

Workshop "Schulen in Holzmodulbauweise,, am 10.11.2023

# Praxiserfahrungen mit Holzmodulschulen im Passivhaus-Standard

Dipl.-Ing. Mathias Linder

Abteilungsleiter Energiemanagement

STADT  FRANKFURT AM MAIN  
Amt für Bau und Immobilien  
Abteilung Energiemanagement

# Gliederung

- Grundlagen
- Nutzerverhalten
- Gebäude- und Anlagenkonzept
- Handlungsempfehlungen

# 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.

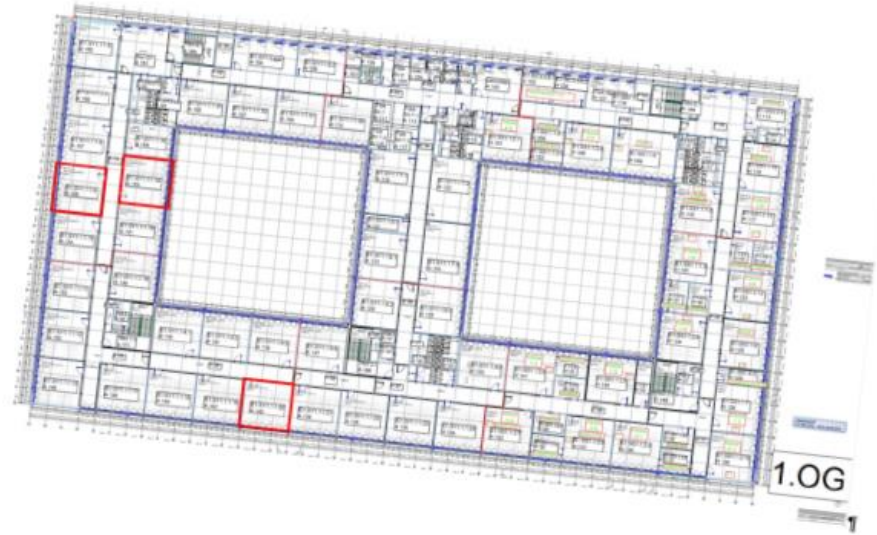
	<b>Adorno Gymnasium (AG)</b>	<b>Gymnasium Nord (GN)</b>
<b>Anzahl der Module</b>	359	210
<b>Nutzfläche</b>	16.600 m <sup>2</sup>	8.144 m <sup>2</sup>
<b>Kühlsystem</b>	Adiabate Abluftkühlung je Lüftungsanlage	Eine zentrale Kältemaschine für Lüftungskühlung und zusätzliche „ECO- Boost“-Kühldecken
<b>Lüftungsanlagen</b>	8 größere Lüftungsanlagen	2 große Lüftungsanlagen

# Grundrisse

## Gymnasium Nord



## Adorno Gymnasium



# 125 Messpunkte

- In 6 Klassenzimmern
  - T, F, CO2, lux, Bewegung
  - Temperatur Zu-/Abluft
  - Temperatur Decke + Beton
  - Fensterkontakte
- Anlagentechnik
  - Strom (Lüftung / Kälte GN)
  - Wasserverbrauch (Kälte AG)
- Umgebung
  - T, F
  - Bestrahlungsstärke

