
Schlussbericht Holzmodul-Schulen



© 2022 deZem GmbH

30. Juni 2022

deZem GmbH

Wilmersdorfer Str. 60, 10627 Berlin

Telefon: +49 (0)30 31 800 730

Fax: +49 (0)30 31 800 731

felix.wehringer@dezem.de

www.dezem.de

Im Auftrag der Stadt Frankfurt am Main -

Amt für Bau und Immobilien -

Abteilung Energiemanagement

<https://energiemanagement.stadt-frankfurt.de/>



Inhaltsverzeichnis

Projektbeschreibung	2
Kurzzusammenfassung des Berichts	2
Wo wurde gemessen	4
Abkürzungsverzeichnis für Datenmesspunkte	4
Übersicht der Messpunktenamen (Export)	5
Tages und Wochenverläufe	6
Gebäudedaten der Schulen	6
Vergleich der Lüftungsanlagen + Kühlung	6
Grundrisse und Raumpläne der betrachteten Klassenräume	8
Auswertung	11
Wetterbedingungen in Frankfurt (Main) während des Untersuchungszeitraums	11
Behaglichkeitsfeld	11
Raumtemperaturen als Carpetplots	13
Raumtemperaturen als Dauerlinie	17
Luftfeuchte in den Räumen	19
CO ₂ -Konzentration in den Räumen	20
Bewertung Nutzerverhalten	21
Fensterkontakte	21
Sonnenschutz	22
Bewertung Gebäude und Anlagenkonzept	25
Raumtemperaturen während der Hitzeperiode	25
Stromverbräuche und –kosten auf Basis der Abrechnungen	28
Stromverbräuche und –kosten Detailbetrachtung	28
Fehlerhafter Anlagenbetrieb – Pumpensteuerung	32
Fehlende bedarfsgeführte Betriebsführung	33
Handlungsempfehlungen zur Optimierung	35
Regelmäßige Kontrolle der Fenster	35
Bessere Nutzung des Sonnenschutzes und der Fensterlüftung an warmen Tagen	35
Komplexe Kühlkonzepte im GN sollten richtig eingestellt werden	35
Sehr hoher Stromverbrauch Lüftungsanlagen + Kühlung GN	36
Anhang	37
Typische Tagesverläufe	37
Typische Wochenverläufe	52
Raumpläne mit Sensorpositionen	67
Messkonzept	70

Projektbeschreibung

Zweck des Projekts „Monitoring Holzmodul-Schulen“ war es, für die beiden Holzmodul-Schulen Gymnasium Nord und den Schulcampus Westend (Adorno Gymnasium) sowohl einen energetischen Vergleich der Belüftungs-/Kühlkonzepte als auch einen Vergleich der Raumluftbedingungen, insbesondere während der warmen Sommermonate, durchzuführen.

Dazu wurden in den beiden Schulen in je drei Klassenzimmern Sensoren installiert und ein Monitoring der Daten über einen Zeitraum von 12 Monaten von März 2021 bis Februar 2022 durchgeführt.

Kurzzusammenfassung des Berichts

In diesem Schlussbericht werden die über die 12 Monate erfassten Daten ausgewertet. Auf Basis der Daten werden das Nutzerverhalten sowie die beiden Anlagenkonzepte bewertet und abschließend Handlungsempfehlungen gegeben.

In den beiden Holzmodulschulen werden unterschiedliche Anlagenkonzepte für die Belüftung und Kühlung eingesetzt.

- Im Adorno Gymnasium werden 9 größere Lüftungsanlagen eingesetzt, 8 davon mit integrierter Adiabater Kühlung.
- Im Gymnasium Nord gibt es zwei größere Lüftungsanlagen und eine zentrale Kältemaschine, die neben der Zuluft auch die Betondeckenelemente der Schule mit Kälte versorgt.

Der Luftaustausch funktioniert in beiden Schulen gut. Sowohl Luftfeuchte als auch CO₂-Konzentration in den Klassenräumen sind gut.

Bei der Bewertung des Nutzerverhaltens wurden die Daten der Fensterkontakte ausgewertet sowie die manuelle Bedienung des außenliegenden Sonnenschutzes. Ergebnis war hier, dass vor allem in den Hitzeperioden die Nutzer nicht das energetisch sinnvollste Verhalten zeigen.

- Fenster werden bei hoher Außentemperatur geöffnet, was die Effizienz der Raumkühlung verschlechtert.
- Der Sonnenschutz in den Klassenzimmern könnte an heißen Tagen besser genutzt werden, um die Kühllast in den Räumen zu verringern.
- Fenster werden in den Ferien oder am Wochenende durchgängig offen gelassen.

Bei der Bewertung der Anlagenkonzepte wurden die Raumtemperaturen während einer Hitzeperiode in den 6 Klassenräumen verglichen. Außerdem wurden die Verbräuche der Anlagen aufgeschlüsselt und die Betriebskosten sowie die Treibhausgasemissionen berechnet. Abschließend wurden erste Fehler im Anlagenbetrieb aufgezeigt und mögliche Einsparpotenziale berechnet.

- Überschreitungen der maximalen Solltemperatur treten in beiden Schulen auf. Die Kälteverteilung im GN scheint nicht korrekt zu funktionieren.
- Die Lüftungsanlage vor allem im GN verbraucht, aufgrund von schlecht eingestellten Betriebszeiten und überraschend hohem Strombezug, verhältnismäßig viel Energie.
- Die Betriebskosten für die Kühlung sind im Gymnasium Nord deutlich höher. Auf den m² Raumfläche gerechnet, sind es im Adorno Gymnasium (Adiabate Kühlung) 0,02 €/m² im Gymnasium Nord (Kältemaschine) sind es über 3 €/m².
- Fehlerhafter Anlagenbetrieb führt zu ca. 6.850 € Mehrkosten über 12 Monate. Nicht auf den Bedarf abgestimmte Betriebszeiten der Lüftungsanlage im GN allein zu 9.866 € an Mehrkosten. Der Betrieb der Anlagen durchgängig in den Sommerferien kostete 6.200 €.

Abschließend werden Handlungsempfehlungen gegeben, mit denen die aufgezeigten Probleme angegangen werden können. Diese umfassen die Information der Nutzer um die vorhandenen Mittel, z.B. Sonnenschutz korrekt zu nutzen, sowie die Korrektur der Kälteverteilung im GN und der falsch eingestellten Betriebszeiten bei den Anlagen. Durch kontinuierliches Monitoring der Anlagen sollten die Maßnahmen überprüft und fehlerhafte Anlagenbetriebe verhindert bzw. schnell aufgedeckt werden.

Wo wurde gemessen

Die genauen Positionen der Messstellen sind im Dokument „deZem - Messkonzept Holzmodulschulen“ beschrieben. Das Messkonzept findet sich im Anhang.

Abkürzungsverzeichnis für Datenmesspunkte

AG	Adorno Gymnasium
DL	Decke/Lüftung
FK	Fensterkontakt
GN	Gymnasium Nord
PS	Pultseite des Klassenzimmers
RK	Raumklima
RS	Rückseite des Klassenzimmers

Beispiel: AG _A140 _RK_PS_co2 → [Adorno-Gymnasium]_[Raum A140]_Raumklima_Pultseite des Klassenzimmers
_CO2-Gehalt

Übersicht der Messpunktenamen (Export)

Adorno-Gymnasium		Gymnasium Nord	
Raum A140	AG_A140_RK_PS_co2	Raum K1.9	GN_K1.9_RK_PS_co2
	AG_A140_RK_PS_humidity		GN_K1.9_RK_PS_humidity
	AG_A140_RK_PS_light		GN_K1.9_RK_PS_light
	AG_A140_RK_PS_motion		GN_K1.9_RK_PS_motion
	AG_A140_RK_PS_temperature		GN_K1.9_RK_PS_temperature
	AG_A140_RK_RS_co2		GN_K1.9_RK_RS_co2
	AG_A140_RK_RS_humidity		GN_K1.9_RK_RS_humidity
	AG_A140_RK_RS_light		GN_K1.9_RK_RS_light
	AG_A140_RK_RS_motion		GN_K1.9_RK_RS_motion
	AG_A140_RK_RS_temperature		GN_K1.9_RK_RS_temperature
	AG_A140_DL_Zulufttemperatur		GN_K1.9_DL_Ablufttemperatur
	AG_A140_DL_Betondecke 2		GN_K1.9_DL_Raumdecke 2
	AG_A140_DL_Raumdecke 1		GN_K1.9_DL_Raumdecke 1
	AG_A140_DL_Raumdecke 2		GN_K1.9_DL_Zulufttemperatur
	AG_A140_DL_Betondecke 1		GN_K1.9_DL_Betondecke 1
	AG_A140_DL_Ablufttemperatur		GN_K1.9_DL_Betondecke 2
	AG_A140_FK 3		GN_K1.9_FK 1
	AG_A140_FK 2		GN_K1.9_FK 2
	AG_A140_FK 4		GN_K1.9_FK 3
	AG_A140_FK 5		
	AG_A140_FK 1		
Raum A153	AG_A153_RK_PS_co2	Raum K1.16	GN_K1.16_RK_PS_co2
	AG_A153_RK_PS_humidity		GN_K1.16_RK_PS_humidity
	AG_A153_RK_PS_light		GN_K1.16_RK_PS_light
	AG_A153_RK_PS_motion		GN_K1.16_RK_PS_motion
	AG_A153_RK_PS_temperature		GN_K1.16_RK_PS_temperature
	AG_A153_RK_RS_co2		GN_K1.16_RK_RS_co2
	AG_A153_RK_RS_humidity		GN_K1.16_RK_RS_humidity
	AG_A153_RK_RS_light		GN_K1.16_RK_RS_light
	AG_A153_RK_RS_motion		GN_K1.16_RK_RS_motion
	AG_A153_RK_RS_temperature		GN_K1.16_RK_RS_temperature
	AG_A153_DL_Zulufttemperatur		GN_K1.16_DL_Raumdecke 1
	AG_A153_DL_Betondecke 1		GN_K1.16_DL_Zulufttemperatur
	AG_A153_DL_Betondecke 2		GN_K1.19_DL_Ablufttemperatur
	AG_A153_DL_Raumdecke 2		GN_K1.19_DL_Raumdecke 2
	AG_A153_DL_Raumdecke 1		GN_K1.16_DL_Betondecke 1
	AG_A153_DL_Ablufttemperatur		GN_K1.16_DL_Betondecke 2
	AG_A153_FK 1		GN_K1.16_FK 1
	AG_A153_FK 2		GN_K1.16_FK 2
	AG_A153_FK 3		GN_K1.16_FK 3
	AG_A153_FK 4		
	AG_A153_FK 5		
Raum A156	AG_A156_RK_PS_co2	Raum K1.19	GN_K1.19_RK_PS_co2
	AG_A156_RK_PS_humidity		GN_K1.19_RK_PS_humidity
	AG_A156_RK_PS_light		GN_K1.19_RK_PS_light
	AG_A156_RK_PS_motion		GN_K1.19_RK_PS_motion
	AG_A156_RK_PS_temperature		GN_K1.19_RK_PS_temperature
	AG_A156_RK_RS_co2		GN_K1.19_RK_RS_co2
	AG_A156_RK_RS_humidity		GN_K1.19_RK_RS_humidity
	AG_A156_RK_RS_light		GN_K1.19_RK_RS_light
	AG_A156_RK_RS_motion		GN_K1.19_RK_RS_motion
	AG_A156_RK_RS_temperature		GN_K1.19_RK_RS_temperature
	AG_A156_DL_Zulufttemperatur		GN_K1.19_DL_Zulufttemperatur
	AG_A156_DL_Raumdecke 1		GN_K1.19_DL_Ablufttemperatur
	AG_A156_DL_Betondecke 2		GN_K1.19_DL_Raumdecke 1
	AG_A156_DL_Ablufttemperatur		GN_K1.19_DL_Raumdecke 2
	AG_A156_DL_Betondecke 1		GN_K1.19_DL_Betondecke 1
	AG_A156_DL_Raumdecke 2		GN_K1.19_DL_Betondecke 2
	AG_A156_FK 1		GN_K1.19_FK 2
	AG_A156_FK 2		GN_K1.19_FK 3
	AG_A156_FK 3		GN_K1.19_FK 1
	AG_A156_FK 4		
	AG_A156_FK 5		
Im Freien	AG_Outside_humidity	Kühlung	GN_cooling_L3_current
	AG_Outside_temperature		GN_cooling_L2_current
	AG_Outside_irradiation		GN_cooling_L1_current
	AG_cooling_volume		GN_ventilation_L1_current
	AG_ventilation_L3_current		GN_ventilation_L3_current
Lüftung	AG_ventilation_L1_current	Lüftung	GN_ventilation_L2_current
	AG_ventilation_L2_current		

Anmerkung: Im AG gibt es aufgrund von mehr Fenstern 5 FK im Gymnasium Nord nur 3 je Klassenzimmer

Tages und Wochenverläufe

Für alle Messpunkte wurden einen Tagesverlauf und einen Wochenverlauf als Kurvendiagramme abgebildet. Die Diagramme finden sich im Anhang. Als Zeitraum wurde eine Woche im Juni (14.6. bis 21.6.2021) gewählt, in der auch die Kühlung in den beiden Schulen benötigt wurde. Die Tagesverläufe zeigen den Mittwoch den 16.2.2021.

Gebäudedaten der Schulen

	Adorno Gymnasium	Gymnasium Nord
Anzahl der Module	359	210
Nutzfläche	16.600 m ²	8.144 m ²
Kühlsystem	Adiabate Abluftkühlung	Kältemaschine Lüftungskühlung und zusätzliche „ECO-Boost“-Kühldecken

Vergleich der Lüftungsanlagen + Kühlung

Adorno Gymnasium:

Im Adorno Gymnasium kommen mehrere Lüftungsanlagen mit unterschiedlichen Volumenströmen zum Einsatz. Die in diesem Projekt betrachtete Anlage RLT2 hat einen Volumenstrom von 21.620 m³/h und ist mit einer Adiabaten Abluftkühlung ausgestattet. Die 9 größeren dezentralen Lüftungsanlagen im AG haben insgesamt einen Nennvolumenstrom von ca. 130.000 m³/h und 8 der 9 Anlagen haben ebenfalls einen Adiabate Abluftkühlung. RLT2 ist die größte der Anlagen und hat ca. 17 % des Gesamtvolumenstroms.

Anlage	Volumenstrom	Anteil
RLT 1	21.200	17%
RLT 2	21.620	17%
RLT 3	11.450	9%
RLT 4	16.825	13%
RLT 5	12.565	10%
RLT 6	17.086	13%
RLT 7	4.500	4%
RLT 8	17.600	14%
RLT 9	4.500	4%
Gesamt Volumenstrom:	127.346	

RLT 2 Gymnasium
ZU 21620m³/h
AB 21620m³/h

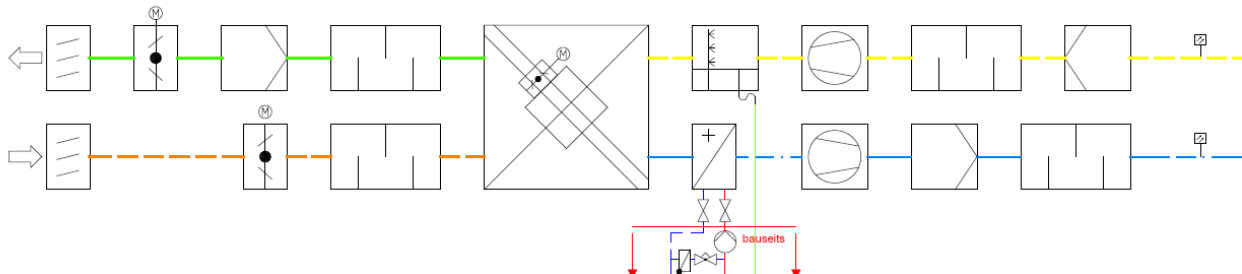


Abbildung 1: Schema der Lüftungsanlagen im Adorno-Gymnasium

Gymnasium Nord:

Im Gymnasium Nord sind eine zentrale Haupt-Lüftungsanlage mit 30.000 m³/h Volumenstrom RLT01 und weitere kleinere Lüftungsanlagen mit 17.000 m³/h installiert. Im Rahmen dieses Projekts wird der Stromverbrauch der Haupt-Lüftungsanlage RLT01 gemessen. Für die Kühlung wird eine Kältemaschine mit 420 kW Kühlleistung eingesetzt. Der Stromverbrauch dieser Anlage wird ebenfalls erfasst. Die (thermische) Leistung der Kältemaschine der RLT01 beträgt 116 kW. Eine zusätzliche Kühlung mit 150 kW geschieht durch eingebaute Kühldecken, sogenannte ECO-Boost-Decken.

Zu- und Abluftanlage (S01 + S02)			
Zuluft-Ventilator V = 30.000 m³/h Pex = 500 Pa Motor : 3 x 400 V/50 HZ/5,7 kW/ 9A EC	WRG Platte diagonal; Wirkungsgrad trocken : 73 % Luft ein/aus : -12 °C / 13,3 °C / 253,8 kW Luft ein/aus : 32 °C / 27,5 °C / 43,9 kW	Erhitzer Luft ein/aus : 8,3 °C / 22°C Erhitzerleistung: 137,96 kW PWW 60 /40 / 5,3 cbm/h / 15 kPa	Zubehör : Segeltuchstutzen, Filter F5+F7, Steckmetallfilter, Schwingungsdämpfer, Rep-Schalter, Frequenzumformer, Stellantriebe, Schalldämpfer
Abluft-Ventilator V = 30.000 m³/h Pex = 500 Pa Motor : 3 x 400 V/50 HZ/5,7 kW/ 9A EC	Spez. Ventilatorleist. SFPv [W/(m³/s)] SFP3 / 1.375	Kühler Luft ein/aus : 32°C / 22°C Kälteleistung: 115,83 kW PKW 6/12	Abmessungen ca.: Länge : 10,162 m Breite : 4,587 m Höhe : 2,548 m + Sockel 300mm Gewicht : 13,545 kg

Abbildung 2: Technische Daten der Hauptlüftungsanlage Gymnasium Nord RLT01 – Zu- und Abluft

Kompaktkältemaschine		
Leistung: Kälteleistung 420 kW Kältemittel R143A EER 2,93 Schalleistungspegel: 88 dB(A)	Verdampfer Wassereintrittstemperatur - Verbrauchersseite 12 °C Wasseraustrittstemperatur - Verbrauchersseite 6 °C Außenlufttemperatur 35 °C Durchflussmenge Verbrauchersseite 64,4 m³/h Druckverlust Verbrauchersseite 52 kPA	Abmessungen Länge: 5.019 mm Breite: 2.260 mm Höhe: 2.434 mm Nettogewicht: 4.577 kg Bruttogewicht: ca. 4.900 kg
Elektrische Daten max. Leistungsaufnahme 142 kW max. Stromaufnahme Anlauf - LRA 413 A Stromaufnahme Vollast - FLA 341 A Versorgungsspannung 400 V / 3 ~ / 50 HZ	Verflüssiger Ventilatoren 8 Stück V = 128.000 m³/h	Hersteller: Swegon o.glw. Typ bei Swegon: KAPPA REV SLN 40.2 mit Kältemittel R134a

Abbildung 3: Technische Daten der Hauptlüftungsanlage Gymnasium Nord RLT01 – Kompaktkältemaschine

Grundrisse und Raumpläne der betrachteten Klassenräume

Im Folgenden zeigen Abbildung 4 und Abbildung 6 die Grundrisse der Schulen. Die jeweils ausgewählten Räume sind dort rot markiert.

Abbildung 5 und Abbildung 7 zeigen die Raumpläne mit Sensorpositionen, exemplarisch für je eines der Klassenzimmer. Mehr Details zu den Positionen der Sensoren finden sich im Messkonzept.

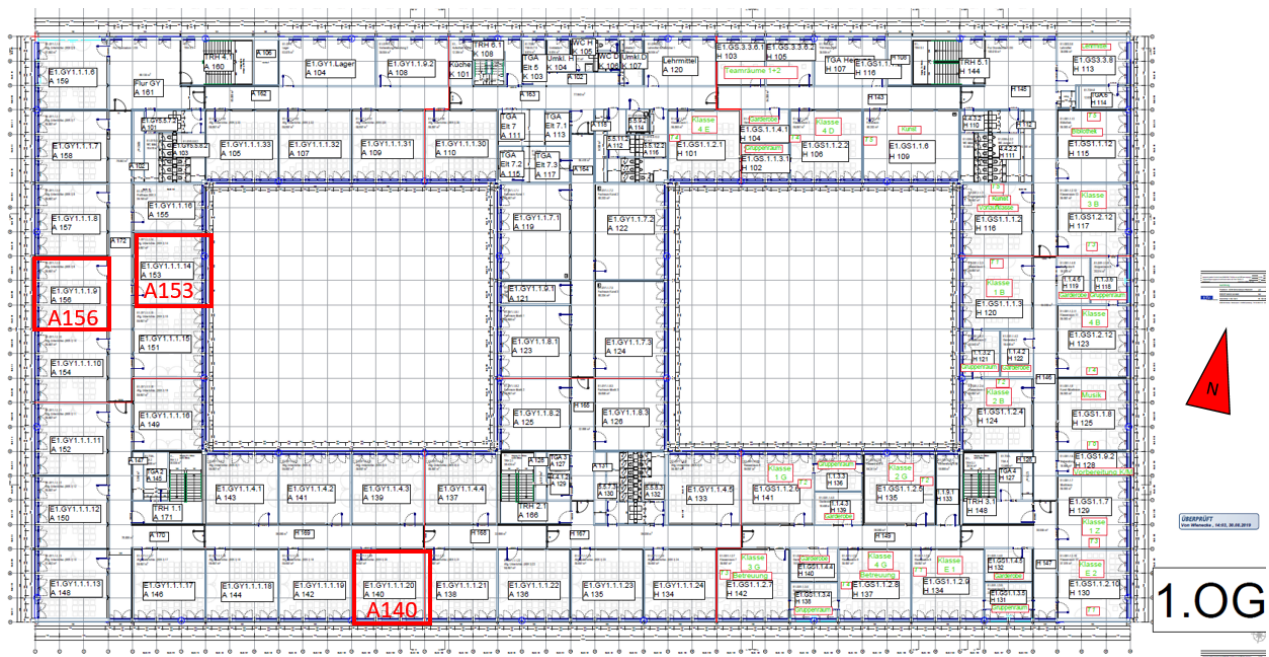


Abbildung 4: Grundriss Adorno Gymnasium 1. OG mit den Klassenräumen A140 (Süd), A153 (Ost) und A156 (West)

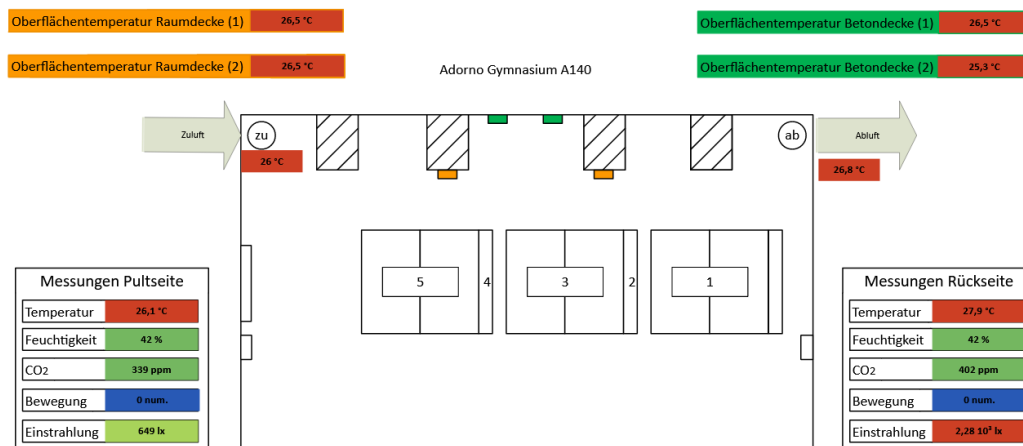


Abbildung 5: AG, A140 Raumplan mit Sensorpositionen, Messwerte vom 16.06.2021 um 16 Uhr



Abbildung 6: Grundriss Gymnasium Nord 1. OG mit den Klassenräumen K1.9 (Süd-West), K1.16 (Nord-Ost) und K1.19 (Süd-West)

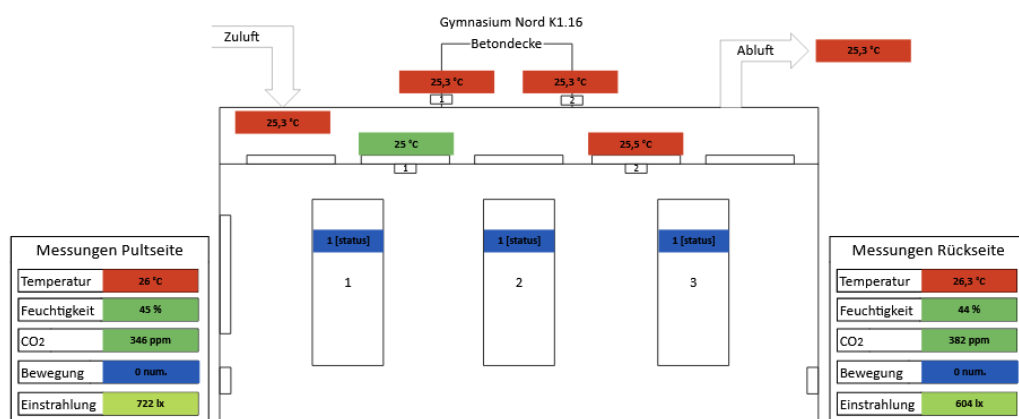


Abbildung 7: GN, K1.16 Raumplan mit Sensorpositionen, Messwerte vom 16.06.2021 um 16 Uhr

Auswertung

Für die Auswertung der Daten wurden keine Daten gefiltert. Es wurden durchgehend 24 Stunden Datenverläufe betrachtet sowohl Ferienzeiten als auch Wochenenden sind in den Daten enthalten.

Wetterbedingungen in Frankfurt (Main) während des Untersuchungszeitraums

Das Jahr 2021 war ein vergleichsweise milder Sommer. In Frankfurt (Main) gab es in dem Jahr lediglich eine lang andauernde Hitzeperiode: Vor allem der Juni 2021 zeichnete sich über einen längeren Zeitraum durch höhere Außentemperaturen aus.

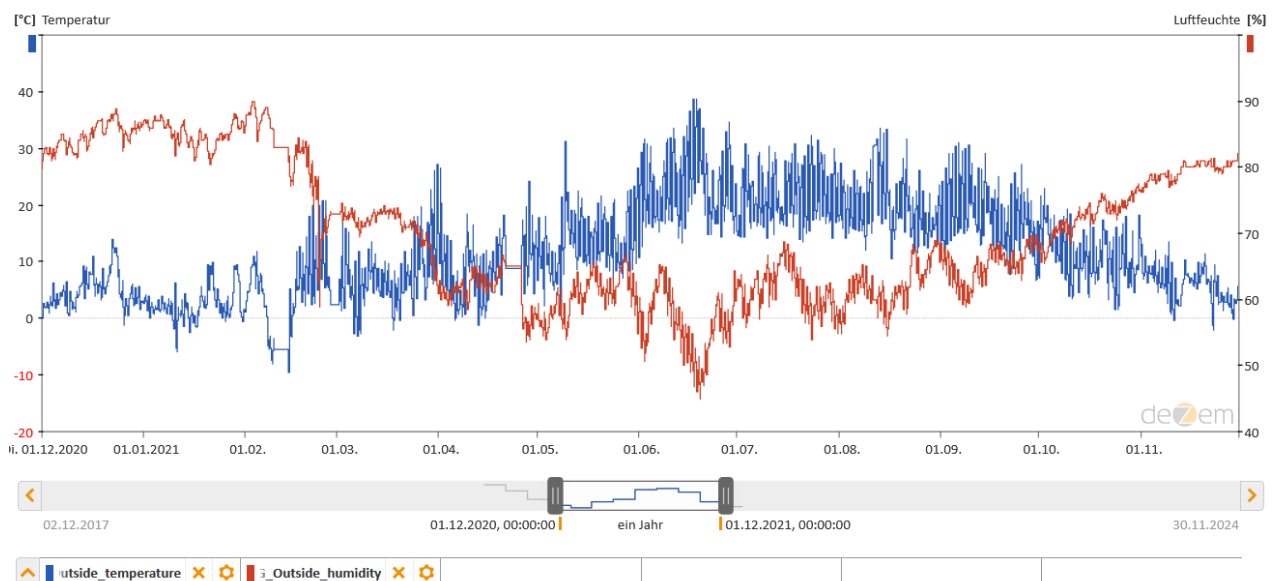


Abbildung 8: Frankfurt (Main), 2021 – Außentemperatur (blau) und relative Luftfeuchte (rot)

Die Ferien in Hessen fielen auf folgende Zeiträume:

- Ostern: 06.04.2021 - 16.4.2021
- Sommer: 19.07.2021 – 27.08.2021
- Herbst: 11.10.2021 - 23.10.2021

Behaglichkeitsfeld

Das Raumklima liegt in beiden Schulen überwiegend innerhalb des Behaglichkeitsfelds. Es lässt sich erkennen, dass es vor allem bei hohen Außentemperaturen, also während der Sommermonate, aus dem behaglichen Bereich ausbricht. Im Gymnasium Nord liegen die Raumtemperaturen tendenziell höher als im Adorno-Gymnasium.

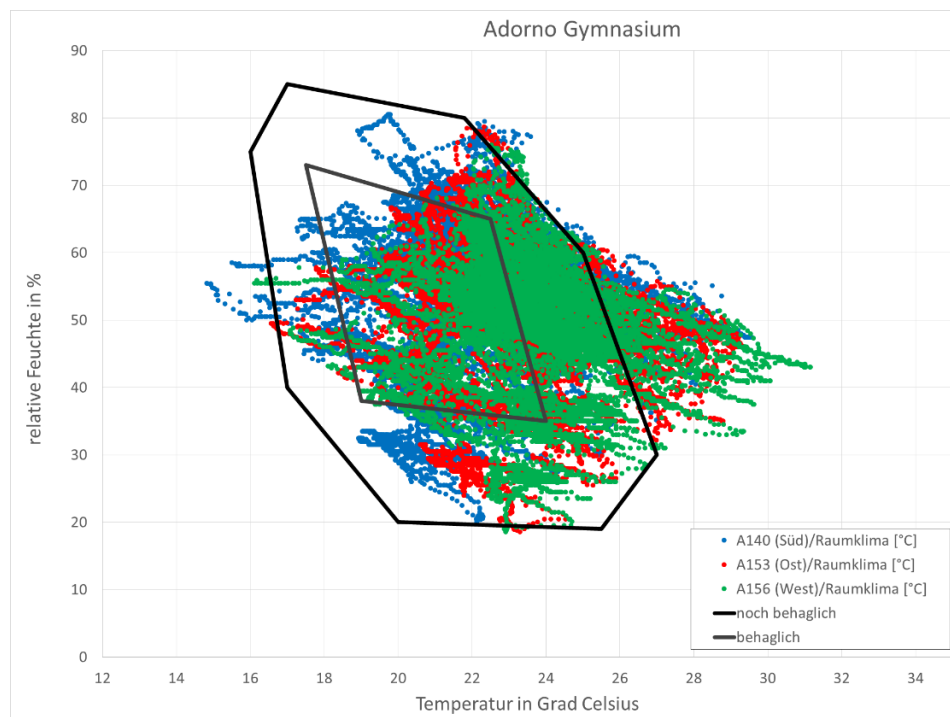


Abbildung 9: Adorno Gymnasium (Mai bis Oktober 2021) – Behaglichkeitsdiagramm für drei Klassenzimmer

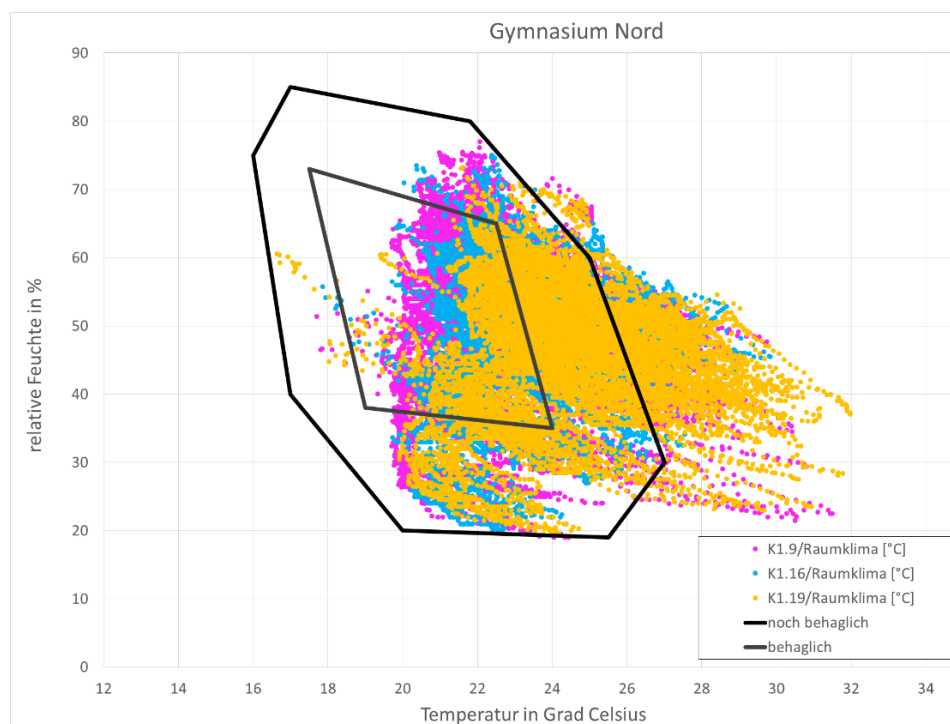


Abbildung 10: Gymnasium Nord (Mai bis Oktober 2021) – Behaglichkeitsdiagramm für drei Klassenzimmer

Raumtemperaturen als Carpetplots

Die folgenden Carpetplots (=Rasterdiagramm) zeigen die Raumtemperaturen in beiden Schulen in jeweils drei Klassenzimmern über den Betrachtungszeitraum Mai bis Oktober 2021. Während dieser Zeit war die Kühlung in Betrieb. Raumtemperaturen über 27 °C werden dunkelrot dargestellt. Auf der Y-Achse der Carpetplots ist die Tageszeit aufgetragen auf der X-Achse die Zeitachse in Tagen. Dadurch lässt sich schnell erkennen, an welchen Tagen und zu welchen Tageszeiten es in der Klassenzimmern besonders warm war.

Es ist zu erkennen, dass in allen Klassezimmern Temperaturen über 27 °C herrschen, es aber deutliche Unterschiede zwischen den Räumen gibt. So werden im AG im Raum A153 (Ostausrichtung) deutlich früher - ca. um 11 Uhr - hohe Raumtemperaturen gemessen als im Raum A156 (Westausrichtung) ca. um 17 bis 18 Uhr. Im GN erwärmt sich Raum K1.16 (Nord-Ost) deutlich früher als die Räume K1.9 und K1.19 (beide Süd-West).

