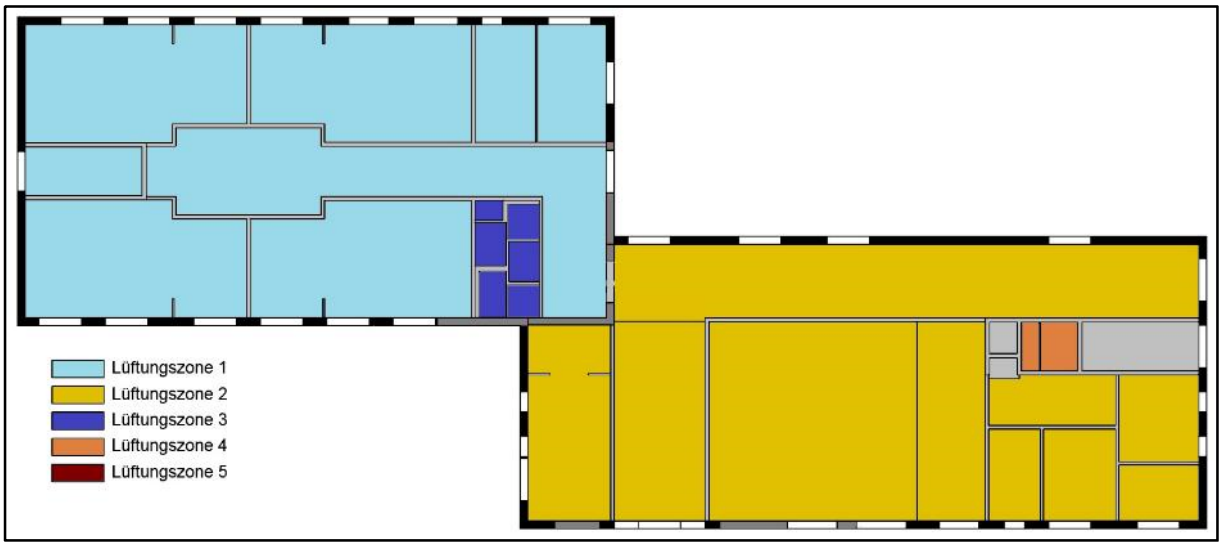

Abbildung 3-2: Lüftungszonierung 1. OG

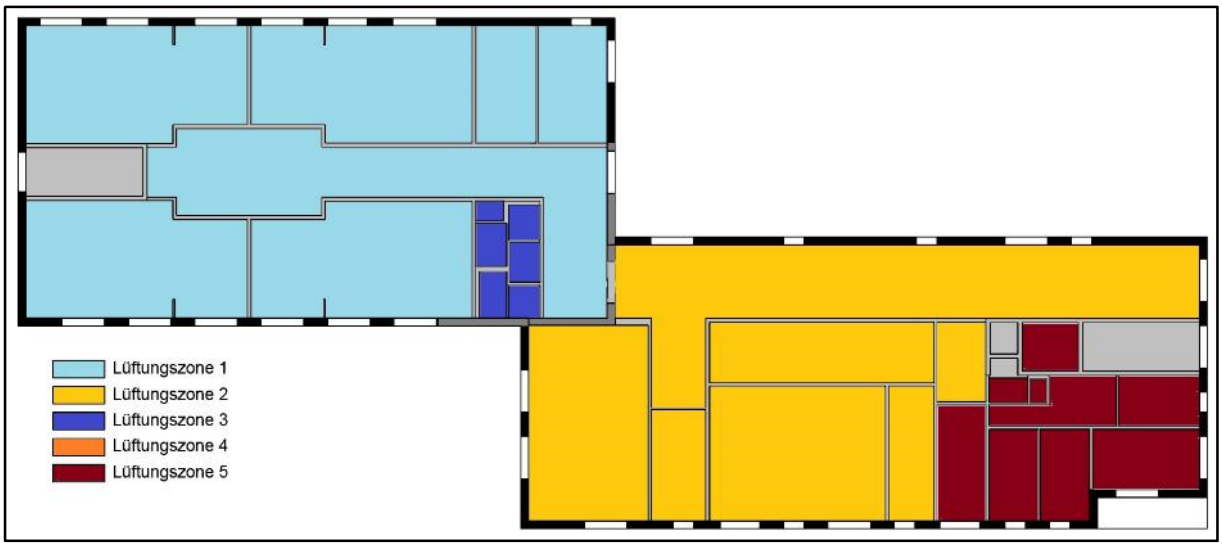

Abbildung 3-3: Lüftungszonierung 2. OG

Zu den Lüftungszonen 1 und 2 gehören die beiden zentralen Anlagen. Zusammen mit der Abluftanlage in Lüftungszone 3 ist die Luftzu- und -abfuhr im westlich gelegenen Klassentrakt ausgeglichen.

In der Küche (Lüftungszone 4) können neben der Grundlüftungsanlage zwei Prozesslüftungsanlagen individuell zugeschaltet werden. Jede dieser Anlagen ist in sich ausbalanciert. Die Hausmeisterwohnung in Lüftungszone 5 ist mit einer eigenen Wohnungslüftungsanlage ausgestattet.

Luftführung

Die Luftführung erfolgt jeweils über einen vertikalen Schacht und eine horizontale Verteilung in der abgehängten Decke der Flure. Die Zu- und Abluftleitungen sind in den meisten Aufenthaltsräumen als sichtbare Metallrohre ausgeführt. Zu- und Abluftauslässe sind meist an gegenüberliegenden Wänden angeordnet. Der Zuluftvolumenstrom entspricht i. d. R. dem Abluftvolumenstrom. Teilweise gibt es Überströmöffnungen zwischen den Räumen.

Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5 zeigen exemplarisch die Luftkanalnetze sowie Luftführung für das 2. OG. Weitere Pläne für die anderen Räume sind dem separaten Anhang A zu entnehmen.

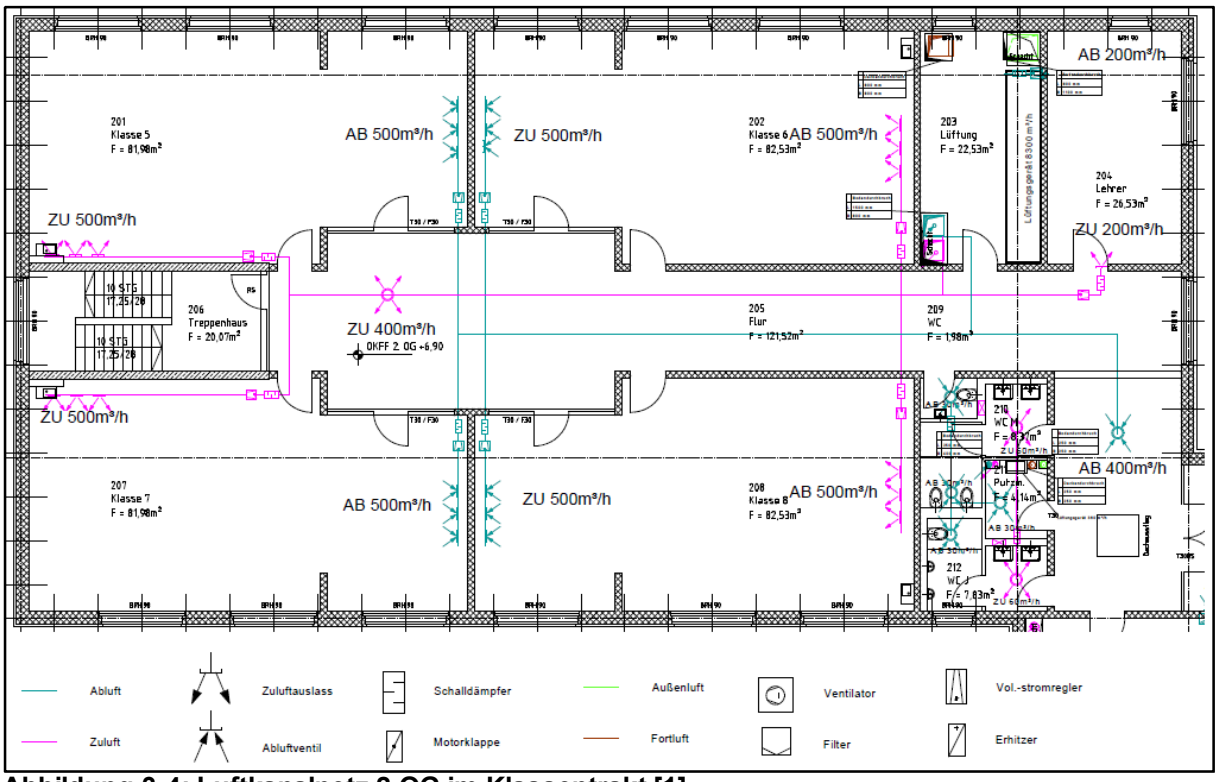

Abbildung 3-4: Luftkanalnetz 2.OG im Klassentrakt [1]

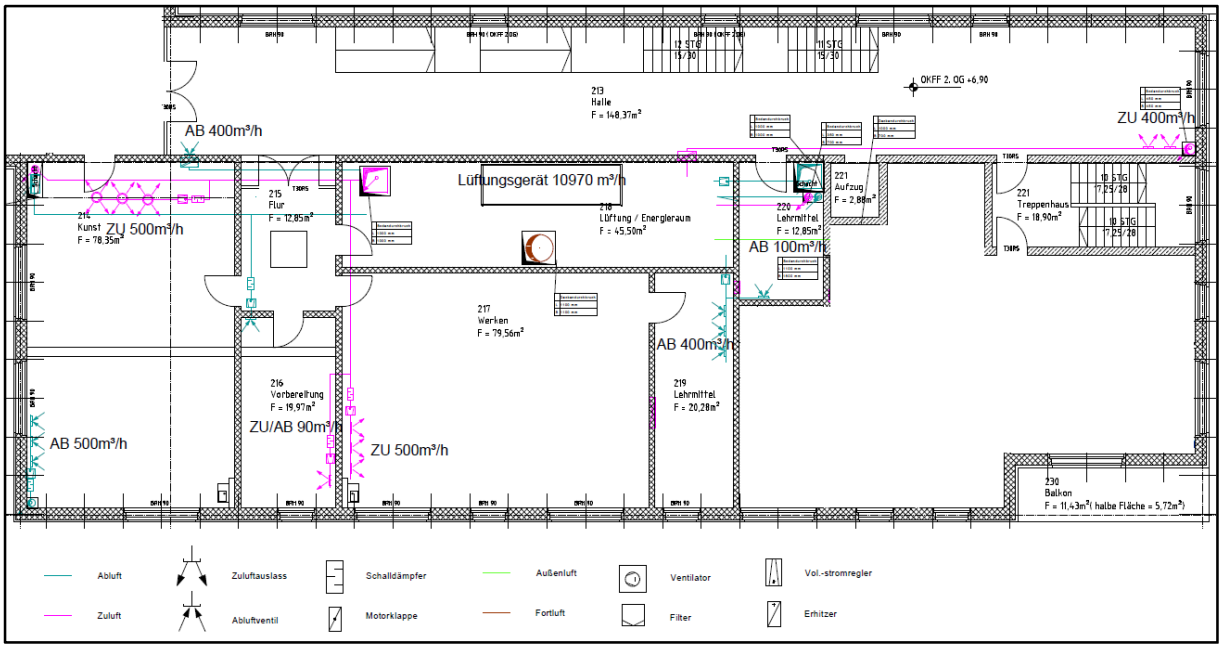

Abbildung 3-5: Luftkanalnetz 2.OG im Verwaltungstrakt [1]

Es wird innerhalb der Gebäudeteile nicht nach nord- bzw. südorientierten Bereichen unterschieden.

Die Außenluftansaugung erfolgt über zwei im westlichen Außenbereich befindliche Ansaugstutzen über das Erdwärmeübertragersystem (siehe Kapitel 8). Die Ansaugung durch den Erdwärmeübertrager kann nicht umgangen werden. Die Fortluft wird über das Dach abgeführt, siehe Abbildung 3-6.

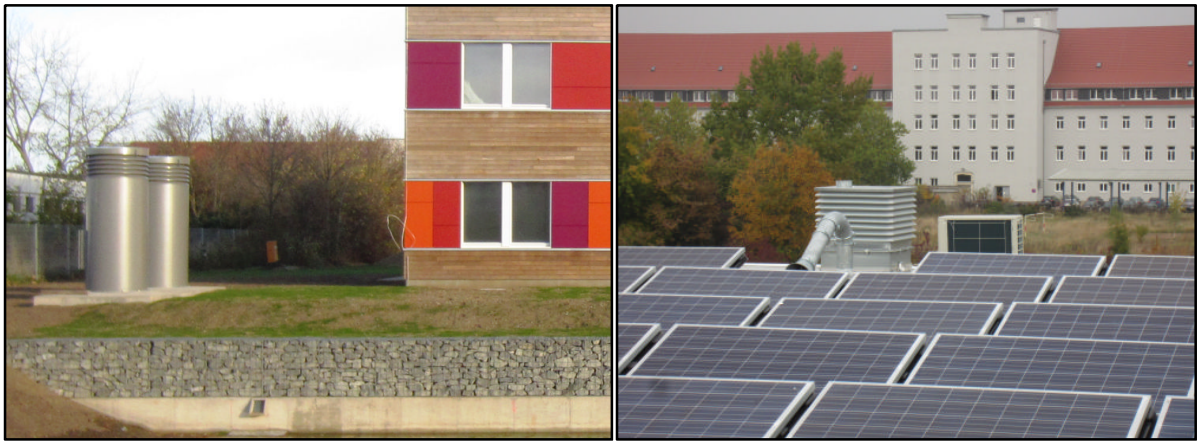

Abbildung 3-6: Zuluft über Ansaugbauwerk, Fortluft über Dach

3.2 Zentralgeräte MENERGA

Die beiden zentralen Lüftungsgeräte der Firma MENERGA, welche in dem Gebäude Verwendung finden, entstammen der gleichen Baureihe. Es handelt sich dabei um "Resolair Komfort-Klimageräte für lufttechnische Anlagen mit Regenerativ-Energieaustauscher, Typenreihe 64 Resolair solVent".

Die beiden installierten Varianten unterscheiden sich im Nennvolumenstrom. Im Klassentrakt ist die Ausführungsvariante "MENERGA Resolair 640701" mit einem Nennvolumenstrom von 7.500 m³/h installiert, im Verwaltungstrakt die nächstgrößere Ausführungsvariante "MENERGA Resolair 641001" mit einem Nennvolumenstrom von 10.000 m³/h. Die individuelle Auslegung in der St. Franziskus-Grundschule liegt jeweils nahe am jeweiligen Maximalwert.

Die Luft wird bei jeder Betriebsart von dem Gerät gefiltert. Es sind im Zuluftweg vorhanden: Grobfilter G3 im Ansaugturm, ein Grobfilter G5 vor dem Zentralgerät sowie ein Feinfilter F7 nach dem Zentralgerät. Im Abluftweg ist ein Grobfilter G5 vor dem Lufteintritt in das Zentralgerät vorhanden.

Als Funktionserweiterung der Anlagen ist jeweils ein Pumpenwarmwasser-Lufterhitzer installiert und die zugehörige Steuerung ist aktiviert [4].

Die Regelung der Lüftungsgeräte erfolgt über einen integrierten Controller. Am Display des Controllers können Soll- und Istwerte eingesehen und geändert werden. Auch der Betriebsmodus lässt sich über diese Steuerung wählen. Das Einsehen und Ändern von Ist- und Sollwerten ist auch über den Webserver von MENERGA möglich. Über das an der Schnittstelle angeschlossene Modem wird die Datenfernübertragung zur Steuerung und Auswertung hergestellt [4]. Die im Webserver gespeicherten historischen Daten werden im Monitoring ausgewertet. Weitere Details zur Messtechnik sind im Abschlussbericht 4 zu finden.

RLT Klassentrakt

Abbildung 3-7 und Abbildung 3-8 zeigen das Zentralgerät für den Klassentrakt im Aufstellraum 2.03. Das Zentralgerät MENERGA 640701 versorgt alle Hort-, Klassen und Mitarbeiterräume des westlichen Gebäudeteils (außer die Sanitärräume) mit einem Zuluftvolumenstrom von 7700 m³/h und einer Abluft von 7380 m³/h. Die überschüssige Zuluft geht über Überströmöffnungen in die Sanitärbereiche, wo sie durch die Abluftanlage (Kapitel 3.5) abgesaugt wird.

Das Typenschild der Anlage ist in Abbildung 3-9 zu sehen.

Abbildung 3-7: RLT Zentralgerät in Raum 2.03 – Blick nach Norden

Abbildung 3-8: RLT Zentralgerät in Raum 2.03 – Blick nach Süden

Abbildung 3-9: Typenschild Zentralgerät in Raum 2.03

RLT Verwaltungstrakt mit Aula

Abbildung 3-10: RLT Zentralgerät in Raum 2.18 – Blick nach Westen

Abbildung 3-11: RLT Zentralgerät in Raum 2.18 – Blick nach Osten

Abbildung 3-10 und Abbildung 3-11 zeigen das Zentralgerät für den Verwaltungstrakt im Aufstellraum 2.18.

Das Gerät ist mit einem Nennvolumenstrom von 10.000 m³/h das größte der Schule. Die Anlage ist auf 10.400 m³/h Zu- und Abluft einreguliert und versorgt die Aula, die Verwaltung sowie die Facharbeitsräume, d. h. alle konditionierten Räume des östlichen Gebäudeteils außer Küche und Hausmeisterwohnung.

Der größte Volumenstrom geht mit 6500 m³/h in die Aula, die jedoch nicht ständig in Benutzung ist und über eine CO_2-Regelung verfügt.

Das Typenschild der Anlage ist in Abbildung 3-12 zu sehen.

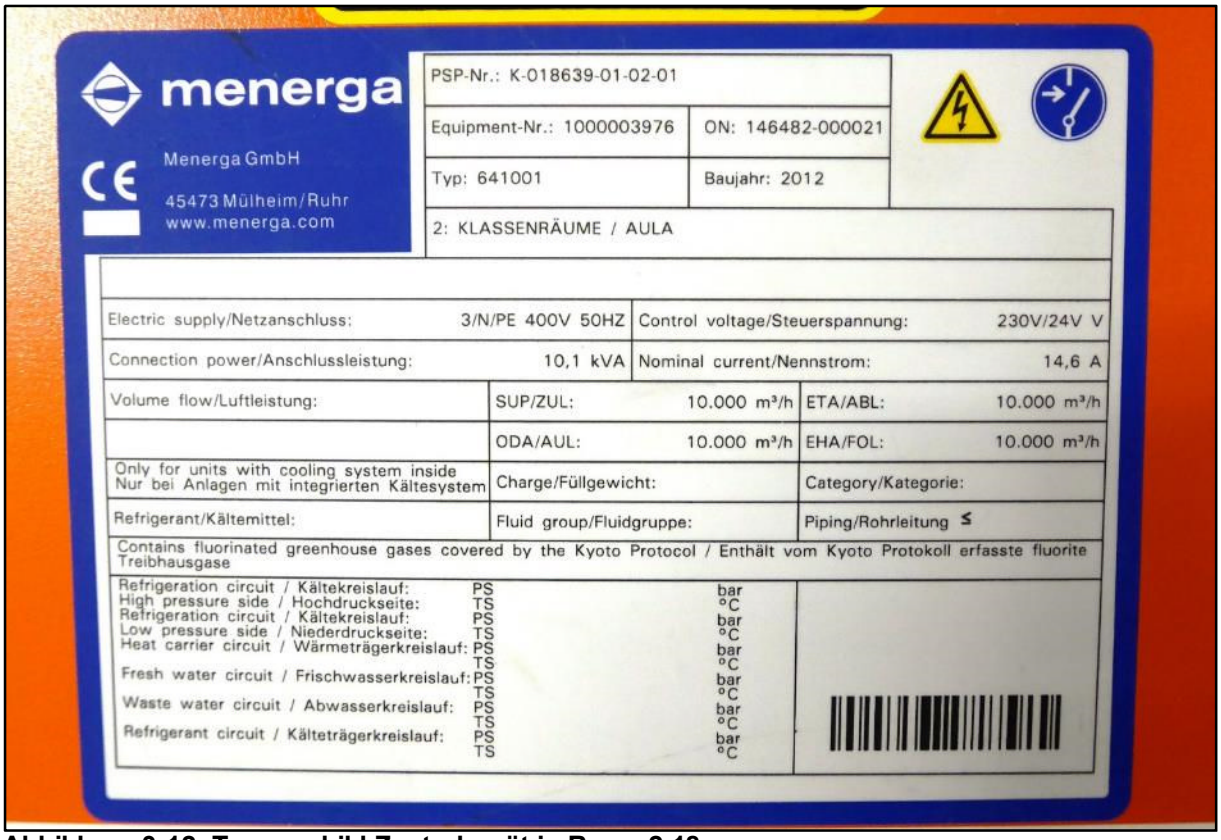

Abbildung 3-12: Typenschild Zentralgerät in Raum 2.18

3.3 Küchenlüftung

Zentralgerät PAUL

In der Küche sorgt ein Zentralgerät vom Typ "PAUL Santos 370 DC" – siehe Abbildung 3-13 – mit einem Volumenstrom von 319 m³/h und maximaler Leistung von 243 W für die Grundlüftung in den Küchenräumen sowie im Lehrer-WC im 1. OG. Das Zentralgerät ist im Flur 0.32 angeordnet.

Abbildung 3-13: Küchengrundlüftung in Raum 0.32

Während des Koch- und Spülbetriebes werden die Zu- und Ablufthauben manuell hinzugeschaltet.

Das Gerät verfügt über einen Dreistufenschalter (100 / 225 / 275 m³/h), die Grundlüftung beträgt 50m³/h. Die jeweilige Stufe kann vom Küchenpersonal prinzipiell frei gewählt werden. Während des Zeit des Monitorings war überwiegend die mittlere Stufe aktiviert.

Der Frostschutz erfolgt über eine Iso-Defrosterbox. Sie ist in der abgehängten Decke installiert und wird nicht separat gemessen. Da eine Vorwärmung der Luft im Erdwärmeübertrager erfolgt, ist das Frostrisiko eher gering.

Zu- und Ablufthauben

In der Küche befinden sich eine Zu- und Ablufthaube sowohl über dem Kochblock (4000 m³/h) sowie über dem Spülbereich (1500 m³/), siehe Abbildung 3-14. Die Hauben werden vom Küchenpersonal manuell bedient, hierzu befinden sich in den Schaltschränken 5-stufige Drehzahlsteller.

Abbildung 3-14: Haube über Kochblock und Spülmaschine

Der Lufttransport erfolgt durch Zuluftventilatoren in der Haube sowie separate Abluftventilatoren, die im benachbarten Stuhllager Raum 0.30 installiert sind:

- Zuluft 4000 m³/h: HELIOS SKR D 450/4/70/40
- Abluft 4000 m³/h: HELIOS MBW 400/4 TK
- Zuluft 1500 m³/h: HELIOS KVW 250/4/50/30
- Abluft 1500 m³/h: HELIOS MBW 200/4 TK

Beide Hauben verfügen über eine integrierte Wärmerückgewinnung mit einem Rückgewinnungsgrad von maximal 75 %. Die Nacherwärmung der Luft erfolgt über Fernwärmeheizregister mit 2 x 18 kW (Kochhaube) bzw. 10,8 kW (Spülhaube). Die maximal einstellbare Zulufttemperatur liegt bei 34°C. Der Wert ist manuell wählbar.

Abbildung 3-15 zeigt die Luftführung der Anlage über dem Kochblock. In Abbildung 3-16 ist der Abluftventilator sowie dessen Typenschild zu sehen. Abbildung 3-17 und Abbildung 3-18 geben den analogen Überblick über die Lüftungsanlage der Spülküche.

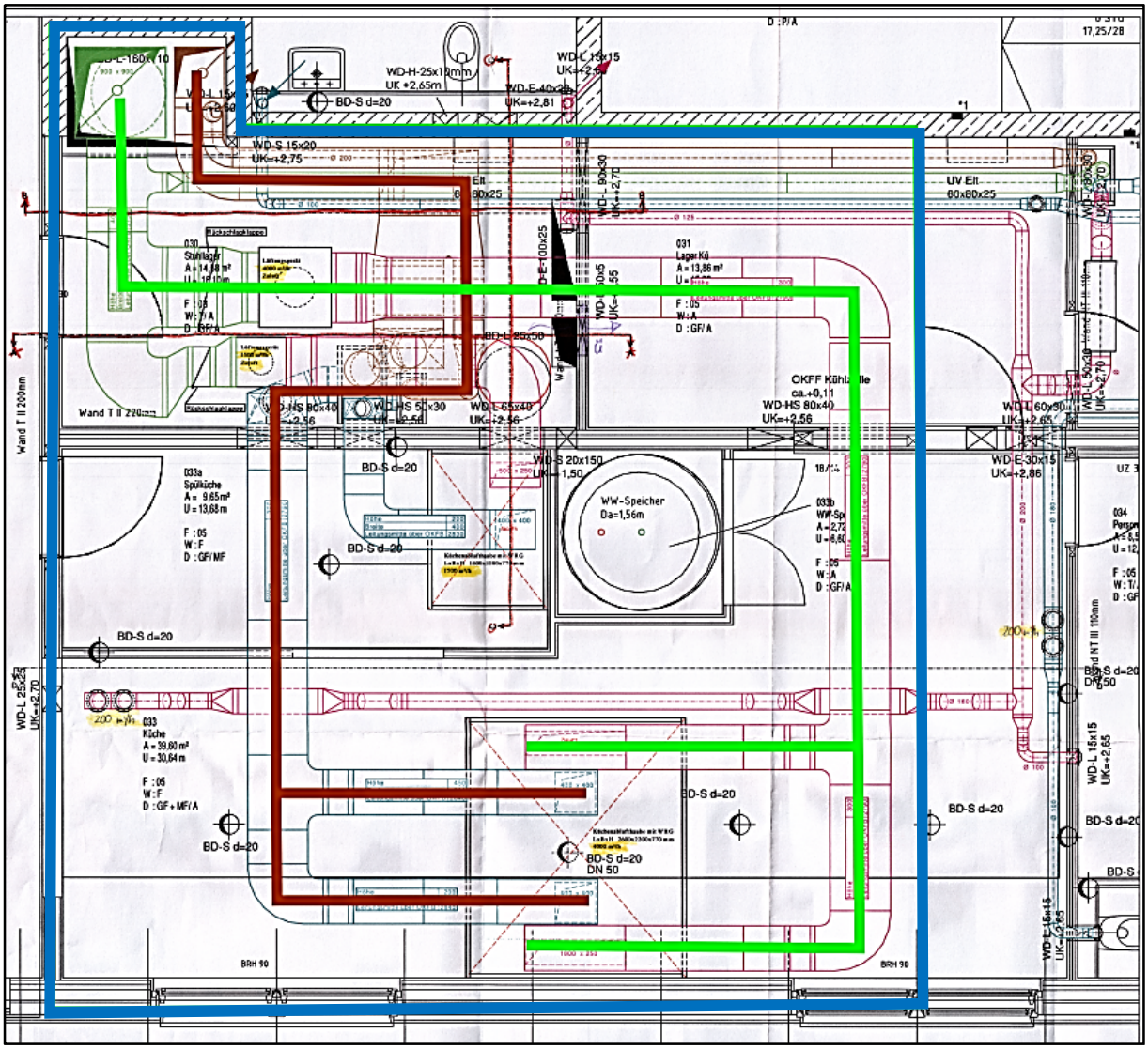

Abbildung 3-15: Prinzip der Luftführung für die Kochhaube 4000 m³/h [5] [6]

Abbildung 3-16: Ventilator und Typenschild in Raum 0.30 unten – Abluft Kochhaube

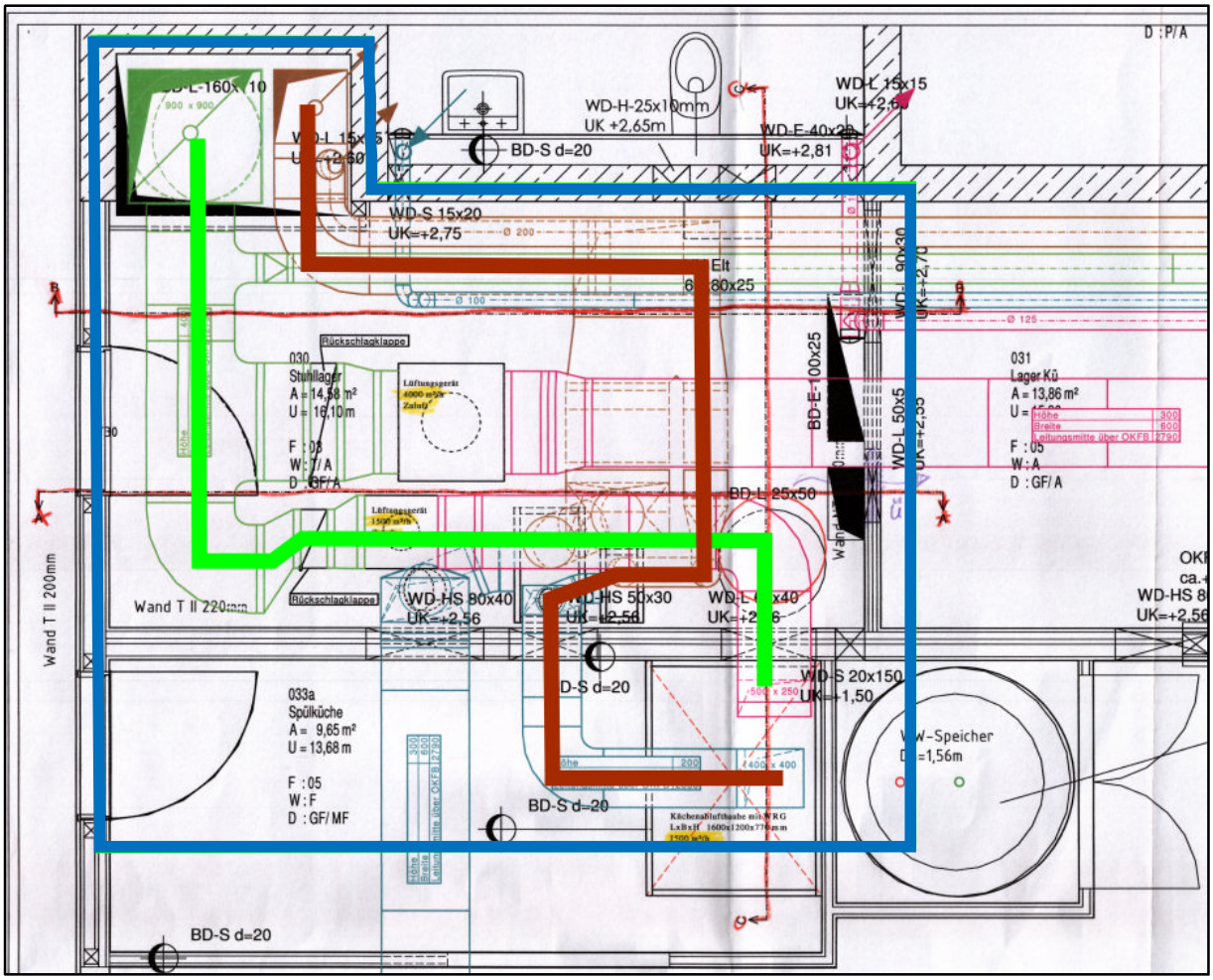

Abbildung 3-17: Prinzip der Luftführung für die Spülhaube 1500 m³/h [5] [6]

Abbildung 3-18: Ventilator und Typenschild in Raum 0.30 oben – Abluft Spülhaube

Einen Einblick in den Aufstellraum der Abluftanlagen 0.30 gibt Abbildung 3-19. An der Rückwand zur Küche ist auf einer Wandkonsole der kleinere Abluftventilator für die Spülküche angebracht. Der größere Abluftventilator für den Kochblock steht auf dem Boden. Da die Luft fetthaltig ist, sind separate Fortluftöffnungen über Dach vorhanden.

Abbildung 3-19: Küchenprozesslüftung mit Abluftventilatoren in Raum 0.30

3.4 Wohnungslüftung Hausmeister

Das Zentralgerät ist im Raum 224a angeordnet. Es versorgt alle Räume der Hausmeisterwohnung. Es handelt sich um ein Wohnungslüftungsgerät "PAUL Santos (F) 370 C". Die Anlage ist auf 214 m³/h ausgelegt. Abbildung 3-20 zeigt den Grundrissausschnitt mit Anordnung der Kanäle.

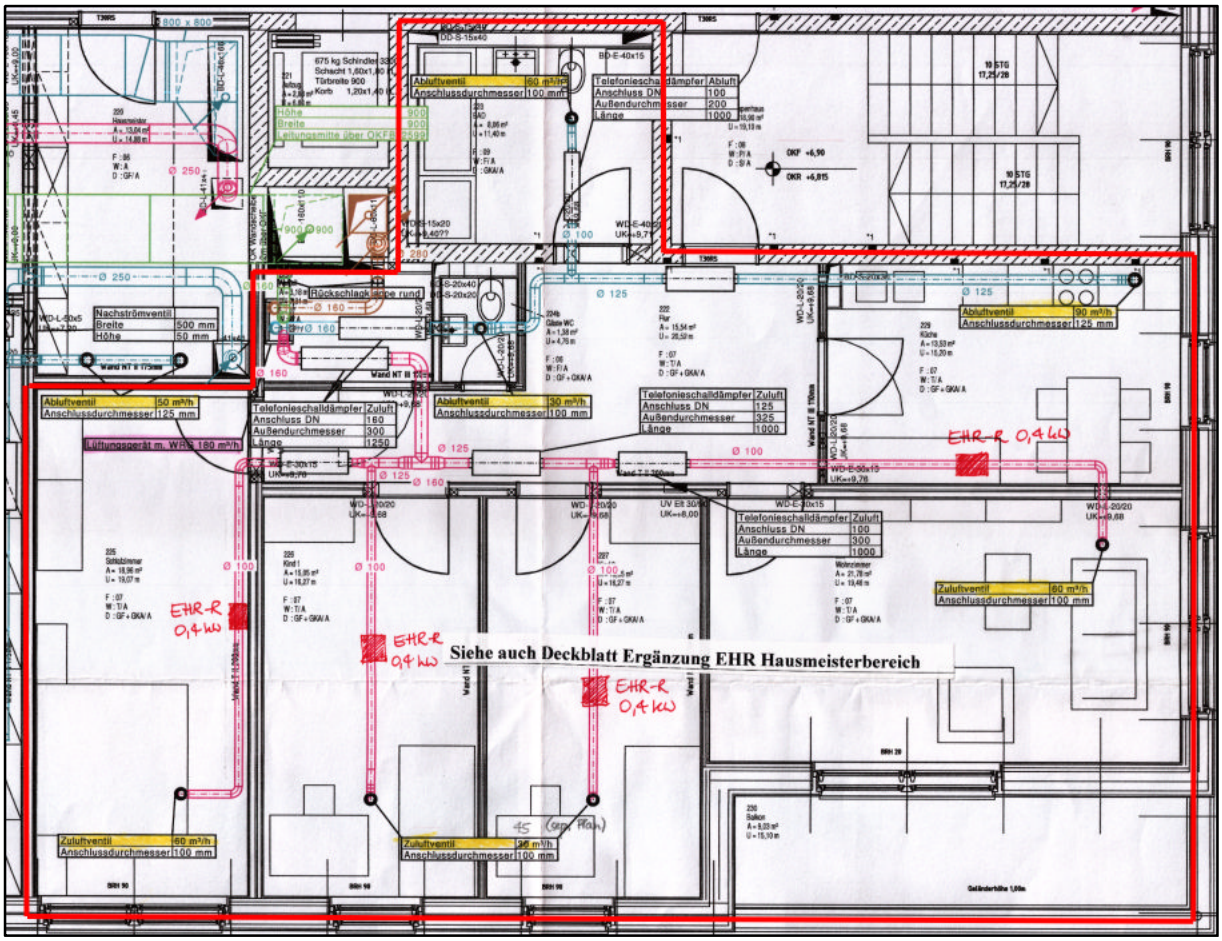

Abbildung 3-20: Prinzip der Luftführung in der Hausmeisterwohnung [5] [6]

Die Anlage ist auf ganztägigen Betrieb ausgelegt.

Das Gerät verfügt über einen Dreistufenschalter (100 / 225 / 275) m³/h, die Grundlast beträgt 50 m³/h. Der Nutzer kann die jeweilige Betriebsstufe frei wählen. Meist ist die mittlere Stufe aktiv. Im Sommer ist die Anlage häufig abgeschaltet. Die höchste Stufe kann aufgrund der Geräuschbelastung nicht längerfristig genutzt werden.

Der Frostschutz wird über ein zusätzliches elektrisches Heizregister im Außenluftkanal gewährleistet. Allerdings kommt die Zuluft wegen der Nutzung des Erdwärmeübertragers praktisch ganzjährig frostfrei an, siehe Kapitel 8.4.1.

Im Gegensatz zu den anderen Lüftungsanlagen der Schule erfolgt die Luftnachheizung nicht zentral, sondern dezentral raumweise durch elektrische Heizregister vom Typ HELIOS EHR-R mit jeweils 0,4 kW Leistung. Die Ansteuerung der Nachheizregister erfolgt über Raumthermostate. Eine weitere Auswertung der Heizung findet sich im Abschlussbericht 9.

3.5 Abluftanlage WCs

Das Abluftgerät mit einem Radialrohrventilator vom Typ HELIOS Slimvent SVS 160 K hängt in Raum 2.11, siehe Abbildung 3-21. Es entsorgt die Abluft der Sanitärräume des Klassentraktes auf drei Etagen mit einem Abluftvolumenstrom von 320 m³/h.

Der Betrieb erfolgt parallel zur zentralen RLT-Anlage "Klassentrakt". Die Ventiltorsteuerung ist an die Hauptanlage gekoppelt.

Abbildung 3-21: Abluftanlage in Raum 2.11

3.6 Volumenstromregler

Viele der Räume, welche der Hauptnutzung zuzuordnen sind, weisen Volumenstromregler auf. Eine tabellarische Zusammenstellung findet sich in Kapitel 5.1.5.

Die Volumenstromregler wurden ab Werk (Fa. TROX) auf einen minimalen und einen maximalen Volumenstrom voreingestellt. Die Ansteuerung der Regler erfolgt über eine Schnittstelle 0 - 10 V. Eine Änderung der beiden Grenzwerte (sofern sie innerhalb des maximal möglichen Bereichs liegen) erfordern für die elektronischen Regler ein Einstellgerät.

Abbildung 3-22 zeigt ein elektronisch einstellbares Gerät. Es kommt in der St. Franziskus-Grundschule in den Räumen mit einem Volumenstrom ab ca. 400 m³/h zum Einsatz. Dies sind überwiegend die Klassen- und große Horträume sowie die Aula.

Abbildung 3-22: Elektronisch einstellbarer Volumenstromregler

Die Räume mit geringeren Volumenströmen sind mit mechanisch einstellbaren Volumenstromreglern ausgestattet, siehe Abbildung 3-23. Es handelt sich um Büroräume, Teamräume, kleine Horträume.

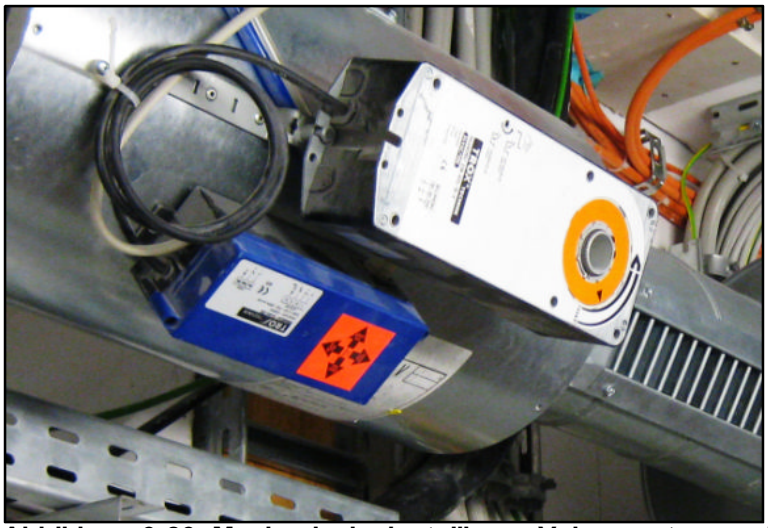

Abbildung 3-23: Mechanisch einstellbarer Volumenstromregler

Die Volumenstromregler sind mit Typenschildern versehen, welche meist am Kanal neben dem Auslass aufgeklebt sind. Beispielhafte Typenschilder zeigt Abbildung 3-24.

Die Volumenstromregler haben die Aufgabe, einen vorgegebenen Sollvolumenstrom unabhängig vom schwankenden Kanaldruck einzuhalten. Dabei unterscheidet man zwischen Konstantvolumenstromreglern, Reglern mit Umschaltung und den variablen Volumenstromreglern.

Die einfache Variante, also der konstante Regler, erlaubt nur einen gleichmäßigen Volumenstrom, wobei der Regler mit Umschaltung auf $\dot{V}_{min}$ und $\dot{V}_{max}$ ausgelegt werden kann. Diese Bauart bzw. Ausführungsart wurde in der St. Franziskus-Grundschule gewählt.

Die einzige Ausnahme bildet die Aula. Sie wurde auf einen variablen Luftstrom ausgelegt. Diese erhalten von der übergeordneten Regelung direkte Befehle für die bedarfsweise Ansteuerung – in diesem Fall nach Temperatur und CO_2-Gehalt der Raumluft.

Aufgrund der möglichen Schallemissionen sind in fast allen Räumen raumseitig nach den Volumenstromreglern noch Schalldämpfer angeordnet.

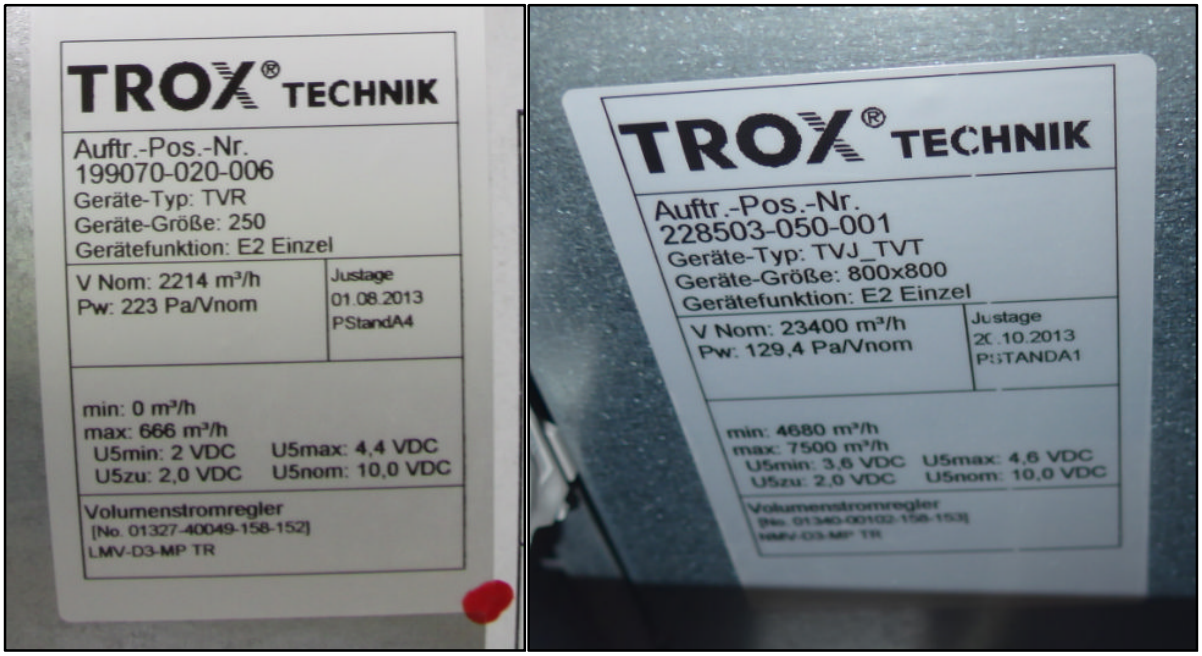

Abbildung 3-24: Typenschilder in einem Klassenraum und für die Aula

3.7 Luftauslässe

Im Gebäude sind verschiedene Arten von Zuluftauslässen, Überstromöffnungen und Abluftdurchlässen installiert. Tabelle 3-2 gibt zunächst einen tabellarischen Überblick.

Tabelle 3-2: Luftauslässe

Raum		Auslässe		Volumenströme, Auslegung [m³/h]			
		Zuluftauslass	Abluftdurchlass	Zu-luft RLT	Zuluft Über-ström	Ab-luft RLT	Abluft Über-ström
001	Hort	Lüftungsgitter Kanaleinbau	SCHAKO	500	0	500	0
002	Hort	Drall-Deckenluftdurchlass	Schlitzdurchlass	180	0	180	0
003	Kindercafé	Lüftungsgitter Kanaleinbau	Lüftungsgitter Kanaleinbau	560	0	560	0
004a	Batterie	gekürztes Türblatt	gekürztes Türblatt	0	30	0	30
004	HAR / Server	gekürztes Türblatt	Abluftventil	0	130	130	0
006	WC	gekürztes Türblatt	Abluftventil	0	30	30	0
007	Büro	Lüftungsgitter Kanaleinbau	Schlitzdurchlass	100	0	0	100
008	Mitarbeiter	Lüftungsgitter Kanaleinbau	Schlitzdurchlass	60	0	0	60
009	Flur	Zuluftventil mit Brandschutz	Abluftventil	300	0	190	110
011	Spielraum	Lüftungsgitter Kanaleinbau	Schlitzdurchlass	400	0	400	0
012	Medien	Drall-Deckenluftdurchlass	Schlitzdurchlass	180	0	180	0
013	Entspannung	Drall-Deckenluftdurchlass	Schlitzdurchlass	180	0	180	0
014	Werkstatt	Lüftungsgitter Kanaleinbau	Schlitzdurchlass	400	0	400	0
015	WC	gekürztes Türblatt	Abluftventil	0	30	30	0
017	WC	gekürztes Türblatt	Abluftventil	0	80	80	0
018	HAR	gekürztes Türblatt	Svegon Überströmventil	0	50	0	50
019	Halle	Lüftungsgitter Kanaleinbau	offener Durchgang	700	0	0	700
021	Foyer/Luftraum	offener Durchgang	offener Durchgang	0	1840	0	1840
022	Garderobe	offener Durchgang	Deckenluftdurchlass	0	460	460	0
023	Garderobe	offener Durchgang	Deckenluftdurchlass	0	460	460	0
024	Garderobe	offener Durchgang	Deckenluftdurchlass	0	460	460	0
025	Garderobe	offener Durchgang	Deckenluftdurchlass	0	460	460	0
026	Aula/Luftraum	Diffusionsgitter	Lüftungsgitter Kanaleinbau	6500	0	4500	2000
028	WC	Tellerventil 100	Abluftventil	31	0	31	0
030	Stuhllager	Zuluftventil	gekürztes Türblatt	30	0	0	29
031	Lager Kühlung	offener Durchgang	Abluftventil	0	29	29	0
033/ 033a	Küche/Spülküche	Zuluftventil	Abluftventil	197	1	198	0
033	Küche	Kochblockhaube	Kochblockhaube	4000	0	4000	0
033a	Spülküche	Spülblockhaube	Spülblockhaube	1500	0	1500	0
034	Personal	Zuluftventil	gekürztes Türblatt	31	0	0	31
035	WC	offener Durchgang	Abluftventil	0	31	31	0
101	Klasse	Lüftungsgitter Kanaleinbau	Lüftungsgitter Kanaleinbau	480	0	480	0
102	Klasse	Lüftungsgitter Kanaleinbau	Lüftungsgitter Kanaleinbau	480	0	480	0
103	Lehrmittel	Schlitzdurchlass	Abluftventil	0	180	180	0
104	Lehrer	Lüftungsgitter Kanaleinbau	Schlitzdurchlass	180	0	0	180
105	Flur	Zuluftventil mit Brandschutz	Abluftventil	280	0	160	90
107	Klasse	Lüftungsgitter Kanaleinbau	Lüftungsgitter Kanaleinbau	480	0	480	0
108	Klasse	Lüftungsgitter Kanaleinbau	Lüftungsgitter Kanaleinbau	480	0	480	0
109	WC	gekürztes Türblatt	Abluftventil	0	30	30	0
110	WC	gekürztes Türblatt	Abluftventil	0	30	30	0
111	Dusche	gekürztes Türblatt	Abluftventil	0	30	30	0
112	WC	gekürztes Türblatt	Abluftventil	0	30	30	0
113	Halle	Lüftungsgitter Kanaleinbau	offener Durchgang	700	440	0	1140
114	Raum der Stille	Drall-Deckenluftdurchlass	Schlitzdurchlass	480	0	480	0
115	Galerie	offener Durchgang	Lüftungsgitter Kanaleinbau	0	50	2000	0
117	WC	gekürztes Türblatt	Abluftventil	0	30	30	0
118	Vorraum WC	Zuluftventil	gekürztes Türblatt	30	0	0	30
120	Flur Lehrer	offener Durchgang	Deckenluftdurchlass	0	150	150	0
121	Besprechung	Drall-Deckenluftdurchlass	Deckenluftdurchlass	300	0	300	0

Raum		Auslässe		Volumenströme, Auslegung [m³/h]			
		Zuluftauslass	Abluftdurchlass	Zu-luft RLT	Zuluft Über-ström	Ab-luft RLT	Abluft Über-ström
122	Schulleiter	Schlitzauslass	gekürztes Türblatt	60	0	0	60
123	Sekretariat	Schlitzauslass	gekürztes Türblatt	90	0	0	90
124	Archiv/1.Hilfe	Tellerventil 100	Abluftventil	30	0	30	0
201	Klasse	Lüftungsgitter Kanaleinbau	Lüftungsgitter Kanaleinbau	480	0	480	0
202	Klasse	Lüftungsgitter Kanaleinbau	Lüftungsgitter Kanaleinbau	480	0	480	0
203	Lüftung	Tellerventil 100	Abluftventil	20	0	20	0
204	Lehrer	Lüftungsgitter Kanaleinbau	Lüftungsgitter Kanaleinbau	180	0	180	0
205	Flur	Zuluftventil	Abluftventil	280	0	160	530
207	Klasse	Lüftungsgitter Kanaleinbau	Lüftungsgitter Kanaleinbau	480	0	480	0
208	Klasse	Lüftungsgitter Kanaleinbau	Lüftungsgitter Kanaleinbau	480	0	480	0
209	WC	gekürztes Türblatt	Abluftventil	0	30	30	0
210	WC	gekürztes Türblatt	Abluftventil	0	30	30	0
211	Putzen	gekürztes Türblatt	Abluftventil	0	30	30	0
212	WC	gekürztes Türblatt	Abluftventil	0	30	30	0
213	Halle	Lüftungsgitter Kanaleinbau	offener Durchgang	440	0	0	440
214	Kunst	Drall-Deckenluftdurchlass	SCHAKO	480	0	480	0
216	Vorbereitung	Schlitzauslass	Schlitzauslass	90	0	90	0
217	Werken	Schlitzauslass	Schlitzdurchlass	480	0	0	480
218	Lüftung	Tellerventil 100	Abluftventil	20	0	20	0
219	Lehrmittel	Schlitzdurchlass	Lüftungsgitter Kanaleinbau	0	480	480	0
220	Hausmeister	Tellerventil 100	Abluftventil	30	0	30	0
222	Flur	gekürztes Türblatt	gekürztes Türblatt	0	214	0	214
223	Bad	gekürztes Türblatt	Abluftventil	0	62	62	0
224a	Abstellraum	gekürztes Türblatt	Abluftventil	0	30	30	0
224b	Gäste WC	gekürztes Türblatt	Abluftventil	0	31	31	0
225	Schlafzimmer	Zuluftventil	gekürztes Türblatt	61	0	0	61
226	Kind	Zuluftventil	gekürztes Türblatt	46	0	0	46
227	Kind	Zuluftventil	gekürztes Türblatt	46	0	0	46
228	Wohnzimmer	Zuluftventil	gekürztes Türblatt	61	0	0	61
229	Küche	gekürztes Türblatt	Abluftventil	0	91	91	0

In den Klassenräumen sowie großen Horträumen sind Zu- und Abluftelemente als Lüftungsgitter mit Kanaleinbau ausgeführt, siehe Abbildung 3-25 und Abbildung 3-26. Die Installation erfolgte einerseits aus Kostengründen sichtbar auf Putz, andererseits baut auch das pädagogische Konzept auf die Sichtbarkeit der Technik.

Mit den im Projekt auftretenden Zulufttemperaturen gab es keinerlei Nutzerbeschwerden über Zugerscheinungen im Bereich der Luftauslässe.

Abbildung 3-25: Zuluft im Klassenraum 2.01

Abbildung 3-26: Abluft im Klassenraum 2.01

In anderen Bereichen, z. B. den Büros und Fluren, kommen Tellerventile sowie Drallauslässe zum Einsatz, siehe Abbildung 3-27 bis Abbildung 3-30.

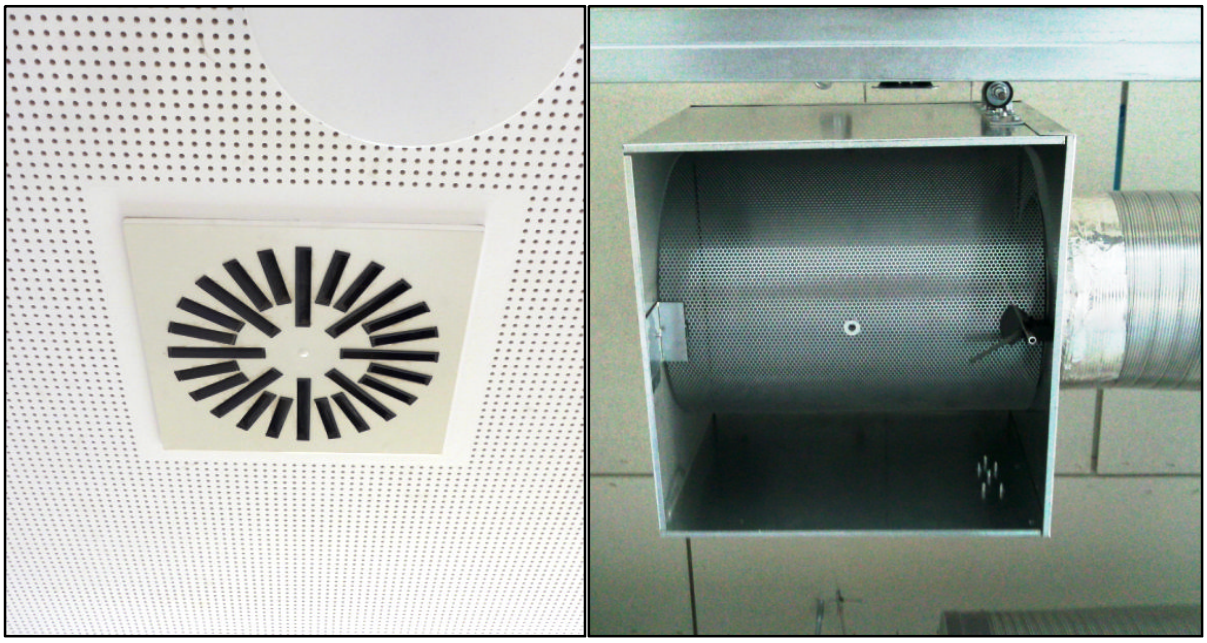

Abbildung 3-27: Luftauslässe in den Büros

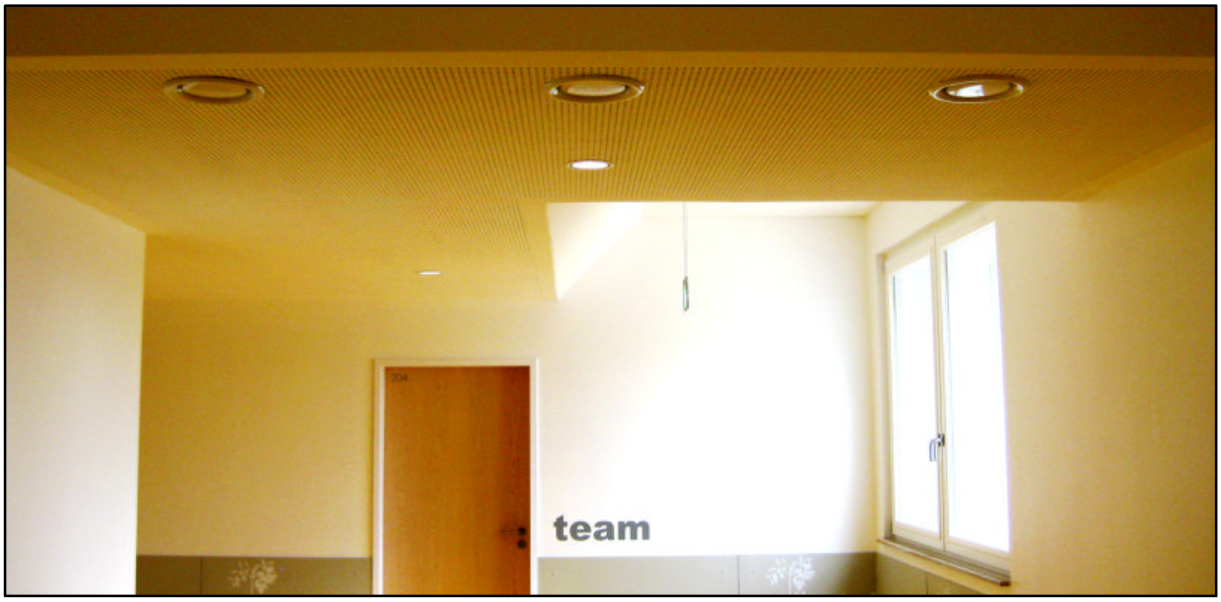

Abbildung 3-28: Luftauslässe in den Fluren des Klassentraktes

Abbildung 3-29: Abluft in den Sanitärräumen

Abbildung 3-30: Luftauslässe in den Fluren des Verwaltungstraktes

Abbildung 3-31: Überströmung zwischen Raum 2.17, 2.18 und 2.19

Abbildung 3-32: Zuluft in der Aula

In der Aula sind Auslässe mit schwenkbaren Lamellen zum Einsatz gekommen. Siehe Abbildung 3-32.

Die Überströmung zwischen den Verkehrsflächen und einzelnen Räumen sind jeweils als gekürzte Türblätter ausgeführt. Der direkte Luftaustausch zwischen 2 Räumen durch die verbindende Wand erfolgt über Wanddurchbrüche mit Tellerventilen oder Lüftungsgittern. Siehe Abbildung 3-31.

3.8 Wärme- und Feuchterückgewinnung

Alle Zu- und Abluftanlagen weisen eine Wärmerückgewinnung auf.

Hauptlüftungsanlagen MENERGA

In den beiden Zentralgeräten erfolgt die Wärmerückgewinnung durch Umschaltspeicher. Hierbei wird der Wärmeübertrager im Wechsel von kalter Außenluft und warmer Abluft durchströmt. Die Wärme der Abluft wird an die Speichermasse abgeführt und danach von der Außenluft aufgenommen. Der Vorteil ist, dass hierbei auch eine Feuchterückgewinnung erfolgt. Abbildung 3-33 zeigt das System schematisch.

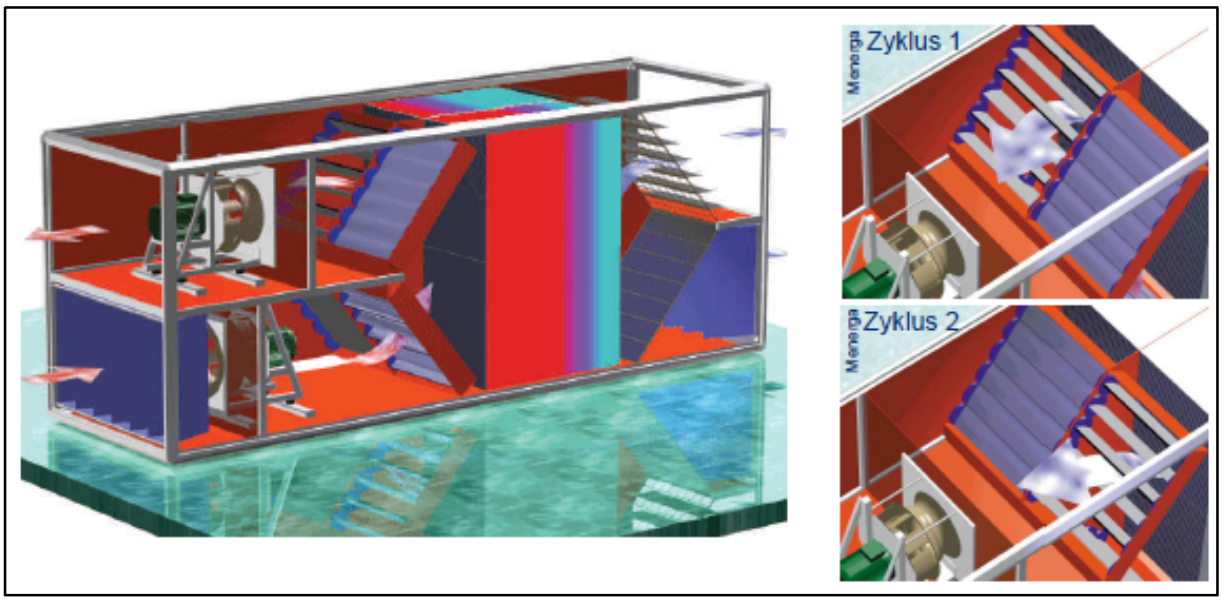

Abbildung 3-33: Schemata Geräteaufbau und Funktionsweise der Umschaltzyklen [4]

Die Geräte verfügen laut Herstellerangaben über einen Temperaturwirkungsgrad von maximal 92 %. Wenn im Sommerbetrieb die Temperatur der Abluft niedriger ist als die der Außenluft, kann über dieses System die Außenluft durch Umschaltzyklen gekühlt werden.

Die Zeitdauer zwischen den Umschaltungen bestimmt den aktuellen Wärmerückgewinnungsgrad. Die maximale Wärmerückgewinnung wird mit einer Taktung alle 40 Sekunden erreicht. Die längste Umschaltdauer beträgt 3 Stunden, wobei dies 0 % Wärmerückgewinnung entspricht.

Die Oberflächen der Speicherpakete bestehen aus korrodiertem Aluminium, an dem sich Feuchte niederschlagen kann. Wird der Taupunkt unterschritten, kann bis 70 % Feuchterückgewinnung erreicht werden, ansonsten liegt der Wert im Bereich 20 … 70 % (ungeregelt).

Abbildung 3-34 zeigt das Gerät vor dem Einbau, Abbildung 3-35 ist eine Aufnahme aus dem Betrieb.

Abbildung 3-34: Wärmerückgewinnung mit Umschaltspeicher vor der Installation

Abbildung 3-35: Umschaltspeicher in Betrieb – Klappen links offen, rechts geschlossen

Küchengrundlüftung und Wohnungslüftung

Bei Plattenwärmeübertragern, wie sie in der Küche und Hausmeisterwohnung zum Einsatz kommen, wird nur die sensible Wärme (oder Kälte) zurückgewonnen. Durch die fehlende direkte Verbindung (= rekuperativ) zwischen Fortluft und Außenluft kann keine Feuchterückgewinnung erfolgen.

Der im Zertifikat nach PHPP bescheinigte effektive Wärmerückgewinnungsgrad liegt bei 84 %. Eine Angabe zum Temperaturwirkungsgrad ist nicht gegeben. Weitere Daten sind den separaten Anlagen F und I zu entnehmen.

Kochhaube

Für die Wärmerückgewinnung der Kochhaube liegen Simulationsberechnungen vor. Für zwei Außentemperaturen liegt der Temperaturwirkungsgrad bei 30 % bzw. 49 %.

- Nennvolumenstrom 4300 m³/h
- Abluft 40°C/65 % r. F.
- Temperaturwirkungsgrad
    - 30 % bei Außenluft +5°C/60 % r. F.
    - 49 % bei Außenluft -15°C/60 % r. F.

Weitere Daten sind der separaten Anlage G zu entnehmen.

Spülhaube

Auch für die Wärmerückgewinnung der Spülhaube liegen Simulationsberechnungen vor. Für zwei Außentemperaturen liegt der Temperaturwirkungsgrad bei 45 % bzw. 60 %.

- Nennvolumenstrom 1400 m³/h
- Abluft 40°C/65 % r. F.
- Temperaturwirkungsgrad
    - 45 % bei Außenluft +5°C/60 % r. F.
    - 60 % bei Außenluft -15°C/60 % r. F.

Weitere Daten sind der separaten Anlage H zu entnehmen.

3.9 Kanalnetz und Dämmung

Das Luftkanalnetz im Gebäude ist aus verzinktem Stahlblech erstellt. Die zentralen Kanäle der Verteilung sind eckig ausgeführt.

Abbildung 3-36: Gedämmte Zuluftkanäle im Gebäude bis zum Luftauslass

In den Bereichen der Anschlussleitungen wurde rundes Wickelfalzrohr gewählt. Das im Zusammenhang mit der Ökobilanzierung angefertigte Massenaufmaß führt zu einem Gesamtgewicht von 16,0 Tonnen.

Die Zuluftleitungen sind mit 20 mm alukaschierter Mineralwolle gedämmt. Die Abluftleitungen sind nicht gedämmt, Außenluft- und Fortluftkanäle sind mit 10 mm dickem synthetischem Kautschuk beklebt, siehe Abbildung 3-37 bis Abbildung 3-40.

Abbildung 3-37: Zentraler Kanal – Außenluft mit Dämmung aus synthetischem Kautschuk

Abbildung 3-38: Zentraler Kanal – Zuluft mit Dämmung aus alukaschierter Mineralwolle

Abbildung 3-39: Zentraler Kanal – Abluft ohne Dämmung

Abbildung 3-40: Zentraler Kanal – Fortluft mit Dämmung aus synthetischem Kautschuk

4 Luftmengen- und Netzplanung

Der nachfolgende Abschnitt befasst sich mit der Planung der Lüftungsnetze, einschließlich Festlegung der Luftvolumenströme. Im ersten Schritt wird ein Überblick der raumweisen Volumenströme gegeben sowie die personenbezogenen Ansätze erläutert.

Nachfolgend werden die Pläne kurz vorgestellt und die Ergebnisse der Kanalnetzberechnung mit Ventilatorauslegung zusammengefasst. Ein Abgleich zwischen der Planung – deren Details aufgrund der Planerinsolvenz unbekannt sind – und der nachgerechneten ausgeführten Anlage wird hergestellt.

4.1 Volumenströme

Maßgeblich für die Auslegung der Volumenströme ist der notwendige Luftwechsel zur Gewährleistung der Raumluftqualität. Als messbare Kenngröße wird hierfür der CO_2-Gehalt in der Raumluft herangezogen.

Die Klassenräume sind auf einen Volumenstrom von 480 m³/h ausgelegt. Das entspricht bei den gegebenen Raumvolumina Luftwechseln von 1,8 … 1,9 h^{-1}. Ausgehend von 24 Kindern und 1 bis 2 Lehrern liegt der personenbezogene Volumenstrom bei 18 … 19 m³/(h · Person). Aufgrund der intermittierenden Nutzung der Unterrichtsräume (Wechsel in Facharbeitsräume oder Sportraum, Pausen) wird in [7] ein Volumenstrom auf Niveau der Raumluftqualität IDA 4 (geringe Raumluftqualität) – entsprechend 18 m³/(h*Person) als ausreichend angesehen.

Eine über dieses Maß hinaus erhöhte Nachtlüftung ist nicht vorgesehen. Ebenfalls gibt es keine reduzierte Lüftung in den Klassenräumen. Registrieren die Bewegungsmelder eine Aktivität, wird innerhalb der Nutzungszeit der Nennvolumenstrom gefahren.

In der Aula wurde mit 15 m³/(h · Person) geplant und im Maximalfall von einer sehr hohen Anzahl von 430 Personen ausgegangen, die nur sehr selten zu erwarten sind. Der Luftwechsel beträgt im Auslegungsfall 5,8 h^{-1}. Es ist eine CO_2-abhängige Anpassung des Volumenstroms vorgesehen.

Für die Büros, Verwaltung und andere büroähnliche Anwendungen wurde von 30 m³/(h · Person) ausgegangen. Es gibt auch hier keine reduzierte Lüftung, sondern nur einen zeitabhängigen Betrieb mit dem Nennvolumenstrom.

In der Hausmeisterwohnung wurde mit einem personenbezogenen Ansatz von 53,5 m³/(h · Person) geplant. Das entspricht einem mittleren Luftwechsel von 0,64 h^{-1}. Beide Werte sind als sehr hoch einzustufen.

Die Luftvolumenströme der Küche ergeben sich aus den 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 m³/h und der Luftwechsel ergibt sich zu 22,4 h^{-1}. Die Grundlüftungsanlage führt zu einem Luftwechsel von 1,2 h^{-1}. Diese Werte sind üblich für kleine Schulküchen [8].

Eine Lüftung zum Feuchteschutz ist in der Schule nicht vorgesehen. Lediglich die Grundlüftungsanlage der Küche sowie die Hausmeisterwohnung weisen Mindestvolumenströme auf. Da beide Anlagen aber vom Nutzer auch abgeschaltet werden können, ist ein nutzungsunabhängiger Feuchteschutz nicht gegeben. Es sei angemerkt, dass keine Feuchtigkeitsprobleme festzustellen waren.

Tabelle 4-1 zeigt die raumweise Aufstellung der Volumenströme. Neben den Planungswerten des insolventen Fachplaners (N&S [1]) und dessen Nachfolger (TUK [5]) sind auch die Werte

aus dem Inbetriebnahmeprotokoll der Ausführung (APW) mit aufgeführt. Da sich hierbei einige Unstimmigkeiten insbesondere bei den Überströmvolumenströmen ergaben, wurde eine zusätzliche korrigierte Version erarbeitet. Diese mit "Volumenströme, Auslegung" gekennzeichneten Zahlen werden als verbindlich für die weiteren Auswertungen angesehen.

Tabelle 4-1: Volumenströme der Räume – Ausführung und Planung

Raum		Lüftungszone und Gerät	Volumenströme, Auslegung (Maximal = Sollwerte)				Naumann& Stahr Planung		Theurich & Klose Planung		Einregulierung APW Ausführung	
			Zuluft RLT [m³/h]	Zuluft Überström [m³/h]	Abluft RLT [m³/h]	Abluft Überström [m³/h]	Zuluft [m³/h]	Abluft [m³/h]	Zuluft [m³/h]	Abluft [m³/h]	Zuluft [m³/h]	Abluft [m³/h]
001	Hort	1	500	0	500	0	425	425	425	425	500	500
002	Hort	1	180	0	180	0	200	200	200	200	180	180
003	Kindercafé	1	560	0	560	0	625	625	625	625	560	560
004	HAR / Server	1	0	130	130	0		60	30	30	30	30
004a	Batterie	1	0	30	0	30			30	30	30	30
006	WC	1	0	30	30	0		60	0	30	0	30
007	Büro	1	100	0	0	100	60		210	210	100	100
008	Mitarbeiter	1	60	0	0	60	120		60	60	60	60
009	Flur	1	300	0	190	110	400	400	520	400	300	190
011	Spielraum	1	400	0	400	0	425	425	425	425	400	400
012	Medien	1	180	0	180	0	200	200	200	200	180	180
013	Entspannung	1	180	0	180	0	200	200	200	200	180	180
014	Werkstatt	1	400	0	400	0	425	425	425	425	400	400
101	Klasse	1	480	0	480	0	500	500	500	500	480	480
102	Klasse	1	480	0	480	0	500	500	500	500	480	480
103	Lehrmittel	1	0	180	180	0		200	0	200	0	180
104	Lehrer	1	180	0	0	180	200		200	0	180	0
105	Flur	1	280	0	160	840	400	400	520	390	280	160
107	Klasse	1	480	0	480	0	500	500	500	500	480	480
108	Klasse	1	480	0	480	0	500	500	500	500	480	480
201	Klasse	1	480	0	480	0	500	500	500	500	480	480
202	Klasse	1	480	0	480	0	500	500	500	500	480	480
203	Lüftung	1	20	0	20	0			30	30	20	20
204	Lehrer	1	180	0	180	0	200	200	200	200	180	180
205	Flur	1	280	0	160	1050	400	400	520	390	280	160
207	Klasse	1	480	0	480	0	500	500	500	500	480	480
208	Klasse	1	480	0	480	0	500	500	500	500	480	480
019	Halle	2	700	0	0	700	500		800	0	700	0
021	Foyer/Luftraum	2	0	1840	0	1840						
022	Garderobe	2	0	460	460	0		250	0	400	0	350
023	Garderobe	2	0	460	460	0		250	0	400	0	350
024	Garderobe	2	0	460	460	0		250	0	400	0	350
025	Garderobe	2	0	460	460	0		250	0	400	0	350
026	Aula/Luftraum	2	6500	0	4500	2000	7500	7500	4501	0	4500	0
113	Halle	2	700	440	0	1140	500		800	0	700	0
114	Raum der Stille	2	480	0	480	0	500	500	500	500	480	480
115	Galerie	2	0	60	2000	0			0	1876	0	2000
120	Flur Lehrer	2	0	150	150	0		120	0	150	0	150
121	Besprechung	2	300	0	300	0	300	300	300	300	300	300
122	Schulleiter	2	60	0	0	60	60		60	0	60	0
123	Sekretariat	2	90	0	0	90	90		90	0	90	0
124	Archiv/1.Hilfe	2	30	0	30	0		30	60	60	30	30
213	Halle	2	440	0	0	440	400	400	800	800	440	440
214	Kunst	2	480	0	480	0	500	500	500	500	480	480
215	Flur	2										
216	Vorbereitung	2	90	0	90	0	90	90	90	90	90	90
217	Werken	2	480	0	0	480	500		500	0	480	0
218	Lüftung	2	20	0	20	0			30	30	20	20
219	Lehrmittel	2	0	480	480	0		400	0	500	0	480
220	Hausmeister	2	30	0	30	0		100	30	30	30	30

Raum		Lüftungszone und Gerät	Volumenströme, Auslegung (Maximal = Sollwerte)				Naumann& Stahr Planung		Theurich & Klose Planung		Einregulierung APW Ausführung	
			Zuluft RLT [m³/h]	Zuluft Überström [m³/h]	Abluft RLT [m³/h]	Abluft Überström [m³/h]	Zuluft [m³/h]	Abluft [m³/h]	Zuluft [m³/h]	Abluft [m³/h]	Zuluft [m³/h]	Abluft [m³/h]
015	WC	3	0	30	30	0	60	30	0	30	0	30
017	WC	3	0	80	80	0	30	30	0	60	0	50
018	HAR	3	0	50	0	50			0	0	0	0
109	WC	3	0	30	30	0		30	0	30	0	30
110	WC	3	0	30	30	0	60	30	0	30	0	30
111	Dusche	3	0	30	30	0		30	0	30	0	30
112	WC	3	0	30	30	0	60	30	0	30	0	30
209	WC	3	0	30	30	0		30	0	30	0	30
210	WC	3	0	30	30	0	60	30	0	30	0	30
211	Putzen	3	0	30	30	0		30	0	30	0	30
212	WC	3	0	30	30	0	60	30	0	30	0	30
028	WC	4	31	0	31	0	30	30	30	30	31	31
030	Stuhllager	4	30	0	0	29	30		30	0	30	0
031	Lager Kühlung	4	0	29	29	0		30	0	30	0	29
032	Flur	4						30	0	0	0	0
033	Küche	6	4000	0	4000	0			4000	4000	4000	4000
033a	Spülküche	7	1500	0	1500	0			1500	1500	1500	1500
	Küche/Spülküche	4	197	1	198	0	200	200	200	200	197	198
034	Personal	4	31	0	0	31	60		30	0	31	0
035	WC	4	0	31	31	0		30	0	30	0	31
117	WC	4	0	30	30	0		30	0	30	0	30
118	Vorraum WC	4	30	0	0	30	30		30	0	30	0
222	Flur	5	0	214	0	214		30	0	0	0	0
223	Bad	5	0	62	62	0		60	0	60	0	62
224a	Abstellraum	5	0	30	30	0		30	0	30	0	30
224b	Gäste WC	5	0	31	31	0			0	30	0	31
225	Schlafzimmer	5	61	0	0	61	60		60	0	61	0
226	Kind	5	46	0	0	46	30		45	0	46	0
227	Kind	5	46	0	0	46	30		45	0	46	0
228	Wohnzimmer	5	61	0	0	61	60		60	0	61	0
229	Küche	5	0	91	91	0		60	0	90	0	91

Teilweise ist unklar, wie es zu den Zahlen im Abnahmeprotokoll der Fa. APW gekommen ist. Beispielsweise wird für den Flur 2.13 ein Abluftvolumenstrom angegeben, obwohl es keine Abluftöffnung gibt.

4.2 Pläne

Nachfolgende Pläne zeigen den Verlauf der Rohrleitungstrassen aus der Planungsphase 2011. Die Umsetzung erfolgte ohne nennenswerte Abweichung.

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 die bekannten Änderungen eingetragen [9]. Die dreidimensionalen Strangschemen sind ebenfalls im Rahmen des Monitoring erstellt worden [6]. Sie sind die Grundlage für die Kanalnetzberechnung.

Sämtliche Planunterlagen sind im separaten Anhang A zu finden.

4.2.1 3D-Strangschema

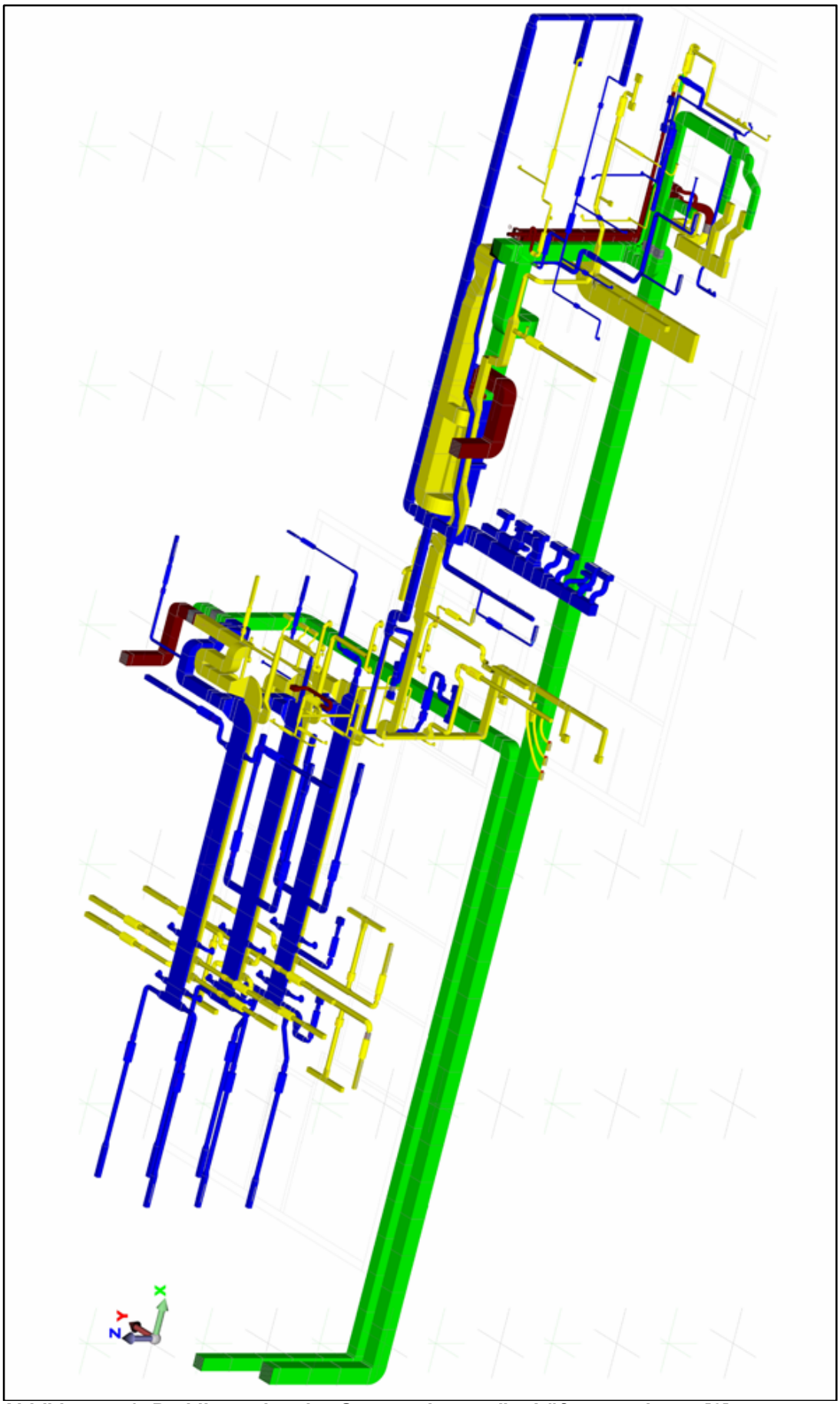

Abbildung 4-1: Dreidimensionales Strangschema aller Lüftungsanlagen [6]

4.2.2 Grundrisse Lüftung

Abbildung 4-2: Grundriss Lüftung – Erdgeschoss – BTA (unten) und BTB (oben)

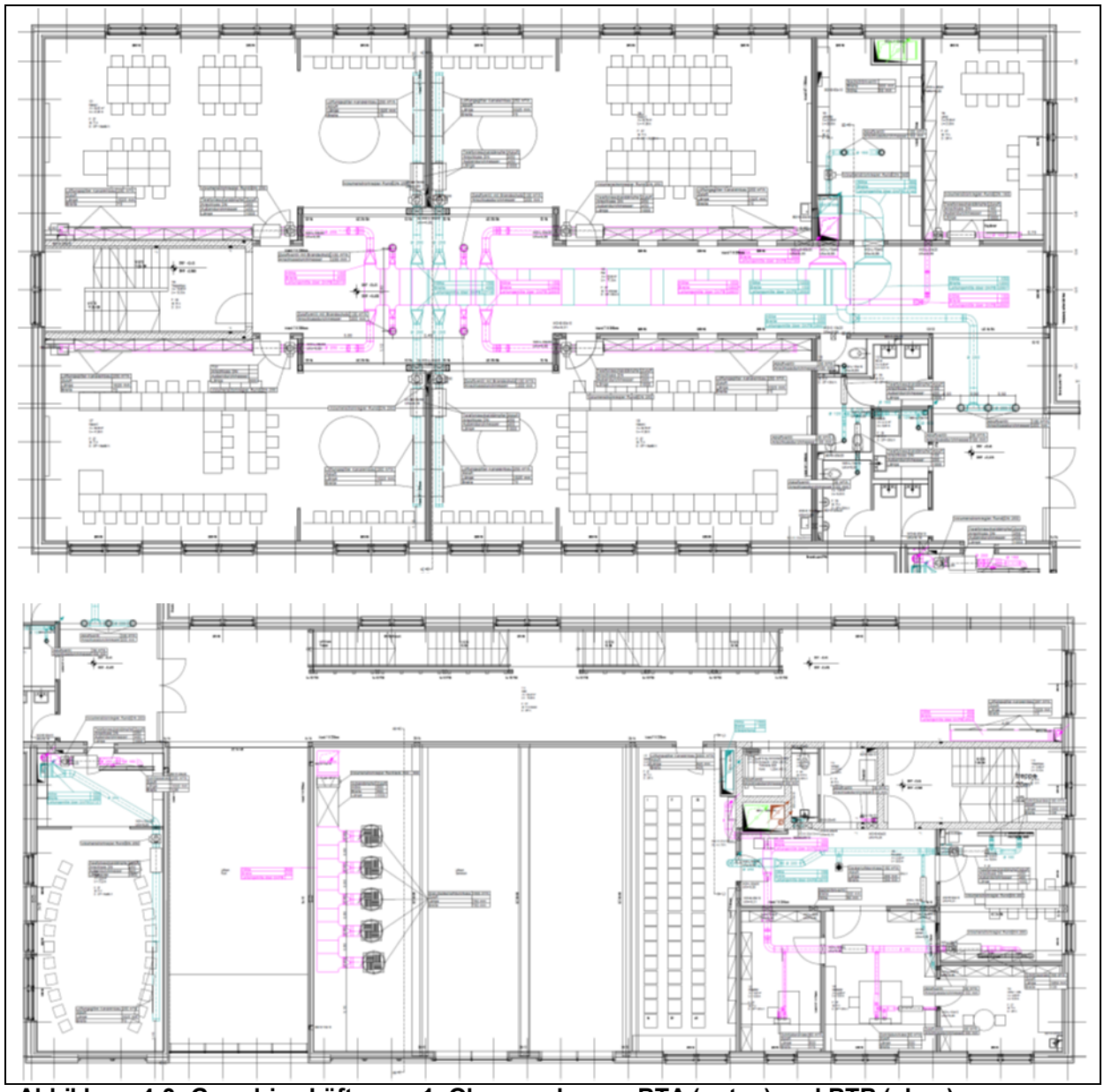

Abbildung 4-3: Grundriss Lüftung – 1. Obergeschoss – BTA (unten) und BTB (oben)

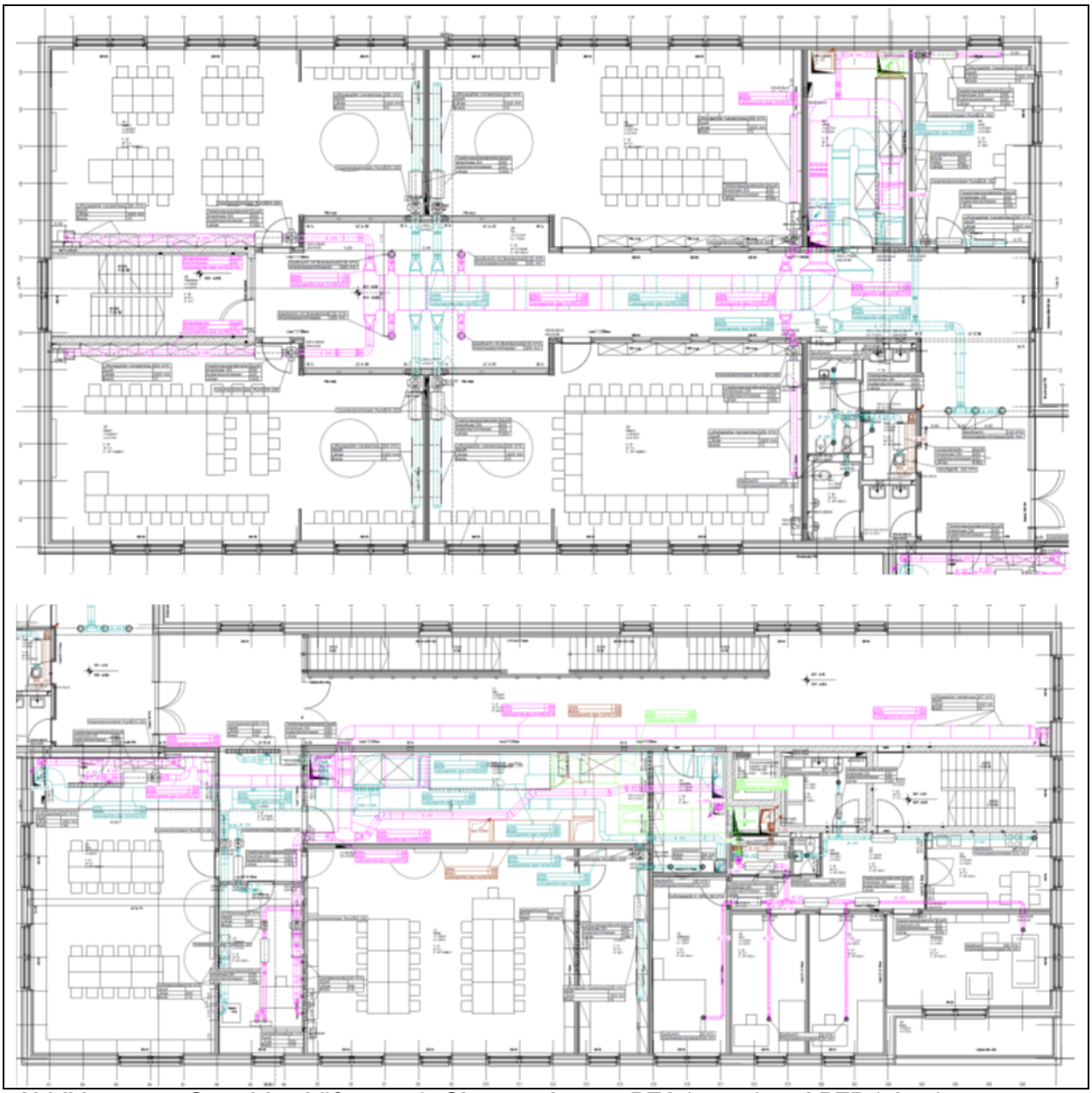

Abbildung 4-4: Grundriss Lüftung – 2. Obergeschoss – BTA (unten) und BTB (oben)

4.3 Planung der Netze und Bemessung der Ventilatoren

Im Rahmen einer Bachelorarbeit [6] wurden alle Lüftungsanlagen von Matthias Lange mit einer professionellen Planungssoftware (MH) als 3D-Netze modelliert und anschließend der gebaute Zustand in einer Kanalnetzberechnung ausgewertet. Änderungen der Ausführung gegenüber der Planung von 2011 [1] wurden berücksichtigt. Sie waren handschriftlich vom ausführenden Bauleiter in Plänen notiert worden. Die Ergebnisse der Nachberechnung konnten mit den Plandaten von 2011 verglichen werden.

4.3.1 Zentrale Anlage für den Klassentrakt

Das Zentralgerät für die Klassenräume und den Hort steht im Raum 2.03. Von dort aus wird die Luft im Deckenbereich auf die umliegenden sowie darunterliegenden Räume verteilt. Die Hauptleitungen für Abluft und Zuluft verlaufen in den Fluren als Blechkanalausführung. In den Räumen werden sie als sichtbare Rohrleitung bis zu den Luftauslässen weitergeführt. Abbildung 4-5 zeigt das Außenluft- und Zuluftnetz, wobei der Erdwärmeübertrager vereinfachend als eine großformatige Rohrleitung abgebildet wird. In Abbildung 4-6 ist das Ab- und Fortluftnetz zu sehen.

Das Zentralgerät ist von MENERGA. Rohrleitungen und Blechkanäle sind von der Firma LINDAB, die Komponenten sowie die Luftauslässe kommen von den Firmen TROX und SCHAKO.

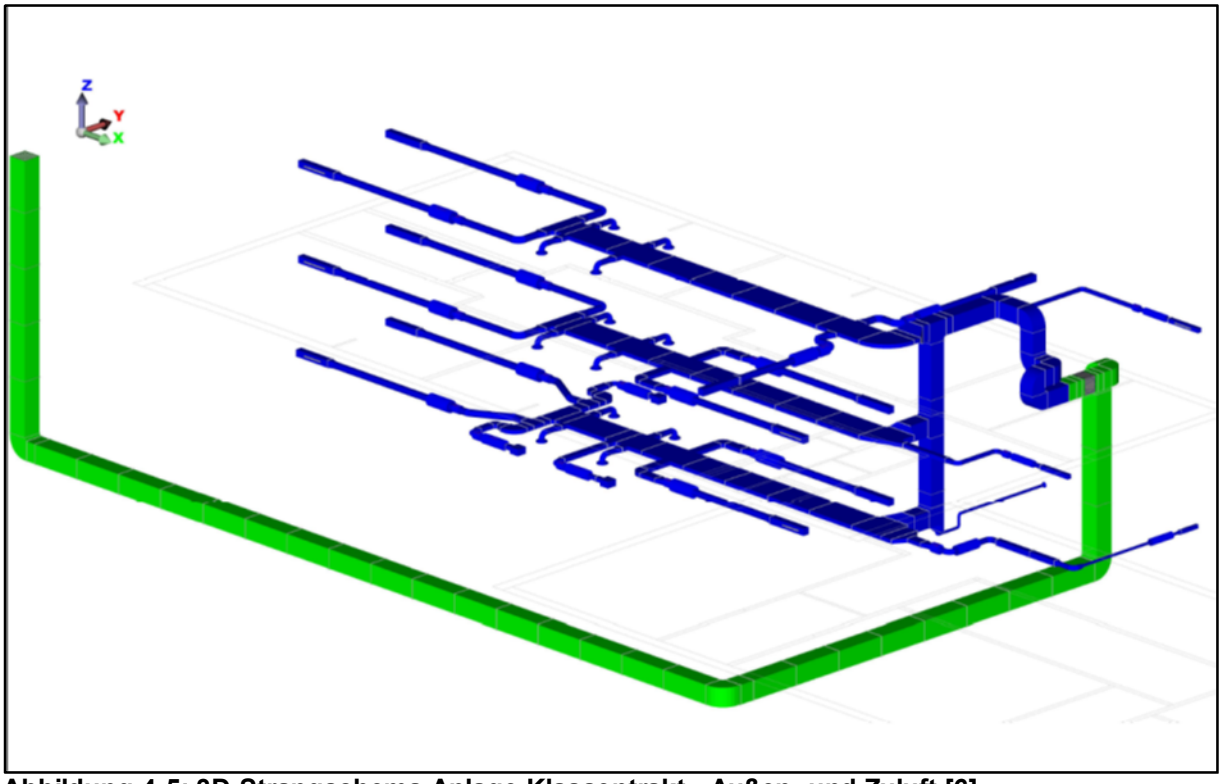

Abbildung 4-5: 3D-Strangschema Anlage Klassentrakt - Außen- und Zuluft [6]

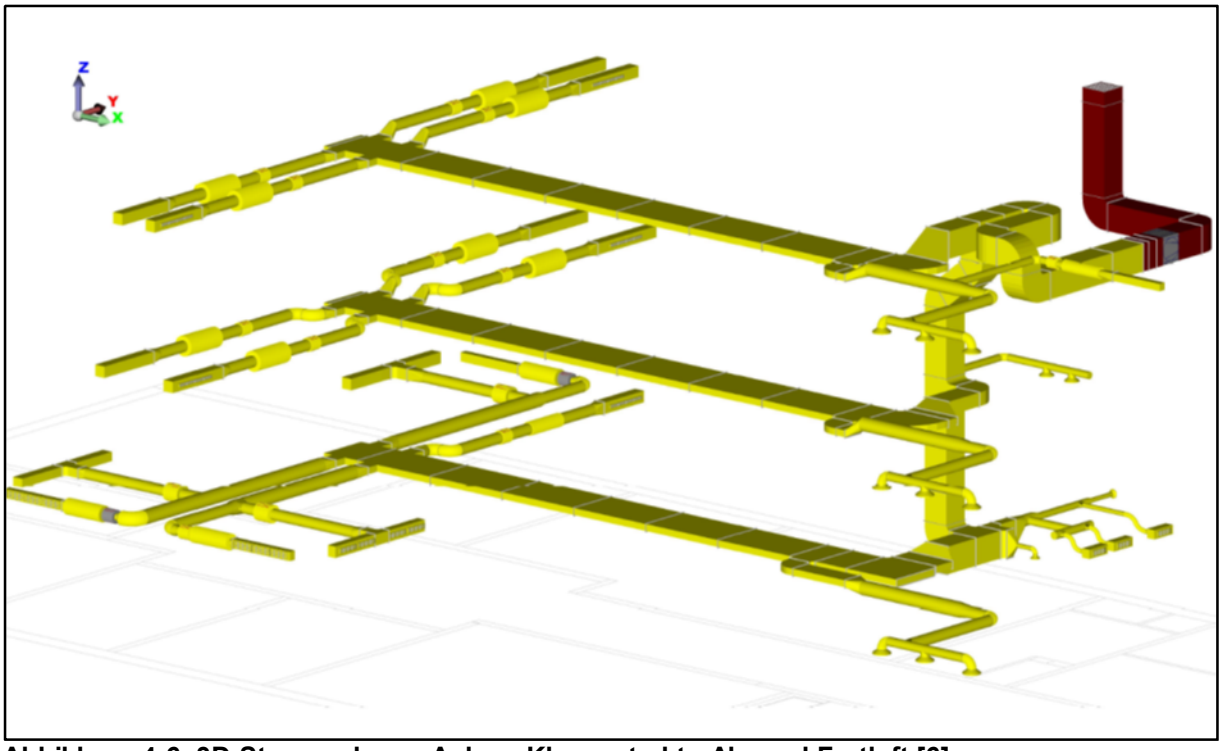

Abbildung 4-6: 3D-Strangschema Anlage Klassentrakt - Ab- und Fortluft [6]

Die Berechnung liefert folgende Ergebnisse:

- Zuluft: $\dot{V}$ = 8760 m³/h, Δp_{ges} = 389 Pa
- Abluft: $\dot{V}$ = 8540 m³/h, Δp_{ges} = 399 Pa

Bei der Auswertung der beiden Ventilatoren erhält man Abweichungen zur Planung von 2011. In Abbildung 4-7 ist für den Zuluftventilator deutlich zu erkennen, dass beim geplanten Betriebspunkt mit einer weitaus größeren Druckerhöhung (914 Pa, lt. Datenblatt) gerechnet wurde. Die neu berechnete Druckerhöhung ist deutlich geringer. Dafür ist der Volumenstrom in der realen Ausführung größer. Für den Abluftventilator gilt Ähnliches, siehe Abbildung 4-8. Der Druckunterschied fällt hier aufgrund der geplanten Gesamtdruckerhöhung von 714 Pa und der errechneten Gesamtdruckerhöhung von 399 Pa nicht ganz so gravierend aus.

qv	m³/h	7500
Psf	Pa	914
Pf	Pa	1020
rpm	1/min	2380
Pe	W	3490
SFP	kW/(m³/s)	1,67
eta e	%	60,9
eta se	%	54,6
I	A	5,37
LwA(A,in)	dBA	87,8
LwA(A,out)	dBA	95,4
LwA_{in+out}	dB(A)	96,1
$U_{control}$	V	8,6
$\rho_{measured\ at}$	kg/m³	1,15

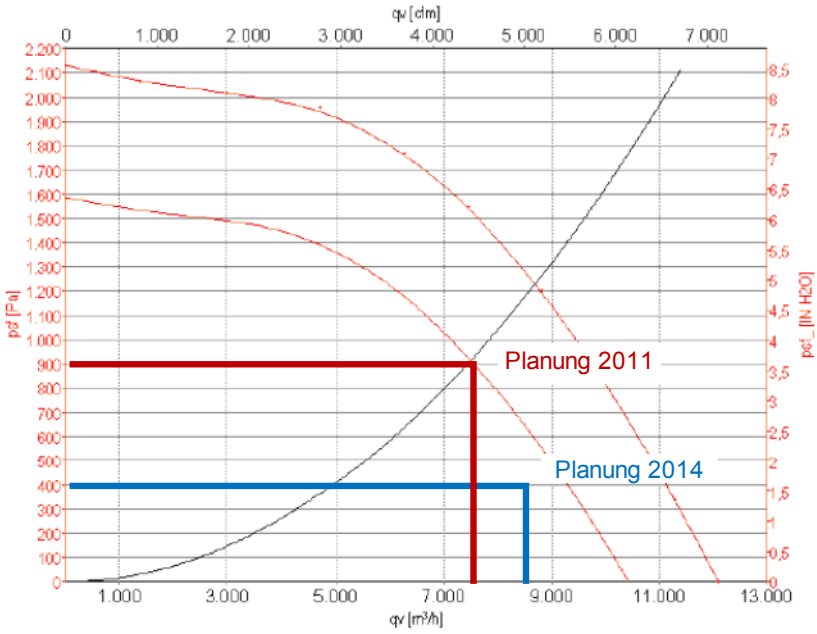

Abbildung 4-7: Ventilatorkennlinie Anlage Klassentrakt – Zuluft [10]

qv	m³/h	7500
Psf	Pa	714
Pf	Pa	818
rpm	1/min	2246
Pe	W	2840
SFP	kW/(m³/s)	1,37
eta e	%	59,9
eta se	%	52,3
I	A	4,35
LwA(A,in)	dBA	87,2
LwA(A,out)	dBA	94,8
LwA_{in+out}	dB(A)	95,5
$U_{control}$	V	8,1
$\rho_{measured\ at}$	kg/m³	1,15

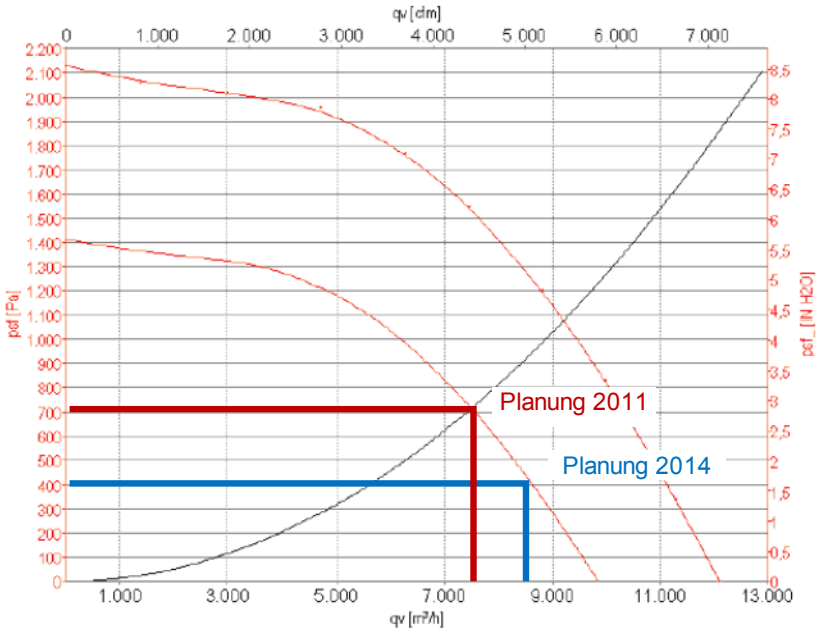

Abbildung 4-8: Ventilatorkennlinie Anlage Klassentrakt – Abluft [10]

Die Volumenstromunterschiede ergeben sich, da ursprünglich 2011 davon ausgegangen wurde, dass im Normalfall der Hort und die Klassenräume nicht zur selben Zeit genutzt werden. Die Druckverlustunterschiede resultieren insbesondere aus der 2011 erfolgten pauschalen Annahme der Druckverluste des EWT.

Insgesamt sind die gewählten Ventilatoren geeignet.

4.3.2 Zentrale Anlage für den Verwaltungstrakt

Die größte der eingebauten Lüftungsanlagen versorgt den Verwaltungstrakt, die Werk- und Kunsträume im zweiten Stock sowie die Aula und den gesamten zugehörigen Flur- und Umkleidebereich.

Abbildung 4-9 zeigt das Außenluft- und Zuluftnetz, wobei der Erdwärmeübertrager vereinfachend als eine großformatige Rohrleitung abgebildet wird. In Abbildung 4-10 ist das Ab- und Fortluftnetz zu sehen.

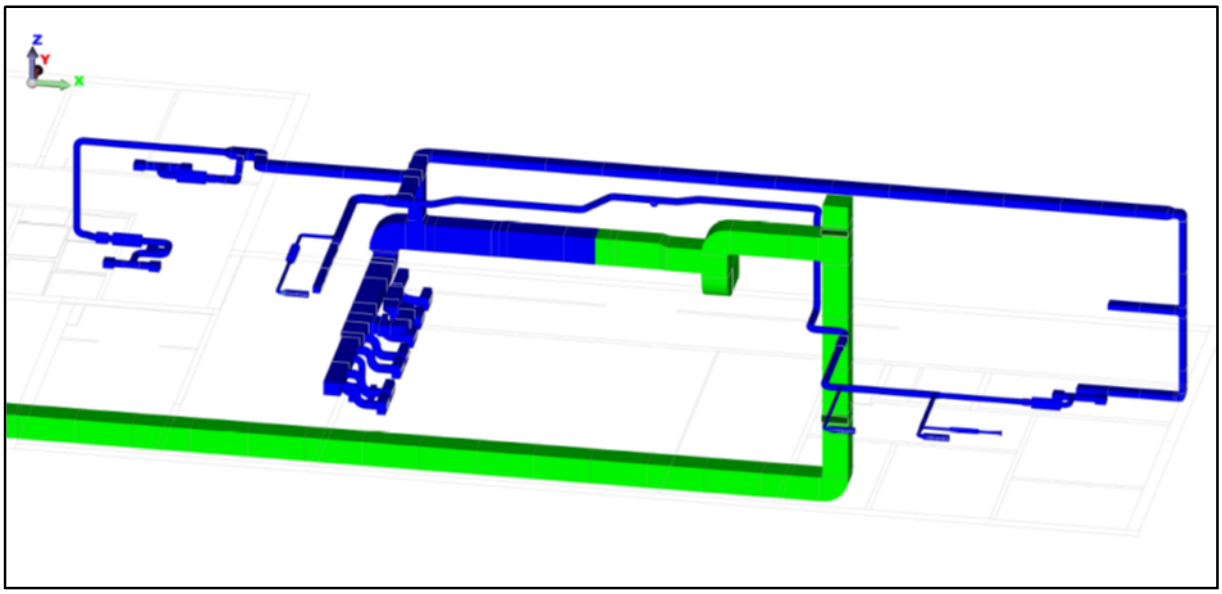

Abbildung 4-9: 3D-Strangschema Anlage Verwaltungstrakt - Außen- und Zuluft [6]

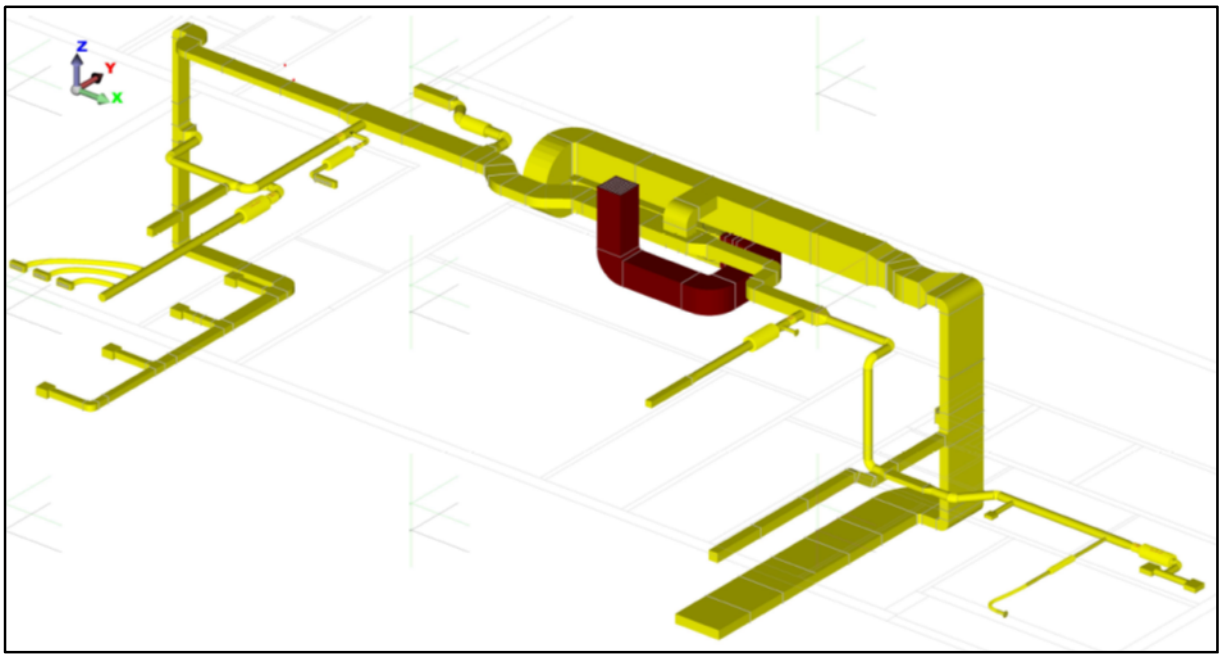

Abbildung 4-10: 3D-Strangschema Anlage Verwaltungstrakt – Ab- und Fortluft [6]

Das Netz besteht aus verzinktem Stahlblech. Luftauslässe und Lufteinlässe kommen von den Firmen SCHAKO und TROX. Ausgeführt werden sie als Gitter in Blechkanälen oder Rohrleitungen, Tellerventile oder Drallauslässe. Das Lüftungsgerät mit Wärmeübertrager, Filter und Ventilator stammt von der Firma MENERGA. Die Berechnung liefert folgende Ergebnisse:

- Zuluft: $\dot{V}$ = 12.187 m³/h, Δp_{ges} = 458 Pa
- Abluft: $\dot{V}$ = 12.062 m³/h, Δp_{ges} = 458 Pa

Bei der Auswertung der beiden Ventilatoren erhält man ebenfalls Abweichungen zur Planung von 2011. In Abbildung 4-11 ist für den Zuluftventilator zu erkennen, dass beim geplanten Betriebspunkt mit einer weitaus größeren Druckerhöhung (801 Pa, lt. Datenblatt) gerechnet wurde. Dafür ist der Volumenstrom in der realen Ausführung größer.

qv	m³/h	10000
Psf	Pa	801
Pf	Pa	846
rpm	1/min	1614
Pe	W	3590
SFP	kW/(m³/s)	1,29
eta e	%	65,5
eta se	%	62
I	A	5,79
LwA(A,in)	dBA	85,1
LwA(A,out)	dBA	91,6
LwA_{in+out}	dB(A)	92,5
$U_{control}$	V	9,2
$\rho_{measured\ at}$	kg/m³	1,16

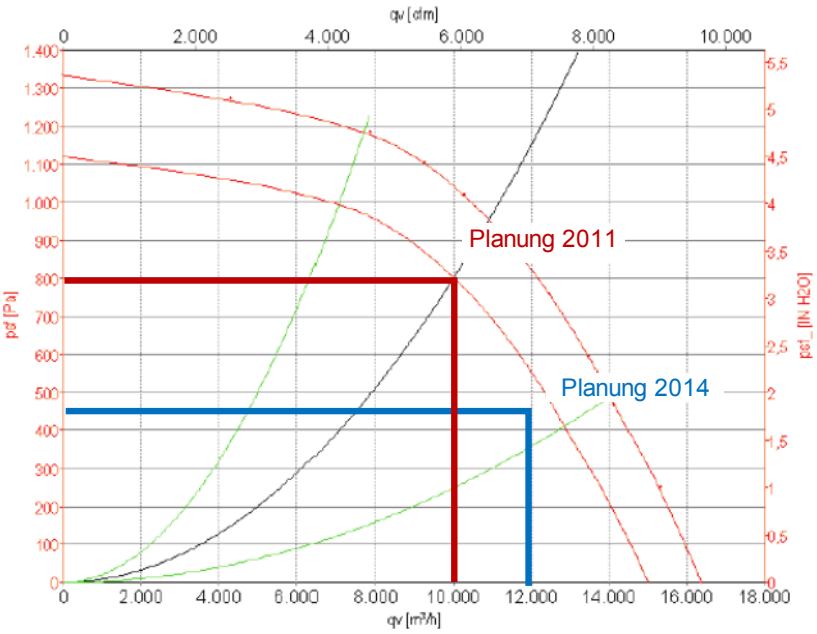

Abbildung 4-11: Ventilatorkennlinie Anlage Verwaltungstrakt – Zuluft [10]

qv	m³/h	10000
Psf	Pa	618
Pf	Pa	663
rpm	1/min	1497
Pe	W	2810
SFP	kW/(m³/s)	1,01
eta e	%	65,6
eta se	%	61,1
I	A	4,52
LwA(A,in)	dBA	83,6
LwA(A,out)	dBA	90
LwA_{in+out}	dB(A)	90,9
$U_{control}$	V	8,5
$\rho_{measured\ at}$	kg/m³	1,16

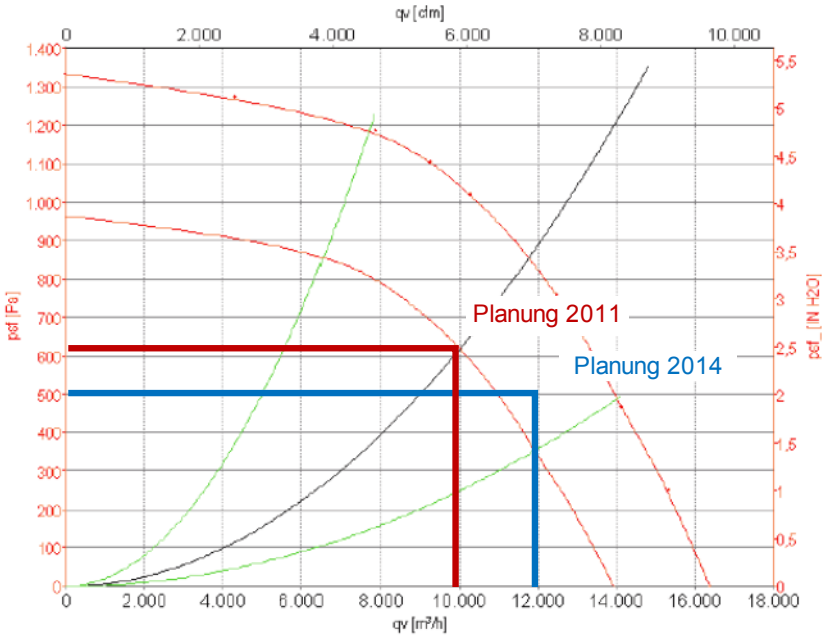

Abbildung 4-12: Ventilatorkennlinie Anlage Verwaltungstrakt – Abluft [10]

Für den Abluftventilator gilt Ähnliches, siehe Abbildung 4-12. Der Druckunterschied fällt hier aufgrund der geplanten Gesamtdruckerhöhung von 618 Pa nicht so hoch aus.

Der Zuluftventilator muss auf einer etwas geringeren Drehzahl laufen als 2011 berechnet, der Abluftventilator auf einer größeren. Insgesamt liegen bei beiden Ventilatoren die abweichenden Betriebspunkte im möglichen Arbeitsbereich.

Bei dieser Anlage ist anzumerken: in einzelnen Bereichen der Aula-Anschlüsse sind sehr hohe Strömungsgeschwindigkeiten zu verzeichnen. In der Realität führt dies zu Strömungsgeräuschen, die für die Nutzung als Mensa zu tolerieren sind, bei einer Theateraufführung jedoch störend wären.

Als Schlussfolgerung kann man sagen, die Aula kann nur ihren Maximalvolumenstrom erhalten, wenn in anderen Räumen die Auslässe geschlossen sind.

4.3.3 Abluftanlage Sanitärbereiche

Die Abluftanlage des Toilettentraktes erstreckt sich über drei Etagen. Rohrleitungen und Formteile sind in Wickelfalzrohrausführung von der Firma LINDAB. Komponenten wie Telefonieschalldämpfer und Luftauslässe, welche man in Form von Tellerventilen eingesetzt hat, stammen aus der Produktreihe der Firma TROX. Bei der Ventilatorauswahl entschied man sich für einen Radial-Rohrventilator (SlimVent SVS 160 K) der Firma HELIOS. Das dreidimensionale Strangschema zeigt Abbildung 4-13.

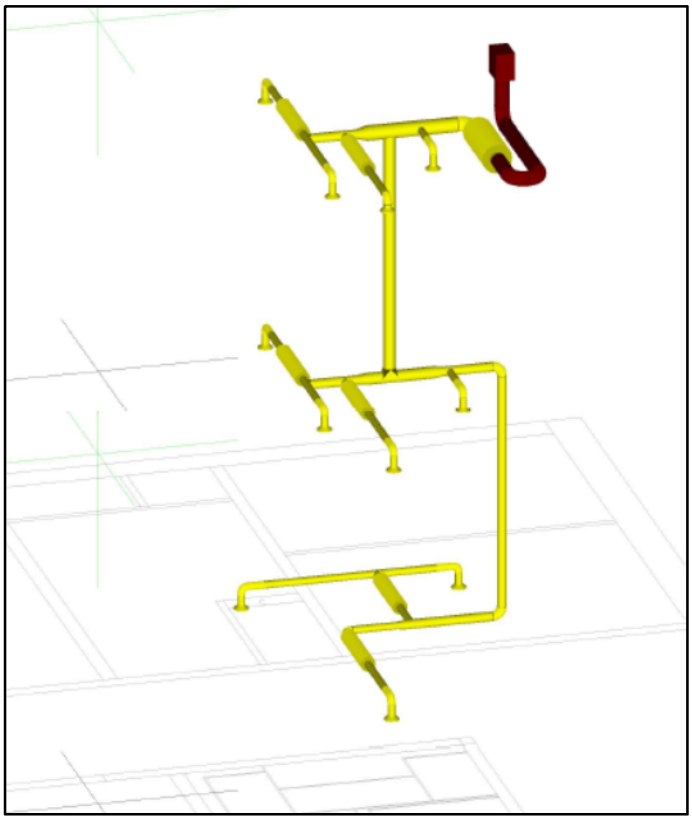

Abbildung 4-13: 3D-Strangschema Abluftanlage Klassentrakt – Ab- und Fortluft [6]

Die Berechnung liefert folgende Ergebnisse:

- Abluft: $\dot{V}$ = 330 m³/h, Δp_{ges} = 179 Pa

Abbildung 4-14 zeigt, dass der geforderte Betriebspunkt mit dem gewählten Ventilator knapp erreicht werden wird. In Anbetracht der Tatsache, dass der Druckverlust quadratisch vom Volumenstrom abhängt, liegt ein realistischer Betriebspunkt bei 320 m³/h und 150 Pa Differenzdruck.

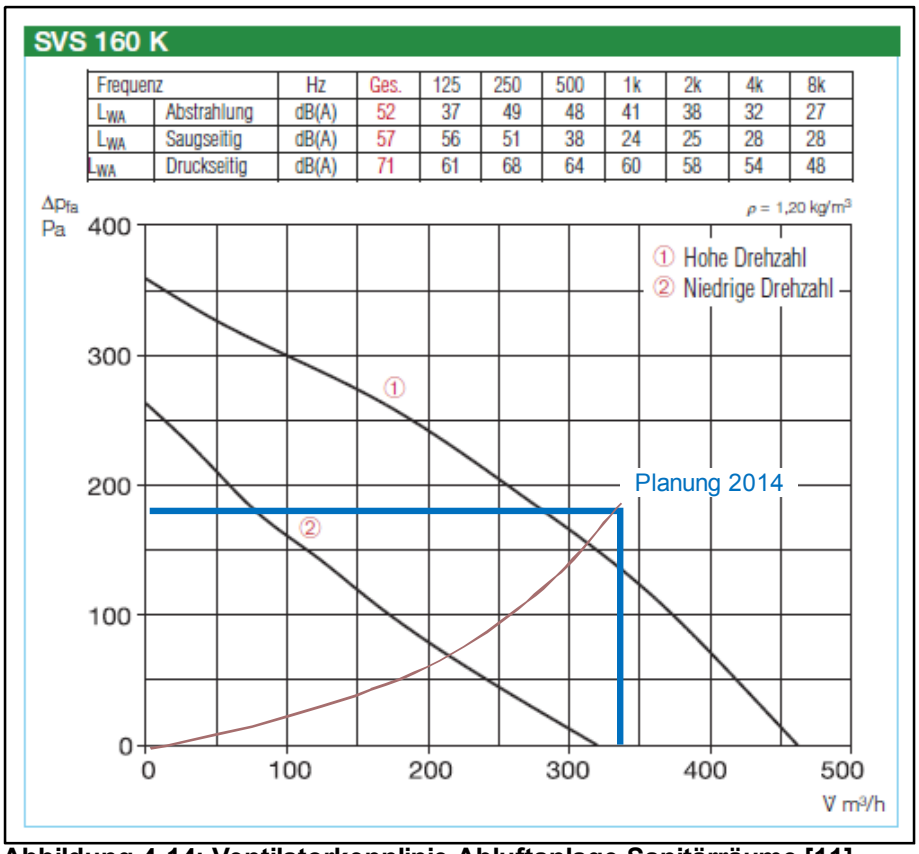

Abbildung 4-14: Ventilatorkennlinie Abluftanlage Sanitärräume [11]

4.3.4 Grundlüftungsanlage Küche

Es wird ein Lüftungsgerät der Marke PAUL Santos DC 370 eingesetzt.

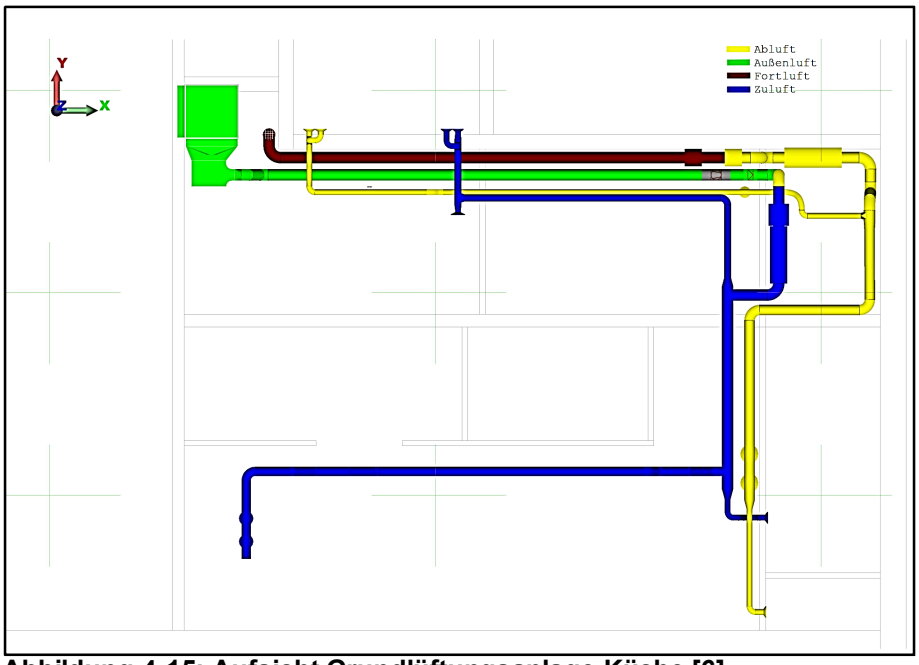

Abbildung 4-15: Aufsicht Grundlüftungsanlage Küche [6]

Die installierten Wickelfalzrohre sowie die Formteile in den Größen 100 … 200 mm der Firma LINDAB sind bis auf kleine Ausnahmen im Deckenbereich verlegt worden. Die hier eingesetzten Tellerventile als Luftauslässe sowie die Telefonieschalldämpfer entstammen der Firma TROX. Abbildung 4-15 zeigt eine Aufsicht auf die Anlage aus der Planungssoftware.