Adorno-Gymnasium	Gymnasium Nord
<b>Raum A140</b> AG_A140_RK_PS_co2 AG_A140_RK_PS_humidity AG_A140_RK_PS_light AG_A140_RK_PS_motion AG_A140_RK_PS_temperature AG_A140_RK_RS_co2 AG_A140_RK_RS_humidity AG_A140_RK_RS_light AG_A140_RK_RS_motion AG_A140_RK_RS_temperature AG_A140_DL_Zulufttemperatur AG_A140_DL_Betondecke 2 AG_A140_DL_Raumdecke 1 AG_A140_DL_Raumdecke 2 AG_A140_DL_Betondecke 1 AG_A140_DL_Ablufttemperatur AG_A140_FK3 AG_A140_FK2 AG_A140_FK4 AG_A140_FK5 AG_A140_FK1	<b>Raum K1.9</b> GN_K1.9_RK_PS_co2 GN_K1.9_RK_PS_humidity GN_K1.9_RK_PS_light GN_K1.9_RK_PS_motion GN_K1.9_RK_PS_temperature GN_K1.9_RK_RS_co2 GN_K1.9_RK_RS_humidity GN_K1.9_RK_RS_light GN_K1.9_RK_RS_motion GN_K1.9_RK_RS_temperature GN_K1.9_DL_Zulufttemperatur GN_K1.9_DL_Betondecke 2 GN_K1.9_DL_Raumdecke 1 GN_K1.9_DL_Zulufttemperatur GN_K1.9_DL_Betondecke 1 GN_K1.9_DL_Betondecke 2 GN_K1.9_FK1 GN_K1.9_FK2 GN_K1.9_FK3
<b>Raum A153</b> AG_A153_RK_PS_co2 AG_A153_RK_PS_humidity AG_A153_RK_PS_light AG_A153_RK_PS_motion AG_A153_RK_PS_temperature AG_A153_RK_RS_co2 AG_A153_RK_RS_humidity AG_A153_RK_RS_light AG_A153_RK_RS_motion AG_A153_RK_RS_temperature AG_A153_DL_Zulufttemperatur AG_A153_DL_Betondecke 1 AG_A153_DL_Betondecke 2 AG_A153_DL_Raumdecke 1 AG_A153_DL_Raumdecke 2 AG_A153_DL_Betondecke 1 AG_A153_DL_Ablufttemperatur AG_A153_FK1 AG_A153_FK2 AG_A153_FK3 AG_A153_FK4 AG_A153_FK5	<b>Raum K1.16</b> GN_K1.16_RK_PS_co2 GN_K1.16_RK_PS_humidity GN_K1.16_RK_PS_light GN_K1.16_RK_PS_motion GN_K1.16_RK_PS_temperature GN_K1.16_RK_RS_co2 GN_K1.16_RK_RS_humidity GN_K1.16_RK_RS_light GN_K1.16_RK_RS_motion GN_K1.16_RK_RS_temperature GN_K1.16_DL_Zulufttemperatur GN_K1.16_DL_Betondecke 1 GN_K1.16_DL_Zulufttemperatur GN_K1.16_DL_Ablufttemperatur GN_K1.16_DL_Betondecke 1 GN_K1.16_DL_Betondecke 2 GN_K1.16_FK1 GN_K1.16_FK2 GN_K1.16_FK3
<b>Raum A156</b> AG_A156_RK_PS_co2 AG_A156_RK_PS_humidity AG_A156_RK_PS_light AG_A156_RK_PS_motion AG_A156_RK_PS_temperature AG_A156_RK_RS_co2 AG_A156_RK_RS_humidity AG_A156_RK_RS_light AG_A156_RK_RS_motion AG_A156_RK_RS_temperature AG_A156_DL_Zulufttemperatur AG_A156_DL_Betondecke 1 AG_A156_DL_Betondecke 2 AG_A156_DL_Raumdecke 1 AG_A156_DL_Ablufttemperatur AG_A156_DL_Betondecke 1 AG_A156_DL_Betondecke 2 AG_A156_FK1 AG_A156_FK2 AG_A156_FK3 AG_A156_FK4 AG_A156_FK5	<b>Raum K1.19</b> GN_K1.19_RK_PS_co2 GN_K1.19_RK_PS_humidity GN_K1.19_RK_PS_light GN_K1.19_RK_PS_motion GN_K1.19_RK_PS_temperature GN_K1.19_RK_RS_co2 GN_K1.19_RK_RS_humidity GN_K1.19_RK_RS_light GN_K1.19_RK_RS_motion GN_K1.19_RK_RS_temperature GN_K1.19_DL_Zulufttemperatur GN_K1.19_DL_Betondecke 1 GN_K1.19_DL_Zulufttemperatur GN_K1.19_DL_Ablufttemperatur GN_K1.19_DL_Betondecke 1 GN_K1.19_DL_Betondecke 2 GN_K1.19_FK1 GN_K1.19_FK2 GN_K1.19_FK3 GN_K1.19_FK4
<b>Im Freien</b> AG_Outside_humidity AG_Outside_temperature AG_Outside_irradiation AG_cooling_volume	<b>Kühlung</b> GN_cooling_L1_current GN_cooling_L2_current GN_cooling_L3_current
<b>Lüftung</b> AG_ventilation_L1_current AG_ventilation_L2_current AG_ventilation_L3_current	<b>Lüftung</b> GN_ventilation_L1_current GN_ventilation_L2_current GN_ventilation_L3_current

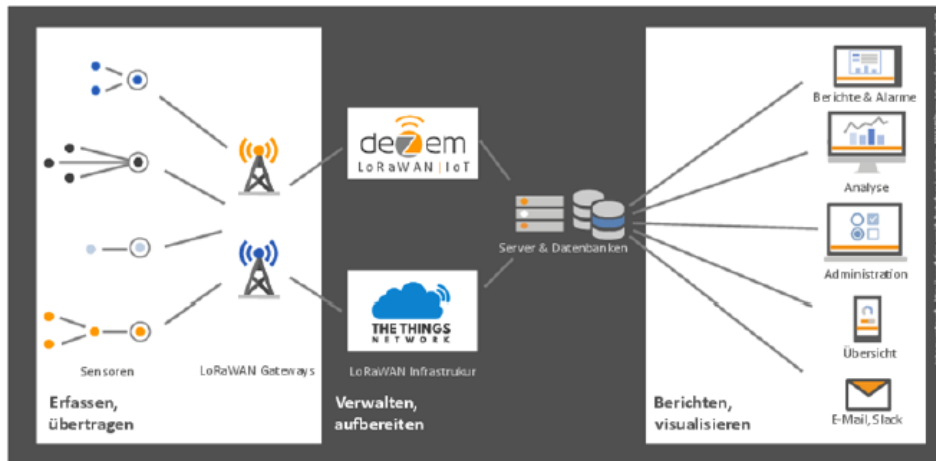
Anmerkung: Im AG gibt es aufgrund von mehr Fenstern 5 FK im Gymnasium Nord nur 3 je Klassenzimmer

# Datenerfassung via LoRaWAN

## LoRaWAN (Long Range Wide Area Network)



- Low-Power Funk mit bis zu **15 km** Reichweite
- Sensoren mit nur einer Batterie **bis 20 Jahre** lang autark
- **kinderleichter Einbau** der vorkonfigurierten Hardware
- beliebige Sensoren und Zähler anbindbar
- Je Schule ein Gateway auf dem Dach für alle Sensoren.