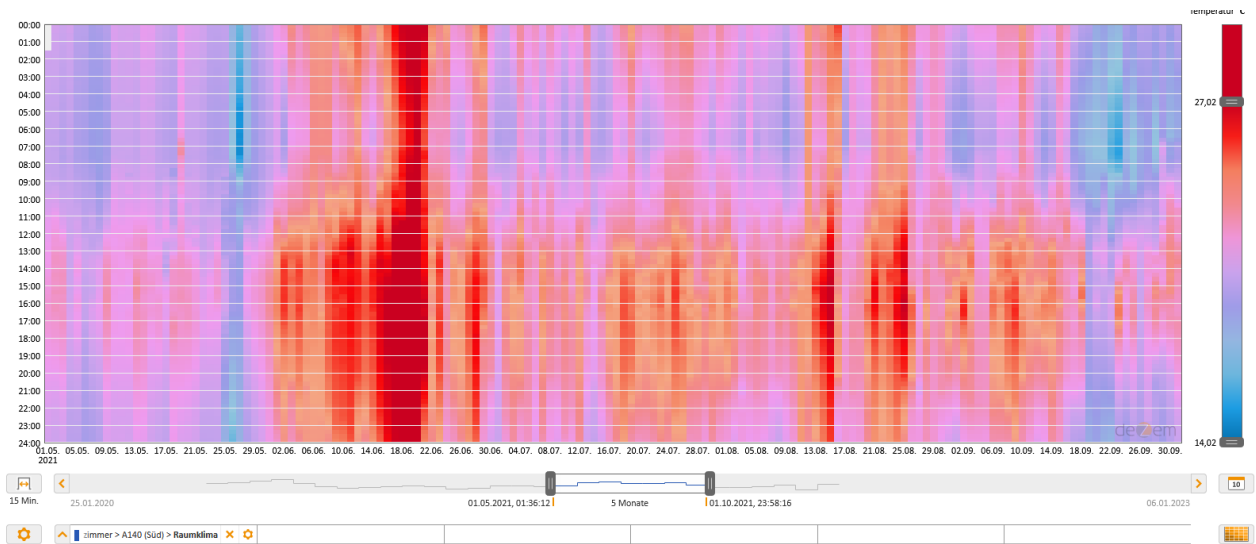
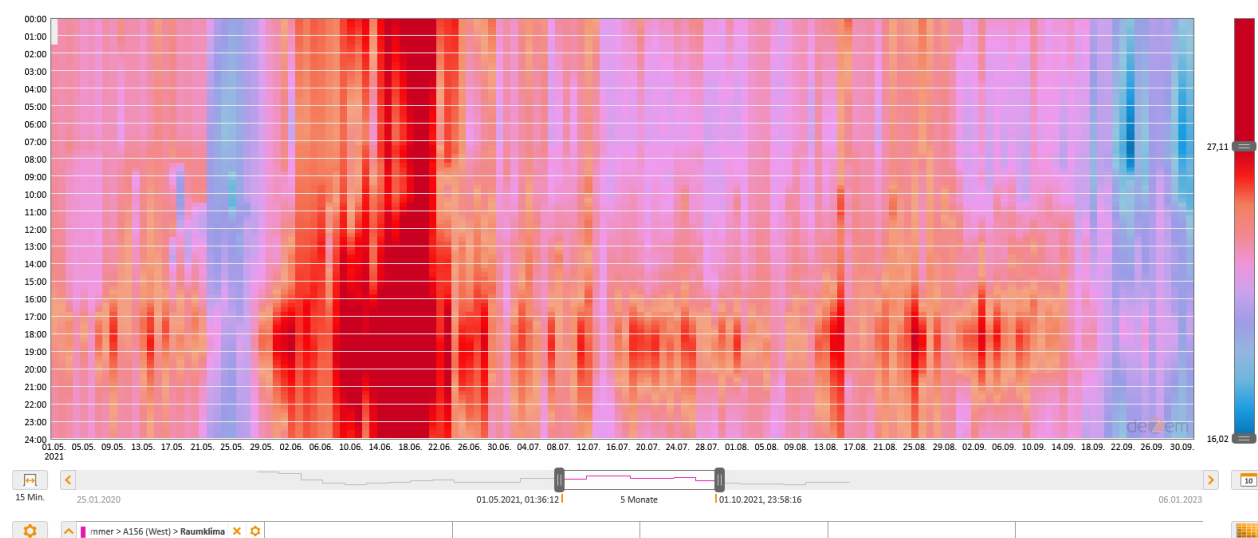
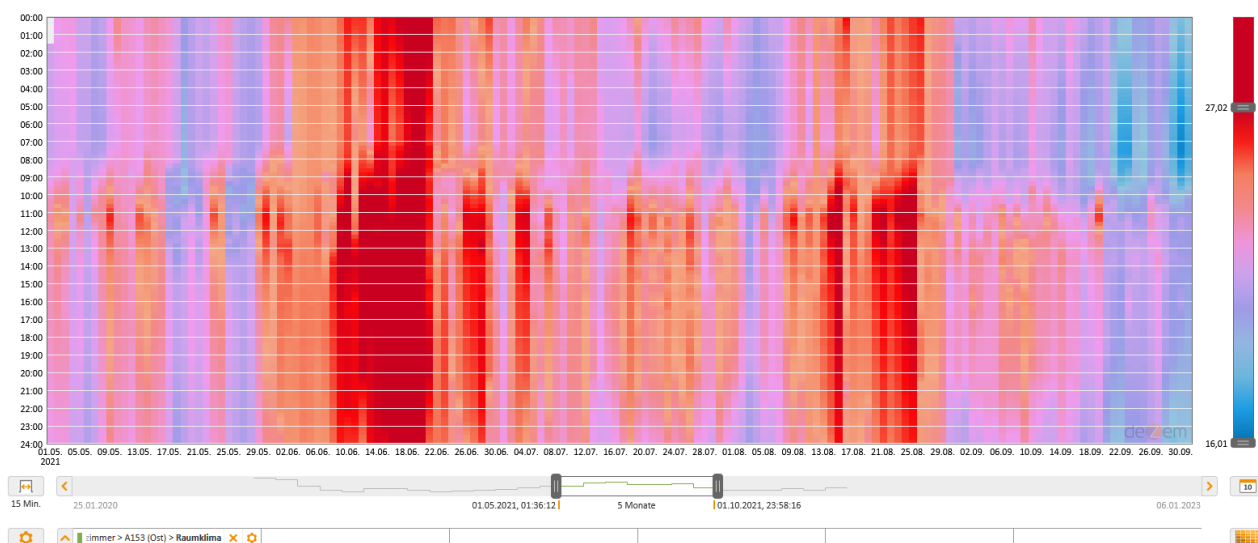
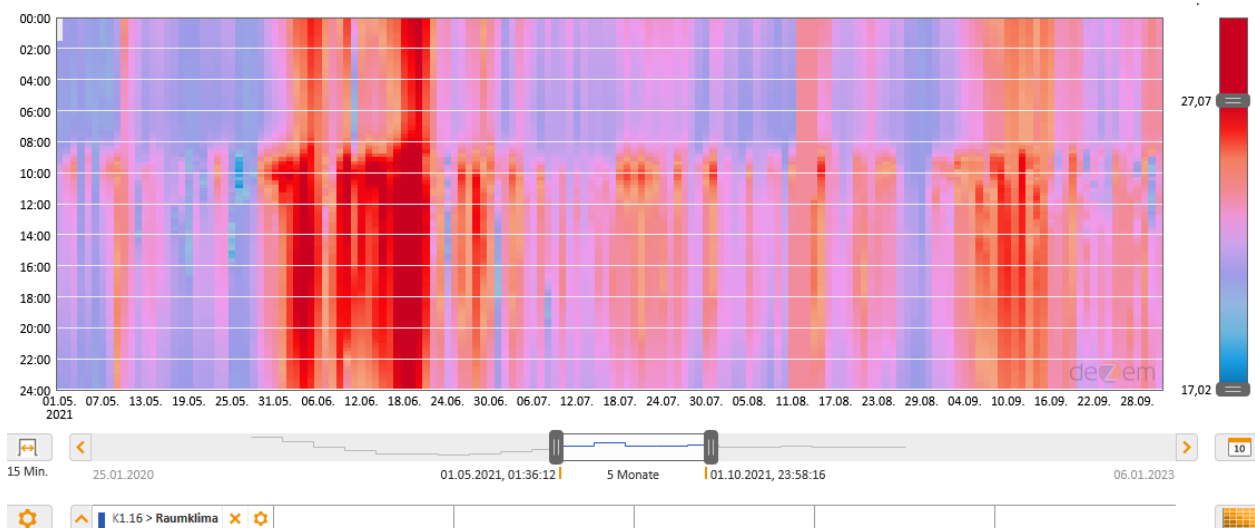
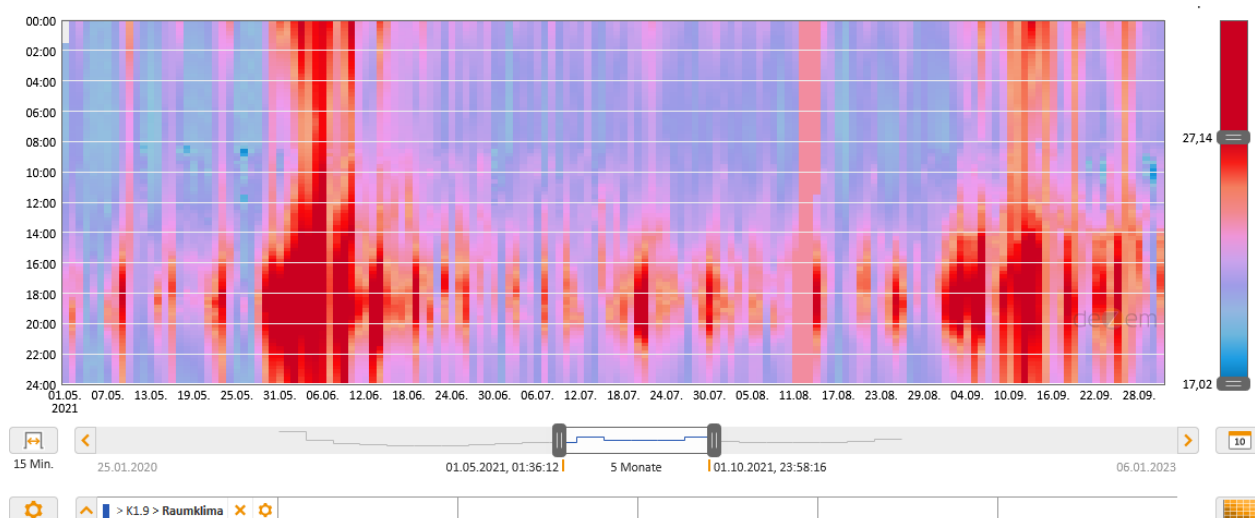
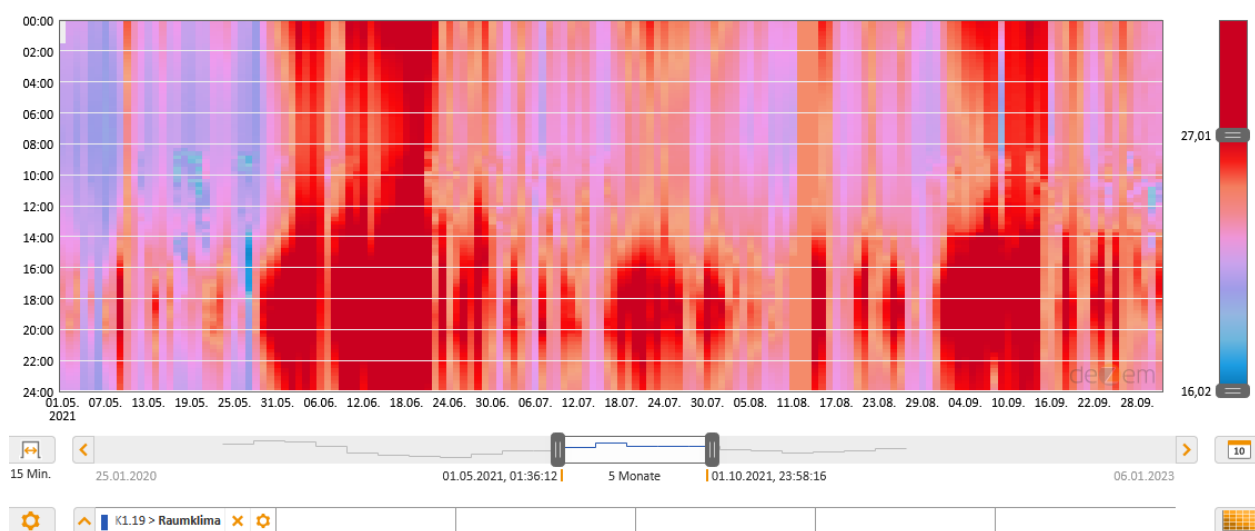


Abbildung 11: Adorno-Gymnasium, Raum A140 (Süd), Raumtemperatur (in °C) – Carpetplot







Raumtemperaturen als Dauerlinie

Im Folgenden werden die Raumtemperaturen als Dauerlinien dargestellt. Auf der Y-Achse wird die Raumtemperatur abgebildet auf der X-Achse der Prozentuale Anteil der Zeit, während dem die Raumtemperatur über oder unter dieser Temperatur lag.

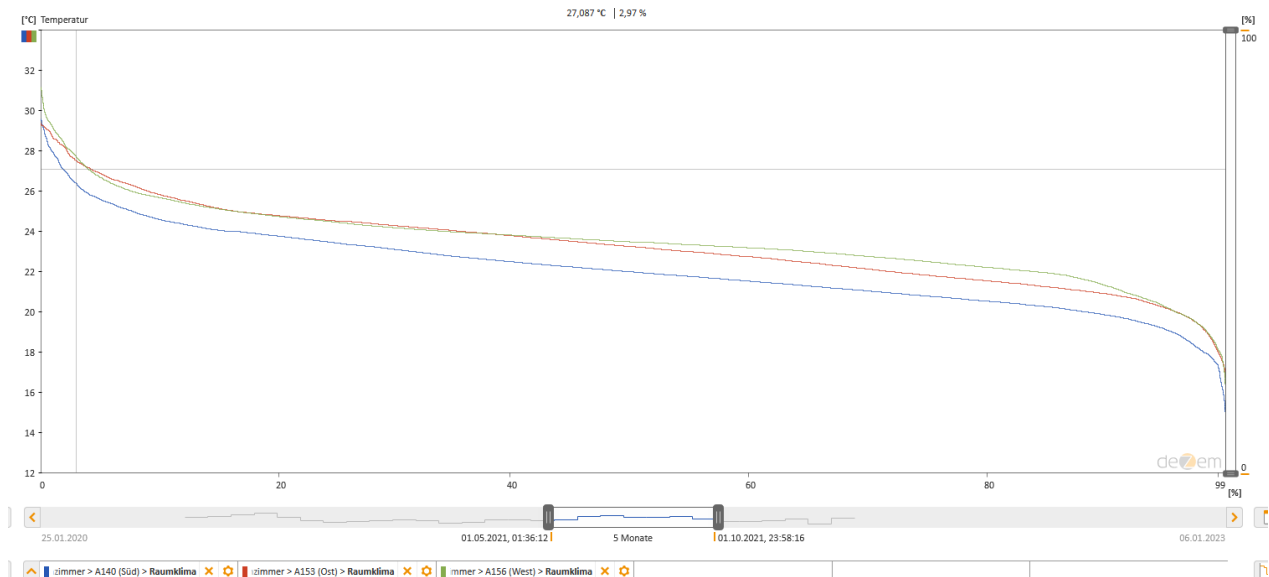


Abbildung 17: Adorno Gymnasium, Raumtemperaturen (in °C) in allen drei Klassenzimmern – Dauerlinie

Anhand der Dauerlinien (Abbildung 17) lässt sich beim Adorno Gymnasium sehr gut erkennen, dass der Raum A140 (blau) von den beiden anderen Räumen insgesamt etwas nach unten abweicht. Hier liegt die Raumtemperatur nur zu ca. 2 % der Zeit bei > 27 °C. Die Temperaturen in den Räumen A 153 (rot) und A156 (grün) liegen beide zu ca. 4 % der Zeit über 27 °C. Insgesamt liegen die Raumtemperaturen aber über die gemessene Zeit in einem ähnlichen Bereich.

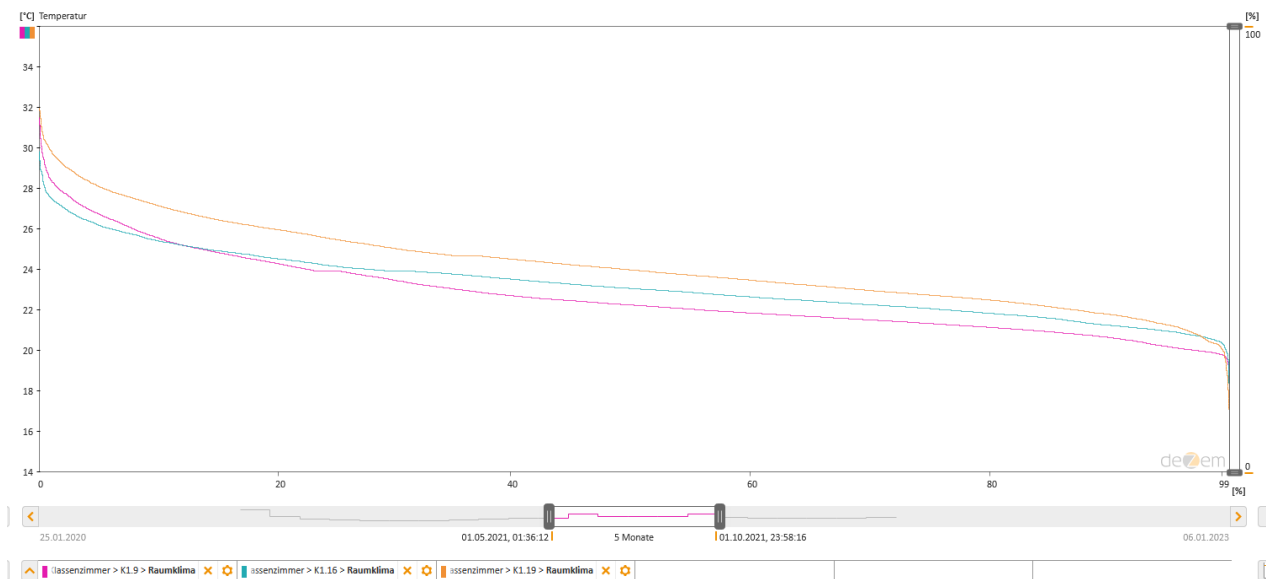


Abbildung 18: Gymnasium Nord, Raumtemperaturen (in °C) in allen drei Klassenzimmern – Dauerlinie

Die Dauerlinien beim Gymnasium Nord lassen erkennen, dass die Temperaturen in den drei Räumen stark voneinander abweichen. In Raum K1.16 (türkisgrün) steigt die Temperatur mit ca. 2 % der Zeit am seltensten über 27 °C. In Raum K1.9 (magenta) liegt die Temperatur zu ca. 4 % der gemessenen Zeit über 27 °C. Am auffälligsten sind die Temperaturen in Raum K1.19 (orange). Hier liegt die Temperatur ganze 10 % der Zeit über 27 °C (vergleiche Abbildung 18). Die Klassenräume K1.9 und K1.19 zeigen nach Süd-West, der Klassenraum K1.16 nach Nord-Ost. Bei den Räumen gibt es jeweils keine nennenswerte Verschattung vor den Fenstern.

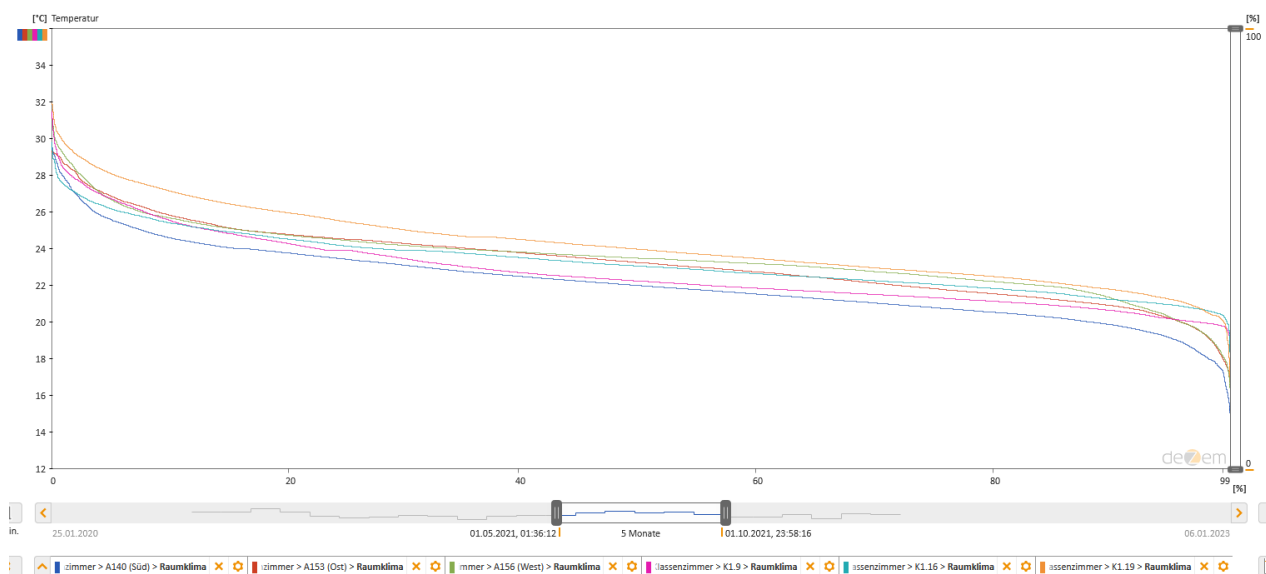


Abbildung 19: AG und GN, Raumtemperaturen (in °C) in allen sechs Klassenzimmern – Dauerlinie

Luftfeuchte in den Räumen

Die Unterschiede bezüglich der Luftfeuchte in den Klassenzimmern des Adorno-Gymnasiums können vernachlässigt werden. Lediglich in Raum A140 (blau) lag sie über die gemessene Zeit insgesamt etwas höher als in den anderen beiden Klassenzimmern.

In Raum K1.9 (magenta) im Gymnasium Nord liegt die Luftfeuchte am höchsten, gefolgt von Raum K1.16 (türkisgrün). Die geringste Luftfeuchtigkeit im GN wurde in Raum K 1.19 (orange) gemessen.

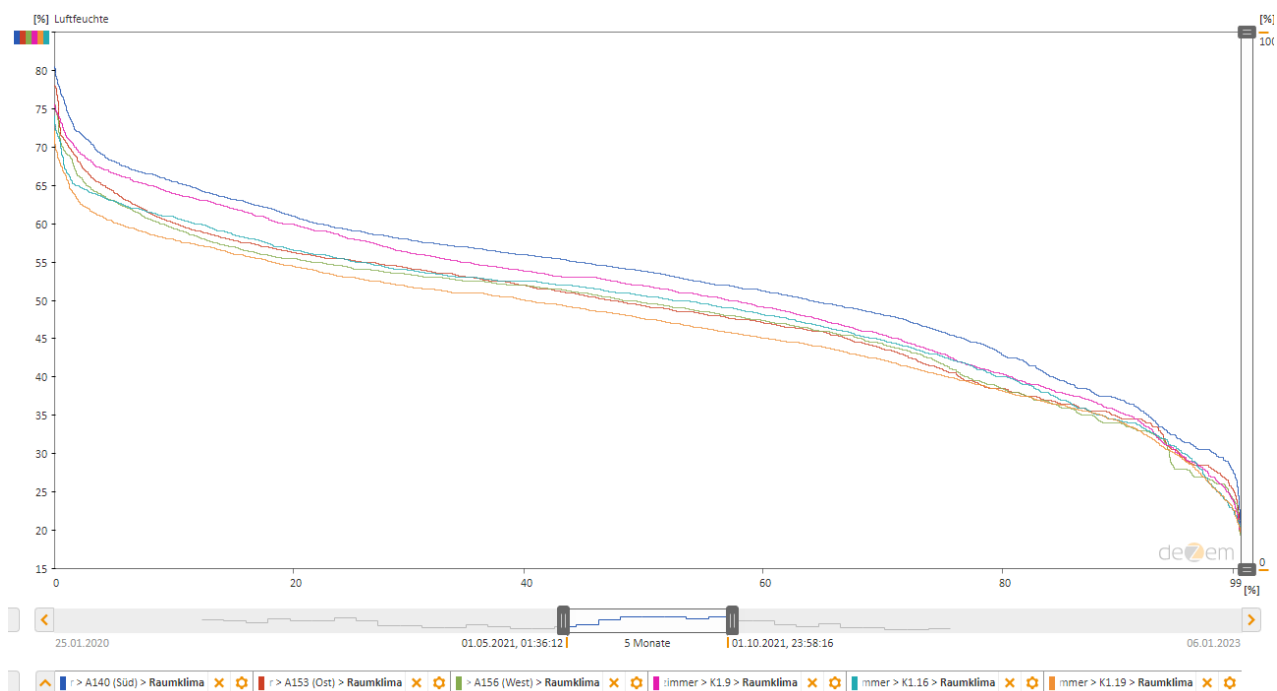


Abbildung 20: AG und GN, Raumtemperaturen (in °C) in allen sechs Klassenzimmern – Dauerlinie

CO₂-Konzentration in den Räumen

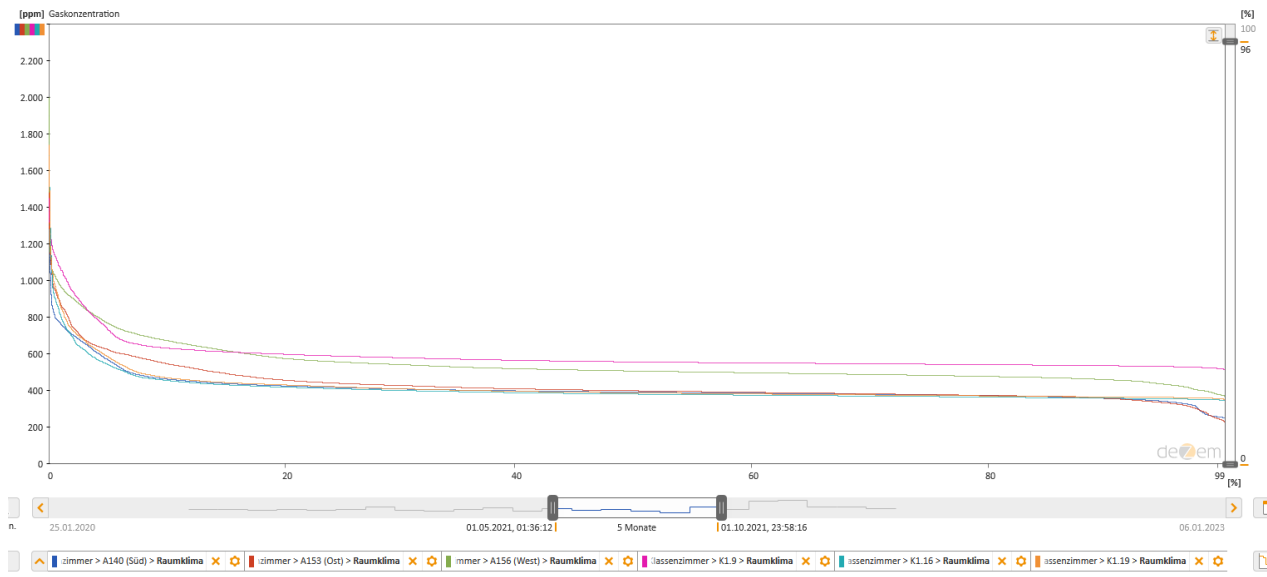


Abbildung 21: AG und GN, Raumtemperaturen (in °C) in allen sechs Klassenzimmern – Dauerlinie

Die Dauerlinie der CO₂-Konzentration für die Sommermonate (Abbildung 21) zeigt, dass die CO₂-Werte in beiden Schulen im Betrachtungszeitraum überwiegend in einem akzeptablen Bereich bei <1000 ppm liegen. Einzig in Raum K1.9 (magenta) des Gymnasiums Nord und in Raum A156 (hellgrün) des Adorno-Gymnasiums wurden teils kurzzeitig höhere CO₂-Werte gemessen.

Die CO₂-Konzentration in den Klassenräumen liegt auf Basis der Messwerte überwiegend im behaglichen Bereich.

- **CO₂-Konzentration:** Die CO₂-Konzentration (in ppm) liegt in den Klassenzimmern größtenteils unter 1000 ppm.
- **Lüftungsverhalten:** Das Lüftungsverhalten ist in allen Räumen recht ähnlich, siehe Abschnitt Fensterkontakte.

Der reine Luftaustausch in den Klassenräumen funktioniert ohne erkennbare Probleme.

Bewertung Nutzerverhalten

Fensterkontakte

Im Rahmen des Projekts wurden zudem Fensterkontakte in allen sechs Klassenzimmern installiert, die automatisch detektierten, ob die Fenster offen oder geschlossen waren. Die Fensterkontakte haben durchgängig gut funktioniert. Es zeigte sich, dass die Nachtlüftungsfenster im Adorno Gymnasium regelmäßig genutzt wurden und deutlich länger geöffnet waren als die übrigen Fenster.

Durch die automatische Überwachung der Fensterkontakte konnten zwei Fälle aufgedeckt werden, bei denen die Fenster über eine längere Zeit unbeabsichtigt offenstanden.

Im Adorno Gymnasium wurden in Raum A153 drei Fenster während der Sommerferien versehentlich offen gelassen, sodass über mehrere Wochen warme Luft in den Raum gelangen konnte und über die Lüftung gekühlt wurde. In Raum A140 waren während der gesamten Winterferien zwei Fenster geöffnet (siehe Abbildung 22).

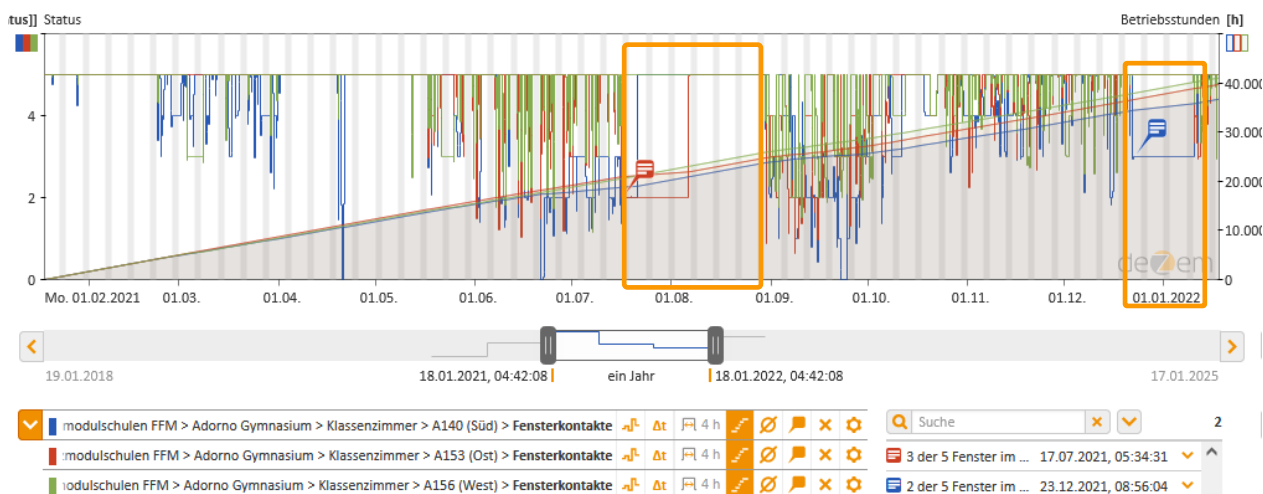


Abbildung 22: Adorno Gymnasium – autom. Überwachung der Fenster. Status = 5 bedeutet alle 5 Fensterkontakte geschlossen.

Die Überwachungsergebnisse der Fenster im Gymnasium Nord (Abbildung 23) zeigen, dass in allen drei untersuchten Klassenzimmern ähnlich oft gelüftet wurde. Hier lässt sich kein signifikanter Unterschied im Lüftungsverhalten erkennen, d. h. das Lüftungsverhalten kann als Ursache für die deutlich unterschiedlichen Klimaverhältnisse in den Räumen ausgeschlossen werden. Auch in dem Ausnahmemonat Juni mit hohen Außenlufttemperaturen waren die Fenster in allen drei Klassenzimmern ähnlich lange geöffnet. Dies ist vor allem an warmen Tagen ungünstig, da so die kühlere Luft aus den Lüftungsanlagen mit der deutlich wärmeren Außenluft vermischt wird.

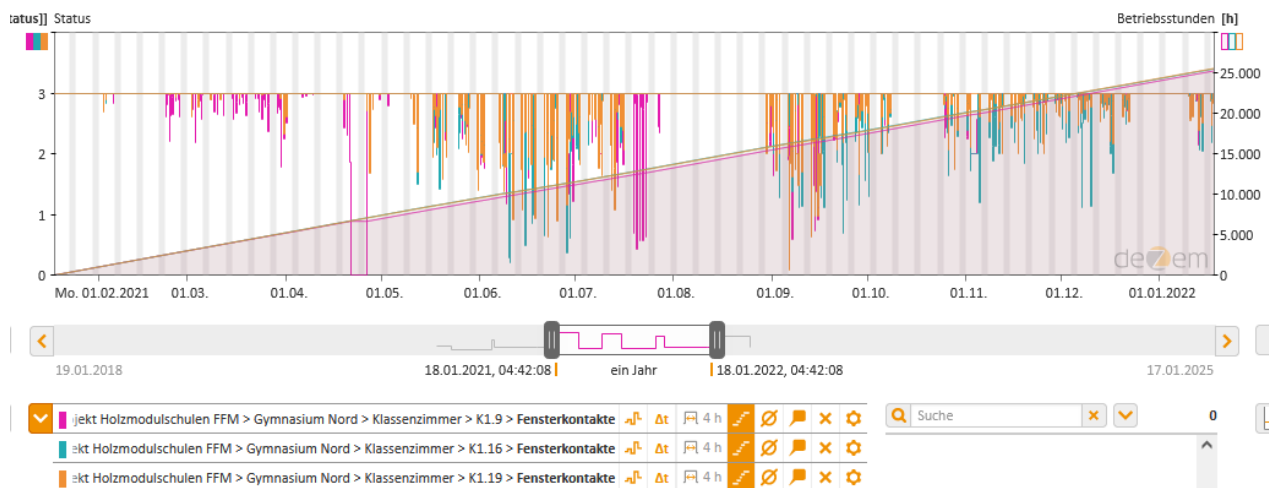


Abbildung 23: Gymnasium Nord - autom. Überwachung der Fenster. Status = 3 bedeutet alle 3 Fensterkontakte geschlossen.

Sonnenschutz

Um die Jalousiesteuerung zu überwachen wurde die Beleuchtungsstärke in den Klassenzimmern mit aufgenommen und mit den einem auf dem Dach des AG installierten Bestrahlungsstärkesensor verglichen. Die Tagesverläufe der Beleuchtungsstärke hängen sehr stark von der Ausrichtung des Raumes ab. Die folgenden beiden Diagramme (Abbildung 24 und Abbildung 25) zeigen die Beleuchtungsstärkesensoren in den Klassenräumen von AG und GN im Vergleich zum Bestrahlungsstärkesensor auf dem Dach des AG an zwei wolkenfreien Tagen (links Sonntag, rechts Montag).

Der Einsatz der Verschattung kann anhand der Änderungen der Beleuchtungsstärke in den Räumen erkannt werden.

Im Adorno Gymnasium scheint die Verschattung nur aktiv, wenn sich Personen im Klassenzimmer befinden. Abbildung 24 zeigt deutlich für Sonntag keine Aktivität der Verschattung, montags hingegen in den verschiedenen Räumen zu unterschiedlichen Uhrzeiten deutliche Anstiege und Abfälle der Beleuchtungsstärke in den Klassenräumen. Abbildung 26 zeigt exemplarisch die Nutzung der Verschattung bis zum Ende der Nutzungszeit des Raumes um ca. 14 Uhr. Danach ist wie am Vortag (Sonntag) keine Verschattung erkennbar.

Im Gymnasium Nord wurde die Verschattung an den beiden Tagen offenbar kaum genutzt, da die Beleuchtungsstärke über lange Zeit am oberen Maximum liegt und keine Änderungen zu erkennen sind. Auch die Temperaturen in den Klassenzimmern steigen direkt mit der steigenden Beleuchtungsstärke, was ebenfalls auf eine unzureichende Verschattung schließen lässt. Abbildung 27 zeigt dies exemplarisch für Klassenzimmer K1.9, wo keine Änderung in der Beleuchtungsstärke registriert werden konnte, und die Raumtemperaturen (rot) über den Nachmittag deutlich zunehmen.

Der Sonnenschutz in beiden Schulen sollte so eingestellt werden, dass in Kühlperiode, wenn es die Windbedingungen erlauben, eine deutliche Verschattung erzielt wird, auch an Wochenenden, wenn die Räume nicht genutzt werden. Dadurch kann ein unnötiges Aufheizen des Gebäudekerns verhindert bzw. verzögert werden.

