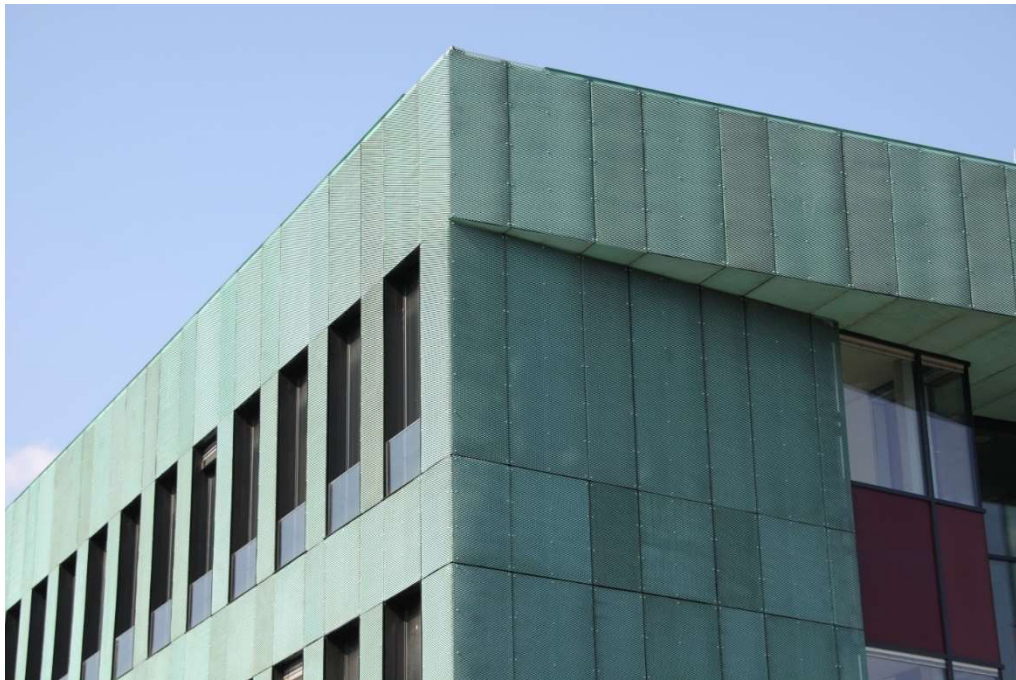


## Verwaltungsgebäude der Polizei in Passivhaus-Qualität



**Passivhaus Institut Darmstadt**

Juli 2017

Auftraggeber:  
Hessisches Ministerium für Wirtschaft,  
Energie, Verkehr und Landesentwicklung



## Verwaltungsgebäude der Polizei in Passivhaus-Qualität

**Autoren:**

Søren Peper  
Wolfgang Hasper  
Dr. Oliver Ottinger

**Unter Mitarbeit von:**

Tim Huyeng  
Florian Gressier

**Herausgeber:**

Passivhaus Institut  
Dr. Wolfgang Feist  
Rheinstraße 44/46  
D-64283 Darmstadt  
Tel: 06151-82699-0  
E-Mail: mail@passiv.de  
www.passiv.de

Darmstadt, Juli 2017

Dieser Bericht entstand im Auftrag vom Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung Ref. I 7 Energieeffizienz, Energieberatung

**Titel des Forschungsprojektes:**

Pilotprojekt Passivhaus-Bauweise Wissenschaftliche Begleituntersuchung zum Neubau eines Dienstgebäudes mit Garagen für das Polizeipräsidium Nordhessen in Baunatal.

Wir bedanken uns bei der Polizei in Kassel/ Baunatal für die Möglichkeit der Durchführung der Messungen. Unser besonderer Dank gilt dem Haustechniker Hr. Kanngießner für seine wiederholte Unterstützung.

Alle Abbildungen und Grafiken dieses Berichtes sind Eigentum des Passivhaus Instituts. Abweichend sind jeweils die Quellen angegeben.

## Inhaltsverzeichnis

## Inhalt

1	Einleitung.....	3
2	Gebäudevorstellung .....	3
2.1	Gebäudehülle .....	4
	Thermographie .....	7
	Luftdichtheit .....	13
2.2	Gebäudetechnik .....	13
2.3	Planungsprozess .....	14
3	Messtechnik .....	15
4	Wetterbedingungen .....	17
5	Raumlufbedingungen: Temperatur, Feuchte, CO <sub>2</sub> .....	19
5.1	Raumlufttemperaturen.....	19
	Detailbetrachtung Raumtemperaturen .....	19
5.2	Raumluftfeuchte .....	22
5.3	CO <sub>2</sub> -Konzentrationen.....	24
6	Auswertung Energieverbrauch.....	26
6.1	Wärme .....	26
	Versorgung.....	27
	Verbrauch.....	30
	PHPP-Bilanz.....	32
6.2	Strom .....	37
	Strom Haustechnik .....	40
	Pumpenstrom .....	42
	Auswertung Wärmepumpe (WP) .....	45
7	Untersuchung der thermischen Behaglichkeit .....	49
7.1	Physikalische Behaglichkeits- und Bewertungsgrößen in Anlehnung an EN ISO 7730 .....	49
	Lufttemperatur und Operative Temperatur .....	50
	Luftfeuchte.....	51
	Luftbewegung.....	51
	Bewertung der Ergebnisse .....	51
	Predicted Mean Vote (PMV) .....	51
	Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) .....	52
	Raumluftfeuchte .....	53
7.2	Behaglichkeitsmessungen Winter 2016/2017 .....	54
	Durchführung der Messung.....	54
7.3	Wetter zum Zeitpunkt der Behaglichkeitsmessungen .....	56
7.4	Ergebnisse und Auswertung.....	57
	Operative Temperatur .....	57
	Temperaturschichtung.....	57
	Strahlungstemperatur-Asymmetrie .....	58
	Relative Luftfeuchte.....	59

---

Luftgeschwindigkeit .....	60
PMV und PPD .....	60
8 Untersuchung des Lüftungssystems .....	62
8.1 Systembeschreibung und Zentralgerät.....	62
Elektrische Effizienz .....	63
Volumenstrom-Reduktion .....	67
Wärmebereitstellungsgrad .....	70
Zusammenfassende Bewertung.....	73
9 Untersuchung der Wärmeverluste durch innenliegende Abwasser- und Regenfallrohre .....	74
9.1 Messaufbau und Rohrkonfigurationen.....	76
Abwasserrohr .....	76
Regenfallrohre .....	79
9.2 Diskussion der Wärmeverluste über Abwasser- und Regenfallrohre .....	82
10 Zusammenfassung .....	84
11 Quellen.....	90



# 1 Einleitung

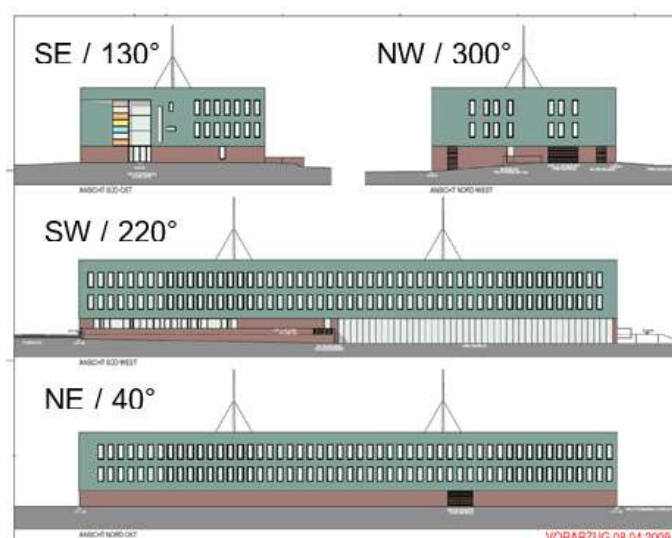
Das Hessische Ministerium der Finanzen ist für Planung, Errichtung und Betrieb der Bauten für die Landesverwaltung zuständig. Es besteht daher eine natürliche Sensibilität für die Gesamtkostenbelastung von Gebäuden über den Lebenszyklus. Als Beitrag zum Klimaschutz soll die Hessische Landesverwaltung bis zum Jahr 2030 CO<sub>2</sub>-neutral arbeiten. Dies ist ein Beschluss der Hessischen Landesregierung, die damit auch neue energetische Baustandards für Landesbauten festschreibt. Bereits im Jahr 2007 wurde seitens des Ministeriums daher ein „Pilotprojekt Passivhausbauweise“ ins Leben gerufen. Die Ergebnisse einer wissenschaftlichen Begleituntersuchung des Gebäudes in den ersten Betriebsjahren sollen im Folgenden vorgestellt werden.

Zwischenzeitlich beschloss die Hessische Landesregierung darüber hinaus, künftig alle Neubauten in einem Baustandard zu errichten, der deutlich über den geltenden gesetzlichen energetischen Vorgaben liegt und die Vorgaben der Europäischen Gebäuderichtlinie für 2019 vorwegnehmen soll. Auch ein Erweiterungsbau in Passivhaus-Bauweise für das Finanzministerium wurde, aufbauend auf den guten Erfahrungen des Pilotprojektes, erstellt und steht beispielhaft für zukünftige Bauten im staatlichen Hochbau in Hessen.

## 2 Gebäudevorstellung

Das „Pilotprojekt Passivhausbauweise – Neubau eines Dienstgebäudes mit Garagen für das Polizeipräsidium Nordhessen“ - so die vollständige Projektbezeichnung, umfasst ein Verwaltungsgebäude von ca. 80 m Länge und 30 m Breite in dreigeschossiger Ausführung mit Flachdach.

Die Energiebezugsfläche nach PHPP beträgt 3.870 m<sup>2</sup>, hinzu kommt eine ca. 1.600 m<sup>2</sup> große Garage in Teilen des Erdgeschosses.



**Abbildung 1: Ansichten des Dienstgebäudes**

Das Projekt wurde als Eigenbau der Hessischen Landesverwaltung durch das Hessische Bau- und Stadtmanagement in wesentlichen Teilen selbst geplant, wobei eine Reihe freiberuflicher Ingenieure eingebunden wurden. Das Passivhaus Institut begleitete das Projekt beratend und führte nach

Fertigstellung im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz die vorliegende Untersuchung durch.

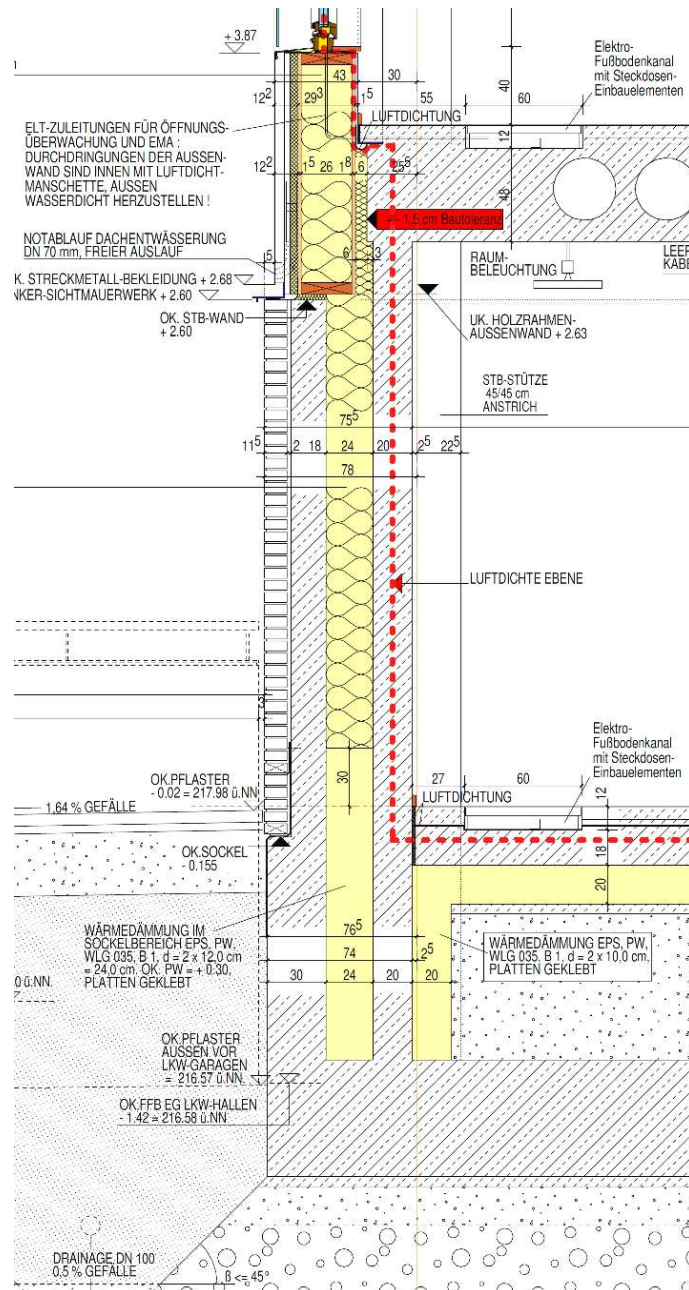


**Abbildung 2: Links: Süd-West Fassade und Eingangsbereich Süd-Ost.  
Rechts: Detailansicht Fassade**

## 2.1 Gebäudehülle

Während die beheizte Zone des Erdgeschosses als Beton-Massivbau mit Klinker-Vormauerung und Kerndämmung ausgeführt wurde, handelt es sich im Übrigen um einen Stahlbeton-Skelettbau mit aussteifenden Treppenhauskernen. Dieser wird durch vorgefertigte Holzleichtbau-Elemente umschlossen. Große Spannweiten werden mit 50 cm dicken Hohlkörperdecken erreicht. Nahezu alle Betonarbeiten wurden in Ortbeton erstellt.

Die ungünstigen Baugrundverhältnisse in Verbindung mit einer Nutzung der leichten Hanglage für zwei unterschiedliche Höhenlagen des EG-Fußbodens erzwang eine zwischen beheizten und unbeheizten Bereichen durchlaufende 50 cm starke Bodenplatte.



**Abbildung 3: Schnitt Wandfußpunkt/Gründung, Luftdichte Ebene in Rot gestrichelt**

Angrenzend an beheizte Bereiche wurde die Wärmebrückenwirkung der aufgehenden tragenden Garagen-Wände durch eine beidseitige Begleitdämmung begrenzt. Wärmebrücken im Gründungsbereich und durch die Stützen im ungeheizten Garagenbereich haben allerdings mit ca. 5% der Gesamtverluste einen bedeutenden Anteil an den Transmissionswärmeverlusten dieses großen Gebäudes. Um weitere Wärmebrückenwirkungen durch die Vormauerung der EG-Fassade zu vermeiden und dieser eine den Lasten angemessene Gründung zu schaffen wurde die Verblendwand als in der Bodenplatte eingespannte Konstruktion frei vor der tragenden Außenwand stehend ausgeführt (Abbildung 3).

Alle Fassaden der Obergeschosse wurden in vorgefertigter Holzkonstruktion erstellt. Fenster und luftdichte innere Beplankung sowie die Wärmedämmung waren dabei bereits installiert, der Rohbau konnte auf diese Weise in sehr kurzer Zeit geschlossen werden. Die Holzelemente werden

von der obersten Geschosdecke abgehängt und sind an den Zwischendecken lediglich gegen Horizontalkräfte rückverankert.



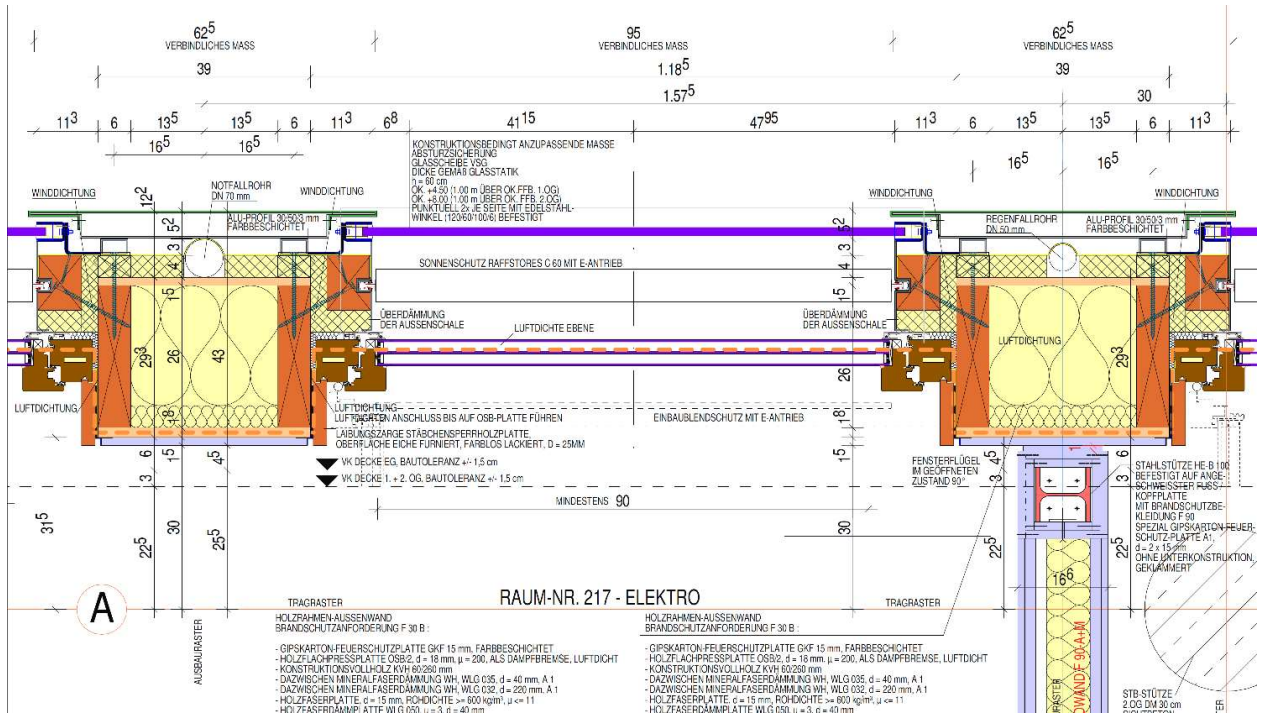
**Abbildung 4: Montage der vorgefertigten Fassadenelemente.**

Die U-Werte opaker Bauteile liegen mit  $\leq 0.15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  im für Passivhäuser in kühl-gemäßigtem Klima üblichen Bereich. Diese Qualität konnte ohne besondere Schwierigkeiten in allen Regelaufbauten erreicht werden, indem lediglich die ohnehin vorzusehende Dämmstärke etwas vergrößert wurde.

Die gewählte Fassadengliederung führte zu einer hohen Zahl von identischen Lochfenstern. Dies kam einer optimierten Detailgestaltung entgegen. Pfosten-Riegel Fassaden im Eingangsbereich und für das Fensterband im Erdgeschoss wurden weitgehend aus zertifizierten Systemen erstellt. Dennoch war einige Aufmerksamkeit erforderlich um in diesen Bereichen die erforderliche Qualität zu erreichen. Erfreulicherweise sind seither die am Markt verfügbaren Passivhaus-geeigneten Systeme noch deutlich zahlreicher geworden.

Der Sonnenschutz erfolgt durch konventionelle außenliegende Raffstores mit Tageslichtnutzung durch geteilten Behang auf den obersten 50 cm (vergl. Abb. 2). Großflächige Dachoberlichter in PR-Konstruktion erhielten einen außenliegenden Sonnenschutz durch Textilstores um sommerliche Wärmeeinträge zu begrenzen, winterliche Einstrahlung aber nutzbar zu machen.





**Abbildung 5: Detail der vorgefertigten Wandelemente mit Fenstereinbau**

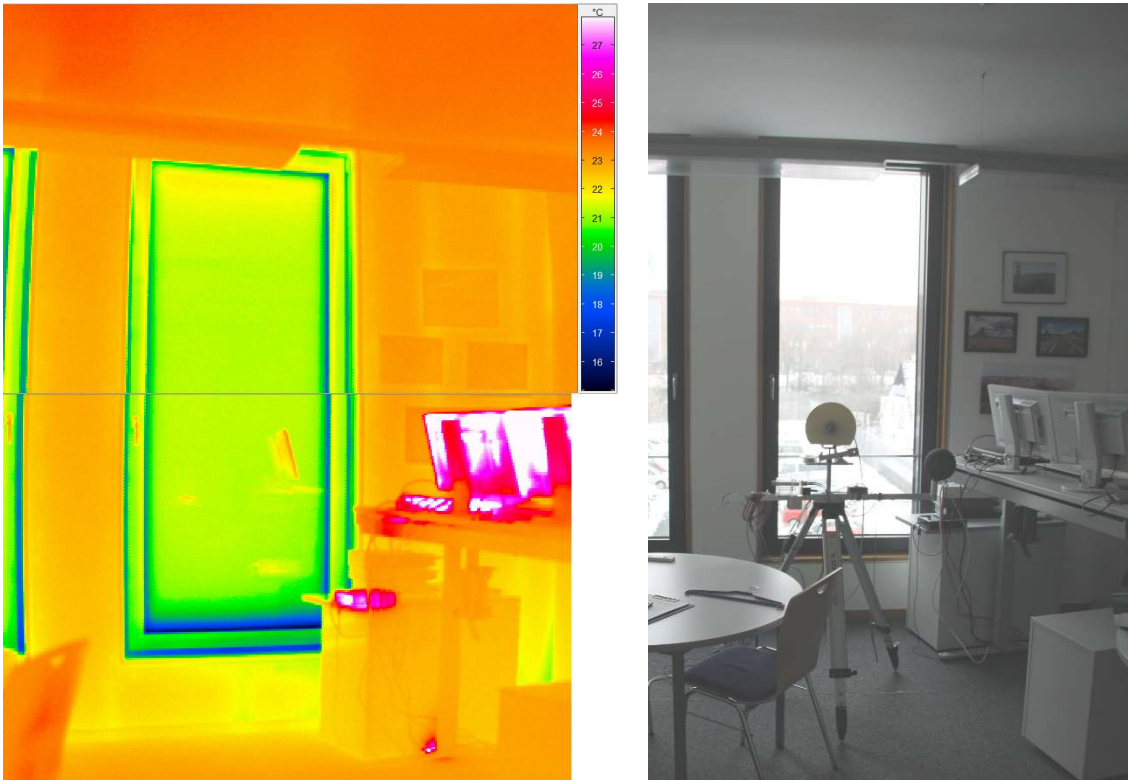
Das Dach besteht aus einer flach geneigten Holzkonstruktion direkt auf der obersten Geschossdecke. Eine auf der Schalung aufgebrachte Schweißbahnlage als Dampfsperre des Warmdachaufbaus stellt die luftdichte Ebene her und schließt an die aus den vorgehängten Holzelementen gebildete Attika an. Darauf wird die Dämmebene aus PU-Hartschaumplatten und zuletzt die Dichtungsbahn aufgebracht.

## Thermographie

Im Rahmen der am 23. Januar 2017 im Gebäude durchgeführten Behaglichkeitsmessung (siehe Abschnitt 7) wurden mit einer hochauflösenden Thermographiekamera Innen- und Außenaufnahmen der Oberflächentemperaturen angefertigt. Die klimatischen Randbedingungen der Außentemperatur und Globalstrahlung sind Abschnitt 7.3 zu entnehmen. Die Innenaufnahmen erfolgten etwa im Zeitraum 15:00 bis 17:30 Uhr, die Außenaufnahmen etwa von 18:00 bis 18:45 Uhr.

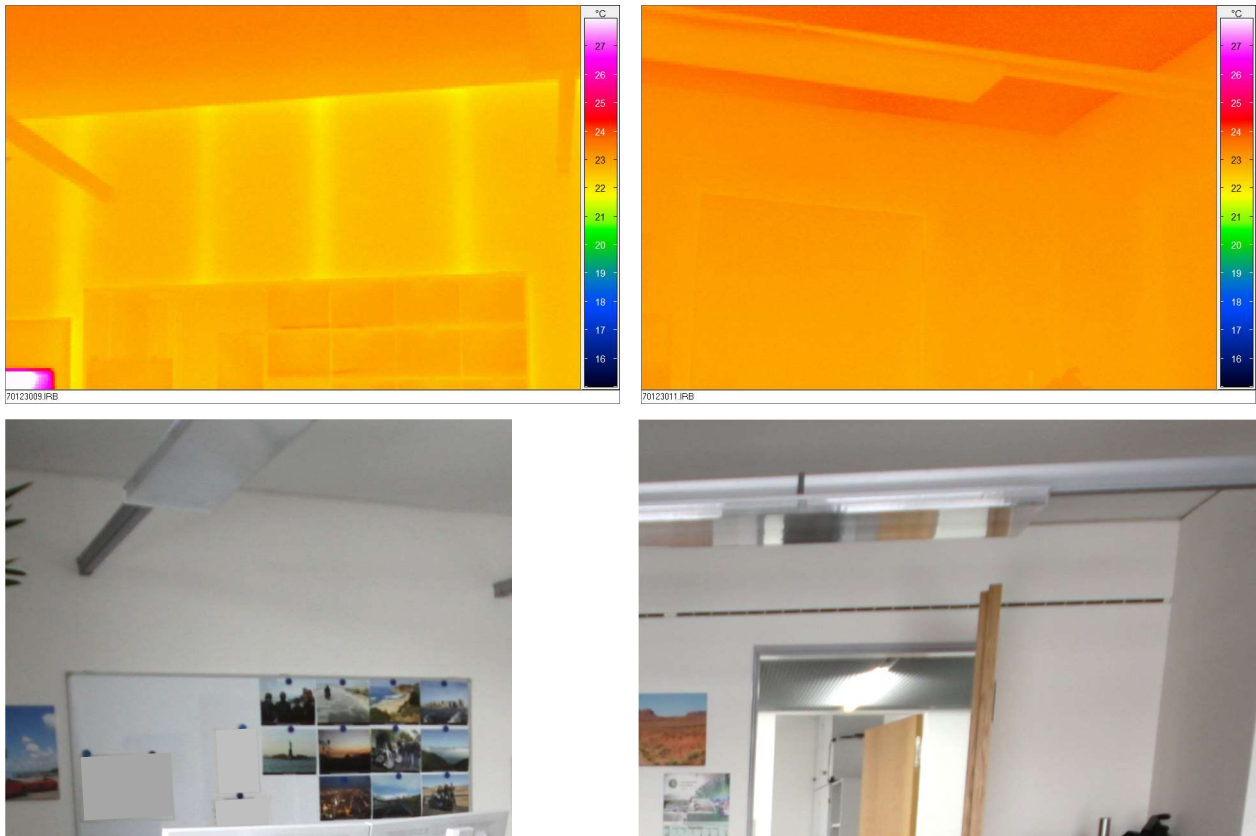
## Innenthermographie Büroräume

Zur Absicherung und Visualisierung der Behaglichkeitsmessungen in den untersuchten Büroräumen ergänzende thermographische Aufnahmen der Umfassungsflächen angefertigt. Hier werden beispielhaft einige Untersuchungsergebnisse dokumentiert.



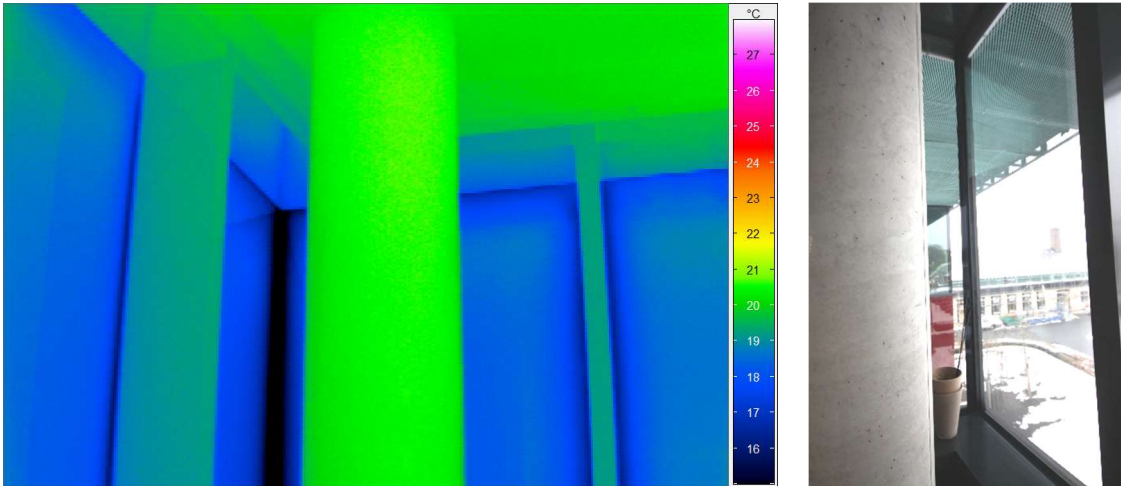
**Abbildung 6: Thermographie (aus zwei Aufnahmen montiert) und Foto von einem Büroraum (Außenwand/Fenster/Decke). Auf dem Foto ist der Behaglichkeits-Messständer zu sehen.**

Im dargestellten Büroraum zeigt sich als niedrigste Oberflächentemperatur ( $15,8^{\circ}\text{C}$ ) der untere Bereich der Verglasung im Bereich des Abstandhalters; dem typisch kühlfsten Bereich auch einer thermisch hochwertigen Verglasung. Die Temperatur ist in Bezug auf Kondensatausfall vollständig unkritisch. Die Wandoberflächentemperaturen liegen zwischen  $21,6$  und  $23,1^{\circ}\text{C}$  sehr hoch, was die ausgezeichnete thermische Qualität belegt. Die Struktur der in der Wand enthaltenen Träger für die Gipsbeplankung zeichnet sich im Thermogramm linienförmig ab. Die minimalen Unterschiede zwischen den Bereichen auf und zwischen den Trägern betragen nur  $0,2$  bis  $0,3$  K. Auch an der zweiten Außenwand dieses Eckraumbüros zeichnen sich die Tragstrukturen der Wandkonstruktion durch geringfügig andere Oberflächentemperaturen ab (Abbildung 7). Die Unterschiede auf der Wandfläche liegen hier bei maximal  $0,8$  K. Die Innenwand des Raumes inkl. der Zimmertür sowie der Decke zeigen harmonisch hohe Oberflächentemperaturen zwischen  $22,7$  bis  $24,0^{\circ}\text{C}$ .



**Abbildung 7:** Links: Thermographie der zweiten Außenwand des Büros aus Abbildung 6  
Rechts: Innenwand des gleichen Raumes zum Flur (Wand/Tür/Decke). Im Thermogramm ist die Zimmertür geschlossen, im Foto geöffnet. Über der Tür ist die schmale Schlitzdüse zur Zuluft-Einbringung zu erkennen.

Auch in einem weiteren Eck-Büroraum zeigen sich ähnliche, sehr gute, hohe Oberflächentemperaturen. Im Bereich des Gebäudeeinschnitts auf der Süd-Ost Seite mit Pfosten-Riegel-Fassade wurde allerdings eine Schwachstelle lokalisiert: Die Außenecke der Fassade ist in der Spitze thermisch nicht optimal angeschlossen. In der Verbindungskante werden minimal 10,7 °C gemessen. Hier wäre eine verbesserte Verbindung technisch einfach möglich gewesen. Aufgrund der Büronutzung und dem Vorhandensein einer Lüftungsanlage ist - auch bei einem normalem Betrieb der Lüftungsanlage - von tendenziell niedrigeren winterlichen Raumluftfeuchten auszugehen. Damit kommt es auch bei der festgestellten Minimaltemperatur in der Kante noch nicht zur Unterschreitung der Taupunkttemperatur und damit nicht zum Ausfall von Kondensat. Es sind bisher auch keinerlei Wasserspuren zu erkennen. Damit sind hier keine Schäden zu erwarten; eine thermisch Verbesserte Konstruktion wäre dennoch wünschenswert.



**Abbildung 8: Pfosten-Riegel-Konstruktion auf der Süd-Ost Seite des Gebäudes. Im untersuchten Büroraum zeigt sich eine thermische Schwachstelle in der Verbindungskante der Verglasung der Außenecke.**

Die Büroräume im EG waren am Tag der Untersuchung ungenutzt. Die Raumlufttemperaturen lagen um 20°C. Aufgrund der identischen Skalierung (15 bis 28 °C) aller Innen-Thermogramme des Gebäudes erscheinen die Bilder aus dem EG deutlich "blauer". Das untersuchte Büro zeigt in Abbildung 9 aber auch relativ hohe Oberflächentemperaturen der Wände von 18,8 bis 20,1 °C. Die Decke verfügt über Temperaturen von ca. 21 bis 22 °C. Die niedrigste punktuell gemessene Temperatur am Fenster beträgt – im Bezug auf Kondensatausfall – unkritische 13,2 °C. Dies erklärt sich aus der etwas ungünstigeren thermischen Qualität der hier eingesetzten Metall-Fensterprofile im Vergleich zu den hochwertigen Holz-Aluminium Rahmen der Lochfenster in den Obergeschossen.



**Abbildung 9: Innenthermographie eines Büroraumes im EG mit Außenwand, Fenster und Decke (aus zwei Aufnahmen montiertes Bild).**



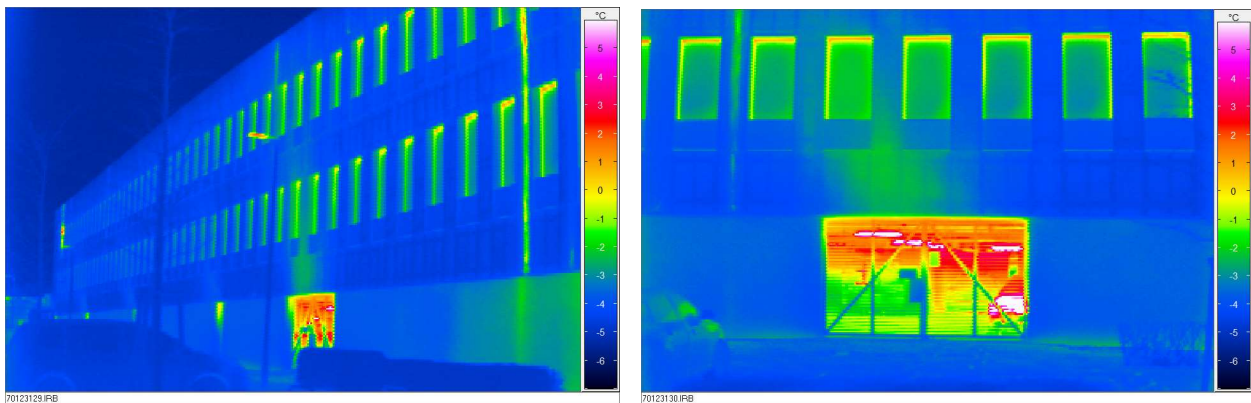
Insgesamt kann festgestellt werden, dass es sich um eine thermisch hochwertig ausgeführte Außenhülle handelt, welche hohe und gleichmäßige Innenoberflächentemperaturen sicherstellt. Damit liegt in den Räumen eine sehr geringe Strahlungsasymmetrie zwischen den Innen- und Außenoberflächen vor (vgl. dazu auch Abschnitt 7).

### Außenthermographie

Aufgrund der extrem niedrigen Globalstrahlung des Untersuchungstages und der niedrigen Außentemperatur wurden am Abend noch einige Außenthermographien des Gebäudes angefertigt. Bei diesen Bedingungen kann solche Untersuchung auch zu diesem Zeitpunkt (Tagstunden) verwertbare Ergebnisse erbringen.

Die Außenaufnahmen der überwiegend hinterlüfteten Fassade mit der Streckmetall-Ansicht sind nur eingeschränkt aussagekräftig, da das Streckmetall die Außenluftbedingungen annimmt und durch den kalten Himmel ggf. noch darunter abgekühlt wird. Da das Streckmetall allerdings löchrig ist, können auch dahinter liegende Unregelmäßigkeiten sichtbar werden.

Insgesamt macht das Gebäude auch bei der Außenuntersuchung einen sehr guten, thermisch einheitlichen Eindruck. Die niedrigen Außenoberflächentemperaturen belegen die hochwertige Wärmedämmung des Baukörpers. Dies zeigt auch die Süd-West Fassade in Abbildung 10. Bei näherer Betrachtung fallen dort einige Hot-Spots ins Auge:



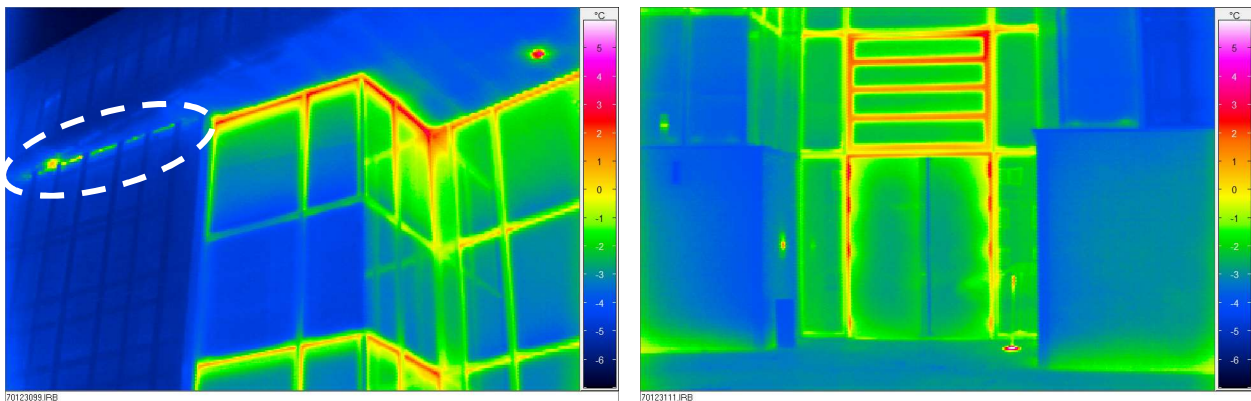
**Abbildung 10: Außenthermographien der Süd-West Fassade. Rechts Detail mit der Fassadenöffnung zur Garage im EG.**

- Eine vertikale Linie im vorderen Teil des linken Bildes und eine angedeutete etwa in der Mitte des Bildes. Dabei handelt es sich um Dachentwässerungsröhre in der Fassade, welche mit einer Frostschutz-Beheizung ausgestattet sind. Diese werden nach einer Regelung ab ca. +2°C mit Widerstandsheizungen elektrisch beheizt. Da sie ungedämmt in der Fassade montiert sind (vgl. auch Abbildung 5), sind sie deutlich sichtbar.
- Die offene Einfahrt in die Garage, welche sich außerhalb der thermischen Hülle befindet. Die höheren Temperaturen in der Garage resultieren aus der Beleuchtung, der Abwärme der Fahrzeuge, der Abschirmung gegenüber dem kalten Himmel sowie der Wärmeausträgen durch die Gebäudedämmung (Decke und Seitenwände). Auf der Fassade über der Garageneinfahrt

zeigt sich eine geringe Erwärmung (2 K) aufgrund der Warmluftfahne aus dem Garagenbereich.

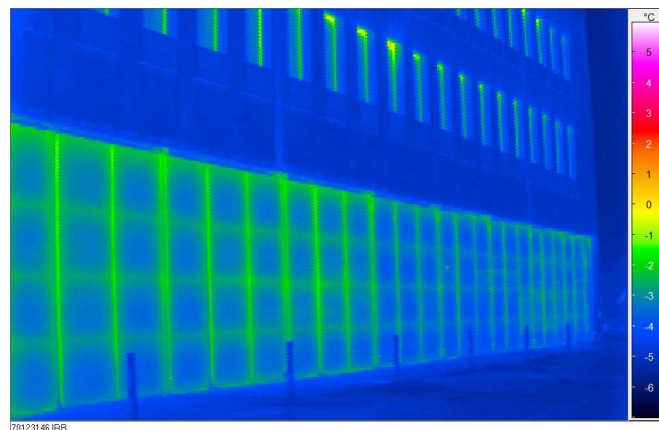
- Im rechten Bild sind außerdem sichtbar: eine Außenbeleuchtung (Mitte oben), ein geöffnetes Fenster (ganz am Ende des Gebäudes, links im linken Bild) sowie eine weitere Maueröffnung im EG zur Garage (unten Mitte).