# Behaglichkeitsfelder

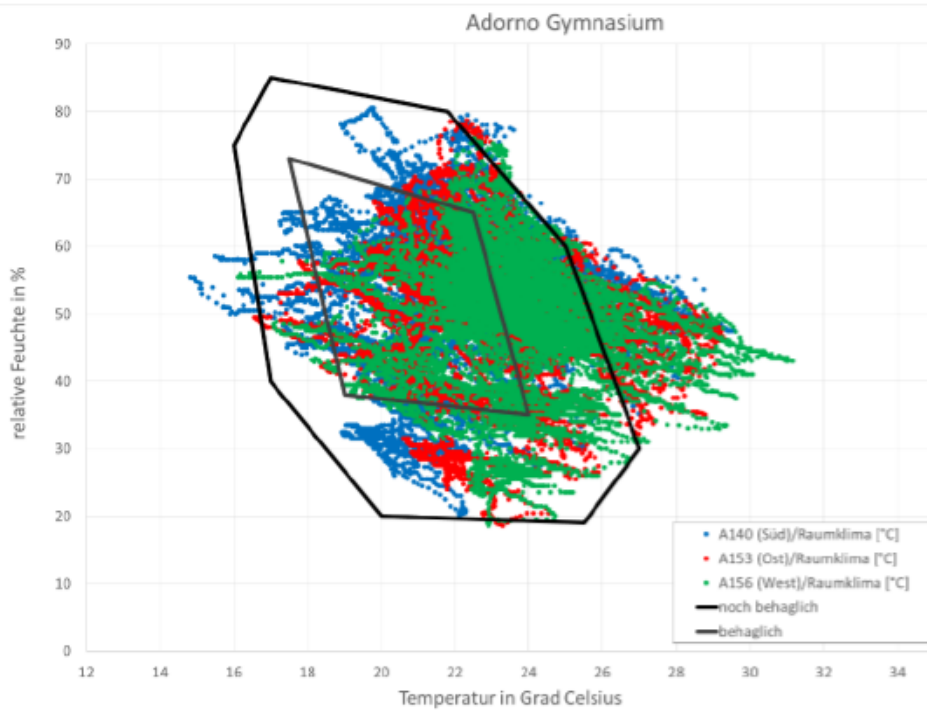


Abbildung 5: Adorno Gymnasium (Mai bis Oktober 2021)  
– Behaglichkeitsdiagramm für drei Klassenzimmer –

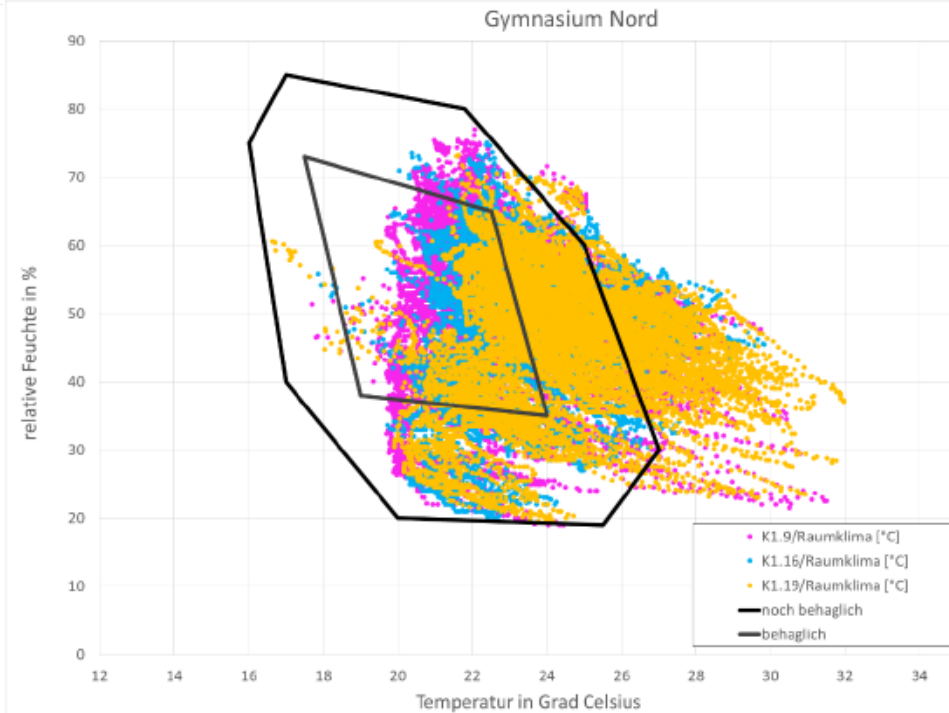


Abbildung 6: Gymnasium Nord (Mai bis Oktober 2021)  
– Behaglichkeitsdiagramm für drei Klassenzimmer –