Die Berechnung liefert folgende Ergebnisse:

- Zuluft: $\dot{V}$ = 320 m³/h, Δp_{ges} = 219 Pa
- Abluft: $\dot{V}$ = 320 m³/h, Δp_{ges} = 160 Pa

Damit sind sowohl Zu- als auch Abluftventilator passend für den Anwendungsfall gewählt, siehe Abbildung 4-16.

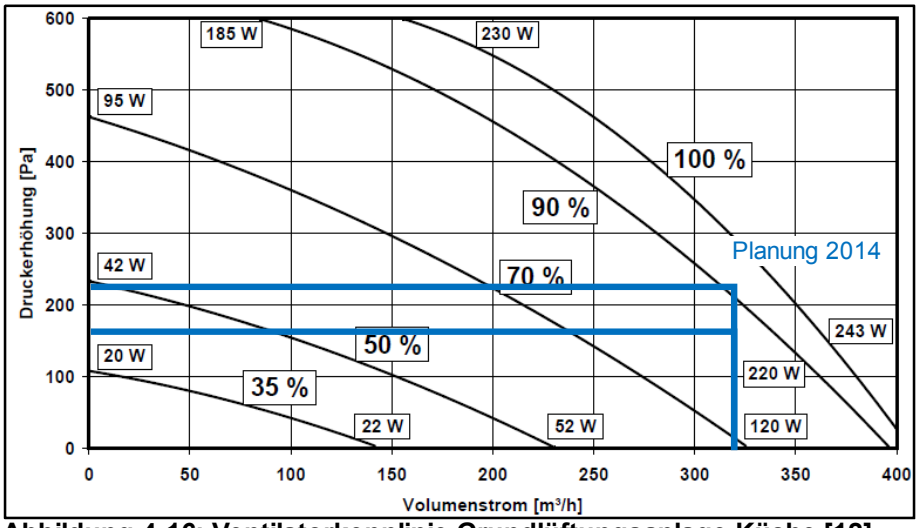

Abbildung 4-16: Ventilatorkennlinie Grundlüftungsanlage Küche [12]

4.3.5 Küchenprozessluft Kochhaube

Die große Ablufthaube von der SÜDLUFT Systemtechnik ist in der Küche direkt über der Koch- und Bräterzone platziert.

Vorwiegende Bestandteile dieser Anlage sind Blechkanäle bis hin zum Abluftventilator, welcher im angrenzenden Stuhllager installiert ist. Ab diesem Punkt wird die Luft weiter in einem Rohrsystem (Wickelfalzrohr) in den Abluftschacht abtransportiert. Durch das geringe Platzangebot im Stuhllager und um eine genormte Deckenhöhe zu wahren, wurden die Blechkanäle breit, aber dafür sehr flach dimensioniert. Die Zuluftführung wurde komplett aus Blechkanälen gebaut. Ausgestattet ist die in Edelstahl ausgeführte Ablufthaube mit einer Wärmerückgewinnung, einem Aerosolabscheider sowie einem Heizregister. Aus dem Hause HELIOS stammen die Ventilatoren für Ab- und Zuluft.

Abbildung 4-17 zeigt die Strangschemen mit Angabe der Strömungsgeschwindigkeit. Sie liegt deutlich über dem sonstigen Niveau innerhalb des Gebäudes, jedoch in einem üblichen Bereich für Prozesslüftung.

Die Berechnung liefert folgende Ergebnisse:

- Zuluft: $\dot{V}$ = 4000 m³/h, Δp_{ges} = 152 Pa
- Abluft: $\dot{V}$ = 4000 m³/h, Δp_{ges} = 281 Pa

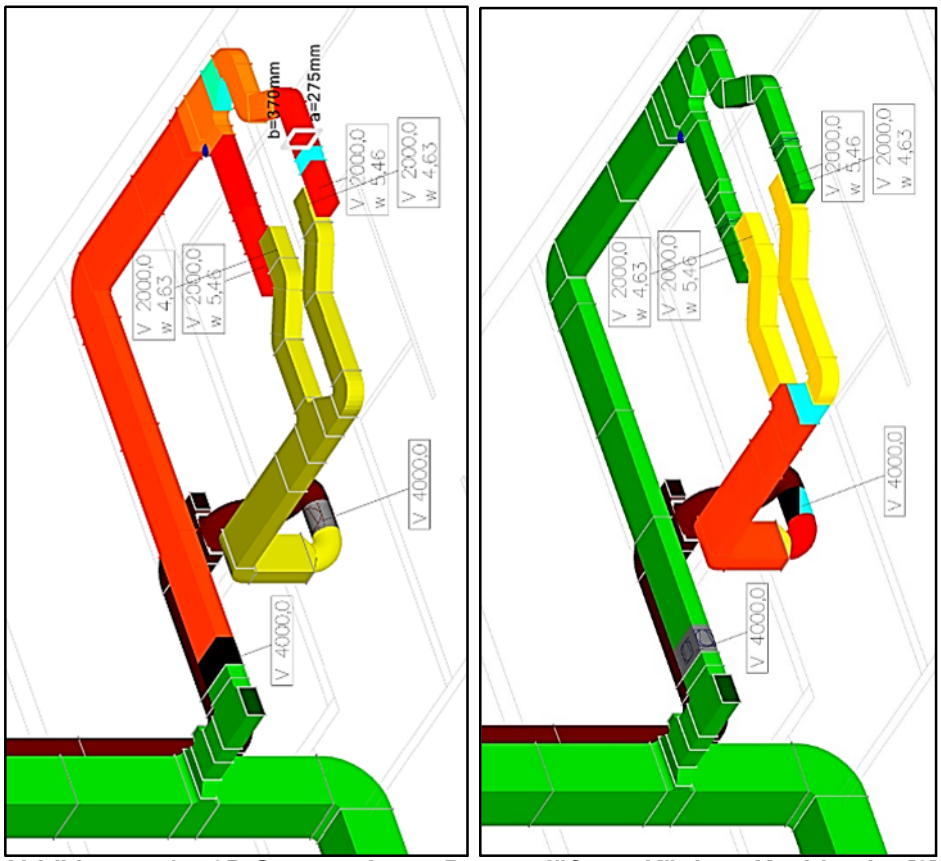

Abbildung 4-17: 3D-Strangschema Prozesslüftung Küche – Kochhaube [6]

Abbildung 4-18 zeigt das Auslegungsdiagramm für den Zuluftventilator. Die gewählte Installationsart 2 mit 280 V entspricht der Nachrechnung.

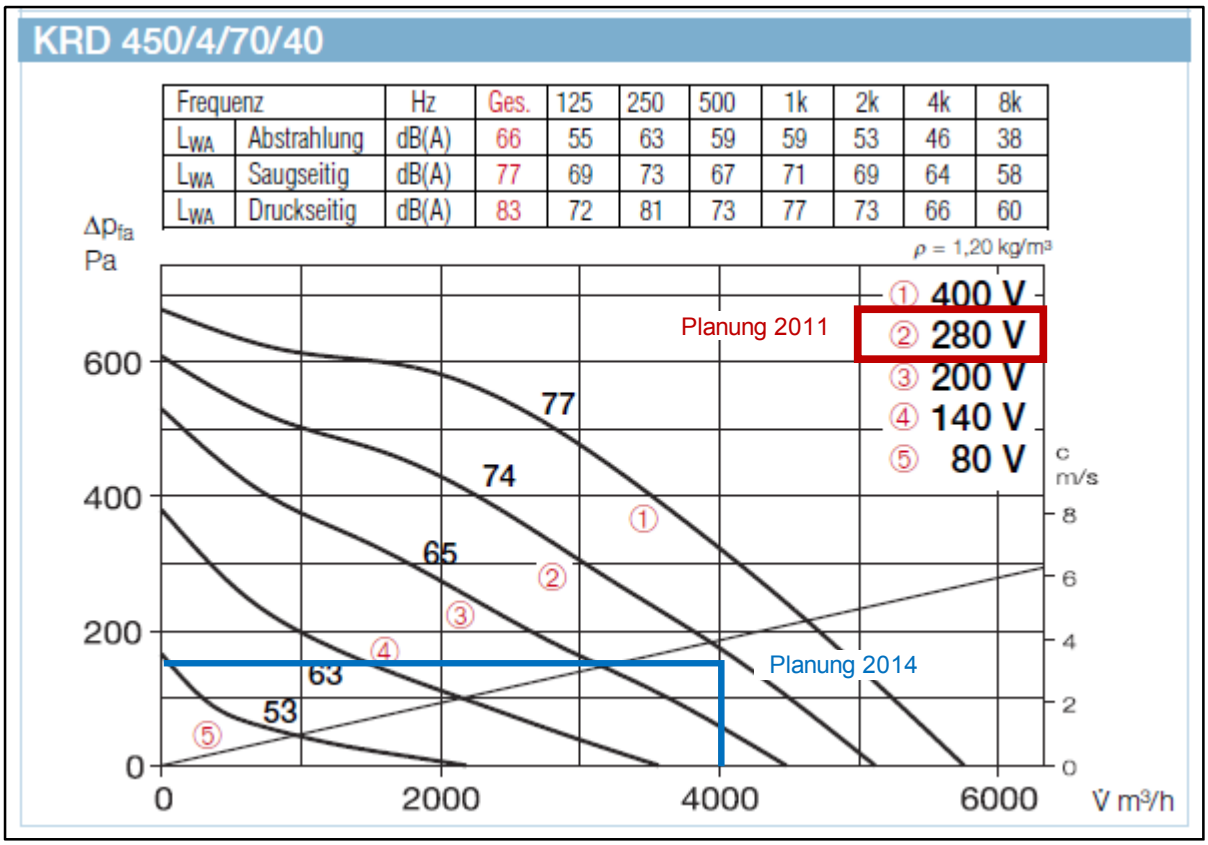

Abbildung 4-18: Ventilatorkennlinie Prozesslüftung Kochhaube – Zuluft [11]

Abbildung 4-19 zeigt die Kennlinie des Abluftventilators. Er ist in der gewählten Ausführungsvariante 2 zu groß dimensioniert bzw. ein insgesamt kleineres Modell dieser Baureihe hätte ausgereicht.

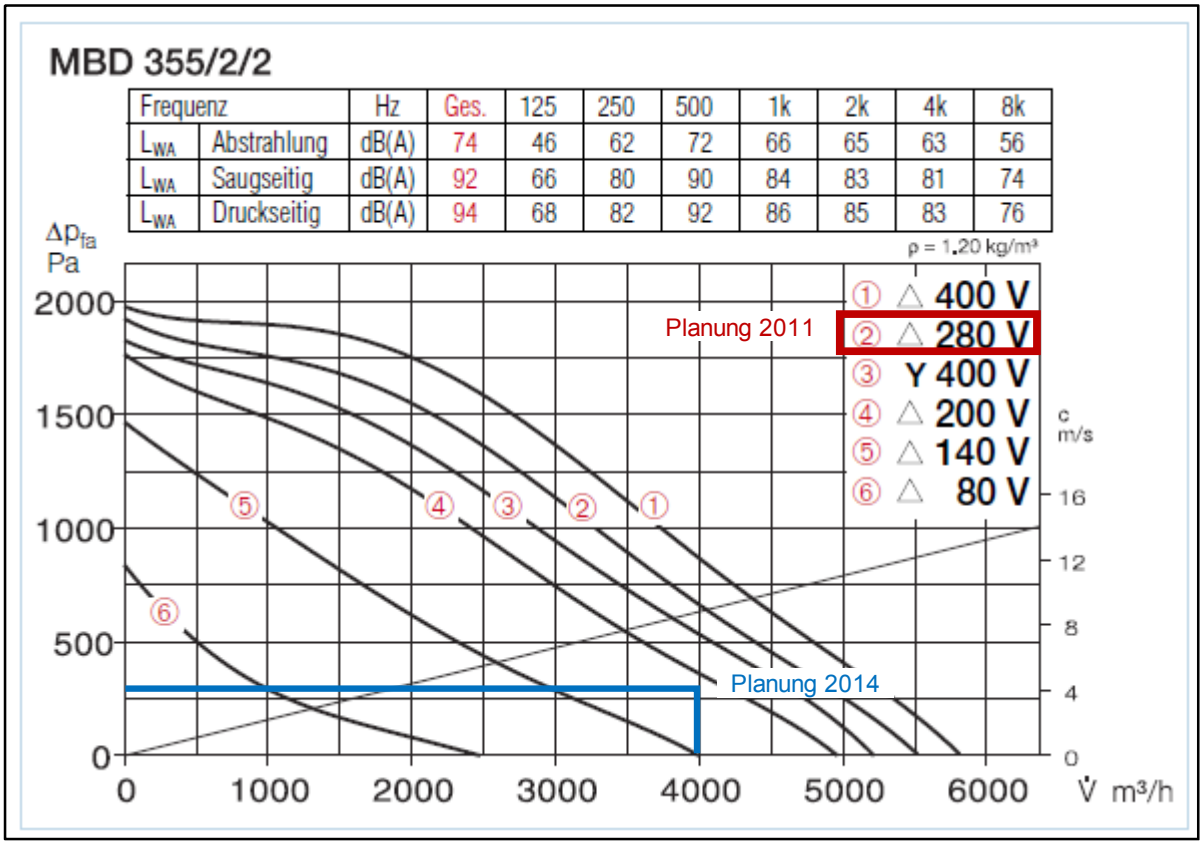

Abbildung 4-19: Ventilatorkennlinie Prozesslüftung Kochhaube – Abluft [11]

4.3.6 Küchenprozessluft Spülhaube

Ebenso wie die große Küchenabluftanlage ist auch die kleine Version von der Firma SÜDLUFT Systemtechnik.

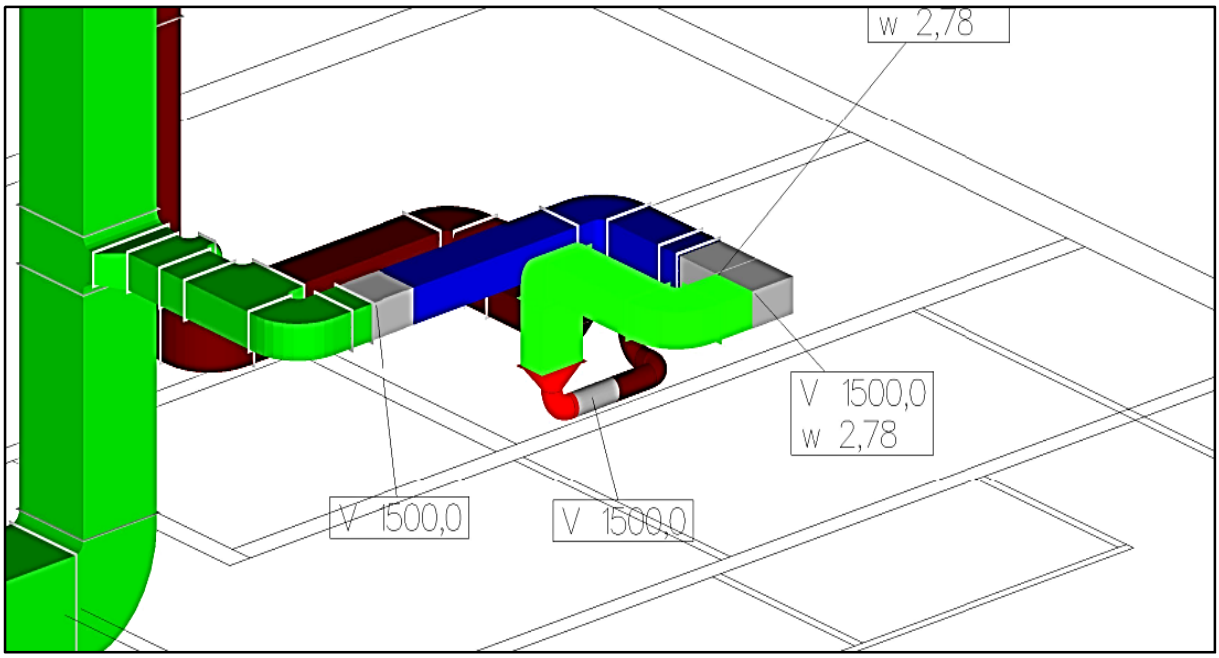

Abbildung 4-20: 3D-Strangschema Prozesslüftung Küche – Spülhaube [6]

Sie ist über der Spülmaschine angeordnet. Hauptbestandteile der Leitungen sind auch hier Blechkanäle. Der Großteil der Anlage befindet sich aufgrund der örtlichen Gegebenheiten im benachbarten Stuhllager. Die Ventilatoren werden von der Firma HELIOS geliefert. Abbildung 4-20 zeigt ein Strangschema.

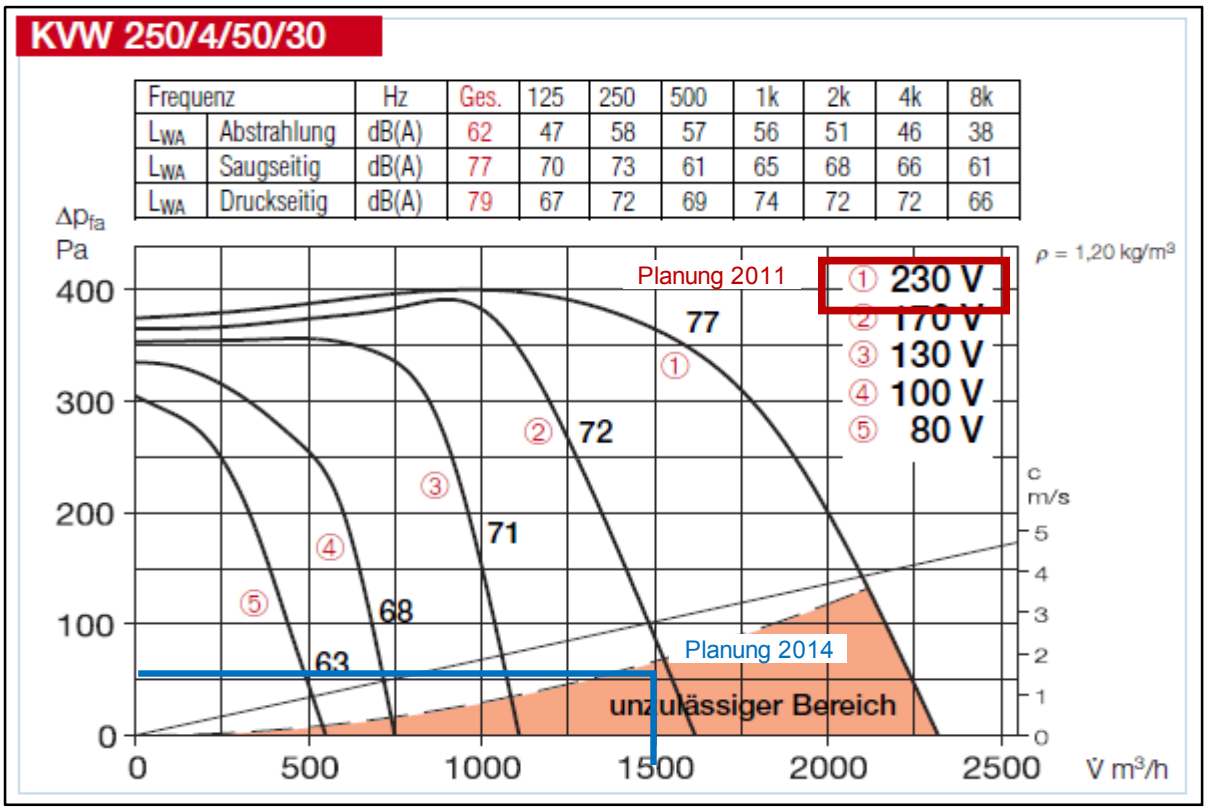

Abbildung 4-21: Ventilatorkennlinie Prozesslüftung Spülhaube – Zuluft [11]

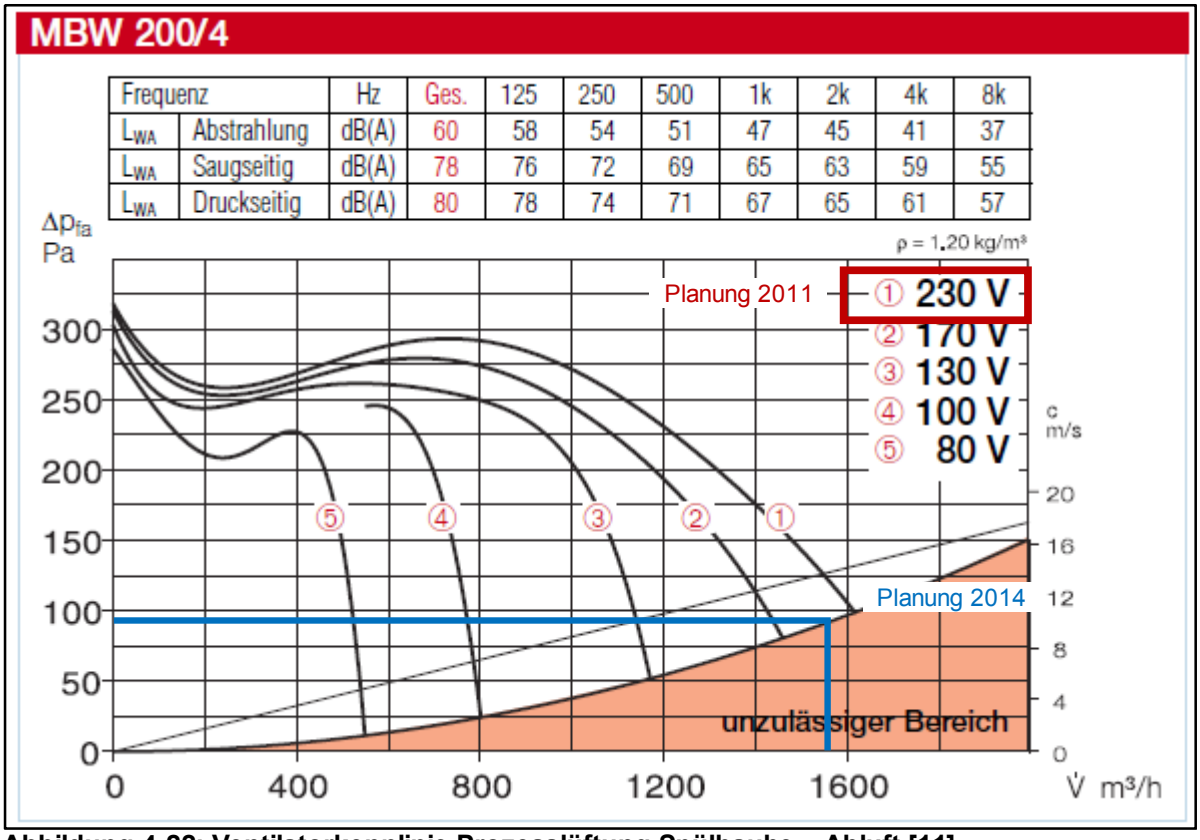

Abbildung 4-22: Ventilatorkennlinie Prozesslüftung Spülhaube – Abluft [11]

Die Berechnung liefert folgende Ergebnisse:

- Zuluft: $\dot{V}$ = 1500 m³/h, Δp_{ges} = 84 Pa
- Abluft: $\dot{V}$ = 1500 m³/h, Δp_{ges} = 90 Pa

Der Druckverlust ist gering, jedoch am Übergang Kanal – Rohr wurde eine sehr hohe Strömungsgeschwindigkeit von ca. 13 m/s ermittelt.

Aus Abbildung 4-21 lässt sich herleiten, dass die ursprüngliche Planung von einem höheren Druckverlust ausgegangen ist. Der Zuluftventilator hätte kleiner bemessen werden können. Ähnliches ergibt sich auch für den Abluftventilator, siehe Abbildung 4-22. Der Ventilator wird am unteren Rand des zulässigen Kennfeldes betrieben und ist überdimensioniert.

4.3.7 Wohnungslüftung Hausmeisterwohnung

Die Lüftungsanlage der Hausmeisterwohnung ist im Hauswirtschaftraum installiert. Die Rohrleitungen (Wickelfalzrohr) mit den Durchmessern von 100 Millimeter bis 160 Millimeter sowie die übrigen Formteile stammen von der Firma LINDAB. Weiterhin wurden an dieser Anlage Telefonieschalldämpfer und als Luftein/-auslässe Tellerventile von der Firma TROX verwendet. Für gleichbleibende Temperaturen sorgen in den einzelnen Zulufträumen nachgeschaltete Zusatzheizregister.

Abbildung 4-23 zeigt eine Aufsicht auf die Anlage aus der Planungssoftware.

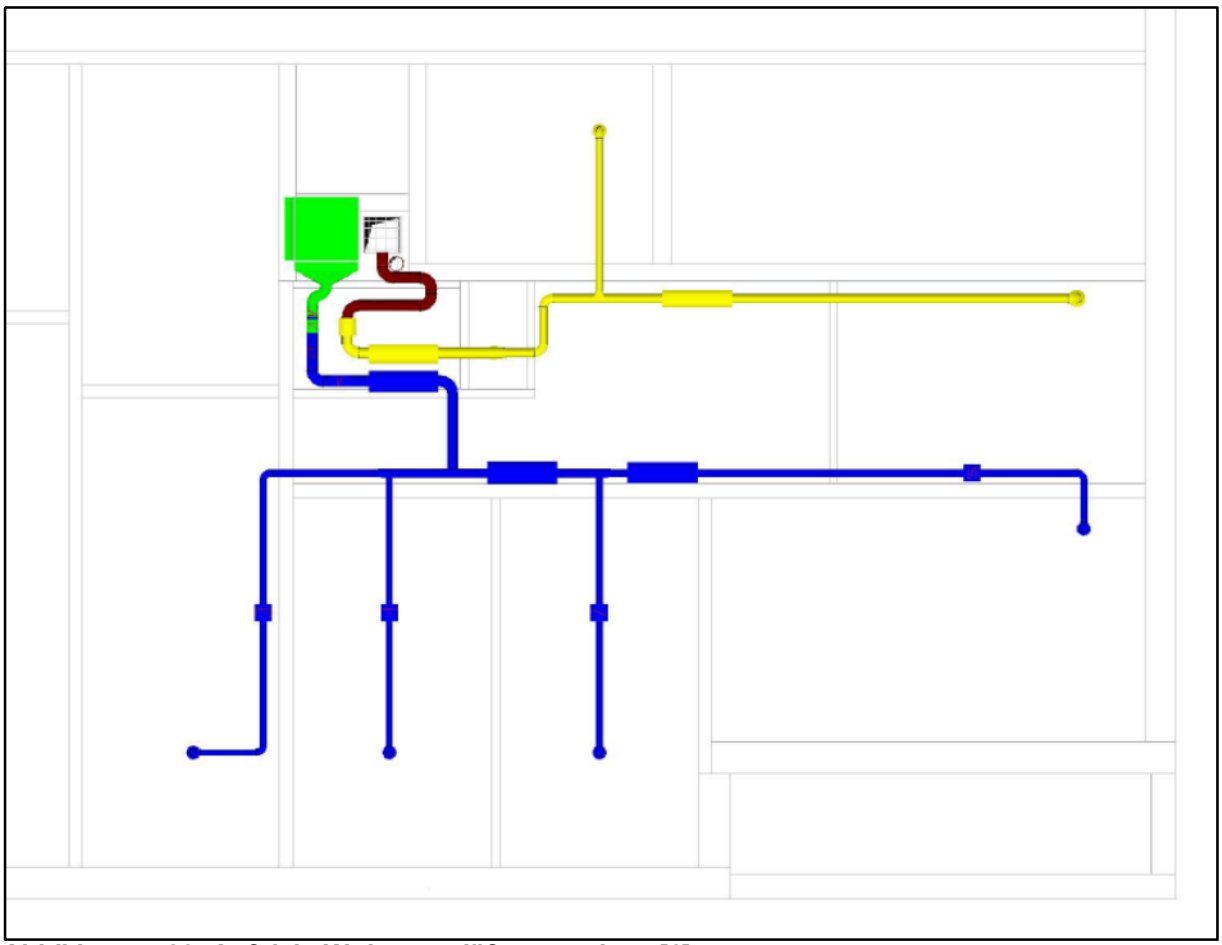

Abbildung 4-23: Aufsicht Wohnungslüftungsanlage [6]

Die Berechnung liefert folgende Ergebnisse:

- Zuluft: $\dot{V}$ = 210 m³/h, Δp_{ges} = 151 Pa
- Abluft: $\dot{V}$ = 210 m³/h, Δp_{ges} = 172 Pa

Das Auslegungsdiagramm der Ventilatoren in Abbildung 4-24 zeigt, dass die Anlage ausreichend dimensioniert ist und die Ventilatorleistung im Bereich 70 … 80 W liegt.

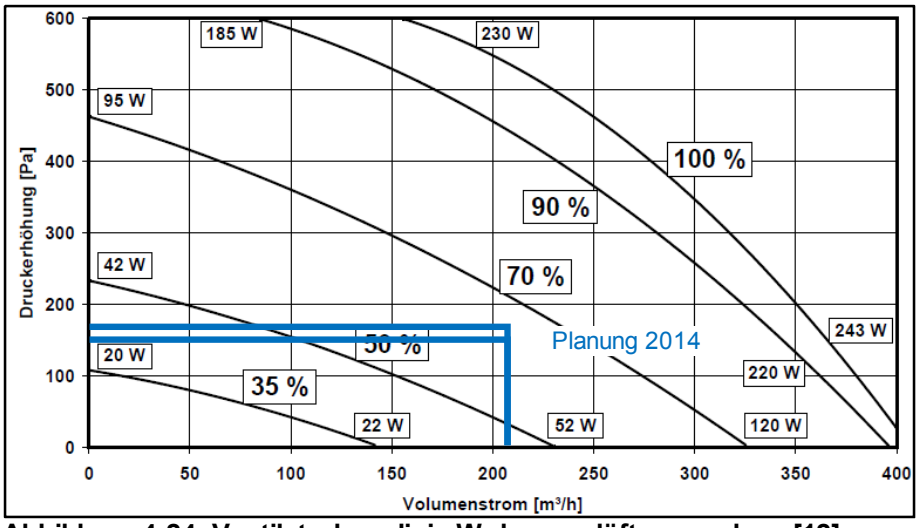

Abbildung 4-24: Ventilatorkennlinie Wohnungslüftungsanlage [12]

4.4 Erkenntnisse und Fazit

Die im Rahmen des Monitorings überprüfte Auslegung der Ventilatorleistungen zeigte, dass – bis auf die zu groß bemessenen Ventilatoren der Spülhaube – alle Anlagen passend dimensioniert sind.

Der laufende Betrieb mit Überwachung der CO_2-Konzentrationen in 2 Klassenräumen und der Aula zeigt, dass die Luftvolumenströme ausreichend zur Wahrung einer guten Raumluftqualität gewählt wurden – siehe Abschlussbericht 5.

Über die planerischen Hintergründe der sehr großzügig bemessenen Lüftungsanlage in der Hausmeisterwohnung sind keine Informationen bekannt. Der Realbetrieb zeigt ausgehend von der gemessenen Leistung, dass die Anlage mit fast ganzjährig auf niedriger Stufe (100 m³/h) läuft und nur selten höhergeschaltet wird.

5 Regelung

Der nachfolgende Abschnitt erläutert die Regelungskonzepte der vorhandenen raumlufttechnischen Anlagen, dabei wird ein Abgleich zwischen den zunächst geplanten Funktionen und den tatsächlich umgesetzten Funktionen gezogen. Sofern erforderlich werden Änderungen im Betrieb während der Monitoringphase erläutert.

Der Hauptteil des Kapitels widmet sich den beiden zentralen RLT-Anlagen von MENERGA einschließlich der hiervon versorgten Räume. Einleitend werden grundsätzliche Anlagenfunktionen und Anforderungen erläutert.

Anschließend werden identische Funktionen beider Zentralgeräte für den Klassentrakt und den Verwaltungstrakt erläutert, z. B. die Zulufttemperaturregelung, Wärme- und Kälterückgewinnung, Heizregisternutzung, Differenzdruckregelung usw.

Anschließend werden Abläufe und Regelbedingungen des Aufheizvorgangs, der regulären Betriebszeit sowie der Phase der freien Nachtlüftung erläutert. Die beiden zentralen RLT-Anlagen werden getrennt behandelt, da es verschiedene Betriebsweisen gibt.

Die Funktionen der untergeordneten Anlagen werden am Ende des Kapitels kurz zusammengefasst. Diese Anlagen sind weniger komplex und versorgen meist unter Verwendung der Einzelraumregelung (für die Heizung) nur einzelne Räume oder kleine Flächen.

5.1 Grundsätzliche Anlagenfunktionen

5.1.1 Einheitliche Zulufttemperatur

KAH empfiehlt in [7] eine Zusammenfassung von Raumgruppen mit gleichem Lastverhalten hinsichtlich Orientierung, Nutzung, Besonnung und Luftwechsel. Durch die Ausstattung der Raumgruppe mit einem zentralen Nachheizregister entsteht ein Kostenvorteil gegenüber einer raumweisen Nachheizung. Zur Temperaturregelung sollte hier eine mittlere Raumtemperatur über alle Räume angenommen werden oder alternativ eine Regelung nach der geringsten Temperatur eines der Räume erfolgen. In jedem Fall sind raumweise angeordnete Temperaturfühler nötig. Diese sind in allen Räumen anzuordnen, die im Laufe des Realbetriebs zum thermisch ungünstigsten Raum werden können. Sofern dies vorher nicht einschätzbar ist, sind dies alle Räume.

Beide Teile dieser Empfehlung wurden nicht beachtet. In weiten Teilen der St. Franziskus-Grundschule werden himmelsrichtungsunabhängig und raumnutzungsunabhängig einheitliche Zulufttemperaturen verwendet, die für alle Räume der jeweiligen Lüftungszone identisch sind. Es gibt keine raumweise angeordneten Temperaturfühler zur Ermittlung des Schlechtpunktes. Lediglich im Klassentrakt sind für den Aufheizfall je ein Nord- und Südraum als Referenzräume gewählt worden. Dies erfolgte erst nach der Inbetriebnahme zur Problemverbesserung und entsprach nicht der ursprünglichen Planung.

Es kam und kommt im Betrieb zu Problemen mit der Behaglichkeit. Es sind deutliche Temperaturunterschiede der einzelnen Räume zu verzeichnen:

- Südräume dauerhaft 2 … 3 K wärmer als Nordräume,
- untergeordnete Räume mit geringen internen Lasten im Winter 4 … 5 K kälter als Klassenräume mit hoher Last.

Siehe auch Abschlussberichte 5 zum Raumklima sowie Abschlussbericht 9 zur Heizung. Der leicht überhöhte Wärmeenergieverbrauch ist angesichts des geringen absoluten Verbrauchsniveaus eher unkritisch.

Folgende Räume weisen dagegen eine Einzelraumregelung auf und lassen sich unabhängig – teils geregelt, teils manuell bedient – individuell beheizen:

- Elektrische raumweise Luftheizregister mit Einzelraumregelung: 2.25 Schlafzimmer, 2.26 Kinderzimmer, 2.27 Kinderzimmer, 2.28 Wohnzimmer der Hausmeisterwohnung
- Elektrische raumweise Fußbodenheizung sowie Handtuchheizkörper: 2.23 Bad der Hausmeisterwohnung
- Elektrische Heizkörper mit Zeitschaltuhr (im Betrieb nachgerüstet): 0.07 Hortbüro (Nordost), 0.08 Hortbüro (Ost), 1.04 Teamraum (Nordost), 2.04 Teamraum (Nordost), 2.16 Vorbereitungsraum (Süd)
- Einzelraumregelung durch variablen Zuluftvolumenstrom (Maximalauswahl Temperatur oder CO_2): Aula
- Einzelraumregelung durch Nachheizregister: Flure und Umkleiden im Verwaltungstrakt 0.19, 0.21, 0.22, 0.32, 0.24, 0.25, 1.13 und 2.13 (als Raumluftverbund)
- Manuell wählbarer Volumenstrom sowie manuell wählbare Zulufttemperatur (Prozesslüftungsanlagen): 0.33 Küche und 0.33a Spülküche

Eine Unterscheidung hinsichtlich der klimatischen Randbedingungen zwischen nach Norden bzw. nach Süden orientierten Klassenräumen (bedingt durch die Sonneneinstrahlung) wurde im vorliegenden Projekt nicht getroffen. Der erste Fachplaner war davon ausgegangen, dass die solaren Wärmegewinne im Süden durch die Lüftungsfunktion der Kastenfenster sehr gering ausfallen bzw. durch die Verschattung weitestgehend eliminiert werden können [1]. Auch sehr frühe Hinweise des Monitoring-Teams auf andere Projekte mit negativen Erfahrungen änderten die Planung nicht [2].

Durch die leichte Bauweise ist zudem weniger Speichermasse vorhanden als in einem vergleichbaren Massivbau. Dies bedeutet, dass sich die Raumluft schneller erwärmt, aber auch schneller wieder abkühlt. Temperaturunterschiede zwischen Nord und Süd sowie unterschiedlichen Raumnutzungsarten können nur durch eine gute thermische Kopplung der Räume untereinander (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 dies ein aus der Not heraus geborenes Konzept und nicht geeignet für alle Räume (Lehrerzimmer, Verwaltung).

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.

Fazit aus dem Monitoring

Die Empfehlung zu einer himmelsrichtungsabhängigen, vor allem aber nutzungsspezifischen Zusammenfassung der Räume ist zu beachten [7]. Eine Schlechtpunktbestimmung durch Messung der Temperaturen in allen Räumen ist verpflichtend. Das ausgeführte System der St. Franziskus-Grundschule ist in der ausgeführten Art und Weise nicht zur Nachahmung empfohlen. Besser noch wäre eine Einzelraumregelung, z. B. durch Heizkörper oder ein anderes schnell reagierendes Heizsystem. Dies entspricht den Empfehlungen zum wirtschaftlichen Bauen der Stadt Frankfurt am Main (u.a. für Schulen in Passivhausbauweise) [3].

5.1.2 Bedarfsabhängige Luftvolumenströme

Um den Volumenstrom zu verringern und somit Energieeinsparungen zu erzielen, besteht die Möglichkeit, nur die belegten Räume kontrolliert zu be- und entlüften. Voraussetzung hierfür ist, dass die Volumenströme raumweise schalt- oder regelbar sind und das jeweilige Zentralgerät den verringerten Volumenstrom auch erkennt und nachregelt.

Eine bedarfsabhängige raumweise Regelung oder zumindest Schaltung der Lüftung ist möglich durch: genaue Zeitprogramme (Belegungsplan der Klassen), Handschalter, Präsenzmelder oder CO_2-Sensoren.

Im vorliegenden Projekt war zunächst eine Regelung über CO_2-Sensoren (in jedem Klassenraum, in der Aula sowie für den Verwaltungsbereich mit dem Lehrerzimmer als Referenzraum) vorgesehen. Durch die wissenschaftliche Begleitung wurde im Zuge der Planung auf die Veröffentlichung der messtechnischen Ergebnisse des Passivhausinstitutes an der Passivhausschule Frankfurt Riedberg hingewiesen [2]. Dort werden CO_2-Sensoren aufgrund hoher Messungenauigkeiten nicht zur Regelung von Lüftungsanlagen empfohlen, stattdessen wird eine reine Zeitsteuerung als erfolgreich und ausreichend betrachtet.

Dieses Konzept wurde in Abstimmung mit dem ursprünglichen Fachplaner umgesetzt. Eine Kopplung der Lüftungsanlage mit den ohnehin vorhandenen Präsenzmeldern der künstlichen Beleuchtung wird in den Klassenräumen und einigen hoch frequentierten Horträumen praktiziert. Es gibt nur zwei Zustände: Nennlüftung bzw. Totalabschaltung.

Nach einem ähnlichen Prinzip wird auch im Albert-Schweizer-Gymnasium in Alsfeld verfahren [13]. Hier wird die Belüftung während des Schulbetriebes über ein Zeitprogramm gesteuert und über Anwesenheitssensoren geregelt. Dabei hat die Temperaturanforderung in jedem Raum Vorrang. Damit wird verhindert, dass bei Nichtbelegung die Lüftung abgeschaltet wird, obwohl die Einzelraum-Solltemperatur nicht eingehalten wird.

Da in der St. Franziskus-Grundschule keine raumweisen Temperaturmessungen vorhanden sind, können nicht alle Räume nach dem Prinzip des Albert-Schweizer-Gymnasiums mit Präsenzmeldern ausgestattet werden. Insbesondere die sehr gering frequentierten Horträume und Büros würden ohne permanenten Zuluftvolumenstrom im Winter auskühlen. Daher sind in diesen Räumen reine Zeitschaltprogramme vorgesehen. Es ergeben sich dadurch jedoch deutlich höhere Luftwechsel als (nach der geringen Belegung) notwendig wären.

Da die Belegungsdichte der Aula (Speiseraum) sehr stark variieren kann, ist bei diesem Raum abweichend und unabhängig von bekannten Problemen mit der Messgenauigkeit von CO_2-Sensoren eine CO_2-Regelung vorhanden.

Fazit aus dem Monitoring

Die rein über Bewegungsmelder gesteuerte Zu- und Abschaltung der Lüftungsanlage ohne Bedarfssteuerung (nach CO_2) hat in der St. Franziskus-Grundschule zu guten bis sehr guten Raumluftqualitäten geführt, siehe Abschlussbericht 5. Sie wird zur Nachahmung empfohlen und ist für eine Grundschule ausreichend.

Wenn die Lüftungs- und Heizfunktion nicht gekoppelt wären – wie es in der St. Franziskus-Grundschule der Fall ist – wäre es darüber hinaus sinnvoll, dies in deutlich mehr Räumen anstelle der reinen Zeitschaltprogramme zu praktizieren. Alle untergeordneten Räume, in denen nur sporadisch eine Nutzung vorhanden ist, sollten allerdings nicht ganz abgeschaltet, sondern mit einer Schwachlüftung versehen werden. Diese Räume müssten jedoch eine von der Lüftung unabhängige Heizung über Heizkörper (o. ä.) aufweisen.

5.1.3 Zeitschaltprogramme

Zeitschaltprogramme können in den zentralen RLT-Anlagen hinterlegt werden, um jährlich und täglich wiederkehrende Abläufe auszuführen. In der St. Franziskus-Grundschule ist der Tagesablauf der Lüftungsanlagen automatisiert, der Jahresablauf jedoch nicht. Der Hausmeister schaltet manuell, wenn es im Jahresverlauf notwendig ist.

Die Steuerung der Lüftungsanlagen erfolgt über Zeitprogramme entsprechend den Betriebszeiten, siehe Kapitel 5.3 bis 5.5. Eine Zeitsteuerung nach Jahreskalender könnte vorgesehen werden, um auch Ferienzeiten einprogrammieren zu können, müsste jedoch für jedes Schuljahr aktualisiert werden. Dies wird in der St. Franziskus-Grundschule nicht praktiziert.

Da in den Ferien teils Hortbetrieb aufrechterhalten wird, gibt es praktisch nur je 2 Wochen im Sommer und über den Jahreswechsel, in denen keine Nutzer im Gebäude anwesend sind. Der Hausmeister schaltet in diesen Zeiten die beiden Zentralanlagen manuell ein und aus. Dies erfolgt am MENERGA-Webserver bzw. am Schaltschrank der Räume 2.03 und 2.18. Die WC-Abluftanlage ist an eine der beiden Hauptlüftungsanlagen gekoppelt, so dass diese ebenfalls mit geschaltet wird.

5.1.4 Volumenstromregler der Räume

Ein Großteil der Räume ist mit Volumenstromreglern (VSR) ausgestattet. Tabelle 5-1 in Kapitel 5.1.5 enthält eine Übersicht. Installiert sind verschiedene Modelle der Fa. TROX. Sie sind im jeweiligen Raum im Zuluftweg vor dem Schalldämpfer und dem Luftauslass sowie im Abluftweg nach den Lufteinlässen installiert.

Die Volumenstrommessung der verwendeten Modelle erfolgt nach dem Prinzip des dynamischen Differenzdrucks. Es wird ein Teilvolumenstrom beim Durchströmen der Luft durch den Regler abgegriffen. Über zwei temperaturabhängige Widerstände wird der proportional zum Gesamtvolumenstrom liegende Teilvolumenstrom gemessen, temperaturkompensiert und in eine Spannung übersetzt [14]. Die VSR arbeiten kanaldruckunabhängig, wodurch Druckschwankungen im Kanalnetz keine dauerhaften Volumenstromänderungen nach sich ziehen. Damit die Regelung der Volumenströme nicht instabil wird, ist eine Hysterese zuzulassen. Innerhalb dieser wird die Stellklappe nicht bewegt [14].

Die VSR werden vom Hersteller mit einer vorprogrammierten Einstellung ausgeliefert, die festlegt, wie weit die VSR öffnen, wenn ein definierter Steuerungsimpuls anliegt. 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. Dabei ergibt sich folgende Erkenntnis:

- der ab Werk eingestellte Minimalwert ist 0 m³/h (wie bestellt)
- der ab Werk eingestellte Maximalwert lag bei jeweils ⅓ des Nennwertes und passt in keinem der Fälle zum Planwert; alle ausgelieferten Volumenstromregler waren auf Maximalwerte oberhalb des Planwertes eingestellt (Klassenräume durchgehend: 666 m³/h statt 480 m³/h)
- in seltenen Fällen konnte der tatsächlich notwendige Planwert nicht eingestellt werden, weil der Volumenstromregler überdimensioniert ist und eine so geringe Einstellung nicht zulässt
- eine Ausnahme der obigen Erkenntnisse bilden die Volumenstromregler der Aula, die mit korrekten Minimal- und Maximalwerten installiert sind.

Das ist als Fehler der Ausführung, aber auch des Planers bei der Abnahme anzusehen. Sofern möglich, wurden im Rahmen des Monitorings alle Volumenstromregler auf die korrekten Werte eingestellt.

Unabhängig von einer falschen oder korrekten Vorgabe der Sollvolumenströme funktioniert die Regelung wie folgt: bei einem anliegenden Spannungssignal von 10 V werden die VSR auf 100 % Durchlass aufgefahren, was einer Ansteuerung auf den maximal eingestellten Volumenstrom $\dot{V}_{max}$ (optimalerweise dem Planwert) entspricht. Bei einem anliegenden Signal von 0 V werden die VSR auf den minimalen Volumenstrom $\dot{V}_{min}$ angesteuert. In diesem Zustand sind die entsprechenden VSR vollständig geschlossen.

Der Einstellbereich der Regler ergibt sich wie folgt bezogen auf den nominalen Volumenstrom der gewählten Modelle:

- $\dot{V}_{max} \geq 0{,}3 \cdot \dot{V}_{nom}$
- $\dot{V}_{min} \leq \dot{V}_{max}$

Die Minimaleinstellung kann also prinzipiell zwischen 0 und 100 % des nominalen Volumenstroms vorgenommen werden. Allerdings schließt die Stellklappe des Reglers bei Sollwerten unterhalb eines baureihenabhängigen Geräteminimalwertes. Für das Modell der Nenngröße 250, welches in den Klassenräumen durchgehend verwendet wurde, ergeben sich folgende konkreten Werte: $\dot{V}_{max}$ = 666 … 2214 m³/h und $\dot{V}_{min,Gerät}$ = 216 m³/h.

Das ausgehende Signal an alle VSR wird im Monitoring von MENERGA erfasst. Die Messeinrichtung dokumentiert die entsprechenden Messwerte mit 100 % bei einem 10 V Ausgangssignal und mit 0 % bei einem anliegenden Signal von 0 V. Das Messintervall beträgt eine Minute. Diese Messpunkte werden bei der Funktionsauswertung – siehe Kapitel 7 – herangezogen, um die Funktionsweise der unterschiedlichen jahreszeitlichen Betriebsfälle zu untersuchen und zu bewerten.

5.1.5 Regelungsoptionen der Räume

Tabelle 5-1 fasst raumweise die geplanten Zuluft- und Abluftvolumenströme (aus der RLT oder Nachbarräumen) zusammen.

Darüber hinaus ist angegeben, welche Räume einen Volumenstromregler aufweisen. Es ist erkennbar, dass dies regulär die Räume mit dauerhaftem Personenaufenthalt sind. Die Stellsignale für die Volumenstromregler werden größtenteils im Monitoring (MENERGA) erfasst.

Die Mehrzahl der Räume mit Volumenstromregler ist gleichzeitig mit einem Bewegungsmelder für die Beleuchtung ausgestattet. Dieser wird auch für die Lüftung als Signalgeber verwendet. Für die VSR ist bis zur Anlagenoptimierung im Juni 2018 eine Nachlaufzeit von zwei Minuten eingestellt. Danach wurde der Wert auf 10 Minuten erhöht.

In den Besprechungsräumen, Teamräumen und Mitarbeiterräumen des Horts sind nicht permanent Personen anwesend. Gleiches gilt für den seltener frequentierten Raum der Stille. Daher wird – unabhängig vom Vorhandensein eines Bewegungsmelders – der Volumenstromregler in diesen Räumen nach einem Zeitprogramm angesteuert.

Eine Reihe von Nebenräumen, vor allem die Sanitärräume, sind nicht mit Volumenstromreglern ausgestattet. Sie werden immer belüftet, sobald die Lüftungsanlagen laufen.

Die Aula mit Galerie weist Volumenstromregler auf, die über eine Einzelraumregelung nach Temperatur oder CO_2 angesteuert werden.

In der Hausmeisterwohnung und bei der Grundlüftungsanlage der Küche sind keine Volumenstromregler vorhanden. Die kleinen Bereiche sind einmalig einreguliert worden und werden individuell betrieben. Die Prozesslüftungsanlagen in der Küche lassen eine manuelle Regulierung von Temperatur und Volumenstrom zu.

Tabelle 5-1: Volumenströme der Räume sowie Regelungsoptionen

Raum		Volumenströme, Auslegung (Maximal = Sollwerte)							Volumenströme, Minimal [m³/h]	Regelung			
		Status	Zuluft RLT [m³/h]	Zuluft Überström [m³/h]	von Raum	Abluft RLT [m³/h]	Abluft Überström [m³/h]	nach Raum		VSR	im Monitoring?	Präsenzmelder	Regelung nach
Volumenstromregler mit Zeitprogramm													
007	Büro	ZU	100	0	-	0	100	004	0	j	j	n	Zeit
008	Mitarbeiter	ZU	60	0	-	0	60	004, 006	0	j	j	n	Zeit
011	Spielraum	ZU/AB	400	0	-	400	0	-	0	j	j	j	Zeit
103	Lehrmittel	AB	0	180	104	180	0	-	0	j	j	n	Zeit
104	Lehrer	ZU	180	0	-	0	180	103	0	j	j	n	Zeit
114	Raum der Stille	ZU/AB	480	0	-	480	0	-	0	j	j	n	Zeit
121	Besprechung	ZU/AB	300	0	-	300	0	-	0	j	j	n	Zeit
204	Lehrer	ZU/AB	180	0	-	180	0	-	0	j	j	n	Zeit
214	Kunst	ZU/AB	480	0	-	480	0	-	0	j	j	j	Zeit
216	Vorbereitung	ZU/AB	90	0	-	90	0	-	0	j	j	n	Zeit
Volumenstromregler mit Präsenzmeldung													
001	Hort	ZU/AB	500	0	-	500	0	-	0	j	j	j	Präsenz
002	Hort	ZU/AB	180	0	-	180	0	-	0	j	j	j	Präsenz
003	Kindercafé	ZU/AB	560	0	-	560	0	-	0	j	n	j	Präsenz
012	Medien	ZU/AB	180	0	-	180	0	-	0	j	j	j	Präsenz
013	Entspannung	ZU/AB	180	0	-	180	0	-	0	j	j	j	Präsenz
014	Werkstatt	ZU/AB	400	0	-	400	0	-	0	j	j	j	Präsenz
101	Klasse	ZU/AB	480	0	-	480	0	-	0	j	j	j	Präsenz
102	Klasse	ZU/AB	480	0	-	480	0	-	0	j	j	j	Präsenz
107	Klasse	ZU/AB	480	0	-	480	0	-	0	j	j	j	Präsenz
108	Klasse	ZU/AB	480	0	-	480	0	-	0	j	j	j	Präsenz
201	Klasse	ZU/AB	480	0	-	480	0	-	0	j	j	j	Präsenz
202	Klasse	ZU/AB	480	0	-	480	0	-	0	j	j	j	Präsenz
207	Klasse	ZU/AB	480	0	-	480	0	-	0	j	j	j	Präsenz
208	Klasse	ZU/AB	480	0	-	480	0	-	0	j	j	j	Präsenz
217	Werken	ZU	480	0	-	0	480	219	0	j	j	j	Präsenz
219	Lehrmittel	AB	0	480	217	480	0	-	0	j	j	n	Präsenz
Volumenstromregler mit Zeitprogramm und Nachheizung													
019	Halle	ZU/Ü	700	0	-	0	700	021	0	j	j	j	ϑ
021	Foyer/Luftraum	Ü	0	1840	019, 113	0	1840	022, 023, 024, 025	-	n	n	j	ϑ
022	Garderobe	AB	0	460	021	460	0	-	0	j	j	j	ϑ
023	Garderobe	AB	0	460	021	460	0	-	0	j	j	j	ϑ
024	Garderobe	AB	0	460	021	460	0	-	0	j	j	j	ϑ
025	Garderobe	AB	0	460	021	460	0	-	0	j	j	j	ϑ
113	Halle	ZU/Ü	700	440	213	0	1140	021	0	j	j	j	ϑ
213	Halle	ZU/Ü	440	0	-	0	440	113	0	j	j	j	ϑ
Volumenstromregler mit Bedarfsregelung													
026	Aula/Luftraum	ZU/Ü	6500	0	-	4500	2000	115	3200	j	n	j	ϑ/CO2
115	Galerie	AB	0	0	026	2000	0	-	0	j	n	j	ϑ/CO2
ohne Volumenstromregler, zentrale Zulufttemperatur													
030	Stuhllager	ZU	30	0	-	0	29	031	-	n	n	n	ohne
031	Lager Kühlung	AB	0	29	030	29	0	-	-	n	n	n	ohne
033/ 033a	Küche/ Spülküche	ZU/AB	197	1	---	198	0	---	-	n	n	n	ohne
034	Personal	ZU	31	0	-	0	31	035	-	n	n	n	ohne
035	WC	AB	0	31	034	31	0	-	-	n	n	n	ohne
ohne Volumenstromregler, manuelle Zulufttemperatur													
033	Küche	ZU/AB	4000	0	-	4000	0	-	-	n	n	n	manuell
033a	Spülküche	ZU/AB	1500	0	-	1500	0	-	-	n	n	n	manuell

Raum		Volumenströme, Auslegung (Maximal = Sollwerte)							Volumenströme, Minimal [m³/h]	Regelung			
		Status	Zuluft RLT [m³/h]	Zuluft Überström [m³/h]	von Raum	Abluft RLT [m³/h]	Abluft Überström [m³/h]	nach Raum		VSR	im Monitoring?	Präsenzmelder	Regelung nach
ohne Volumenstromregler, raumweise Nachheizung													
220	Hausmeister	ZU/AB	30	0	-	30	0	-	-	n	n	n	ohne
222	Flur	Ü	0	214	223, 224a, 224b, 229	0	214	225, 226, 227, 228	-	n	n	n	ohne
223	Bad	AB	0	62	222	62	0	-	-	n	n	n	ohne
224a	Abstellraum	AB	0	30	222	30	0	-	-	n	n	n	ohne
224b	Gäste WC	AB	0	31	222	31	0	-	-	n	n	n	ohne
225	Schlafzimmer	ZU	61	0	-	0	61	222	-	n	n	n	ohne
226	Kind	ZU	46	0	-	0	46	222	-	n	n	n	ohne
227	Kind	ZU	46	0	-	0	46	222	-	n	n	n	ohne
228	Wohnzimmer	ZU	61	0	-	0	61	222	-	n	n	n	ohne
229	Küche	AB	0	91	222	91	0	-	-	n	n	n	ohne
ohne Volumenstromregler, zentrale Zulufttemperatur													
004a	Batterie	Ü	0	30	004	0	30	004	-	n	n	n	ohne
004	HAR / Server	AB	0	130	007, 008	130	0	-	-	n	n	n	ohne
006	WC	AB	0	30	007	30	0	-	-	n	n	n	ohne
009	Flur	ZU/Ü	300	0	-	190	110	015, 017, 018	-	n	n	j	ohne
015	WC	AB	0	30	009	30	0	-	-	n	n	j	ohne
017	WC	AB	0	80	009, 018	80	0	-	-	n	n	j	ohne
018	HAR	Ü	0	50	009	0	50	017	-	n	n	n	ohne
028	WC	ZU/AB	31	0	-	31	0	-	-	n	n	j	ohne
105	Flur	ZU/Ü	280	0	-	160	250	109, 110, 111, 112	-	n	n	j	ohne
109	WC	AB	0	30	105	30	0	-	-	n	n	j	ohne
110	WC	AB	0	30	105	30	0	-	-	n	n	j	ohne
111	Dusche	AB	0	30	105	30	0	-	-	n	n	n	ohne
112	WC	AB	0	30	105	30	0	-	-	n	n	j	ohne
117	WC	AB	0	30	118	30	0	-	-	n	n	n	ohne
118	Vorraum WC	ZU	30	0	-	0	30	117	-	n	n	n	ohne
120	Flur Lehrer	AB	0	150	122, 123	150	0	-	-	n	n	n	ohne
122	Schulleiter	ZU	60	0	-	0	60	120	-	n	n	n	ohne
123	Sekretariat	ZU	90	0	-	0	90	120	-	n	n	n	ohne
124	Archiv/1.Hilfe	ZU/AB	30	0	-	30	0	-	-	n	n	n	ohne
203	Lüftung	ZU/AB	20	0	-	20	0	-	-	n	n	n	ohne
205	Flur	ZU/Ü	280	0	-	160	160	209, 210, 211, 212	-	n	n	j	ohne
209	WC	AB	0	30	205	30	0	-	-	n	n	j	ohne
210	WC	AB	0	30	205	30	0	-	-	n	n	j	ohne
211	Putzen	AB	0	30	205	30	0	-	-	n	n	n	ohne
212	WC	AB	0	30	205	30	0	-	-	n	n	j	ohne
218	Lüftung	ZU/AB	20	0	-	20	0	-	-	n	n	n	ohne

5.2 Funktionen der MENERGA-Anlagen

Beide zentralen RLT-Anlagen weisen unabhängig von den individuellen Einstellungen (Zeitprogramme, Sollwerte) einige grundlegende identische Regelungsoptionen auf. Diese werden nachfolgend beschrieben. Sie lassen sich teilweise im Webserver bzw. am Controller der Anlage einsehen und ggf. verstellen, siehe Abbildung 5-1. Einzelne Funktionen sind nur vom Servicetechniker der Fa. MENERGA direkt auf der Programmierebene änderbar.

Abbildung 5-1: Aufnahme eines MENERGA Controllers

Zulufttemperaturregelung

Es kann zwischen einer Zuluft-Konstant-Regelung oder einer Zuluft-Kaskadenregelung gewählt werden. Zur Regelung der Zulufttemperatur werden die Zuluft- und die Ablufttemperatur (jeweils im RLT-Gerät) erfasst. Letztere wird nur für die Kaskadenregelung verwendet.

In beiden RLT-Anlagen war von der Inbetriebnahme bis Juni 2018 die Zuluft-Konstant-Regelung aktiviert. Die Zulufttemperatur wird dabei von der Anlage konstant gehalten. Über einen PI-Regler wird die Zulufttemperatur mit dem im Controller eingestellten Sollwert verglichen. Es erfolgt keine Regulierung anhand der Raumtemperaturen. Wenn es durch den eingestellten Sollwert zu einer Über- oder Unterversorgung mit Heizwärme in einzelnen Gebäudeteilabschnitten kommt, wird dieser manuell nach unten bzw. nach oben angepasst. Durch den Hausmeister der Schule wird dieser Sollwert entsprechend dem Bedarf angepasst. Er nutzt dazu die Weboberfläche am PC, wobei die Einstellung auch direkt an der Anlage erfolgen kann. Praktisch wird vom Hausmeister ein Wertebereich zwischen 20 °C und 35 °C gewählt, siehe Kapitel 7.3.

Abweichungen zwischen Soll- und Istwert regelt die Anlage durch das Anfordern der Heiz- bzw. Kühlstufen. Da die hier installierten Anlagen nicht über aktive Kühlung verfügen, kann nur eine Regelabweichung nach unten ausgeregelt werden. Zunächst erfolgt dies über Wärmerückgewinnung, anschließend über das Nachheizregister [15].

Im Juni 2018 wurde die RLT-Anlage "Klassentrakt" auf eine Kaskadenregelung umgestellt.

Für die Temperaturregelung wird die Ablufttemperatur zusätzlich berücksichtigt. Die Ablufttemperatur wird mit dem Raumtemperatursollwert verglichen. Bei einer Regelabweichung wird der Sollwert der Zulufttemperaturregelung verschoben.

Die Kaskadenregelung entscheidet, in Abhängigkeit von der Außentemperatur, ob die Anlage im Sommer- oder Winterbetrieb läuft. Je nach Betriebsart ist die höhere oder niedrigere Referenzraumtemperatur regelungsrelevant und die Zuluft wird dynamisch auf ein Niveau gebracht, welches das Erreichen des Raumsollwerts ermöglichen soll. Dadurch wird die Zulufttemperatur im Winterfall tendenziell über Raumistwert gebracht und im Sommerfall darunter gehalten.

Ob diese Funktion tatsächlich den gewünschten Effekt mit sich bringt, müssen Messwerte über einen längeren Zeitraum zeigen.

Wärmerückgewinnung

Die Anlagen verfügen über Umschaltspeicher zur Wärmerückgewinnung (WRG). Über die Taktzeitveränderung des Resolair-Klappensystems wird die WRG stufenlos geregelt, siehe Abbildung 5-2.

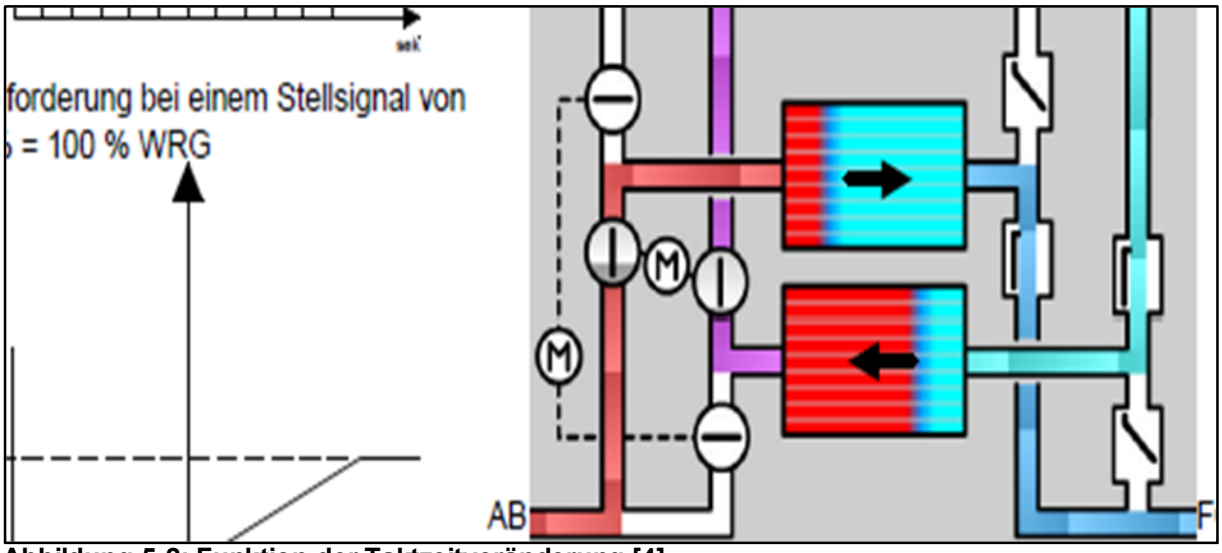

Abbildung 5-2: Funktion der Taktzeitveränderung [4]

Wird die WRG voll genutzt, erfolgt alle 40 Sekunden eine Umschaltung der Klappen. In diesem Fall wird abwechselnd und gleichmäßig kalte bzw. warme Luft durch die beiden Wärmepakete des WRG-Systems geführt. Für den Fall, dass die WRG nicht oder nur zu einem Teil genutzt werden soll, ändert die Anlage den Umschaltzyklus des Klappensystems automatisch. So kann der Wirkungsgrad der WRG an sich verändernde Temperaturen angepasst werden. Das Gegenteil zu einem Betrieb mit voller WRG stellt die freie Kühlung dar. In diesem Modus werden die Klappen nicht umgeschaltet [15].

Für den Fall, dass Außentemperaturen von < 12 °C herrschen, findet eine Tauscheranwärmung statt. Bevor der Außenluftbetrieb mit WRG startet, werden die Wärmepakete angewärmt. Dies erfolgt im Umluftbetrieb der Anlage und dauert ca. 2 min an. Für diese Zeit sind sämtliche Klappen des Resolair-Systems auf der Zu- und Abluftseite geöffnet. Die Außen- und Fortluftklappen der Anlage bleiben währenddessen geschlossen [15].

Kälterückgewinnung

Die Lüftungsanlage ist mit einem Programm zur Raumkälterückgewinnung ausgestattet. Wenn im Sommer die Ablufttemperatur um 2 K niedriger ist als die Außentemperatur, wird die Kälterückgewinnung aus der Abluft aktiviert. Im Regenerator der Anlage wird, über die Taktzeitveränderung des Resolair-Klappensystems, mit der kühleren Abluft die Außenluft abgekühlt [15].

Freie Nachtkühlung

Des Weiteren verfügt die Anlage über die Funktion einer freien Nachtauskühlung. Diese Funktion ist bei der Auslieferung ab Werk deaktiviert. Die Nutzung erfordert, dass sie bei der Inbetriebnahme aktiviert wird und außerdem ein Datumsbereich eingegeben wird, innerhalb dessen diese Funktion zur Verfügung stehen soll.

In beiden zentralen Anlagen wurde diese Funktion am 18.07.2014 durch das Eintragen von Schaltzeiten aktiviert [15]. In der RLT-Anlage "Verwaltungstrakt" blieb sie bis zum Ende des Monitorings permanent in jedem Sommer verfügbar.

In der RLT-Anlage "Klassentrakt" wurde sie – vermutlich über den Webserver – unbeabsichtigt am 23.05.2017 deaktiviert, siehe Abbildung 5-3. Sie wurde erst am 04.06.2018 wieder aktiviert, als der Fehler im Rahmen der Optimierung auffiel.

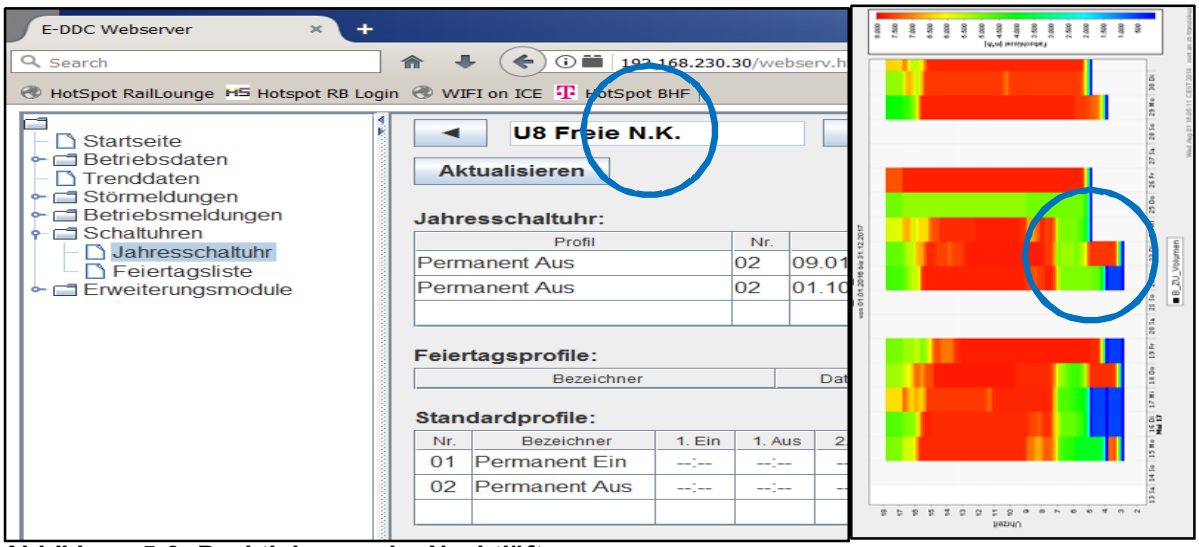

Abbildung 5-3: Deaktivierung der Nachtlüftung

Sind alle entsprechenden Parameter eingehalten, startet die Anlage zu der eingestellten Zeit den Betriebsfall "Freie Nachtauskühlung". Alle VSR werden mit einem Signal von 10 V angesteuert und öffnen auf $\dot{V}_{max}$. Die Präsenzregelung ist für diese Zeit deaktiviert. Über die Ventilatoren wird ausschließlich Außenluft ins Gebäude geführt, die Wärmerückgewinnung wird unterdrückt. Der Betriebsfall wird beendet, sobald die Raumtemperatur 1 K unterhalb der Raumsolltemperatur liegt. Wenn eine Nachtauskühlung stattgefunden hat, bleibt der Heizungsausgang der Anlage für drei Stunden gesperrt, so dass das Heizregister nicht angesprochen werden kann [15].

Heizregisternutzung

Die zentralen Lüftungsgeräte verfügen über Luftheizregister, welche bei entsprechendem Betriebsfall die durch die WRG bereits maximal vorgewärmte Zuluft bis auf den jeweils eingestellten Sollwert der Zulufttemperatur nachheizen. Diese Heizregister werden über den Fernwärmeanschluss der Grundschule versorgt, siehe Abschlussbericht 9.

Der Flur des Verwaltungstraktes verfügt über ein separates Nachheizregister, welches ebenfalls über den Fernwärmeanschluss versorgt wird. Mit diesem Heizregister wird eine Raumregelung für den Raumluftverbund "Flure + Garderoben" im Verwaltungstrakt praktiziert. Falls die Regelung einen Nachheizbedarf ermittelt, um den Flurtemperatursollwert zu erreichen, wird dieses Heizregister zugeschaltet.

In beiden Fällen erfolgt die eigentliche Regelung durch das Ansprechen eines Dreiwegeventils, welches zwischen 100 % (maximale Vorlauftemperatur) bis 0 % (keine Heizwärmezufuhr) stufenlos von der MENERGA-Regelung angesteuert wird.

Steuerung der Warmwasserpumpe

Die zum jeweiligen Heizregister gehörige Pumpe wird von der zentralen Regelung der RLT-Anlage angesteuert. Die Pumpe läuft nach Schließen des Ventils noch für rund 5 Minuten nach. Damit die Pumpe bei längerem Stillstand nicht blockiert, wird die Pumpenleistung einmal täglich für ca. 5 Sekunden angefordert [15].

Druckregelung

Die Anlage läuft mit einem konstanten Druck im Zuluftkanal. Über einen Drucksensor im Zuluftkanal wird der aktuelle Druck erfasst und die benötigten Volumenströme für die Zu- und Abluftventilatoren werden anhand des erfassten Drucks bestimmt. Dabei wird die zu fördernde Zuluftmenge berechnet.

Abweichungen werden über zwei getrennte PI-Regler ausgeregelt. Wird eine Abweichung vom Sollwert im Zuluftkanal registriert, so wird das Ausgangssignal für den Frequenzumrichter der Ventilatoren entsprechend geändert, sodass der Druck im Zuluftkanal konstant bleibt [15].

Am Controller und im Webserver können die Ist- und Sollwerte des Drucks und der Volumenströme angezeigt werden.

Eine Schlechtpunktregelung mit Rückkopplung des Regelsignals der Volumenstromregler an das Zentralgerät wäre ebenso denkbar gewesen. In der St. Franziskus-Grundschule sind alle relevanten Räume mit VSR ausgestattet, so dass diese Regelung grundsätzlich ohne größeren Kosteneinsatz möglich gewesen wäre. Damit wäre sichergestellt, dass der Anlagendifferenzdruck jeweils für den ungünstigsten Volumenstromregler gerade ausreicht, jedoch nicht höher als notwendig ausfällt. Dies spart Ventilatorstrom.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse des Monitorings wird eine Nachrüstung bzw. Umprogrammierung nicht empfohlen. Da viele Räume nach Zeitprogrammen versorgt werden und nicht über Präsenzmelder, sind die nutzungsbedingten Schwankungen des Volumenstroms über den Tag bzw. das Jahr nur wenig ausgeprägt. Das ist vor allem durch das Konzept "Luftheizung ohne statische Heizflächen" begründet.

In Systemen mit einer statischen Heizung und reiner Lüftungsfunktion der RLT ließe sich eine größere Quote von Präsenzreglern realisieren. Dann wäre mit stärker schwankenden Volumenströmen zu rechnen und eine Schlechtpunktregelung für die Druckdifferenz sinnvoller.

Sonderfälle

Für Nutzungszeiten außerhalb der regulären Betriebszeiten ist die Anlage händisch, durch Fachpersonal wie den Hausmeister, im Betriebsfall "Handbetrieb" an- bzw. abzuschalten.

Dies versetzt die Anlage während des Normalbetriebs in Volllast (alle VSR 100 % offen). Dies kann auch während der Abschaltzeit erfolgen. So kann beispielsweise auf Elternabende o. ä. reagiert werden.

5.3 Regelschema Zentralanlage Klassentrakt

Abbildung 5-4 zeigt das Prinzipschema der Regelungs- und Messtechnik für die RLT-Anlage "Klassentrakt". Ein Teil der Volumenstromregler ist der Nordseite, der andere Teil der Südseite zugeordnet.

Im Aufheizvorgang (siehe Kapitel 5.3.2) wird jeweils eine Raumtemperatur pro Himmelsrichtung eines Referenzraumes berücksichtigt. Die Aufheizung wird ggf. zeitlich unterschiedlich beendet. In der normalen Betriebszeit (siehe Kapitel 5.3.3) werden alle Räume gleich behandelt. Es gibt eine gemeinsame Zulufttemperatur, der raumweise Volumenstrom wird in den Räumen mit aktivierter Präsenzerkennung ggf. gestoppt. In allen anderen Räumen wird dauerhaft gelüftet. Ist die sommerliche Nachtlüftung (siehe Kapitel 5.3.4) aktiv, werden ebenfalls alle Räume gemeinschaftlich, unabhängig von der Himmelsrichtung durchlüftet. Alle Volumenstromregler werden dazu voll geöffnet.

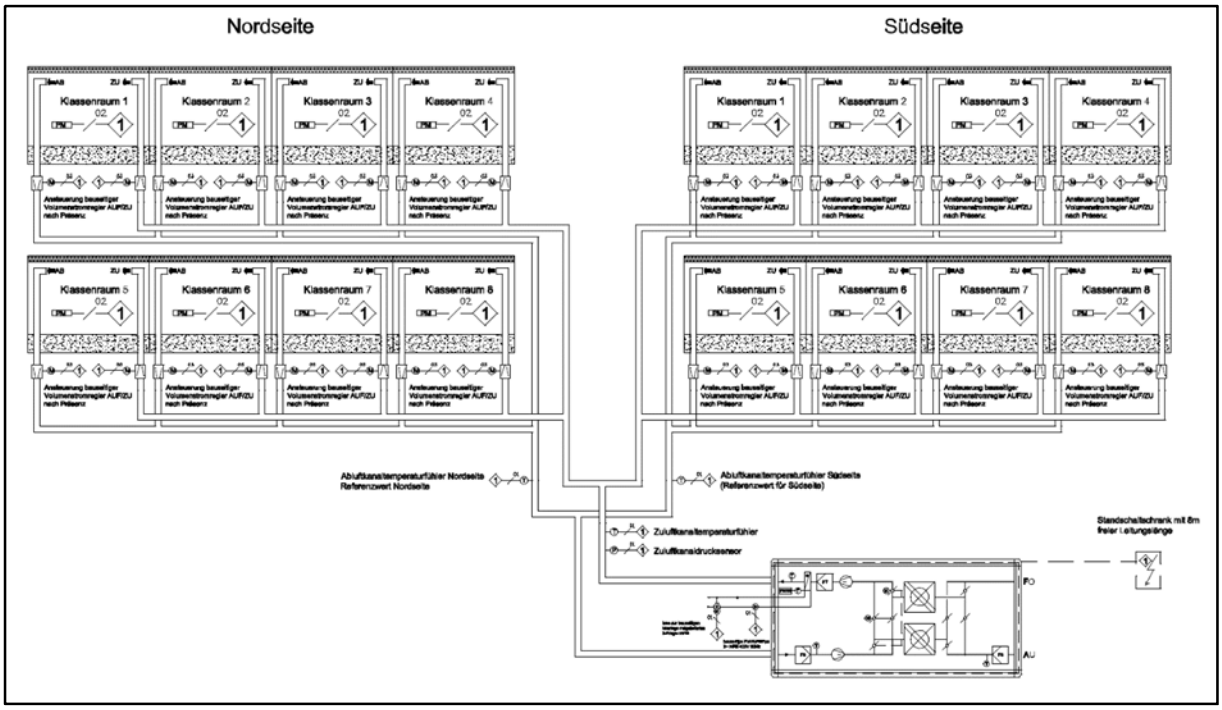

Abbildung 5-4: Prinzipschema der Regelung- und Messtechnik der Klassentraktanlage [15]

Die Betriebszeiten und auch die Umschaltungen zwischen verschiedenen Zuständen wurden im Laufe der Planung immer wieder angepasst. In der Phase der Planung waren morgendliche Vorspülung, Regelbetrieb und sommerliche Nachtlüftung vorgesehen [1]. Während der Ausführung wurden unterschiedliche Betriebszeiten für Klassenräume und Hort kommuniziert, die jedoch nicht umgesetzt wurden [5].

5.3.1 Volumenstromregler (VSR) im Klassentrakt

Die Ausstattung der einzelnen Räume mit Volumenstromreglern ist in Kapitel 5.1.5 tabelliert und soll hier nicht wiederholt werden.

Die VSR der Klassen- und Horträume werden während des Betriebsfalls "Betriebszeit" über bauseitige Präsenzmelder angesteuert. Wird durch den Präsenzmelder in einem Raum eine Bewegung registriert, erhält die zentrale Regelung ein entsprechendes Signal. Die Regelung steuert die entsprechenden VSR dann durch ein 10 V Ausgangssignal auf $\dot{V}_{max}$ an.

Das Öffnen erfolgt ca. 1 Minute zeitversetzt, d. h. wird durch die raumweisen Präsenzmelder für mindestens 1 Minute eine Person im Raum registriert, so erhalten die Zu- und Abluft-VSR dieses Raumes ein Signal. Die zeitversetzte Ansteuerung ist gewollt, um zu verhindern, dass die VSR öffnen, wenn z. B. eine Person kurz etwas aus der Klasse holt und direkt wieder geht.

Ermittelt der entsprechende Präsenzmelder, dass niemand mehr im Raum ist, werden die VSR auf $\dot{V}_{min}$ angesteuert. Dies geschieht mit einer programmierten Schaltdifferenz der Präsenzmelder. Die Präsenzmelder weisen eine programmierte Nachlaufzeit von 5 Minuten auf und die Nachlaufzeit der VSR ist seit dem 04.06.2018 auf 10 Minuten eingestellt (vorher 2 Minuten). In Summe ergibt sich somit eine Nachlaufzeit von 15 Minuten, nachdem die letzte Person den Raum verlassen hat.

In den Betriebsfällen "Aufheizvorgang" und "Freie Nachtauskühlung" wird $\dot{V}_{max}$ dauerhaft angefordert, sofern die Regelung den jeweiligen Betriebsfall für den entsprechenden Raum freigibt [15].

Eine Ausnahme bilden die Horträume 0.08 und 0.11 sowie die Lehrer- und Lehrmittelräume 1.03, 1.04 und 2.04. Diese werden während aller Betriebsfälle dauerhaft auf $\dot{V}_{max}$ angesteuert. Ein Zeitschaltprogramm überbrückt die bauseitigen Präsenzmelder in den Horträumen. Für die Lehrer- und Lehrmittelräume ist ohnehin keine Präsenzerfassung vorgesehen.

Abbildung 5-5 und Abbildung 5-6 zeigen Volumenstromregler in den Klassenräumen.

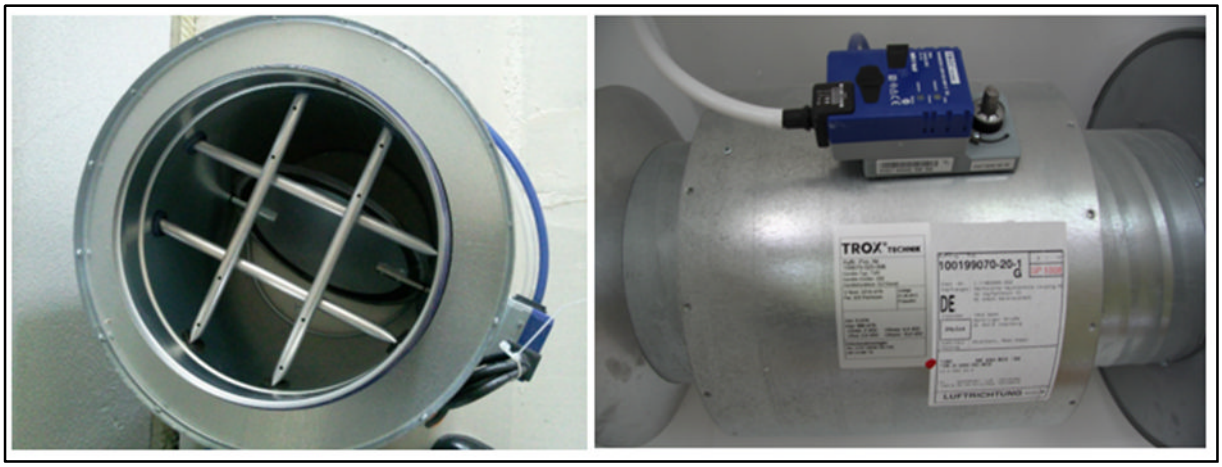

Abbildung 5-5: Elektronisch programmierbarer VSR im Klassentrakt (Typ: LMV-D3-MP TR)

Abbildung 5-6: Mechanisch einstellbarer VSR in Lehrer- und Nebenräumen (Typ: M546ED4)

Bei der Anlagenoptimierung im Juni 2018 wurde festgestellt, dass die Zuluft-VSR der Räume 1.02 und 2.07 sowie der Abluft-VSR in Raum 0.04 stromlos sind. Sie sind nicht korrekt mit dem Schaltschrank verdrahtet oder Kabelverbindungen sind defekt. Dies muss noch durch die ausführende Firma behoben werden.

Die Horträume 0.07/0.08 und 0.11 werden über ein Zeitschaltprogramm angesteuert, alle anderen Horträume (ohne Nebenräume) weisen einen Präsenzmelder auf. Auch diese könnten eine reine Zeitsteuerung erhalten, um das Problem der Unterversorgung mit Wärme im Winter zu vermindern. Einzig das Kindercafé 0.03 ist hochfrequentiert und weist Abwärmequellen auf, so dass es hier bei der Präsenzmeldung bleiben könnte. Die ausführende Firma kann dazu die Präsenzmeldersignale im Schaltkasten überbrücken. Diese Maßnahme wurde innerhalb der Monitoringphase jedoch noch nicht umgesetzt.

5.3.2 Betriebsfall "Aufheizvorgang"

Gemäß DIN EN 15251 ist es erforderlich, bereits vor Nutzungsbeginn mit der Lüftung zu beginnen oder eine Grundlüftung zu gewährleisten, um mögliche Anreicherungen aus Gebäudeemissionen (z. B. Schadstoffe aus Mobiliar o. ä.) abzuführen. Abschnitt B.4 der Norm besagt, dass dem Raum das Zweifache des Luftvolumens über einen Außenluftstrom zuzuführen ist [16].

Um 4 Uhr (Mo) bzw. 5 Uhr (Di-Fr) läuft die Lüftungsanlage im Vollbetrieb an und die Volumenstromregler öffnen auf 100 %. Sie sorgt dabei für den geforderten Luftaustausch sowie die Aufheizung der Räume.

Der Aufheizvorgang läuft mit Außenluft, auch wenn in der Anlagenbeschreibung von Umluft gesprochen wird – dies ist aus den Temperaturen im Erdreichwärmeübertrager zu schlussfolgern, die sich exakt zum Betriebsbeginn verändern, was auf Durchströmung zurückzuführen ist.

Ein Ende des Aufheizfalles und damit der Übergang zur normalen Betriebszeit ergibt sich getrennt zonenweise für die Nord- und Südräume. Sobald die Raumtemperatur im jeweiligen Referenzraum (Räume 0.01 und 1.08) erreicht ist, ist bei 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 Zielwerte in den Referenzräumen ändern.

Es gibt kein offizielles zeitliches Ende des Aufheizvorganges, wie ursprünglich geplant (6 Uhr, [5]). Wenn zum Unterrichtsbeginn immer noch keine Sollwerterreichung eingetreten ist, wird der Aufheizvorgang fortgeführt.

Das Ende des Aufheizfalles ist ansonsten gekennzeichnet durch eine Freischaltung der Bewegungsmelder in die Regelung. Alle Räume, die von Bewegungsmeldern gesteuert werden, fahren nun zu. In den Räumen mit Zeitprogramm geht die Aufheizung fließend in die Betriebszeit über. Die Lüftungsanlage schaltet demnach nicht aus – auch wenn der Aufheizvorgang bereits 10 Minuten nach Betriebsbeginn erreicht wäre. Ob und in welcher Höhe die WRG und das Heizregister während der Aufheizung aktiv sind, ergibt sich aus der gewünschten Zulufttemperatur.

Eine Heizgrenze von 16°C, welche in der Planung vorgesehen war, gibt es somit 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.

Die Solltemperaturen der Referenzräume für den Aufheizvorgang sind am Controller und im Webserver hinterlegt. Es sind folgende Sollwerte eingestellt, die der Hausmeister anpassen kann und im Falle der Zulufttemperatur auch witterungsabhängig angepasst hat:

- Sollwert Zulufttemperatur: 15 … 35°C (im Zeitraum 2016/17, siehe Kapitel 7.3)
- Aufheizsollwert Nordräume: 24°C (weitgehend unverändert, nicht im Monitoring)
- Aufheizsollwert Südräume: 21°C (weitgehend unverändert, nicht im Monitoring)

An den Einstellungen des "Aufheizvorgangs" wurde im Zuge der Lüftungsoptimierung im Juni 2018 folgende Änderungen vorgenommen:

- Es erfolgte eine korrekte Zuordnung der Horträume zu den Lüftungsbereichen "Nord" und "Süd" während der Aufheizung.
- Der Temperaturfühler im Nordreferenzraum 0.01 wurde aus der Elektrounterverteilung (Schaltkasten) herausgeführt, so dass die Raumtemperatur korrekt erfasst wird.
- Darüber hinaus gibt es zusätzlich am Sonntag von 21:00 – 22:30 Uhr eine Heizphase, in der alle Volumenstromregler geöffnet sind.

Im Rahmen einer Masterarbeit wurden weitere Optimierungsvorschläge erarbeitet [17], die bei späterer Gelegenheit noch umgesetzt werden können:

- Absenken des Aufheizsollwertes der Südräume von 21°C auf 20°C, um eine Überwärmung im Tagesverlauf zu vermindern
- Reparatur der defekten Kabelverbindungen der Volumenstromregler, so dass die Aufheizung in allen Räumen funktioniert

5.3.3 Betriebsfall "Betriebszeit"

Ist der Aufheizfall beendet, beginnt die Betriebszeit. Entgegen der Planung gibt es keinen festen Betriebsbeginn. Ursprünglich war dieser mit 6 Uhr (Hort) bzw. 8 Uhr (Klassen) vorgesehen und die Anlage sollte nach der Aufheizung komplett ausschalten [5]. Das passiert jedoch nicht.

Für die Räume mit Präsenzregler bedeutet dies, dass die Volumenstromregler nach Ende der Aufheizung auf 0 % zugefahren werden, es sei denn der Präsenzmelder registriert bereits Aktivität, dann bleiben sie offen. Für die Räume mit Zeitprogramm ergibt sich keine Änderung, die Volumenstromregler bleiben 100 % offen.

Während des Betriebsfalls sind ggf. Wärmerückgewinnung und Heizregister in Betrieb, sofern die gewählte Zulufttemperatur dies erforderlich macht.

Wird über die Präsenzmelder keine Bewegung mehr im Raum verzeichnet, werden die entsprechenden VSR auf $\dot{V}_{min}$ zugefahren. Dies geschieht mit einer eingestellten Nachlaufzeit von 2 Minuten. Der Wert wurde im Rahmen der Optimierung auf 10 Minuten erhöht, um in den Schulpausen eine bessere Nachlüftung zu garantieren. Bis zur nächsten Auslösung des Präsenzmelders findet für diesen Raum planmäßig kein weiterer, kontrollierter Luft- bzw. Wärmeaustausch statt.

Die Differenzdruckerfassung im Zu- und Abluftkanal regelt die Ventilatoren der Anlage auf den für die restlichen in Benutzung befindlichen, geregelten Räume und die ungeregelten Flure erforderlichen Volumenstrom herunter. Zum Ende der Betriebszeit schaltet die Lüftungsanlage mit allen dazugehörigen Komponenten ab.

Es sind folgende Sollwerte eingestellt, die der Hausmeister anpassen kann bzw. bis Mitte 2018 jeweils manuell witterungsabhängig angepasst hat:

- Sollwert Zulufttemperatur: 15 … 35°C (im Zeitraum 2016/17, siehe Kapitel 7.3)

An den Einstellungen der "Betriebszeit" wurden im Zuge der Lüftungsoptimierung im Juni 2018 folgende Änderungen vorgenommen:

- Die Zuluft-Kaskadenregelung der Anlage wurde aktiviert, wodurch im Sommerbetrieb die Zuluft bei hohen Raumtemperaturen deutlich unter den Raumsollwert temperiert wird, um im Tagesverlauf eine schnelle Wiedererwärmung der Räume zu verhindern. Dieser Effekt greift allerdings nur vollumfänglich, wenn die Außentemperatur unter der Zuluftsolltemperatur liegt, da die Anlage keine aktive Kühlfunktion hat.
- Der Raumtemperatursollwert (Nord-/Süd) für die "Betriebszeit" wurde einheitlich auf 21°C festgelegt und soll nur noch bei massiven Wetterumschwüngen durch den Hausmeister geändert werden. Das ständige Umstellen der Zuluftsolltemperatur durch den Hausmeister entfällt somit.
- Eine Maximalbegrenzung von 28°C für die Zulufttemperatur der Anlage wurde programmiert.
- Die Umschaltaußentemperatur zwischen Sommer- und Winterfall in der Kaskadenregelung wurde mit 15°C festgelegt; im Winterfall ist die kleinere der beiden Referenzraumtemperaturen regelungsrelevant (voraussichtlich die des Nordraumes 0.01), im Sommer die größere (voraussichtlich Südraum 1.08)
- Die Betriebszeit wird von Montag bis Freitag von 5 bis 17 Uhr festgelegt.

Im Rahmen einer Masterarbeit wurden weitere Optimierungsvorschläge erarbeitet [17], die bei späterer Gelegenheit noch umgesetzt werden können:

- Verminderung der Volumenströme in den Südräumen während der Betriebszeit (nicht während der Aufheizung oder während der freien Nachtkühlung) auf 80 % der heutigen Werte; die Erhöhung der CO_2-Konzentration wurde geprüft und liegt dann berechnet bei ca. 1700 ppm.
- Erhöhung der Volumenströme in den Nordräumen während der Betriebszeit (nicht während der freien Nachtkühlung) auf 120 % der heutigen Werte, um eine höhere Beheizung sicherzustellen.

5.3.4 Betriebsfall "Freie Nachtauskühlung"

Die freie Nachtauskühlung wurde am 18.07.2014 in Betrieb genommen. Sie sollte jeweils vom 15.04. bis 30.09. aktiv sein und war dies bis zum 23.05.2017. Bis Mitte 2017 war sie im Zeitraum 3 bis 4 Uhr (Mo) bzw. 5 Uhr (Di-Fr) aktiv.

Die freie Nachtauskühlung wurde im Mai 2017 versehentlich deaktiviert und erst am 04.06.2018 wieder aktiviert. Seitdem ist sie an Wochentagen zwischen 1 und 5 Uhr aktiv geschaltet. Der Zeitraum mit aktiver Nachtlüftung wurde verlängert auf 01.04. bis 30.10.

Nachtauskühlung an:

Ist die Raumtemperatur mindestens 1 K höher als der eingestellte Raumtemperatursollwert und die Außenlufttemperatur mindestens 3 K unter dem Raumtemperatursollwert, jedoch > 12 °C, so werden alle Volumenstromregler zu 100 % geöffnet. Dies erfolgt unabhängig von der Präsenzregelung. Die 3 K-Bedingung wurde im Zuge der Lüftungsoptimierung auf 2 K gemindert. Sollte die Startbedingung um 1 Uhr nicht erfüllt sein, startet die Anlage erneut um 2 Uhr usw. Während der Nachtlüftung ist die WRG inaktiv.

Um zu verhindern, dass die Betriebsbedingungen aufgrund stehender Luft, z. B. im AU-Kanal, nicht erfüllt werden, startet die Anlage um 1 Uhr für 5 Minuten die Ventilatoren und steuert die VSR auf $\dot{V}_{max}$ an. Dadurch werden alle Temperaturfühler mit Luft umspült und können die tatsächlich anliegenden Temperaturen messen.

Nachtauskühlung aus:

Sowie die Raumtemperatur mindestens 1 K niedriger als der eingestellte Raumtemperatursollwert im Tagbetrieb ist, wird die Nachtauskühlung deaktiviert. Die Regelung erfolgt gesondert nach nördlichem und südlichem Gebäudeteilabschnitt. Ist in einem der beiden Abschnitte der Sollwert erreicht, läuft die Lüftungsanlage für den noch zu kühlenden Abschnitt weiter, bis auch bei diesem der Temperatursollwert erreicht wurde.

Mit der Beendigung der Nachtauskühlung steuert die Anlage alle entsprechenden VSR auf V_{min} an. Alternativ endet der Betriebsfall um 5 Uhr, wenn die geforderte Raumtemperatur bis dahin nicht erreicht wird. In diesem Fall wechselt die Lüftungsanlage nahtlos in den Betriebsfall "Betriebszeit" und regelt die VSR nach der Präsenzregelung bzw. dem Zeitschaltprogramm. Nach Beendigung der freien Nachtauskühlung ist die Heizregisternutzung für drei Stunden gesperrt, um eine unzweckmäßige Wiederaufheizung zu verhindern.

An den Einstellungen der "Freien Nachtauskühlung" wurde im Zuge der Lüftungsoptimierung im Juni 2018 folgende Änderungen vorgenommen:

- Dieser Modus wurde wieder aktiviert.
- Der tägliche und jährliche Zeitraum der Aktivierung wurde verlängert, s. o.
- Die Einschaltbedingung $\vartheta_{AU} - \vartheta_{Raum,soll}$ wurde von 3 K auf 2 K abgesenkt.

5.4 Regelschema Zentralanlage Verwaltungstrakt

Abbildung 5-7 zeigt das Prinzipschema der Regelungs- und Messtechnik für die RLT-Anlage "Verwaltungstrakt". Es wird unterschieden in die Aula, den Flur mit separatem Nachheizregister sowie alle anderen Räume.

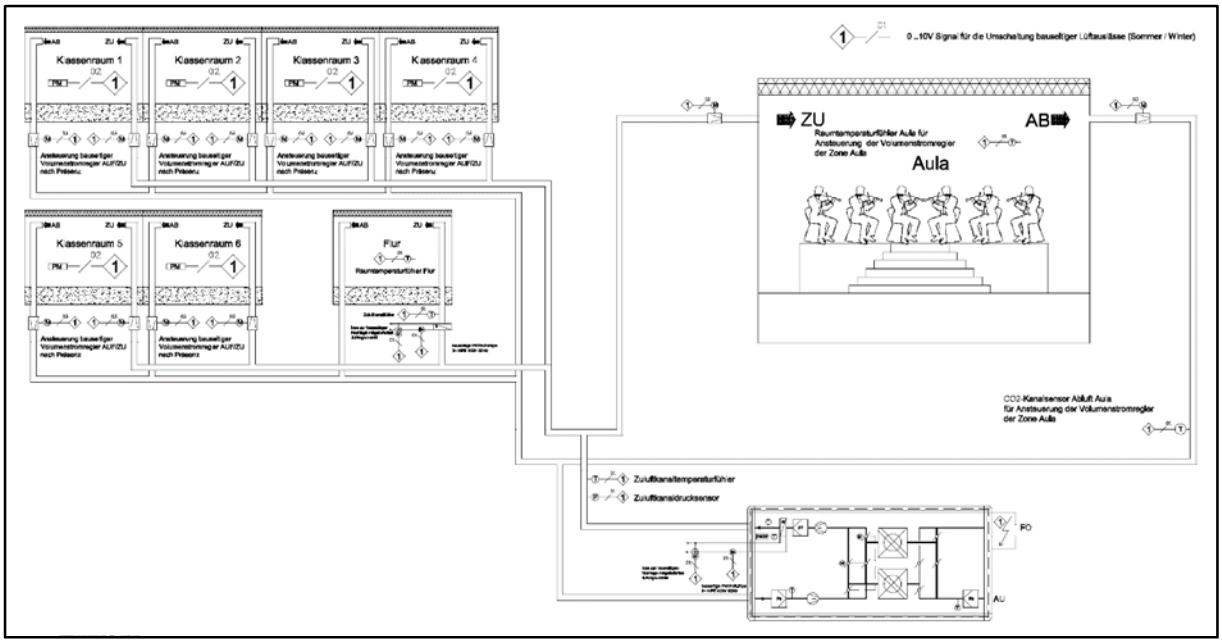

Abbildung 5-7: Prinzipschema der Regelung- und Messtechnik der Verwaltungstraktanlage [15]

Im Aufheizvorgang (siehe Kapitel 5.4.2) wird die gemischte Ablufttemperatur aller Räume als maßgebend berücksichtigt. In der normalen Betriebszeit (siehe Kapitel 5.4.3) gibt es eine gemeinsame Zulufttemperatur für die Aula und restlichen Räume (ohne Flur). In der Aula wird der Volumenstrom nach einer Maximalauswahl von CO_2 und Temperatur so gewählt, dass sich eine gute Raumluftqualität ergibt, aber der Raum nicht zu kalt wird.

Für den Flur gibt es einen konstanten Volumenstrom, aber eine variable Zulufttemperatur. Hier zielt die Regelung auf eine Einhaltung der Raumtemperatur. Der Rest des Gebäudeteils läuft identisch zum Klassentrakt; der raumweise Volumenstrom wird in den Räumen mit aktivierter Präsenzerkennung ggf. gestoppt. In allen anderen Räumen wird dauerhaft gelüftet.

Ist die sommerliche Nachtlüftung (siehe Kapitel 5.4.4) aktiv, werden ebenfalls alle Räume gemeinschaftlich durchlüftet. Alle Volumenstromregler werden dazu voll geöffnet.

5.4.1 Volumenstromregler (VSR) in BTA

Die Ausstattung der einzelnen Räume mit Volumenstromreglern ist in Kapitel 5.1.5 tabelliert und soll hier nicht wiederholt werden.

Aula

Die VSR der Aula 0.26 werden entsprechend einer Einzelraumregelung angesteuert. Die Regelung erfolgt temperatur- und CO_2-konzentrationsabhängig. Wird während der Betriebszeit eine Unterschreitung der eingestellten Solltemperatur oder eine Überschreitung der CO_2-Konzentration registriert, werden die VSR auf $\dot{V}_{max}$ angesteuert. Wird durch die Regelung ermittelt, dass kein Lüftungs- bzw. Heizbedarf besteht, werden die VSR auf $\dot{V}_{min}$ angesteuert.

Die VSR der Aula sind vom Hersteller so programmiert, dass sie auch bei einem Ausgangssignal von 0 V und somit einer Ansteuerung auf $\dot{V}_{min}$, nicht schließen, sondern 3200 m³/h Luft strömt. Der Maximalwert liegt bei 6.500 m³/h.

Ein Umprogrammieren der VSR ist möglich, erfordert allerdings aufgrund der örtlichen Gegebenheiten ein Gerüst. Während der Betriebsfälle "Aufheizvorgang" und "Freie Nachtauskühlung" wird dauerhaft $\dot{V}_{max}$ angefordert [18].

Lehrerbereich und Funktionsräume

Die VSR im Lehrerbereich und in den Funktionsräumen werden während allen Betriebsfällen auf $\dot{V}_{max}$ angesteuert, sofern die Aktivierung des jeweiligen Betriebsfalls durch die Regelung freigegeben wird. Bei den Funktionsräumen handelt es sich im 1.OG um den Raum der Stille 1.14 sowie im 2.OG um die Räume für Vorbereitung 2.16, für Werkunterricht 2.17 und Kunst 2.14. Der Lehrerbereich umfasst den Flur Lehrer 1.20, den Besprechungsraum 1.21, den Raum des Schulleiters 1.22, das Sekretariat 1.23 und das Archiv 1.24 [18].

Der Werkraum weist abweichend eine Präsenzregelung auf. Wird durch den Präsenzmelder eine Bewegung registriert, erhält die zentrale Regelung ein entsprechendes Signal. Die Regelung steuert die entsprechenden VSR dann durch ein 10 V Ausgangssignal auf $\dot{V}_{max}$ an.

Wird durch den raumweisen Präsenzmelder für mindestens 1 Minute eine Person im Raum registriert, so erhalten die Zu- und Abluft-VSR dieses Raumes ein Signal. Ermittelt der entsprechende Präsenzmelder, dass niemand mehr im Raum ist, werden die VSR auf $\dot{V}_{min}$ angesteuert. Dies geschieht mit einer programmierten Schaltdifferenz der Präsenzmelder. Die Präsenzmelder weisen eine programmierte Nachlaufzeit von 5 Minuten auf und die Nachlaufzeit der VSR ist auf 2 Minuten eingestellt. In Summe ergibt sich somit eine Nachlaufzeit von 7 Minuten, nachdem die letzte Person den Raum verlassen hat.

In den Betriebsfällen "Aufheizvorgang" und "Freie Nachtauskühlung" wird $\dot{V}_{max}$ dauerhaft angefordert, sofern die Regelung den jeweiligen Betriebsfall für den entsprechenden Raum freigibt [15].

Flur (Foyer, Halle und Garderoben)

Der Flur umfasst das Foyer 0.21, die Halle im EG – 2.OG mit den Raumnummern 0.19, 1.13 und 2.13 und die vier Garderoben mit den Raumnummern 0.22 bis 0.25 als Raumluftverbund. Die installierten VSR sind während des Betriebsfalls "Betriebszeit" dauerhaft geöffnet. Die vorhandenen Präsenzmelder werden nur für die Beleuchtung eingesetzt. In den Betriebsfällen "Aufheizvorgang" und "Freie Nachtauskühlung" wird $\dot{V}_{max}$ dauerhaft angefordert.

5.4.2 Betriebsfall "Aufheizvorgang"

Die Vorspülphase der Lüftungsanlage entspricht der in Kapitel 5.3.2 für den Klassentrakt beschriebenen Fahrweise, jedoch ohne Nord-/Süd-Temperaturüberwachung. Die Temperaturregelung erfolgt über Ablufttemperaturfühler im Abluftkanal am Lüftungsgerät.

Um 4 Uhr (Mo) bzw. 5 Uhr (Di-Fr) läuft die Lüftungsanlage im Vollbetrieb an und die Volumenstromregler öffnen auf 100 %. Sie sorgt dabei für den geforderten Luftaustausch sowie die Aufheizung der Räume.

Es gibt kein offizielles zeitliches Ende des Aufheizvorganges, wie ursprünglich geplant (6 Uhr, [5]). Er läuft bis zur Erreichung des Sollwertes. Ob und in welcher Höhe die WRG und das Heizregister während der Aufheizung aktiv sind, ergibt sich aus der gewünschten Zulufttemperatur. Eine Heizgrenze 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.

Die Solltemperaturen der Referenzräume für den Aufheizvorgang sind am Controller und im Webserver hinterlegt. Es sind folgende Sollwerte eingestellt, die der Hausmeister anpassen kann und im Falle der Zulufttemperatur auch witterungsabhängig angepasst hat:

- Sollwert Zulufttemperatur: 15 … 35°C (im Zeitraum 2016/17, siehe Kapitel 7.3)
- Aufheizsollwert Raum: 21 … 22°C (weitgehend unverändert, nicht im Monitoring)

Einen ursprünglich in der Regelung vom Planer vorgesehenen getrennten Sollwert für den Flur von 17°C gibt es nicht [5].

5.4.3 Betriebsfall "Betriebszeit"

Ist der Aufheizfall beendet, beginnt die Betriebszeit. Entgegen der Planung gibt es keinen festen Betriebsbeginn. Ursprünglich war dieser mit 8 Uhr vorgesehen und die Anlage sollte nach der Aufheizung komplett ausschalten [5]. Das passiert jedoch nicht.

Für den Werkraum mit Präsenzregler bedeutet dies, dass die Volumenstromregler nach Ende der Aufheizung auf 0 % zugefahren werden, es sei denn der Präsenzmelder registriert bereits Aktivität, dann bleiben sie offen. Für die Räume mit Zeitprogramm ergibt sich keine Änderung, die Volumenstromregler bleiben 100 % offen. In der Aula beginnt dann die Berücksichtigung von CO_2.

Die restlichen Funktionen entsprechen denen der RLT-Anlage "Klassentrakt", siehe 5.4.3.

In der Aula erfolgt eine Einzelraumregelung mittels Temperatur- und CO_2-Fühler im Abluftkanal der Aula. Bei erreichter Raumtemperatur gemäß manueller Sollwerteinstellung und einem CO_2-Wert < 1.000 ppm erfolgt eine Ansteuerung der Volumenstromregler der Aula durch die Lüftungsgeräteregelung auf eine minimale Luftleistung von 3.200 m³/h. Wird einer der beiden Werte nicht eingehalten, also CO_2-Wert > 1.000 ppm oder Temperatursollwert nicht erreicht, erfolgt eine Ansteuerung der Volumenstromregler für die Aula auf maximal 100 % Öffnung, was einem Volumenstrom für Zu- bzw. Abluft von 7.500 m³/h entspricht.

Im Flur erfolgt eine Einzelraumregelung mittels Temperaturfühler im Abluftkanal. Bei Unterschreiten der Raumtemperatur erfolgt eine Ansteuerung des Dreiwegeventils und der Pumpe für das Nachheizregister. Der Volumenstrom bleibt immer bei $\dot{V}_{max}$.

Es gibt keine witterungsgeführte Regelung der Zulufttemperatur für die Anlage, sondern einen konstanten Festwert. Es sind folgende Sollwerte eingestellt, die der Hausmeister anpassen kann bzw. bis Mitte 2018 jeweils manuell witterungsabhängig angepasst hat:

- Sollwert Zulufttemperatur: 15 … 35°C (im Zeitraum 2016/17, siehe Kapitel 7.3)
- Sollwert Zulufttemperatur Flur: 15 … 42°C (anhand der IST-Werte geschätzt)
- Sollwert CO_2 Aula: 1000 ppm (keine Änderung seit Inbetriebnahme)

An den Einstellungen der "Betriebszeit" wurden im Zuge der Lüftungsoptimierung im Juni 2018 keine Änderungen vorgenommen. Die Zuluft-Konstant-Regelung wird belassen und die Kaskadenregelung nicht aktiviert, da aufgrund der Einzelraumregelung für Flur und Aula große Teile des Gebäudes auch in dem Modus bedarfsgerecht versorgt werden und das System im aktuellen Zustand keine Probleme machte.

Ein bei der Lüftungsoptimierung im Juni 2018 am Rande erkanntes Problem ist: die Regelung setzt für die Aula Raumsollwert und Zuluftsollwert gleich, wodurch der Raumsollwert nie erreicht werden kann. Dadurch kommt es zu unnötigen Betriebszeiten und damit einhergehend zu unnötigen Energieverbräuchen, insbesondere hinsichtlich Ventilatorstrom und Heizenergie. Dies soll im Zuge einer weiteren Optimierung behoben werden. Der Termin wird erst im Winter 2018/19 stattfinden, um gleichzeitig evtl. erkannte Probleme des Klassentraktes (aus der Optimierung vom Juni 2018) mit beheben zu können.

5.4.4 Betriebsfall "Freie Nachtauskühlung"

Die freie Nachtauskühlung wurde am 18.07.2014 in Betrieb genommen. Sie ist jeweils vom 15.04. bis 30.09. von 3 bis 4 Uhr (Mo) bzw. 5 Uhr (Di-Fr) aktiv. Seit dem 04.06.2018 startet sie bereits um 1 Uhr und ist im Zeitraum 01.04. bis 30.10. aktiv geschaltet.

Die sonstigen Randdaten für die Ein- und Ausschaltung der Nachtauskühlung sind identisch zu denen der RLT-Anlage "Klassentrakt", siehe Kapitel 5.3.4.

5.5 Regelschemen andere Anlagen

5.5.1 Abluftanlage

Der Abluftventilator für die WCs im Klassentrakt hat keine eigene Regelung. Er wird gemeinsam mit den anderen beiden Ventilatoren über das MENERGA-Zentralgerät angesteuert. In diesem ist eine feste Differenz von 320 m³/h zwischen dem Zu- und Abluftventilatorvolumenstrom programmiert, die in jedem Betriebsfall aufrechterhalten wird, so dass der gesamte Gebäudeabschnitt in Summe ausbalanciert ist.

5.5.2 Wohnungslüftung

Die Wohnungslüftung wird der gemessenen Ventilatorleistung nach häufig auf Stufe "Niedriglüftung" (ca. 100 m³/h) von der Familie des Hausmeisters betrieben. Nach Nutzerbefragung wird die Anlage im Sommer auch ausgeschaltet. Weitere Untersuchungen fanden hierzu nicht statt.

5.5.3 Küchengrundlüftung

Die geplanten Betriebsbedingungen lauten wie folgt [5]:

- Montag bis Freitag
- 7:00 – 16:00 Uhr
- Stufe "Normal"

Das Programm für die Küchenlüftung kann manuell umgestellt werden. Ob und inwieweit dies durch das Küchenpersonal erfolgte, ist nicht bekannt und wurde auch nicht näher untersucht. Die Messwerte deuten darauf hin, dass ein Dauerbetrieb eingestellt war.

Am 2.8.2018 wurden im Rahmen einer Optimierung folgende Daten eingestellt:

- Montag bis Freitag
- 5:00 – 12:00 Uhr
- Stufe "Normal"
- Sonnabend und Sonntag kein Betrieb

In diesem Zusammenhang wurden die Uhrzeit und der Wochentag korrekt eingestellt (beides vorher falsch).

5.5.4 Koch- und Spülhaube

Die Kochhaube wird manuell vom Nutzer bedient. Es steht ein Bedienpaneel für die Nutzer zur Verfügung, siehe Abbildung 5-8. Der Volumenstrom kann in 5 Stufen bis zum Maximum erhöht werden, die Zulufttemperatur liegt zwischen 10°C und 30°C, wobei keine aktive Kühlung vorhanden ist. Die Kochhaube wird ebenso manuell vom Nutzer über ein analoges Bedienpaneel gesteuert, siehe Abbildung 5-9.

Abbildung 5-8: Bedienpaneel der Lüftungsanlage über dem Kochblock

Abbildung 5-9: Bedienpaneel der Lüftungsanlage über der Spülmaschine

Die Ventilatoren werden entsprechend der manuellen Vorgaben per Frequenzumformer angesteuert. Die Wärmerückgewinnung und das Heizregister sind für die Erreichung der Zulufttemperatur seriell angesteuert.

Außerhalb der Nutzungszeit ist die Anlage ausgeschaltet.

5.6 Optimierung

Zentrale Einstellungen der RLT-Anlage "Klassentrakt" – Juni 2018

Im Zuge der Masterarbeit zur Lüftungsoptimierung von Adrian Rehbein [17] wurden etliche Unstimmigkeiten zwischen der ursprünglich geplanten Regelungsfunktionen der Ingenieurbüros N&S [1] und TUK [5] sowie der Regelungsbeschreibung der Fa. MENERGA [15] [18] und dem realen Betrieb erkannt.

In einem Vor-Ort-Termin sollten einerseits Unklarheiten beseitigt und andererseits Regelungsoptimierungen an der RLT-Anlage "Klassentrakt" vorgenommen werden. Der Ortstermin mit einem Servicetechniker wurde von Herstellerseite mehrfach verschoben. Nach einer Planung ab Januar 2018 fand der Termin am 04./05.06.2018 statt.

Die wesentlichsten regelungs- und betriebstechnischen Unterschiede gegenüber den ursprünglichen Annahmen sollen an dieser Stelle kurz und knapp aufgeführt werden, um einen Überblick über den Sachverhalt abzubilden:

- der Betriebsfall "Freie Nachtauskühlung" war für den Klassentrakt deaktiviert [wurde sofort geändert]
- etliche Zeitschaltbedingungen sind bei den Anlagen von MENERGA grundsätzlich nicht vorgesehen [wurde nicht verändert]
    - eine Sommer-/Winter-Umschaltung bei 16°C – wie in der Planung beschrieben – gibt es nicht,
    - der Aufheizvorgang in Verbindung mit der Durchspülung des Gebäudes findet ganzjährig statt,
    - es gibt kein definiertes Ende – wie geplant um 6 Uhr – des Aufheizvorganges bzw. der Vorspülphase, sondern es schließt sich nahtlos die Betriebszeit an.
- einige Volumenstromregler waren nicht mit der Anlage verdrahtet, so dass sich fehlerhafte Aufzeichnungen über deren Ansteuerung ergaben [muss noch ausgeführt werden]
- die Horträume waren falsch in den himmelsrichtungsabhängigen Gruppen für die Aufheizung zugeordnet [wurde sofort geändert]
- Der regelungsrelevante Temperaturfühler im Referenzraum Nord lag im Stromkasten des Referenzraumes, statt die Temperatur im Raum oder im Abluftkanal des Raumes zu messen [wurde sofort geändert]

Darüber hinaus wurde die Zuluft-Konstant-Regelung für den Klassentrakt ersetzt durch die Kaskadenregelung. Die Phase der freien Nachtlüftung wurde täglich und jährlich verlängert.

Einstellung der Volumenstromregler der RLT-Anlage "Klassentrakt" – August 2018

Der Vor-Ort-Termin im Juni 2018 wurde bereits genutzt, um stichprobenhaft die Einstellung der Volumenstromregler im Klassentrakt zu erfassen. Es zeigte sich, dass keiner der elektronisch einstellbaren VSR den geplanten Einstellwert aufwies.

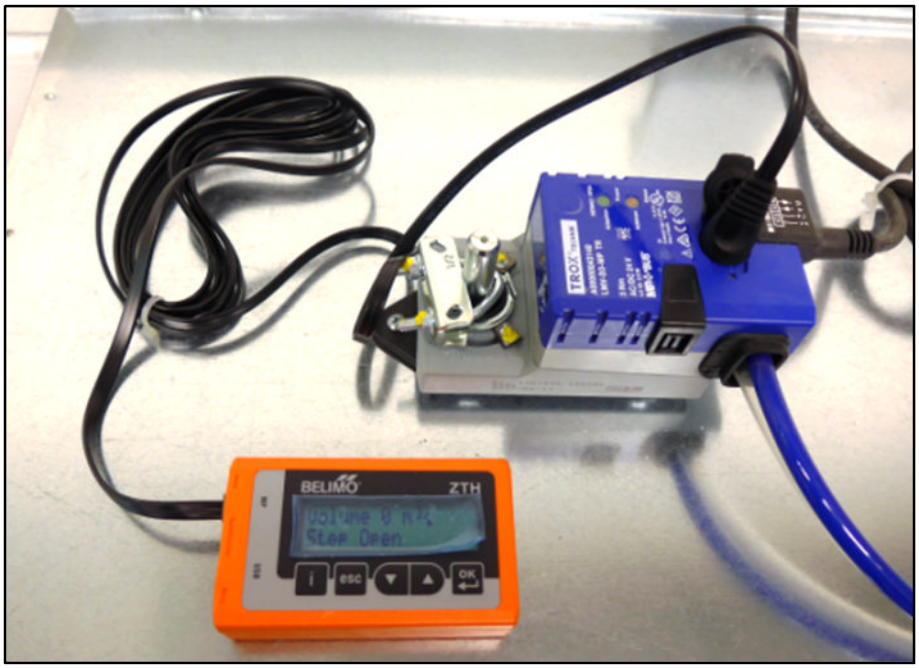

Abbildung 5-10: Anschluss des Programmiergerätes an einen elektronischen VSR

Am 02.08.2018 regulierte das Monitoring-Team die RLT-Anlage Klassentrakt neu ein. Folgender Ablauf wurde gewählt:

- Ausbau des Abluftfilters, der sehr stark verschmutzt war, so dass kein ausreichender Volumenstrom im Abluftnetz erreicht wurde
- Inbetriebnahme der Anlage im Handbetrieb, so dass alle Volumenstromregler vom Zentralgerät zu 100 % geöffnet werden
- Manuelle Öffnung aller Tellerventile an den Öffnungen ohne VSR bis zum möglichen Maximum
- Einregulierung aller elektronischen Volumenstromregler mit dem kabelgebundenen Einstellgerät, siehe Abbildung 5-10
- Einregulierung aller Öffnungen ohne VSR mit dem Anemometer, siehe Abbildung 5-11
- Nachmessen aller mechanischen VSR bzw. ersatzweise von Überströmöffnungen mit dem Anemometer – ohne Einstellungen zu ändern.
- Einbau des alten Abluftfilters und Auslösen einer Nachbestellung von Ersatzfiltern.
- Inbetriebnahme der Anlage im Regelbetrieb.

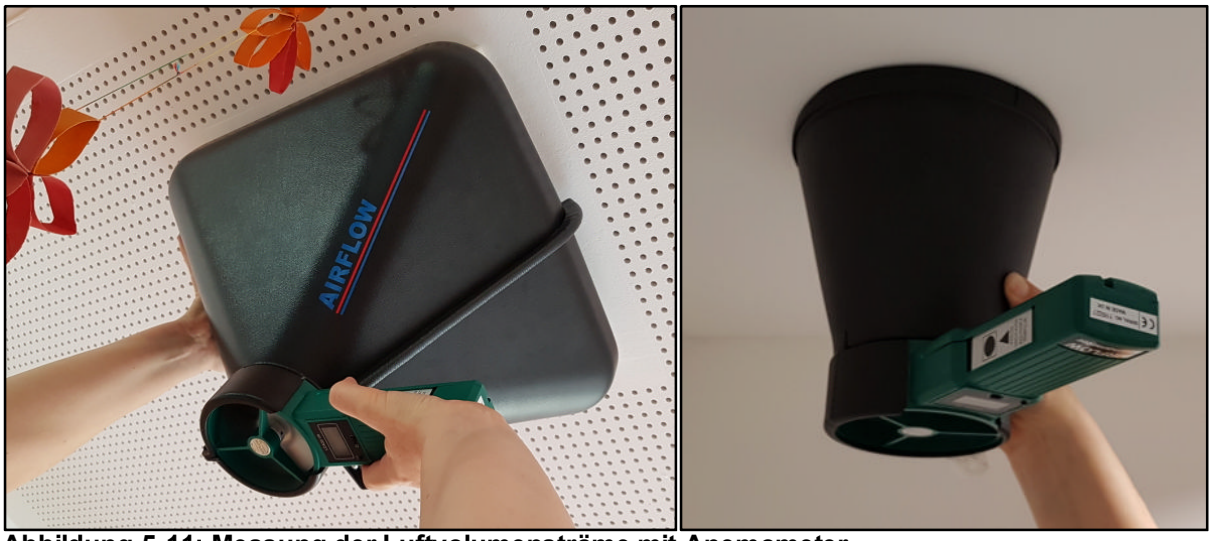

Abbildung 5-11: Messung der Luftvolumenströme mit Anemometer

Die Ergebnisse der Einregulierung zeigen Tabelle 5-2 für die Zuluftanlage sowie Tabelle 5-3 für die Abluftanlage. Es ist folgendes festzustellen:

Im Zuluftweg werden die Volumenströme nach der Einregulierung weitgehend erreicht. Allerdings reicht der Vordruck kaum aus, was an den Reglerzuständen zu erkennen ist; nur wenige Regler sind im Modus der Drosselung. Daher war auch vorher, als die Maximalvolumenströme durchweg höher eingestellt waren, keine Überversorgung eingetreten. Da die Luftqualität in den Räumen gut ist, wird der vorgefundene Zustand zunächst nicht geändert. Er wird im Zuge einer weiteren Lüftungsoptimierung in der Heizperiode 2018/19 eingestellt.