Weitere Auffälligkeiten sind auf der Süd-Ost Fassade im Bereich der Pfosten-Riegel Fassade zu erkennen (Abbildung 11). Die von innen auffällige Außenecke der Verglasung ist hier nicht weiter auffällig. Dagegen allerdings die die oberen Anschlüsse der Verglasungen im 2. OG sowie auch die Innenecke sowie die Bänder der Eingangstür und die Lüftungsklappen (Glas) über dem Eingang. Allerdings handelt es sich jeweils um unkritische lokal begrenzte Temperaturerhöhungen von 2 bis 4,5 K. Im linken Bild von Abbildung 11 (Markierung Strichlinie) ist zusätzlich noch am Übergang Fassade zum Dach eine geringe Erwärmung zu erkennen. Dies deutet auf eine thermische Anschluss-Schwachstelle hin.



**Abbildung 11: Außenthermographien der Süd-Ost Fassade mit der zurückgesetzten Pfosten-Riegel-Fassade (rechts Eingangsbereich im EG).**

Auch die Nord-Ost Fassade zeigt harmonische Oberflächentemperaturen. Die LKW Garagentoren im EG Bereich sind thermisch schwächer als die Regelfassade. Dies war aus der Planungszeit bereits bekannt. Es lässt sich auch der Bereich der beheizten Garagen (Vordergrund) gegenüber den unbeheizten (hintere) sichtbar im Thermogramm unterscheiden.



**Abbildung 12: Außenthermographien der Nord-Ost Fassade mit den Garagentoren der LKW Garagen.**

## Luftdichtheit

Die Gebäude-Luftdichtheit wurde als eigene Planungsaufgabe von Beginn an systematisch durchdacht und in allen Bauzeichnungen entsprechend dargestellt. Für die neutrale öffentliche Ausschreibung war dies eine wichtige Grundlage. In den vorgelegten Angeboten sowie der anschließenden Werk- und Montageplanung der Auftragnehmer wurde ebenfalls die systematische und vollständige Umsetzung des Luftdichtheits-Konzeptes überprüft, was in einigen Fällen mehrere Iterationen erforderte.

Die Luftdichtheitsmessung erbrachte ein Ergebnis von  $n_{50} = 0,26 \text{ h}^{-1}$ , was einen sehr guten, aber dem großen Gebäudevolumen (ca. 20.000 m<sup>3</sup> umbauter Raum) angemessenen Wert darstellt. Bezieht man den Leakagevolumenstrom auf die Gebäudehüllfläche entspricht dies einem flächenbezogenen Leckagewert von knapp 0,5 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>h). Bei einem derart geringen Leckagewert der Außenbauteile ist auch eine lokale Beeinträchtigung der Behaglichkeit durch Zugerscheinungen ausgeschlossen und es wurden bei der umfassenden Leckagesuche dementsprechend auch keine erheblichen Undichtigkeiten angetroffen. Einzelne Probleme lagen bei der Durchführung von Kabeltrassen zur ungeheizten Garage und wurden im Anschluss verbessert.



**Abbildung 13: Durchführung der Blower Door Messung zur Feststellung der Gebäudeluftdichtheit am 13.03.2013.**  
**Links: Eingebauter Ventilator im EG (Nord-Ost Fassade).**  
**Rechts: Temporäre Abdichtung von Kabeldurchführungen. Diese wurden später dauerhaft verschlossen.**

## 2.2 Gebäudetechnik

Durch frühzeitige Koordination von Brandschutzerfordernissen und Lüftungsplanung konnte ein Lüftungskonzept mit gerichteter Durchströmung vollständig realisiert werden. In den Fluren angeordneten Türen werden im Normalbetrieb ständig offen gehalten, und die Luft kann frei aus den Büros zu den Fluren überströmen. Eine Brandmeldeanlage überwacht das Gebäude und schließt diese Brandschutztüren bei Bedarf. Frischluft wird in die fassadenorientierten Büroräume der Dreibundanlage eingeblasen und in der Kernzone, in Sanitär- und Lagerräumen, abgesaugt. Präsenzmelder steuern neben dem Luftbedarf auch die künstliche Beleuchtung. Die insgesamt umgesetzten Luftmengen können mit dieser Planung gering gehalten werden. Das Lüftungsgerät

mit hochwertiger regenerativer Wärmerückgewinnung ist im obersten Geschoss angeordnet, Außen- und Fortluftstrang können so auf kürzestem Weg über Dach geführt werden.

Zur Absicherung des Sommerkomforts bei zeitweilig hohen internen Wärmelasten wurde die Kühlung durch eine Betonkerntemperierung vorgesehen, die im Passivhaus auch die winterliche Heizwärmeverteilung übernehmen kann. Durch die jeweils nur geringen Temperaturdifferenzen zum Raum können Versorgungssysteme mit hoher Effizienz eingesetzt werden: Ein Erdsondensystem mit Wärmepumpenunterstützung dient der sommerlichen Wärmeabfuhr, im Winter kann durch reversiblen Betrieb der Wärmepumpenanlage geheizt werden.

Sommerliche Wärmeüberschüsse werden über eine Betonkerntemperierung erfasst und nach Möglichkeit über Erdsonden passiv in den Baugrund übertragen. Bei zusätzlichem Bedarf kann dieser Prozess durch eine Wärmepumpenanlage auch aktiv betrieben werden, ein auf dem Dach angeordnetes Rückkühlwerk kann alternativ als Wärmesenke genutzt werden (aktiv oder passiv). Dieselbe Wärmepumpenanlage deckt auch den vollständigen Wärmebedarf des Gebäudes für Duschwarmwasser (ganzjährig) und Heizwärme im Winter, wobei hier über geringe Vorlauftemperaturen der Betonkerntemperierung gute Arbeitszahlen erwartet werden können.

## 2.3 Planungsprozess

Dieses Projekt stellt die erstmalige Umsetzung des Passivhauskonzeptes im Landesbau des Landes Hessen dar. Die Integration aller Anforderungen bei der gegebenen vielfältigen Nutzung durch eine Polizeidienststelle neben allen bautechnischen und energetischen Aspekten gelang durch eine sehr frühzeitige Einbindung aller Nutzer und Planer im Sinne der Integralen Planung. Immer wieder wurden in Planungsgesprächen mit allen Beteiligten Probleme identifiziert und einvernehmliche Lösungen gefunden. Über den mehrjährigen Vorbereitungs- und Planungsprozess hinweg sind ernste Kollisionen von Anforderungen oder gar Umplanungen dadurch vollständig vermeidbar gewesen.

Große Aufmerksamkeit und ein entsprechendes Zeitbudget wurde der öffentlichen, produktneutralen Ausschreibung gewidmet. Bei der Ausgestaltung der Leistungsverzeichnisse und ebenso bei der Prüfung der Angebote musste sehr sorgfältig vorgegangen werden, sollte die geplante Qualität auch in diesem Schritt der Umsetzung gesichert werden. Anbieter mussten, nach in der Ausschreibung spezifizierten Verfahren, die Qualität der angebotenen Produkte objektivierbar nachweisen bzw. vorzugsweise unabhängige Nachweise von Dritter Seite vorlegen. Auf diesem Feld können noch große Potentiale zur Vereinfachung und Beschleunigung des Vergabeprozesses erschlossen werden, nicht zuletzt auch durch einen verbesserten Kenntnisstand der Bieter selbst.



### 3 Messtechnik

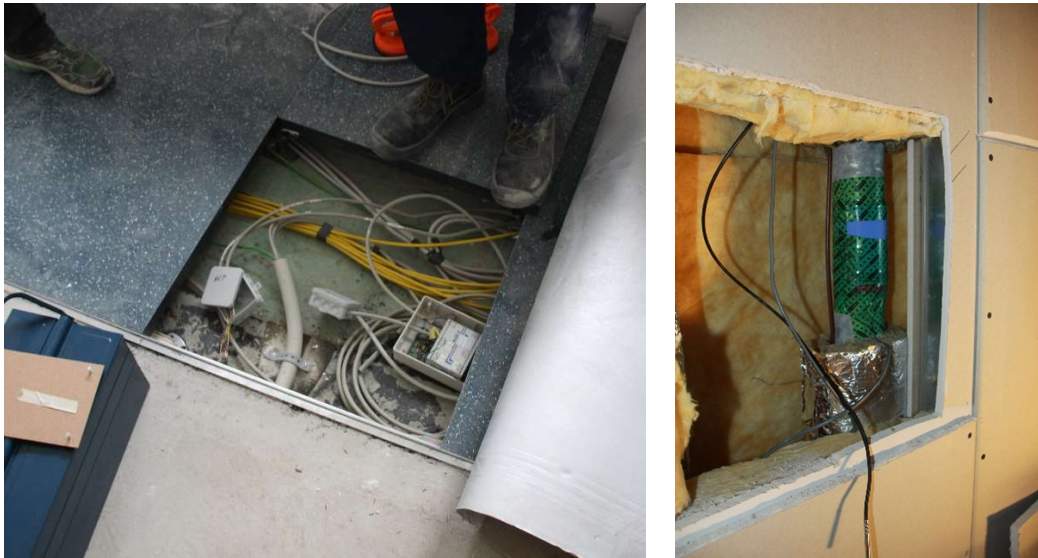
Zur Untersuchung der Funktion des Gebäudes werden Messdaten insbesondere der Verbrauchszähler (Wärme, Strom) benötigt als auch z.B. Temperatur-, Feuchte- und CO<sub>2</sub>-Konzentrations-Messdaten. Die Verbrauchsdaten der Zähler werden über die vorhandene GLT-Anlage des Gebäudes erfasst. Durch die Realisierung der Abspeicherung der wichtigsten Daten und die Einrichtung eines Datenfernzugriffs auf die GLT konnten diese Daten für das Monitoring nutzbar gemacht werden.

Insbesondere für die genauere Untersuchung der Raumlufttemperaturen, -feuchten sowie CO<sub>2</sub>-Konzentrationen sind die Sensoren einer GLT-Anlage in der Qualität regelmäßig nicht ausreichend bzw. es sind nicht ausreichend Informationen vorhanden und die Positionen der Sensoren sind nicht wie benötigt. Bei einer Lufttemperaturmessung ist z.B. durch die Anordnung des Messelements festgelegt wie groß der Anteil der Wandoberflächentemperatur gegenüber der eigentlich zu messenden Lufttemperatur ist. Dies ist üblicherweise nicht bekannt. Zusätzlich liegen die Genauigkeiten der Temperaturmessung häufig bei  $\pm 0,5$  K oder noch darüber, was für ein wissenschaftliches Monitoring dieser Art nicht ausreichend ist. Aus diesen Gründen wurde im Gebäude während der Bauphase ein separates Mess-Netz (M-Bus) installiert und mit Sensoren ausgestattet. In ausgewählten Räumen wurde damit die Raumluft- bzw. Oberflächentemperatur (24 Positionen) und relative Feuchte (10 Positionen) gemessen sowie auch die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (7 Positionen). Außerdem wurde auf dem Dach eine eigenständige Wetterstation (Außentemperatur, rel. Feuchte, Windstärke, Globalstrahlung horizontal sowie Globalstrahlung nach den vier Haupt-Himmelsrichtungen vertikal) installiert und in Betrieb genommen. Die Wettermessungen wurden bei Störung ergänzt durch Messdaten der Wetterstation Kassel-Mitte des hessischen HLNUG Messnetzes (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie).

Für eine Sondermessung an einem Fall- und einem Entwässerungsrohr (Innenhofbereich im 2. OG) bezüglich Wärmeverluste wurden zusätzlich auch Wärmestromplatten (4 Positionen) mit Messverstärkern und Oberflächentempersensoren (4 Positionen) eingesetzt. Aufgrund des komplexen Hausnetzwerkes für unterschiedliche beteiligte Firmen war der Fernzugriff auf das M-Bus Netz längere Zeit nicht möglich. Daten wurden händisch aus dem Speicher geholt. Nach längerer Zeit wurden die Probleme durch eine am Bau beteiligte Firma behoben und der Fernzugriff auf die M-Bus Daten konnte direkt genutzt werden.

Um die Anforderung an die Messung umzusetzen, wurden die Temperatur- und Feuchtemessungen des M-Bus-Netzes im installierten Zustand vor Ort kalibriert. So können auch Einflüsse z.B. der Kabellängen bis zur Signalumsetzung und unterschiedliche Montagesituationen (Leichtbau- oder Massivwand) vermieden werden. Am 5. und 6. Mai 2015 wurden an 18 Sensoren über ca. 20 Stunden mit autarken Datenloggern (HOBO, Typ Pro v2) Messdaten direkt an den fest montierten Sensoren des M-Bus Netzes aufgezeichnet. Die HOBOs verfügen im hier relevanten Bereich über eine Genauigkeit von  $\pm 0,2$  K und  $\pm 2,5$  % rF. Die Messdaten der HOBOs wurden dann der Dauermessung (M-Bus) verglichen und Kalibrierwerte festgelegt. Diese wurden bei der Auswertung der Dauermessung eingerechnet. Die CO<sub>2</sub>-Sensoren wurden vor der Montage

im Gebäude im PHI mit Prüfgasen kalibriert. Die damit erzeugten Kalibrierwerte (Offset und Steigung) wurden ebenfalls in die Dauermessdaten eingerechnet.



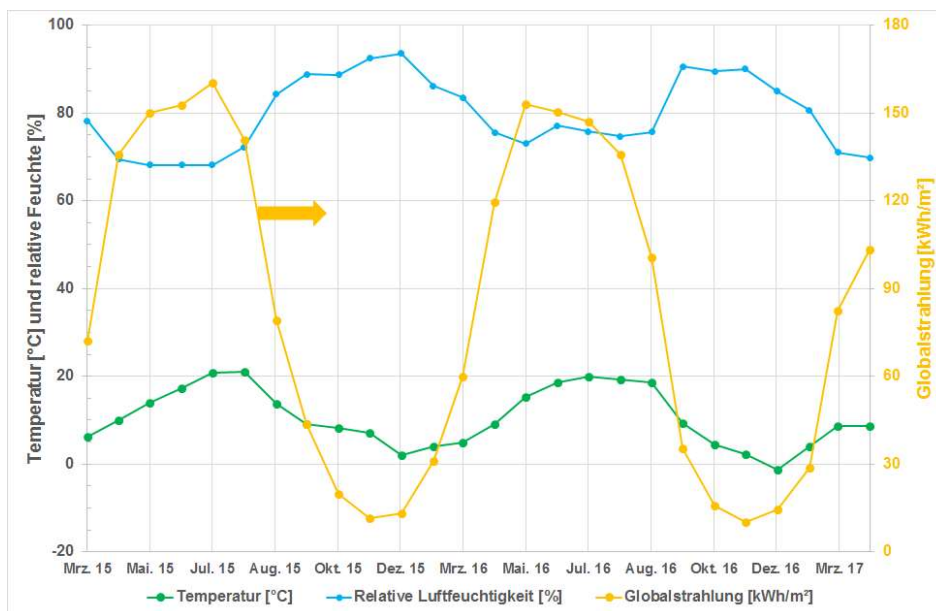
**Abbildung 14:** Links: Montag der Messtechnik (Signalumsetzer vom Sensor auf das M-Bus Netz) in einem Bodenkanal in einem Büroraum.  
Rechts: Montage einer Wärmestrommessplatte und eines Oberflächentemperatur-Sensors an einem Entwässerungsrohr in einer Innenwand.



**Abbildung 15:** Links: Fertig montierte Temperaturmessstelle in einer Unterputzdose über einer Schalterkombination in einem Büroraum.  
Mitte: Kombisensor Temperatur/Luftfeuchte/CO<sub>2</sub> in einem Büroraum während der Kalibriermessung mit einem autarken Datenlogger (nur der Sensorkopf im Bild)  
Rechts: Wettersensoren montiert an einem Funkmast auf dem Dach.

## 4 Wetterbedingungen

Zur Einstufung der Wetterbedingungen während der Messzeit sind in Abbildung 16 die Monatswerte für die Außenlufttemperatur, Außenluftfeuchte sowie die Summe der Globalstrahlung dargestellt



**Abbildung 16: Übersicht über die monatlichen Wetterdaten.**

Die energetischen Auswertungen sind aus Gründen der verfügbaren Messdaten der Energiezähler auf zwei überlappende Zeiträume festgelegt:

**Jahr 1: 01. Juni 2015 bis 31. Mai 2016**

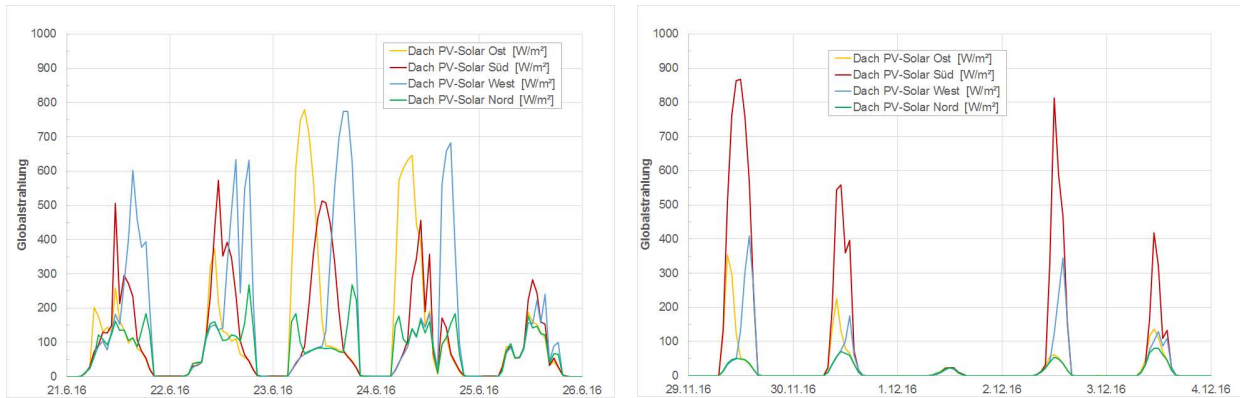
**Jahr 2: 01. Mai 2016 bis 30. April 2017**

Für diese beiden Jahreszeiträume ergeben sich die folgenden Mittelwerte bzw. Summen:

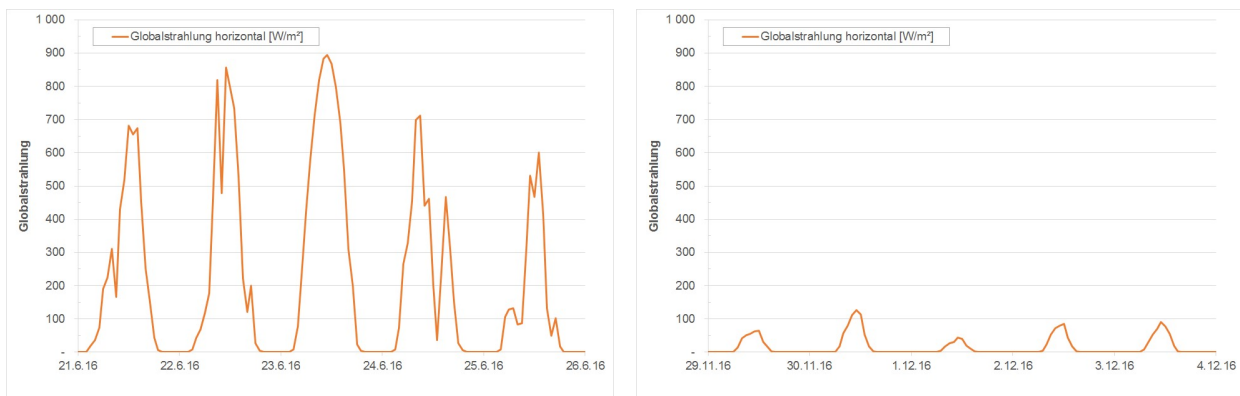
**Tabelle 1: Übersicht der Wetterbedingungen der beiden Messjahreszeiträume**

	Jahr 1	Jahr 2
Zeitraum	01.06.2015 bis 31.05.2016	01.05.2016 bis 30.04.2017
Außentemperatur [°C]	11,1	10,6
Außentemperatur Kernwinter 1.11. bis 28./29.02. [°C]	5,3	2,3
Außentemperatur Sommer 1.6. bis 30.9. [°C]	18,2	19,1
Globalstrahlung [kWh/m²]	985	977
Globalstrahlung Kernwinter 1.11. bis 28./29.02. [kWh/m²]	75	17
Globalstrahlung Sommer 1.6. bis 30.09. [kWh/m²]	533	534

Die Tabelle zeigt, dass das zweite Untersuchungsjahr im Winter deutlich niedrigere Temperaturen und gleichzeitig auch über deutlich geringere Globalstrahlungseinträge verfügt. Zur Bewertung des Heizwärmeverbrauchs ist es also das Jahr, welches einen höheren Heizwärmeverbrauch vermuten lässt. Die Sommerdaten sind dagegen bei der Betrachtung der Mittelwerte weniger unterschiedlich. Die sommerlichen Strahlungssummen (Juni bis September) liegen sogar genau gleich.



**Abbildung 17: Globalstrahlungsmessung vertikal nach Himmelsrichtungen für fünf typische Tage im Sommer und im Winter. Es zeigen sich erwartungsgemäß deutliche Unterschiede in der Strahlungsintensität.**



**Abbildung 18: Globalstrahlungsmessung horizontal für die gleichen fünf typische Tage im Sommer und im Winter wie in Abbildung 17.**

Durch die zusätzliche Erfassung der himmelsrichtungsabhängigen Strahlung können die Einträge auf die unterschiedlichen Fassaden untersucht werden. In Abbildung 17 sind beispielhaft jeweils fünf Tage der Messung für den Sommer wie für den Winter dargestellt. Der mittlere Tag bei der Sommerdarstellung zeigt mit seinen harmonischen ungestörten Kurvenverlauf einen nahezu wolkenlosen Sommertag. Die anderen Tage zeigen mit den zackigen Verläufen die Reduktion der Strahlung durch Wolken. Die Wintertage zeigen deutlich niedrigere Summen der Strahlung, wenn auch einzelne Spitzen der Strahlung aus Süden höhere Intensität zeigen. Im Winter steht die Sonne niedriger, was die Intensität auf die vertikale Messfläche erhöht gegenüber der horizontalen Globalstrahlungsmessung.



## 5 Raumlufbedingungen: Temperatur, Feuchte, CO<sub>2</sub>

### 5.1 Raumluftemperaturen

Zur Untersuchung der Raumluftemperaturen werden die kalibrierten Messstellen des M-Bus Netzes ausgewertet. Die Sensoren sind in allen drei Geschossen in ausgewählten Büroräumen einem Flur bzw. einzelnen Räumen in der Kernzone verteilt. Bei den Büroräumen im 1. und 2. OG wurden jeweils die vier Eckräume und je lange Gebäudeseite jeweils ein Raum (etwa in der Mitte) gemessen. Die vorhandenen Sensoren werden repräsentativ für den gesamten jeweiligen umliegenden Bürobereich bzw. Kernzonenbereich angesetzt. Dazu wurden die entsprechenden Büro- und Kernzonenflächen berechnet und den Sensoren zugeordnet. Mit dieser Gewichtung wird eine Gebäudemitteltemperatur bestimmt. Diese wird für die energetischen Untersuchungen benötigt.

Die gebäudemittleren Temperaturen für die unterschiedlichen Zeiträume sind der folgenden Tabelle zu entnehmen. Die Temperaturen sind im Winter mit Werten um 23°C relativ hoch. Im Sommer mit Mittelwerten mit etwa 23,5 °C sind sie als sehr moderat einzustufen<sup>1</sup>). Es herrschen damit bei der Betrachtung der mittleren Temperaturen das Jahr über sehr gleichmäßige Temperaturen.

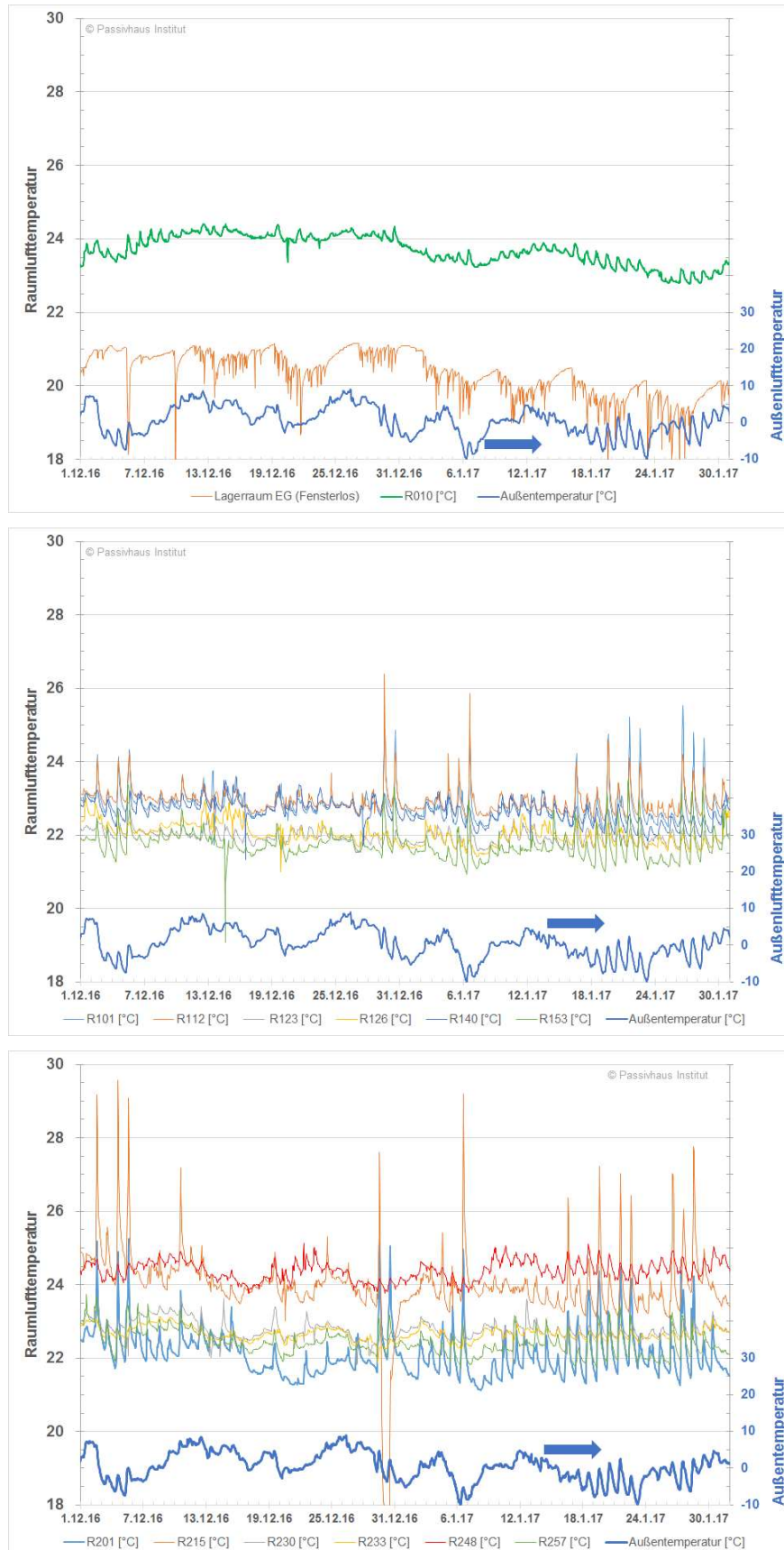
**Tabelle 2: Mittlere Gebäude-Innentemperaturen zu unterschiedlichen Zeiträumen**

Zeitraum		Mitteltemperaturen [°C]
Jahr 2	1.5.2016 - 30.4.2017	23,2
Winter 2	1.10.2016 - 1.5.2017	23,1
Kernwinter 2	1.11.2016 - 1.3.2017	22,9
Sommer 2 <sup>1)</sup>	1.5.2016 - 30.09.2016	23,5

#### Detailbetrachtung Raumtemperaturen

Wird der Verlauf Raumluftemperaturen im Detail betrachtet können die Unterschiede zwischen den Räumen und Etagen sowie im Zeitverlauf untersucht werden. Im typischen Winterverlauf zeigt sich kein Einfluss der Außenlufttemperatur auf die Innentemperaturen. Ein beispielhafter Zeitbereich ist in Abbildung 19 für alle drei Etagen dargestellt.

<sup>1</sup> Im Sommer 2016 gab es mehrere Datenausfälle. Vereinfacht wurde hier der Mittelwert der gemessenen Sommertemperaturen berechnet.



**Abbildung 19: Raumlufitemperaturen (Stundendaten) im Winterzeitraum 1.12.2016 bis zum 31.01.2017 im EG (oben), 1. OG (Mitte) sowie im 2. OG (unten). Zusätzlich ist der Außenlufttemperaturverlauf dargestellt.**

Es wird deutlich, dass die Räume über unterschiedliche Temperaturniveaus verfügen, die allerdings alle relativ hoch liegen. Der Bereich liegt in diesem Zeitabschnitt in allen Büros etwa zwischen 21 bis etwa 25 °C. Im EG ist ein fensterloser Lagerraum mit dargestellt; dort liegen die Temperaturen zwischen 19 und 21 °C. Eine weitere Büromessung im EG war in der dargestellten Zeit ausgefallen. Auffällig in einem kleineren Büroraum im 2. OG, sind die winterlichen kurzen Temperaturspitzen von bis zu 29 °C. Diese ergeben sich immer zu 14:00 bzw. 15:00 Uhr. Vermutlich liegt hier eine intensive Nutzung vor; in dem Raum befinden sich mehrere PCs und er wird bei Bedarf von mehreren Personen zeitgleich genutzt.

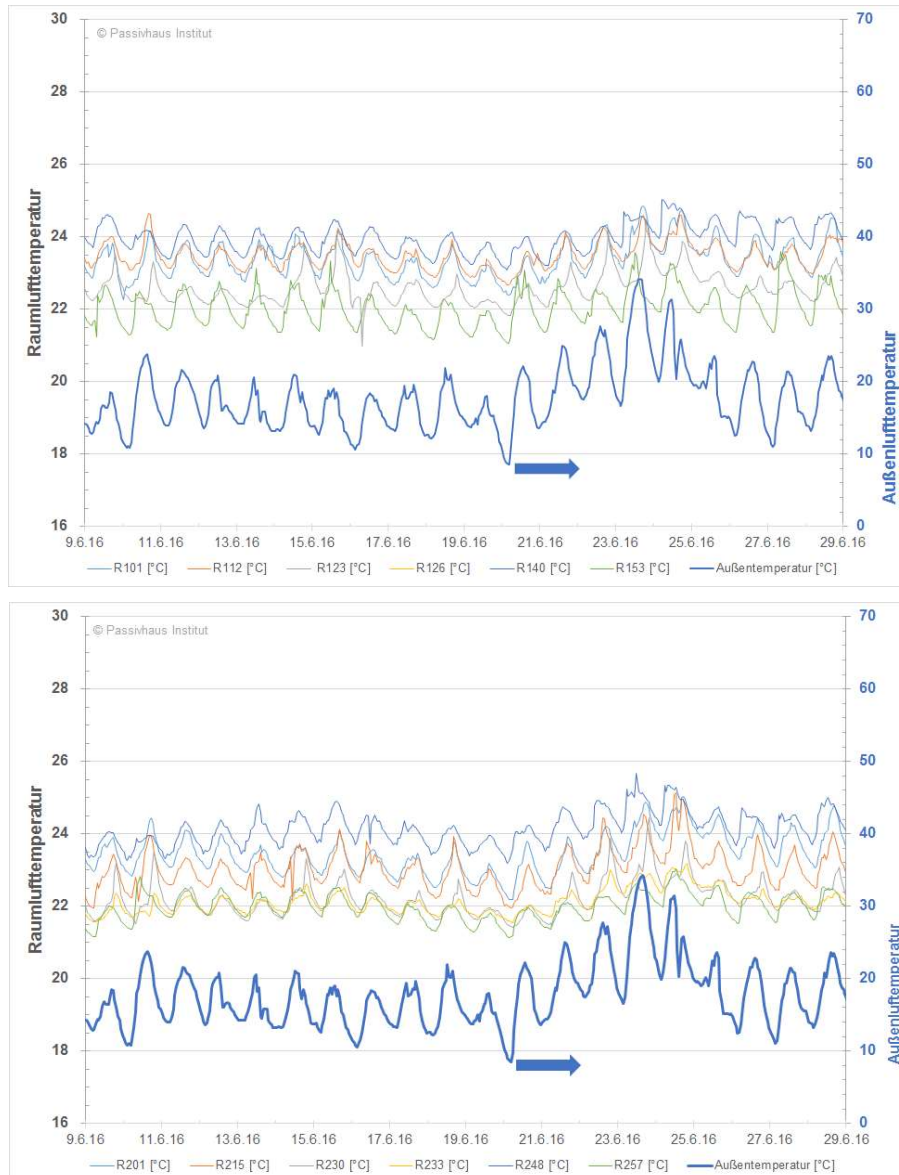
Einer der vermessenen Eckräume ist der kühlfeste Raum ein anderer Eckraum ist der zweit wärmste. Es ist daher kein Trend dazu festzustellen: Die Nutzung der Räume bzw. die Temperatureinstellung scheint den entscheidenden Einfluss auf die Raumlufttemperatur zu haben, nicht die Lage.

Um zu untersuchen, ob die Temperaturspitzen in dem Büroraum im 2. OG durch winterliche Solarlasten entstehen, ist für die Räume im 2. OG eine Detailbetrachtung erstellt. Zum einen spricht die Anordnung des Raumes (Fenster an der Nord-Ost Fassade) gegen eine winterliche Solarlast. Zum anderen zeigt der gewählte Zeitbereich (21.11. bis 2.12.2016) in Abbildung 20 insgesamt sehr geringe Globalstrahlungswerte (Spitze bis 200 W/m<sup>2</sup>); diese korreliert auch nicht mit der Höhe der Temperaturspitzen.



**Abbildung 20: Detailbetrachtung der winterlichen Raumlufttemperaturen im 2. OG vom 21.11. bis zum 2.12.2016. Zusätzlich ist die Globalstrahlung horizontal aufgetragen.**

Die Betrachtung der sommerlichen Temperaturen in der folgenden Abbildung zeigt für einen Zeitbereich mit Außentemperaturen bis 34 °C (am 23.06.2016) moderate Innentemperaturen mit nur geringem Tagesgang. Die Temperaturen im 1. und 2. OG liegen in der höchsten Spitze bei maximal nur 25,7 °C. Das Temperaturband liegt insgesamt etwa zwischen 21 bis 25 °C. Die Betonkerntemperatur stellt also behagliche Raumtemperaturen sicher.

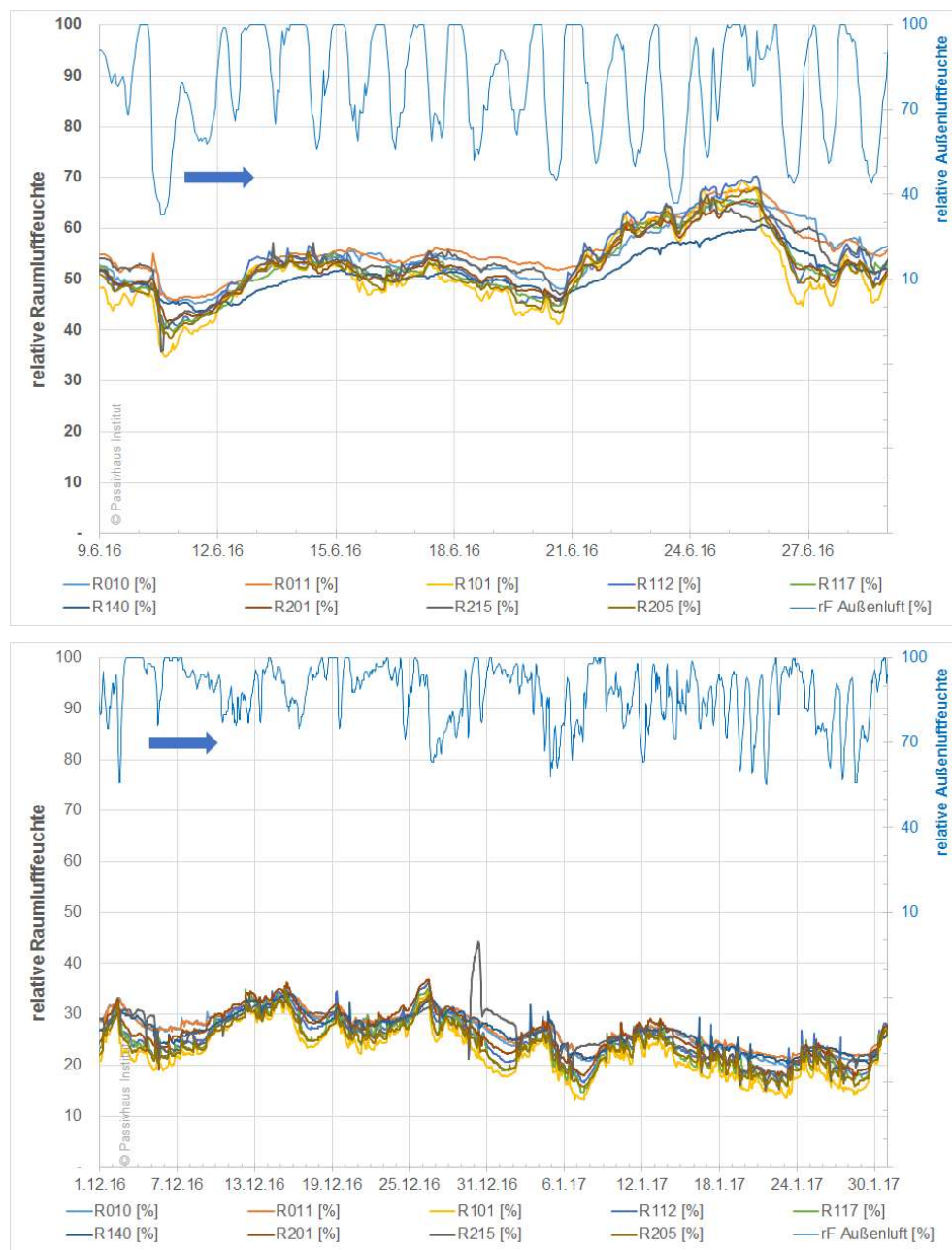


**Abbildung 21: Ausschnitt der Sommertemperaturen im 1. OG (oben) und im 2. OG (unten) im Zeitraum 9.6. bis 28.6.2016. Zusätzlich ist der Außentemperaturverlauf dargestellt.**

## 5.2 Raumlufffeuchte

Der zweite wichtige Parameter neben der Raumlufftemperatur ist die Raumlufffeuchte. In neun ausgewählten Büroräumen des Gebäudes wird die relative Raumlufffeuchte gemessen und aufgezeichnet. Auch diese Sensoren wurden vor Ort kalibriert (vgl. dazu auch Kapitel 3). Die Auswertung erfolgt für die identischen Zeiträume aus der Raumlufftemperaturuntersuchung. Die sommerlichen Raumlufffeuchten liegen im dargestellten Zeitraum hauptsächlich zwischen 40 bis 70 % rF. Das ist eine typische Bandbreite. Im Winterzeitraum (Dezember 2016 / Januar 2017) zeigen sich dagegen deutlich niedrigere relative Raumlufffeuchten. Sie liegen nur zwischen 15 und 35 % rF. und damit in einem sehr niedrigen Bereich. Längere Zeiträume unter 30 % rF. sollten generell vermieden werden. Es ist unvermeidlich, dass aufgrund der absolut niedrigeren Feuchte der Außenluft in der kalten Jahreszeit die relativen Feuchten der Raumluff bei ausreichendem Luftwechsel geringer ausfallen. Bei der Wahl eines angepassten Luftwechsels können regelmäßig ausreichend hohe

Luftfeuchten realisiert werden. In Bürogebäuden mit geringeren Feuchteinträgen als im Wohnungsbau ist dies generell schwieriger. Aus diesem Grund ist in diesem Gebäude eine Lüftungsanlage mit Feuchterückgewinnung realisiert. Das nun trotzdem deutlich zu geringe winterliche Raumlufftfeuchten festgestellt werden müssen, liegt eindeutig an dem viel zu hohen Luftwechsel. Dies wird im Abschnitt 8 näher untersucht und diskutiert. Der erhöhte Luftwechsel konnte nach der ausgewerteten Messperiode am 9.6.2017 deutlich reduzieren werden. Damit sollten sich auch die winterlichen Raumlufftfeuchten zukünftig im empfohlenen Bereich einpendeln.