# Raumluftparameter

- Der Luftaustausch funktioniert in beiden Schulen gut.
- Sowohl Luftfeuchte als auch CO<sub>2</sub>-Konzentration in allen Klassenräumen sind gut.
- Überschreitungen der maximalen Solltemperatur treten im Sommer in beiden Schulen auf. Im GN gibt es hier größere Unterschiede zwischen den überwachten Räumen.
- Zeitlicher Anteil mit Raumtemperaturen > 27°C im Sommer
  - A140 (2%), A153 (4%), A156 (4%)
  - K1.16 (2%), K1.9 (4%), K1.19 (10%)

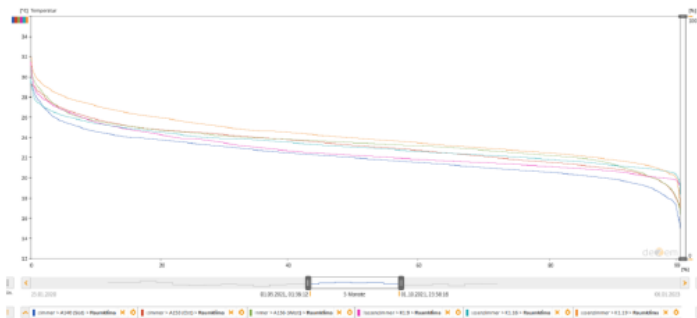
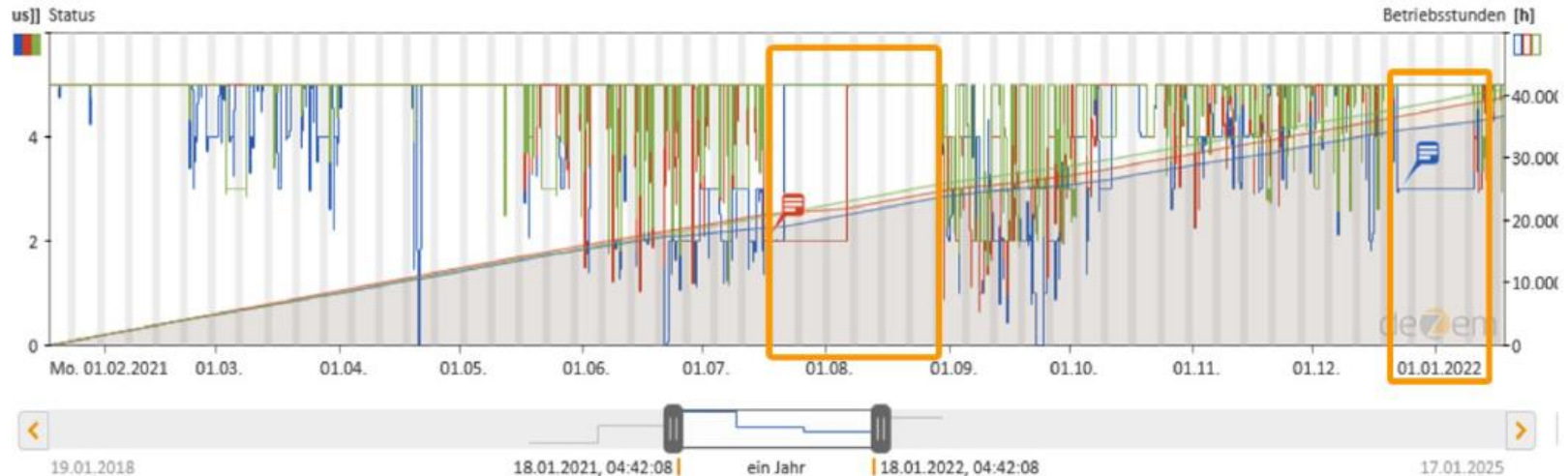


Abbildung 19: AG und GN, Raumtemperaturen (in °C) in allen sechs Klassenzimmern – Dauerlinie - ([Link zum Diagramm](#))



# Fensterkontakte

- ☺ Nachlüftungsfenster AG werden regelmäßig genutzt.
- ☹ Fenster werden bei hohen Außentemperaturen geöffnet.
- ☹ Fenster werden offen gelassen.