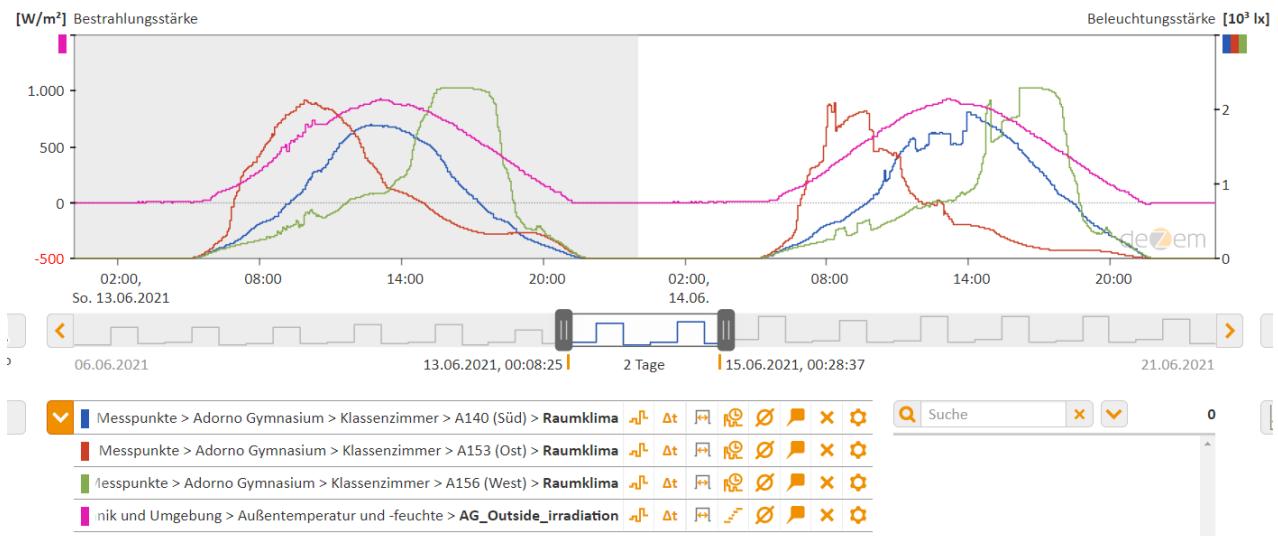


Abbildung 24: AG - Bestrahlungsstärke Dach (magenta) und Beleuchtungsstärke in den Klassenräume an zwei wolkenfreien Tagen links Sonntag rechts Montag.

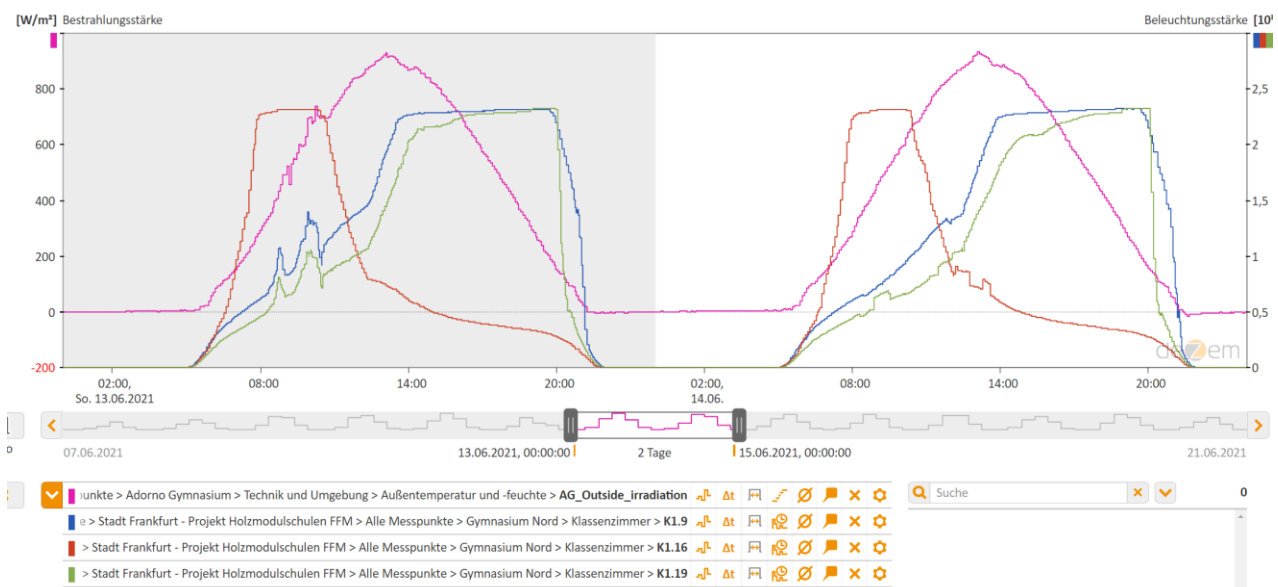


Abbildung 25: GN – Bestrahlungsstärke Dach (magenta) und Beleuchtungsstärke in den Klassenräume an zwei wolkenfreien Tagen links Sonntag rechts Montag.

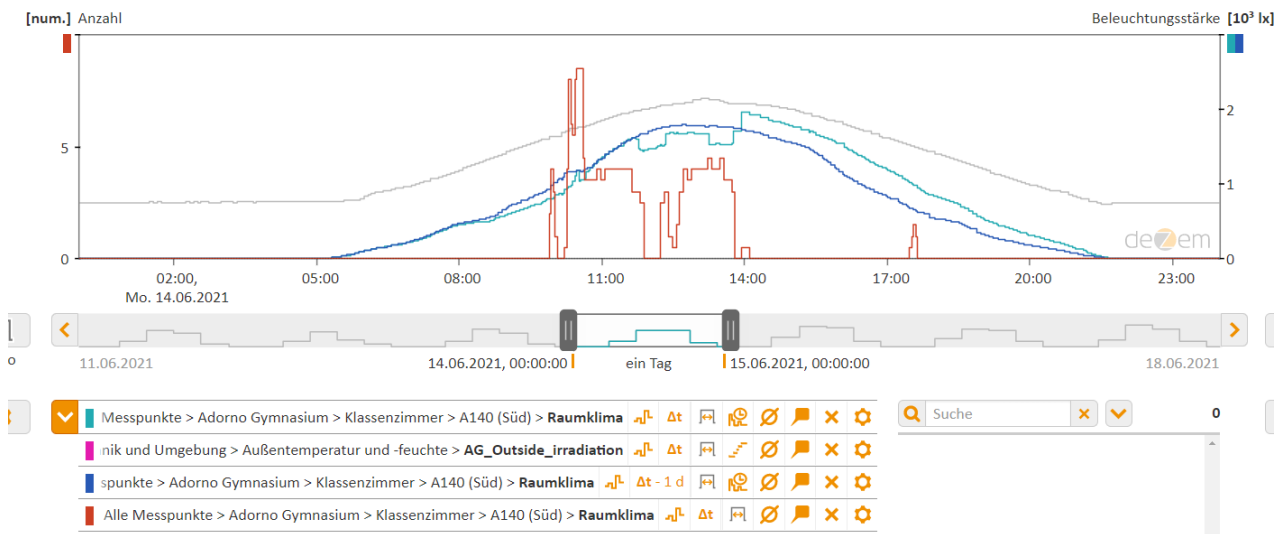


Abbildung 26: AG - Verschattung Klassenzimmer A140 (Süd) - Vergleich zweier wolkenloser Tage - Beleuchtungsstärke cyan an einem Schultag und blau am Sonntag davor – Bewegung an diesem Schultag im Klassenzimmer in rot.

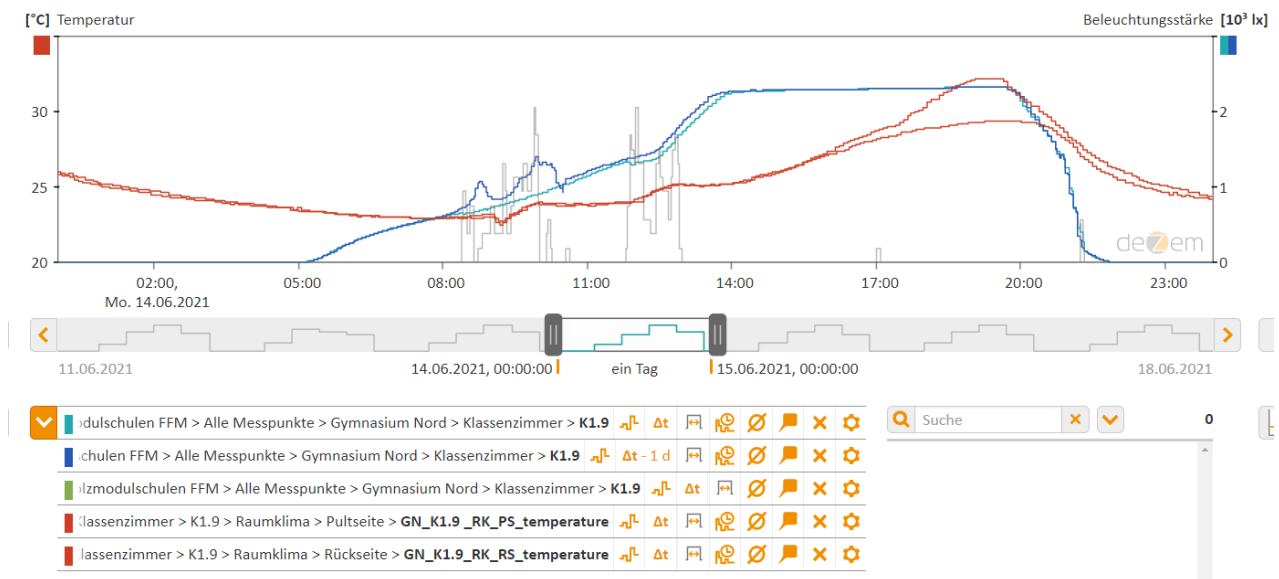


Abbildung 27: GN - Verschattung Klassenzimmer K1.9 (Süd-West) - Vergleich zweier wolkenloser Tage - Beleuchtungsstärke cyan an einem Schultag und blau am Sonntag davor – Bewegung an diesem Schultag im Klassenzimmer in grau,- rot Temperaturverlauf in dem Klassenzimmer.

Bewertung Gebäude und Anlagenkonzept

In diesem Kapitell werden die beiden Anlagenkonzepte verglichen. Zuerst das Verhalten der Raumtemperaturen der beiden Schulen während einer Hitzeperiode, wie gut funktionieren die Konzepte bei solchen Bedingungen. Anschließend werden die Verbräuche sowie Kosten der beiden Konzepte verglichen. In den letzten beiden Unterkapiteln werden Fehler im Anlagenbetrieb aufgezeigt und mögliche Einsparpotentiale aufgezeigt.

Raumtemperaturen während der Hitzeperiode

Für einen ersten Vergleich der beiden Kühlkonzepte werden zuerst die beiden Schulen miteinander verglichen (Mittelwert aller Raumtemperaturen) und anschließend die einzelnen Räume je Schule. In beiden Fällen werden die Überschreitungen der oberen Grenze der Solltemperatur betrachtet.

Die Raumtemperaturen im Gymnasium Nord lagen während der Hitzeperiode im Juni 2021 unterhalb der Temperaturen im Adorno-Gymnasium. Abbildung 28 zeigt die maximale Solltemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur in Frankfurt (rot) sowie die gemittelten Raumtemperaturen des Adorno-Gymnasiums (hellgrün) und des Gymnasiums Nord (magenta) mit ihren jeweils 3 Klassenzimmern (je 2 Sensoren pro Raum).

Die maximale Solltemperatur für die Raumtemperaturen wurde nach dem Kriterium Außentemperatur – 3°C bzw. 27 °C festgelegt.

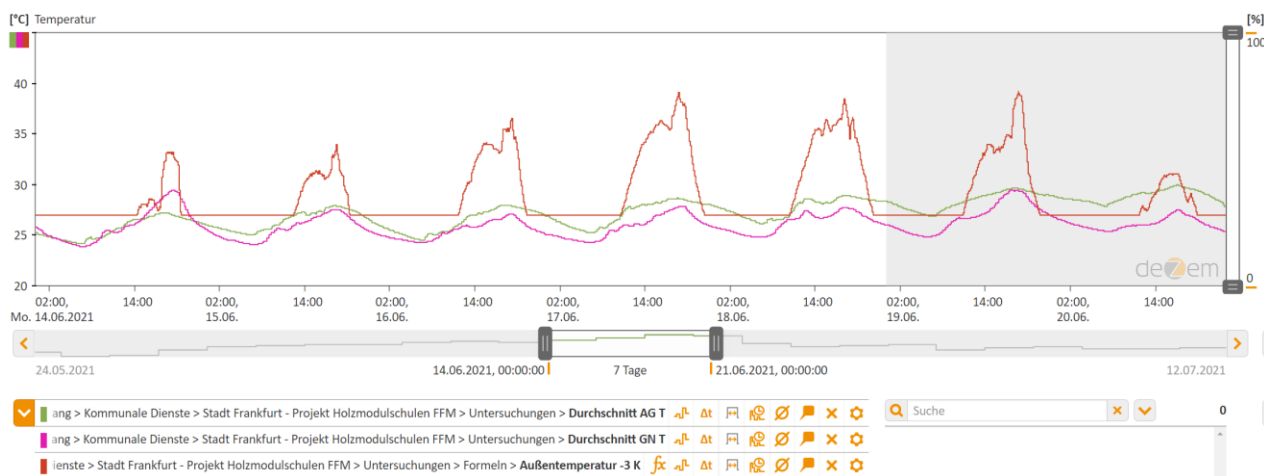


Abbildung 28: Raumtemperaturen AG (magenta) und GN (grün) sowie Außentemperatur-3°K bzw. 27 °C (rot) im Zeitraum 14.06 - 20.06.2021

Die Ergebnisse aus den nachfolgenden Abbildungen führen zu folgenden Schlussfolgerungen. Diese beziehen sich insbesondere auf die Hitzeperiode im Juni 2021.

- **Raumtemperatur allgemein:** In beiden Schulen liegen die Raumtemperaturen im Juni besonders hoch.

- **Temperaturunterschiede zwischen Klassenzimmern:** Im Adorno Gymnasium liegen die Temperaturen sowie die Zuluft in den drei untersuchten Räumen relativ ähnlich (siehe Abbildung 29), während sie im Gymnasium Nord zwischen den drei Klassenzimmern deutlich unterschiedlicher ausfallen (Abbildung 30).
- **Kühlung:** Im GN wurden nur in einem der drei untersuchten Räume, nämlich Raum K1.9, niedrige Temperaturen bei gleichzeitig hohen Außentemperaturen gemessen (siehe Abbildung 30). In Raum K1.19 im GN wurden in diesem Zeitraum die höchsten Raumtemperaturen gemessen mit den meisten Überschreitungen der Solltemperatur. In den Räumen K1.16 und K1.19 scheint von der Kühlleistung weder durch die Kühldecken noch durch die Lüftung kühle Zuluft anzukommen. Die Durchschnittliche Betondeckentemperatur weicht in diesen Räumen um 6 K von Raum K1.9 ab (siehe Abbildung 31).

Schlussfolgerung: Da davon ausgegangen wird, dass in beiden Schulen alle untersuchten Räume ähnlich ausgelastet waren, kann abschließend gesagt werden, dass die signifikanten Temperaturunterschiede zwischen den Klassenzimmern des GN vermutlich auf eine nicht korrekt installierte oder eingestellte Kälteverteilung zurückzuführen sind.

Andere Einflussfaktoren wie unterschiedliches Lüftungsverhalten können ausgeschlossen werden, da die Überwachung der Fenster gezeigt hat, dass in allen Klassenzimmern ähnlich oft gelüftet wurde.

Die Lüftungsanlage und Kühlung im AG arbeitet dagegen recht gleichmäßig. In allen drei Räumen sind die Raumtemperaturen während der untersuchten Hitzeperiode sehr ähnlich. Die Überschreitungen der Solltemperaturen (rot) sind nur geringfügig vor allem in den Abendstunden (siehe Abbildung 29).

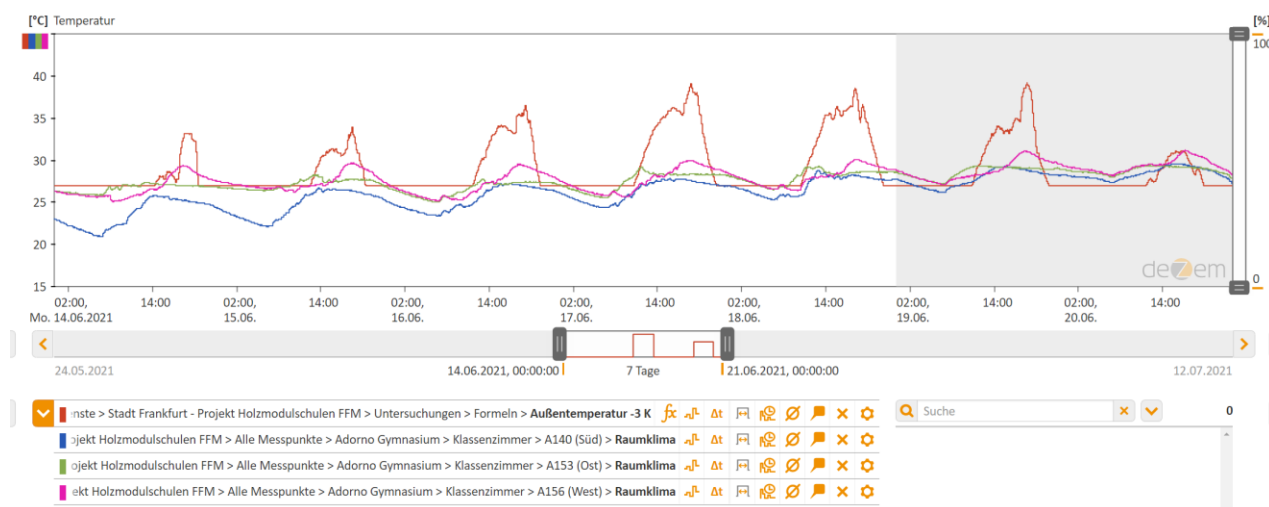
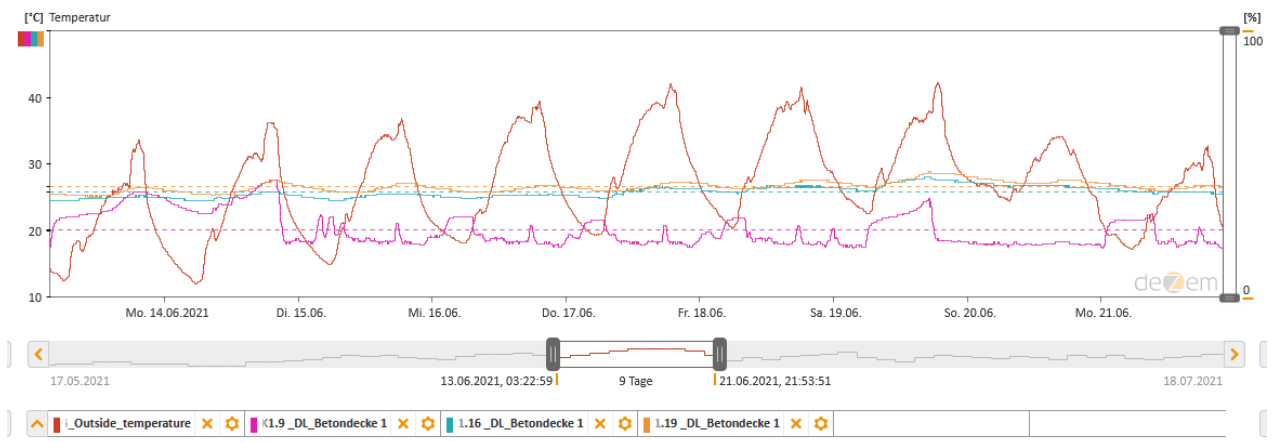
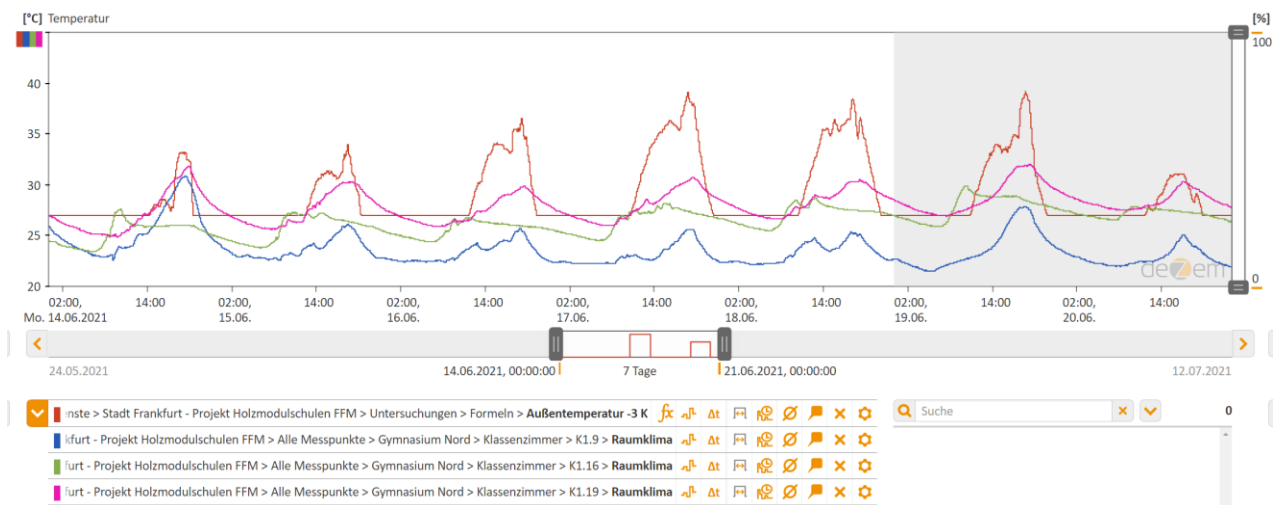


Abbildung 29: AG - Solltemperatur maximal (rot) - Raumtemperaturen A140 (blau), A153 (grün), A156 (magenta).



Stromverbräuche und –kosten auf Basis der Abrechnungen

Die folgende Tabelle zeigt die Stromverbräuche und Kosten aus den monatlichen Abrechnungen des Energieversorgers, sowie die Fläche der beiden Schulen und daraus resultierenden spezifischen elektrischen Verbrauch je m². Für das GN wurde die Fläche der Liegenschaft hergenommen, da der Holzmodulbau nicht über einen eigenen Abrechnungszähler verfügt. Da sich auf dem Campus noch Sporthallen und andere Schulgebäude befinden sind die spezifischen Verbräuche nur bedingt vergleichbar. Durch die Detailmessungen der Lüftungsanlage und der Kältemaschine in GN wird gezeigt, dass ein signifikanter Anteil auf diese zurückzuführen ist.

	Holzmodulbau AG Fläche in m ² :	16.600			GN Campus Fläche in m ² :	14.080	Holzmodulbau GN A + B:	7.441
	Adorno-Gymnasium				Gymnasium Nord			
Abrechnungs- monat	Verbrauch El. Energie in kWh	Verbrauch / Fläche in kWh / m ²	Kosten El. Energie in € (Brutto)	Kosten / Fläche in € / m ²	Verbrauch El. Energie in kWh	Verbrauch / Fläche in kWh / m ²	Kosten El. Energie in € (Brutto)	Kosten / Fläche in € / m ²
Jan 20	11.288	0,68			34.938	2,5		
Jun 20	10.276	0,62			37.749	2,7		
Dez 20	10.113	0,61			44.988	3,2		
Jan 21	8.959	0,54	2.409,73	0,15	38.276	2,7	8.524,10	0,61
Jun 21	13.294	0,80	3.295,61	0,20	52.728	3,7	12.531,18	0,89
Dez 21	11.163	0,67	2.560,09	0,15	49.040	3,5	10.114,80	0,72
Mittelwert	10.849	0,65	2.755,14	0,17	42.953	3,1	10.390,03	0,74
Extrapolierter Jahreswert	130.186	7,84	33.061,72	1,99	515.438	36,6	124.680,32	8,86

Der Vergleich der Stromrechnungen für die beiden Gebäude zeigt bereits einen deutlichen Unterschied beim Stromverbrauch der beiden Gebäude. Die Gebäude am Campus GN benötigt mehr als 4-mal so viel elektrische Energie je Fläche (kWh je m²) wie das AG.

Der Preis je kWh für die Kostenabschätzung wird aus diesen Abrechnungen mit ca. 23,49 ct/kWh abgeleitet. Da Preissteigerungen zu erwarten sind wird für die Berechnung der Einsparpotentiale mit 25 ct/kWh gerechnet.

Stromverbräuche und –kosten Detailbetrachtung

Da Strommessungen für die elektrische Erfassung durchgeführt wurden, werden die folgenden Verbräuche in Scheinarbeit VAh ausgewiesen. Die abgerechnete Wirkarbeit Wh ist je nach Verbraucher etwas niedriger. Für die Abschätzung der Wirkarbeit wird im Folgenden ein cos phi von 0,9 verwendet, dieser Wert wurde den monatlichen Abrechnungsinformationen der Schulen entnommen.

Die folgende Tabelle zeigt die in einem Jahr gemessenen Verbräuche sowie die daraus entstehenden Kosten und Treibhausgasemissionen je Anlage. Für die Berechnung der Treibhausgasemission wurden die Werte von UBA¹ und für Wasser von der BAFA² hergenommen.

¹ Laut [Umweltbundesamt](#) lag der CO₂-Emissionsfaktor für den deutschen Strommix 2021 bei 428 g/kWh.

² Laut [Informationsblatt CO₂-Faktoren der BAFA vom 15.11.2021](#) liegt der CO₂-Faktor für Wasser bei ca. 0,33 kg/m³.

Schule - Anlage	Jahresverbrauch in kVAh	Jahresverbrauch	Einheit	Betriebskosten je Jahr in €	Treibhausgasemission je Jahr in kg
GN - Lüftungsanlage RLT01	128.720	115.848	kWh	28.962	49.583
GN - Kältemaschine	109.080	98.172	kWh	24.543	42.018
AG - Lüftungsanlage RLT02	27.390	24.651	kWh	6.163	10.551
AG - Adiabate Kühlung RLT02		16	m³	58	5

Die folgende Tabelle Abbildung 32 und das Säulendiagramm Abbildung 33 geben einen Überblick über die gemessenen Verbräuche je Monat durch die Anlagen. Es ist deutlich der Verbrauch für die Kühlung in den Sommermonaten zu erkennen. Der Wasserverbrauch der Adiabaten Kühlung (grün) ist in m³ angegeben und wird in Abbildung 33 auf der zweiten Achse aufgetragen, dadurch erscheint er höher, ist aber mit Blick auf die Kosten deutlich niedriger.

Startzeitpunkt	Lüftungsanlage (W150)	Kältemaschine (T500)	AG_cooling_volume	Strom RLT 2 - Sicherung F...
Intervall.: Monate	Scheinarbeit [MVAh] Δt = 0	Scheinarbeit [MVAh] Δt = 0	Volumen [m³] Δt = 0	Scheinarbeit [MVAh] Δt = 0
01.03.2021	11,86	0,07	0	1,58
01.04.2021	12,22	1,47	0	2,45
01.05.2021	10,96	8,57	0	1,66
01.06.2021	11,38	26,01	5,32	3,25
01.07.2021	11,42	24,08	3,64	3,62
01.08.2021	11,53	13,07	1,31	2,95
01.09.2021	11,35	9,82	1,79	3,34
01.10.2021	7,26	8,72	0	1,78
01.11.2021	7,76	4,26	0	1,62
01.12.2021	11,85	2,58	0	1,87
01.01.2022	10,92	3,18	0	1,62
01.02.2022	10,21	7,24	0	1,65
Summe Σ	128,72	109,08	12,06	27,39

Abbildung 32: Verbräuche Lüftungsanlage GN (blau), AG (magenta) und Kühlung GN (rot), AG (grün) – Tabelle

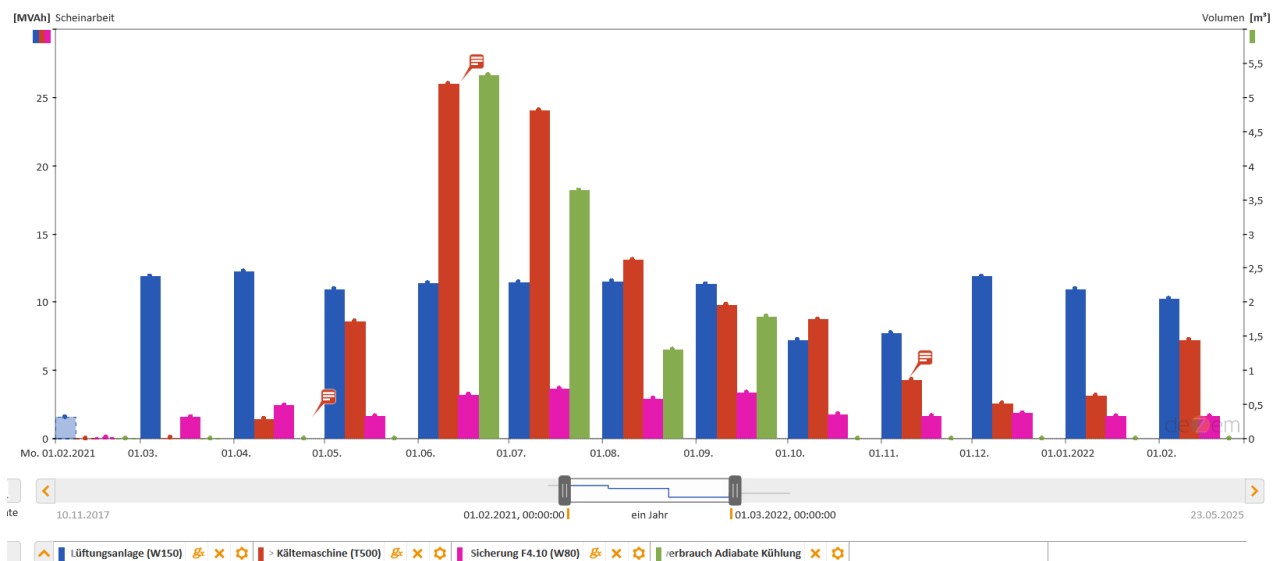


Abbildung 33: Verbräuche Lüftungsanlage GN (blau), AG (magenta) und Kühlung GN (rot) in MVAh linke Achse, Verbrauch Wasservolumen Adiabate Kühlung AG in m³ rechte Achse (grün) – Säulendiagramm

Lüftungsanlagen

Der Strombedarf der Lüftungsanlage im GN ist signifikant höher, verglichen mit den Lüftungsanlagen im AG. Bei einem ähnlich hohen Luftumsatz 30.000 m³/h (GN) vs. 21.620 m³/h (AG) ist der spezifische Verbrauch in Wh/m³ auf das Jahr gerechnet um Faktor 2 höher. Der spezifische Verbrauch wurde hier anhand der mit der Dauerlinie ermittelten Betriebsstunden der Anlagen berechnet Abbildung 34.

Die Betriebsstunden GN: 6.044 (69% des Jahres) bzw. AG: 3.592 (41% des Jahres) liegen deutlich über den Betriebszeiten von vergleichbaren Anlagen. Das Optimierungspotential bei den Betriebszeiten wird im Detail im Kapitel „Fehlende bedarfsgeführte Betriebsführung“ aufgezeigt.

	Jahresverbrauch in kWh	Volumenstrom in m³/h	ermittelte Betriebsstunden	berechnetes Volumen auf Basis der Betriebsstunden in m³	spezifischer Verbrauch in Wh/m³
GN Lüftungsanlage	115.848	30.000	6.044	181.320.000	0,6
AG Lüftungsanlage	24.651	21.620	3.592	77.659.040	0,3

Die spezifischen Verbräuche der Anlagen über 5 Stunden bei „Normalbetrieb“ gemessen, fallen ebenfalls deutlich schlechter für das Gymnasium Nord aus. Auf den Betriebszustand über 5 Stunden gemessen, ist der spezifische Verbrauch im GN ebenfalls doppelt so hoch wie im AG (GN: 0,6 Wh/m³ vs. AG: 0,3 Wh/m³).

	Verbrauch 5 h in kWh	Volumenstrom in m³/h	berechnetes Volumen bei 5 Betriebsstunden in m³	spezifischer Verbrauch in Wh/m³
GN Lüftungsanlage	93	30.000	150.000	0,6
AG Lüftungsanlage	32	21.620	108.100	0,3



Abbildung 34: Dauerlinie Lüftungsanlage GN (grün) und AG (blau) über 12 Monate – auf der x-Achse ist die Zeit in Prozent aufgetragen.

Der überraschend hohe Stromverbrauch (ca. 90 A) der Lüftungsanlage RLT01 im GN muss vor Ort untersucht werden, aus der Dokumentation und den vorliegenden Messungen konnte dieser nicht nachvollzogen werden. Um einen Fehler in der Messung auszuschließen wurde das Verbrauchsprofil der Lüftungsanlage mit der Lastkurve des Abrechnungszählers verglichen. Hier konnte an vielen Stellen das gleiche Profil erkannt werden und somit eine Leistung von ca. 20 kW (ca. 30 A je Phase) im Betrieb validiert werden (siehe Abbildung 35).

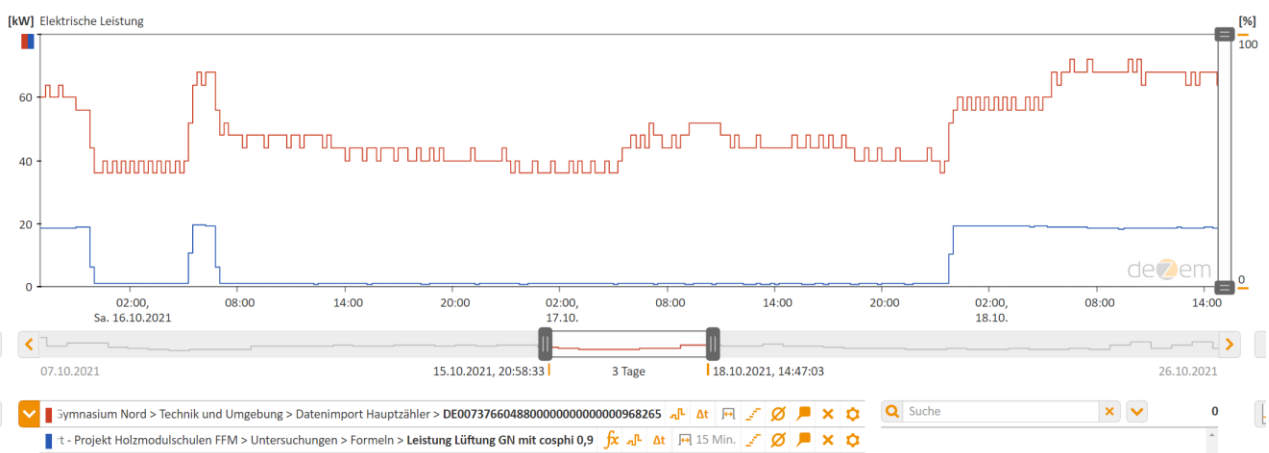


Abbildung 35: GN - Vergleich Lastprofil Campus GN (rot) mit berechnetem Lastverlauf der Lüftungsanlage RLT01 (blau) (90 A = ca. 19 kW).

Kälteerzeugung

Der Strombedarf für die Kühlung im Gymnasium Nord ist ebenfalls sehr hoch. Für ein Jahr wurde ein Verbrauch von ca. 110 MVAh gemessen (ca. 100 MWh), was Kosten von ca. 25.000 € innerhalb eines Jahres verursacht.

Da die Luft im Adorno Gymnasiums mit Wasser gekühlt wird, muss hier für die Kühlung der Wasserbrauch während eines Jahres in die Rechnung einbezogen werden. Der Wasserverbrauch liegt bei ca. 12 m³ bei der gemessenen Lüftungsanlage. Da die Messung des Wasservolumens erst im Juni gestartet werden konnte, ist wird auf einen jährlichen Verbrauch von ca. 16 m³ extrapoliert. Dies entspricht Koste von ca. 58€ für diese Anlage (2 + 1,61 €/m³).

Um die Kosten je Fläche die mit der Anlage gekühlt wird zu berechnen, wurde für die Kältemaschine des GN die gesamte Raumfläche verwendet, da sie die zentrale Kältequelle ist. Für die Fläche die über die Adiabate Kühlung in der RLT2 im AG gekühlt wird, wurden 17 % der Gesamtfläche angenommen, da dies der Anteil der RLT2 am Gesamtvolumenstrom der Schule ist.

Hier durch zeigen sich die deutlich höheren Kosten durch die elektrische Kältemaschine im Vergleich zur Adiabate Kühlung. Im GN fallen über 3 €/m² für die Kühlung an im AG sind es nur 0,02 €/m².