**Abbildung 22: Relative Raumlufftfeuchte in ausgewählten Büroräumen im Winter- (unten) und Sommerzeitraum (oben). Die Zeiträume sind identisch mit den aus der Untersuchung der Raumluffttemperaturen vor vorherigen Abschnitt. Zusätzlich ist die relative Außenluftfeuchte dargestellt.**



Bei der Bewertung muss neben diesem grundlegenden Faktum berücksichtigt werden, dass die Räume in den dargestellten Zeiträumen nicht alle genutzt werden. Die Raumlufftfeuchte ist noch geringer, wenn die einzigen Einträge (neben ggf. Zimmerpflanzen) durch Personen fehlen. Dann allerdings kann die niedrigere Feuchte auch nicht wahrgenommen werden bzw. stören. So wird z.B. Raum 101 als Besprechungszimmer genutzt; Besprechungen werden dort allerdings nur temporär durchgeführt (vgl. CO<sub>2</sub>-Konzentration, Abschnitt 5.3). Auch normale Büroräume sind z.T. nur zeitweise genutzt.

Bei den Darstellungen in Abbildung 22 lassen sich im Winter (unteres Bild) Zeiträume wie die Weihnachtsfeiertage und Wochenenden durch gleichmäßigere, abfallende Verläufe erkennen.

### 5.3 CO<sub>2</sub>-Konzentrationen

Als technisch leicht messbares "Leitgas" eignet sich die CO<sub>2</sub>-Konzentration gut um Aussagen über die Luftqualität zu machen. In sechs Büros und einem Flurbereich wurde dauerhaft die CO<sub>2</sub>-Konzentration ermittelt. Bei dem für die Analyse wieder identisch gewählten Sommer- und Winterzeitraum zeigt sich ganz deutlich die Belegungszeit gegenüber den Nacht- und Wochenendstunden (Abbildung 23). Die Werte liegen erwartungsgemäß sehr niedrig, da die Lüftungsanlage für einen deutlich höheren Luftwechsel sorgt als angeraten. Das führt auf extrem niedrige Werte selbst während der Nutzung um nur 600 ppm. Die beiden höchsten Spitzen liegen mit max. 1.200 ppm sehr niedrig (beides im Besprechungszimmer). Würden im Mittel während der Nutzung Werte um 1.000 ppm erreicht werden, würde noch immer von sehr guter Luftqualität gesprochen werden können. Einzelne Spitzen bis 1.500 / 2.000 ppm stellen keine Einschränkung dar. Hier wird die Reduktion des Luftwechsels ab dem 9.06.2017 auf "normalen Betrieb" etwas höhere Werte ergeben (siehe Luftfeuchte im vorherigen Abschnitt).

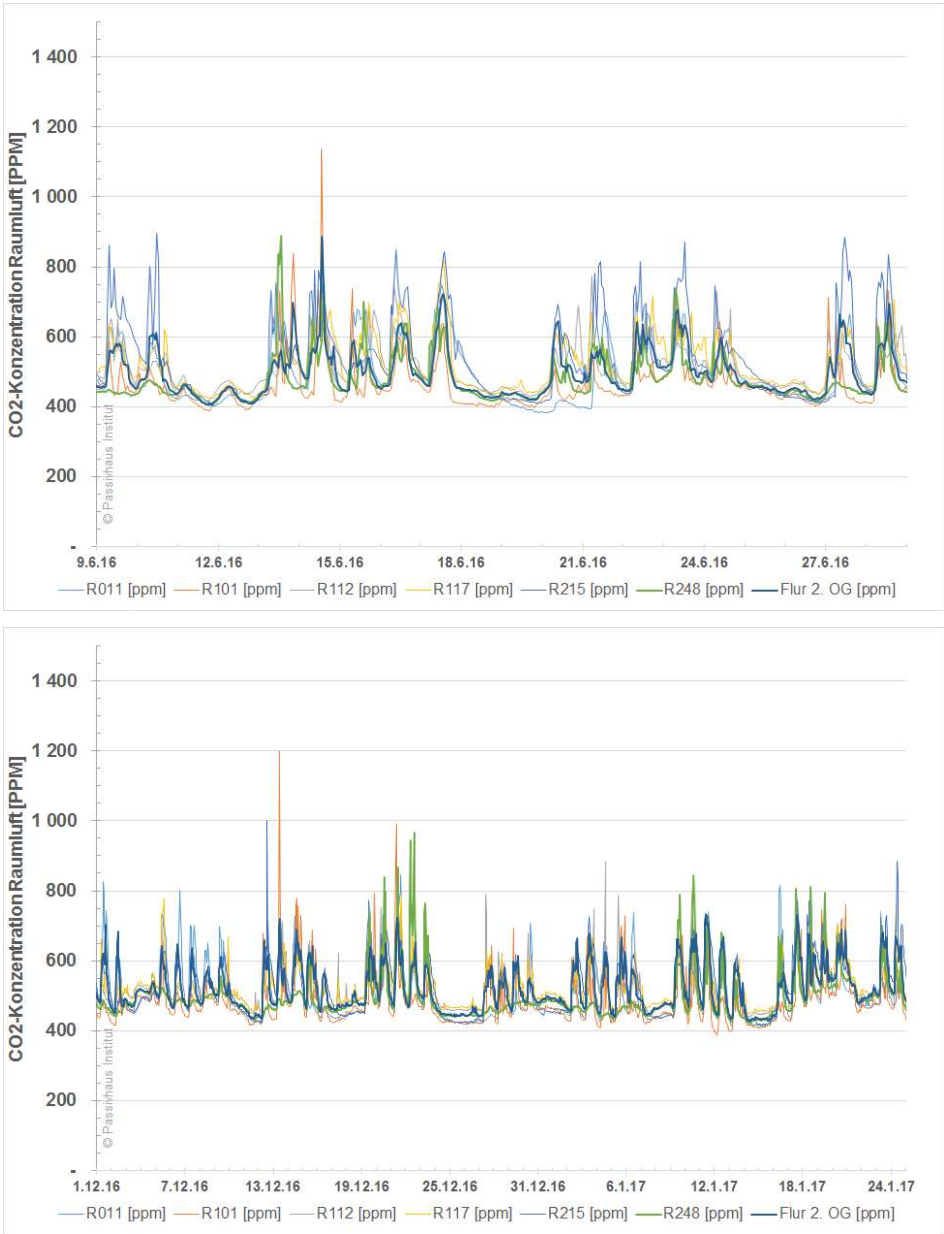


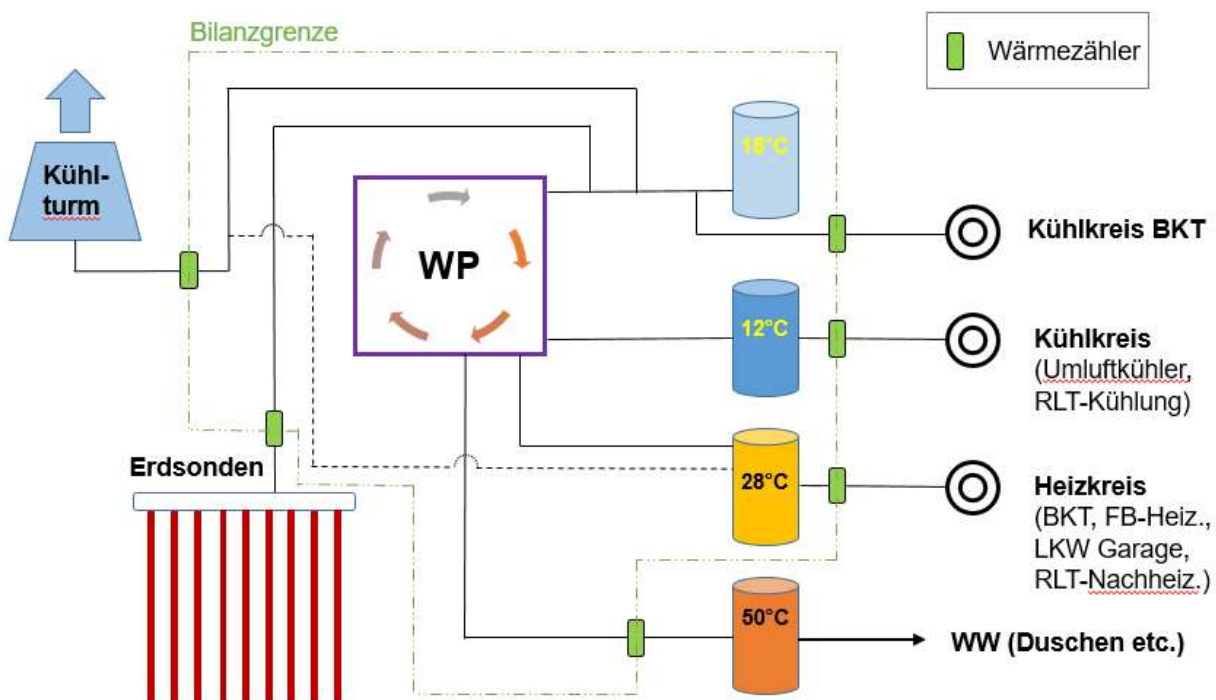
Abbildung 23: CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in 6 Büroräumen und in einem Flur im Sommer- (oben) und Winterzeitraum (unten).

## 6 Auswertung Energieverbrauch

Von zentralem Interesse bei der Untersuchung des Gebäudes ist neben der Überprüfung der Behaglichkeitskriterien die energetische Performance. Dazu werden der Wärme-, Kälte- sowie der Stromverbrauch analysiert.

### 6.1 Wärme

Aufgrund der Versorgung des Gebäudes durch zwei Wärmepumpen (WP) hängen die Wärme-/Kälte- und Stromversorgung noch enger zusammen als bei konventionellen Versorgungssystemen. Daher muss bei der Betrachtung der Wärmeversorgung der Stromeinsatz für die Wärmepumpen direkt mit bilanziert werden. Zum Verständnis der grundlegenden Versorgungsstruktur wird ein auf das Minimum reduziertes Hydraulikschema dargestellt. Die Wärmepumpen können über die Wärmequelle "Erdsonden" das Gebäude im Winter versorgen. Im Sommer wird über die Erdsonden sowie über den Kühlturm Wärme aus dem Gebäude abgeführt. Die Wärmepumpen liefern vier Temperaturniveaus zur Beheizung (28 °C), zur Kühlung (12 °C und 18 °C) sowie zur Warmwasserversorgung (50 °C). Die Abwärme aus der Kälteerzeugung der WP, welche im Gebäude nicht abgenommen wird, kann über den 28 °C-Speicher dem Kühlturm zugeführt werden (gestrichelte schwarze Linie in der folgenden Grafik).

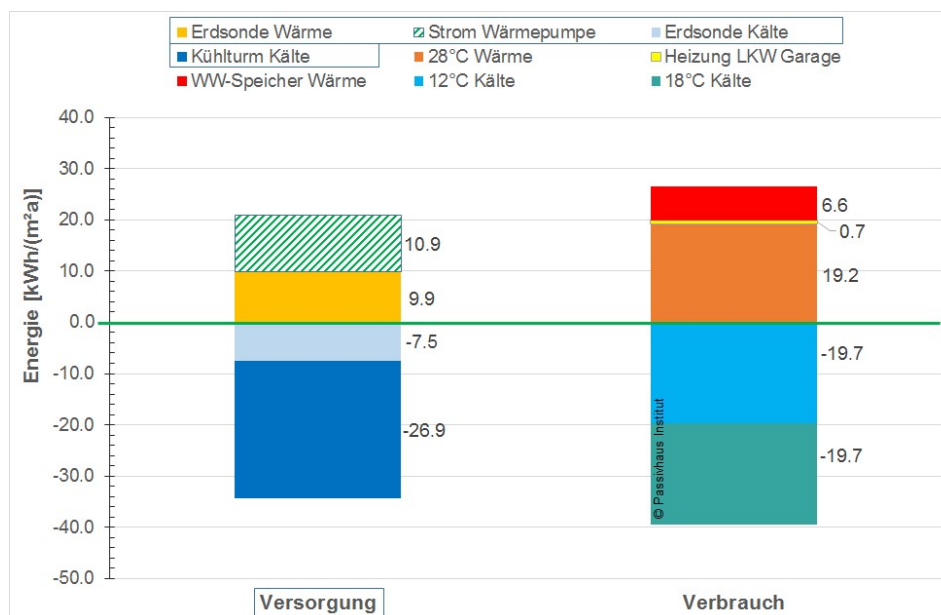


**Abbildung 24:** Auf ein Minimum vereinfachtes Hydraulikschema des Gebäudes mit der Versorgungsseite und den vier Energiespeichern mit unterschiedlichem Temperaturniveaus. Die Vor- und Rücklaufleitungen sind dabei gemeinsam nur als einfache Verbindungslinien eingezeichnet; Wärmeübertrager zwischen getrennten Kreisläufen sind nicht dargestellt. Nachgelagerte Wärmezähler sind ebenfalls nicht enthalten. Die angedeutete Bilanzgrenze wird für Abbildung 25 verwendet.



Die Jahresbilanz der Versorgungs- und Verbrauchsseite des Gebäudes (Abbildung 25) zeigt in der Übersicht, der Bilanzgrenze in Abbildung 24, die Energieströme in Bezug auf die gesamte Energiebezugsfläche (3.870 m<sup>2</sup>). Neben den Messwerten der Haupt-Wärmezähler ist der Stromverbrauch der Wärmepumpe aufgeführt, welcher vollständig in Wärme umgesetzt wird. Der kleine Anteil der Garagenbeheizung (0,7 kWh/(m<sup>2</sup>a)) wird außerhalb der hier betrachteten thermischen Hülle des Gebäudes verwendet. Da er aber innerhalb der hier gewählten Bilanzgrenze durch die Wärmepumpe erzeugt wird, muss er bei der Wahl dieser Bilanzgrenze aber mit aufgeführt werden.

Auffällig an der Jahresbilanz ist, dass die gesamte Energie auf der Verbrauchsseite größer ausfällt als auf der Versorgungsseite. Dies erklärt sich dadurch, dass durch gleichzeitiges Heizen und Kühlen die Wärmepumpe Abwärme aus der Kühlung in Nutzwärme für Heizung und Warmwasser umwandelt. In der Größenordnung 5 kWh/(m<sup>2</sup>a) Kühlung und 5,7 kWh/(m<sup>2</sup>a) Wärme ist die Bilanz auf der Verbrauchsseite daher größer als die Versorgungsseite. Dabei bleiben alle Verteil- und Speicherverluste ohne Berücksichtigung.



**Abbildung 25: Versorgungs-Verbrauchs-Bilanz des Gebäudes für den Jahreszeitraum 01.05.2016 bis 30.04.2017. Energiebezugsfläche (EBF): 3.870 m<sup>2</sup>.**

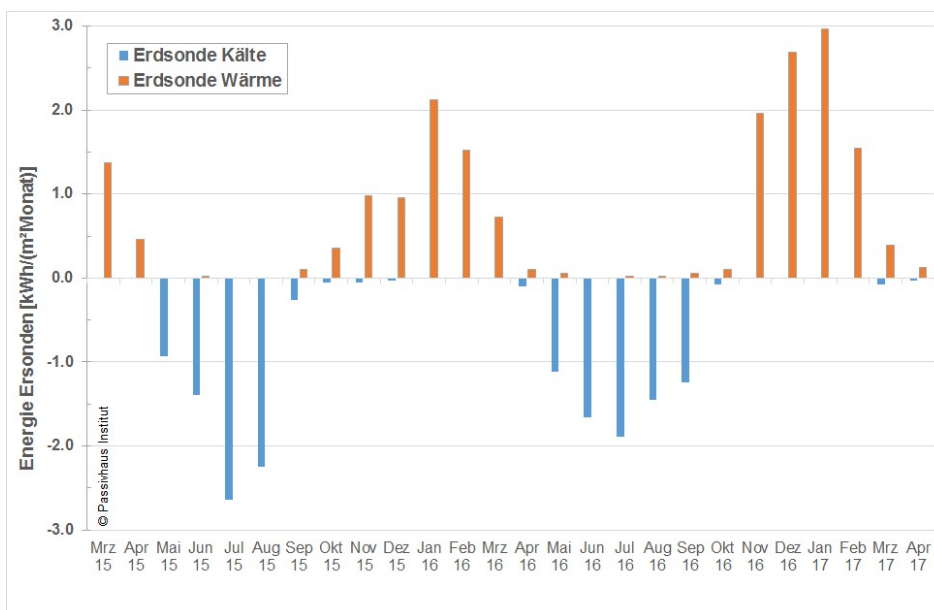
## Versorgung

Zur Wärmeversorgung werden aus den Erdsonden 9,9 kWh/(m<sup>2</sup>a) Wärme entnommen. Die 10,9 kWh/(m<sup>2</sup>a) Stromverbrauch der Wärmepumpe werden dem Gebäude ebenfalls als Wärme zugeführt. Zur Kälteversorgung werden über den Kühlturn 26,9 kWh/(m<sup>2</sup>a) abgeführt (entspricht 78 % der Kälteversorgung) und nur 7,5 kWh/(m<sup>2</sup>a) über die Erdsonden (entspricht 22 %). Für die Wärmeabfuhr war es Planungsziel, zuerst den Kühlturn zu nutzen und danach die Erdsonden. Dies ist erfolgreich umgesetzt worden. Die Jahresbilanz der Erdsonden ist näherungsweise ausgeglichen. Somit ist nicht zu befürchten, dass sich die Erdsonden langfristig erschöpfen könnten.



**Abbildung 26:** Links: Sammelrohrleitung (VL/RL) der Erdsonden während der Bauzeit  
 Mitte: Gehäuse mit den beiden Wärmepumpen im Technikraum im 2. OG  
 Rechts: Kühlturm auf dem Dach des Gebäudes direkt über dem Technikraum

Aus den Erdsonden werden im Untersuchungszeitraum 9,9 kWh/(m<sup>2</sup>a) Wärme entnommen und zur Kühlung 7,5 kWh/(m<sup>2</sup>a) abgeführt. In absoluten Zahlen bedeutet dies 38.500 kWh/a gegenüber 29.100 kWh/a. Es wird in diesem Zeitraum damit 24 % mehr Energie aus dem Erdreich entnommen als eingespeichert. Mit der Darstellung in Abbildung 27 wird erkennbar, dass die gleichzeitige Entnahme von Kühl- und Heizenergie in nur wenigen Monaten und in geringem Umfang erfolgt, was auf eine sinnvolle Regelung hinweist. In der Grafik ist nicht nur das 2. Messjahr, sondern ein längerer Zeitraum dargestellt (ab März 2015). Wählt man einen anderen Jahreszeitraum (Okt 2015 bis September 2016) als in Abbildung 25, wird mehr Kühlenergie (7,6 kWh/(m<sup>2</sup>a)) dem Erdreich entnommen als Wärme (6,9 kWh/(m<sup>2</sup>a)) eingespeist wird. Das Verhältnis dreht sich also um und es wird klar, dass die nicht ausgeglichene Bilanz durch den besonders kaltem Winter 2016/2017 verursacht wurde. Zur endgültigen Bewertung müsste ein noch längerer Zeitraum analysiert werden (z.B. 5 Jahre).



**Abbildung 27:** Monatsdaten der Bilanz der Erdsonden für den Zeitraum März 2015 bis April 2017. Energiebezugsfläche (EBF): 3.870 m<sup>2</sup>.

Im Technikbereich der Erdsonden wird auf der GLT-Anlage auch die gemeinsame Vorlauftemperatur der beiden Felder erfasst. In Abbildung 28 ist der jahreszeitliche Temperaturgang zu erkennen (Zeitraum ist mit dem in Abbildung 27 identisch): Im Sommer wird das System zur Kühlung mit Temperaturen um 18 °C, in Spitzen bis 20 °C beladen. Im Winter liegen die Vorlauftemperaturen als Wärmequelle der Beheizung mit Werten um 11 bis 12 °C deutlich niedriger. Der markante Beginn der Heizanforderung am 08.11.2016 mit dem dann folgenden, relativ kalten Winter, ist gut zu erkennen.

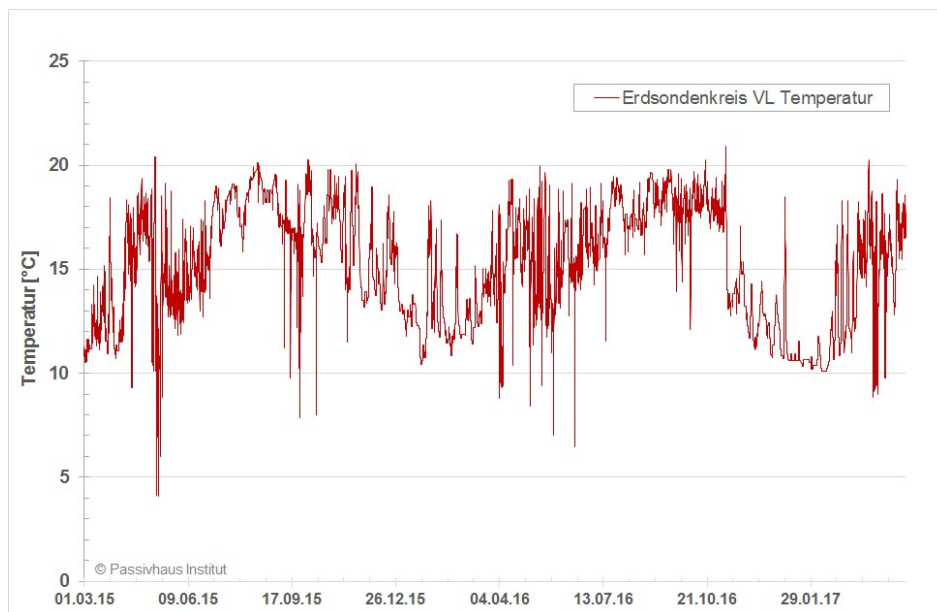


Abbildung 28: Vorlauftemperatur der Erdsonden vom 1.3.2016 bis zum 30.04.2017 (Stundendaten).

Alle vier Bereiche der Gebäudeversorgung aus Abbildung 25 sind im Monatsverlauf in der folgenden Grafik dargestellt. Deutlich ist die Dominanz der Kühl- gegenüber der Heizenergie zu erkennen.

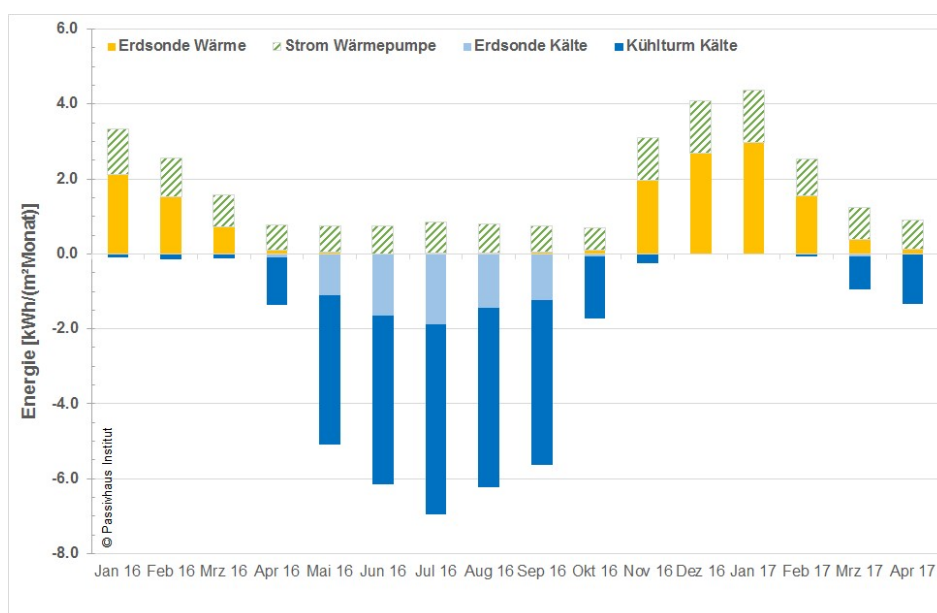


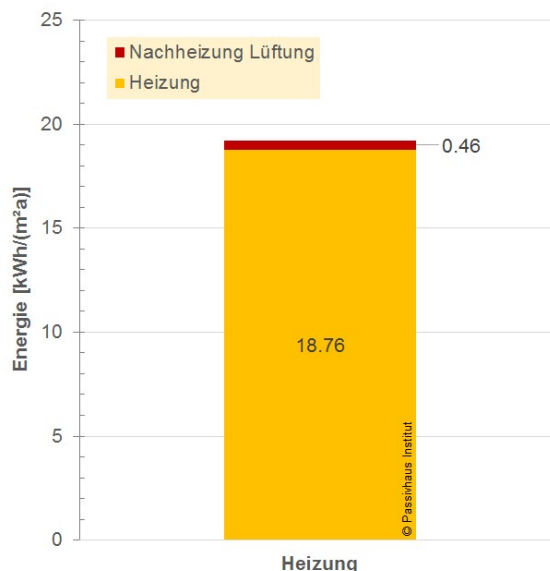
Abbildung 29: Monatsdaten der Versorgungsbilanz (Erdsonden, Kühlturm, Wärmepumpe) für den Zeitraum März 2015 bis April 2017. Energiebezugsfläche (EBF): 3.870 m<sup>2</sup>.

## Verbrauch

Auf der Verbrauchsseite "Kühlung" liegt die Entnahme aus dem 12 °C-Speicher gleichauf mit dem 18 °C-Speicher mit jeweils **19,7 kWh/(m<sup>2</sup>a)** (vgl. Abbildung 25). Zur Kühlung werden damit in Summe **39,4 kWh/(m<sup>2</sup>a)** eingesetzt. Zur Beheizung des Gebäudes wurden **19,2 kWh/(m<sup>2</sup>a)** aufgewendet, für die Warmwasserbereitung sind es **6,6 kWh/(m<sup>2</sup>a)**. Diese Ergebnisse werden weiter unten beim Vergleich mit den PHPP-Daten diskutiert.

Die aufgeführten 0,7 kWh/(m<sup>2</sup>a) für die Temperierung des beheizten Teils der **LKW-Garage** (Flächenheizung) erfolgt außerhalb der hier betrachteten Gebäudehülle. Bezieht man diesen geringen Verbrauch auf die Fläche der beheizten Garage (127 m<sup>2</sup>) ergeben sich 19,8 kWh/(m<sup>2</sup>Garagea). Die Temperatur im Winter lag immer über 5 °C, mit nur einer kurzen Ausnahme, die auf ein längeres Öffnen der Tore hinweist (Minimum 1,4 °C). Im Mittel wurde im Kernwinter (01.11.2016 bis 01.03.2017) in diesem Garagenteil eine Temperatur von 10,9 °C gemessen. Im gleichen Zeitraum betrug das Mittel der Außentemperatur 2,3 °C. Die Temperierung der Garage zum sicheren Frostfreihalten funktioniert damit nachweislich für diesen relativ strengen Winter.

Mit einem weiteren Unterzähler im Heizwärmestrang wird auch der Heizwärmeverbrauch zur Nachheizung der Luft im Heizregister nach der WRG gemessen. Daher kann der Heizwärmeverbrauch aus der obigen Bilanz (19,2 kWh/(m<sup>2</sup>a)) in zwei Bereiche aufgeteilt werden: Beheizung über die **Betonkerntemperierung** ("Heizung") sowie die Luftnacherwärmung nach dem zentralen Lüftungsgerät. Der Bereich der BKT beinhaltet auch die Beheizung der Duschräume im 1. und 2. OG mittels Fußbodenheizung. Für die Nachheizung der Luft mit dem Nachheizregister der RLT-Anlage wird mit 0,46 kWh/(m<sup>2</sup>a) nur ein sehr geringer Teil (2,4 %) verbraucht.

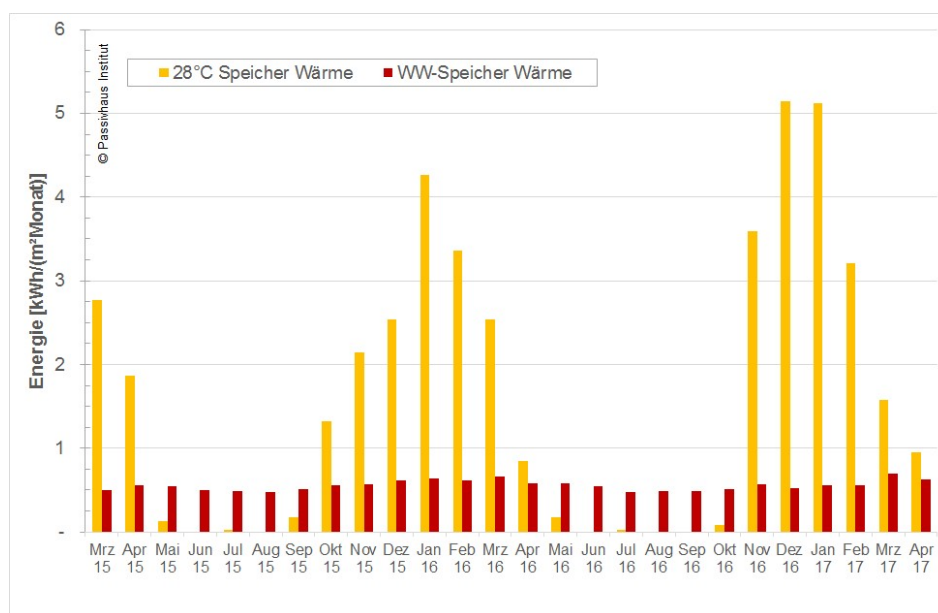


**Abbildung 30: Wärmeversorgung des Gebäudes unterschieden nach der Beheizung über die Betonkerntemperierung (BKT) und Luftnacherhitzung im Lüftungsgerät (Jahreszeitraum 01.05.2016 bis 30.04.2017; Bezugsfläche 3.870 m<sup>2</sup>).**

Die BKT-Versorgung des Gebäudes ist insgesamt in sechs Kreise aufgeteilt. Exemplarisch ist einer dieser Heizkreise mit einem Unter-Wärmezähler ausgestattet. Damit kann der Bereich des Heizwärmeverbrauchs weiter aufgeteilt werden. Mit diesem "Heizkreis 5" werden die Büroräume im

2. OG (gesamte Süd-West- und kurze Süd-Ost-Fassade) sowie einige Teile der Kernzone im 2. OG versorgt (Besprechungsraum, Sporthalle). Die Teilfläche, welche mit Heizkreis 5 versorgt wird, beträgt 813 m<sup>2</sup>. Bezieht man den Verbrauch des Unterzählers auf diese Teilfläche, ergeben sich für das Messjahr **14,0 kWh/(m<sup>2</sup>a)**. Dies entspricht etwa dem Verbrauch des Gesamtgebäudes.

Die Wärmeverbraucher Heizung und Warmwasser zeigen auch in den Monatsverbräuchen den erwarteten Verlauf (Abbildung 31): Bei der Heizung zeigen sich Spitzenwerte nur im Winter; die Warmwasserversorgung wird ganzjährig benötigt (Versorgung Duschen). Die Unterschiede bei der Warmwasserbereitung zwischen Sommer und Winter liegen bei 14,5 %. In den Sommermonaten werden 0,51 kWh/(m<sup>2</sup>Monat) verbraucht, im Winter 0,60 kWh/(m<sup>2</sup>Monat). Die unnötigen, allerdings sehr kleinen Verbräuche der Heizung im Juli 2015 und 2016 (jeweils fast 100 kWh) könnte eine komplette Verriegelung der Heizungsversorgung in den Sommermonaten verhindern.



**Abbildung 31: Monatsverbrauchswerte für Heizung und Warmwasser (März 2015 bis April 2017; Bezugsfläche 3.870 m<sup>2</sup>).**

Der Verbrauch aus dem **12 °C-Speicher** kann mit seinen Unterverbrauchern dargestellt werden: Von diesem Kühl-Speicher werden zum einen das Kühlregister der Lüftungsanlage versorgt (Zuluft-Kühlung), zum anderen die einzelnen Umluftkühlgeräte in allen Serverräumen und in den größeren Besprechungsräumen. Der Anteil der Luftkühlung nach dem zentralen Lüftungsgerät fällt - erwartungsgemäß - fast ausschließlich in den Sommermonaten an. Dominant ist aber der Verbrauch der deckenhängenden Umluftkühler. Dieser Verbrauch variiert zwischen den Sommer- und den Wintermonaten nur wenig. Die Vermutung, dass die Serverräume auf unnötig geringe Temperaturen (z.B. 17 °C) gekühlt werden, konnten nicht bestätigt werden (Auskunft Hautechniker Mai 2017). Eine Temperaturmessung der Räume für genauere Analysen ist nicht realisiert. Die Verbrauchswerte in der Darstellung (Abbildung 32) liegen zwischen 1,3 und 1,6 kWh/(m<sup>2</sup>Monat). Aufgrund des erstaunlich hohen - auch winterlichen - Kühlenergieverbrauchs und der nur geringen Schwankungen ist Optimierungspotenzial vorhanden (vgl. dazu die Ausführungen im nächsten Abschnitt).



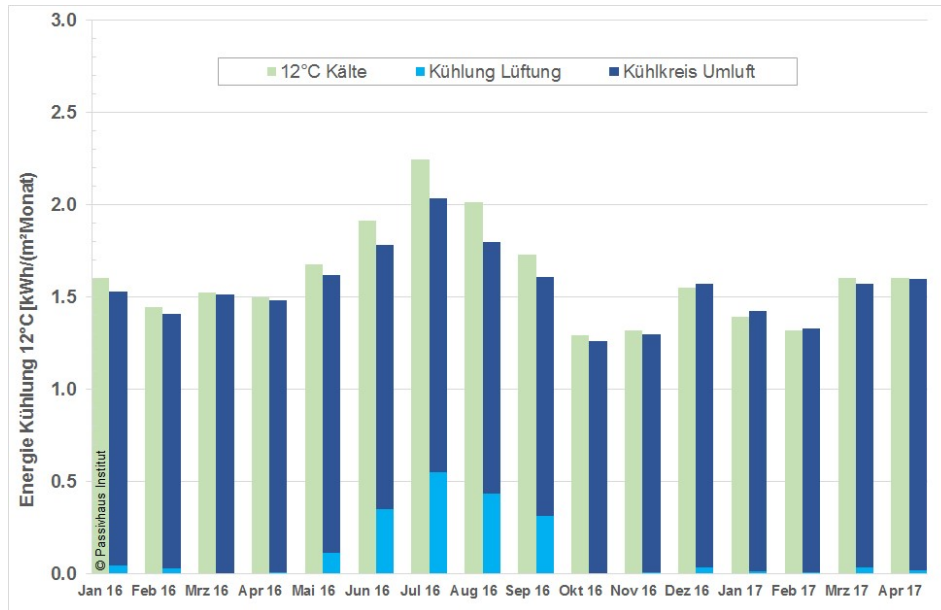


Abbildung 32: Monatsverbrauch Kühlung aus dem 12 °C Speicher. Die Verbraucher, welche aus dem 12 °C Speicher versorgt werden "Kühlung Lüftung" sowie "Umluftkühler" in Besprechungs- und Serverräumen sind getrennt aufgeführt (Zeitraum Januar 2015 bis April 2017; Bezugsfläche 3.870 m<sup>2</sup>).

### PHPP-Bilanz

Zur weiteren Analyse ist ein Abgleich mit den Planungswerten aus dem Energiebilanztool PHPP von Interesse. Während der Planung wurde das PHPP kontinuierlich an die baulichen Bedingungen angepasst. Die Zertifizierung erfolgte mit diesen Kenndaten:

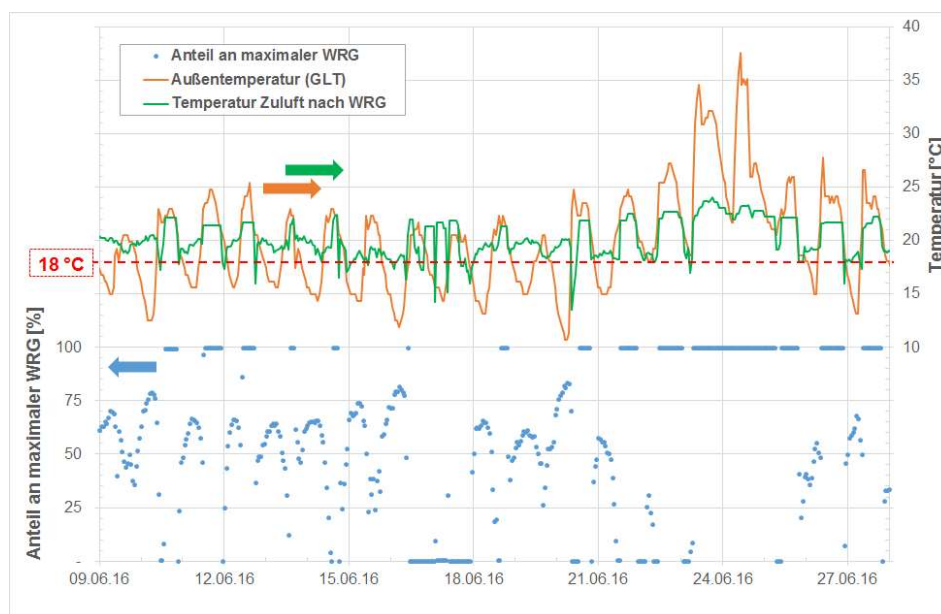
Energiebezugsfläche:	3870.0	m <sup>2</sup>
<b>Energiekennwert Heizwärme:</b>	<b>13</b>	<b>kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>
<b>Drucktest-Ergebnis:</b>	<b>0.3</b>	<b>h<sup>-1</sup></b>
<b>Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung, Kühlung, Hilfs- u. Haushalts-Strom):</b>	<b>118</b>	<b>kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>
<b>Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Hilfsstrom):</b>	<b>43</b>	<b>kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>
<b>Primärenergie-Kennwert Einsparung durch solar erzeugten Strom:</b>		<b>kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>
<b>Heizlast:</b>	<b>13</b>	<b>W/m<sup>2</sup></b>
<b>Übertemperaturhäufigkeit:</b>		<b>%</b>
<b>Energiekennwert Nutzkälte:</b>	<b>2</b>	<b>kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>
<b>Kühllast:</b>	<b>8</b>	<b>W/m<sup>2</sup></b>

Abbildung 33: Kenndaten des Gebäudes aus dem PHPP-Nachweisblatt der Zertifizierung 2012.

Für einen geeigneten Vergleich mit den Planungsdaten müssen die Randbedingungen der Messung in der Bilanzrechnung (PHPP) berücksichtigt werden. Daher werden die Randbedingungen wie das Wetter (Außentemperatur und Globalstrahlung nach Himmelsrichtungen), die Innentemperatur, die Lüftungszeiten und die Gebäudebelegung sowie die internen Wärmequellen aus dem Messzeitraum verwendet.

Bei der weiteren Untersuchung der Ursachen des erhöhten Kühlverbrauchs stellte sich heraus, dass die **Wärmerückgewinnung des Lüftungsgerätes auch in der Sommerzeit aktiv** war. Die aktive Kühlung muss damit verstärkt gegen diese unnötige Wärme im Gebäude arbeiten. Wie bei der Untersuchung des Lüftungsgerätes (vgl. Abschnitt 8) ausgeführt wird, handelt es sich um ein Gerät mit zwei fest stehenden Wärmespeicher-Blöcken (regenerativ). Der Luftweg wird durch Jalousieklappen zyklisch alle 60-90 Sekunden umgeschaltet, die Blöcke werden so entsprechend thermisch be- und entladen. Durch Vorgabe längerer Zykluszeiten kann die Wärmerückgewinnung bei Bedarf reduziert werden. Die Messdatenerfassung liefert ein auf 0 bis 100 % normiertes Signal des "Anteils an der maximal möglichen WRG".

Wird dieser Wert für den Sommerzeitraum untersucht, ergibt sich, dass an Sommertagen (und insbesondere auch in Nächten) mit Kühlpotential die Wärmerückgewinnung aktiv bzw. teilaktiv ist. Das führt dazu, dass dem Gebäude Wärme aus der Abluft wieder zugeführt wird. Die kühleren Perioden (Außenlufttemperaturen unter der Innentemperatur) werden nicht bzw. nur deutlich reduziert ausgenutzt. In Hitzephasen – aber auch nur dann – ist die Nutzung der WRG zielführend, da dann die sehr warme Außenluft einen großen Teil der Wärmeenergie an die Abluft überträgt. Diese Energie verlässt dann mit der Fortluft das Gebäude, was zur passiven Kühlung beiträgt. Diese Effekte (moderate Sommertage mit unerwünschter WRG, Hitzetage mit Nutzung der WRG) sind an einem Datenausschnitt in der folgenden Grafik dargestellt. Es zeigt sich, dass die Regelung versucht, durch Variation der WRG eine Zulufttemperatur von etwa 18 °C zu halten. Dadurch wird das Gebäude auch im Sommer fast dauerhaft mit WRG betrieben.