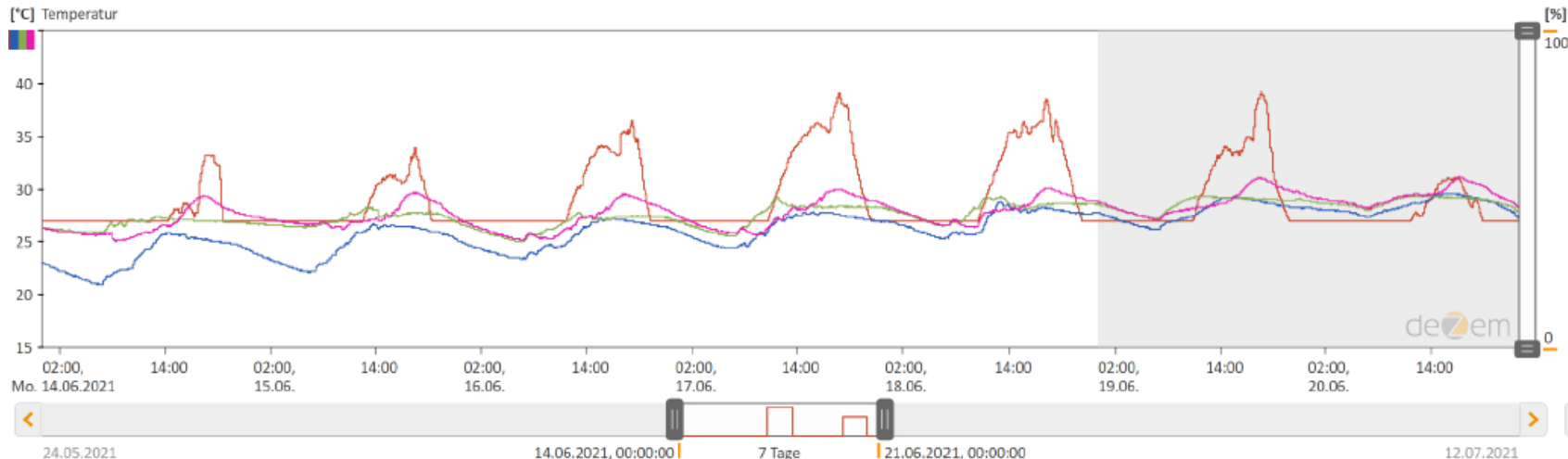


modulschulen FFM > Adorno Gymnasium > Klassenzimmer > A140 (Süd) > Fensterkontakte	🔊	⏱	🗑	🗨	✖	⚙
modulschulen FFM > Adorno Gymnasium > Klassenzimmer > A153 (Ost) > Fensterkontakte	🔊	⏱	🗑	🗨	✖	⚙
modulschulen FFM > Adorno Gymnasium > Klassenzimmer > A156 (West) > Fensterkontakte	🔊	⏱	🗑	🗨	✖	⚙

Suche	2
3 der 5 Fenster im ...	17.07.2021, 05:34:31
2 der 5 Fenster im ...	23.12.2021, 08:56:04

# Raumtemperaturen Adorno-Gymnasium

- Raumtemperaturen sehr ähnlich
- Abhängigkeit der Himmelsrichtung



▼ Inste > Stadt Frankfurt - Projekt Holzmodulschulen FFM > Untersuchungen > Formeln > Außentemperatur -3 K

▶ Projekt Holzmodulschulen FFM > Alle Messpunkte > Adorno Gymnasium > Klassenzimmer > A140 (Süd) > Raumklima

▶ Projekt Holzmodulschulen FFM > Alle Messpunkte > Adorno Gymnasium > Klassenzimmer > A153 (Ost) > Raumklima

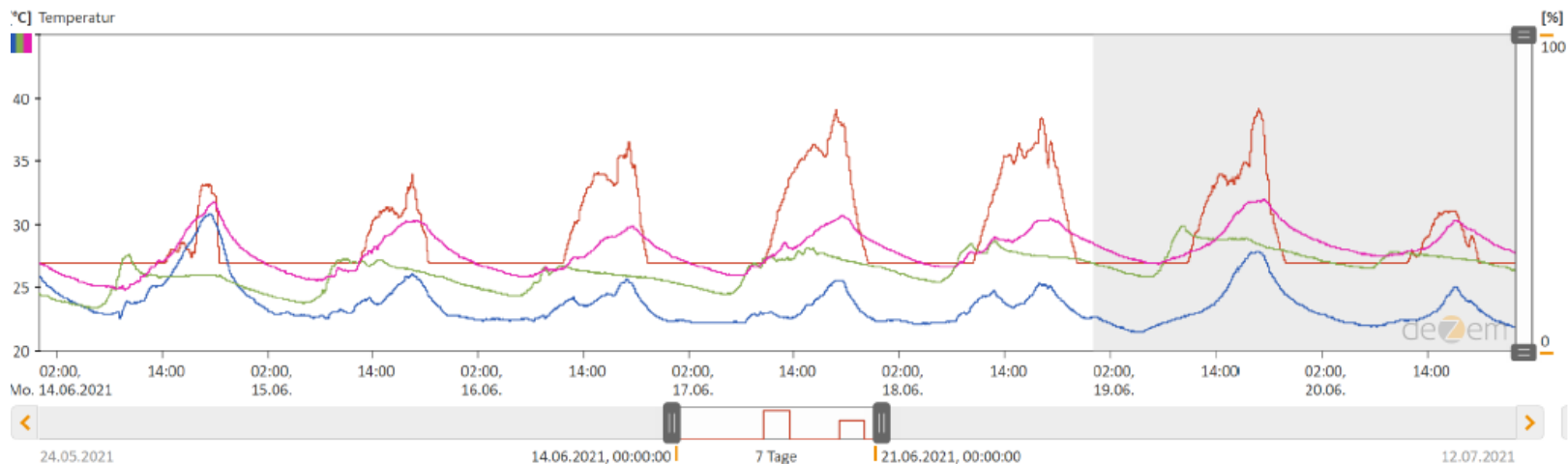
▶ Projekt Holzmodulschulen FFM > Alle Messpunkte > Adorno Gymnasium > Klassenzimmer > A156 (West) > Raumklima

Suche

0

# Raumtemperaturen Gymnasium Nord

- Raumtemperaturen zwischen den Räumen unterschiedlich
- Abhängigkeit der Himmelsrichtung