	Jahresverbrauch	Einheit	Betriebskosten je Jahr in €	Gekühlte Raumfläche durch die Anlage in m ²	Kosten je Fläche €/m ²
GN Kältemaschine	98.172	kWh	24.543	7.441	3,30
AG Adiabate Kühlung in RLT2	36	m ³	58	2.822	0,02

Fehlerhafter Anlagenbetrieb – Pumpensteuerung

Bei der Kältemaschine im GN gibt es Probleme mit der Ansteuerung der Pumpen durch die GLT. Diese wurden dreimal im Betrachtungszeitraum auf Dauerbetrieb gestellt (insgesamt ca. 5 Monate). Dies führte zu signifikanten Mehrverbräuchen von ca. 70 MVAh pro Monat (bzw. ca. 1.370 € je Monat / insgesamt: ca. 6850 €) im Vergleich zum geregelten Pumpenbetrieb.

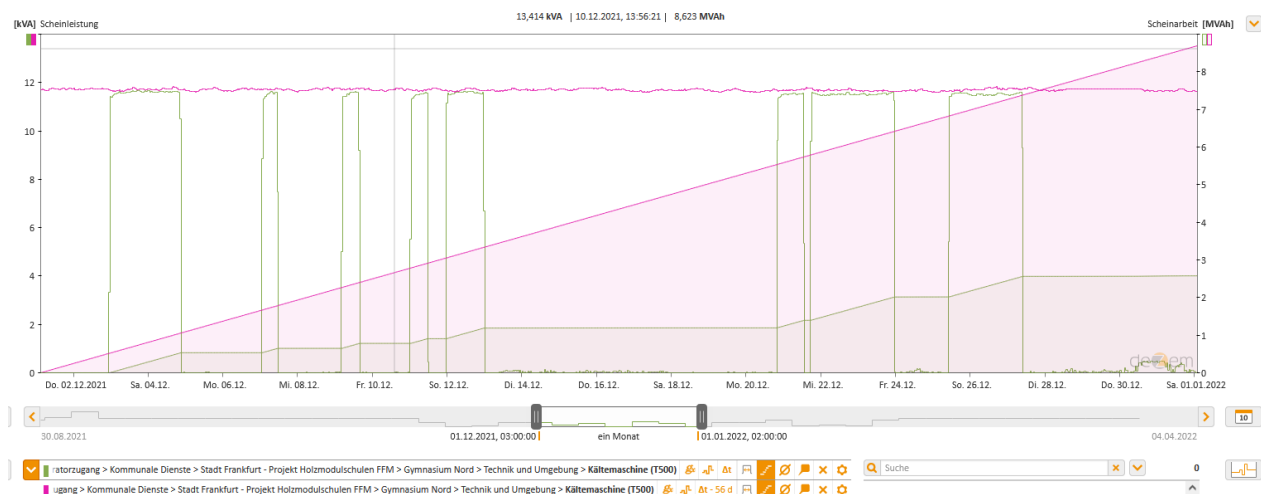


Abbildung 36: GN, Vergleich geregelter (blau) und ungeregelter (magenta) Betrieb der Kältemaschine im Winter

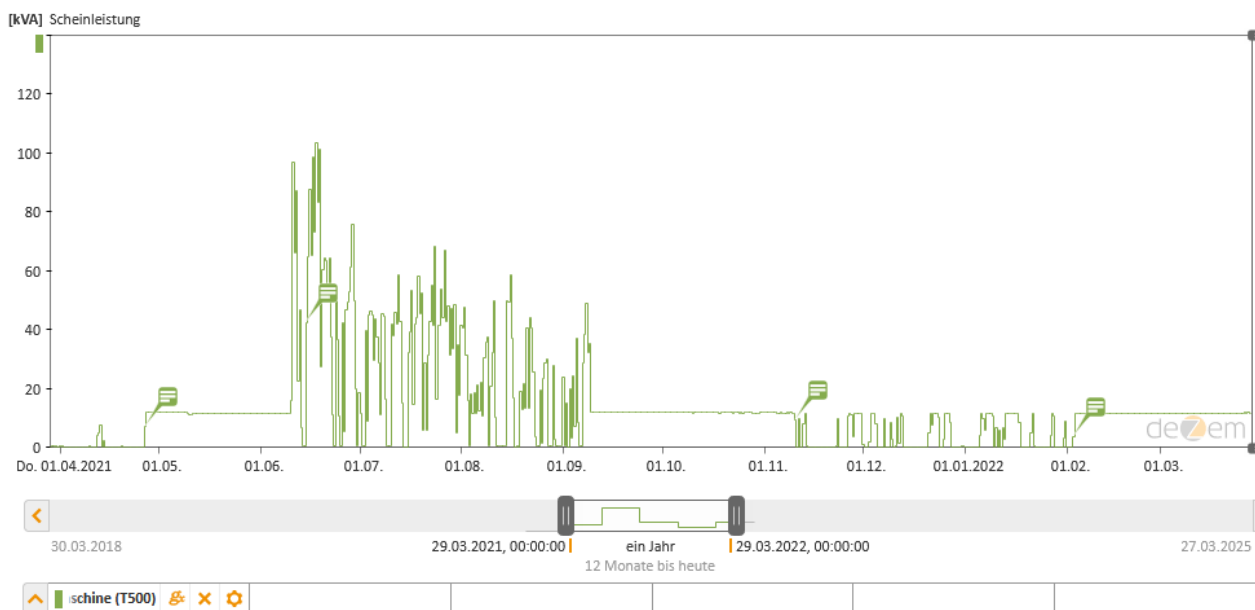


Abbildung 37: GN, erfasste Scheinleistung der Kältemaschine über 1 Jahr

Fehlende bedarfsgeführte Betriebsführung

Beide Lüftungsanlagen sind nicht optimal auf die Nutzungszeiten der Schule abgestimmt. Die folgenden Diagramme zeigen die Bewegung in den Räumen der beiden Schulen (Abbildung 38) und die Verbräuche in diesem Zeitraum (Abbildung 39).

Es zeigt sich:

- Keine der Anlagen ändert während der Ferienzeit den Betriebszustand.
- Die Lüftungsanlage im GN (Abbildung 39, blau) läuft an den Wochentagen Tag und Nacht durch, es ist kein reduzierter Nachtbetrieb erkennbar.
- Die Kältemaschine im GN läuft durchgehend auch an den Wochenenden Tag und Nacht durch (Abbildung 39, rot).

Hier könnten durch einfache Anpassungen der Betriebszeiträume deutliche Einsparungen erzielt werden.

Durch eine Abschaltung der Lüftungsanlage im GN während der Nachtstunden 18:00 bis 6:00 Uhr (10 Stunden) lassen sich 42 % des täglichen Energiebedarfs (ca. 500 kVAh * 0,42) einsparen. 210 kVAh multipliziert mit der Anzahl der Schultage im Jahr (ca. 200) ergibt eine Gesamteinsparung von 42 MVAh, was wiederum Kosten von rund 9.866 € entspricht. Damit könnten etwa 15,37 t CO₂-Emissionen im Jahr eingespart werden.

Durch die Abschaltung der Anlagen allein in den Sommerferien könnte entsprechend der jeweiligen Verbräuche der Anlagen mindestens 1 Monatsverbrauch eingespart werden. Dadurch ergeben sich mögliche jährliche Einsparungen von ca. 6200 € allein für die diese Anlagen und die Sommerferien.

Anlage	Verbrauch im August	Kosten je Monat
AG Lüftungsanlage	2,95 MVAh	ca. 664 €
AG Adiabate Kühlung	1,31 m ³	ca. 5 €
GN Lüftungsanlage	11,53 MVAh	ca. 2594 €
GN Kältemaschine	13,09 MVAh	ca. 2945 €

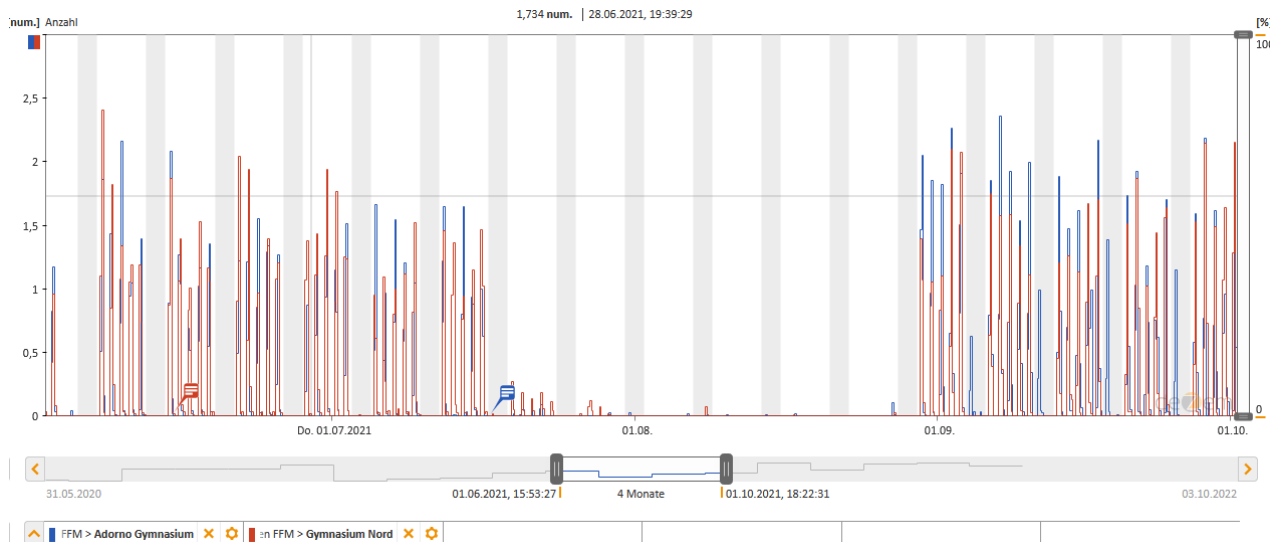


Abbildung 38: AG (blau) und GN (rot), Bewegung in den Klassenzimmern in den Sommermonaten mit Ferien im Juli/August

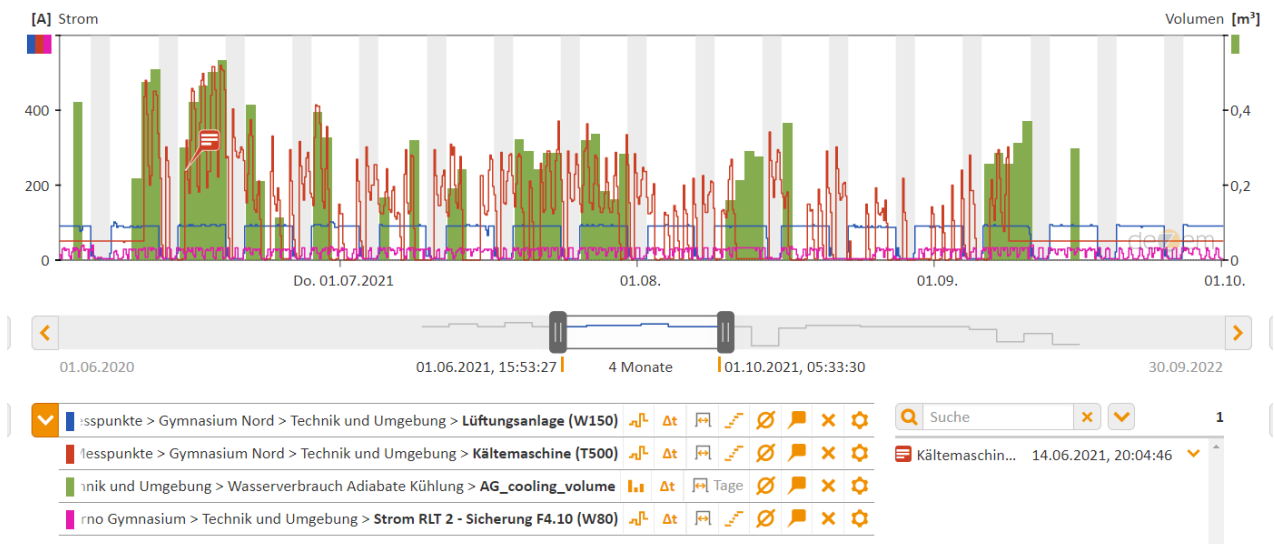


Abbildung 39: AG und GN, Verbrauchprofil der Lüftungsanlagen (AG: magenta / GN: blau) und Kühlanlagen (AG: grün / GN: rot) in den Sommermonaten. Es ist keine Änderung der Betriebsführung in den Sommerferien erkennbar.

Handlungsempfehlungen zur Optimierung

Regelmäßige Kontrolle der Fenster

Im Betrachtungszeitraum wurde allein in den überwachten Räumen zweimal vor den Ferien vergessen, die Fenster zu schließen. Dies konnte durch die installierten Fensterkontakte entdeckt werden (siehe Kapitel Fensterkontakte) und führte zu erheblichen Mehrverbräuchen.

Empfehlung:

- Vor dem Wochenende und den Ferien sollte stets kontrolliert werden, ob alle Fenster geschlossen sind. Insbesondere während heißer Sommertage und der kalten Wintermonate sollte darauf geachtet werden. Denn im Winter kann eine übermäßige Auskühlung zu einem erhöhten Heizungsbedarf führen. Im Sommer führen offene Fenster zur unnötigen Erhitzung der Räume, wodurch die Lüftungs-/Kühlanlagen besonders gefordert werden, d. h. damit auch der Energie- und Wasserbedarf der Lüftungs-/Kühlanlagen erheblich steigt. Dies bedeutet höhere Energie- und Wasserkosten.

Bessere Nutzung des Sonnenschutzes und der Fensterlüftung an warmen Tagen

Die Verschattung in den Klassenzimmern scheint verbesserungsfähig. Sie wird vor manuell durch die Nutzer gesteuert und nur im Fall von höheren Windgeschwindigkeiten automatisch hochgefahren. Das führt dazu, dass in den Zeiten in denen die Räume nicht genutzt werden keinen Sonnenschutz gibt und sich die Räume besonders erwärmen. Die Fenster werden durch die Nutzer auch an sehr warmen Tagen geöffnet, obwohl dadurch wärmere Luft in die Räume gelangt und den Nutzen der Kühlung durch die Lüftungsanlage entgegenwirkt.

Empfehlung:

- Sofort und leicht umsetzbar wäre eine Empfehlung an die Nutzer, im Sommer die Verschattung vermehrt zu nutzen und zur letzten Stunde ggf. komplett zu schließen. Vor allem in den Obergeschossen, wo die Gefahr von Vandalismus nicht so stark gegeben ist wie im Erdgeschoss, gibt es hier kaum Mehrkosten.
- Auch leicht umzusetzen wäre die Empfehlung an die Nutzer die Fenster an sehr warmen Tagen geschlossen zu halten, um der Kühlwirkung der Kältemaschine nicht entgegen zu wirken.
- Mit einer automatisierten Ansteuerung der Verschattung in der Abwesenheit der Nutzer könnte die Kühllast im Sommer deutlich gesenkt werden und verhindert werden, dass sich die Bausubstanz über das Wochenende unnötig aufheizt.

Komplexe Kühlkonzepte im GN sollten richtig eingestellt werden

Das „einfachere“ Kühlkonzept im AG zeigt ein robusteres Verhalten. Die Übertemperaturhäufigkeit ist sogar etwas niedriger als in manchen Klassenräumen im GN.

Bei der Lüftungsanlage des GN wurde eine sehr unterschiedliche Kälteverteilung festgestellt.

Empfehlung:

- Es wird eine genaue Untersuchung der Kälteverteilung im Gymnasium Nord empfohlen. Die deutlich höheren Temperaturen in Raum K1.19 des GN deuten darauf hin, dass die Kälte hier nicht korrekt verteilt wird. Dies gilt sowohl für die Zuluft als auch für die Kühldecken (siehe Kapitel Raumtemperaturen während der Hitzeperiode).

Sehr hoher Stromverbrauch Lüftungsanlagen + Kühlung GN

Der vergleichsweise sehr hohe Energieverbrauch der Lüftungsanlage und Kühlmaschine im GN wird u. A. durch wiederkehrende Betriebsfehler verursacht, dies sollte kontinuierlich überwacht werden. Die Betriebsführung von beiden Lüftungsanlagen ist nicht an den Bedarf angepasst (siehe Kapitel: Fehlende bedarfsgeführte Betriebsführung) hier besteht ebenfalls Optimierungspotential.

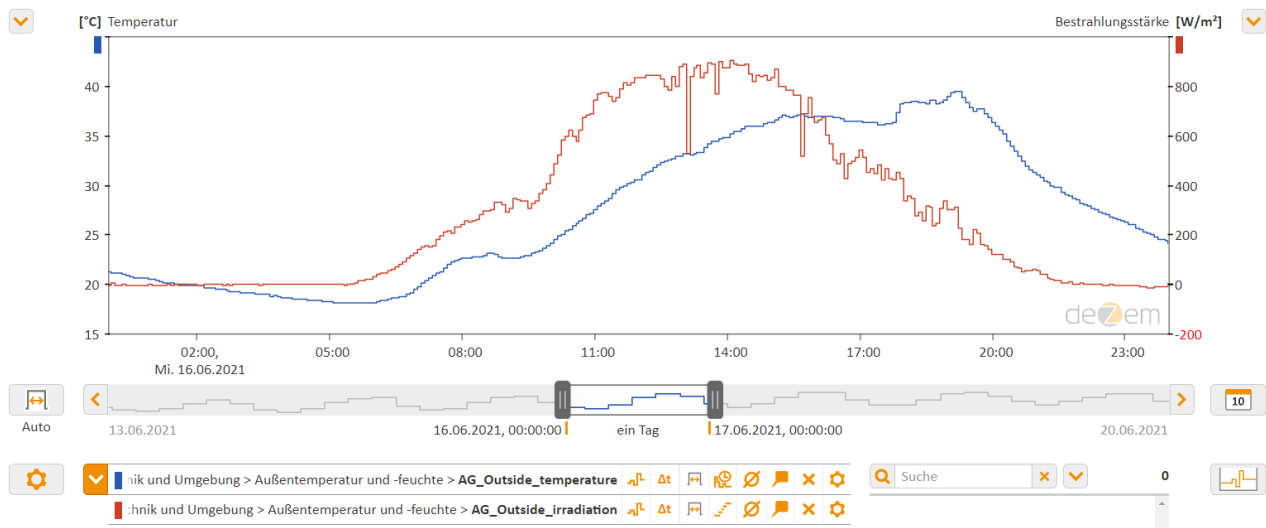
Empfehlung:

- Es sollte zum einen die Steuerung der Lüftungsanlage im GN angepasst werden. Der Dauerbetrieb von Anlagen sollte verhindert werden (z. B. Dauerbetrieb Pumpen).
- Es sollten Ferienzeiten berücksichtigt und ein Nachtbetrieb eingerichtet werden.
- Um den korrekten Betrieb dieser energieintensiven Anlagen zu überwachen, empfehlen wir ein detaillierteres kontinuierliches Monitoring des Anlagenzustandes und des Anlagenverbrauchs. Das Wechseln in den ungeplanten Dauerbetrieb würde so schneller erkannt werden und deutlich Energie und Kosten sparen.
- Wir empfehlen ein Edge Device (z.B. iPCR von deZem), mit dem Betriebsparameter z. B. via BACnet/IP oder Modbus ausgelesen werden können und Transparenz in den Anlagenbetrieb gebracht werden kann. Auch die Regelung der Anlagen ließe sich auf diese Weise vollständig und sinnvoll automatisieren – ggf. auch mit Nutzereingaben und automatisierter Rücksetzung auf den normal automatisierten Betrieb, z. B. nach einigen Stunden.
- Via Webportal sollten die Daten für die relevanten Nutzergruppen freigegeben werden, die Betriebsverantwortlichen könnten so bei Fehlverhalten alarmiert werden und den Anlagenzustand regelmäßig kontrollieren.

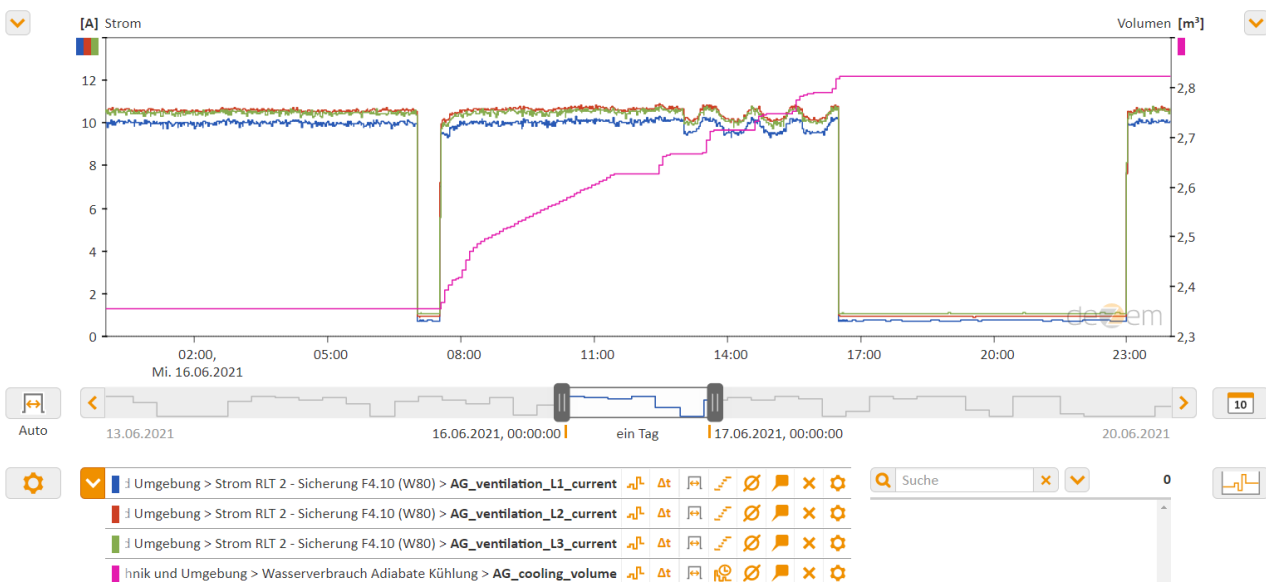
Anhang

Typische Tagesverläufe

Außentemperatur und Sonneneinstrahlung



Anlagentechnik Verbräuche



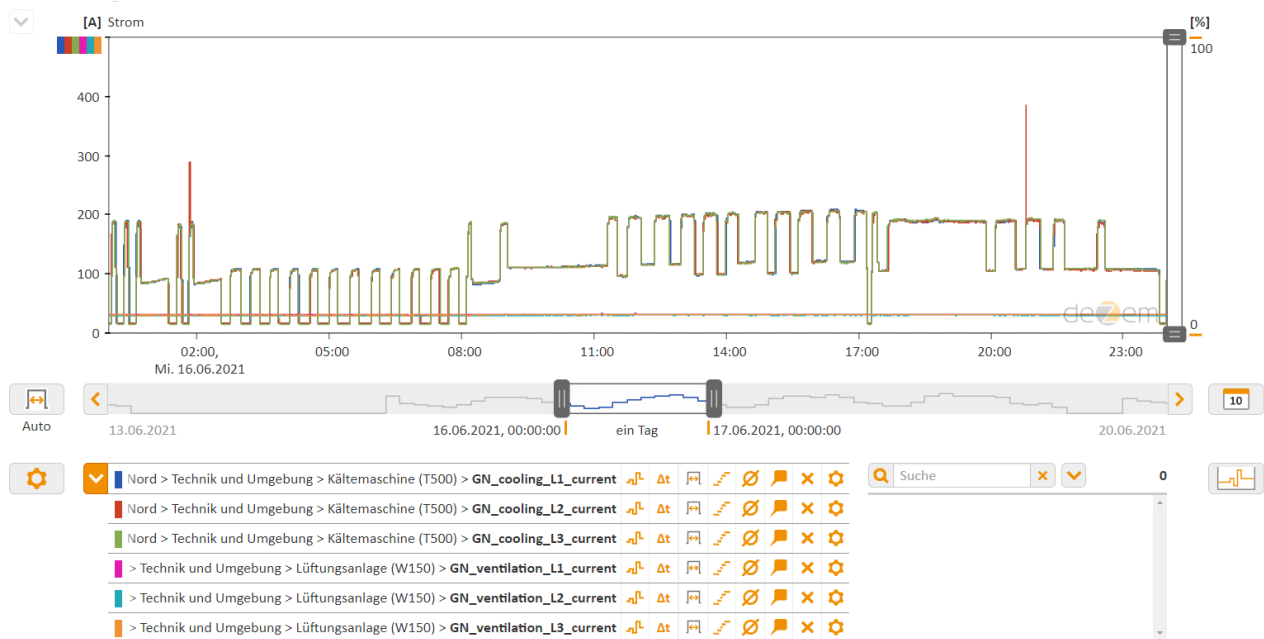


Abbildung 42: GN – Strommessung Kältemaschine und Lüftungsanlage je 3 Phasen - Tagesverlauf

Temperatur und Feuchte

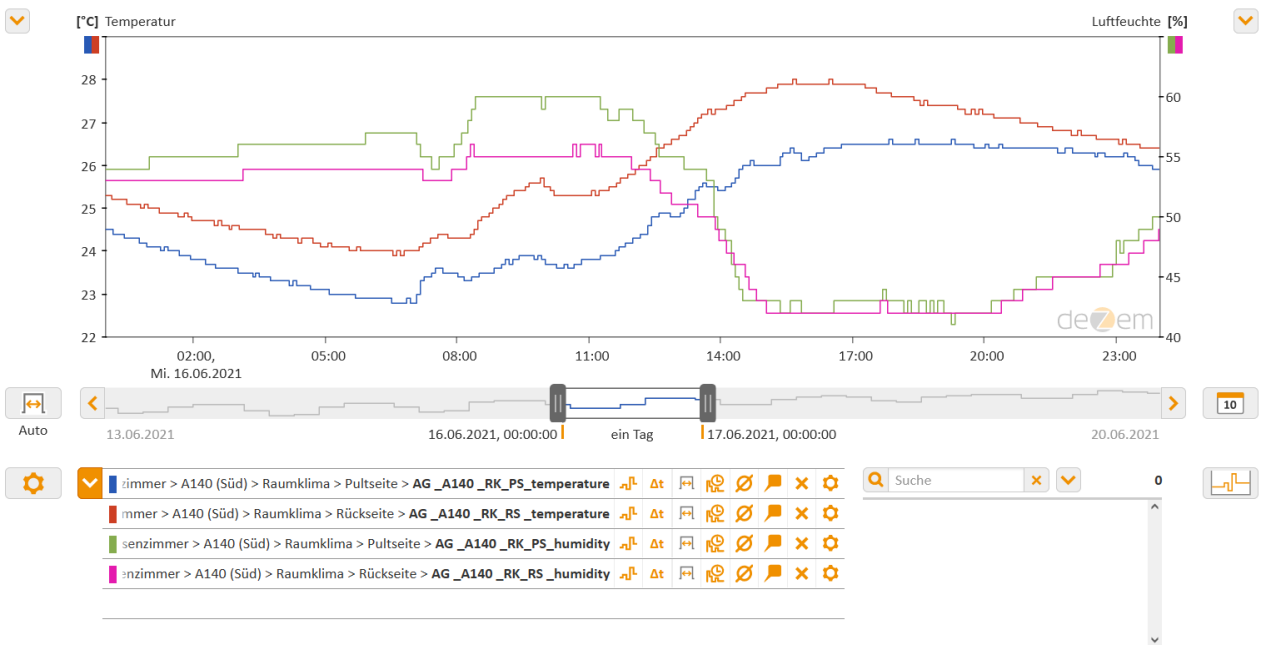
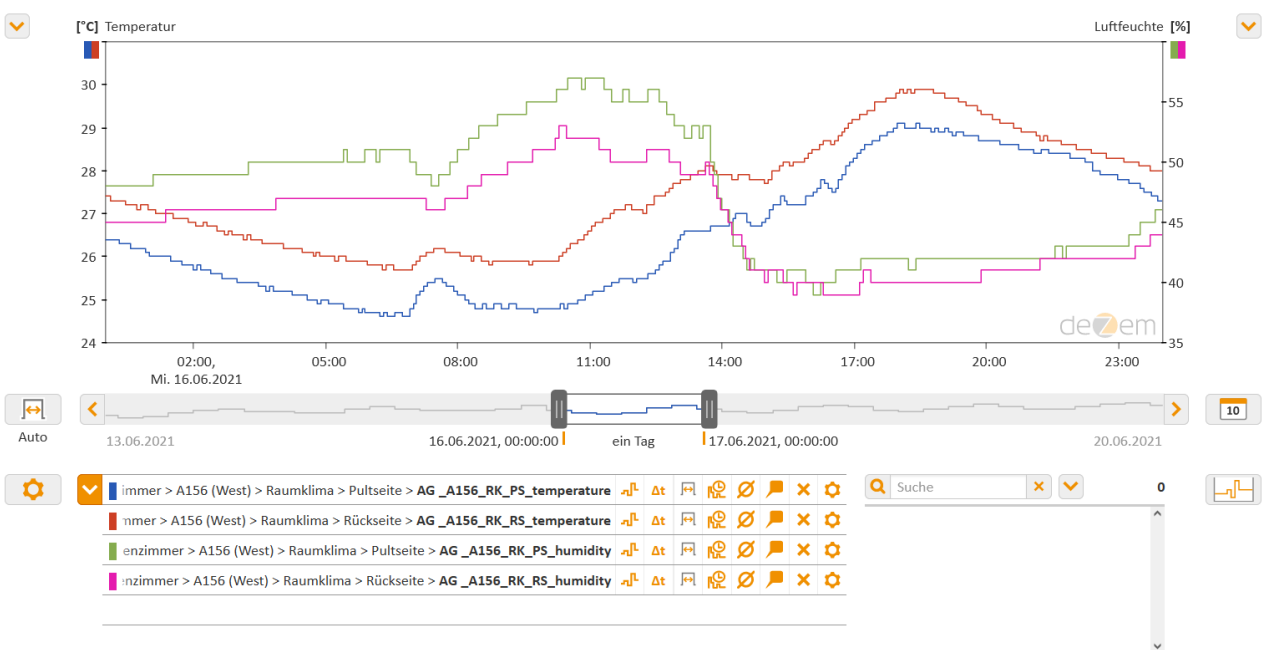
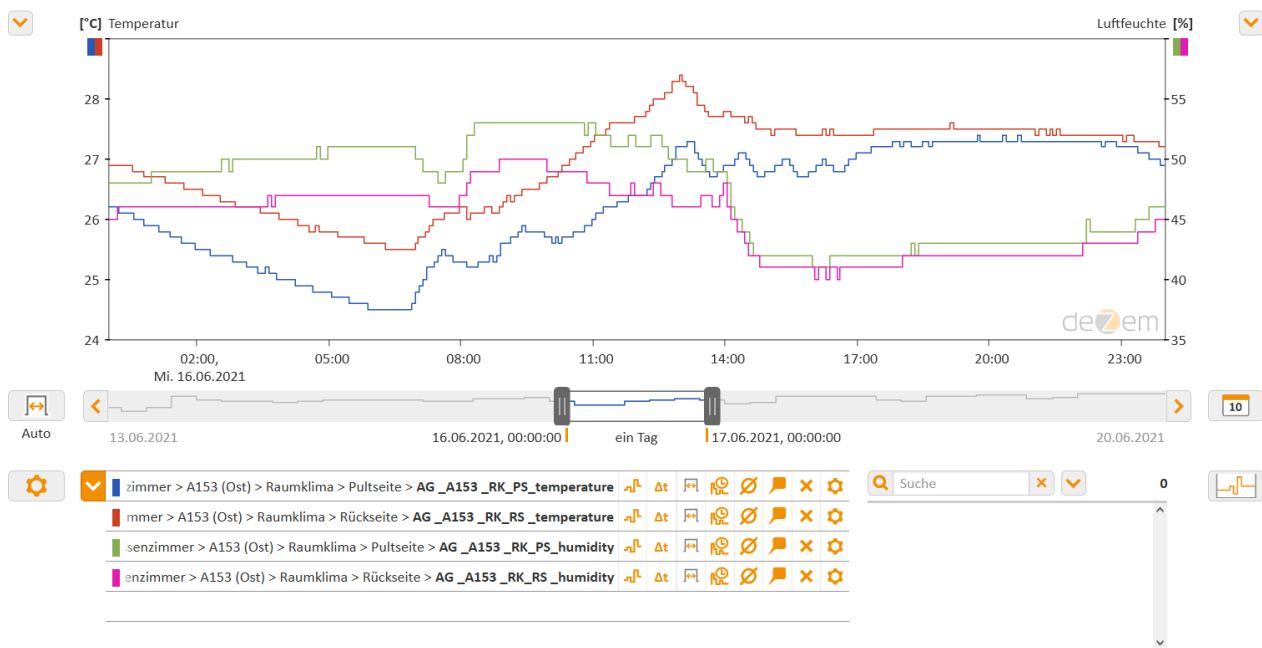
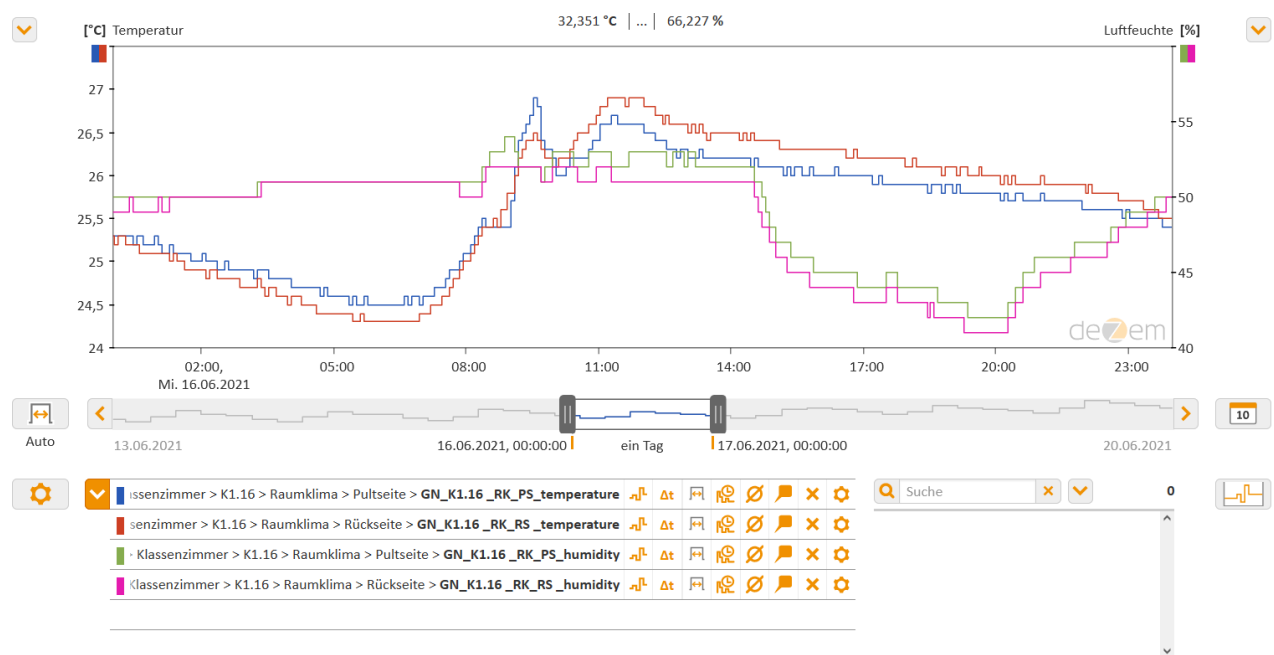
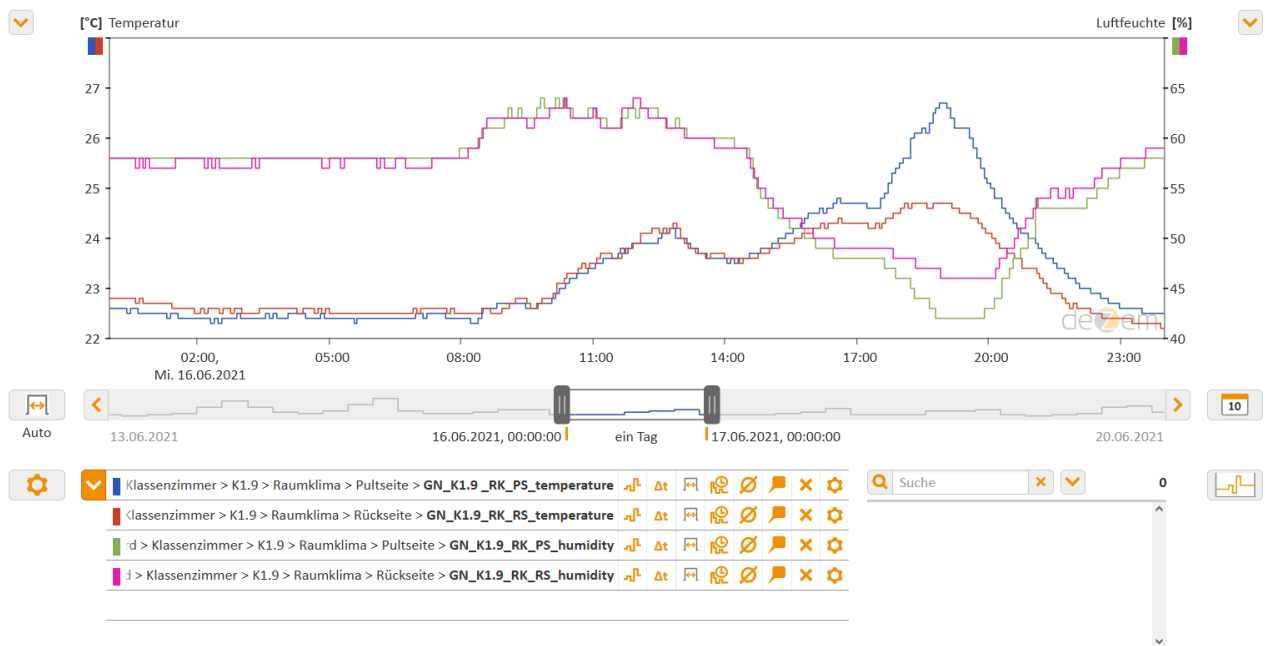
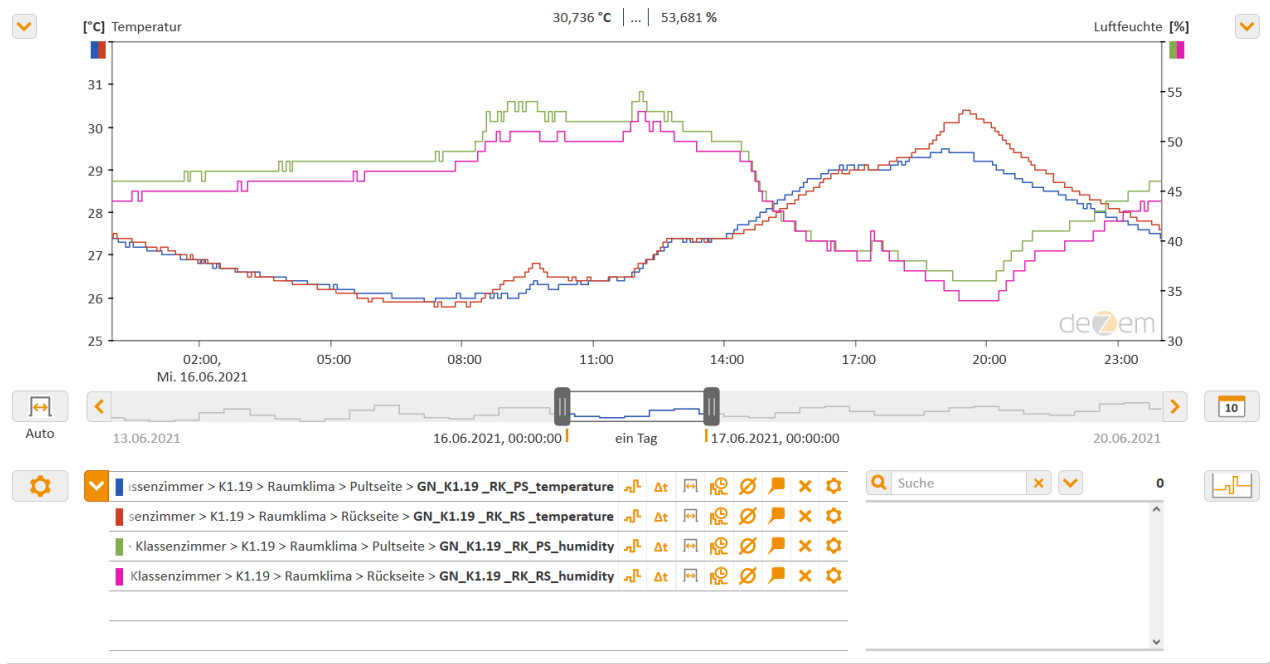