**Abbildung 34: Der Anteil der, mit dem Lüftungsgerät (regenerativ), maximal möglichen WRG, wird durch die Regelung dauernd angepasst. Für einen Sommerzeitraum (9.6. bis 27.6.2016) mit moderaten Außentemperaturen sowie einer kurzen Hitzeperiode ist die Einstellung der WRG-Anforderung dargestellt. Auch bei niedrigeren Außenlufttemperaturen ist die WRG aktiv. Damit wird ein großes Potential zur Kühlung des Gebäudes nicht genutzt.**

Im Sommer ist generell die Temperaturdifferenz zwischen der Ab- und der Außenluft ( $t_{ab} - t_{au}$ ) geringer als im Winter. Daher ist die effektive WRG noch höher als die für den Winter berechnete

(vgl. Formel Seite 71). Dieser Effekt ist der in diesem Gebäude nur anteiligen Nutzung der WRG im Sommer entgegengesetzt. Vereinfacht wird für die Untersuchung daher die WRG-Nutzung auch für die Sommermonate im PHPP als vollständig angesetzt.

**Tabelle 3: Unterschiede in der PHPP Berechnung zur Zertifizierung und Vergleich mit dem Monitoring.**

	PHPP-Zertifizierung	PHPP-Monitoring
<b>Wetterdaten</b>	Wetterdatensatz Kassel	Messdaten Wetter 2016/2017
<b>Innentemperatur Winter</b>	20 °C	Messwert 23,1 °C
<b>Innentempertur Sommer</b>	25 °C	Messwert 23,5 °C
<b>Betrieb Lüftungsanlage</b>	15 h Standard 9h Grundlüftung Mittelwert: 2.936 m³/h Luftwechselrate n = 0,30 h <sup>-1</sup>	24 h Maximalbetrieb  Mittelwert: 4.300 m³/h Luftwechselrate n = 0,44 h <sup>-1</sup>
<b>Interne Wärmequellen IWQ</b> (ermittelt u.a. nach dem Stromverbrauch, siehe Abschnitt 6.2)	4,4 W/m²	4,1 W/m²
<b>Personenbelegung</b>	80 Personen	46 Personen
<b>Nutzung der WRG Sommer</b>	Keine WRG im Sommer ("Bypass")	Volle WRG-Nutzung

Durch die aufgelisteten Anpassungen verändern sich die Ergebnisse der Energiebilanz. Die einzelnen Änderungen können zur Erhöhung oder zur Absenkung der Kennwerte in der Bilanz führen. Nach den beschriebenen Anpassungen des PHPP ergeben sich im Nachweisblatt des PHPP die folgenden Kennwerte:

Energiebezugsfläche:	3870.0	m <sup>2</sup>
Verwendet:	Monatsverfahren	
<b>Energiekennwert Heizwärme:</b>	<b>18</b>	<b>kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>
<b>Drucktest-Ergebnis:</b>	<b>0.3</b>	<b>h<sup>-1</sup></b>
<b>Primärenergie-Kennwert</b> (WW, Heizung, Kühlung, Hilfs- u. Haushalts-Strom):	<b>121</b>	<b>kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>
<b>Primärenergie-Kennwert</b> (WW, Heizung und Hilfsstrom):	<b>46</b>	<b>kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>
<b>Primärenergie-Kennwert</b> Einsparung durch solar erzeugten Strom:		<b>kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>
<b>Heizlast:</b>	<b>16</b>	<b>W/m<sup>2</sup></b>
<b>Übertemperaturhäufigkeit:</b>		<b>%</b>
<b>Energiekennwert Nutzkälte:</b>	<b>17</b>	<b>kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>
<b>Kühllast:</b>	<b>11</b>	<b>W/m<sup>2</sup></b>

**Abbildung 35: Kenndaten des Gebäudes aus dem PHPP-Nachweisblatt NACH der Anpassung an die Bedingungen des Messjahres nach Tabelle 3.**



Der Heizwärmebedarf steigt von 13,2 auf 18,3 kWh/(m<sup>2</sup>a) nach der Anpassung. Die Nutzkälte steigt von 2 auf 17 kWh/(m<sup>2</sup>a). Erst mit diesen Werten kann nun ein sinnvoller Vergleich mit den Messdaten erfolgen.

Der gemessene **Heizwärmeverbrauch** von 19,2 kWh/(m<sup>2</sup>a) (vgl. weiter oben) liegt damit um nur 0,9 kWh/(m<sup>2</sup>a) höher als der aus der angepassten PHPP-Berechnung. Das ist als sehr gute Übereinstimmung zu bewerten. Es muss berücksichtigt werden, dass die Messung, wie auch die Berechnung in der Regel mit einer Genauigkeit von etwa  $\pm 3$  kWh/(m<sup>2</sup>a) bzw.  $\pm 4$  kWh/(m<sup>2</sup>a) anzusetzen sind (vgl. [Feist 2004], [Peper 2012] und [Feist 2012]).



**Abbildung 36: Heizwärmebedarf aus der PHPP-Bilanz mit den Randbedingungen der Zertifizierung und denjenigen aus dem Monitoring gegenüber dem Heizwärmeverbrauch (Messergebnis) aus dem Messzeitraum 2016/2017.**

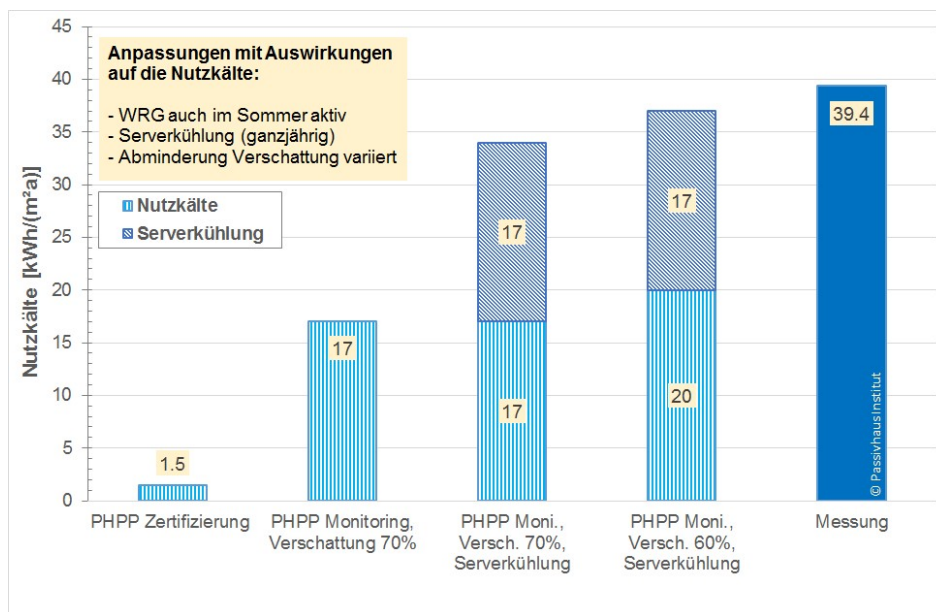
Bei der **Kühlung** ist ein sehr großer Mehrverbrauch gegenüber der Planung zu verzeichnen: Als Nutzkälte waren während der Zertifizierung 2 kWh/(m<sup>2</sup>a) angesetzt, mit den beschriebenen angepassten Bedingungen 17 kWh/(m<sup>2</sup>a). In dieser Erhöhung ist die sommerliche Nutzung der WRG (verursacht ca. 10 kWh/(m<sup>2</sup>a) Kühlbedarf) enthalten. Die Messwerte zeigen einen Nutzkälteverbrauch von insgesamt 39,4 kWh/(m<sup>2</sup>a).

Bei der Untersuchung des "**Kühlkreislaufs Umluft**" (vgl. weiter oben Abbildung 32) zeigt sich, dass dieser Kühlverbrauch mit nur geringer Variabilität das ganze Jahr über anfällt. Aus der Grafik lassen sich anhand des winterlichen Kühlbedarfs etwa 1,4 kWh/(m<sup>2</sup>Monat) abschätzen, was einem Jahresverbrauch von etwa 17 kWh/(m<sup>2</sup>a) entspricht. Es wird angenommen, dass diese Kühlenergie zum großen Teil zur Kühlung der fünf Serverräume benötigt wird und nur zum kleineren Teil zur temporären Kühlung der Lagebesprechungsräume (kleinere Schwankungen). In diesem hochausgerüsteten Gebäude ist neben der normalen Servertechnik aus dem Bürobereich weitere

polizeispezifische Technik vorhanden. Wie oben erwähnt, liegen keine Messdaten zur Raumtemperatur in den Serverräumen und auch nicht zum Stromverbrauch nur in diesen Räumen vor<sup>2</sup>. Wird in einem Raum Strom in Wärme umgesetzt und durch ein Kühlgerät aktiv wieder herausgekühlt, wird dieser Vorgang nicht in der PHPP-Wärmebilanz erfasst (Wohl aber in der Strom- und Primärenergiebilanz). Da die Abwärme der Serverräume aber über das Gebäude-Kühlsystem abgeführt wird, muss dieser Kühlbeitrag hier gesondert mit in die Kühlbilanz aufgenommen werden. Damit erhöht sich die notwendige Nutzkälte um die abgeschätzten 17 kWh/(m<sup>2</sup>a).

Als weiterer Einfluss auf die Nutzkälte wurde beobachtet, dass die **Außenverschattung** der Fenster in der Sommerzeit zeitlich eingeschränkt genutzt wurde. Daher muss der Ansatz dazu im PHPP ebenfalls angepasst werden. Es liegen keine Messdaten zur Berechnung vor, weshalb eine moderate Reduktion um 10 %, zusätzlich zu der ursprünglichen 70 %-Nutzung der Verschattung, angesetzt wird (in Summe 60 %).

Damit zeigt sich insgesamt, dass der größte Teil des Zusatzverbrauchs durch diese Effekte zu erklären ist (vgl. Abbildung 37). Die Dauerkühlung in den Serverräumen führt auf zusätzliche 17 kWh/(m<sup>2</sup>a). Der Ansatz der verminderten Nutzung der Außenverschattung ergänzt weitere 3 kWh/(m<sup>2</sup>a) Kühlbedarf. Diese beiden Zusammenhänge erhöhen den Kühlbedarf deutlich von den bisherigen 17 kWh/(m<sup>2</sup>a) der angepassten PHPP-Bilanz auf 34 bzw. 37 kWh/(m<sup>2</sup>a), was nahezu den Messwerten entspricht.



**Abbildung 37: Nutzkältebedarf aus der PHPP-Bilanz mit den Randbedingungen der Zertifizierung sowie denjenigen aus dem Monitoring inkl. Variationen der Verschattungsnutzung gegenüber dem Heizwärmeverbrauch (Messergebnis) aus dem Messzeitraum 2016/2017.**

<sup>2</sup> Die gemessenen Stromverbrauchswerte der IT-Bereiche beinhalten immer auch die Verbraucher in den Büroräumen des jeweiligen Bereichs (Ausnahme Serverraum im EG).

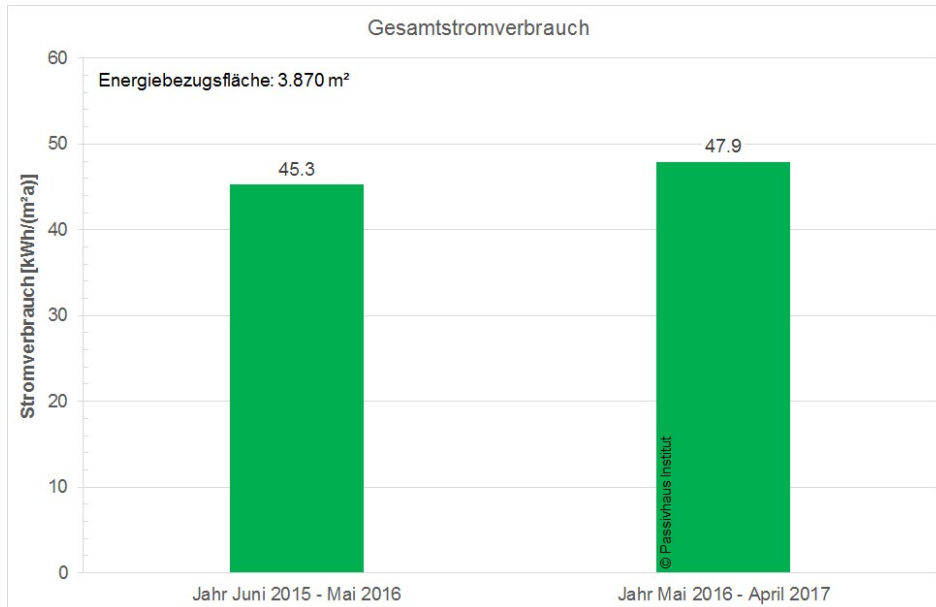
Festzuhalten bleibt in jedem Fall:

- Die kontraproduktive Nutzung der WRG im Sommer sollte umgehend deaktiviert werden (Anpassung der Regelung). Die sommerliche Aktivierung sollte nur in Hitzeperioden erfolgen (Verminderung der Lüftungswärmelast durch WRG).
- Werden in Nichtwohngebäuden aktive Kühlungen betrieben, steigt die Gefahr, durch weiteren Energieeinsatz die gewünschte Behaglichkeit herzustellen, obwohl das Potential passiver Maßnahmen (z.B. Sonnenschutz) nicht vollständig ausgenutzt ist.
- Bei der Kühlung von Serverräumen können größere Energiemengen durch den Stromverbrauch zur Erwärmung beitragen, welche dann aktiv herausgekühlt werden müssen. Die Serverräume nebst Kühlung werden im PHPP wie ein elektrisches Gerät betrachtet, dessen Abwärme nicht in die Berechnung der internen Wärmequellen (IWQ) eingeht. Ihr Stromverbrauch wird in der Primärenergiebilanz aber berücksichtigt. Es ist zu beachten, dass der im PHPP ausgewiesene Kühlbedarf den Kühlbedarf der Serverräume nicht enthält. Es macht auch nochmals deutlich, wie sinnvoll und notwendig der Einsatz stromsparender IT-Technik ist. Auf diesen Bereich sollte in der Planung stets geachtet werden.
- Für den Bereich der Nutzkälte ist weiteres Optimierungspotential vorhanden.

## 6.2 Strom

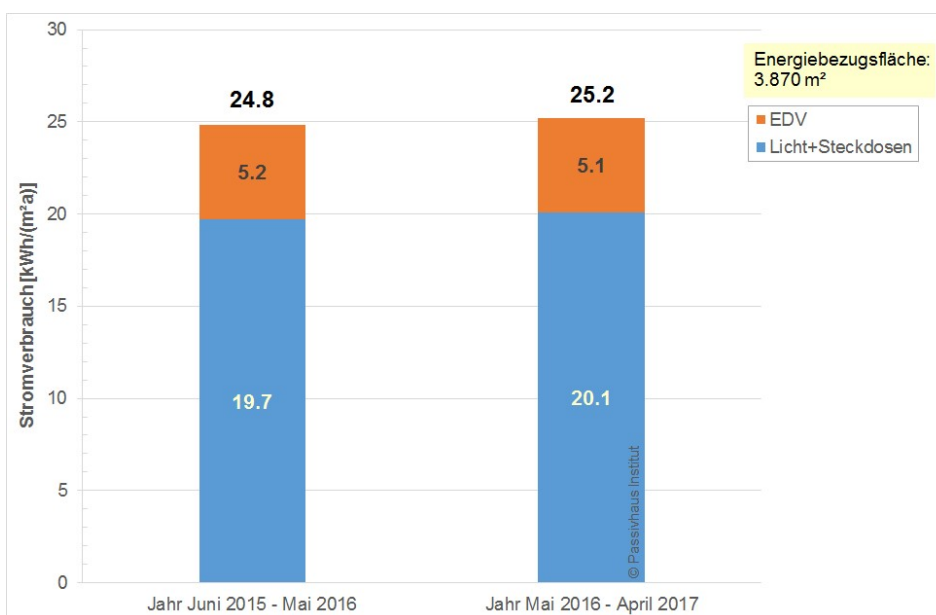
Die gesamte Energieversorgung des Gebäudes erfolgt ausschließlich elektrisch. Daher sind die Verbrauchswerte von besonderem Interesse. Zentral ist der Hauptstromzähler an der Übergabestelle des Gesamtgebäudes (NSHV, Niederspannungshauptverteilung), da hier die gesamte Energiezufuhr erfasst wird. Daneben gibt es weitere Unterzähler für unterschiedliche Verbrauchsbereiche. Der Stromverbrauch der beiden zentralen Wärmepumpen wurde bereits im obigen Abschnitt "Wärme" aufgeführt; er wird hier weiter untersucht.

Der spezifische Gesamtstromverbrauch des Gebäudes von 45,3 bzw. 47,9 kWh/(m<sup>2</sup>a) in den beiden Untersuchungsjahren (Juni 2015 bis Mai 2016 sowie Mai 2016 bis April 2017) beinhaltet die Wärme- und Kälteversorgung, den gesamten technischen Hilfsstrom (Haustechnik, Lüftung,...) sowie die Versorgung der Büros, Lager, Besprechungsräume für alle Anwendungen wie IT (Server und PCs) und die Beleuchtung. Auch polizeispezifische Anwendungen, die über eine normale Büronutzung hinausgehen, sind darin enthalten (Großbildschirme, Funktechnik etc.). Nur geringe Anteile davon werden außerhalb der thermischen Gebäudehülle verbraucht. Dazu zählen die Beleuchtung der Garagen, die elektrischen Garagentürsysteme und eine kleine Lüftungsanlage in der beheizten LKW-Garage sowie Rohr-Begleitheizungen. Nur die LKW-Lüftungsanlage wird messtechnisch gesondert erfasst. Bezogen auf die gesamte Gebäudefläche (EBF) ist der Verbrauch der nur temporär betriebenen Kleinanlage allerdings vernachlässigbar (Jahr 1: 0,29 kWh/(m<sup>2</sup>a) bzw. Jahr 2: 0,12 kWh/(m<sup>2</sup>a)). Die Abschätzung der Größenordnung auch der anderen externen Verbraucher zeigt, dass diese Beiträge hier vernachlässigt werden können.



**Abbildung 38: Spezifischer Gesamt-Stromverbrauch des Gebäudes in den beiden untersuchten Jahreszeiträumen.**

Als eine wichtige Teilmessung werden alle Unterverteilungen im Gebäude separat erfasst. Für die Teilflächen gibt es jeweils in den elektrischen Unterverteilungen eine separate Messung der Bereiche "Licht + Steckdosen" sowie des getrennten EDV-Netzes "IT + IT-Steckdosen". Insgesamt werden so 6 Teilbereiche mit 11 Stromzählern erfasst. Für eine kleine Fläche im EG erfolgt keine Trennung nach den beiden Verbrauchsbereichen (Zuordnung komplett zum Bereich "Licht + Steckdosen"). Die Summe aller dieser Unterzähler zeigt für die beiden Jahre fast identische Verbräuche (Abbildung 39) um 25 kWh/(m²a) bezogen auf die gesamte EBF. Für die EDV Versorgung werden davon gut 5 kWh/(m²a) eingesetzt, die restlichen etwa 20 kWh/(m²a) sind für den Bereich "Licht + Steckdosen" aufgewendet worden.

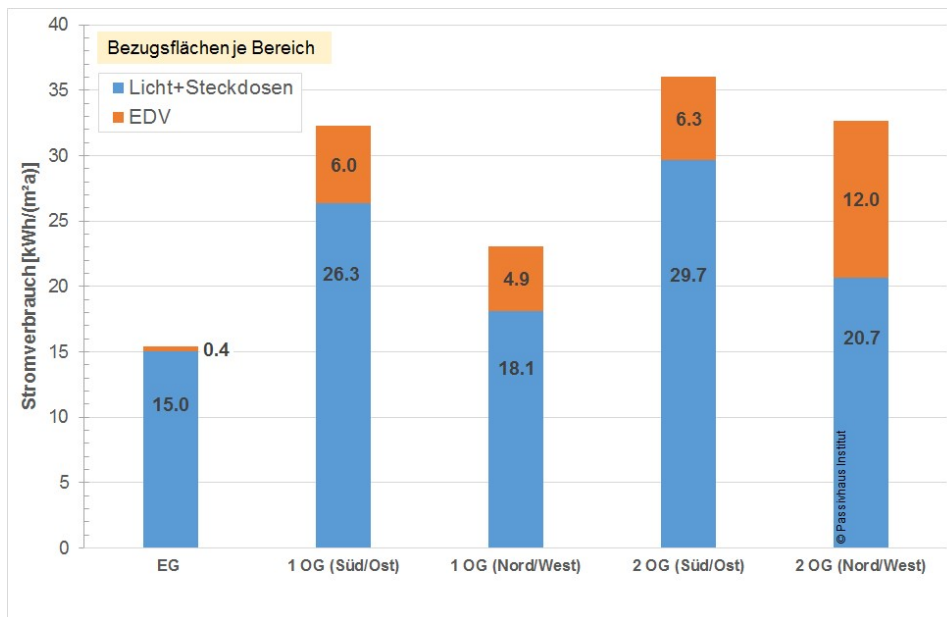


**Abbildung 39: Spezifischer Stromverbrauch der Summe der Unterverteilungen in den Geschossen für die Versorgung von Beleuchtung und Steckdosen sowie der EDV.**

Werden die Verbrauchswerte der Unterzähler für das zweite Jahr (Mai 2016 bis April 2017) einzeln dargestellt, müssen als Bezugsflächen fünf unterschiedliche Teilflächen herangezogen werden. Die Berechnung dieser Flächen - mit Ausnahme des einen Teilbereichs im EG - ergibt zwischen 575 und 817 m<sup>2</sup>. Dies sind die Büro-, Besprechungs-, Lager-, Umkleide-, WC/Dusch- sowie Funktionsräume der entsprechenden Bereiche. Vereinfacht werden das erste und zweite Geschoss in zwei Hälften aufgeteilt (Süd/Ost und Nord/West) und der Büro-Lagerbereich im EG erfasst (ergibt die 5 Teilflächen). In Abbildung 40 ist zu erkennen, dass nicht nur die spezifischen Verbräuche deutlich variieren, sondern auch die Verteilung zwischen den Bereichen "Licht + Steckdosen" und "IT + IT-Steckdosen". Die Anteile der Aufwendungen für den EDV-Strom am Gesamtverbrauch des jeweiligen Bereichs liegen zwischen 2 und 37 %. Dabei muss zum Kleinstwert im EG ergänzt werden, dass hier nur eine kleine Teilfläche als Büro genutzt wird und dies auch nur zeitlich eingeschränkt. Im 2. OG ist die "klassische" Büronutzung am stärksten vertreten; fast alle an der Fassade gelegenen Räume sind Büros oder Besprechungszimmer. Hier liegt die Verteilung der Gesamtagelast bei 27 % für den EDV-Stromanteil. Im 1. OG mit etwas abweichender Nutzung (z.B. ist ein Sportbereich beinhaltet) liegt der Anteil für die EDV-Nutzung bei insgesamt 20 %. Damit wird also etwa ein Fünftel bis ein Viertel für IT-Anwendungen aufgewendet. Eine detaillierte Information zu der genauen Nutzung der angeschlossenen Verbraucher der beiden Teilbereiche und der unterschiedlichen Steckdosen für jeden Raum liegt allerdings nicht vor.

Werden die Monatsverläufe des Bereichs "Licht + Steckdosen" analysiert, fällt auf, dass **kein** relevanter Unterschied zwischen dem Sommer- und dem Winterverbrauch festzustellen ist. Die Abweichung von vier Sommer- zu vier Wintermonaten beträgt nur 0 bis 6 %. Nur eine der Teilflächen weist eine sommerliche Reduktion um 11 % auf. Der Einfluss der Raumbeleuchtung, welche im Winter vermutlich häufiger genutzt wird als im Sommer, auf den gesamten Nicht-EDV-Strom scheint damit sehr gering zu sein, was ggf. auch als Bestätigung des sorgfältig ausgearbeiteten Beleuchtungskonzeptes mit geteiltem Behang der Verschattungen und sehr effizienten Kunstlichtquellen gewertet werden kann.





**Abbildung 40: Spezifischer Stromverbrauch der einzelnen Unterverteilungen in den Geschossen für die Versorgung für Beleuchtung, IT und Steckdosen für das 2 Messjahr (Mai 2016 bis April 2017). Je Bereich sind die beiden Unterzähler für Licht+Steckdosen und den IT-Bereich (EDV) aufgetragen.**

## Strom Haustechnik

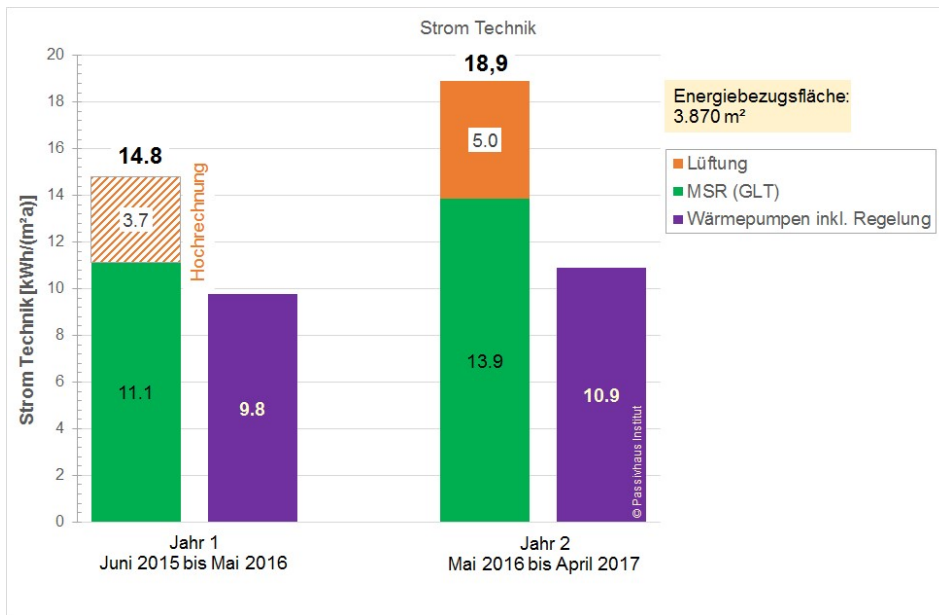
Als weiterer Strom-Verbrauchsbereich ist die gesamte Haustechnik bzw. der Hilfsstrom zu untersuchen. Dieser Bereich teilt sich messtechnisch auf in den zentralen Schaltschrank der MSR-Anlage und die Wärmepumpe.

Der MSR-Stromverbrauch ("**M**essen/**S**teuern/**R**egeln") beinhaltet einen großen zentralen Schaltschrank im 2. OG für die GLT-Technik. Von hier werden die diversen Regelungen und Geräte in allen Etagen und Räumen versorgt. Dazu zählen z.B. Sensoren (Temperatur, Feuchte), Stellantriebe für z.B. Klappen, Präsenzmelder, Fensterkontakte, Volumenstromregler, motorische BSK (dauerhafte Leistungsanforderung gegen Federkraft), Filterkontrollmessungen, Druckdifferenzmessgeräte, Kühlturm inkl. Wasserenthärtung und Wasseraufbereitung, mehrere Dachheizungen (Frostfreihaltung Entwässerungsröhre), Pumpen, Thermostate und Regelventile. Der Jahresverbrauch der MSR-Anwendungen (ohne Lüftungsanlage) beträgt **11,1 bzw. 13,9 kWh/ (m²a)**. Die Dauerleistung für den MSR-Bereich ohne Lüftung beträgt damit 4,9 bzw. 6,1 kW.

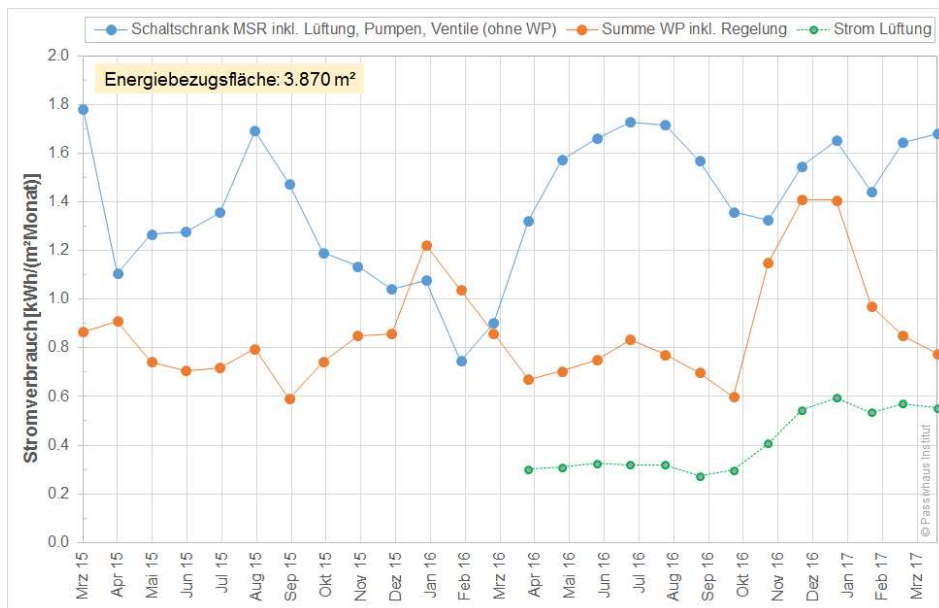
Auch die zentrale **Lüftungsanlage** wird aus dem MSR-Schaltschrank mit Strom versorgt. Ein gesonderter Zähler für die Lüftungsanlage (Ventilatoren, Regelung) wurde im Auftrag des PHI Anfang Februar 2016 nachgerüstet; nutzbare Verbrauchsdaten liegen ab April 2016 vor. Wie oben bereits erwähnt wird die Lüftungsanlage seit 23. März 2016 bis zum 09. Juni 2017 mit deutlich zu hohen Volumenströmen betrieben. Für das erste Messjahr wurde der Stromverbrauch der Lüftung vereinfacht hochgerechnet, indem der "normale" Stromverbrauch der Monate April bis Oktober 2016 für den gesamten ersten Jahreszeitraum berechnet wurde (3,7 kWh/(m²a)). Im zweiten Messjahr mit der ungeplante erhöhten Betriebsweise wurden 5,0 kWh/(m²a) verbraucht. Für die

Darstellung des Technikstroms in Abbildung 41 wurde der Stromverbrauch der Lüftung (Hochrechnung und Messung) vom Messwert des Schaltschranks abgezogen und gesondert dargestellt.

Als dritten großen Stromverbraucher im Technikbereich werden die Verbrauchssummen der beiden **Wärmepumpen** und ihrer Regelung für die beiden Messjahre bestimmt und dargestellt. Sie betragen knapp 10 bzw. 11 kWh/(m<sup>2</sup>a). Insgesamt sind die Verbräuche im zweiten Messjahr etwas angestiegen, was vermutlich auf den kühleren Winter zurückzuführen ist.



**Abbildung 41: Spezifischer Technikstromverbrauch für MSR, Lüftung und Wärmepumpen in den beiden Bilanzjahren. Der Stromzähler Lüftung wurde erst im April 2016 installiert; der Wert für das erste Bilanzjahr wurde daher hochgerechnet (Schraffur).**



**Abbildung 42: Spezifischer Stromverbrauch des Technikbereichs im Monatsverlauf. Der Stromverbrauch der Lüftungsanlage ist ein Unterzähler der MSR-Werte (dort ebenfalls noch enthalten).**

Der Monatsverlauf der Stromverbräuche für den Technikbereich in Abbildung 42 zeigt deutliche zeitliche Schwankungen. In der Darstellung ist der Lüftungsstrom gesondert als Unterzähler des MSR-Zählers aufgeführt. Im MSR-Strom ist er ebenfalls enthalten (noch nicht herausgerechnet, wie es in Abbildung 41 der Fall ist). Beim Stromverbrauch der Wärmepumpen zeigten sich deutlich Spitzen in den Wintermonaten (Beheizung); ausgeprägt im zweiten, kälteren Winter. Der Stromverbrauch der MSR ist unregelmäßig aber nicht eindeutig bestimmt durch Jahreszeiten; hier überlagern sich vermutlich unterschiedliche Effekte. Beim Stromverbrauch der Lüftungsanlage ist deutlich der Anstieg ab etwa Oktober/November 2016 zu erkennen. Dieser wurde weiter oben bereits diskutiert. Im Abschnitt 8 erfolgt die Untersuchung der Lüftungsanlage im Detail.

### **Pumpenstrom**

Im Gebäude werden mehrere Umwälzpumpen zum Betrieb der hydraulischen Kreisläufe eingesetzt. Vier davon werden dauerhaft gemessen. Diese vier Stromzähler sind Unterzähler des MSR-Stromverbrauchs, sie sind im Stromverbrauch MSR bereits enthalten.

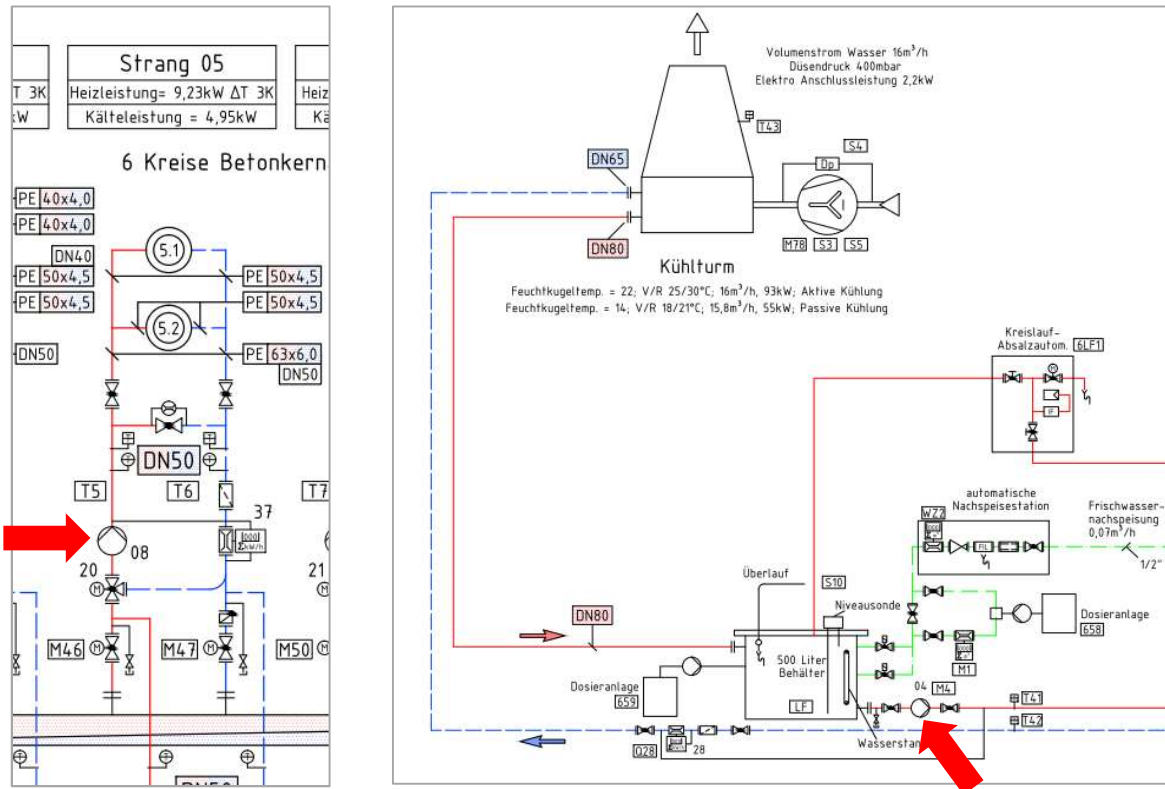
Gemessen werden die Pumpen:

- **Pumpe 1:** Kreislauf der gesamten Erdsonden bis zum Wärmeübertrager des 18 °C-Kühlkreises.<sup>3</sup>
- **Pumpe 4:** Kreislauf vom Kühlturm bis zum Wärmeübertrager des 18 °C-Kühlkreises. Mit dieser Pumpe wird gleichzeitig auch Abwärme aus der Kälteerzeugung der WP, welche im Gebäude nicht abgenommen wird, über den Umweg des 28 °C-Speichers dem Kühlturm zugeführt.
- **Pumpe 5:** Versorgung des 12 °C-Speichers (zwischen Wärmepumpe und Speicher)
- **Pumpe 8:** Umwälzpumpe für einen der sechs Kreisläufe der Betonkernaktivierung ("Strang 5") zur Kühlung und Heizung.

Für zwei der vier Pumpen kann mit dem jeweiligen Ausschnitt aus dem Hydraulikschema die Einbauposition verdeutlicht werden:

---

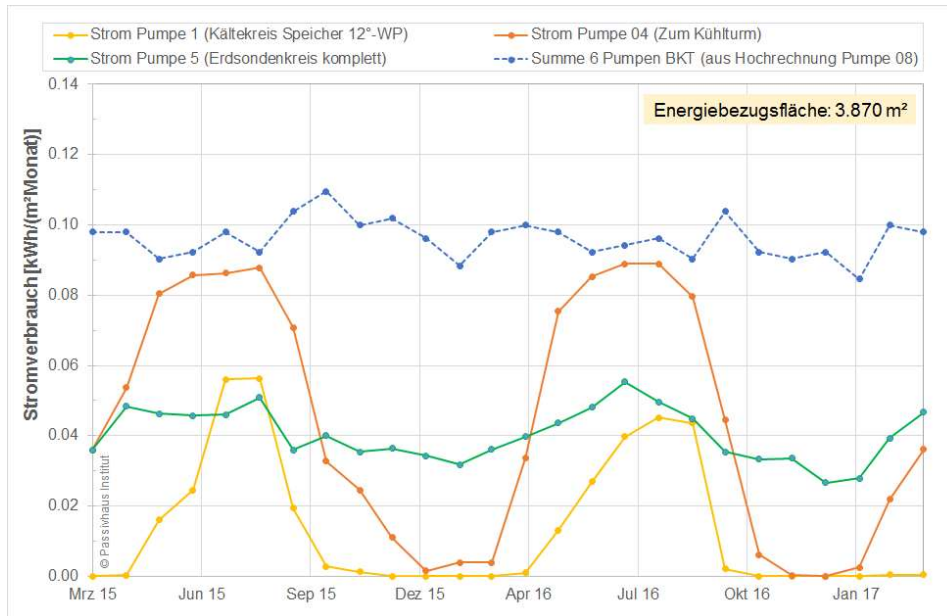
<sup>3</sup> Die Messwerte von Pumpe 1 und Pumpe 5 wurden gegenüber der Bezeichnung auf der GLT vertauscht, da es sich dort offensichtlich um eine fehlerhafte Zuordnung handelt.