Tabelle 5-2: Volumenstromregler vor und nach Optimierung, Zuluft, Klassentrakt

Raum		Plandaten [m³/h]		VSR Typ	Einstellwerte der VSR [m³/h]					Istwerte nach Einstellung			Hinweise
		Zuluft RLT	Zuluft Über-ström		$\dot{V}_{nom}$	$\dot{V}_{min,alt}$	$\dot{V}_{min,neu}$	$\dot{V}_{max,alt}$	$\dot{V}_{max,neu}$	Δp [Pa]	$\dot{V}_{ist}$ [m³/h]	Regler-zustand	
001	Hort	500	0	LMV-D3-MP TR	2214	0	0	666	500	6	370	100 %	
002	Hort	180	0	M546ED4						-	120	-	*
003	Kindercafé	560	0	LMV-D3-MP TR	2214	0	0	666	560	15	560	100 %	
007	Büro	100	0	LMV-D3-MP TR	1458	0	0	437	292	8	270	100 %	kleinere Einstellung unmöglich, VSR in Decke in Flur
008	Mitarbeiter	60	0	-						-	-	-	mit R 007 gemeinsamer VSR
009	Flur	300	0	ohne						-	277	-	*
011	Spielraum	400	0	LMV-D3-MP TR	2214	0	0	666	443	7	370	100 %	kleinere Einstellung unmöglich
012	Medien	180	0	M546ED4						-	108	-	*
013	Entspannung	180	0	M546ED4						-	150	-	*
014	Werkstatt	400	0	LMV-D3-MP TR	2214	0	0	666	443	7	390	100 %	*
101	Klasse	480	0	LMV-D3-MP TR	2214	0	0	666	480	11	490	52 %	
102	Klasse	480	0	LMV-D3-MP TR	2214	0	0	666	?	?	?	?	ist offen, aber stromlos, überbrückt auf die Abluftanlage
104	Lehrer	180	0	M546ED4						-	104	-	*, Überströmung zu 103 gemessen
105	Flur	280	0	ohne						-	273	-	*
107	Klasse	480	0	LMV-D3-MP TR	2214	0	0	666	480	6	370	100 %	
108	Klasse	480	0	LMV-D3-MP TR	2214	0	0	666	480	8	410	100 %	
201	Klasse	480	0	LMV-D3-MP TR	2214	0	0	666	480	11	480	48 %	
202	Klasse	480	0	LMV-D3-MP TR	2214	0	0	666	480	11	480	43 %	
203	Lüftung	20	0	ohne						-	?	-	nicht messbar
204	Lehrer	180	0	M546ED4						-	?	-	nicht messbar
205	Flur	280	0	ohne						-	284	-	*
207	Klasse	480	0	LMV-D3-MP TR	2214	0	0	666	?	?	?	?	Strom wird überbrückt von Abluft
208	Klasse	480	0	LMV-D3-MP TR	2214	0	0	2214	480	10	480	52 %	
* per Anemometer eingemessen													

In der Abluftanlage wird in praktisch keinem Raum der Sollvolumenstrom erreicht – trotz ausgebautem Abluftfilter. Die Differenz zur Zuluft ist vergleichsweise groß, so dass unklar bleibt, wo die Restmenge an Zuluft verbleibt. Der Abluftventilator zeigt im Monitoring an, dass der Sollvolumenstrom erreicht wird. Das Phänomen wird im Zuge einer weiteren Lüftungsoptimierung in der Heizperiode 2018/19 geklärt und ggf. in diesem Zusammenhang auch der Ventilatordruck erhöht.

Tabelle 5-3: Volumenstromregler vor und nach Optimierung, Abluft, Klassentrakt

Raum		Plandaten [m³/h]		VSR Typ	Einstellwerte der VSR [m³/h]					Istwerte nach Einstellung			Hinweise
		Abluft RLT	Abluft Über-ström		$\dot{V}_{nom}$	$\dot{V}_{min,alt}$	$\dot{V}_{min,neu}$	$\dot{V}_{max,alt}$	$\dot{V}_{max,neu}$	Δp [Pa]	$\dot{V}_{ist}$ [m³/h]	Regler-zustand	
001	Hort	500	0	LMV-D3-MP TR	2214	0	0	666	500	8	260	100 %	in Decke von R 0.02
002	Hort	180	0	M546ED4							40		*
003	Kindercafé	560	0	LMV-D3-MP TR	2214	0	0	666	560	8	420	100 %	
004	HAR / Server	130	0	M546ED4							173		stromlos, *, Überströ-mung zu R 007/008 gemessen
006	WC	30	0	ohne							18		*
009	Flur	190	110	ohne							133		*
011	Spielraum	400	0	LMV-D3-MP TR	2214	0	0	666	443	2	200	100 %	in Decke von R 0.12
012	Medien	180	0	M546ED4							90		*
013	Entspannung	180	0	M546ED4							120		*
014	Werkstatt	400	0	LMV-D3-MP TR	2214	0	0	666	443	1	170	100 %	in Decke von R 0.13
015	WC	30	0	ohne							28		*
017	WC	80	0	ohne							47		*
101	Klasse	480	0	LMV-D3-MP TR	2214	0	0	666	480	7	380	100 %	
102	Klasse	480	0	LMV-D3-MP TR	2214	0	0	666	480	10	460	100 %	
103	Lehrmittel	180	0	M546ED4							123		*
105	Flur	160	120	-							169		*
107	Klasse	480	0	LMV-D3-MP TR	2214	0	0	666	480	4	290	100 %	
108	Klasse	480	0	LMV-D3-MP TR	2214	0	0	666	480	4	310	100 %	
109	WC	30	0	ohne							25		*
110	WC	30	0	ohne							28		*
111	Dusche	30	0	ohne							27		*
112	WC	30	0	ohne							29		*
201	Klasse	480	0	LMV-D3-MP TR	2214	0	0	666	480	6	350	100 %	
202	Klasse	480	0	LMV-D3-MP TR	2214	0	0	666	480	6	350	100 %	
203	Lüftung	20	0	ohne							k. A.		nicht messbar
204	Lehrer	180	0	M546ED4							k. A.		nicht messbar; steht auf Minimum und bewegt sich nicht
205	Flur	160	120	-							165		*
207	Klasse	480	0	LMV-D3-MP TR	2214	0	0	666	480	4	300	100 %	
208	Klasse	480	0	LMV-D3-MP TR	2214	0	0	666	480	5	320	100 %	
209	WC	30	0	ohne							32		*
210	WC	30	0	ohne							32		*
211	Putzen	30	0	ohne							29		*
212	WC	30	0	ohne							29		*
* per Anemometer eingemessen													

5.7 Erkenntnisse und Fazit

Zunächst ist festzuhalten, dass die Lüftungsregelung aller Anlagen grundsätzlich in der Lage ist bzw. wäre, alle gewünschten Regeloptionen abzubilden. Allerdings 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.

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.

Hinsichtlich der einzelnen vorhandenen Regelungsoptionen, Dokumentation usw. werden die Anlagen nachfolgend bewertet. Den konkreten Betrieb bewertet Kapitel 7.

RLT Klassentrakt

Die vorhandenen Optionen sind für das Projekt passend. Die Zuluft-Konstantregelung mit Sollwertvorgabe durch den Hausmeister (als Reaktion auf Nutzerbeschwerden) ist nicht praktikabel. Die im Zuge der Optimierung in Betrieb genommene Kaskadenregelung für die Zulufttemperatur ist sinnvoller. Sie vermindert allerdings nicht das Problem der Ungleichbeheizung, welches sich durch die Zusammenfassung des gesamten Klassentraktes zu einer Lüftungszone ergibt. Siehe auch Abschlussbericht 9.

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. Insbesondere die Lüftung der Räume mit reinem Zeitschaltprogramm startet somit täglich um 4 bzw. 5 Uhr, obwohl teils noch stundenlang keine Personen anwesend sein werden.

Die ursprüngliche Planung, die Regelungstechnik so zu wählen, dass die Lüftungsanlage in der Aufheizphase einen "Selbstlerneffekt" erbringt, wurde nicht umgesetzt. Sinnvoll wäre es. Anhand der vorherrschenden Außentemperaturen, Raumtemperaturen und der Dauer vergangener Aufheizphasen würde das Zentralgerät die benötigte Aufheizdauer intelligent anpassen. Dies würde dazu führen, dass die Aufheizdauer beispielsweise nicht bereits um 5 Uhr, sondern erst um 6:30 Uhr beginnt, wenn sich dies an Tagen mit vergleichbarer Witterung als ausreichend erwiesen hat.

RLT Verwaltungstakt

Die Regelung des Verwaltungstraktes funktioniert insgesamt besser als beim Klassentrakt. Dies ergibt sich, weil die Aula sowie der Flur mit Garderoben Einzelraumregelung aufweisen. Letztlich bleiben nur Kunst- und Werkraum sowie die Räume der Verwaltung (allesamt südlich ausgerichtet), die gemeinsam mit der identischen Zulufttemperatur versorgt werden und keine Einzelraumregelung aufweisen. Es ist vertretbar, dass die Konstanttemperatur-Regelung statt der Kaskadenregelung verwendet wird. Allerdings sind im Zuge weiterer Optimierungen noch Maßnahmen zu treffen, die zu einer korrekten Raumregelung in der Aula führen. Derzeit sind Raumtemperatursollwert und Zulufttemperatursollwert identisch, was dazu führt, dass der Volumenstrom vielfach zu hoch ist.

Die für die RLT-Anlage "Klassentrakt" gegebenen Hinweise zur den Zeitschaltprogrammen gelten ebenso.

Küchenlüftung

Die Prozesslüftung und die Grundlüftung erfüllen ihren geplanten Zweck. Es fehlt eine schriftliche Kurzanweisung für das Küchenpersonal. Sie wurde im Zusammenhang mit dem Monitoringprojekt erstellt, siehe separate Anhänge G und I.

6 Messergebnisse Energie

Der folgende Abschnitt widmet sich der Auswertung der energetischen Aspekte der Raumlufttechnik. Einleitend wird die vorhandene Messtechnik tabellarisch vorgestellt. Die für die Energiebilanzierung definierten Messziele sowie Rechenwege werden erläutert.

Die eigentliche Auswertung umfasst zunächst die Wärmeenergiebilanz der Wärmerückgewinnung sowie Ventilatorabwärme. Die Fernwärme wird im Abschlussbericht 9 ausgewertet. Im Weiteren folgt die Hilfsenergiebilanz für alle Ventilatoren.

Anhand der Messwerte wird die Wärme- und Feuchterückgewinnung bewertet. Anschließend werden Ventilatorwirkungsgrade und SFP-Werte der Ventilatoren bestimmt sowie jeweils eingeordnet.

6.1 Messorte und Messtechnik

Tabelle 6-1 zeigt die Summe aller mit der Lüftungstechnik verbundenen Messfühler bzw. Messpunkte. Sie sind einerseits extra für das Monitoringprojekt installiert worden (GEDES) oder waren bauseits in den RLT-Anlagen bereits vorhanden (MENERGA). Grundlegendes zu dieser Projektarchitektur wird in Bericht 4 erläutert.

Unter der Tabelle wird erläutert, welche Werte zur Energiebilanzierung herangezogen werden. Die Messwerte wurden dazu in Gruppen und Untergruppen unterteilt.

Tabelle 6-1: Messpunkte Lüftung

Messpunktkürzel	Einheit	Gruppe	Untergruppe	Beschreibung
Temperatur- und Feuchtemessung für den Erdwärmeübertrager (GEDES)				
DF0220-5194-0	°C	RLT	EWT	Temperatur_Erdsonde_0_cm
DF0220-519A-0	°C	RLT	EWT	Temperatur_Erdsonde_10_cm
DF0220-5192-0	°C	RLT	EWT	Temperatur_Erdsonde_50_cm
DF0220-519C-0	°C	RLT	EWT	Temperatur_Erdsonde_100_cm
DF0321-618A-0	°C	RLT	EWT	Lufttemperatur_Registereingang_Erdwaermetauscher_BtA
DF0321-618A-1	%	RLT	EWT	Luftfeuchte_Registereingang_Erdwaermetauscher_BtA
DF0321-5188-0	°C	RLT	EWT	Lufttemperatur_Registereingang_Erdwaermetauscher_BtB
DF0321-5188-1	%	RLT	EWT	Luftfeuchte_Registereingang_Erdwaermetauscher_BtB
DF0321-6182-0	°C	RLT	EWT	Lufttemperatur_Registerausgang_Erdwaermetauscher_BtA
DF0321-6182-1	%	RLT	EWT	Luftfeuchte_Registerausgang_Erdwaermetauscher_BtA
DF0321-5184-0	°C	RLT	EWT	Lufttemperatur_Registerausgang_Erdwaermetauscher_BtB
DF0321-5184-1	%	RLT	EWT	Luftfeuchte_Registerausgang_Erdwaermetauscher_BtB
DF0321-6180-0	°C	RLT	EWT	Lufttemperatur_Sammlerausgang_Erdwaermetauscher_BtA
DF0321-6180-1	%	RLT	EWT	Luftfeuchte_Sammlerausgang_Erdwaermetauscher_BtA
DF0321-5186-0	°C	RLT	EWT	Lufttemperatur_Sammlerausgang_Erdwaermetauscher_BtB
DF0321-5186-1	%	RLT	EWT	Luftfeuchte_Sammlerausgang_Erdwaermetauscher_BtB
Leistungsmessungen für die Hilfsenergie der RLT "Verwaltungstrakt" (GEDES)				
DF0118-65A2-0	A	RLT	HEA	Strom_Betrieb_Lueftung_BtA_Phase_L1
DF0118-65A2-5	kW	RLT	HEA	Leistung_Betrieb_Lueftung_BtA_Phase_L1
DF0118-65C2-0	A	RLT	HEA	Strom_Betrieb_Lueftung_BtA_Phase_L2
DF0118-65C2-5	kW	RLT	HEA	Leistung_Betrieb_Lueftung_BtA_Phase_L2
DF0118-65C4-0	A	RLT	HEA	Strom_Betrieb_Lueftung_BtA_Phase_L3
DF0118-65C4-5	kW	RLT	HEA	Leistung_Betrieb_Lueftung_BtA_Phase_L3
DF0118-65A8-0	A	RLT	HEA	Strom_Ventilator_BtA_Zuluft_Phase_L1
DF0118-65A8-5	kW	RLT	HEA	Leistung_Ventilator_BtA_Zuluft_Phase_L1
DF0118-65AA-0	A	RLT	HEA	Strom_Ventilator_BtA_Zuluft_Phase_L2
DF0118-65AA-5	kW	RLT	HEA	Leistung_Ventilator_BtA_Zuluft_Phase_L2
DF0118-65AC-0	A	RLT	HEA	Strom_Ventilator_BtA_Zuluft_Phase_L3
DF0118-65AC-5	kW	RLT	HEA	Leistung_Ventilator_BtA_Zuluft_Phase_L3
DF0118-65B0-0	A	RLT	HEA	Strom_Ventilator_BtA_Abluft_Phase_L1
DF0118-65B0-5	kW	RLT	HEA	Leistung_Ventilator_BtA_Abluft_Phase_L1
DF0118-65B2-0	A	RLT	HEA	Strom_Ventilator_BtA_Abluft_Phase_L2
DF0118-65B2-5	kW	RLT	HEA	Leistung_Ventilator_BtA_Abluft_Phase_L2
DF0118-65B4-0	A	RLT	HEA	Strom_Ventilator_BtA_Abluft_Phase_L3
DF0118-65B4-5	kW	RLT	HEA	Leistung_Ventilator_BtA_Abluft_Phase_L3
VIR_DF0118-65A8	kW	RLT	HEA	Leistung_Ventilator_BtA_Zuluft_Summe

Messpunktkürzel	Ein-heit	Grup-pe	Unter-gruppe	Beschreibung
VIR_DF0118-65B0	kW	RLT	HEA	Leistung_Ventilator_BtA_Abluft_Summe
VIR_DF0118-65AB	kW	RLT	HEA	Leistung_Ventilatoren_BtA_Summe
VIR_DF0118-65A2	kW	RLT	HEA	Leistung_Betrieb_Lueftung_BtA_Summe
Leistungsmessungen für die Hilfsenergie der RLT "Klassentrakt" (GEDES)				
DF0118-54B2-0	A	RLT	HEB	Strom_Ventilator_Zuluft_BtB, eine Phase repraesentativ
DF0118-54B2-5	kW	RLT	HEB	Leistung_Ventilator_Zuluft_BtB_nur_ein Drittel
DF0118-54B4-0	A	RLT	HEB	Strom_Ventilator_Abluft_BtB, eine Phase repraesentativ
DF0118-54B4-5	kW	RLT	HEB	Leistung_Ventilator_Abluft_BtB_nur_ein Drittel
DF0118-54C0-0	A	RLT	HEB	Strom_Betrieb_Lueftung_BtB_Phase_L1
DF0118-54C0-5	kW	RLT	HEB	Leistung_Betrieb_Lueftung_BtB_Phase_L1
DF0118-54C2-0	A	RLT	HEB	Strom_Betrieb_Lueftung_BtB_Phase_L2
DF0118-54C2-5	kW	RLT	HEB	Leistung_Betrieb_Lueftung_BtB_Phase_L2
DF0118-54C4-0	A	RLT	HEB	Strom_Betrieb_Lueftung_BtB_Phase_L3
DF0118-54C4-5	kW	RLT	HEB	Leistung_Betrieb_Lueftung_BtB_Phase_L3
VIR_DF0118-54B2	kW	RLT	HEB	Leistung_Ventilatoren_BtB_Summe
VIR_DF0118-54C0	kW	RLT	HEB	Leistung_Betrieb_Lueftung_BtB_Summe
Leistungsmessungen für die Hilfsenergie der RLT "Hausmeisterwohnung" (GEDES)				
DF0118-57A0-0	A	RLT	HEH	Stromverbrauch_Ventilatoren_Hausmeister
DF0118-57A4-0	A	RLT	HEH	Stromverbrauch_Ventilatoren_Hausmeister
DF0118-57A2-5	kW	RLT	HEH	Leistung_Ventilatoren_Hausmeister_Phase_L1
DF0118-57A0-6	kW	RLT	HEH	Leistung_Ventilatoren_Hausmeister_Phase_L2
DF0118-57A0-7	kW	RLT	HEH	Leistung_Ventilatoren_Hausmeister_Phase_L3
VIR_DF0118-57A2	kW	RLT	HEH	Leistung_Ventilatoren_Hausmeister_Summe
Leistungsmessungen für die Hilfsenergie der RLT "Küche" (GEDES)				
DF0118-61A0-0	A	RLT	HEK	Strom_Kueche_Lueftung_Stromkreis_1
DF0118-61A0-5	kW	RLT	HEK	Leistung_Kueche_Lueftung_Stromkreis_1
DF0118-61B0-0	A	RLT	HEK	Strom_Kueche_Lueftung_Stromkreis_2_Phase_L1
DF0118-61B0-5	kW	RLT	HEK	Leistung_Kueche_Lueftung_Stromkreis_2_Phase_L1
DF0118-61B2-0	A	RLT	HEK	Strom_Kueche_Lueftung_Stromkreis_2_Phase_L2
DF0118-61B2-5	kW	RLT	HEK	Leistung_Kueche_Lueftung_Stromkreis_2_Phase_L2
DF0118-61B4-0	A	RLT	HEK	Strom_Kueche_Lueftung_Stromkreis_2_Phase_L3
DF0118-61B4-5	kW	RLT	HEK	Leistung_Kueche_Lueftung_Stromkreis_2_Phase_L3
DF0118-62A0-0	A	RLT	HEK	Stromverbrauch_Ventilatoren_Kuechen-RLT
DF0118-62A0-5	kW	RLT	HEK	Leistung_Ventilatoren_Kuechen-RLT
VIR_DF0118-61B0	kW	RLT	HEK	Leistung_Kueche_Lueftung_Stromkreis_2_Summe
VIR_DF0118-61AB	kW	RLT	HEK	Leistung_Kueche_Lueftung_Stromkreise_Summe
VIR_DF0118-61AB0	kW	RLT	HEK	Leistung_Kueche_Lueftung Summe
Temperatur- und Feuchtemessung in RLT "Küche" (GEDES)				
DF0321-6252-0	°C	RLT	KLU	Zulufttemperatur_vor_WRG_Kuechengrundlueftung
DF0321-6252-1	%	RLT	KLU	Zuluftfeuchte_vor_WRG_Kuechengrundlueftung
DF0321-624E-0	°C	RLT	KLU	Zulufttemperatur_nach_WRG_Kuechengrundlueftung
DF0321-624E-1	%	RLT	KLU	Zuluftfeuchte_nach_WRG_Kuechengrundlueftung
DF0321-6254-0	°C	RLT	KLU	Ablufttemperatur_vor_WRG_Kuechengrundlueftung
DF0321-6254-1	%	RLT	KLU	Abluftfeuchte_vor_WRG_Kuechengrundlueftung
DF0321-6256-0	°C	RLT	KLU	Ablufttemperatur_nach_WRG_Kuechengrundlueftung
DF0321-6256-1	%	RLT	KLU	Abluftfeuchte_nach_WRG_Kuechengrundlueftung
Temperatur- und Feuchtemessung in RLT "Verwaltungstrakt" (MENERGA)				
A_AU Temp. Gerät min	°C	RLT	MAT	Außentemperatur im Zentralgerät, Minimalwert
A_AU Temp. Gerät	°C	RLT	MAT	Außentemperatur im Zentralgerät, Mittelwert
A_AU Temp. Gerät max	°C	RLT	MAT	Außentemperatur im Zentralgerät, Maximalwert
A_XS Temperatur min	°C	RLT	MAT	Sollwert Zulufttemperatur aus der Geräteregelung, Minimalwert
A_XS Temperatur	°C	RLT	MAT	Sollwert Zulufttemperatur aus der Geräteregelung, Mittelwert
A_XS Temperatur max	°C	RLT	MAT	Sollwert Zulufttemperatur aus der Geräteregelung, Maximalwert
A_XS Temp. aktiv min	°C	RLT	MAT	Sollwert Zulufttemperatur aus ggf. externer GLT, Minimalwert
A_XS Temp. aktiv	°C	RLT	MAT	Sollwert Zulufttemperatur aus ggf. externer GLT, Mittelwert
A_XS Temp. aktiv max	°C	RLT	MAT	Sollwert Zulufttemperatur aus ggf. externer GLT, Maximalwert
A_ZU Temperatur min	°C	RLT	MAT	Zulufttemperatur im Zentralgerät, Minimalwert
A_ZU Temperatur	°C	RLT	MAT	Zulufttemperatur im Zentralgerät, Mittelwert
A_ZU Temperatur max	°C	RLT	MAT	Zulufttemperatur im Zentralgerät, Maximalwert
A_ZU Temperatur extern min	°C	RLT	MAT	Zulufttemperatur hinter der Anlage im Zuluftkanal, Minimalwert
A_ZU Temperatur extern	°C	RLT	MAT	Zulufttemperatur hinter der Anlage im Zuluftkanal, Mittelwert
A_ZU Temperatur extern max	°C	RLT	MAT	Zulufttemperatur hinter der Anlage im Zuluftkanal, Maximalwert
A_ZU Temperatur Flur min	°C	RLT	MAT	Zulufttemperatur für den Flur nach Zentralgerät, Minimalwert
A_ZU Temperatur Flur	°C	RLT	MAT	Zulufttemperatur für den Flur nach Zentralgerät, Mittelwert
A_ZU Temperatur Flur max	°C	RLT	MAT	Zulufttemperatur für den Flur nach Zentralgerät, Maximalwert
A_RA Temperatur Aula min	°C	RLT	MAT	Raumtemperatur im Abluftkanal der Aula, Minimalwert
A_RA Temperatur Aula	°C	RLT	MAT	Raumtemperatur im Abluftkanal der Aula, Mittelwert
A_RA Temperatur Aula max	°C	RLT	MAT	Raumtemperatur im Abluftkanal der Aula, Maximalwert
A_RA Temperatur Flur min	°C	RLT	MAT	Raumtemperatur im Abluftkanal des Flurs, Minimalwert
A_RA Temperatur Flur	°C	RLT	MAT	Raumtemperatur im Abluftkanal des Flurs, Mittelwert
A_RA Temperatur Flur max	°C	RLT	MAT	Raumtemperatur im Abluftkanal des Flurs, Maximalwert

Messpunktkürzel	Ein-heit	Grup-pe	Unter-gruppe	Beschreibung
A_AB Temperatur min	°C	RLT	MAT	Ablufttemperatur im Zentralgerät, Minimalwert
A_AB Temperatur	°C	RLT	MAT	Ablufttemperatur im Zentralgerät, Mittelwert
A_AB Temperatur max	°C	RLT	MAT	Ablufttemperatur im Zentralgerät, Maximalwert
zusätzliche Temperatur- und Feuchtemessung in RLT "Verwaltungstrakt" (GEDES)				
DF0321-654E-0	°C	RLT	BTA	Zulufttemperatur_fuer_Flure_BtA
DF0321-654E-1	%	RLT	BTA	Zuluftfeuchte_fuer_Flure_BtA
DF0321-6552-0	°C	RLT	BTA	Zulufttemperatur_fuer_Aula
DF0321-6552-1	%	RLT	BTA	Zuluftfeuchte_fuer_Aula
DF0321-6554-0	°C	RLT	BTA	Aussenlufteintrittstemperatur_in_RLT-Geraet_BtA
DF0321-6554-1	%	RLT	BTA	Aussenlufteintrittsfeuchte_in_RLT-Geraet_BtA
DF0321-6556-0	°C	RLT	BTA	Fortluftaustrittstemperatur_aus_RLT-Geraet_BtA
DF0321-6556-1	%	RLT	BTA	Fortluftaustrittsfeuchte_aus_RLT-Geraet_BtA
DF0321-6558-0	°C	RLT	BTA	Ablufttemperatur_aus_Aula_im_Kanal
DF0321-6558-1	%	RLT	BTA	Abluftfeuchte_aus_Aula_im_Kanal
DF0321-6560-0	°C	RLT	BTA	Zulufttemperatur_vor_Heizregister_RLT_BtA
DF0321-6560-1	%	RLT	BTA	Zuluftfeuchte_vor_Heizregister_RLT_BtA
CO_2-Messung in RLT "Verwaltungstrakt" (MENERGA)				
A_XS CO2 aktiv min	ppm	RLT	MAC	Sollwert CO2 Wert in der Aula, Minimalwert
A_XS CO2 aktiv	ppm	RLT	MAC	Sollwert CO2 Wert in der Aula, Mittelwert
A_XS CO2 aktiv max	ppm	RLT	MAC	Sollwert CO2 Wert in der Aula, Maximalwert
A_CO2-Sensor min	ppm	RLT	MAC	CO2 Wert in der Aula, Minimalwert
A_CO2-Sensor	ppm	RLT	MAC	CO2 Wert in der Aula, Mittelwert
A_CO2-Sensor max	ppm	RLT	MAC	CO2 Wert in der Aula, Maximalwert
Regelungsparameter in RLT "Verwaltungstrakt" (MENERGA)				
A_Regler Temperatur min	%	RLT	MAT	Stand des Reglers auf der Regelkurve, Minimalwert
A_Regler Temperatur	%	RLT	MAT	Stand des Reglers auf der Regelkurve, Mittelwert
A_Regler Temperatur max	%	RLT	MAT	Stand des Reglers auf der Regelkurve, Maximalwert
A_PWW-Ventil Stellung min	%	RLT	MAR	Stellung des Dreiwegeventils zur Heizung, Minimalwert
A_PWW-Ventil Stellung	%	RLT	MAR	Stellung des Dreiwegeventils zur Heizung, Mittelwert
A_PWW-Ventil Stellung max	%	RLT	MAR	Stellung des Dreiwegeventils zur Heizung, Maximalwert
A_Ya ZU-FU min	%	RLT	MAR	Stellung Frequenzumrichter Zuluftventilator, Minimalwert
A_Ya ZU-FU	%	RLT	MAR	Stellung Frequenzumrichter Zuluftventilator, Mittelwert
A_Ya ZU-FU max	%	RLT	MAR	Stellung Frequenzumrichter Zuluftventilator, Maximalwert
A_Ya AB-FU min	%	RLT	MAR	Stellung Frequenzumrichter Abluftventilator, Minimalwert
A_Ya AB-FU	%	RLT	MAR	Stellung Frequenzumrichter Abluftventilator, Mittelwert
A_Ya AB-FU max	%	RLT	MAR	Stellung Frequenzumrichter Abluftventilator, Maximalwert
A_Taktzeitveränderung min	%	RLT	MAW	WRG (0%) oder Bypass (100%), Minimalwert
A_Taktzeitveränderung	%	RLT	MAW	WRG (0%) oder Bypass (100%), Mittelwert
A_Taktzeitveränderung max	%	RLT	MAW	WRG (0%) oder Bypass (100%), Maximalwert
A_Ya ZU/AB-Klappe min	%	RLT	MAR	Stellung der zentralen Geräteklappen, Minimalwert
A_Ya ZU/AB-Klappe	%	RLT	MAR	Stellung der zentralen Geräteklappen, Mittelwert
A_Ya ZU/AB-Klappe max	%	RLT	MAR	Stellung der zentralen Geräteklappen, Maximalwert
Volumenströme und Ventilatordruckerhöhung in RLT "Verwaltungstrakt" (MENERGA)				
A_ZU Volumen min	m³/h	RLT	MAV	Zuluftvolumenstrom, Minimalwert
A_ZU Volumen	m³/h	RLT	MAV	Zuluftvolumenstrom, Mittelwert
A_ZU Volumen max	m³/h	RLT	MAV	Zuluftvolumenstrom, Mittelwert
A_ZU Ventil. Druck min	Pa	RLT	MAD	Druckerhöhung Zuluftventilator, Minimalwert
A_ZU Ventil. Druck	Pa	RLT	MAD	Druckerhöhung Zuluftventilator, Mittelwert
A_ZU Ventil. Druck max	Pa	RLT	MAD	Druckerhöhung Zuluftventilator, Maximalwert
A_AB Volumen min	m³/h	RLT	MAV	Abluftvolumenstrom, Minimalwert
A_AB Volumen	m³/h	RLT	MAV	Abluftvolumenstrom, Mittelwert
A_AB Volumen max	m³/h	RLT	MAV	Abluftvolumenstrom, Maximalwert
A_AB Ventil. Druck min	Pa	RLT	MAD	aktuelle Druckerhöhung Abluftventilator, Minimalwert
A_AB Ventil. Druck	Pa	RLT	MAD	aktuelle Druckerhöhung Abluftventilator, Mittelwert
A_AB Ventil. Druck max	Pa	RLT	MAD	aktuelle Druckerhöhung Abluftventilator, Maximalwert
A_AB Druck MAX min	Pa	RLT	MAD	Druckerhöhung Abluftventilator Abschaltung, Minimalwert
A_AB Druck MAX	Pa	RLT	MAD	Druckerhöhung Abluftventilator Abschaltung, Mittelwert
A_AB Druck MAX	Pa	RLT	MAD	Druckerhöhung Abluftventilator Abschaltung, Maximalwert
A_ZU Druck Kanal min	Pa	RLT	MAD	Differenzdruck Schlechtpunkt Zuluftkanalnetz, Minimalwert
A_ZU Druck Kanal	Pa	RLT	MAD	Differenzdruck Schlechtpunkt Zuluftkanalnetz, Mittelwert
A_ZU Druck Kanal max	Pa	RLT	MAD	Differenzdruck Schlechtpunkt Zuluftkanalnetz, Maximalwert
A_XS ZU Druck Kanal min	Pa	RLT	MAD	Sollwert Differenzdruck Schlechtpunkt Zuluftkanal, Minimalwert
A_XS ZU Druck Kanal	Pa	RLT	MAD	Sollwert Differenzdruck Schlechtpunkt Zuluftkanal, Mittelwert
A_XS ZU Druck Kanal max	Pa	RLT	MAD	Sollwert Differenzdruck Schlechtpunkt Zuluftkanal, Maximalwert
Filterdruckverluste in RLT "Verwaltungstrakt" (MENERGA)				
A_AU Filter Druck min	Pa	RLT	MAD	Druckverlust Außenluftfilter, Minimalwert
A_AU Filter Druck	Pa	RLT	MAD	Druckverlust Außenluftfilter, Mittelwert
A_AU Filter Druck max	Pa	RLT	MAD	Druckverlust Außenluftfilter, Mittelwert
A_ZU Filter Druck min	Pa	RLT	MAD	Druckverlust Zuluftfilter, Minimalwert
A_ZU Filter Druck	Pa	RLT	MAD	Druckverlust Zuluftfilter, Mittelwert
A_ZU Filter Druck max	Pa	RLT	MAD	Druckverlust Zuluftfilter, Mittelwert

Messpunktkürzel	Ein-heit	Grup-pe	Unter-gruppe	Beschreibung
A_AB Filter Druck min	Pa	RLT	MAD	Druckverlust Abluftfilter, Minimalwert
A_AB Filter Druck	Pa	RLT	MAD	Druckverlust Abluftfilter, Mittelwert
A_AB Filter Druck max	Pa	RLT	MAD	Druckverlust Abluftfilter, Mittelwert
Volumenstromregler in RLT "Verwaltungstrakt" (MENERGA)				
A_VSR Raum 214 min	%	RLT	MAR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 214, Minimalwert
A_VSR Raum 214	%	RLT	MAR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 214, Mittelwert
A_VSR Raum 214 max	%	RLT	MAR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 214, Maximalwert
A_VSR Raum 216 min	%	RLT	MAR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 216, Minimalwert
A_VSR Raum 216	%	RLT	MAR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 216, Mittelwert
A_VSR Raum 216 max	%	RLT	MAR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 216, Maximalwert
A_VSR Raum 217 min	%	RLT	MAR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 217, Minimalwert
A_VSR Raum 217	%	RLT	MAR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 217, Mittelwert
A_VSR Raum 217 max	%	RLT	MAR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 217, Maximalwert
A_VSR Flur min	%	RLT	MAR	Stellung des Volumenstromreglers Flur, Minimalwert
A_VSR Flur	%	RLT	MAR	Stellung des Volumenstromreglers Flur, Mittelwert
A_VSR Flur max	%	RLT	MAR	Stellung des Volumenstromreglers Flur, Maximalwert
A_VSR Raum 114 min	%	RLT	MAR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 114, Minimalwert
A_VSR Raum 114	%	RLT	MAR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 114, Mittelwert
A_VSR Raum 114 max	%	RLT	MAR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 114, Maximalwert
A_VSR Raum 121 min	%	RLT	MAR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 121, Minimalwert
A_VSR Raum 121	%	RLT	MAR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 121, Mittelwert
A_VSR Raum 121 max	%	RLT	MAR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 121, Maximalwert
Meldungen in RLT "Verwaltungstrakt" (MENERGA)				
A_Wartung	-	RLT	MAS	Fehlermeldung Wartung
A_Störung	-	RLT	MAS	Fehlermeldung Störung
A_Lüftung ein	-	RLT	MAS	Aufzeichnung über Anlagenbetrieb
A_ZU Ventilator Betrieb	-	RLT	MAS	Aufzeichnung über Betrieb des Zuluftventilators
A_AB Ventilator Betrieb	-	RLT	MAS	Aufzeichnung über Betrieb des Abluftventilators
A_PWW-Pumpe	-	RLT	MAS	Aufzeichnung über Betrieb der Pumpe Fernwärme
A_Störung PWW-Pumpe	-	RLT	MAS	Fehlermeldung Pumpe Fernwärme
A_A Alarm	-	RLT	MAS	Alarme
A_B Alarm	-	RLT	MAS	Alarme
Temperatur- und Feuchtemessung in RLT "Klassentrakt" (MENERGA)				
B_AB Temperatur min	°C	RLT	MBT	Ablufttemperatur im Zentralgerät, Minimalwert
B_AB Temperatur	°C	RLT	MBT	Ablufttemperatur im Zentralgerät, Mittelwert
B_AB Temperatur max	°C	RLT	MBT	Ablufttemperatur im Zentralgerät, Maximalwert
B_ZU Temperatur min	°C	RLT	MBT	Zulufttemperatur im Zentralgerät, Minimalwert
B_ZU Temperatur	°C	RLT	MBT	Zulufttemperatur im Zentralgerät, Mittelwert
B_ZU Temperatur max	°C	RLT	MBT	Zulufttemperatur im Zentralgerät, Maximalwert
B_AU Temp. Gerät min	°C	RLT	MBT	Außentemperatur im Zentralgerät, Minimalwert
B_AU Temp. Gerät	°C	RLT	MBT	Außentemperatur im Zentralgerät, Mittelwert
B_AU Temp. Gerät max	°C	RLT	MBT	Außentemperatur im Zentralgerät, Maximalwert
B_ZU Temperatur extern min	°C	RLT	MBT	Zulufttemperatur hinter der Anlage im Zuluftkanal, Minimalwert
B_ZU Temperatur extern	°C	RLT	MBT	Zulufttemperatur hinter der Anlage im Zuluftkanal, Mittelwert
B_ZU Temperatur extern max	°C	RLT	MBT	Zulufttemperatur hinter der Anlage im Zuluftkanal, Maximalwert
B_RA Temperatur Nord min	°C	RLT	MBT	Raumtemperatur im Referenzraum Nord, Minimalwert
B_RA Temperatur Nord	°C	RLT	MBT	Raumtemperatur im Referenzraum Nord, Mittelwert
B_RA Temperatur Nord max	°C	RLT	MBT	Raumtemperatur im Referenzraum Nord, Maximalwert
B_RA Temperatur Süd min	°C	RLT	MBT	Raumtemperatur im Referenzraum Süd, Minimalwert
B_RA Temperatur Süd	°C	RLT	MBT	Raumtemperatur im Referenzraum Süd, Mittelwert
B_RA Temperatur Süd max	°C	RLT	MBT	Raumtemperatur im Referenzraum Süd, Maximalwert
B_XS Temperatur min	°C	RLT	MBT	Sollwert Zulufttemperatur aus der Geräteregelung, Minimalwert
B_XS Temperatur	°C	RLT	MBT	Sollwert Zulufttemperatur aus der Geräteregelung, Mittelwert
B_XS Temperatur max	°C	RLT	MBT	Sollwert Zulufttemperatur aus der Geräteregelung, Maximalwert
B_XS Temp. aktiv min	°C	RLT	MBT	Sollwert Zulufttemperatur aus ggf. externer GLT, Minimalwert
B_XS Temp. aktiv	°C	RLT	MBT	Sollwert Zulufttemperatur aus ggf. externer GLT, Mittelwert
B_XS Temp. aktiv max	°C	RLT	MBT	Sollwert Zulufttemperatur aus ggf. externer GLT, Maximalwert
zusätzliche Temperatur- und Feuchtemessung in RLT "Klassentrakt" (GEDES)				
DF0321-5452-0	°C	RLT	BTB	Temperatur_Abluft_vor_WRG_RLT-Anlage_BtB
DF0321-5452-1	%	RLT	BTB	Feuchte_Abluft_vor_WRG_RLT-Anlage_BtB
DF0321-5454-0	°C	RLT	BTB	Temperatur_Aussenluft_vor_WRG_RLT-Anlage_BtB
DF0321-5454-1	%	RLT	BTB	Feuchte_Aussen_vor_WRG_RLT-Anlage_BtB
DF0321-5456-0	°C	RLT	BTB	Temperatur_Fortluft_nach_WRG_RLT-Anlage_BtB
DF0321-5456-1	%	RLT	BTB	Feuchte_Fortluft_nach_WRG_RLT-Anlage_BtB
DF0321-5458-0	°C	RLT	BTB	Temperatur_Zuluft_nach_WRG_RLT-Anlage_BtB
DF0321-5458-1	%	RLT	BTB	Feuchte_Zuluft_nach_WRG_RLT-Anlage_BtB
DF0321-5460-0	°C	RLT	BTB	Temperatur_Zuluft_vor_Heizregister_RLT-Anlage_BtB
DF0321-5460-1	%	RLT	BTB	Feuchte_Zuluft_vor_Heizregister_RLT-Anlage_BtB
DF0810-5452-0	°C	RLT	BTB	Temperatur_Abluft_vor_WRG_in_RLT-Geraet_BtB
DF0810-5452-1	%	RLT	BTB	Feuchte_Abluft_vor_WRG_in_RLT-Geraet_BtB
DF0810-5454-0	°C	RLT	BTB	Aussenlufteintrittstemperatur_in_RLT-Geraet_BtB

Messpunktkürzel	Einheit	Gruppe	Untergruppe	Beschreibung
DF0810-5454-1	%	RLT	BTB	Aussenlufteintrittsfeuchte_in_RLT-Geraet_BtB
DF0810-5456-0	°C	RLT	BTB	Temperatur_Fortluft_nach_WRG_in_RLT-Geraet_BtB
DF0810-5456-1	%	RLT	BTB	Feuchte_Fortluft_nach_WRG_in_RLT-Geraet_BtB
DF0810-5458-0	°C	RLT	BTB	Temperatur_Zuluft_nach_WRG_in_RLT-Geraet_BtB
DF0810-5458-1	%	RLT	BTB	Feuchte_Zuluft_nach_WRG_in_RLT-Geraet_BtB
Regelungsparameter in RLT "Verwaltungstrakt" (MENERGA)				
B_Ya ZU-FU min	%	RLT	MBR	Stellung Frequenzumrichter Zuluftventilator, Minimalwert
B_Ya ZU-FU	%	RLT	MBR	Stellung Frequenzumrichter Zuluftventilator, Mittelwert
B_Ya ZU-FU max	%	RLT	MBR	Stellung Frequenzumrichter Zuluftventilator, Maximalwert
B_Ya AB-FU min	%	RLT	MBR	Stellung Frequenzumrichter Zuluftventilator, Minimalwert
B_Ya AB-FU	%	RLT	MBR	Stellung Frequenzumrichter Zuluftventilator, Mittelwert
B_Ya AB-FU max	%	RLT	MBR	Stellung Frequenzumrichter Zuluftventilator, Maximalwert
B_Regler Temperatur min	%	RLT	MBT	Stand des Reglers auf der Regelkurve, Minimalwert
B_Regler Temperatur	%	RLT	MBT	Stand des Reglers auf der Regelkurve, Mittelwert
B_Regler Temperatur max	%	RLT	MBT	Stand des Reglers auf der Regelkurve, Maximalwert
B_PWW-Ventil Stellung min	%	RLT	MBR	Stellung des Dreiwegeventils zur Heizung, Minimalwert
B_PWW-Ventil Stellung	%	RLT	MBR	Stellung des Dreiwegeventils zur Heizung, Mittelwert
B_PWW-Ventil Stellung max	%	RLT	MBR	Stellung des Dreiwegeventils zur Heizung, Maximalwert
B_Taktzeitveränderung min	%	RLT	MBW	WRG (0%) oder Bypass (100%), Minimalwert
B_Taktzeitveränderung	%	RLT	MBW	WRG (0%) oder Bypass (100%), Mittelwert
B_Taktzeitveränderung max	%	RLT	MBW	WRG (0%) oder Bypass (100%), Maximalwert
Volumenströme und Ventilatordruckerhöhung in RLT "Verwaltungstrakt" (MENERGA)				
B_AB Volumen min	m³/h	RLT	MBV	Abluftvolumenstrom, Minimalwert
B_AB Volumen	m³/h	RLT	MBV	Abluftvolumenstrom, Mittelwert
B_AB Volumen max	m³/h	RLT	MBV	Abluftvolumenstrom, Maximalwert
B_ZU Volumen min	m³/h	RLT	MBV	Zuluftvolumenstrom, Minimalwert
B_ZU Volumen	m³/h	RLT	MBV	Zuluftvolumenstrom, Mittelwert
B_ZU Volumen max	m³/h	RLT	MBV	Zuluftvolumenstrom, Maximalwert
B_AB Ventil. Druck min	Pa	RLT	MBD	Druckerhöhung Abluftventilator, Minimalwert
B_AB Ventil. Druck	Pa	RLT	MBD	Druckerhöhung Abluftventilator, Mittelwert
B_AB Ventil. Druck max	Pa	RLT	MBD	Druckerhöhung Abluftventilator, Maximalwert
B_ZU Ventil. Druck min	Pa	RLT	MBD	Druckerhöhung Zuluftventilator, Minimalwert
B_ZU Ventil. Druck	Pa	RLT	MBD	Druckerhöhung Zuluftventilator, Mittelwert
B_ZU Ventil. Druck max	Pa	RLT	MBD	Druckerhöhung Zuluftventilator, Maximalwert
B_ZU Druck Kanal min	Pa	RLT	MBD	Differenzdruck Schlechtpunkt Zuluftkanalnetz, Minimalwert
B_ZU Druck Kanal	Pa	RLT	MBD	Differenzdruck Schlechtpunkt Zuluftkanalnetz, Mittelwert
B_ZU Druck Kanal max	Pa	RLT	MBD	Differenzdruck Schlechtpunkt Zuluftkanalnetz, Maximalwert
B_XS ZU Druck Kanal min	Pa	RLT	MBD	Sollwert Differenzdruck Schlechtpunkt Zuluftkanal, Minimalwert
B_XS ZU Druck Kanal	Pa	RLT	MBD	Sollwert Differenzdruck Schlechtpunkt Zuluftkanal, Mittelwert
B_XS ZU Druck Kanal max	Pa	RLT	MBD	Sollwert Differenzdruck Schlechtpunkt Zuluftkanal, Maximalwert
Filterdruckverluste in RLT "Klassentrakt" (MENERGA)				
B_AU Filter Druck min	Pa	RLT	MBD	Druckverlust Außenluftfilter, Minimalwert
B_AU Filter Druck	Pa	RLT	MBD	Druckverlust Außenluftfilter, Mittelwert
B_AU Filter Druck max	Pa	RLT	MBD	Druckverlust Außenluftfilter, Maximalwert
B_AB Filter Druck min	Pa	RLT	MBD	Druckverlust Abluftfilter, Minimalwert
B_AB Filter Druck	Pa	RLT	MBD	Druckverlust Abluftfilter, Mittelwert
B_AB Filter Druck max	Pa	RLT	MBD	Druckverlust Abluftfilter, Maximalwert
B_ZU Filter Druck min	Pa	RLT	MBD	Druckverlust Zuluftfilter, Minimalwert
B_ZU Filter Druck	Pa	RLT	MBD	Druckverlust Zuluftfilter, Mittelwert
B_ZU Filter Druck max	Pa	RLT	MBD	Druckverlust Zuluftfilter, Maximalwert
Volumenstromregler in RLT "Klassentrakt" (MENERGA)				
B_VSR Nord Raum 202 min	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 202, Minimalwert
B_VSR Nord Raum 202	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 202, Mittelwert
B_VSR Nord Raum 202 max	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 202, Maximalwert
B_VSR Nord Raum 201 min	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 201, Minimalwert
B_VSR Nord Raum 201	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 201, Mittelwert
B_VSR Nord Raum 201 max	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 201, Maximalwert
B_VSR Nord Raum 102 min	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 102, Minimalwert
B_VSR Nord Raum 102	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 102, Mittelwert
B_VSR Nord Raum 102 max	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 102, Maximalwert
B_VSR Nord Raum 101 min	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 101, Minimalwert
B_VSR Nord Raum 101	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 101, Mittelwert
B_VSR Nord Raum 101 max	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 101, Maximalwert
B_VSR Nord Raum 014 min	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 014, Minimalwert
B_VSR Nord Raum 014	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 014, Mittelwert
B_VSR Nord Raum 014 max	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 014, Maximalwert
B_VSR Nord Raum 013 min	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 013, Minimalwert
B_VSR Nord Raum 013	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 013, Mittelwert
B_VSR Nord Raum 013 max	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 013, Maximalwert
B_VSR Nord Raum 012 min	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 012, Minimalwert
B_VSR Nord Raum 012	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 012, Mittelwert

Messpunktkürzel	Ein-heit	Grup-pe	Unter-gruppe	Beschreibung
B_VSR Nord Raum 012 max	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 012, Maximalwert
B_VSR Nord Raum 011 min	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 011, Minimalwert
B_VSR Nord Raum 011	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 011, Mittelwert
B_VSR Nord Raum 011 max	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 011, Maximalwert
B_VSR Süd Raum 107 min	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 107, Minimalwert
B_VSR Süd Raum 107	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 107, Mittelwert
B_VSR Süd Raum 107 max	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 107, Maximalwert
B_VSR Süd Raum 108 min	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 108, Minimalwert
B_VSR Süd Raum 108	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 108, Mittelwert
B_VSR Süd Raum 108 max	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 108, Maximalwert
B_VSR Süd Raum 207 min	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 207, Minimalwert
B_VSR Süd Raum 207	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 207, Mittelwert
B_VSR Süd Raum 207 max	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 207, Maximalwert
B_VSR Süd Raum 208 min	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 208, Minimalwert
B_VSR Süd Raum 208	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 208, Mittelwert
B_VSR Süd Raum 208 max	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 208, Maximalwert
B_VSR Süd Raum 001 min	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 001, Minimalwert
B_VSR Süd Raum 001	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 001, Mittelwert
B_VSR Süd Raum 001 max	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 001, Maximalwert
B_VSR Süd Raum 002 min	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 002, Minimalwert
B_VSR Süd Raum 002	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 002, Mittelwert
B_VSR Süd Raum 002 max	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 002, Maximalwert
B_VSR Süd Raum 003 min	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 003, Minimalwert
B_VSR Süd Raum 003	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 003, Mittelwert
B_VSR Süd Raum 003 max	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 003, Maximalwert
B_VSR Süd Raum 008 min	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 008, Minimalwert
B_VSR Süd Raum 008	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 008, Mittelwert
B_VSR Süd Raum 008 max	%	RLT	MBR	Stellung des Volumenstromreglers Raum 008, Maximalwert
Meldungen in RLT "Verwaltungstrakt" (MENERGA)				
B_Wartung	-	RLT	MBS	Fehlermeldung Wartung
B_Störung	-	RLT	MBS	Fehlermeldung Störung
B_Lüftung ein	-	RLT	MBS	Aufzeichnung über Anlagenbetrieb
B_ZU Ventilator Betrieb	-	RLT	MBS	Aufzeichnung über Betrieb des Zuluftventilators
B_AB Ventilator Betrieb	-	RLT	MBS	Aufzeichnung über Betrieb des Abluftventilators
B_PWW-Pumpe	-	RLT	MBS	Aufzeichnung über Betrieb der Pumpe Fernwärme
B_Störung PWW-Pumpe	-	RLT	MBS	Fehlermeldung Pumpe Fernwärme
B_A Alarm	-	RLT	MBS	Alarme
B_B Alarm	-	RLT	MBS	Alarme
B_ext.AB-Ventilator	-	RLT	MBS	Aufzeichnung über Betrieb des WC Abluftventilators

Ein Teil der Messdaten wird zur Erstellung der Energiebilanz verwendet. Die formelmäßige Herangehensweise wird nachfolgend erläutert.

Hydraulische Leistung und Energie

Aus den Volumenströmen $\dot{V}$ [m³/h bzw. m³/s] und Druckerhöhungen der Ventilatoren Δp [Pa] kann die hydraulische Leistung P_{Hyd} [W] bestimmt werden. Durch Summation der Leistungen im vorhandenen 10-Minuten-Intervall (t) ergibt sich die hydraulische Energiemenge W_{Hyd} [kWh]. Diese Näherung wird statt der eigentlich erforderlichen Integration verwendet. Die Messwerte entstammen den Untergruppen MAV und MAD (RLT Verwaltungstrakt) sowie MBV und MBD (RLT Klassentrakt).

$$P_{Hyd} = \dot{V} \cdot \Delta p$$
$$W_{Hyd} = \Sigma(P_{Hyd} \cdot t)$$

Die entsprechende Auswertung ist nur ein Zwischenschritt zur Bestimmung der Ventilatoreffizienz sowie Ventilatorabwärme.

Elektrische Leistung und Energie

Die gemessenen Leistungen der Ventilatoren sind zumeist dreiphasig vorhanden. Die Zahlenwerte der drei Phasen werden addiert zur elektrischen Gesamtleistung P_{El} [W]. Anschließend erfolgt eine Summation der Leistungen in den vorhandenen 10-Minuten-Intervallen (t) zur Energiemenge Q_{El} [kWh]. Die Messwerte entstammen den Untergruppen HEA und HEB (Zentrale RLT-Anlagen) sowie HEH und HEK (Hausmeister und Küche).

$$P_{El} = \Sigma(P_{El})_{Phasen}$$
$$Q_{El} = \Sigma(P_{El} \cdot t)$$

Die Ergebnisse dieser Auswertung sind im Kapitel 6.3 zu finden.

Ventilatorwirkungsgrad und Ventilatorabwärme

Aus der hydraulischen Leistung P_{Hyd} [W] und der elektrischen Leistung P_{El} [W] werden der Ventilatorwirkungsgrad η_{El} [-] sowie die Abwärmeleistung $\dot{Q}_{Ab}$ [W] bestimmt. Werden statt der Leistungen die Energiemengen als Eingangsgrößen verwendet, resultieren der Ventilatornutzungsgrad η_{ges} [-] sowie die Abwärmemenge Q_{Ab} [kWh].

$$\eta_{El} = \frac{P_{Hyd}}{P_{El}} \quad \text{bzw.} \quad \eta_{ges} = \frac{W_{Hyd}}{Q_{El}}$$
$$\dot{Q}_{Ab} = P_{El} - P_{Hyd} \quad \text{bzw.} \quad Q_{Ab} = Q_{El} - W_{Hyd}$$

Die Auswertung der Ventilatoreffizienz ist im Kapitel 6.5 zu finden. Diagramme zur Ventilatorabwärme sind im Kapitel 6.2.2 hinterlegt.

Rückwärmzahl und Rückfeuchtzahl

Für die Einrichtungen zur Wärme- und ggf. Feuchterückgewinnung werden mit Rückwärm- und Rückfeuchtzahlen bewertet. Es wird zurückgegriffen auf vier Temperaturen, jeweils direkt vor und nach der Einrichtung zur Wärmerückgewinnung gemessen: ϑ_{AU} [°C] und ϑ_{ZU} [°C] sowie ϑ_{AB} [°C] und ϑ_{FO} [°C]. Die Rückwärmzahl bzw. der Temperaturwirkungsgrad Φ [-] kann alternativ aus den Messwerten der Zu- oder Abluft erfolgen:

$$\Phi_{ZU} = \frac{\vartheta_{ZU} - \vartheta_{AU}}{\vartheta_{AB} - \vartheta_{AU}} \quad \text{bzw.} \quad \Phi_{AB} = \frac{\vartheta_{AB} - \vartheta_{FO}}{\vartheta_{AB} - \vartheta_{AU}}$$

Analoges gilt für die Rückfeuchtzahl ψ [-], welche aus den absoluten Luftfeuchten x [g/kg] bestimmt wird. Auf eine formelmäßige Darstellung wird verzichtet. Die absolute Feuchte wird mit einer Näherungsformel über den Sättigungsdruck der Luft p_S bestimmt.

$$\mathrm{p}_s[Pa] = 288{,}68 \cdot \left(1{,}098 + \frac{\vartheta[°C]}{100}\right)^{8{,}02}$$
$$x[g/kg] = 622 \cdot \frac{\varphi[\%]}{100} \cdot \frac{\mathrm{p}_s[Pa]}{100.000 - \frac{\mathrm{p}_s[Pa] \cdot \varphi[\%]}{100}}$$

Die entsprechenden Temperaturen und relativen Luftfeuchten stammen aus den Untergruppen MAT und BTA (RLT Verwaltungstrakt), MBT und BTB (RLT Klassentrakt) sowie KLU (Küche).

Die Ergebnisse sind in Kapitel 6.4 zu finden.

Wärmeenergiemengen

Die in der Wärmerückgewinnung der RLT-Anlagen oder im Erdwärmeübertrager auf die Luft übertragenen Energiemengen Q_{th} [kWh] werden aus der Summation der thermischen Leistungen $\dot{Q}_{th}$ [W] im Messintervall t [h] gebildet. Die Leistung selbst ergibt sich aus dem Volumenstrom $\dot{V}$ [m³/h bzw. m³/s], der Luftdichte ρ [kg/m³], der spezifischen Wärmespeicherkapazität von Luft c_P [kJ/(kgK)]] sowie den jeweiligen Ein- und Austrittstemperaturen ϑ [°C].

$$\dot{Q}_{th} = \dot{V} \cdot c_P \cdot (\vartheta_{aus} \cdot \rho_{aus} - \vartheta_{ein} \cdot \rho_{ein})$$
$$Q_{th} = \Sigma(\dot{Q}_{th} \cdot t)$$

Die Wärmespeicherkapazität wird als konstanter Wert von 1,005 kJ/(kgK) verwendet, da die Schwankungsbreite im untersuchten Messintervall gering ist. Für die Luftdichte wird eine temperaturabhängige Näherungsformel verwendet:

$$\rho\left[\frac{kg}{m^3}\right] = 10^{-5} \cdot \left[\frac{\vartheta}{°C}\right]^2 \text{-}0{,}0048 \cdot \left[\frac{\vartheta}{°C}\right]^1 + 1{,}2926$$

Alle anderen Werte sind Messwerte. Die entsprechenden Temperaturen und relativen Luftfeuchten stammen aus den Untergruppen MAT und BTA (RLT Verwaltungstrakt), MBT und BTB (RLT Klassentrakt) sowie EWT (Erdwärmeübertrager). Der Volumenstrom ist in der Untergruppe MAV bzw. MBV archiviert.

6.2 Wärmeenergiebilanz

Die Wärmeenergiezufuhr für die Passivhausschule ergibt sich – neben den internen und solaren Gewinnen – über den Erdwärmeübertrager (siehe Kapitel 8), die Fernwärmeheizregister (siehe Abschlussbericht 9), die Wärmerückgewinnung und die Ventilatorabwärme. Die beiden letztgenannten Wärmequellen werden nachfolgend ausgewertet.

6.2.1 Wärmerückgewinnung

Abbildung 6-1 zeigt die mit der Wärmerückgewinnung in den Jahren 2016 und 2017 nutzbar gemachte Energie für die RLT-Anlage "Klassentrakt". Im Mittel werden 42,9 MWh/a an Energie von der Abluft auf die Zuluft übertragen. Im gleichen Zeitraum beträgt der witterungskorrigierte Fernwärmeverbrauch dieser Anlage 8,7 MWh/a (siehe Abschlussbericht 9).

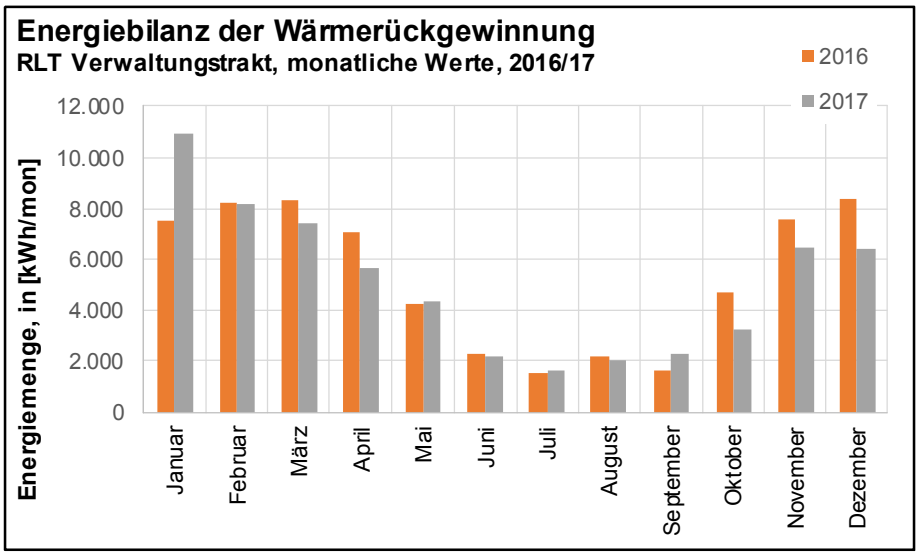

Abbildung 6-1: Energiebilanz Wärmerückgewinnung Klassentrakt, 2016/17

Der Jahresgang ist deutlich ausgeprägt. Eine Kühlung in den Sommermonaten ist – im Monatsmittel – nicht feststellbar. Andererseits wird aber auch kaum Heizenergie übertragen – anders als in der Anlage "Verwaltungstrakt".

In Abbildung 6-2 sind analog die Ergebnisse für den Verwaltungstrakt erkennbar. Im Verlauf eines typischen Jahres werden 62,4 MWh/a an Energie von der Abluft an die Zuluft übertragen. Zum Vergleich: aus Fernwärme werden 16,9 MWh/a eingesetzt (siehe Abschlussbericht 9).

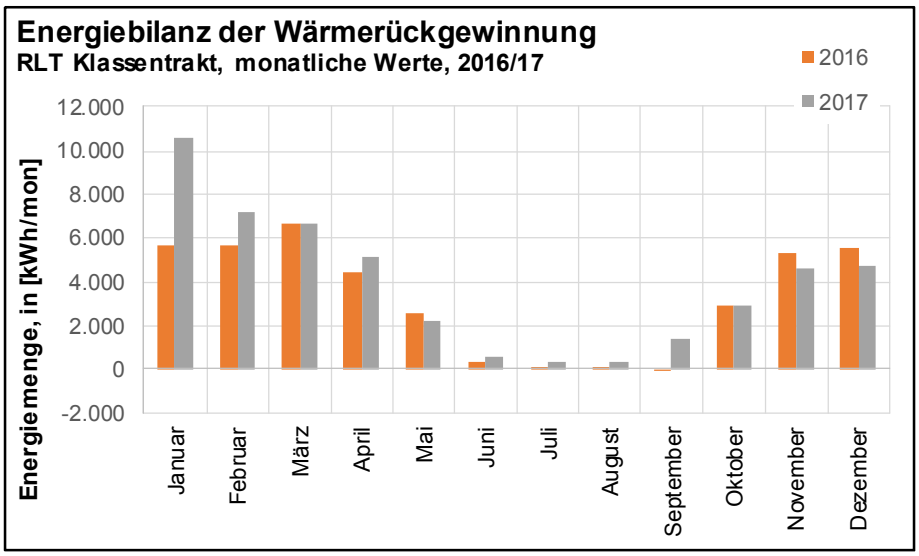

Abbildung 6-2: Energiebilanz Wärmerückgewinnung Verwaltungstrakt, 2016/17

Im Verwaltungstrakt erfolgt auch im Sommer eine Wärmeübertragung von der Abluft auf die Zuluft. Bis Mitte 2018 war eine Zuluft-Konstanttemperatur-Regelung aktiviert, so dass dies grundsätzlich erklärt werden kann.

Der gravierende Unterschied der Januarwerte für beide Anlagen ist mit der Witterung zu erklären (milder Winter 2016, strenger Winter 2017).

6.2.2 Ventilatorabwärme

Alle vier Ventilatoren der beiden Zentralgeräte sind im jeweiligen Luftstrom angeordnet. Es wird daher geschlussfolgert, dass die Energiemenge, welche nicht als Antriebsenergie aufgewendet wird, zur Erwärmung der strömenden Zu- und Abluft führt.

Abbildung 6-3 und Abbildung 6-4 zeigen die Monatsbilanzen dieser Abwärmemengen. Die zugehörigen Diagramme für die hydraulische und elektrische Leistung sind im Kapitel 6.5 zu finden.

Die Jahresbilanz ergibt für den Klassentrakt eine Abwärmemenge des Zuluftventilators von 1,7 MWh/a. Diese erwärmt den Zuluftvolumenstrom rechnerisch um 0,2 K und vermindert damit im Winter die Heizenergiemenge. Im Sommer ergibt sich ein – unvermeidlicher – zusätzlicher Wärmeeintrag in den Raum. Es sind insgesamt 2,3 MWh/a Abwärme am Abluftventilator zu verzeichnen. Die Energiemenge ist indirekt nutzbar – über die Wärmerückgewinnung, da die Abluft bei Eintritt in die WRG etwa 0,3 K wärmer ist.

Die Jahresbilanz für den Verwaltungstrakt sieht sehr ähnlich aus. Der Zuluftventilator erzeugt 5,3 MWh/a an Abwärme, welche zu einer Temperaturerhöhung der Zuluft um 0,5 K führen. Beim Abluftventilator sind es 3,9 MWh/a bzw. 0,4 K Temperaturerhöhung.

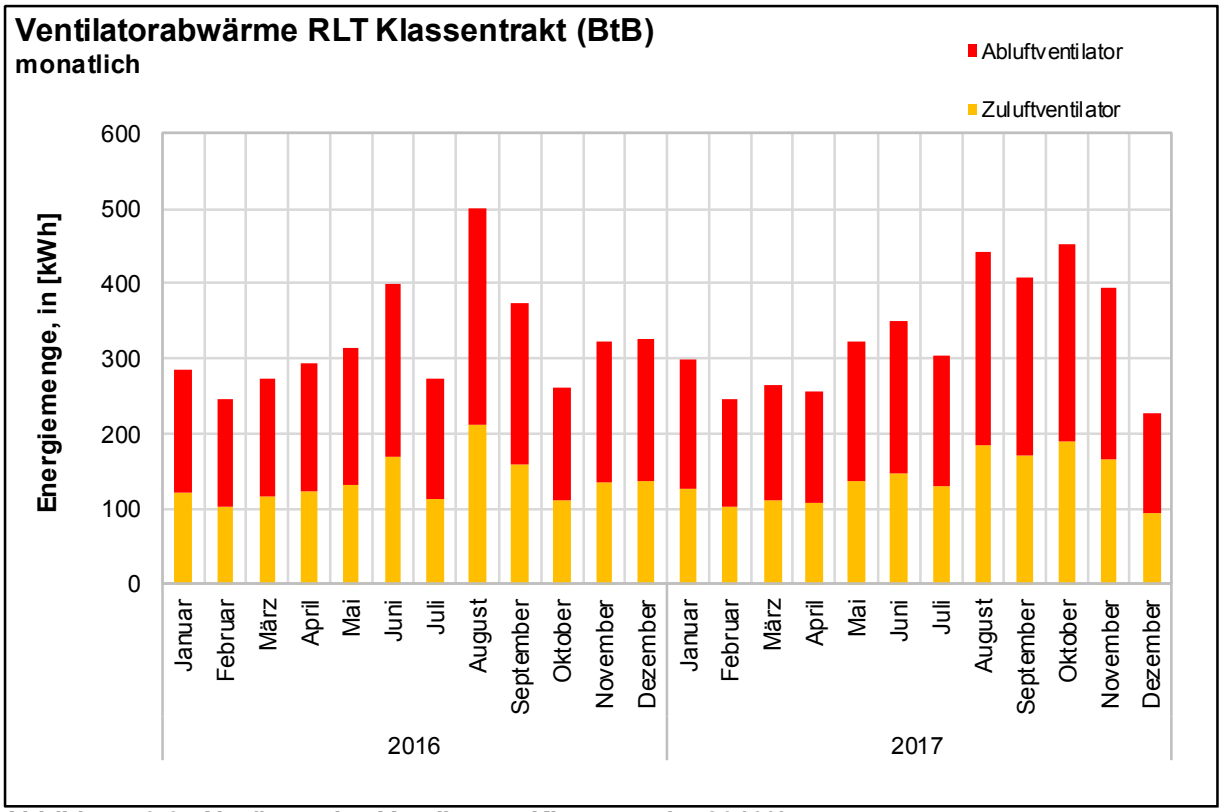

Abbildung 6-3: Abwärme des Ventilators, Klassentrakt, 2016/17

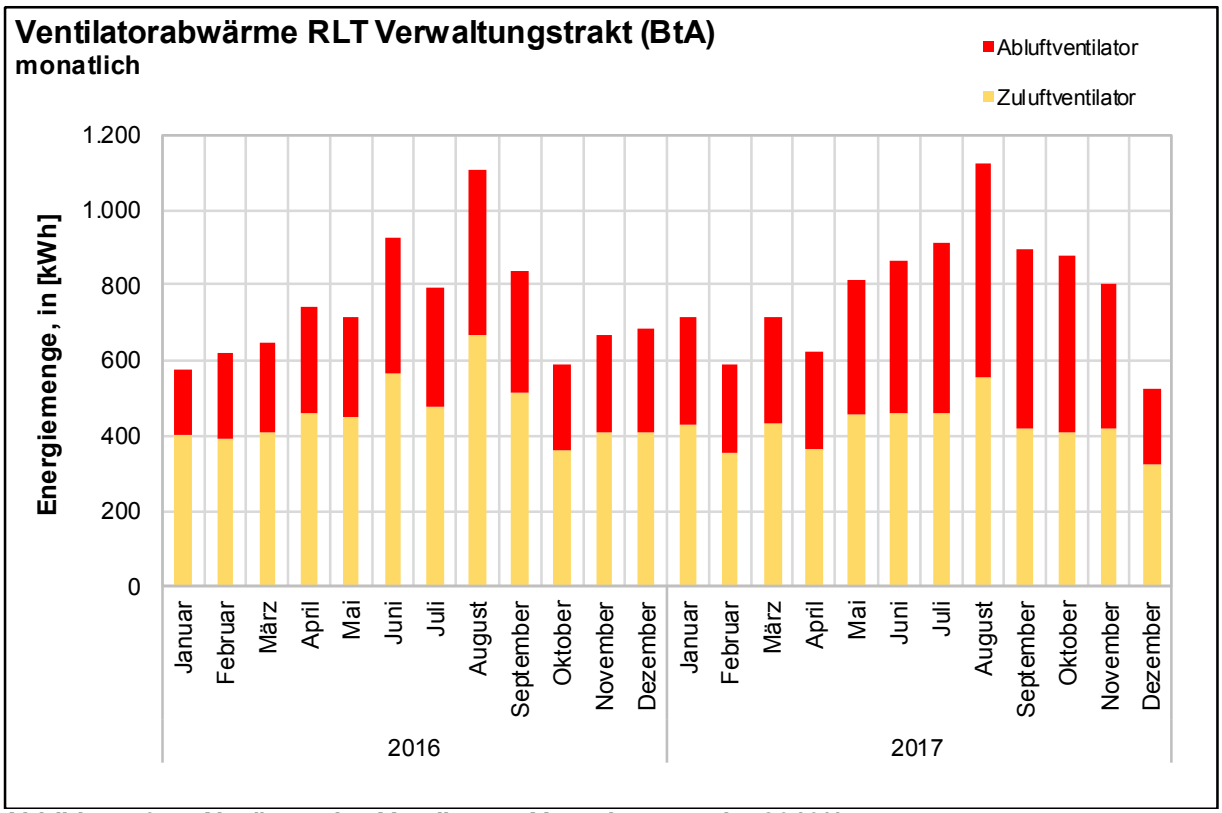

Abbildung 6-4: Abwärme des Ventilators, Verwaltungstrakt, 2016/17

Die indirekt über die Wärmerückgewinnung erreichte Temperaturerhöhung der Zuluft mit der Abwärme des Ventilators ist in der Bilanzierung der Wärmerückgewinnung nach Kapitel 6.2.1 bereits enthalten. Jedoch die Temperaturerhöhung durch den Zuluftventilator ist eine zusätzliche Energiemenge, die einzeln erfasst wird. Eine Gesamtübersicht aller Energiebilanzen zeigt Abschlussbericht 3.

6.3 Hilfsenergiebilanz

Die Messwerte ermöglichen eine Hilfsenergiebilanz für alle Ventilatoren. Sie sind auch ein Teil der Strombilanz, welche im Abschlussbericht 10 vertieft wird.

6.3.1 Ventilatoren und weitere Hilfsenergien Anlage Klassentrakt

Abbildung 6-5 zeigt die Messwerte für die RLT-Anlage "Klassentrakt". Einerseits wird die Gesamtanlage erfasst, andererseits die beiden Ventilatoren separat. Die Messreihe "Nebenaggregate" ergibt sich aus der Differenzbetrachtung. Im Verlauf eines Jahres benötigen die Nebenaggregate 2,0 MWh/a an Strom, der Zuluftventilator bezieht 7,2 MWh/a und der Abluftventilator 7,1 MWh/a.

Ein kleinerer Einbruch des Verbrauchs ergibt sich jeweils im Juli aufgrund der Sommerferien. Ansonsten steigt vor allem der Stromverbrauch des Abluftventilators stetig bis zum Filterwechsel (z. B. im November 2017) an, um danach stark abzufallen. Der Abluftweg hat in der Planung einen deutlich geringeren Druckverlust als der Zuluftweg. Der fast identische Stromverbrauch bei der Messung zeugt allerdings von ähnlichen Druckverlusten in beiden Systemen. Dieses Phänomen dürfte mit großer Wahrscheinlichkeit auf den in der Realität deutlich höheren Druckverlust des Abluftfilters zurückzuführen sein. Er wurde im Untersuchungszeitraum zu selten gewechselt. Das Problem ist unterdessen behoben.

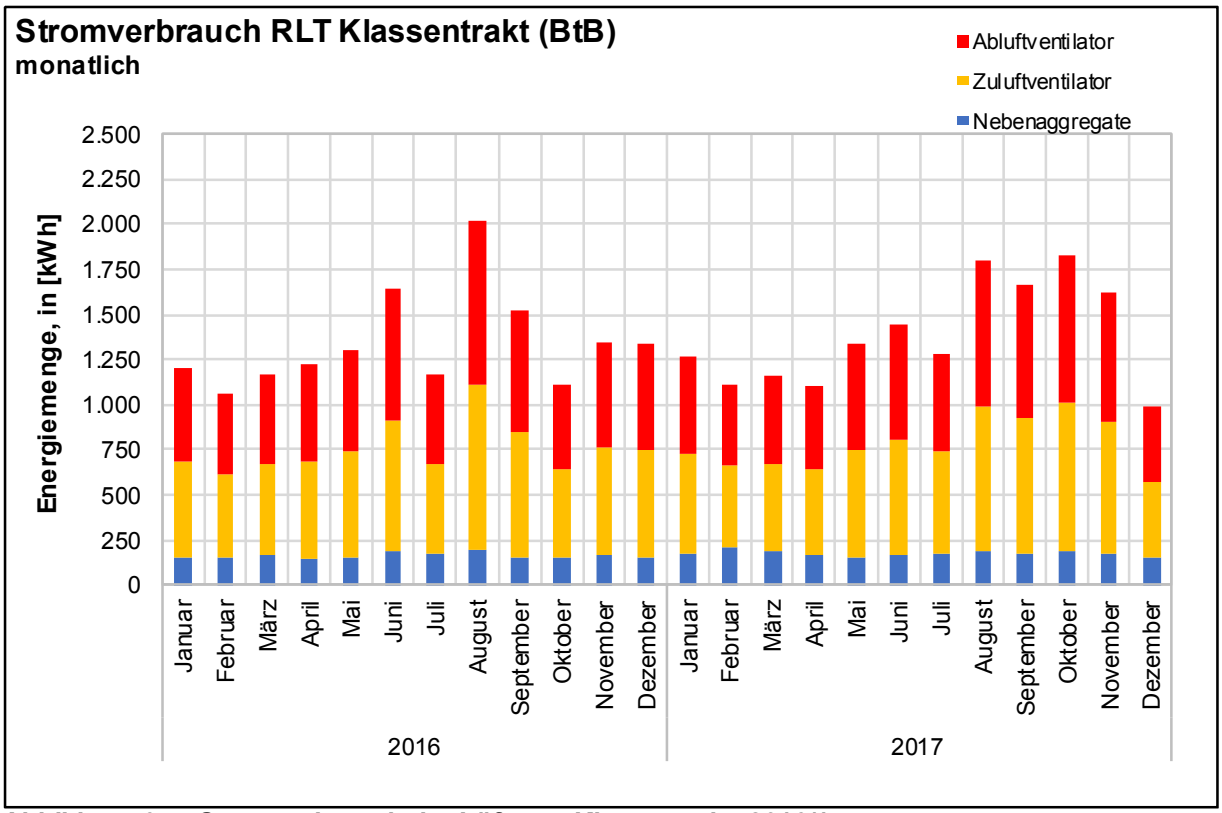

Abbildung 6-5: Stromverbrauch der Lüftung, Klassentrakt, 2016/17

6.3.2 Ventilatoren und weitere Hilfsenergien Anlage Verwaltungstrakt

Die Nebenaggregate in der Anlage "Verwaltungstrakt" benötigen 1,3 MWh/a an Strom. Die Menge ist deutlich geringer als beim "Klassentrakt". Dies kann unter anderem mit der deutlich geringeren Anzahl von angeschlossenen Räumen – und damit zu versorgenden Volumenstromreglern – erklärt werden. Der Zuluftventilator benötigt 10,6 MWh/a an Strom im Verlauf eines Jahres, der Abluftventilator 7,8 MWh/a. Die in der Planung erkannten Druckverlustunterschiede beider Netze zeigen sich auch im realen Betrieb.

Abbildung 6-6 zeigt den Monatsverlauf. Die Monate mit sommerlicher Nachtlüftung sind deutlich erkennbar.

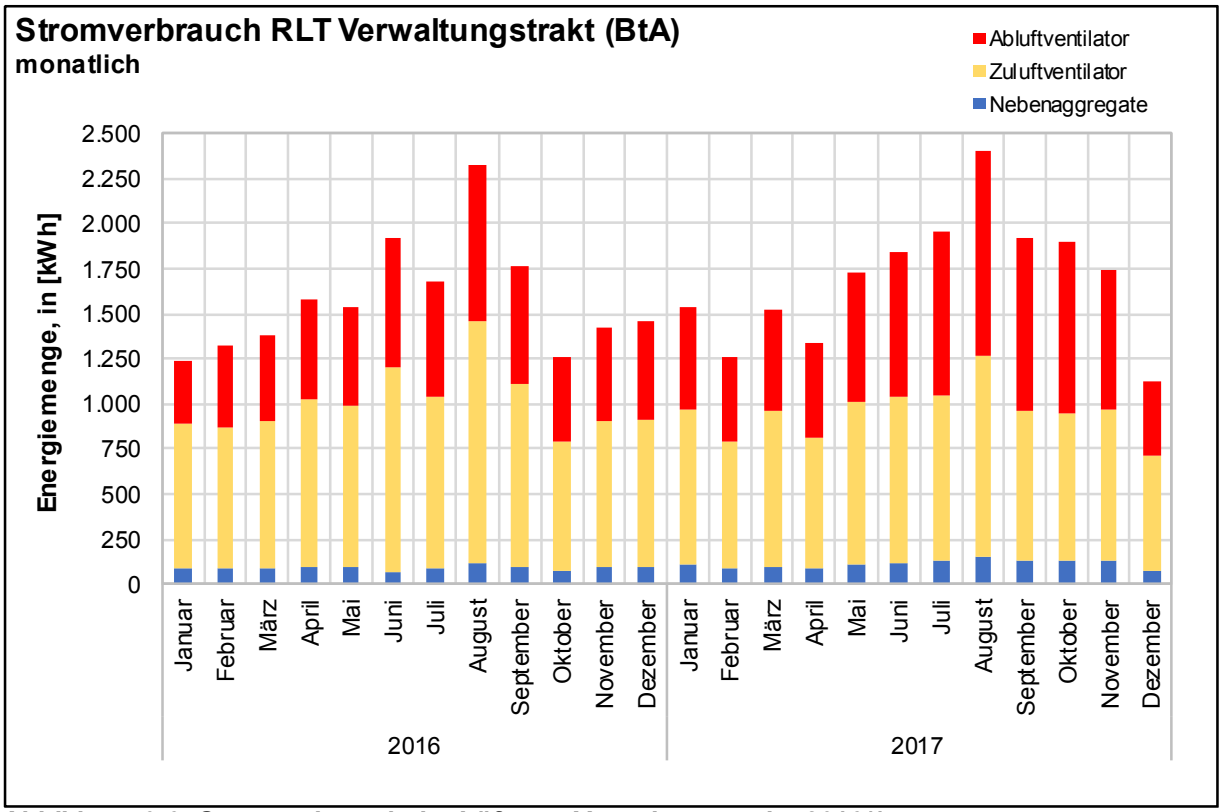

Abbildung 6-6: Stromverbrauch der Lüftung, Verwaltungstrakt, 2016/17

6.3.3 Ventilatoren Anlage Wohnungslüftung

In der Wohnungslüftungsanlage der Hausmeisterwohnung werden etwa 950 kWh/a für Ventilatorstrom aufgewendet. Der Jahresverlauf ist homogen, siehe Abbildung 6-7. Unterstellt man Dauerbetrieb (8760 h/a), der in der Realität nicht ganz gegeben ist, ergibt sich eine mittlere Dauerleistung von 108 W bzw. 54 W je Ventilator. Damit sind die Planwerte in etwa bestätigt.

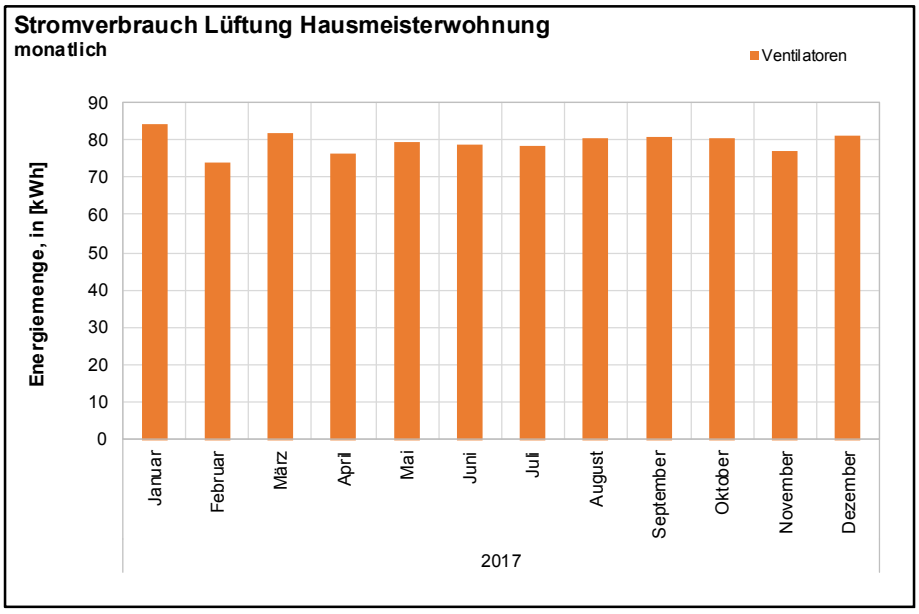

Abbildung 6-7: Stromverbrauch der Lüftung, Hausmeisterwohnung, 2017

6.3.4 *Ventilatoren Anlage Küchenlüftung*

In der Küche sind zunächst 1,3 MWh/a für die Grundlüftung zu verzeichnen. Das ist mehr als bei der Hausmeisteranlage, obwohl es sich um das gleiche Lüftungsgerät handelt. Die grafische Auswertung in Abbildung 6-8 zeigt einen ausgeprägten Jahresgang. Es konnte nicht abschließend geklärt werden, welche Gründe zu dem sichtbaren Verlauf führten. Es wird eine Überlagerung folgender Effekte vermutet:

- Filterwechselzyklen; je verschmutzter der Filter, desto höher der Stromverbrauch
- Auslösen der Frostschutzsicherung der Lüftungsanlage
- Rückwirkung der sommerlichen Nachtlüftung; die Küchengrundlüftung ist nicht ausgelegt, die Zuluft allein durch den Erdwärmeübertrager zu befördern; in den Zeiten mit gleichzeitigem Betrieb der sommerlichen Nachtlüftung überwindet die zentrale RLT den Druckverlust des Erdwärmeübertragers und entlastet die Küchenanlage
- Nutzerverhalten und Änderung von Schaltprogrammen.

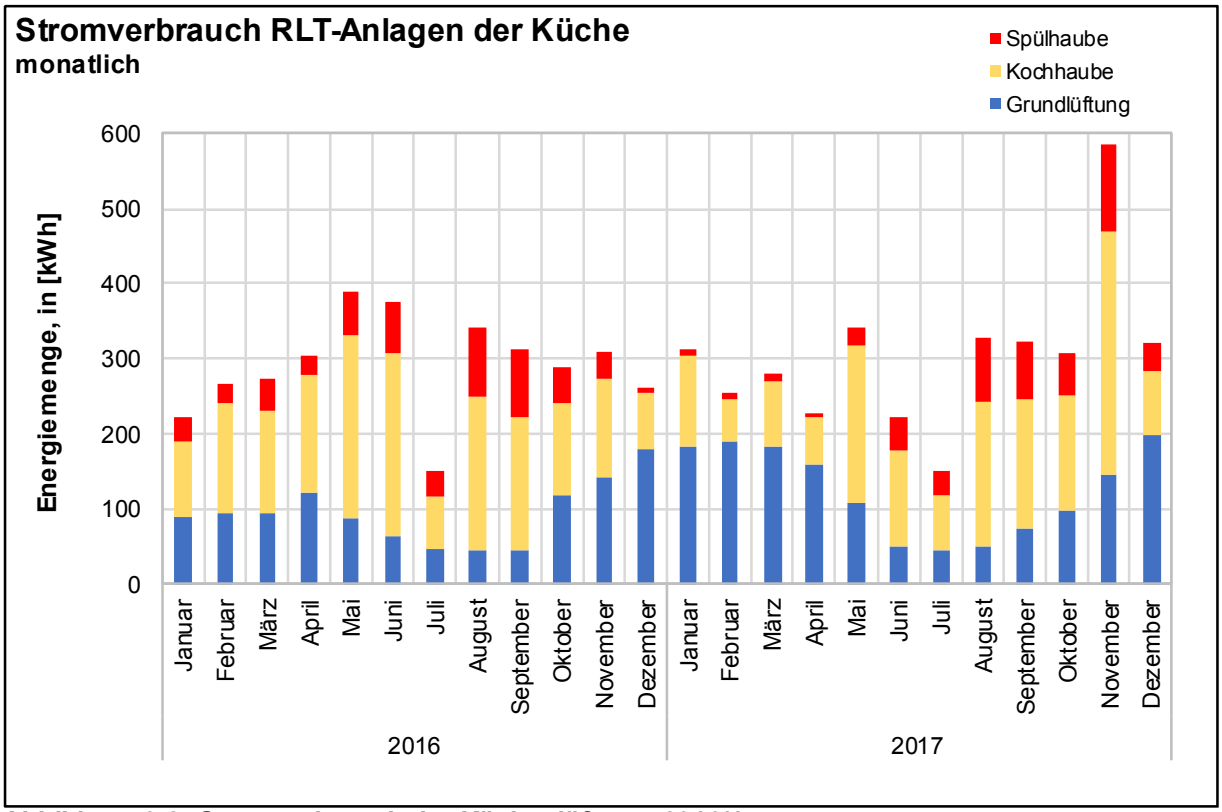

Abbildung 6-8: Stromverbrauch der Küchenlüftung, 2016/17

Für die Prozesslüftung fallen darüber hinaus noch weitere 1,7 MWh/a an der Kochhaube sowie 0,5 MWh/a Strom an der Spülhaube an. Die Nutzung dieser beiden Geräte ist erkennbar im Sommer etwas intensiver als im Winter.

6.4 *Temperatur- und Feuchtewirkungsgrad*

Die Untersuchung beschränkt sich im Wesentlichen auf die beiden großen RLT-Anlagen. Die vorhandene Messtechnik lässt folgende Auswertungen an den einzelnen Anlagen zu:

- Temperaturwirkungsgrad (Rückwärmzahl): RLT Klassentrakt und RLT Verwaltungstrakt – jeweils zu- und abluftseitig
- Feuchtewirkungsgrad (Rückfeuchtzahl): RLT Klassentrakt – zu- und abluftseitig

Die Messfühler in der Grundlüftungsanlage der Küche liefern keine auswertbaren Daten. Das baugleiche Gerät in der Hausmeisterwohnung wurde nicht ausgestattet.

Die Prozesslüftungsanlagen sind so kompakt gebaut, dass eine Messung nach der Wärmerückgewinnung und vor den Heizregistern nicht möglich ist. Daher wurde auf eine Messung verzichtet.

Zu der Auswertung beider Kennwerte ist anzumerken, dass die Ausstattung mit Messtechnik es nicht erlaubt, tatsächlich den "**Temperaturwirkungsgrad**" bzw. die "**Rückwärmzahl**" zu bestimmen. Diese Größe setzte 4 Temperaturmessungen direkt vor und hinter dem Wärmeübertrager voraus. Der Abluftventilator ist in der Messung jedoch jeweils enthalten, siehe auch Abbildung 7-1 und Abbildung 7-2 in Kapitel 7.1. Das heißt, im Ab-/Fortluftweg sind zwischen den beiden relevanten Messfühlern der Wärmeübertrager und der Abluftventilator angeordnet. Im Außenluft-/Zuluftweg ist es korrekterweise nur der Wärmeübertrager. Aus den Daten lässt sich damit strenggenommen auch nicht der "**Wärmebereitstellungsgrad**" ermitteln, da dieser die Abwärme beider Ventilatoren enthält. Der ermittelte Kennwert ist eine Mischung beider Größen, was bei der Dateninterpretation zu berücksichtigen ist.

Ein "**Wärmerückgewinnungsgrad**" unter Berücksichtigung der Enthalpie von Temperatur und Feuchte, aber ohne Ventilatorabwärme wird nicht bestimmt, da die Messwerte der Feuchte dies kaum plausibel ermöglichen und andererseits das oben geschilderte Problem hinsichtlich der Ventilatorabwärme besteht.

6.4.1 Wärmerückgewinnung RLT Klassentrakt

Basis der Auswertung sind die 10-Minuten-Messwerte der Jahre 2016 und 2017. Vor der Auswertung wurden die Daten bearbeitet, um Fehler und Fehlinterpretationen zu vermindern. Es werden nur Zeitintervalle ausgewertet, für die folgendes gilt:

- Volumenstrom $\dot{V} > 0$ m³/h
- Temperaturwirkungsgrad $0\ \% < \eta < 95\ \%$
- Ggf. Taktzeitveränderung $0\ \% < TZ < 99\ \%$

Auswertung nach Regelungssignal

Das Regelungssignal ist die Taktzeitveränderung. Sie ist ein Maß für die Umschaltfrequenz der beiden Wärmespeicherblöcke. Eine Taktzeitveränderung von 0 % führt zu einer Umschaltzeit von 40 Sekunden und entspricht der maximalen Wärmerückgewinnung.

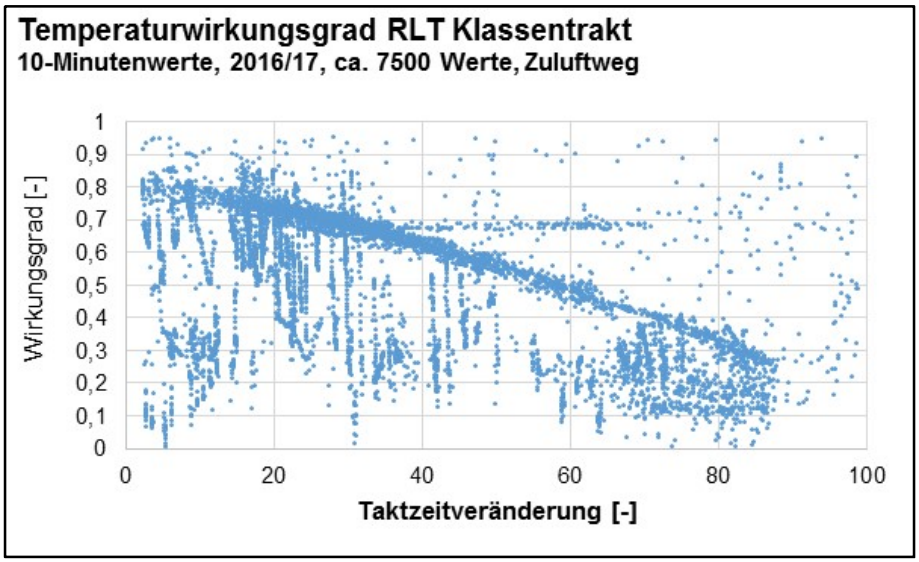

Abbildung 6-9: Temperaturwirkungsgrad aus Zuluftdaten, Klassentrakt, 2016/17

Abbildung 6-9 zeigt die Ergebnisse für den Zuluftweg. Von mehr als 105.000 Einzelmesswerten bleiben nur ca. 7500 übrig (7 %). Insbesondere die Taktzeitveränderung selbst weist im Monitoring massive Datenlücken auf. Die restlichen Größen streuen vergleichsweise stark. Dennoch ist ein guter Zusammenhang zwischen der Taktzeitveränderung und dem Temperaturwirkungsgrad zu erkennen. Ein Maximum liegt bei etwa 82 %.

Regelt die Anlage herunter, sinkt der Wert – nicht ganz linear, wie für einen Wärmeübertrager zu erwarten – bis auf null. Obwohl die Herstellerangabe von 92 % nicht erreicht wird, sind die Messwerte als erfreulich einzustufen.

Abbildung 6-10 bestätigt die Aussage auf Basis der Messwerte aus dem Abluftweg.

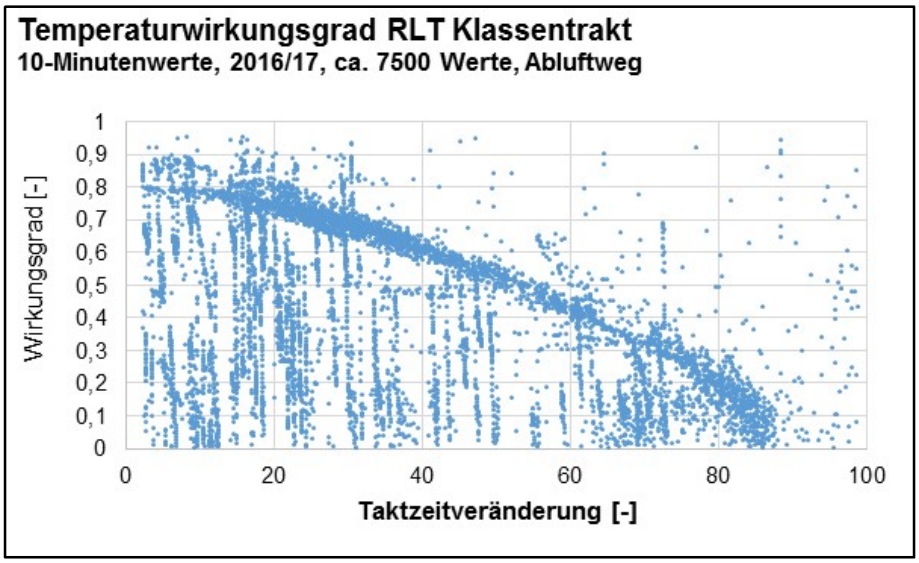

Abbildung 6-10: Temperaturwirkungsgrad aus Abluftdaten, Klassentrakt, 2016/17

Auswertung nach Zulufttemperatur

Wenn der erreichte Temperaturwirkungsgrad über der Außentemperatur aufgetragen wird, erhöht sich die Anzahl der auswertbaren Datenpunkte, siehe Abbildung 6-11 und Abbildung 6-12.

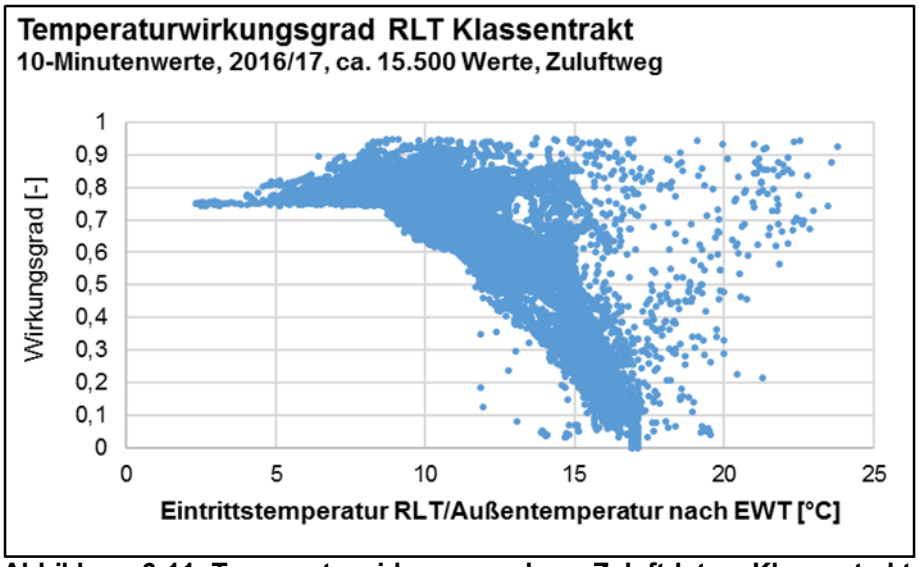

Abbildung 6-11: Temperaturwirkungsgrad aus Zuluftdaten, Klassentrakt, 2016/17

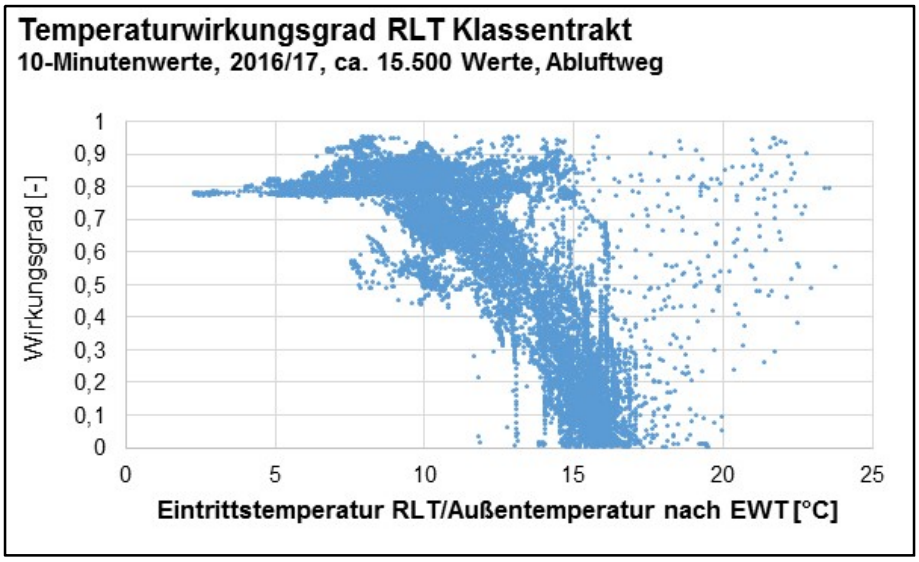

Abbildung 6-12: Temperaturwirkungsgrad aus Abluftdaten, Klassentrakt, 2016/17

Die Wärmerückgewinnung läuft bei Eintrittstemperaturen ab ca. 7 °C optimal. Werte unter 2°C kommen aufgrund der Vorwärmung mit dem EWT nicht vor. Bei etwa 17°C Außentemperatur ist im Trend keine Wärmerückgewinnung mehr notwendig.

6.4.2 Wärmerückgewinnung RLT Verwaltungstrakt

Die Datenfilterung zur Fehlerminimierung ist identisch zur RLT des Klassentraktes. Etwa 7300 Messpunkte verbleiben für die Analyse (7 %).

Auswertung nach Regelungssignal

Abbildung 6-13 und Abbildung 6-14 zeigen die Ergebnisse der Auswertung. Die Ergebnisse der Auswertung der RLT-Anlage "Klassentrakt" wiederholen sich. Maximale Temperaturwirkungsgrade um 85 % sind feststellbar, was als gutes Praxisergebnis gewertet wird.

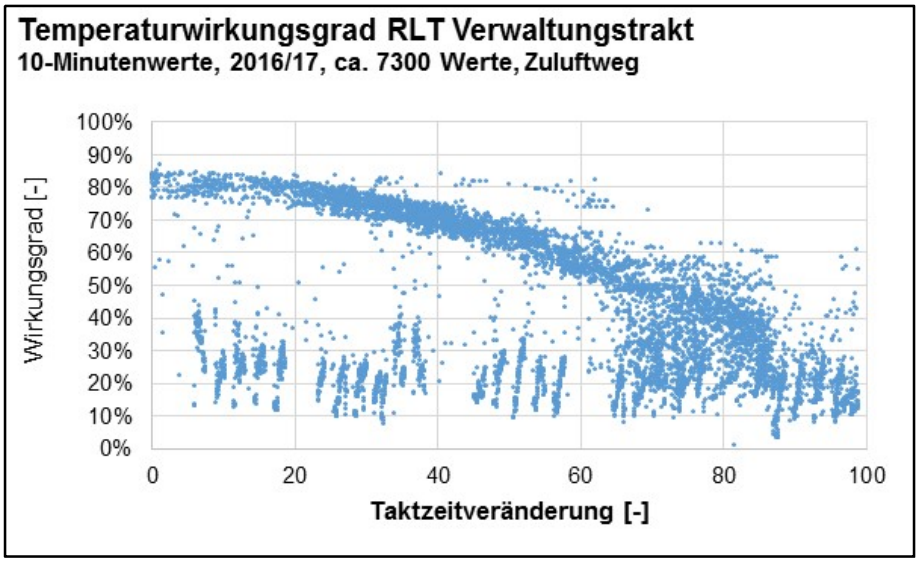

Abbildung 6-13: Temperaturwirkungsgrad aus Zuluftdaten, Verwaltungstrakt, 2016/17

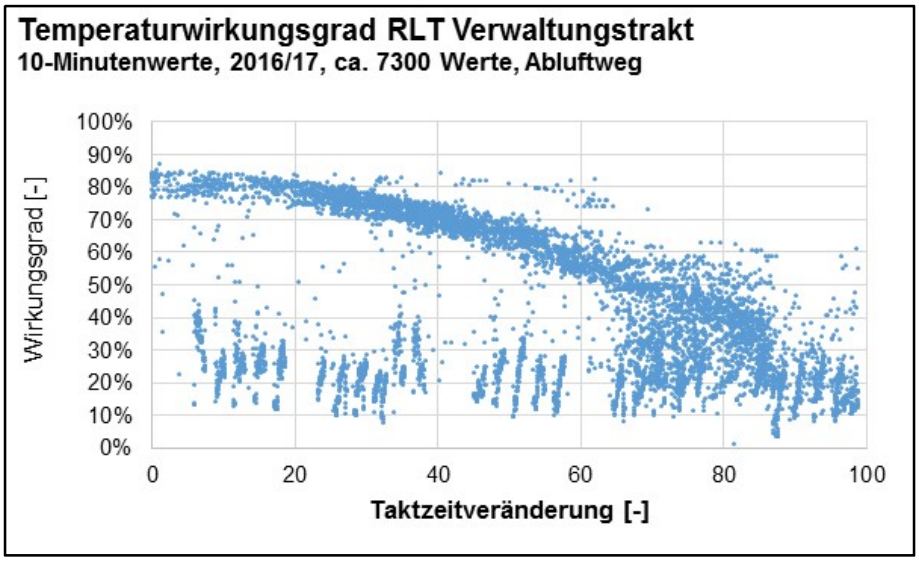

Abbildung 6-14: Temperaturwirkungsgrad aus Abluftdaten, Verwaltungstrakt, 2016/17

Auswertung nach Zulufttemperatur

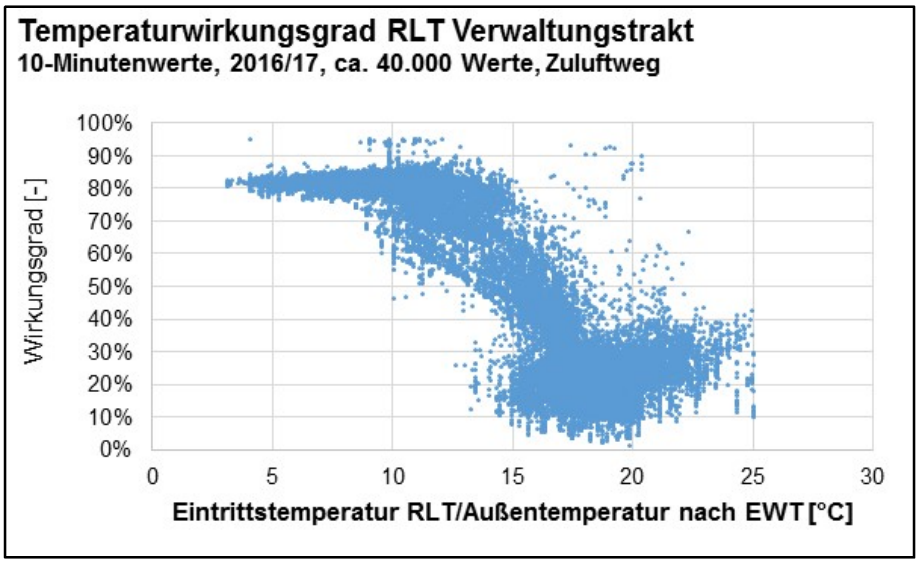

Abbildung 6-15: Temperaturwirkungsgrad aus Zuluftdaten, Verwaltungstrakt, 2016/17

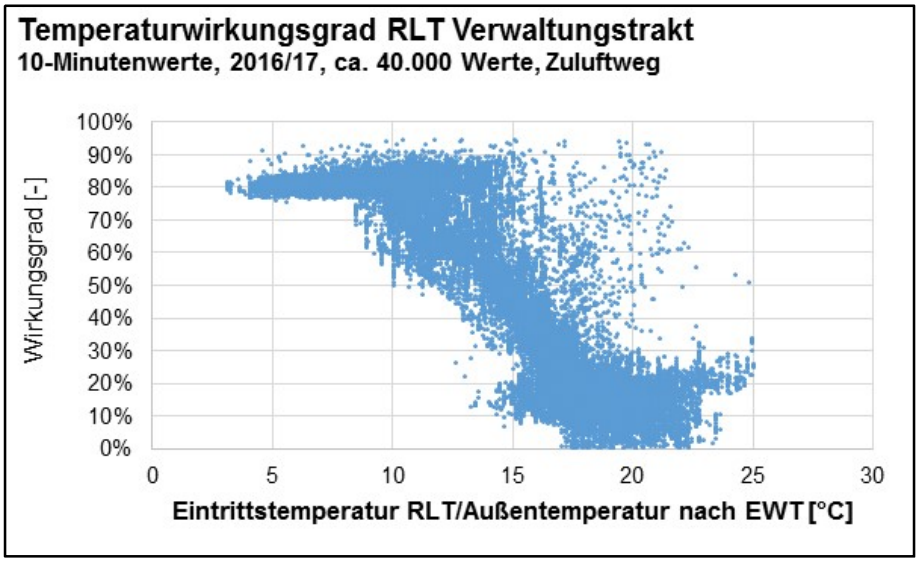

Abbildung 6-16: Temperaturwirkungsgrad aus Abluftdaten, Verwaltungstrakt, 2016/17

Über der Zulufttemperatur ausgewertet zeigt sich, dass unterhalb von etwa 8°C die Wärmerückgewinnung in voller Höhe genutzt wird (maximale Taktung der Umschaltspeicher). Zwischen 8°C und 15°C liegt die Phase der Regelung, d. h. die Umschalttakte werden gedrosselt. Ist es noch wärmer, ergibt sich ein Temperaturwirkungsgrad von nur noch 15 … 25 %, siehe Abbildung 6-15 und Abbildung 6-16.

6.4.3 Feuchterückgewinnung

Basis der Auswertung sind die 10-Minuten-Messwerte der Jahre 2016 und 2017. Vor der Auswertung wurden die Daten bearbeitet, um Fehler und Fehlinterpretationen zu vermindern. Es werden nur Zeitintervalle ausgewertet, für die folgendes gilt:

- Volumenstrom $\dot{V} > 0$ m³/h
- Feuchtewirkungsgrad $0\ \% < \eta < 95\ \%$
- Ggf. Taktzeitveränderung $0\ \% < TZ < 99\ \%$

Auswertung nach Regelungssignal

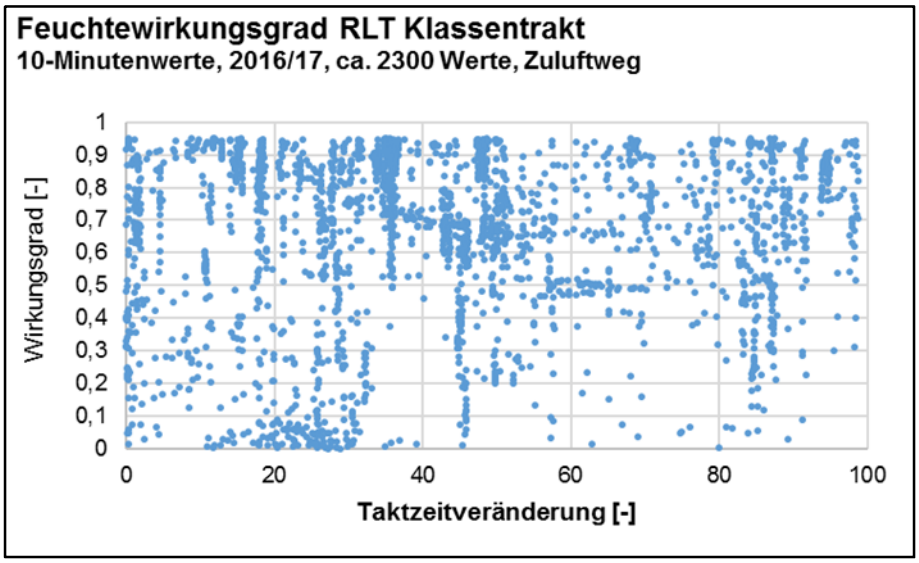

Abbildung 6-17: Feuchtewirkungsgrad aus Zuluftdaten, Klassentrakt, 2016/17

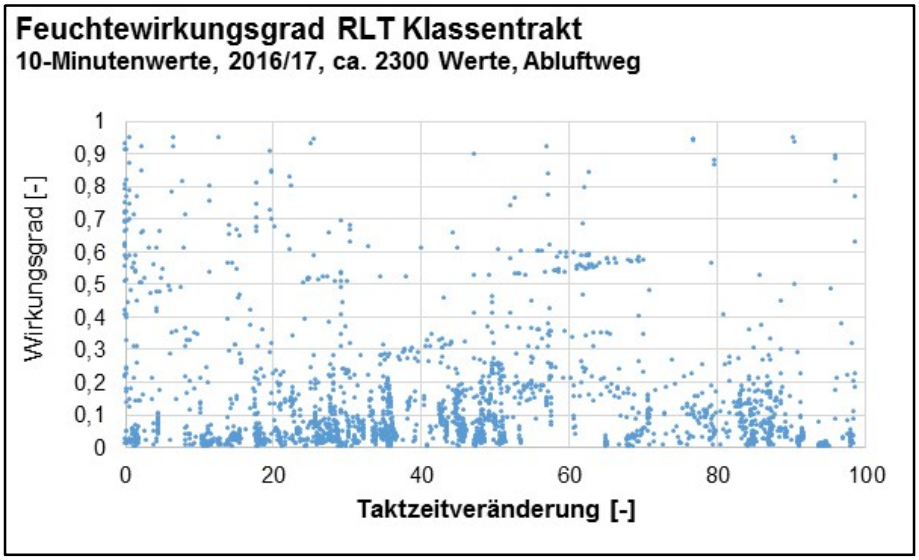

Abbildung 6-18: Feuchtewirkungsgrad aus Abluftdaten, Klassentrakt, 2016/17

Die Sortierung der Rohdaten führt dazu, dass nur ca. 2300 Datensätze zur Auswertung zur Verfügung stehen. Das sind 2 % der Stichprobe. Es lässt sich kein Zusammenhang zwischen Feuchtewirkungsgrad und der Taktzeitveränderung nachweisen, siehe Abbildung 6-17 und Abbildung 6-18.

Auswertung nach Zulufttemperatur

Auch die Auftragung des Feuchterückgewinnungsgrades über der Außentemperatur liefert keine besseren Erkenntnisse, siehe Abbildung 6-19 und Abbildung 6-20, wenn auch mehr Daten zur Auswertung zur Verfügung stehen.

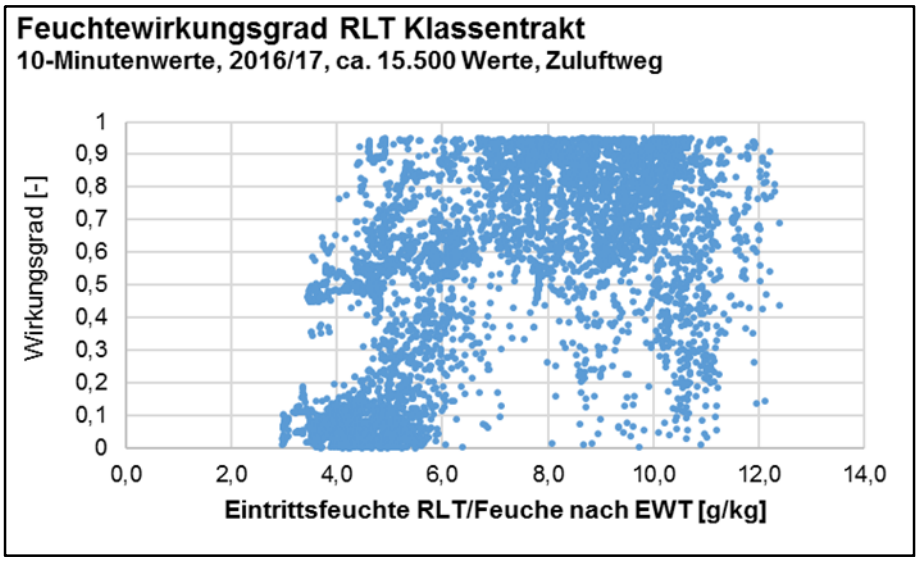

Abbildung 6-19: Feuchtewirkungsgrad aus Zuluftdaten, Klassentrakt, 2016/17

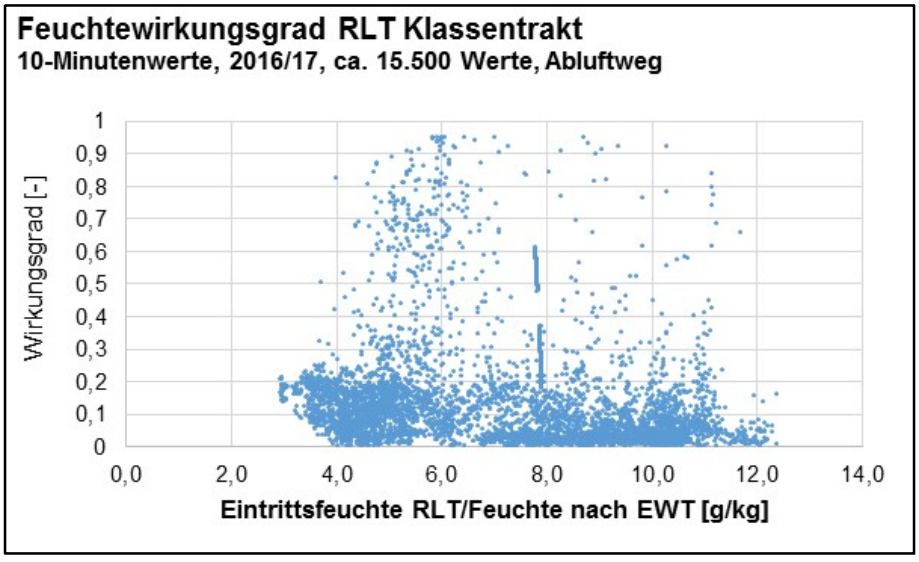

Abbildung 6-20: Feuchtewirkungsgrad aus Abluftdaten, Klassentrakt, 2016/17

Vor allem der Unterschied der Aussagen je nach Auswertung der Zu- und Abluftdaten lässt auf Messfehler schließen. Da insgesamt 6 potentiell fehlerbehaftete Größen (3 Temperaturen, 3 relative Luftfeuchten) zu einem Kennwert führen, sollen die Werte nicht weiter interpretiert werden.

6.4.4 Wärmerückgewinnung Küche

Die erfassten Messwerte sind nicht auswertbar. Da alle 4 Temperaturen/Feuchten nahezu identisch sind, wird von einem Installationsfehler ausgegangen.

6.5 Ventilatorwirkungsgrade und SFP-Werte

Getrennt für die beiden zentralen RLT-Anlagen sowie für Zu- und Abluftweg werden die Ventilatorwirkungsgrade sowie die SFP-Werte (specific fan power) bestimmt. Letzteres ist die auf den Volumenstrom bezogene elektrische Leistungsaufnahme.

Zur Einordnung der Ergebnisse kann die Klassifizierung nach DIN EN 13779 herangezogen werden, siehe Tabelle 6-2.

Tabelle 6-2: SFP-Klassen [19]

Kategorie	spezifische Ventilatorleistung [W/(m³/s)]
SFP-1	<500
SFP-2	500–750
SFP-3	750–1250
SFP-4	1250–2000
SFP-5	2000–3000
SFP-6	3000–4500
SFP-7	>4500

Darüber hinaus kann eine Einordnung der Güte der Kennwerte nach DIN V 18599 [20] erfolgen. Die Norm gibt im Falle unbekannter Realwerte typische Standardwerte zur Erstellung der Energiebilanz an. Für die St. Franziskus-Grundschule sind relevant:

- Wohnungslüftung, mit Wärmerückgewinnung und Heizfunktion: 0,55 W/(m³/h) bzw. 1980 W/(m³/s) [Hausmeisterwohnung]
- Zuluftventilator im Nichtwohnbau, mit Erwärmung: 1600 W/(m³/s) bzw. 0,44 W/(m³/h)
- Abluftventilator im Nichtwohnbau: 1250 W/(m³/s) bzw. 0,35 W/(m³/h)

In der Energieeinsparverordnung [21] ist unter den Eigenschaften des Referenzgebäudes folgendes verzeichnet:

- Zuluftventilator im Nichtwohnbau: 1500 W/(m³/s)
- Abluftventilator im Nichtwohnbau: 1000 W/(m³/s)

Die Werte der DIN V 18599 bzw. EnEV sind nicht als verpflichtend einzuhaltende Grenzwerte zu verstehen, sondern werden als Vergleichswerte in der Auswertung herangezogen.

6.5.1 RLT Klassentrakt

Für die Ventilatoren liegen für den Zeitraum 2016/17 Messdaten im 10-Minuten-Takt vor. Diese werden wie folgt gefiltert, um die Auswertung übersichtlicher und treffsicherer zu gestalten:

- Luftvolumenstrom $\dot{V} \geq 750$ m³/h (10 % des Maximalwertes)
- Differenzdruck $\Delta p \geq 100$ Pa
- Ventilatorwirkungsgrad $\eta_{El} \leq 100$ %
- Belastung des Ventilators: $\beta \geq 1$ % (von 5.370 W Maximalleistung)
- Frequenzumformersignal: FU > 0 % (nur für die entsprechende Auswertung)

Gesamtübersicht

Laut technischer Beschreibung haben Zu- und Abluftventilator jeweils eine maximale Leistung von 5.370 W. Für diese Ventilatoren sind anhand der oben genannten Auswertungsranddaten ca. 30.000 Messintervalle auswertbar (knapp 30 % der Gesamtmenge). Das ist eine sehr gute Quote; die meisten nicht auswertbaren Zeitintervalle ergeben sich, da der Ventilator stillsteht.

Tabelle 6-3 zeigt die Ergebnisse für den Klassentrakt. Die mittlere Belastung innerhalb der Betriebszeit liegt bei 39 %. Die SFP-Werte sind fast identisch – in beiden Fällen entspricht dies

Klasse 3 nach DIN EN 31779. Beide Werte sind besser als die Standardwerte der DIN V 18599, welche als typisch bei unbekannten Randdaten angesehen werden. Die Ventilatoren im Referenzgebäude der EnEV wären teils besser [Abluft: 1000 W/(m³/s)], teils schlechter [Zuluft: 1500 W/(m³/s)].

Tabelle 6-3: Ergebnisse Ventilatoren RLT-Klassentrakt

	mittlere Leistung		Belastung und Wirkungsgrad		mittlerer Betriebspunkt		SFP Kennwert	
	P_{EL} [W]	P_{Hyd} [W]	η_{ges} [%]	β [%]	$\dot{V}$ [m³/h]	Δp [Pa]	SFP [W/(m³/h)]	SFP [W/(m³/s)]
Zuluft	2110	1627	77 %	39 %	6736	818	0,313	1128
Abluft	2074	1409	68 %	39 %	6419	748	0,323	1163

Der gemessene Wirkungsgrad ist teils deutlich besser als der Herstellerwert, welcher bei 60 % bzw. 61 % liegt. Es könnte sich um Messfehler handeln. Welcher der Messwerte nicht korrekt erfasst wird, kann nicht beurteilt werden.

Grafische Auswertung

Abbildung 6-21 und Abbildung 6-22 zeigen die Auftragung von elektrischer über hydraulischer Leistung. Idealerweise sollten die Werte auf einer Linie oder Kurve liegen und weit weniger streuen. Dennoch ist ein Zusammenhang erkennbar. Der typische Mittelwert ist markiert.