Abbildung 43: AG A140 Raumklima Temperatur und relative Luftfeuchte - Tagesverlauf







CO2-Konzentration und Bewegung



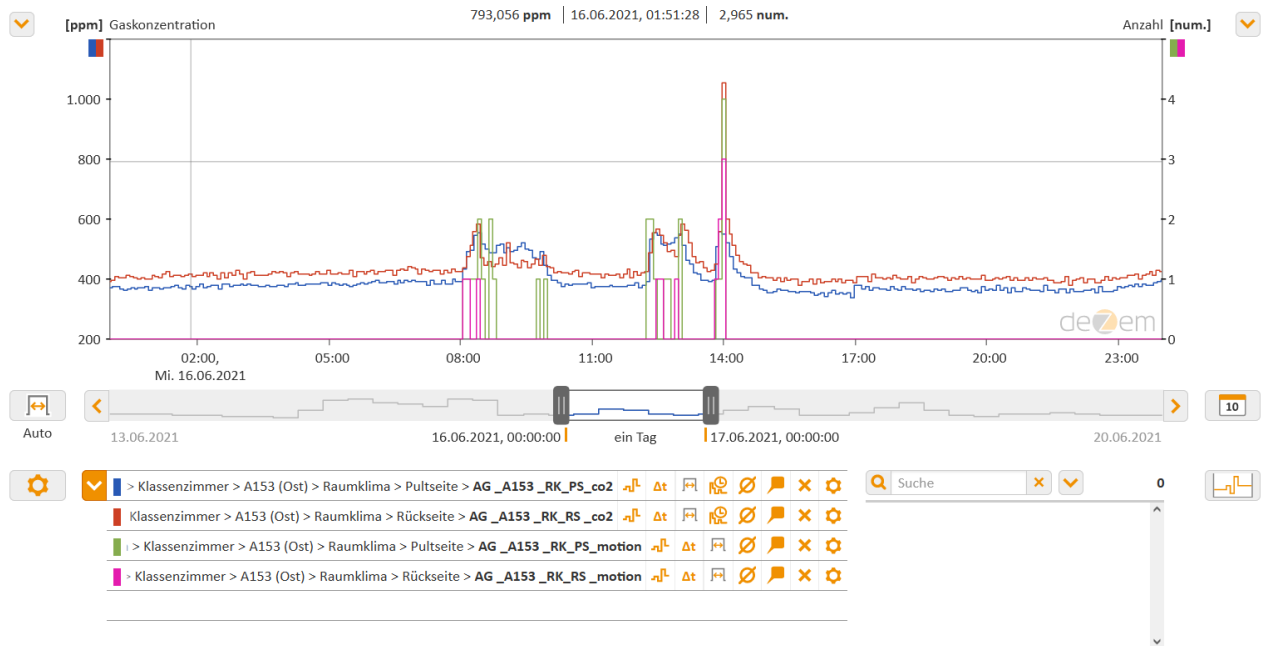


Abbildung 50: AG A153 CO2 Konzentration und Bewegung im Klassenzimmer - Tagesverlauf



Abbildung 51: AG A156 CO2 Konzentration und Bewegung im Klassenzimmer - Tagesverlauf



Abbildung 52: GN K1.9 CO2 Konzentration und Bewegung im Klassenzimmer - Tagesverlauf



Abbildung 53: GN K1.16 CO2 Konzentration und Bewegung im Klassenzimmer - Tagesverlauf

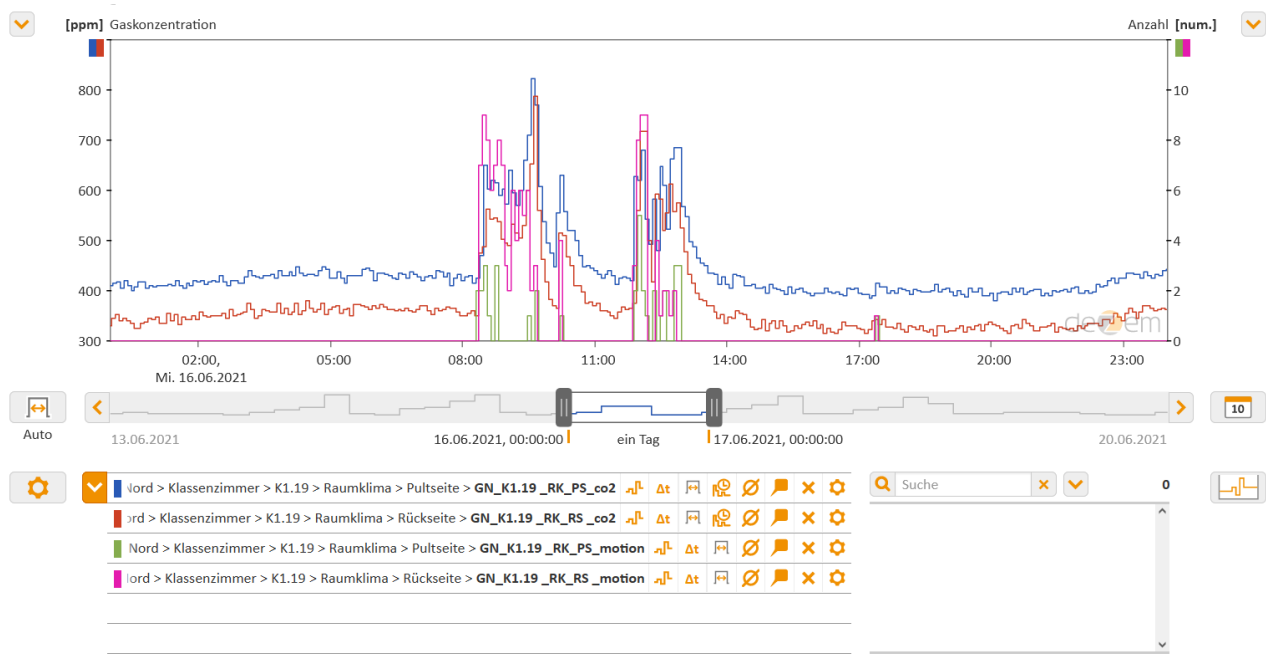


Abbildung 54: GN K1.19 CO2 Konzentration und Bewegung im Klassenzimmer - Tagesverlauf

Beleuchtungsstärke

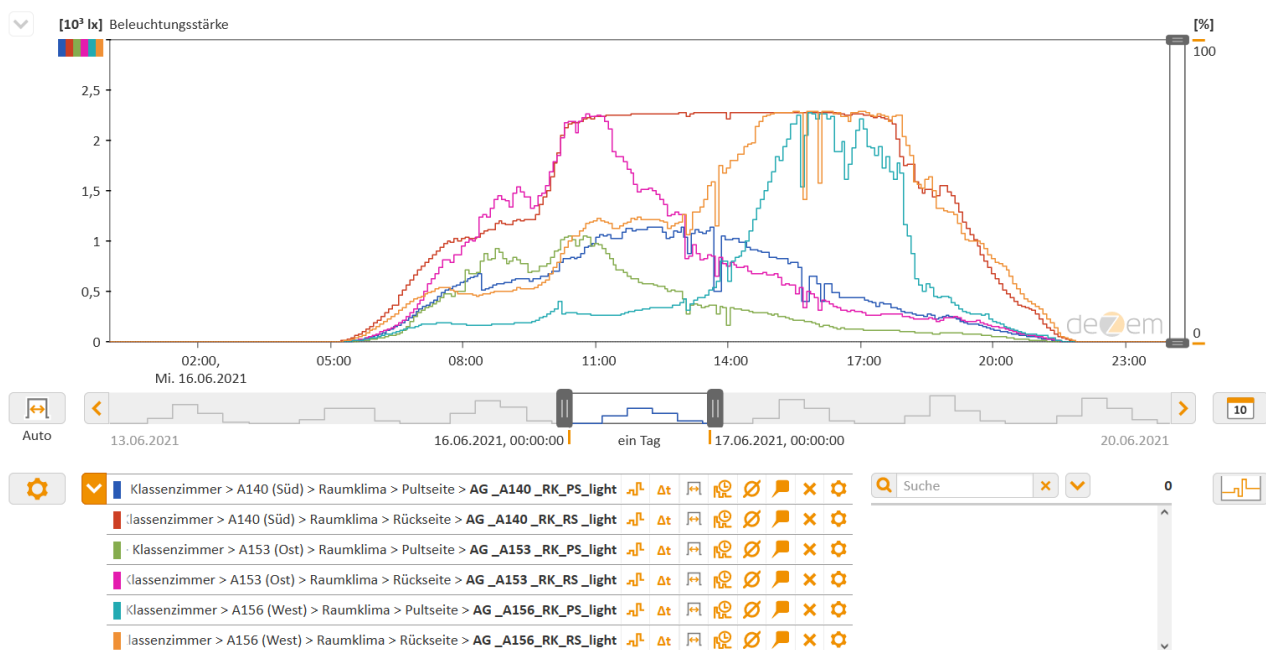


Abbildung 55: AG A140, A153 und A156 Beleuchtungsstärke - Tagesverlauf

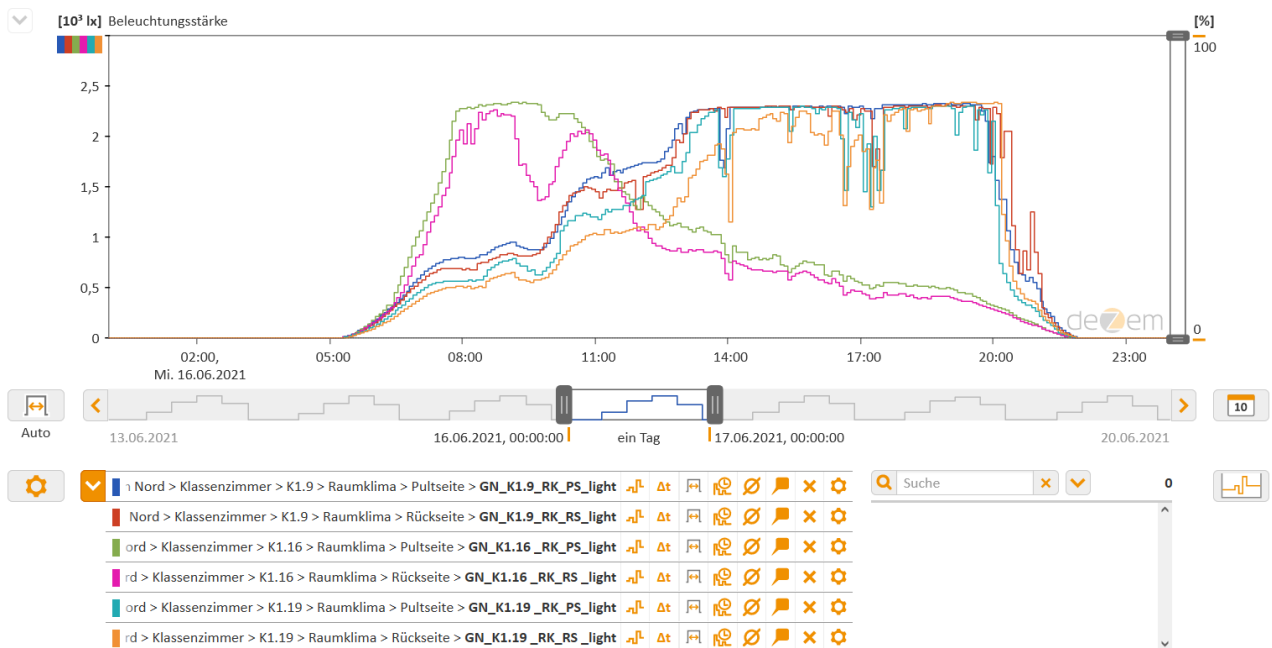


Abbildung 56: GN K1.9, K1.16 und K1.19 Beleuchtungsstärke - Tagesverlauf

Fensterkontakte (1 = geschlossen, 0 = offen) + aufsummierte Stunden geschlossen max. 24h

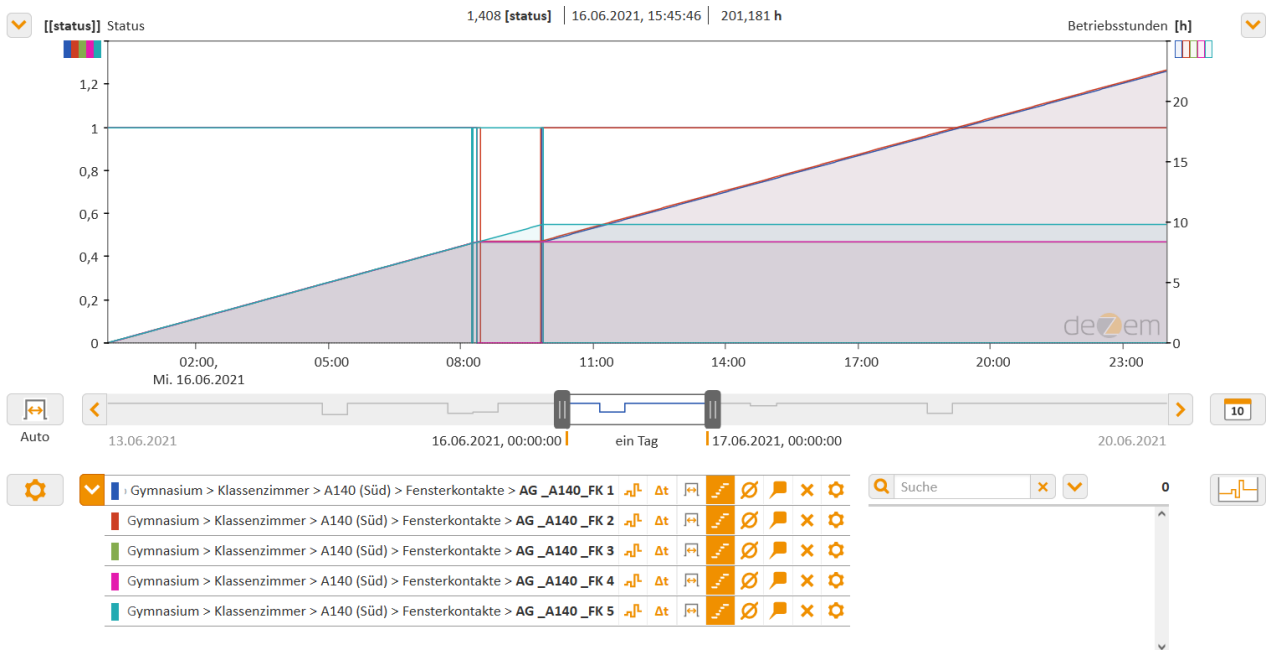


Abbildung 57: AG A140 Fensterkontakte Status und aufsummierte Zeit Fenster geschlossen max. 24h / Tag – Tagesverlauf

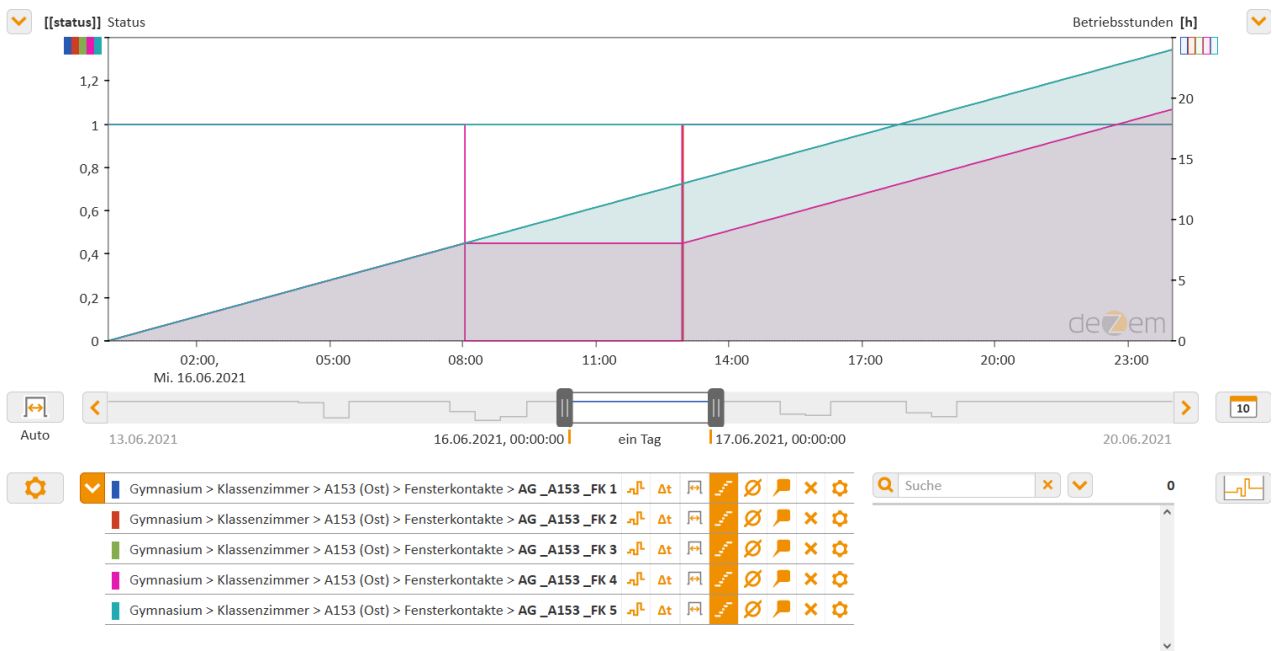


Abbildung 58: AG A153 Fensterkontakte Status und aufsummierte Zeit Fenster geschlossen max. 24h / Tag – Tagesverlauf

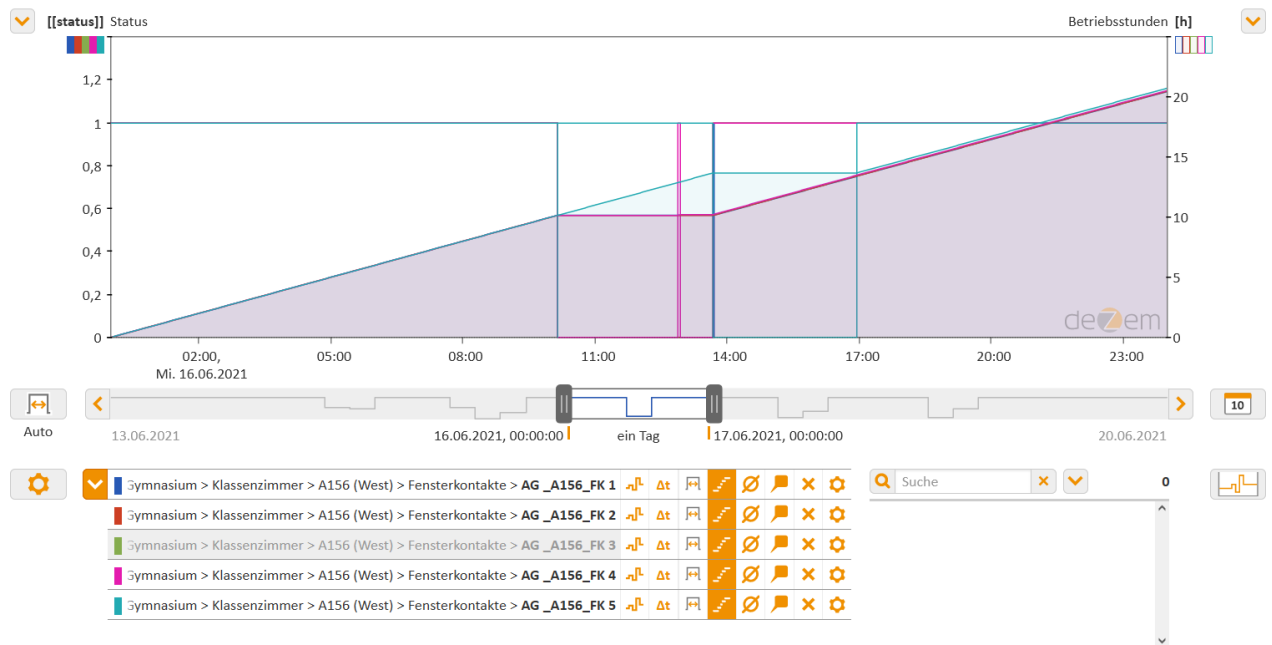


Abbildung 59: AG A156 Fensterkontakte Status und aufsummierte Zeit Fenster geschlossen max. 24h / Tag – Tagesverlauf

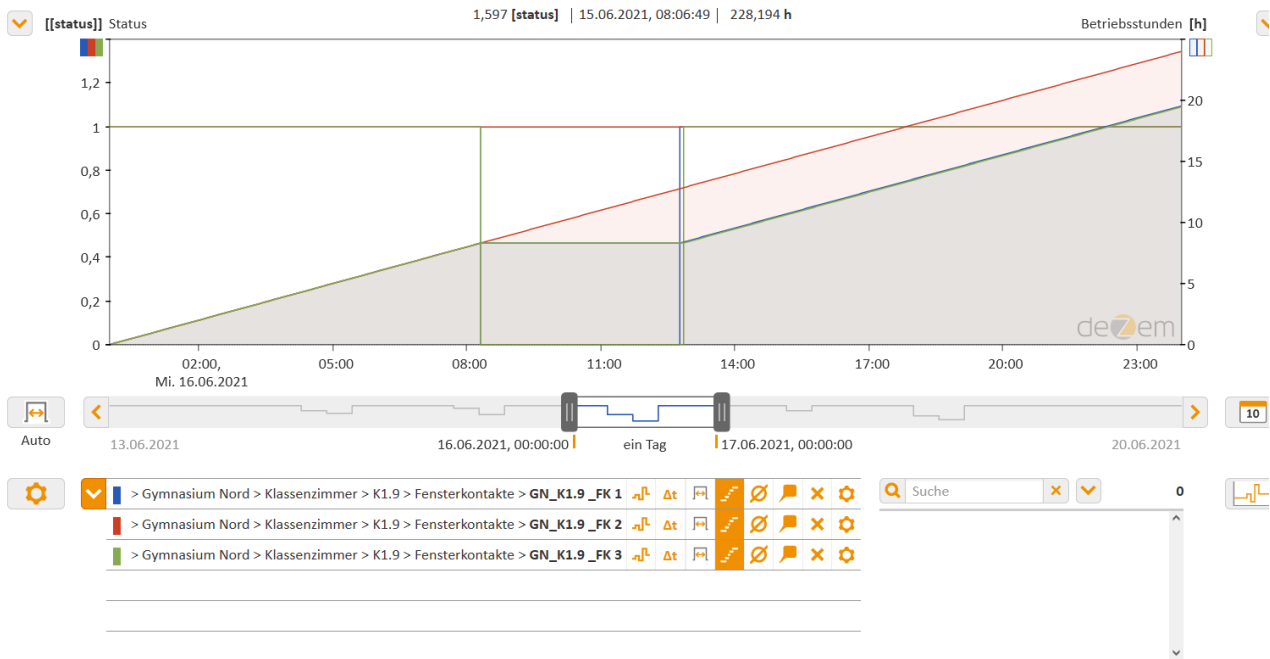


Abbildung 60: GN K1.9 Fensterkontakte Status und aufsummierte Zeit Fenster geschlossen max. 24h / Tag – Tagesverlauf

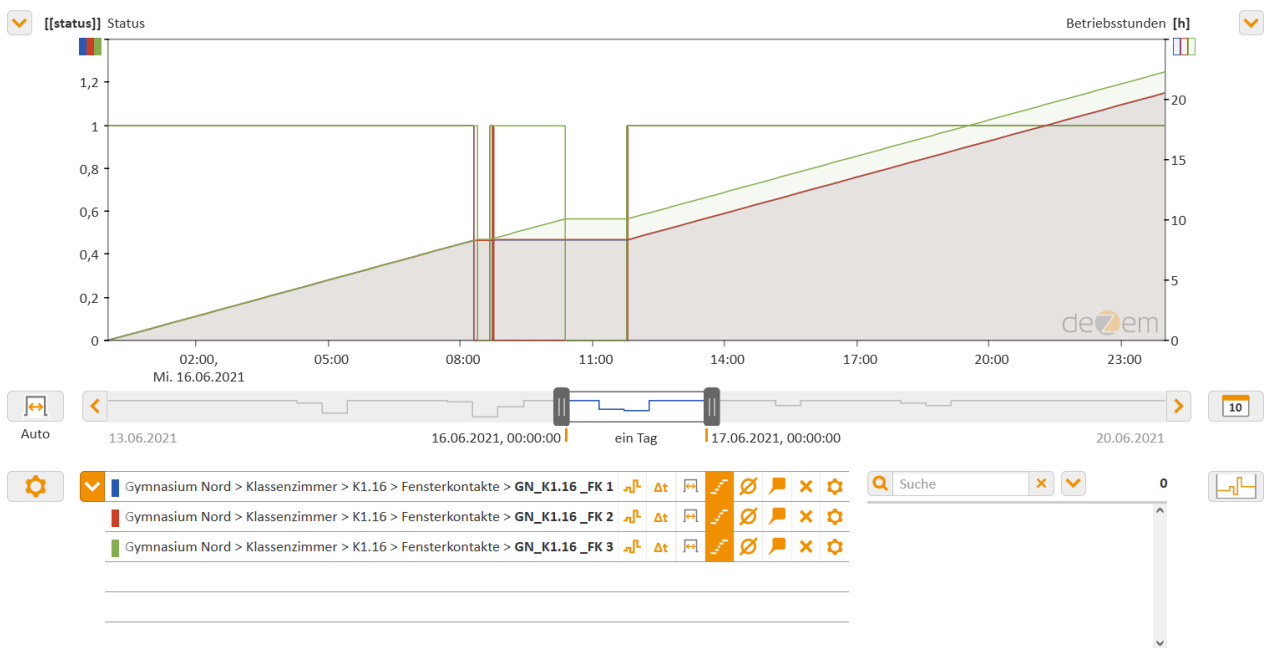


Abbildung 61: GN K1.16 Fensterkontakte Status und aufsummierte Zeit Fenster geschlossen max. 24h / Tag – Tagesverlauf

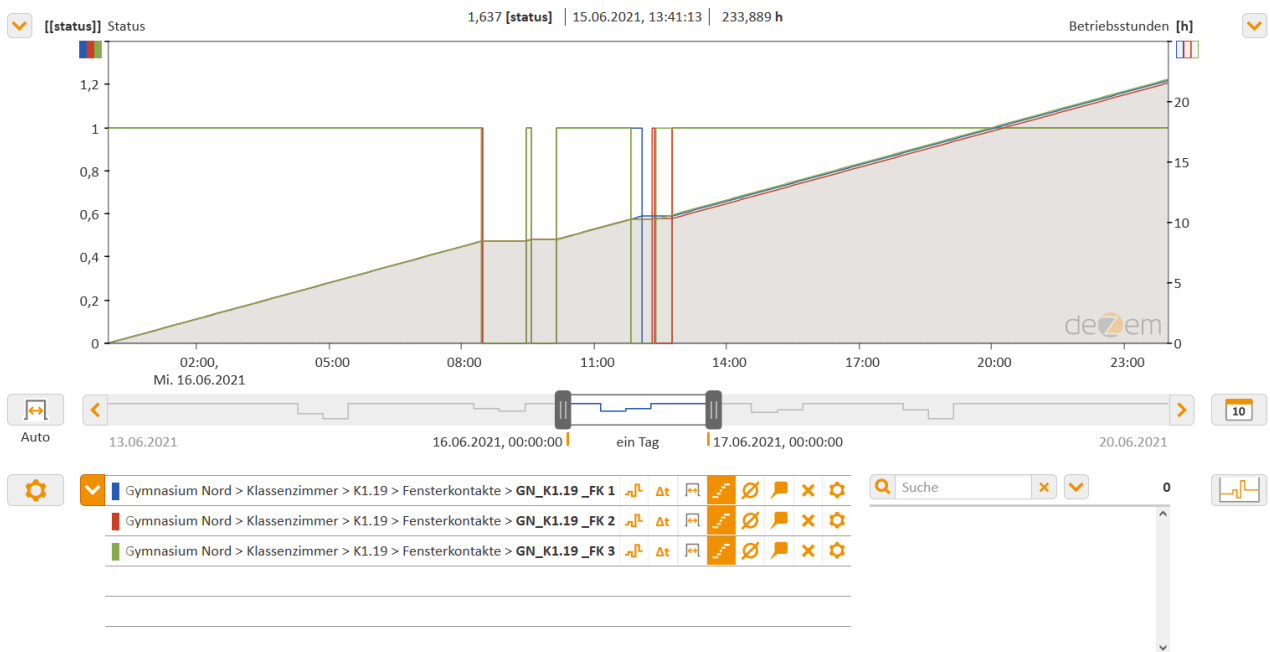


Abbildung 62: GN K1.19 Fensterkontakte Status und aufsummierte Zeit Fenster geschlossen max. 24h / Tag – Tagesverlauf