**Abbildung 43:** Links: Ausschnitt aus dem Hydraulikschema von einem (Strang 5) der sechs Hydraulikkreise zur Betonkerntemperaturierung. Die Pumpe mit der Nr. 08 (Pfeil) versorgt diesen Strang zum Heizen und Kühlen. In diesem Kreis ist auch ein Wärmehähler ("37") montiert. Rechts: Ausschnitt aus dem Hydraulikschema vom Bereich des Kühlturms mit der Versorgungspumpe Nr. 04 (Pfeil) für diesen Kreislauf. Quelle Hydraulikschema: HLS Technisches Büro, Reiner Döring, Alsfeld

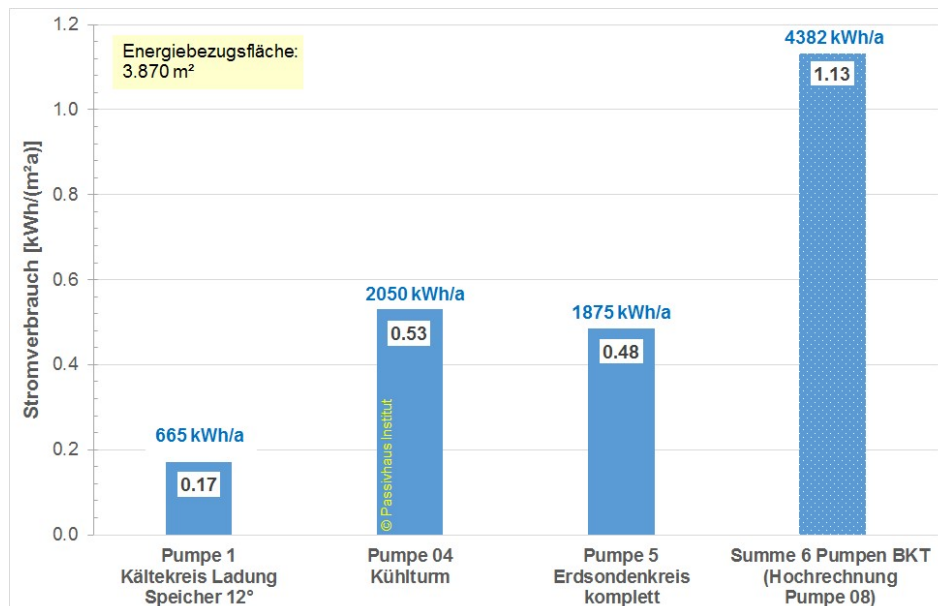
Der Stromverbrauch für alle sechs Kreisläufe der **Betonkernaktivierung** kann aus dem einen gemessenen Kreislauf (Strang 5, Pumpe 08) abgeschätzt werden: Dazu werden die Heiz- und Kühlauslegungsleistungen aus der Planung für jeden Kreislauf addiert und ins Verhältnis zur Leistungssumme von Strang 5 gesetzt. Mit diesen Anteilen wird der gemessene Stromverbrauch der Pumpe 08 multipliziert. Die Summe aus diesen hochgerechneten Energiemengen (347 bis 1.485 kWh/a) ist die Abschätzung für den Gesamtstromverbrauch für den hydraulischen Betrieb der BKT. Als Jahresgesamtsomme ergeben sich auf diesem Weg **4.382 kWh/a**, was **1,13 kWh/(m²a)** entspricht.

Der Monatsverlauf der Stromverbräuche der vier (bzw. inkl. Hochrechnung 9) Pumpen in Abbildung 44 zeigt unterschiedliches Verhalten im Zeitverlauf der Monate: Die Pumpe für die Speicherladung des 12 °C-Speichers (Nr. 1) und die für den Kühlturm (Nr. 04) zeigen deutliche Spitzen während der Sommerperioden aufgrund der sommerlichen Kälteversorgung. Bei der Pumpe für die Versorgung des Erdsondenkreises (Nr. 05) sind die Sommerspitzen weniger ausgeprägt; der Verbrauch verbleibt auch im Winter auf deutlich höherem Niveau, da die Erdsonden auch als Wärmequelle für die Heizung dienen. Die Summe der 6 Pumpen der Betonkernkreisläufe wird durchgängig ganzjährig mit nur geringen Schwankungen betrieben.



**Abbildung 44: Spezifischer Stromverbrauch der Umwälzpumpen der hydraulischen Kreisläufe im Monatsverlauf. Die Pumpen sind zum Betrieb des Gesamtgebäudes notwendig, daher wurde als Bezugsfläche die gesamte EBF angesetzt.**

Die Monatsverbräuche der Pumpen im 2. Auswertejahr schwanken zwischen 0 und 0,1 kWh/(m²Monat). Absolut entspricht das einem Jahresstromverbrauch von 665 bis 4382 kWh/a für die Einzelpumpen bzw. für den BKT-Bereich als Summe der 6 Pumpen. Die zugehörigen Werte sind Abbildung 45 zu entnehmen. Als Verbrauchssumme der dargestellten Pumpen ergibt sich ein Jahresstromverbrauch der Förderpumpen von 2,3 kWh/(m²a).

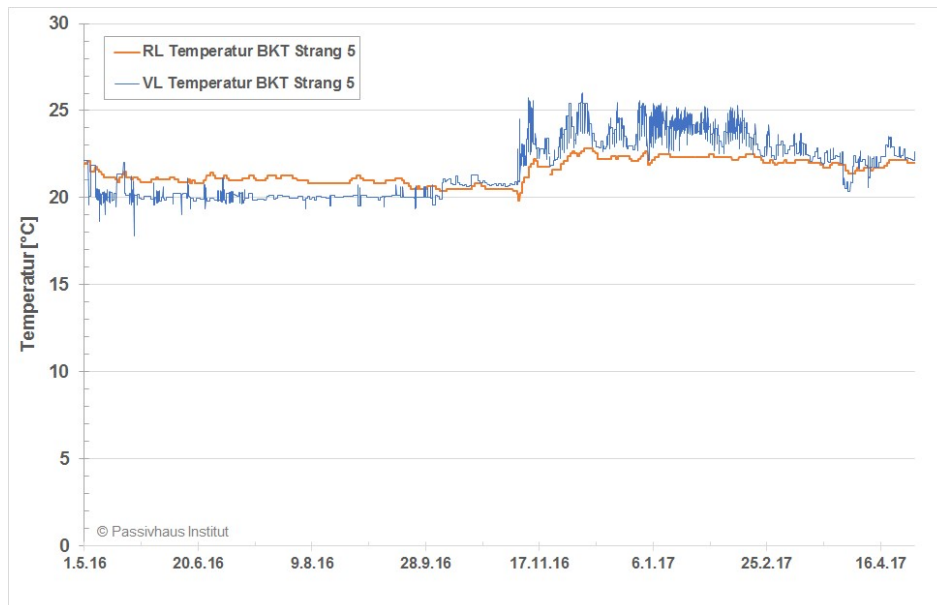


**Abbildung 45: Spezifischer und absoluter jährlicher Stromverbrauch der vier exemplarisch untersuchten Hydraulikpumpen (Jahr 2 / Mai 2016 bis April 2017).**

Die aufgezeichneten VL- und RL-Temperaturen des BKT Stranges 5 zeigt im 2. Messjahreszeitraum - wie zu erwarten - vom Sommer zum Winter eine Umkehrung der Temperaturdifferenzen



(Abbildung 46). Im Winter wird mit der BKT geheizt ( $VL > RL$ ) im Sommer dient sie zur Kühlung ( $VL < RL$ ). In der Planung wurde auf eine Temperaturspreizung von 3 K ausgelegt. Die Messung zeigt im Sommer eine Spreizung um etwa 1 bis 1,5 K und im Winter um 2 bis 3 K. Bei der Betrachtung des Stromverbrauchs im Zeitverlauf wird deutlich, dass die Umwälzpumpe 08 für den Strang dauerhaft betrieben wird; die BKT wird daher dauerhaft durchströmt. Es ist auch eine Regelung denkbar, welche die Betondecken auflädt und dann die Pumpe bis zum Erreichen einer Grenztemperatur (Raumluft) abschaltet. Damit würde der Stromverbrauch reduziert werden können.



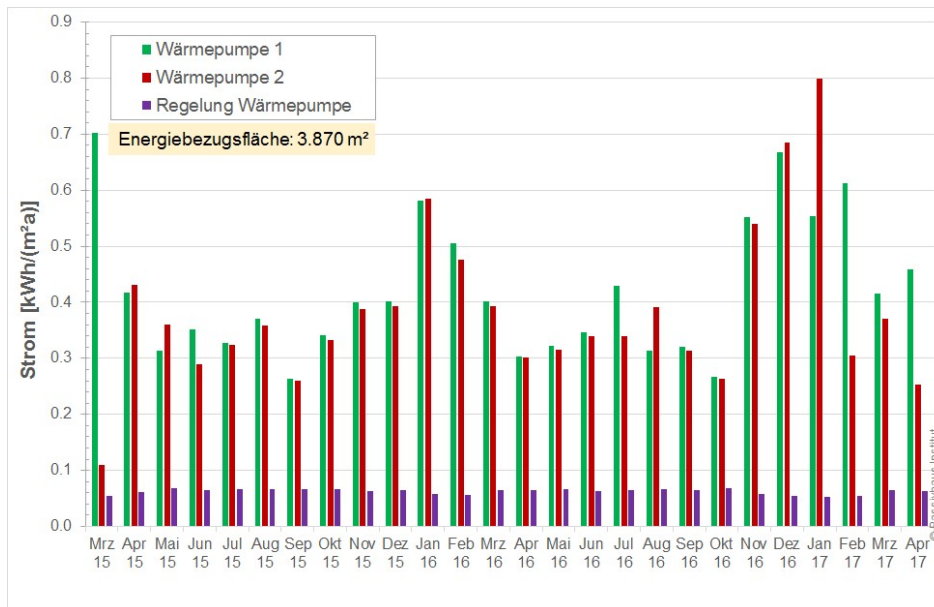
**Abbildung 46: VL- und RL-Temperaturen vom BKT Strang 5 im 2. Messjahr (Stundendaten)**

### Auswertung Wärmepumpe (WP)

Als einzige Wärmeversorgung des Gebäudes ist die Wärmepumpe (mit angeschlossenem Erdsondenfeld und Kühlturm) von besonderem Interesse. Das Speichermanagement (Steuerung Wärmepumpe, Ladung Pufferspeicher, Pumpen- und Ventilsteuerung sowie Steuerung Kühlturm) erfolgt durch die Wärmepumpensteuerung. Die Steuerung entscheidet, welche anlagenseitige Pumpe (P1, P05, P40) geschaltet und welches anlagenseitige Ventil bzw. Klappe (Motorklappen) verstellt wird. Das zugehörige Programm der Regelung ist für Nutzer, Betreiber und Monitoring-Team nicht transparent.

Der jährliche Gesamtstromverbrauch der Doppelanlage inkl. der Regelung wurde weiter oben in Abbildung 41 bereits dargestellt (9,8 bzw. 10,9 kWh/(m<sup>2</sup>a)). Der Verlauf der Monatsverbrauchswerte als Gesamtsumme beider Wärmepumpen inkl. Regelung wurde in Abbildung 42 dargestellt. Bei der Darstellung der monatlichen Einzelwerte je Wärmepumpe (Abbildung 47) zeigt sich, dass die beiden Geräte nicht immer gleich stark beansprucht werden. In vielen Monaten sind die Stromverbrauchswerte annähernd gleich groß, in einzelnen weichen sie auch deutlich voneinander ab. Zeitweise war eine Wärmepumpe ausgefallen oder in Revision, was die unterschiedlichen Laufzeiten und damit die unterschiedlichen Stromverbräuche verursacht. Die Jahresverbrauchswerte im 2. Jahr betragen 20.355 bzw. 19.019 kWh/a (entspricht **5,3 bzw. 4,9 kWh/(m<sup>2</sup>a)**). Der

Stromverbrauch der Regelung **inkl.** der internen Hydraulikpumpen (WW-Kreis mit dem 50 °C-Speicher, Ladung 28 °C-Speicher sowie beide Kreisläufe der Kaltseite) ist mit absolut fast 2.900 kWh pro Jahr nicht zu vernachlässigen (entspricht **0,74 kWh/(m<sup>2</sup>a)**).



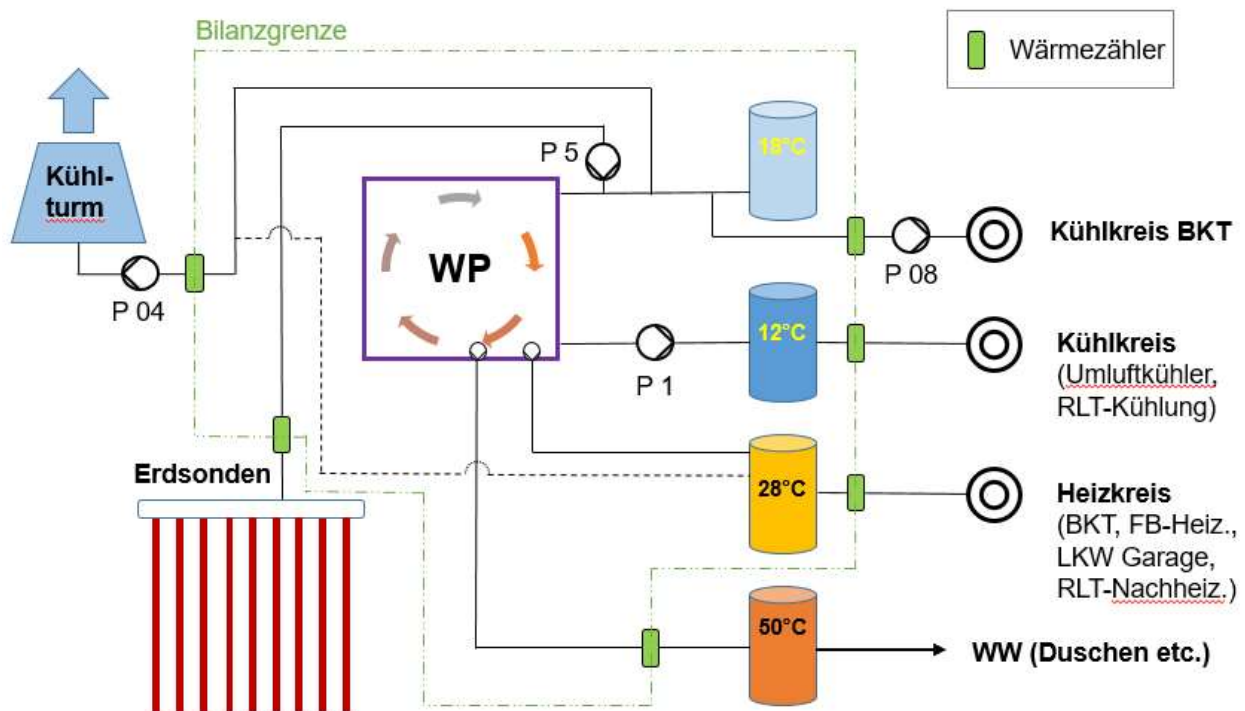
**Abbildung 47: Spezifischer Stromverbrauch der beiden Wärmepumpen und der zugehörigen Regelung im Monatsverlauf.**

Zur Bestimmung einer Jahresarbeitszahl der Wärmepumpen wären Wärmezähler für die gelieferten Energiemengen notwendig. Diese waren geplant, wurden vom Hersteller der Wärmepumpe allerdings nicht realisiert. Eine Nachrüstung im Rahmen des Monitorings konnte dem PHI bauseits aus rechtlichen Gründen nicht genehmigt werden. Aus diesem Grund müssen für eine Berechnung nun die vorhandenen Wärmezähler ausgewertet werden, welche die Speicher- und Rohrleitungsverluste beinhalten (Ausnahme: Warmwasser, hier nur die Rohrleitungsverluste, da vor dem Speicher gemessen wird), was zu einer unvermeidbaren Unschärfe führt.

Die Gebäudekühlung erfolgt z.T. auch direkt durch den Kühlturm und zusätzlich auch durch die Erdsonden, dann jeweils ohne den Betrieb der Wärmepumpe. Daher müssen von den Wärmemengen der vier Speicher (versorgt durch die WP) die Wärmemengen, welche im Kühlturm bzw. in den Erdsonden abgeführt werden, abgezogen werden (aber nicht die von den Erdsonden gelieferte Wärmemenge). Die sich damit ergebende Wärmemenge ist die, welche nur durch die WP erzeugt wird, wobei die WP teilweise Wärme und Kälte gleichzeitig liefert. Diese Nutzwärmemenge wird mit dem aufgewendeten Stromverbrauch ins Verhältnis gesetzt.

Zusätzlich wird der Stromverbrauch der Umwälzpumpen berücksichtigt, welche notwendig sind das System zu betreiben. Die im vorherigen Abschnitt dargestellten vier Hydraulikpumpen werden inkl. der beschriebenen Hochrechnung für die BKT-Kreise berücksichtigt (vgl. Abbildung 48). Die Pumpen zur Versorgung des 28 °C- und des 50 °C-Speichers ist bereits beim Wärmepumpenstrom "Regelung" enthalten. Nicht enthalten ist darin der Pumpenstrom zum Betrieb der 12 °C-

Kreisläufe nach dem Speicher (Umluftkühler und Nachheizregister RLT) sowie die Pumpe "P40" für den 18 °C-Kreislauf.



**Abbildung 48:** Stark vereinfachtes Hydraulikschema aus Abbildung 24 ergänzt um die vier vermessenen Umwälzpumpen. Pumpe 08 für die BKT ist nur eine von sechs Pumpen der Einzelkreise. Diese pumpen auch die Heizwärme aus dem 28 °C-Speicher in der BKT.

Bei der Untersuchung der **Arbeitszahlen der Wärmepumpe** für unterschiedliche Zeiträume wird als erstes ein Sommer/Winter-Unterschied deutlich: Im **Sommer** arbeitet die Wärmepumpe fast ausschließlich zur Warmwasserbereitung (Ladung des 50 °C-Speichers) sowie zur Ladung des 12 °C-Speichers. Die Bereitstellung der 18 °C-Kälte erfolgt in dieser Zeit überwiegend direkt über den Kühlturm und die Erdsonden, also ohne Nutzung der Wärmepumpe<sup>4</sup>. Damit wird, bis auf die Energie für die Förderpumpen, erfolgreich eine vorwiegend passive Wärmeabgabe aus dem Gebäude realisiert. Wird aus der gelieferten Energiemenge (Warmwasser, minimale Heizwärme und 12 °C-Kälte inkl. Speicherverluste) und dem Stromaufwand der WP eine Arbeitszahl berechnet, ergibt sich ein Wert von **3,2**. Naturgemäß ist diese sommerliche Betriebsweise energetisch nicht ganz so günstig wie im Winter, da die dem Verdichter zugeführte Energie kaum als Wärme nutzbar ist.

In der **Winterzeit** ergibt sich ein noch besseres Bild: Sobald eine nennenswerte Wärmeabnahme vorhanden ist, arbeitet die Wärmepumpe in der Hauptsache für die Wärmeerzeugung Heizung und für die Warmwasserbereitung (deutlich geringerer Umfang). Daneben erfolgt wie im Sommer die

<sup>4</sup> Durch den Betrieb der Wärmepumpe für die Warmwasserbereitung wird im Sommer auch Kälte an die 12 °C bzw. 18 °C-Speicher abgegeben (Kaltseite Wärmepumpenprozess)

Erzeugung der 12 °C-Kälte, was eine energetisch günstige Abnahme auf der Kaltseite des WP-Prozesses bedeutet. Über den Kühlturm und Erdsonden erfolgt im Kernwinter fast keine Kältebereitstellung bzw. Wärmeabfuhr. Die Bedingungen für den Betrieb der WP sind damit sehr günstig. Betrachtet man im 2. Bilanzjahr nur den Zeitraum, ab dem Heizwärme abgenommen wird (08. November 2016) bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes (30. April 2017) liegt die **Arbeitszahl bei 4,9**. Lässt man die Übergangszeit weg und betrachtet nur den Kernwinter bis Ende Februar 2017, liegt die Arbeitszahl sogar bei günstigen **5,1**. Bei dieser Berechnung werden die Energieerträge der Wärmepumpe (Heizung und Warmwasserbereitung) sowie die von der Wärmepumpe gelieferte Kälteenergie ins Verhältnis gesetzt zum Stromeinsatz der Wärmepumpe inkl. Regelung etc.

Für den Betrieb des Systems werden auch noch die Umwälzpumpen benötigt. Wird der Stromverbrauch der Umwälzpumpen (siehe oben "Pumpenstrom" in diesem Kapitel, inkl. Hochrechnung auf alle BKT-Stränge) ebenfalls berücksichtigt, sinken die Arbeitszahlen auf **4,6** (8.11.16 - 30.04.2017) bzw. **4,7** (8.11.16 - 28.2.2017). Dies sind noch immer recht gute Werte für den winterlichen Betrieb. Wenn man daraus - mit allen Ungenauigkeiten aufgrund der Messanordnung - eine Jahresarbeitszahl für das 2. Bilanzjahr abschätzt, ergibt sich ein Wert von 4,2 ohne Hilfsstrom der Pumpen, bzw. 3,5 unter Berücksichtigung des Hilfsstroms. Hier wird der Einfluss der ungünstigeren Sommermonate spürbar.

Die Jahresarbeitszahl des **Gesamtsystems des Gebäudes** ist zum Vergleich mit anderen Versorgungssystemen ebenfalls von Interesse. Darunter verstehen wir hier die gesamte gelieferte Energiemenge eines Bilanzjahres (alle vier Speicher) in Bezug auf den Stromeinsatz (Wärmepumpe plus Hilfsstrom, nicht berücksichtigt ist der Hilfsstrom des Kühlturms, der nicht gesondert gemessen wurde). Die Wärmemengen der Versorgungsseite (Erdsonden, Kühlturm) bleiben dabei unberücksichtigt. Bei dieser Betrachtung ergibt sich ein Jahreswert von  $JAZ_{System} = 5,4$ .

**Tabelle 4: Übersicht über die Arbeitszahlen der Wärmepumpe in unterschiedlichen Zeiträumen**

Zeitraum	Arbeitszahl (ohne Hilfsstrom)	Arbeitszahl (Hilfsstrom berücksichtigt)
Sommer 01.05.2016 bis 07.11.2016	3,2	2,8
Winter 08.11.2016 bis 30.04.2017	4,9	4,6
Kernwinter 08.11.2016 bis 20.02.2017	5,1	4,7
Jahr (1.5.2016 bis 30.04.2017)	4,2	3,5

## 7 Untersuchung der thermischen Behaglichkeit

### 7.1 Physikalische Behaglichkeits- und Bewertungsgrößen in Anlehnung an EN ISO 7730

Das Behaglichkeitsempfinden des Menschen wird von einer Reihe von Einzelfaktoren bestimmt. Dazu gehören sowohl physiologische Randbedingungen wie Geschlecht, Alter, Körperverfassung als auch intermediäre wie Kleidung und Tätigkeit und physikalische Parameter. Während die beiden Erstgenannten allein von der Person, ihrer Empfindung und Veranlagung abhängen, sind die physikalischen Bedingungen durch Messungen verschiedener physikalischer Parameter eindeutig darstellbar. Die endgültige Beurteilung der thermischen Behaglichkeit in Innenräumen setzt sich zusammen aus der subjektiven Bewertung und aus der Auswertung objektiver Parameter. Letztere sind Gegenstand des vorliegenden Berichtes. Eine weiter gehende Beschreibung der [ISO7730] und ihrer Parameter gibt [AkkP 25].

Der Mensch empfindet thermische Behaglichkeit, wenn sein Wärmehaushalt ausgeglichen ist. Das heißt, die durch den Stoffwechsel entstehende und die durch die Umgebung aufgenommene Wärme steht im Gleichgewicht mit der über Haut und Atmung abgegebenen Wärme. Der Körper verfügt über eine Reihe von Möglichkeiten auf Schwankungen z.B. der Lufttemperatur zu reagieren. Der Behaglichkeitsbereich beschreibt somit nicht einen einzelnen Zustand sondern einen Wertebereich in den mehrere Parameter einfließen:

- Lufttemperatur und Operative Temperatur
- Luftfeuchte
- Luftbewegung
- Temperaturasymmetrien

Je nach Erwartungsniveau an das Umgebungsklima werden drei Behaglichkeitskategorien unterschieden. Darin werden Grenzen für den Prozentsatz der statistisch mit dem Umgebungsklima Unzufriedenen (PPD, percentage of persons dissatisfied) und das vorausgesagte mittlere Votum (PMV, predicted mean vote) festgelegt. Kategorie A entspricht einem hohen Erwartungsniveau an das Umgebungsklima (max. 6 % Unzufriedene), Kategorie B beschreibt ein mittleres Anforderungsniveau (max. 10 % Unzufriedene) und Kategorie C weist mit max. 15 % Unzufriedenen ein gemäßigttes Niveau auf.



**Tabelle 5: Anforderungen für unterschiedliche Umgebungskategorien gemäß [ISO7730]**

Kategorie	Thermischer Zustand des Körpers insgesamt		Lokale Unbehaglichkeit				
	PPD [%]	PMV	DR	Vertikaler Temperatur-Unterschied <sup>5</sup>		Strahlungstemperatur-Asymmetrie (kühle Wand)	
			PD [%]	PD [%]	max. ΔT [K]	PD [%]	max. ΔT [K]
A	< 6	-0.2<PMV<+0.2	< 10	< 3	< 2	< 5	< 10
B	< 10	-0.5<PMV<+0.5	< 20	< 5	< 3	< 5	< 10
C	< 15	-0.7<PMV<+0.7	< 30	< 10	< 4	< 10	< 13

### Lufttemperatur und Operative Temperatur

Die operative Temperatur setzt sich aus der Raumlufttemperatur und der Strahlungstemperatur der raumumfassenden Oberflächen zusammen. Sie ist gleichzusetzen mit der physiologisch empfundenen Temperatur und daher für die Betrachtung der thermischen Behaglichkeit von besonderer Bedeutung. Es kann bei geringen Luftgeschwindigkeiten davon ausgegangen werden, dass die operative Temperatur das arithmetische Mittel beider Größen bildet [EN ISO 7730]:

$$t_o = 0,5 \cdot (t_a + t_r)$$

mit  $t_a$  = Lufttemperatur [°C]  
 $t_r$  = Strahlungstemperatur [°C]  
 $t_o$  = Operative Temperatur [°C]

Nach [EN ISO 7730] Kategorie A, wird für den Winterfall eine operative Temperatur von 22 °C ±1 °C (leichte und hauptsächlich sitzende Tätigkeit) empfohlen, mit einer Spanne von 22 °C ±2 °C für die Kategorie B.

Daneben bildet sich je nach thermischer Eigenschaft der Hüllflächen und Art der Beheizung im Raum eine Temperaturschichtung. Nach [EN ISO 7730] kann anhand der vorhandenen Temperaturdifferenz zwischen Kopf und Fußgelenk ein Prozentsatz Unzufriedener abgeleitet werden. Für ein gutes Raumklima wird dieser nach Kategorie A auf 5 % bzw. 2 K begrenzt. Neben der vertikalen Temperaturschichtung herrscht in Räumen mit Außenwänden auch eine Strahlungstemperatur-Asymmetrie. Diese ergibt sich aus dem Temperaturunterschied zwischen dem warmen Innenbereich zur kälteren Außenwand. Bei ungedämmten Altbauten und thermisch ungenügenden Fenstern ist diese Temperaturdifferenz sehr hoch, sie sinkt aber mit steigender Qualität der Außenhülle ab. Für ein hohes Anforderungsniveau wird eine maximale Temperaturdifferenz von weniger als 10 K gefordert.

<sup>5</sup> Vertikaler Temperaturunterschied zwischen Knöchelhöhe und Kopfhöhe einer sitzenden Person (0,1 und 1 m über Fußboden)

## Luftfeuchte

Luft kann in Abhängigkeit ihrer Temperatur eine gewisse Menge Wasserdampf binden. Die relative Feuchte setzt den vorhandenen Dampfdruck ins Verhältnis zum Sättigungsdampfdruck bei gleicher Temperatur. Nach [EN ISO 7730] sollte die relative Feuchte zwischen 30 und 70% liegen.

## Luftbewegung

Neben der empfundenen Raumtemperatur und der relativen Luftfeuchte, die den thermischen Zustand des Körpers insgesamt beeinflussen gibt es noch eine Reihe weiterer Faktoren, die zu einer lokalen Unbehaglichkeit führen können. Dazu zählt neben den oben genannten Effekten die Luftgeschwindigkeit. Die zulässige Luftgeschwindigkeit hängt ab von der Turbulenz und der Temperatur. Je höher der Turbulenzgrad (kurzzeitige Schwankung der Luftgeschwindigkeit) ist, desto geringer ist die zulässige mittlere Luftgeschwindigkeit. Je wärmer die Luft ist, desto größer die Akzeptanz einer höheren mittleren Geschwindigkeit. Bei insgesamt sehr geringen Luftgeschwindigkeiten kann, wie hier geschehen, auf die messtechnisch aufwändige detaillierte Erfassung des Turbulenzgrades verzichtet werden (vergl. Abbildung). Die sehr geringe mittlere Luftgeschwindigkeit selbst stellt dann das relevante Maß der Behaglichkeit dar, eine Angabe zur Streuung der Messwerte wird durch die Darstellung von Maxima und Minima erreicht.

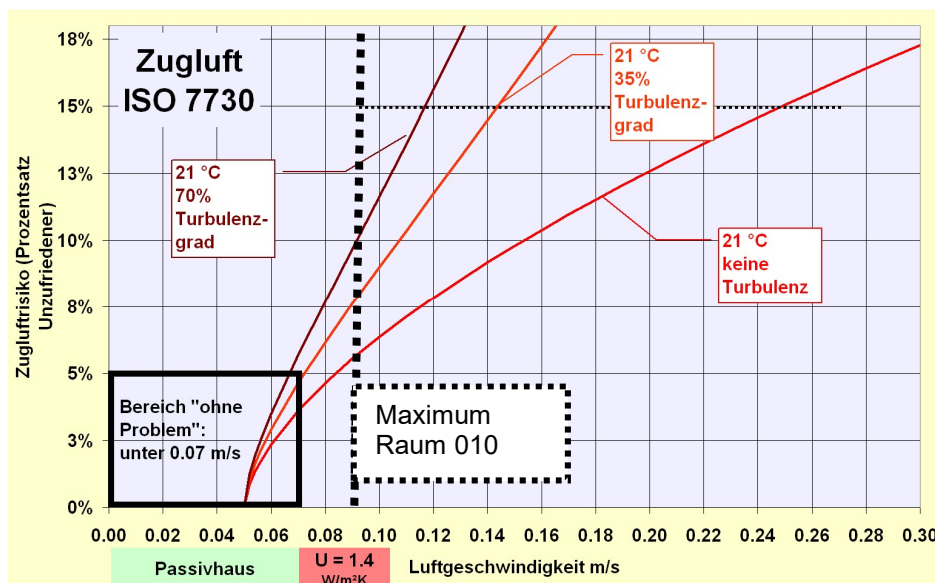


Abbildung 49: Abhängigkeit des PPD von der Luftgeschwindigkeit [AkkP25]; Der Turbulenzgrad verliert bei Luftgeschwindigkeiten unter ca. 0,07 m/s seinen Einfluss

## Bewertung der Ergebnisse

Die Bewertung der Behaglichkeitsparameter wird anhand der [EN ISO 7730] durchgeführt. Darin wird ein Verfahren zur Ermittlung einer statistisch erwarteten mittleren Bewertung durch eine größere Zahl von Individuen sowie der erwartete Prozentsatz mit der Umgebung unzufriedener Personen beschrieben.

## Predicted Mean Vote (PMV)

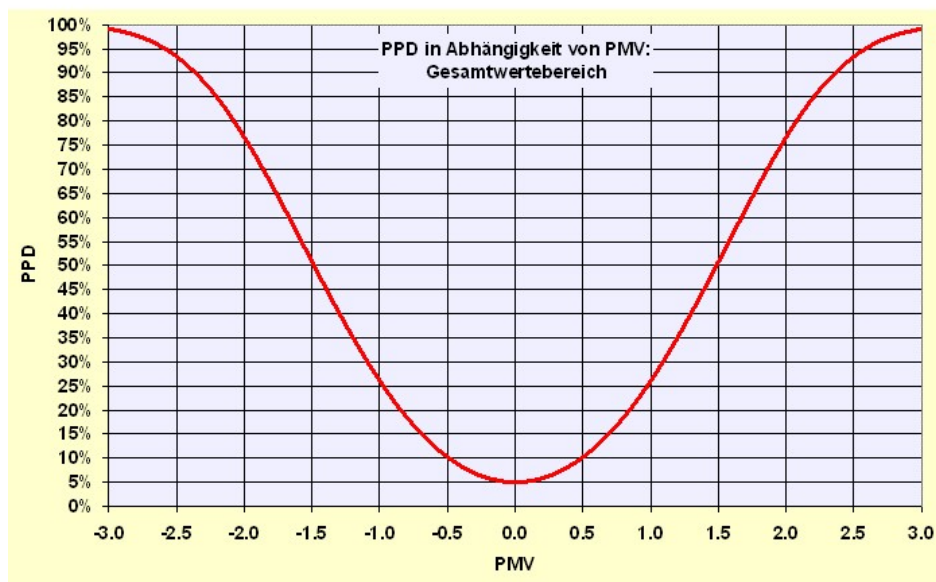
Das vorausgesagte mittlere Votum (PMV) beschreibt den Durchschnittswert für die Klimabewertung durch eine große Personengruppe. Das heißt, setzt man eine große Anzahl von Personen

einem vorgegebenen Raumklima aus, befragt diese nach ihrem Urteil und bildet den Durchschnittswert aller Beurteilungen, so erhält man das PMV. Die Bewertung erfolgt in sieben Schritten:

**Tabelle 6: Beurteilungsskala PMV**

+3	heiß
+2	warm
+1	etwas warm
0	neutral
-1	etwas kühl
-2	kühl
-3	kalt

Neben den physikalischen Größen Luft- und Strahlungstemperatur, Raumluftheuchte und Luftgeschwindigkeit fließen hier auch intermediäre Faktoren wie Bekleidung und Tätigkeitsgrad ein. Bei Ermittlung des PMV werden diese Faktoren als konstant angesetzt. Nur so kann eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse erreicht werden. Reale Nutzer werden freilich von diesem Ideal abweichen, verschiedene individuelle Gewohnheiten bzgl. des Tätigkeitsgrades und der Bekleidung werden somit nicht berücksichtigt.



**Abbildung 50:** Nach der [EN ISO 7730] wird für uneingeschränkten Komfort der Kategorie A ein PMV von +0.2 bis -0.2 gefordert. In Kategorie B noch zulässig ist jeweils ein maximales PMV von  $\pm 0.5$  [AkkP 25]

### Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)

Der vorausgesagte Prozentsatz Unzufriedener (PPD) gibt Auskunft über die Anzahl der Personen die das vorgefundene Umgebungsklima wahrscheinlich zu warm oder zu kalt empfinden und

ermöglicht so eine quantitative Vorhersage der Anzahl der mit einem vorgegebenen Klima unzufriedenen Menschen. Analog zum PMV wird in der [EN ISO 7730] für ein optimales Raumklima ein PPD von maximal 6 % empfohlen, was dem oben genannten PMV von +0.2 bis -0.2 entspricht.

Um die Verfahren des PMV und PPD sicher anwenden zu können sollten die Hauptparameter innerhalb gewisser Grenzen liegen. In Tabelle 7 sind die wichtigsten Grenzwerte zusammengestellt:

**Tabelle 7: Grenzwerte für die Anwendung des PMV**

Lufttemperatur	10 bis 30 °C
mittlere Strahlungstemperatur	10 bis 40 °C
relative Feuchte	30 bis 70 %
Luftgeschwindigkeit	0 bis 1 m/s

Die genannten Einsatzgrenzen sind in dem hier untersuchten Objekt weit gehend gegeben, lediglich bei der relativen Raumlufffeuchte gibt es Unterschreitungen des Bereiches.

### **Raumlufffeuchte**

Das Anpassungsvermögen des Menschen an hohe oder niedrige Raumlufffeuchte ist sehr groß. Über den Bereich der physiologisch als „angenehm“ empfunden wird, gibt es aber keine eindeutigen Erkenntnisse. Als Richtwert für die Bandbreite der empfehlenswerten Raumlufffeuchten können hier die Werte der [EN ISO 7730] mit 30 bis 70% angesetzt werden. Neben der reinen Behaglichkeitsbetrachtung hat die Raumlufffeuchte indirekt Einfluss auf die Luftqualität.

Sowohl sehr geringe als auch sehr hohe relative Luftfeuchten können direkt oder indirekt zu erhöhtem Risiko gesundheitlicher Beschwerden führen. Dauerhafte Exposition gegenüber sehr trockener Luft (< 25 %) kann bei empfindlichen Personen zu Schleimhautreizungen und trockener Haut führen [Pfluger 2014]. Bei einer relativen Luftfeuchte unterhalb von 30 % steigt zudem die Staubbelastung, da Staubteilchen weniger stark agglomerieren und sich länger im Schwebestand halten. Hohe Raumlufffeuchte (ab 60 %) kann zu vermehrtem Milbenwachstum führen. Zur Reduzierung der Belastung durch Milben werden von Medizinern relative Feuchten unterhalb von 50% empfohlen [Oettl 2003].

Grund für das Auftreten geringer Raumlufffeuchte im Winter ist in der Regel ein überhöhter Luftwechsel, insbesondere in Gebäuden mit nur geringem Feuchteaufkommen, etwa Schulen und Bürogebäuden. Umgekehrt kann eine erhöhte Raumlufffeuchte häufig mit ungenügendem Luftwechsel erklärt werden. Dies wird im unzureichend sanierten Wohnungsbau ohne mechanische Lüftung häufig angetroffen.

## 7.2 Behaglichkeitsmessungen Winter 2016/2017

Im Rahmen des Monitoring-Projektes wurden 4 Räume des Dienstgebäudes näher untersucht.

**Tabelle 8: Charakterisierung der exemplarisch untersuchten Räume**

Raum 010	Erdgeschoss, Büroraum, 1 Lochfenster mit Brüstung ca. 1m, erhöhte Wärmeverluste durch Wärmebrücke im Sockelbereich der Außenwand; im Untersuchungszeitraum nur wenig intensiv genutzt
Raum 201	2. Obergeschoss, Büroraum, stark exponierter Eckraum mit zwei Außenecken und 2,5 Außenwänden, 4 Lochfenster mit Brüstung ca. 0,3m und ein über Eck angeordneter Bereich Pfosten-Riegel Fassade mit thermisch ungünstig ausgebildetem Scheibenstoß; im Untersuchungszeitraum von zwei Personen genutzt
Raum 229	2. Obergeschoss, Büroraum, Eckraum, 2 Lochfenster mit Brüstung ca. 0,3m; im Untersuchungszeitraum von einer Personen genutzt
Raum 233	2. Obergeschoss, Büroraum, Eckraum, 1 Lochfenster mit Brüstung ca. 0,3m; im Untersuchungszeitraum von einer Personen genutzt

Es handelt sich durchweg um Räume, die hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit relativ ungünstige Eigenschaften, wie etwa mehr als eine Außenwand oder aber potenzielle Wärmebrücken aufweisen. Die Räume im Erdgeschoss und im zweiten Obergeschoss grenzen zudem am Boden bzw. an der Decke an den Außenraum. In den übrigen Räumen mit nur einer Außenwand können daher noch günstigere Bedingungen erwartet werden.

### Durchführung der Messung

Zur Ermittlung der operativen Raumtemperatur, der Strahlungstemperatursymmetrie und der Luftgeschwindigkeit wurde in allen Räumen eine ca. 30-minütige Messung durchgeführt. Hierzu wurde ein Messstativ zusammengestellt, das mit Sensoren für die genannten Größen bestückt wurde (siehe Abbildung 51). Die Räume waren während der Messung nicht von Personen belegt, um die Messgrößen von Nutzungseinflüssen frei zu halten. Die Lüftungsanlage war eingeschaltet um die wesentliche Quelle möglicher Zugscheinungen in die Betrachtung einzuschließen.

Dabei wurde das Messstativ in der Nähe der Außenwand vor dem Fenstern aufgebaut. Diese Position hat den Vorteil, dass bei der Messung der Strahlungstemperatursymmetrie einmal der Bereich der kälteren Außenwand und einmal der Bereich der wärmeren Innenwände und Decken erfasst wird. Das Gerät wurde so eingestellt, dass sich der Sensor nach der Hälfte der Messzeit eigenständig dreht.





**Abbildung 51: Messstativ mit Globethermometer, Psychrometer, Thermoanemometer, Temperaturfühler und Pygeometer während der Messung eines Büroraumes.**

Zur Ermittlung der für die Behaglichkeit relevanten Parameter wurden nachfolgend beschriebene physikalischen Größen gemessen und aufgezeichnet.