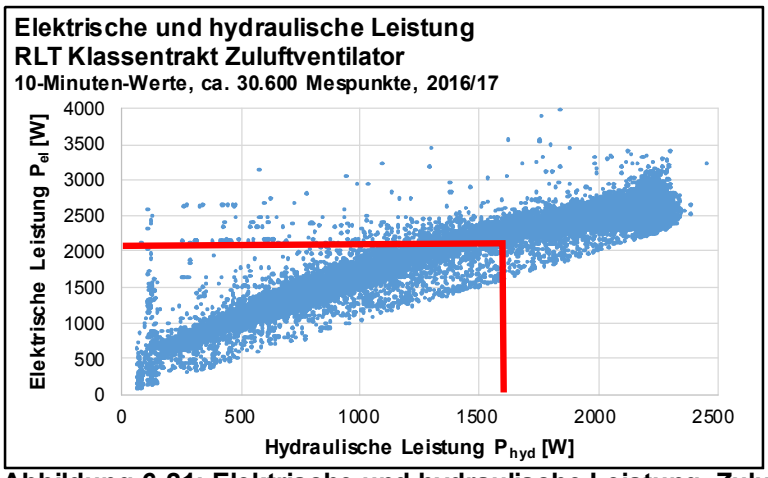

Abbildung 6-21: Elektrische und hydraulische Leistung, Zuluftventilator, Klassentrakt, 2016/17

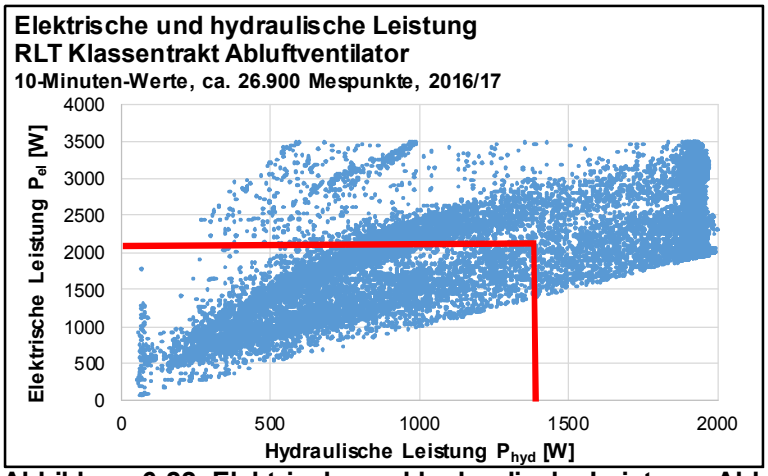

Abbildung 6-22: Elektrische und hydraulische Leistung, Abluftventilator, Klassentrakt, 2016/17

Abbildung 6-23 und Abbildung 6-24 zeigen die Ergebnisse des Wirkungsgrades nach Auslastung des Ventilators. Die Streuung insbesondere beim Abluftventilator ist so stark, dass kein Zusammenhang mehr erkennbar ist. Die Jahresmittelwerte für beide Ventilatoren sind dennoch markiert.

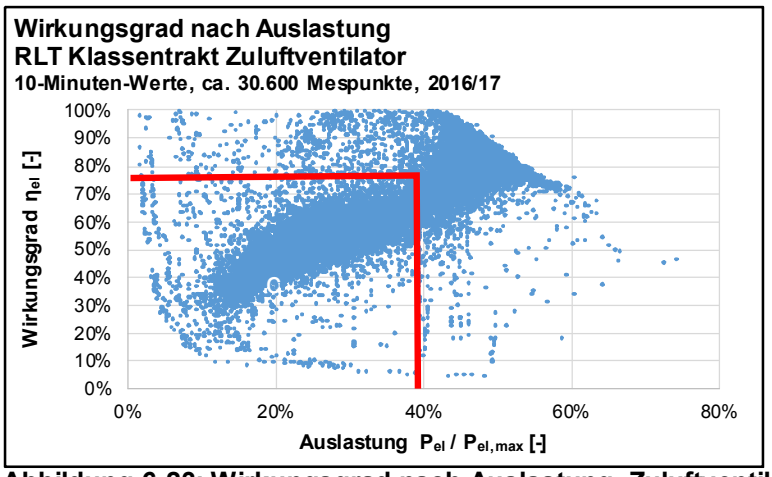

Abbildung 6-23: Wirkungsgrad nach Auslastung, Zuluftventilator, Klassentrakt, 2016/17

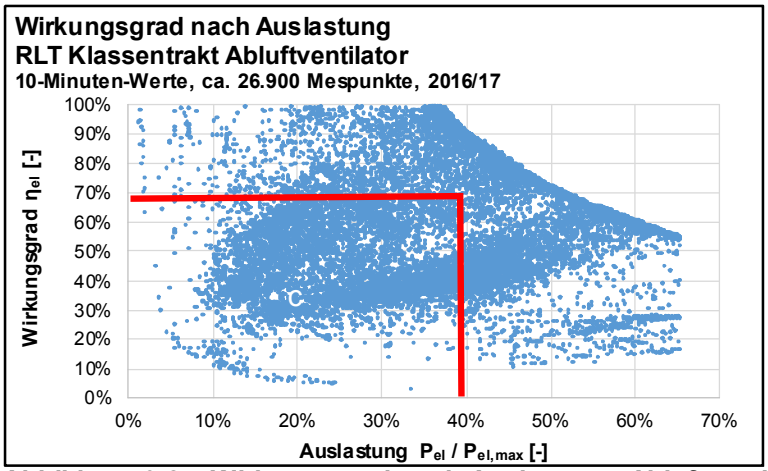

Abbildung 6-24: Wirkungsgrad nach Auslastung, Abluftventilator, Klassentrakt, 2016/17

Der Zusammenhang zwischen der Ansteuerung des Ventilators mit dem Frequenzumformer (FU) und der elektrischen Leistung ist dagegen deutlich besser zu erkennen, siehe Abbildung 6-25 und Abbildung 6-26. Die gemessene mittlere Leistung von ca. 2,1 kW für den Zuluftventilator ergibt sich aus einer Ansteuerung des FU von 60 %.

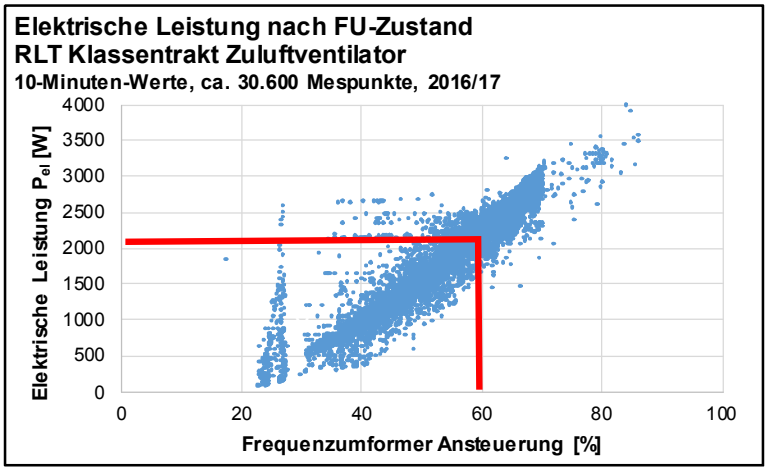

Abbildung 6-25: Elektrische Leistung nach Regelung, Zuluftventilator, Klassentrakt, 2016/17

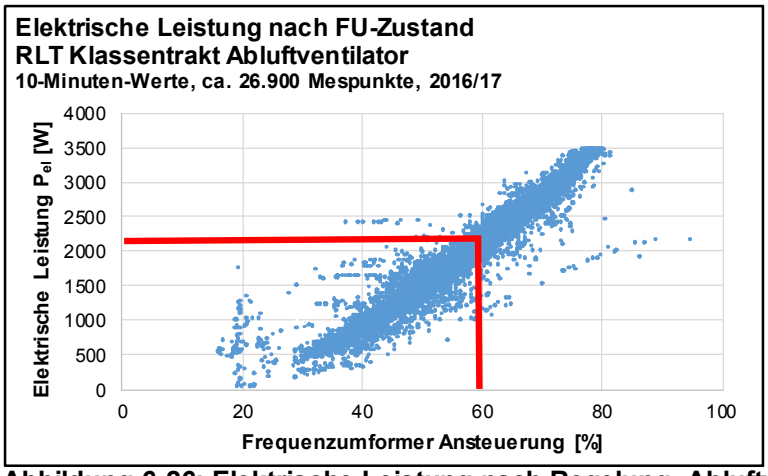

Abbildung 6-26: Elektrische Leistung nach Regelung, Abluftventilator, Klassentrakt, 2016/17

6.5.2 RLT Verwaltungstrakt

Für die Ventilatoren liegen für den Zeitraum 2016/17 Messdaten im 10-Minuten-Takt vor. Diese werden wie folgt gefiltert, um die Auswertung übersichtlicher und treffsicherer zu gestalten:

- Luftvolumenstrom $\dot{V} \geq 1000$ m³/h (10 % des Maximalwertes)
- Differenzdruck $\Delta p \geq 100$ Pa
- Ventilatorwirkungsgrad $\eta_{EL} \leq 100$ %
- Belastung des Ventilators $\beta \geq 1$ % (von 4.700 W Maximalleistung)
- Hydraulische Leistung $P_{Hyd} \geq 500$ W
- Frequenzumformersignal FU > 0 % (nur für die entsprechende Auswertung)

Gesamtübersicht

Laut technischer Beschreibung haben Zu- und Abluftventilator jeweils eine maximale Leistung von 4700 W. Für den Abluftventilator sind anhand der oben genannten Auswertungsranddaten ca. 32.000 Messintervalle auswertbar (knapp ⅓ der Gesamtmenge). Das ist eine sehr gute Quote; die meisten nicht auswertbaren Zeitintervalle ergeben sich, da der Ventilator stillsteht. Beim Abluftventilator ergibt die Filterung nicht sinnvoller Daten eine auswertbare Datenmenge von nur ca. 15.500 Daten.

Tabelle 6-4 zeigt die Ergebnisse für den Verwaltungstrakt.

Die mittlere Belastung des Zuluftventilators innerhalb der Betriebszeit liegt bei 64 %, sein Wirkungsgrad bei 50 %. Das ist deutlich schlechter als die Herstellerprognose von 66 %. Da beide Werte stark von den anderen abweichen, wird von einem Messfehler bei der elektrischen Leistung ausgegangen. Der SFP-Wert ergibt sich zu 3 nach DIN EN 13779, dies ist etwas besser als der Standardwert der EnEV für das Referenzgebäude [1500 W/(m³/s)].

Tabelle 6-4: Ergebnisse Ventilatoren RLT-Verwaltungstrakt

	mittlere Leistung		Belastung und Wirkungsgrad		mittlerer Betriebspunkt		SFP Kennwert	
	P_{EL} [W]	P_{Hyd} [W]	η_{ges} [%]	β [%]	$\dot{V}$ [m³/h]	Δp [Pa]	SFP [W/(m³/h)]	SFP [W/(m³/s)]
Zuluft	3027	1511	50 %	64 %	8677	624	0,349	1256
Abluft	1951	1487	76 %	42 %	8634	617	0,226	814

Der Abluftventilator wird zu 42 % ausgelastet, was den Werten der Klassentraktanlage entspricht. Der Wirkungsgrad liegt mit 76 % über der Herstellerangabe von 66 %. Es könnte sich um Messfehler handeln. Welcher der Messwerte nicht korrekt erfasst wird, kann nicht beurteilt werden. Der SFP-Wert führt zu einer Eingruppierung in die Klasse 3. Der Wert ist etwas besser als der EnEV-Standardwert [1000 W/(m³/s)].

Grafische Auswertung

Abbildung 6-27 und Abbildung 6-28 zeigen die Auftragung von elektrischer über hydraulischer Leistung. Idealerweise sollten die Werte auf einer Linie oder Kurve liegen und weit weniger streuen. Insbesondere die parallele Verschiebung nach oben spricht für einen Messfehler bei der elektrischen Leistung des Zuluftventilators; der typische Mittelwert ist dennoch markiert. Die Grafik für den Abluftventilator ist augenscheinlich plausibler.

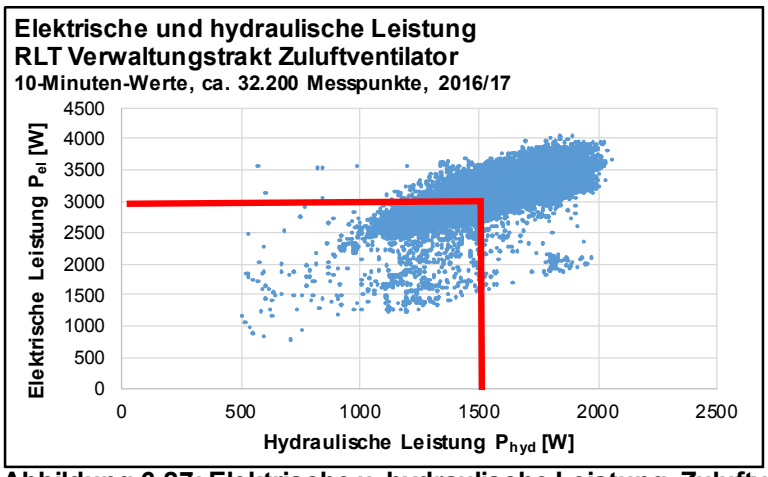

Abbildung 6-27: Elektrische u. hydraulische Leistung, Zuluftventilator, Verwaltungstrakt, 2016/17

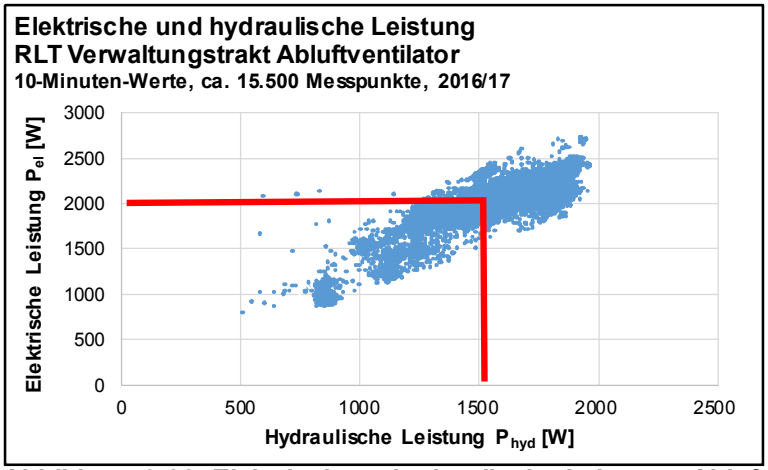

Abbildung 6-28: Elektrische u. hydraulische Leistung, Abluftventilator, Verwaltung, 2016/17

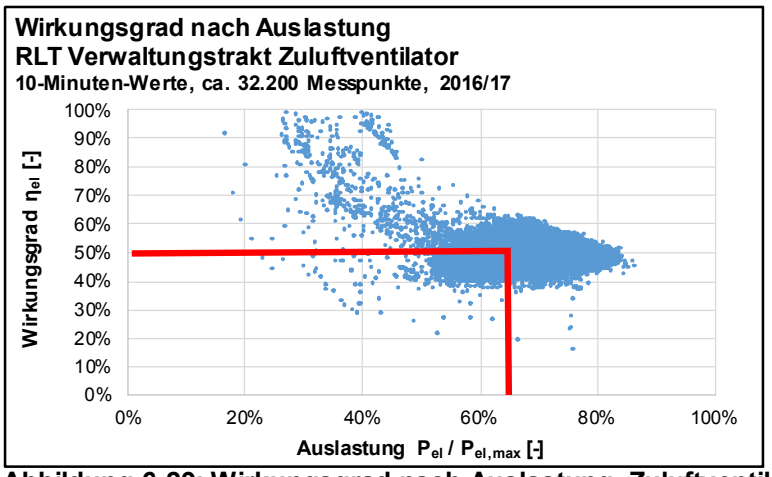

Abbildung 6-29: Wirkungsgrad nach Auslastung, Zuluftventilator, Verwaltungstrakt, 2016/17

Abbildung 6-29 und Abbildung 6-30 zeigen die Ergebnisse des Wirkungsgrades nach Auslastung des Ventilators. Die Jahresmittelwerte für beide Ventilatoren sind markiert, auch wenn die Werte des Zuluftventilators vergleichsweise niedrig liegen.

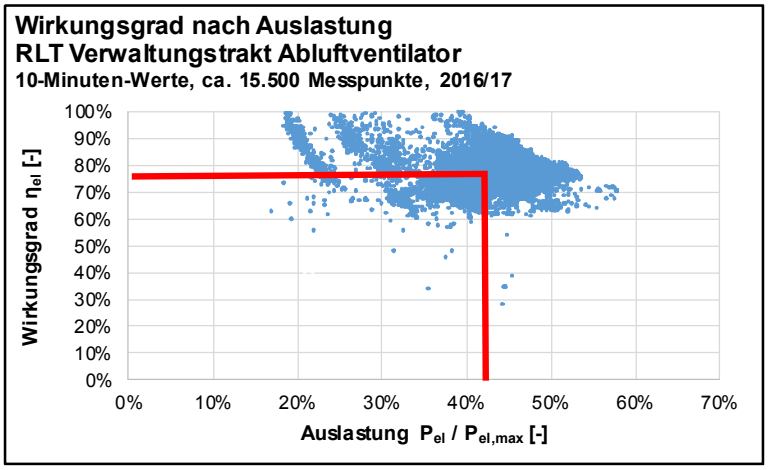

Abbildung 6-30: Wirkungsgrad nach Auslastung, Abluftventilator, Verwaltungstrakt, 2016/17

Der Zusammenhang zwischen der Ansteuerung des Ventilators mit dem Frequenzumformer und der elektrischen Leistung ist dagegen deutlich besser zu erkennen, siehe Abbildung 6-31 und Abbildung 6-32. Allerdings fällt auch in dieser Darstellung der Zuluftventilator mit einer rechnerischen Belastung von über 70 % aus dem Rahmen, während der Abluftventilator vergleichbare Messwerte wie in der RLT-Anlage "Klassentrakt" aufweist.

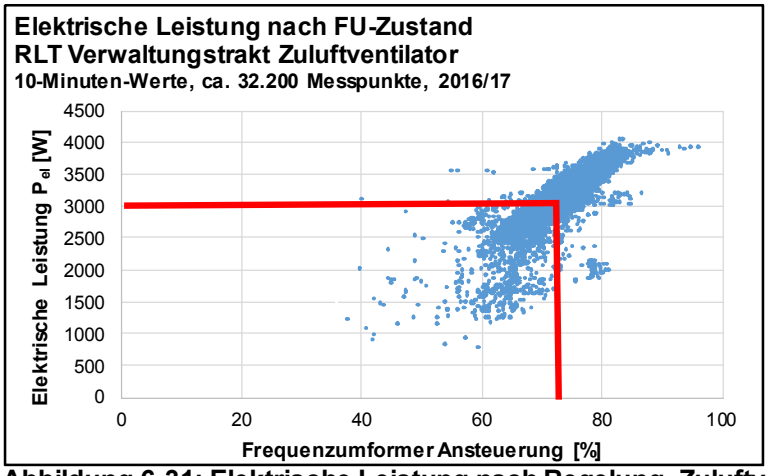

Abbildung 6-31: Elektrische Leistung nach Regelung, Zuluftventilator, Verwaltungstrakt, 2016/17

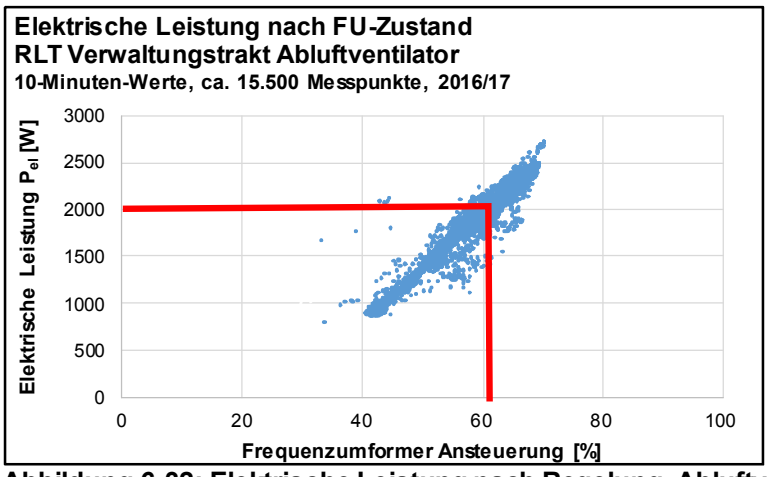

Abbildung 6-32: Elektrische Leistung nach Regelung, Abluftventilator, Verwaltungstrakt, 2016/17

6.6 Erkenntnisse und Fazit

Der gemessene Temperaturwirkungsgrad beider zentraler RLT-Anlagen liegt im Optimum bei etwa 82 %. Die Regelung durch Änderung der Taktzahl des Umschaltspeichers ist gut messtechnisch nachweisbar. Die Herstellerwerte von 92 % (ermittelt unter optimalen Bedingungen) konnten nicht ganz erreicht werden, dennoch ist das Ergebnis zufriedenstellend.

Die nutzbar gemachten Wärmemengen liegen bei 42,9 MWh/a im Klassentrakt bzw. 62,4 MWh/a für den Verwaltungstrakt. Das ist insgesamt das Vierfache der Energiemenge, die in Form von Fernwärme eingebracht wird.

Die Ventilatoren arbeiten mit einem hohen Wirkungsgrad von ca. 75 %, wobei der Zuluftventilator der RLT-Anlage Verwaltungstrakt etwas zu hohe Messwerte bei der Stromaufnahme aufweist, was zu nur 50 % Wirkungsgrad führt. Dennoch liegen alle Ventilatoren in der Klasse SFP3 nach DIN EN 13779, was auch der Herstellerangabe in der Planung entspricht. Die erreichte Effizienz entspricht etwa den Kennwerten des Referenzgebäudes der EnEV 2016. Die Messwerte sind besser als die Standardwerte der DIN V 18599, welche verwendet werden, sofern die realen Randdaten nicht vorliegen.

Dennoch ist festzustellen, dass in den beiden RLT-Anlagen 16,3 MWh/a (Klassentrakt) bzw. 19,7 MWh/a (Verwaltungstrakt) an Strom als Hilfsenergien aufgewendet werden.

Für die untergeordneten Lüftungsanlagen konnten – mangels messtechnischer Ausstattung – keine weiteren Kennwerte bestimmt werden. Die Stromaufnahme der Technik liegt im erwarteten Bereich.

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

7 Messergebnisse Funktion

Zur Funktionsanalyse werden Messdaten über kurze Zeiträume von Stunden oder Tagen analysiert – nicht wie bei der Energiebilanzierung anhand von Monats- oder Jahresmittelwerten. Eine geeignete Darstellung sind Carpetplots. Sie zeigen wiederkehrende Muster im Tagesverlauf, die sich wöchentlich wiederholen.

Der nachfolgende Abschnitt hat das Ziel, die im Kapitel 5 beschriebenen Regelungsoptionen und Zeitschaltprogramme der Lüftungsanlagen nachzuvollziehen. Dies betrifft vor allem die beiden Hauptlüftungsanlagen. Dazu werden Temperaturen, Volumenströme und Druckverluste der Ventilatoren, Schaltbefehle für die Volumenstromregler sowie Stromflussmessungen der Ventilatoren ausgewertet. Die Basis ist die Masterarbeit "Untersuchung und Optimierung der Luftheizung- und Luftkühlung für eine Passivhausschule" von Adrian Rehbein [17].

7.1 Messorte und Messtechnik

In Kapitel 6.1 findet sich eine tabellarische Übersicht zur installierten Messtechnik, die auch zur Funktionsüberwachung herangezogen wird. Abbildung 7-1 und Abbildung 7-2 geben einen grafischen Überblick der relevanten Daten für die beiden Hauptlüftungsanlagen.

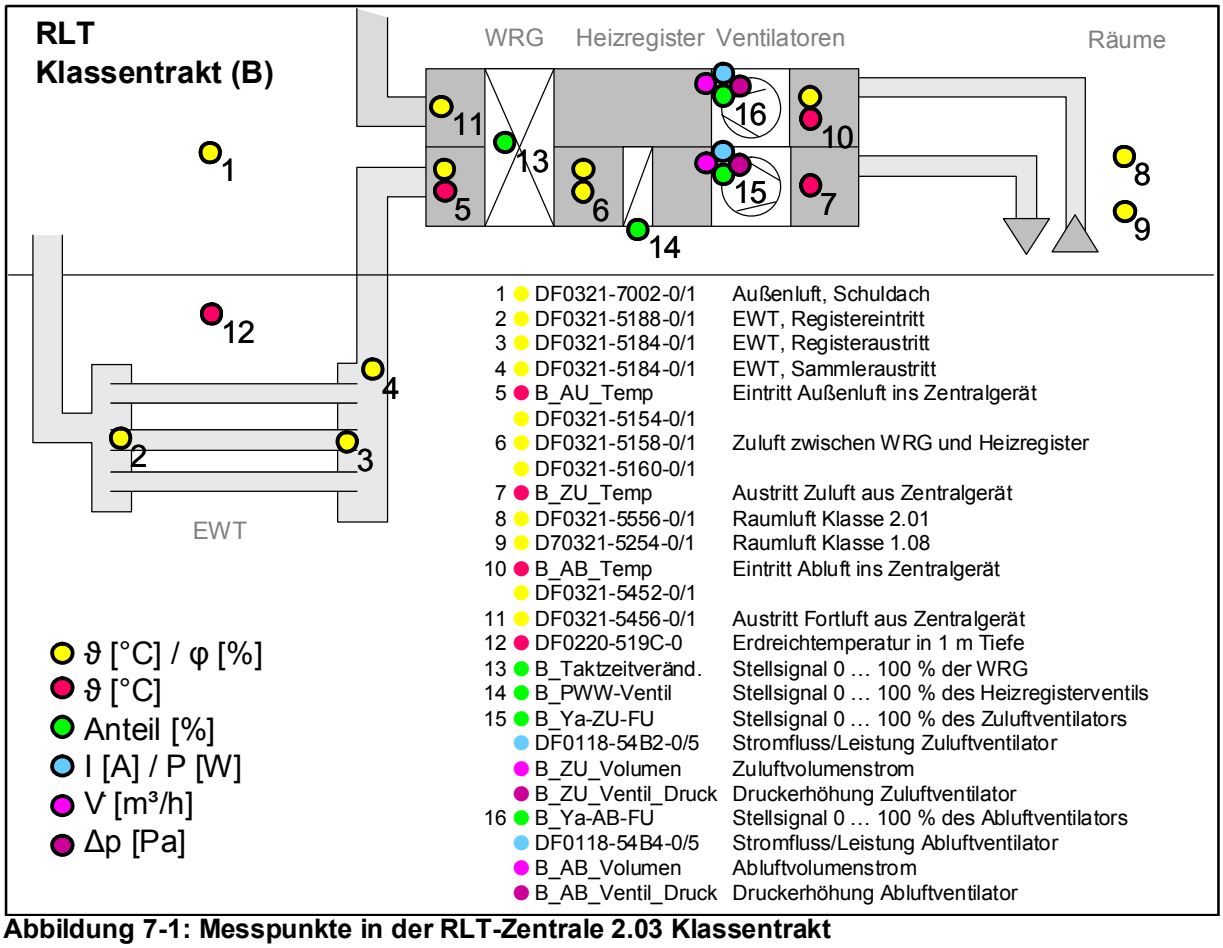

Abbildung 7-1: Messpunkte in der RLT-Zentrale 2.03 Klassentrakt

Die Stromfluss- bzw. Leistungsmessungen an den Ventilatoren werden verwendet, um die korrekten Betriebszeiten zu prüfen. Dies erfolgt auch für die untergeordneten Lüftungsanlagen, soweit Messdaten vorliegen.

Die Lufttemperaturen geben Aufschluss darüber, wie gut die Zulufttemperaturregelung arbeitet und ob Wärmerückgewinnung und Heizregister korrekt verwendet werden. Auch können die Temperaturen verwendet werden, um Regelfunktionen zu überprüfen. Die sommerliche Nachtlüftung sollte nur starten, wenn eine Reihe von Temperaturbedingungen eingehalten wird.

In den beiden Hauptlüftungsanlagen werden Regelungsparameter der Zentralkomponenten mitgeschrieben. Dies sind Stellsignale von Dreiwegeventilen, Frequenzumformern, Klappenstellungen. Sie werden zur Funktionsüberwachung der betreffenden Komponenten – z. B. der Heizfunktion – verwendet.

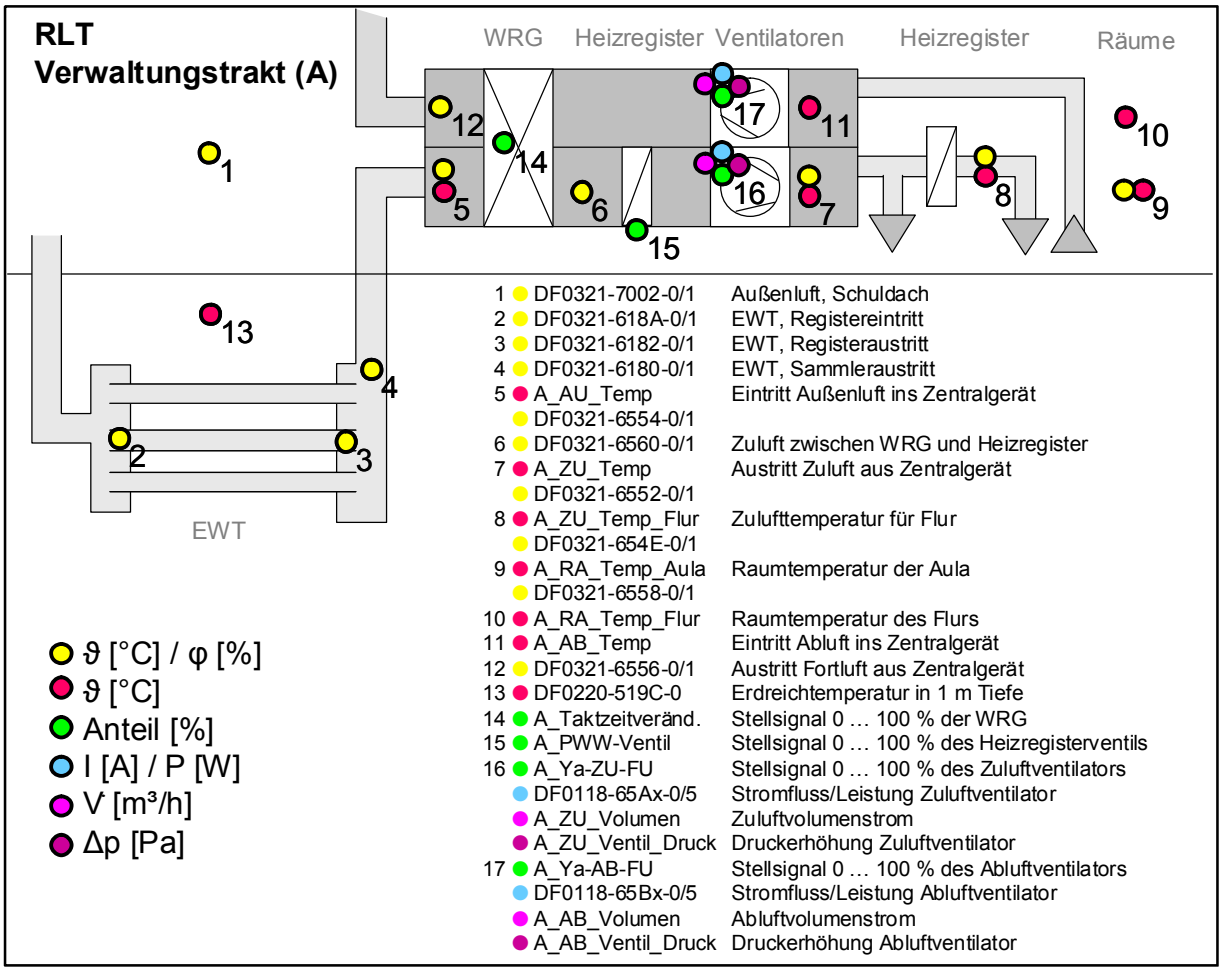

Abbildung 7-2: Messpunkte in der RLT-Zentrale 2.18 Verwaltungstrakt

Anhand der Ansteuerung der raumweisen Volumenstromregler sowie der Ventilatorvolumenströme lässt sich ein Rückschluss über die korrekte Funktion der morgendlichen Vorspülphase, der Betriebszeit und sommerlichen Nachtlüftung ziehen.

Zu guter Letzt geben die Filterdruckverluste Aufschluss über die tatsächlichen Wartungsintervalle und ermöglichen es, Empfehlungen zum künftigen Betrieb auszusprechen.

Carpetplots

Zur Auswertung der Messwerte kommen vielfach Carpetplots zum Einsatz. Es handelt sich um eine Diagrammform mit zwei Zeitachsen: auf der Abszisse X sind alle Tage nebeneinander dargestellt, auf der Ordinate Y die einzelnen Stunden eines Tages. In den sich ergebenden 8760 Feldern des Diagramms wird eine Messgröße dargestellt. Unterschiedliche Messwerte werden in unterschiedlicher Farbintensität (blau bis rot für Minimal- bis Maximalwerte) markiert.

Diese Art der Darstellung ermöglicht es, zeitliche Abläufe – insbesondere wiederkehrende periodische Messwertänderungen – nachzuvollziehen. Ausreißer von den Zeitprogrammen können leicht identifiziert werden, auch Änderungen des Nutzerverhaltens, Unterschiede zwischen den Jahreszeiten sowie zeitlich veränderliche Größen, z. B. Verschlechterungen von Effizienzen.

7.2 Außenluft- und Erdreichtemperatur

Abbildung 7-3 zeigt die Wochenwerte der Außenluft- und Erdreichtemperatur für die Jahre 2016 und 2017. Die Originaldaten liegen als 10-Minuten-Werte vor. Diese Temperaturen werden verwendet, um einerseits den Erdreichwärmeübertrager zu bewerten (siehe Kapitel 8), andererseits ist die Außentemperatur ein Indiz für das Einschalten der Lüftungsanlage.

Im Rahmen einer Masterarbeit parallel zur Inbetriebnahme des Monitorings, wurde die Datenqualität der erfassten Außenlufttemperatur geprüft [22]. Vergleichswerte liefern Messungen des DWD. Im Allgemeinen sind die Temperaturmesswerte der Wetterstation der St. Franziskus-Grundschule sehr schlüssig und als plausibel anzusehen. Die Verläufe sind sehr ähnlich. Zu erkennen sind jedoch oftmals kleinere Messwerte bei der Maximal- und Minimaltemperatur der Messstation des DWD (ca. 1 K).

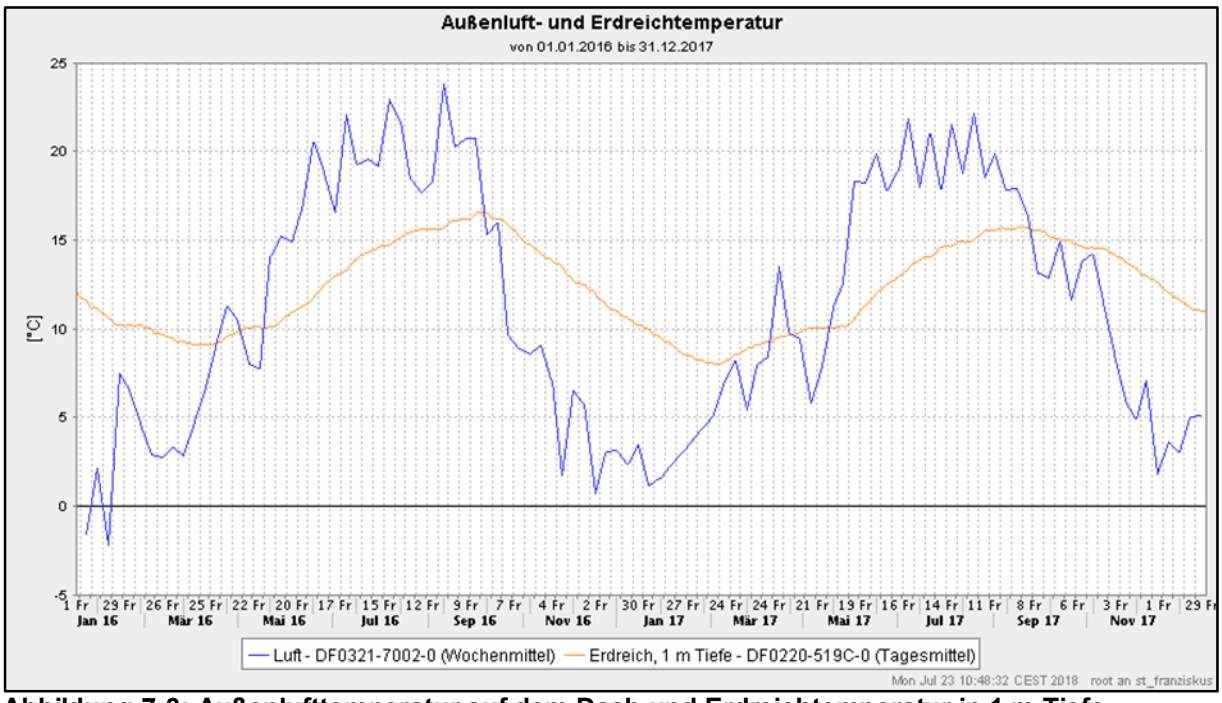

Abbildung 7-3: Außenlufttemperatur auf dem Dach und Erdreichtemperatur in 1 m Tiefe

Laut WMO-Kriterien werden die Messungen auf unbebauter Fläche in 2 Meter Höhe durchgeführt. Dies kommt als ein Grund für die Temperaturabweichung infrage. Des Weiteren können die Tiefsttemperaturen in 2 Meter Höhe über dem Erdboden deutlich niedriger sein als die auf dem Schuldach. Grund dafür ist die sogenannte Ausstrahlung. Der Boden kühlt schneller aus als das Dach, ebenso sinkt kalte Luft nach unten. Das Gebäude dient in dem Fall als Wärmespeicher. Die Maximaltemperatur, die in der Mittags- und Nachmittagszeit erreicht wird, kann ebenfalls von diesem Effekt beeinflusst werden. Das Flachdach und das PV-Feld heizen sich stark auf und haben so eventuell Einfluss auf das Messergebnis.

7.3 Lufttemperaturen

Bei der Interpretation der Zahlen für die Lufttemperatur ist zu beachten, dass alle Messfühler eine Messungenauigkeit aufweisen, die mit etwa ± 1 K angesetzt werden kann. Darüber hinaus sind einige Fühler frei von Luft umspült, andere an einer Fläche angebracht, so dass sich dort Speichereffekte bemerkbar machen.

7.3.1 RLT Klassentrakt

Abbildung 7-4 zeigt den Verlauf der Lufttemperaturen in der RLT-Anlage "Klassentrakt" für einen Wintermonat. Aufgetragen sind monatliche Mittelwerte, die sich aus 10-Minuten-Werten ergeben, wobei nur die Phasen mit eingeschalteter Lüftung berücksichtigt wurden (Mo – Fr, 3 oder 5 Uhr bis 17 Uhr).

Die 5°C kalte Luft – gemessen auf dem Dach – tritt in den Erdreichwärmeübertrager ein. Sie verlässt ihn etwa 6 °C wärmer und strömt in das Gebäude ein. In der RLT-Anlage wird die Eintrittstemperatur mit knapp über 10°C registriert. Nach der Wärmerückgewinnung ist sie im Schnitt 20°C warm. Das Heizregister führt zu einer Erwärmung auf 21°C.

Die Raumluft auf Nord- und Südseite des Gebäudes ist 22°C bzw. 23°C warm – gemessen in den Räumen. Das Zentralgerät erfasst eine gemischte Ablufttemperatur aller versorgten Räume (auch Flure) von 20°C. Nach der Durchströmung der Wärmerückgewinnung wird 12°C warme Fortluft an die Umgebung abgegeben.

Die Effekte der Vorwärmung im Erdreich sowie die Funktion der Wärmerückgewinnung sind gut erkennbar.

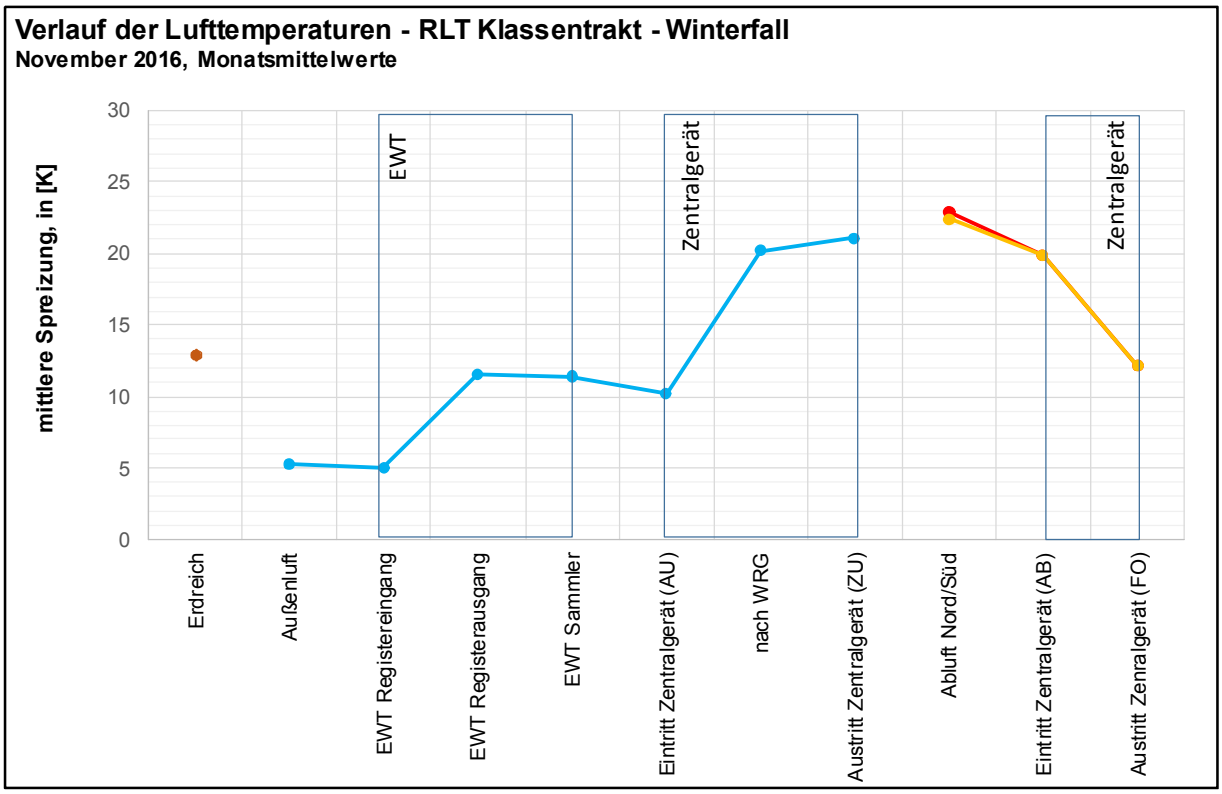

Abbildung 7-4: Verlauf der Lufttemperaturen – Klassentrakt – Winterfall

In Abbildung 7-5 sind die Vorgänge für den Sommerfall aufgetragen. Der Erdreichwärmeübertrager führt ausgehend von der Eintrittstemperatur in das Zentralgerät zu einer Abkühlung von 3 K. Die Wärmerückgewinnung ist im Sommer kaum wirksam.

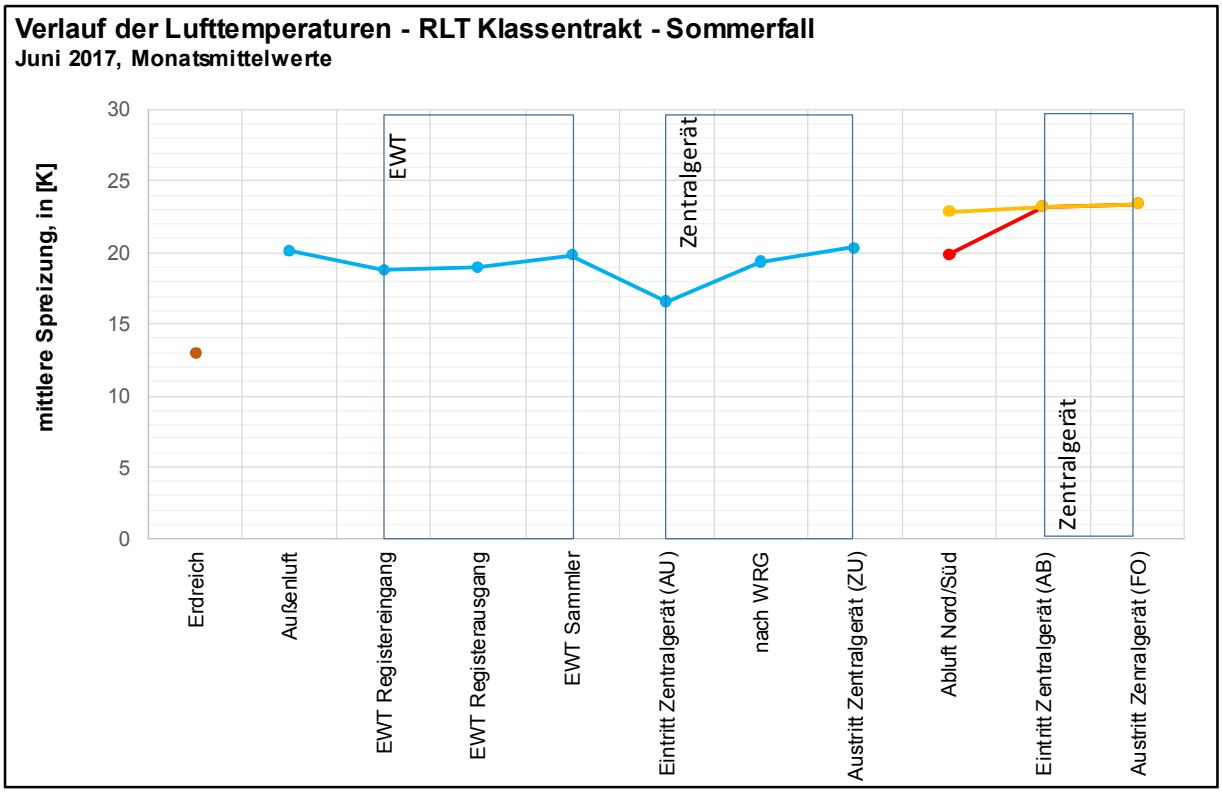

Abbildung 7-5: Verlauf der Lufttemperaturen – Klassentrakt – Sommerfall

Tabelle 7-1 fasst alle Lufttemperaturen der 2 Jahre des Intensivmonitorings zusammen. Nicht alle Zwischentemperaturen sind eingetragen, sondern nur die als sehr vertrauenswürdig eingestuften.

Tabelle 7-1: Verlauf der Lufttemperaturen – Klassentrakt

alle Werte in [°C]		Erd-reich	Außen-luft	Eintritt Zentral-gerät (AU)	nach WRG	Austritt Zentral-gerät (ZU)	Raum 1.08 Süd	Raum 2.01 Nord	Eintritt Zentral-gerät (AB)	Austritt Zentral-gerät (FO)
2016	Januar	11,0	1,6	9,1	19,5	29,2	23,3	20,3	23,4	11,9
	Februar	10,0	4,4	8,6	19,4	26,7	23,4	20,9	23,8	11,1
	März	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
	April	9,9	10,0	10,5	18,5	20,6	23,9	21,9	23,3	13,4
	Mai	10,9	16,3	13,5	18,5	20,6	25,3	22,2	24,5	18,4
	Juni	12,9	19,7	16,4	16,8	19,5	25,2	22,9	24,7	23,8
	Juli	14,6	21,0	17,6	17,6	20,3	25,2	22,9	25,0	24,2
	August	15,7	18,9	17,5	17,5	20,1	24,6	22,9	23,8	23,9
	September	16,3	18,9	17,9	17,9	20,3	25,0	22,9	22,8	23,7
	Oktober	15,0	9,5	13,3	18,5	20,6	21,8	22,9	20,1	15,2
	November	13,0	5,3	10,2	18,2	21,1	22,4	22,9	19,9	12,2
	Dezember	11,0	3,4	8,3	16,6	20,2	20,2	17,5	18,1	10,3
2017	Januar	9,3	2,1	5,7	21,8	28,8	21,2	k. A.	21,3	12,5
	Februar	8,2	6,1	7,2	19,6	24,4	21,3	8,9	20,5	11,3
	März	9,1	9,3	11,9	22,0	23,6	21,2	21,2	21,3	14,3
	April	9,9	8,4	11,7	20,8	22,6	20,6	21,0	21,0	13,8
	Mai	10,7	16,5	13,7	17,4	19,9	22,0	19,9	21,7	18,8
	Juni	13,1	20,1	16,6	17,6	20,4	22,8	19,8	23,2	23,4
	Juli	14,6	20,7	17,5	18,1	20,6	23,0	23,4	22,8	23,3
	August	15,5	20,2	17,9	18,4	21,0	23,3	23,3	23,4	24,6
	September	15,5	15,1	15,8	18,2	20,9	21,6	22,3	22,2	21,6
	Oktober	14,6	13,0	14,5	19,3	21,9	21,2	22,8	21,7	18,0
	November	13,5	7,1	11,3	18,9	22,5	20,4	22,9	20,5	12,9
	Dezember	11,7	3,9	9,3	18,8	26,1	20,8	20,9	20,6	11,6

7.3.2 RLT Verwaltungstrakt

Analog zur Auswertung des Klassentraktes zeigt Abbildung 7-6 den Verlauf der Lufttemperaturen in der RLT-Anlage "Verwaltungstrakt" für einen Wintermonat.

Die 5°C kalte Luft – gemessen auf dem Dach – tritt in den Erdreichwärmeübertrager ein. Sie verlässt ihn mit 9°C und strömt in das Gebäude ein. An dieser Stelle ergibt sich ein Unterschied von 2 K zur Klassentraktanlage (dort: 11°C), was eher auf Messfehler zurückzuführen sein dürfte als auf reale Unterschiede im Wärmeübertragungsverhalten.

In der RLT-Anlage wird die Eintrittstemperatur mit knapp unter 11°C registriert. Das ist fast identisch zur Klassentraktanlage. Nach der Wärmerückgewinnung ist sie im Schnitt 20°C warm. Das ist in der Klassentraktanlage ebenso.

Das Heizregister führt zu einer Erwärmung auf 24°C, bei den Fluren auf 29°C. Die Raumluft in der Aula und im Flur wird mit etwa 21 … 22°C gemessen. Sie liegt etwas niedriger als die Raumtemperaturen des Klassentraktes. Das Zentralgerät erfasst eine gemischte Ablufttemperatur aller versorgten Räume (auch Flure) von knapp 23°C. Nach der Durchströmung der Wärmerückgewinnung wird 13°C warme Fortluft an die Umgebung abgegeben. Hier ähneln die Zahlen wieder der Klassentraktanlage.

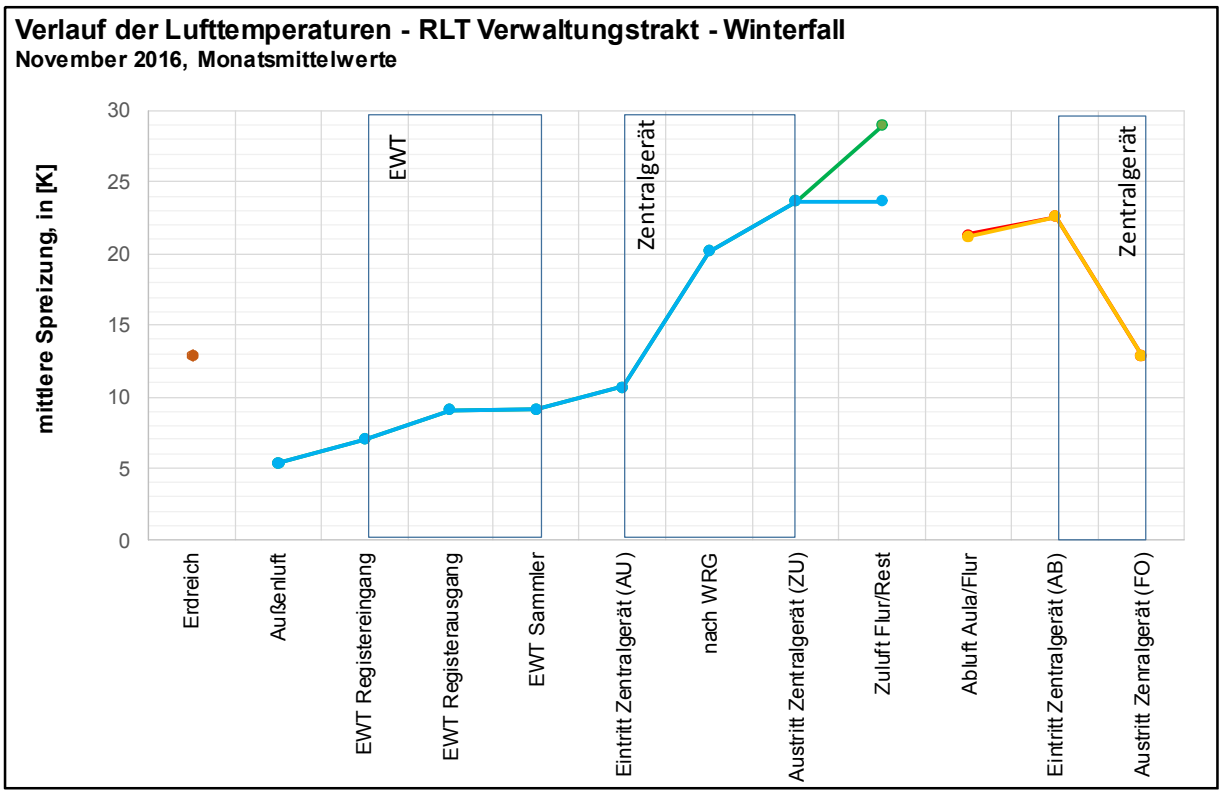

Abbildung 7-6: Verlauf der Lufttemperaturen – Verwaltungstrakt – Winterfall

Abbildung 7-7 zeigt die Zusammenhänge für einen Sommermonat, Tabelle 7-2 für alle untersuchten 24 Monate.

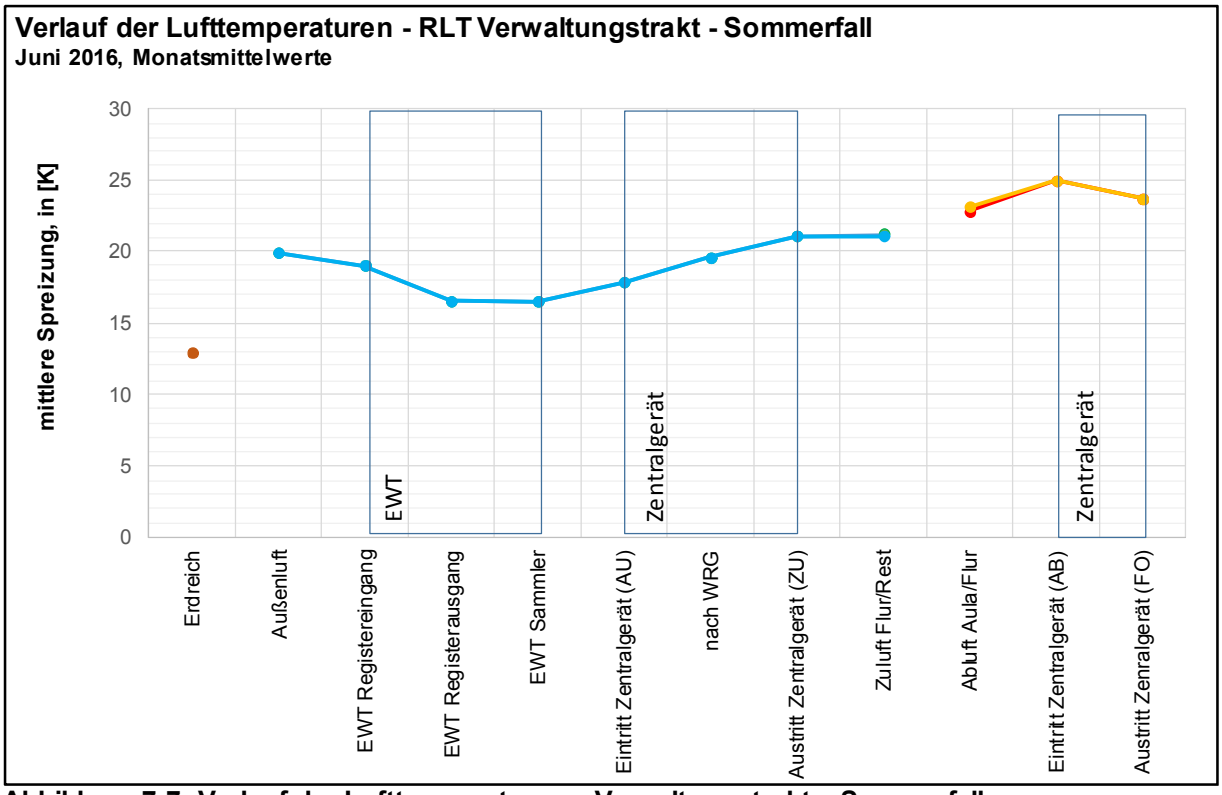

Abbildung 7-7: Verlauf der Lufttemperaturen – Verwaltungstrakt – Sommerfall

Tabelle 7-2: Verlauf der Lufttemperaturen – Verwaltungstrakt

alle Werte in [°C]		Erd-reich	Au-ßenluft	Eintritt Zent-ralge-rät (AU)	nach WRG	Aus-tritt Zent-ralge-rät (ZU)	Zuluft Tem-pera-tur Flur	Aula	Flur	Eintritt Zent-ralge-rät (AB)	Aus-tritt Zent-ralge-rät (FO)
2016	Januar	11,0	1,6	10,4	21,6	26,2	31,3	21,1	20,1	22,5	13,1
	Februar	10,0	4,4	9,0	20,6	24,5	31,4	21,7	21,5	23,0	11,7
	März	9,2	5,6	9,1	20,7	24,1	30,3	22,1	21,7	23,3	12,2
	April	9,9	9,9	11,3	20,0	21,7	25,6	21,8	21,8	23,4	15,2
	Mai	10,9	16,2	14,8	20,8	22,0	23,0	23,1	23,2	24,9	19,6
	Juni	12,9	19,8	17,8	19,6	21,1	21,2	22,8	23,1	25,0	23,7
	Juli	14,6	20,8	19,1	20,4	21,9	22,0	23,1	23,8	25,3	24,3
	August	15,7	18,7	18,5	19,7	21,3	21,3	22,4	23,0	24,4	23,4
	September	16,3	19,4	19,3	20,4	21,9	21,9	23,6	23,5	25,4	24,2
	Oktober	15,1	9,6	13,8	20,4	22,1	26,2	21,0	21,4	22,6	15,8
	November	13,0	5,4	10,7	20,2	23,2	29,0	21,3	21,2	22,6	12,9
	Dezember	11,0	3,4	9,1	19,1	22,5	29,4	20,5	20,9	21,6	11,3
2017	Januar	9,4	2,0	6,5	19,1	24,5	30,4	21,1	20,8	22,2	9,5
	Februar	8,2	6,1	7,8	19,7	23,7	28,8	21,3	21,2	22,5	10,6
	März	9,1	9,2	10,6	19,8	21,6	22,0	21,2	20,5	22,5	13,3
	April	9,9	8,3	10,9	18,9	20,6	22,4	20,6	20,9	22,2	14,3
	Mai	10,7	16,1	14,6	19,5	21,0	21,2	21,9	22,0	23,7	19,3
	Juni	13,1	19,5	17,8	19,9	21,4	21,4	22,8	23,6	25,0	23,3
	Juli	14,6	19,8	19,0	20,3	21,8	21,9	22,8	23,4	25,1	24,0
	August	15,5	19,7	19,4	20,7	22,3	22,3	23,4	23,8	25,5	24,6
	September	15,5	14,9	17,0	19,5	21,0	21,1	21,7	22,0	23,6	21,9
	Oktober	14,7	13,0	15,8	19,6	21,2	21,8	21,2	21,5	23,0	19,9
	November	13,4	7,0	11,6	19,9	21,9	29,1	20,4	21,5	22,0	13,6
	Dezember	11,7	4,0	9,3	19,4	24,4	28,5	20,8	20,4	22,0	11,6

7.3.3 Zu- und Abluft am Zentralgerät

Abbildung 7-8 und Abbildung 7-9 zeigen den Sollwert der Zulufttemperatur sowie die tatsächlich erreichte Zulufttemperatur in der RLT "Klassentrakt" als Carpetplots (Erläuterungen zu dieser Diagrammart siehe Kapitel 7.1).

Hinsichtlich der Sollwerte ist zu erkennen, dass der Hausmeister insbesondere im Winter fast wöchentlich Änderungen vorgenommen hat, um eine Nutzerzufriedenheit zu erreichen. Dabei gab es Sprünge von 25°C auf 20°C auf 35°C und zurück in kurzer Zeit. Im Sommer wurde jeweils ein sehr niedriger Zulufttemperaturwert gewählt und kaum geändert. Diese Art der manuellen Regelung ist weder zeitgemäß noch praktikabel. Nach EnEV ist sie auch nicht zulässig. Die Monitoringphase ist als Zeitraum zum Finden optimaler Einstellparameter zu verstehen, Im Rahmen der Lüftungsoptimierung wurde auf eine automatische Kaskadenregelung geändert.

Bei den tatsächlichen Zulufttemperaturen ist anzumerken, dass außerhalb der Betriebszeiten der Lüftungsanlage die Messfühler nicht umströmt werden und sich der Aufstellraumtemperatur angleichen. Es sind nur die Zahlenwerte innerhalb des Lüftungsbetriebs relevant. Es ist zu erkennen, dass die im Winter gewünschten Zulufttemperaturen erreicht werden. Eine Ausnahme ist im Januar 2017 zu erkennen: hier gab es technische Probleme mit dem Fernwärmeanschluss.

Im Verwaltungstrakt ist die Situation sehr ähnlich, wie Abbildung 7-10 und Abbildung 7-11 zeigen. Der Hausmeister hat Beschwerden in einem Gebäudeteil meist in beiden Regelungen parallel umgesetzt, jedoch in der Anlage "Verwaltungstrakt" keine so großen Sprünge programmiert.

Zuluft Klassentrakt

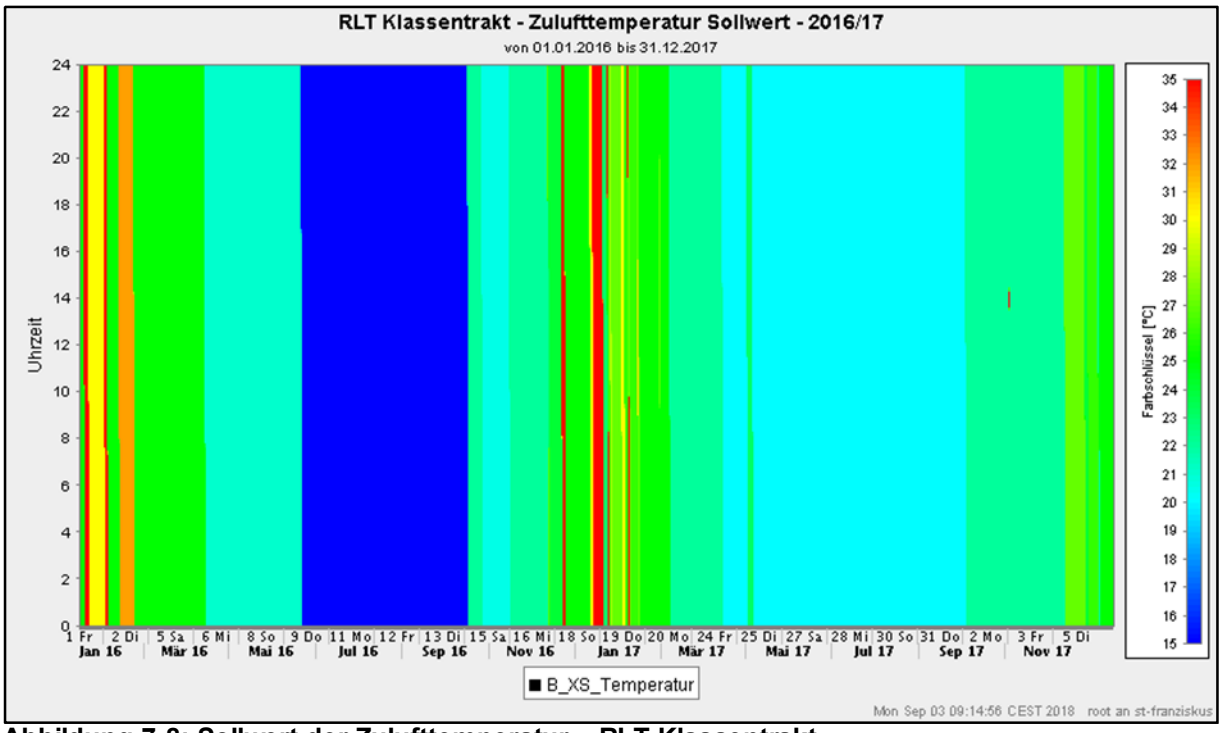

Abbildung 7-8: Sollwert der Zulufttemperatur – RLT Klassentrakt

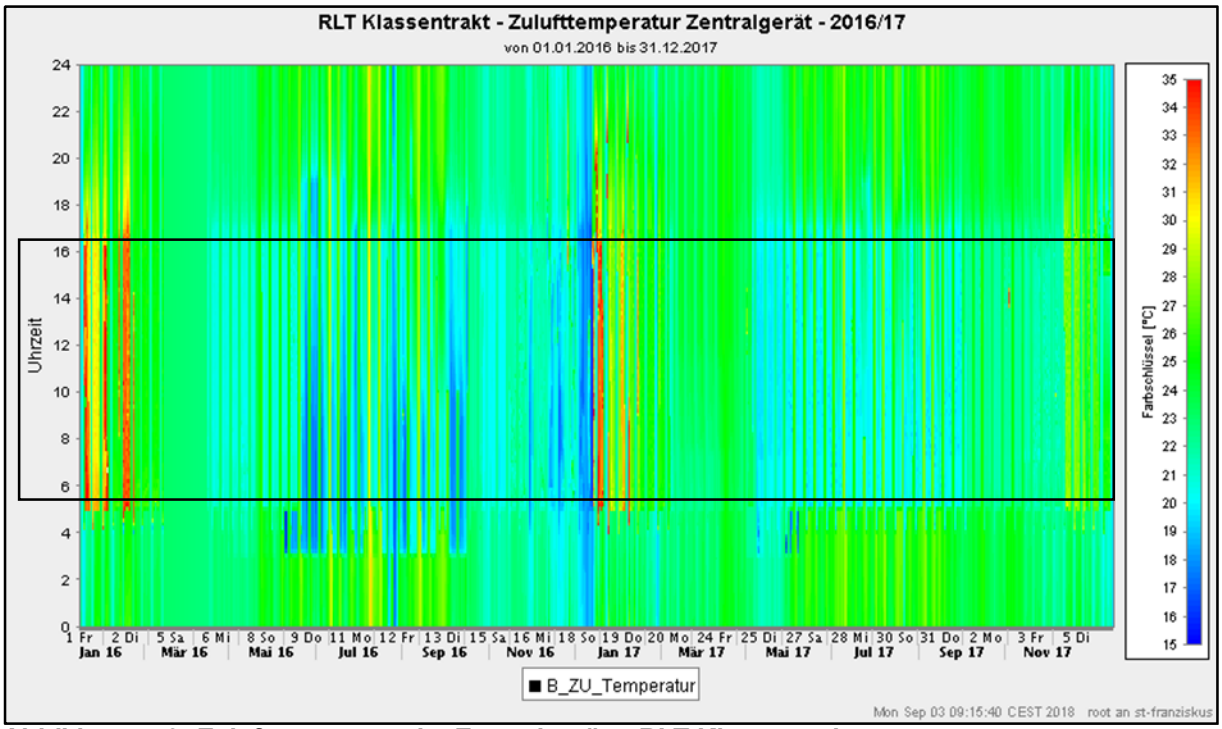

Abbildung 7-9: Zulufttemperatur im Zentralgerät – RLT Klassentrakt

Zuluft Verwaltungstrakt

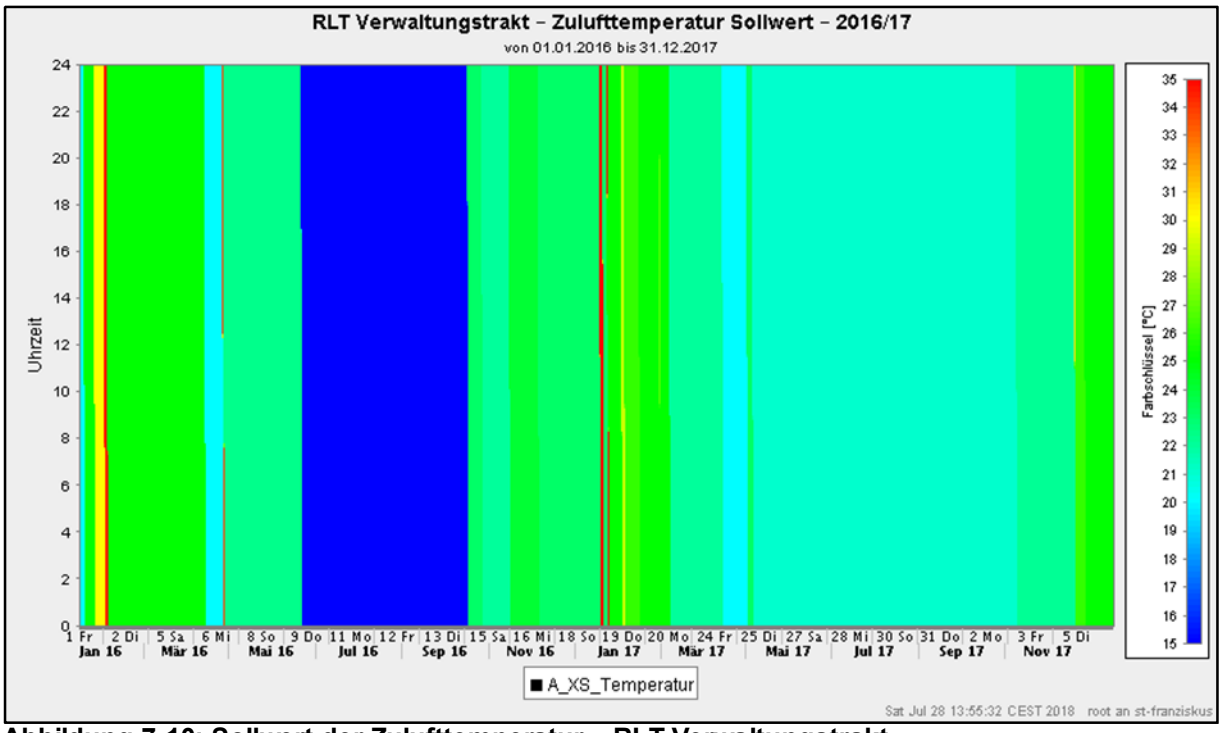

Abbildung 7-10: Sollwert der Zulufttemperatur – RLT Verwaltungstrakt

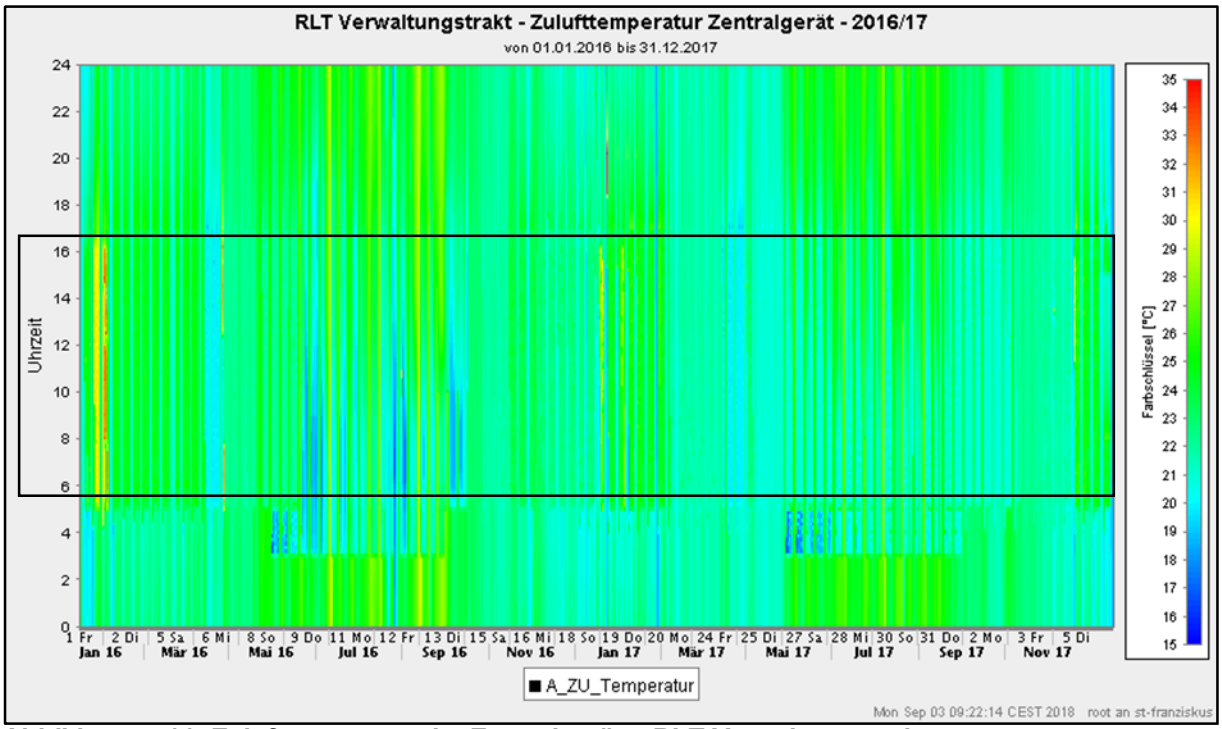

Abbildung 7-11: Zulufttemperatur im Zentralgerät – RLT Verwaltungstrakt

Abbildung 7-12 zeigt die Zulufttemperatur in den Fluren. Der zugehörige Sollwert wird nicht im Monitoring erfasst, so dass es keinen Soll-Ist-Vergleich gibt. Es ist zu erkennen, dass insgesamt höhere Zulufttemperaturen erreicht werden.

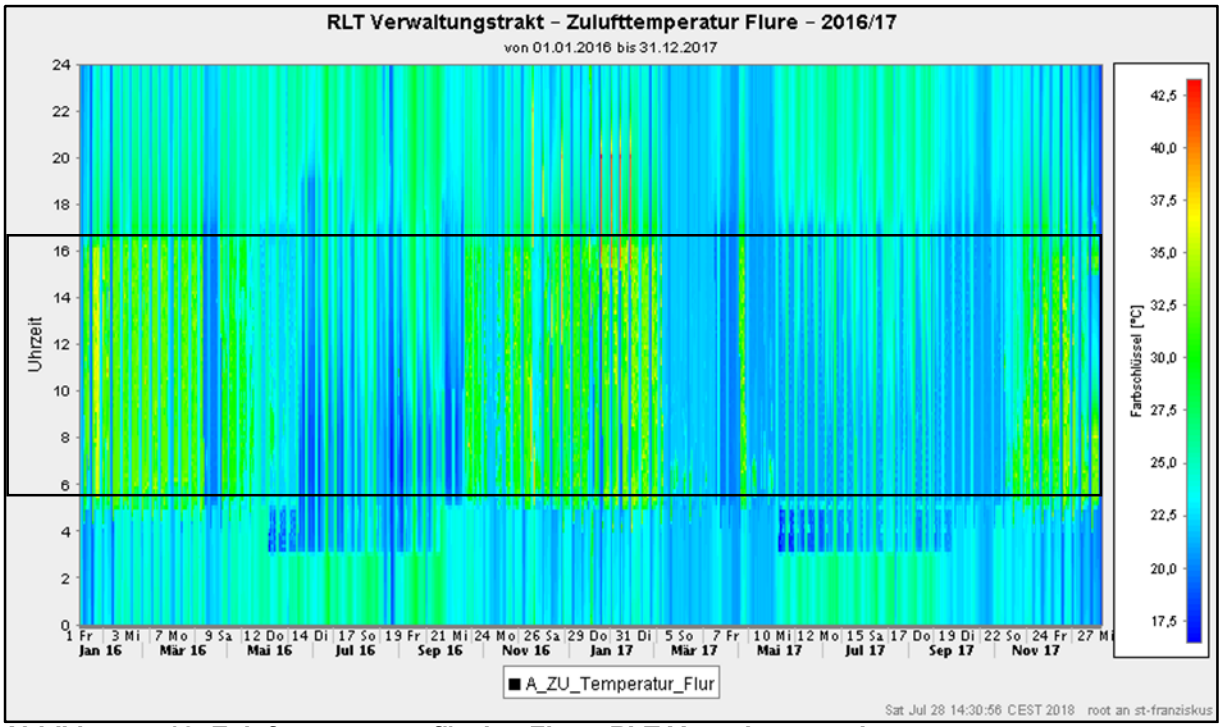

Abbildung 7-12: Zulufttemperatur für den Flur – RLT Verwaltungstrakt

Abluft

Abbildung 7-13 und Abbildung 7-14 zeigen die Ablufttemperaturen, gemessen als Mischwerte im RLT-Zentralgerät. Der relevante Zeitraum für die Nutzeranwesenheit ist markiert. Im Klassentrakt sind deutliche Unterschreitungen Anfang Januar 2017 erkennbar, was mit Problemen der Fernwärmeversorgung zusammenhängt.

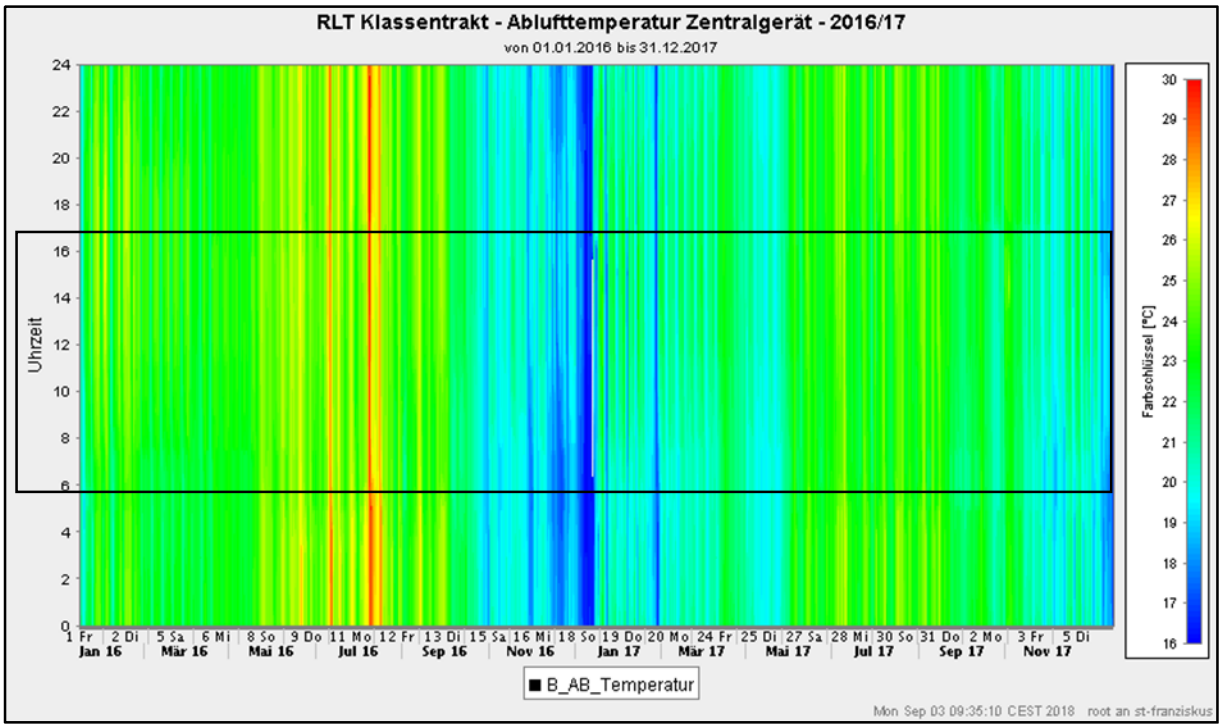

Abbildung 7-13: Ablufttemperatur im Zentralgerät – RLT Klassentrakt

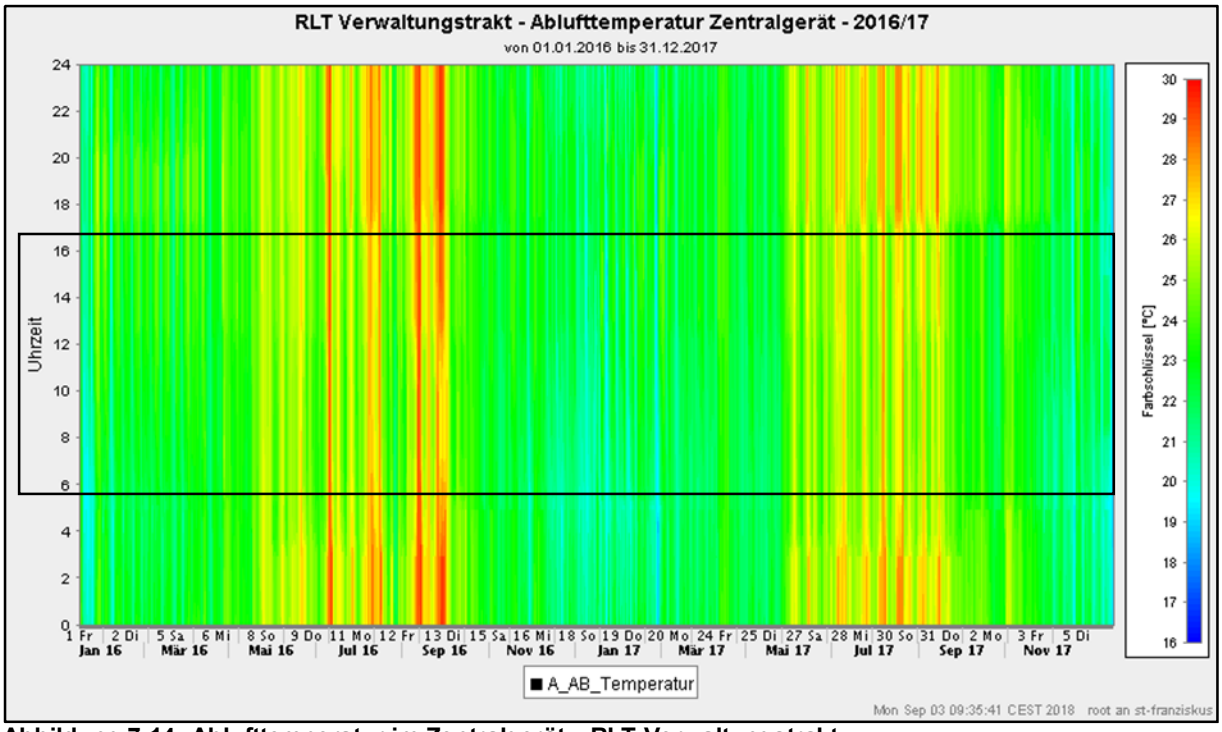

Abbildung 7-14: Ablufttemperatur im Zentralgerät – RLT Verwaltungstrakt

Im Sommerhalbjahr ist die Neigung zur Überwärmung im Verwaltungstrakt größer. Insbesondere im Spätsommer – mit der flach stehenden Sonne – sind starke Wärmeeinträge in die Aula festzustellen, was zu einer insgesamt höheren Ablufttemperatur als im Klassentrakt führt. Weitere Auswertungen zu einzelnen Räumen sind im Abschlussbericht 5 zu finden.

7.4 Ventilatoren RLT Klassentrakt

7.4.1 Volumenströme

Tabelle 7-3 fasst die Volumenströme der Zu- und Abluftventilatoren im Betrieb zusammen.

Tabelle 7-3: Monatliche Volumenströme und Betriebszeiten – RLT Klassentrakt

		Betriebsstunden, [h/mon]	$\dot{V}_{ZU}$, in [m³/h]	$\dot{V}_{AB}$, in [m³/h]
2016	Januar	272	6134	5712
	Februar	261	6176	5998
	März	k. A.	k. A.	k. A.
	April	266	6452	6243
	Mai	255	6215	6031
	Juni	348	6343	6177
	Juli	295	5325	5279
	August	417	6582	6359
	September	349	6876	6620
	Oktober	266	6587	6364
	November	285	7167	6858
	Dezember	293	6854	6621
2017	Januar	292	6934	6645
	Februar	247	7167	6861
	März	284	7345	6995
	April	256	6947	6680
	Mai	299	6338	6129
	Juni	272	6777	6547
	Juli	290	5728	5669
	August	323	6878	6602
	September	260	6964	6640
	Oktober	273	6914	6022
	November	272	6935	5928
	Dezember	225	6817	6579

Im Mittel sind 6630 m³/h als Zuluftvolumenstrom und 6330 m³/h als Abluftvolumenstrom festzustellen. Die Werte schwanken nur wenig; in den Monaten mit sommerlicher Nachtlüftung liegt der Wert etwas höher. Die Differenz ergibt sich aus der separaten Abluftanlage in den WCs.

Abbildung 7-15 zeigt den Volumenstrom der Zuluftanlage als Carpetplot, Abbildung 7-16 den Abluftvolumenstrom. Der morgendliche Start ist gut erkennbar; ebenfalls der frühere Betriebsbeginn am Montag. Die sommerliche Nachtlüftung ist erkennbar – bis zu ihrer unbeabsichtigten Deaktivierung im Mai 2017. Es ist ebenfalls zu sehen, dass der Ventilator jeweils erst nach einer halben Stunde seinen maximalen Volumenstrom erreicht.

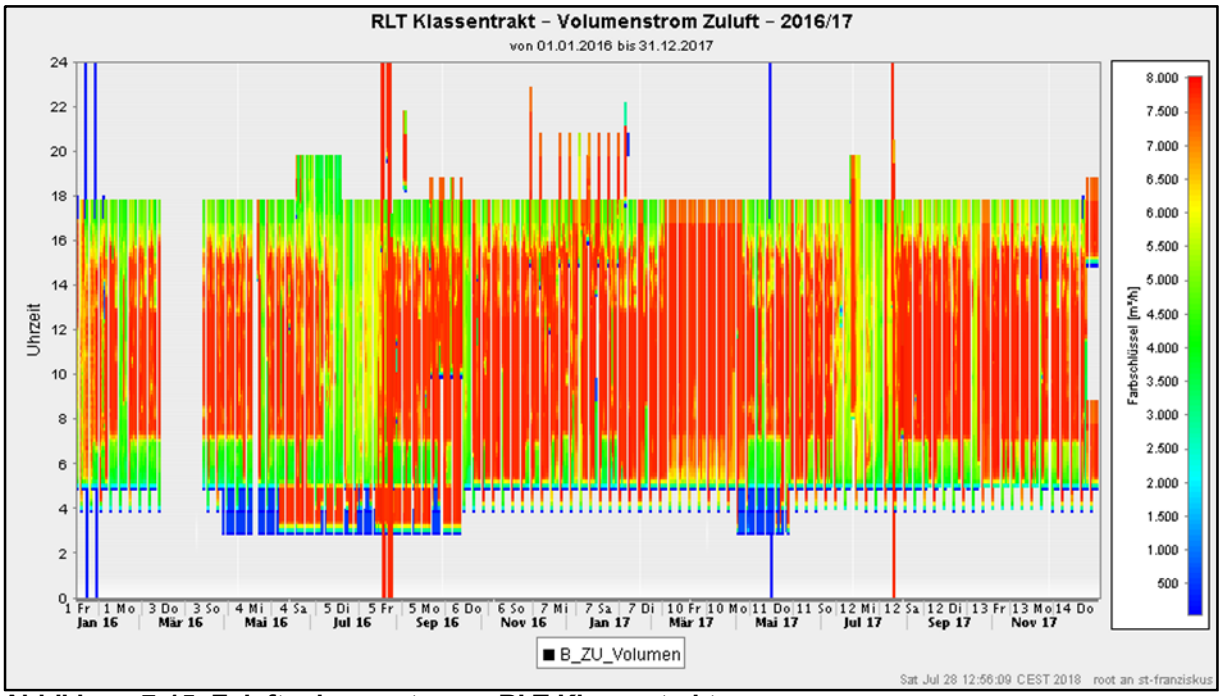

Abbildung 7-15: Zuluftvolumenstrom – RLT Klassentrakt

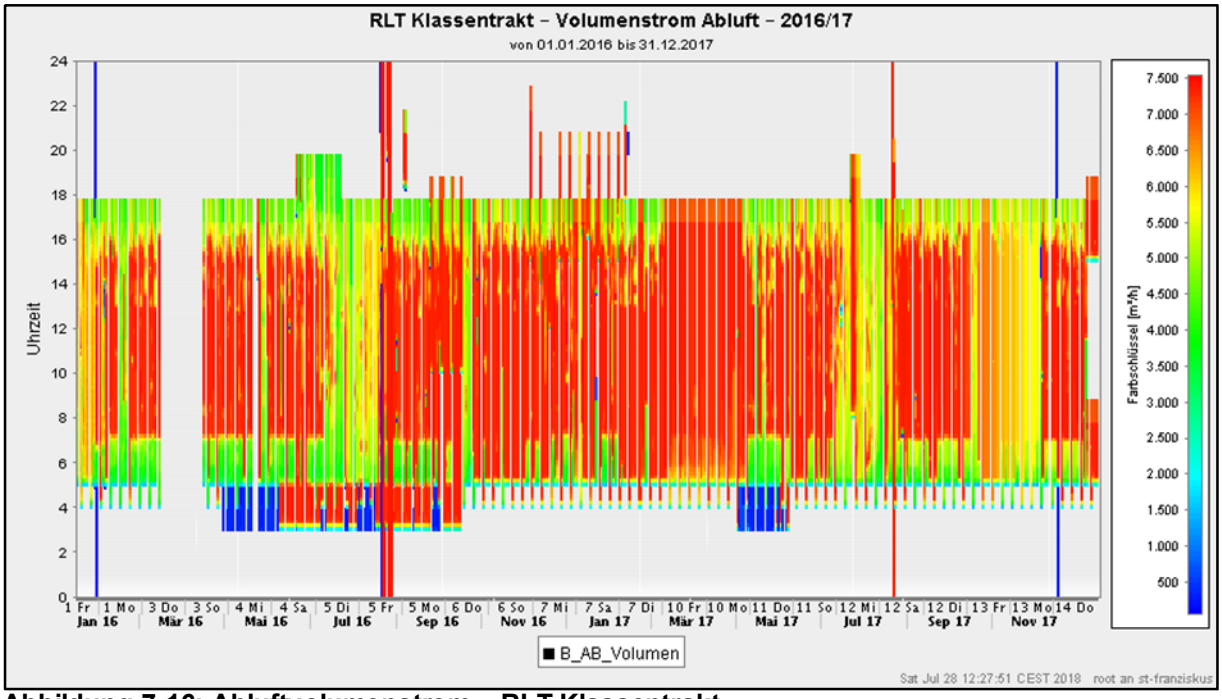

Abbildung 7-16: Abluftvolumenstrom – RLT Klassentrakt

In den Phasen der sommerlichen Nachtlüftung sind die Tage gut zu erkennen, die bereits um 3 Uhr zu einer Nachtlüftung führten. An anderen Tagen war erst um 4 Uhr – beim erneuten Prüfen – die Temperatur niedrig genug. An den anderen Tagen wurde bis 5 Uhr geprüft, aber nie stark gelüftet und dann der Normalbetrieb begonnen.

An vielen Tagen außerhalb der Heizperiode ist zu sehen, dass erst mit dem Eintreffen der Nutzer gegen 7 Uhr die Volumenströme stärker steigen. Die Bewegungsmelder lösen die Volumenstromregler aus. Zwischen 5 und 7 Uhr läuft die Anlage auf halber Last und versorgt nur die Räume, die immer durchlüftet werden.

In der Heizperiode sind ab 5 Uhr alle Räume durchgehend belüftet, weil geheizt werden muss. Es gibt keine Halblastphase.

Nachmittags ist ab 15 Uhr ganzjährig eine Verminderung des Volumenstroms erkennbar, weil die Räume mit Bewegungsmelder nicht mehr frequentiert werden. Nach 17 Uhr – dem eigentlich einprogrammierten Betriebsschluss – läuft die Anlage noch fast eine ganze Stunde nach.

Die Sommerferien sind gut zu sehen – es tritt ganztägig keine Maximallast auf (außer während der Nachtlüftung).

Abbildung 7-17 und Abbildung 7-18 zeigen die sortierten Dauerlinien der Volumenströme. Fast 20 % der Zeit ist die Anlage in Volllast. Allerdings ist sie auch fast 60 % der Zeit nicht in Benutzung. Es ergeben sich ca. 3300 Betriebsstunden pro Jahr.

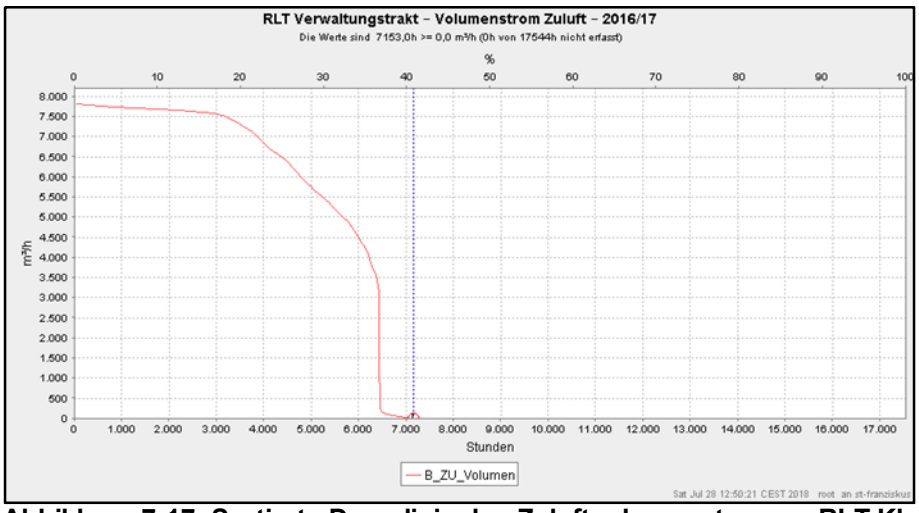

Abbildung 7-17: Sortierte Dauerlinie des Zuluftvolumenstroms – RLT Klassentrakt

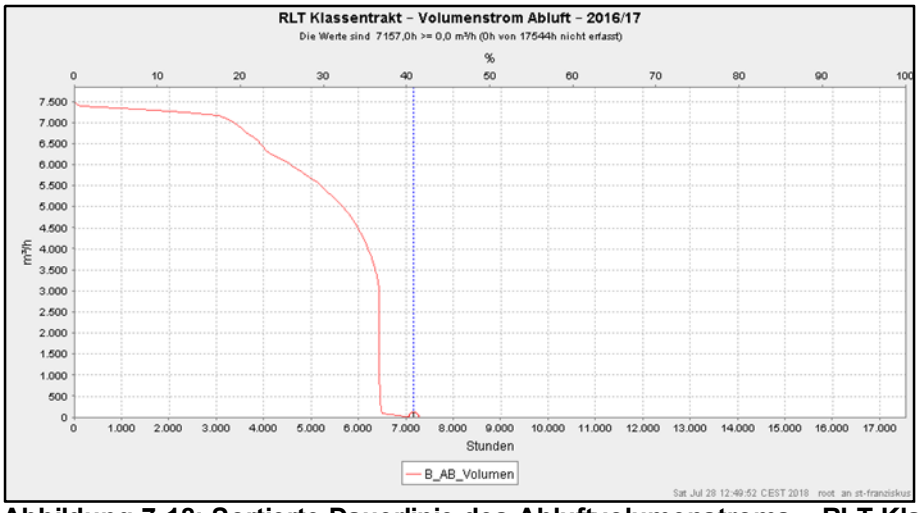

Abbildung 7-18: Sortierte Dauerlinie des Abluftvolumenstroms – RLT Klassentrakt

7.4.2 Druckerhöhung

Die Druckerhöhung korreliert grundsätzlich mit dem Volumenstrom. Abbildung 7-19 und Abbildung 7-20 zeigen dies für Zu- und Abluftventilator.

In Abbildung 7-21 und Abbildung 7-22 sind die sortierten Dauerlinien für die Druckerhöhungen abgebildet. Aufgrund der quadratischen Zusammenhänge zwischen Volumenstrom und Druckverlust zeigt sich die Teillast in dieser Darstellung noch deutlicher als bei der Auftragung der Volumenströme.

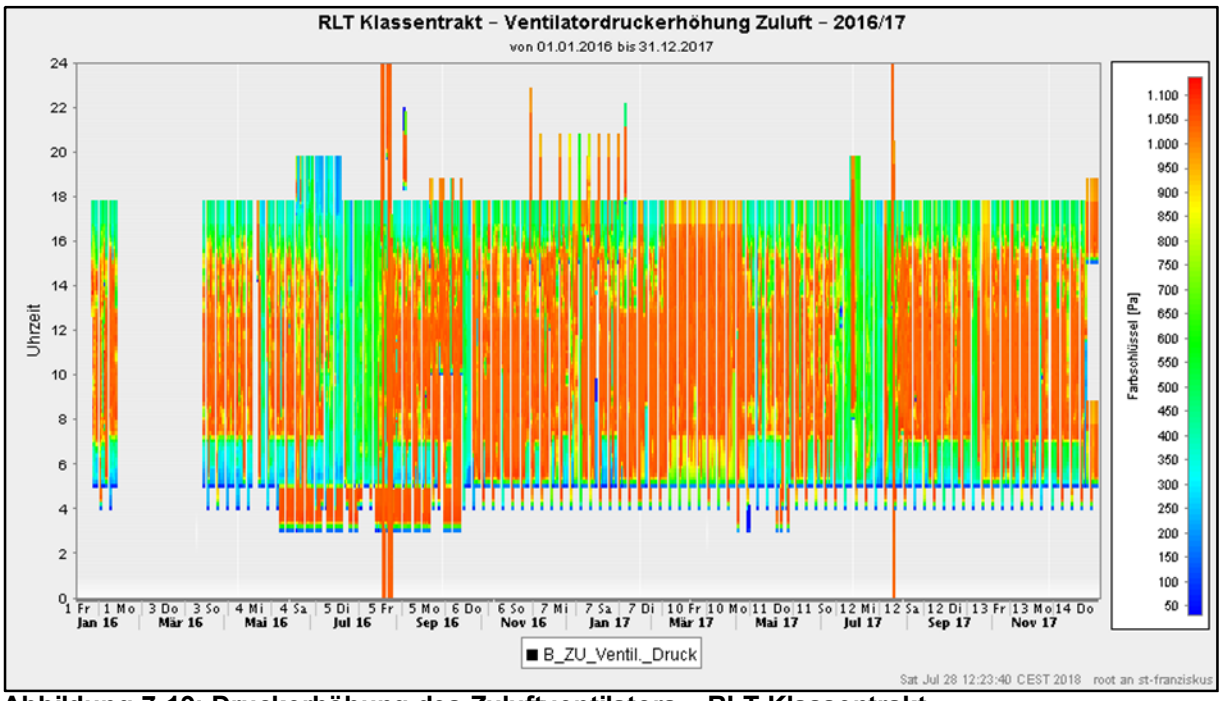

Abbildung 7-19: Druckerhöhung des Zuluftventilators – RLT Klassentrakt

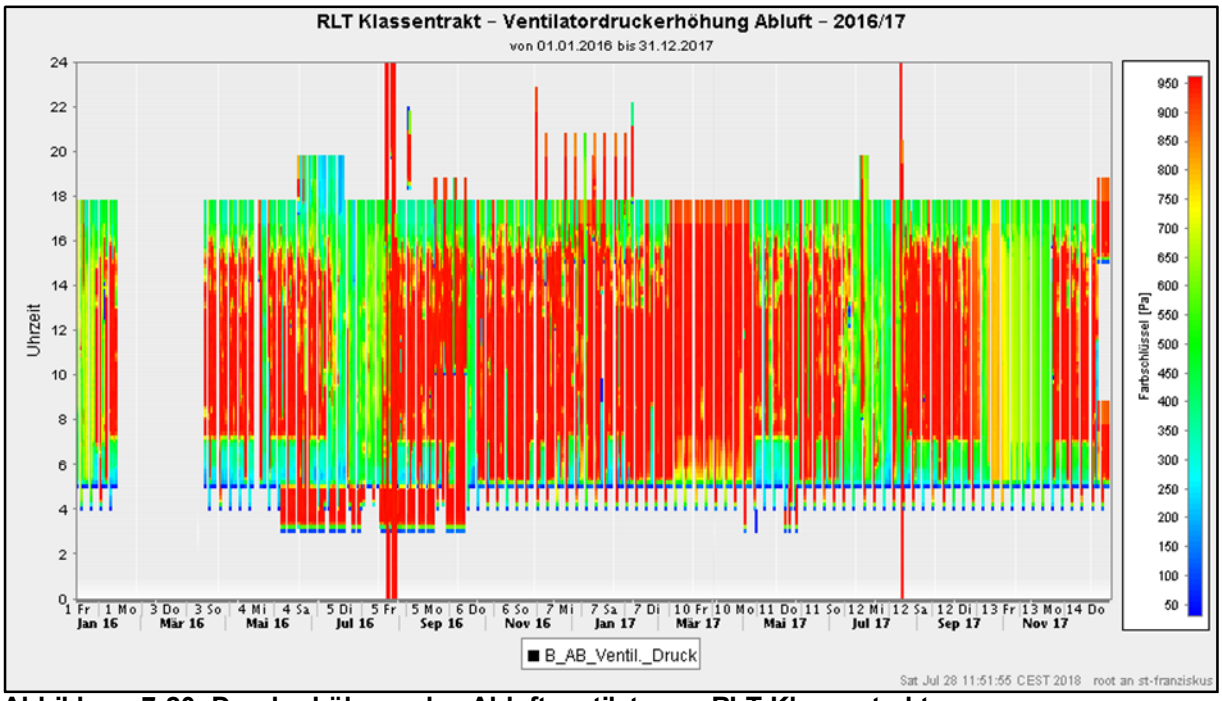

Abbildung 7-20: Druckerhöhung des Abluftventilators – RLT Klassentrakt

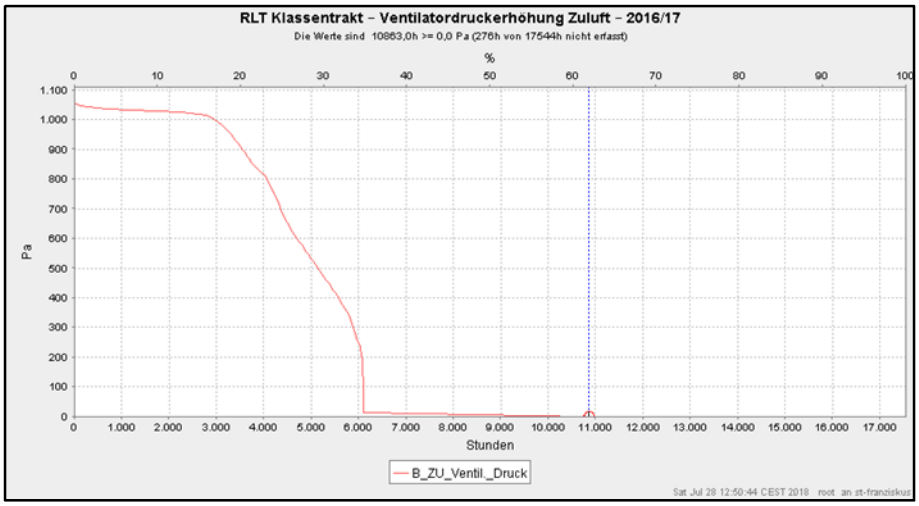

Abbildung 7-21: Sortierte Dauerlinie der Zuluftventilatordruckerhöhung – RLT Klassentrakt

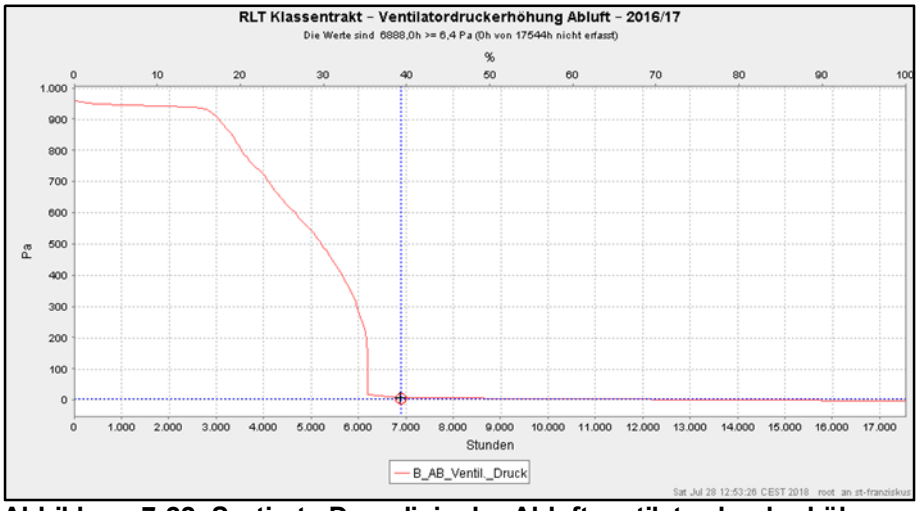

Abbildung 7-22: Sortierte Dauerlinie der Abluftventilatordruckerhöhung – RLT Klassentrakt

7.4.3 Leistung und Frequenzumformer

Wird die Leistung als Carpetplot aufgetragen, ergibt sich Abbildung 7-23 für den Zuluftventilator. Nach dem eigentlichen Betriebsschluss um 17 Uhr läuft die Anlage noch ca. 1 Stunde mit sehr geringer Leistung weiter, bis gegen 18 Uhr nur noch der Standbyverbrauch zu verzeichnen ist.

Abbildung 7-24 zeigt die zugehörige Ansteuerung des Ventilators durch den Frequenzumformer (FU). Es ist festzustellen, dass die Phase am Betriebsende sich hinsichtlich der Zuordnung "FU-Signal zu Leistung" nicht mit den Werten morgens deckt. Die 50 %-Ansteuerung führt morgens zu Leistungen von 3,5 … 4,0 kW, aber abends zu 0,5 … 1,0 kW. Das spricht dafür, dass der Ventilator nach Betriebsschluss um 17 Uhr nicht mehr aktiv angesprochen bzw. geregelt wird, sondern nur noch "austrudelt".

Abbildung 7-25 und Abbildung 7-26 zeigen analoge Grafiken für den Abluftventilator. Darin ist zusätzlich zu erkennen, welche Leistungssteigerung sich ab Mitte 2017 ergibt. Der Abluftfilter ist über das Normalmaß hinaus verschmutzt, wird aber nicht gewechselt. Der FU steuert den Ventilator über Wochen voll an – nicht wie sonst mit 50 … 60 % seiner Drehzahl, sondern mit 100 %. Die Leistung verdoppelt sich in dieser Phase. Weitere Auswertungen zu diesem Thema sind in Kapitel 7.12 zu finden.

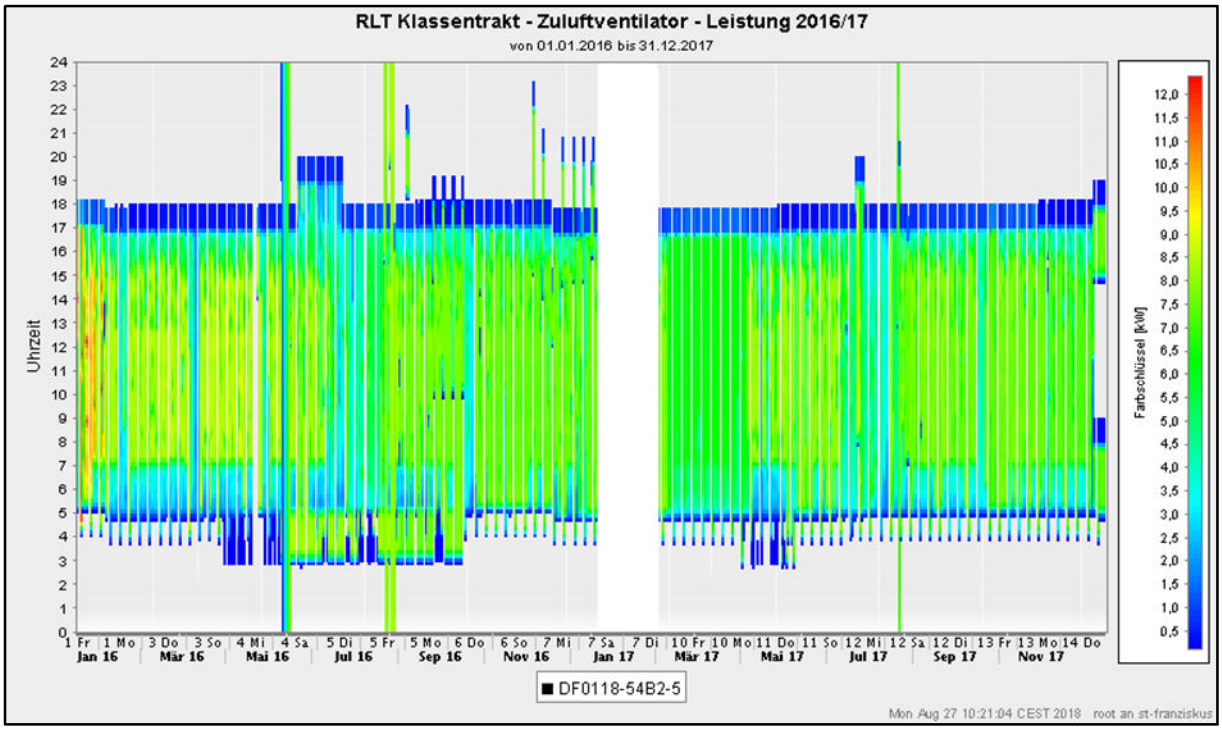

Abbildung 7-23: Leistung des Zuluftventilators – RLT Klassentrakt

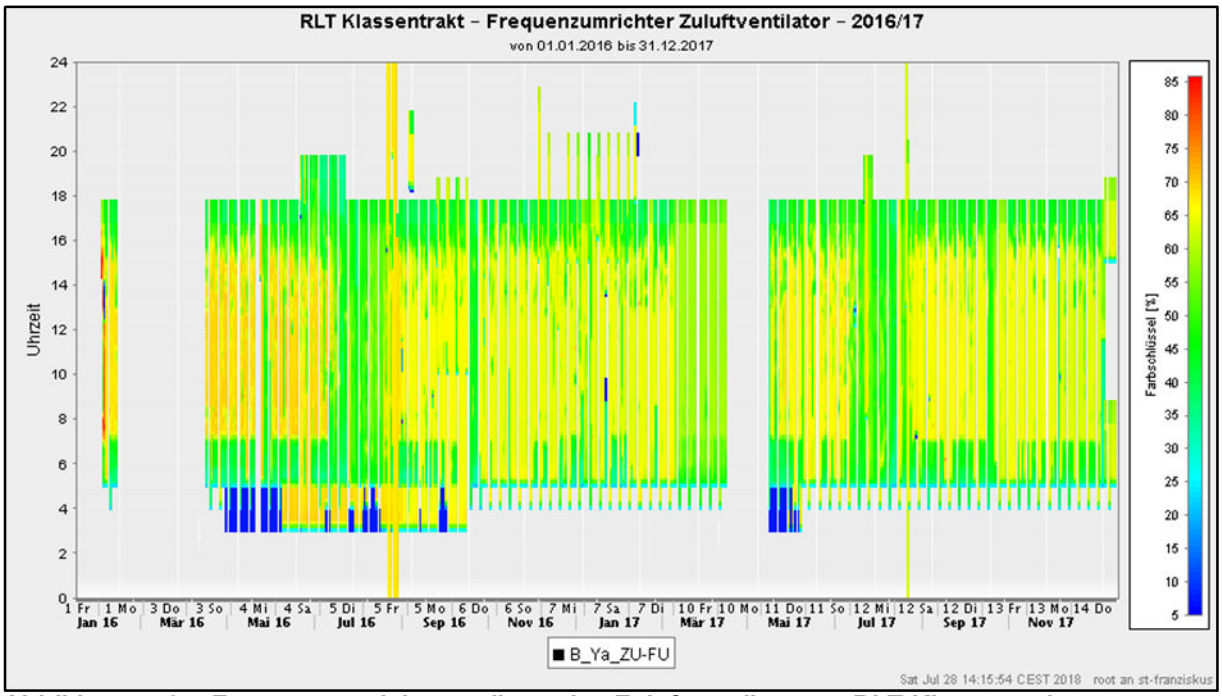

Abbildung 7-24: Frequenzumrichterstellung des Zuluftventilators – RLT Klassentrakt

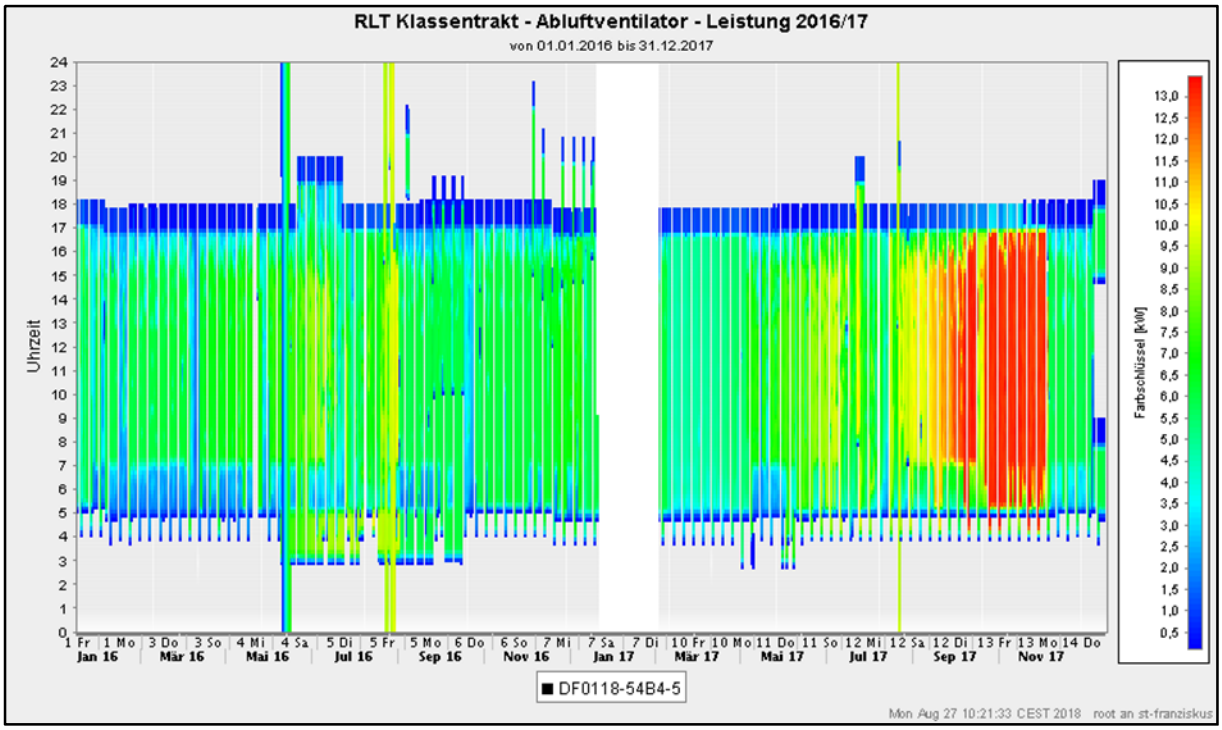

Abbildung 7-25: Leistung des Abluftventilators – RLT Klassentrakt

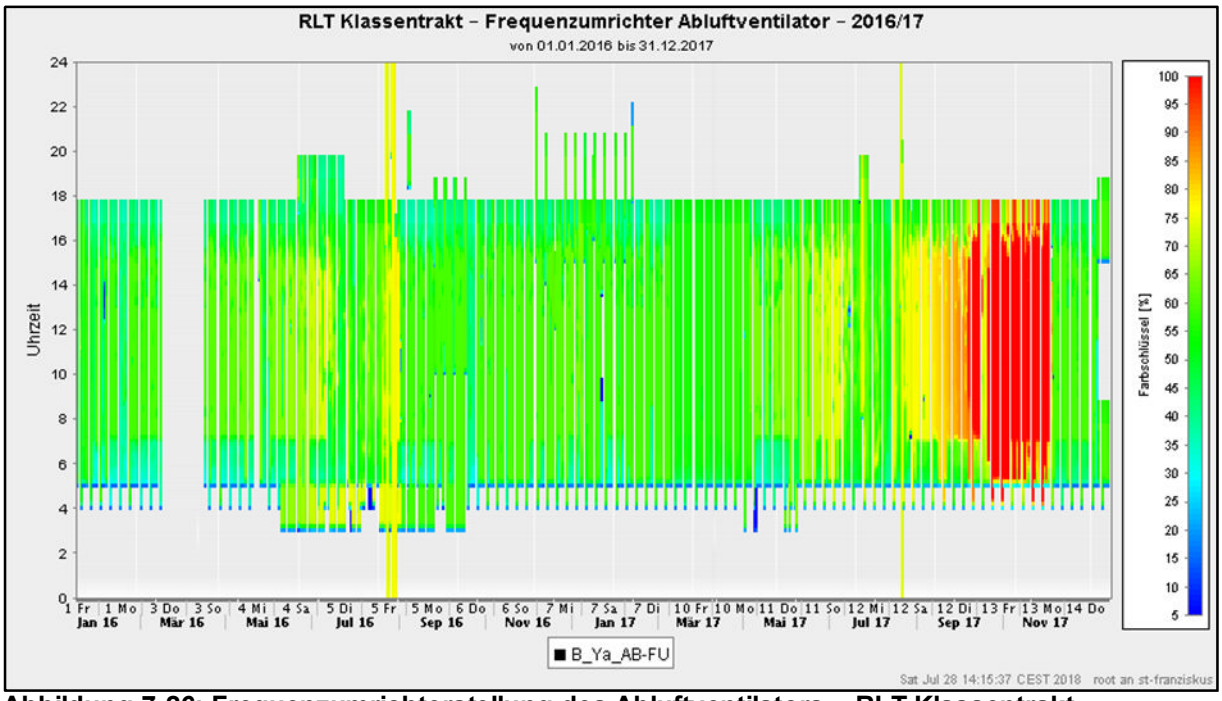

Abbildung 7-26: Frequenzumrichterstellung des Abluftventilators – RLT Klassentrakt

7.4.4 Tagesprofile Strom

Abbildung 7-27 bis Abbildung 7-30 zeigen getrennt nach Zu- und Abluftventilator sowie nach Wochentag und Wochenende die mittleren Tagesprofile des Stromverbrauchs. Es sind jeweils Stunden- und 10-Minuten-Werte verfügbar. Weitere Auswertungen mit Unterscheidung in Schulwoche, Ferienhortwoche und Schließzeit finden sich im Anhang 9.4.5.