▼ nste > Stadt Frankfurt - Projekt Holzmodulschulen FFM > Untersuchungen > Formeln > Außentemperatur -3 K

lfurt - Projekt Holzmodulschulen FFM > Alle Messpunkte > Gymnasium Nord > Klassenzimmer > K1.9 > Raumklima

lfurt - Projekt Holzmodulschulen FFM > Alle Messpunkte > Gymnasium Nord > Klassenzimmer > K1.16 > Raumklima

lfurt - Projekt Holzmodulschulen FFM > Alle Messpunkte > Gymnasium Nord > Klassenzimmer > K1.19 > Raumklima

Suche 0

# Lüftungs-/Kühlkonzept Adorno-Gymnasium

- Zuluft- / Abluft sichtbar, Betondecke nicht abgehängt.
- Kühlung über Adiabate Abluftkühlung der Zuluft.
- Nachtlüftungsfenster mit Schlagregenschutz.





# Messungen Adorno-Gymnasium A140

- 16.6.2021 um 16 Uhr Außentemperatur ca. 37°C

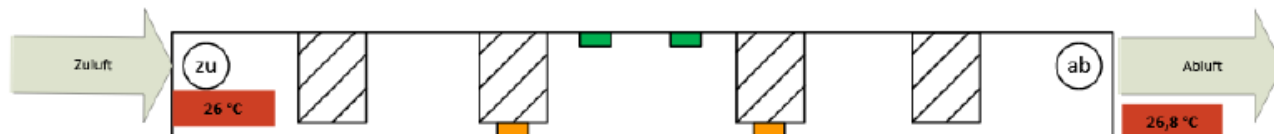
Oberflächentemperatur Raumdecke (1) 26,5 °C

Oberflächentemperatur Betondecke (1) 26,5 °C

Oberflächentemperatur Raumdecke (2) 26,5 °C

Oberflächentemperatur Betondecke (2) 25,3 °C

Adorno Gymnasium A140



## Messungen Pultseite

Temperatur 26,1 °C

Feuchtigkeit 42 %

CO<sub>2</sub> 339 ppm

Bewegung 0 num.

Einstrahlung 649 lx

## Messungen Rückseite

Temperatur 27,9 °C

Feuchtigkeit 42 %

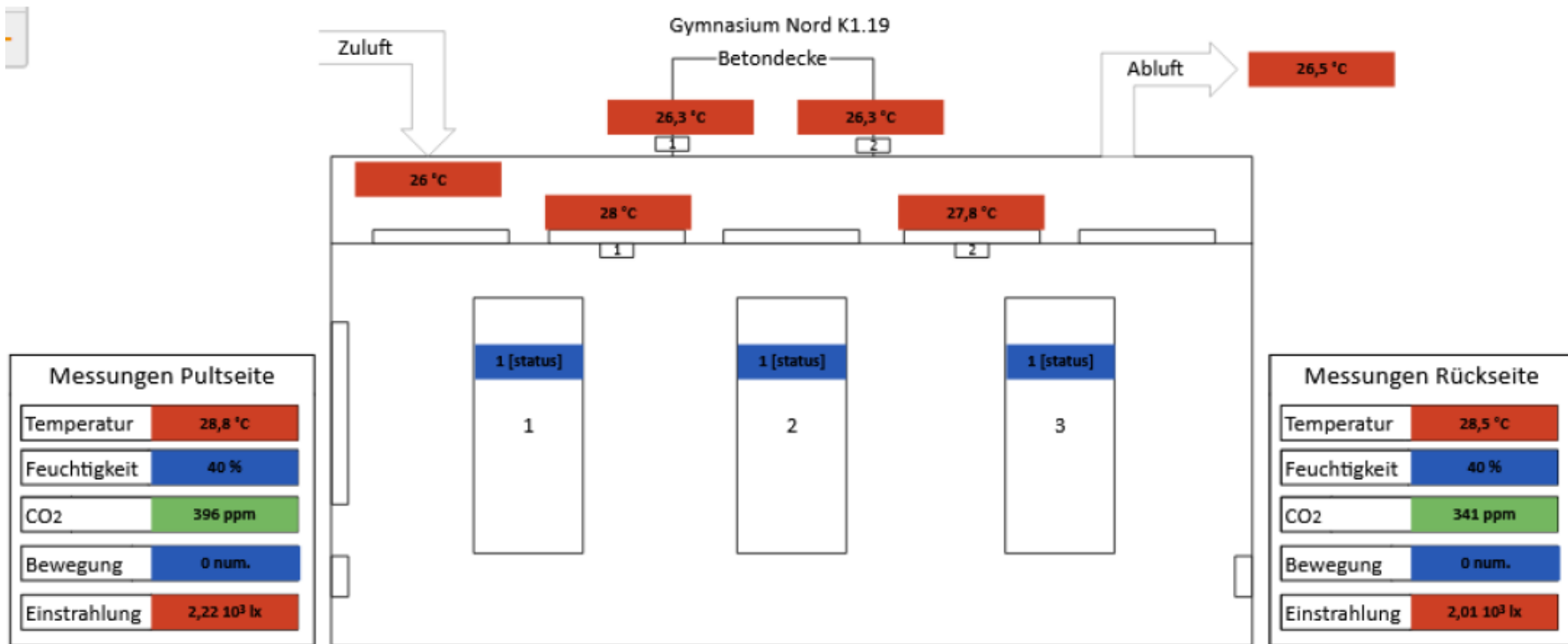
CO<sub>2</sub> 402 ppm

Bewegung 0 num.