**Tabelle 9: Messsensoren und -daten**

Parameter	Sensor	Position/ Ort	Datenaufzeichnung	Messdauer
Lufttemperatur	Temperaturfühler (NTC/PT100)	Augenhöhe einer sitzenden Person (ca. 1,10m) Knöchelhöhe (ca. 0,10m)	1 min <sup>-1</sup> Minutenmittelwert	ca. 30 min
Rel. Luftfeuchte	Psychrometer	Augenhöhe einer sitzenden Person (ca. 1,10m)	1 min <sup>-1</sup> Minutenmittelwert	ca. 30 min
Strahlungstemperatur	Globethermometer (PT100)	Augenhöhe einer sitzenden Person (ca. 1,10m)	1 min <sup>-1</sup> Minutenmittelwert	ca. 30 min
Luftgeschwindigkeit	Thermoanemometer	Knöchelhöhe (ca. 0,10m)		ca. 30 min
Thermographieaufnahmen	Thermographiekamera	Wandoberflächen		
Strahlungstemperaturasymmetrie	Pygeometer	Augenhöhe einer sitzenden Person (ca. 1,10m)	1-4 Stk	ca. 30 min (2 * 10 min)

### 7.3 Wetter zum Zeitpunkt der Behaglichkeitsmessungen

Die Messungen zur thermischen Behaglichkeit wurden am Nachmittag des 23.01.2017 durchgeführt. An diesem Tag herrschte kaltes, trübes und strahlungsarmes Winterwetter. Die mittlere Außenlufttemperatur betrug ca.  $-4.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Eine ausreichend große Temperaturdifferenz zwischen Innenraum und Außenluft war gegeben. Die Innenraumtemperatur betrug in allen Räumen ca.  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  (2. OG) bzw.  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$  (EG).

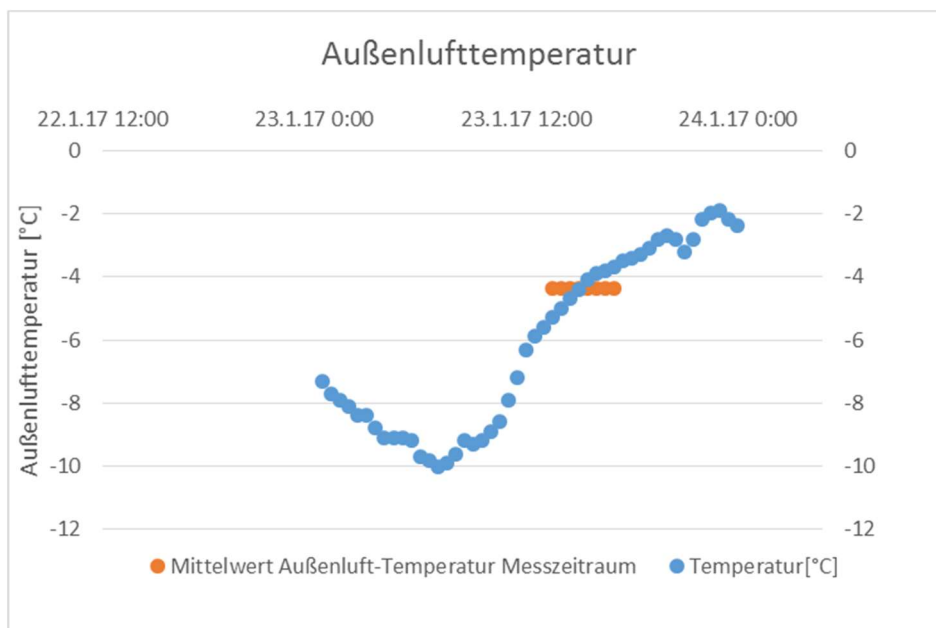


Abbildung 52: Außenlufttemperatur im zeitlichen Umfeld der Behaglichkeitsmessung am 23.01.2017.

Die Globalstrahlungsintensität auf die Horizontale erreichte zum Mittag ein Maximum von  $36\text{ W/m}^2$  und ging im Lauf des Nachmittags langsam zurück. Eine Beeinflussung der Messergebnisse durch Sonneneinstrahlung ist damit sehr gering. Zum Vergleich: ein sonniger, klarer Wintertag würde ein mittägliches Maximum um  $200\text{ W/m}^2$  aufweisen.

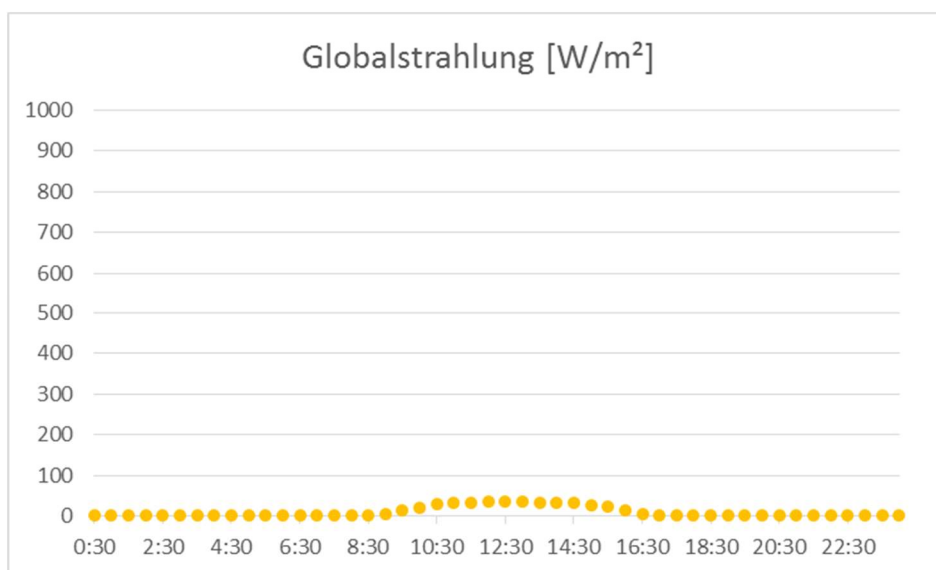


Abbildung 53: Globalstrahlung im zeitlichen Umfeld der Behaglichkeitsmessung am 23.01.2017.

## 7.4 Ergebnisse und Auswertung

### Operative Temperatur

Die Abbildung zeigt eine Übersicht der in den untersuchten Räumen angetroffenen operativen Temperatur sowie den Mittelwert dieser mutmaßlich ungünstigsten Räume. Die Anforderung von  $22\text{ °C} \pm 1\text{ K}$  wird in allen Räumen des zweiten Obergeschosses eingehalten (Kategorie A), während im Erdgeschoss eine etwas geringere Temperatur vorgefunden wurde, entsprechend Kategorie B oder  $22\text{ °C} \pm 2\text{ K}$ .

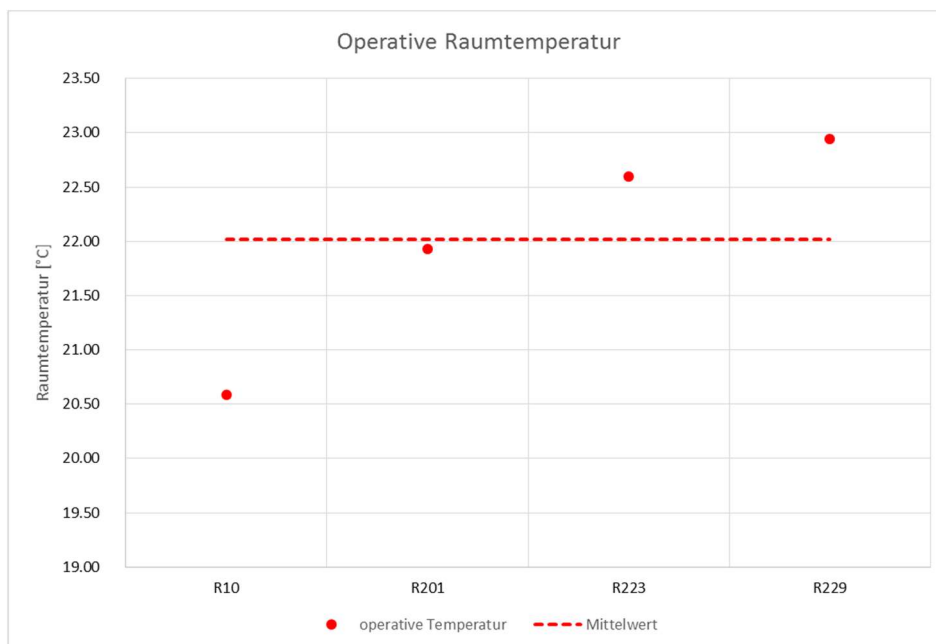


Abbildung 54: Operative Raumtemperaturen und Mittelwert

### Temperaturschichtung

Der Temperaturunterschied zwischen Knöchelhöhe und Kopfhöhe einer sitzenden Person ist in der folgenden Abbildung für alle Räume dargestellt. Wie für ein gut wärmedämmtes und luftdichtes Gebäude zu erwarten ist in allen Fällen die angetroffene Temperaturschichtung außerordentlich gering. Selbst der Maximalwert von ca. 0,4 K in dem Erdgeschossraum ist unbedenklich.

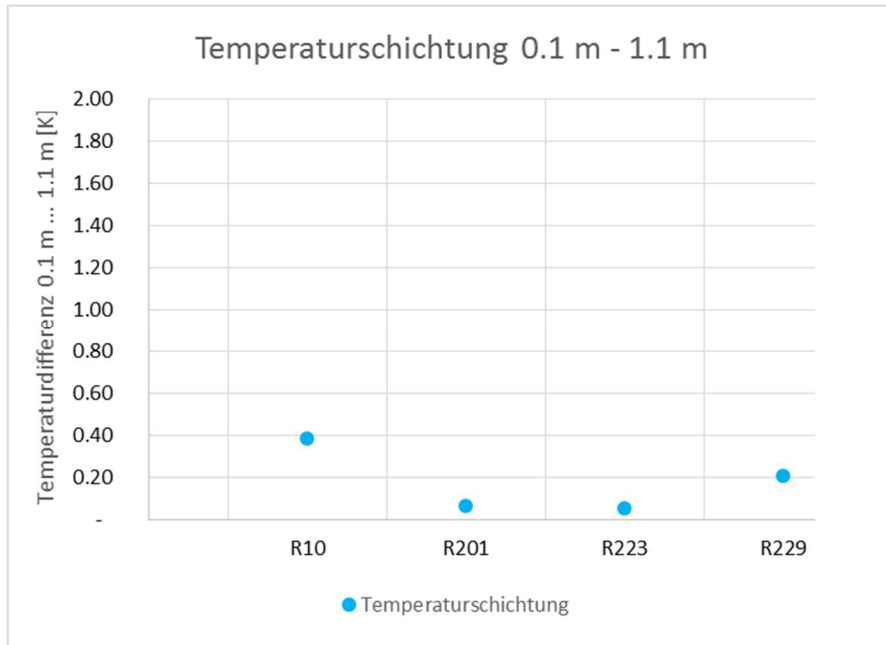


Abbildung 55: Temperaturdifferenz zwischen Knöchelhöhe und Kopfhöhe einer sitzenden Person.

### Strahlungstemperatur-Asymmetrie

Bei der Strahlungstemperaturasymmetrie wird die Differenz zwischen den warmen Innenwänden und –Decken zu der kälteren Außenwand gemessen. Sind die Werte positiv, so sind die zur Außenluft orientieren Bauteile wie Fenster und Wände kälter als die Innenbauteile, sind die Werte negativ, so sind die Außenbauteile wärmer. Die Abbildung zeigt die Messergebnisse für die untersuchten Räume im Vergleich zu der noch über Kategorie A ISO 7730 hinausgehenden Anforderung von 4,0 K. Diese wird mit großem Abstand in allen Räumen eingehalten, es herrscht jeweils ein sehr homogenes Temperaturfeld vor.

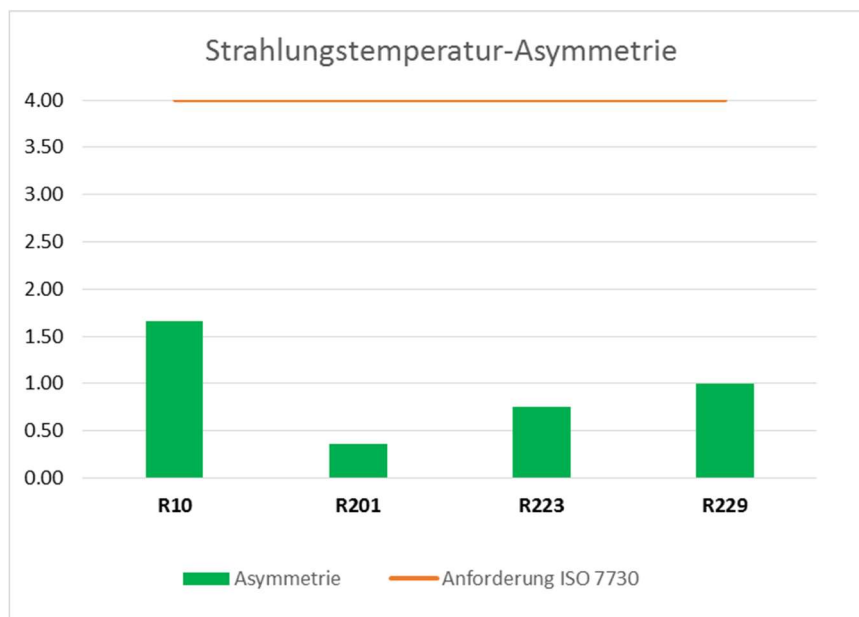


Abbildung 56: Strahlungstemperatur-Asymmetrie

## Relative Luftfeuchte

Die Parameter Raumlufttemperatur und relative Raumluftfeuchte sind in der folgenden Darstellung aufgetragen. Die Raumlufttemperatur ist bereits in die Bestimmung der operativen (empfundene) Temperatur eingeflossen und uneingeschränkt im optimal behaglichen Bereich.

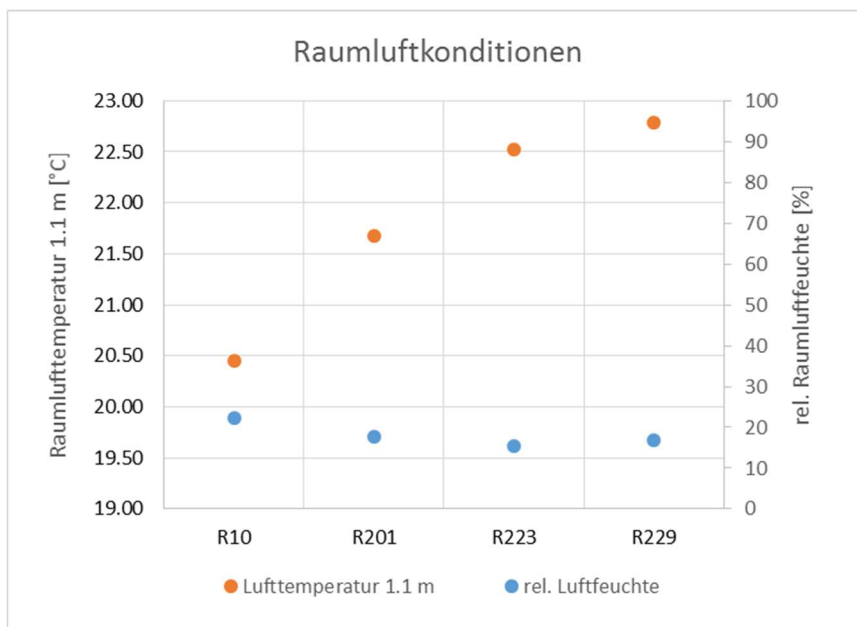


Abbildung 57: Relative Luftfeuchte und Lufttemperatur in 1,1 m Höhe.

Die angetroffenen relativen Luftfeuchten sind gering und unterschreiten die Empfehlung von 30 % r.F. als Mittelwert über längere Perioden. Dies deutet auf einen überhöhten Luftwechsel und geringe Feuchtequellen hin, verschärft durch die Kälteperiode zum Messzeitpunkt geringe absolute Außenluftfeuchte. Vergl. hierzu das folgende Kapitel zur Gebäudelüftung.

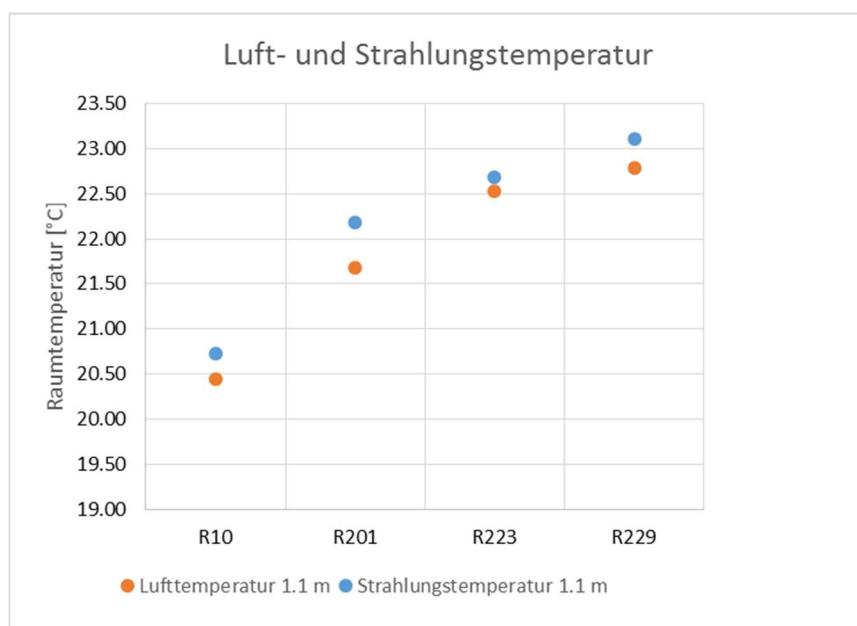


Abbildung 58: Vergleichende Darstellung von Luft- und Strahlungstemperatur mit durchweg geringer Differenz



Die Feststellung eines sehr homogenen Temperaturfeldes wird zudem durch die durchweg nur geringen Unterschiede zwischen Luft- und Strahlungstemperatur in den untersuchten Räumen gestützt. Die Maximale Differenz im Raum 201 beträgt 0,5 K.

### Luftgeschwindigkeit

Die gemessenen mittleren Luftgeschwindigkeiten, dargestellt für alle Räume in der folgenden Abbildung, sind sehr gering. In allen Räumen wurden 0,1 m/s auch in den Spitzenwerten unterschritten. Die Mittelwerte lagen unterhalb von 0,07 m/s. Jede Beeinträchtigung des thermischen Komforts durch Luftbewegungen kann auf dieser Grundlage ausgeschlossen werden; auf eine separate Betrachtung des Turbulenzgrades wurde daher verzichtet.

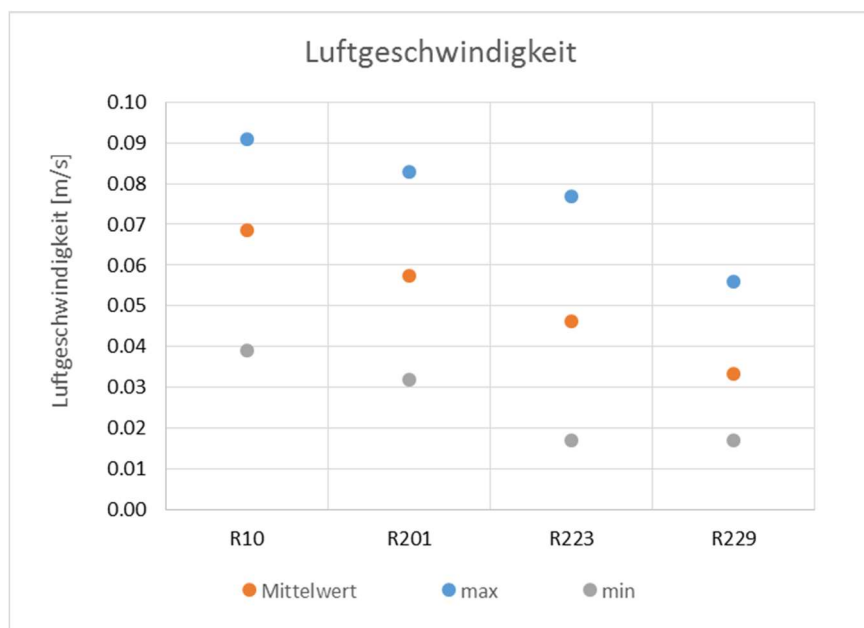
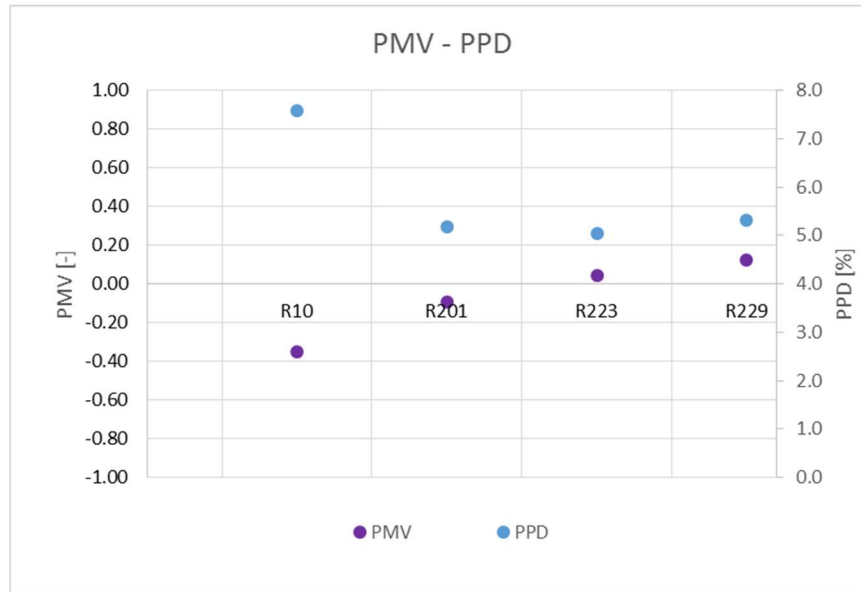


Abbildung 59: Maximale, mittlere und minimale Luftgeschwindigkeit

### PMV und PPD

Aus den oben dargestellten Einzelparametern können die zusammenfassenden Bewertungs-Indizes PMV und PPD abgeleitet werden. Diese sind in der folgenden Grafik zusammengestellt. Hierbei wurde von einem büroüblichen Aktivitätsgrad von 1,2 met und einer an die herrschenden Wetterbedingungen angepassten winterlichen Bekleidung von 1,0 clo ausgegangen.



**Abbildung 60: PMV und PPD bei einem Isolationswert der Bekleidung von 1,0 clo und einer Metabolismusrate von 1,2 met.**

In allen Räumen des zweiten Obergeschosses wird die optimale Behaglichkeit nach Kategorie A erreicht, das PMV liegt deutlich unterhalb eines Betrages von 0,2. Wie eingangs festgestellt kann für die weniger stark exponierten Räume des zweiten Obergeschosses und sämtliche Räume des ersten Obergeschosses ein noch geringeres PMV erwartet werden. Die Bedingungen auf ca. 90 % der beheizten Gebäudefläche bieten damit auch unter schärfsten Anforderungen ein optimales Umgebungsklima. Lediglich in dem Erdgeschossraum wird die Kategorie A verfehlt. Der thermische Komfort erfüllt hier das Kriterium für Kategorie B. Das noch zulässige PMV von  $\pm 0,5$  wird mit einem Wert von -0,35 allerdings deutlich unterschritten. Der PPD ist gegenüber Kategorie A ( $PPD \leq 6$ ) nur leicht auf 7,6 erhöht. Unter Berücksichtigung der wenig intensiven Nutzung des Raumes (geringe interne Wärmequellen) ist dies ein gutes Ergebnis. Eine optimierte Ansteuerung der Betonkerntemperatur für diesen Bereich sollte untersucht werden und könnte die thermische Behaglichkeit bei Bedarf noch verbessern.

## 8 Untersuchung des Lüftungssystems

### 8.1 Systembeschreibung und Zentralgerät

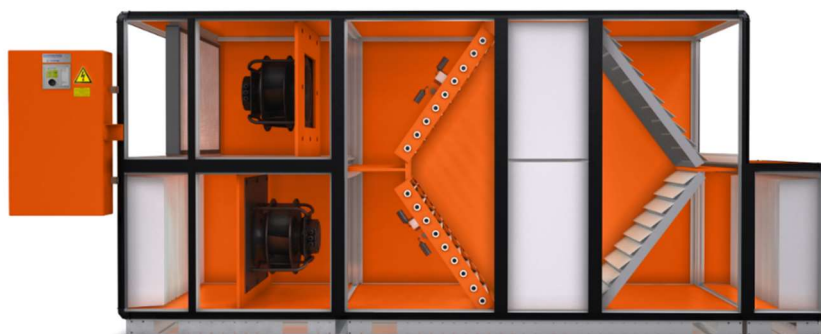
Wie für Passivhäuser im kühl-gemäßigten Klima üblich verfügt das Dienstgebäude über eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Gewählt wurde ein einzelnes, zentrales System, angeordnet in einem Technikraum im obersten Geschoss. Dies ermöglichte die Anbindung von Außen- und Fortluft auf kürzestem Weg über Dach. Bei dem Zentralgerät handelt es sich um den Typ Resolair 640701 des Herstellers Menerga mit einer maximalen Luftleistung von 7.500 m<sup>3</sup>/h. Für das Projekt wurde eine Auslegungs-Luftmenge von 4.200 m<sup>3</sup>/h geplant, wobei durch Einzelraum-Regelung zumeist ein deutlich geringerer Volumenstrom zu erwarten war. Außerhalb der Nutzungszeit, nachts und an Wochenenden, wurde eine geregelte Abschaltung mit vorgeschalteter Filtertrocknung vorgesehen.

Für das Gerät liegen aus der Zertifizierung als Passivhaus-Komponente Kennwerte zur energetischen Leistungsfähigkeit vor, die mit realitätsnahen Randbedingungen ermittelt wurden. Diese wurden in der Energiebilanzierung mit dem Passivhaus-Projektierungspaket (PHPP) zu Grunde gelegt. Die wesentlichen Werte sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

**Tabelle 10: Zentrale Kennwerte des eingesetzten Lüftungsgerätes gemäß Zertifizierung als Passivhaus-Komponente**

Typ, Hersteller	Resolair 640701, Menerga
Wärmebereitstellungsgrad	$\eta_{WRG,eff} \geq 86 \%$
Elektroeffizienz	$P_{el} \leq 0,45 \text{ Wh/m}^3$ (@ 4200 m <sup>3</sup> /h)
bei externer Pressung von	316 Pa (incl. Filter-Druckverlust)
Verfügbare externe Pressung	281 Pa
Automatische Volumenstrombalance	vorhanden

Das Gerät arbeitet auf regenerativer Basis unter Verwendung von zwei fest stehenden Wärmespeicher-Blöcken. Der Luftweg wird durch Jalousieklappen zyklisch alle 60-90 Sekunden umgeschaltet. Durch Vorgabe längerer Zykluszeiten kann die Wärmerückgewinnung bei Bedarf reduziert werden, vergleichbar der Wirkung einer Bypassklappe an einem Platten-Wärmeübertrager. Die Abbildung illustriert den Aufbau des Gerätes beispielhaft.



**Abbildung 61: Lüftungsgerät vom Typ Resolair geöffnet (Abbildung: Hersteller)**

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung war u.a. zu klären, ob die Prüfstandswerte im Rahmen einer Feldmessung bestätigt werden können oder ob größere Abweichungen auftreten. Diese Frage ist von hoher Relevanz für die verlässliche Auslegung des Wärmeschutzes von Passivhäusern und damit die Planung von Folgeobjekten. Hierzu standen aufgezeichnete Messwerte aus der Gebäudeleittechnik zur Verfügung, weiterhin Werte aus dem Monitoring-System und zusätzlichen Vertiefungsuntersuchungen, die nachfolgend nach Themenfeldern aufgearbeitet werden.



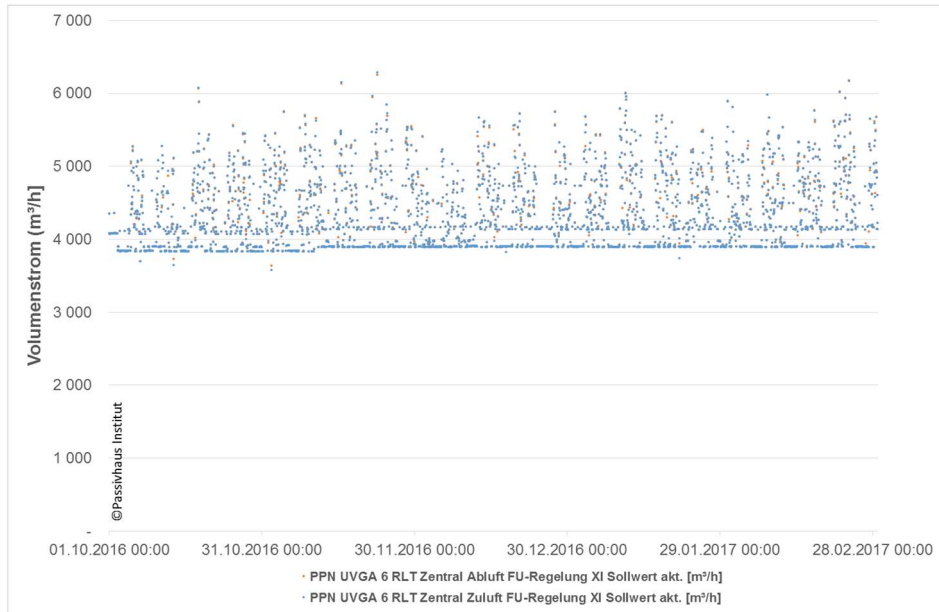
**Abbildung 62:** Das Lüftungsgerät während der Bauphase, links oben der Fortluftkanal über Dach, rechts oben im Hintergrund der Außenluftkanal über Dach.

### Elektrische Effizienz

Um eine hohe Wärmerückgewinnungs-Leistung bei geringem Stromverbrauch zu gewährleisten wird im Rahmen der Geräte-Zertifizierung durch das Passivhaus-Institut die spezifische elektrische Förderleistung begrenzt. Da das bauseitige Kanalnetz mit seinen Druckverlusten einen wesentlichen Bestandteil des Gesamtsystems darstellt, wird ein maximal zulässiger Wert als Planungsinformation mitgegeben. In dem vorliegenden Fall sollte dieser externe Druckverlust maximal 280 Pa betragen um den Grenzwert für die spezifische elektrische Förderleistung von 0,45 Wh/m<sup>3</sup> einhalten zu können. Diese Information wurde für den Planungsprozess in einem Pflichtenheft niedergelegt und ein Zielwert von 200 Pa festgeschrieben.

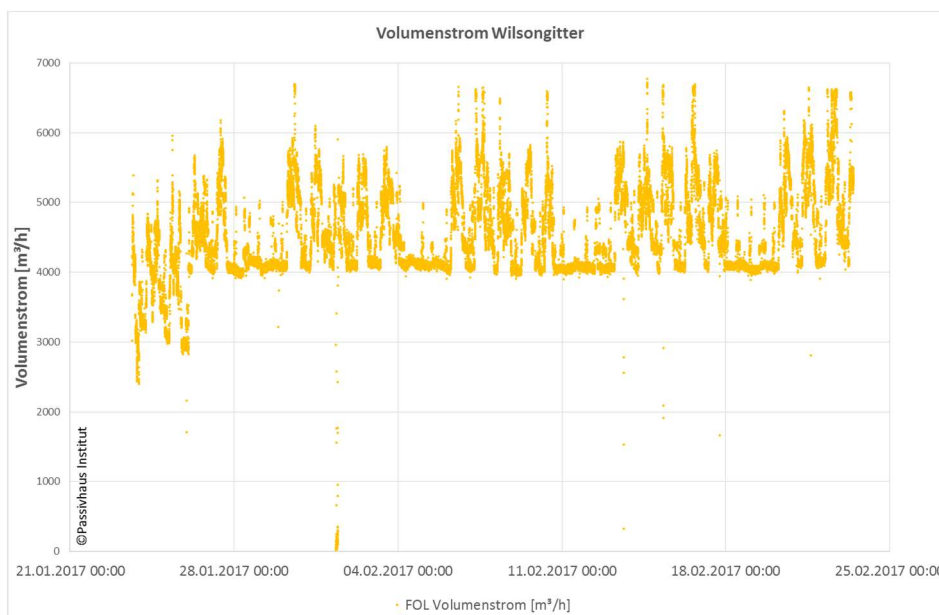
Die ausweislich der in der Gebäude-Leittechnik aufgezeichneten Werte vorherrschenden Volumenströme sind häufig deutlich höher als der geplante Maximalwert von 4.200 m<sup>3</sup>/h und zeigen zudem, dass die vorgesehene Abschaltung zur Nacht und an Wochenenden **nicht** erfolgt. Im Mittel über die Heizperiode liegt ein Volumenstrom von 4.275 m<sup>3</sup>/h vor. Das Gerät arbeitet also selbst im langzeitige Mittel unter Vollast und zyklisch im Tagesverlauf deutlich darüber hinaus, obwohl die Gebäudenutzung über lange Zeiträume gar keine Vollbelegung aufwies.

Weder das Gerät noch das Kanalnetz sind auf eine derartige Nutzung ausgelegt noch besteht eine sachliche Notwendigkeit für diese Betriebsweise.



**Abbildung 63: Auf der GLT aufgezeichnete Messwerte der Volumenströme des Lüftungsgerätes für die Heizperiode 2016/17**

Die Messwerte der GLT können auch durch eine unabhängige Messung mit Staugittern in den Kanälen (Zu- und Abluft) im Grunde bestätigt werden, wie die Abbildung 64 zeigt.



**Abbildung 64: Verlauf des Fortluft-Volumenstroms, bestimmt durch Druckmessung am Wilson-Staugitter, für den Zeitraum der Vertiefungsmessung (Januar/Februar 2017).**

Deutlich sind die Wochentage von den Wochenenden zu unterscheiden. Jedoch erfolgt nachts und an Wochenenden statt der vorgesehenen Stilllegung der Anlage lediglich eine Reduktion etwa auf die vorgesehene Maximalleistung. Das stellt eine massive Abweichung vom geplanten Betrieb dar.



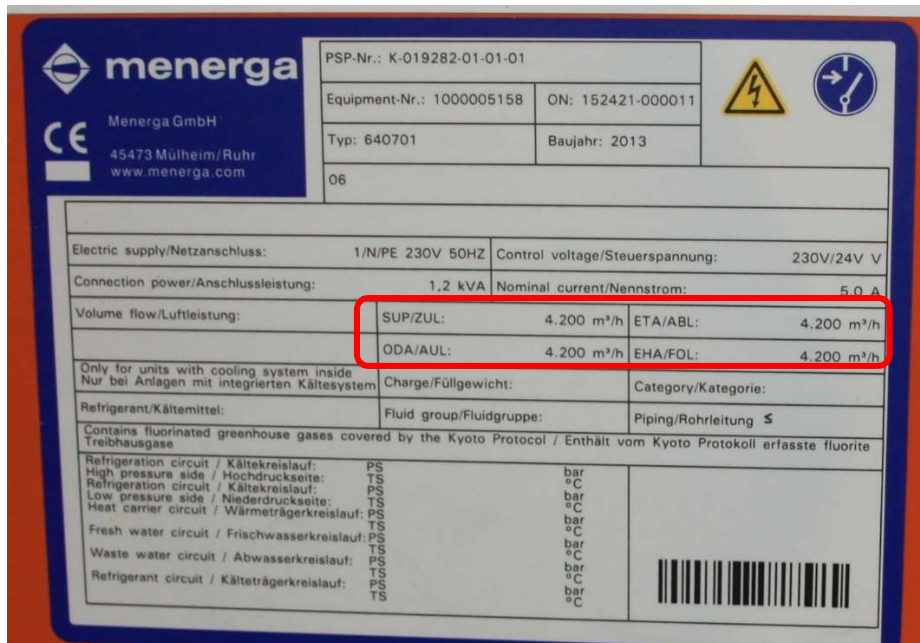


Abbildung 65: Typenschild des eingebauten Gerätes mit Angabe der planungsgemäßen Nennluftleistung.

Die fortlaufend gespeicherten Kanaldrücke spiegeln die von der Planung abweichende Betriebsweise ebenfalls wider und liegen wesentlich über dem Planungsziel von ca. 200 Pa:

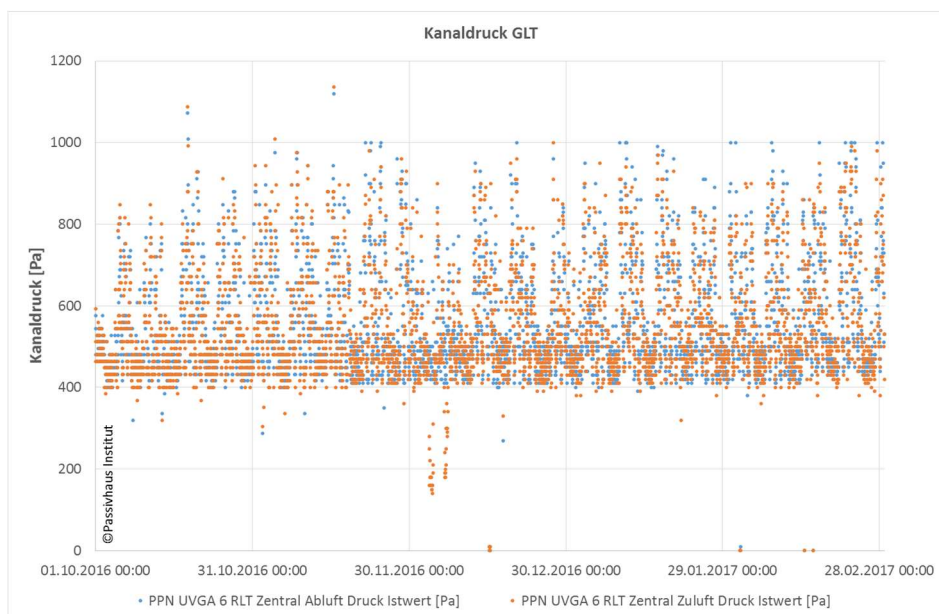
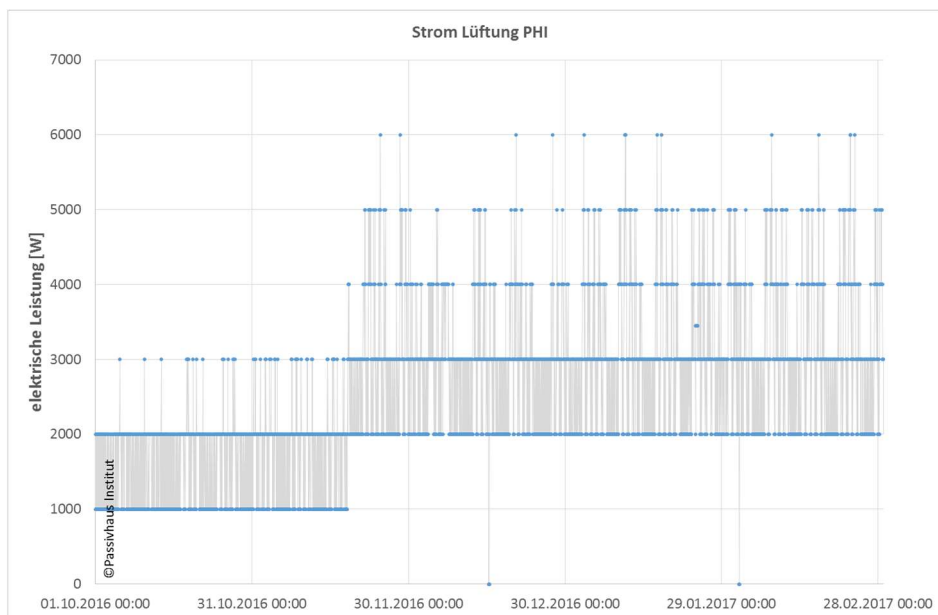


Abbildung 66: Betrag der im gebäudeseitigen Kanalnetz anstehenden Kanaldrücke.

Es zeigt sich eine Überschreitung der Planungsvorgaben um gut das Doppelte. Im Mittel über die untersuchte Heizperiode wird ein Zuluft-Kanaldruck von 547 Pa erreicht. Da das Kanalnetz für die hohen vorgefundenen Volumenströme nicht ausgelegt ist, muss die Anlage mit entsprechend hohem Druck betrieben werden. Der technische Hausverwalter berichtet gleichzeitig von hörbarem mechanischem Stress für die Lüftungskanäle.

Weiteren Aufschluss über die Gegebenheiten kann der gemessene Stromverbrauch der Lüftungsanlage geben, dargestellt als mittlere Leistung je Zeitintervall.