Temperaturen Decke und Lüftung

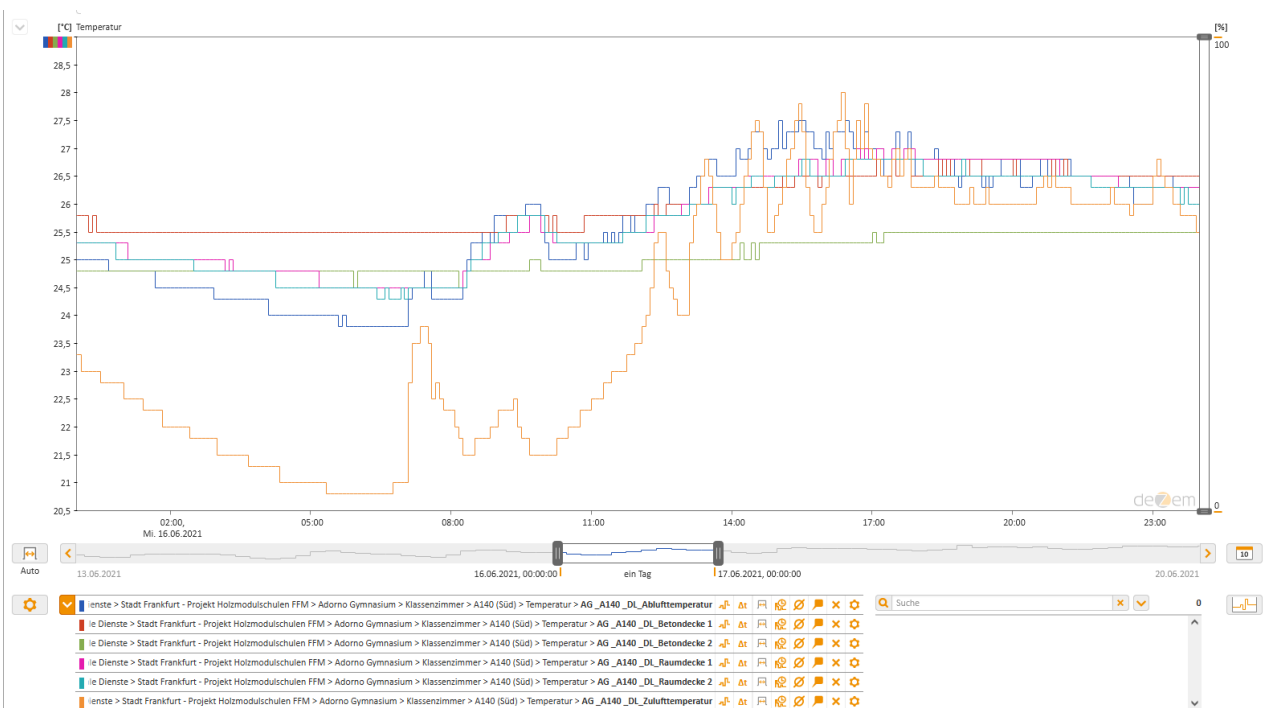
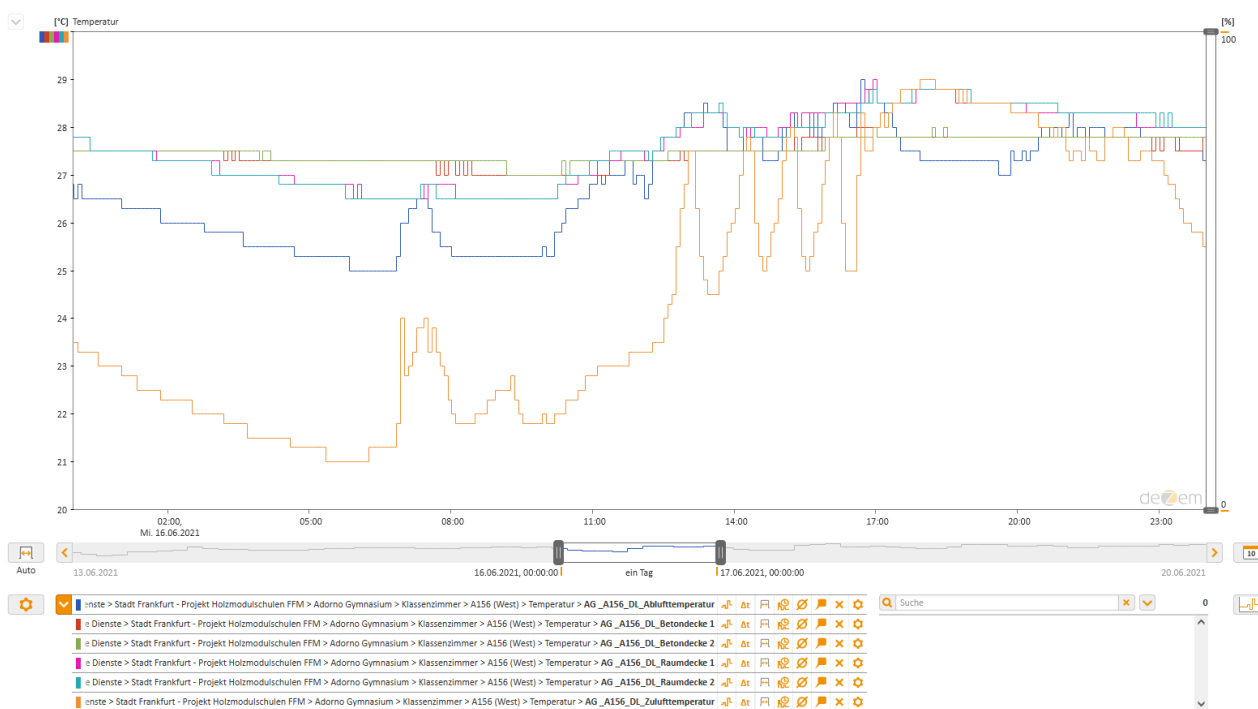
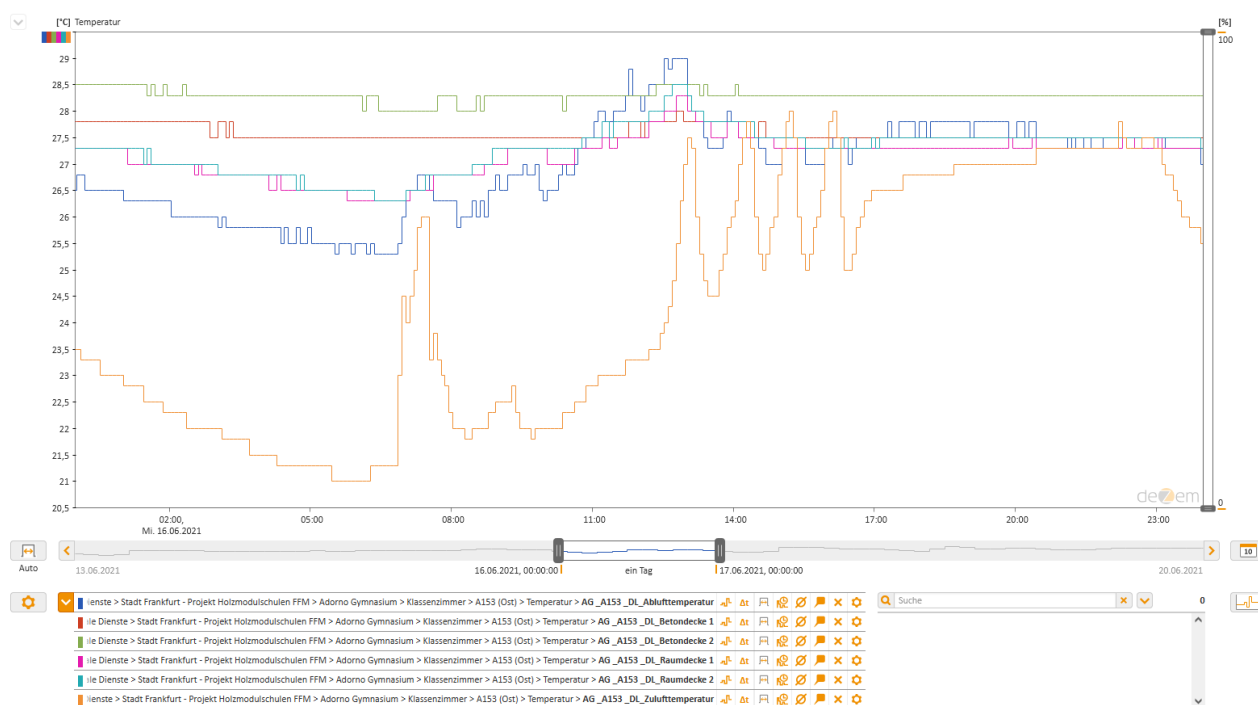


Abbildung 63: AG A140 Temperaturen Decke und Lüftung - Tagesverlauf



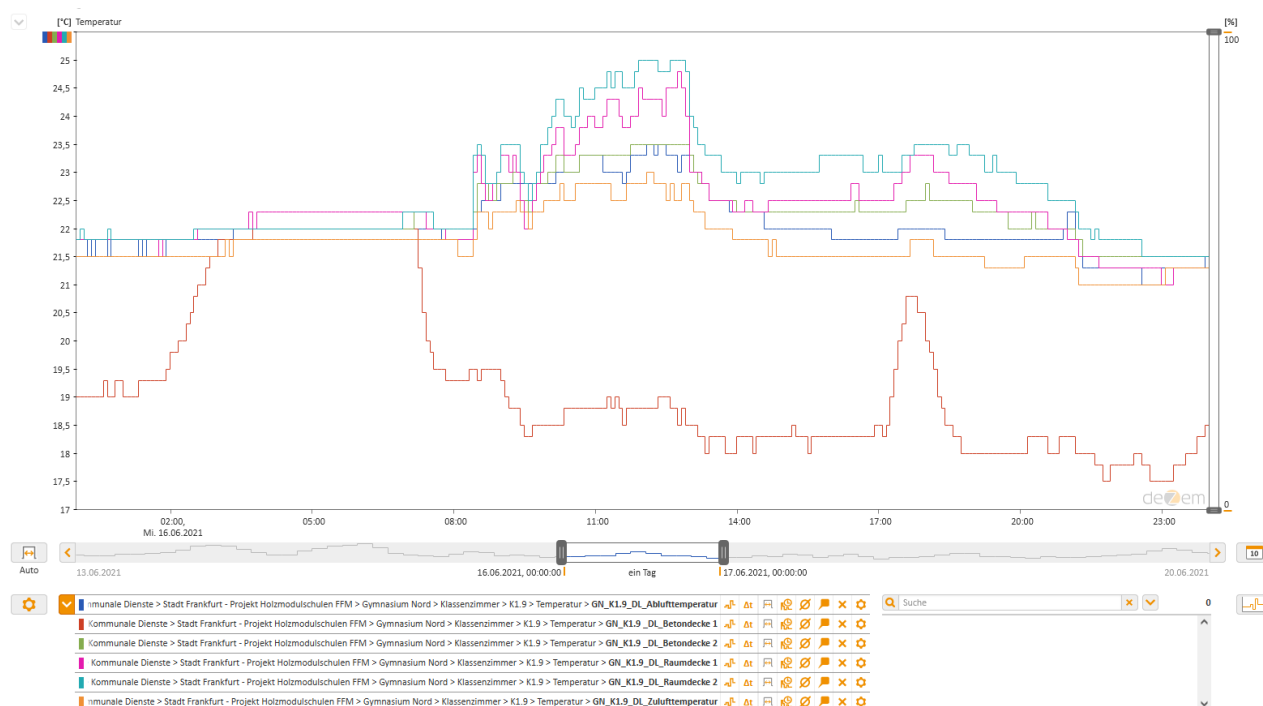


Abbildung 66: GN K1.9 Temperaturen Decke und Lüftung - Tagesverlauf

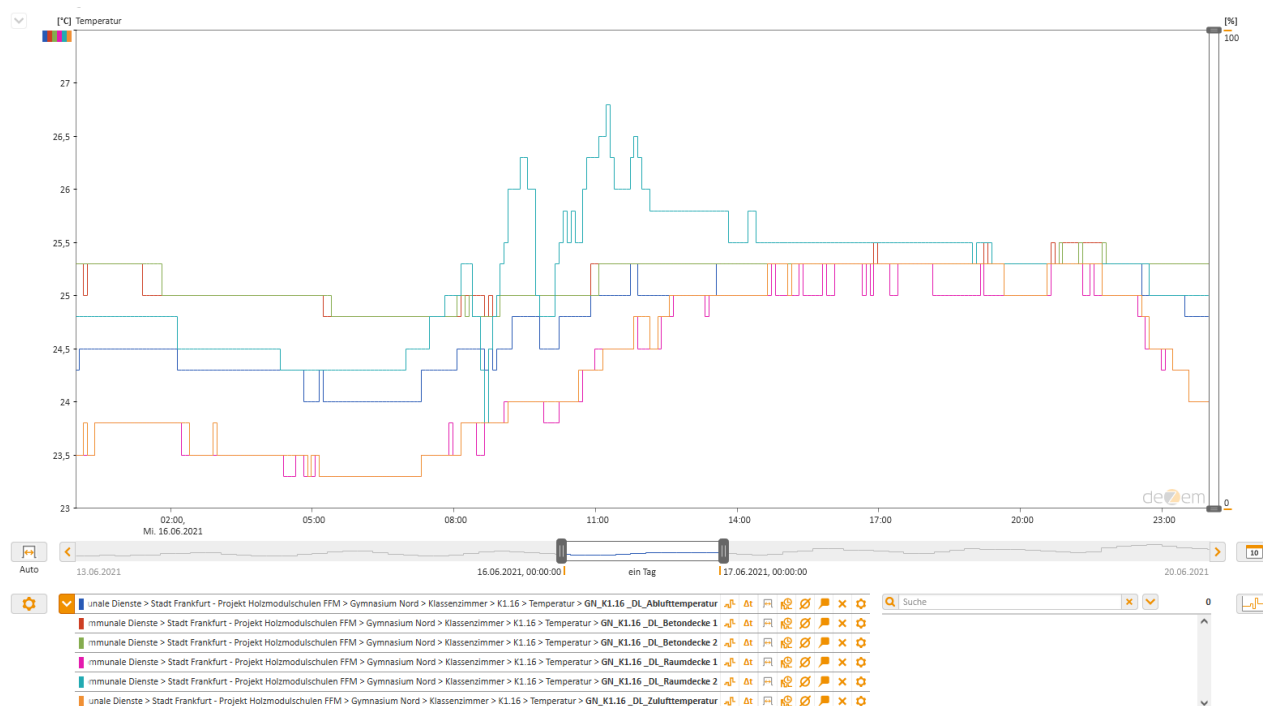


Abbildung 67: GN K1.16 Temperaturen Decke und Lüftung - Tagesverlauf

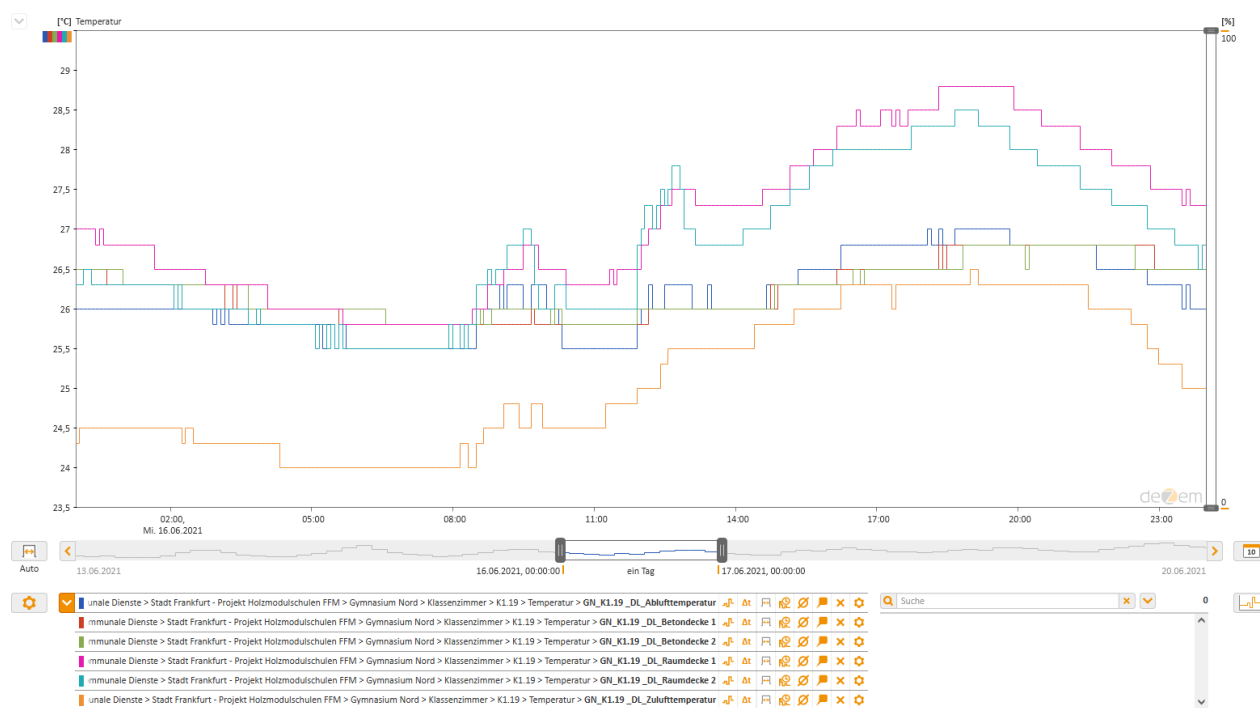


Abbildung 68: GN K1.16 Temperaturen Decke und Lüftung - Tagesverlauf

Typische Wochenverläufe

Außentemperatur und Sonneneinstrahlung

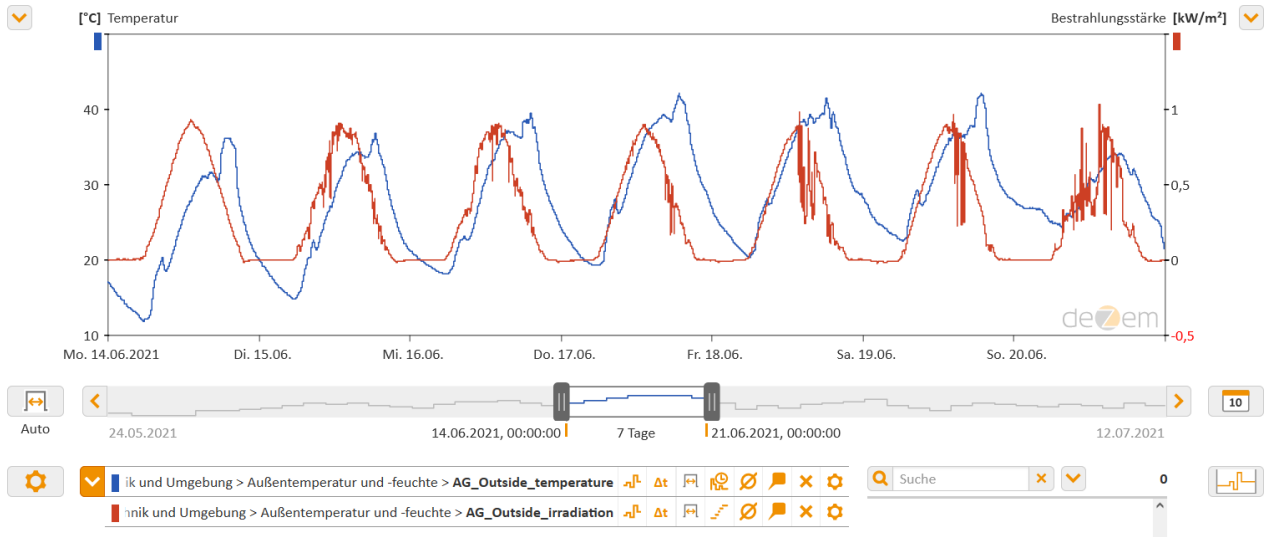


Abbildung 69: AG – Außentemperatur und Bestrahlungsstärke - Wochenverlauf

Anlagentechnik Verbräuche

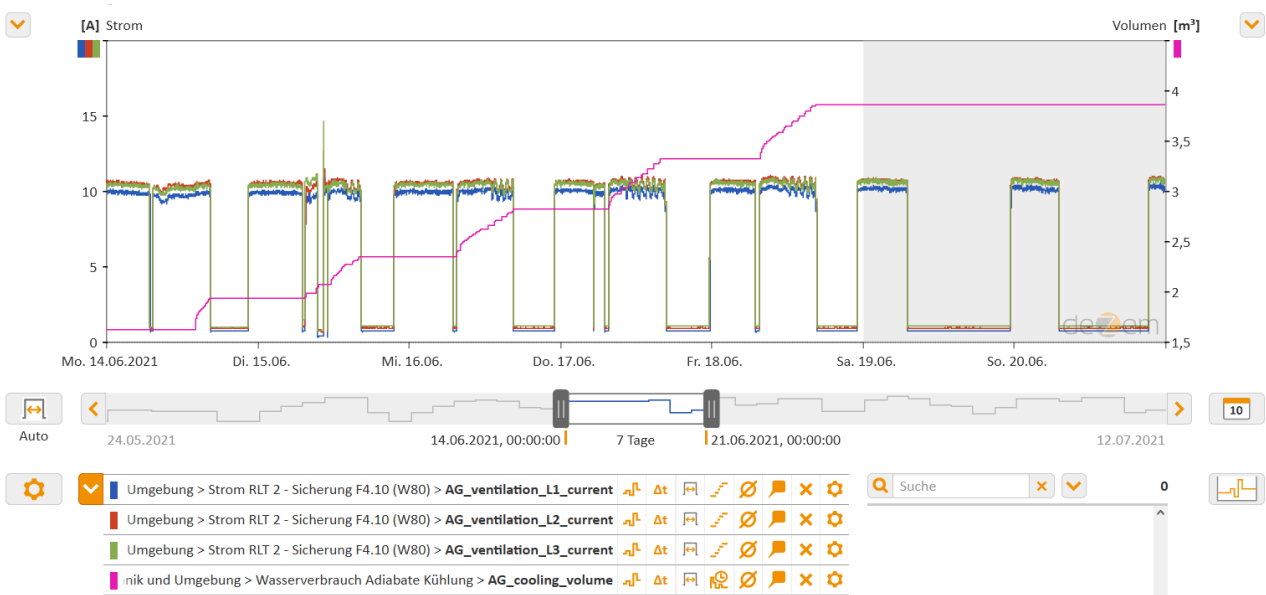


Abbildung 70: AG – Strommessung RLT2 (3 Phasen) Messung Wasserzähler in m³ für Adiabate Kühlung RLT2

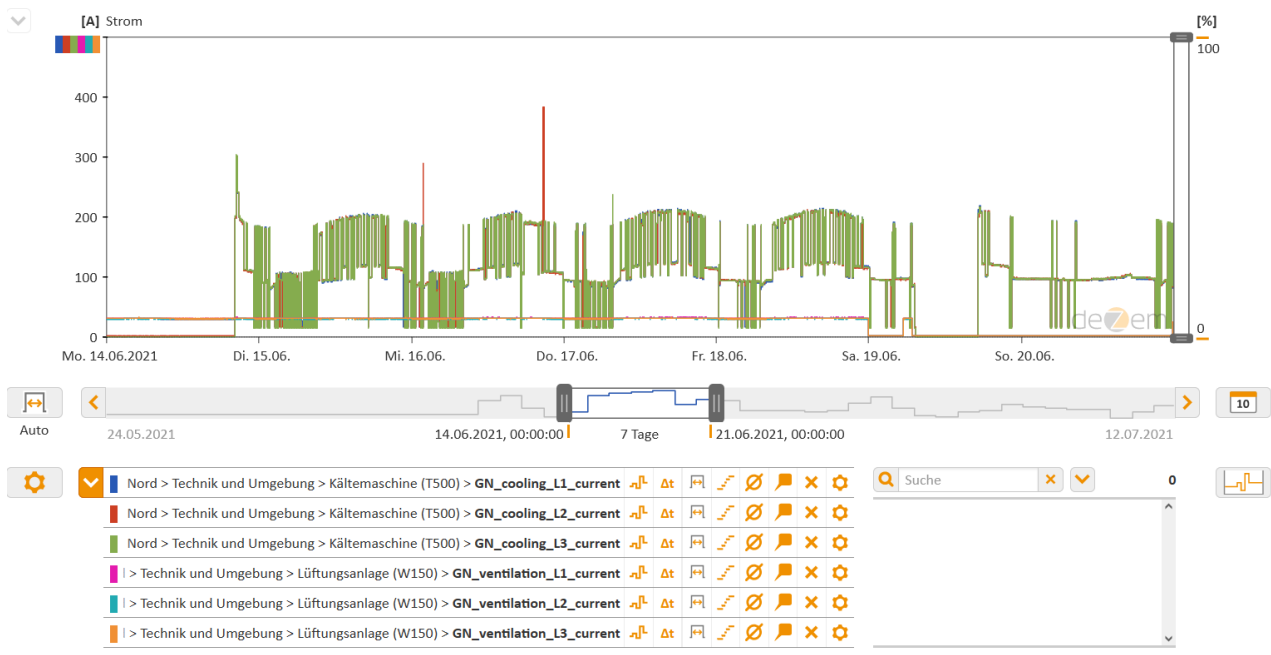


Abbildung 71: GN – Strommessung Kältemaschine und Lüftungsanlage je 3 Phasen

Raumtemperatur und Feuchte

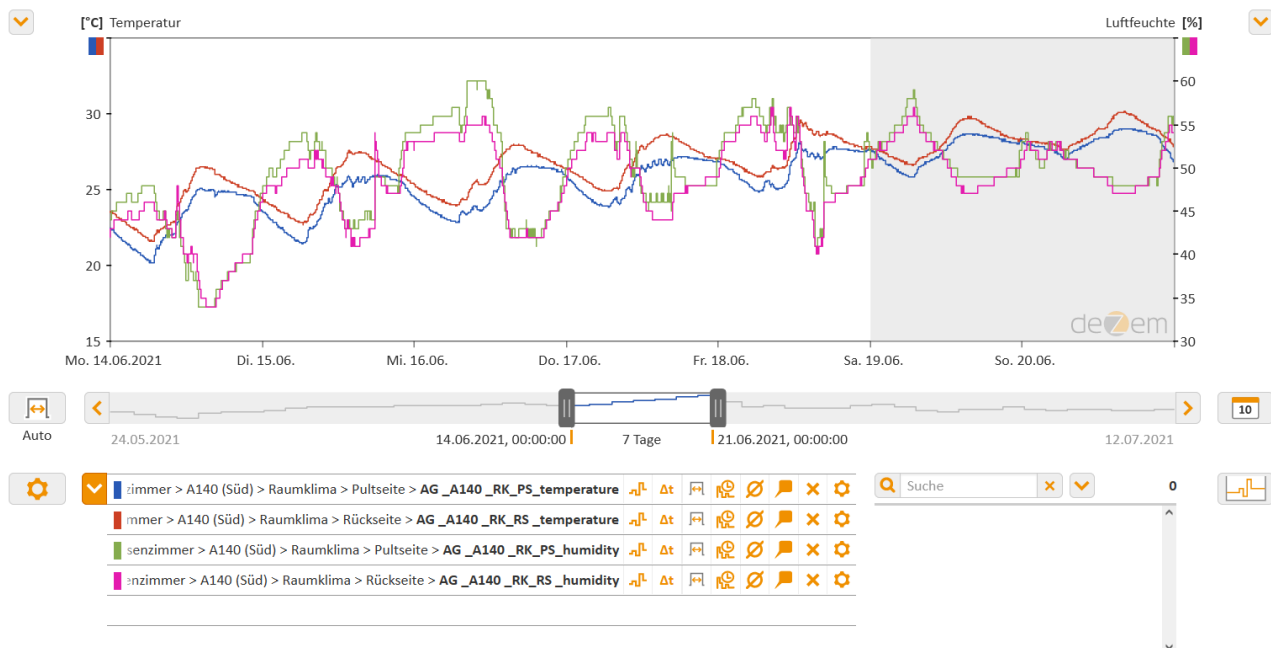


Abbildung 72: AG A140 Raumklima Temperatur und relative Luftfeuchte - Wochenverlauf

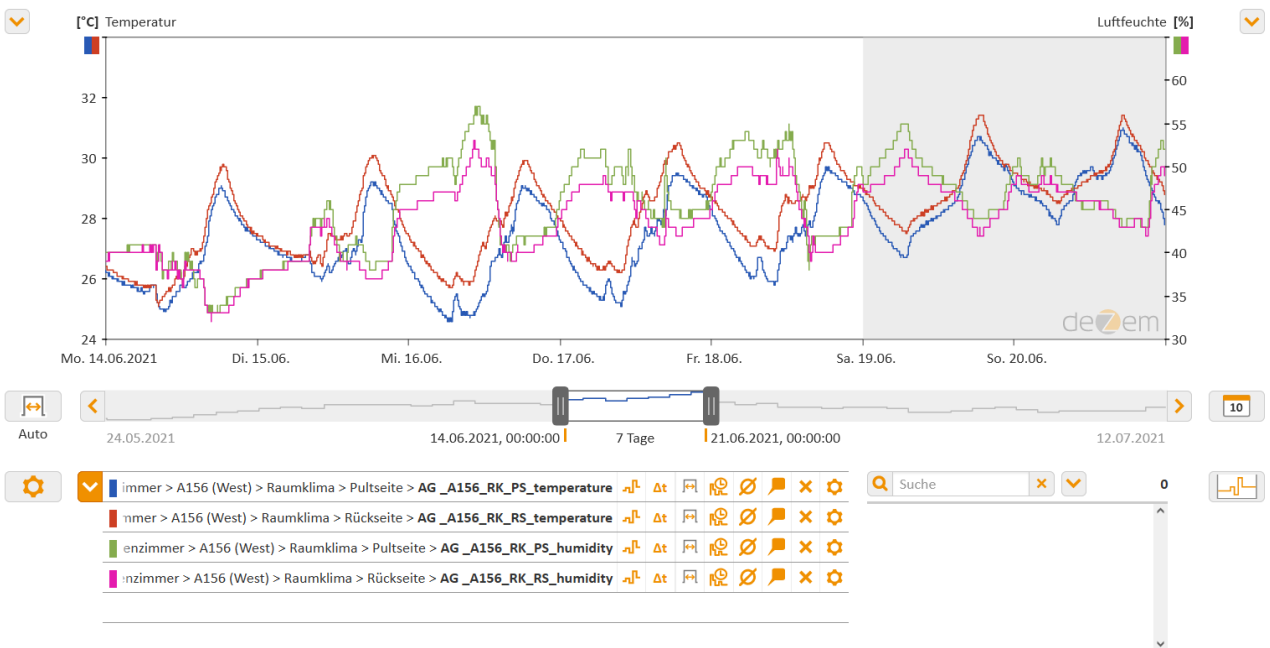
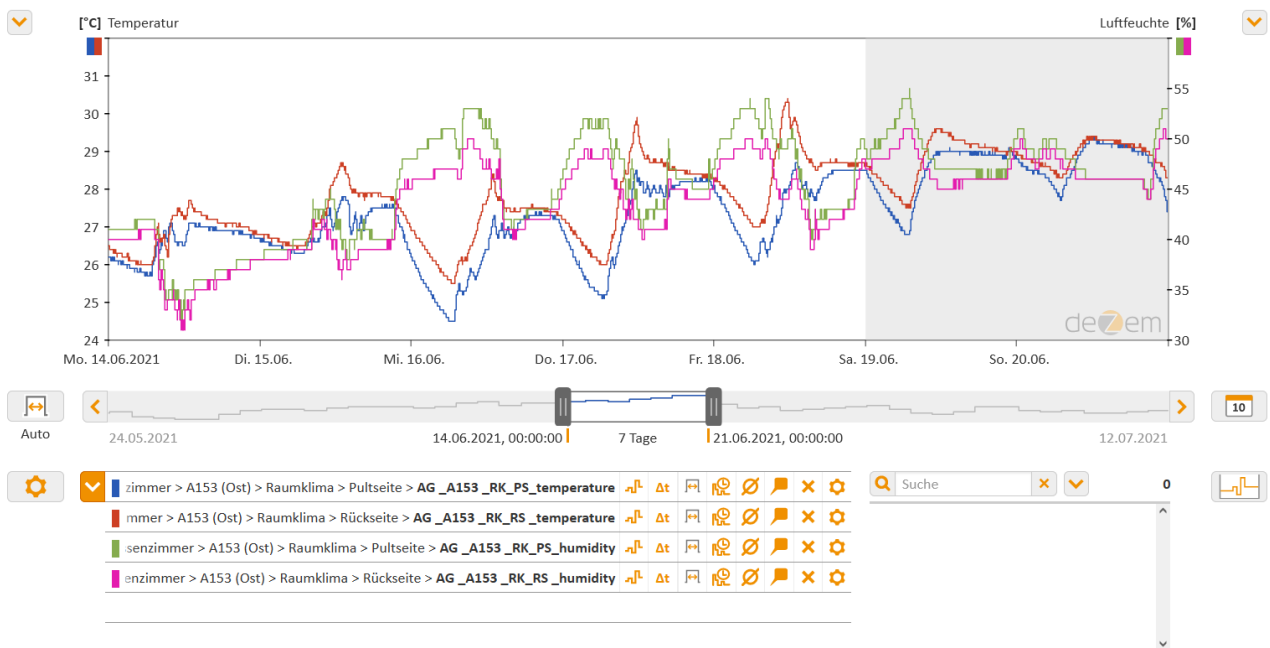




Abbildung 75: GN K1.9 Raumklima Temperatur und relative Luftfeuchte - Wochenverlauf



Abbildung 76: GN K1.16 Raumklima Temperatur und relative Luftfeuchte - Wochenverlauf



CO2-Konzentration und Bewegung





Abbildung 79: AG A153 CO2 Konzentration und Bewegung im Klassenzimmer - Wochenverlauf



Abbildung 80: AG A156 CO2 Konzentration und Bewegung im Klassenzimmer - Wochenverlauf



Abbildung 81: GN K1.9 CO2 Konzentration und Bewegung im Klassenzimmer - Wochenverlauf



Abbildung 82: GN K1.16 CO2 Konzentration und Bewegung im Klassenzimmer - Wochenverlauf



Abbildung 83: GN K1.19 CO2 Konzentration und Bewegung im Klassenzimmer - Wochenverlauf

Beleuchtungsstärke

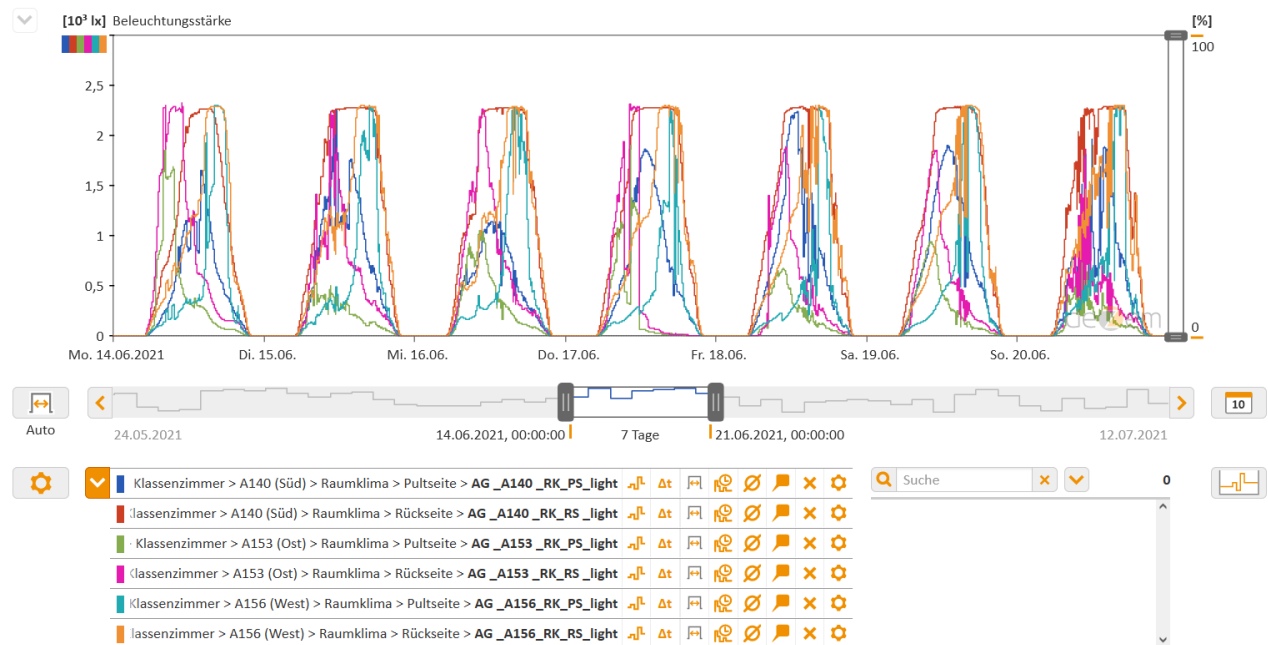
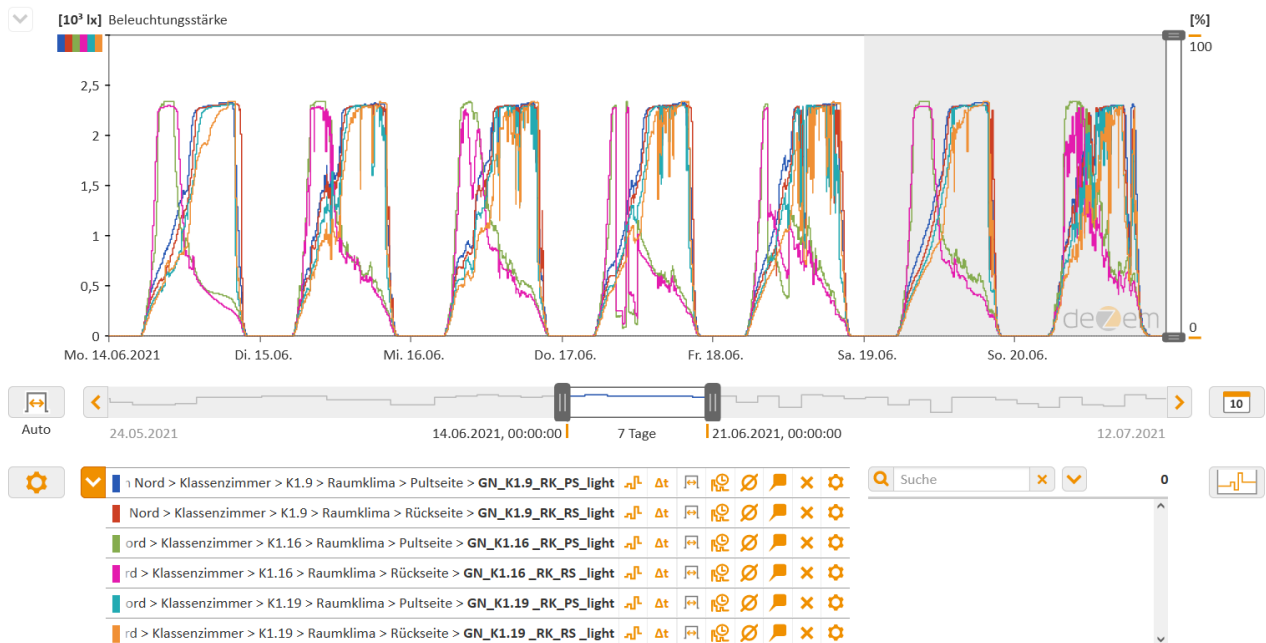
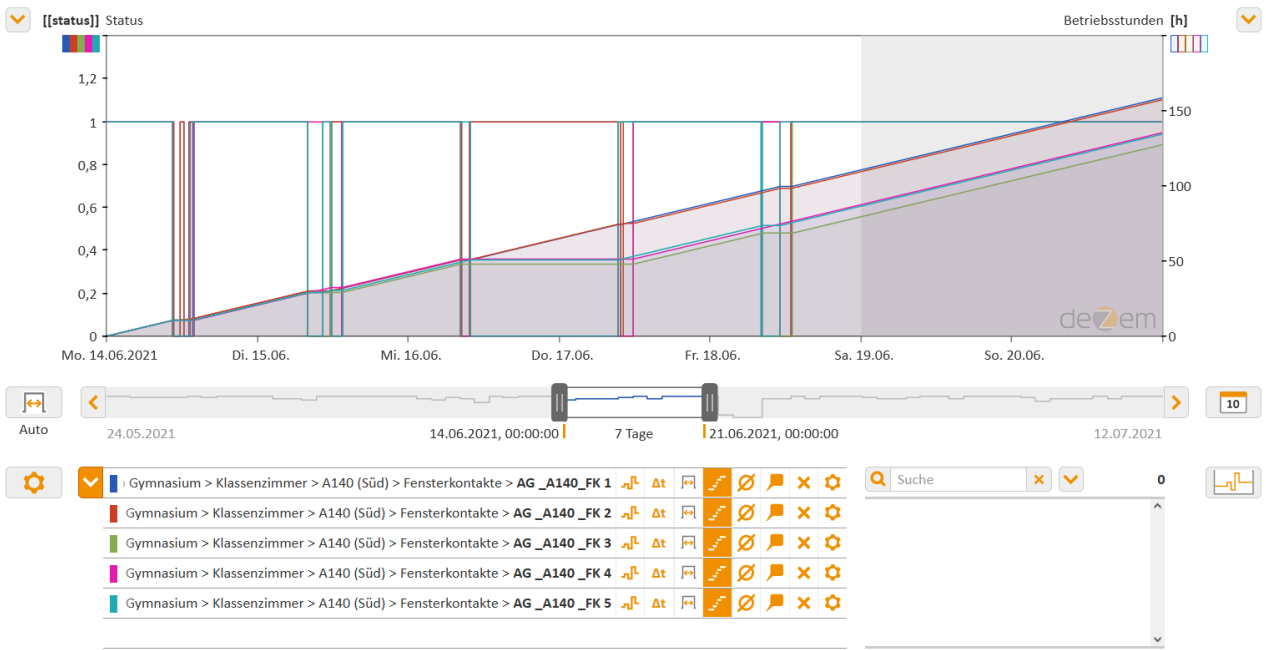