Einstrahlung 2,28 10<sup>9</sup> lx

# Messungen Gymnasium Nord K1.19

- 16.6.2021 um 16 Uhr Außentemperatur ca. 37°C





# Stromrechnungen im Vergleich

- Hier Vergleich des Campus Nord, enthält auch andere Gebäude.
- Der Stromverbrauch bzw. die Kosten je m<sup>2</sup> ist im GN deutlich höher als im AG.

	Holzmodulbau AG				GN Campus Fläche			
	Fläche in m <sup>2</sup> :		16.600		14.080		Holzmodulbau GN A + B: 7.441	
	Adorno-Gymnasium				Gymnasium Nord			
Abrechnungsmonat	Verbrauch El. Energie in kWh	Verbrauch / Fläche in kWh / m <sup>2</sup>	Kosten El. Energie in € (Brutto)	Kosten / Fläche in € / m <sup>2</sup>	Verbrauch El. Energie in kWh	Verbrauch / Fläche in kWh / m <sup>2</sup>	Kosten El. Energie in € (Brutto)	Kosten / Fläche in € / m <sup>2</sup>
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



# Jahresverbräuche Anlagen

- Betriebskosten auf Basis der Strommessungen ermittelt.
- Vermessene Anlagen machen einen großen Teil des Gesamtverbrauchs aus.

Schule - Anlage	Jahresverbrauch in kVAh	Jahresverbrauch	Einheit	Betriebskosten je Jahr in €	Treibhausgasemmission je Jahr in kg
<b>GN - Lüftungsanlage RLT01</b>	128.720	115.848	kWh	28.962	49.583
<b>GN - Kältemaschine</b>	109.080	98.172	kWh	24.543	42.018
<b>AG - Lüftungsanlage RLT02</b>	27.390	24.651	kWh	6.163	10.551
<b>AG - Adiabate Kühlung RLT02</b>		16	m <sup>3</sup>	58	5

# Effizienz der Lüftungsanlagen

- Lüftung GN deutlich schlechterer spezifischer Verbrauch.
- Betriebsstunden der Lüftungsanlage im GN sehr hoch.
- Die Lüftungsanlage im GN hat einen überraschend hohen Strombezug.

	Jahresverbrauch in kWh	Volumenstrom in m <sup>3</sup> /h	ermittelte Betriebsstunden	berechnetes Volumen auf Basis der Betriebsstunden in m <sup>3</sup>	spezifischer Verbrauch in Wh/m <sup>3</sup>
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

# Kosten für Kälteerzeugung

- Strombedarf für die Kühlung im Gymnasium Nord ist sehr hoch.
- Thermische Leistung (Kälte) für RLT01 -> 116kW + zusätzliche 150 kW durch Kühldecken (ECO-Boost).
- Betriebskosten für Adiabate Kühlung deutlich niedriger.

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

# Handlungsempfehlungen 1

- Regelmäßige Kontrolle der Fenster durch die Nutzer + Gebäudeverwalter (Wochenende / Ferien).
- Fensterlüftung an warmen Tagen vermeiden bzw. optimieren (nur in den Morgenstunden).
- Bessere Nutzung des Sonnenschutzes
  - Sonnenschutz an heißen Tage beim Verlassen des Raumes schließen.
  - Ggf. automatische Ansteuerung der Verschattung.

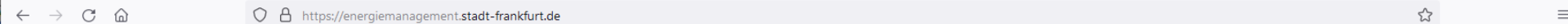
# Handlungsempfehlungen 2

- Komplexes Kühlkonzept im GN nicht richtig abgestimmt
  - Untersuchung der Kälteverteilung im GN sowohl Lüftung als auch Kühldecken nötig.
- Sehr hoher Stromverbrauch Lüftungsanlage + Kühlung GN
  - Anpassung der Steuerung (vor allem Betriebszeiten – Nacht und Ferien).
  - Kontinuierliches Monitoring des Anlagenbetriebs und Verbrauchs um Transparenz zu schaffen, ggf. mit Edge Device zur direkten Optimierung des Anlagen Parameter.

# Fazit

Beim Vergleich der beiden Belüftungs-/ Kühlkonzepte schneidet die Lösung des AG besser ab, als das komplexere Konzept des GN. Bei beiden Konzepten kann durch die Optimierung der Regelung viel Energie eingespart werden.

- Raumluftparameter in beiden Schulen ähnlich, auch während Hitzewellen.
- Lüftungsanlage im AG ist effizienter (AG: 0,3 vs. GN: 0,6 Wh/m<sup>3</sup>).
- Mehrkosten im Betrieb für die Kühlung via Kompressionskältemaschine sehr hoch (AG: 0,02 vs. GN: 3,3 €/m<sup>2</sup>).
- Komplexes Kühlkonzept im GN erfordert noch weitere Optimierung im Betrieb.