**Abbildung 67: Stundenmittlere elektrische Leistungsaufnahme des Lüftungssystems.**

Rechnerisch ergibt sich aus den zertifizierten Kennwerten für das Gerät bei vollem Volumenstrom (4.300 m<sup>3</sup>/h) eine elektrischer Leistungsbedarf von 1.935 W. Gemessen wurde im Mittel der Heizperiode 2.538 W, damit etwa 25 % mehr als erwartet.

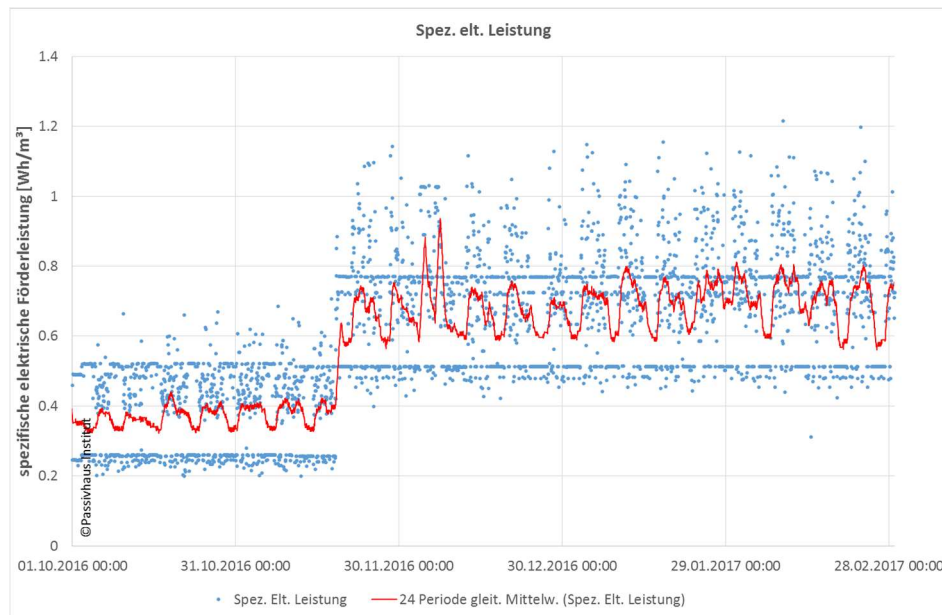
Dass dies auf den vergrößerten Volumenstrom bei gleichzeitig größerer Druckerhöhung zurückgeführt werden kann zeigt ein einfacher Überschlag:

Die Mittelwerte über die Heizperiode liefern eine hydraulische Leistung für Zuluft- und Abluftstrang (bei näherungsweise gleichem Differenzdruck) von

$$\Delta p * \dot{V} = 547 \text{ Pa} * 4.275 \text{ m}^3/\text{h} * 2 = 1.300 \text{ W}$$

Unter Einbeziehung eines typischen Ventilator-Wirkungsgrades von 52 % resultieren 2.500 W. Spezifisch entspricht dies einem Wert von 0,58 Wh/m<sup>3</sup> und steht in guter Übereinstimmung mit dem Messwert von 2.538 W. Auffallend ist jedoch ein Sprung ab dem 18.11.2016 auf ein dann durchgängig höheres Niveau, der möglicherweise mit Wartungsarbeiten an der Gebäudetechnik zu diesem Zeitpunkt zusammenhängt. Leider konnte dieses Phänomen trotz intensiver Nachforschungen nicht aufgeklärt werden.

Noch aufschlussreicher als diese grobe Betrachtung der gesamten Heizperiode ist die zeitschrittweise Berechnung der **spezifischen** elektrischen Leistungsaufnahme, unter Berücksichtigung des jeweils aktuellen Volumenstromes. Auch hier zeigt sich der gleiche Sprung am 18.11.2016, da hier die elektrische Leistung ein Eingangswert ist. Die spezifische elektrische Leistung ist im Tageszyklus Schwankungen unterworfen, die den Schwankungen des Kanaldrucks bzw. Volumenstroms entsprechen.

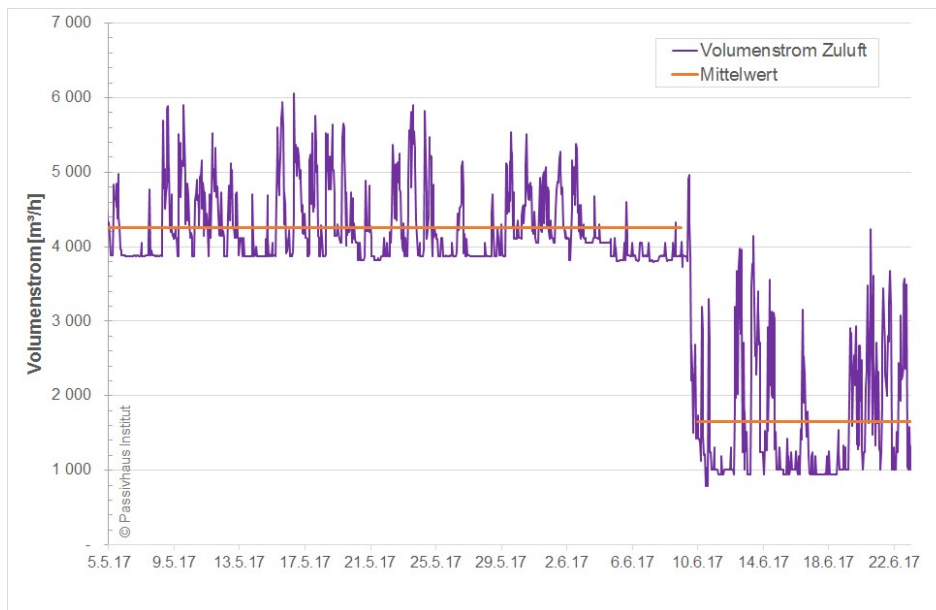


**Abbildung 68: Spezifische elektrische Förderleistung im Lauf der Heizperiode 2016/17**

Trotz unveränderter Volumenströme und Kanaldrücke steigt die Förderleistung am 18.11.2017 ausgehend von einem Mittelwert von  $0,37 \text{ Wh/m}^3$  auf dann über  $0,68 \text{ Wh/m}^3$  an. Eine mögliche Erklärung besteht in veränderten Geräte-internen Druckverlusten, wie sie etwa durch defekte bzw. veränderte Filter verursacht werden können. Der anfänglich gemessene Wert von  $0,37 \text{ Wh/m}^3$  ist angesichts der über den gesamten Zeitraum übermäßig großen Volumenströme und Kanaldrücke deutlich geringer als zu erwarten wäre, während der in der Folgezeit erhöhte Wert die Verhältnisse vermutlich besser wiedergibt. Die deutlich erhöhte spezifische elektrische Leistungsaufnahme kann aus den vorliegenden Randbedingungen mit deutlich überhöhtem Volumenstrom und Kanaldruck gut erklärt werden. Wenngleich es unwahrscheinlich ist, kann allerdings auch nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass ein zusätzlicher Verbraucher fälschlicherweise über den Elektrozähler der Lüftung geschaltet ist.

### Volumenstrom-Reduktion

Um die Ursache der deutlich erhöhten Volumenströme der Lüftungsanlage zu klären und zu beheben, wurde nach der Ursache gesucht. Es stellte sich heraus, dass aufgrund von zu hohen Feuchtwerten in den Duschräumen seit August 2015 das Programm der GLT so geändert wurde, dass das Gerät fast dauerhaft auf dem sehr hohem Niveau betrieben wurde. Die zeitliche Begrenzung (Nachlaufzeit) zur Trocknung der Dusch- und Waschräume war aufgehoben worden. Das führte zur Betriebsweise mit ca.  $1.600 \text{ m}^3/\text{h}$  Daueranforderung nur der Dusch- und Waschräume. Nur im Februar und März 2016 gab es einen Zeitraum im Normalbetrieb. Aufgrund des Drängens des PHI wurde die Ursache im Programm durch die GLT Firma festgestellt. Das Programm wurde am 09.06.2017 zurückgestellt auf die ursprüngliche Betriebsweise mit Nachlaufzeiten. Dadurch konnte die Luftmenge von im Mittel  $4.260 \text{ m}^3/\text{h}$  schlagartig auf  $1.660 \text{ m}^3/\text{h}$  – also um gut 60 % – reduziert werden. Nun wird der Wert von  $4.000 \text{ m}^3/\text{h}$  nur noch als seltene Spitzenanforderung erreicht.



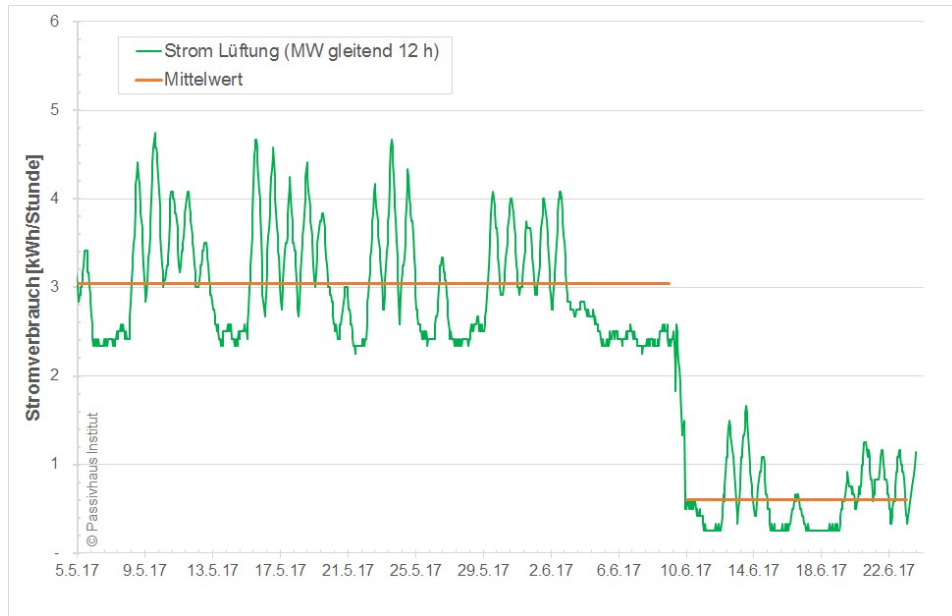
**Abbildung 69: Stundendaten vom Volumenstrom Zuluft der Lüftungsanlage mit der Umstellung am 09.06.2017, die zur 60 %-Reduktion führte (auf ursprünglichen Normalbetrieb).**

Diese Änderung macht sich entsprechend positiv beim reduzierten Stromverbrauch bemerkbar (Abbildung 70): Die benötigte elektrische Leistung sinkt von im Mittel 3 kW auf nur 0,6 kW. Das entspricht einer Reduktion um 80 %. Hochgerechnet als Jahresstromverbrauch der Lüftung ergibt sich ein Wert von dann nur 1,4 kWh/(m²a).

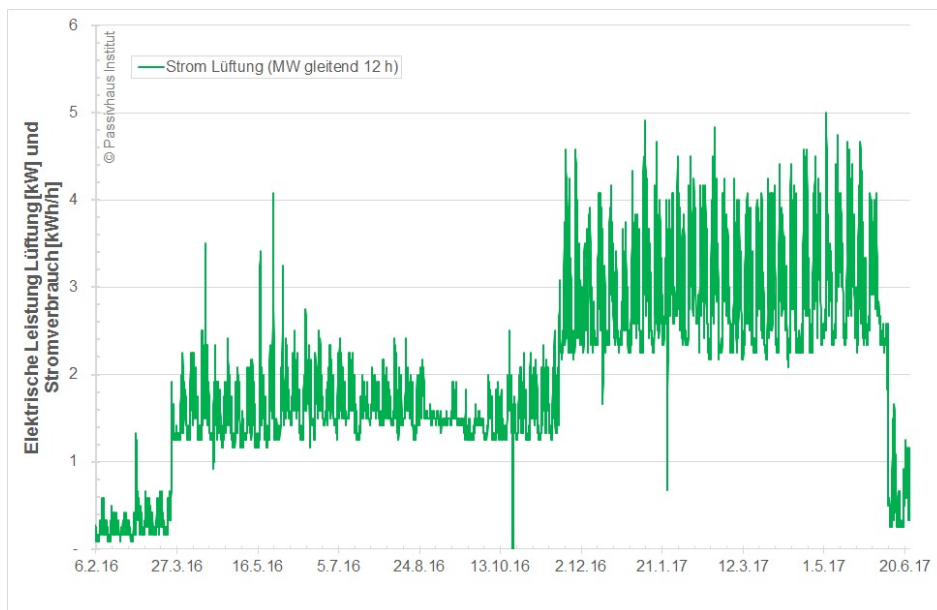
Die spezifische elektrische Leistungsaufnahme beträgt nun im Mittel über mehrere Tage 600 W / 1.660 m³/h = 0,36 Wh/m³ und steigt bei Vollbetrieb auf Werte um 1.600 W / 4.200 m³/h = 0,38 Wh/m³. Die maximal zulässige spezifische elektrische Leistungsaufnahme von 0,45 Wh/m³ wird nach der Einstellung des bestimmungsgemäßen Betriebs also sehr gut eingehalten.

Wird diese Betriebsweise beibehalten, reduziert sich der Verbrauch um über 1.700 kWh/Monat (entspricht bei 25 €Cent/kWh über 400,- €/Monat). Das Diagramm Abbildung 71 zeigt mit seinem längeren Zeitraum, dass der unnötig hohe Verbrauch schon seit Monaten vorhanden ist.

Abbildung 72 zeigt entsprechend um den 09.06.2017 die Veränderung der Kanaldrücke im zentralen Zu- und Abluftsystem. Durch die Volumenstromreduktion reduzieren sich die Kanaldrücke von ca. 550 auf nur noch etwa 100 Pa mit kurzzeitigen Spitzen während der seltenen Vollast-Stunden.

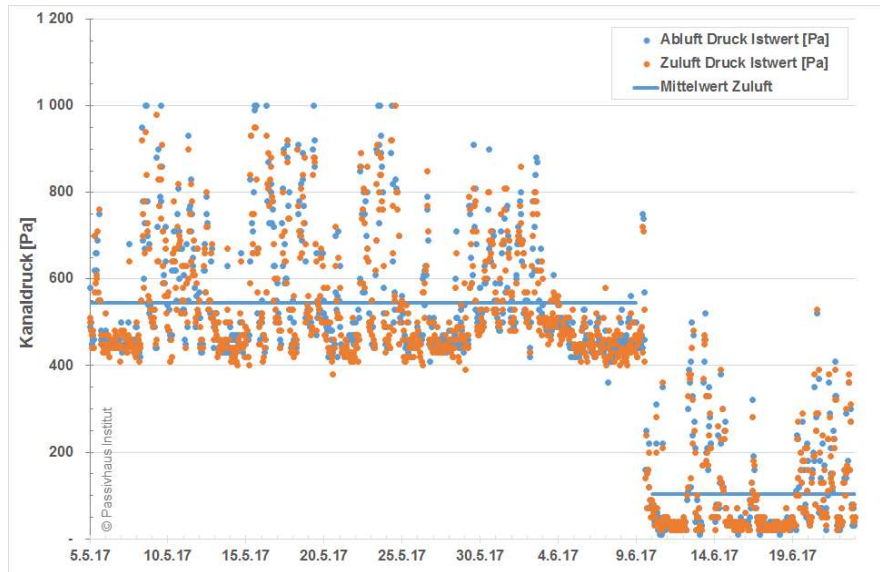


**Abbildung 70: Stundendaten des Stromverbrauchs der Lüftungsanlage mit der Umstellung am 09.06.2017, welche zu einer 80 %igen Reduktion führte (auf ursprünglichen Normalbetrieb).**



**Abbildung 71: Stromverbrauch der Lüftungsanlage über einen längeren Zeitraum (06.02.2016 bis 20.06.2017) (Stundendaten).**



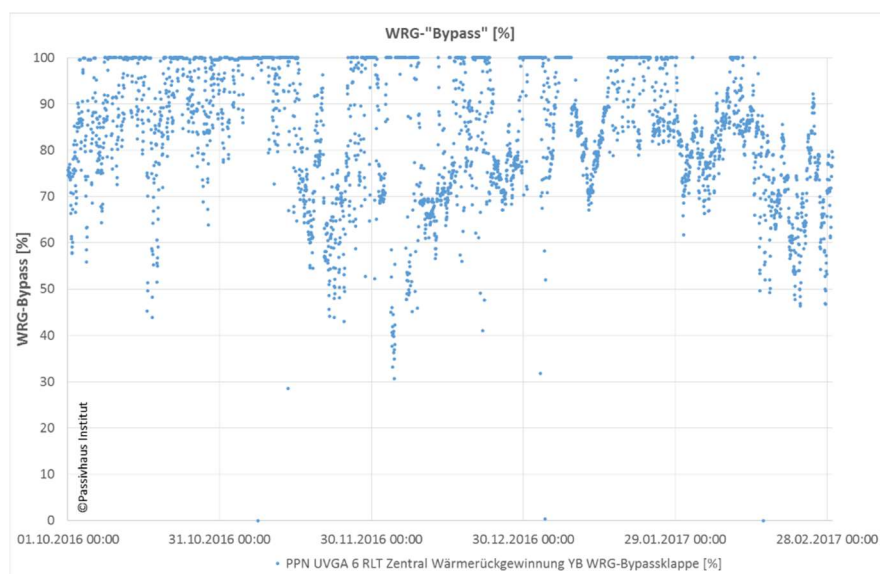


**Abbildung 72: Stundendaten der Kanaldrücke im zentralen Zu- und Abluftkanal. Die Umstellung am 09.06.2017 bewirkt eine Reduktion von im Mittel 550 auf 100 Pa (dem ursprünglichen Normalbetrieb).**

### Wärmebereitstellungsgrad

Die Bestimmung des Wärmebereitstellungsgrades erfordert die Messung der Lufttemperatur in Abluft, Außenluft sowie Fortluft. Hier bestehen in der Feldmessung zunächst Einschränkungen hinsichtlich der Messunsicherheit selbst. Zudem muss die Temperatur an einer als repräsentativ angesehenen Stelle gemessen und Homogenität über den gesamten Kanalquerschnitt angenommen werden. Dies ist real nicht der Fall und ergibt zusätzliche Abweichungen.

Hinsichtlich des im untersuchten Objekt erreichten Wärmebereitstellungsgrades soll zunächst ein Blick auf die in der Gebäudeleittechnik (GLT) historisierten Betriebsdaten Klarheit über die Betriebsweise des Gerätes bringen.



**Abbildung 73: GLT-Anforderungswerte an die Wärmerückgewinnung des Lüftungsgerätes (100% entspricht maximaler Wärmerückgewinnung)**

Es fällt auf, dass auch im Kernwinter über größere Zeiträume gar nicht die volle Leistung der Wärmerückgewinnung angefordert wird. (ungenau wurde in der Leittechnik die Bezeichnung "By-passklappe" verwendet, tatsächlich wird die Zykluszeit des Gerätes angepasst).

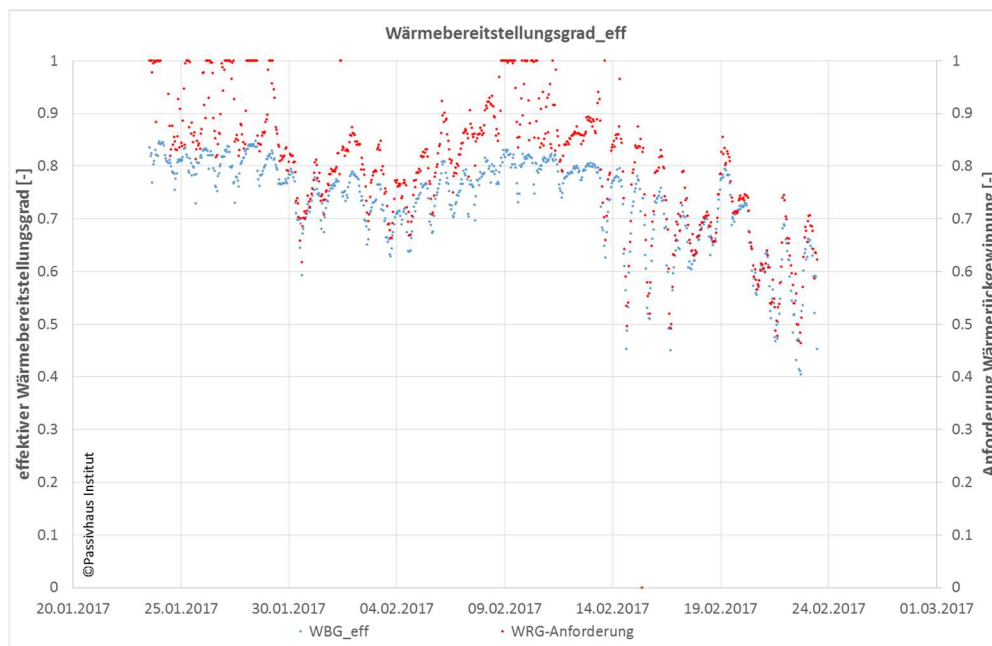
Dies weist auf eine verbesserungsbedürftige Ansteuerung des Gerätes durch die Gebäudeleittechnik hin: Die Planung sieht einen uneingeschränkten Betrieb der Wärmerückgewinnung über den Kernwinter hinweg vor. Für die weitere Auswertung muss daher die Betrachtung auf die Zeiträume eingegrenzt werden, zu denen 100 % Wärmerückgewinnung eingestellt waren und das Gerät entsprechend seine volle Leistungsfähigkeit entfalten konnte. Weiterhin ist diese Beeinträchtigung der Wärmerückgewinnung bei der Interpretation des gemessenen Heizwärmeverbrauches zu berücksichtigen. Unabhängig davon sollte die Abregelung der Wärmerückgewinnung in der Heizperiode noch vor dem kommenden Winter abgestellt werden.

Da die Messunsicherheiten der Temperatursensoren in GLT-Systemen in der Regel vergleichsweise groß (um 1 K) und im Einzelnen auch nicht bekannt sind, wurde zur Bestimmung des Wärmebereitstellungsgrades vom PHI eine Vertiefungsmessung mit kalibrierten Datenloggern im Kernwinter 2016/17 durchgeführt.

Der effektive Wärmebereitstellungsgrad kann berechnet werden, wenn die Einzelwerte für Ablufttemperatur, Außenlufttemperatur und Fortlufttemperatur, die elektrische Leistungsaufnahme und den Massenstrom bekannt sind und eine Massenstrom-Balance zwischen Zuluft- und Abluftseite unterstellt werden kann.

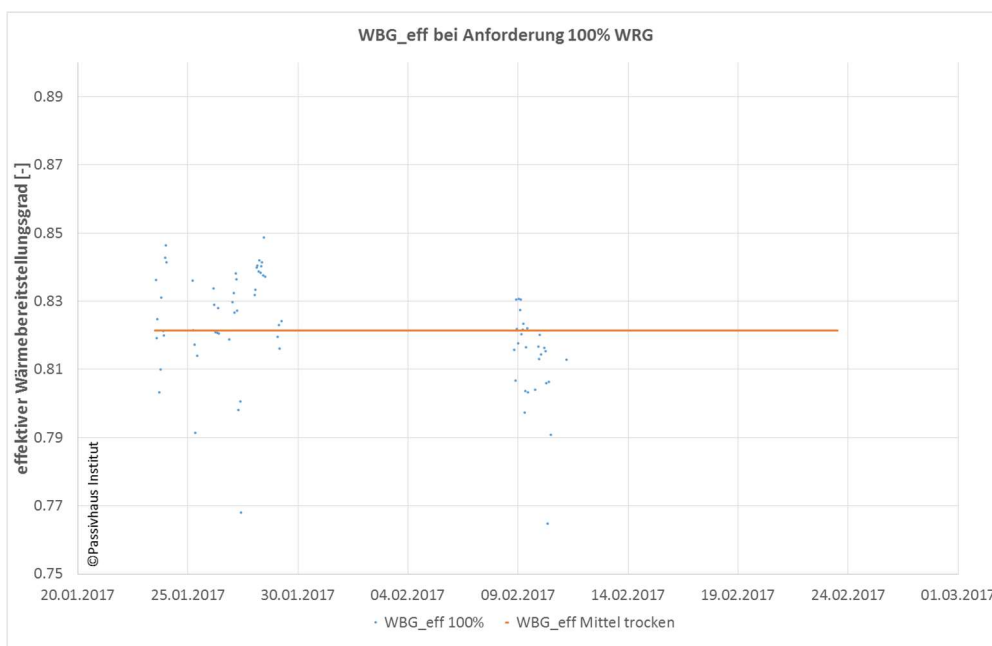
$$\eta_{\text{WRG,t,eff}} = \frac{(\dot{Q}_{Ab} - \dot{Q}_{Fo}) + \frac{P_{ei}}{\dot{m} \cdot c_p}}{(\dot{Q}_{Ab} - \dot{Q}_{Au})}$$

Die Temperaturen wurden mit einer Unsicherheit von  $\pm 0,2$  K gemessen, die elektrische Leistungsaufnahme ergibt sich aus den Werten des 2016 für das Gerät installierten Stromzählers mit einer Unsicherheit von ca. 1 %. Aus der Gerätezertifizierung ist bekannt, dass die in dem Gerät angewendete Messung der Volumenströme über Druckdifferenzen an der Einströmdüse des Ventilators eine zufriedenstellende Genauigkeit erreicht und die darauf basierende Balance-regelung als verlässlich angesehen werden kann. Abbildung 74 zeigt im Überblick der Heizperiode den Verlauf der Wärmerückgewinnungs-Anforderung durch die GLT (rot) und die sich rechnerisch einstellenden Werte für den effektiven Wärmebereitstellungsgrad.



**Abbildung 74: Effektiver Wärmebereitstellungsgrad und GLT-Anforderungswert Wärmerückgewinnung, Vertiefungsmessung PHI**

Die folgende Abbildung zeigt nur die ausgewählten Messpunkte mit voller Wärmerückgewinnungs-Anforderung. Im Mittel des Betrachtungszeitraumes wird für diese Messpunkte ein effektiver Wärmebereitstellungsgrad von 82 % erreicht.



**Abbildung 75: Effektiver Wärmebereitstellungsgrad selektiert nach Zeiträumen mit 100 % WRG-Anforderung, Vertiefungsmessung PHI (Nullpunkt Ordinate unterdrückt)**

Die Berechnung erfolgte unter der Voraussetzung, dass es zu keinem Kondensatanfall im Gerät kommt. Dies ist tatsächlich nicht der Fall, so dass es zu Energieübertragung ohne Temperaturveränderung kommt, die in der dargestellten Auswertung unberücksichtigt bleibt. Die genaue Kondensatmenge ist allerdings aufgrund der vergleichsweise hohen Messunsicherheit der relativen Feuchte der einzelnen Luftströme schwierig zu ermitteln, hier muss mit einer Unsicherheit

von  $\pm 3$  % gerechnet werden. Der unter Vernachlässigung der Kondensat-Effekte berechnete Wert von im Mittel 82 % kann daher als konservative Bewertung gelten.

Dieser Wert unterschreitet den unter Kondensat-freien Bedingungen ermittelten Zertifizierungskennwert um 4 Prozentpunkte, was unter den Bedingungen der Feldmessung und der entsprechenden Unsicherheiten bei Temperaturen und Balancierung des Gerätes als grundsätzliche Bestätigung gewertet werden kann.

### **Zusammenfassende Bewertung**

Es konnte festgestellt werden, dass die Betriebsparameter des Gerätes im Auswertungszeitraum noch stark von der geplanten Betriebsweise abweichen. In Folge des dauerhaft zu großen Luftvolumenstromes kann es im Winter zum Auftreten geringer Raumluftfeuchte kommen. Dies bestätigen die entsprechenden Messungen in den Räumen. Weiterhin ist der Heizwärmebedarf vergrößert und es wird wesentlich mehr elektrischer Strom zur Luftförderung eingesetzt als erforderlich. Wird die Reduktion der Volumenströme vom 09.06.2017 beibehalten werden diese unerwünschten Auswirkungen auf den Heizwärmeverbrauch, die Luftfeuchte, den Stromverbrauch wie auch den mechanischen Stress des Kanalsystems abgestellt.

**Dennoch können die aus der Zertifizierung vorliegenden Kennwerte des Lüftungsgerätes unter Feldbedingungen im Rahmen der Messunsicherheit bestätigt werden. Das hoch effiziente Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung bewährt sich in der praktischen Anwendung auch unter widrigen Randbedingungen und die im Rahmen der Zertifizierung realitätsnah bestimmten Kennwerte erweisen sich als geeignet für eine zielgenaue Planung zukünftiger Objekte.**

Die Bedeutung einer umfassenden und kontinuierlichen Inbetriebnahme-Phase unter Mitwirkung aller Projektbeteiligter zeigt sich durch die massive Anhebung der Volumenströme einmal mehr. Im Rahmen zukünftiger Projekte sollte frühzeitig geklärt werden, wie eine optimale Zusammenarbeit aus Fachplanern, ausführenden Firmen und Gebäudebetreibern gewährleistet werden kann. Hierzu muss eine fortlaufende Betriebsüberwachung sichergestellt und auch die Nutzerseite einbezogen werden. Besonders wichtig ist die Klärung von Kommunikationswegen und Verantwortlichkeiten.w

## 9 Untersuchung der Wärmeverluste durch innenliegende Abwasser- und Regenfallrohre

Abwasserleitungen für häusliches Schmutzwasser aus Waschbecken, Duschen, Toiletten etc. müssen zur Sicherstellung eines ausreichenden Druckausgleichs belüftet werden. Dies kann entweder mit sog. Unterdachbelüftungsventilen<sup>6</sup> erfolgen oder aber, wie in den meisten Fällen durch Weiterführung der Abwasserleitungen über Dach, häufig ist letzteres sogar explizit vorgeschrieben. Im vorliegenden Gebäude wurden zur Minimierung von Durchdringungen und Wärmeverlusten Fallrohrstränge so weit als möglich gebäudeintern zusammengefasst und eine gemeinsame Belüftung über Dach realisiert.

Bei Überdachbelüftung stellt sich im Winter eine Luftströmung, angetrieben durch Kamineffekt und Windsog, aus der Kanalisation durch das Rohrsystem hin zum Dachauslass ein. Somit entstehen Wärmeverluste vom Gebäude an die kältere Luft, die durch das Fallrohr strömt. Eine ähnliche Situation ergibt sich, wenn Regenfallrohre durch die thermische Hülle geführt werden. Hier treten allerdings zusätzlich Wärmeverluste vom Gebäude an das kalte Regenwasser auf, welches durch das Fallrohr fließt.

Prinzipiell sollten solche Situationen planerisch vermieden oder entschärft werden:

- Verwendung von Unterdachbelüftern soweit möglich.
- Ist die Überdachentlüftung notwendig, sollte die Zahl der Dachdurchdringungen gering gehalten werden. Gesamtes Netz kompakt halten und betroffenes Fallrohr durchgehend mindestens 50 mm stark dämmen.
- Regenfallrohre vollständig außerhalb der thermischen Hülle führen.
- Für unvermeidbare, innenliegende Regenfallrohre ebenfalls Netz kompakt halten und mindestens 50 mm stark dämmen.

Die genaue Quantifizierung der Wärmeverluste ist schwierig, da sie von zahlreichen Einflussfaktoren abhängen und z.B. die Geschwindigkeit der Luftströmung nur schwer abschätzbar ist. Die zu erwartenden Wärmeverluste werden im Energiebilanzierungsprogramm PHPP auf Basis einer empirischen Formel berechnet.

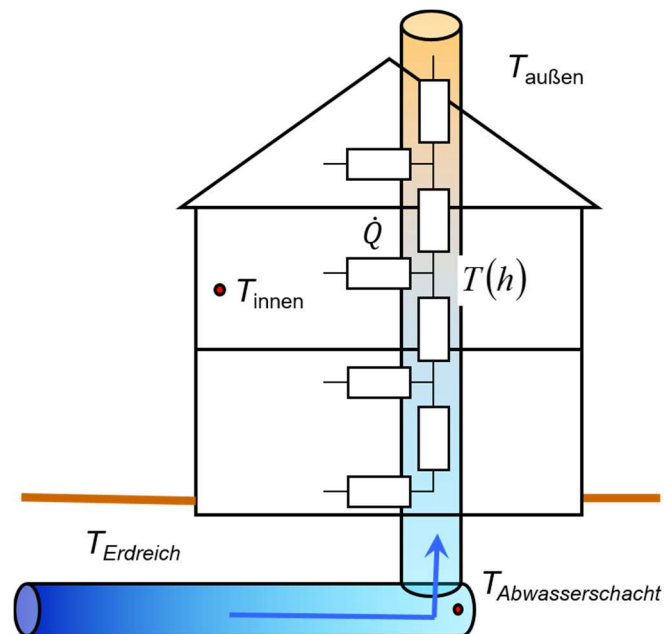
Dass Verluste Auftreten ist allerdings recht offensichtlich: Durch das Rohr besteht eine offene Verbindung vom Dach des Gebäudes durch das Gebäude hindurch ins Erdreich und von dort zumindest bis zum nächsten Kanaldeckel. Bei niedrigen Außentemperaturen kommt es aufgrund der mit steigender Temperatur sinkenden Dichte zu Auftriebseffekten. Die durch das Erdreich bereits erwärmte Luft ist auf Grund der temperaturabhängigen Dichte deutlich leichter als die Außenluft und steigt daher auf. Durch Wärmeverluste von der warmen Raumluft an das Rohr, wird die Luft im Rohr noch weiter erwärmt, was den Auftrieb erhöht. So stellt sich eine kontinuierliche Strömung ein, die je nach Strömungsgeschwindigkeit und Temperaturverhältnissen für dauerhafte

---

<sup>6</sup> Beim Einsatz von Unterdachbelüftern entfällt die Dachdurchführung (Dämmung, Luftdichtheit) komplett. Diese Ventile werden innerhalb der Gebäudehülle montiert und saugen nur kurzzeitig Luft aus dem Gebäude an wenn ein Unterdruck im Rohr ansteht. Bei der Verwendung müssen die geltenden Normen berücksichtigt werden.



Wärmeverluste vom Gebäude an das Rohr sorgt (vgl. Abbildung 76). Im Weiteren wird nicht zwischen Sammelleitungen und Fallrohren unterschieden, sondern der Einfachheit halber lediglich von vertikalen und horizontalen Abschnitten gesprochen.



**Abbildung 76: Schemaskizze der Erwärmung der Außenluft durch den Abwasserkanal und ein Fallrohr im Gebäude. Durch Erwärmung und Auftrieb stellt sich ein kontinuierlicher Luftstrom von unten nach oben durch das Abwasserfallrohr ein.**

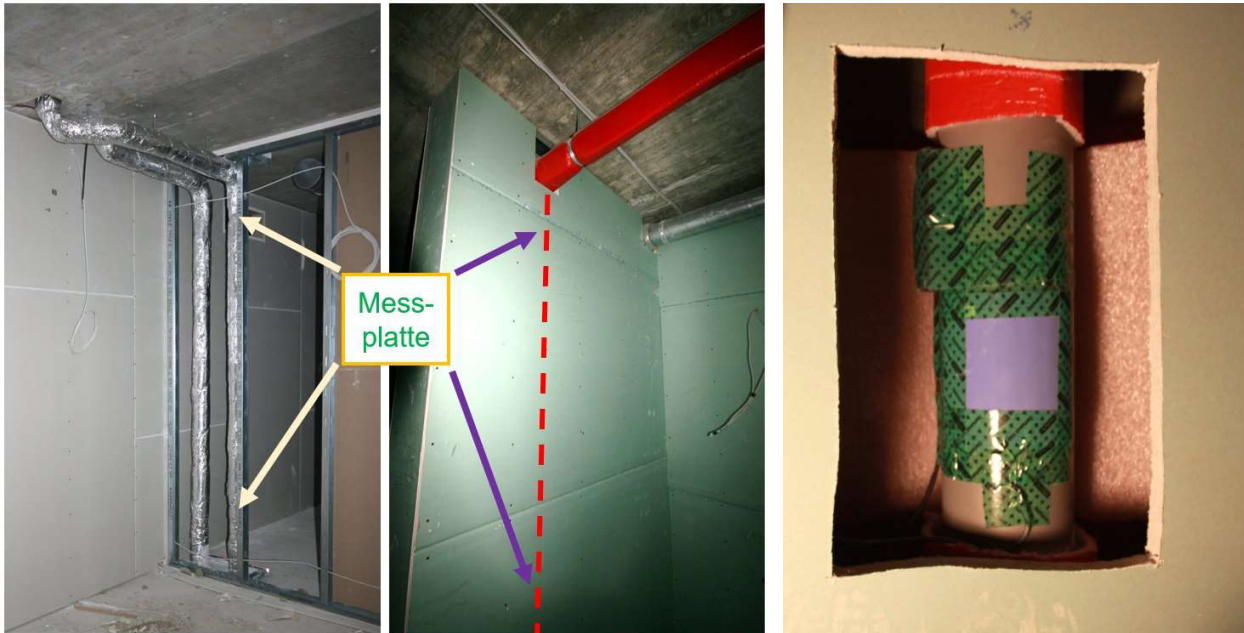
Im Rahmen des Monitorings des PPN wurden zur näheren Bestimmung der Wärmeverluste unter realen Bedingungen an einem Abwasserrohr und einem innenliegenden Regenfallrohr zwei Messungen der Wärmeströme durch die Rohrwandungen durchgeführt. Mit den installierten Wärmeflussplatten können die Wärmeströme durch die Rohrwandung und damit die Wärmeverluste vom Innenraum hin zum Rohrinnenen direkt gemessen werden. Zur besseren Interpretation wurden zusätzlich die Rohrtemperaturen (Oberfläche, raumseitig) und die Außentemperatur aufgezeichnet. Mit der Untersuchung soll der Einfluss auf den Heizwärmeverbrauch des Gebäudes bestimmt werden

**Tabelle 11: Daten der untersuchten Rohrleitungen**

	<b>Abwasserfallrohr</b>	<b>Regenfallrohr</b>
Durchmesser	100 mm	70 mm
Material	Polypropylen (PP)	Stahlrohr verzinkt
Dämmdicke	10 mm	60 mm
WLG	0,033 W/mK	0,04 W/mK
Gesamtlänge	15,7 m	8,4 m
Höhe	11 m	7 m

## 9.1 Messaufbau und Rohrkonfigurationen

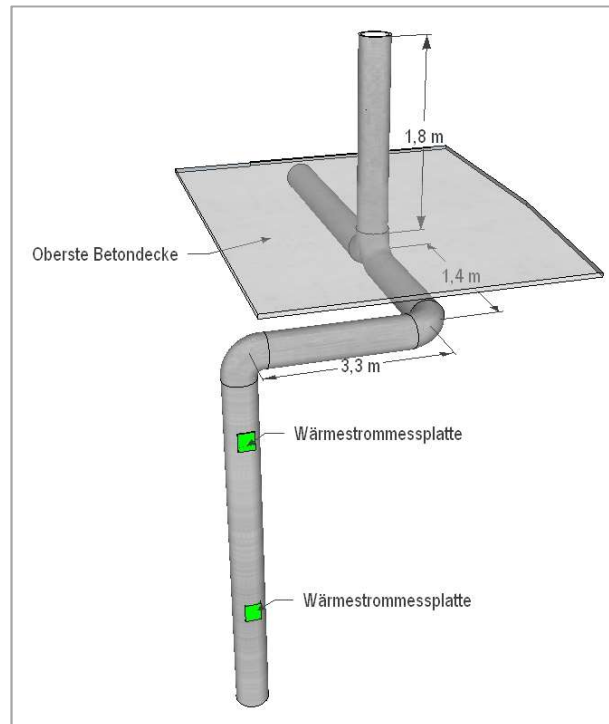
Im Folgenden werden die vermessenen Rohre (Regenfallrohr und Abwasserrohr), die Messstellen und die verbaute Sensorik genauer beschrieben und die Messergebnisse dargestellt.



**Abbildung 77:** Links: Rohrverlauf des Regenfallrohrs zur Lichthofentwässerung in einer Zwischenwand (Raum 117: Schrank- und Umkleideraum), die mit beidseitig 6 cm Mineralwolle ausgekleidet wird.  
Mitte: Das vermessene Abwasserrohr verläuft hinter der verkleideten Wand im Bereich eines Waschrums (Raum 212).  
Rechts: Montierte Wärmestrommessplatte und Temperatursensor auf dem Abwasserrohr vor dem Umlegen der aufgeschnittenen Dämmung.