Abbildung 84: AG A140, A153 und A156 Beleuchtungsstärke - Wochenverlauf



Fensterkontakte (1 = geschlossen, 0 = offen) + aufsummierte Stunden geschlossen max. 168h





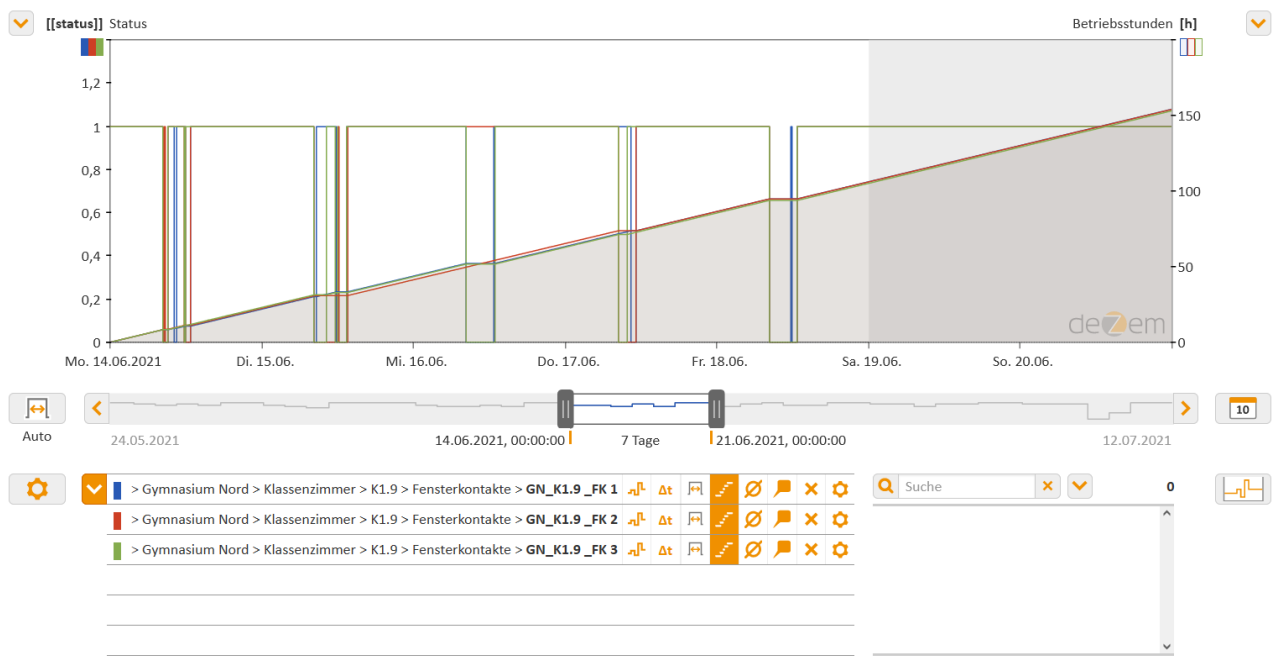


Abbildung 89: GN K1.9 Fensterkontakte Status und aufsummierte Zeit Fenster geschlossen max. 168h /Woche - Wochenverlauf

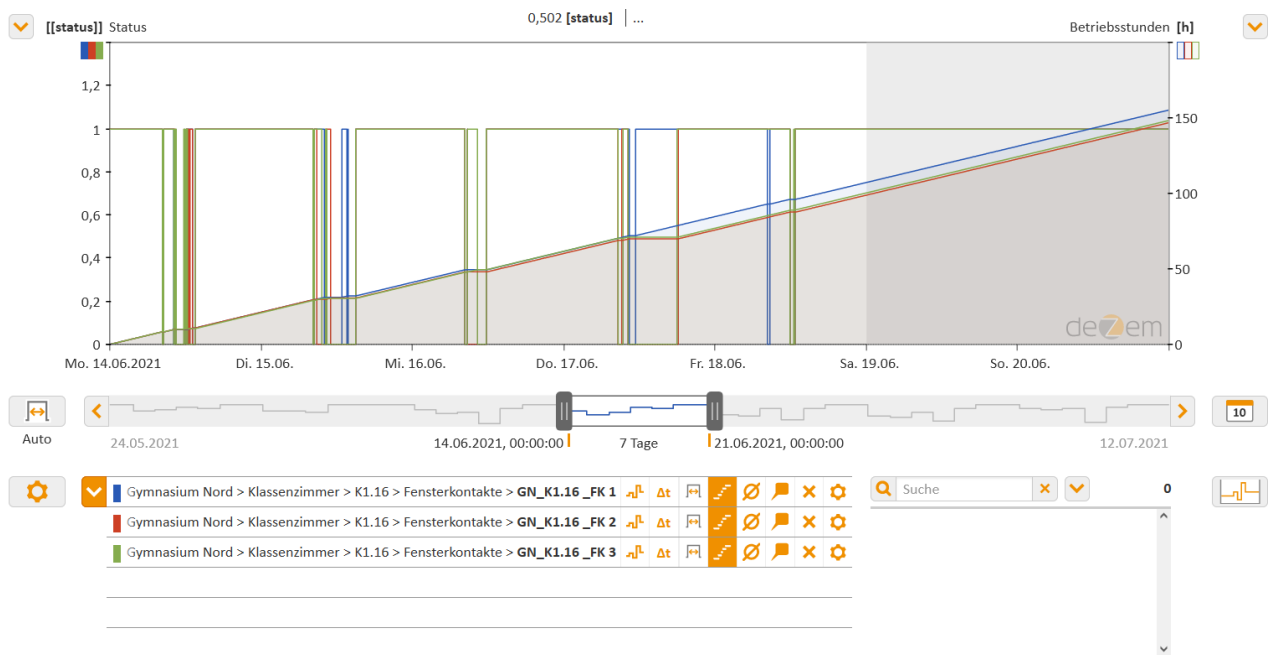


Abbildung 90: GN K1.16 Fensterkontakte Status und aufsummierte Zeit Fenster geschlossen max. 168h /Woche - Wochenverlauf

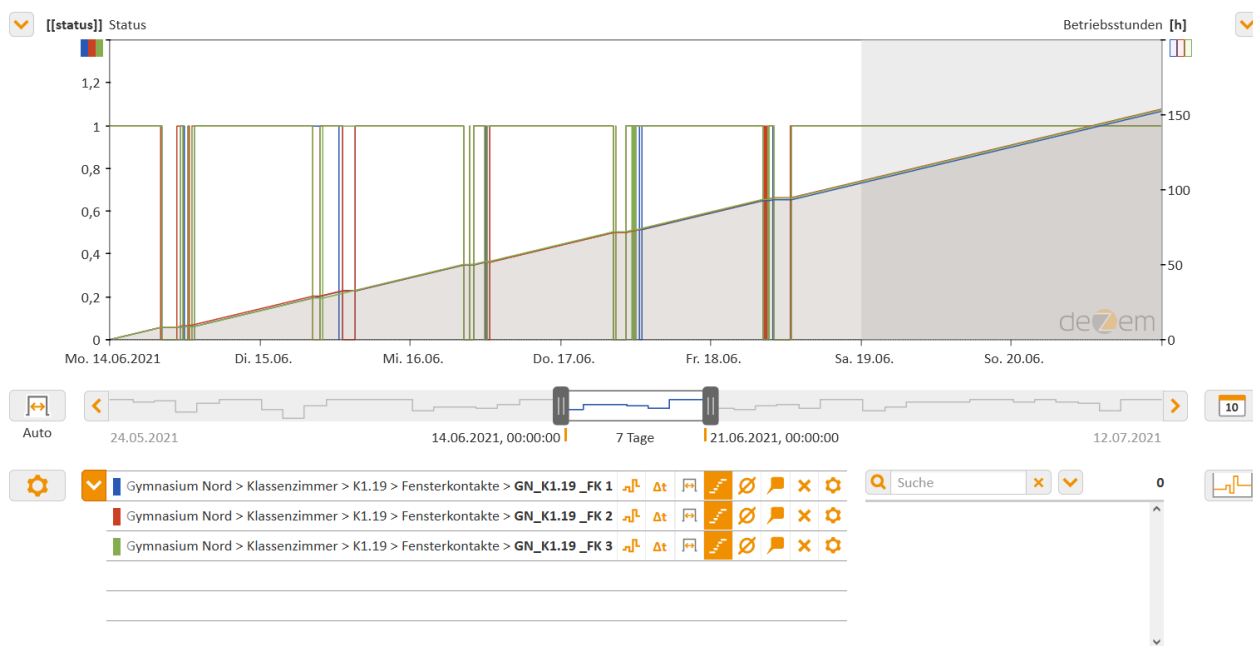


Abbildung 91: GN K1.19 Fensterkontakte Status und aufsummierte Zeit Fenster geschlossen max. 168h /Woche - Wochenverlauf

Temperaturen Decke und Lüftung

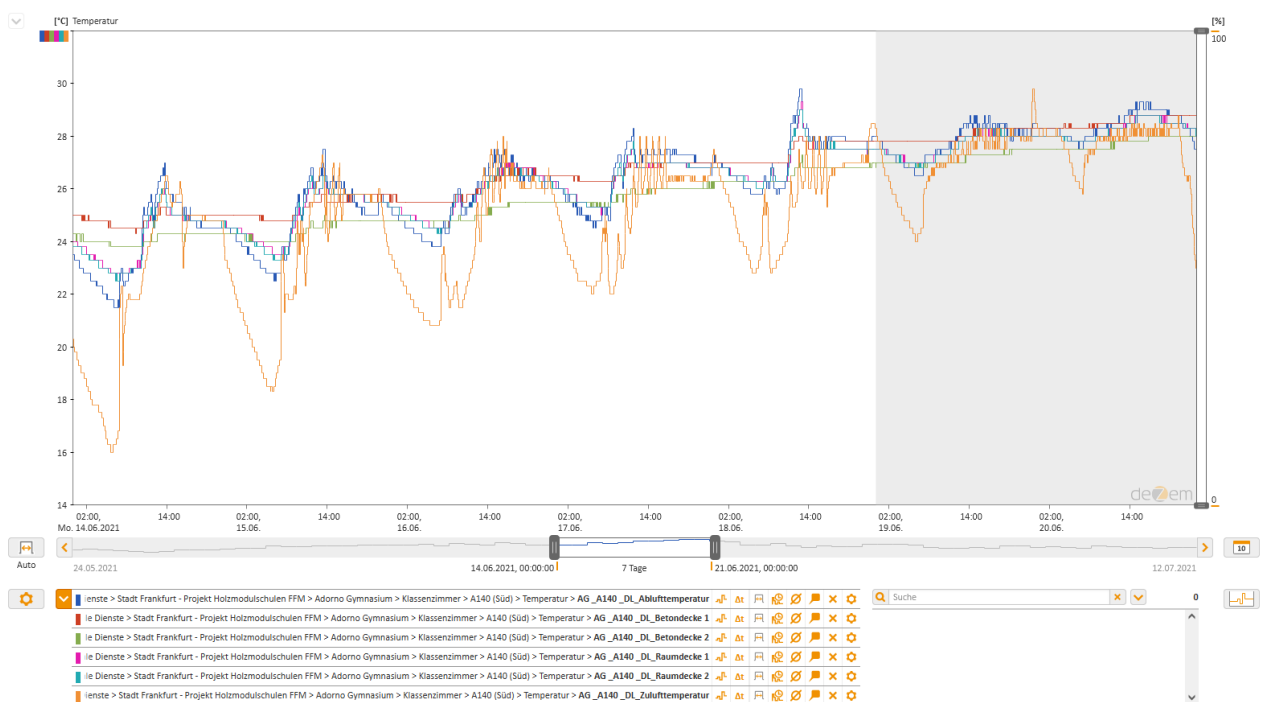


Abbildung 92: AG A140 Temperaturen Decke und Lüftung- Wochenverlauf

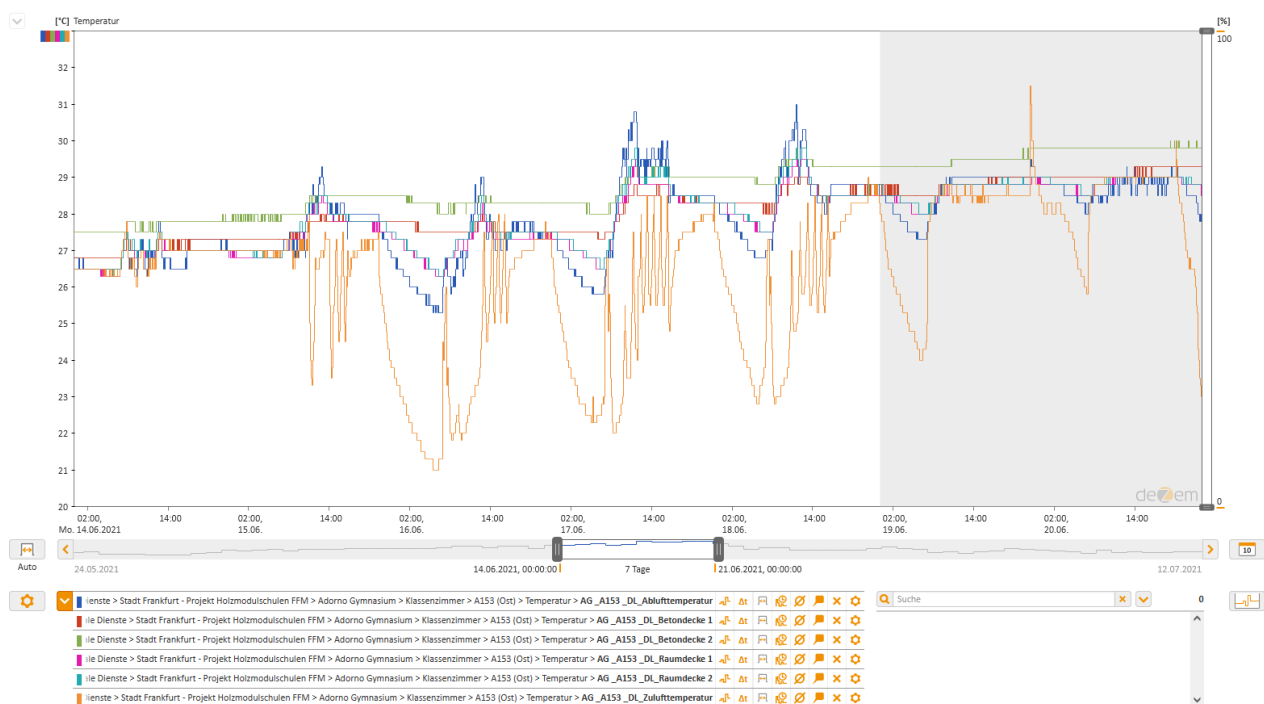


Abbildung 93: AG A153 Temperaturen Decke und Lüftung – Wochenverlauf

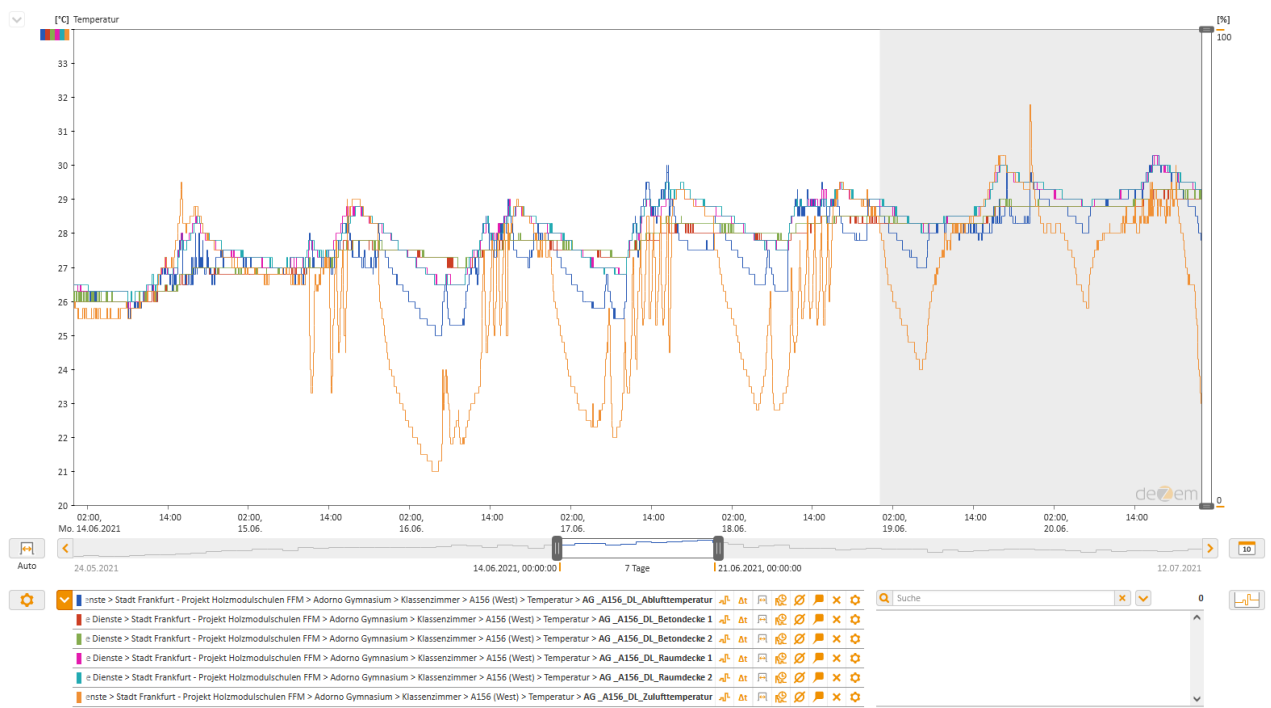


Abbildung 94: AG A156 Temperaturen Decke und Lüftung – Wochenverlauf



Abbildung 95: GN K1.9 Temperaturen Decke und Lüftung – Wochenverlauf

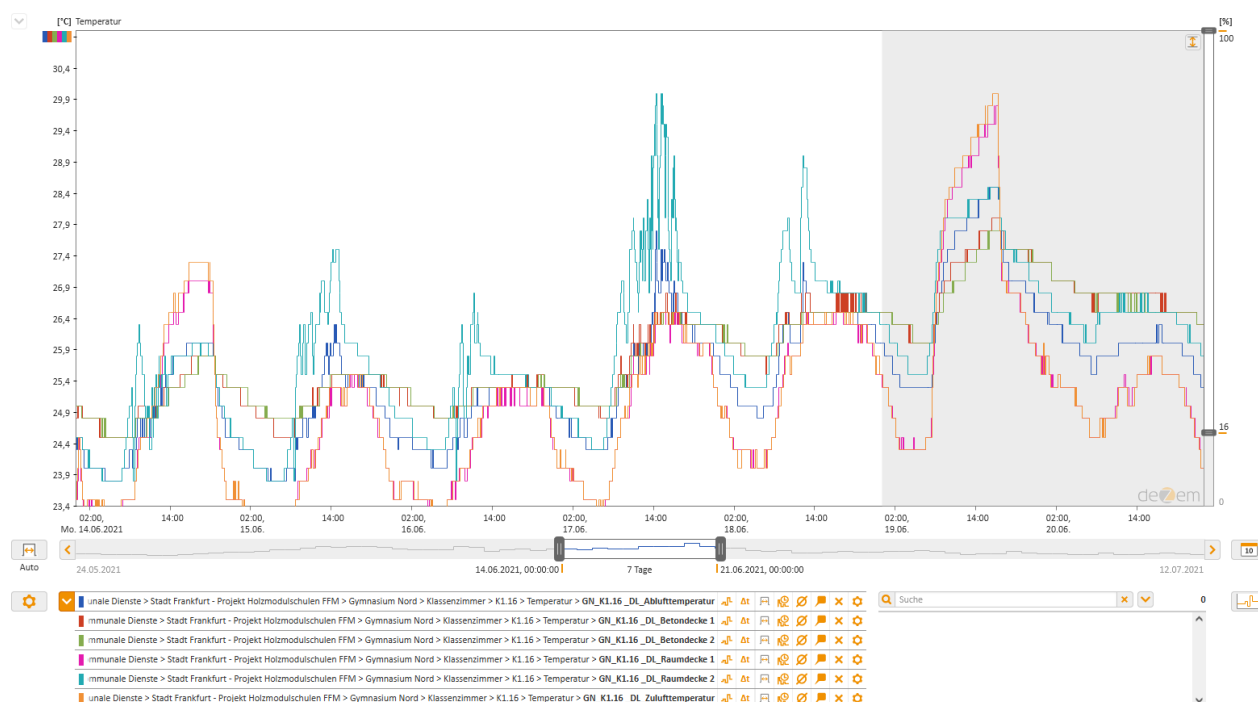


Abbildung 96: GN K1.16 Temperaturen Decke und Lüftung – Wochenverlauf

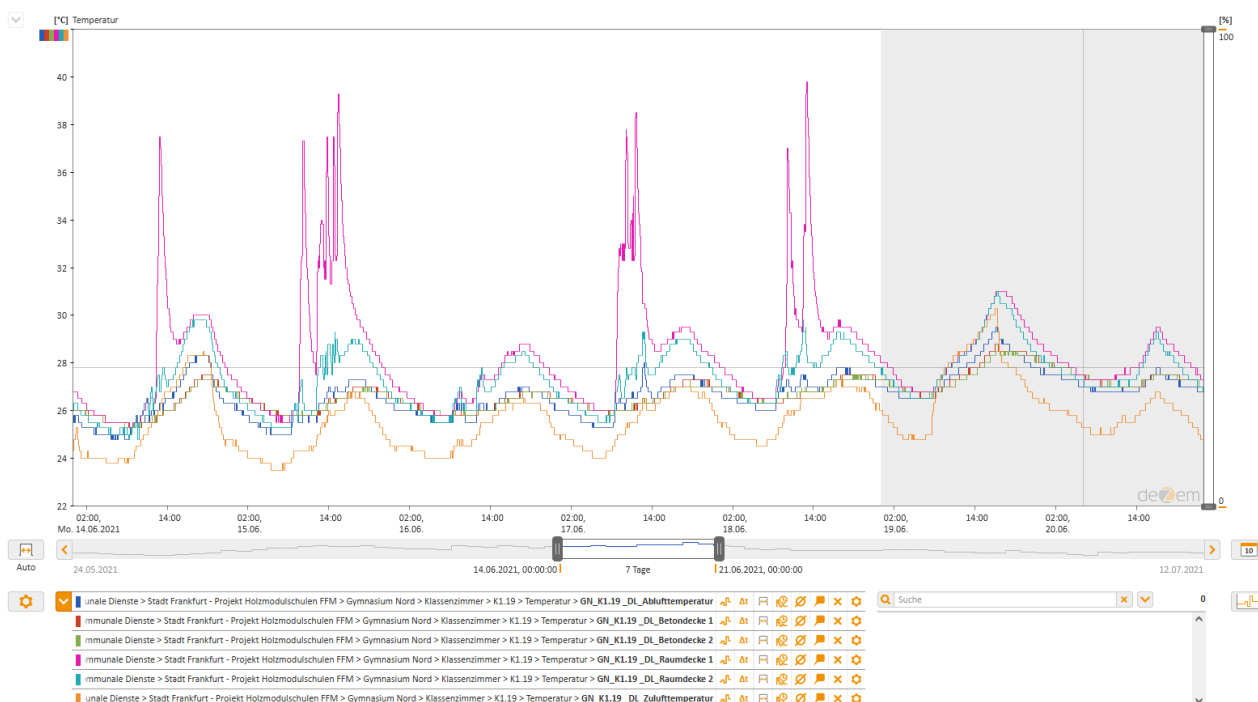


Abbildung 97: GN K1.19 Temperaturen Decke und Lüftung – Wochenverlauf

Raumpläne mit Sensorpositionen

Die folgenden Raumpläne zeigen eine genauere Verteilung der Temperaturen innerhalb der einzelnen Räume. Die Messungen an den Sensoren beziehen sich bei allen Klassenzimmern in beiden Schulen auf den 16.06.2021 um 16:00 Uhr.

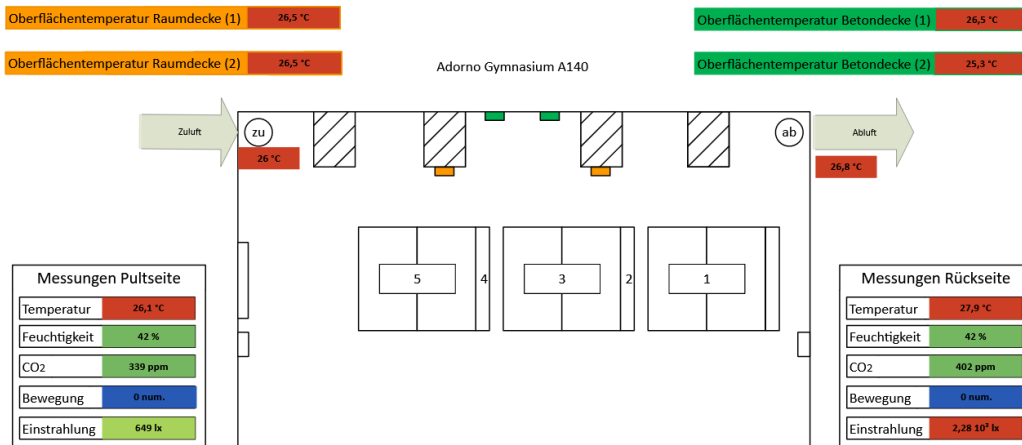


Abbildung 98: AG, Raum A140, gemessen am 16.06.2021 um 16 Uhr

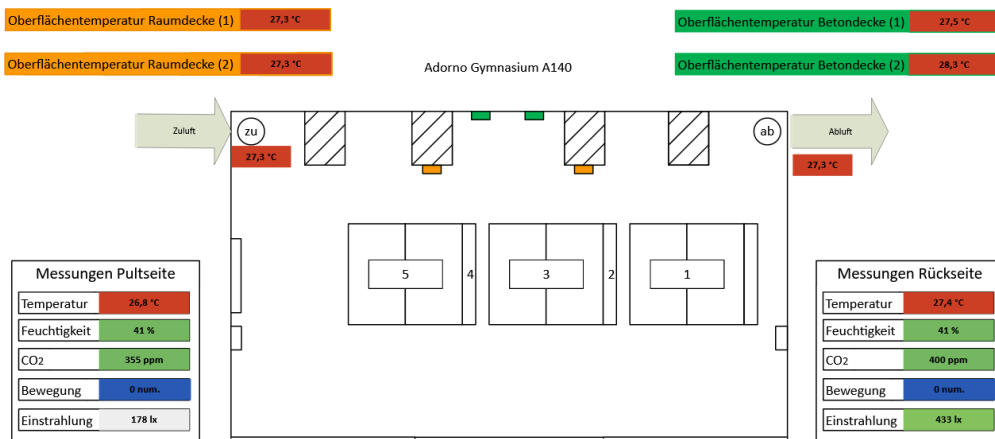


Abbildung 99: AG, Raum A153, gemessen am 16.06.2021 um 16 Uhr

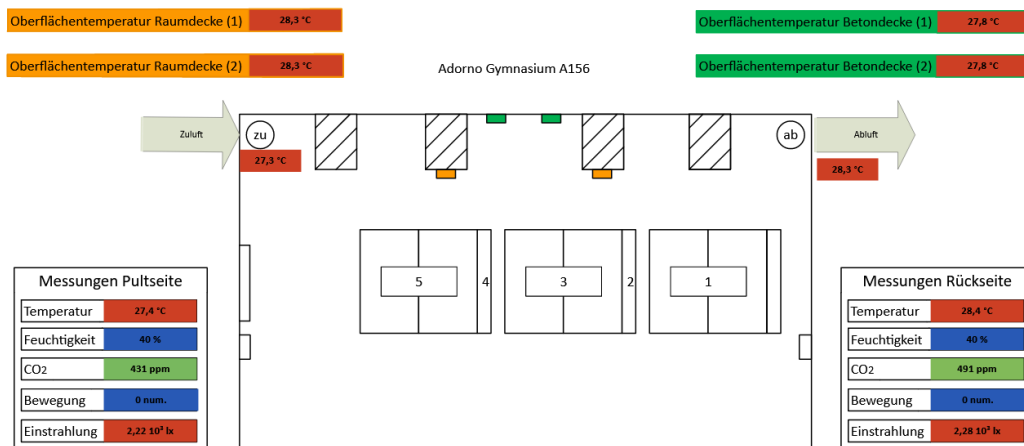


Abbildung 100: AG, Raum A156, gemessen am 16.06.2021 um 16 Uhr

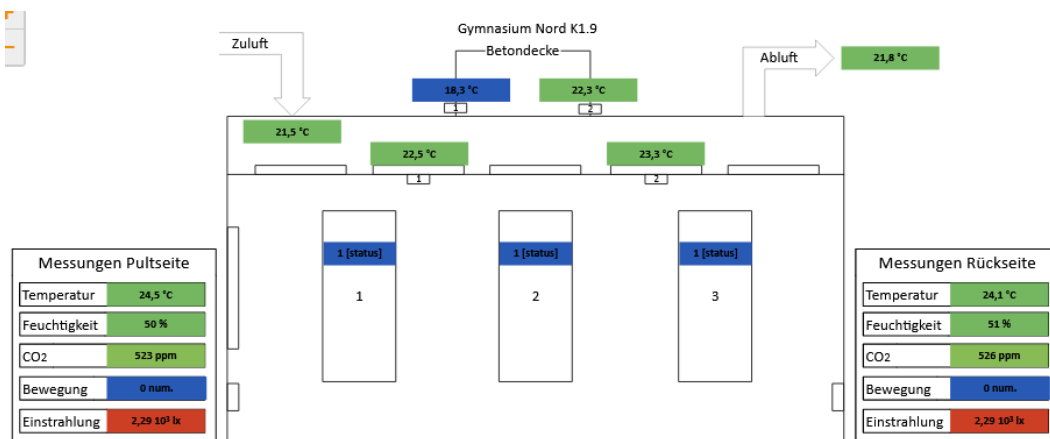


Abbildung 101: GN, Raum K1.9, gemessen am 16.06.2021 um 16 Uhr

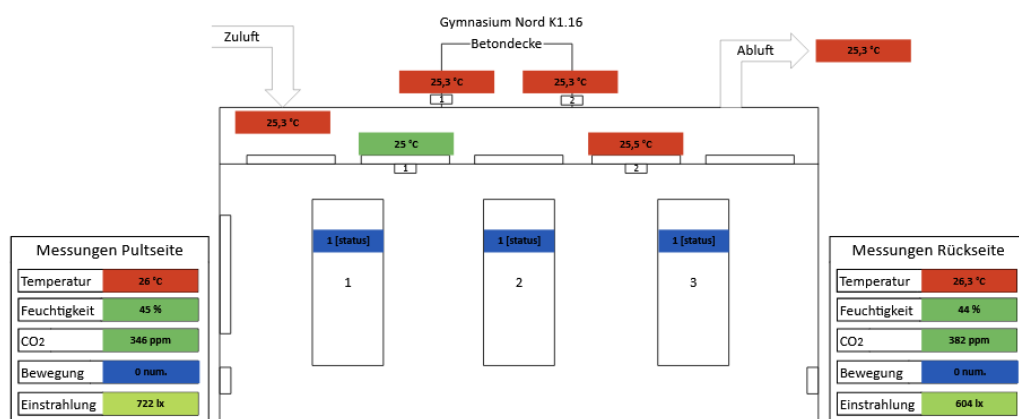


Abbildung 102: GN, Raum K1.16, gemessen am 16.06.2021 um 16 Uhr

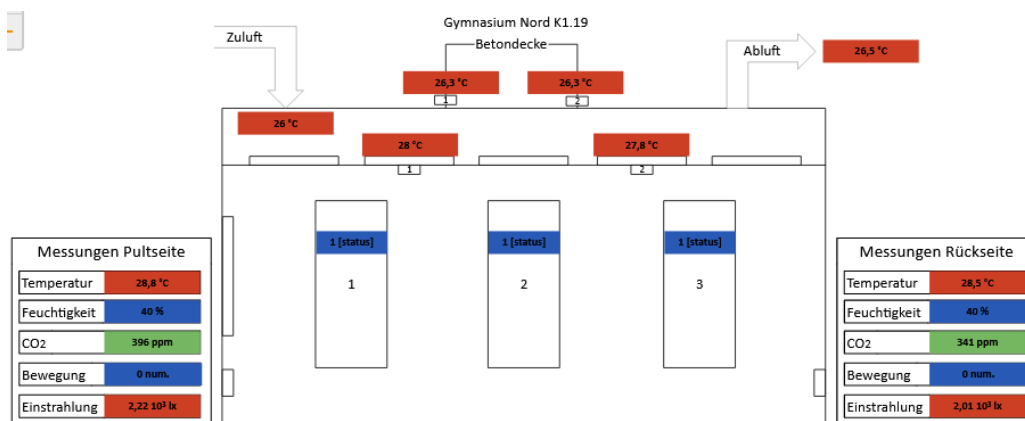


Abbildung 103: GN, Raum K1.19, gemessen am 16.06.2021 um 16 Uhr

Messkonzept

Messkonzept Holzmodul-Schulen



© 2019 deZem GmbH

15. April 2021

deZem GmbH

Wilmsdorfer Str. 60, 10627 Berlin

Telephone: +49 (0)30 31 800 730

Fax: +49 (0)30 31 800 731

info@dezem.de • www.dezem.de

Inhaltsverzeichnis

Projektbeschreibung	73
Messstellen	73
Adorno Gymnasium - Schulcampus Westend	76
Datenübertragung	76
Klassenräume	77
Raumklima und Präsenz	77
Temperatur Decke	79
Temperatur Lüftung	80
Fensterkontakte	80
Außenluft Parameter	81
Lüftungsanlage	82
Gymnasium Nord	84
Datenübertragung	84
Klassenräume	85
Raumklima und Präsenz	86
Temperatur Decke	87
Temperatur Lüftung	88
Fensterkontakte	88
Außenluft Parameter	89
Lüftungsanlage	89

Document History

22.6.2020: 1. Entwurf Messkonzept	20200622_deZem - Messkonzept Holzmodulschulen.docx	deZem, Felix Wehringer
24.6.2020: Bemerkungen von Herr Latsch	BemerkungenLa-20200622_deZem - Messkonzept Holzmodulschulen.docx	Stadt Frankfurt am Main, Armin Latsch
2.7.2020: Überarbeitung durch deZem, Offene Punkte, Übersicht Hardware	20200702_deZem - Messkonzept Holzmodulschulen_Bem. La+FW.docx	deZem, Georg Riegel und Felix Wehringer
15.7.2020: Überarbeitung durch deZem, Anmerkungen von Herr Linder eingearbeitet.	20200715_deZem - Messkonzept Holzmodulschulen_Bem. La+FW.docx	deZem, Felix Wehringer
21.7.2020: Kleine Überarbeitung, Änderungen angenommen Kommentare entfernt.	20200721_deZem - Messkonzept Holzmodulschulen	deZem, Felix Wehringer
15.4.2021: Installationsorte Strommessungen, Wasserzähler und Datenübertragung (Gym. Nord) ergänzt. Messpunktliste und Abkürzungsverzeichnis für Datenpunkte eingefügt.	20210415_deZem – Messkonzept Holzmodulschulen	deZem, Felix Wehringer

Projektbeschreibung

Für das Projekt "Monitoring Holzmodul-Schulen" soll ein energetischer Vergleich und ein Vergleich der Raumluftkonditionen insbesondere im Sommer der beiden Holzmodul-Schulen Gymnasium Nord und Schulcampus Westend (Adorno-Gymnasium) durchgeführt werden.