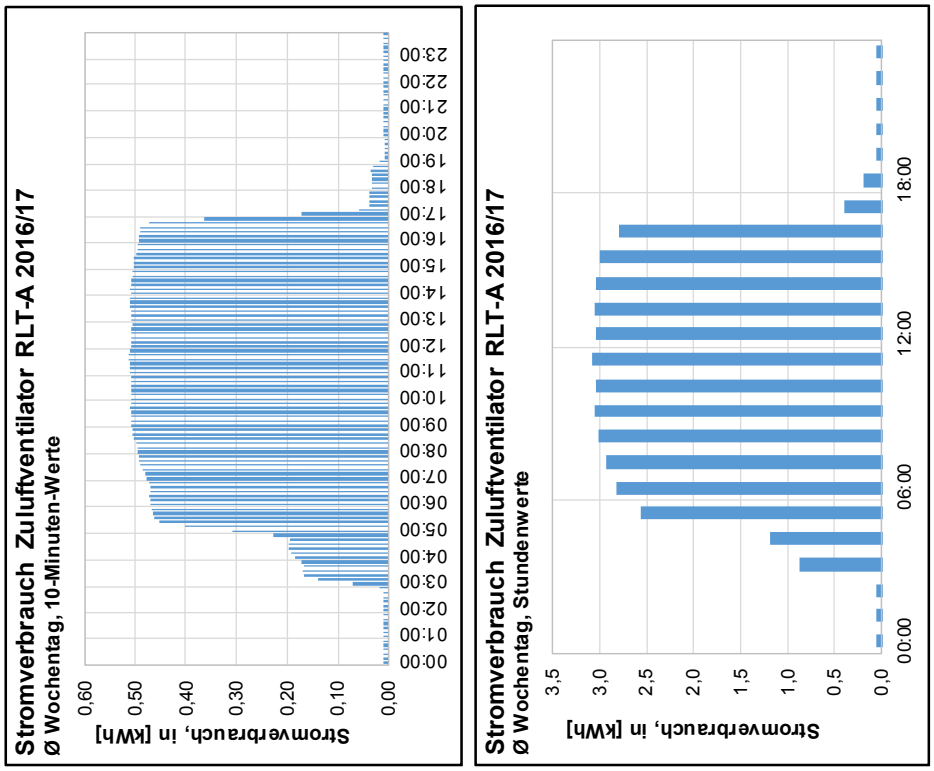

Abbildung 7-27: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Klassentrakt – Wochentage

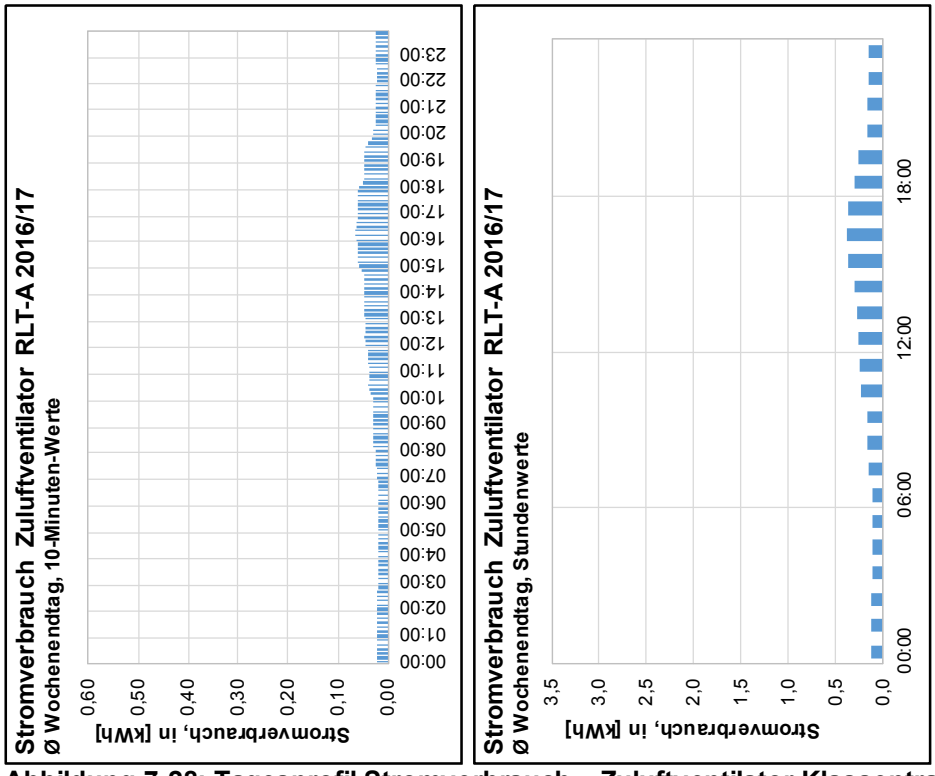

Abbildung 7-28: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Klassentrakt – Wochenende

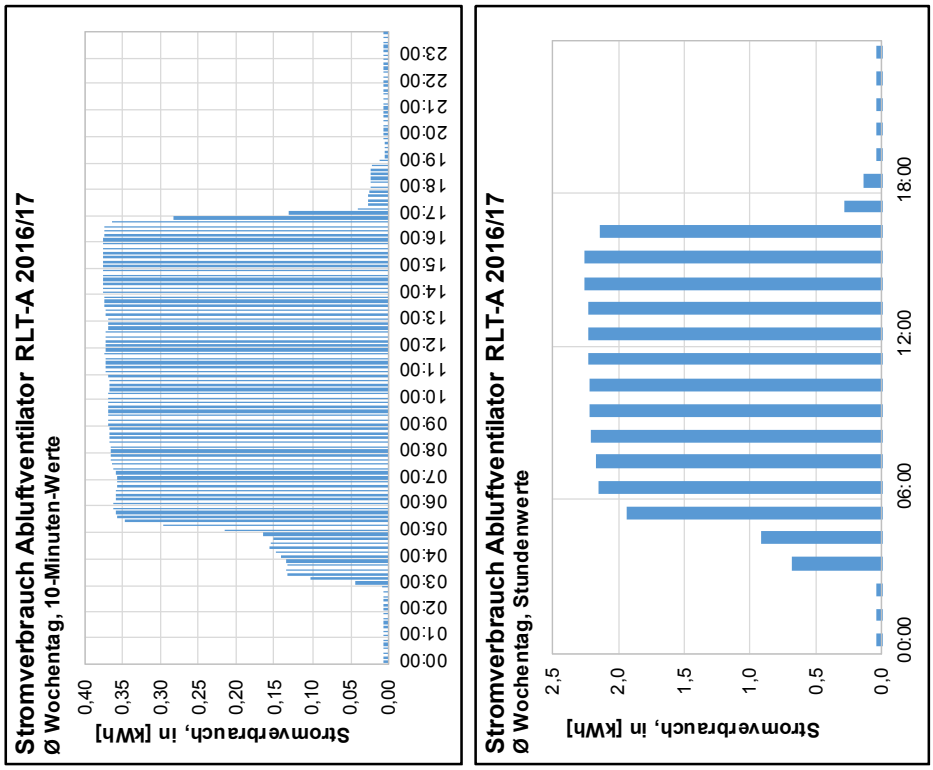

Abbildung 7-29: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Klassentrakt – Wochentage

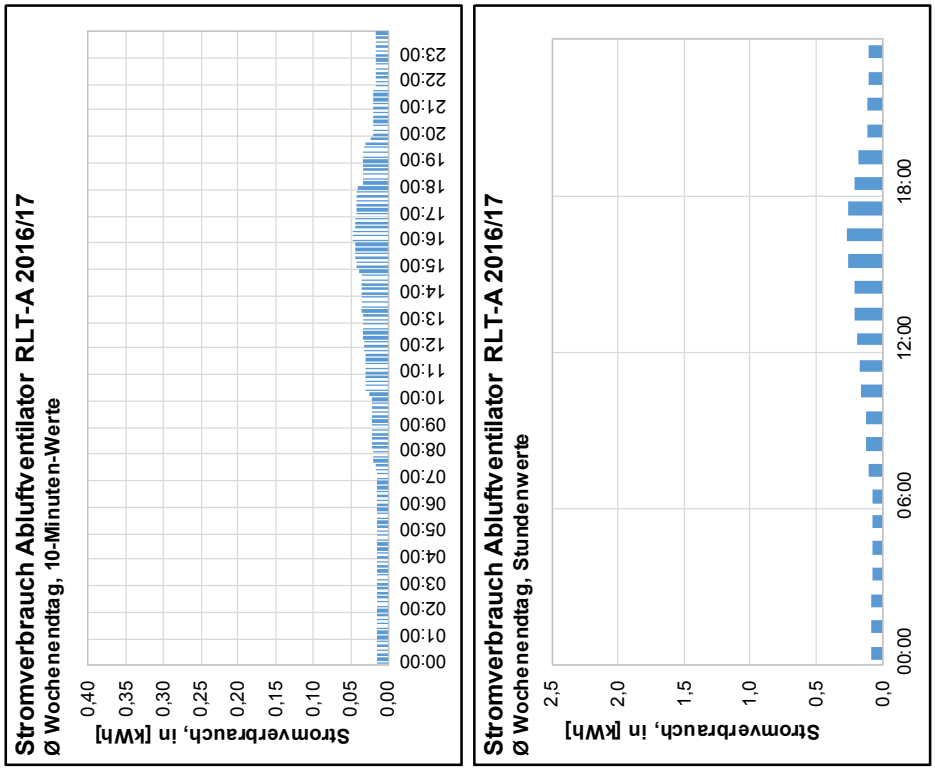

Abbildung 7-30: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Klassentrakt – Wochenende

7.5 Ventilatoren RLT Verwaltungstrakt

7.5.1 Volumenströme

Tabelle 7-4 fasst die Volumenströme der Zu- und Abluftventilatoren im Betrieb zusammen. Im Mittel sind 8400 m³/h als Zuluftvolumenstrom und 8300 m³/h als Abluftvolumenstrom festzustellen. Die Werte schwanken nur wenig; in den Monaten mit sommerlicher Nachtlüftung liegt der Wert erkennbar höher; ebenso die Betriebsstundenzahl.

Tabelle 7-4: Monatliche Volumenströme und Betriebszeiten – RLT Klassentrakt

		Betriebsstunden, [h/mon]	$\dot{V}_{ZU}$, in [m³/h]	$\dot{V}_{AB}$, in [m³/h]
2016	Januar	259	7674	7550
	Februar	261	8159	8132
	März	258	8298	8293
	April	285	8480	8472
	Mai	269	8141	8112
	Juni	350	8637	8617
	Juli	305	8538	8537
	August	417	8853	8811
	September	342	8696	8650
	Oktober	253	8363	8346
	November	282	8428	8426
	Dezember	299	8201	8187
2017	Januar	307	8249	8241
	Februar	247	8231	8213
	März	284	8438	8415
	April	247	8363	8344
	Mai	308	8365	8326
	Juni	312	8431	8383
	Juli	313	8549	8524
	August	365	8771	8707
	September	280	8506	8060
	Oktober	273	8502	7808
	November	269	8496	7766
	Dezember	225	8303	8271

Abbildung 7-31 zeigt den Volumenstrom der Zuluftanlage als Carpetplot, Abbildung 7-32 den Abluftvolumenstrom.

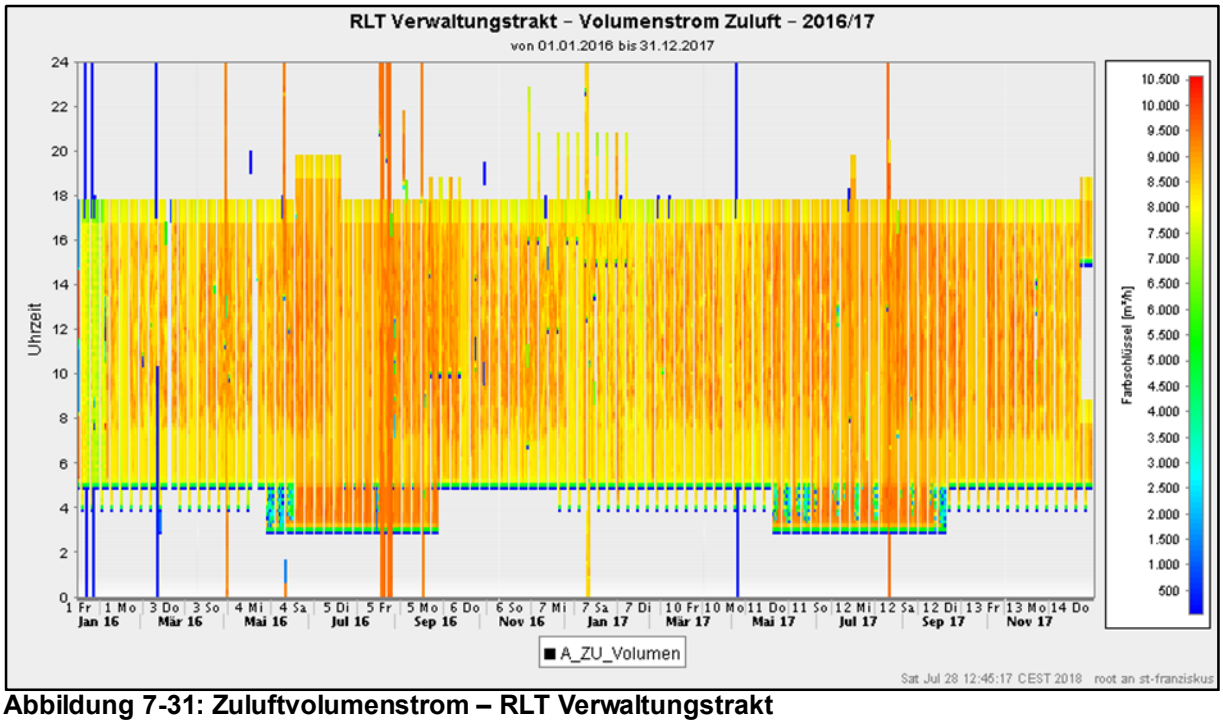

Abbildung 7-31: Zuluftvolumenstrom – RLT Verwaltungstrakt

Der morgendliche Start ist gut erkennbar; ebenfalls der frühere Betriebsbeginn am Montag bzw. die sommerliche Nachtlüftung. Der Ventilator erreicht jeweils erst nach einer halben Stunde seinen maximalen Volumenstrom.

In den Phasen der sommerlichen Nachtlüftung sind die Tage gut zu erkennen, die bereits um 3 Uhr zu einer Nachtlüftung führten. An anderen Tagen war erst um 4 Uhr – beim erneuten Prüfen – die Temperaturen niedrig genug. An den restlichen Tagen wurde bis 5 Uhr geprüft, aber nie stark gelüftet und dann der Normalbetrieb begonnen.

Im Gegensatz zur Klassentraktanlage ist der Unterschied zwischen Nachtlüftung, Aufheizphase und Normalbetrieb nur schwach erkennbar. Da kaum einer der Räume einen Präsenzmelder hat, schwankt der Volumenstrom nur, wenn der Werkraum betreten wird (± 500 m³/h) oder wenn die Regler in der Aula den Volumenstrom ändern, was kaum auftritt.

Weder Ferien noch Betriebsbeginn oder -ende der Bürozeiten der Verwaltung sind erkennbar. Einzig die verschmutzten Abluftfilter führen dazu, dass im Oktober/November 2017 der Sollwert des Abluftvolumenstroms nicht mehr erreicht wird.

Nachmittags ist ab 15 Uhr ganzjährig eine Verminderung des Volumenstroms erkennbar, weil die Räume mit Bewegungsmelder nicht mehr frequentiert werden. Nach 17 Uhr – dem eigentlich einprogrammierten Betriebsschluss – läuft die Anlage noch fast eine ganze Stunde nach.

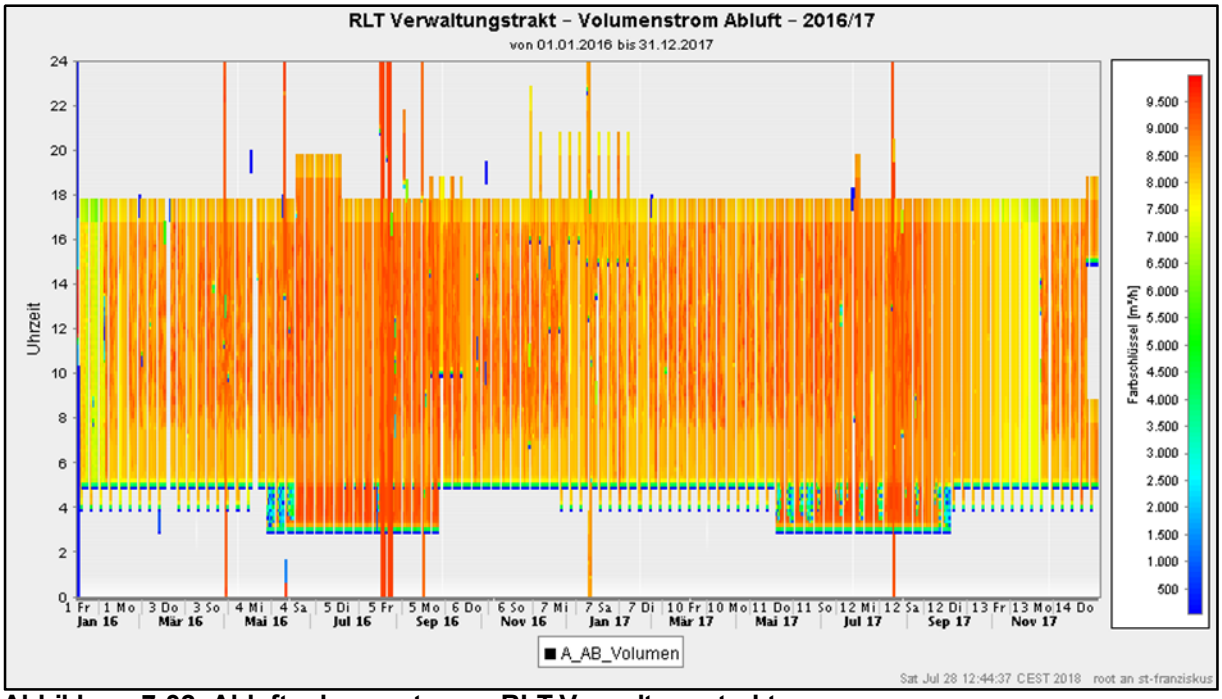

Abbildung 7-32: Abluftvolumenstrom – RLT Verwaltungstrakt

Abbildung 7-33 und Abbildung 7-34 zeigen die sortierten Dauerlinien der Volumenströme. Es ist anders als bei der RLT-Anlage "Klassentrakt" keine ausgeprägte Teillast zu erkennen. Das Jahr besteht aus der Betriebszeit (40 %) und der Stillstandzeit (60 %). Es ergeben sich ca. 3500 Betriebsstunden pro Jahr, davon ca. 230 Stunden für Nachtlüftung.

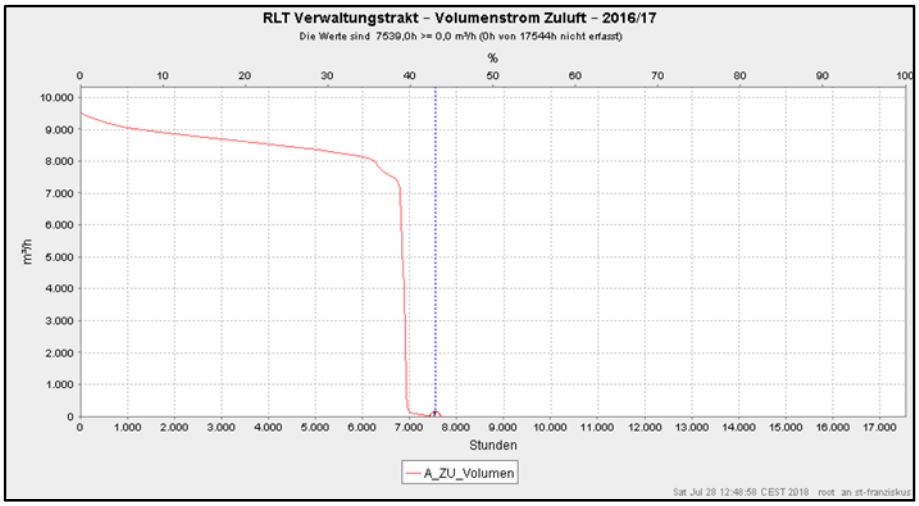

Abbildung 7-33: Sortierte Dauerlinie des Zuluftvolumenstroms – RLT Verwaltungstrakt

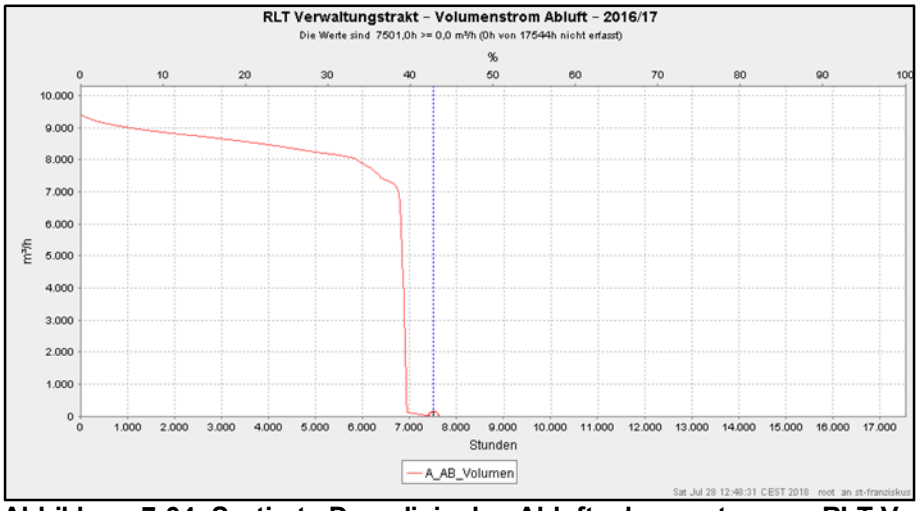

Abbildung 7-34: Sortierte Dauerlinie des Abluftvolumenstroms – RLT Verwaltungstrakt

7.5.2 Druckerhöhung

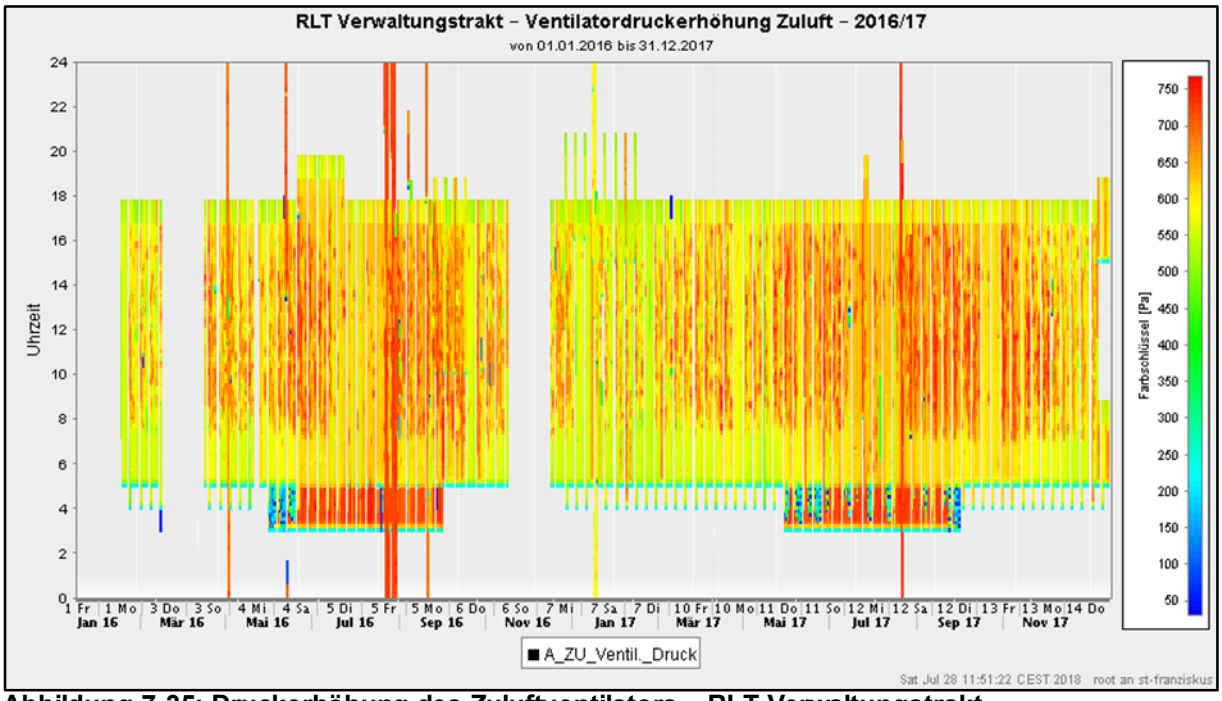

Abbildung 7-35: Druckerhöhung des Zuluftventilators – RLT Verwaltungstrakt

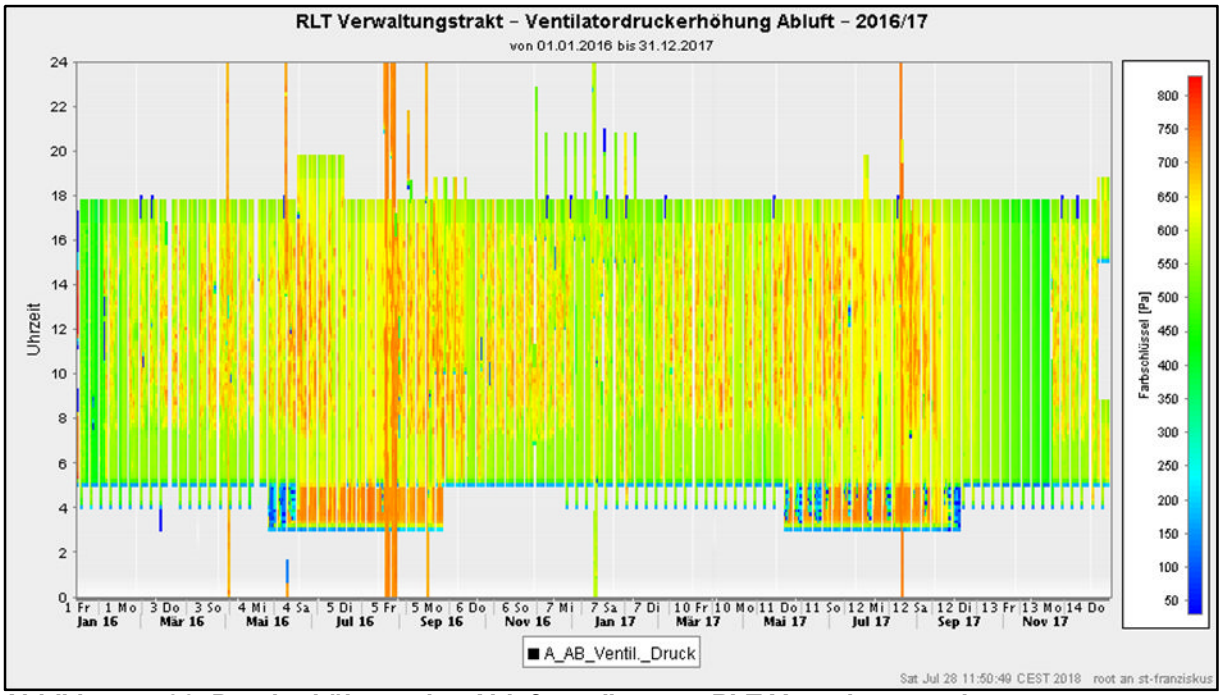

Abbildung 7-36: Druckerhöhung des Abluftventilators – RLT Verwaltungstrakt

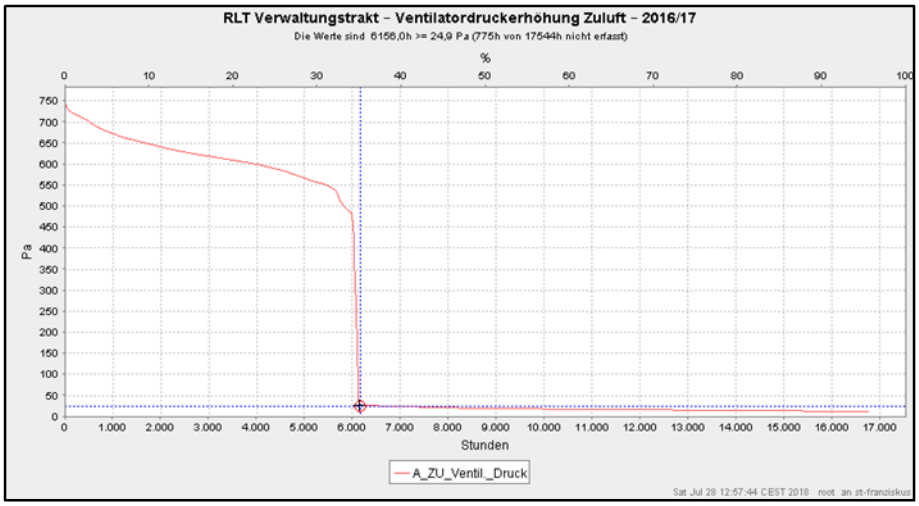

Abbildung 7-37: Sortierte Dauerlinie der Zuluftventilatordruckerhöhung – RLT Verwaltungstrakt

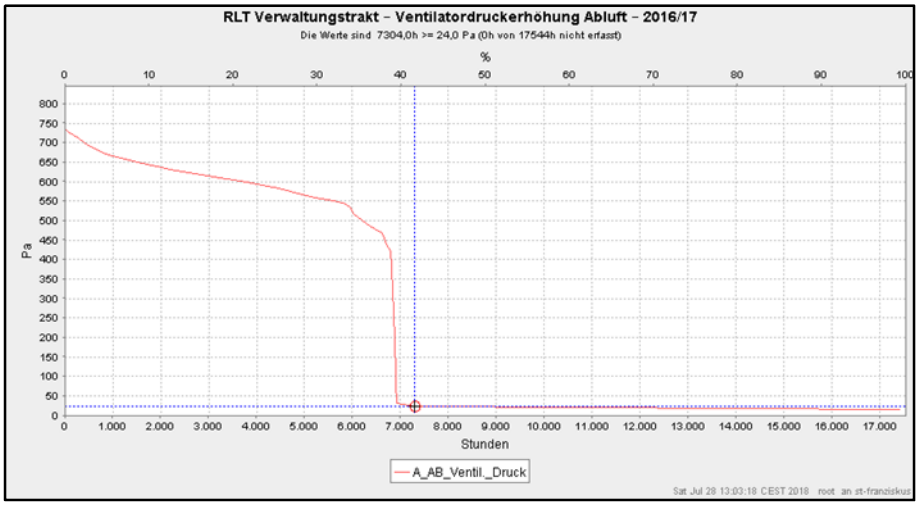

Abbildung 7-38: Sortierte Dauerlinie der Abluftventilatordruckerhöhung – RLT Verwaltungstrakt

Die Druckerhöhung korreliert grundsätzlich mit dem Volumenstrom. Abbildung 7-35 und Abbildung 7-36 zeigen dies für Zu- und Abluftventilator.

In Abbildung 7-37 und Abbildung 7-38 sind die sortierten Dauerlinien für die Druckerhöhungen abgebildet. Aufgrund der quadratischen Zusammenhänge zwischen Volumenstrom und Druckverlust zeigt sich die Teillast in dieser Darstellung noch deutlicher als bei der Auftragung der Volumenströme.

7.5.3 Leistung und Frequenzumformer

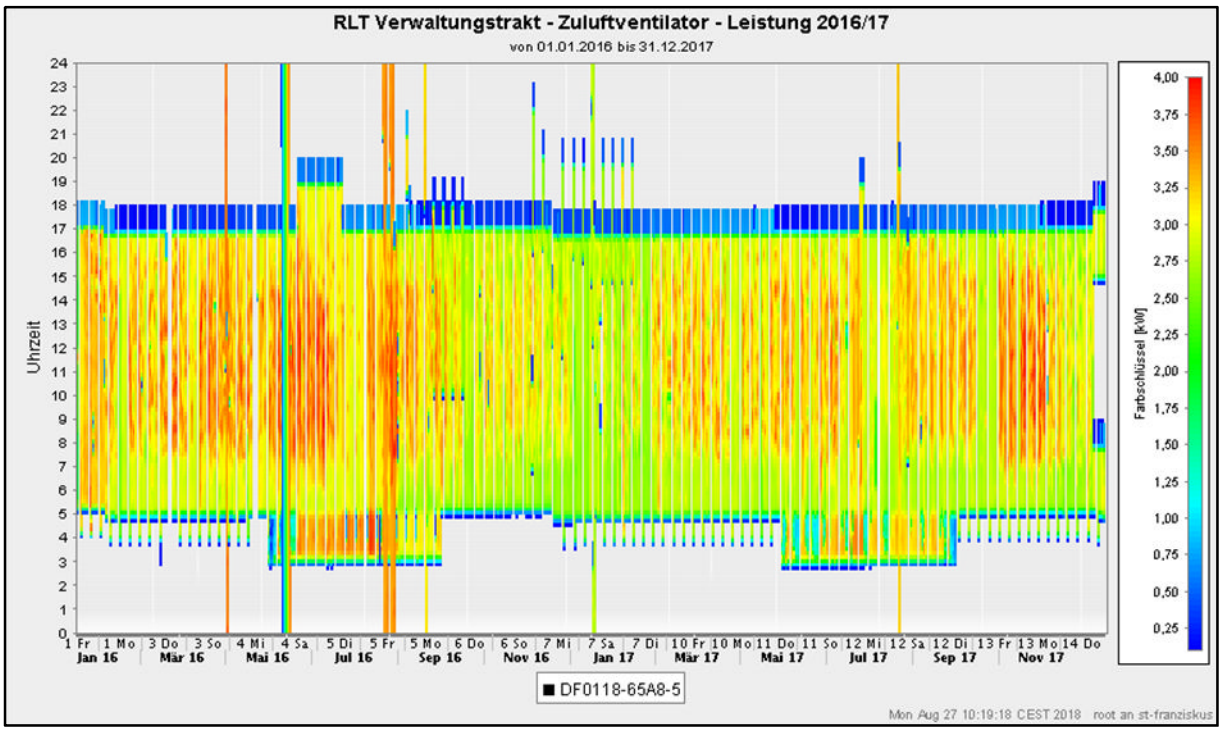

Abbildung 7-39: Leistung des Zuluftventilators – RLT Verwaltungstrakt

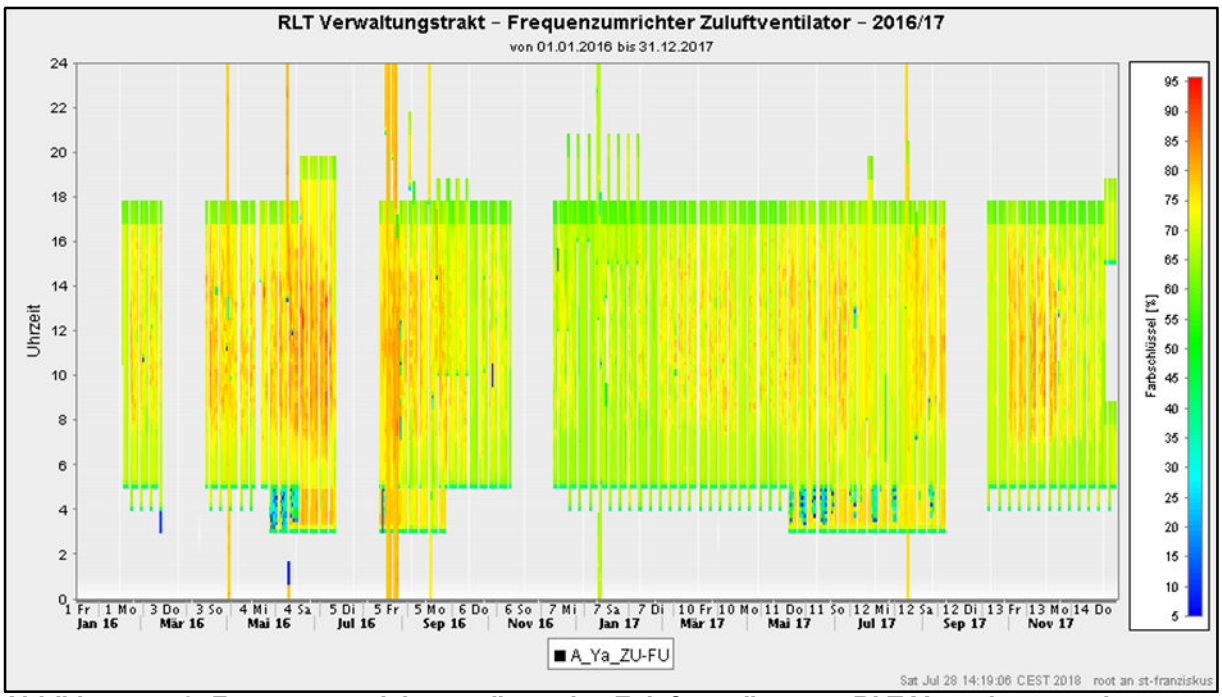

Abbildung 7-40: Frequenzumrichterstellung des Zuluftventilators – RLT Verwaltungstrakt

Wird die Leistung als Carpetplot aufgetragen, ergibt sich Abbildung 7-39 für den Zuluftventilator. Nach dem eigentlichen Betriebsschluss um 17 Uhr läuft die Anlage noch ca. 1 Stunde mit sehr geringer Leistung weiter, bis gegen 18 Uhr nur noch der Standbyverbrauch zu verzeichnen ist. Abbildung 7-40 zeigt die zugehörige Ansteuerung des Ventilators durch den Frequenzumformer.

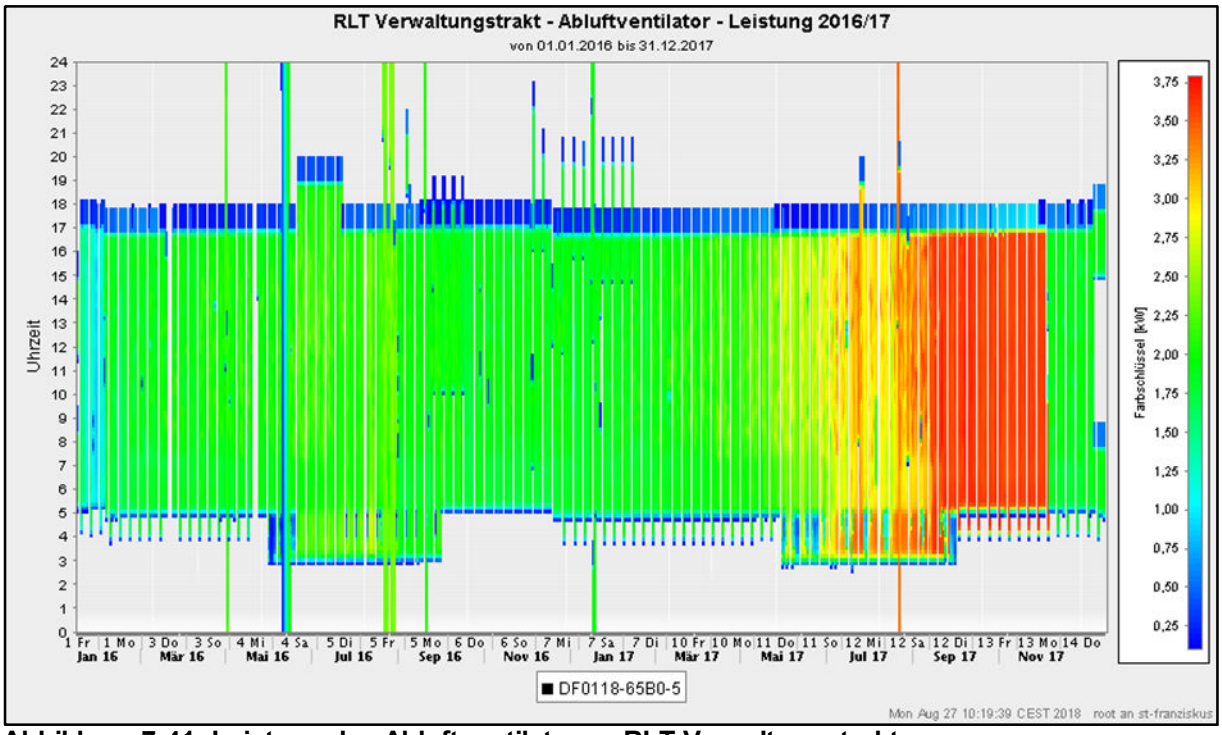

Abbildung 7-41: Leistung des Abluftventilators – RLT Verwaltungstrakt

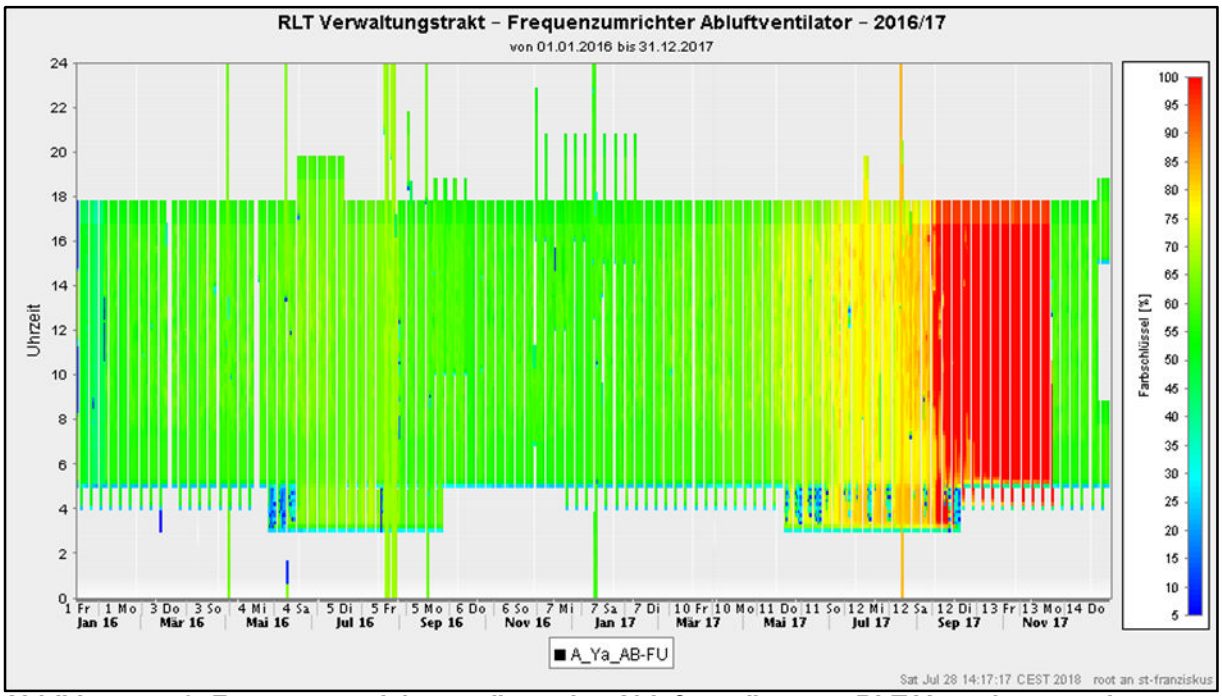

Abbildung 7-42: Frequenzumrichterstellung des Abluftventilators – RLT Verwaltungstrakt

Abbildung 7-41 und Abbildung 7-42 zeigen analoge Grafiken für den Abluftventilator. Darin ist zusätzlich zu erkennen, welche Leistungssteigerung sich ab Mitte 2017 ergibt. Der Abluftfilter ist über das Normalmaß hinaus verschmutzt, wird aber nicht gewechselt. Es zeigt sich das gleiche Bild wie im "Klassentrakt".

Der FU steuert den Ventilator über Wochen voll an – nicht wie sonst mit ca. 50 % seiner Drehzahl, sondern mit 100 %. Die Leistung verdoppelt sich in dieser Phase. Weitere Auswertungen zu diesem Thema sind in Kapitel 7.12 zu finden.

7.5.4 Tagesprofile Strom

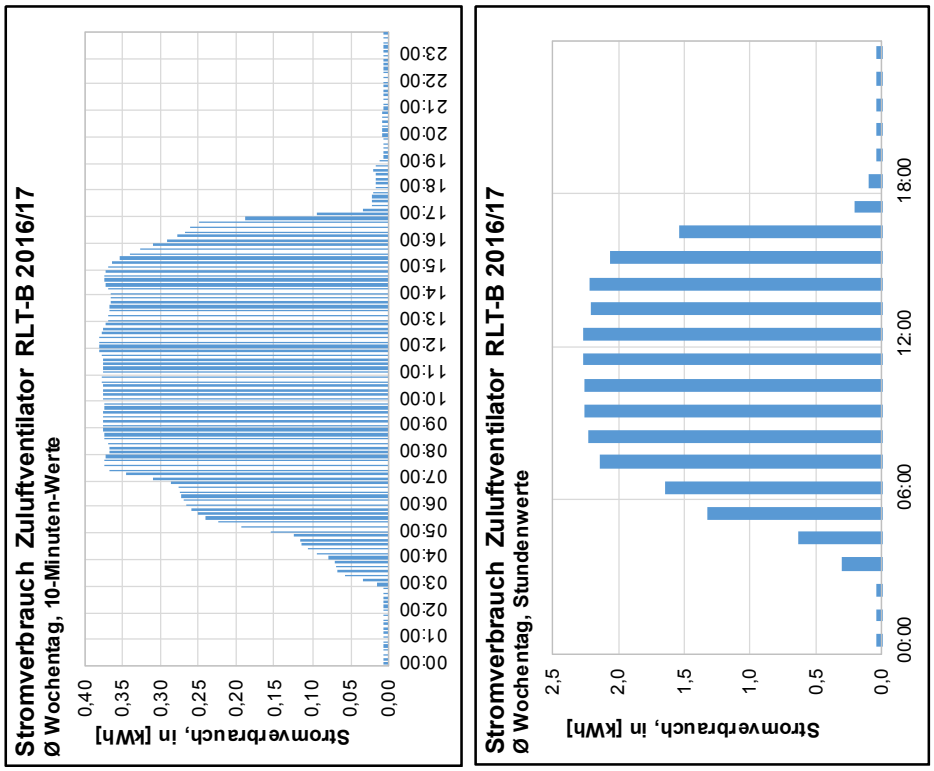

Abbildung 7-43: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Verwaltungstrakt – Wochentage

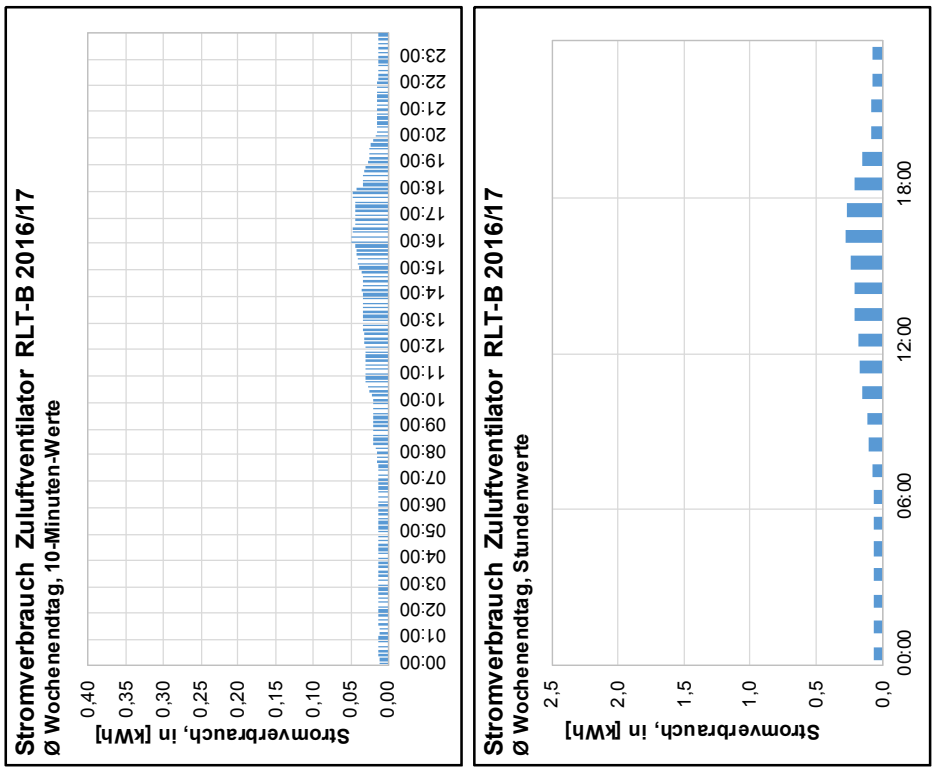

Abbildung 7-44: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Verwaltungstrakt – Wochenende

Abbildung 7-43 bis Abbildung 7-46 zeigen getrennt nach Zu- und Abluftventilator sowie nach Wochentag und Wochenende die mittleren Tagesprofile des Stromverbrauchs. Es sind jeweils Stunden- und 10-Minuten-Werte verfügbar. Weitere Auswertungen mit Unterscheidung in Schulwoche, Ferienhortwoche und Schließzeit finden sich im Anhang 9.4.6.

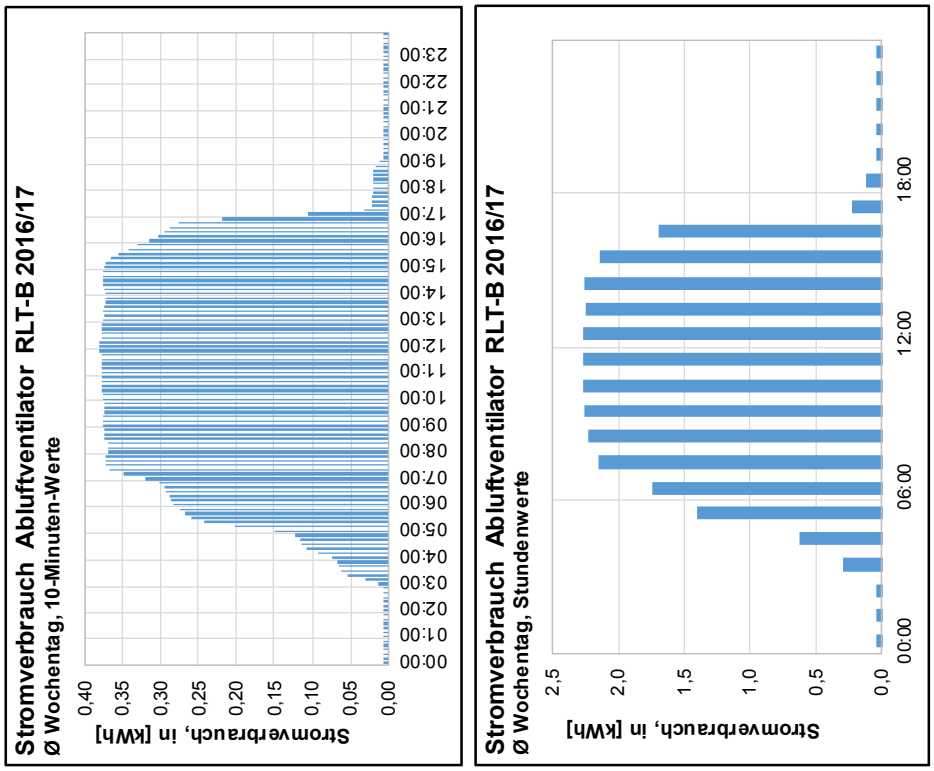

Abbildung 7-45: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Verwaltungstrakt – Wochentage

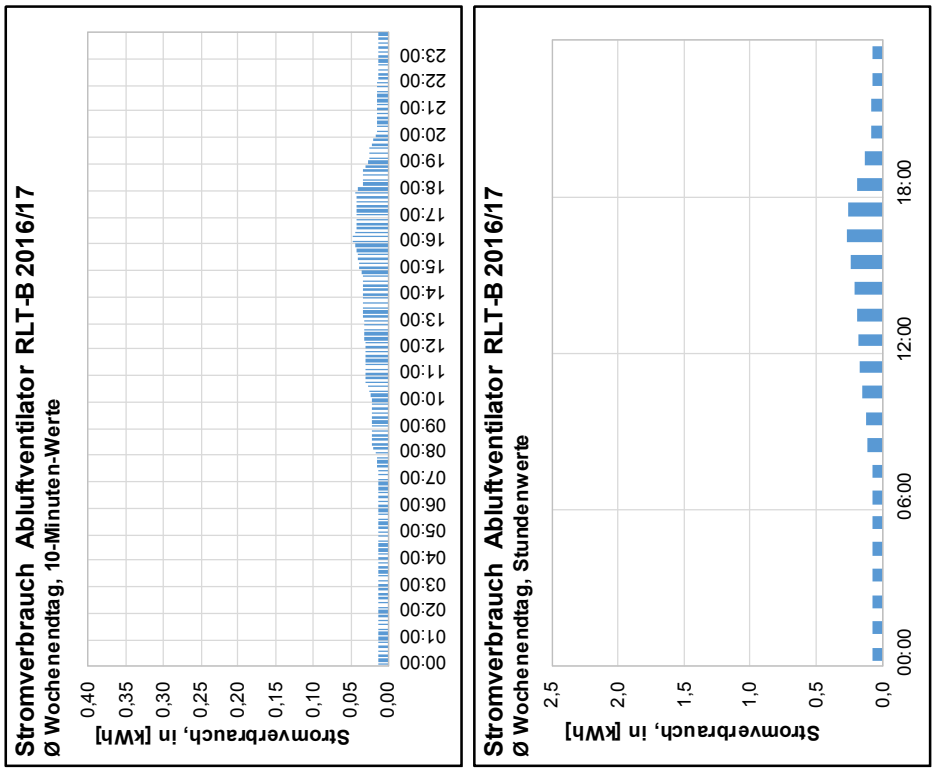

Abbildung 7-46: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Verwaltungstrakt – Wochenende

7.6 Volumenströme im Zentralgerät

Anhand typischer Wochen in einer Winterschulwoche, einer Sommerschulwoche und einer Sommerferienwoche wird nachfolgend der Volumenstrom näher untersucht. Ein Vergleich zwischen Messung und Planung wird gezogen.

7.6.1 Volumenströme Winterwoche

Abbildung 7-47 und Abbildung 7-49 zeigen den Verlauf der Zu- und Abluftvolumenströme im jeweiligen Zentralgerät in einer Winterwoche. Es ist eine der kältesten Wochen des Jahres 2017 mit Schulbetrieb und ohne Feiertage.

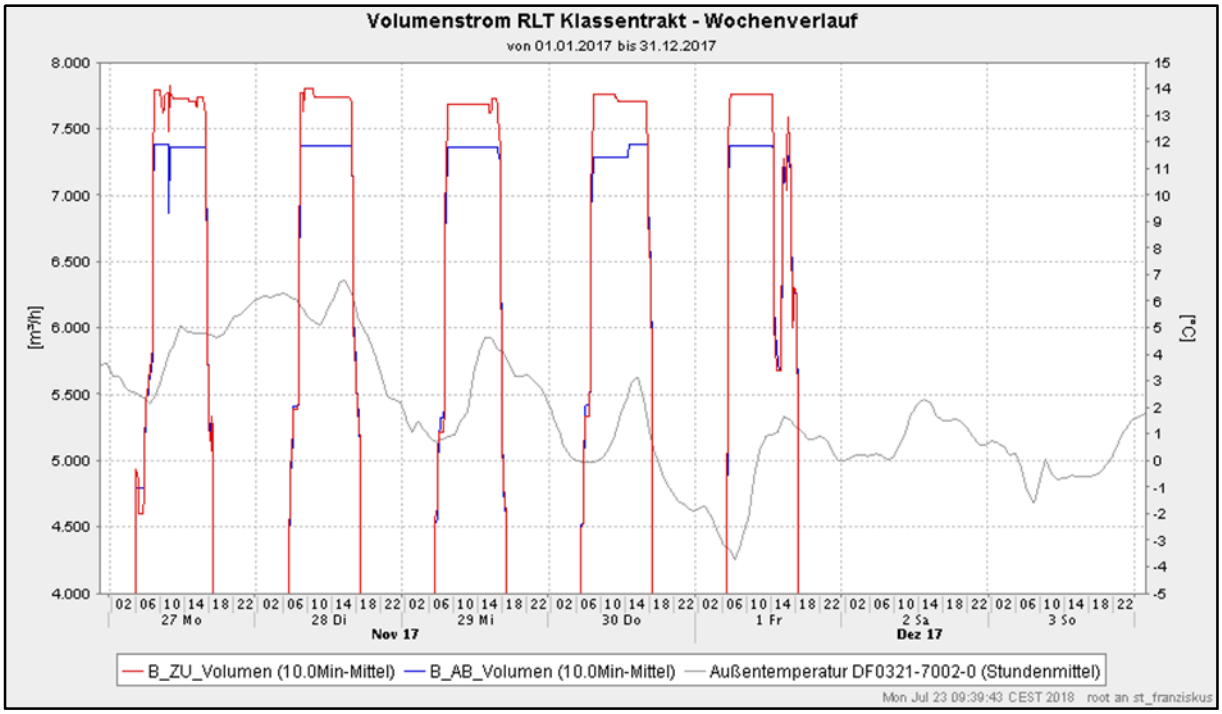

Abbildung 7-47: Wochenprofil einer Winterwoche – Volumenströme RLT Klassentrakt

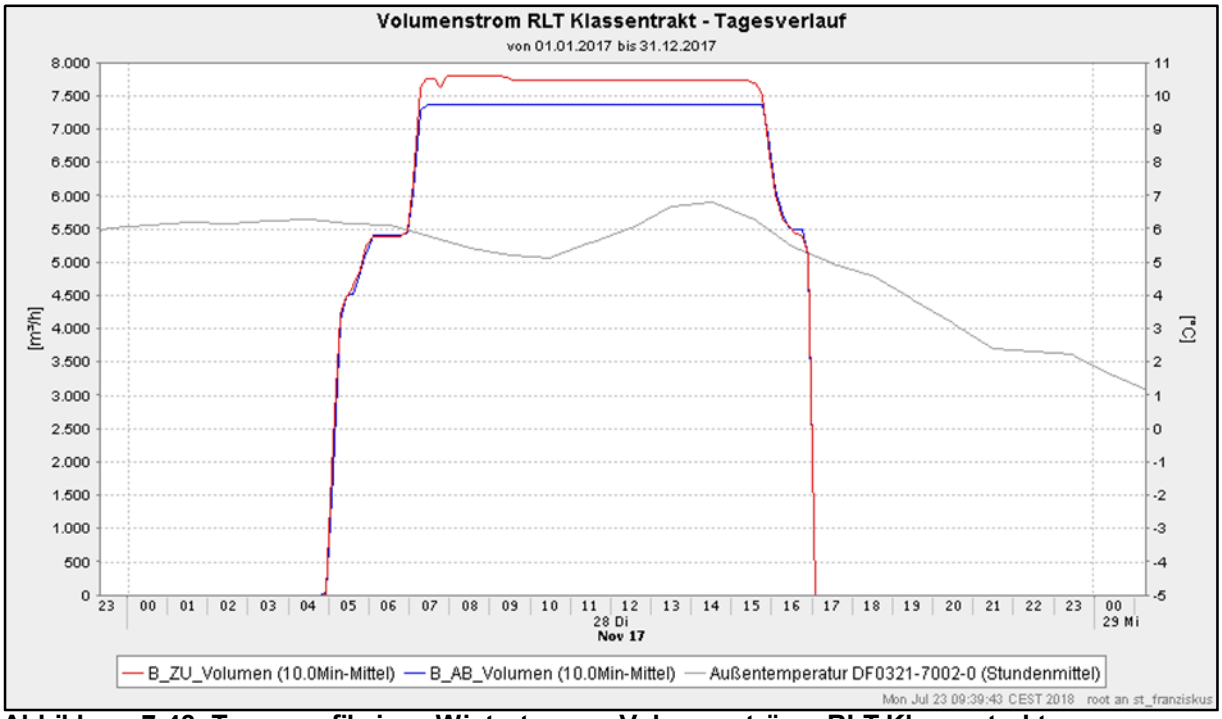

Abbildung 7-48: Tagesprofil eines Wintertages – Volumenströme RLT Klassentrakt

Im Klassentrakt ist festzustellen, dass – bis auf den Freitag – alle Tage ähnlich verlaufen. Mit Betriebsstart um 4 Uhr bzw. 5 Uhr steigert sich der Volumenstrom auf etwa 5500 m³/h. Das entspricht in etwa der Summe aller Räume, jedoch ohne die Südräume (welche nicht aufgeheizt werden). Dort verharrt er etwa 1 Stunde.

Die Aufheizphase geht fließend in die Betriebsphase über, ohne dass es zu Verminderungen des Volumenstroms (vor Unterrichtsbeginn) kommt. Die Nordräume wurden bis zum Eintreffen der Personen beheizt. Dann gegen 7 … 7:30 Uhr steigt der Volumenstrom auf seinen Auslegungswert von 7500 m³/h an. Die Südräume (4 x 480 m³/a) kommen hinzu.

Am Montag zeigt die erste Hofpause viele schließende Volumenstromregler, so dass das Zentralgerät herunterfährt, an den anderen Tagen ist das nicht der Fall. Am Nachmittag aller Tage ist offensichtlich Betrieb in den Klassenräumen bis ca. 1 Stunde vor Betriebsschluss. Ein Teil der präsenzabhängig geregelten Räume schließt.

Freitag bildet die Ausnahme. Nach der letzten Stunde bis zum Eintreffen des Reinigungsteams sinkt der Volumenstrom erkennbar, so dass die Ventilatoren herunterfahren. Am Wochenende gibt es – wie geplant – keinen Betrieb.

Die Grafik für den Verwaltungstrakt ist in der Skalierung stark abgeschnitten, weil so die sehr geringen absoluten Änderungen überhaupt sichtbar werden. Die Schwankungen von maximal 1000 m³/h ergeben sich nutzungsbedingt durch die Belegung der Aula und des Werkraumes.

Abbildung 7-48 und Abbildung 7-50 lösen zwei der Tage noch besser auf.

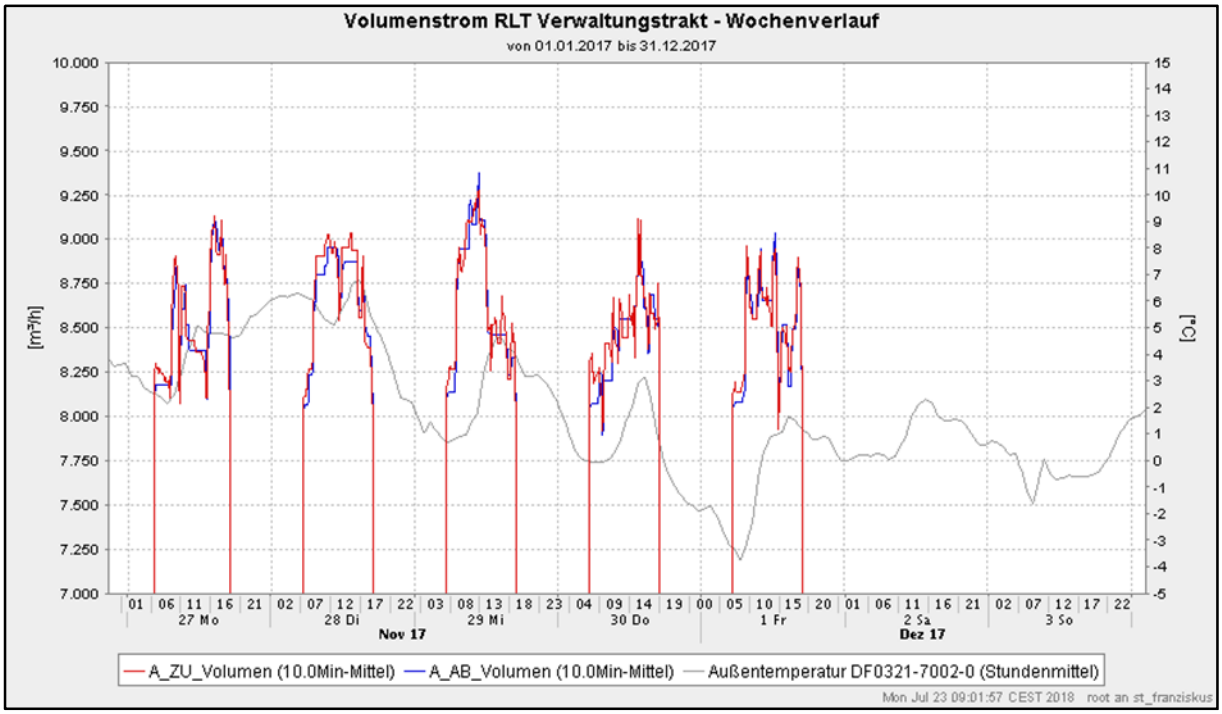

Abbildung 7-49: Wochenprofil einer Winterwoche – Volumenströme RLT Verwaltungstrakt

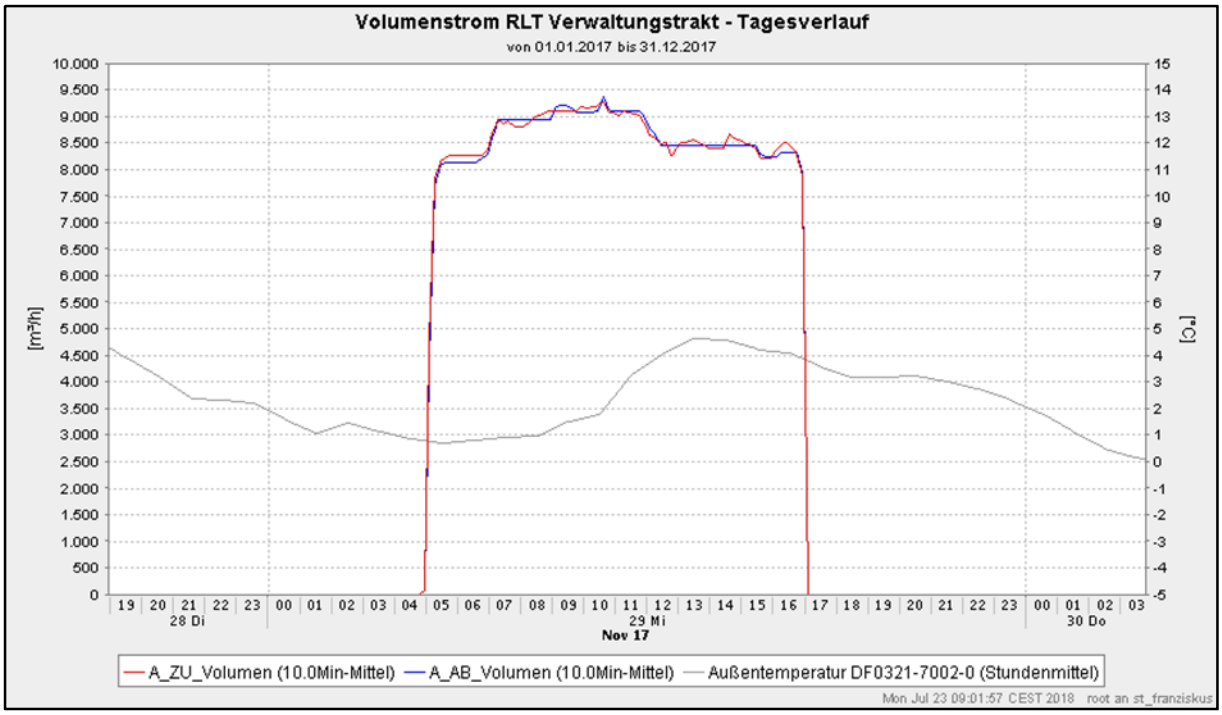

Abbildung 7-50: Tagesprofil eines Wintertages – Volumenströme RLT Verwaltungstrakt

7.6.2 Volumenströme Sommerwoche

Abbildung 7-51 und Abbildung 7-53 zeigen den Verlauf der Zu- und Abluftvolumenströme im jeweiligen Zentralgerät in einer Sommerwoche. Es ist eine der wärmsten Wochen des Jahres 2017 mit Schulbetrieb und ohne Feiertage.

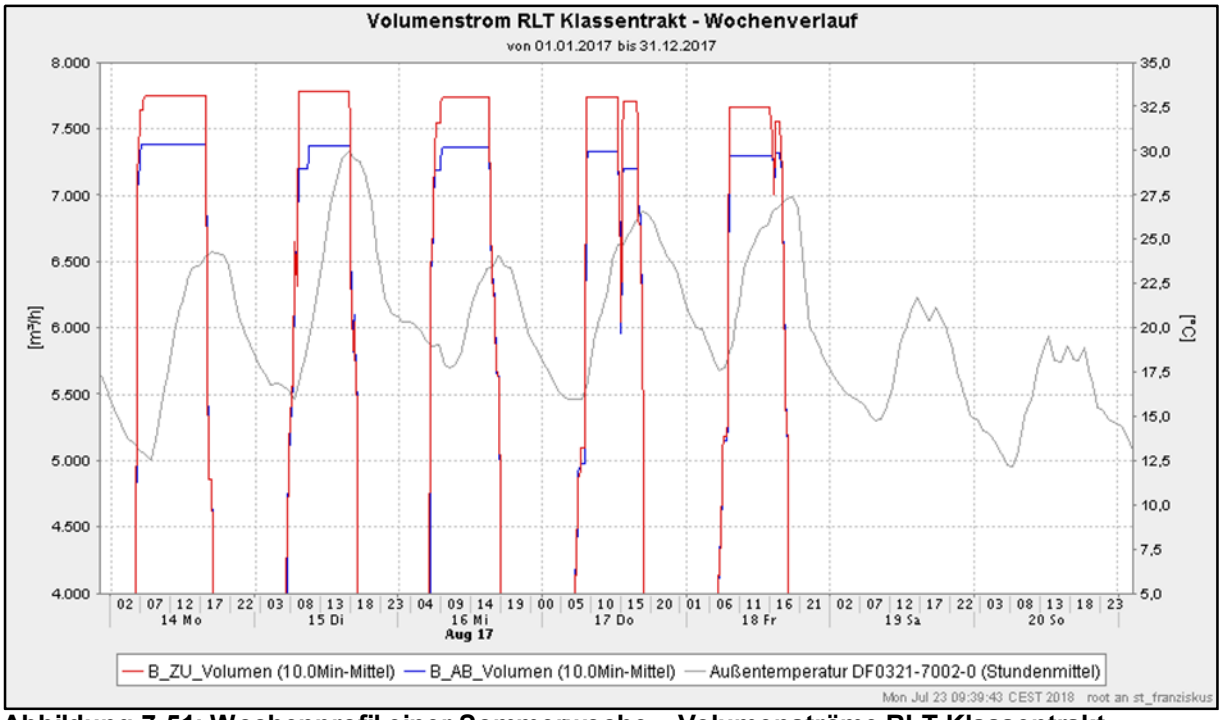

Abbildung 7-51: Wochenprofil einer Sommerwoche – Volumenströme RLT Klassentrakt

Im Klassentrakt ist festzustellen, dass sich die Sommerwoche kaum von der Winterwoche unterscheidet. Da die sommerliche Nachtlüftung nicht aktiv war, ergeben sich die gleichen Abläufe.

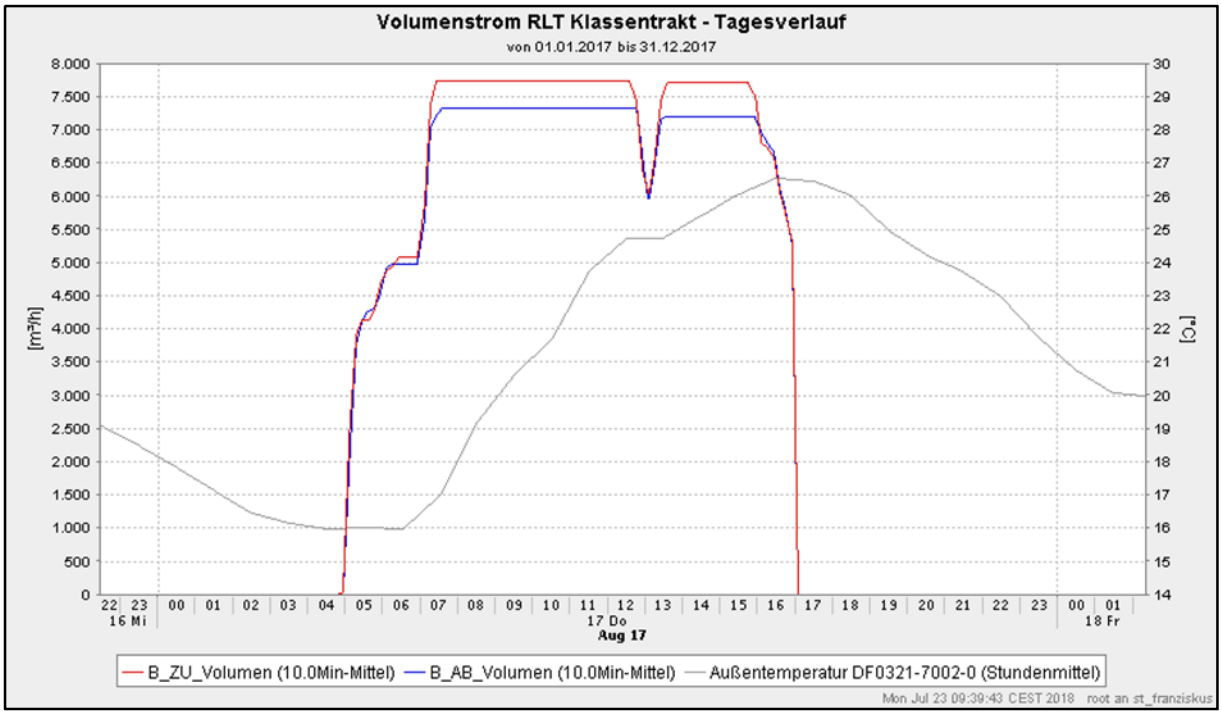

Abbildung 7-52: Tagesprofil eines Sommertages – Volumenströme RLT Klassentrakt

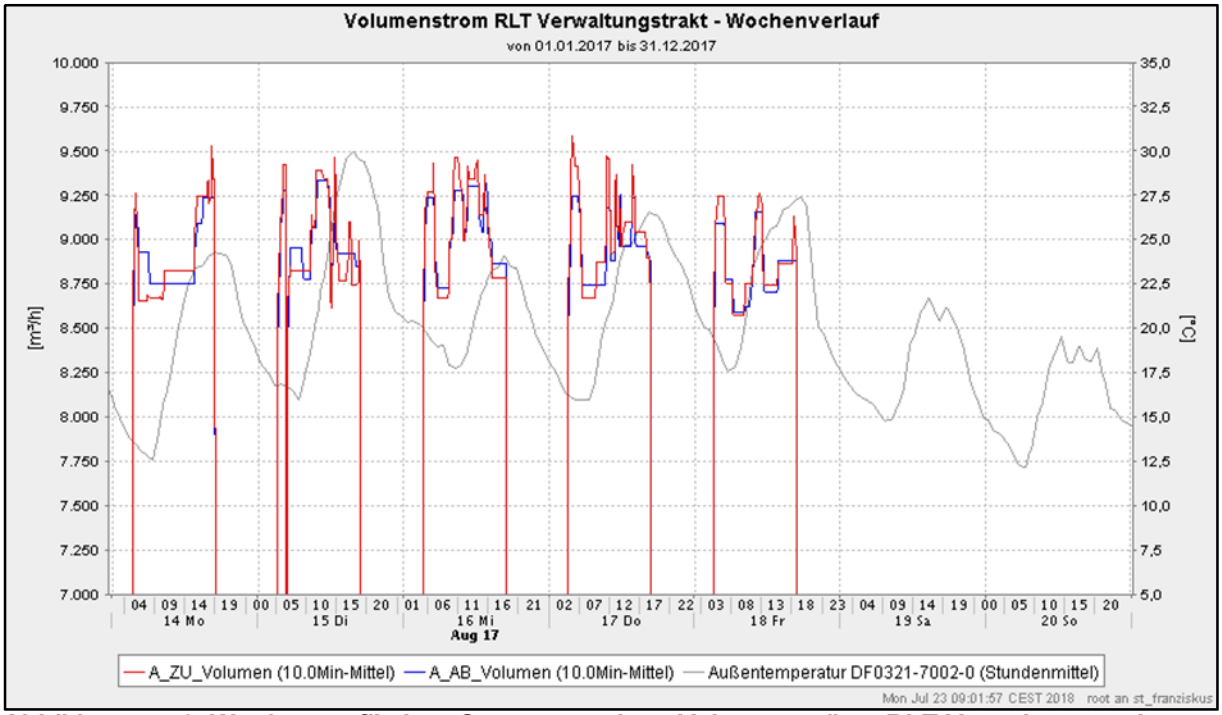

Abbildung 7-53: Wochenprofil einer Sommerwoche – Volumenströme RLT Verwaltungstrakt

Die Grafik für den Verwaltungstrakt ist in der Skalierung wiederum stark abgeschnitten, weil so die sehr geringen absoluten Änderungen überhaupt sichtbar werden. Die Schwankungen von maximal 1000 m³/h ergeben sich nutzungsbedingt durch die Belegung der Aula und des Werkraumes. Es ist die Nachtlüftung in diesem Gebäudeteil von 3 bis 5 Uhr zu erkennen.

Abbildung 7-52 und Abbildung 7-54 lösen zwei der Tage noch besser auf.

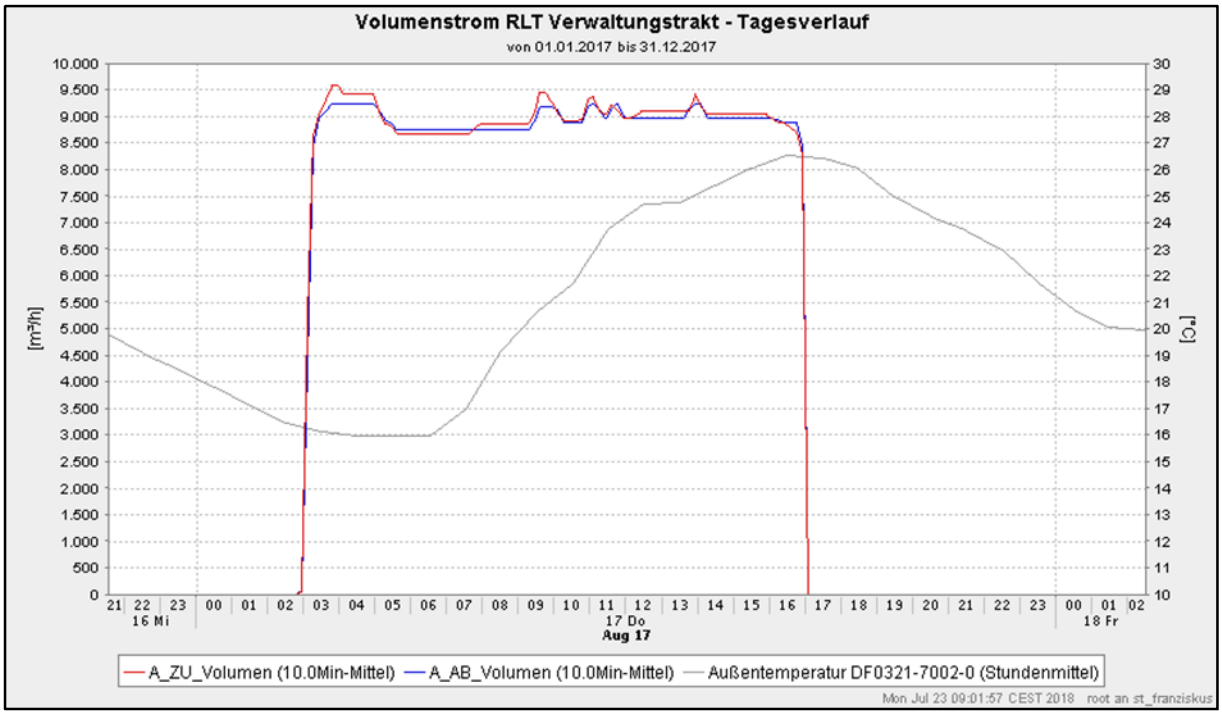

Abbildung 7-54: Tagesprofil eines Sommertages – Volumenströme RLT Verwaltungstrakt

7.6.3 Volumenströme Ferienwoche

Abbildung 7-55 zeigt den Volumenstrom des Klassentraktes in einer kühlen Sommerferienwoche. Nach dem Start der Anlage um 4 bzw. 5 Uhr verbleibt der Volumenstrom in etwa auf dem Niveau um 5000 m³/h. Es wird davon ausgegangen, dass am Mittwoch und Donnerstag keine Volumenstromregler ausgelöst wurden. Damit ergibt sich der minimal erzielbare Volumenstrom für die RLT-Anlage "Klassentrakt" aus der Summe aller Räume, die rein zeitabhängig durchlüftet werden.

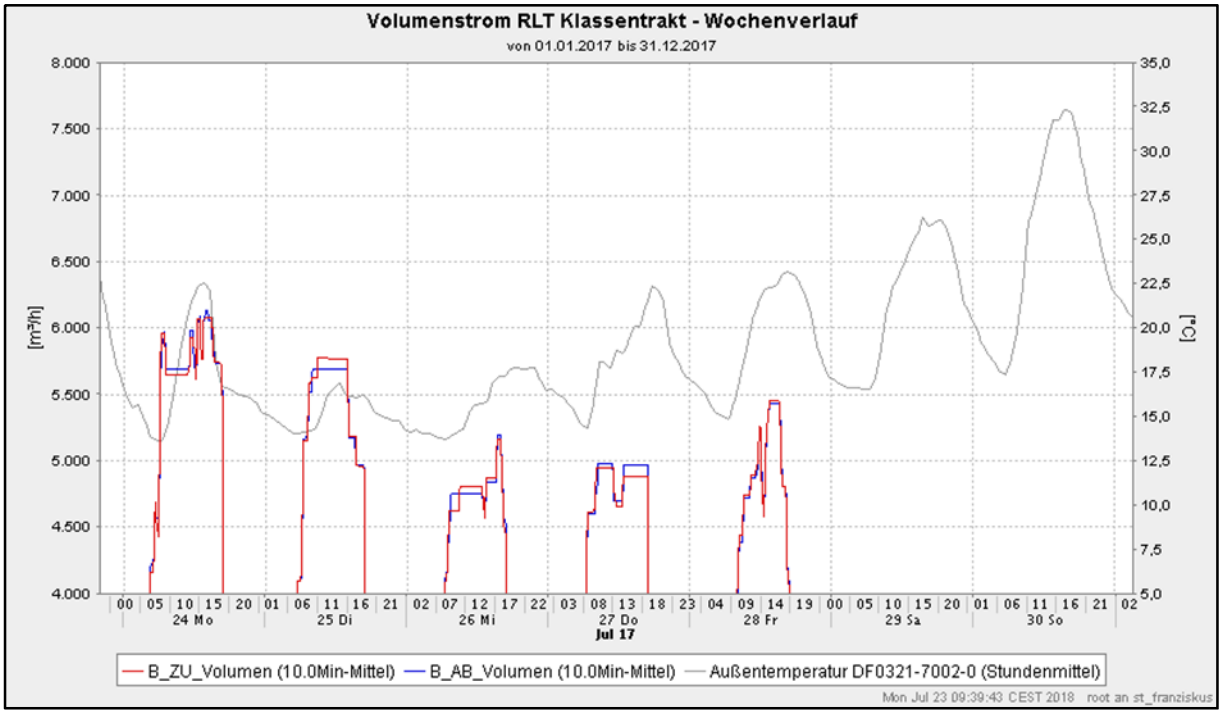

Abbildung 7-55: Wochenprofil einer Ferienwoche – Volumenströme RLT Klassentrakt

Im Klassentrakt zeigt sich somit eine deutliche Minderung des Volumenstroms – im Gegensatz zum Verwaltungstrakt.

7.6.4 Vergleich von Bedarf und Verbrauch

Im Verlauf des Monitorings befassten sich einige Abschlussarbeiten zu Beginn mit der Prognose von Energiemengen und Leistungen, andere am Ende mit der Auswertung der tatsächlichen Zustände.

Abbildung 7-56 zeigt die Prognose des Lastverlaufs der Ventilatoren für einen typischen Schultag – anhand der Raumnutzungen. In beiden Gebäudeabschnitten beginnt der Tag mit einer sehr leistungsintensiven Aufheiz- und Vorspülphase. Im Klassentrakt schließt sich die Nutzung der Klassenräume (ohne Hort) und dann der Horträume (ohne Klassen) an. In der Aula wird zur Mittagszeit Essen eingenommen, sonst werden nur die anderen Räume des Verwaltungstraktes benutzt.

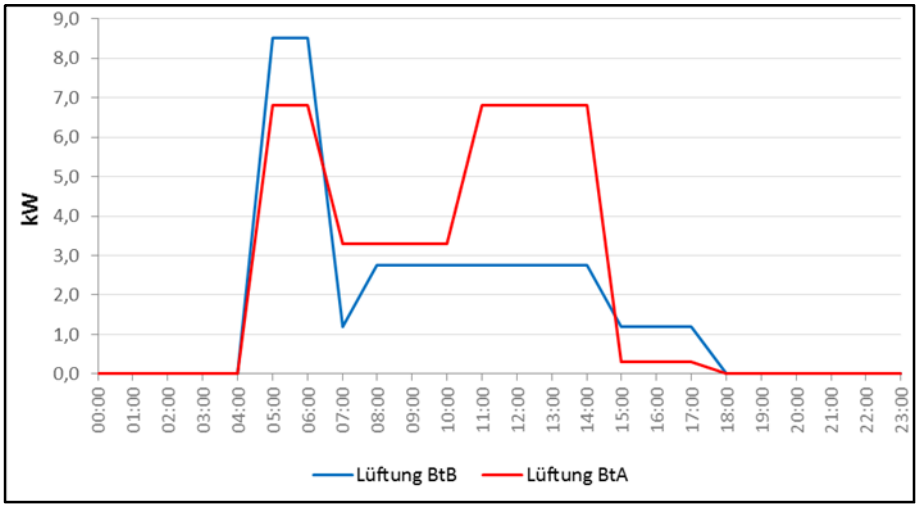

Abbildung 7-56: Theoretischer Strombedarf im Schulbetrieb [23]

Abbildung 7-57 und Abbildung 7-58 zeigen die Messwerte – in einer Schulwoche und einer Ferienwoche. In der Verwaltungstraktanlage (BTA) werden zwar die maximalen Leistungen aus der Prognose nicht erreicht, es zeigt sich aber kein Tagesgang. Der Klassentrakt (BTB) hat in der gewählten Woche keine ausgeprägte Aufheizphase, überschreitet aber im restlichen Tagesverlauf die Prognosewerte bei weitem – Hort und Klassenräume werden nicht alternativ benutzt, sondern gleichzeitig (bzw. gibt es viele Horträume mit ganztägiger Lüftung nach Zeitschaltung).

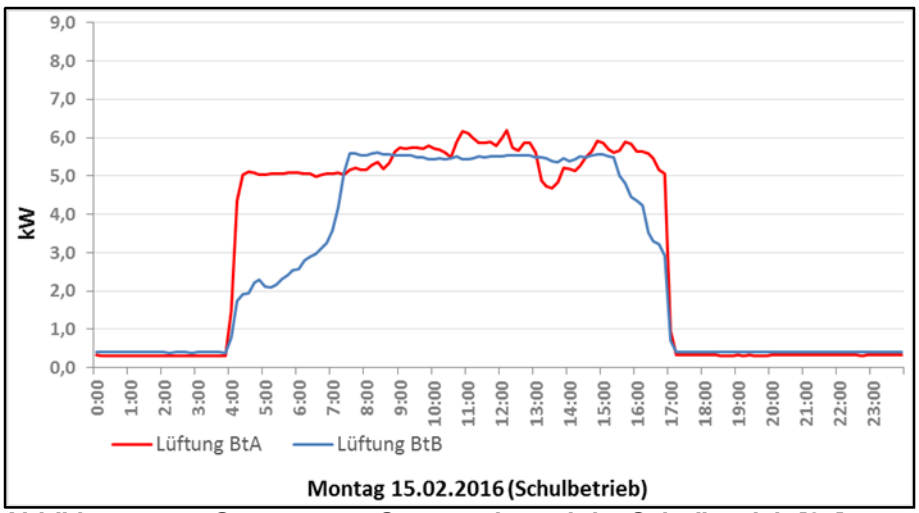

Abbildung 7-57: Gemessener Stromverbrauch im Schulbetrieb [24]

Der Ferientag ist im Verwaltungstrakt nicht, jedoch im Klassentrakt gut erkennbar.

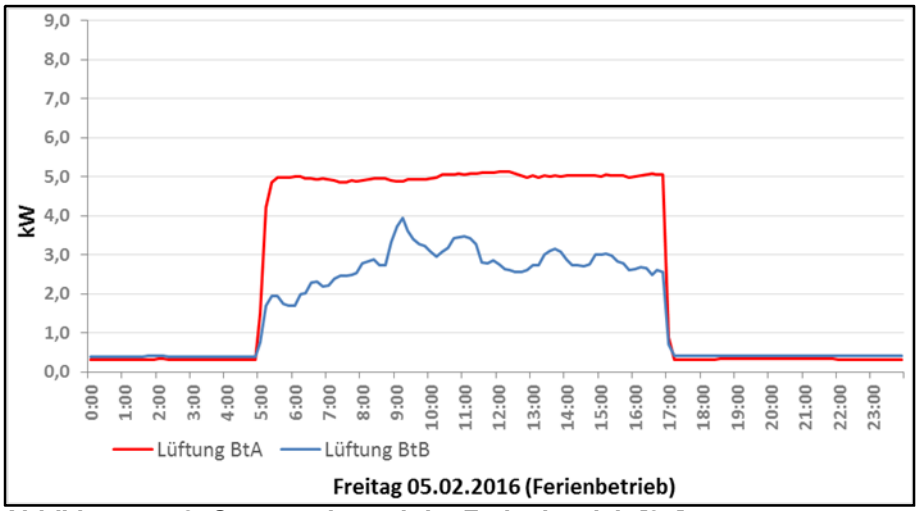

Abbildung 7-58: Stromverbrauch im Ferienbetrieb [24]

Wenn beide Lüftungsanlagen in den langen Schließzeiten – Weihnachten von 24.12. bis 01.01. und zwei Wochen in den Sommerferien – ausgeschaltet würden, ergäbe sich sowohl für das Jahr 2017 als auch für das Jahr 2018 eine Energieeinsparung von ca. 18 % für den Ventilatorstrom [24].

7.7 Raumregelung

Für fast alle Räume, welche mit Volumenstromregler ausgestattet sind, wird das Regelsignal der MENERGA-Zentralgeräte als Monitoring-Wert gespeichert. Es handelt sich dabei um den Wert zwischen 0 und 10 V (übersetzt als 0 % - 100 %), mit dem die Volumenstromregler angesprochen werden – nicht die Stellung der Klappe im VSR. Die Zentralgeräte geben nur binäre Werte – 0 % oder 100 % ab. Die abgespeicherten Zwischenwerte ergeben sich durch Mittelwertbildung über den Messzeitraum. In den nachfolgenden Übersichten sind 10-Minuten-Werte gewählt.

Die Grafiken können verwendet werden, um einerseits die Belegung näherungsweise nachzuvollziehen (bei den Räumen mit Präsenzregelung) bzw. die korrekte Funktion der Ansteuerung über die Zentralanlage nachzuvollziehen (Aufheizung, Nachlüftung usw.).

7.7.1 Räume mit Präsenzregelung

Abbildung 7-59 bis Abbildung 7-63 zeigen die Carpetplots für ausgewählte Räume mit Präsenzregelung.

Märchenzimmer

Die Aufheizung an Montagen ab 4 Uhr ist in vielen Wochen erkennbar. In etlichen Wochen der Übergangszeit ist dies der einzige Aufheizmorgen; an den anderen Tagen der betreffenden Wochen reicht die Restwärme vom Vortag.

An den Tagen ohne morgendliche Aufheizung ist der eigentliche Nutzungsbeginn erkennbar. Er liegt zwischen 6 und 8 Uhr.

Die sommerliche Nachtlüftung im Jahr 2016 wurde in den ersten Wochen nur getestet und nicht durchgeführt, erst ab Juni wurde sie tatsächlich notwendig. Nach der Nachtlüftung erfolgte im Sommer häufig ein Schließen der Volumenstromregler, weil keine Personen anwesend waren.

Im Winter dauert die Aufheizung oft bis 8 Uhr. Erst danach beginnt die Phase, in der die Präsenzregler wieder freigegeben werden.

Der Hautbetrieb liegt zwischen 13 und 16 Uhr ganzjährig – bis auf die Ferienwochen.

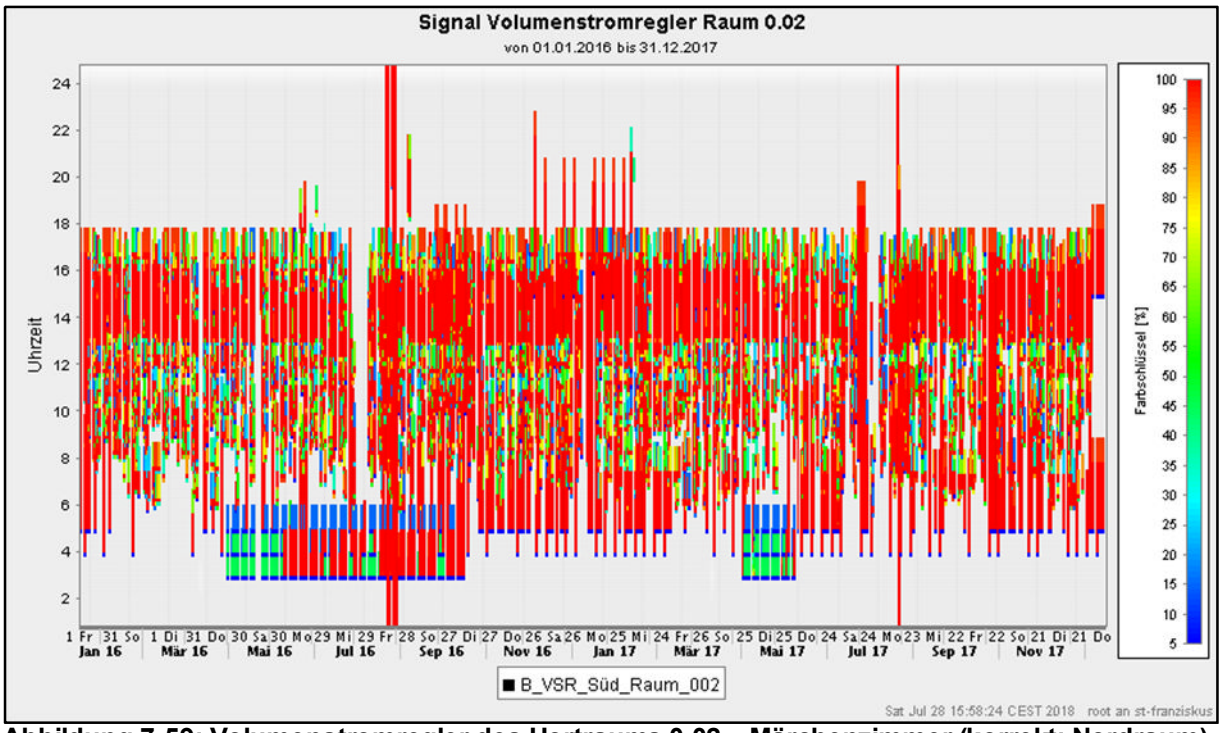

Abbildung 7-59: Volumenstromregler des Hortraums 0.02 – Märchenzimmer (korrekt: Nordraum)

Kindercafé

Im Kindercafé ist fast jeden Tag ab 6 Uhr bis 17 Uhr Betrieb festzustellen, so dass kaum andere Volumenstromreglerstellungen als 100 % registriert werden. Dieser Raum hätte auch mit einem Zeitschaltprogramm ausgestattet werden können. Jedoch: in den Ferienzeiten ist der Raum nicht durchlüftet.

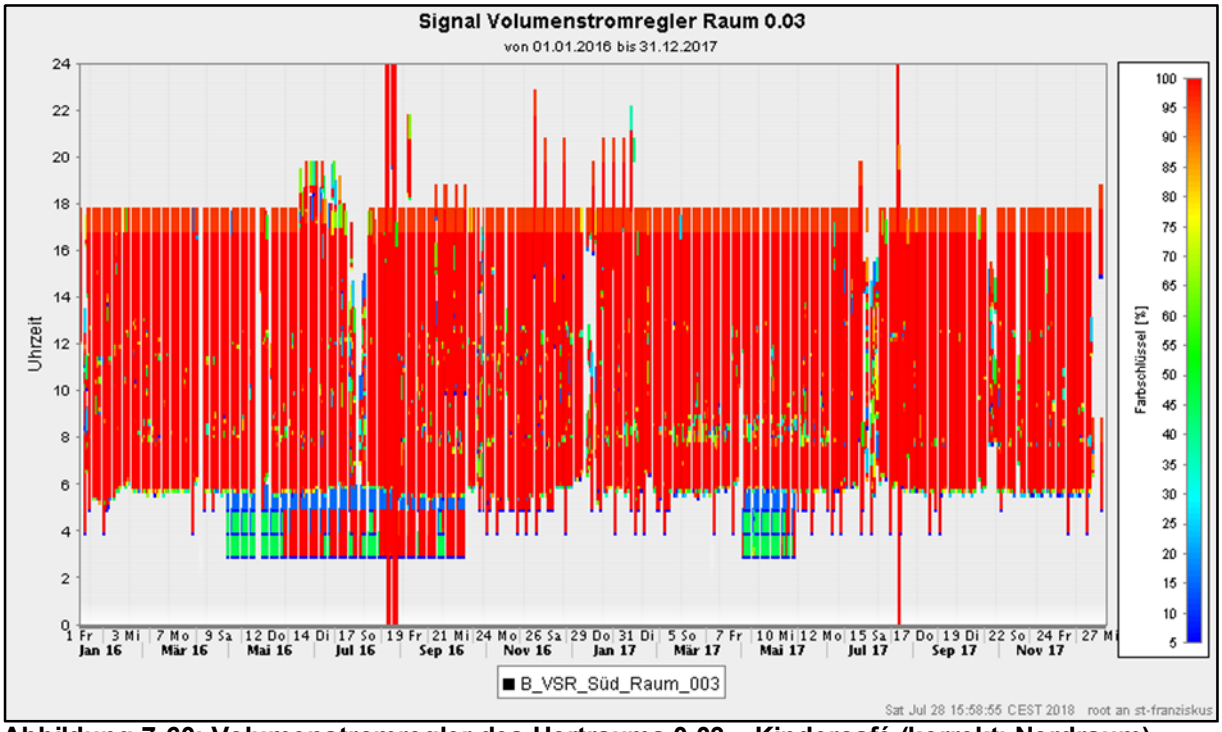

Abbildung 7-60: Volumenstromregler des Hortraums 0.03 – Kindercafé (korrekt: Nordraum)

Nicht nachvollziehbar ist folgendes: beide Räume sind an derselben Anlage angeschlossen und derselben Zone zugeordnet (beide fälschlicherweise der Gruppe "Südräume"). Sie werden also laut Regelungsbeschreibung mit denselben Signalen zur morgendlichen Aufheizung und Nachtlüftung beschickt. Betrachtet wird der Januar/Februar 2016 und dort nur die Starts am Montagmorgen: es ist erkennbar, dass der Hortraum nicht identisch angesteuert wird. Dies passiert auch in anderen Wochen und bei anderen Räumen und konnte – auch durch Nachfrage beim Techniker der Fa. MENERGA – nicht ergründet werden.

Klassenräume 1.08 und 2.01

Die Tagesverläufe für die beiden intensiv überwachten Klassenräume zeigen jeweils eine identische sommerliche Nachtlüftung, die um 5:00 Uhr gestoppt wird und dann noch ca. 1 Stunde nachläuft.

Die morgendliche Aufheizung findet im Raum 1.08 auf der Südseite seltener statt. Wenn sie aber ausgelöst wird, geht sie fließend in die Betriebsphase über. Es gibt nur sehr selten eine Unterbrechung der Volumenströme – nach Ende der Aufheizung und vor dem Eintreffen der Schüler.

Zu Beginn der Woche sind häufiger morgendliche Aufheizphasen feststellbar als am Ende. Das gilt für beide Klassenräume. Kritisch ist anzumerken: stellt die Regelung keinen Heizbedarf fest, wird nicht gelüftet, bis die Personen kommen – das widerspricht der notwendigen Vorspülung und wurde im Rahmen der Lüftungsoptimierung geändert.

Die Hofpause gegen 10:00 Uhr sowie die Mittagspause gegen 12:30 Uhr sind erkennbar. Ab 14 Uhr beginnt die sporadische Nutzung der Räume, die gegen 16:00 Uhr meist beendet ist.

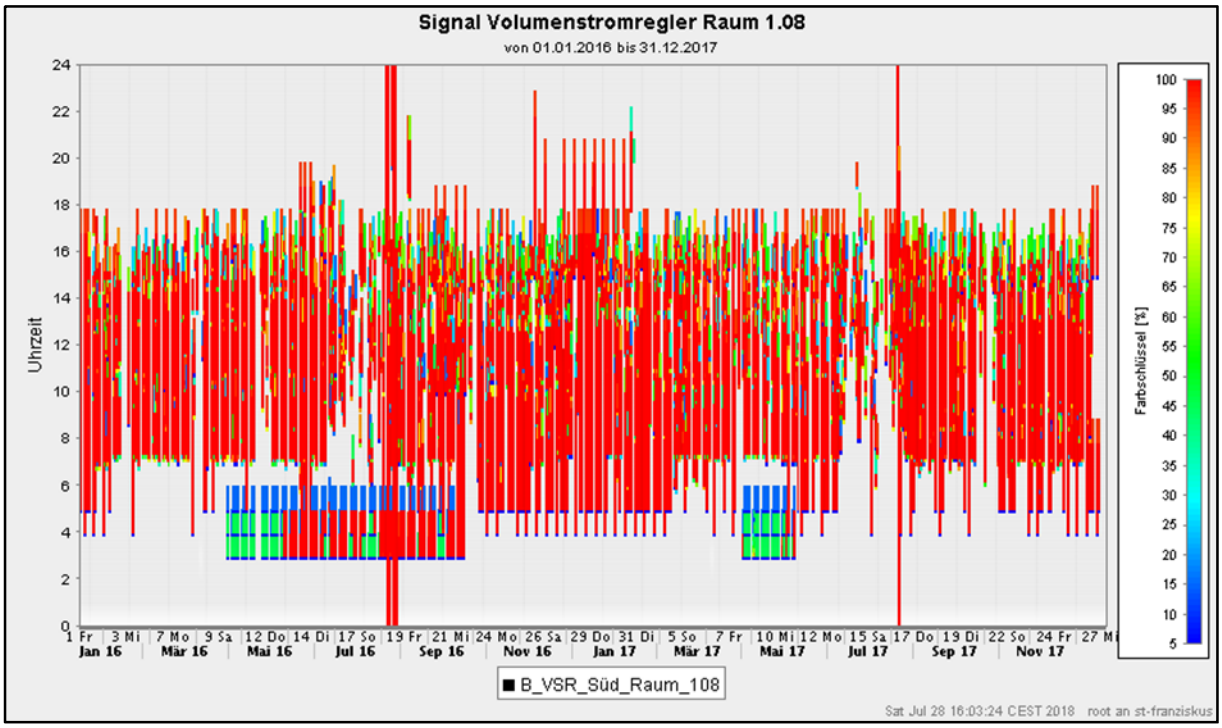

Abbildung 7-61: Volumenstromregler des Klassenraumes 1.08

Im März 2017 ist für alle Nordräume – so auch den Klassenraum 2.01 – festzustellen: die Aufheizphase dauert den gesamten Tag. Es ist nicht abschließend zu klären, was das Problem war, jedoch wird vermutet, dass der Raumtemperatursollwert für die Aufheizung der Nordräume so hoch gesetzt wurde (nach Nutzerbeschwerden), dass dies dem korrekten Verhalten der Regelung entspricht.

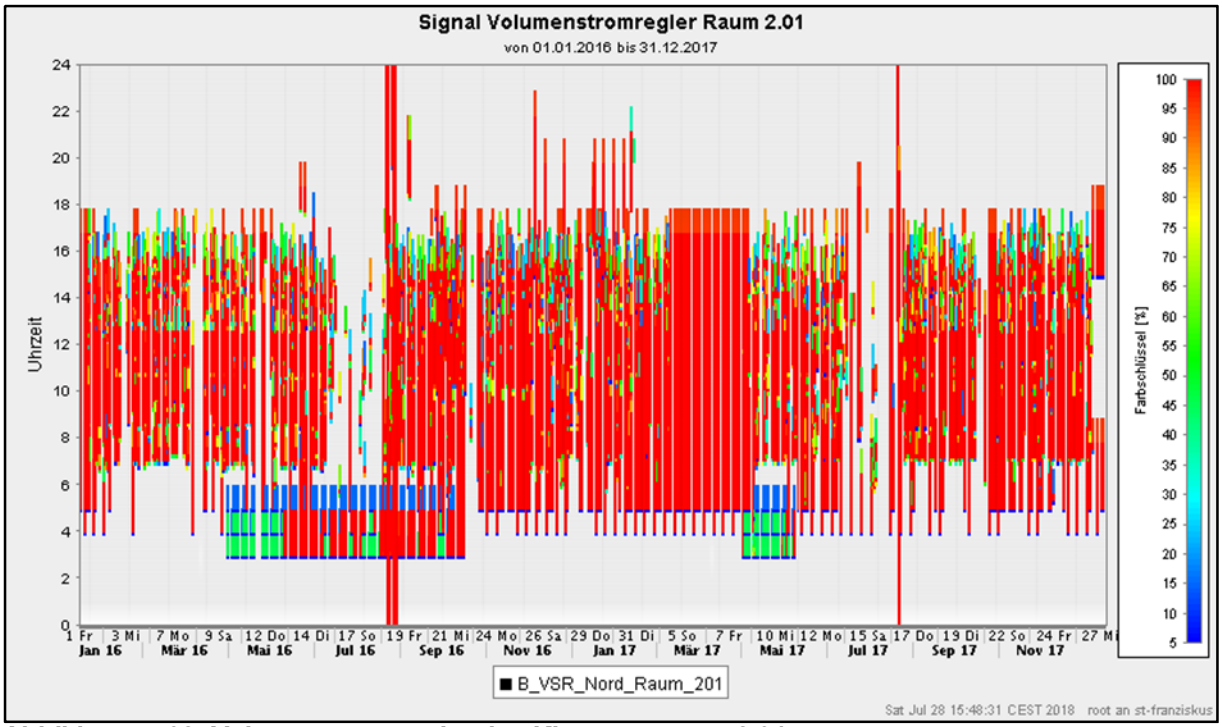

Abbildung 7-62: Volumenstromregler des Klassenraumes 2.01

Werkraum

Der Werkraum wird deutlich weniger genutzt als andere Räume. Die Nachtlüftung ist gut erkennbar, die eher seltenen morgendlichen Aufheizvorgänge auf der Südseite ebenso. Da der Klassenraum dem Verwaltungstrakt zugeordnet ist, bricht die sommerliche Nachtlüftung nicht Mitte 2017 ab, sondern ist weiter in Betrieb.

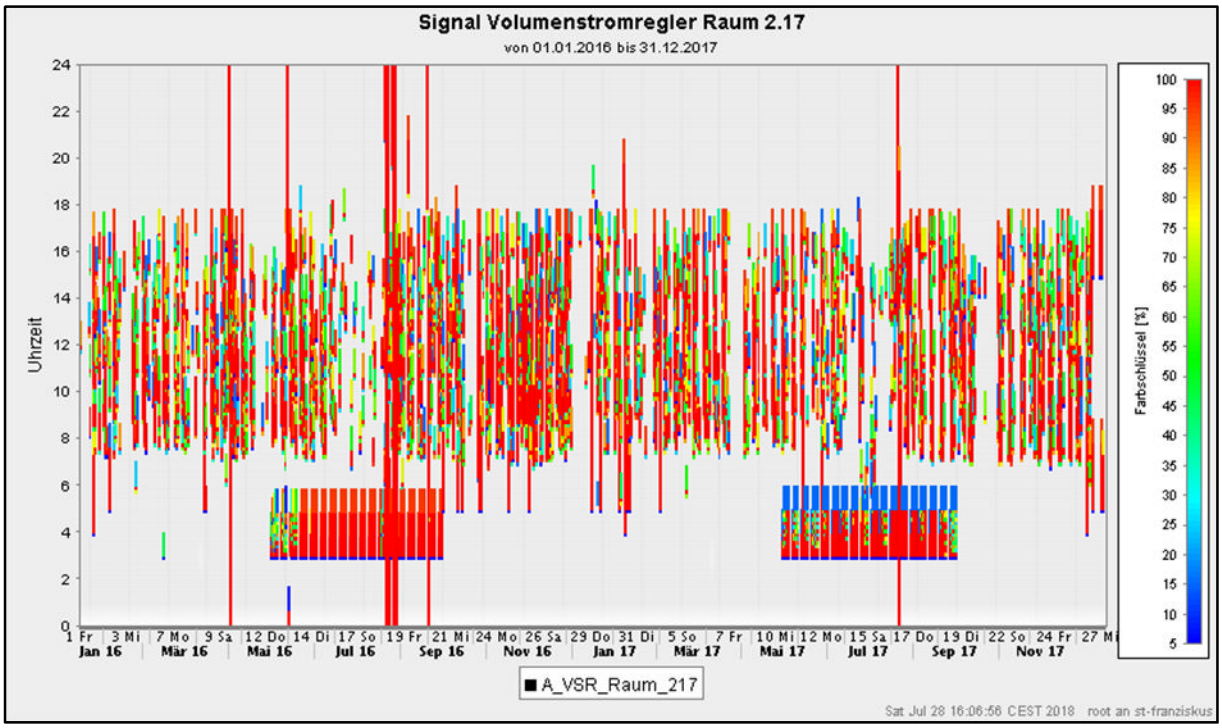

Abbildung 7-63: Volumenstromregler des Werkraumes 2.17

Weitere Profile für die Räume mit Präsenzregelung sind im Anhang 9.4.1 zu finden. Auf eine weitere Interpretation wird verzichtet, da alle relevanten Erkenntnisse sich wiederholen.

7.7.2 Räume ohne Präsenzregelung

Abbildung 7-64 und Abbildung 7-65 zeigt die Carpetplots für zwei beispielhafte Räume ohne Präsenzregelung. Weitere Profile für die Räume sind im Anhang 9.4.2 zu finden.

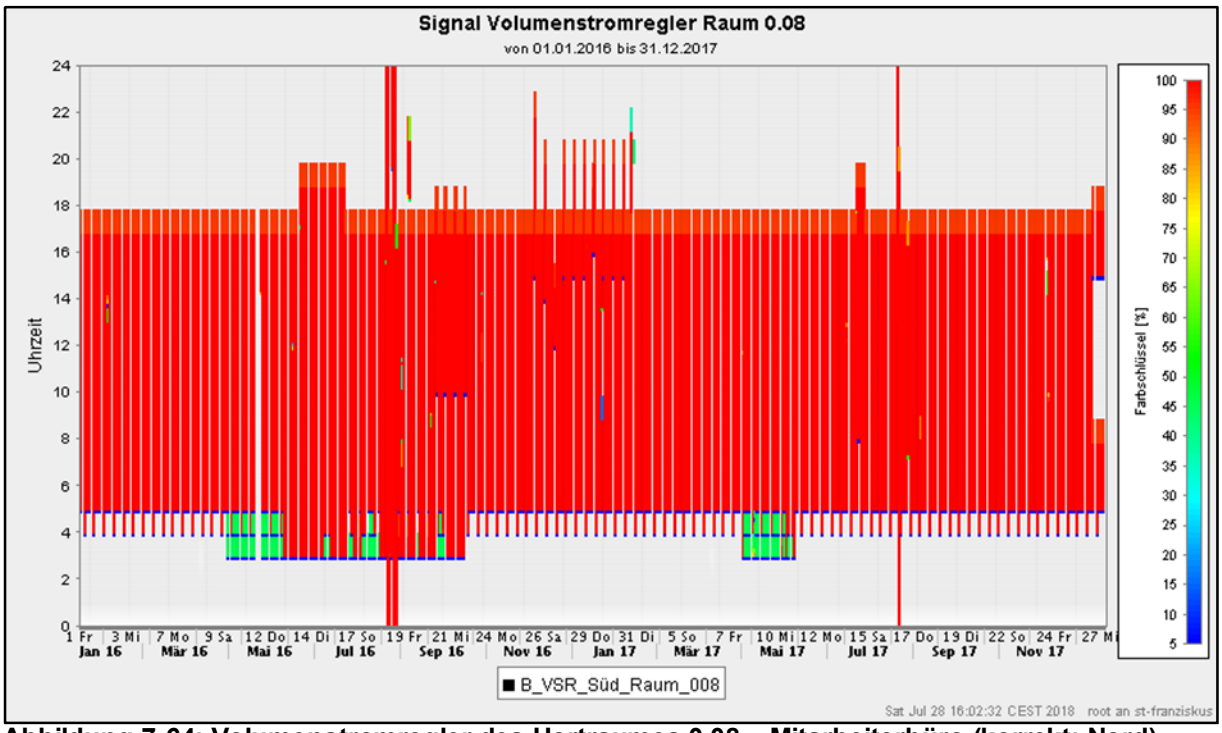

Abbildung 7-64: Volumenstromregler des Hortraumes 0.08 – Mitarbeiterbüro (korrekt: Nord)

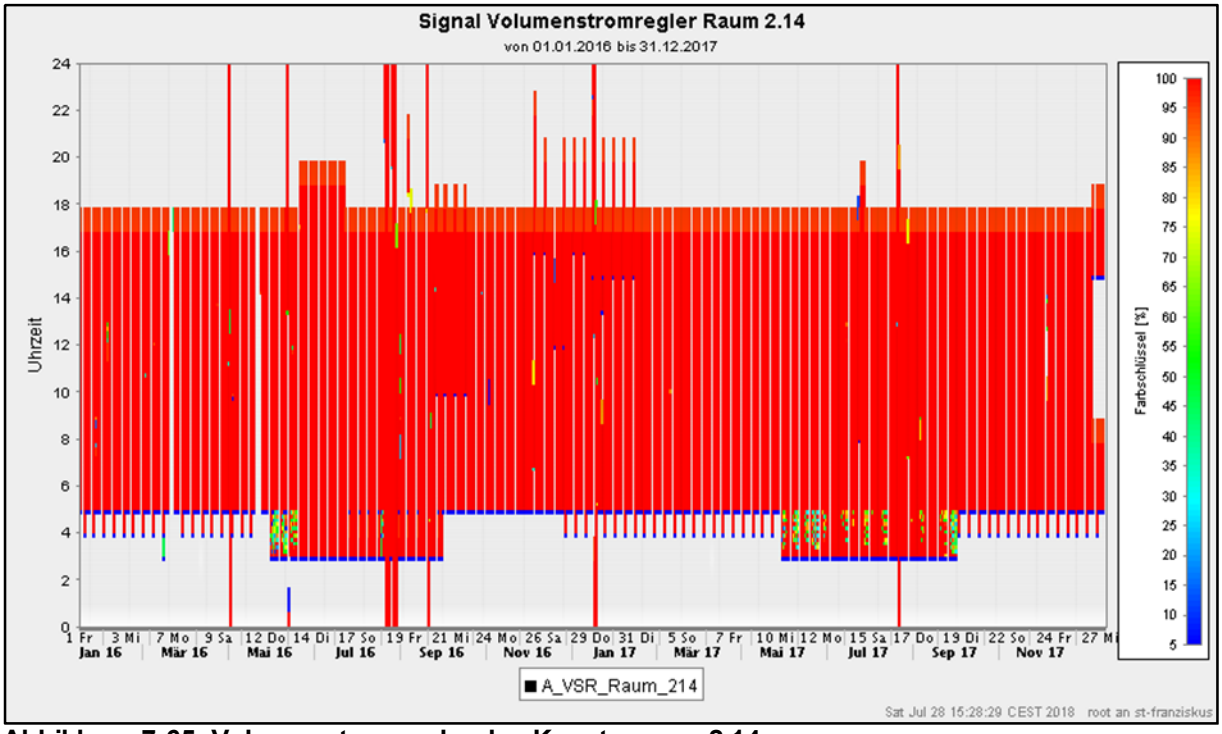

Abbildung 7-65: Volumenstromregler des Kunstraumes 2.14

Die Nachtlüftung sowie die morgendlichen Betriebsstarts um 4 bzw. 5 Uhr sind zu erkennen. Unabhängig von einer notwendigen Heizung werden die Räume auch ohne Personenanwesenheit belüftet.

Es gibt keine Ungereimtheiten hinsichtlich der morgendlichen Durchspülung und Aufheizung. Unabhängig von der Lage im Gebäude ist der Raum durchlüftet und im Winter beheizt, wenn die Nutzer eintreffen.

7.7.3 Fazit zur Raumregelung

Ungünstig ist, dass Räume morgens nicht durchlüftet werden, wenn kein Heizbedarf besteht und keine Nachtlüftung erfolgt ist. Das betrifft nur die Räume mit Präsenzregler. Wenn die ersten Nutzer eintreffen, wird erstmalig Frischluft zugeführt. Das wiederspricht der Raumhygiene – wenn auch keine langen Zeiträume verstreichen, bis die frische Luft eintrifft.

Andererseits ist der Zustand, den Kunstraum und andere selten frequentierte Räume permanent von morgens 4 oder 5 Uhr an mit dem Nennvolumenstrom zu versorgen, ebenfalls nicht zufriedenstellend, aber im gewählten Anlagenkonzept notwendig. Hierbei wird einerseits reichlich Ventilatorstrom eingesetzt, andererseits auch – weniger – Heizwärme. Auch erwärmen sich Räume entsprechend nach der sommerlichen Nachtlüftung wieder, ohne dass Personen anwesend sind.

Insgesamt ergibt sich unter Betrachtung der Sachlage die Erkenntnis, dass eine Entkopplung von Heizung und Lüftung empfehlenswerter ist.

- alle Räume der Hauptnutzung könnten konsequent mit Volumenstromreglern ausgestattet werden, so dass kein unnötiger Volumenstrom 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 gestaffelt für Hort, Büro und Klassenräume
- mit raumweise notwendigen Heizflächen (Heizkörpern) ließe sich in jedem Raum eine Einzelraumregelung realisieren.

7.8 Regelungsfunktionen der Zentralanlage Klassentrakt

Basis der nachfolgenden Ausführungen sind die Regelungsbeschreibungen der Anlage nach Kapitel 5.2 sowie 5.3. Es wird in die drei Phasen: "Aufheizvorgang", "Betriebszeit" und "Freie Nachtauskühlung" unterschieden. Anhand von Messwerten wird geprüft, ob der Betrieb bestimmungsgemäß läuft. Auf eine erneute Wiedergabe aller Sollwerte wird verzichtet, lediglich bei Abweichungen von den Sollwerten gibt es Hinweise. Die Ausarbeitung erfolgte im Rahmen einer Masterarbeit zur Lüftungsoptimierung [17].

7.8.1 Betriebsfall "Aufheizvorgang"

Basis der Untersuchung ist die Kalenderwoche 50 des Jahres 2017. In dieser Schulwoche liegen alle Messwerte lückenlos vor.

Der Raumtemperatursollwert wurde im Laufe der Woche zweimal vom Hausmeister geändert. Die für die RLT-Anlage relevante Außentemperatur (die Zuströmtemperatur in das Zentralgerät nach dem Erdreichwärmeübertrager) liegt bei etwa 8 °C.

Südliche Klassenräume

Gemäß der Regelung wird die Aufheizung für den südlichen Teil des Klassentraktes beendet, wenn die Raumtemperatur im Referenzraum 1.08 den Grenzwert von 20°C erreicht (1 K unter Sollwert, der bei 21°C liegt). Anhand der Raumtemperatur lässt sich ableiten, dass die Aufheizung am Montag erforderlich war, an den anderen Tagen nicht.

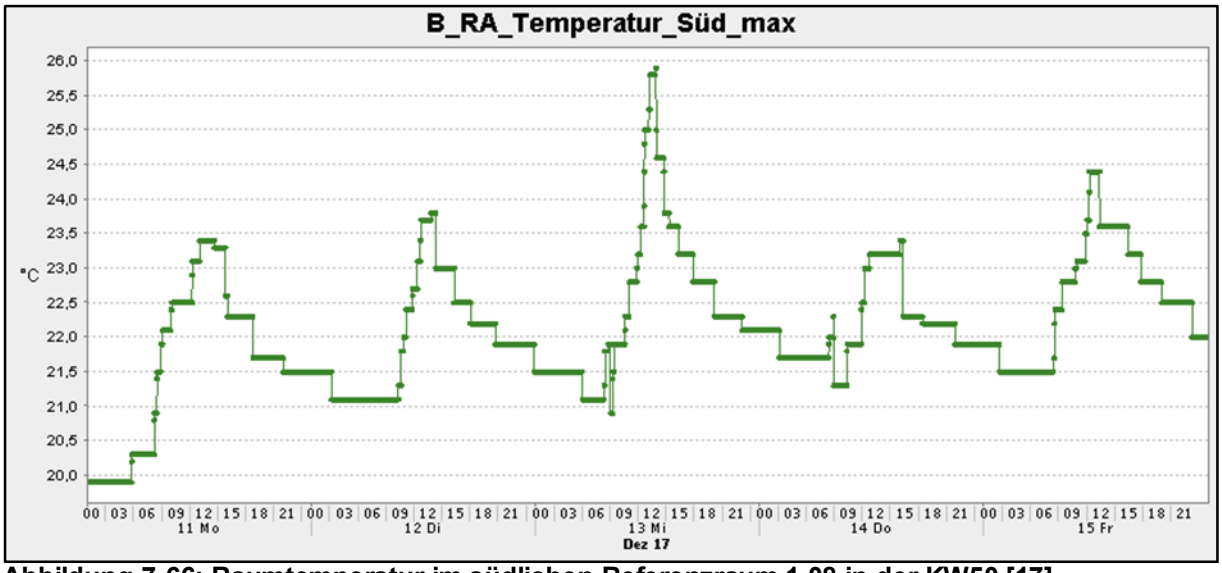

Abbildung 7-66: Raumtemperatur im südlichen Referenzraum 1.08 in der KW50 [17]

In Abbildung 7-67 sind die Messpunkte der vier Südklassen-VSR dargestellt. Die Darstellungslinien der VSR überlagern sich aufgrund gleichzeitiger Ansteuerung teilweise. Es ist zu erkennen, dass die VSR am Montag schon um 4 Uhr und an den restlichen Tagen erst gegen 7 Uhr, also kurz vor Unterrichtsbeginn, öffnen. Das entspricht der Planung.

Außerdem ist der Abbildung zu entnehmen, dass die VSR am Montag erst im Laufe des Vormittags schließen. An diesem Tag ist die Aufheizung erst beendet, als die Nutzer schon anwesend sind, was ebenfalls der Anlagenregelung entspricht. Allerdings war dies nicht in der ursprünglichen Planung vorgesehen: eigentlich sollte der Aufheizvorgang um 6 Uhr beendet sein [5].

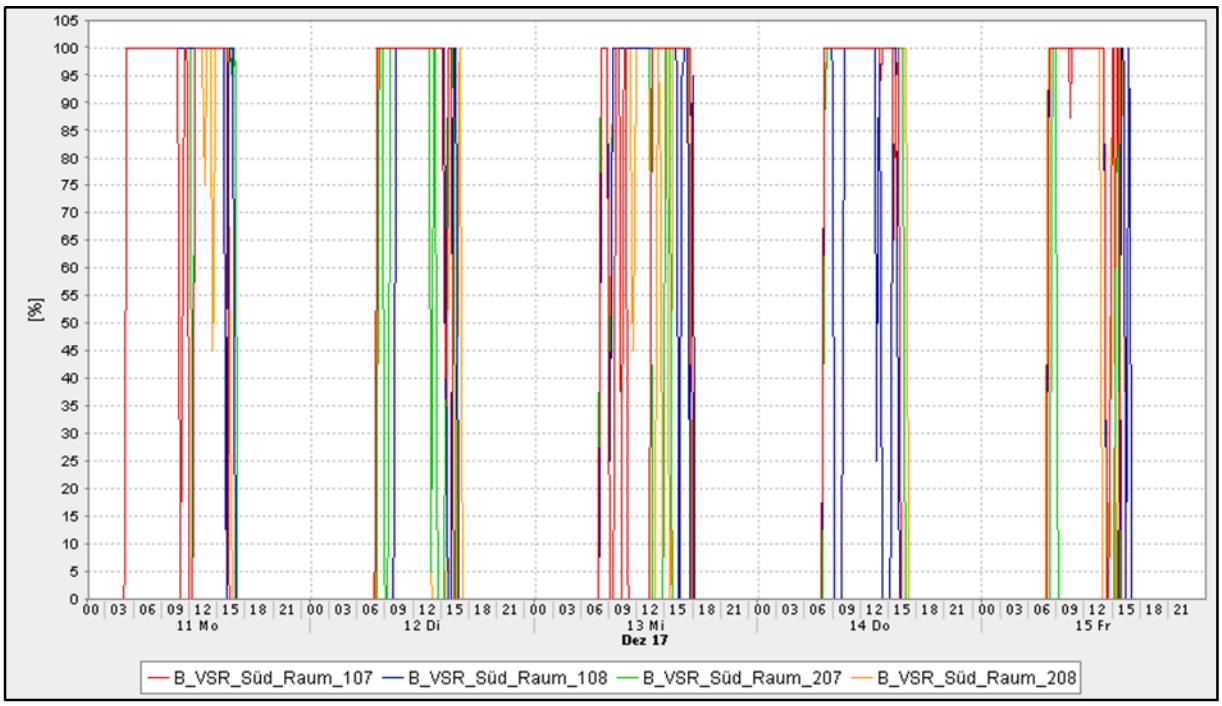

Abbildung 7-67: VSR-Stellung R107, R108, R207 und R208 in der KW50 [17]

Nördliche Klassenräume

Der für die Aufheizung des nördlichen Gebäudeteils des Klassentraktes eingestellte Aufheiztemperatursollwert von 24 °C (bzw. 23 °C als Endwert der Beheizung) wird an keinem Morgen der KW 50 erreicht. Referenz ist der Messfühler im Hortraum 0.01.