## Energiecontrolling

- [EVU-Rechnungen](#)
- [Manuelle Zählerablesungen](#)
- [Automatische Verbrauchserfassung](#)
- [Energieausweise](#)

## Betriebsoptimierung

- [Hinweise zur Gebäudenutzung](#)
- [Anweisungen für Hausverwaltungen](#)
- [Erfolgsbeteiligung Nutzung und Betrieb](#)
- [Seminarprogramm](#)
- [Gebäudeautomation](#)

## Investive Maßnahmen

- [Leitlinien zum wirtschaftlichen Bauen](#)
- [Gesamtkostenberechnung](#)
- [Bauprojekte](#)
- [Energiekonzepte](#)
- [Thermografieuntersuchungen](#)
- [Kraft-Wärme-Kopplung](#)
- [Regenerative Energiequellen](#)

## Service

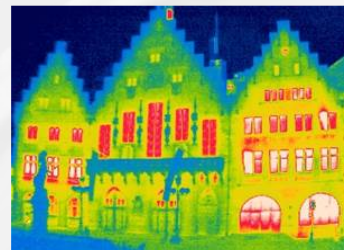
- [Aktuelles](#)
- [Berichte / Dokumente](#)
- [Rechenprogramme](#)
- [Verweise auf externe Seiten](#)
- [Verweise auf interne Seiten](#)
- [Information in English](#)
- [Informations en français](#)
- [Impressum](#)
- [Datenschutzerklärung](#)
- [Kontakte / Ansprechpersonen](#)

## Energiemanagement

Bereits im Jahr 1990 hat sich die Stadt Frankfurt a.M. mit dem Beitritt zum Klimabündnis der europäischen Städte festgelegt, den Energieverbrauch und damit die Kohlendioxid-Emissionen deutlich zu reduzieren. Um dieses Ziel im Bereich der eigenen Liegenschaften zu erreichen, wurde 1991 die Abteilung Energiemanagement eingerichtet, die heute Teil des Amtes für Bau und Immobilien ist. Diese Abteilung hat die Aufgabe, die Strom-, Heizenergie- und Wasserkosten für die ca. 1.000 städtisch genutzten Liegenschaften mit ca. 2,1 Mio. m<sup>2</sup> Nettoraumfläche zu minimieren. Dazu gehören so unterschiedliche Gebäudearten wie Schulen, Kindertagesstätten, Bäder, Sportanlagen, Verwaltungsgebäude, Museen, Städtische Bühnen, Zoo und Palmengarten.

Seit dem Jahr 2007 werden alle Neubauten und Sanierungen städtischer Gebäude im Passivhaus-Standard oder mit Passivhaus-Komponenten durchgeführt und alle Dächer für Photovoltaikanlagen ausgelegt. Seit dem Jahr 2018 wird bei allen Neubauten und Dachsanierungen von städtischen Gebäuden die durch Photovoltaik größtmöglich erreichbare Stromerzeugungsleistung installiert und in Betrieb genommen. Seit dem Jahr 2021 wird die Photovoltaik grundsätzlich mit Dachbegrünung kombiniert.

Im Jahr 2022 wurden für diese Liegenschaften Energie- und Wasserkosten in Höhe von ca. 46,9 Mio. € aufgewendet. Davon entfielen ca. 19,3 Mio. € auf Strom, ca. 21,9 Mio. € auf Heizenergie und ca. 5,8 Mio. € auf Wasser und Kanaleinleitung. Seit dem Jahr 1990 konnte der spezifische Stromverbrauch trotz der vor allem im Bereich der IT rasant zunehmenden technischen Ausstattung im Schnitt um 17 % gesenkt werden. Der spezifische Heizenergieverbrauch sank in dieser Zeit um 38 %, der spezifische Wasserverbrauch sogar um 63 % und die spezifischen Treibhausgas-Emissionen um 50 %. Außerdem konnte seit dem Jahr 1990 ein finanzieller Gewinn von 282 Mio. € erwirtschaftet werden. Der Einsparfaktor (Verhältnis von Einsparungen zu Aufwendungen) betrug über den gesamten Zeitraum 4,0. Das bedeutet, dass für jeden Euro, der im Energiemanagement aufgewendet wurde, vier Euro Energie- und Wasserkosten eingespart werden konnten.



Eine Zusammenstellung der Zahlen finden Sie hier:

- [Entwicklung der Kosten, Verbrauchswerte und Emissionen seit 1990](#)

Diese Erfolge wurden mit den drei wesentlichen Instrumenten des kommunalen Energiemanagements erreicht:

Instrumente	CO <sub>2</sub> -Einsparpotential	Kosten : Nutzen
<a href="#">Energiecontrolling</a>	> 5 %	1:5 – 1:10
<a href="#">Betriebsoptimierung</a>	> 15 %	1:3 – 1:5
<a href="#">Investive Maßnahmen</a>	> 80 %	5:1 – 1:2

Um die aktuellen Klimaschutzziele der Stadt Frankfurt a.M. zu erreichen (Klimaneutralität bis 2035) und vor dem Hintergrund der [Gasmangellage](#) sind jedoch kurzfristig massiv verstärkte Anstrengungen nötig:

- [Energieenderechner](#) (wenn Sie Firefox verwenden, müssen Sie die Datei mit rechter Maustaste > Ziel speichern unter herunterladen)

Weiterführende Dokumente:

- [Energiemanagement in Frankfurt](#)
- [Organigramm der Abteilung Energiemanagement](#)
- [Ablaufschema der Abteilung Energiemanagement](#)