Dieses Messkonzept dokumentiert die geplanten Messstellen und die für die Messungen eingesetzten Sensoren.

Messstellen

Allgemein

Anforderungen an die Genauigkeit der Sensoren

- Temperatur $\leq \pm 0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Relative Feuchte $\leq \pm 3 \text{ } \%$
- CO₂-Konzentration $\leq \pm 100 \text{ ppm}$
- Globalstrahlung $\leq \pm 50 \text{ W/m}^2$
- Stromverbrauch $\leq \pm 3 \text{ } \%$

Datenerfassung und Speicherung

Die Messwerte werden von unterschiedlichen Sensortypen erfasst und via LoRaWAN zuerst an eine zentrale LoRaWAN-Antenne mit Gateway übertragen und von dort aus via LTE an einen zentralen Server wo die Daten gespeichert werden.

Abkürzungen für die Bezeichnung der Datenpunkte

AG: Adorno Gymnasium

GN: Gymnasium Nord

RK: Raumklima

DL: Decke / Lüftung

PS: Pultseite des Klassenzimmers

RS: Rückseite des Klassenzimmers

FK: Fensterkontakt

Beispiel: AG_A140_RK_PS_co2

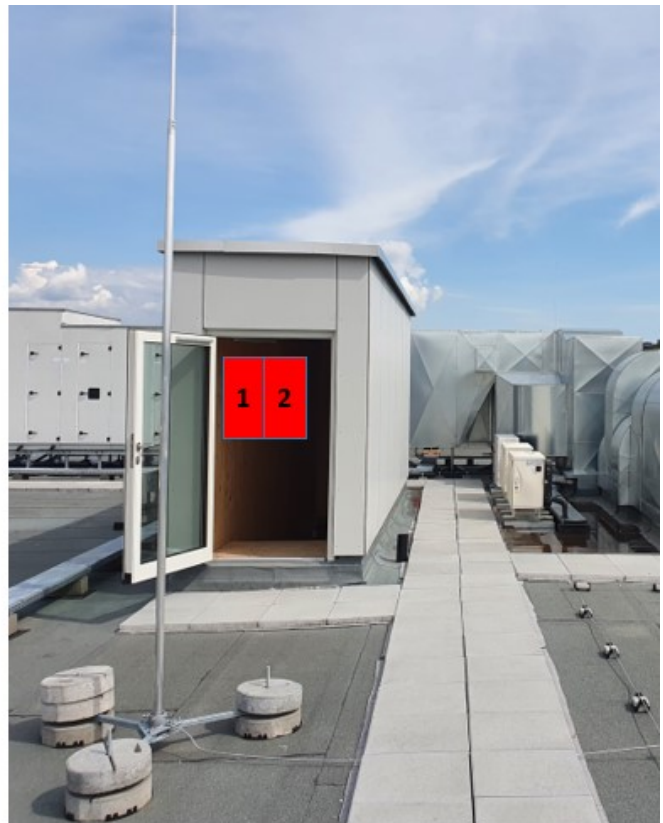
Übersicht Messpunktenamen Export

Adorno Gymnasium	Gymnasium Nord
AG_A140_RK_PS_co2	GN_K1.9_RK_PS_co2
AG_A140_RK_PS_humidity	GN_K1.9_RK_PS_humidity
AG_A140_RK_PS_light	GN_K1.9_RK_PS_light
AG_A140_RK_PS_motion	GN_K1.9_RK_PS_motion
AG_A140_RK_PS_temperature	GN_K1.9_RK_PS_temperature
AG_A140_RK_RS_co2	GN_K1.9_RK_RS_co2
AG_A140_RK_RS_humidity	GN_K1.9_RK_RS_humidity
AG_A140_RK_RS_light	GN_K1.9_RK_RS_light
AG_A140_RK_RS_motion	GN_K1.9_RK_RS_motion
AG_A140_RK_RS_temperature	GN_K1.9_RK_RS_temperature
AG_A140_DL_Zulufttemperatur	GN_K1.9_DL_Ablufttemperatur
AG_A140_DL_Betondecke 2	GN_K1.9_DL_Raumdecke 2
AG_A140_DL_Raumdecke 1	GN_K1.9_DL_Raumdecke 1
AG_A140_DL_Raumdecke 2	GN_K1.9_DL_Zulufttemperatur
AG_A140_DL_Betondecke 1	GN_K1.9_FK 1
AG_A140_DL_Ablufttemperatur	GN_K1.9_FK 2
AG_A140_FK 3	GN_K1.9_FK 3
AG_A140_FK 2	
AG_A140_FK 4	
AG_A140_FK 5	
AG_A140_FK 1	
AG_A153_RK_PS_co2	GN_K1.16_RK_PS_co2
AG_A153_RK_PS_humidity	GN_K1.16_RK_PS_humidity
AG_A153_RK_PS_light	GN_K1.16_RK_PS_light
AG_A153_RK_PS_motion	GN_K1.16_RK_PS_motion
AG_A153_RK_PS_temperature	GN_K1.16_RK_PS_temperature
AG_A153_RK_RS_co2	GN_K1.16_RK_RS_co2
AG_A153_RK_RS_humidity	GN_K1.16_RK_RS_humidity
AG_A153_RK_RS_light	GN_K1.16_RK_RS_light
AG_A153_RK_RS_motion	GN_K1.16_RK_RS_motion
AG_A153_RK_RS_temperature	GN_K1.16_RK_RS_temperature
AG_A153_DL_Zulufttemperatur	GN_K1.16_DL_Raumdecke 1
AG_A153_DL_Betondecke 1	GN_K1.16_DL_Zulufttemperatur
AG_A153_DL_Betondecke 2	GN_K1.19_DL_Ablufttemperatur
AG_A153_DL_Raumdecke 2	GN_K1.19_DL_Raumdecke 2
AG_A153_DL_Raumdecke 1	GN_K1.16_FK 1
AG_A153_DL_Ablufttemperatur	GN_K1.16_FK 2
AG_A153_FK 1	GN_K1.16_FK 3
AG_A153_FK 2	
AG_A153_FK 3	
AG_A153_FK 4	
AG_A153_FK 5	
AG_A156_RK_PS_co2	GN_K1.19_RK_PS_co2
AG_A156_RK_PS_humidity	GN_K1.19_RK_PS_humidity
AG_A156_RK_PS_light	GN_K1.19_RK_PS_light
AG_A156_RK_PS_motion	GN_K1.19_RK_PS_motion
AG_A156_RK_PS_temperature	GN_K1.19_RK_PS_temperature
AG_A156_RK_RS_co2	GN_K1.19_RK_RS_co2
AG_A156_RK_RS_humidity	GN_K1.19_RK_RS_humidity
AG_A156_RK_RS_light	GN_K1.19_RK_RS_light
AG_A156_RK_RS_motion	GN_K1.19_RK_RS_motion
AG_A156_RK_RS_temperature	GN_K1.19_RK_RS_temperature
AG_A156_DL_Zulufttemperatur	GN_K1.19_DL_Zulufttemperatur
AG_A156_DL_Raumdecke 1	GN_K1.19_DL_Ablufttemperatur
AG_A156_DL_Betondecke 2	GN_K1.19_DL_Raumdecke 1
AG_A156_DL_Ablufttemperatur	GN_K1.19_DL_Raumdecke 2
AG_A156_DL_Betondecke 1	GN_K1.19_FK 2
AG_A156_DL_Raumdecke 2	GN_K1.19_FK 3
AG_A156_FK 1	GN_K1.19_FK 1
AG_A156_FK 2	
AG_A156_FK 3	
AG_A156_FK 4	
AG_A156_FK 5	
AG_Outside_humidity	GN_cooling_L3_current
AG_Outside_temperature	GN_cooling_L2_current
AG_Outside_irradiation	GN_cooling_L1_current
AG_cooling_volume	GN_ventilation_L1_current
AG_ventilation_L3_current	GN_ventilation_L3_current
AG_ventilation_L1_current	GN_ventilation_L2_current
AG_ventilation_L2_current	

Adorno Gymnasium - Schulcampus Westend

Datenübertragung

Installation: LTE-Router und LoRaWAN Gateway werden im Aufgang zum Dach installiert, dadurch wird ein möglichst guter Empfang gewährleistet. Die Spannungsversorgung erfolgt über eine vorhandene Steckdose im Treppenaufgang zum Dach. Die Verkabelung erfolgt entlang der vorhandenen Kabelführung für die Beleuchtung.



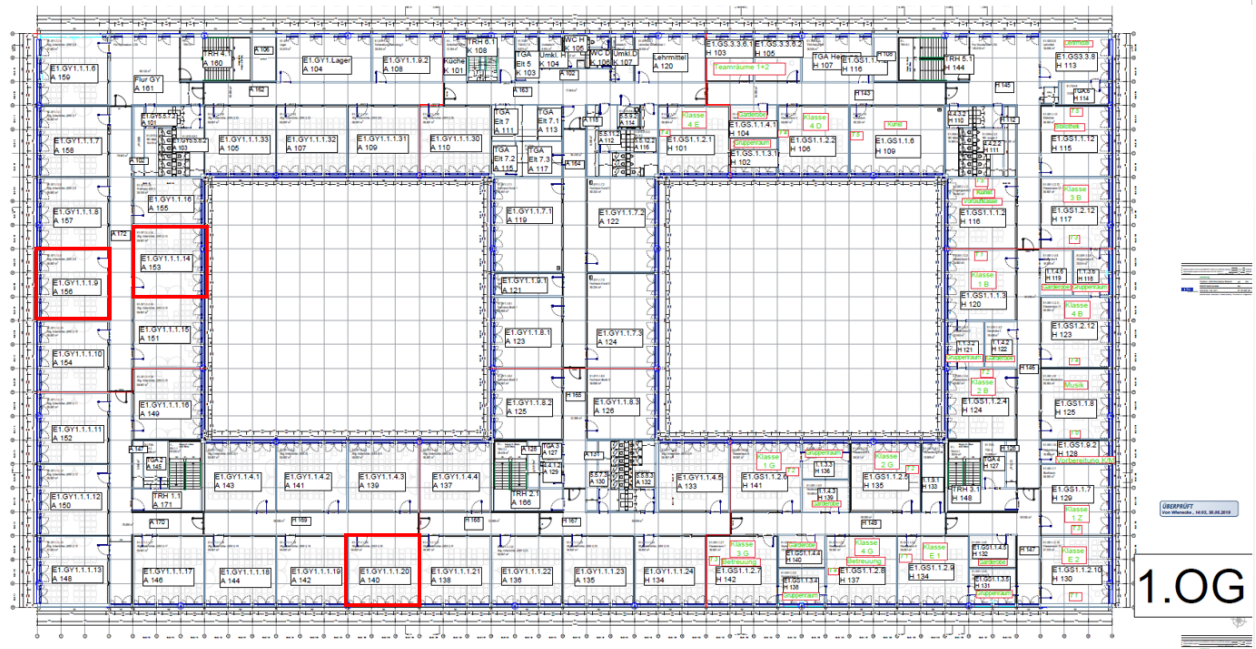
Legende der Nummern:

1: LoRaWAN Gateway – LorixOne

2: LTE-Router MikroTik SXT LTE Kit

Klassenräume

Es sollen drei Räume mit unterschiedlichen Ausrichtungen zur Sonne untersucht werden. Es wurden die folgenden Räume ausgewählt: A140 (Süd), A153 (Ost), A156 (West)



Raumklima und Präsenz

Messgrößen:

- 2 Raumlufttemperaturen
- 2 relative Raumluftfeuchten
- 2 CO₂-Konzentrationen der Raumluft
- 2 Präsenzmelder
- 2 Sensoren zum Erkennen direkter Sonneneinstrahlung hinter der Fensterebene

Sensoren: Elsys ERS CO₂

Installation: Die Sensoren werden ca. 30 cm von der Fensterfront auf einer Höhe von ca. 1,5 m installiert. Die Einstrahlung wird über einen ebenfalls integrierten Sensor für Bestrahlungsstärke erfasst.



Legende der Nummern:

1: Elsys ERS CO₂

2: Elsys ERS CO₂

Temperatur Decke und Lüftung

Messgrößen:

- 2 Oberflächentemperaturen der Raumdecke mit Anlegefühlern (Temperatur auf Höhe der Holzmodule)
- 2 Oberflächentemperaturen der Betondecke mit Anlegefühlern
- 1 Zulufttemperatur mit Anlegefühlern
- 1 Ablufttemperatur mit Anlegefühlern

Sensoren: 1 x Lobaro 1-Wire/LoRa Bridge + 6 x 1-Wire Sensoren (basierend auf DS18B20) = Anlegefühler mit unterschiedlichen Kabellängen

Installation: 2 Temperatursensoren an der Betondecke, 2 an den Holzbalken, 2 direkt an bzw. in den Lüftungsgittern der Zu-/Abluftleitung. Die Verkabelung von der zentralen LoRaWAN Bridge bzw. Verteildose zu den Temperatursensoren wird in dem bestehenden Kabelkanal sowie entlang bestehender Verkabelung verlegt.



Legende der Nummern:

- 1: 1-Wire Temperatursensor (1 m) – Messung Oberflächentemperatur Betondecke
- 2: 1-Wire Temperatursensor (1 m) – Messung Oberflächentemperatur Betondecke
- 3: 1-Wire Temperatursensor (2 m) – Messung Oberflächentemperatur Raumdecke
- 4: 1-Wire Temperatursensor (2 m) – Messung Oberflächentemperatur Raumdecke
- 5: 1-Wire Temperatursensor (7 m) – Messung Abluft
- 6: 1-Wire Temperatursensor (7 m) – Messung Zuluft
- 7: Lobaro 1-Wire/LoRa Bridge
- 8: Aufputzdose Verteilung 1-Wireverkabelung

Fensterkontakte

Messgrößen:

- Fensterkontakte

Hier sind Fensterkontakte an allen Fenstern sinnvoll, da ansonsten das Lüftungsverhalten nicht kontrolliert werden kann.

Sensoren: Elsys EMS Door

Installation: Anbringung der Sensoren an der Oberkante der Fenster um Zugriff durch Schüler zu erschweren. Der Sensor mit Batterie und Sender wird an den Fensterrahmen geklebt. Das dazugehörige Magnetmodul wird an den zuerst öffnenden Teil der Doppelfenster und die Nachtlüftungsfenster geklebt.



Legende der Nummern:

1-6: Elsys EMS Door (Sensor + Magnet)

Außenluft Parameter

Messgrößen:

- 2 Außentemperaturen
- 2 Außenluftfeuchten
- 1 Außenglobalstrahlung auf horizontale Fläche

Sensor: 2 x ELT-2 + 1 x Globalstrahlungssensor

Installation: Nordseite des Treppenaufgangs auf dem Dach. Globalstrahlungssensor auf dem Dach des Treppenaufgangs.



Legende der Nummern:

1: 2 x Elsys ELT-2

2: Globalstrahlungssensor GBS01

Lüftungsanlage und Kühlung

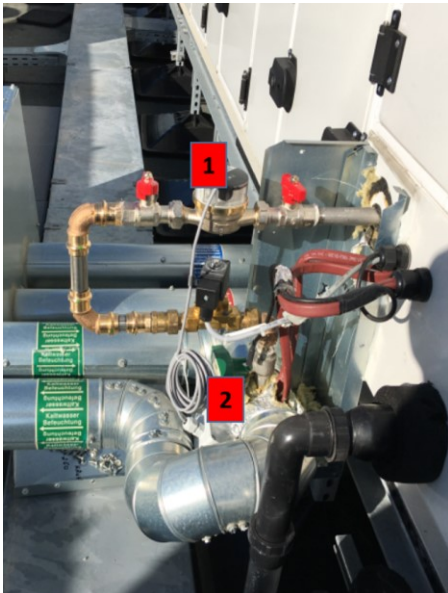
Messgrößen:

- Volumen Wasserverbrauch adiabate Kühlung
- Stromverbrauch der Lüftungsanlage

Volumen Wasserverbrauch adiabate Kühlung

Sensor: Wasserzähler mit Impuls.

Installation: Direkt an dem Zulauf der Lüftungsanlage (RLT Anlage 2) wurde durch die Lüftungsfirma ein Wasserzähler installiert. Das gemessene Volumen des Wasserzählers (via Impulse) wird mit einem Elsys ELT-2 erfasst. Der Wasserzähler und Sensor wurden mit einem Witterungsschutz isoliert.



Legende der Nummern:

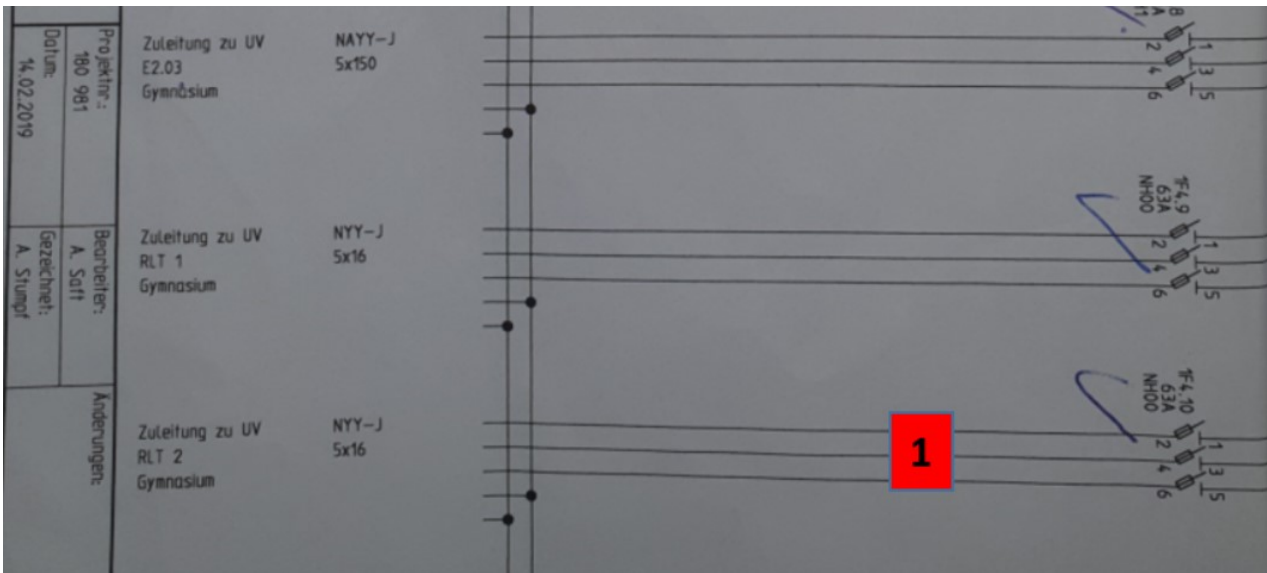
1: Wasserzähler Impulse

2: Elsys ELT-2

Stromverbrauch der Lüftungsanlage

Sensor: Mobile Strommessung von deZem CT-LoRa Wandlermessung (W80)

Installation: Raum: A 111 - TGA ELT 7 / Schrank: NSHV Feld 7 Abgänge Gymnasium / Sicherung: 1F4.10 (63 A) - Zuleitung zu UV RLT 2 Gymnasium



Legende der Nummern:

1: 3 x CT-LoRa mit je W80 Stromwandler

Gymnasium Nord

Datenübertragung

Installation: LTE-Router und LoRaWAN Gateway werden im Aufgang zum Dach installiert, dadurch wird ein möglichst guter Empfang gewährleistet.

Der LTE-Router wurde im Schaltschrank (BT1 bzw. RLT01) an die bestehende Steckdose (-3X0) angeschlossen. Die Antenne wurde in unmittelbarer Nähe des Schaltschranks angebracht.



Legende der Nummern:

- 1: LoRaWAN Gateway – LorixOne
- 2: LTE-Router MikroTik SXT LTE kit
- 3: Steckdosenabgang (-3X0 für Spannungsversorgung)

Klassenräume

Es sollen drei Räume mit unterschiedlichen Ausrichtungen zur Sonne untersucht werden. Es wurden die folgenden Räume ausgewählt: K1.9 / K1.16 / K1.19



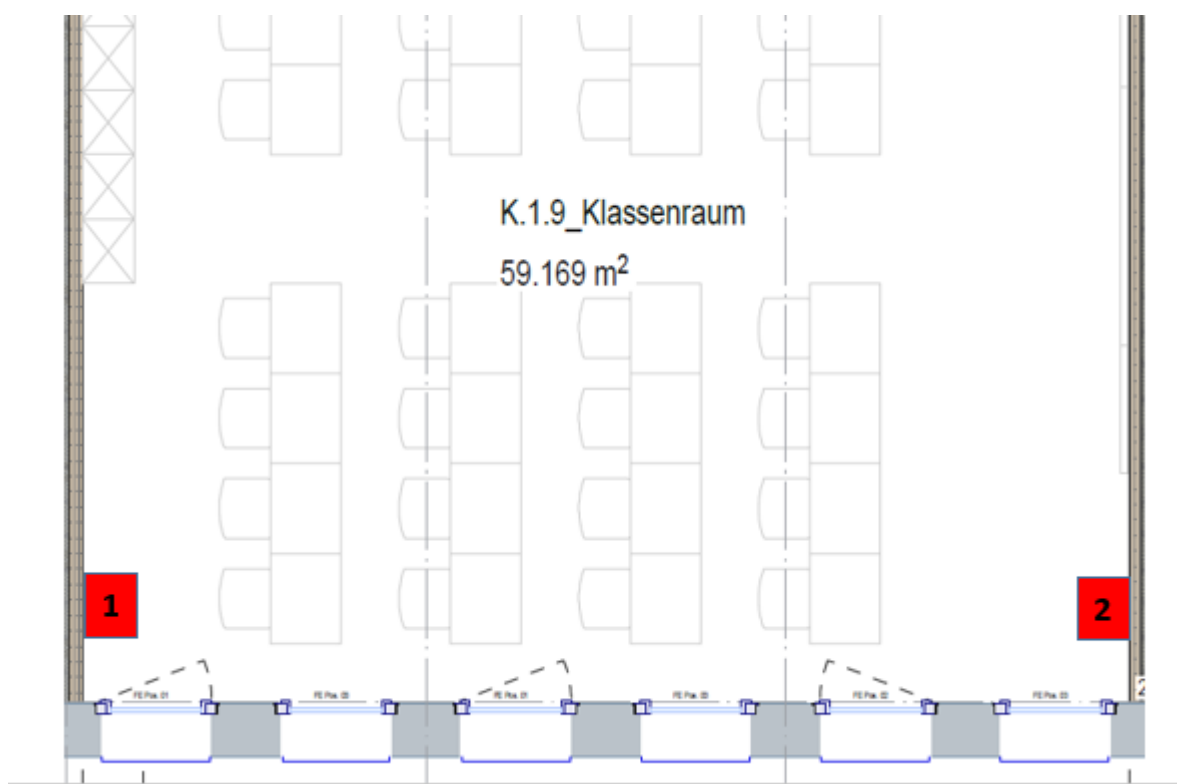
Raumklima und Präsenz

Messgrößen:

- 2 Raumlufttemperaturen
- 2 relative Raumluftfeuchten
- 2 CO₂-Konzentrationen der Raumluft
- 2 Präsenzmelder
- 2 Sensoren zum Erkennen direkter Sonneneinstrahlung hinter der Fensterebene

Sensoren: Elsys ERS CO₂

Installation: Die Sensoren werden ca. 30 cm von der Fensterfront auf einer Höhe von ca. 1,5 m installiert. Die Einstrahlung wird über einen Sensor für Bestrahlungsstärke erfasst.



Legende der Nummern:

- 1: Elsys ERS CO₂
2: Elsys ERS CO₂

Temperatur Decke und Lüftung

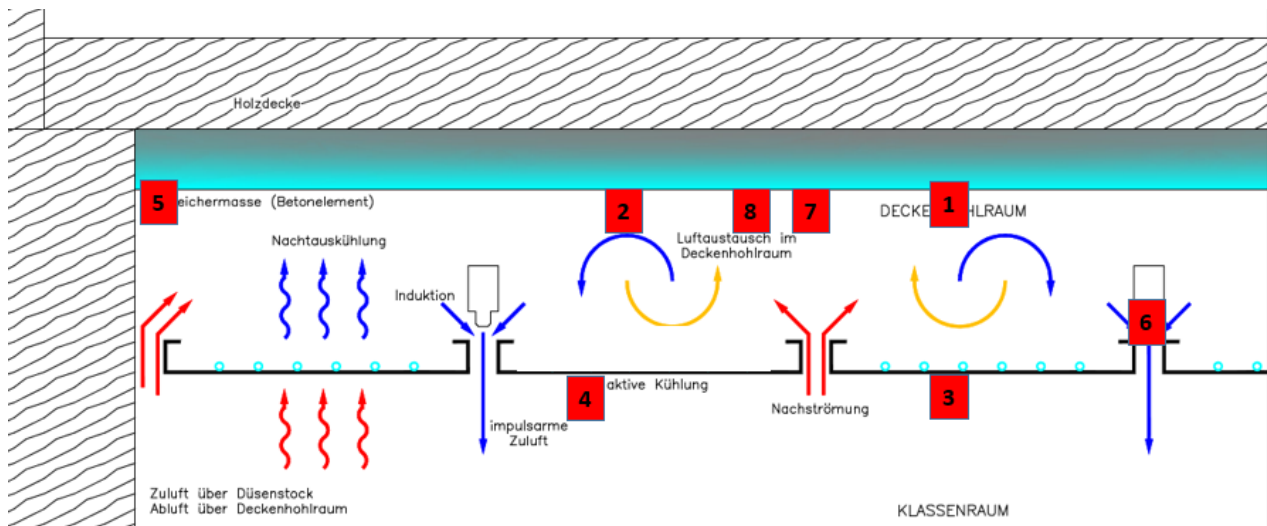
Messgrößen:

- 2 Oberflächentemperaturen der Raumdecke
- 2 Oberflächentemperaturen der Betondecke
- 1 Zulufttemperatur
- 1 Ablufttemperatur

Sensoren: 1 x Lobaro 1-Wire/LoRa Bridge + 6 x 1-Wire Sensoren (basierend auf DS18B20) = Anlegefühler mit unterschiedlichen Kabellängen

Installation: In der Zwischendecke der Klassenräume. Eine Messung der Betondecke in einer Kammer mit Kühlrohren und eine Messungen der Betondecke in einer Kammer ohne Kühlrohre. Zwei Messungen an der Decke des Klassenzimmers an der Unterseite der Deckenplatten.

Ein Temperatursensor an einer Einströmsleiste Zuluft (6) und eine zweite Temperaturmessung am Überströmkanal zum Flur (5). Installation möglichst mittig im Luftstrom.



- 1: 1-Wire Temperatursensor (1 m) – Messung Oberflächentemperatur Betondecke
- 2: 1-Wire Temperatursensor (1 m) – Messung Oberflächentemperatur Betondecke
- 3: 1-Wire Temperatursensor (2 m) – Messung Oberflächentemperatur Raumdecke
- 4: 1-Wire Temperatursensor (2 m) – Messung Oberflächentemperatur Raumdecke
- 5: 1-Wire Temperatursensor (7 m) – Messung Abluft
- 6: 1-Wire Temperatursensor (7 m) – Messung Zuluft
- 7: Lobaro 1-Wire/LoRa Bridge
- 8: Aufputzdose Verteilung 1-Wireverkabelung

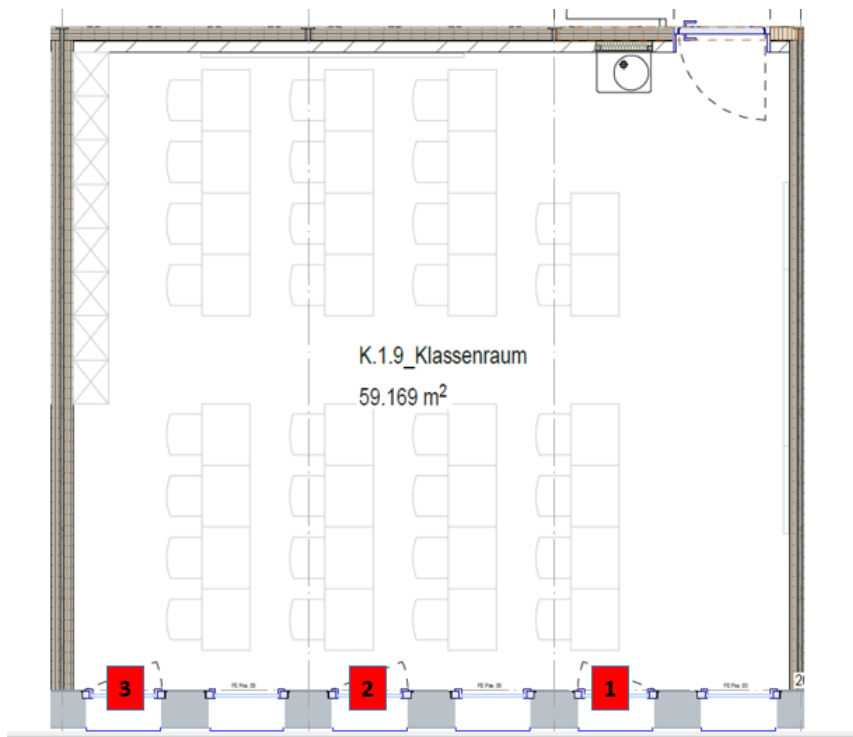
Fensterkontakte

Messgrößen:

- Fensterkontakte

Sensoren: Elsys EMS Door

Installation: Die drei Fenster im Raum die geöffnet werden können werden mit Sensoren ausgestattet. Der Sensor mit Batterie und Sender wird an den Fensterrahmen geklebt. Das dazugehörige Magnetmodul wird an den zuerst öffnenden Teil der Doppelfenster und die Nachtlüftungsfenster geklebt.



Legende der Nummern:

1-3: Elsys EMS Door (Sensor + Magnet)

Lüftungsanlage und Kühlung

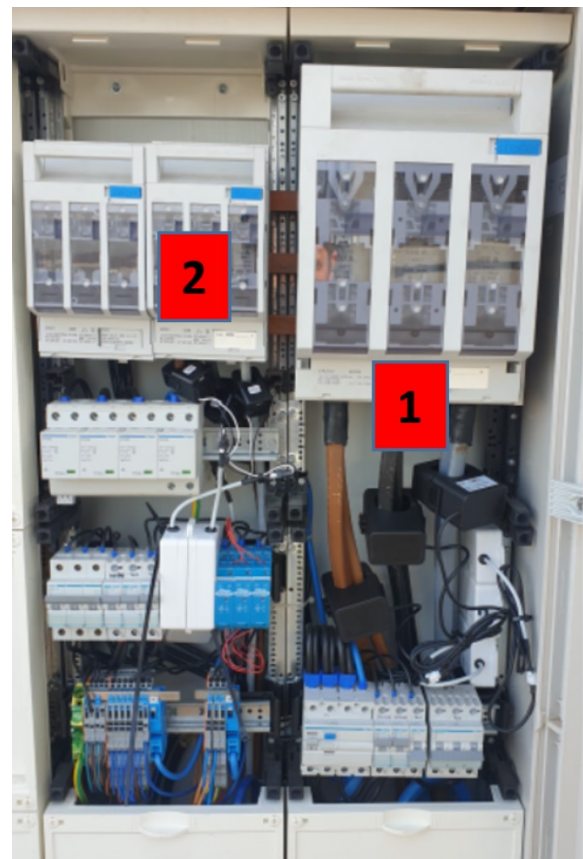
Elektrozähler in den Verteilungen auf dem Dach. Elektrozähler können durch die Stadt Frankfurt installiert werden. Genauer Einbauort muss noch festgelegt werden.

Messgrößen:

- Stromverbrauch der Kältemaschine 420 kW (BlueBox)
- Stromverbrauch der Lüftungsanlage RLT01

Sensor: Mobile Strommessung von deZem

Installation: Unterverteilung Dach (UV Dache), neben dem Aufgang. Abgang BT1 und 2 Kältemaschine (Absicherung 400 A). Abgang Lüftungsanlage RLT01 (Absicherung 80 A).



Legende der Nummern:

1: Messung Kältemaschine - 3 x CT-LoRa mit je T500 Stromwandler

2: Messung Lüftungsanlage - 3 x CT-LoRa mit je W150 Stromwandler

Übersicht Hardware und Messwerte

Hardware Datenübertragung				
LoRaWAN Gateway 1 (Westend)	MAC: fcc23d0b8f5a		IP: 192.168.88.2	
Router 1	MAC: C4AD3469D7D3		IP: 192.168.88.1	
SIM 1	25186046390879			
LoRaWAN Gateway 2	MAC: fcc23d2071a9	GatewayID: fcc23dFFFE2071a5	IP: 192.168.88.2	
Router 2	MAC: C4AD3469D605		IP: 192.168.88.1	
SIM 2	17176008252043			

Nr.	Hardware für die Messstellen			
	Raum	Messstelle	Sensor	Messgrößen
1	Raum 1 - 6	Raumklima 1	Elsys ERS CO2	T, RF, CO2
2	Raum 1 - 6	Raumklima 2	Elsys ERS CO2	T, RF, CO2
3	Raum 1 - 6	Präsenzmelder 1	via Nr. 1	Bewegung
4	Raum 1 - 6	Präsenzmelder 2	via Nr. 2	Bewegung
5	Raum 1 - 6	Globalstrahlung Fenster 1	via Nr. 1	Beleuchtungsstärke
6	Raum 1 - 6	Globalstrahlung Fenster 2	via Nr. 2	Beleuchtungsstärke
7	Raum 1 - 6	Raumdecke 1	Lobaro 1-Wire/LoRa Bridge + Anlegefühler	T
8	Raum 1 - 6	Raumdecke 2	via Nr. 7 mit Anlegefühler	T
9	Raum 1 - 6	Betondecke 1	via Nr. 7 mit Anlegefühler	T
10	Raum 1 - 6	Betondecke 2	via Nr. 7 mit Anlegefühler	T
11	Raum 1 - 6	Zulufttemperatur	via Nr. 7 mit Anlegefühler	T
12	Raum 1 - 6	Ablufttemperatur	via Nr. 7 mit Anlegefühler	T
13	Raum 1 - 6	Fensterkontakte	Elsys EMS Door	Status
14	Technikzentrale (Gymnasium Nord)	Außentemperatur + Feuchte 1	ELT-2	T, RF
15	Technikzentrale (Gymnasium Nord)	Außentemperatur + Feuchte 2	ELT-2	T, RF
16	Technikzentrale (Gymnasium Nord)	Globalstrahlung auf horz. Fläche	via Nr. 14 + Sensor	Globalstrahlung
17	Technikzentrale (Gymnasium Nord)	UV Dach - Stromverbrauch Kältemaschine 400A Parallelkabel	CT-LoRa Effektivstromsensoren deZem via 3x T500	Strom
18	Technikzentrale (Gymnasium Nord)	UV-Dach - Stromverbrauch Lüftungsanlage 80A	CT-LoRa Effektivstromsensoren deZem via 3x W150	Strom
19	Technikzentrale (Westend) Adomo	Außentemperatur + Feuchte 1	ELT-2	T, RF
20	Technikzentrale (Westend) Adomo	Außentemperatur + Feuchte 2	ELT-2	T, RF
21	Technikzentrale (Westend) Adomo	Globalstrahlung auf horz. Fläche	via Nr. 19 + Sensor	Globalstrahlung
22	Technikzentrale (Westend) Adomo	Wasserverbrauch Adiabate Kühlung	ELT-2	Wasservolumen
23	Technikzentrale (Westend) Adomo	Stromverbrauch Lüftungsanlage RLT2 1F4.10	CT-LoRa Effektivstromsensoren deZem via 3x W80	Strom