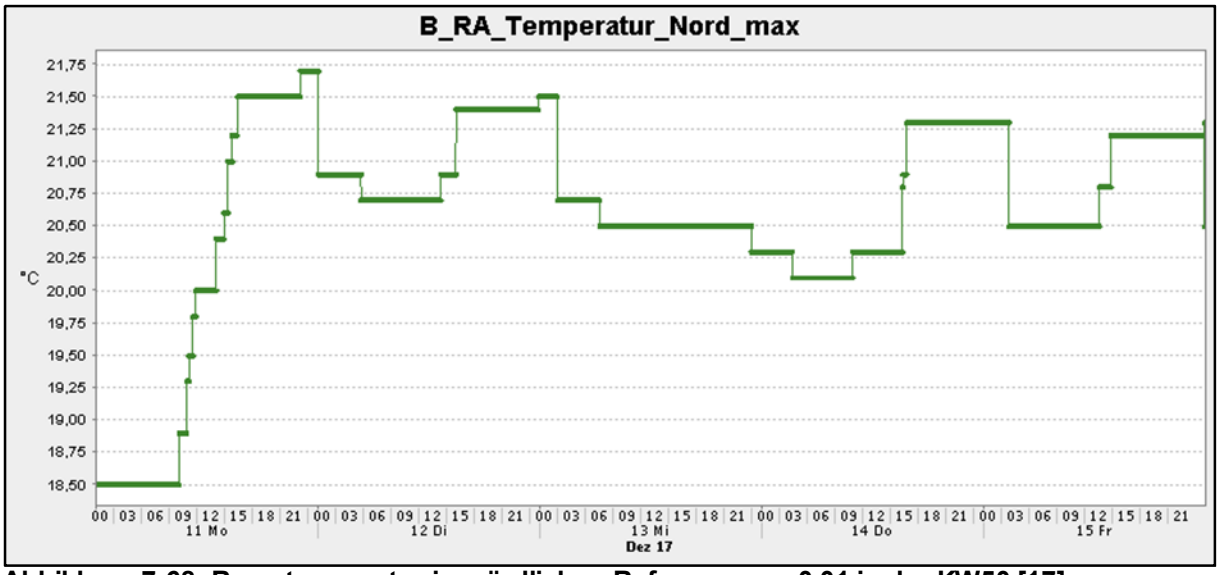

Abbildung 7-68: Raumtemperatur im nördlichen Referenzraum 0.01 in der KW50 [17]

Am Montagmorgen wird in allen Räumen außer 2.02 der Aufheizvorgang gestartet, siehe Abbildung 7-69. Die Volumenstromreglerwerte überlagern sich. Der VSR des Klassenraums 2.02 öffnet am Montag erst um 06:57 Uhr. Es ist davon auszugehen, dass es sich bei dieser Uhrzeit um den Zeitpunkt des erstmaligen Auslösens des Präsenzmelders handelt. Die Gründe dafür konnten nicht im Zuge der Anlagenoptimierung mit dem Techniker von Fa. MENERGA geklärt werden.

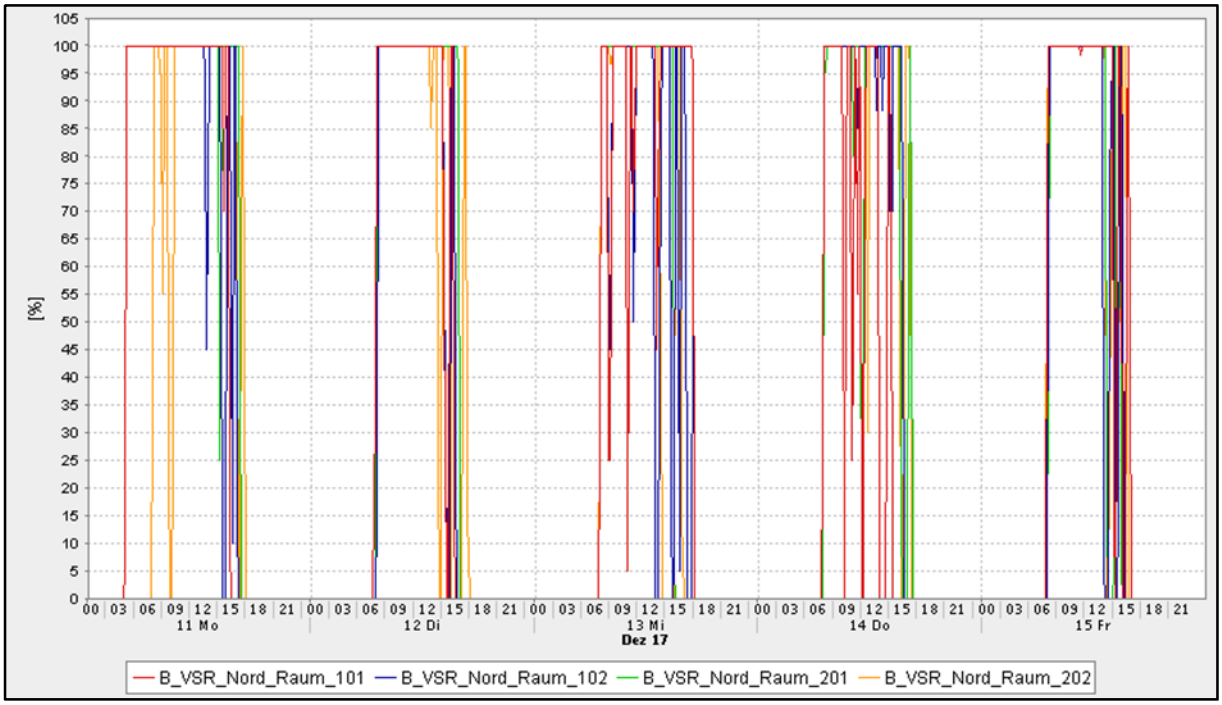

Abbildung 7-69: VSR-Stellung der nördlichen Klassenräume in der KW50 [17]

An den anderen Wochentagen, Dienstag bis Freitag, erfolgt keine Aufheizung und die vier VSR bleiben an diesen Tagen, zwischen 5 und 6 Uhr, geschlossen. Die erste tägliche VSR-Zustandsänderung, also der erste Öffnungszeitpunkt, wird jeweils gegen 7 Uhr aufgezeichnet. Das stützt die Annahme, dass es sich dabei um das Auslösen des Präsenzmelders zum Beginn des Betriebsfalls "Betriebszeit" handelt. Das entspricht nicht der geplanten Regelung.

Horträume

In den Horträumen gestaltet sich die Auswertung ebenso. Dabei muss beachtet werden, dass die südlichen Horträume der nördlichen Lüftungszone zugeordnet sind und umgekehrt. Das Problem wurde erst im Juni 2018 behoben. Fazit ist: Die Aufheizung am Montag funktioniert, an anderen Tagen gibt es einzelne oder alle Räume, die nicht morgens aufgeheizt werden.

7.8.2 Betriebsfall "Betriebszeit"

Basis der Untersuchung ist ebenfalls die Kalenderwoche 50 des Jahres 2017.

Südliche Klassenräume

Während der Unterrichtspausen, in denen keine Nutzer in den jeweiligen Räumen sind, werden die VSR, mit Ablauf der entsprechenden Nachlaufzeit, auf $\dot{V}_{min}$ geschlossen. Sobald durch die Präsenzmelder wieder Nutzer im entsprechenden Raum registriert werden, öffnet die Regelung diese wieder.

Die Messwerte des Dienstags sind in Abbildung 7-70 dargestellt. Hier ist deutlich zu erkennen, dass die VSR durch die raumweise Präsenzerfassung angesteuert werden und in den Pausen und nach Unterrichtsschluss keine kontrollierte Be- und Entlüftung erfolgt. Die Funktionsweise der VSR in den südlichen Klassenräumen erfolgt somit entsprechend der Funktionsbeschreibung.

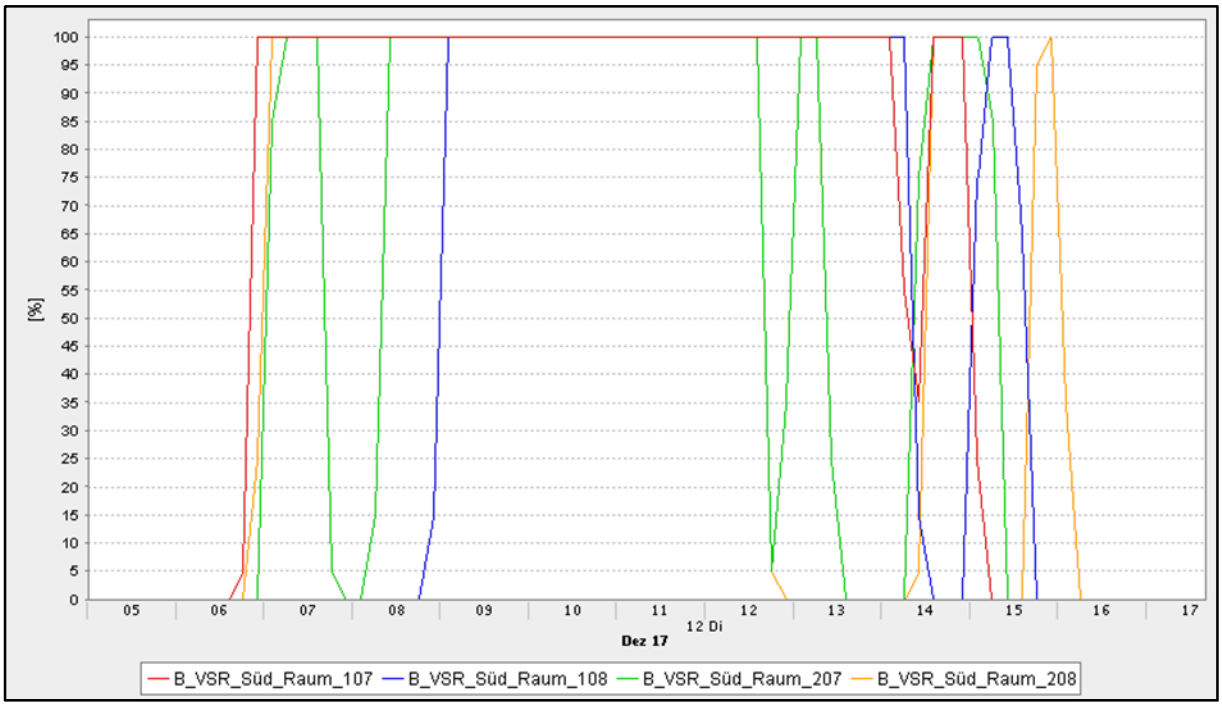

Abbildung 7-70: VSR-Stellung der südlichen Klassenräume am 12.12.17 [17]

Zur Überprüfung der präsenzgesteuerten VSR-Regelung gibt es, neben den Raumbelegungsplänen, noch weitere Rückschlussmöglichkeiten im Referenzraum 1.08. Über die Messwerte des CO_2-Messpunktes lässt sich rückschließen, wann Nutzer im Raum sind. Ist der VSR während der Unterrichtszeit geöffnet, also bei vollständiger oder zumindest annähernd vollständiger Belegung des Raumes, erhöht sich die CO_2-Konzentration stetig. Die durch die Nutzer ausgeatmeten CO_2-Emmissionen können durch die Lüftungsanlage nur zum Teil wieder abgeführt werden. Die CO_2-Spitzenwerte belaufen sich im typischen Tagesverlauf allerdings auf maximal 1510 ppm und nur ca. zur Hälfte der Unterrichtszeit wird eine CO_2-Konzentration von mehr als 1000 ppm gemessen.

Während der Pausen, also wenn alle oder ein Großteil der Nutzer den Raum verlassen, sinkt die CO_2-Konzentration in Folge der geringen Belegung wieder. Das betrifft allerdings nur die kurzen Pausen, in denen die VSR nicht geschlossen werden. Es wird angenommen, dass noch die Lehrkraft oder einzelne Kinder im Klassenraum verbleiben und so die Präsenzerfassung aktiv bleibt. Während der eingestellten Nachlaufzeit, in der keine Nutzer mehr im Raum sind, aber die VSR noch geöffnet sind, sinkt die CO_2-Konzentration im Vorfeld des Lüftungsstopps ab. Der Effekt der Lüftungsanlage auf die Luftqualität hinsichtlich der CO_2-Emmissionen ist klar erkennbar und wird als positiv eingestuft.

Zur besseren Übersicht und detaillierten Auswertung der raumspezifischen Messpunkte aus Raum 1.08, ist in Abbildung 7-71 nur der Tagesverlauf des Donnerstags dargestellt. Diese Abbildung dient dazu, die Zusammenhänge von VSR-Stellung, CO_2-Konzentration (orange dargestellt) und relativer Luftfeuchte (hellblau) einfacher abzulesen. Die Messwertverläufe sind über die gesamte KW 50 als ähnlich einzustufen.

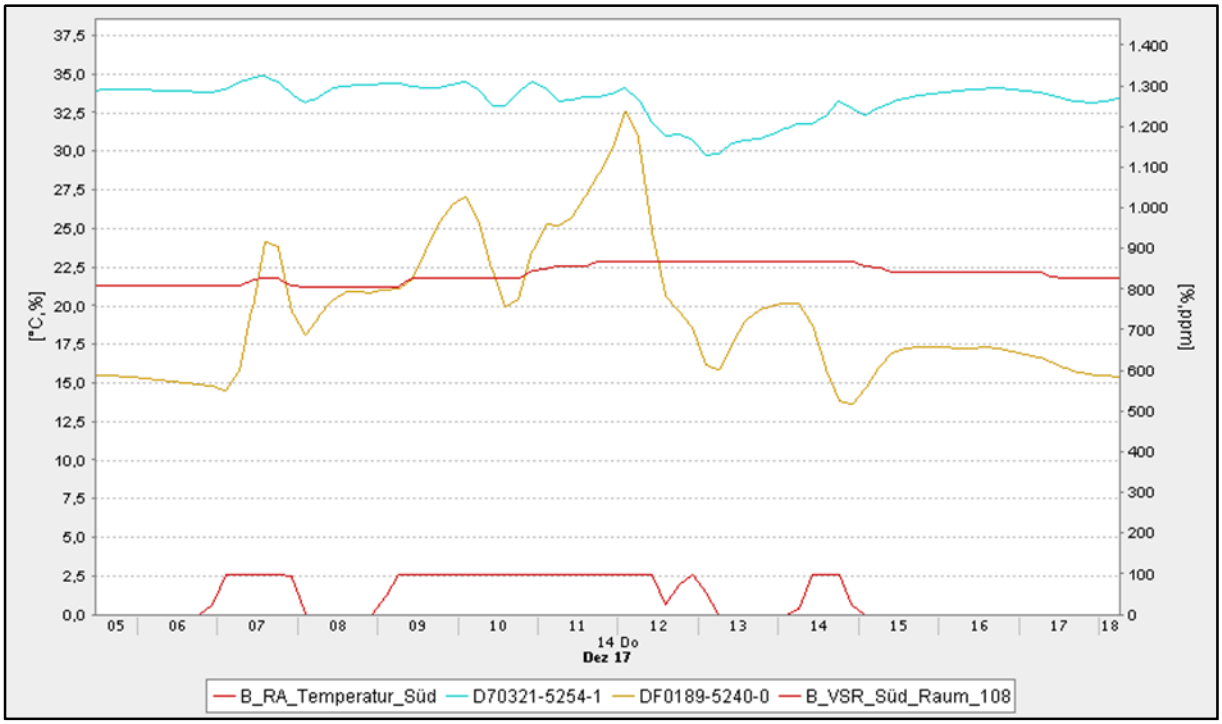

Abbildung 7-71: Raumtemperatur, Feuchte, CO_2-Konzentraltion und VSR im Raum 1.08 [17]

Nördliche Klassenräume und Horträume

In den nördlichen Klassenräumen und Horträumen sind analoge Zusammenhänge erkennbar. Der Betriebsfall "Betriebszeit" findet wie geplant statt.

Zulufttemperaturregelung

Der Sollwert der Zulufttemperatur ist im Laufe der KW 50 zweimal durch den Hausmeister angepasst worden. Abbildung 7-72 zeigt, dass die Anlage der Änderung unmittelbar folgt. Eine Überhöhung von ca. 0,5 … 1,0 K über dem Sollwert ist gemessen worden.

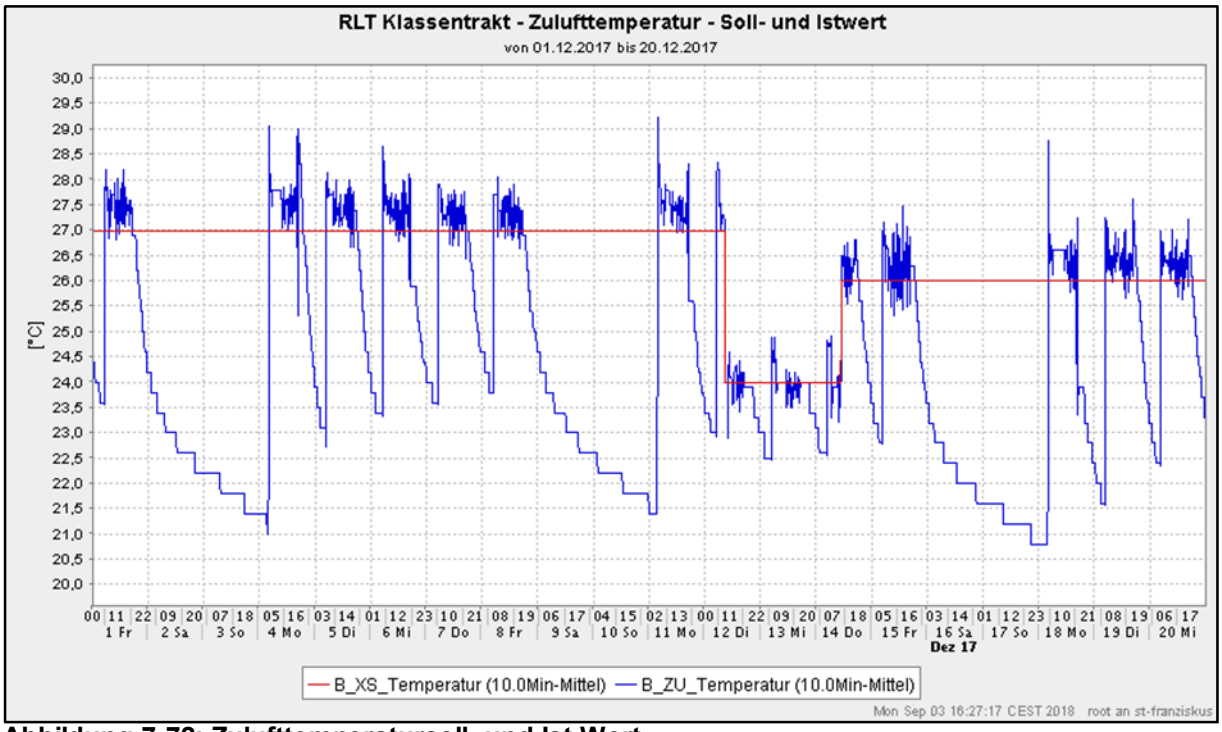

Abbildung 7-72: Zulufttemperatursoll- und Ist-Wert

7.8.3 Betriebsfall "Freie Nachtauskühlung"

Die Funktionsweise des Betriebsfalls „Freie Nachtauskühlung“ für den Klassentrakt wird nicht ausgewertet, sie war im Untersuchungszeitraum, in dem alle Messdaten verfügbar sind (Sommer 2017), deaktiviert. Es wird auf die Erkenntnisse des Kapitels 5.4.4 verwiesen.

Es ist allerdings festzuhalten: im Rahmen des "Aufheizvorgangs" wurde die Anlage im Sommer zu identischen Zeiten wie im Winter gestartet, d. h. montags um 4 Uhr, sonst um 5 Uhr. Die Heizfunktion selbst wurde im Sommer nicht ausgelöst, weil die Referenzräume warm genug waren. Allerdings hat das die Folge, dass – weil der (winterliche) Raumtemperatursollwert erreicht war – die Volumenströme nicht angesteuert wurden. Die Kühlung betraf somit nur die Räume, in denen reine Zeitprogramme gefahren werden.

7.9 Regelungsfunktionen der Zentralanlage Verwaltungstrakt

Basis der nachfolgenden Ausführungen sind die Regelungsbeschreibungen der Anlage nach Kapitel 5.2 sowie 5.4. Es wird in die drei Phasen: "Aufheizvorgang", "Betriebszeit" und "Freie Nachtauskühlung" unterschieden. Anhand von Messwerten wird geprüft, ob der Betrieb bestimmungsgemäß läuft. Auf eine erneute Wiedergabe aller Sollwerte wird verzichtet, lediglich bei Abweichungen von den Sollwerten gibt es Hinweise. Die Ausarbeitung erfolgte im Rahmen einer Masterarbeit zur Lüftungsoptimierung [17].

7.9.1 Betriebsfall "Aufheizvorgang"

Aula

Im Gegensatz zu den Klassen- und Horträumen und dem Flur des Verwaltungstraktes kann der Beginn und das Ende des Aufheizvorgangs in der Aula nicht über die Stellung der VSR ermittelt werden, da in der Aula keine Messung der VSR-Zustände vorgesehen ist. Die Auswertung erfolgt somit zum Großteil über den Zuluft- und Abluftvolumenstrom der Gesamtanlage, da Be- und Entlüftung der Aula einen großen Teil der gesamten Volumenströme ausmachen.

Der Betriebsstart ist am Montag, dem 11.12.2017 um 4 Uhr mit einer Raumtemperatur der Aula von 19,4°C. Ab 04:01 Uhr wird die erste Änderung der Raumtemperatur registriert. In den ersten Minuten schwanken die Messwerte und sinken bis 04:08 Uhr auf 17,7°C. Nach den frühmorgendlichen Schwankungen steigt die Raumlufttemperatur im weiteren Betriebsverlauf stetig an. Dies entspricht der Sollfunktion, entsprechend der Funktionsbeschreibung.

Es ist bei der Auswertung festzustellen, dass der Messpunkt bzw. der Messfühler der Raumtemperatur sehr träge ist und deshalb die tatsächlichen Messwerte zeitversetzt liefert. Im Gegensatz zu dem MENERGA-Messpunkt "A_RA_Temperatur_Aula" wird über den GEDES-Messpunkt "DF0321-3660-6" ein deutlich schnellerer Anstieg der Raumtemperatur registriert.

In Abbildung 7-73 sind die Messwerte dieser beiden Messpunkte über den Wochenverlauf der KW 50 abgebildet. Die beiden Darstellungslinien zeigen deutlich, dass der GEDES-Fühler Temperaturänderungen deutlich früher wahrnimmt. Der ungleiche Verlauf führt zu der Annahme, dass die Reglung nicht richtig funktionieren kann, wenn der regelungsrelevante Messpunkt teilweise erst Stunden später Veränderungen registriert.

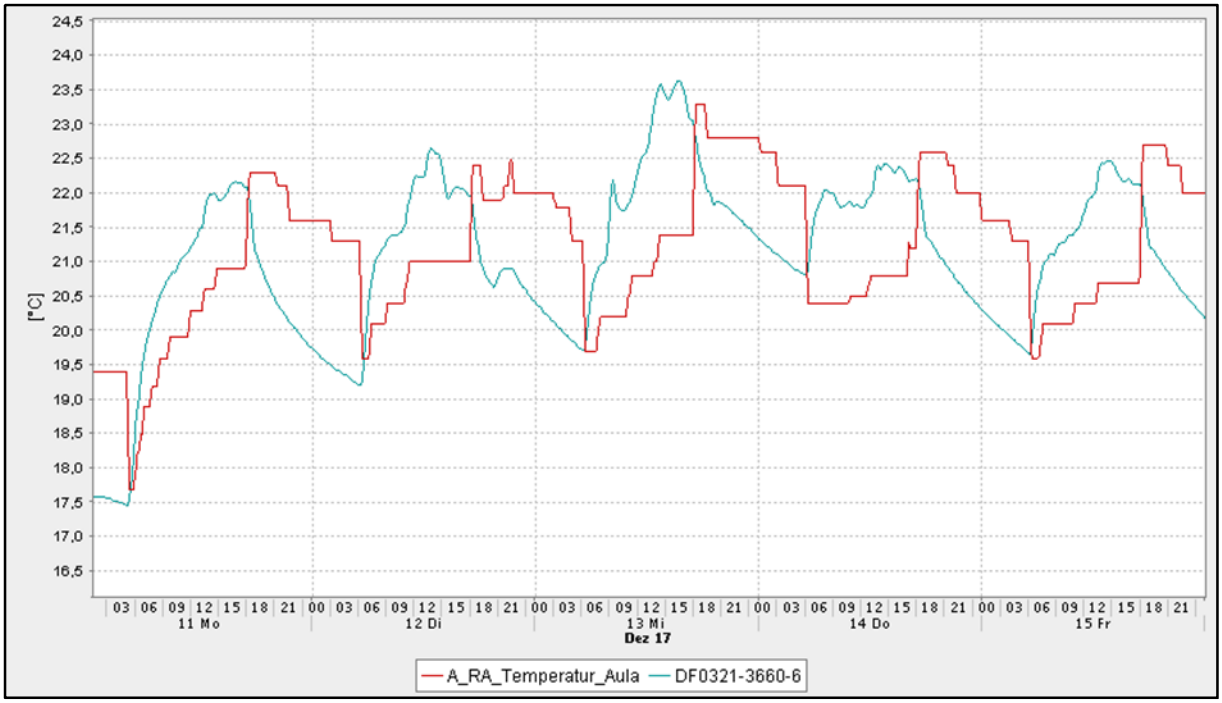

Abbildung 7-73: Raumtemperatur (MENERGA und GEDES) Aula in der KW50 [15]

Flur

Die zeitlichen Abläufe des Aufheizvorgangs im Flur entsprechen denen der Aula. Für den Betrieb der Lüftungsanlage des BTA gibt es nur ein gemeinsames Wochenprofil für den gesamten Gebäudeteil.

Die Funktionsauswertung des Aufheizvorgangs in der Aula bestätigt die Annahme, dass die in der Planung bestimmten Betriebszeiten nicht verwendet werden. Dementsprechend startet der Aufheizvorgang im Flur am Montag der KW 50 um 4 Uhr und an den anderen Wochentag um 5 Uhr.

7.9.2 Betriebsfall "Betriebszeit"

Die für den Klassentrakt in Kapitel 7.8 als korrekt funktionierend eingestufte Zulufttemperaturregelung kann auch hier bestätigt werden. Auf eine grafische Auswertung der Messwerte wird verzichtet.

Aula

Ist in der Aula der Sollwert für die Raumtemperatur erreicht und ist die CO_2-Konzentration eingehalten, sollen die VSR auf $\dot{V}_{min}$ schließen. Wie in Kapitel 7.9.1 ermittelt, läuft der Aufheizvorgang an allen Wochentagen der KW 50 ohne Unterbrechung bis in die Nutzungsphase hinein. Dies wird darauf zurückgeführt, dass der Aufheiztemperatursollwert von 22°C nicht erreicht wird. Regelungstechnisch beginnt die "Betriebszeit" in der KW jeweils erst mittags mit Erreichen der Sollraumtemperatur.

Der Raumtemperatursollwert kann allein aufgrund der Anlage auch nicht erreicht werden, sondern nur durch solare oder innere Fremdwärme. Praktisch ist es nicht möglich, eine Raumtemperatur von 25°C zu erreichen, wenn die Zulufttemperatur selbst auch nur 25°C beträgt und wie hier signifikante Transmissionswärmeverluste auftreten. Es ergibt sich im Betrieb dadurch dauerhaft ein deutlich zu großer Ventilatorvolumenstrom, der nicht durch die für das Monitoring-Team oder den Hausmeister am Controller freigeschalteten Regelungseingaben geändert werden kann. Das Problem muss im Zusammenhang mit einer zweiten Anlagenoptimierung durch eine Umprogrammierung (MENERGA-Techniker) beseitigt werden. Sie ist für das Winterhalbjahr 2018/19 geplant.

Der CO_2-Wert ist wegen der großen Volumenströme jeweils sehr niedrig.

Flur

Der Flur arbeitet gemäß den vorgesehenen Regelungsbedingungen.

7.9.3 Betriebsfall "Freie Nachtauskühlung"

Zur Auswertung dienen die Daten der KW 35 des Jahres 2017, da alle Werte vollständig vorliegen, die Witterung passend ist (Außentemperatur über 12°C) und keine Ferien sind.

Aula

Der Raumtemperatur-Sollwert ist an allen fünf Wochentagen auf 21°C eingestellt. Die Raumtemperatur liegt in den Morgenstunden deutlich mehr als 1 K oberhalb dieser Betriebsgrenze, wodurch die Bedingungen für die freie Nachtauskühlung erfüllt sind. Die Außentemperatur liegt 3 K unter dem Sollraumtemperaturwert, siehe Abbildung 7-74.

Die zentrale Lüftungsanlage des BTA startet die Zu- und Abluftventilatoren an allen Wochentagen der KW 35 zeitgleich um 3 Uhr. Die Ventilatoren erhöhen die Volumenströme in den ersten Betriebsminuten stetig, bis diese gegen 3:30 Uhr den Auslegungsvolumenstrom erreicht haben. Die CO_2-Konzentration der Raumluft in der Aula, aufgezeichnet durch den Messpunkt „A_CO2-Sensor“ sinkt an allen fünf Wochentagen ab kurz nach 3 Uhr. Da die CO_2-Konzentration nur bei aktiver Lüftung reduziert werden kann, bestätigt dies die Annahme, dass der Betriebsfall "Freie Nachtauskühlung" an allen Wochentagen aktiviert wird.

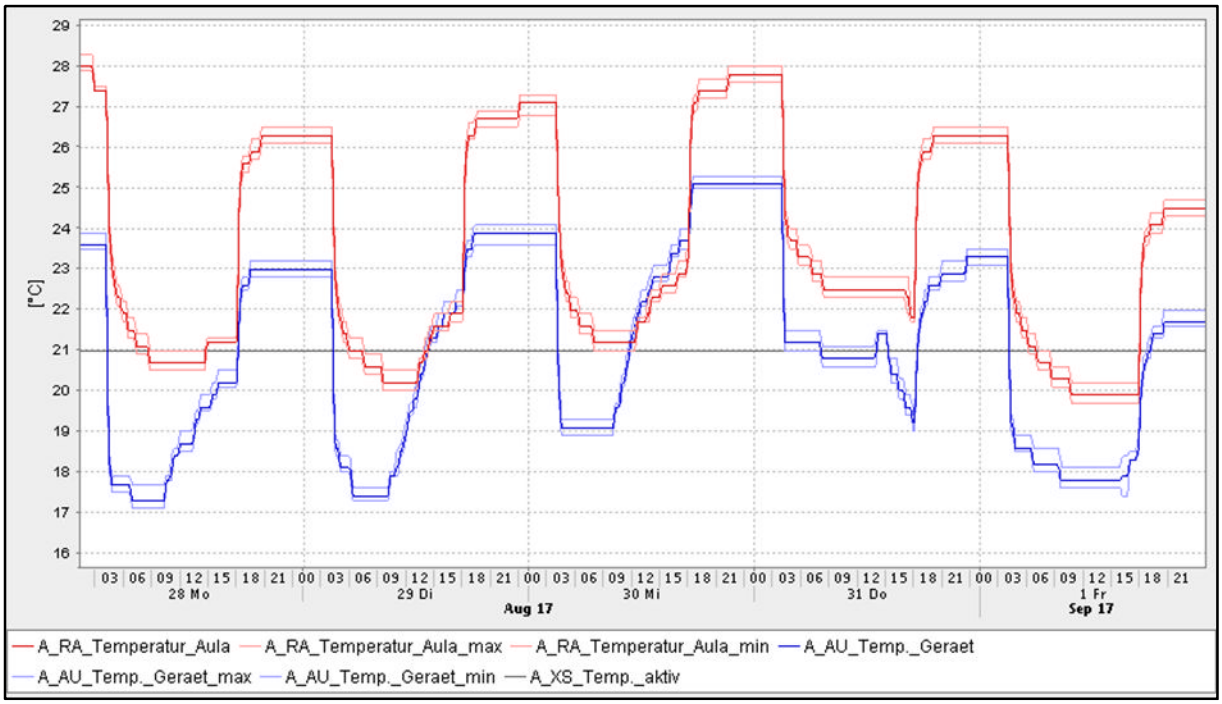

Abbildung 7-74: Temperaturbedingungen in der Aula in der KW35 [15]

Nachdem bekannt ist, dass die Nachtauskühlung in der KW 35 aktiv ist, soll bestimmt werden, wie stark der erwünschte Auskühlungseffekt ausfällt. In den ersten 30 Minuten nach Betriebsstart, zwischen 3 Uhr und 3:30 Uhr, sinkt die Raumtemperatur mit rund 4 K am stärksten. Im weiteren morgendlichen Verlauf sinkt sie weiter, bis gegen 8 Uhr ein konstantes Niveau erreicht ist, siehe Abbildung 7-75.

Die Raumtemperatur kann über den Tagesverlauf, trotz der dauerhaften Belüftung mit $\dot{V}_{max}$, nahezu konstant gehalten werden. Erst nach Ende der Betriebszeit, und somit bei Stillstand der Lüftungsanlage, steigt die Temperatur wieder merklich an. Der Auskühlungseffekt wird als sehr positiv eingestuft. Die Soll-Funktion ist damit hinreichend erfüllt.

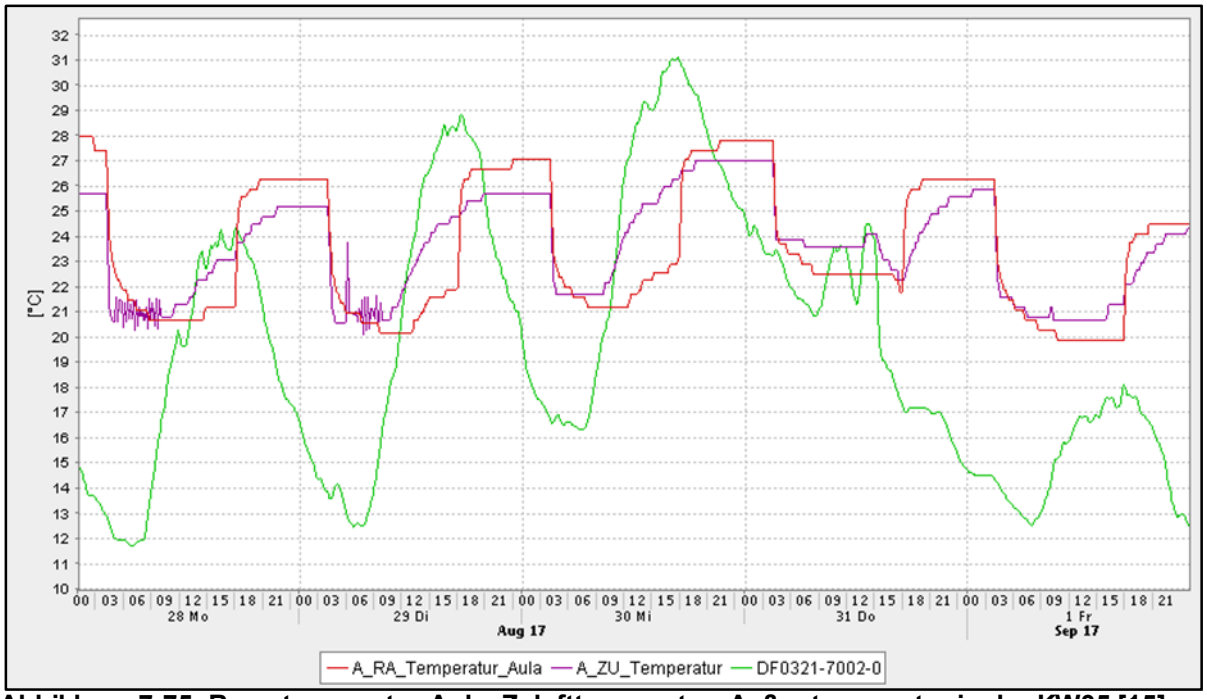

Abbildung 7-75: Raumtemperatur Aula, Zulufttemperatur, Außentemperatur in der KW35 [15]

Flur

Für die Nachtkühlung im Flur wird ebenfalls die Ablufttemperatur in der Aula herangezogen. Sie läuft parallel zur Aula und den anderen Räumen.

Die Messwerte zeigen, dass die Raumtemperatur im Flur infolge der Nachtauskühlung gesenkt wird. Es wird eine Abkühlung der Raumluft um 2 … 3 K innerhalb der ersten drei Betriebsstunden erzielt. Im weiteren Tagesverlauf kann die Temperatur im Flur bei dauerhafter Be- und Entlüftung nahezu konstant gehalten werden. Zum Ende der Betriebszeit steigen die Werte infolge steigender Außentemperaturen wieder an. Der Auskühlungseffekt ist deutlich erkennbar, fällt aber schwächer aus als in der Aula, siehe Abbildung 7-76

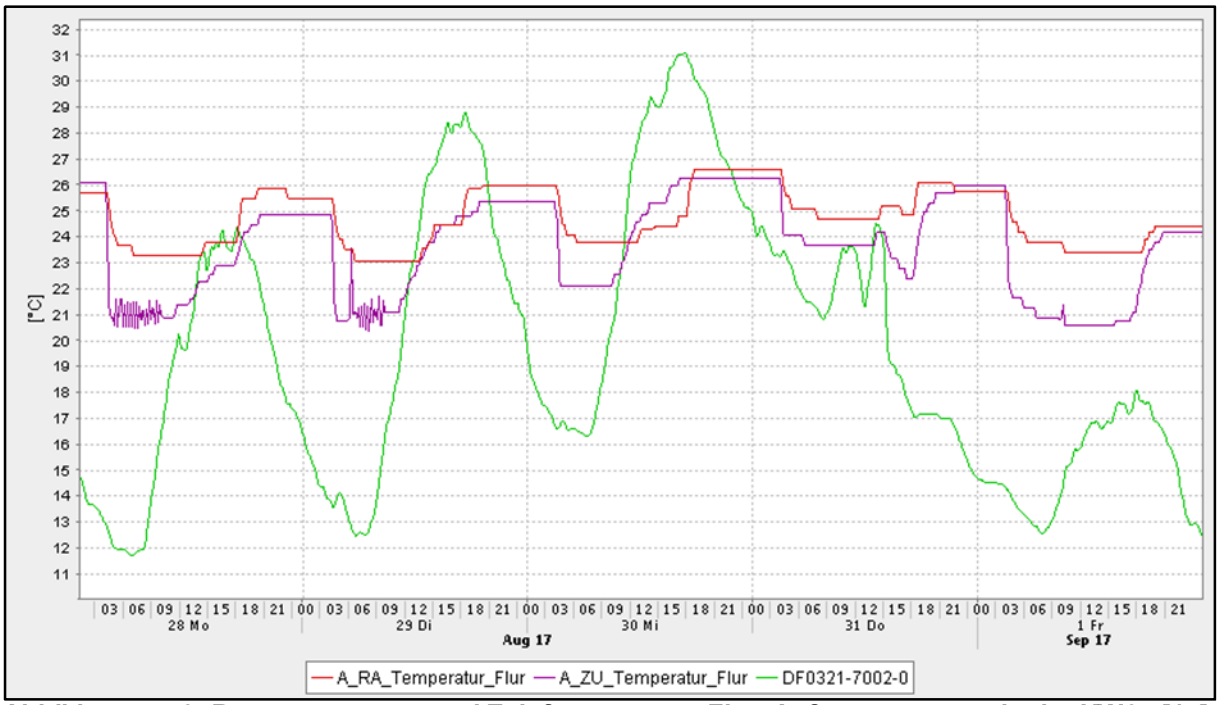

Abbildung 7-76: Raumtemperatur und Zulufttemperatur Flur, Außentemperatur in der KW35 [15]

7.10 Wärmerückgewinnung

Zur Bewertung der Funktion der Wärmerückgewinnung werden nachfolgend die je Anlage 4 Temperaturen am Wärmeübertrager als Carpetplot dargestellt: Außenluft (nach der Erdwärmenutzung), Zuluft (vor dem Heizregister), Abluft und Fortluft.

In jedem Fall ist zu beachten, dass die Luft in der Anlage außerhalb der Betriebszeit steht und der Temperaturfühler zuerst die Gerätetemperatur, dann die Raumtemperatur annimmt. Die Bereiche mit Volumenstrom sind zu erkennen und grob markiert.

RLT Klassentrakt

Abbildung 7-77 und Abbildung 7-78 zeigen die Temperaturen im Zuluftweg des RLT-Zentralgerätes. Die zuströmende Luft weist im Winter Temperaturen von 5 … 10°C auf, selten kälter. Die Erwärmung liefert 13 … 18°C warme Zuluft. Im Hochsommer strömt die Luft mit Temperaturen von 20 … 25°C aus dem Erdreichwärmeübertrager zu, selten höher. Es erfolgt keine weitere Temperaturerhöhung in der Wärmerückgewinnung.

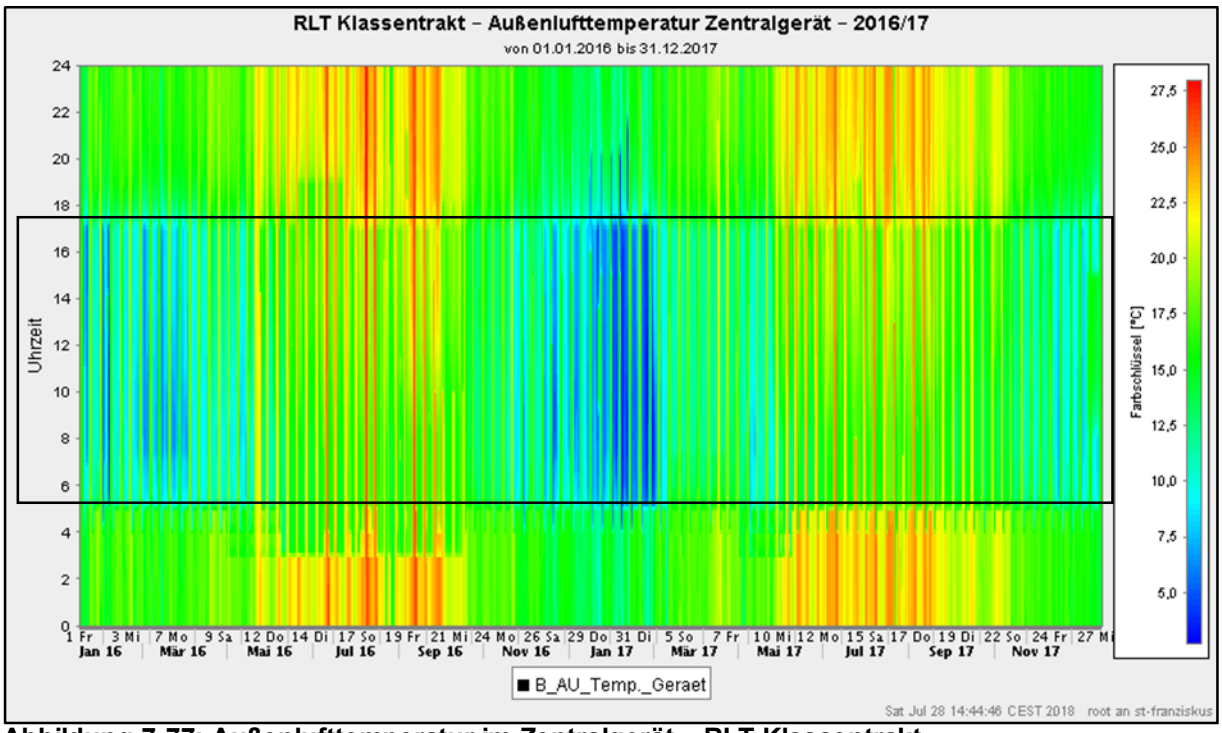

Abbildung 7-77: Außenlufttemperatur im Zentralgerät – RLT Klassentrakt

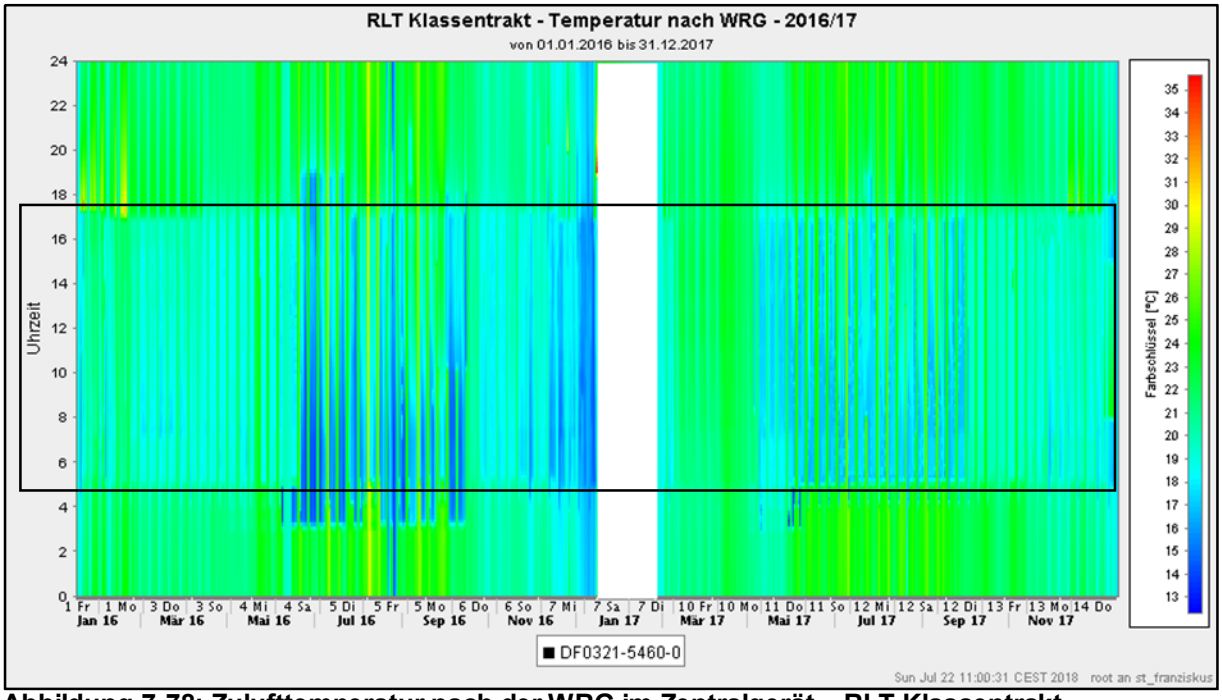

Abbildung 7-78: Zulufttemperatur nach der WRG im Zentralgerät – RLT Klassentrakt

Abbildung 7-79 und Abbildung 7-80 zeigen die Temperaturen im Abluftweg des Zentralgerätes. Im Winter wird der 18 … 22°C warmen Abluft Wärme entzogen und sie mit 9 … 13°C an die Umgebung zurückgeführt. Im Hochsommer strömt 25 … 30°C warme Raumluft ohne Wärmerückgewinnung durch die Anlage.

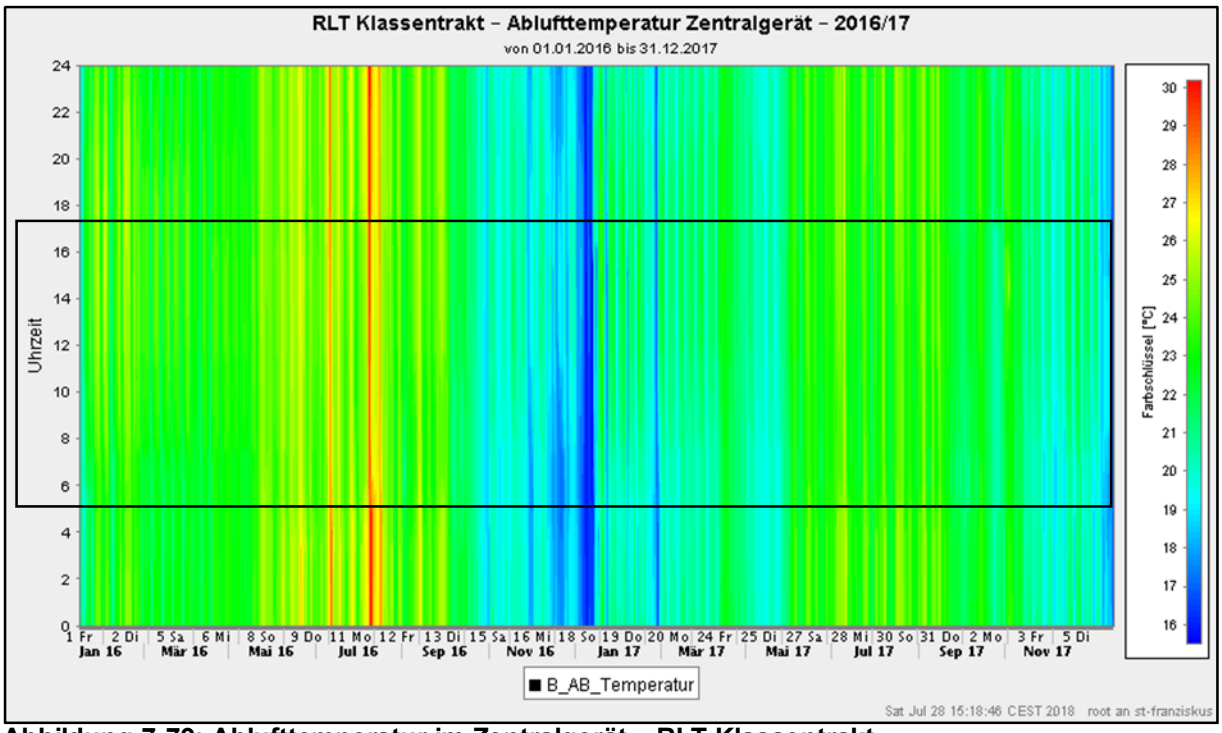

Abbildung 7-79: Ablufttemperatur im Zentralgerät – RLT Klassentrakt

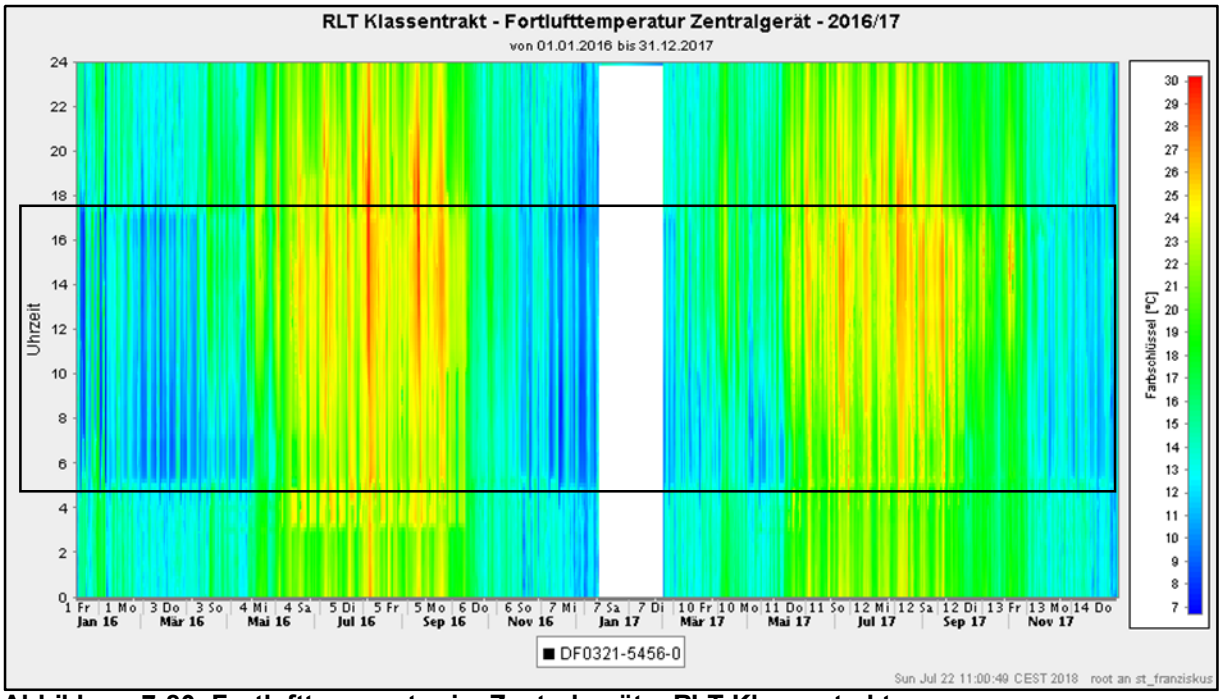

Abbildung 7-80: Fortlufttemperatur im Zentralgerät – RLT Klassentrakt

RLT Verwaltungstrakt

Abbildung 7-81 und Abbildung 7-82 zeigen die Temperaturen im Zuluftweg des Zentralgerätes. Die Zahlenwerte sind fast identisch der RLT-Anlage "Klassentrakt". Die zuströmende Luft weist im Winter Temperaturen von 5 … 10°C auf, selten kälter. Die Erwärmung liefert 15 … 19°C warme Zuluft. Im Hochsommer strömt die Luft mit Temperaturen von 20 … 25°C aus dem Erdreichwärmeübertrager zu, selten höher. Es erfolgt keine weitere Temperaturerhöhung in der Wärmerückgewinnung, aber auch keine Abkühlung.

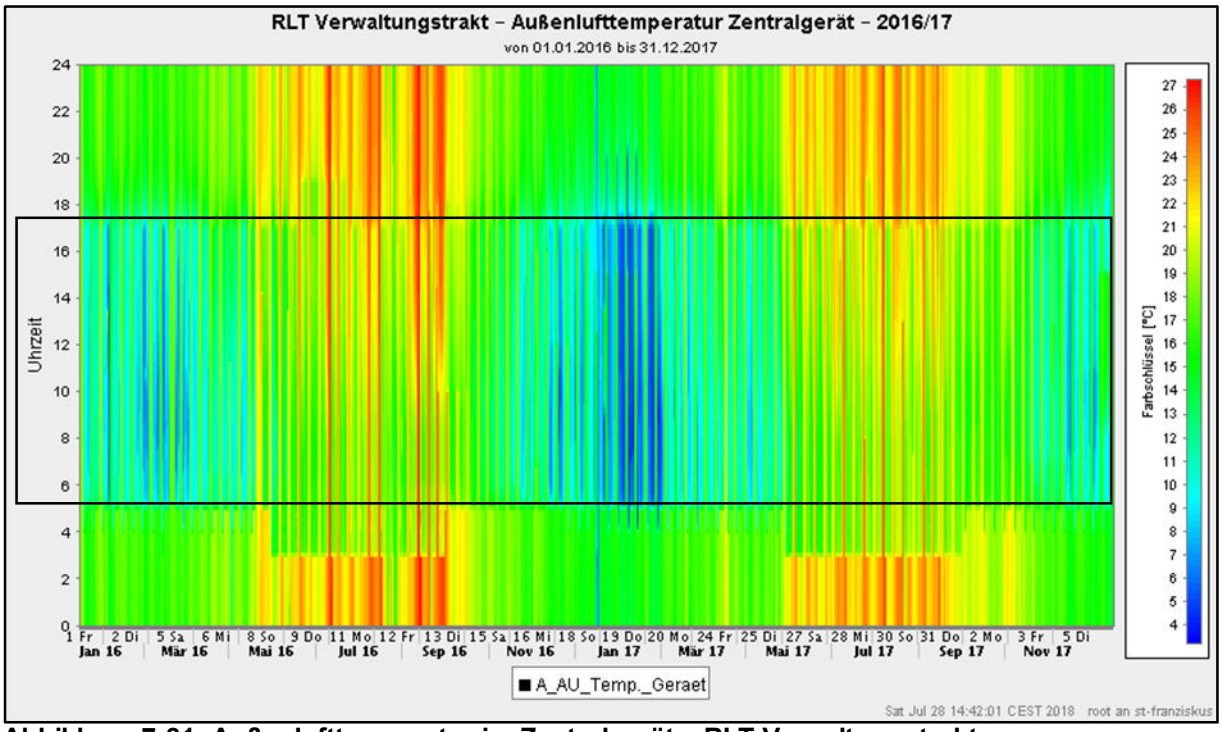

Abbildung 7-81: Außenlufttemperatur im Zentralgerät – RLT Verwaltungstrakt

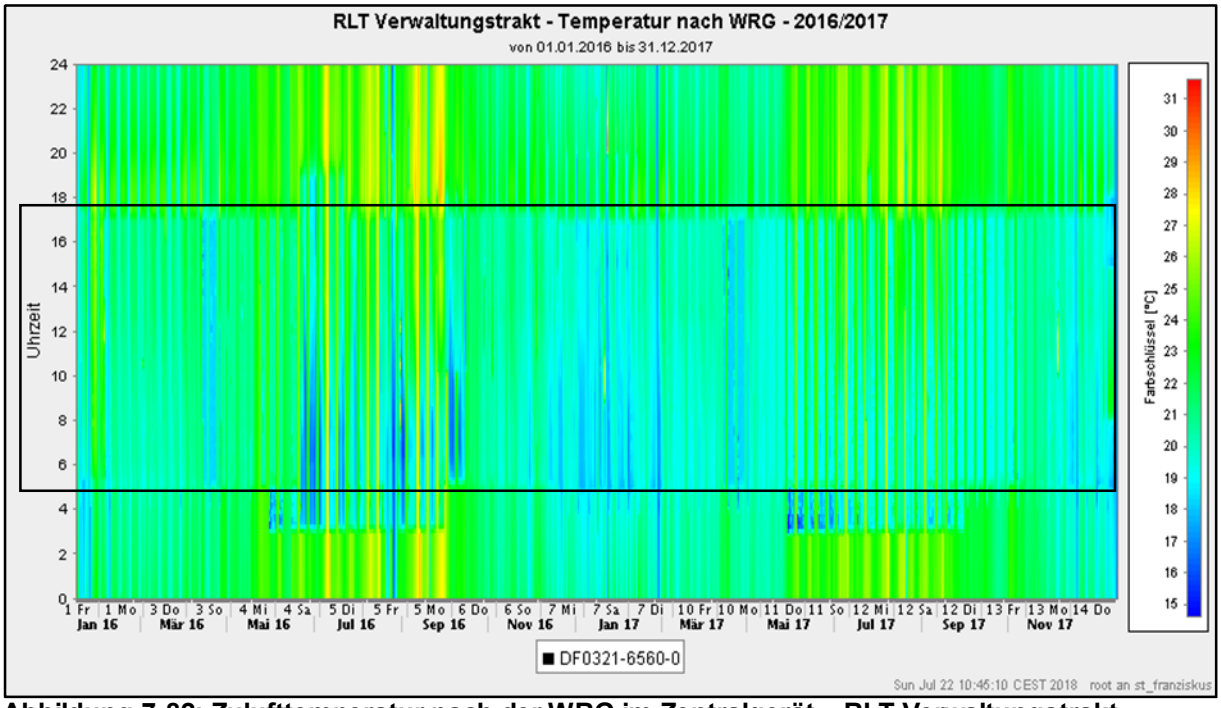

Abbildung 7-82: Zulufttemperatur nach der WRG im Zentralgerät – RLT Verwaltungstrakt

Abbildung 7-83 und Abbildung 7-84 zeigen die Temperaturen im Abluftweg des Zentralgerätes. Im Winter wird der 20 … 23°C warmen Abluft Wärme entzogen und sie mit 7 … 12°C an die Umgebung zurückgeführt. Im Hochsommer strömt 25 … 30°C warme Raumluft ohne Wärmerückgewinnung durch die Anlage.

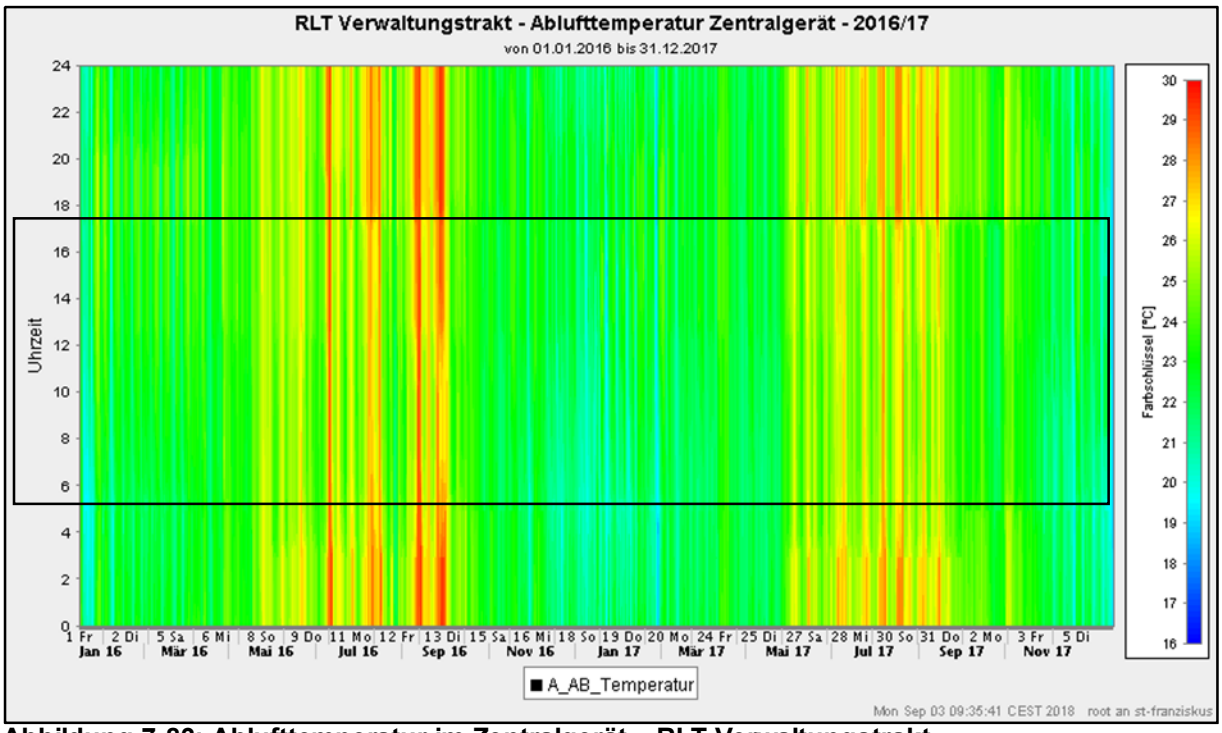

Abbildung 7-83: Ablufttemperatur im Zentralgerät – RLT Verwaltungstrakt

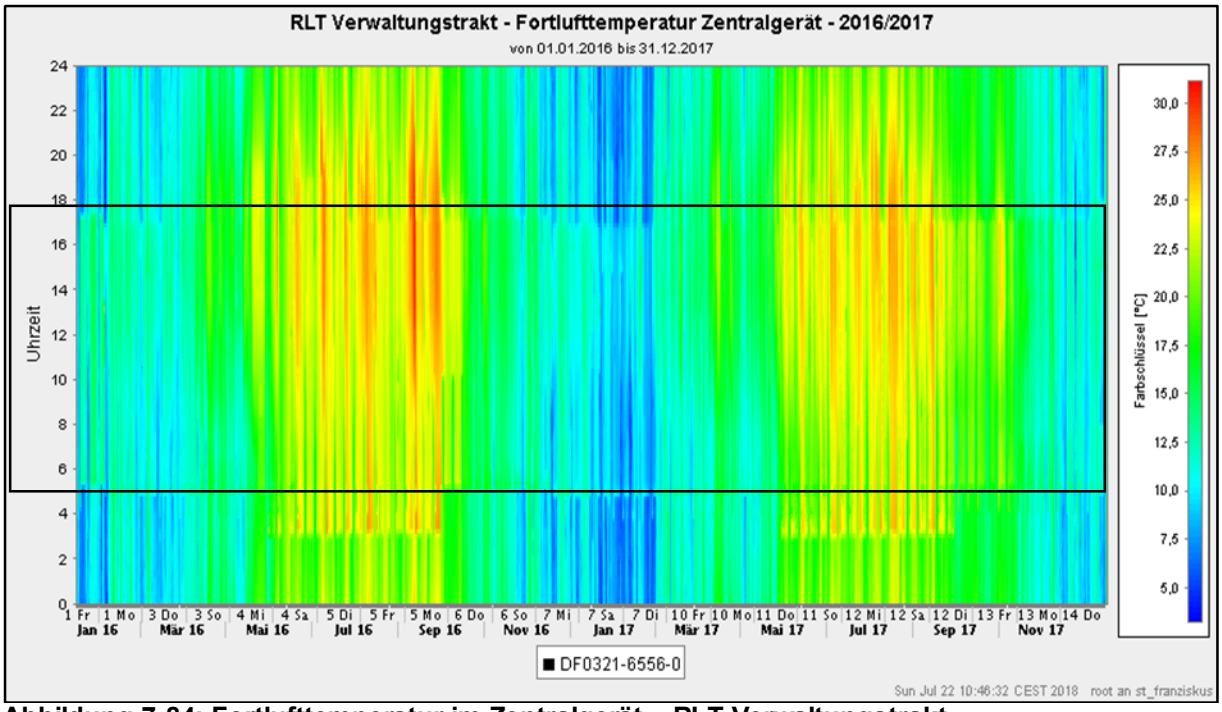

Abbildung 7-84: Fortlufttemperatur im Zentralgerät – RLT Verwaltungstrakt

7.11 Schlechtpunktregelung

An der Schlechtpunktregelung des Zuluftventilators sind als Sollwerte eingestellt: Δp = 67 Pa für die RLT-Anlage "Klassentrakt" sowie Δp = 120 Pa für die RLT-Anlage "Verwaltungstrakt". In beiden Anlagen funktioniert die Regelung, siehe Abbildung 7-85 und Abbildung 7-86.

Der Abluftvolumenstrom wird nach Zuluftvolumenstrom geregelt; über den dabei aufrechtzuhaltenden Differenzdruck gibt es keine Aufzeichnungen.

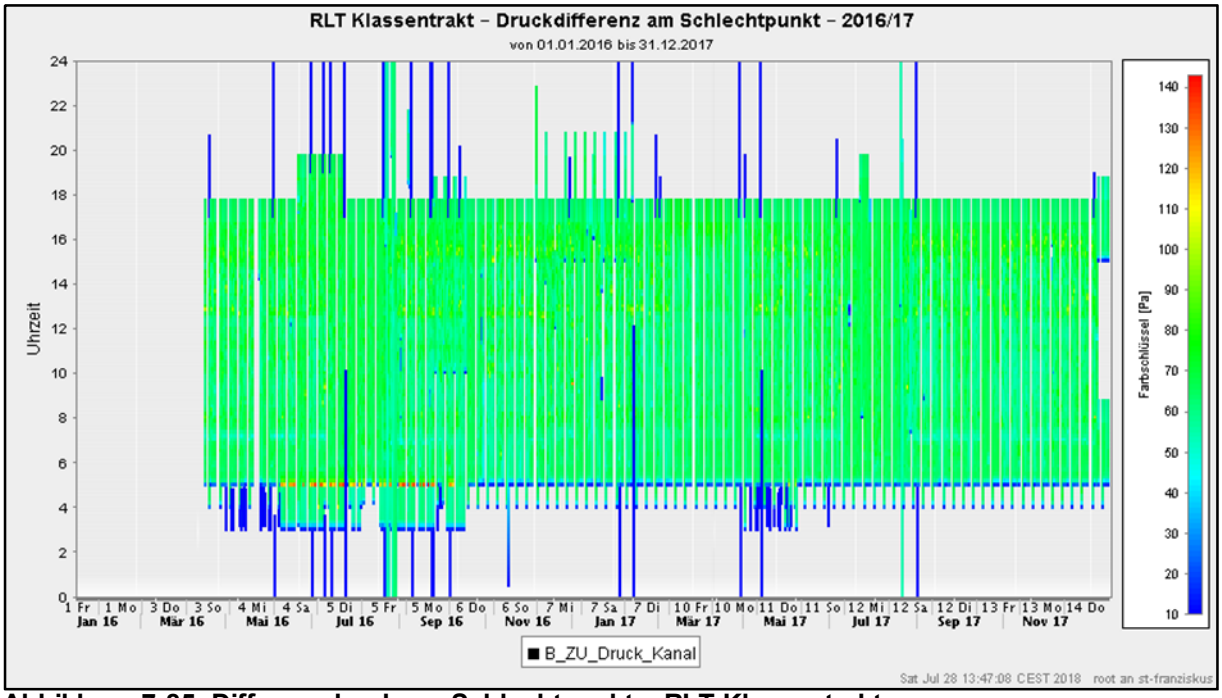

Abbildung 7-85: Differenzdruck am Schlechtpunkt – RLT Klassentrakt

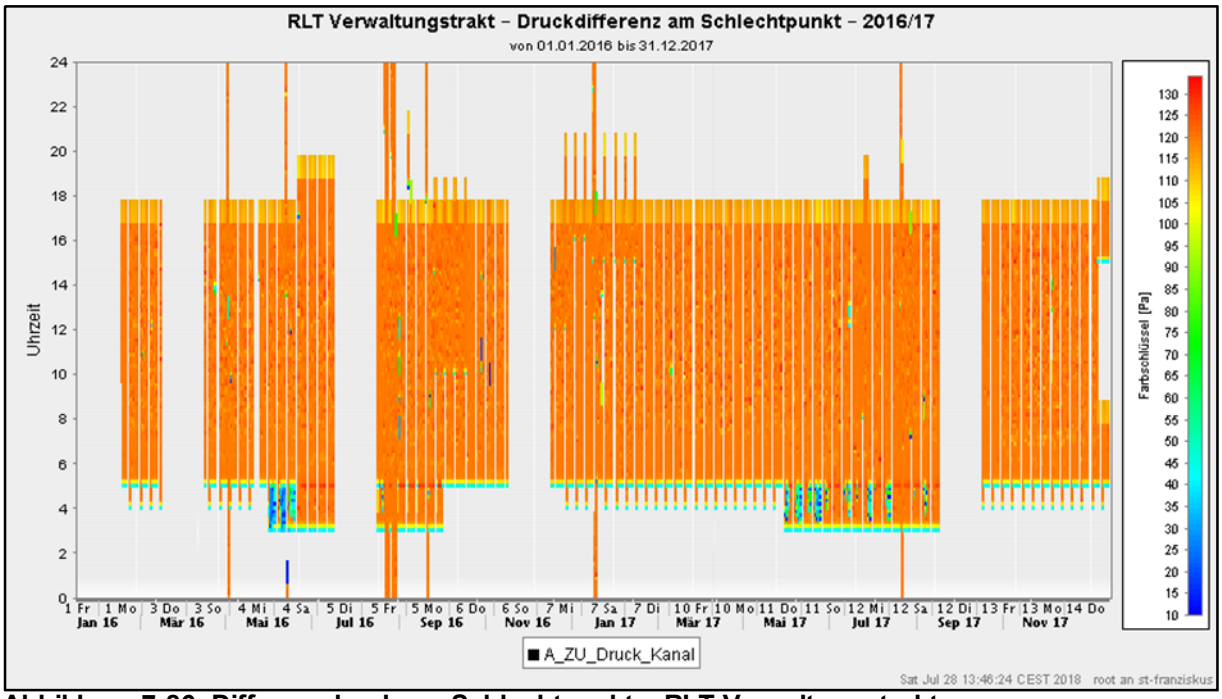

Abbildung 7-86: Differenzdruck am Schlechtpunkt – RLT Verwaltungstrakt

7.12 Druckverluste der Filter

Die Druckverluste aller Filter sowie die Grenzwerte bis zu einer Fehlermeldung werden im Monitoring permanent erfasst. Insbesondere aus den Verschmutzungsdaten des Abluftfilters lässt sich schlussfolgern, welches Wartungsintervall sinnvoll ist – siehe Kapitel 7.12.3.

7.12.1 RLT Klassentrakt

Abbildung 7-87 zeigt das Typenschild des Abluftfilters. Trotz Markierung, dass der Filterenddruckverlust 200 Pa beträgt, ist in der Regelung dauerhaft (ohne Änderung über die Jahre) ein Wert von 300 Pa eingestellt. Abbildung 7-88 zeigt den Differenzdruckverlauf.

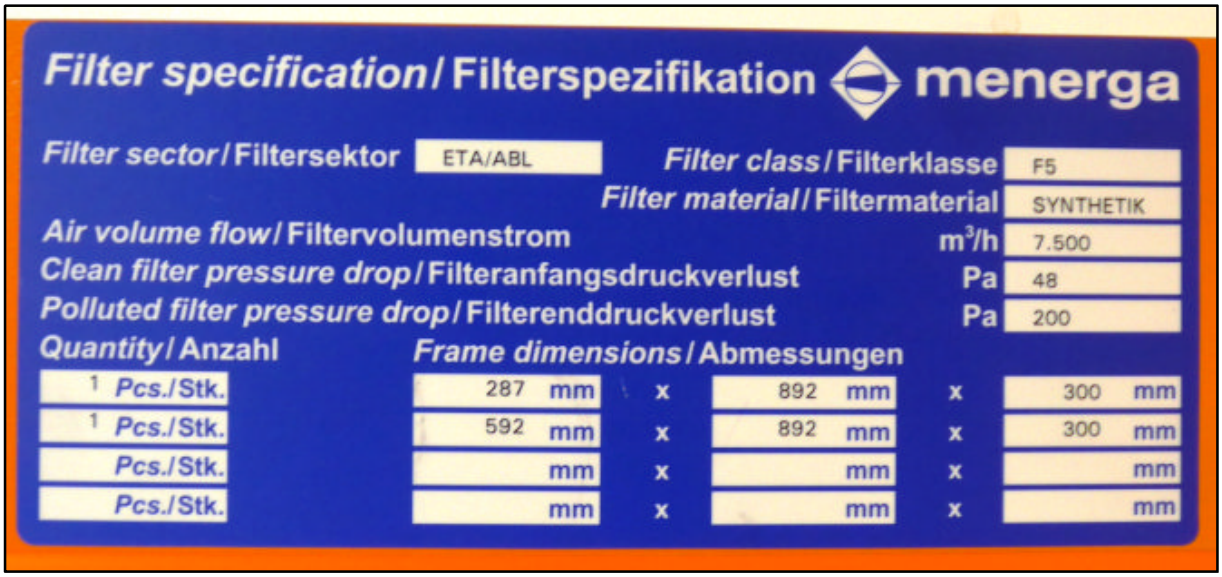

Abbildung 7-87: Typenschild Abluftfilter – RLT Klassentrakt

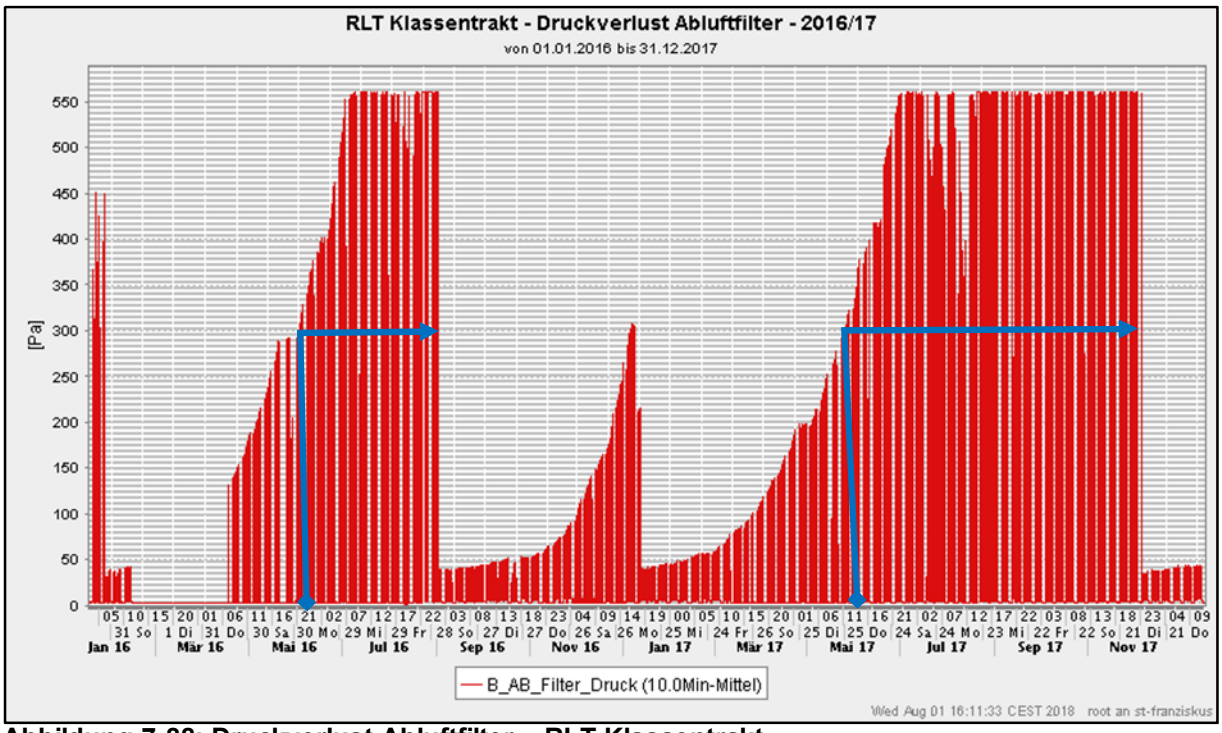

Abbildung 7-88: Druckverlust Abluftfilter – RLT Klassentrakt

Der erste Filterwechsel im dargestellten Zeitraum wurde per Fehlermeldung Anfang Juni 2016 gefordert. Der neue Filter 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.

Der Außenluftfilter soll laut Typenschild an der Anlage bis maximal 200 Pa betrieben werden, siehe Abbildung 7-89. Das entspricht auch der Einstellung im Webserver/Controller. Es gab keine Überschreitung. Der Filter wurde in dem dargestellten Zeitraum 2 Mal getauscht (jeweils zusammen mit dem Abluftfilter): zum September 2016 und im November 2017, siehe Abbildung 7-90.

Abbildung 7-89: Typenschild Außenluftfilter – RLT Klassentrakt

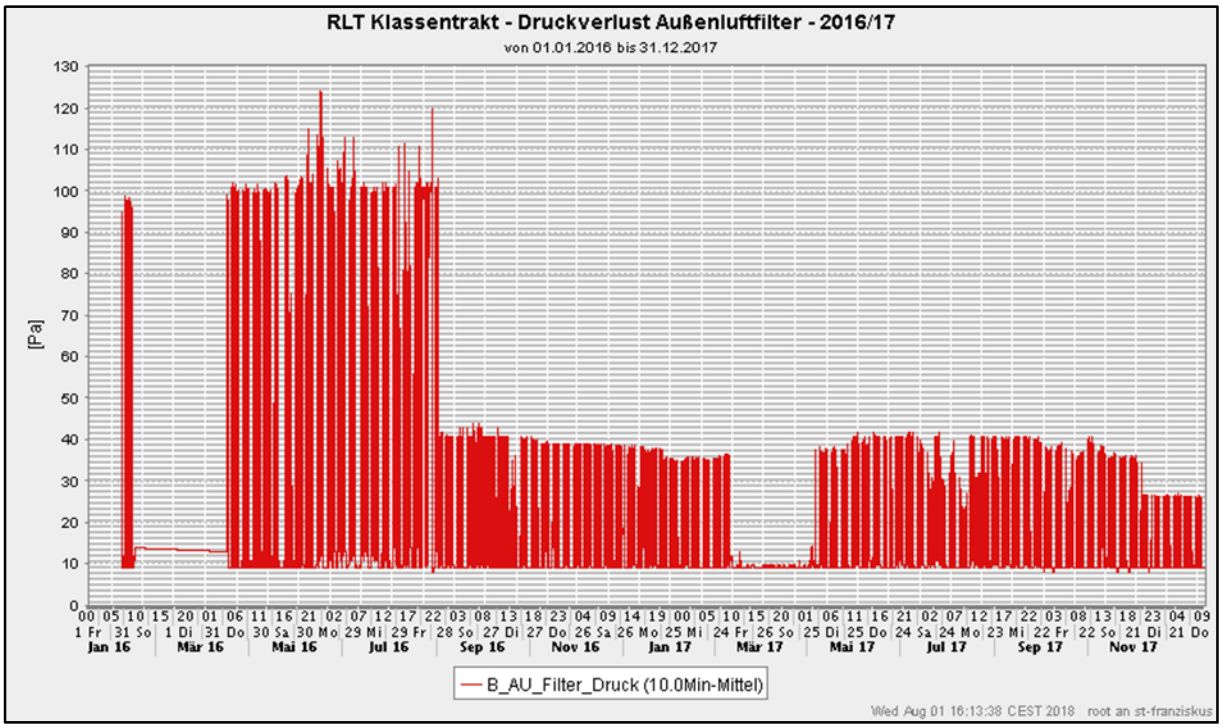

Abbildung 7-90: Druckverlust Außenluftfilter – RLT Klassentrakt

Der Zuluftfilter ist ein Feinfilter F7. Er hat bereits beim Einbau einen höheren Druckverlust, siehe Abbildung 7-91. Er soll bei 200 Pa getauscht werden. Das ist auch als Fehlermeldungsgrenze in der Anlage programmiert. Dieser Wert wurde nicht erreicht. Der Filter wurde vermutlich zeitgleich mit dem Außenluftfilter jährlich etwa 1 x getauscht. Allerdings lassen die Messwerte keine genaue Nachverfolgung zu, siehe Abbildung 7-92.

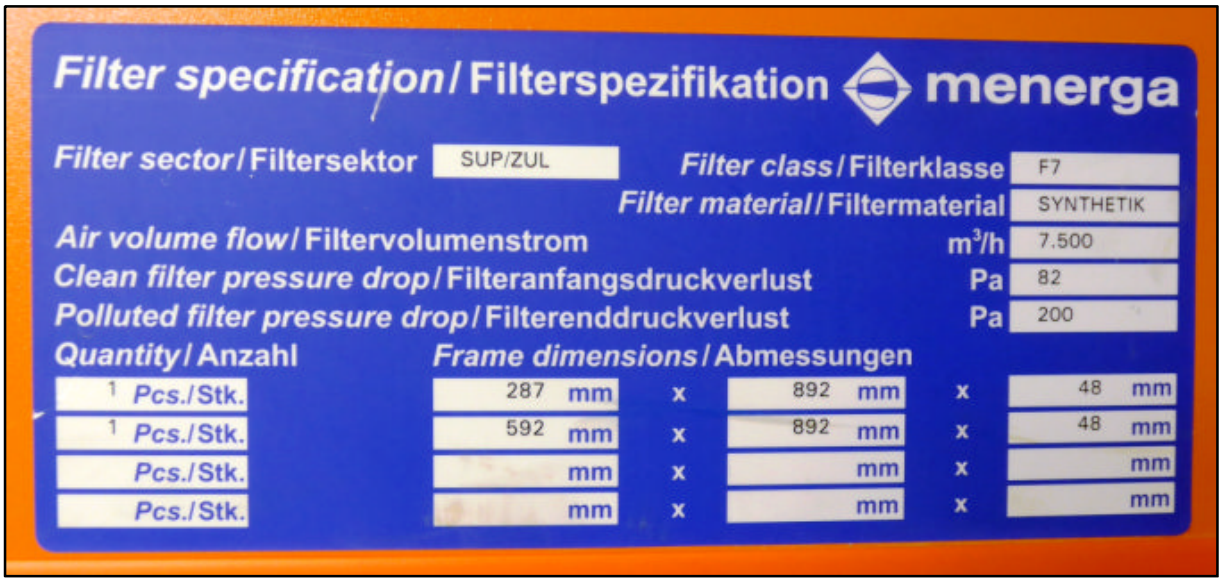

Abbildung 7-91: Typenschild Zuluftfilter – RLT Klassentrakt

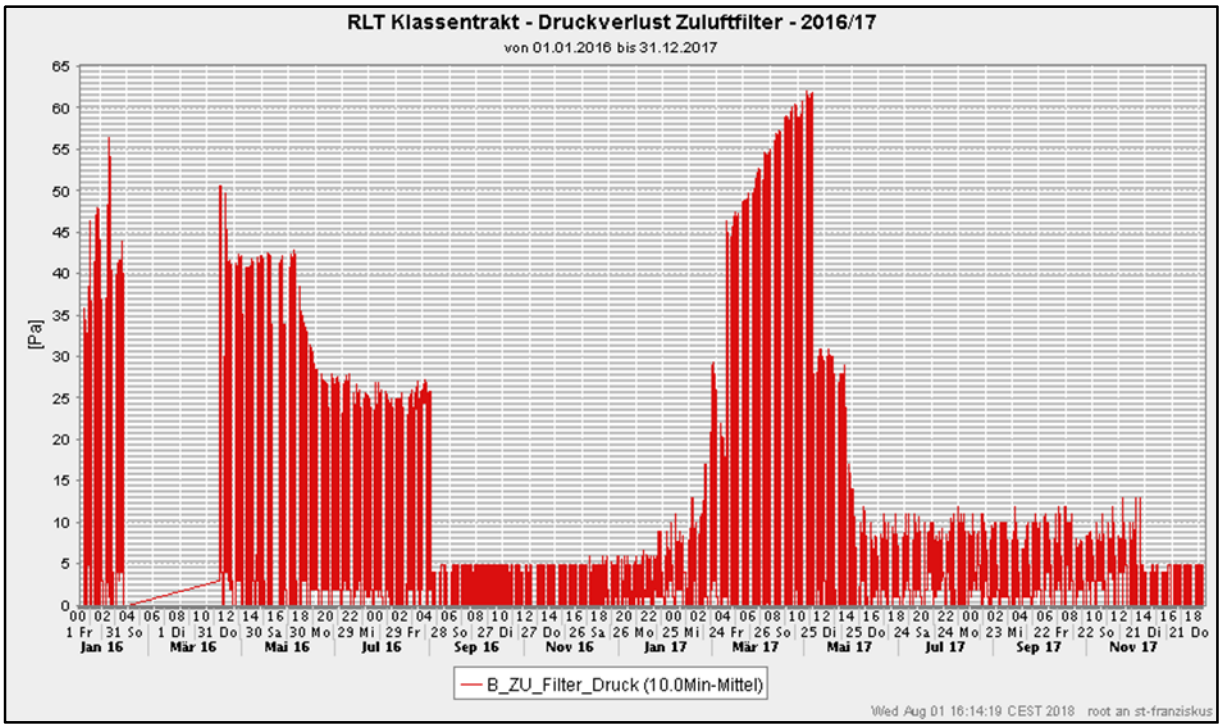

Abbildung 7-92: Druckverlust Zuluftfilter – RLT Klassentrakt

7.12.2 RLT Verwaltungstrakt

Abbildung 7-93 zeigt das Typenschild des Abluftfilters. Trotz Markierung, dass der Filterenddruckverlust 200 Pa beträgt, ist in der Regelung dauerhaft (ohne Änderung über die Jahre) ein Wert von 250 Pa eingestellt. Abbildung 7-94 zeigt den Differenzdruckverlauf.

Der erste Filterwechsel im dargestellten Zeitraum erfolgte ohne Fehlermeldung – parallel zu dem Tausch in der RLT-Anlage "Klassentrakt" zum September 2016. Das war eigentlich zu früh, d. h. der Filter hätte noch Aufnahmekapazität gehabt.

Eine erste Fehlermeldung ist vermutlich Ende Mitte/Mai 2017 erfolgt. Etwa 6 Monate später wurde der Filter tatsächlich getauscht, zeitgleich zum Tausch in der anderen Anlage. Etwa 3 Monate nach der ersten Fehlermeldung kam die Anlage an ihre Grenzen und der Druck wurde nicht weiter erhöht – was dazu führt, dass der Volumenstrom nicht mehr seine Planwerte erreicht.

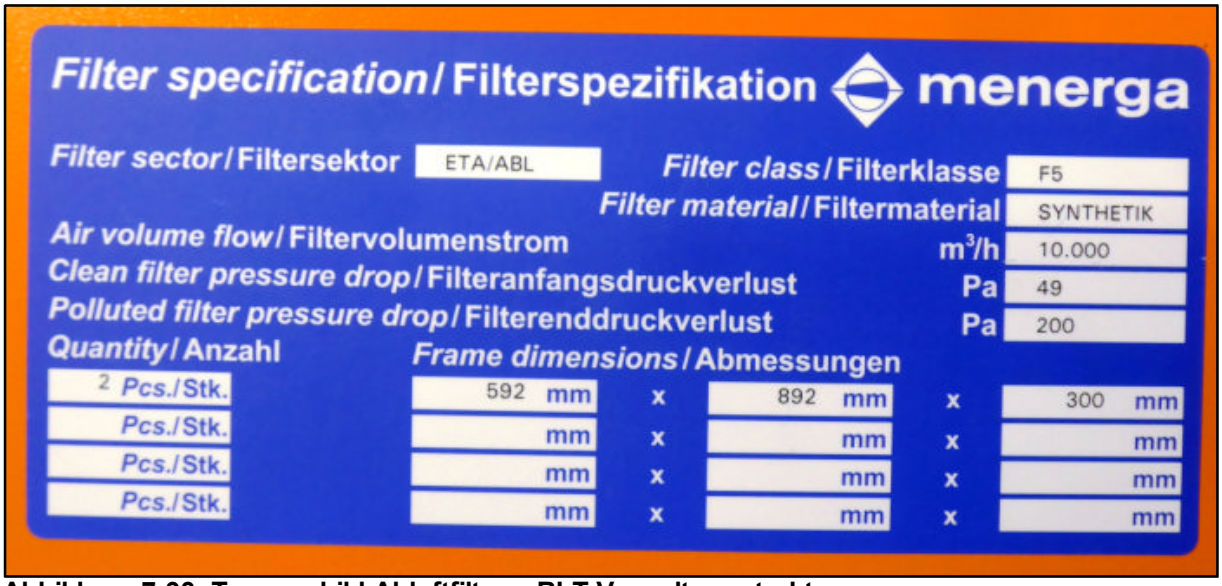

Abbildung 7-93: Typenschild Abluftfilter – RLT Verwaltungstrakt

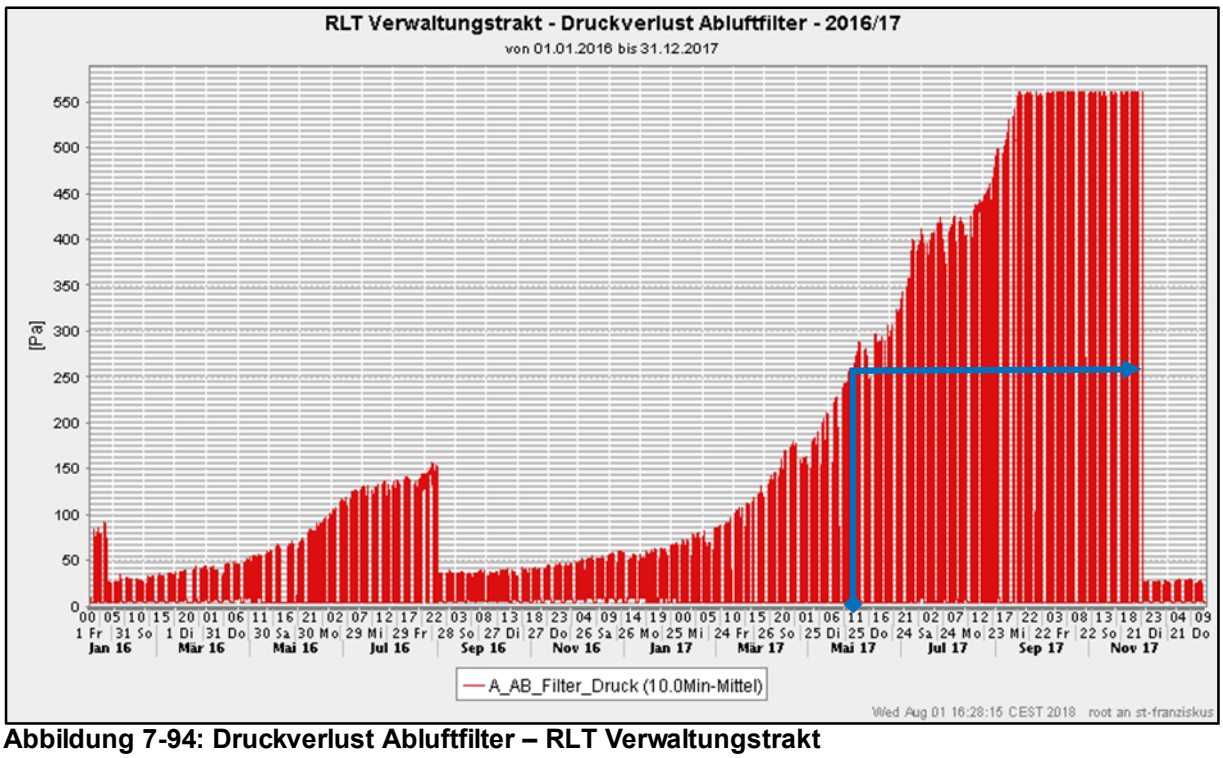

Abbildung 7-94: Druckverlust Abluftfilter – RLT Verwaltungstrakt

Der Außenluftfilter soll laut Typenschild an der Anlage bis maximal 200 Pa betrieben werden, siehe Abbildung 7-95. Das entspricht auch der Einstellung im Webserver/Controller. Es gab keine Überschreitung. Der Filter wurde in dem dargestellten Zeitraum 2 Mal getauscht (jeweils zusammen mit dem Abluftfilter): zum September 2016 und im November 2017, siehe Abbildung 7-96.

Abbildung 7-95: Typenschild Außenluftfilter – RLT Verwaltungstrakt

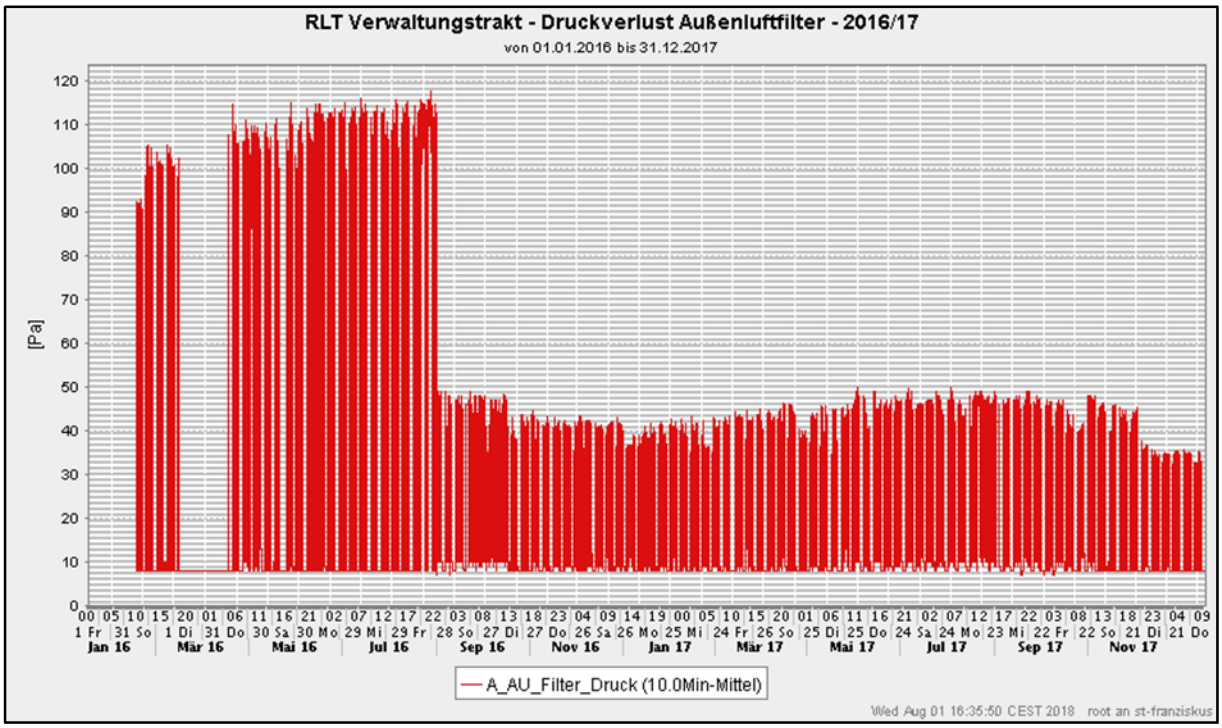

Abbildung 7-96: Druckverlust Außenluftfilter – RLT Verwaltungstrakt

Der Zuluftfilter ist ein Feinfilter F7, siehe Abbildung 7-97. Er soll bei 200 Pa getauscht werden. Das ist auch als Fehlermeldungsgrenze in der Anlage programmiert. Dieser Wert wurde nicht erreicht. Der Filter wurde vermutlich zeitgleich mit dem Außenluftfilter jährlich etwa 1 x getauscht. Allerdings lassen die Messwerte keine genaue Nachverfolgung zu, siehe Abbildung 7-98.

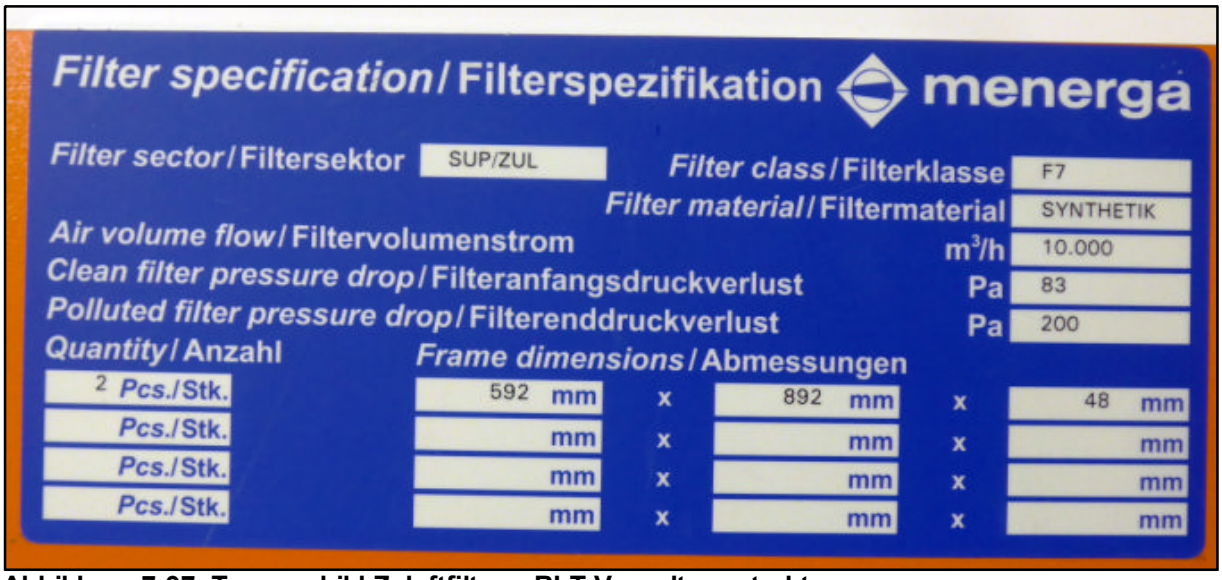

Abbildung 7-97: Typenschild Zuluftfilter – RLT Verwaltungstrakt

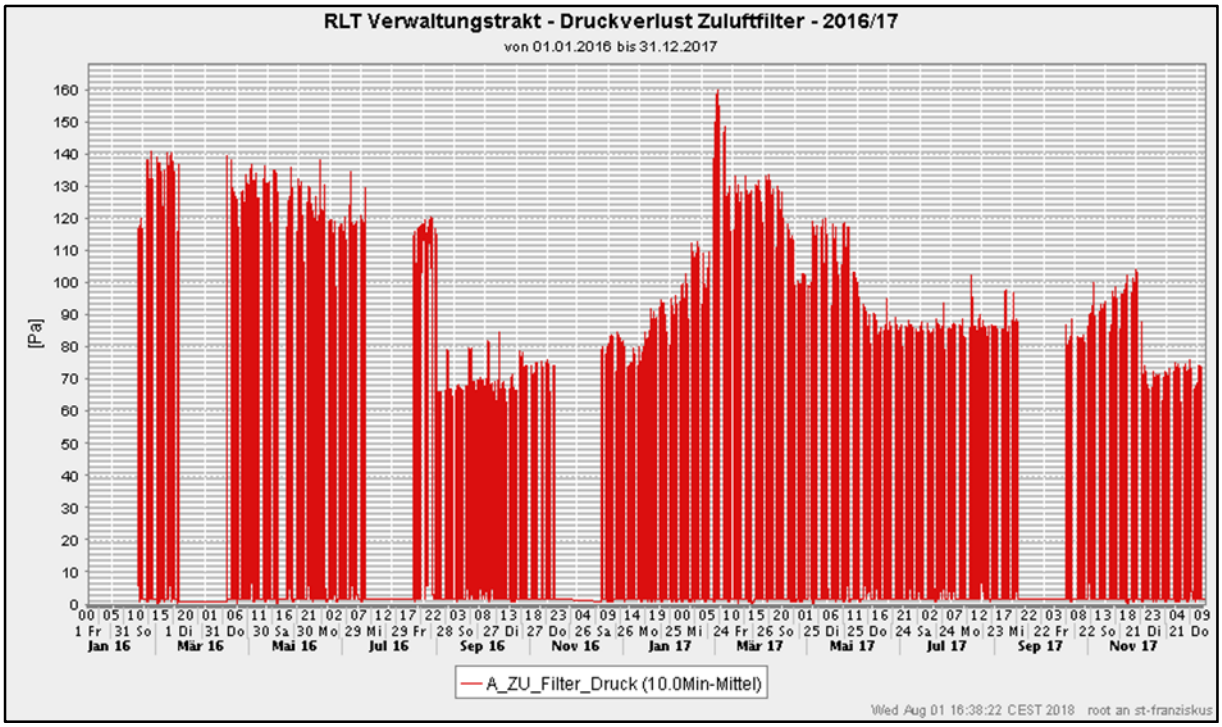

Abbildung 7-98: Druckverlust Zuluftfilter – RLT Verwaltungstrakt

7.12.3 Filterwechsel

Abbildung 7-99 zeigt einen benutzten und einen neuen Abluftfilter aus dem Klassentrakt der St. Franziskus-Grundschule. Dem Neuzustand bei Filtereinbau lässt sich ein gemessener Druckverlust zuordnen.

Abbildung 7-99: Benutzter und neuer Abluftfilter

Im Lauf der Zeit ergibt sich mit der Verschmutzung ein steigender Druckverlust, zusammen mit dem Abluftvolumenstrom eine Steigerung der anteiligen hydraulischen Leistung (die der Ventilator erzeugt) und damit der elektrischen Leistung (die er aufnimmt). Mit der Verschmutzung steigen die anteiligen Stromkosten.

Es kann daher anhand der Kosten eines Filters bestimmt werden, bis zu welchem Grenzdruckverlust ein Filter in der Anlage bleiben darf, ehe er zu mehr Stromkosten führt als der Filter kostet.

Mittlerer Strompreis

Für die St. Franziskus-Grundschule ergibt sich aus den Abrechnungsdaten des Versorgers ein Strompreis von 0,27 €/kWh für das Jahr 2017. Allerdings zeigt die Stromanalyse, dass im Zeitraum von 4 bis 17 Uhr an Wochentagen nur etwa 59 % des Stroms eingekauft wird, siehe Abschlussbericht 10. Die restliche Stromproduktion (41 %) stammt aus der gebäudeeigenen Photovoltaik. Es wird als Preis hierfür 0,12 €/kWh angesetzt, die man erhielte, wenn der Strom nicht vom Ventilator verbraucht würde, sondern eingespeist.

Damit ergibt sich ein gewichteter Strompreis von: 0,21 €/kWh.

Sonstige Randdaten

Abbildung 7-100 zeigt den Sprung des Druckverlustes beim Filterwechsel. Beim Klassentrakt weist der neue Filter einen gemessenen Anfangsdruckverlust von 39 Pa auf, beim Verwaltungstrakt von 35 Pa. Diese Werte sind die minimalen Werte, die unvermeidlich sind.

Darüber hinaus sind folgende Randdaten relevant:

- der Wirkungsgrad des Abluftventilators wird für den Klassentrakt wie gemessen mit 68 % angesetzt, siehe Kapitel 6.5.1, für den Verwaltungstrakt mit 76 %, siehe Kapitel 6.5.2
- die effektive jährliche Betriebszeit liegt im Klassentrakt bei etwa 3300 Stunden, im Verwaltungstrakt bei knapp 3600 Stunden; der Wert im Klassentrakt wird auf ebenfalls 3600 Stunden steigen, weil die Nachtlüftung nun aktiv ist
- ein Abluftfilter für den Klassentakt kostet incl. Versand und Mehrwertsteuer knapp 36 €, im Verwaltungstrakt 43 €
- für den Arbeitsaufwand werden 25 € angesetzt.

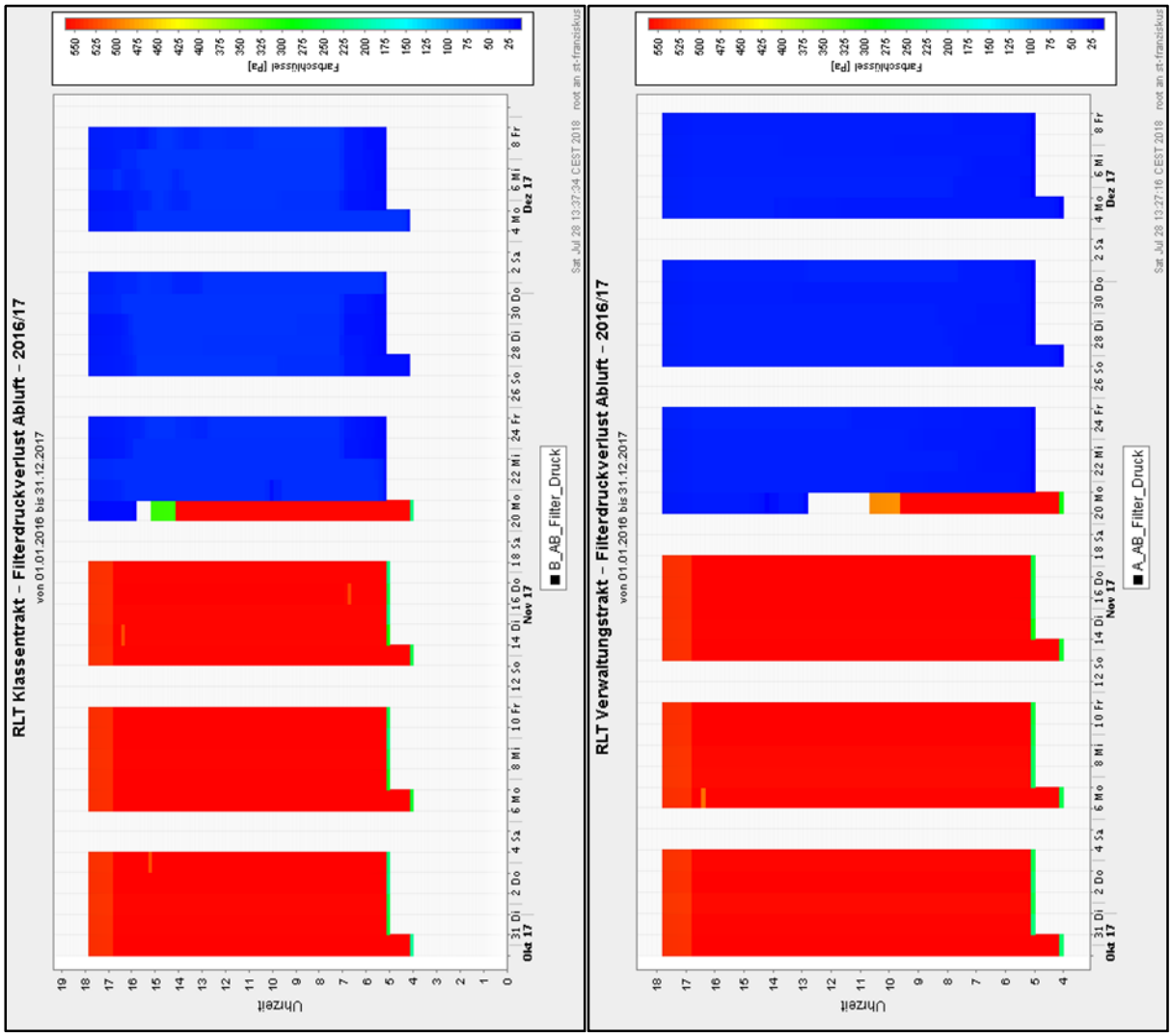

Abbildung 7-100: Filterwechsel 17.11.17

Auswertung und Empfehlung

Abbildung 7-101 bis Abbildung 7-103 sowie Abbildung 7-104 bis Abbildung 7-106 zeigen die Auswertung. Es sind folgende Handlungsweisen sinnvoll:

- Klassentrakt
  - Einprogrammieren von ca. 200 Pa als MENERGA-Fehlergrenze
  - Tausch des Filters ca. alle 1100 Betriebsstunden, d. h. ca. 3 x jährlich
- Verwaltungstrakt
  - Einprogrammieren von ca. 220 Pa als MENERGA-Fehlergrenze
  - Tausch des Filters ca. alle 2500 Betriebsstunden, d. h. ca. 1,5 x jährlich

Drei Mal im Jahr werden in der Klassentraktanlage die Filter gewechselt. Bei jedem zweiten Mal ist der Verwaltungstraktfilter gleichzeitig fällig. Die beiden anderen Filter der jeweiligen Anlage sollten unabhängig von der Auswertung einmal jährlich getauscht werden.

Aus Gründen der Vereinfachung – und ohne weitere Prüfung – wird empfohlen, die anderen Filter jährlich zu tauschen.

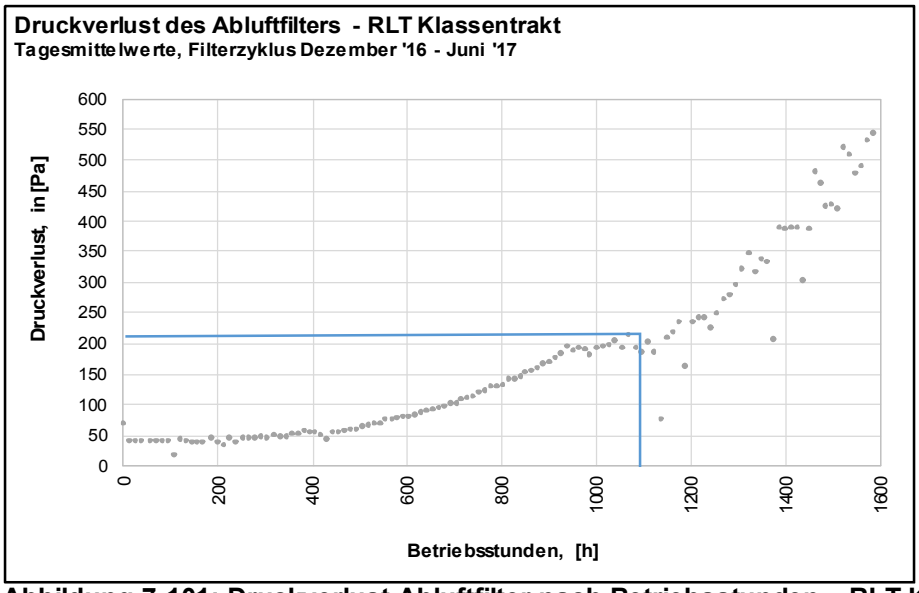

Abbildung 7-101: Druckverlust Abluftfilter nach Betriebsstunden – RLT Klassentrakt

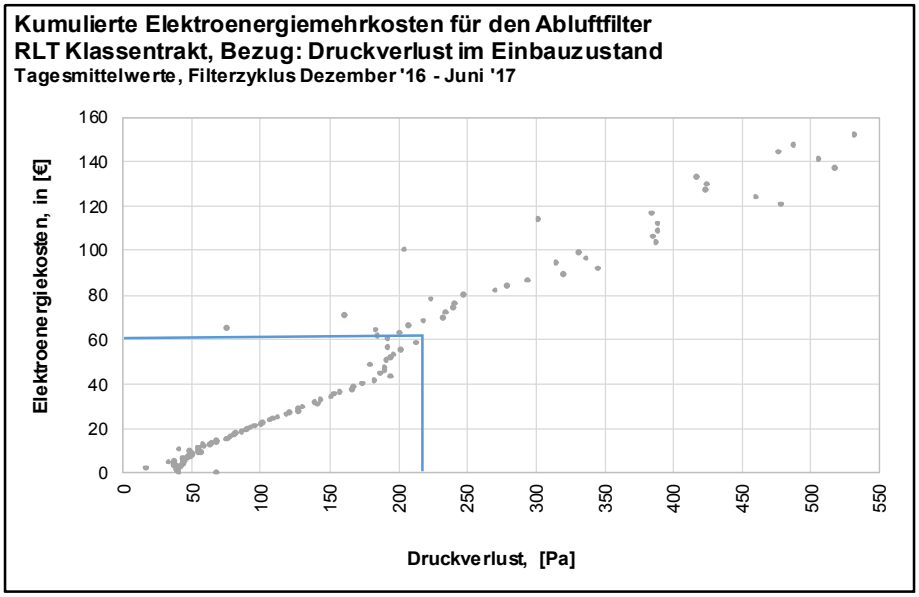

Abbildung 7-102: Elektroenergiekosten nach Druckverlust für Abluftfilter – RLT Klassentrakt

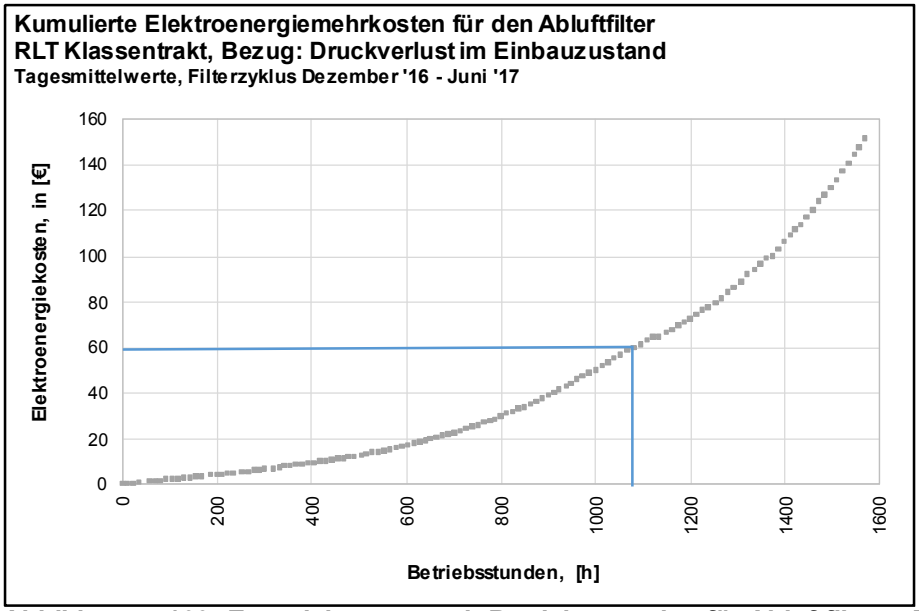

Abbildung 7-103: Energiekosten nach Betriebsstunden für Abluftfilter – RLT Klassentrakt

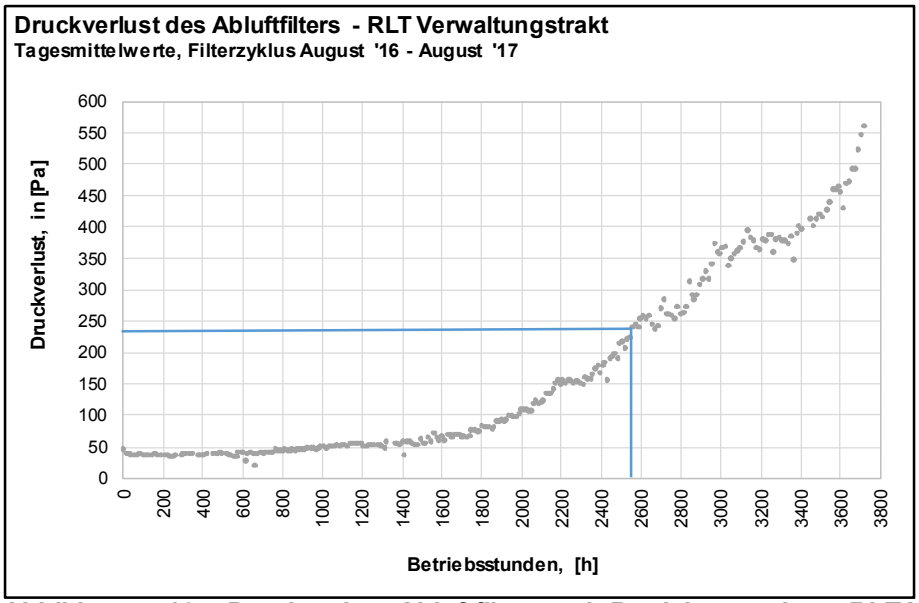

Abbildung 7-104: Druckverlust Abluftfilter nach Betriebsstunden – RLT Verwaltungstrakt

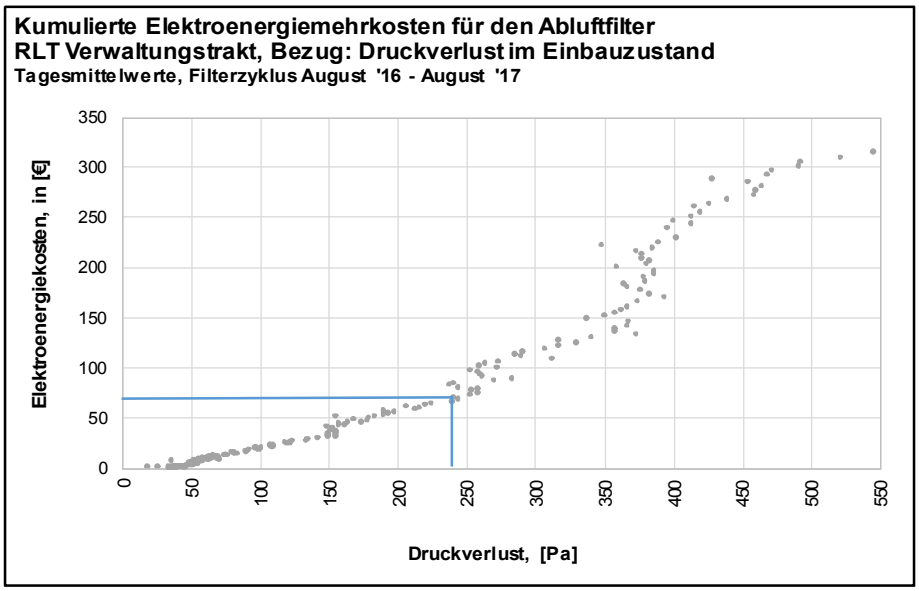

Abbildung 7-105: Elektroenergiekosten nach Druckverlust für Abluftfilter – RLT Verwaltungstrakt

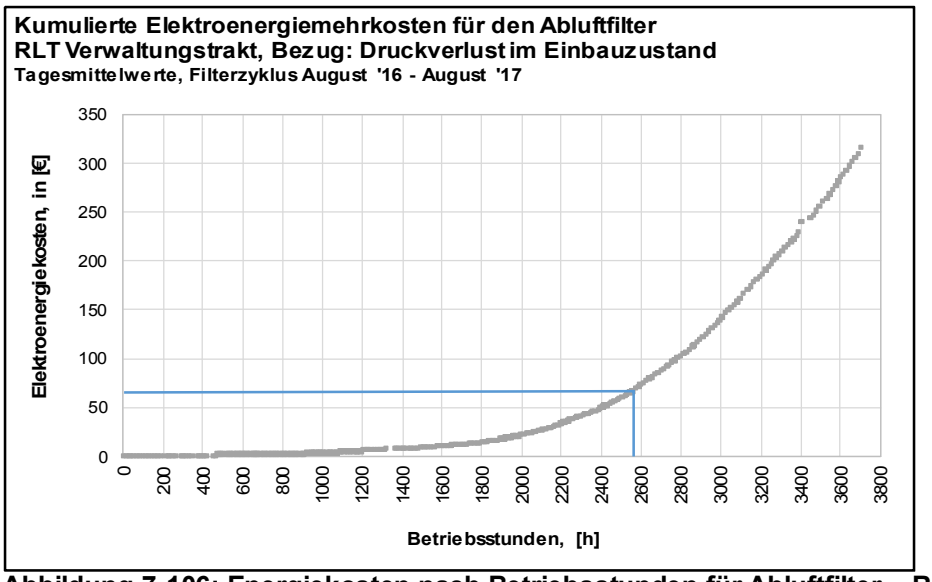

Abbildung 7-106: Energiekosten nach Betriebsstunden für Abluftfilter – RLT Verwaltungstrakt

7.13 Andere Anlagen

Die Regelstrategien der anderen Lüftungsanlagen können nur anhand der Auswertung der Ventilatorleistung überprüft werden. Bei der Hausmeisterwohnung wird allerdings aus Datenschutzgründen darauf verzichtet. Die Abluftanlage im Klassentrakt wird nicht weiter ausgewertet, sie läuft parallel zur RLT-Anlage "Klassentrakt".

7.13.1 Küchengrundlüftung

Abbildung 7-107 zeigt die Leistungsaufnahme der Grundlüftung in der Küche im Zeitraum Sommer 2016 bis Sommer 2017 für ein Jahr. Es zeigt sich ein inverses Bild zum Stromverbrauch der MENERGA-Lüftungsanlagen. Sind diese in Betrieb, sinkt der Stromverbrauch auf ca. 150 … 200 W, ansonsten sind es im Sommer ca. 250 … 300 W (nachts) und im Winter 500 W und mehr.

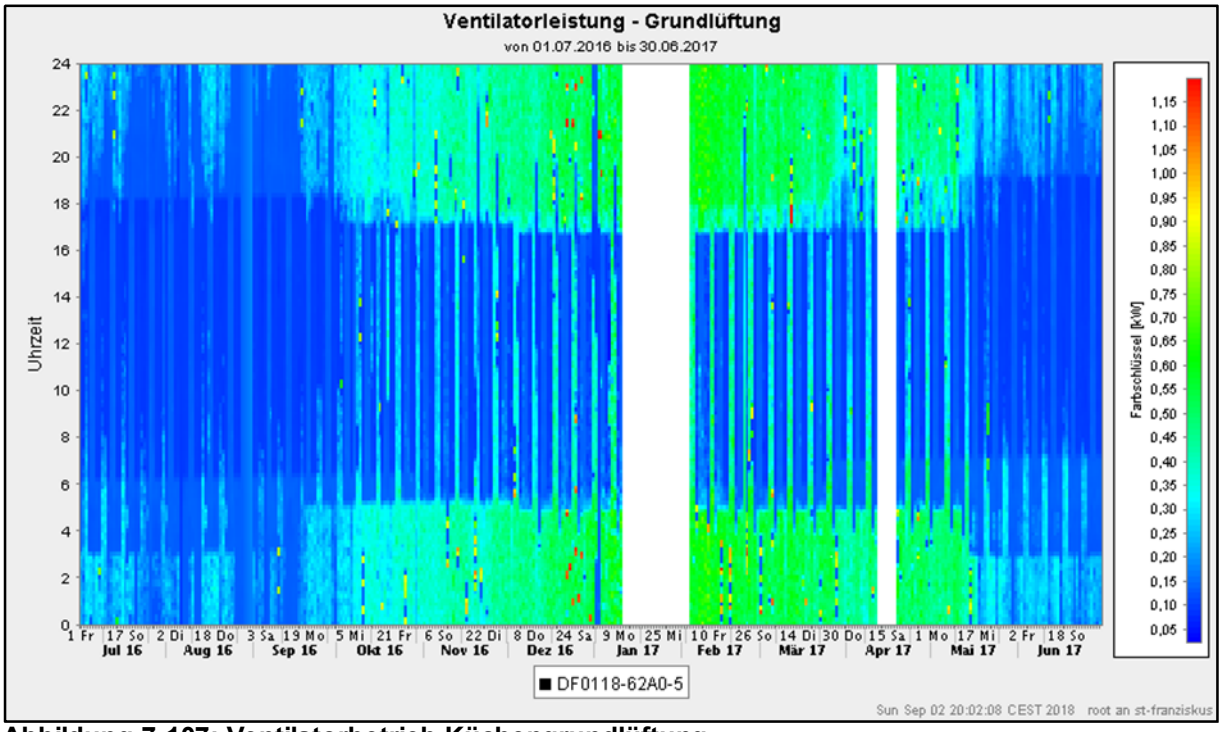

Abbildung 7-107: Ventilatorbetrieb Küchengrundlüftung

Das lässt den Schluss zu, dass die Anlage ganzjährig in Betrieb war und jeweils in den Zeiten ohne die MENERGA-Geräte versuchte, die Luft aus eigener Kraft durch den Erdwärmeübertrager zu befördern. Dies ist unterdessen umprogrammiert. Zum anderen ist mit großer Wahrscheinlichkeit die Iso-Defrosterbox im Winter in Betrieb, um die Luft vorzuwärmen. Das muss nicht unterbunden werden, da dies die einzige Wärmezufuhr in die Nebenräume der Küche darstellt.

7.13.2 Küchenprozesslüftung

In Abbildung 7-108 und Abbildung 7-109 kann anhand eines Carpetplots die Nutzung von Koch- und Spülhaube eingeschätzt werden. Die Anlagen werden manuell betrieben.

Im Winter wurden die Kochhaube eher spät und die Spülhaube oft gar nicht eingeschaltet. Eine Nutzerbefragung ergab, dass die Nutzer nicht wussten, wie die Anlage zu betreiben ist, damit eine gute Beheizung zustande kommt (kleiner Luftwechsel, große Zulufttemperatur). Sie haben die Anlage dann offenbar gar nicht genutzt, um die Räume nicht zu stark auszukühlen.

Im Sommer wurde mit den Anlagen gelüftet. Wobei auch hier offenbar nicht bekannt war, dass in Anbetracht des großen Luftwechsels der Raum schnell Außentemperatur annimmt. Insbesondere die Nutzung der Spülhaube morgens von 6 … 8 Uhr war sicherlich nicht motiviert, weil die Spülmaschine lief.

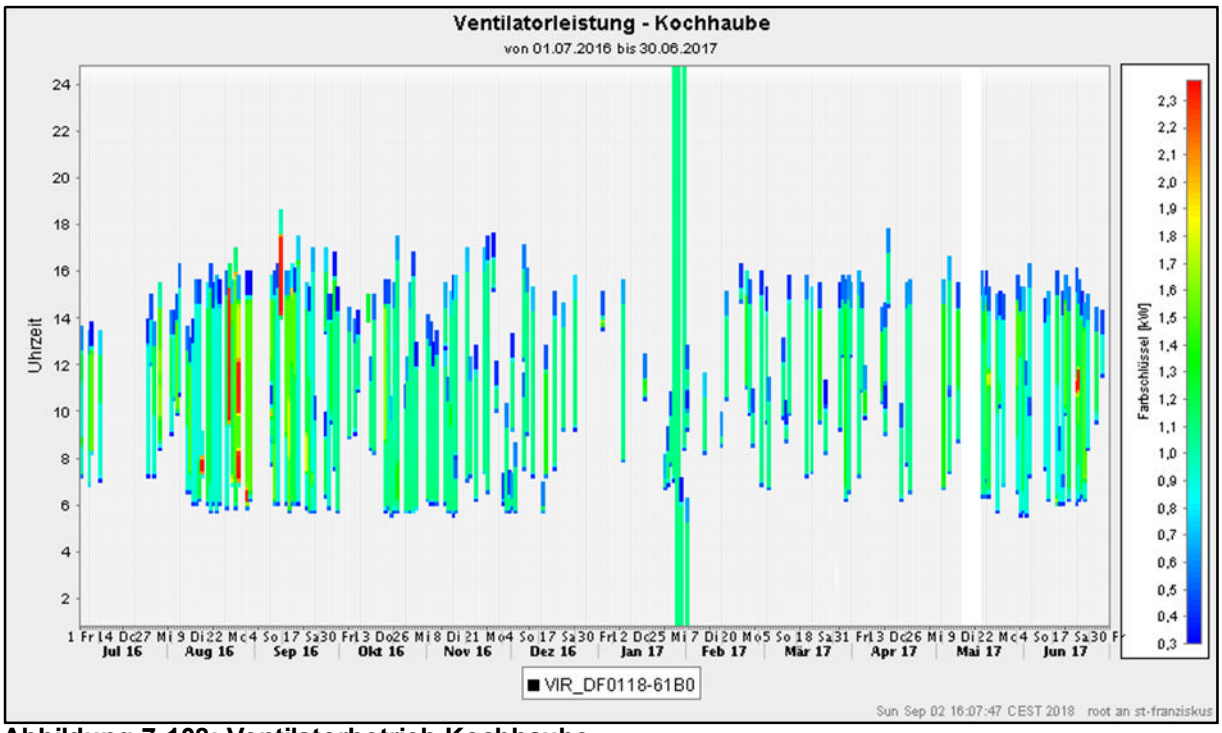

Abbildung 7-108: Ventilatorbetrieb Kochhaube

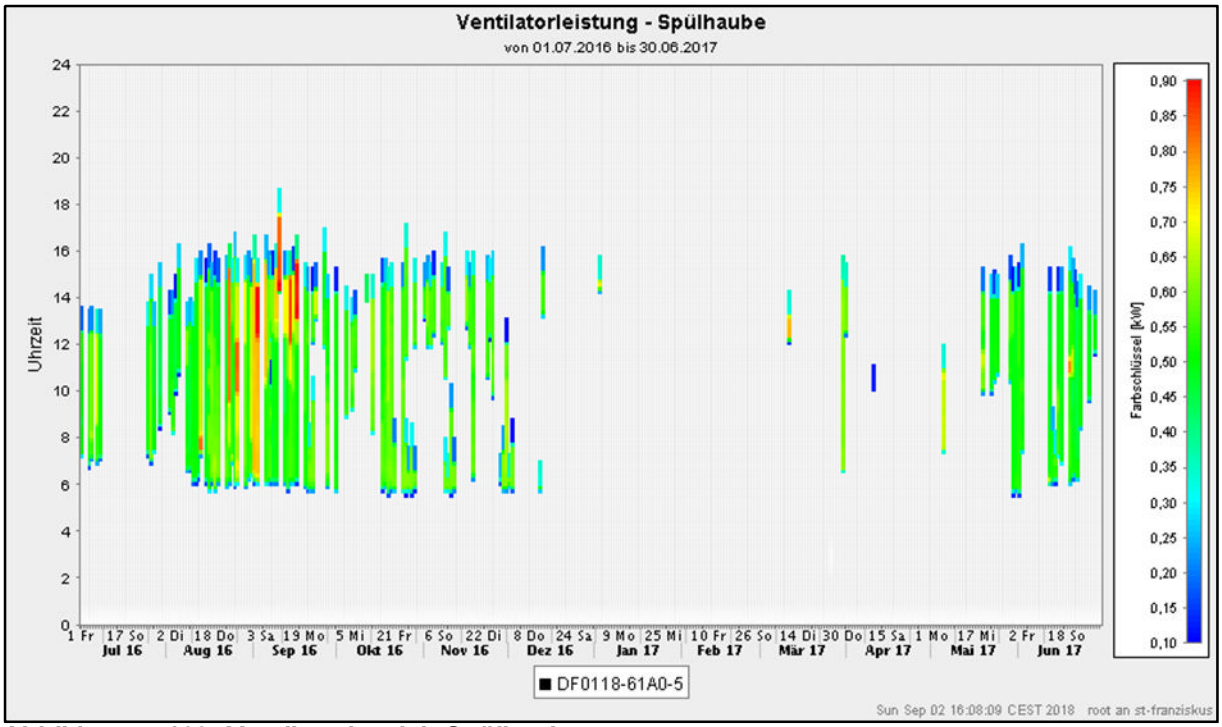

Abbildung 7-109: Ventilatorbetrieb Spülhaube

Eine Nutzererläuterung ist unterdessen verfasst, siehe separater Anhang G, H und I.

7.14 Erkenntnisse und Fazit

Die Regelungsoptionen der Anlagen werden weitgehend eingehalten. Bei den zentralen RLT-Anlagen von MENERGA entsprechen einige Funktionsabläufe nicht den ursprünglich 2011/12 in der Planung kommunizierten: es gibt beispielweise einen fließenden Übergang zwischen Aufheizung und Tagbetrieb, keine scharfe Grenze. Auch ist keine klare Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlperiode programmiert.

Die morgendliche Aufheizung funktioniert prinzipiell, es wurde allerdings nicht in jedem Fall der Sollwert bis zum Eintreffen der Personen erreicht. Damit die passende Zulufttemperatur gegeben ist, wurde die RLT-Anlage "Klassentrakt" von manueller Zuluft-Konstantregelung auf eine Kaskadenregelung umgestellt.

Der Tagbetrieb und die freie Nachtkühlung laufen zufriedenstellend nach den gegebenen Regelschemata.

Unklar war und bleibt trotz Optimierung mit dem MENERGA-Techniker, warum an einzelnen Tagen und innerhalb eigentlich gemeinschaftlich angesteuerten Lüftungszonen teilweise bei der morgendlichen Aufheizung manche Räume nicht beheizt/gelüftet werden. Vor allem stellt sich die Frage, weil kein erkennbares Schema gegeben ist. Einzig ist festzustellen, dass das Problem in den Räumen mit den (eigentlich übersteuerten) Bewegungsmeldern auftritt.

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 tiefergehende Einweisung erhalten, im optimalen Falle aus einer technischen Fachrichtung kommen oder sich persönlich für die technischen Belange interessieren.

8 Erdwärmeübertrager

Zur Luftvorerwärmung (im Winterbetrieb) bzw. Luftkühlung (im Sommerbetrieb) kommt ein Erdwärmeübertrager bzw. Erdwärmetauscher (EWT) zum Einsatz. Dieser bestehen aus erdreichtauglichen, druckfesten Entwässerungsrohren mit glatten, schmutzabweisenden Innenoberflächen. Hierbei werden die relativ konstanten Temperaturen im Erdreich genutzt, welche über das Jahr nur geringfügig schwanken.

Der nachfolgende Abschnitt erläutert den Aufbau des Erdwärmeübertragers und stellt die Simulationsergebnisse vor, die in der Planungs- und Monitoringphase erstellt wurden. Die Prognosen werden mit den Messwerten verglichen. Ein Fazit zur Reproduktion des Konzeptes in anderen Schulen wird gezogen.

8.1 Anlagenbeschreibung

Der Erdwärmeübertrager liegt vollflächig jeweils unter den Bodenplatten der beiden Gebäudeteile. Er ist in zwei Teile gegliedert, wobei die Anlage unter Gebäudeteil A auch den Gebäudeteil A versorgt (Lüftungszentralgerät "Verwaltungstrakt"). Für den Gebäudeteil B gilt gleiches analog (Lüftungszentralgerät "Klassentrakt").

Der Erdwärmeübertrager ist jeweils aus zwei Verteilerrohren (DN 900) und entsprechenden Registerrohren (DN 315 bzw. 400) im Tichelmannprinzip aufgebaut. Das Gefälle beträgt 0,5 bis 1,0 %. Die verwendeten Materialien sind PP bzw. PE-HD. Einen Eindruck aus der Bauphase gibt Abbildung 8-1.

Abbildung 8-1: Erdwärmeübertrager [25]

Die Frischluftansaugung erfolgt über zwei Ansaugstutzen DN 900, Höhe 3 Meter über Oberkante Gelände, welche dann über Anschlussrohre DN 900 zu den Verteilerrohren DN 900 führen. Die tatsächlich ausgeführten Daten (Längen, Rohrdurchmesser usw.) haben sich gegenüber der Planung von 2010 nur geringfügig geändert.

Jeweils an den Tiefpunkten der Verteilerrohre gibt es Revisionsschächte DN 1000. Diese sind begehbar. Es gibt keine stationäre Kondensathebepumpe. Es erfolgt in einem größeren Zeitintervall eine Sichtprüfung durch den Hausmeister, der bei Bedarf Wasser mit einer mobilen Pumpe entfernt.

Abbildung 8-2 zeigt den gebäudeseitigen Einstieg eines der beiden EWT.

Abbildung 8-2: Einstieg Erdwärmeübertrager in Raum 0.04

Abbildung 8-3 zeigt einen bemaßten Plan aus der Installationsphase. Weitere Daten sind dem separaten Anhang N zu entnehmen.

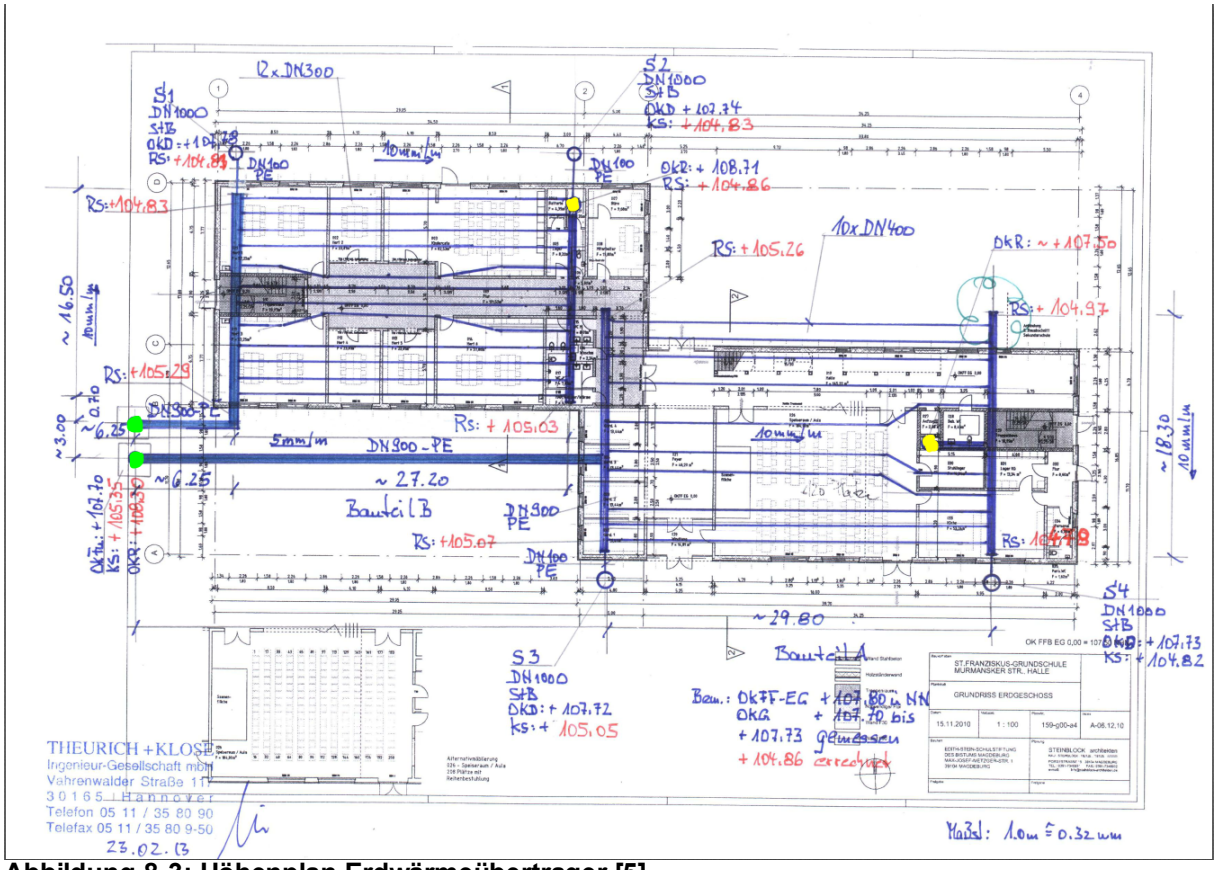

Abbildung 8-3: Höhenplan Erdwärmeübertrager [5]

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.

Technische Daten EWT "Verwaltungstrakt" [5] [26]

Ansaugrohr DN 900	ca. 37,0 m
Verteilerrohr DN 900	2 x 19,0 m
Registerrohre DN 400	10 x 29,1 m
Anschlussrohr DN 900 zw. Verteilerrohr und Vertikalschacht	4,5 m
lichter Abstand zwischen den Rohren	0,9 m
Verlegungstiefe Register unter OK Gelände	1,8 m
Auslegungsvolumenstrom	10.000 m³/h

Technische Daten EWT "Klassentrakt" [5] [26]

Ansaugrohr DN 900	ca. 7,0 m
Verteilerrohr DN 900	2 x 17,0 m
Registerrohre DN 315	12 x 26,3 m
lichter Abstand zwischen den Rohren	1,0 m
Verlegungstiefe Register unter OK Gelände	1,7 m
Auslegungsvolumenstrom	7.500 m³/h

8.2 Simulationsergebnisse

Mithilfe der frei verfügbaren Software „Graphische Auslegung von Erdwärme Austauschern“ (GAEA) wurde der EWT zweimal bewertet.

Planungsphase 2012

Tabelle 8-1 zeigt die Simulationsergebnisse aus der Planungsphase. Die Leitungslängen für den Verwaltungstrakt wurden etwas überschätzt. Der Klassentrakt wurde in etwa um den Faktor 2 zu klein simuliert (Längen und Luftvolumenstrom), was bei der Interpretation der Werte zu berücksichtigen ist.

Tabelle 8-1: Simulation Erdwärmeübertrager 2012 [26]

	Verwaltungstrakt Planung	Klassentrakt Planung
Tiefe	1,8 m	1,8 m
Länge	430 m	192 m
Kühlung im Sommer	max. 2,0 K	max. 2,4 K
Erwärmung im Winter	max. 2,6 K	max. 3,1 K
max. Gesamtluftmenge	10.000 m³/h	3.750 m³/h
Wärmeaufnahme [kWh/a]	17.340	7.607
Wärmeabgabe [kWh/a]	744	330

Betriebsphase 2017

Im Zusammenhang mit dem Monitoring wurden die Anlagen später erneut simuliert, siehe Tabelle 8-2. Die Maßketten sowie Volumenströme entsprechen dem ausgeführten Zustand.

Tabelle 8-2: Simulation Erdwärmeübertrager 2017 [27]

	Verwaltungstrakt Ausführung	Klassentrakt Ausführung
Tiefe	1,8 m	1,8 m
Länge	370 m	360 m
Erdtemperatur Sommer	13 - 16 °C	13 - 16 °C
Kühlung im Sommer	max. 1,7 K	max. 2,2 K
Erdtemperatur Winter	8 - 10 °C	8 - 10 °C
Erwärmung im Winter	max. 2,3 K	max. 2,9 K
max. Gesamtluftmenge	10.000 m³/h	7.500 m³/h
Wärmeaufnahme [kWh/a]	15.167	14.408
Wärmeabgabe [kWh/a]	643	616

Als Gesamtergebnis beider Anlagen lässt sich festhalten: es wird eine Wärmeausnahme der Luft aus dem Erdreich von 29,6 MWh/a prognostiziert. Darüber hinaus erfolgt eine sommerliche Kühlung in Höhe von 1,2 MWh/a.

8.3 Messorte und Messtechnik

Für die Bewertung der Erdwärmeübertrager sind Messfühler in der Außenluft, im Erdreich sowie in den Strömungswegen beider Anlagen installiert. Tabelle 6-1 in Kapitel 6.1 listet diese neben allen anderen Fühlern der RLT auf.

8.4 Messergebisse

8.4.1 Temperaturen

Abbildung 8-4 zeigt die mit der Wetterstation auf dem Schuldach erfasste Außentemperatur als Carpetplot (grundlegende Erläuterungen siehe Kapitel 7.1. Es sind in den Winterperioden Werte bis -10°C erfasst worden. Insbesondere im Sommer 2017 erreichen die sommerlichen Temperaturen Spitzenwerte von 35°C. Diese Grafik dient dem Vergleich mit den Temperaturen bei Eintritt in die zentralen RLT-Anlagen. Es ist allerdings anzumerken, dass die Ansaugung der Luft in die RLT 3 Meter über dem Erdboden liegt, während die Messstelle in etwa 10 Meter Höhe platziert und unverschattet angeordnet ist.

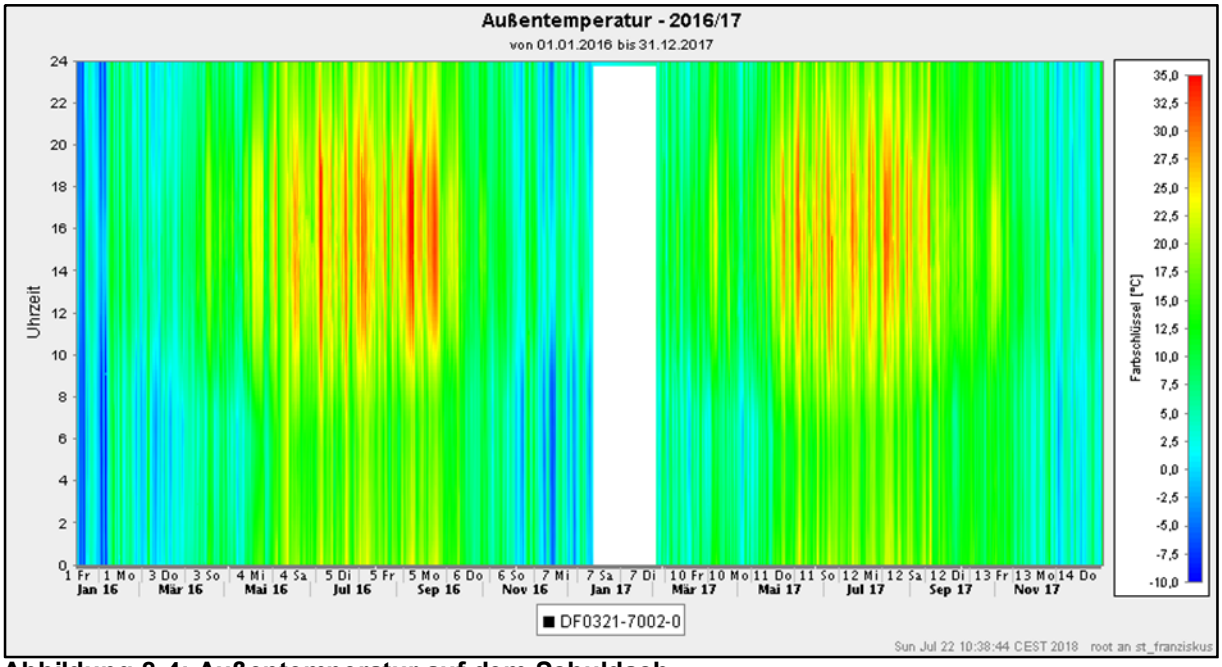

Abbildung 8-4: Außentemperatur auf dem Schuldach

Das Erdreich weist bei der Messung in 1 Meter Tiefe eine über den Tag homogene Temperaturverteilung auf, siehe Abbildung 8-5. Die maximalen und minimalen Temperaturen treten etwa einen Monat zeitversetzt auf. Da die Erdkollektoren noch tiefer verlegt sind (1,8 m), ist die Phasenverschiebung dort noch größer zu erwarten. Andererseits schirmt das darüber befindliche Gebäude den EWT von Witterungseinflüssen ab und erwärmt seinerseits das Erdreich, so dass die Amplituden im EWT noch geringer ausfallen dürften.

Die weiteren verfügbaren Messpunkte der Erdreichtemperatur in geringeren Tiefen wurden nicht weiter ausgewertet; teilweise waren nicht plausible Messwerte zu verzeichnen.

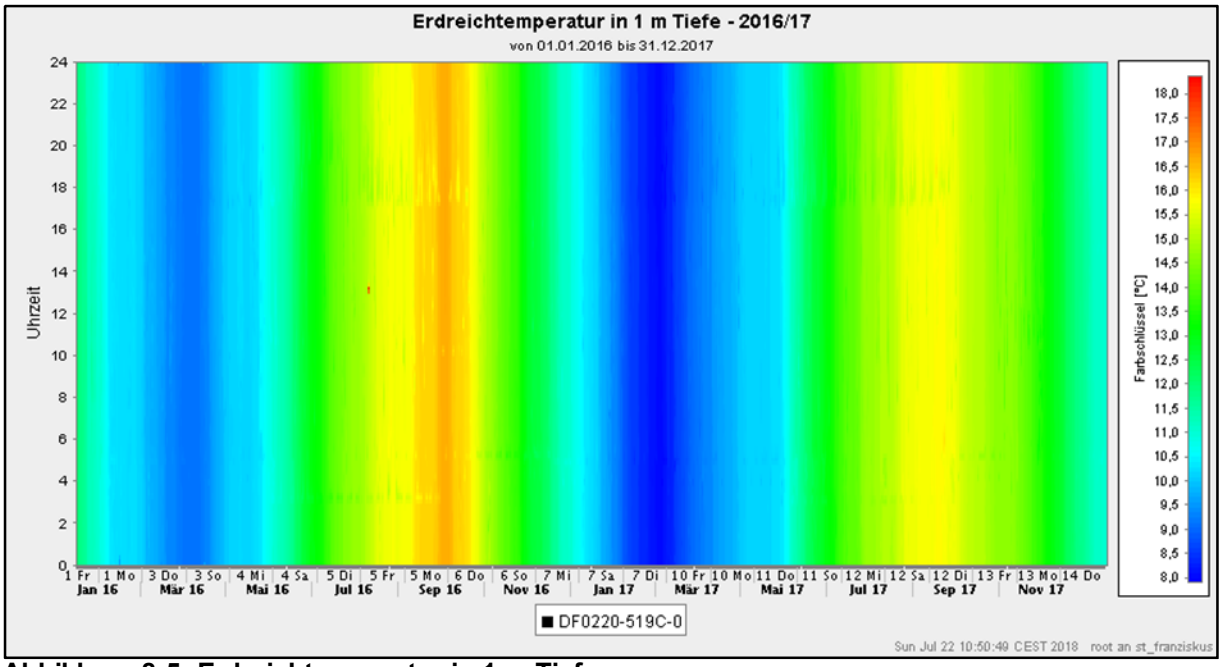

Abbildung 8-5: Erdreichtemperatur in 1 m Tiefe

Abbildung 8-6 sowie Abbildung 8-7 zeigen die Messergebnisse getrennt für beide Wärmeübertrager. Es ist folgendes grundsätzlich anzumerken: außerhalb der Betriebszeiten der RLT-Anlage (je nach Wochentag und Jahreszeit 3 oder 5 – 17 Uhr) wird die Temperatur der stehenden Luft gemessen. Der Messfühler ist im Kanalnetz unterhalb des Gebäudes platziert, so dass dessen Temperatureinfluss hoch ist. Repräsentativ für die Auswertung sind die Zeiten mit strömender Luft (Montag bis Freitag).

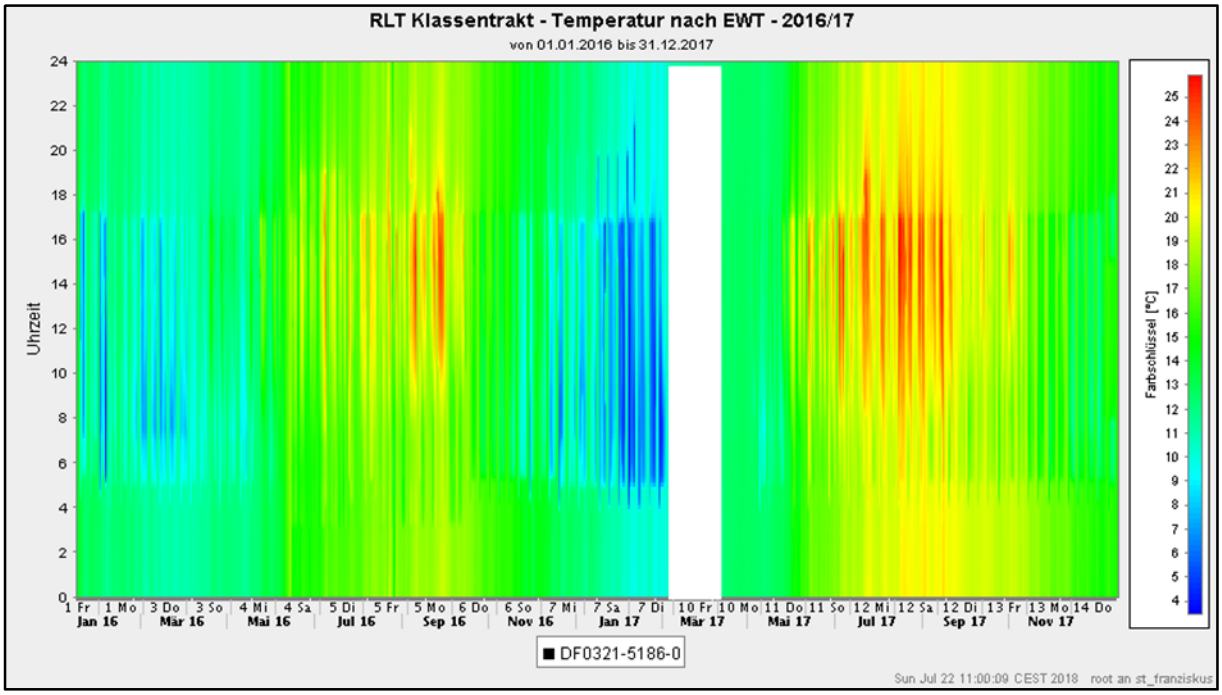

Abbildung 8-6: Temperatur nach dem Erdwärmeübertrager – RLT Klassentrakt

Im Sommer werden für den Klassentrakt maximale Temperaturen von 26°C nach dem EWT registriert. Die Temperatur nimmt im Verlauf des Tages zu. Die winterlichen Minimaltemperaturen liegen bei 3°C. Es ist eine Datenlücke Anfang 2017 festzustellen. In diesem Zeitraum lag die Außentemperatur so hoch, dass keine noch kleineren Messwerte vermutet werden dürfen.

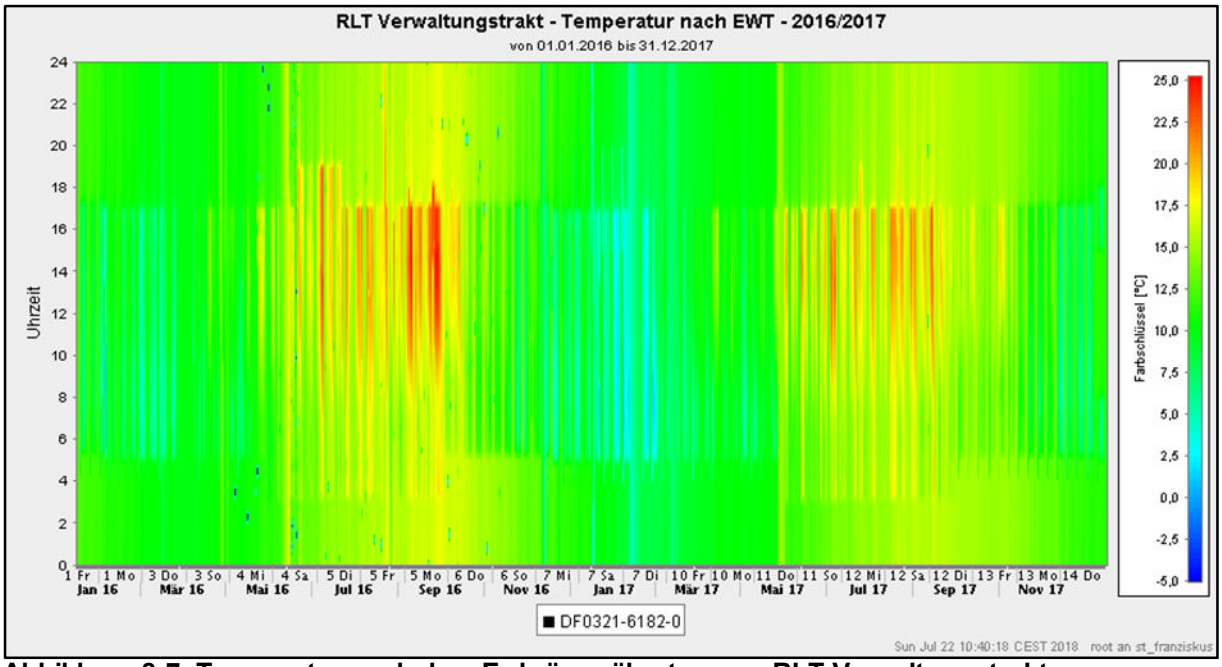

Abbildung 8-7: Temperatur nach dem Erdwärmeübertrager – RLT Verwaltungstrakt

Im Verwaltungstrakt ist das Bild ähnlich: die gemessenen Temperaturen nach dem Wärmeübertrager liegen im Bereich 2 … 25°C.

Im Winter wird somit die Frostsicherheit der Lüftungsanlage gewährleistet, da die Außenluft nicht mit Minustemperaturen direkt in die Lüftungsanlage gesaugt, sondern erst im Erdreich auf Plusgrade gebracht wird.

Tabelle 8-3 sowie Tabelle 8-4 fassen die Temperaturen der verschiedenen Messstellen als Monatsmittelwerte der Jahre 2016 und 2017 zusammen. Ausgewertet sind nur Zeiträume, in denen ein Volumenstrom in der RLT-Anlage registriert wurde.

Tabelle 8-3: Messwerte Temperaturen im Erdwärmeübertrager - RLT Klassentrakt

Temperaturen, in [°C]		Erdreich	Außenluft	EWT Regis-tereingang	EWT Regis-terausgang	EWT Sammler	Eintritt Zentralge-rät (AU)
2016	Januar	11,0	1,6	2,0	10,3	9,8	9,1
	Februar	10,0	4,4	3,9	9,7	9,5	8,6
	März	9,2	5,6	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
	April	9,9	9,9	9,1	11,7	11,6	10,5
	Mai	10,9	16,2	14,8	15,0	14,7	13,5
	Juni	12,9	19,8	18,3	18,0	17,4	16,4
	Juli	14,6	20,8	19,8	18,7	18,5	17,6
	August	15,7	18,7	17,9	19,2	18,4	17,5
	September	16,3	19,4	18,2	19,6	18,9	17,9
	Oktober	15,1	9,6	9,3	14,7	14,4	13,3
	November	13,0	5,4	5,0	11,5	11,4	10,2
	Dezember	11,0	3,4	2,9	9,7	9,4	8,3
2017	Januar	9,4	2,0	-1,0	7,0	6,8	5,7
	Februar	8,2	6,1	2,8	8,3	8,2	7,2
	März	9,1	9,2	8,1	11,4	11,5	11,9
	April	9,9	8,3	8,2	11,8	12,3	11,7
	Mai	10,7	16,1	15,0	14,7	15,9	13,7
	Juni	13,1	19,5	18,8	19,0	19,8	16,6
	Juli	14,6	19,8	19,4	19,5	21,1	17,5
	August	15,5	19,7	19,2	20,3	21,6	17,9
	September	15,5	14,9	14,4	17,3	19,4	15,8
	Oktober	14,7	13,0	12,4	16,1	18,2	14,5
	November	13,4	7,0	6,7	12,6	15,0	11,3
	Dezember	11,7	4,0	3,6	10,5	12,8	9,3

Tabelle 8-4: Messwerte Temperaturen im Erdwärmeübertrager - RLT Verwaltungstrakt

Temperaturen, in [°C]		Erdreich	Außenluft	EWT Regis-tereingang	EWT Regis-terausgang	EWT Sammler	Eintritt Zentralge-rät (AU)
2016	Januar	11,0	1,6	4,1	8,2	8,2	10,4
	Februar	10,0	4,4	5,1	7,2	7,1	9,0
	März	9,2	5,6	6,4	8,3	8,4	9,1
	April	9,9	9,9	10,4	10,2	10,1	11,3
	Mai	10,9	16,2	15,3	13,5	13,4	14,8
	Juni	12,9	19,8	19,0	16,5	16,5	17,8
	Juli	14,6	20,8	20,4	17,6	17,7	19,1
	August	15,7	18,7	18,7	17,2	17,2	18,5
	September	16,3	19,4	19,6	18,0	18,1	19,3
	Oktober	15,1	9,6	11,8	12,3	12,5	13,8
	November	13,0	5,4	7,0	9,0	9,1	10,7
	Dezember	11,0	3,4	4,9	7,1	7,0	9,1
2017	Januar	9,4	2,0	1,1	4,3	4,2	6,5
	Februar	8,2	6,1	3,9	5,9	5,7	7,8
	März	9,1	9,2	9,1	8,9	8,8	10,6
	April	9,9	8,3	9,0	9,0	9,0	10,9
	Mai	10,7	16,1	15,9	13,5	13,3	14,6
	Juni	13,1	19,5	19,2	16,4	16,4	17,8
	Juli	14,6	19,8	20,0	16,9	17,0	19,0
	August	15,5	19,7	20,1	17,5	17,6	19,4
	September	15,5	14,9	15,7	15,2	15,2	17,0
	Oktober	14,7	13,0	14,3	13,8	13,8	15,8
	November	13,4	7,0	8,6	9,7	9,8	11,6
	Dezember	11,7	4,0	5,1	7,5	7,5	9,3

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.

8.4.2 Energiebilanz

Aus den im Monitoring erfassten Volumenströmen der RLT-Anlagen sowie den Temperaturen (Außenluft, Eintritt in den RLT-Anlage) wird eine Energiebilanz erstellt. Die Dichte der Luft wird temperatur- und feuchteabhängig bestimmt. Abbildung 8-8 und Abbildung 8-9 zeigen die Ergebnisse für beide Anlagen und beide Jahre 2016 und 2017.

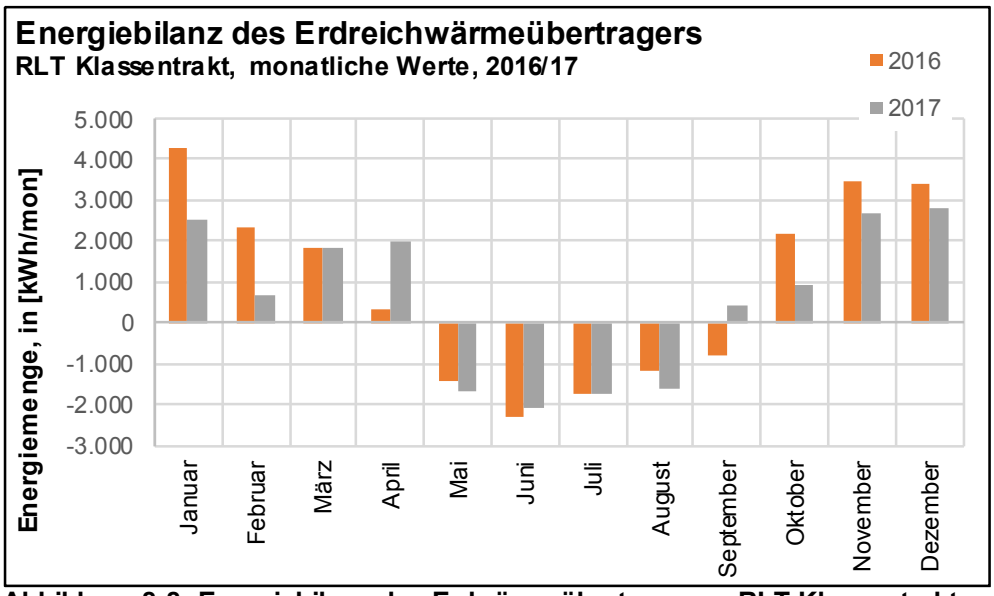

Abbildung 8-8: Energiebilanz des Erdwärmeübertragers – RLT Klassentrakt

Die regenerativ gewonnenen Energiemengen für den Klassentrakt liegen bei:

- Winter: 15,9 MWh/a (14,4 MWh/a)
- Sommer: 7,2 MWh/a (0,6 MWh/a)

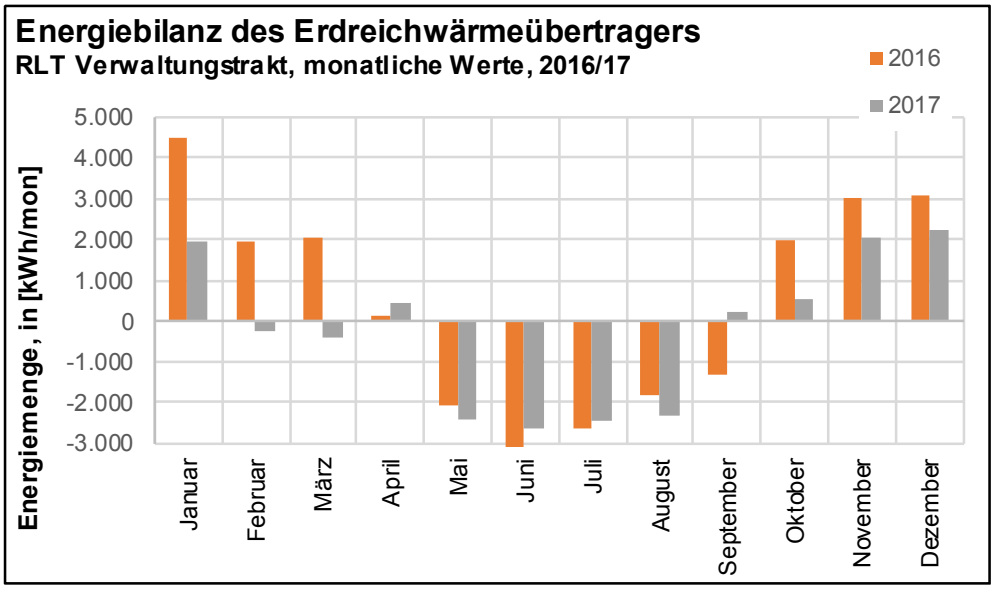

Abbildung 8-9: Energiebilanz des Erdwärmeübertragers – RLT Verwaltungstrakt

Die regenerativ gewonnenen Energiemengen für den Verwaltungstrakt liegen bei:

- Winter: 12,0 MWh/a (15,2 MWh/a)
- Sommer: 10,8 MWh/a (0,6 MWh/a)

Die Werte in Klammern geben die simulierten Planwerte an. Insbesondere im Sommer ist der Kühleffekt in beiden Anlagen deutlich höher als prognostiziert, was als sehr positiv anzusehen ist.

8.5 Erkenntnisse und Fazit

Insgesamt verbessern die Erdreichwärmeübertrager die Energiebilanz des Gebäudes deutlich. Es werden im Winter 27,9 MWh/a Wärme passiv nutzbar gemacht, die über Fernwärme oder Wärmerückgewinnung bereitgestellt worden wäre. Im Sommer sind es 18,0 MWh/a – die alternativ beispielsweise mit einer aktiven Kühlung zu generieren wären.

Wirtschaftliche Bewertung

Die Investitionskosten beliefen sich incl. Baunebenkosten auf etwas mehr als 196.000 € für beide Anlagen. Die Reparatur des Wassereinbruchs führte zu weiteren knapp 221.000 €. Unter der Annahme, dass die Reparatur ein Ausnahmetatbestand ist, keine Zinsen anfallen und die Anlage 30 Jahre hält, ergibt sich folgender jährlicher Kostenansatz für die Investition:

- 196.000 € / 30 a = 6.533 €/a

Die passiv gewonnene Energiemenge hätte im ungünstigsten Fall mit Fernwärme erzeugt werden müssen (eine höhere Wärmerückgewinnung in den RLT-Zentralgeräten wird vereinfachend vernachlässigt). Es käme zu folgenden Fernwärmekosten:

- Fernwärme, nur Arbeitspreis: 0,06 €/kWh (auf Basis der Versorgerabrechnung von 2015 aufgerundet)
- Energiekosten: 27.900 kWh/a · 0,06 €/kWh = 1674 €/a

Für eine konventionelle Kälteerzeugung würden im einfachsten Falle zwei strombetriebene Kompressionskältemaschinen benötigt. Die Abkühlung der gegebenen Luftvolumenströme (10.000 m³/h und 7.500 m³/h) um 3 K führte zu Kältemaschinen mit 10 kW und 7,5 kW Nennleistung. Dies wären Kleinklimageräte mit eher schlechteren Jahresarbeitszahlen.

- Strom, Mischkalkulation: 0,21 €/kWh (siehe Kapitel 7.12.3)
- Arbeitszahl für das Sommerhalbjahr: SEER = 3,5 (entspricht Energieeffizienzklasse E)
- Kosten: ca. 5000 €/Gerät zzgl. Installation (Annahme Faktor 2)
- Lebensdauer: 15 Jahre

Dies führte zu folgenden Kosten für die Kühlung:

- Kapitalkosten: 5000 €/Gerät · 2 Geräte · 2 / 15 a = 1333 €/a
- Energiekosten: 0,21 €/kWh · 18.000 kWh/a / 3,5 = 1080 €/a

Insgesamt belaufen sich die alternativen Kosten für Heizung und Kühlung auf 4.087 €/a. Das ist deutlich weniger als für den EWT zu verzeichnen ist. Die Kosten der Reparatur des EWT sind dabei noch unberücksichtigt. Ebenfalls alle Wartungs- und Instandhaltungskosten.

Fazit aus Sicht der St. Franziskus-Grundschule

Die Anlagen funktionieren wie geplant bzw. im Sommer sogar deutlich besser. Die prognostizierten Luftkühl- bzw. -vorwärmeffekte konnten nachgewiesen werden.

Da ein großer Teil der Investitionsmittel aus Fördermitteln stammt, kann die Anlage in der St. Franziskus-Grundschule auch wirtschaftlich betrieben werden. Allerdings sind künftige Kosten für die Wartung der nicht zugänglichen Registerrohre zu veranschlagen. Es handelt sich um die Hygieneinspektion nach VDI 6022, welche im Falle der Grundschule alle 2 Jahre notwendig, weil es den Erdwärmeübertrager gibt (sonst wären es 3 Jahre). Durchführen können dies alle Firmen, die entsprechend zertifiziert sind.

Fazit aus Sicht anderer Schulen

Es darf angesichts der Preisstruktur (Investitionskosten, Energiekosten, Wartung) gefolgert werden, dass diese Art der regenerativen Luftkühlung bzw. -heizung für andere Schulträger eher wirtschaftlich uninteressant ist. Insbesondere eine Vortemperierung der Luft (keine Vollkühlung!) lässt sich mit Kompressionskälte deutlich günstiger erreichen. Unter Nutzung von Photovoltaikstrom ist ebenfalls eine voll- oder zumindest teilregenerative Kühlung zu erreichen. Die Erkenntnisse decken sich grundsätzlich mit denen aus dem Verwaltungsbau [28].

Es ist zudem anzumerken, dass im Winter die passive Erdwärmenutzung mit der ebenfalls passiven Wärmerückgewinnung der Lüftungsgeräte konkurriert. Mit der Vorwärmung der Luft sinkt der Rückgewinnungsgrad in der RLT. Da jene kostengünstiger ist und deutlich bessere Rückgewinnungsgrade erreicht, verschlechtert dies den Erdwärmeübertrager indirekt noch mehr [29].

Ebenfalls gegen das Konzept spricht die sehr kostenintensive Schadensbeseitigung.

9 Anhang

9.1 Literatur

[1] Ingenieurbüro Naumann & Stahr, *Planungsunterlagen,* Leipzig, 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] Dezernat Planen, Bauen, Wohnen und Grundbesitz - Hochbauamt, „Leitlinien Nachhaltiges Bauen," Magistrat der Stadt Frankfurt am Main, Frankfurt, 2012.

[4] Menerga GmbH, „Resolair Komfort-Klimagerät für lufttechnische Anlagen mit Regenerativ-Energieaustauscher Typreihe: 64 .. .. Resolair," Menerga GmbH, 2014. [Online]. Available: http://katalogi.menerga.lv/Menerga_Tehniskie_Katalogi/Ventilacijas_iekartas/64-Tips_Resolair/Menerga_Resolair_Type-64_Techn_Kat_DE.pdf. [Zugriff am 13 Oktober 2014].

[5] Theurich+Klose GmbH, *Planungsunterlagen und Pläne St. Franziskus Grundschule,* Hannover: Theurich+Klose GmbH, 2013.

[6] M. Lange, „Bachelorarbeit "Berechnung und Optimierung der Lüftungsanlagen einer Passivhausschule zur Energiebilanzierung"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2014.

[7] O. Kah, „Schulen im Passivhaus-Standard: Planungsaspekte," in *Protokollband 33 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser: Passivhaus-Schulen*, Darmstadt, Passivhaus Institut, 2006.

[8] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, „Energieeffiziente Kantinen und Gewerbeküchen," in *Protokollband 47*, Darmstadt, 2012.

[9] M. Schneider, „Projektarbeit "Erstellung von Planunterlagen"," Hochschule Magdeburg/Stendal, Magdeburg, 2017.

[10] EBM Papst GmbH & Co KG, *Planungsunterlagen EC Radial-Ventilatoren,* Mulfingen: EMB Papst, 2015.

[11] H. G. &. C. KG, *Helios Ventilatoren Hauptkatalog,* Villingen-Schwenningen: Helios, 2014.

[12] Paul Wärmerückgewinnung GmbH, *Technische Daten Santos (F) 370,* Reinsdorf: Paul, 2014.

[13] O. Kah, „Albert-Schweizer-Gymnasium als Passivhaus," in *Protokollband 33 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser: Passivhaus-Schulen*, Darmstadt, Passivhaus Institut, 2006.

[14] TROX Technik, „Regelungstechnische Information LMV-D3-MP TR," 2010.

[15] Menerga, „Technische Dokumentation Anlage: 640701 - RLT1," 2012.

[16] DIN EN 15251, *Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik,* Berlin: Beuth, 2007.

[17] A. Rehbein, „Masterarbeit "Untersuchung und Optimierung der Luftheizung- und Luftkühlung für eine Passivhausschule"," Hochschule Magdeburg/Stendal, Magdeburg, 2018.

[18] Menerga, „Technische Dokumentation Anlage: 641001 - RLT2," 2012.

[19] DIN EN 13779, *Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme,* Berlin: Beuth, 2007.

[20] DIN V 18599, *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung,* Berlin: Beuth, 2016.

[21] EnEV, „Energieeinsparverordnung 2016 (EnEV)," Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz in Zusammenarbeit mit der juris GmbH, 24 Oktober 2015. [Online]. Available: http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/enev_2007/gesamt.pdf. [Zugriff am März 2017].

[22] 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.

[23] 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.

[24] A. Soboh, „Masterarbeit "Optimierung der Photovoltaikanlage auf Basis von Messdaten für eine Passivhausschule"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2016.

[25] Steinblock Architekten, *Planungsunterlagen,* Magdeburg: Steinblock Architekten, 2013.

[26] Fränkische Rohrwerke - Ralf Neubauer, „Berechnungen der Erdwärmetauscher," Fränkische Rohrwerke, Königsberg/Bayern, 2012.

[27] N. Stottmeister, „Masterarbeit "Energetische und wirtschaftliche Bewertung regenerativer Einsparmaßnahmen für eine Grundschule in Passivhausbauweise," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2017.

[28] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, „Energieeffiziente Raumkühlung," in *Protokollband 31*, Darmstadt, 2005.

[29] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, „Erdwärmeübertrager und Erdsonden im Passivhaus," in *Protokollband 43*, Darmstadt, 2012.

[30] O. Kah, T. Schulz, S. Winkel, J. Schnieders, Z. Bastian und B. Kaufmann, „Leitfaden für energieeffiziente Bildungsgebäude," Passivhaus Institut, Darmstadt, 2010.

[31] X. Wang, „Masterarbeit "Ökobilanz für die technische Gebäudeausrüstung einer Passivhausschule"," Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2017.

[32] FIZ Karlsruhe GmbH, „BINE - Lüften in Schulen," Bonn, 2015.

9.2 Nomenklatur

Tabelle 9-1: Lateinische Formelzeichen

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
A	Fläche	m²
c	spezifische Wärmekapazität	J/(kgK)
n	Luftwechselrate	h^{-1}
p	Druck	Pa
P	Leistung, v. A. elektrisch	kW, W
Q	Energiemenge, v. a. thermisch	kWh/a
$\dot{Q}$	Leistung, v. A. thermisch	kW, W
t	Zeit	s, h usw.
$\dot{V}$	Volumenstrom	m³/h, m³/s
W	Energiemenge, v. A. elektrisch	kWh/a
x	absolute Luftfeuchte	g/kg

Tabelle 9-2: Griechische Formelzeichen

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
β	Belastung	-
Δ	Differenz	verschieden
η	Wirkungs- oder Nutzungsgrad	-
ϑ	Temperatur	°C
ρ	Dichte	kg/m³
Φ	Temperaturwirkungsgrad, Rückwärmzahl	-
φ	relative Luftfeuchte	%
Ψ	Feuchtewirkungsgrad, Rückfeuchtzahl	-

Tabelle 9-3: Indices

Index	Erläuterung
Ab	Abwärme
AB	Abluft
AU	Außenluft
aus	austretend
ein	eintretend
El	elektrisch
FO	Fortluft
ges	Gesamt
Hyd	hydraulisch
Ist	Istwert
max	maximal
min	minimal
nom	nominal
Raum	Raum
s	Sättigung
Soll	Sollwert
th	thermisch
ZU	Zuluft

Tabelle 9-4: Abkürzungen

Kürzel	Erläuterung
AB	Abluft
AU	Außenluft
BTA	Gebäudeteil A, Verwaltungstrakt
BTB	Gebäudeteil B, Klassentrakt
CO_2	Kohlenstoffdioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung; deutsche Norm
DIN V	Deutsches Institut für Normung; deutsche Vornorm
DN	engl. Diameter Nominal, Nennweite (von Rohren etc.)
DWD	Deutscher Wetterdienst
EG	Erdgeschoss
EN	Europäische Norm
EnEV	Energieeinsparverordnung (Jahr 2009)
EnOB	(Forschung für) Energieoptimiertes Bauen
EnSan	(Forschung für) Energieoptimiertes Bauen in der Sanierung
EWT	Erdwärmetauscher, Erdwärmeübertrager
FO	Fortluft
FU	Frequenzumformer
GLT	Gebäudeleittechnik
HS MD	Hochschule Magdeburg-Stendal
IDA	Indoor air (Klassifizierung der Raumluftqualität)

Kürzel	Erläuterung
k. A.	keine Angabe
KW	Kalenderwoche
OG	Obergeschoss
PE-HD	Polyethylen „high density“ (hohe Dichte)
PHI	Passivhaus Institut Darmstadt
PI	Proportional-Integral-Regler
PP	Polypropylen
PV	Photovoltaik
RLT	Raumlufttechnik
SEER	Jahresenergieeffizienzrate, seasonal energy efficiecy ratio
SFP	bezogene Ventilatorleistung, specific fan power
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TZ	Taktzeit
VOC	Volatile organic compounds (flüchtige organische Verbindungen)
VSR	Volumenstromregler
WRG	Wärmerückgewinnung
ZU	Zuluft

9.3 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1-1: Lüftungszonierung EG 7
Abbildung 1-2: Lüftungszonierung 1. OG 8
Abbildung 1-3: Lüftungszonierung 2. OG 8
Abbildung 1-4: Messpunkte in der RLT-Zentrale 2.03 Klassentrakt 9
Abbildung 1-5: Energiebilanz des Erdwärmeübertragers 12
Abbildung 1-6: Energiebilanz Wärmerückgewinnung, 2016/17 13
Abbildung 1-7: Volumenstromregler des Hortraums 0.02 – Märchenzimmer 14
Abbildung 1-8: Volumenstromregler des Kunstraumes 2.14 16
Abbildung 1-9: Volumenstromregler des Klassenraumes 1.08 16
Abbildung 1-10: Druckverlust Abluftfilter – RLT Klassentrakt 18
Abbildung 2-1: Heizungs- und Lüftungskonzept 21
Abbildung 3-1: Lüftungszonierung EG 24
Abbildung 3-2: Lüftungszonierung 1. OG 24
Abbildung 3-3: Lüftungszonierung 2. OG 24
Abbildung 3-4: Luftkanalnetz 2.OG im Klassentrakt [1] 25
Abbildung 3-5: Luftkanalnetz 2.OG im Verwaltungstrakt [1] 26
Abbildung 3-6: Zuluft über Ansaugbauwerk, Fortluft über Dach 26
Abbildung 3-7: RLT Zentralgerät in Raum 2.03 – Blick nach Norden 27
Abbildung 3-8: RLT Zentralgerät in Raum 2.03 – Blick nach Süden 28
Abbildung 3-9: Typenschild Zentralgerät in Raum 2.03 28
Abbildung 3-10: RLT Zentralgerät in Raum 2.18 – Blick nach Westen 29
Abbildung 3-11: RLT Zentralgerät in Raum 2.18 – Blick nach Osten 29
Abbildung 3-12: Typenschild Zentralgerät in Raum 2.18 30
Abbildung 3-13: Küchengrundlüftung in Raum 0.32 31
Abbildung 3-14: Haube über Kochblock und Spülmaschine 31
Abbildung 3-15: Prinzip der Luftführung für die Kochhaube 4000 m³/h [5] [6] 32
Abbildung 3-16: Ventilator und Typenschild in Raum 0.30 unten – Abluft Kochhaube 33
Abbildung 3-17: Prinzip der Luftführung für die Spülhaube 1500 m³/h [5] [6] 33
Abbildung 3-18: Ventilator und Typenschild in Raum 0.30 oben – Abluft Spülhaube 34
Abbildung 3-19: Küchenprozesslüftung mit Abluftventilatoren in Raum 0.30 34
Abbildung 3-20: Prinzip der Luftführung in der Hausmeisterwohnung [5] [6] 35
Abbildung 3-21: Abluftanlage in Raum 2.11 36
Abbildung 3-22: Elektronisch einstellbarer Volumenstromregler 36
Abbildung 3-23: Mechanisch einstellbarer Volumenstromregler 37
Abbildung 3-24: Typenschilder in einem Klassenraum und für die Aula 37
Abbildung 3-25: Zuluft im Klassenraum 2.01 40
Abbildung 3-26: Abluft im Klassenraum 2.01 40
Abbildung 3-27: Luftauslässe in den Büros 41

Abbildung 3-28: Luftauslässe in den Fluren des Klassentraktes....41
Abbildung 3-29: Abluft in den Sanitärräumen....42
Abbildung 3-30: Luftauslässe in den Fluren des Verwaltungstraktes....42
Abbildung 3-31: Überströmung zwischen Raum 2.17, 2.18 und 2.19....43
Abbildung 3-32: Zuluft in der Aula....43
Abbildung 3-33: Schemata Geräteaufbau und Funktionsweise der Umschaltzyklen [4]....44
Abbildung 3-34: Wärmerückgewinnung mit Umschaltspeicher vor der Installation....45
Abbildung 3-35: Umschaltspeicher in Betrieb – Klappen links offen, rechts geschlossen....45
Abbildung 3-36: Gedämmte Zuluftkanäle im Gebäude bis zum Luftauslass....46
Abbildung 3-37: Zentraler Kanal – Außenluft mit Dämmung aus synthetischem Kautschuk....47
Abbildung 3-38: Zentraler Kanal – Zuluft mit Dämmung aus alukaschierter Mineralwolle....47
Abbildung 3-39: Zentraler Kanal – Abluft ohne Dämmung....47
Abbildung 3-40: Zentraler Kanal – Fortluft mit Dämmung aus synthetischem Kautschuk....47
Abbildung 4-1: Dreidimensionales Strangschema aller Lüftungsanlagen [6]....52
Abbildung 4-2: Grundriss Lüftung – Erdgeschoss – BTA (unten) und BTB (oben)....53
Abbildung 4-3: Grundriss Lüftung – 1. Obergeschoss – BTA (unten) und BTB (oben)....54
Abbildung 4-4: Grundriss Lüftung – 2. Obergeschoss – BTA (unten) und BTB (oben)....55
Abbildung 4-5: 3D-Strangschema Anlage Klassentrakt - Außen- und Zuluft [6]....56
Abbildung 4-6: 3D-Strangschema Anlage Klassentrakt - Ab- und Fortluft [6]....56
Abbildung 4-7: Ventilatorkennlinie Anlage Klassentrakt – Zuluft [9]....57
Abbildung 4-8: Ventilatorkennlinie Anlage Klassentrakt – Abluft [9]....57
Abbildung 4-9: 3D-Strangschema Anlage Verwaltungstrakt - Außen- und Zuluft [6]....58
Abbildung 4-10: 3D-Strangschema Anlage Verwaltungstrakt – Ab- und Fortluft [6]....58
Abbildung 4-11: Ventilatorkennlinie Anlage Verwaltungstrakt – Zuluft [9]....59
Abbildung 4-12: Ventilatorkennlinie Anlage Verwaltungstrakt – Abluft [9]....59
Abbildung 4-13: 3D-Strangschema Abluftanlage Klassentrakt – Ab- und Fortluft [6]....60
Abbildung 4-14: Ventilatorkennlinie Abluftanlage Sanitärräume [10]....61
Abbildung 4-15: Aufsicht Grundlüftungsanlage Küche [6]....61
Abbildung 4-16: Ventilatorkennlinie Grundlüftungsanlage Küche [11]....62
Abbildung 4-17: 3D-Strangschema Prozesslüftung Küche – Kochhaube [6]....63
Abbildung 4-18: Ventilatorkennlinie Prozesslüftung Kochhaube – Zuluft [10]....63
Abbildung 4-19: Ventilatorkennlinie Prozesslüftung Kochhaube – Abluft [10]....64
Abbildung 4-20: 3D-Strangschema Prozesslüftung Küche – Spülhaube [6]....64
Abbildung 4-21: Ventilatorkennlinie Prozesslüftung Spülhaube – Zuluft [10]....65
Abbildung 4-22: Ventilatorkennlinie Prozesslüftung Spülhaube – Abluft [10]....65
Abbildung 4-23: Aufsicht Wohnungslüftungsanlage [6]....66
Abbildung 4-24: Ventilatorkennlinie Wohnungslüftungsanlage [11]....67
Abbildung 5-1: Aufnahme eines MENERGA Controllers....76
Abbildung 5-2: Funktion der Taktzeitveränderung [4]....77
Abbildung 5-3: Deaktivierung der Nachtlüftung....78
Abbildung 5-4: Prinzipschema der Regelung- und Messtechnik der Klassentraktanlage [14]....80
Abbildung 5-5: Elektronisch programmierbarer VSR im Klassentrakt (Typ: LMV-D3-MP TR)....81
Abbildung 5-6: Mechanisch einstellbarer VSR in Lehrer- und Nebenräumen (Typ: M546ED4)....81
Abbildung 5-7: Prinzipschema der Regelung- und Messtechnik der Verwaltungstraktanlage [14]....85
Abbildung 5-8: Bedienpaneel der Lüftungsanlage über dem Kochblock....89
Abbildung 5-9: Bedienpaneel der Lüftungsanlage über der Spülmaschine....89
Abbildung 5-10: Anschluss des Programmiergerätes an einen elektronischen VSR....91
Abbildung 5-11: Messung der Luftvolumenströme mit Anemometer....91
Abbildung 6-1: Energiebilanz Wärmerückgewinnung Klassentrakt, 2016/17....102
Abbildung 6-2: Energiebilanz Wärmerückgewinnung Verwaltungstrakt, 2016/17....103
Abbildung 6-3: Abwärme des Ventilators, Klassentrakt, 2016/17....104
Abbildung 6-4: Abwärme des Ventilators, Verwaltungstrakt, 2016/17....104
Abbildung 6-5: Stromverbrauch der Lüftung, Klassentrakt, 2016/17....105
Abbildung 6-6: Stromverbrauch der Lüftung, Verwaltungstrakt, 2016/17....106
Abbildung 6-7: Stromverbrauch der Lüftung, Hausmeisterwohnung, 2017....106
Abbildung 6-8: Stromverbrauch der Küchenlüftung, 2016/17....107
Abbildung 6-9: Temperaturwirkungsgrad aus Zuluftdaten, Klassentrakt, 2016/17....108
Abbildung 6-10: Temperaturwirkungsgrad aus Abluftdaten, Klassentrakt, 2016/17....109
Abbildung 6-11: Temperaturwirkungsgrad aus Zuluftdaten, Klassentrakt, 2016/17....109
Abbildung 6-12: Temperaturwirkungsgrad aus Abluftdaten, Klassentrakt, 2016/17....110
Abbildung 6-13: Temperaturwirkungsgrad aus Zuluftdaten, Verwaltungstrakt, 2016/17....110
Abbildung 6-14: Temperaturwirkungsgrad aus Abluftdaten, Verwaltungstrakt, 2016/17....111

Abbildung 6-15: Temperaturwirkungsgrad aus Zuluftdaten, Verwaltungstrakt, 2016/17 111
Abbildung 6-16: Temperaturwirkungsgrad aus Abluftdaten, Verwaltungstrakt, 2016/17 111
Abbildung 6-17: Feuchtewirkungsgrad aus Zuluftdaten, Klassentrakt, 2016/17 112
Abbildung 6-18: Feuchtewirkungsgrad aus Abluftdaten, Klassentrakt, 2016/17 112
Abbildung 6-19: Feuchtewirkungsgrad aus Zuluftdaten, Klassentrakt, 2016/17 113
Abbildung 6-20: Feuchtewirkungsgrad aus Abluftdaten, Klassentrakt, 2016/17 113
Abbildung 6-21: Elektrische und hydraulische Leistung, Zuluftventilator, Klassentrakt, 2016/17 115
Abbildung 6-22: Elektrische und hydraulische Leistung, Abluftventilator, Klassentrakt, 2016/17 115
Abbildung 6-23: Wirkungsgrad nach Auslastung, Zuluftventilator, Klassentrakt, 2016/17 116
Abbildung 6-24: Wirkungsgrad nach Auslastung, Abluftventilator, Klassentrakt, 2016/17 116
Abbildung 6-25: Elektrische Leistung nach Regelung, Zuluftventilator, Klassentrakt, 2016/17 116
Abbildung 6-26: Elektrische Leistung nach Regelung, Abluftventilator, Klassentrakt, 2016/17 117
Abbildung 6-27: Elektrische u. hydraulische Leistung, Zuluftventilator, Verwaltungstrakt, 2016/17 ... 118
Abbildung 6-28: Elektrische u. hydraulische Leistung, Abluftventilator, Verwaltung, 2016/17 118
Abbildung 6-29: Wirkungsgrad nach Auslastung, Zuluftventilator, Verwaltungstrakt, 2016/17 118
Abbildung 6-30: Wirkungsgrad nach Auslastung, Abluftventilator, Verwaltungstrakt, 2016/17 119
Abbildung 6-31: Elektrische Leistung nach Regelung, Zuluftventilator, Verwaltungstrakt, 2016/17 ... 119
Abbildung 6-32: Elektrische Leistung nach Regelung, Abluftventilator, Verwaltungstrakt, 2016/17 ... 119
Abbildung 7-1: Messpunkte in der RLT-Zentrale 2.03 Klassentrakt 121
Abbildung 7-2: Messpunkte in der RLT-Zentrale 2.18 Verwaltungstrakt 122
Abbildung 7-3: Außenlufttemperatur auf dem Dach und Erdreichtemperatur in 1 m Tiefe 123
Abbildung 7-4: Verlauf der Lufttemperaturen – Klassentrakt – Winterfall 124
Abbildung 7-5: Verlauf der Lufttemperaturen – Klassentrakt – Sommerfall 125
Abbildung 7-6: Verlauf der Lufttemperaturen – Verwaltungstrakt – Winterfall 126
Abbildung 7-7: Verlauf der Lufttemperaturen – Verwaltungstrakt – Sommerfall 127
Abbildung 7-8: Sollwert der Zulufttemperatur – RLT Klassentrakt 129
Abbildung 7-9: Zulufttemperatur im Zentralgerät – RLT Klassentrakt 129
Abbildung 7-10: Sollwert der Zulufttemperatur – RLT Verwaltungstrakt 130
Abbildung 7-11: Zulufttemperatur im Zentralgerät – RLT Verwaltungstrakt 130
Abbildung 7-12: Zulufttemperatur für den Flur – RLT Verwaltungstrakt 131
Abbildung 7-13: Ablufttemperatur im Zentralgerät – RLT Klassentrakt 131
Abbildung 7-14: Ablufttemperatur im Zentralgerät – RLT Verwaltungstrakt 132
Abbildung 7-15: Zuluftvolumenstrom – RLT Klassentrakt 133
Abbildung 7-16: Abluftvolumenstrom – RLT Klassentrakt 133
Abbildung 7-17: Sortierte Dauerlinie des Zuluftvolumenstroms – RLT Klassentrakt 134
Abbildung 7-18: Sortierte Dauerlinie des Abluftvolumenstroms – RLT Klassentrakt 134
Abbildung 7-19: Druckerhöhung des Zuluftventilators – RLT Klassentrakt 135
Abbildung 7-20: Druckerhöhung des Abluftventilators – RLT Klassentrakt 135
Abbildung 7-21: Sortierte Dauerlinie der Zuluftventilatordruckerhöhung – RLT Klassentrakt 136
Abbildung 7-22: Sortierte Dauerlinie der Abluftventilatordruckerhöhung – RLT Klassentrakt 136
Abbildung 7-23: Leistung des Zuluftventilators – RLT Klassentrakt 137
Abbildung 7-24: Frequenzumrichterstellung des Zuluftventilators – RLT Klassentrakt 137
Abbildung 7-25: Leistung des Abluftventilators – RLT Klassentrakt 138
Abbildung 7-26: Frequenzumrichterstellung des Abluftventilators – RLT Klassentrakt 138
Abbildung 7-27: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Klassentrakt – Wochentage 139
Abbildung 7-28: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Klassentrakt – Wochenende 139
Abbildung 7-29: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Klassentrakt – Wochentage 140
Abbildung 7-30: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Klassentrakt – Wochenende 140
Abbildung 7-31: Zuluftvolumenstrom – RLT Verwaltungstrakt 141
Abbildung 7-32: Abluftvolumenstrom – RLT Verwaltungstrakt 142
Abbildung 7-33: Sortierte Dauerlinie des Zuluftvolumenstroms – RLT Verwaltungstrakt 143
Abbildung 7-34: Sortierte Dauerlinie des Abluftvolumenstroms – RLT Verwaltungstrakt 143
Abbildung 7-35: Druckerhöhung des Zuluftventilators – RLT Verwaltungstrakt 143
Abbildung 7-36: Druckerhöhung des Abluftventilators – RLT Verwaltungstrakt 144
Abbildung 7-37: Sortierte Dauerlinie der Zuluftventilatordruckerhöhung – RLT Verwaltungstrakt 144
Abbildung 7-38: Sortierte Dauerlinie der Abluftventilatordruckerhöhung – RLT Verwaltungstrakt 144
Abbildung 7-39: Leistung des Zuluftventilators – RLT Verwaltungstrakt 145
Abbildung 7-40: Frequenzumrichterstellung des Zuluftventilators – RLT Verwaltungstrakt 145
Abbildung 7-41: Leistung des Abluftventilators – RLT Verwaltungstrakt 146
Abbildung 7-42: Frequenzumrichterstellung des Abluftventilators – RLT Verwaltungstrakt 146
Abbildung 7-43: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Verwaltungstrakt – Wochentage 147
Abbildung 7-44: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Verwaltungstrakt – Wochenende 147

Abbildung 7-45: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Verwaltungstrakt – Wochentage.....148
Abbildung 7-46: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Verwaltungstrakt – Wochenende.....148
Abbildung 7-47: Wochenprofil einer Winterwoche – Volumenströme RLT Klassentrakt.....149
Abbildung 7-48: Tagesprofil eines Wintertages – Volumenströme RLT Klassentrakt.....149
Abbildung 7-49: Wochenprofil einer Winterwoche – Volumenströme RLT Verwaltungstrakt.....150
Abbildung 7-50: Tagesprofil eines Wintertages – Volumenströme RLT Verwaltungstrakt.....151
Abbildung 7-51: Wochenprofil einer Sommerwoche – Volumenströme RLT Klassentrakt.....151
Abbildung 7-52: Tagesprofil eines Sommertages – Volumenströme RLT Klassentrakt.....152
Abbildung 7-53: Wochenprofil einer Sommerwoche – Volumenströme RLT Verwaltungstrakt.....152
Abbildung 7-54: Tagesprofil eines Sommertages – Volumenströme RLT Verwaltungstrakt.....153
Abbildung 7-55: Wochenprofil einer Ferienwoche – Volumenströme RLT Klassentrakt.....153
Abbildung 7-56: Theoretischer Strombedarf im Schulbetrieb [22].....154
Abbildung 7-57: Gemessener Stromverbrauch im Schulbetrieb [23].....154
Abbildung 7-58: Stromverbrauch im Ferienbetrieb [23].....155
Abbildung 7-59: Volumenstromregler des Hortraums 0.02 – Märchenzimmer (korrekt: Nordraum).....156
Abbildung 7-60: Volumenstromregler des Hortraums 0.03 – Kindercafé (korrekt: Nordraum).....156
Abbildung 7-61: Volumenstromregler des Klassenraumes 1.08.....157
Abbildung 7-62: Volumenstromregler des Klassenraumes 2.01.....158
Abbildung 7-63: Volumenstromregler des Werkraumes 2.17.....158
Abbildung 7-64: Volumenstromregler des Hortraumes 0.08 – Mitarbeiterbüro (korrekt: Nord).....159
Abbildung 7-65: Volumenstromregler des Kunstraumes 2.14.....159
Abbildung 7-66: Raumtemperatur im südlichen Referenzraum 1.08 in der KW50 [16].....161
Abbildung 7-67: VSR-Stellung R107, R108, R207 und R208 in der KW50 [16].....161
Abbildung 7-68: Raumtemperatur im nördlichen Referenzraum 0.01 in der KW50 [16].....162
Abbildung 7-69: VSR-Stellung der nördlichen Klassenräume in der KW50 [16].....162
Abbildung 7-70: VSR-Stellung der südlichen Klassenräume am 12.12.17 [16].....163
Abbildung 7-71: Raumtemperatur, Feuchte, CO_2-Konzentraltion und VSR im Raum 1.08 [16].....164
Abbildung 7-72: Zulufttemperatursoll- und Ist-Wert.....165
Abbildung 7-73: Raumtemperatur (MENERGA und GEDES) Aula in der KW50 [14].....166
Abbildung 7-74: Temperaturbedingungen in der Aula in der KW35 [14].....168
Abbildung 7-75: Raumtemperatur Aula, Zulufttemperatur, Außentemperatur in der KW35 [14].....168
Abbildung 7-76: Raumtemperatur und Zulufttemperatur Flur, Außentemperatur in der KW35 [14].....169
Abbildung 7-77: Außenlufttemperatur im Zentralgerät – RLT Klassentrakt.....170
Abbildung 7-78: Zulufttemperatur nach der WRG im Zentralgerät – RLT Klassentrakt.....170
Abbildung 7-79: Ablufttemperatur im Zentralgerät – RLT Klassentrakt.....171
Abbildung 7-80: Fortlufttemperatur im Zentralgerät – RLT Klassentrakt.....171
Abbildung 7-81: Außenlufttemperatur im Zentralgerät – RLT Verwaltungstrakt.....172
Abbildung 7-82: Zulufttemperatur nach der WRG im Zentralgerät – RLT Verwaltungstrakt.....172
Abbildung 7-83: Ablufttemperatur im Zentralgerät – RLT Verwaltungstrakt.....173
Abbildung 7-84: Fortlufttemperatur im Zentralgerät – RLT Verwaltungstrakt.....173
Abbildung 7-85: Differenzdruck am Schlechtpunkt – RLT Klassentrakt.....174
Abbildung 7-86: Differenzdruck am Schlechtpunkt – RLT Verwaltungstrakt.....174
Abbildung 7-87: Typenschild Abluftfilter – RLT Klassentrakt.....175
Abbildung 7-88: Druckverlust Abluftfilter – RLT Klassentrakt.....175
Abbildung 7-89: Typenschild Außenluftfilter – RLT Klassentrakt.....176
Abbildung 7-90: Druckverlust Außenluftfilter – RLT Klassentrakt.....176
Abbildung 7-91: Typenschild Zuluftfilter – RLT Klassentrakt.....177
Abbildung 7-92: Druckverlust Zuluftfilter – RLT Klassentrakt.....177
Abbildung 7-93: Typenschild Abluftfilter – RLT Verwaltungstrakt.....178
Abbildung 7-94: Druckverlust Abluftfilter – RLT Verwaltungstrakt.....178
Abbildung 7-95: Typenschild Außenluftfilter – RLT Verwaltungstrakt.....179
Abbildung 7-96: Druckverlust Außenluftfilter – RLT Verwaltungstrakt.....179
Abbildung 7-97: Typenschild Zuluftfilter – RLT Verwaltungstrakt.....180
Abbildung 7-98: Druckverlust Zuluftfilter – RLT Verwaltungstrakt.....180
Abbildung 7-99: Benutzter und neuer Abluftfilter.....181
Abbildung 7-100: Filterwechsel 17.11.17.....182
Abbildung 7-101: Druckverlust Abluftfilter nach Betriebsstunden – RLT Klassentrakt.....183
Abbildung 7-102: Elektroenergiekosten nach Druckverlust für Abluftfilter – RLT Klassentrakt.....183
Abbildung 7-103: Energiekosten nach Betriebsstunden für Abluftfilter – RLT Klassentrakt.....183
Abbildung 7-104: Druckverlust Abluftfilter nach Betriebsstunden – RLT Verwaltungstrakt.....184
Abbildung 7-105: Elektroenergiekosten nach Druckverlust für Abluftfilter – RLT Verwaltungstrakt.....184
Abbildung 7-106: Energiekosten nach Betriebsstunden für Abluftfilter – RLT Verwaltungstrakt.....184

Abbildung 7-107: Ventilatorbetrieb Küchengrundlüftung 185
Abbildung 7-108: Ventilatorbetrieb Kochhaube 186
Abbildung 7-109: Ventilatorbetrieb Spülhaube 186
Abbildung 8-1: Erdwärmeübertrager [24] 189
Abbildung 8-2: Einstieg Erdwärmeübertrager in Raum 0.04 190
Abbildung 8-3: Höhenplan Erdwärmeübertrager [5] 190
Abbildung 8-4: Außentemperatur auf dem Schuldach 192
Abbildung 8-5: Erdreichtemperatur in 1 m Tiefe 193
Abbildung 8-6: Temperatur nach dem Erdwärmeübertrager – RLT Klassentrakt 193
Abbildung 8-7: Temperatur nach dem Erdwärmeübertrager – RLT Verwaltungstrakt 194
Abbildung 8-8: Energiebilanz des Erdwärmeübertragers – RLT Klassentrakt 195
Abbildung 8-9: Energiebilanz des Erdwärmeübertragers – RLT Verwaltungstrakt 196
Abbildung 9-1: Volumenstromregler des Hortraums 0.01 – Atelier (korrekt: Nordraum) 208
Abbildung 9-2: Volumenstromregler des Hortraums 0.12 – Medienraum (korrekt: Südraum) 208
Abbildung 9-3: Volumenstromregler des Hortraums 0.13 – Entspannung (korrekt: Südraum) 208
Abbildung 9-4: Volumenstromregler des Hortraums 0.14 – Bauraum (korrekt: Südraum) 209
Abbildung 9-5: Volumenstromregler des Klassenraumes 1.01 209
Abbildung 9-6: Volumenstromregler des Klassenraumes 1.02 210
Abbildung 9-7: Volumenstromregler des Klassenraumes 1.07 210
Abbildung 9-8: Volumenstromregler des Klassenraumes 2.02 211
Abbildung 9-9: Volumenstromregler des Klassenraumes 2.07 211
Abbildung 9-10: Volumenstromregler des Klassenraumes 2.08 212
Abbildung 9-11: Volumenstromregler des Kunstraums 2.16 212
Abbildung 9-12: Volumenstromregler des Hortraums 0.11 – Spielraum 213
Abbildung 9-13: Volumenstromregler des Raums der Stille 1.14 213
Abbildung 9-14: Volumenstromregler des Hortraums 1.21 – Besprechungsraum 214
Abbildung 9-15: Volumenstromregler der Flure im Verwaltungstrakt 214
Abbildung 9-16: Stellsignal der Wärmerückgewinnung – RLT Klassentrakt 215
Abbildung 9-17: Stellsignal der Wärmerückgewinnung – RLT Verwaltungstrakt 215
Abbildung 9-18: Stellsignal des Dreiwegeventils für die Heizung – RLT Klassentrakt 216
Abbildung 9-19: Stellsignal des Dreiwegeventils für die Heizung – RLT Verwaltungstrakt 216
Abbildung 9-20: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Klassentrakt – Schultage 217
Abbildung 9-21: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Klassentrakt – Ferienhorttage 217
Abbildung 9-22: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Klassentrakt – Schließtage 218
Abbildung 9-23: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Klassentrakt – Wochenende 218
Abbildung 9-24: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Klassentrakt – Wochentage 219
Abbildung 9-25: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Klassentrakt – Schultage 219
Abbildung 9-26: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Klassentrakt – Ferienhorttage 220
Abbildung 9-27: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Klassentrakt – Schließtage 220
Abbildung 9-28: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Klassentrakt – Wochenenden 221
Abbildung 9-29: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Klassentrakt – Wochentage 221
Abbildung 9-30: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Verwaltungstrakt – Schultage 222
Abbildung 9-31: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Verwaltungstrakt – Horttage 222
Abbildung 9-32: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Verwaltungstrakt – Schließtage 223
Abbildung 9-33: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Verwaltungstrakt – Wochenende 223
Abbildung 9-34: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Verwaltungstrakt – Wochentage 224
Abbildung 9-35: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Verwaltungstrakt – Schultage 224
Abbildung 9-36: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Verwaltungstrakt – Horttage 225
Abbildung 9-37: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Verwaltungstrakt – Schließtage 225
Abbildung 9-38: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Verwaltungstrakt – Wochenende 226
Abbildung 9-39: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Verwaltungstrakt – Wochentage 226
Abbildung 9-40: Tagesprofil Volumenstrom – Zuluftventilator Klassentrakt – Schultage 227
Abbildung 9-41: Tagesprofil Volumenstrom – Zuluftventilator Klassentrakt – Ferienhorttage 227
Abbildung 9-42: Tagesprofil Volumenstrom – Zuluftventilator Klassentrakt – Schließtage 228
Abbildung 9-43: Tagesprofil Volumenstrom – Zuluftventilator Klassentrakt – Wochenende 228
Abbildung 9-44: Tagesprofil Volumenstrom – Zuluftventilator Klassentrakt – Wochentage 229
Abbildung 9-45: Tagesprofil Volumenstrom – Abluftventilator Klassentrakt – Schultage 229
Abbildung 9-46: Tagesprofil Volumenstrom – Abluftventilator Klassentrakt – Ferienhorttage 230
Abbildung 9-47: Tagesprofil Volumenstrom – Abluftventilator Klassentrakt – Schließtage 230
Abbildung 9-48: Tagesprofil Volumenstrom – Abluftventilator Klassentrakt – Wochenenden 231
Abbildung 9-49: Tagesprofil Volumenstrom – Abluftventilator Klassentrakt – Wochentage 231
Abbildung 9-50: Tagesprofil Volumenstrom – Zuluftventilator Verwaltungstrakt – Schultage 232

Abbildung 9-51: Tagesprofil Volumenstrom – Zuluftventilator Verwaltungstrakt – Horttage 232
Abbildung 9-52: Tagesprofil Volumenstrom – Zuluftventilator Verwaltungstrakt – Schließtage 233
Abbildung 9-53: Tagesprofil Volumenstrom – Zuluftventilator Verwaltungstrakt – Wochenende 233
Abbildung 9-54: Tagesprofil Volumenstrom – Zuluftventilator Verwaltungstrakt – Wochentage 234
Abbildung 9-55: Tagesprofil Volumenstrom – Abluftventilator Verwaltungstrakt – Schultage 234
Abbildung 9-56: Tagesprofil Volumenstrom – Abluftventilator Verwaltungstrakt – Horttage 235
Abbildung 9-57: Tagesprofil Volumenstrom – Abluftventilator Verwaltungstrakt – Schließtage 235
Abbildung 9-58: Tagesprofil Volumenstrom – Abluftventilator Verwaltungstrakt – Wochenende 236
Abbildung 9-59: Tagesprofil Volumenstrom – Abluftventilator Verwaltungstrakt – Wochentage 236

Tabelle 1-1: Übersicht über die Lüftungsgeräte 9
Tabelle 3-1: Übersicht über die Lüftungsgeräte 23
Tabelle 3-2: Luftauslässe 38
Tabelle 4-1: Volumenströme der Räume – Ausführung und Planung 50
Tabelle 5-1: Volumenströme der Räume sowie Regelungsoptionen 74
Tabelle 5-2: Volumenstromregler vor und nach Optimierung, Zuluft, Klassentrakt.....92
Tabelle 5-3: Volumenstromregler vor und nach Optimierung, Abluft, Klassentrakt.....93
Tabelle 6-1: Messpunkte Lüftung 95
Tabelle 6-2: SFP-Klassen [19].....114
Tabelle 6-3: Ergebnisse Ventilatoren RLT-Klassentrakt.....115
Tabelle 6-4: Ergebnisse Ventilatoren RLT-Verwaltungstrakt 117
Tabelle 7-1: Verlauf der Lufttemperaturen – Klassentrakt 125
Tabelle 7-2: Verlauf der Lufttemperaturen – Verwaltungstrakt 127
Tabelle 7-3: Monatliche Volumenströme und Betriebszeiten – RLT Klassentrakt 132
Tabelle 7-4: Monatliche Volumenströme und Betriebszeiten – RLT Klassentrakt 141
Tabelle 8-1: Simulation Erdwärmeübertrager 2012 [26].....191
Tabelle 8-2: Simulation Erdwärmeübertrager 2017 [27].....191
Tabelle 8-3: Messwerte Temperaturen im Erdwärmeübertrager - RLT Klassentrakt.....194
Tabelle 8-4: Messwerte Temperaturen im Erdwärmeübertrager - RLT Verwaltungstrakt 195
Tabelle 9-1: Lateinische Formelzeichen 200
Tabelle 9-2: Griechische Formelzeichen.....201
Tabelle 9-3: Indices.....201
Tabelle 9-4: Abkürzungen 201
Tabelle 9-5: Planer, Ausführende Projektbeteiligte 237

9.4 Weitere Auswertungen

9.4.1 Volumenstromregler der Räume mit Präsenzregelung

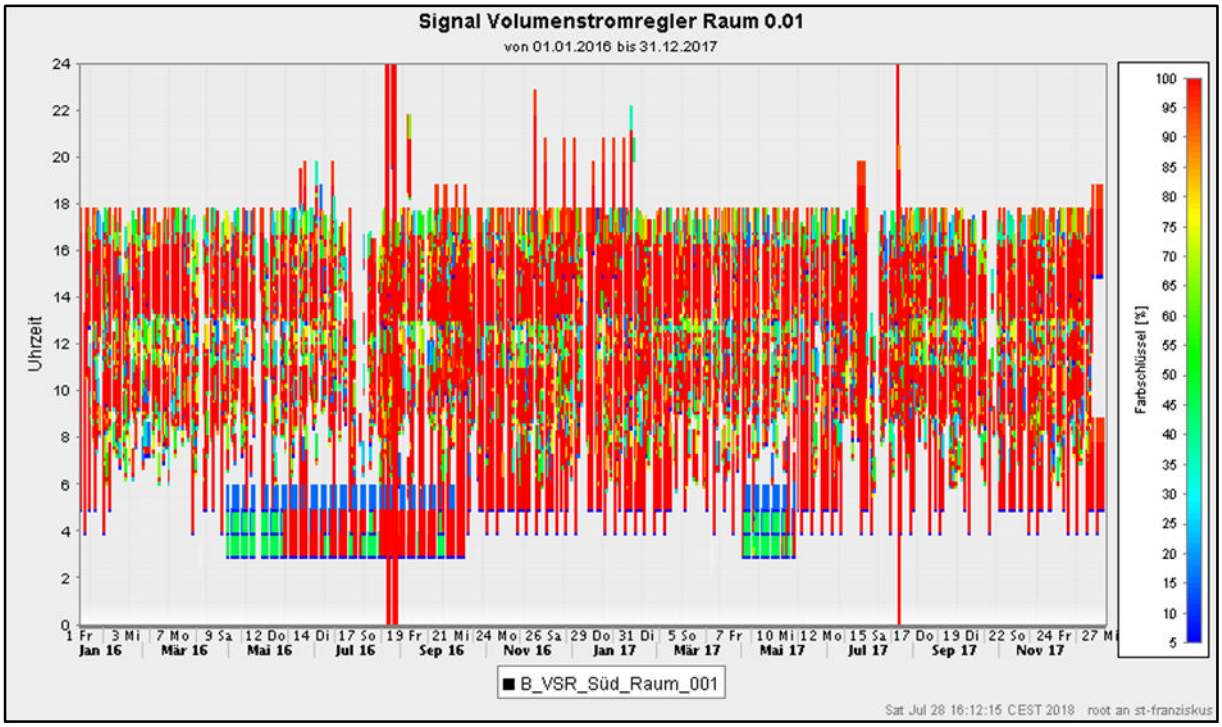

Abbildung 9-1: Volumenstromregler des Hortraums 0.01 – Atelier (korrekt: Nordraum)

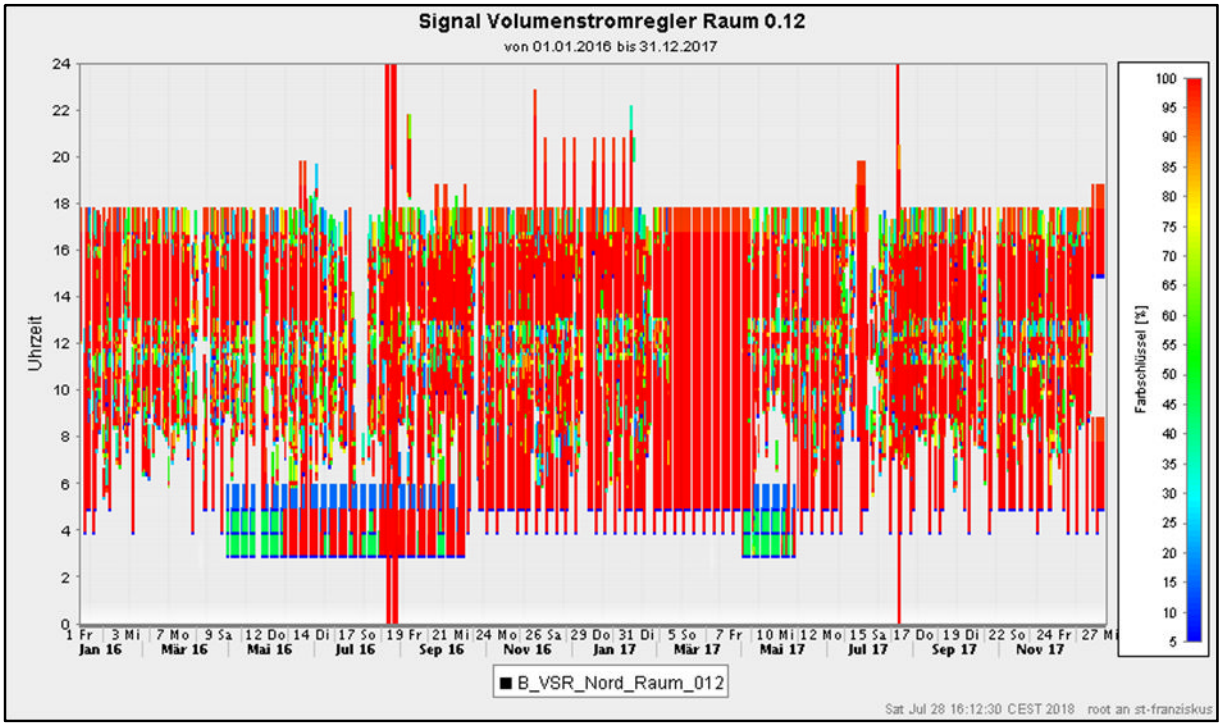

Abbildung 9-2: Volumenstromregler des Hortraums 0.12 – Medienraum (korrekt: Südraum)

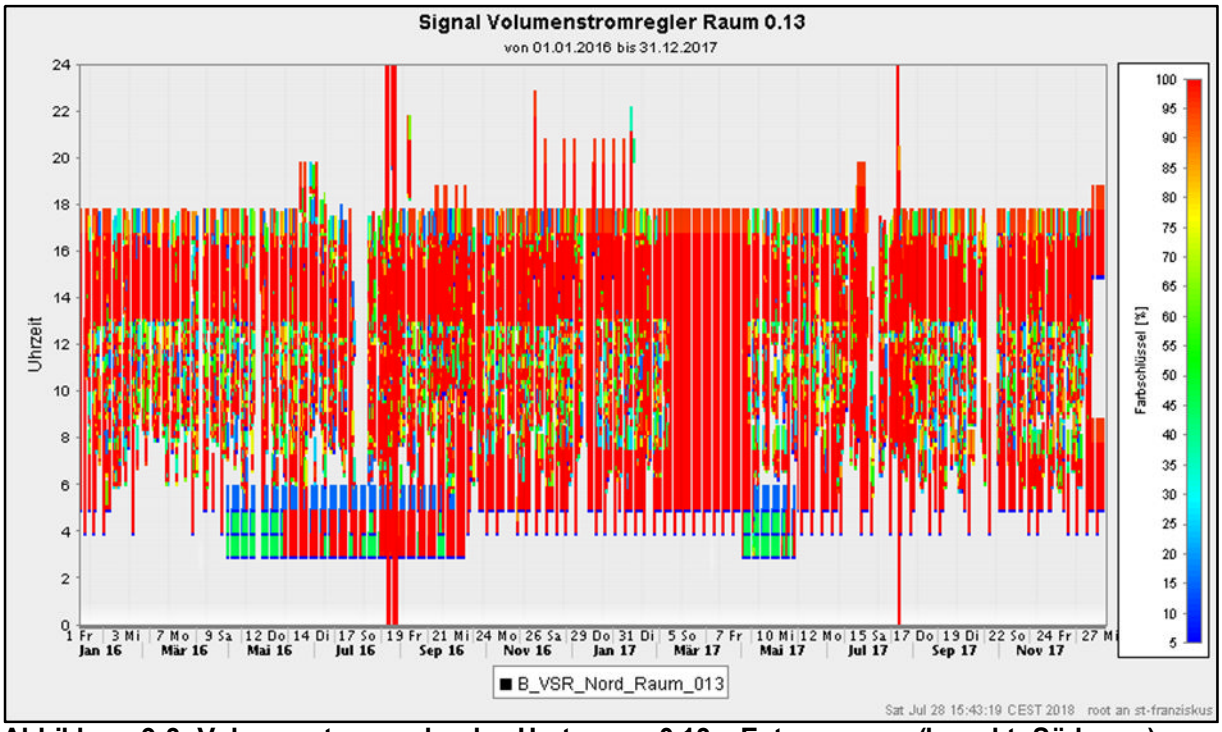

Abbildung 9-3: Volumenstromregler des Hortraums 0.13 – Entspannung (korrekt: Südraum)

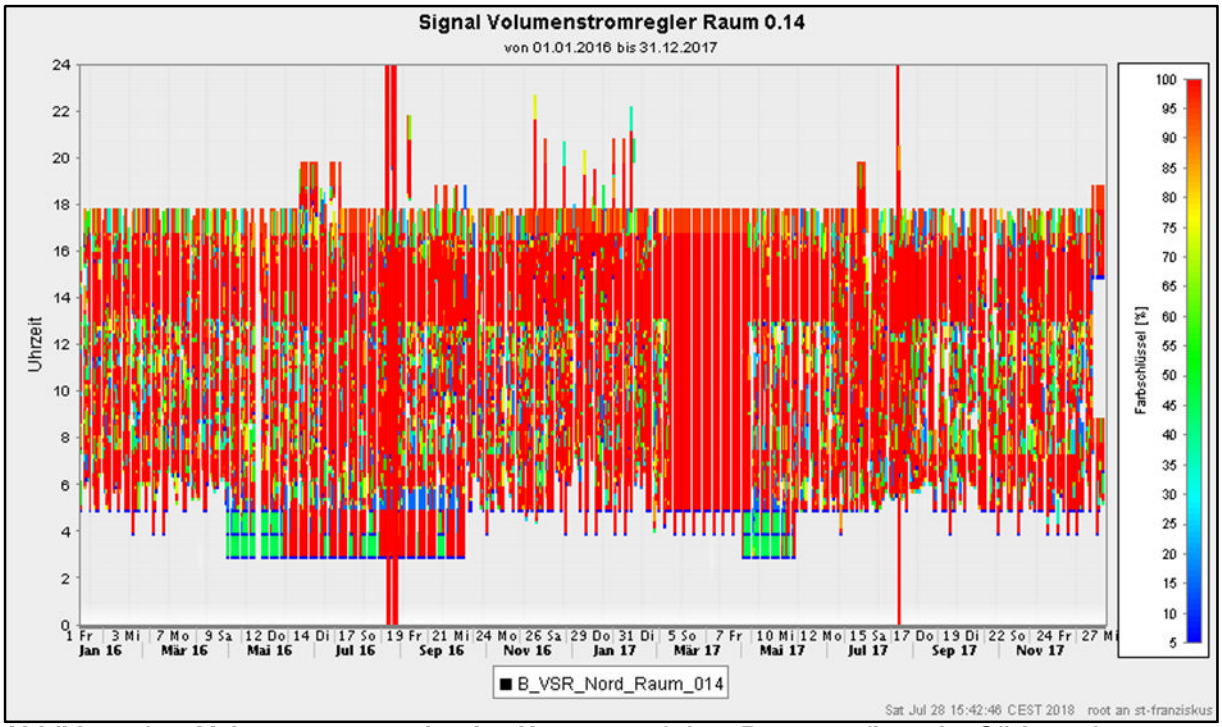

Abbildung 9-4: Volumenstromregler des Hortraums 0.14 – Bauraum (korrekt: Südraum)

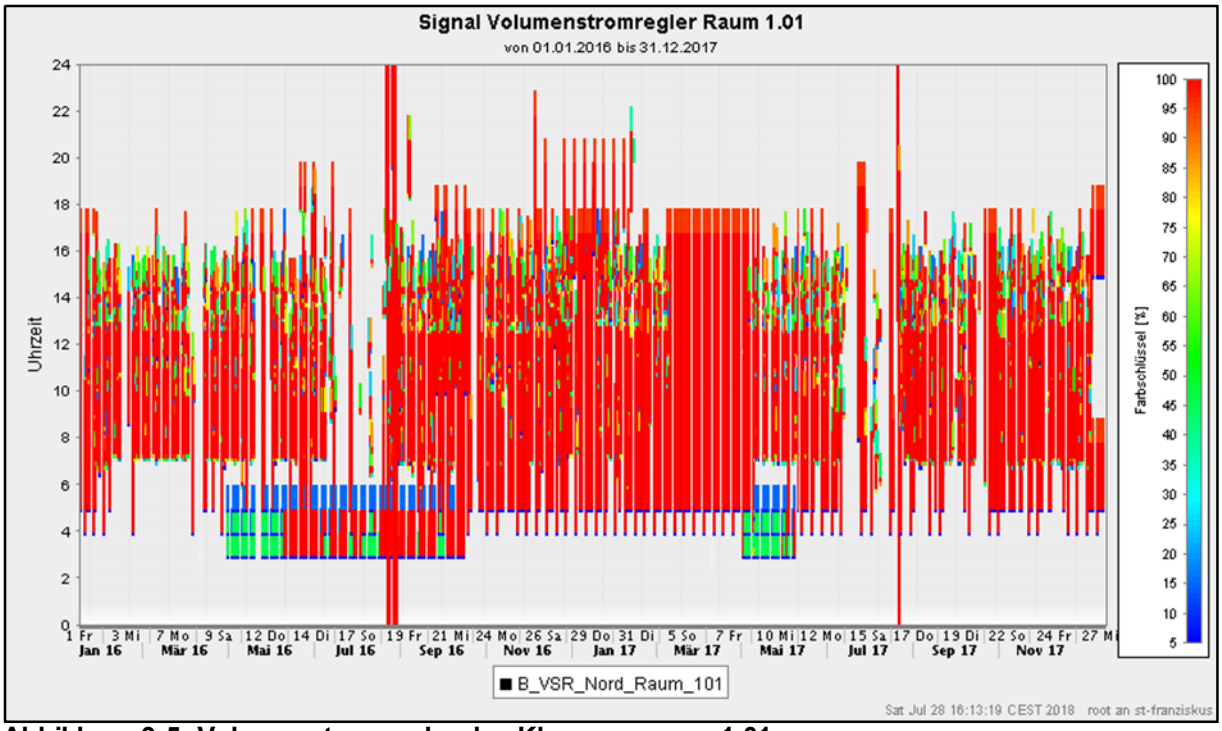

Abbildung 9-5: Volumenstromregler des Klassenraumes 1.01

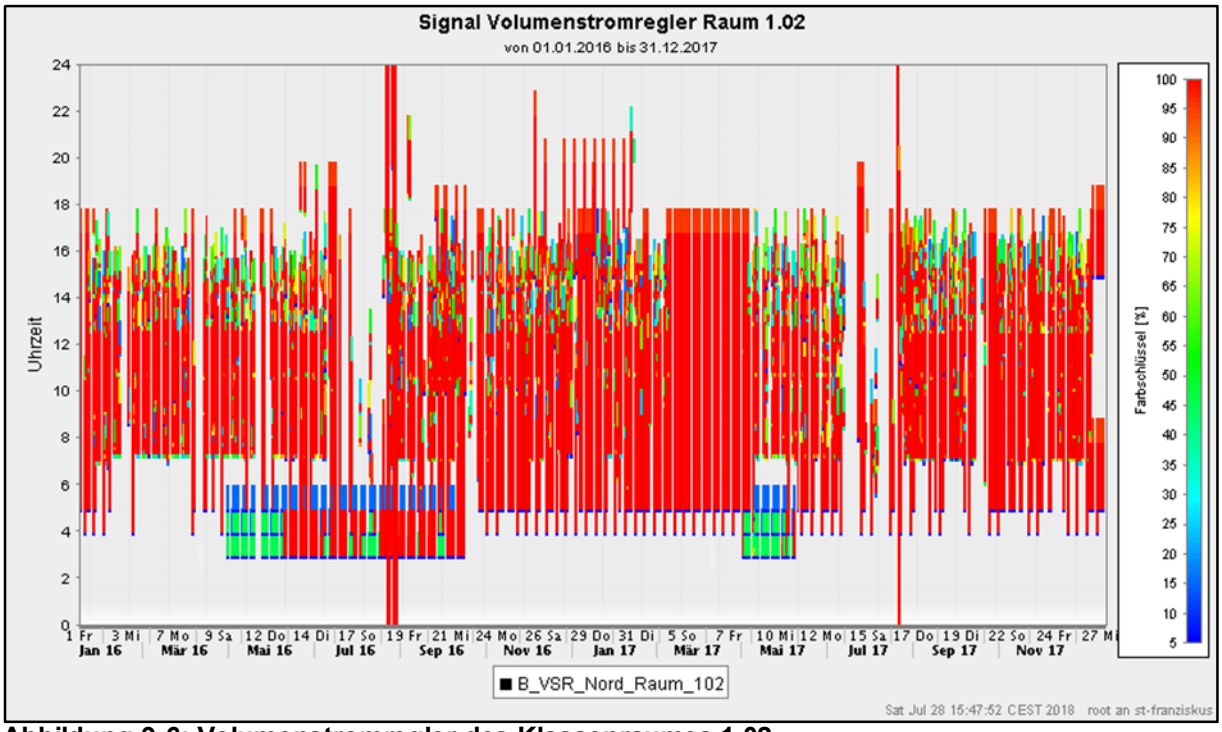

Abbildung 9-6: Volumenstromregler des Klassenraumes 1.02

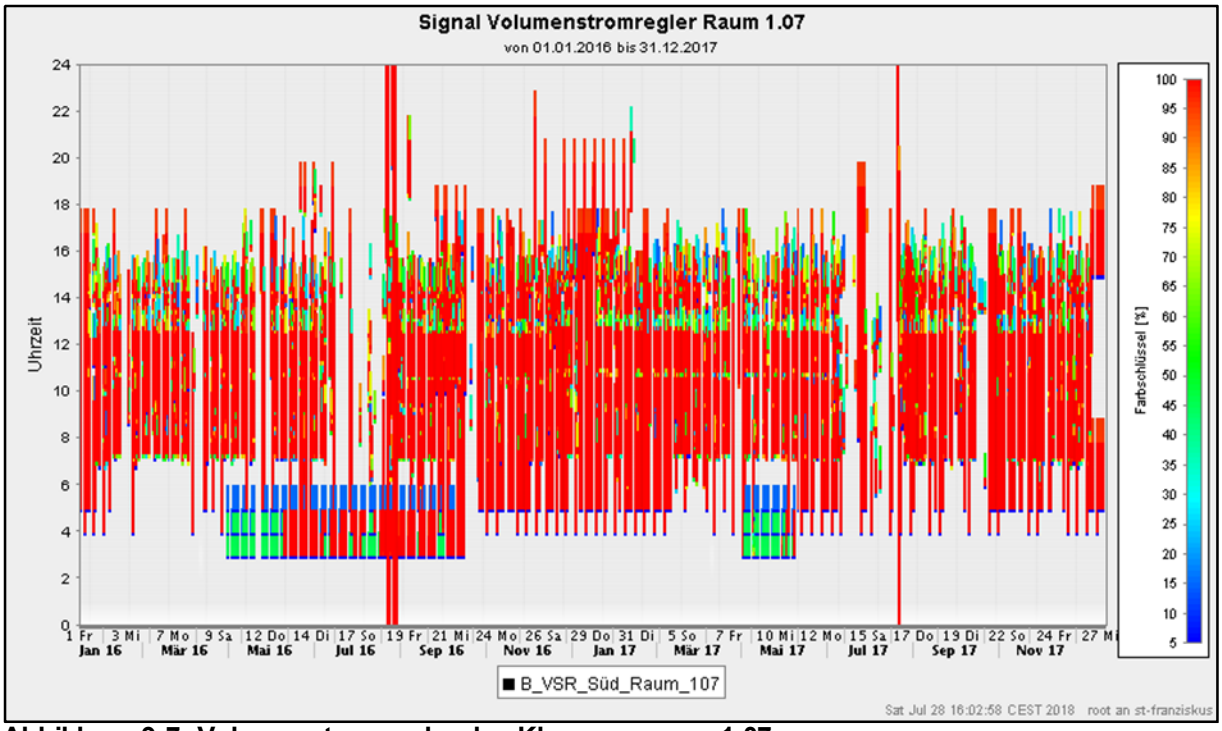

Abbildung 9-7: Volumenstromregler des Klassenraumes 1.07

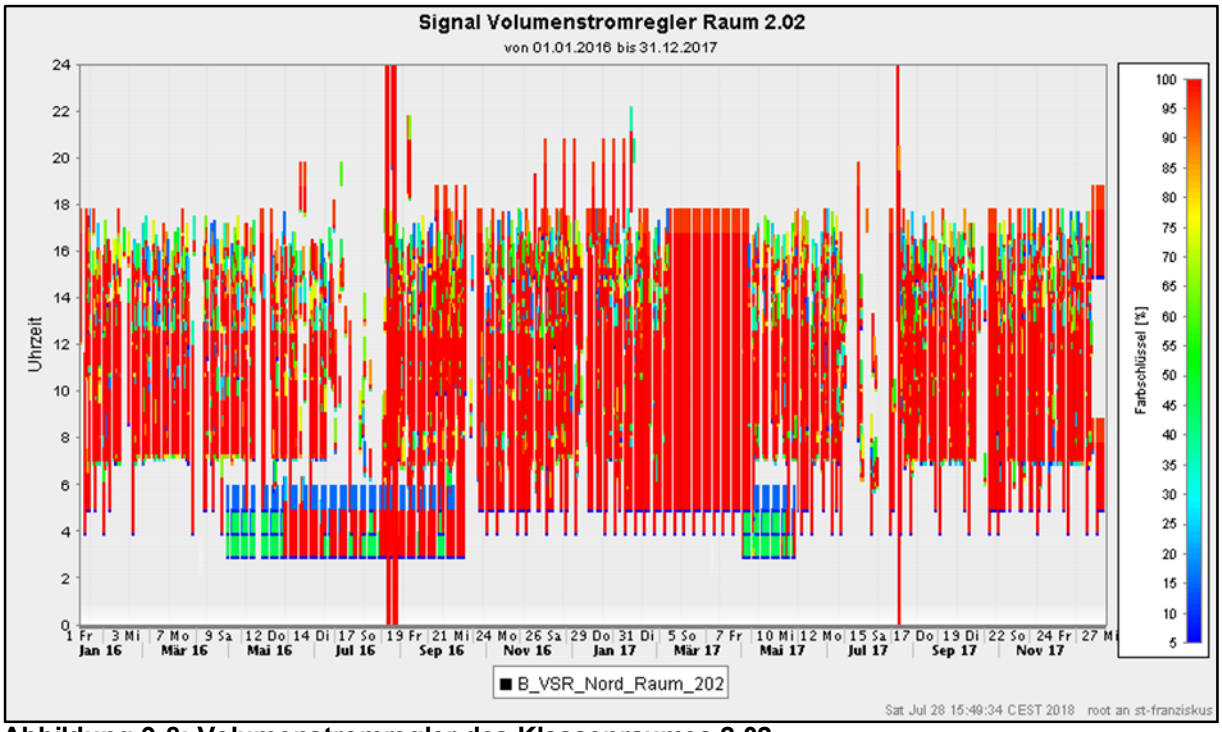

Abbildung 9-8: Volumenstromregler des Klassenraumes 2.02

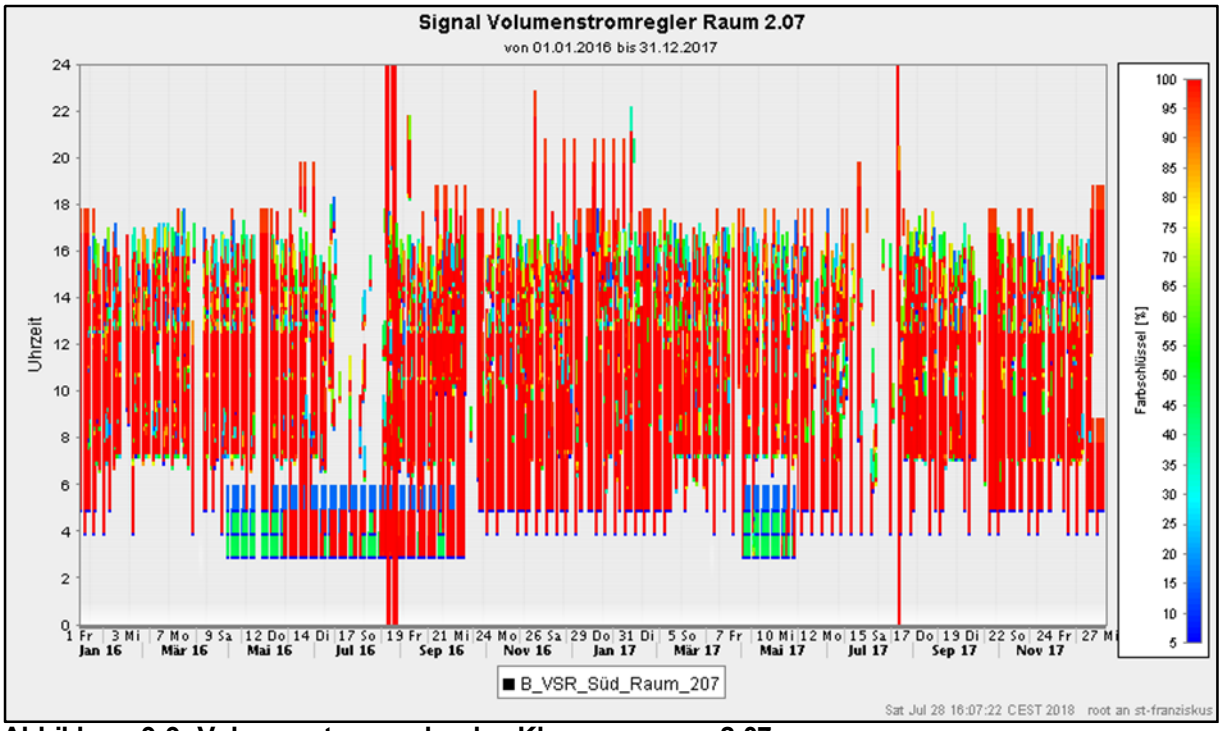

Abbildung 9-9: Volumenstromregler des Klassenraumes 2.07

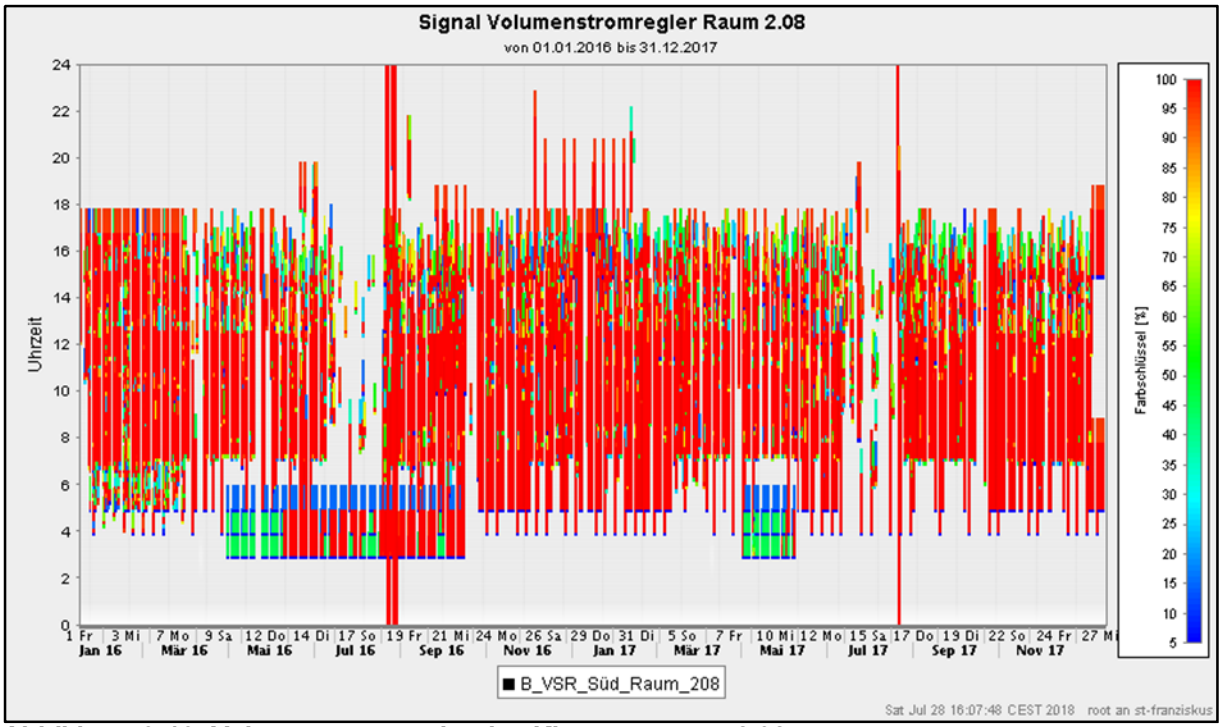

Abbildung 9-10: Volumenstromregler des Klassenraumes 2.08

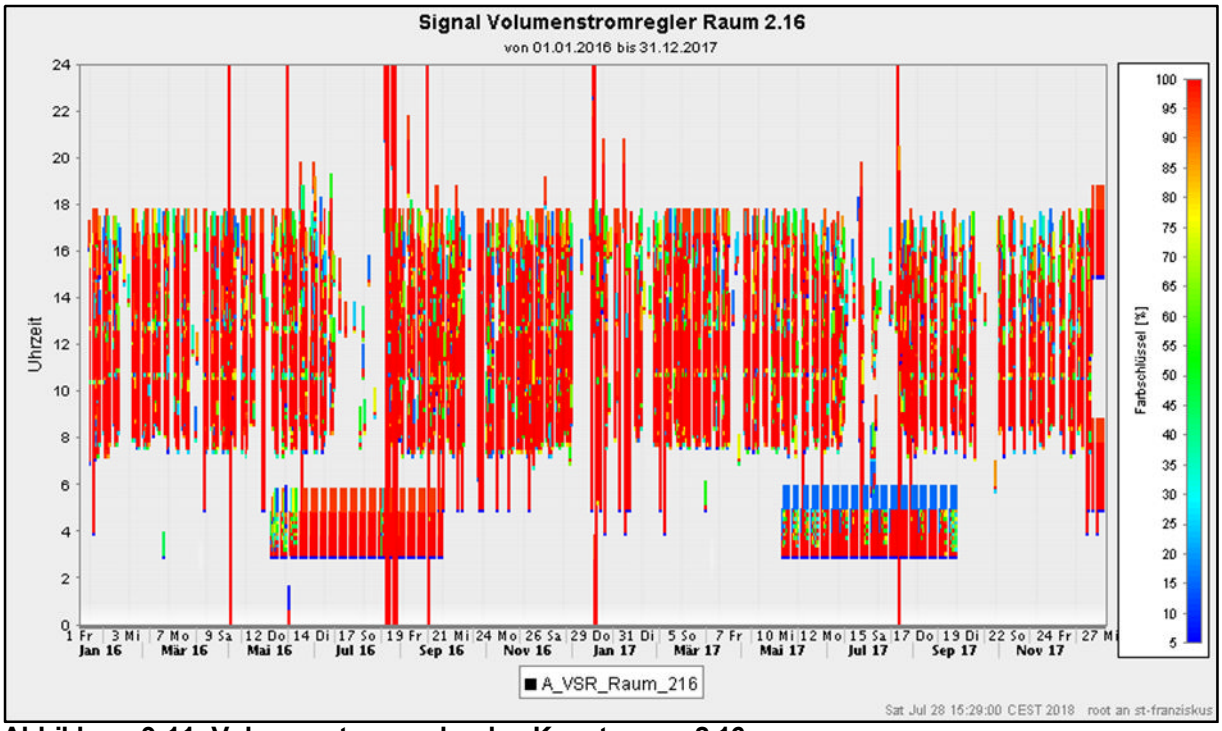

Abbildung 9-11: Volumenstromregler des Kunstraums 2.16

9.4.2 Volumenstromregler der Räume ohne Präsenzregelung

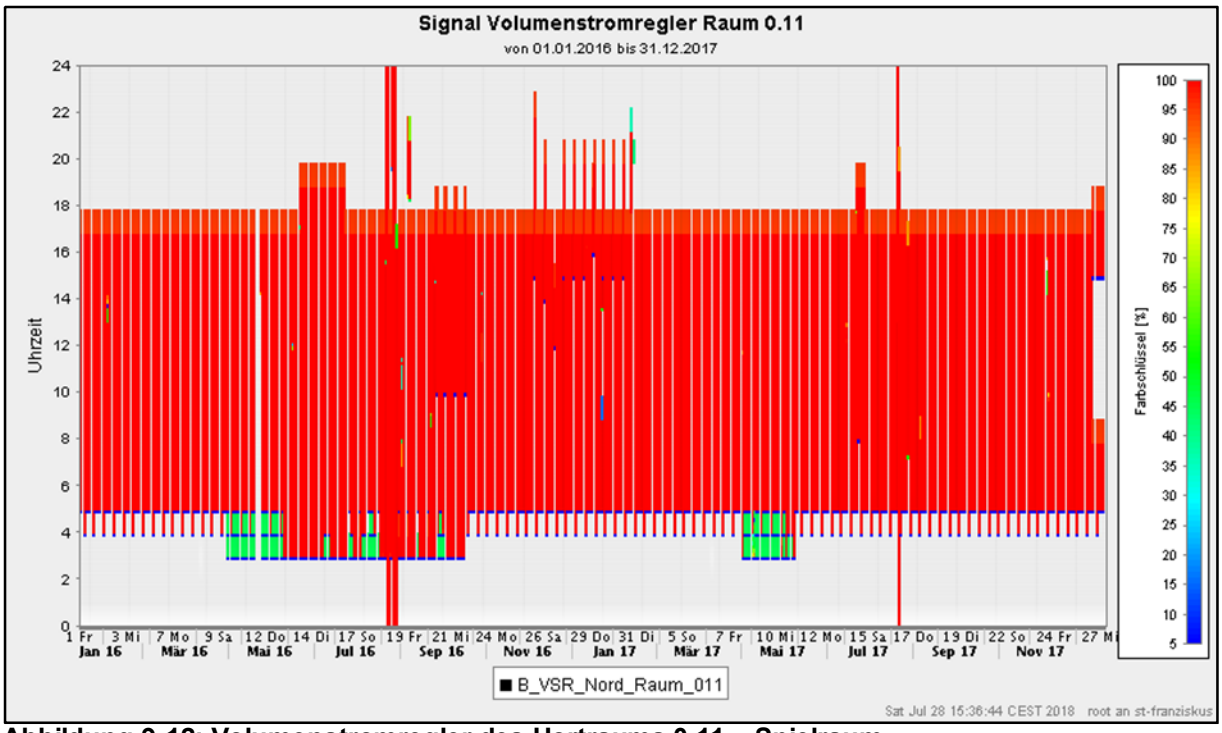

Abbildung 9-12: Volumenstromregler des Hortraums 0.11 – Spielraum

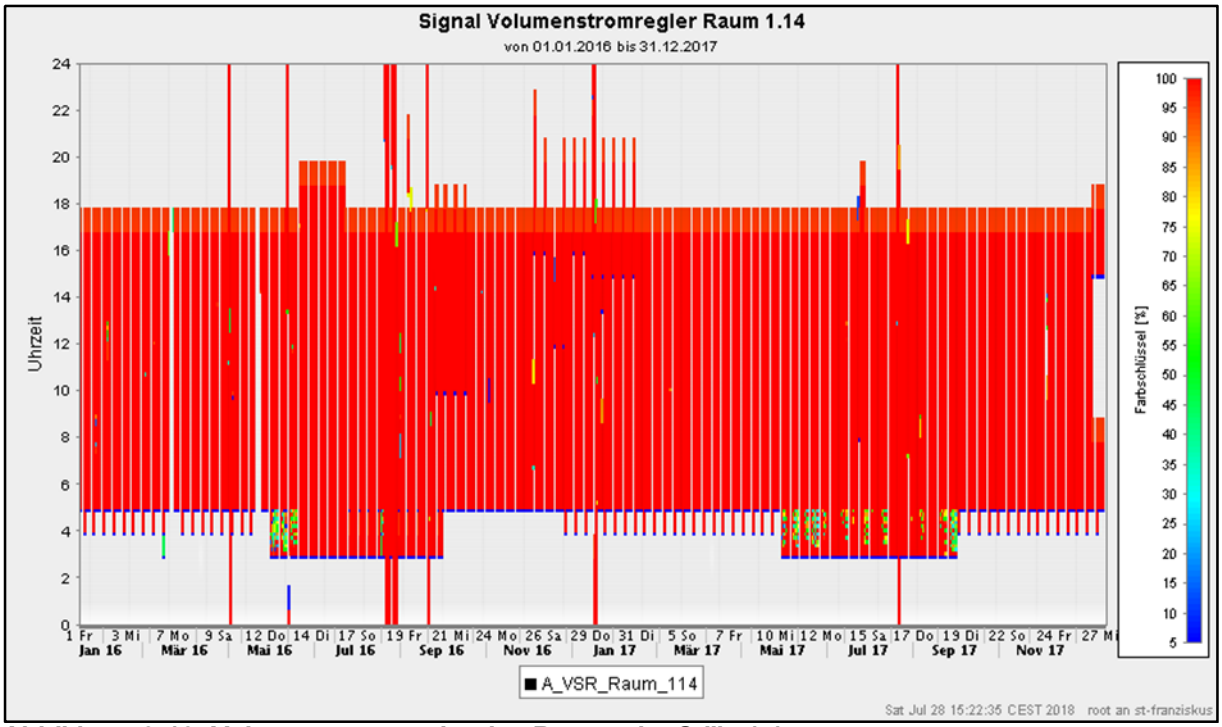

Abbildung 9-13: Volumenstromregler des Raums der Stille 1.14

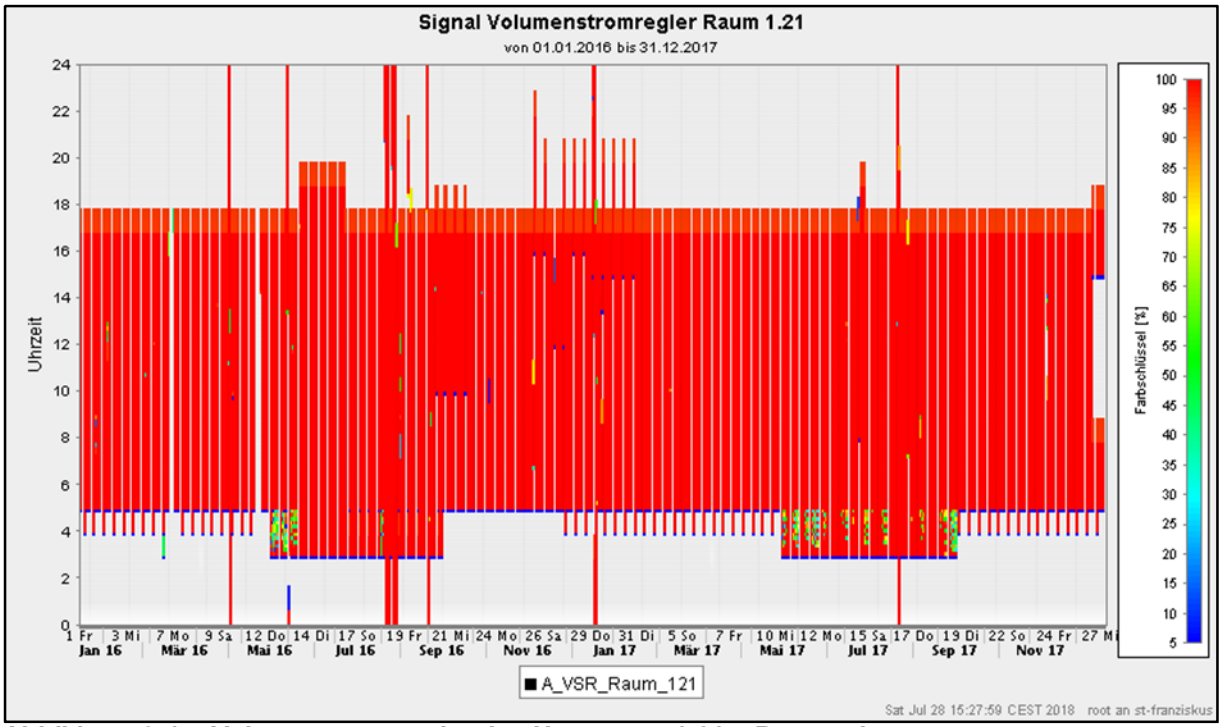

Abbildung 9-14: Volumenstromregler des Hortraums 1.21 – Besprechungsraum

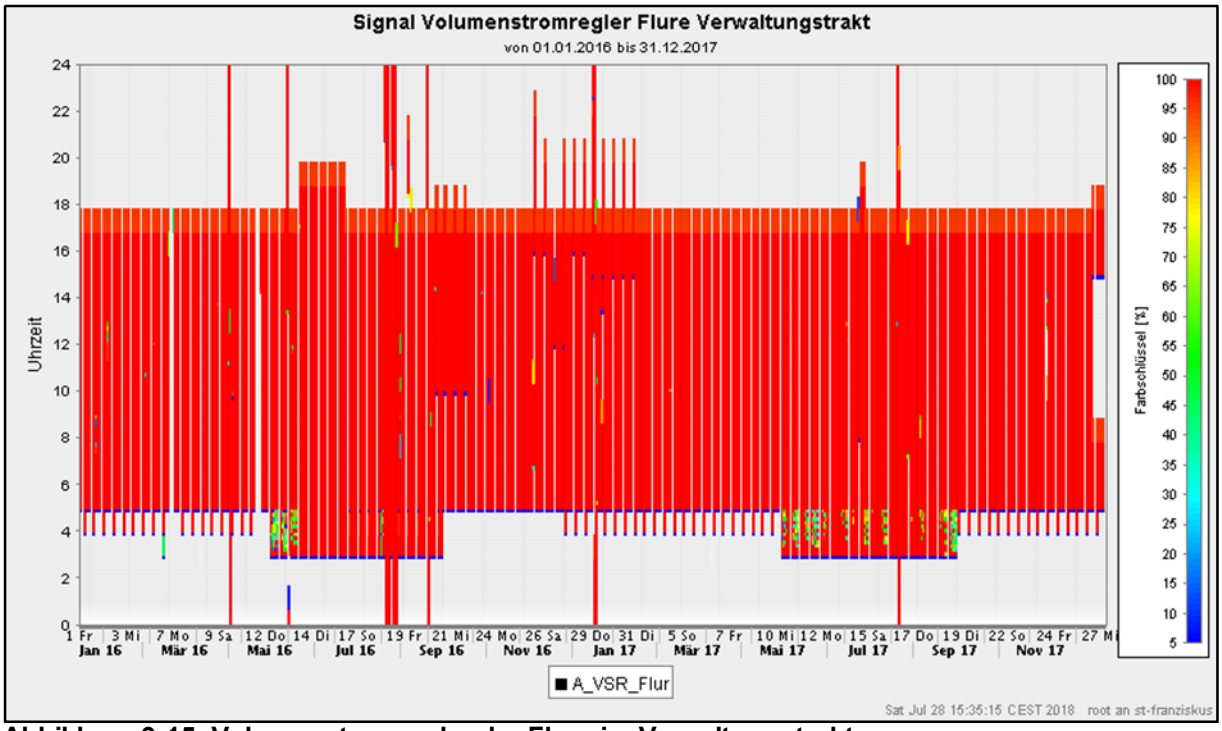

Abbildung 9-15: Volumenstromregler der Flure im Verwaltungstrakt

9.4.3 Wärmerückgewinnung

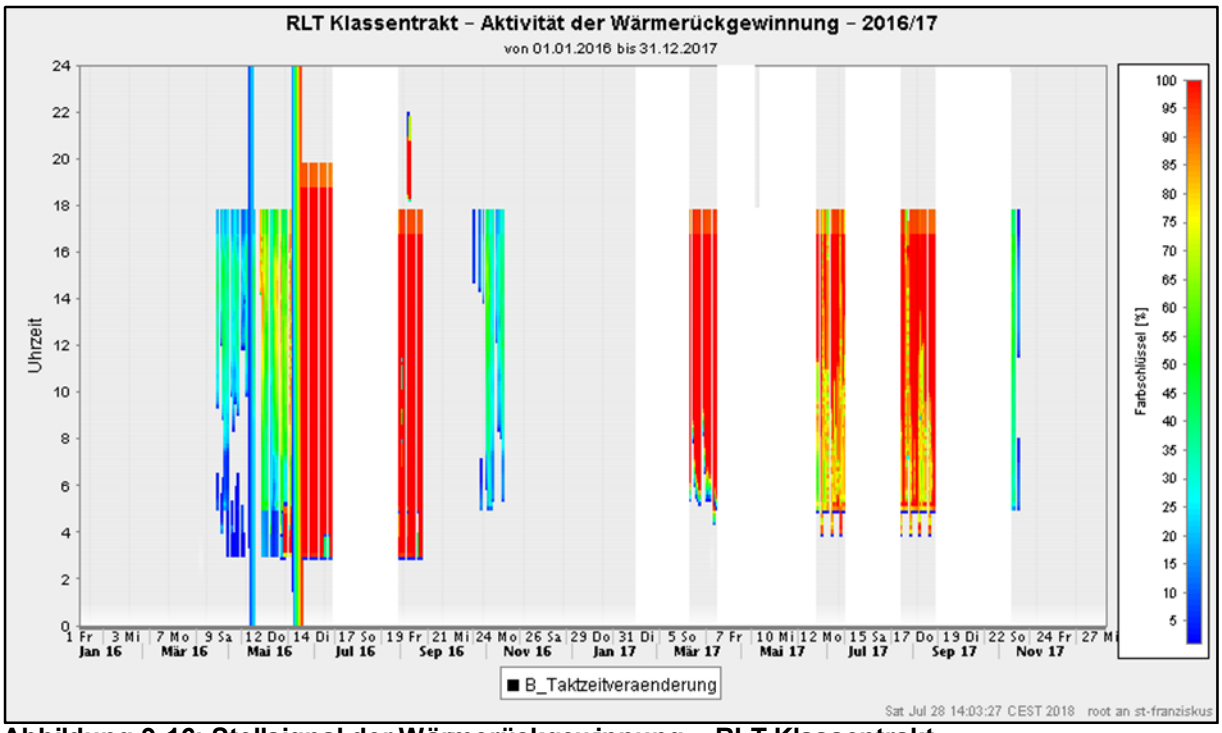

Abbildung 9-16: Stellsignal der Wärmerückgewinnung – RLT Klassentrakt

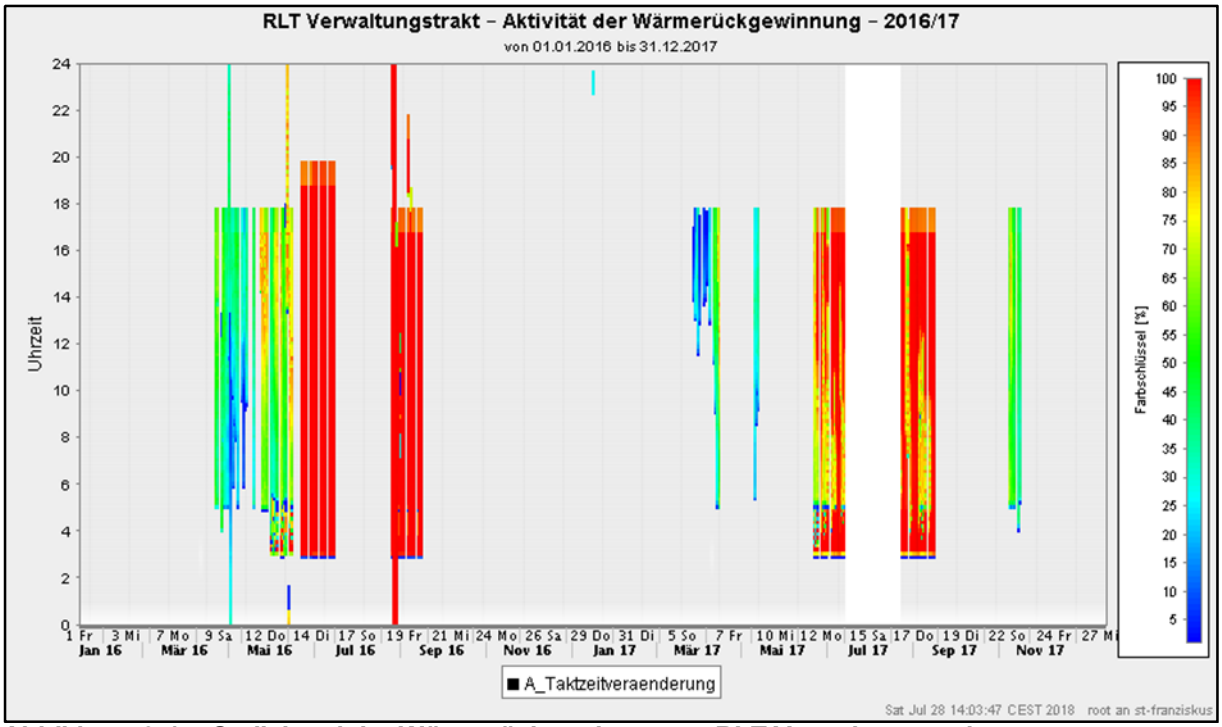

Abbildung 9-17: Stellsignal der Wärmerückgewinnung – RLT Verwaltungstrakt

9.4.4 Heizfunktion

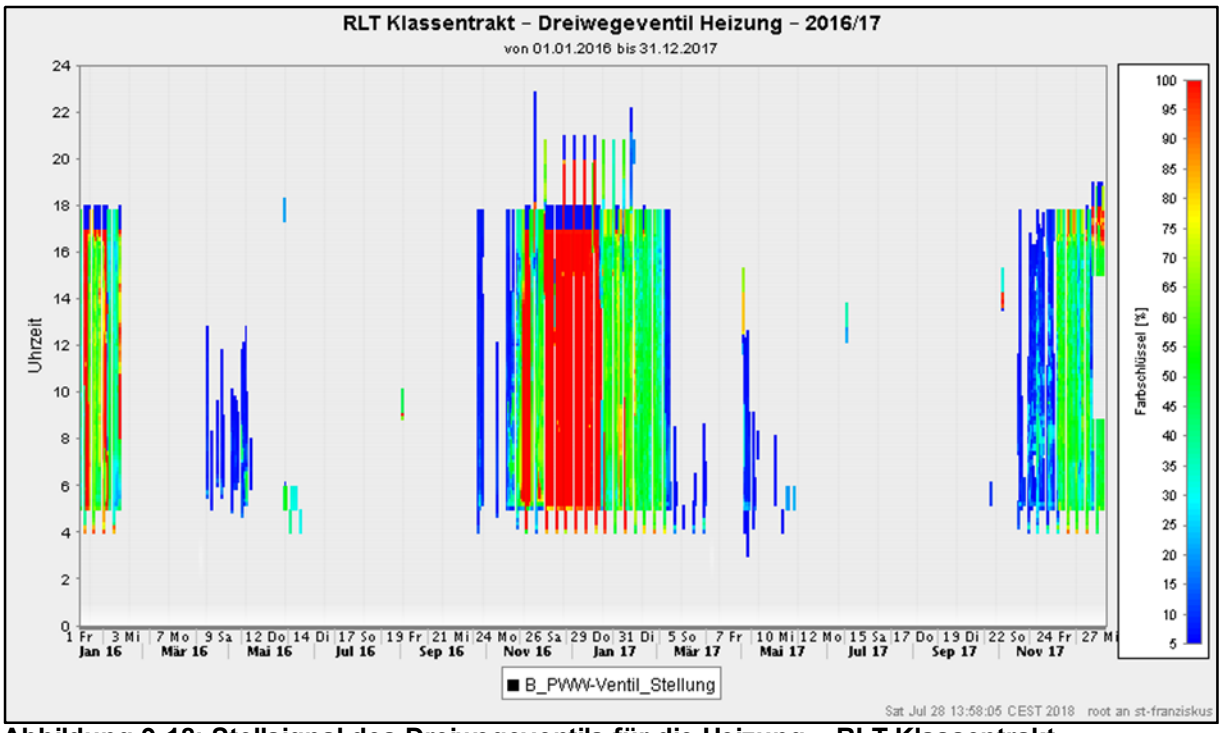

Abbildung 9-18: Stellsignal des Dreiwegeventils für die Heizung – RLT Klassentrakt

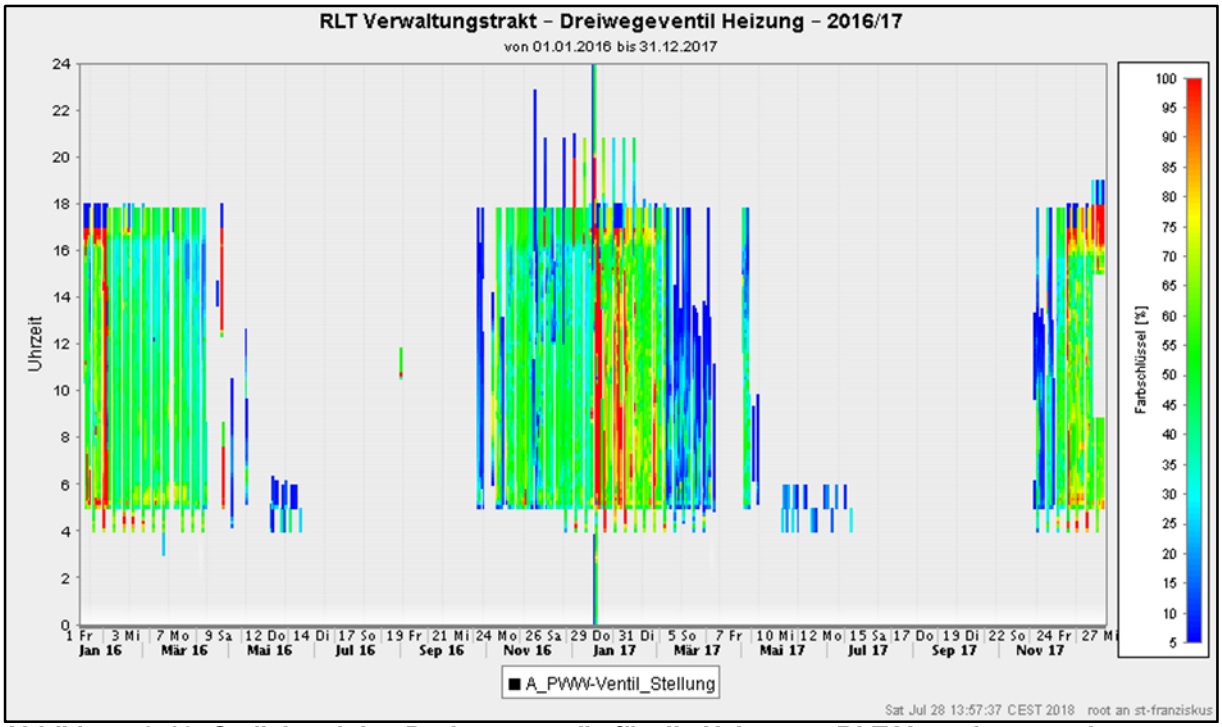

Abbildung 9-19: Stellsignal des Dreiwegeventils für die Heizung – RLT Verwaltungstrakt

9.4.5 Verteilung Ventilatorstrom RLT Klassentrakt

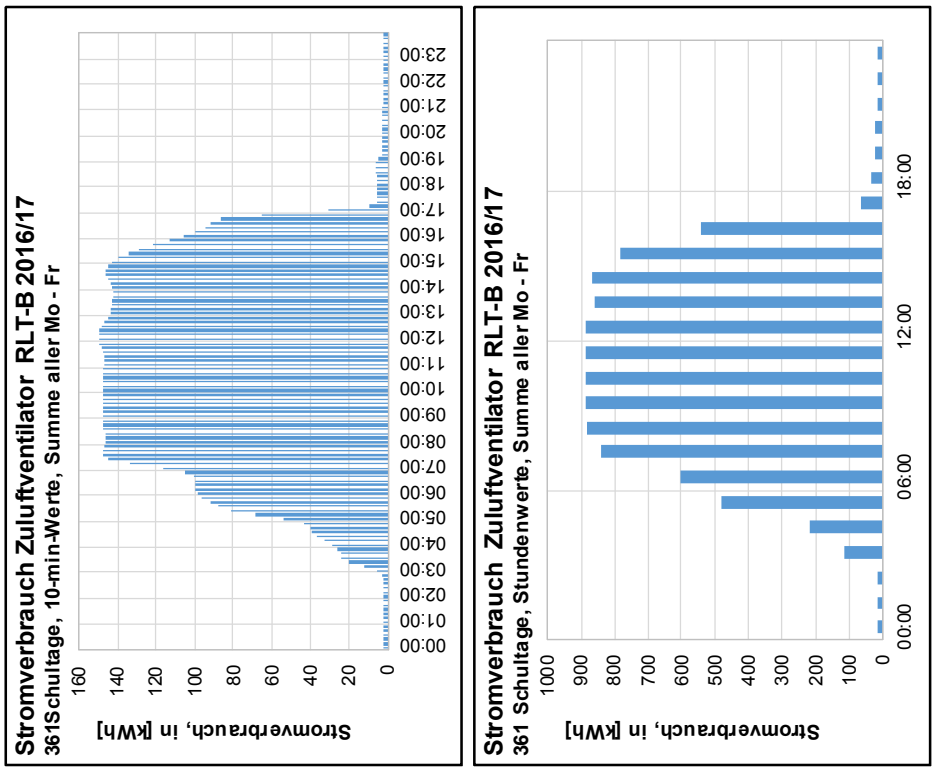

Abbildung 9-20: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Klassentrakt – Schultage

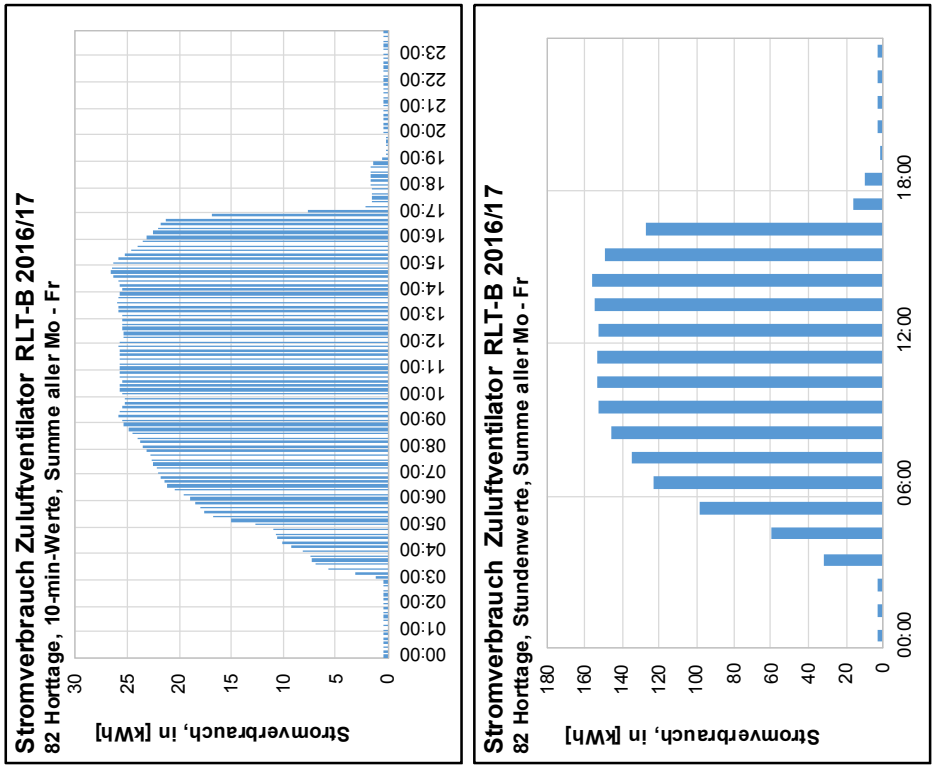

Abbildung 9-21: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Klassentrakt – Ferienhorttage

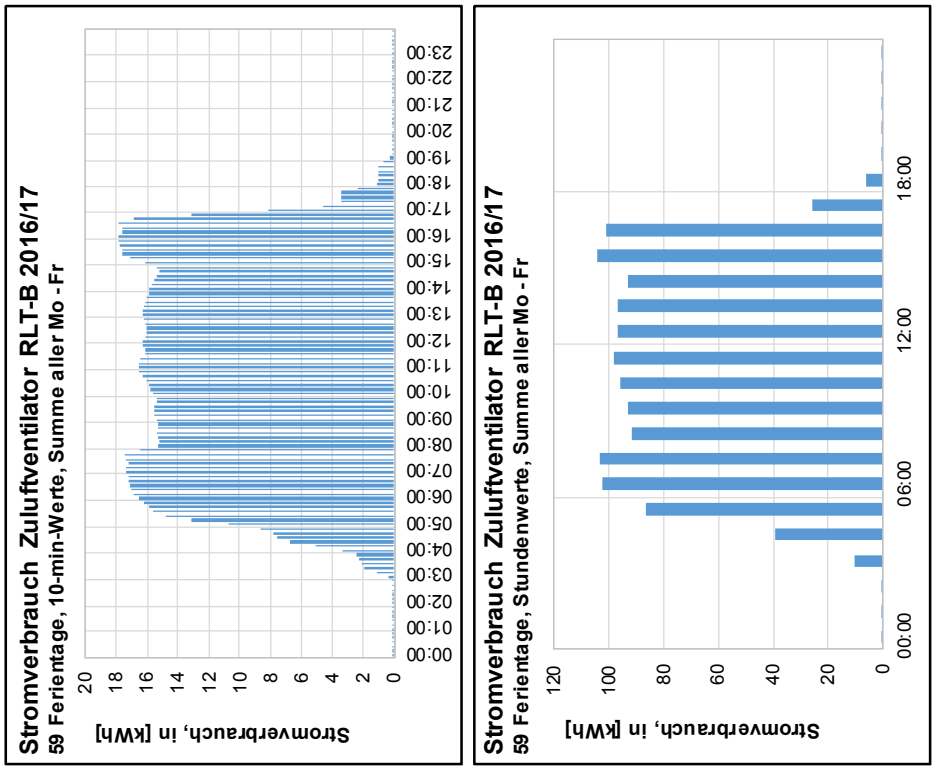

Abbildung 9-22: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Klassentrakt – Schließtage

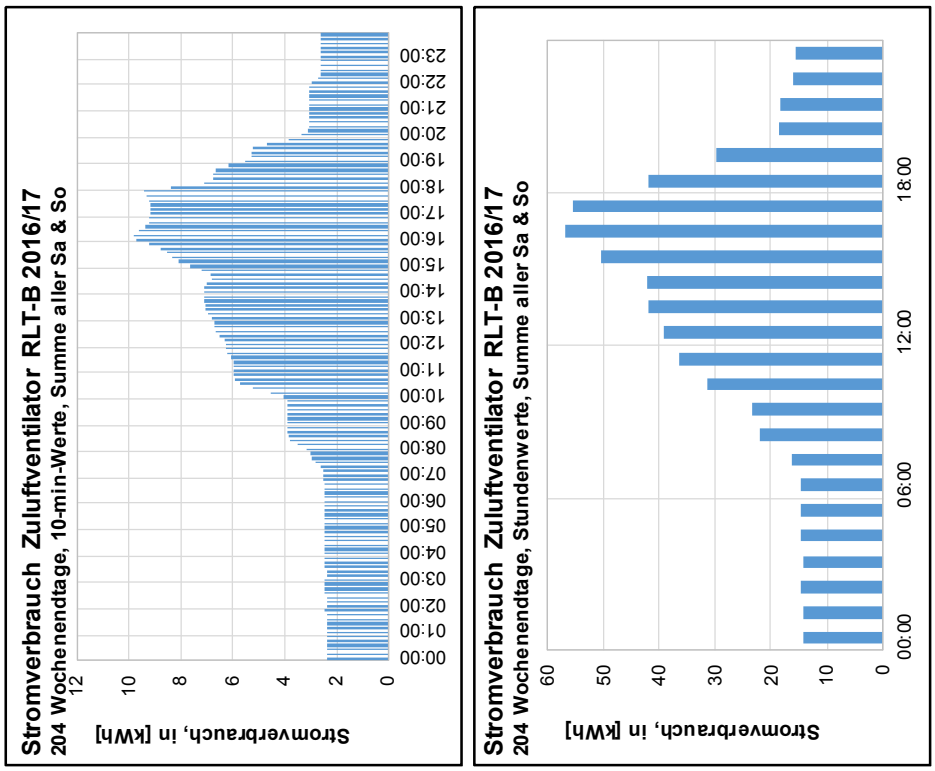

Abbildung 9-23: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Klassentrakt – Wochenende

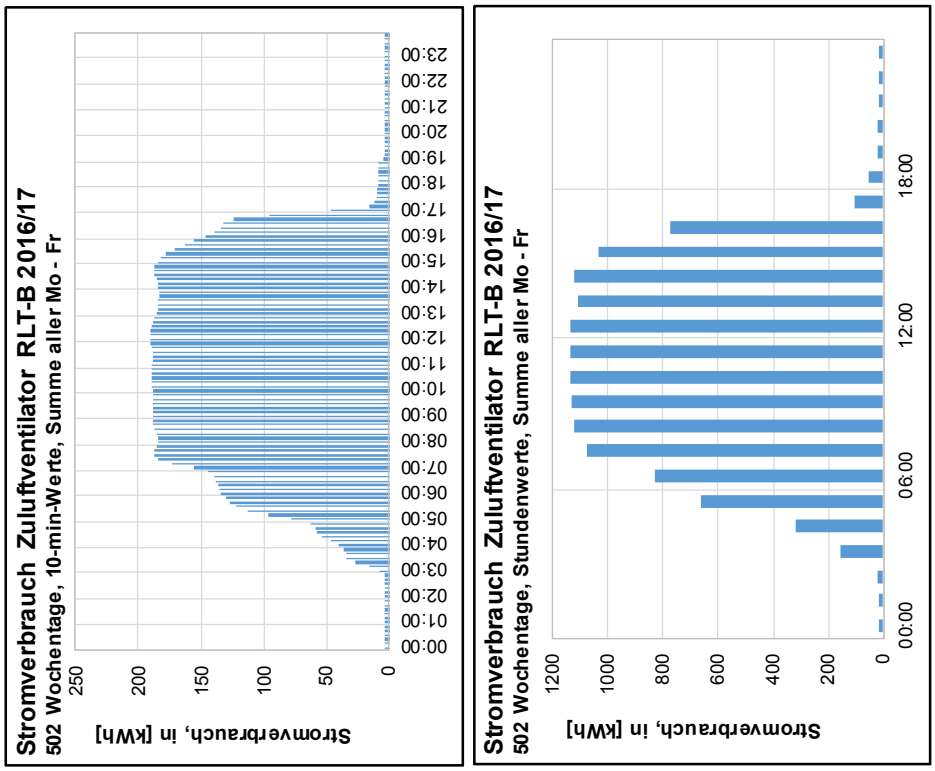

Abbildung 9-24: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Klassentrakt – Wochentage

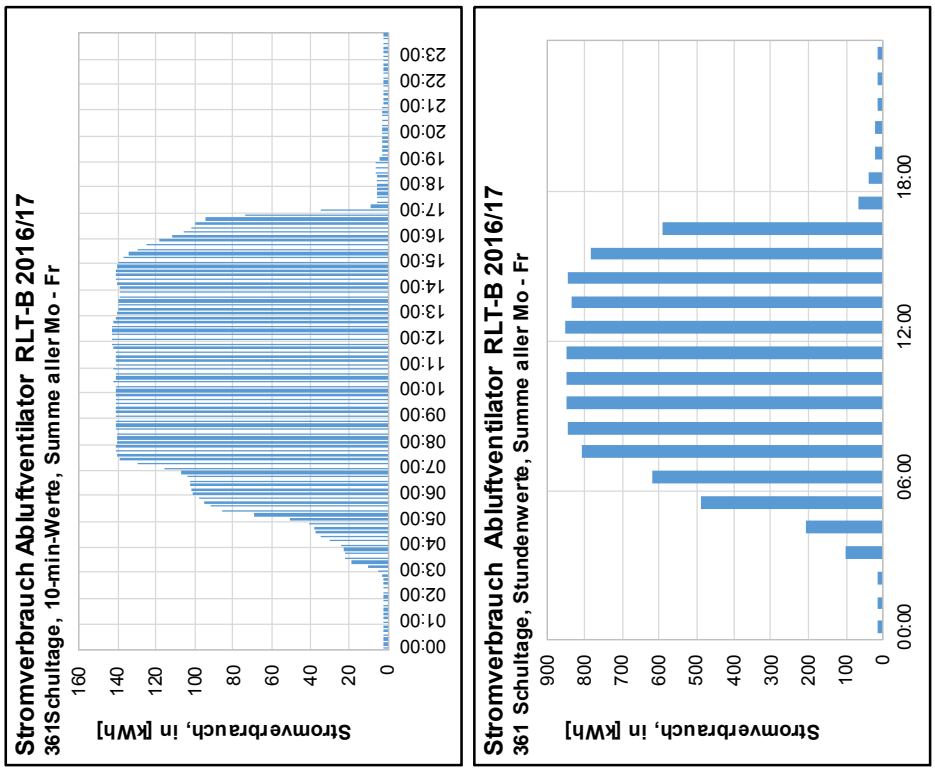

Abbildung 9-25: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Klassentrakt – Schultage

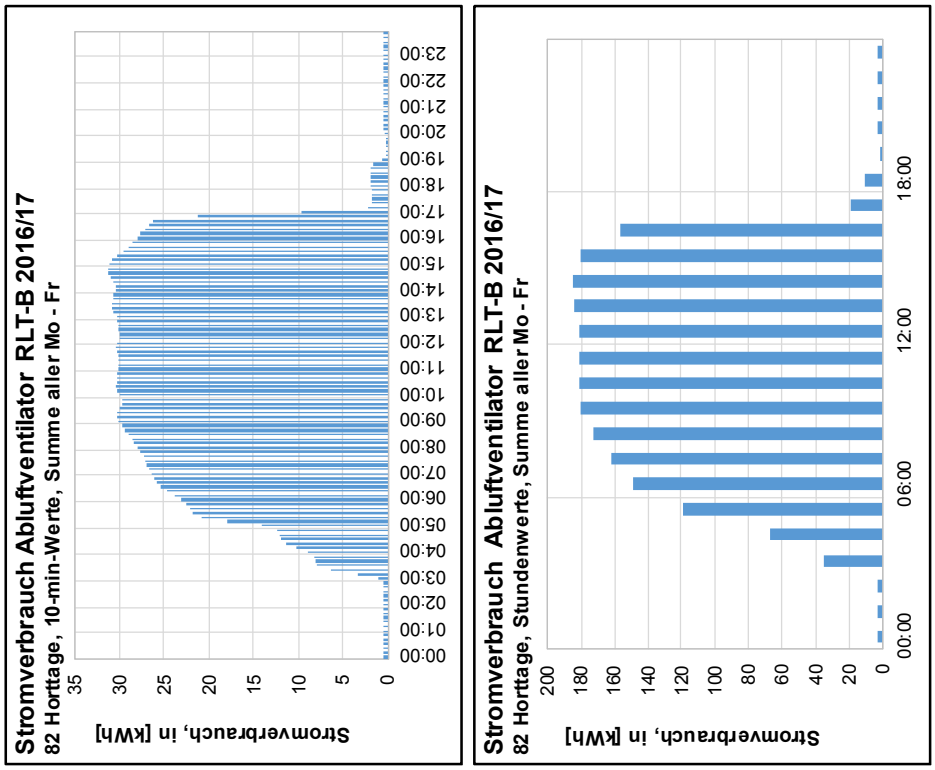

Abbildung 9-26: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Klassentrakt – Ferienhorttage

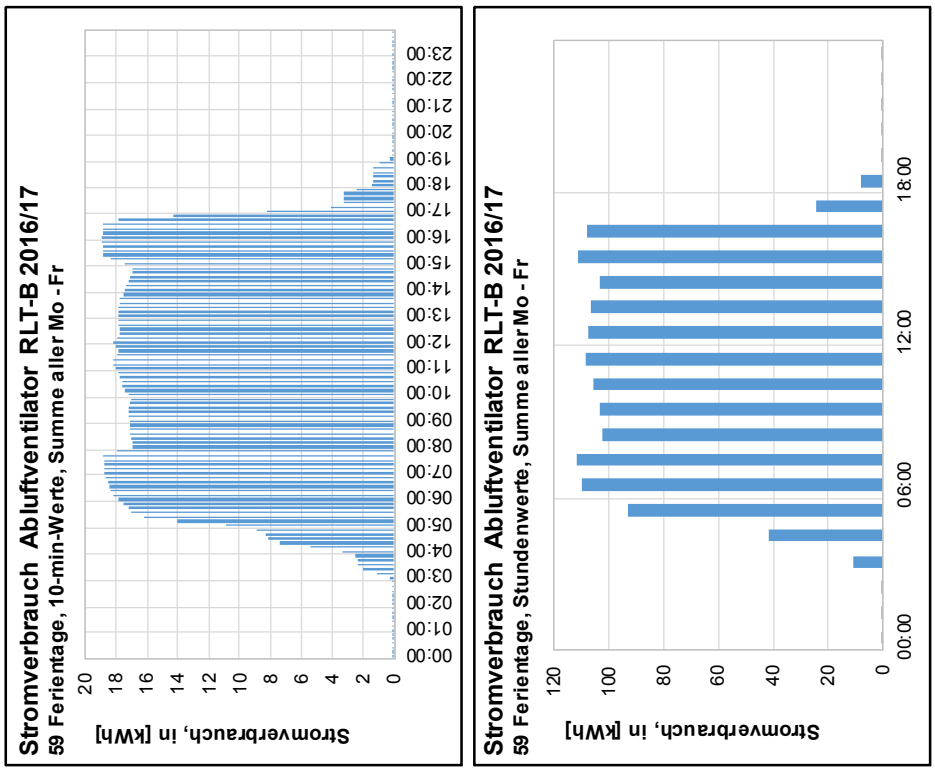

Abbildung 9-27: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Klassentrakt – Schließtage

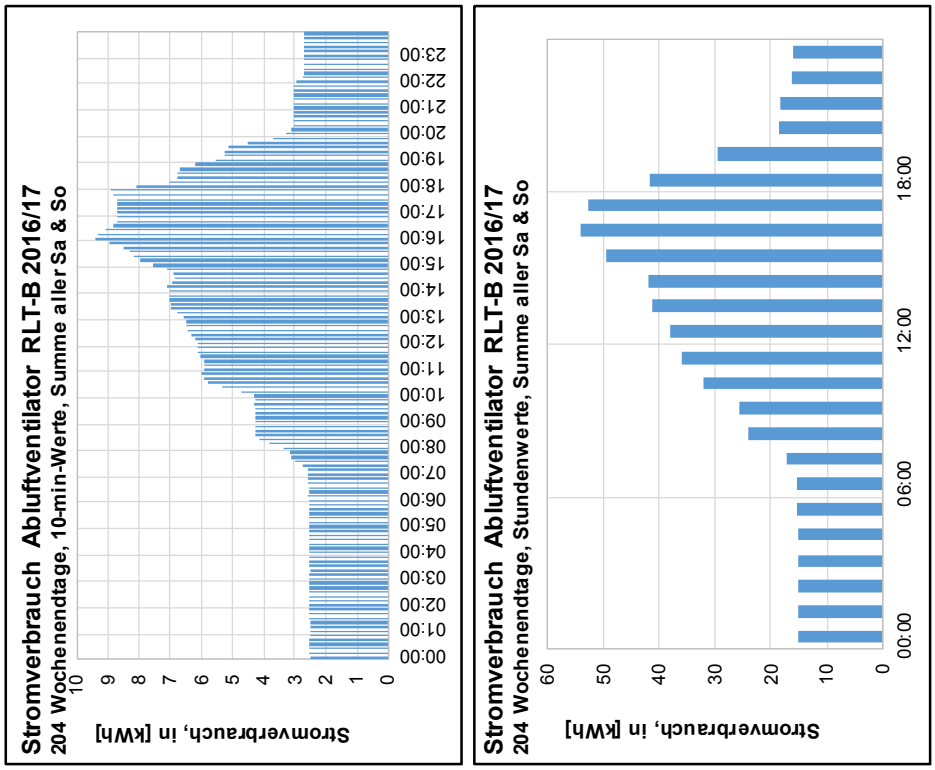

Abbildung 9-28: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Klassentrakt – Wochenenden

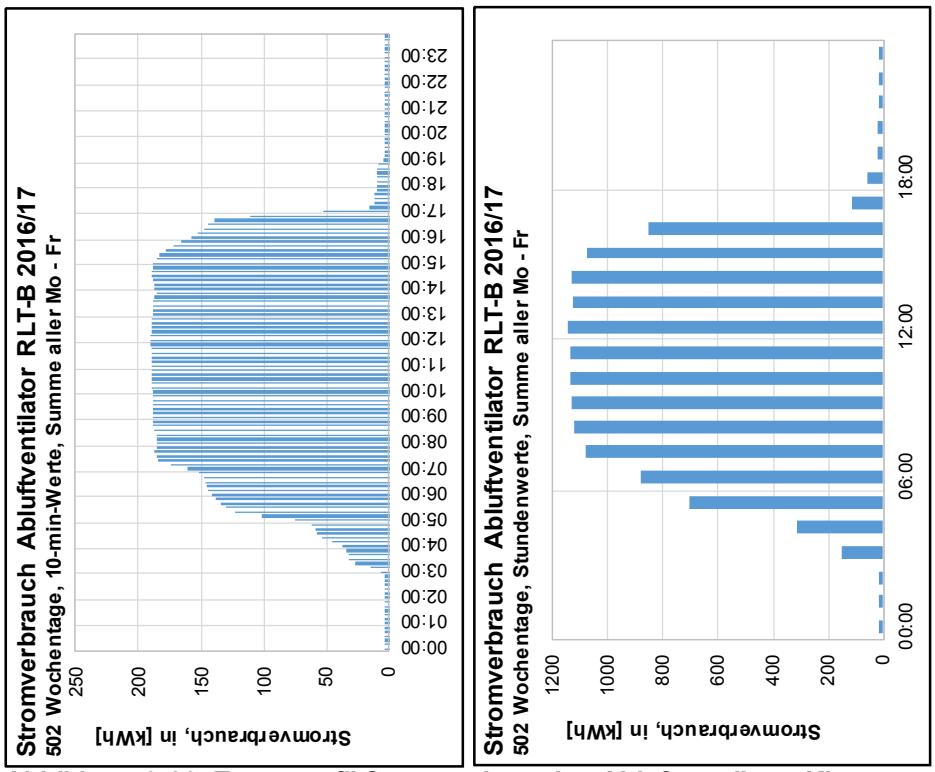

Abbildung 9-29: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Klassentrakt – Wochentage

9.4.6 Verteilung Ventilatorstrom RLT Verwaltungstrakt

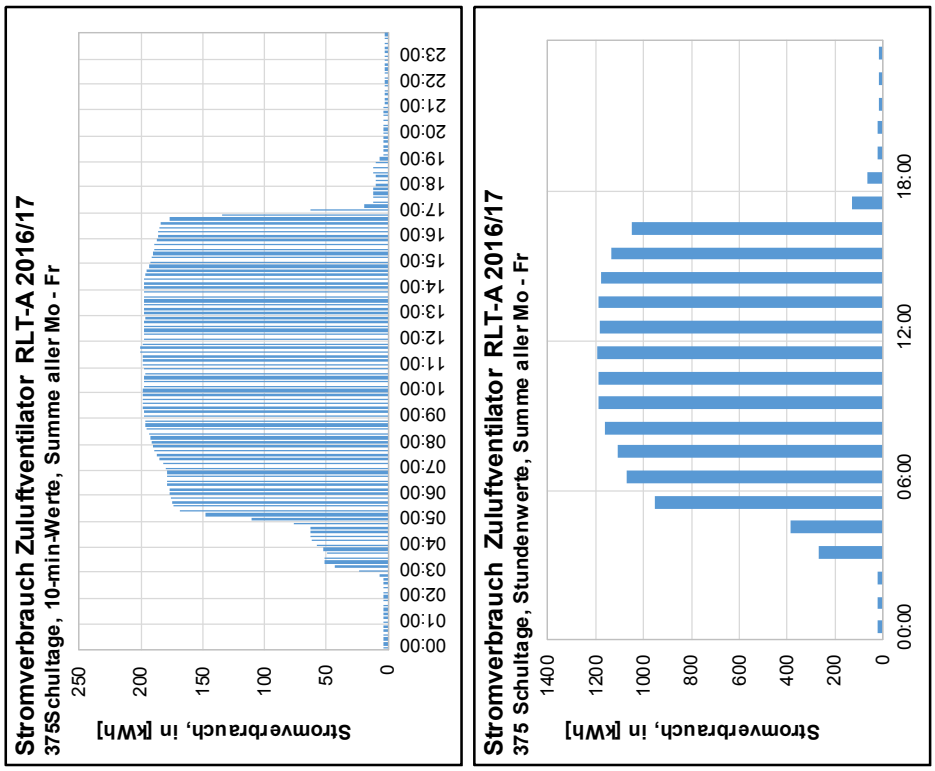

Abbildung 9-30: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Verwaltungstrakt – Schultage

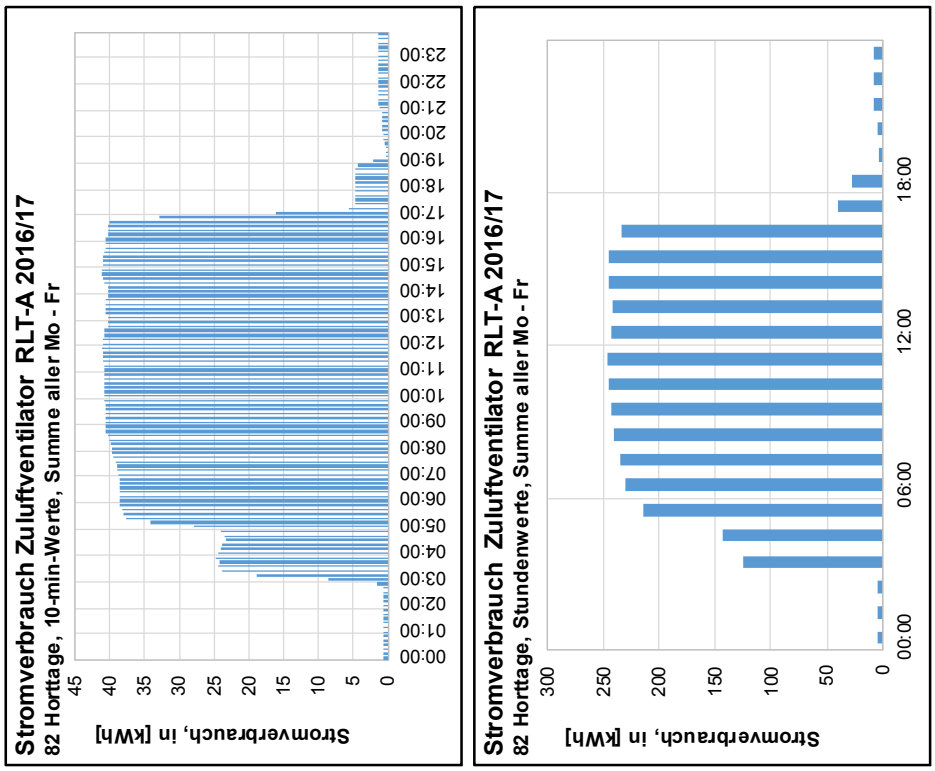

Abbildung 9-31: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Verwaltungstrakt – Horttage

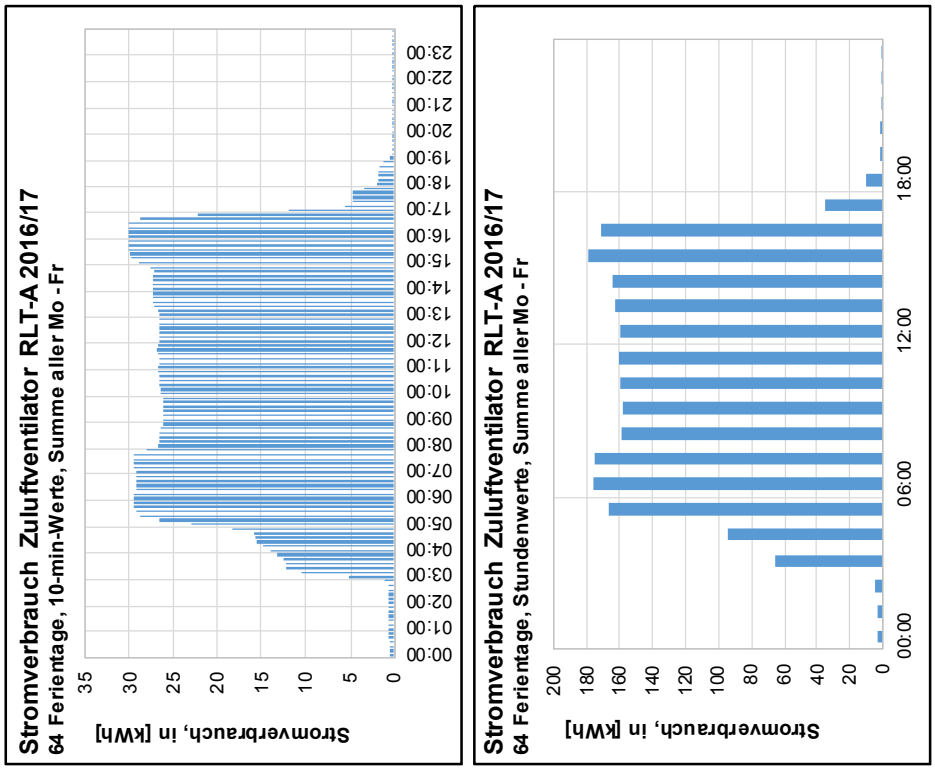

Abbildung 9-32: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Verwaltungstrakt – Schließtage

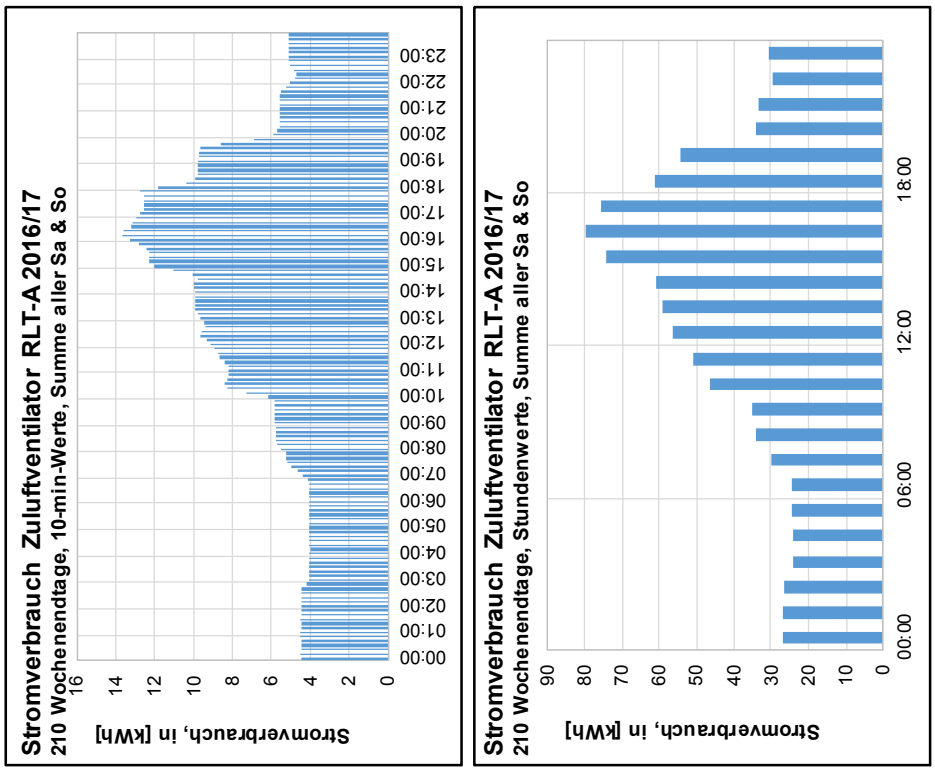

Abbildung 9-33: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Verwaltungstrakt – Wochenende

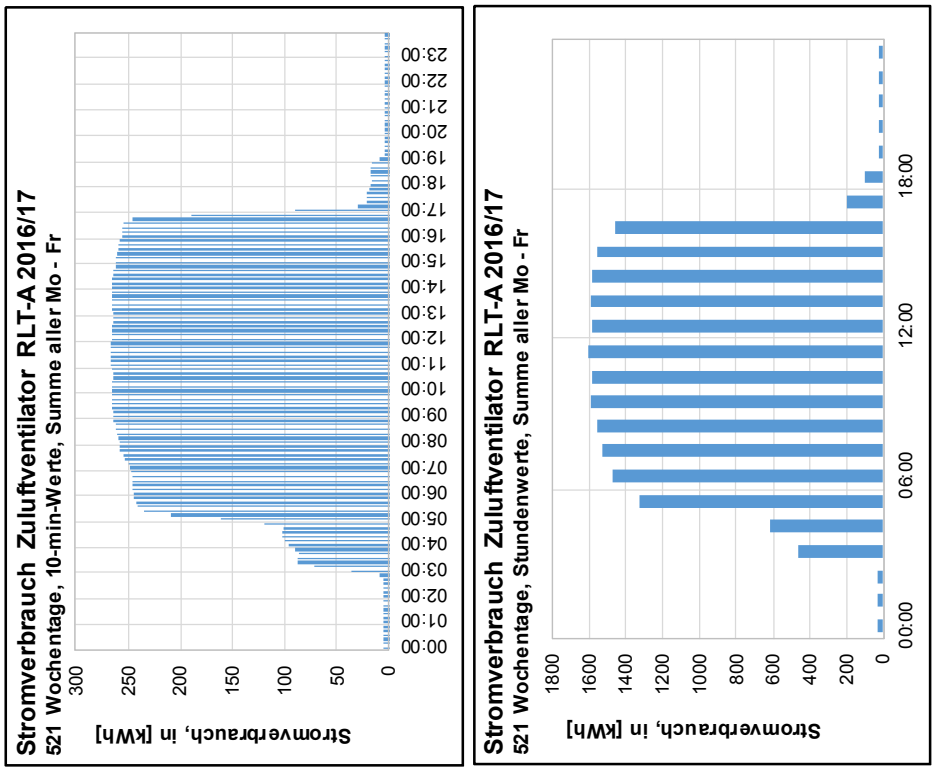

Abbildung 9-34: Tagesprofil Stromverbrauch – Zuluftventilator Verwaltungstrakt – Wochentage

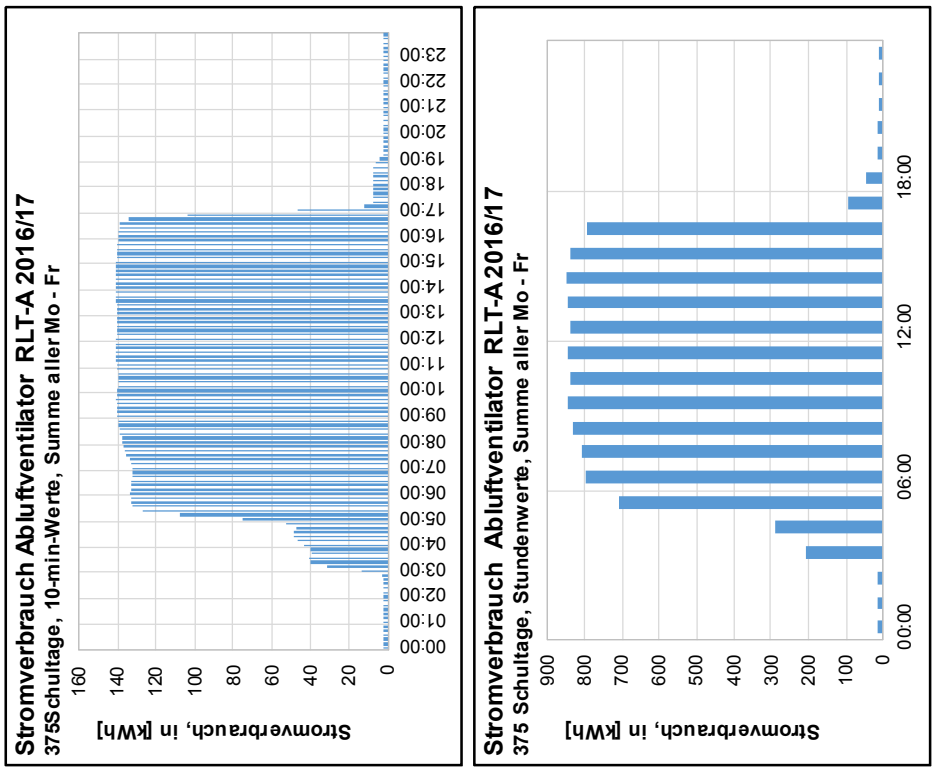

Abbildung 9-35: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Verwaltungstrakt – Schultage

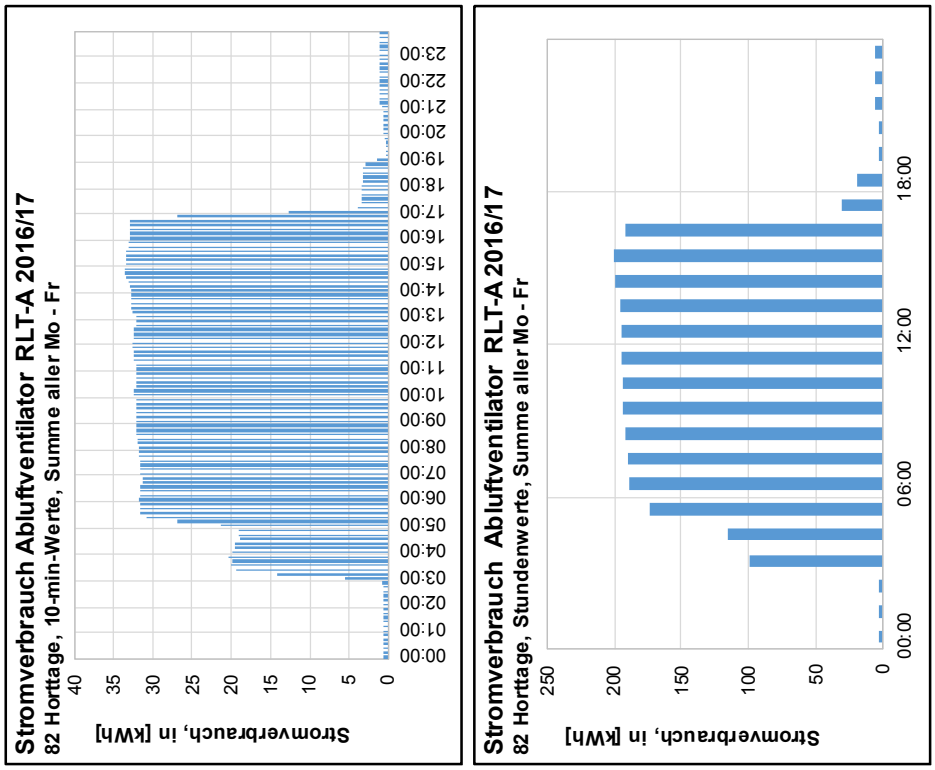

Abbildung 9-36: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Verwaltungstrakt – Horttage

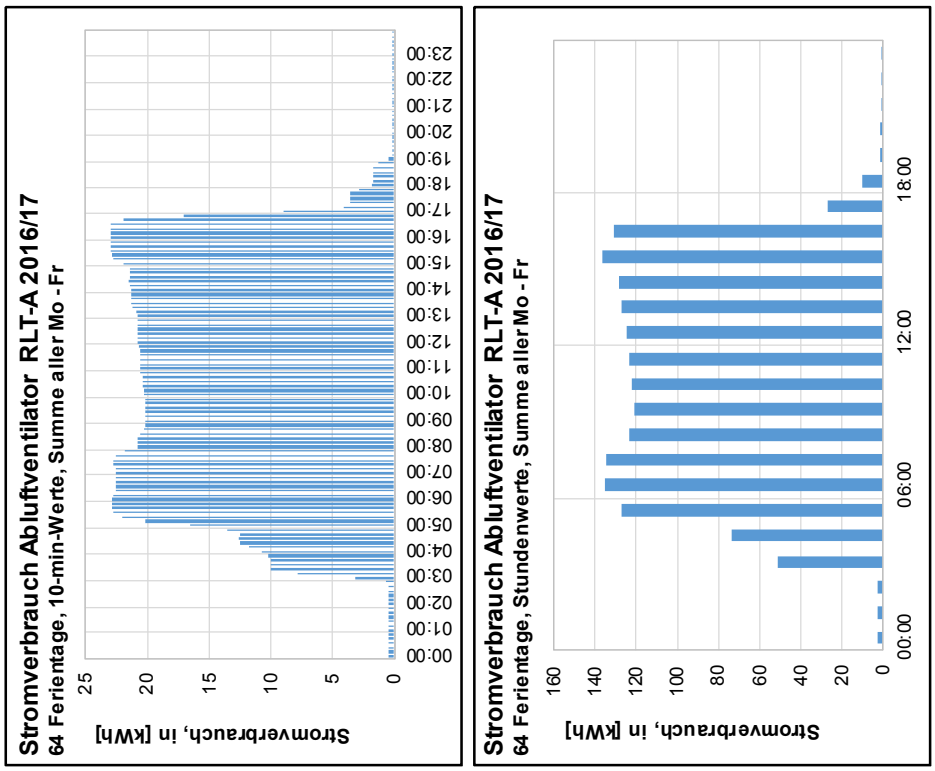

Abbildung 9-37: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Verwaltungstrakt – Schließtage

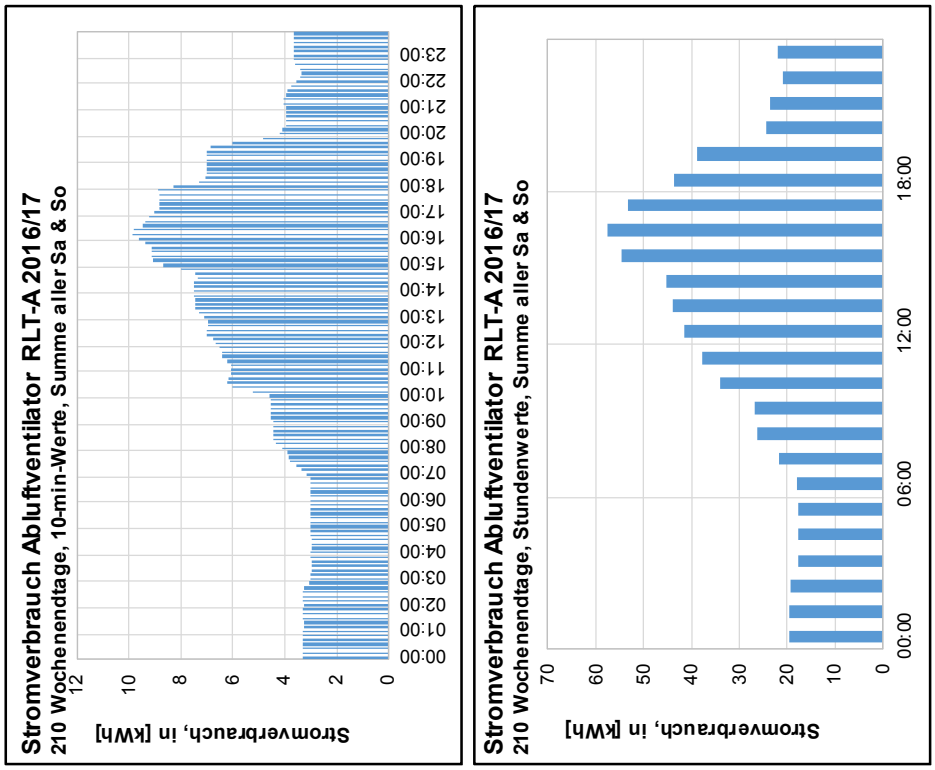

Abbildung 9-38: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Verwaltungstrakt – Wochenende

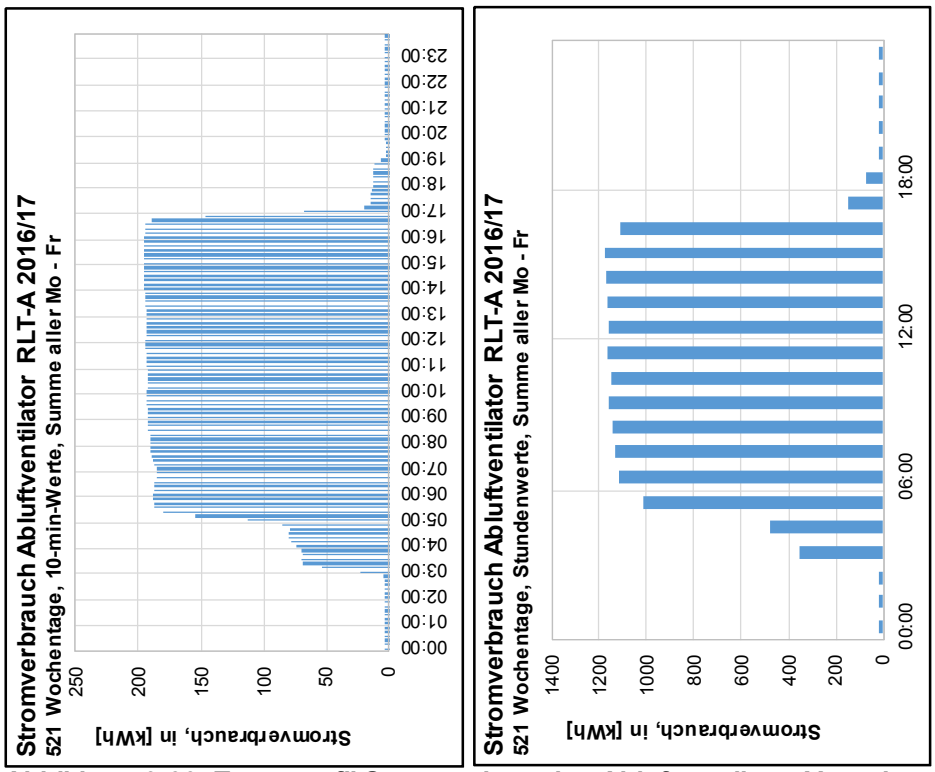

Abbildung 9-39: Tagesprofil Stromverbrauch – Abluftventilator Verwaltungstrakt – Wochentage

9.4.7 Verteilung Volumenstrom RLT Klassentrakt

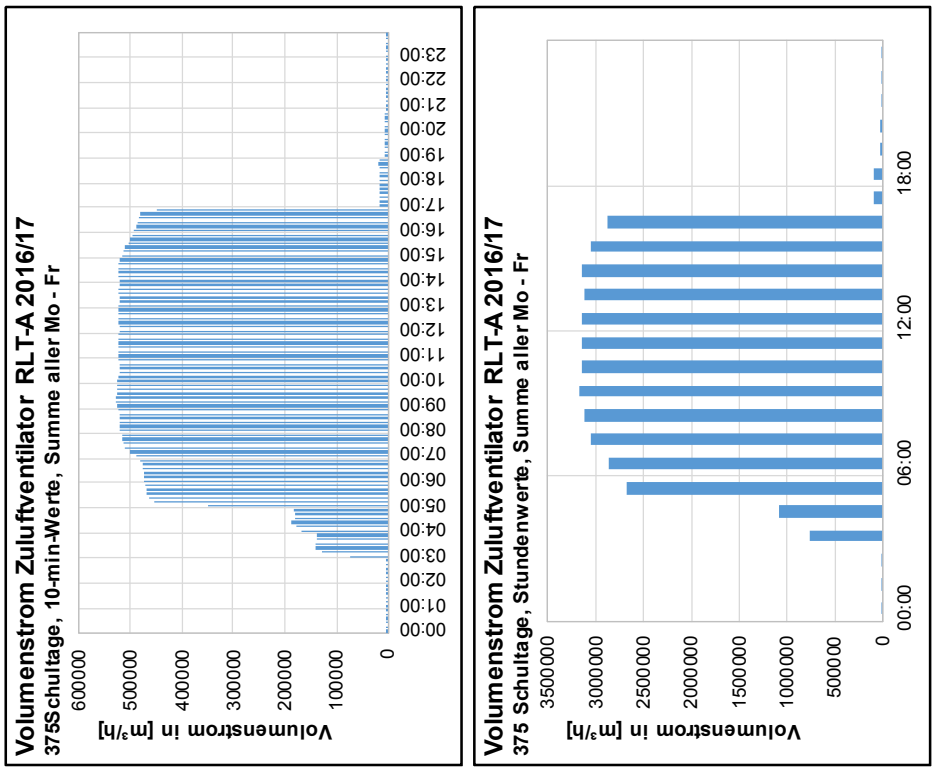

Abbildung 9-40: Tagesprofil Volumenstrom – Zuluftventilator Klassentrakt – Schultage

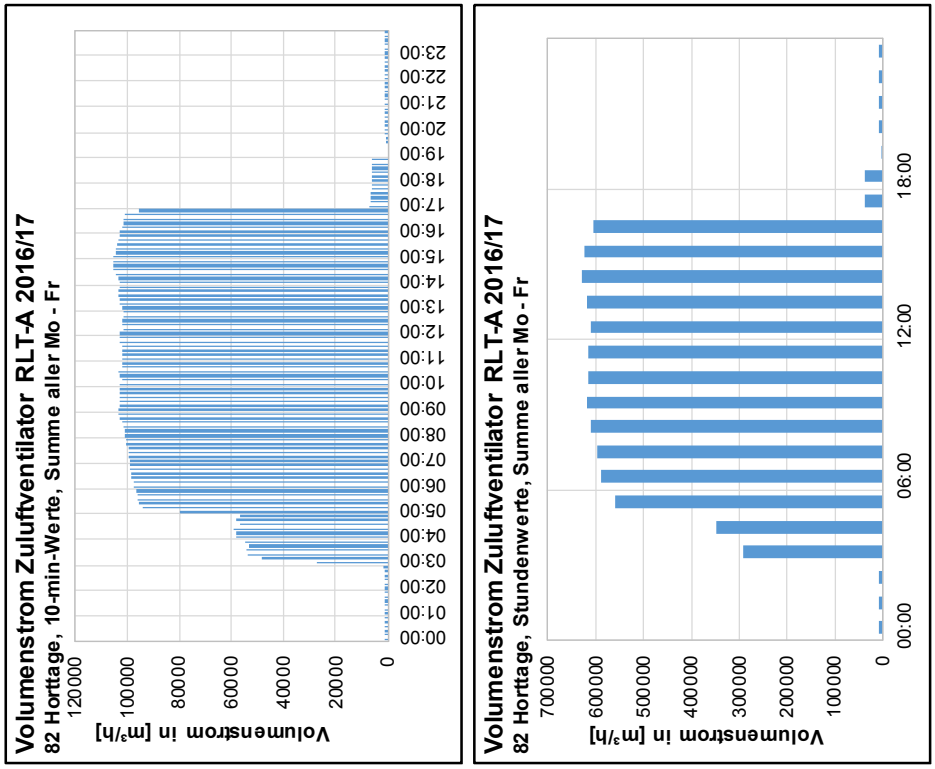

Abbildung 9-41: Tagesprofil Volumenstrom – Zuluftventilator Klassentrakt – Ferienhorttage

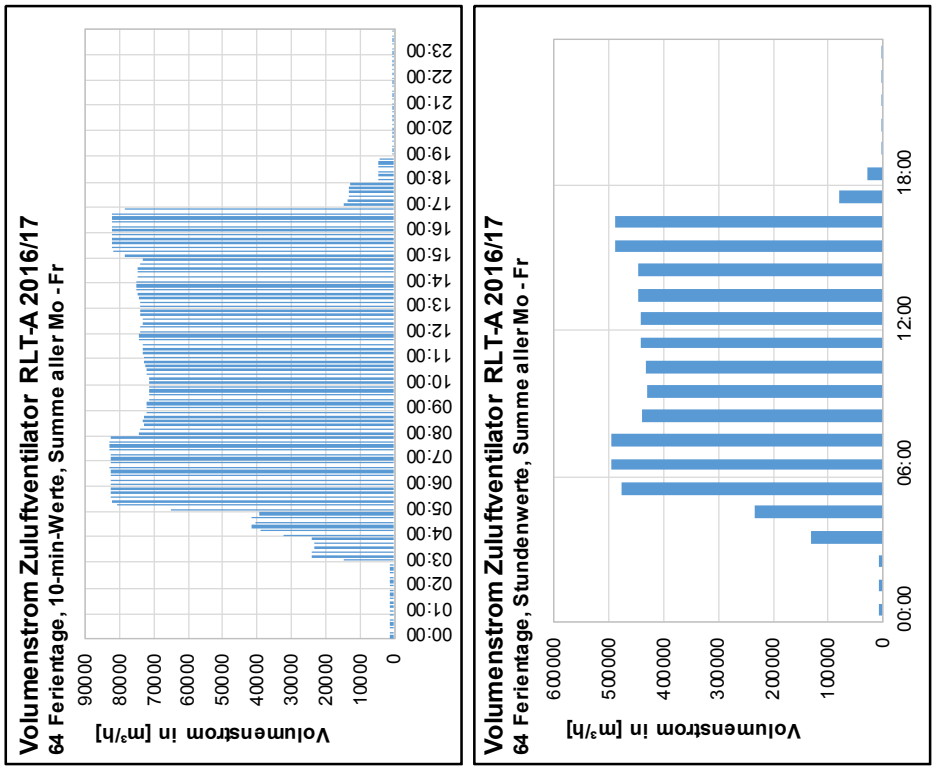

Abbildung 9-42: Tagesprofil Volumenstrom – Zuluftventilator Klassentrakt – Schließtage

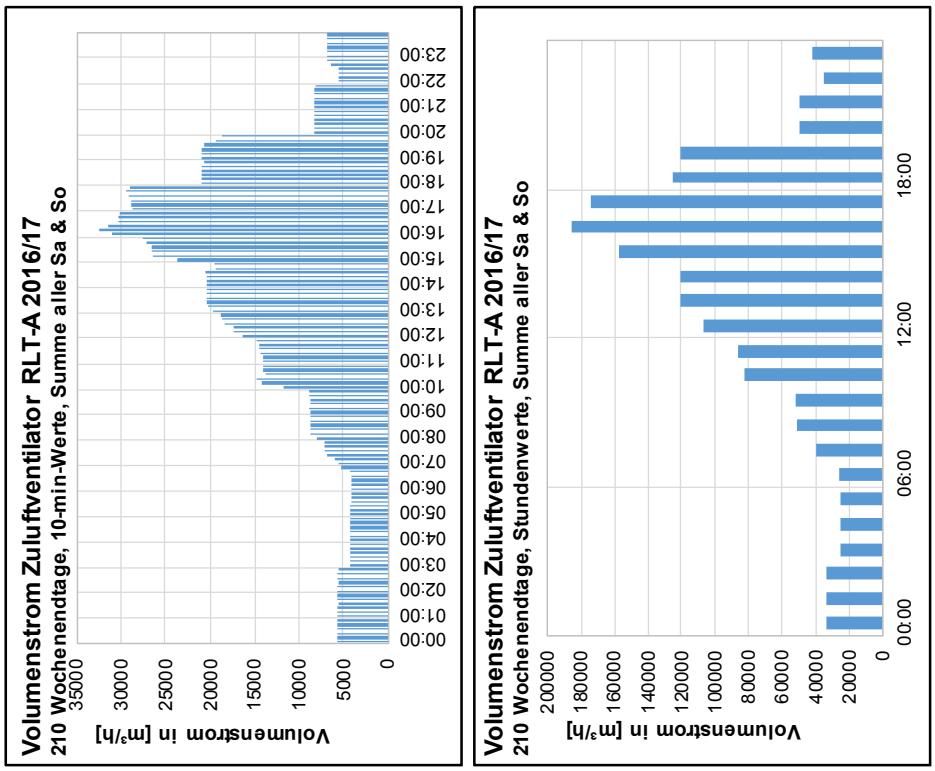

Abbildung 9-43: Tagesprofil Volumenstrom – Zuluftventilator Klassentrakt – Wochenende

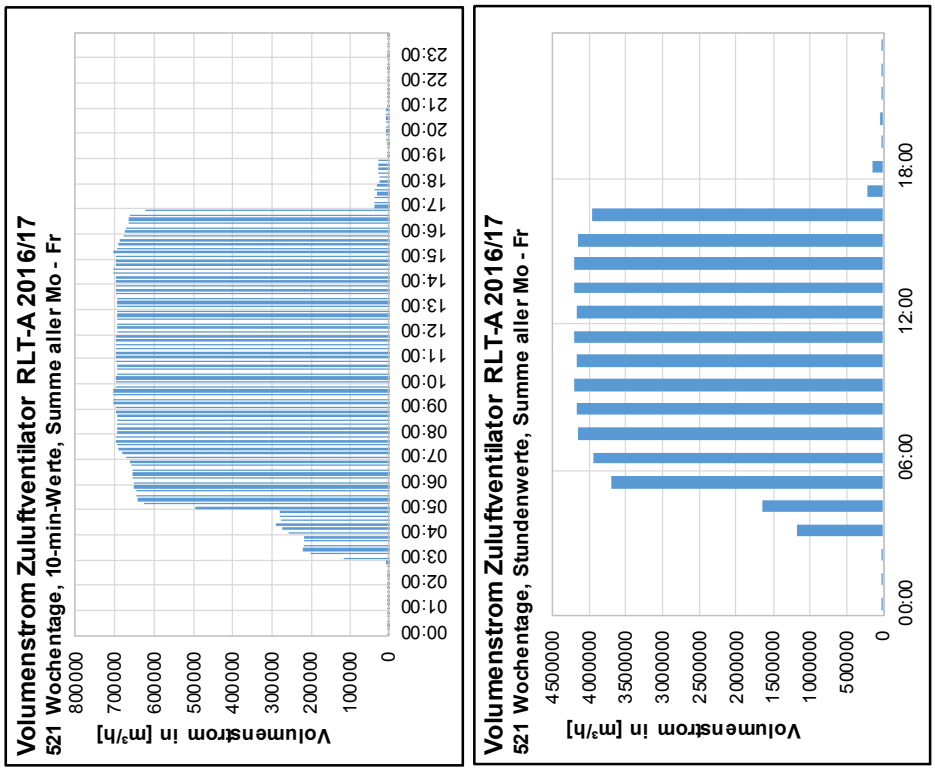

Abbildung 9-44: Tagesprofil Volumenstrom – Zuluftventilator Klassentrakt – Wochentage

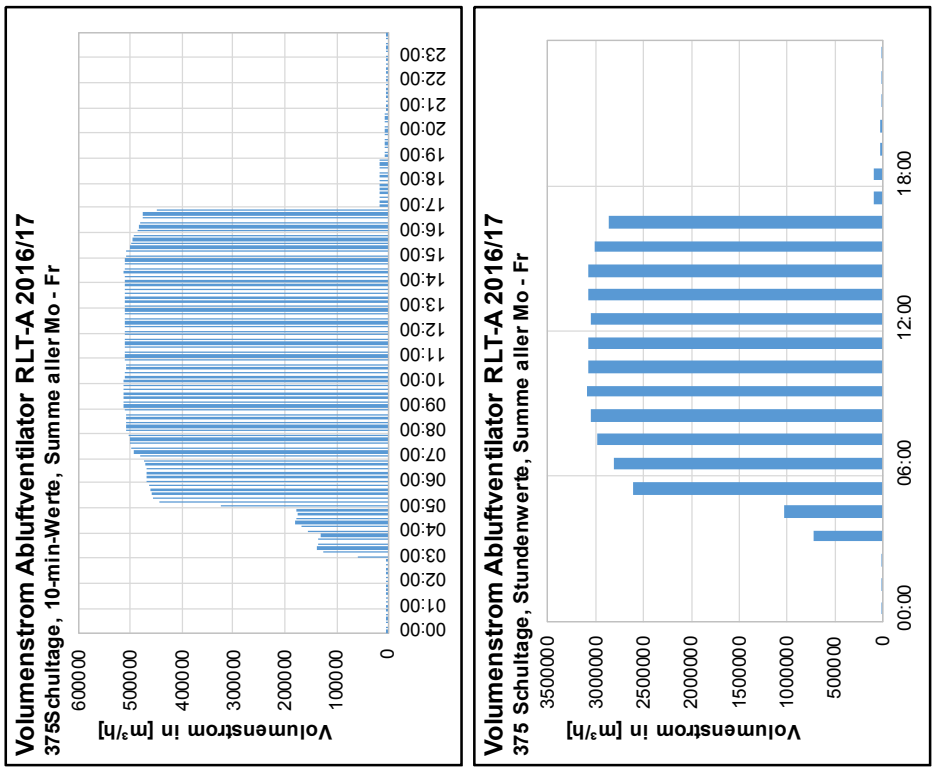

Abbildung 9-45: Tagesprofil Volumenstrom – Abluftventilator Klassentrakt – Schultage

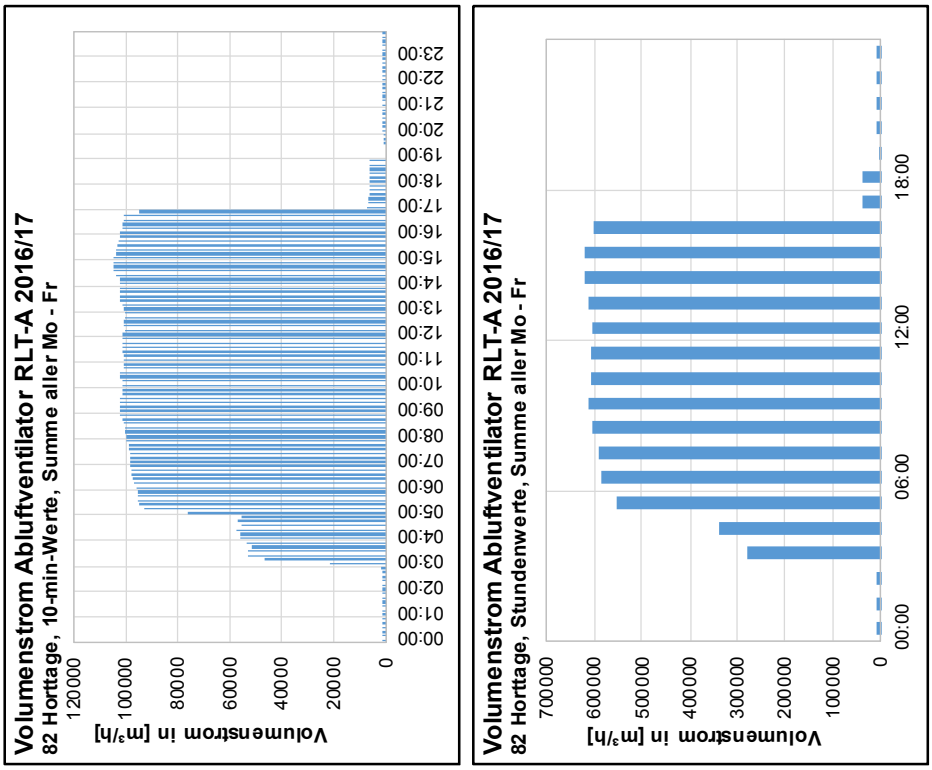

Abbildung 9-46: Tagesprofil Volumenstrom – Abluftventilator Klassentrakt – Ferienhorttage

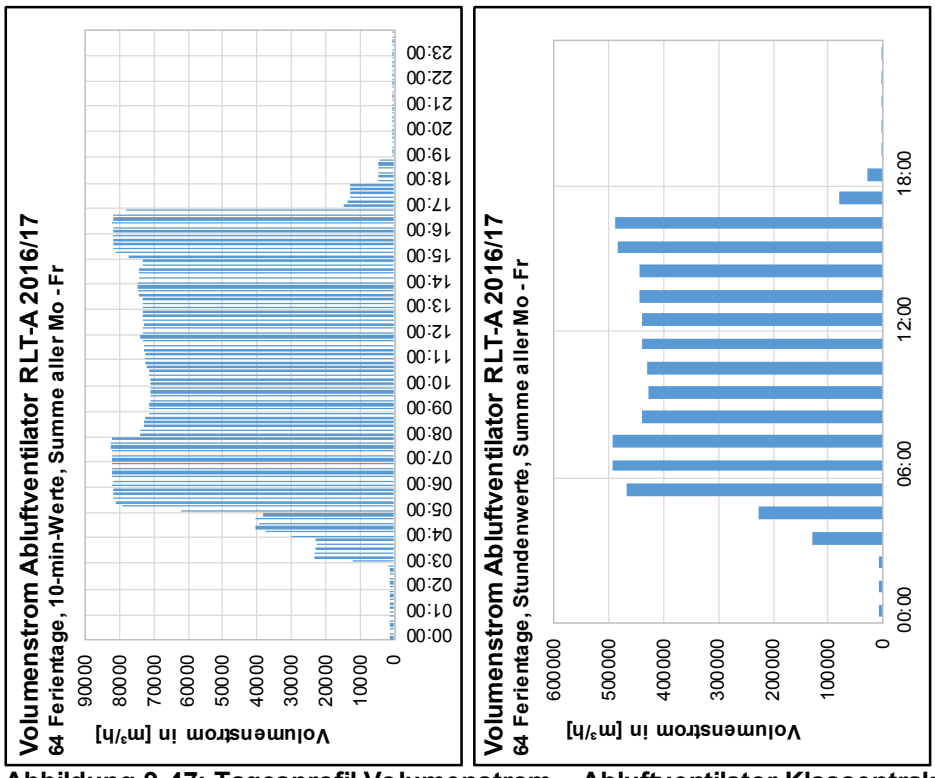

Abbildung 9-47: Tagesprofil Volumenstrom – Abluftventilator Klassentrakt – Schließtage

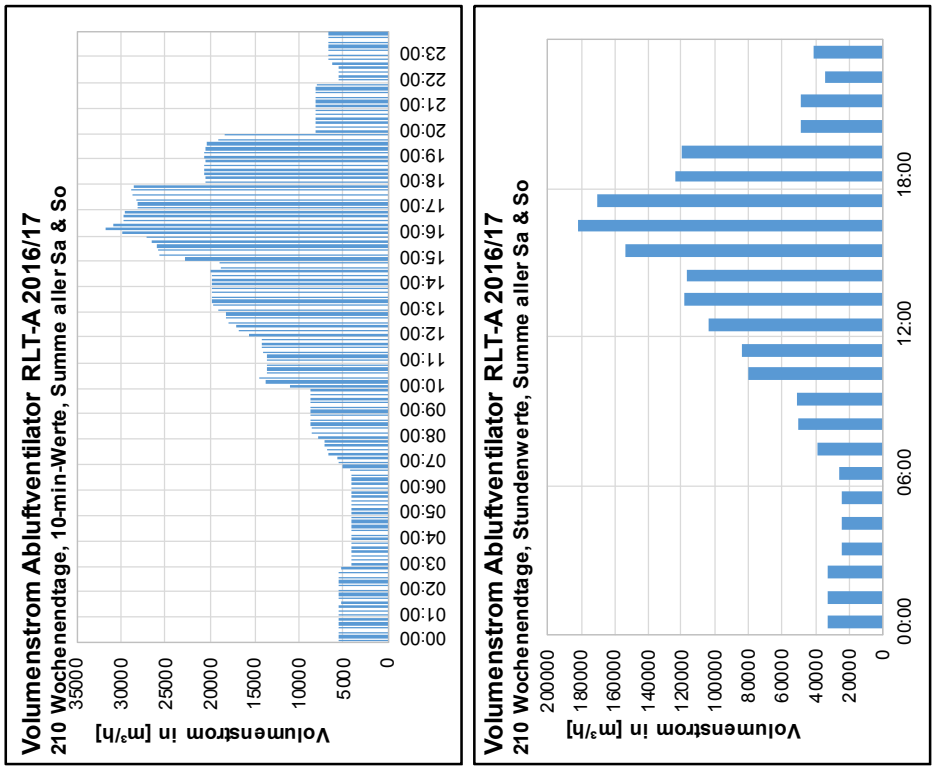

Abbildung 9-48: Tagesprofil Volumenstrom – Abluftventilator Klassentrakt – Wochenenden

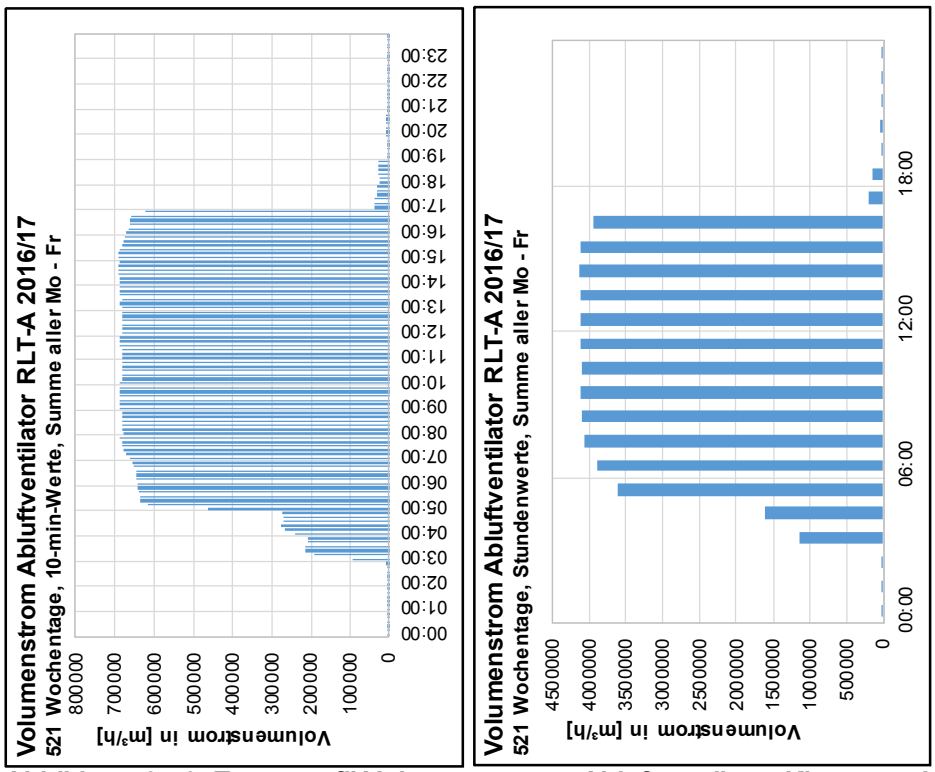

Abbildung 9-49: Tagesprofil Volumenstrom – Abluftventilator Klassentrakt – Wochentage

9.4.8 Verteilung Volumenstrom RLT Verwaltungstrakt

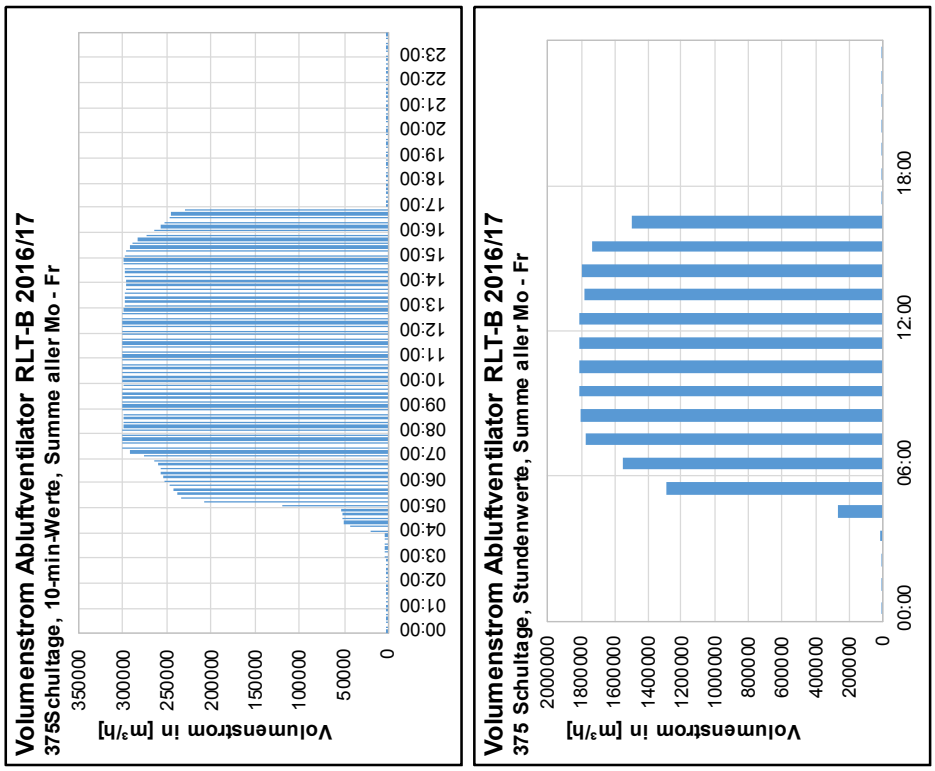

Abbildung 9-50: Tagesprofil Volumenstrom – Zuluftventilator Verwaltungstrakt – Schultage

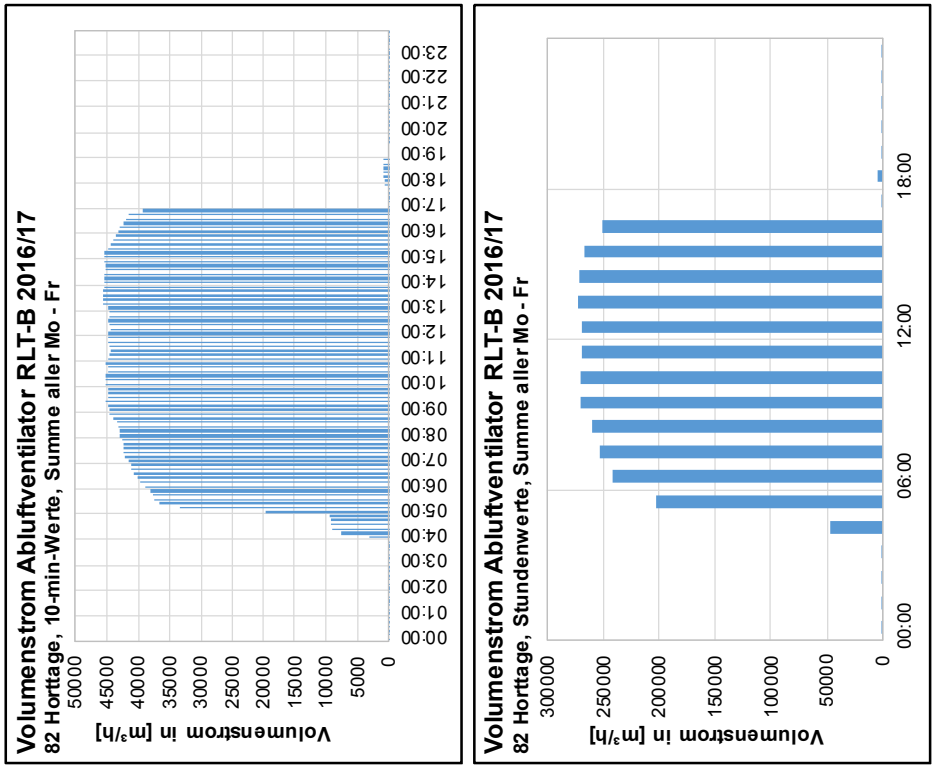

Abbildung 9-51: Tagesprofil Volumenstrom – Zuluftventilator Verwaltungstrakt – Horttage

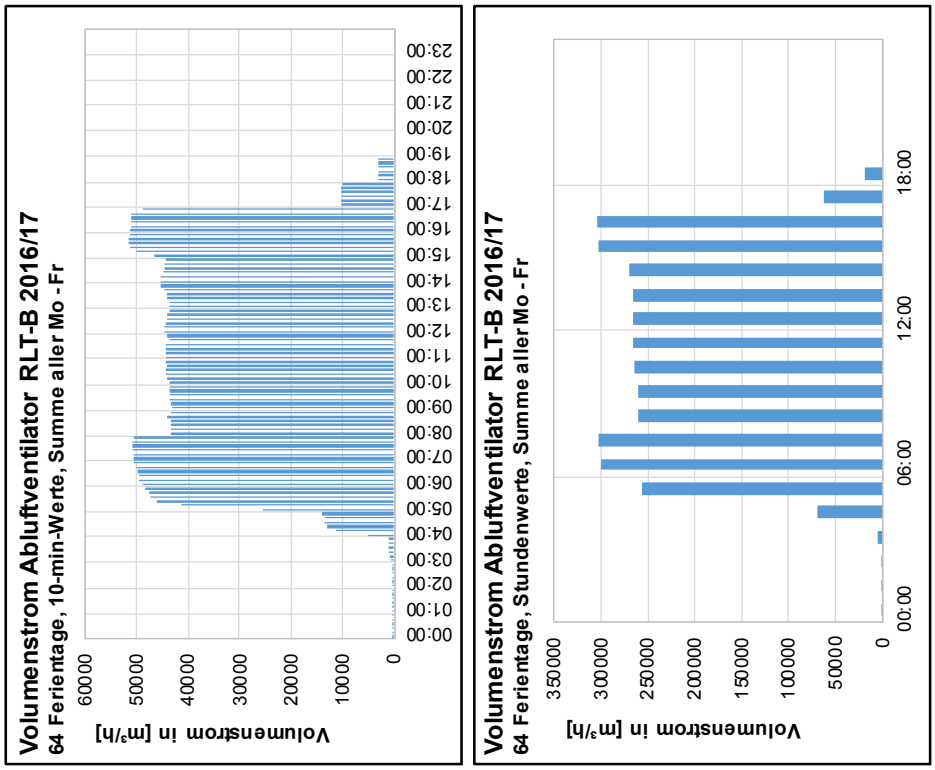

Abbildung 9-52: Tagesprofil Volumenstrom – Zuluftventilator Verwaltungstrakt – Schließtage

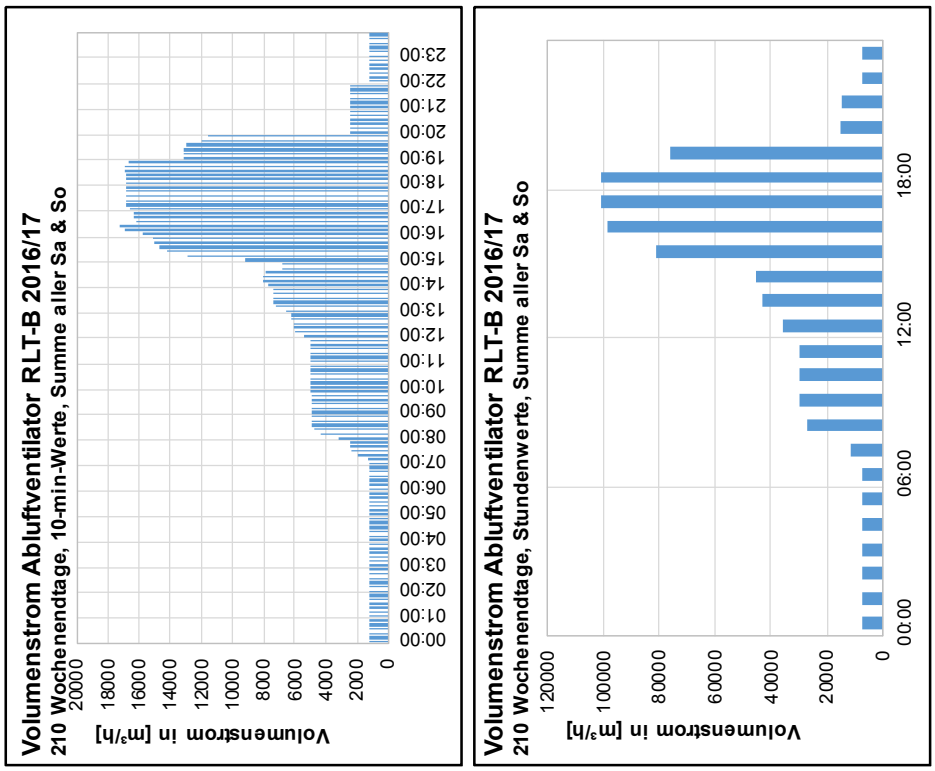

Abbildung 9-53: Tagesprofil Volumenstrom – Zuluftventilator Verwaltungstrakt – Wochenende

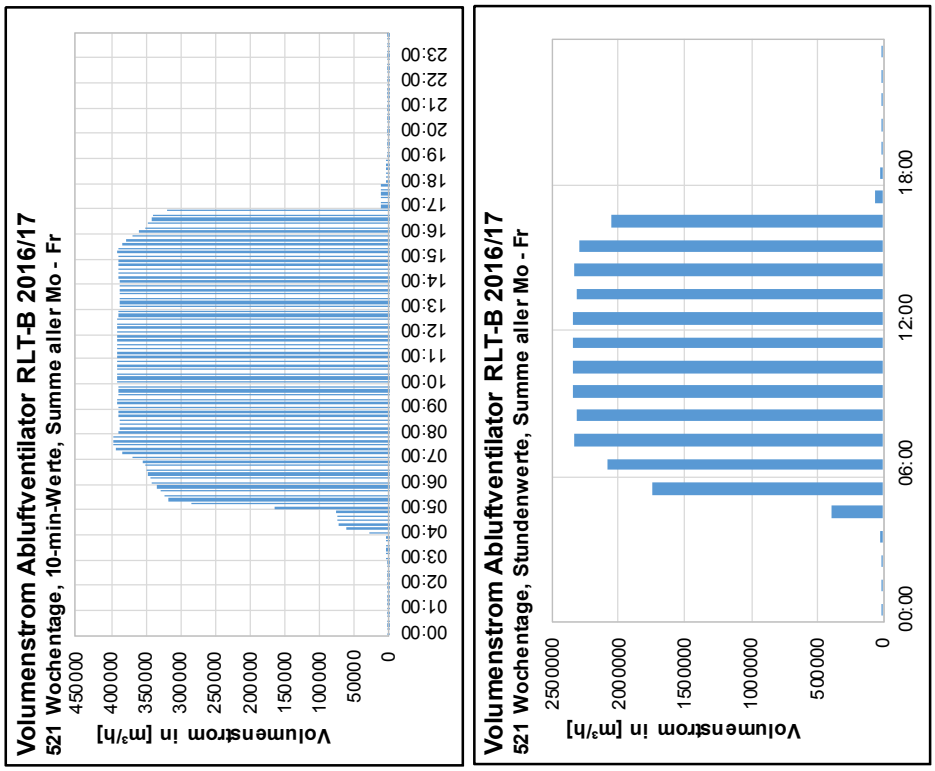

Abbildung 9-54: Tagesprofil Volumenstrom – Zuluftventilator Verwaltungstrakt – Wochentage

a

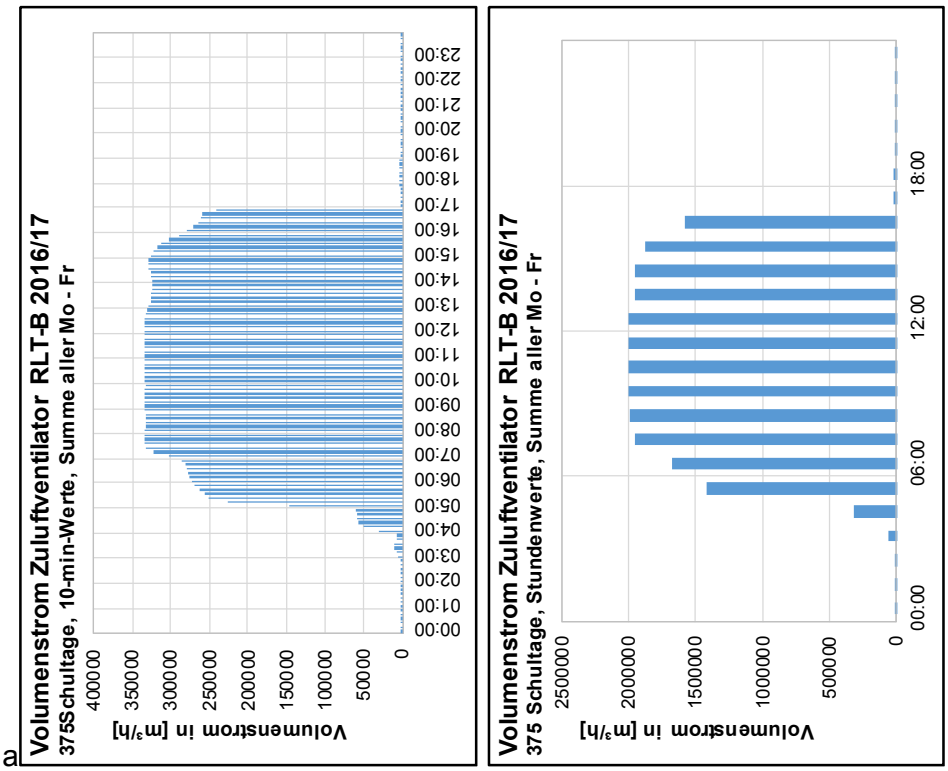

Abbildung 9-55: Tagesprofil Volumenstrom – Abluftventilator Verwaltungstrakt – Schultage

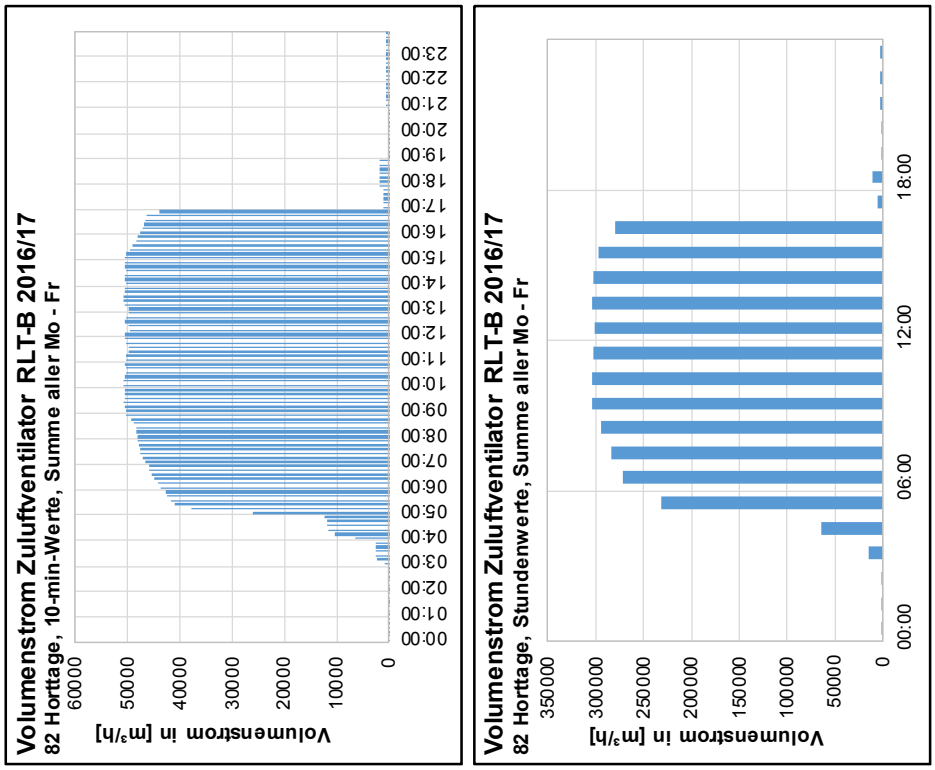

Abbildung 9-56: Tagesprofil Volumenstrom – Abluftventilator Verwaltungstrakt – Horttage

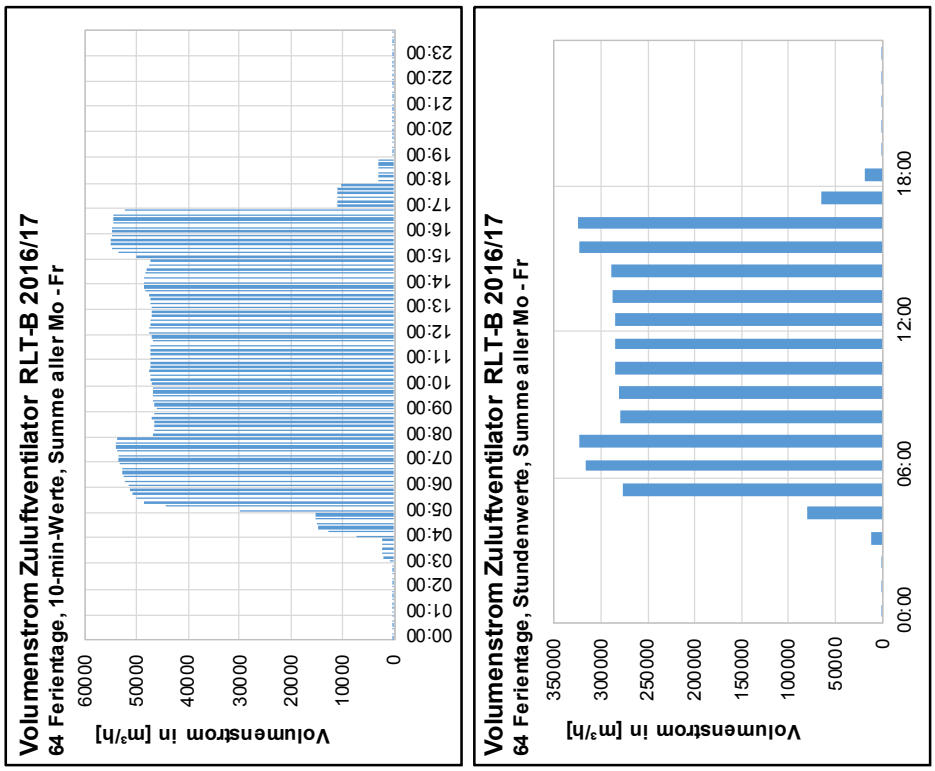

Abbildung 9-57: Tagesprofil Volumenstrom – Abluftventilator Verwaltungstrakt – Schließtage

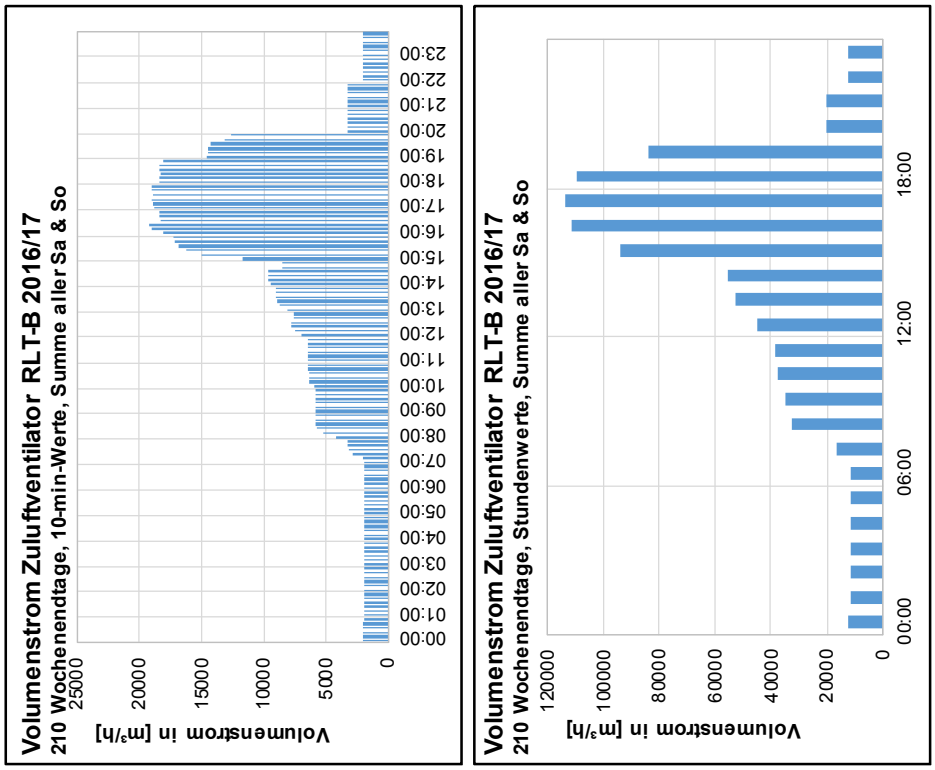

Abbildung 9-58: Tagesprofil Volumenstrom – Abluftventilator Verwaltungstrakt – Wochenende

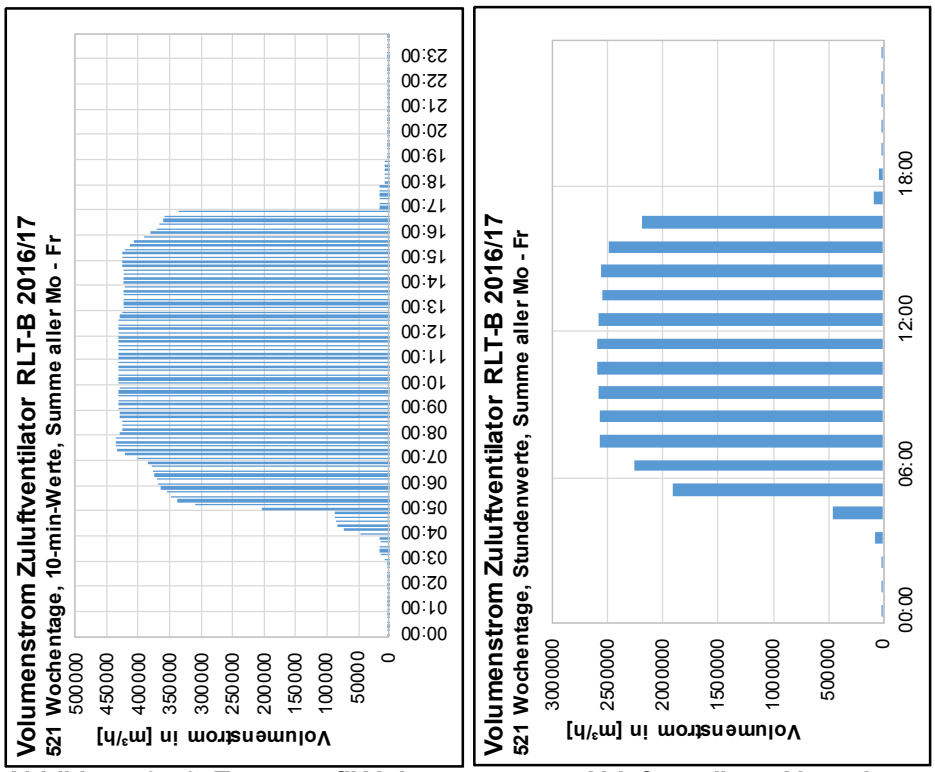

Abbildung 9-59: Tagesprofil Volumenstrom – Abluftventilator Verwaltungstrakt – Wochentage

9.5 Planer, Ausführende, Projektbeteilige

Tabelle 9-5: Planer, Ausführende Projektbeteiligte

Kurz	ausführliche Angabe	Gewerk/Verantwortlichkeit
APW	APW Heizung und Sanitärbau GmbH Herr Petersohn Hauptstraße 9 04288 Leipzig	TGA, Ausführung
GEDES	Gedes e.V. Herr Döring Promenadenring 8 02708 Löbau	Messtechnik, Ausführung
HOLLENBACH	Sachverständigenbüro Herr Hollenbach Karlstraße 14 39261 Zerbst	Projektsteuerer
LUNGWITZ	Lungwitz GmbH Herr Lungwitz Matthiasstr. 23 39122 Magdeburg	Küchenplanung
MENERGA	Menerga GmbH Herren Beyer, Hornauer, Kaya, Lechtenböhmer, Schuster Alexanderstraße 69 45472 Mülheim an der Ruhr	Lüftungstechnik, Messtechnik Hersteller
N&S	Ing.-Büro Naumann u. Stahr GbR Herr Naumann, Herr Reichel, Herr Stahr Sommerfelder Straße 11 04299 Leipzig	TGA, Planung (zu Beginn)
PAUL	PAUL Wärmerückgewinnung GmbH August-Horch-Straße 7 08141 Reinsdorf	Lüftungstechnik, Hersteller
TROX	TROX GmbH Heinrich-Trox-Platz 47504 Neukirchen-Vluyn	Lüftungstechnik, Hersteller
TUK	Theurich+Klose Ingenieurgesellschaft mbH Herr Gierlich, Herr Adolf, Herr v. Goldammer Vahrenwalder Str. 117 30165 Hannover	TGA, Planung (zum Schluss)

9.6 Überblick über separate Anhänge

Als separate Anhänge liegen vor:

A	Pläne
B	Schemen
C	Lüftungszonierung und Luftmengen
D	Technische Daten RLT 7500 Klassentrakt
E	Technische Daten RLT 10000 Verwaltungstrakt
F	Technische Daten Wohnungslüftung Hausmeister
G	Technische Daten Küchenlüftung Kochhaube
H	Technische Daten Küchenlüftung Spülhaube
I	Technische Daten Küchengrundlüftung
J	Technische Daten Abluftanlage WCs
K	Technische Daten Volumenstromregler
L	Technische Daten Auslässe
M	Planung MH Kanalnetz
N	Erdwärmeübertrager