### Abwasserrohr

Das untersuchte Abwasserfallrohr (s. Abbildung 77, rechts), wird über Dach belüftet. Für das Monitoring wurde der Rohrabschnitt in einem Waschräum im 2. OG (Raum 212) gewählt, wobei die Wand an zwei Punkten zur Installation geöffnet werden musste. Bei dem Rohr handelt es sich um ein übliches Polypropylen (PP) Rohr mit einem Nenndurchmesser von 100 mm. Bei dem vertikalen Rohrabschnitt handelt es sich um einen von zwei Strängen, die nach einem weiteren 4,7 m langen horizontalen Teilstück zusammengeführt und über einen weiteren, gemeinsamen 2,7 m langen horizontalen und einen ca. 1,8 m langen vertikalen Abschnitt über Dach geführt werden. Das Abwasserrohr wird unter der Bodenplatte (EG) an den Kanal angeschlossen, so dass eine Gesamthöhendifferenz von ca. 11 m vorliegt. Die Höhe der unteren Messstelle liegt ca. 7,5 m oberhalb des Hausanschlusses. Die obere Messstelle hat einen vertikalen Abstand von ca. 2 m. Das Abwasserrohr ist mit 10 mm gedämmt. Die Zwischenwand ist beidseitig doppelt beplankt mit Gipskartonplatten (je 1,25 cm Dicke).

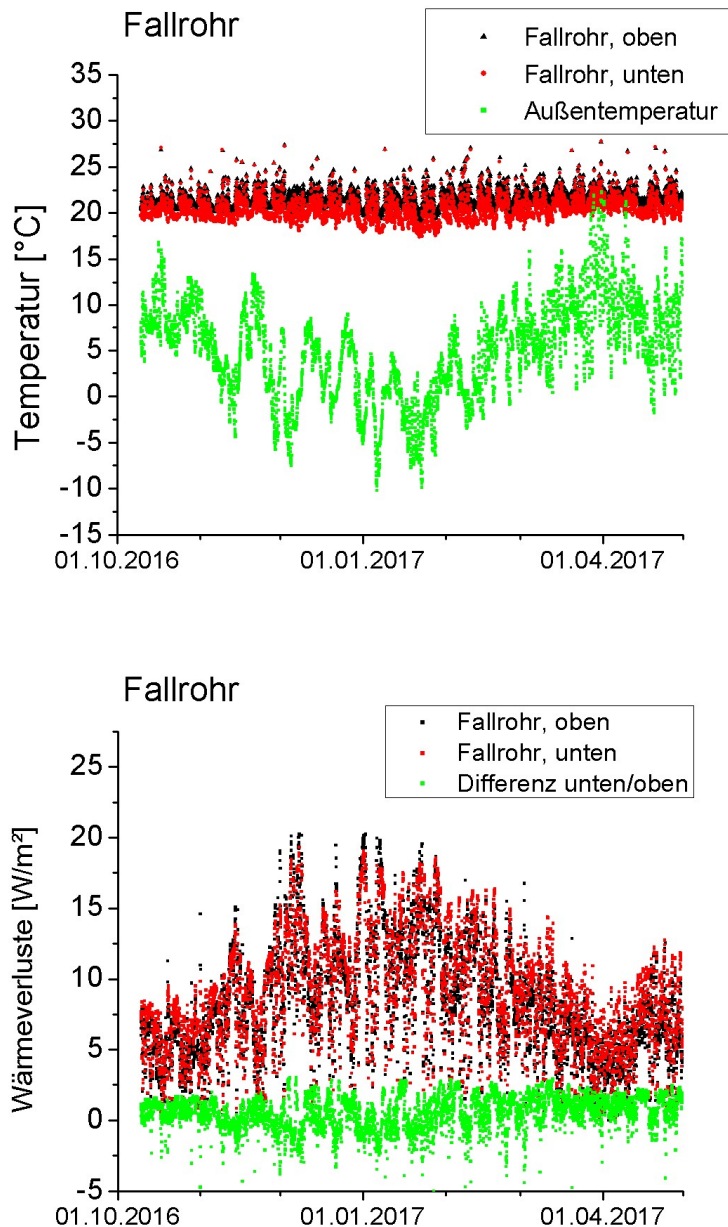


**Abbildung 78: Skizze von der Anordnung des oberen Bereiches des Abwasserrohrs mit den beiden Messplatten und dem Verlauf über Dach.**

Die verwendeten Wärmestrommessplatten (Fa. Phymeas) haben Abmessungen von 15 x 15 cm und wurden jeweils an dem Bus-System für das Gebäudemonitoring angeschlossen. Neben dem Wärmestrom wurden zusätzlich die Temperatur auf der Rohroberfläche sowie die Außentemperatur aufgezeichnet. Der Temperatursensor auf der Rohrwandung zur Bestimmung der Oberflächentemperatur der Rohrwandung wurde zum Schutz vor äußeren Einflüssen zusätzlich mit 20 mm geschlossenzelligem Dämmstoff bedeckt. Die gemessenen Temperaturen und Wärmeströme sind für den Winter 2016/17 in Abbildung 79 dargestellt. Die Anlegefühler zeigen sehr konstante Temperaturen von im Mittel 21,6 °C am oberen bzw. 20,4 °C am unteren Messpunkt. Der Wertebereich in dem sich die Oberflächentemperaturen bewegen liegt zwischen im 17,4 °C und 28,1 °C. Die Temperaturen im angrenzenden Raum wurden nicht gemessen, so dass nicht eindeutig feststellbar ist, ob die hohen Temperaturen durch sehr hohe Raumtemperaturen im Bereich der Umkleidekabinen begründet sind oder durch warmes Abwasser aus dem obersten Geschoss. Ein weiterer Einflussfaktor ist die Schachttemperatur, die durch Wärmeverluste der Warmwasserleitungen auch über der Raumtemperatur liegen kann.

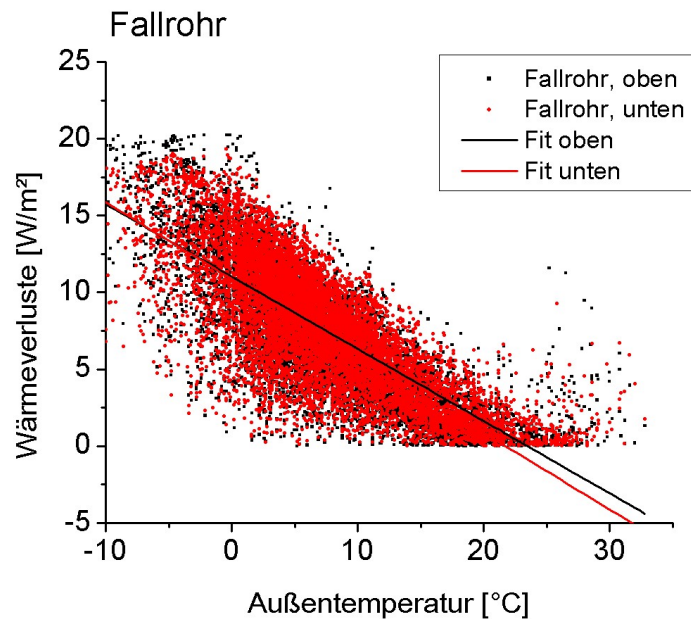
Im unteren Teil von Abbildung 79 sind die Wärmeströme durch die Rohrwandungen, gemessen mit Wärmeflussplatten aufgetragen und zusätzlich zur Orientierung die Differenz der Messwerte für den unteren und oberen Messpunkt dargestellt. Deutlich zu sehen ist ein Anstieg des Wärmestroms bei fallenden Außentemperaturen im Winterhalbjahr. Auffällig ist eine sehr große Schwankungsbreite der gemessenen Wärmeströme zwischen 0 und 19,1 W/m<sup>2</sup>. Der Mittelwert beträgt 7,6 W/m<sup>2</sup> (oben) bzw. 8,0 W/m<sup>2</sup> (unten). Der Unterschied zwischen den Wärmeströmen an den zwei Messpunkten streut um 0 und scheint keine klare Tendenz zu haben.

Die 10 mm starke Dämmung entspricht einem U-Wert von ca.  $2 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Somit wäre eine Temperaturdifferenz von 3,5 K notwendig, um den gemessenen mittleren Wärmestrom von  $7 \text{ W/m}^2$  im Kernwinter zu erreichen. Mit den gemessenen Rohroberflächentemperaturen würden hieraus Schachttemperaturen von  $24,9 \text{ }^\circ\text{C}$  bzw.  $23,7 \text{ }^\circ\text{C}$  folgen. Das erscheint im Vergleich zur mittleren Gebäudetemperatur von ca.  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  als plausibel, insbesondere da es sich um einen Waschaum handelt.



**Abbildung 79:** Auftragung des Temperaturverlaufs im zweiten Messwinter an der oberen (schwarz) und unteren (rot) Messstelle auf dem Fallrohr sowie in grün der Außentemperatur (oben). Unten sind die Wärmeströme durch die Messplatten oben und unten sowie deren Differenz aufgetragen.

Beim Vergleich der Verläufe von Außentemperatur und Wärmeverlusten liegt es nahe, deren Korrelation genauer zu untersuchen. Dazu wurden in Abbildung 80 die Wärmeverluste in Abhängigkeit der Außentemperatur aufgetragen und ein linearer Fit für beide Messpunkte durchgeführt. Eine direkte singuläre Abhängigkeit von der Außentemperatur lässt sich auf Grund der starken Streuung hierdurch sicher nicht ableiten. Allerdings lässt sich doch die Aussage treffen, dass die Wärmeverluste mit fallenden Außentemperaturen deutlich ansteigen und bei Außentemperaturen im Bereich von 20 °C keine Verluste mehr auftreten.



**Abbildung 80: Auftragung der Wärmeverluste in Abhängigkeit der Außentemperatur für die obere (schwarz) und untere (rot) Messstelle am Abwasserrohr. Zusätzlich wurden jeweils lineare Fits durchgeführt, die die negative Korrelation aufzeigen.**

### Regenfallrohre

Bei den Regenfallrohren (s. Abbildung 77, links) handelt es sich um verzinkte Stahlrohre (DN 70) für die Entwässerung eines Lichthofs im 2. OG des Gebäudes. Die Messung erfolgte durch Wärmeflussplatten an zwei Punkten des Rohres auf Höhe des 1. OG mit einem vertikalen Abstand von 1,7 m. Ausgehend vom Wasserablauf am Boden des Lichthofs folgen ca. 0,5 m vertikaler Verlauf durch die Decke und dann ein 1,4 m langes Horizontalstück, ehe der untersuchte vertikale Abschnitt folgt. Der Rohrabschnitt befindet sich in einer Wand mit beidseitig 6 cm Mineralwolldämmung um das Rohr. Um Wasserstau durch Eisbildung im Winter zu vermeiden wurde eine Rohrbegleitheizung installiert. Diese soll bei Temperaturen unter von 4 °C für Eisfreiheit sorgen. In den Messdaten spiegelt sich die Aktivität der Rohrbegleitheizung allerdings nicht wieder. Der Ablauf des Lichthofs befindet sich ca. 7 m oberhalb des Abwasseranschlusses.

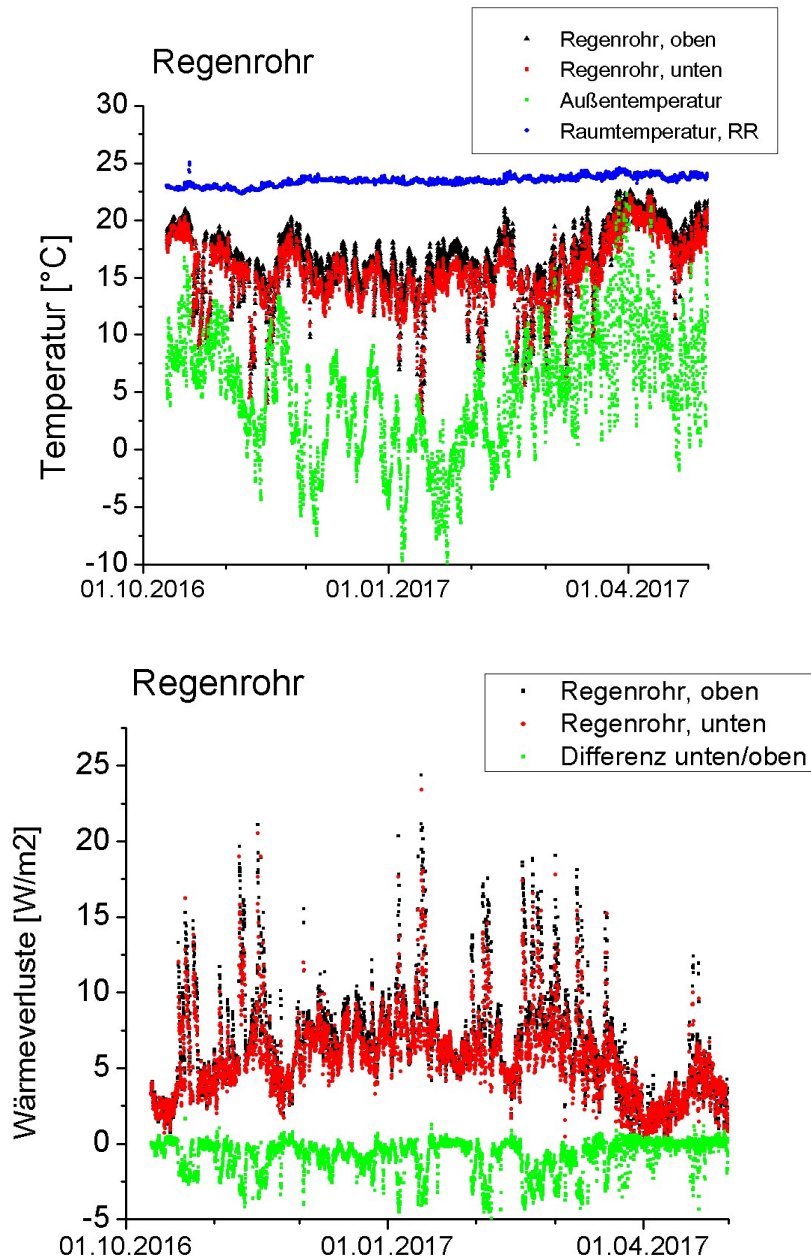
Die Messergebnisse für das Regenfallrohr sind in Abbildung 81 dargestellt. Die mittlere Temperatur im angrenzenden Raum beträgt 23,6 °C. Da die Dämmdicke des Regenfallrohres deutlich größer ist, als die der Abwasserfallrohres, treten beim Regenfallrohr deutlich geringere Temperaturen im Rohr auf diese betragen im Mittel 16,9 °C am oberen bzw. 16,1 °C am unteren



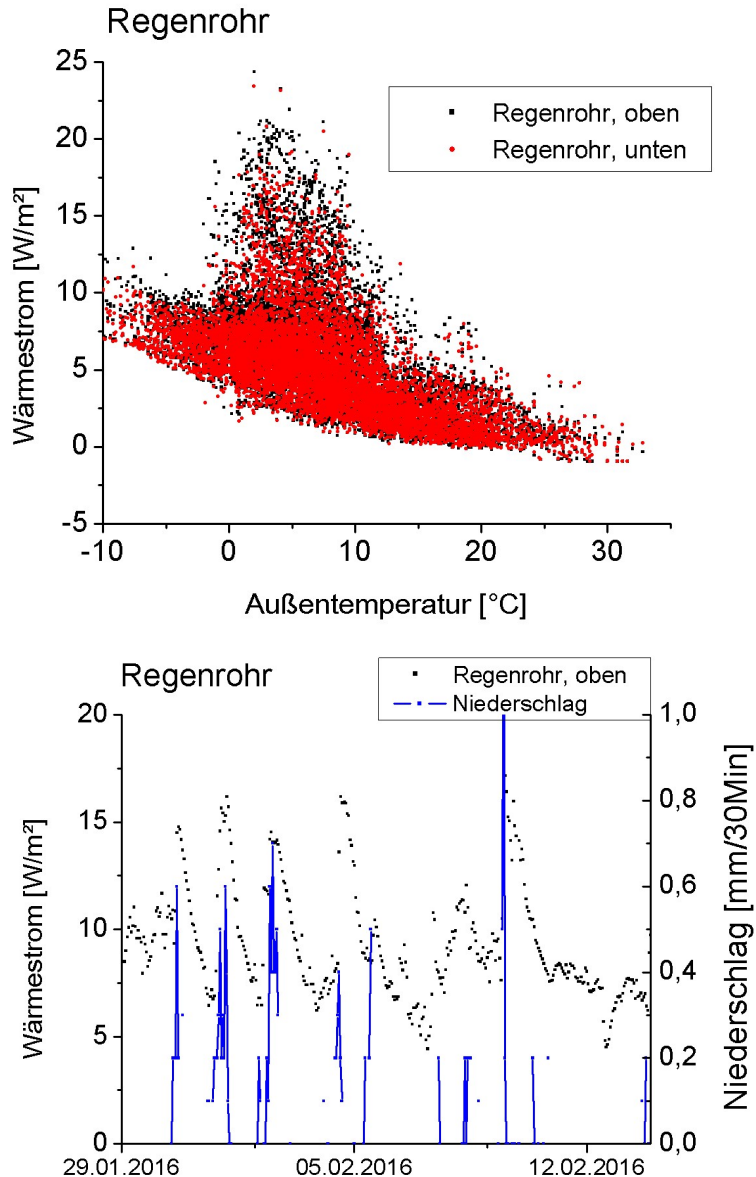
Messpunkt und schwanken zwischen 3 °C und 25 °C. Die sehr niedrigen Temperaturen korrelieren sehr gut mit Regenereignissen (vgl. Abbildung 82) bei denen Wasser mit Temperaturen nahe der Außentemperatur die Rohrwandung hinunter fließt. Zu diesen Zeiten treten entsprechend vergleichsweise große Wärmeströme auf, die ca. 3-mal so groß werden können, wie die üblichen Wärmeverluste ohne Niederschlag.

Aus der Auftragung der Wärmeströme an den beiden Messpunkten sowie deren Differenz ist ein deutlicher jahreszeitlicher Verlauf mit Maximum im Januar erkennbar. Der mittlere Wärmeverlust beträgt am oberen Messpunkt 5,9 W/m<sup>2</sup>K und am unteren 5,2 W/m<sup>2</sup>K. Der Messbereich erstreckt sich von -1 W/m<sup>2</sup>K und 24 W/m<sup>2</sup>K. Auffällig im Vergleich zu den Wärmeströmen im Abwasserfallrohr ist, dass hier im wesentlichen Ausreißer nach oben und nur sehr wenige Abweichungen vom jahreszeitlichen Durchschnitt nach unten auftreten. Dies könnte daran liegen, dass im Gegensatz zu den Abwasserfallrohren im Regenwasserfallrohr keine Wärmequellen, wie das Duschabwasser auftreten, die zu einer Erhöhung der Temperaturen führen würden. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Dämmniveaus der beiden vermessenen Fallrohre ist hier eine finale Aussage allerdings kaum möglich. Hierzu wäre die zusätzliche Messung der Rohrtemperatur auf Höhe des Wasserablaufs hilfreich.

Aus der Auftragung der Wärmeströme an den beiden Messstellen im Regenfallrohr gegen die Außentemperatur (vgl. Abbildung 82, oben) ist eine deutlich schlechtere Korrelation als beim Abwasserfallrohr erkennbar. Dies liegt vermutlich daran, dass durch Niederschlagsereignisse relevante Mengen kalten Wassers aus dem Lichthof in das Regenwasserfallrohr fließen und hier erhöhte Wärmeverluste verursachen. Diese steigen bei sinkenden Außentemperaturen. Da Niederschläge unterhalb von 0 °C meist in Form von Schnee auftreten, sind unterhalb des Forstpunktes keine signifikant erhöhten Wärmeverluste beobachtbar. Dieser Erklärungsansatz deckt sich mit der sehr guten zeitlichen Korrelation zwischen Regenereignissen der nahegelegenen Wetterstation Zierenberg ([www.hlnug.de](http://www.hlnug.de)) mit den Wärmeverlusten (vgl. Abbildung 82, unten).



**Abbildung 81:** Oben: Temperaturverlauf im Messwinter 2016/2017 an der oberen (schwarz) und unteren (rot) Messstelle des Regenfallrohrs sowie der Außentemperatur (grün) und der Raumtemperatur des angrenzenden Umkleideraumes (blau). Unten: Wärmeströme durch die Wärmeflussplatten am oberen und unteren Messpunkt sowie deren Differenz.



**Abbildung 82:** Auftragung der Wärmeverluste in Abhängigkeit der Außentemperatur für die obere (schwarz) und untere (rot) Messstelle am Regenfallrohr. Unten sind der zeitliche Verlauf der Wärmeströme und der der gemessenen Niederschläge an der Wetterstation Zierenberg aufgetragen.

## 9.2 Diskussion der Wärmeverluste über Abwasser- und Regenfallrohre

Die offene Verbindung durch das Rohrsystem zwischen dem Abwasseranschluss, durch das Gebäude bis zur oberen Durchdringung bewirkt eine Durchströmung mit Luft. Die dauerhafte Durchströmung mit kalter Luft führt zu Wärmeverlusten.

Die Messungen der Wärmeströme durch die Rohrwandungen eines Abwasserfallrohres und eines Regenfallrohres haben eindeutig das Auftreten von Wärmeverlusten durch die Rohre belegt. Diese betragen im Mittel über das Winterhalbjahr von Oktober bis April  $7,4 \text{ W/m}^2$  für das Abwasserfallrohr und  $5,6 \text{ W/m}^2$  für das Regenfallrohr. Unter der Annahme, dass die Verluste über die ganze

Rohrleitung konstant sind, können hieraus die Gesamtwärmeverluste bzw. die Erhöhung des Heizwärmebedarfs für die spezifischen Rohrlängen abgeschätzt werden. Hierzu müssen die Flächenspezifischen Wärmeverluste zunächst in Längenspezifische Verluste umgerechnet und dann mit der Dauer der Heizperiode von 180 Tagen multipliziert werden. Es ergeben sich Wärmeverluste von 185 kWh/a für das Abwasserfallrohr mit einer Länge von 18,5 m bzw. von 45 kWh/a für das Regenwasserfallrohr mit einer Länge von 8,4 m. Das entspricht je Meter Rohrlänge beim Abwasserrohr 10,0 kWh/(ma) sowie beim Regenfallrohr 5,3 kWh/(ma).

Aus dem bisherigen PHPP Ansatz, der von einer konstanten Durchströmung der Rohrleitungen mit Erdreichtemperatur ausgeht, folgen Wärmeverluste von knapp 450 kWh/a bzw. 75 kWh/a für das Abwasser bzw. das Regenfallrohr. Damit würden in der Energiebilanz für diesen Fall die Verluste um über 100 % bzw. über 60 % übertroffen.

Allerdings wurden die Messungen am jeweils oberen Ende der Rohre durchgeführt. Da eine Erwärmung der Luft im Rohr stattfindet sind die Verluste im unteren Bereich der Rohrleitungen größer als weiter oben. Daher werden in der Realität die Gesamtverluste größer ausfallen, als aus der Messung abgeschätzt. Damit fallen die Abweichungen zwischen PHPP-Ansatz und Messung kleiner aus. Es ist aber trotzdem deutlich, dass die Wärmeverluste durch die Rohrleitungen im PHPP im Vergleich zu den Messdaten tendenziell überschätzt werden. Hier wäre eine genauere Untersuchung und Modellierung der Wärmeverluste und Strömungen in den Rohrleitungssystemen von Interesse, aus denen in Kombination mit den Messungen eine genauere Abschätzung der Wärmeverluste erfolgen könnte.

Dass die Fragestellung nach der Größenordnung der Wärmeverluste bzw. der Erhöhung des Heizwärmebedarfs relevant ist, lässt sich aus den extrapolierten Messdaten ablesen: Für das Gesamtsystem im PPN bestehend aus vier Abwasserleitungen und zwei innenliegenden Entwässerungsrohren treten für das Gebäude Gesamtverluste von ca. 850 kWh/a bzw. 0,25 kWh/(m<sup>2</sup>a) auf. Dies entspricht einem Anteil am Heizwärmebedarf von 1,5 %. Bei Wohngebäuden kann von einer höheren Dichte an Abwasserleitungen ausgegangen werden, die Verluste können auf 5-10 % ansteigen. Daher ist die Frage nach der Bedeutung, der durch innenliegende Rohrleitungssysteme verursachte Wärmeverluste für hochenergieeffiziente Gebäude, relevant. Diese hat umso mehr Gewicht, als dass sich hieran auch die Frage nach dem zu wählenden Dämmniveau stellt. Nach Wissen der Autoren ist das PHPP das einzige Energiebilanzierungsprogramm, welches Wärmeverluste an innenliegenden Rohrleitungssysteme ausweist. Eine Anpassung des Berechnungsverfahrens auf Grund der Erkenntnisse aus den Messungen ist geboten und soll in naher Zukunft erfolgen.

## 10 Zusammenfassung

Im Zuge der Bemühungen der Hessischen Landesregierung eine CO<sub>2</sub>-neutrale Landesverwaltung zu erreichen, wurde das untersuchte Gebäude als „Pilotprojekt Passivhausbauweise“ errichtet. Die Untersuchungsergebnisse belegen eindeutig, dass ein signifikanter Beitrag zur Energie- und damit auch zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung erreicht wurde. Das Pilotprojekt Passivhaus gab bereits vor Fertigstellung maßgebende Impulse für neue Anforderungen zum energieeffizienten Bauen im staatlichen Hochbau in Hessen. Zukünftige Landesprojekte werden durch die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Pilotprojekt profitieren. Aus diesem Erkenntnisgewinn können staatliche Bauten in Hessen mit optimierten Planungsansätzen nachhaltig und noch einfacher und wirtschaftlicher ausgeführt werden.

Die Wirtschaftlichkeit des Gebäudes wurde bereits 2009 in einer Studie untersucht. In [Huse 2010] ist dazu resümiert: *„Als Ergebnis dieser Analyse kann hier festgehalten werden, dass sich das Dienstgebäude nach Passivhausbauweise in jedem Fall als eine wirtschaftlich interessante Maßnahme erwiesen hat. Das PASSIVHAUS verursacht gegenüber den Referenzgebäuden E07 und E09 [Anmerkung: nach der Energieeinsparverordnung] derart geringe Nutzungskosten und Emissionen bei gleichzeitiger Verbesserung des Komforts, dass sich die höheren Investitionskosten für energieeffizientere Maßnahmen rückfinanzieren. Darüber hinaus ist das Kosten- und Versorgungsrisiko wesentlich geringer.“*

Das Gebäude mit einer Energiebezugsfläche von 3.870 m<sup>2</sup> verfügt über eine moderne Versorgungstechnik mittels zweier zentraler Wärmepumpen (mit angeschlossenem Erdsondenfeld und Kühlturm) zur Heizung und Kühlung. Damit erfolgt die Energieversorgung monovalent mit Strom und passt damit sehr gut in das zukünftige nachhaltige Versorgungssystem, basierend auf vollständig regenerativ erzeugtem Strom. Zum Einsatz kommt eine Betonkernaktivierung (BKT) mit der alle Räume geheizt und gekühlt werden können.

### Heizenergie

Ende August 2014 wurde das Gebäude in Betrieb genommen. Die Messdatenauswertung erfolgt ab Anfang 2015. Im Detail wird insbesondere das Messjahr Mai 2016 bis April 2017 mit einem vergleichsweise kalten Winter ausgewertet. Der gemessene Heizwärmeverbrauch des Gebäudes liegt mit nur 19,2 kWh/(m<sup>2</sup>a) nahe beim Rechenwert von 18,3 kWh/(m<sup>2</sup>a) (nach der Anpassung der Bedingungen des Betriebsjahres), was erheblich unter den Verbrauchswerten üblicher Bürogebäude liegt. Die geringfügige Erhöhung erklärt sich durch die höheren Innentemperaturen (23 °C), die Wetterbedingungen sowie den erhöhten Luftvolumenstrom während des Untersuchungszeitraumes. Damit bestätigt sich die Funktion der hochwertigen Gebäudehülle des Gebäudes. Dies zeigen ergänzend auch die thermographischen Außenaufnahmen der Gebäudehülle. Der Heizwärmeverbrauch teilt sich auf in den dominanten Teil der Beheizung über die BKT (18,8 kWh/(m<sup>2</sup>a)) und nur 0,5 kWh/(m<sup>2</sup>a) für die Nachheizung der Lüftung (entspricht 2,4 %). Der Energieaufwand für den Warmwasserverbrauch ist durch die überwiegende Büronutzung untergeordnet und beträgt 6,6 kWh/(m<sup>2</sup>a).



## **Kühlenergie**

Die Kühlung des Gebäudes erfolgt in erster Linie über die BKT. Ergänzend gibt es noch die Möglichkeit, mittels Decken-Umluftkühler die Server- und Lagebesprechungsräume zu kühlen. Insgesamt beträgt der Kühlenergieverbrauch mit  $39,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  deutlich mehr als geplant. Die Ursachen sind zum größten Teil auf eine ungeplante Betriebsweise zurückzuführen: Es wurde festgestellt, dass die Wärmerückgewinnung des Lüftungssystems den gesamten Sommer lang aktiviert war, wodurch Wärme aus der Abluft im Gebäude verbleibt (verursacht ca.  $10 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  zusätzlichen Kühlbedarf). Außerdem würde eine verminderte Nutzung der Außenverschattung einen weiteren Kühlbedarf erzeugen ( $3 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  bei der Variation von 60 anstelle 70 % Nutzung). Über die genaue Nutzung der Verschattung liegen allerdings keine Messdaten vor. Insbesondere wurde aber festgestellt, dass ganzjährig Kühlenergie benötigt wird, welche in der Hauptsache zur Kühlung der Serverräume aufgewendet wird. Wird in einem Raum Strom in Wärme umgesetzt und durch ein Kühlgerät aktiv wieder herausgekühlt, wird dieser Vorgang absichtlich nicht in der PHPP-Wärmebilanz erfasst (wohl aber in der Strom- und Primärenergiebilanz). Da die Abwärme der Serverräume aber über das Gebäude-Kühlsystem abgeführt wird, muss dieser Kühlbeitrag hier gesondert mit in die Kühlbilanz aufgenommen werden. Damit erhöht sich die notwendige Nutzkälte um etwa  $17 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ . Der größte Teil des Zusatzverbrauchs für Kühlenergie lässt sich durch diese drei Effekte erklären. Für den Bereich der Nutzkälte ist somit weiteres Optimierungspotential vorhanden. Die Ergebnisse deuten auch darauf hin, dass wenn in Nichtwohngebäuden aktive Kühlungen betrieben werden, die Gefahr, durch weiteren Energieeinsatz die gewünschte Behaglichkeit herzustellen, ansteigt, obwohl das Potential passiver Maßnahmen (z.B. Sonnenschutz) nicht vollständig ausgenutzt ist.

## **Wärme- und Kälteversorgung**

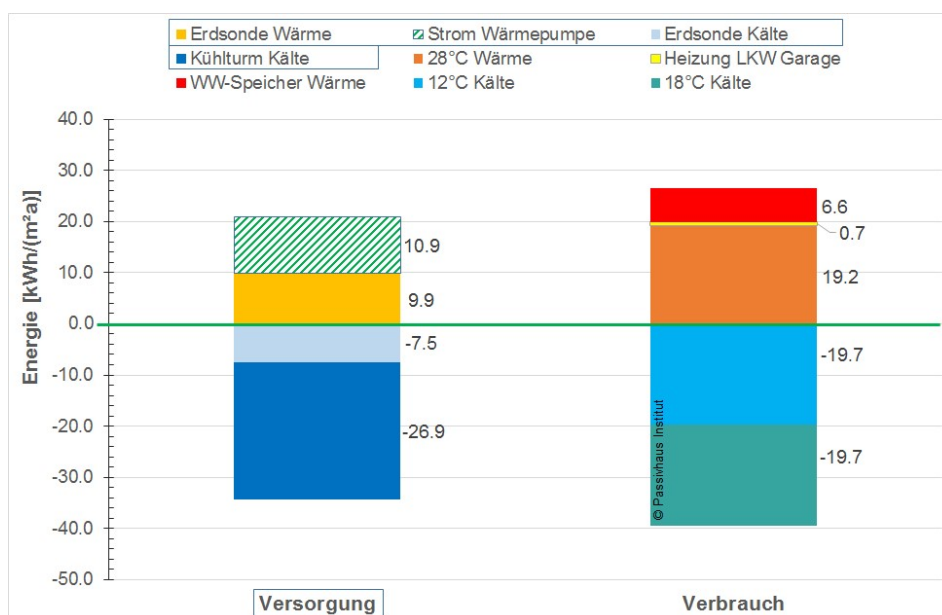
Zur Wärmeversorgung werden aus den Erdsonden  $9,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  Wärme entnommen.  $10,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  Stromverbrauch der Wärmepumpe werden dem Gebäude ebenfalls als Wärme zugeführt. Zur Kälteversorgung werden über den Kühlturm  $26,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  abgeführt (entspricht 78 % der Kälteversorgung) und nur  $7,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  über die Erdsonden (entspricht 22 %). Für die Wärmeabfuhr war es Planungsziel, vorrangig den Kühlturm zu nutzen und danach die Erdsonden. Dies ist erfolgreich umgesetzt worden. Die Jahresbilanz der Erdsonden ist näherungsweise ausgeglichen. Somit ist nicht zu befürchten, dass sich die Erdsonden langfristig erschöpfen könnten.

## **Lüftungssystem**

Wie für Passivhäuser im kühl-gemäßigten Klima üblich verfügt das Dienstgebäude über eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Gewählt wurde ein einzelnes, zentrales System, angeordnet in einem Technikraum im obersten Geschoss. Dies ermöglichte die Anbindung von Außen- und Fortluft auf kürzestem Weg über Dach. Das Zentralgerät arbeitet auf regenerativer Basis unter Verwendung von zwei fest stehenden Wärmespeicher-Blöcken. Der Luftweg wird durch Jalousieklappen zyklisch alle 60-90 Sekunden umgeschaltet. Durch Vorgabe längerer Zykluszeiten kann die Wärmerückgewinnung bei Bedarf reduziert werden. Für das Projekt wurde eine Auslegungs-Luftmenge von  $4.200 \text{ m}^3/\text{h}$  geplant, wobei durch Einzelraum-Regelung zumeist ein deutlich geringerer Volumenstrom zu erwarten war. Außerhalb der Nutzungszeit, nachts und

an Wochenenden, wurde eine geregelte Abschaltung mit vorgeschalteter Filtertrocknung vorgesehen.

Zur Bestimmung des Wärmebereitstellungsgrades des Gerätes wurde vom PHI eine Vertiefungsmessung mit kalibrierten Datenloggern im Kernwinter 2016/17 durchgeführt. Die aus der Zertifizierung vorliegenden Kennwerte des Lüftungsgerätes konnten unter Feldbedingungen im Rahmen der Messunsicherheit mit einem Wärmebereitstellungsgrad von 82 % bestätigt werden. Das hoch-effiziente Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung bewährt sich in der praktischen Anwendung auch unter widrigen Randbedingungen, und die im Rahmen der Zertifizierung realitätsnah bestimmten Kennwerte erweisen sich als geeignet für eine zielgenaue Planung zukünftiger Objekte.



**Abbildung 83: Versorgungs-Verbrauchs-Bilanz des Gebäudes für den Jahreszeitraum 01.05.2016 bis 30.04.2017. Energiebezugsfläche (EBF): 3.870 m². (Grafik identisch mit Abbildung 25)**

### PHPP-Bilanz

Während der Planung wurde das PHPP kontinuierlich an die baulichen Bedingungen angepasst. Für einen geeigneten Vergleich mit den Planungsdaten müssen die Randbedingungen der Messung in der Bilanzrechnung (PHPP) berücksichtigt werden (Wetter, Innentemperatur, Betriebszeiten und Volumenstrom der Lüftung, Personenbelegung, IWQ). Durch die Anpassungen verändern sich die Ergebnisse der Energiebilanz des PHPP. Der gemessene **Heiwärmeverbrauch** von 19,2 kWh/(m²a) liegt damit um nur 0,9 kWh/(m²a) höher als der aus der angepassten PHPP-Berechnung, was als sehr gute Übereinstimmung zu bewerten ist. Bei der **Kühlung** ist – wie oben erwähnt – ein sehr großer Mehrverbrauch gegenüber der Planung zu verzeichnen. Dieser konnte durch das Monitoring aufgeklärt werden (Nutzung WRG ganzjährig, Verschattungsnutzung und Serverkühlung).

Für den Bereich der Nutzkälte ist damit weiteres Optimierungspotential vorhanden. Wichtig ist, dass die kontraproduktive Nutzung der WRG im Sommer umgehend deaktiviert wird (Anpassung der Regelung). Die sommerliche Aktivierung sollte nur in Hitzeperioden erfolgen (Verminderung der Lüftungswärmelast durch WRG). Außerdem machen die Ergebnisse nochmals deutlich, wie sinnvoll und notwendig der Einsatz stromsparender IT-Technik insbesondere auch in Serverräumen ist. Auf diesen Bereich sollte in der Planung stets geachtet werden.

## Strom

Die gesamte Energieversorgung des Gebäudes erfolgt ausschließlich elektrisch, weshalb die Verbrauchswerte von besonderem Interesse sind. Der spezifische Gesamtstromverbrauch des Gebäudes von 47,9 kWh/(m<sup>2</sup>a) beinhaltet alle Aufwendungen für das Gebäude, auch die polizei-spezifischen.

Als eine wichtige Teilmessung werden die Bereiche "Licht + Steckdosen" sowie das getrennte EDV-Netz "IT + IT-Steckdosen" separat erfasst. Für die EDV-Versorgung werden etwa 5 kWh/(m<sup>2</sup>a) eingesetzt, die restlichen etwa 20 kWh/(m<sup>2</sup>a) sind für den Bereich "Licht + Steckdosen" aufgewendet worden. Der Jahresverbrauch der gesamten MSR-Anwendungen ("Messen/Steuern/Regeln") beträgt 13,9 kWh/(m<sup>2</sup>a). Der Verbrauch wird für die Versorgung der diversen Regelungen und Geräte in allen Etagen und Räumen aufgewendet. Dazu zählen z.B. Sensoren (Temperatur, Feuchte), Stellantriebe für z.B. Klappen, Präsenzmelder, Fensterkontakte, Volumenstromregler, motorische BSK (dauerhafte Leistungsanforderung gegen Federkraft), Filterkontrollmessungen, Druckdifferenzmessgeräte, Kühlturm inkl. Wasserenthärtung und Wasseraufbereitung, mehrere Dachheizungen (Frostfreihaltung Entwässerungsrohre), Pumpen, Thermostate und Regelventile. Zum Bereich der Haustechnik wurde der Strom für die **Hydraulikpumpen** (Wasserumwälzung) gesondert gemessen und untersucht. Dieser ist im MSR-Strom bereits enthalten. Zum Betrieb des Netzes mit Erdsonden, Kühlturm sowie den vier Kalt- und Warmwasserspeichern inkl. der Betonkerntemperierung (BKT) werden vier zentrale Pumpen gemessen und auf die insgesamt 9 eingesetzten Pumpen hochgerechnet (6 BKT-Pumpen). In der Summe ergibt sich für alle 9 Pumpen ein Jahresverbrauch von 2,3 kWh/(m<sup>2</sup>a).

Die Lüftungsanlage würde im planungsgemäßen Betrieb etwa 1,4 kWh/(m<sup>2</sup>a) benötigen (Hochrechnung). Die Messung für die Lüftungsanlage zeigt für den Jahreszeitraum mit 5,0 kWh/(m<sup>2</sup>a) einen höheren Verbrauch an. Die Ursache liegt in der zunächst fehlerhaften Betriebsweise mit deutlich zu hohen Volumenströmen (auch in der Nacht und an Wochenenden). Es stellte sich heraus, dass aufgrund von zu hohen Feuchtwerten in den Duschräumen seit August 2015 das Programm der GLT so geändert wurde, dass das Gerät fast dauerhaft auf sehr hohem Niveau betrieben wurde. Die zeitliche Begrenzung (Nachlaufzeit) zur Trocknung der Dusch- und Waschräume war aufgehoben worden. Das führte zu einer Betriebsweise mit ca. 1.600 m<sup>3</sup>/h Daueranforderung nur der Dusch- und Waschräume. Aufgrund des Drängens des PHI wurde die Ursache im Programm durch die GLT-Firma festgestellt. Das Programm wurde am 09.06.2017 zurückgestellt auf die ursprüngliche Betriebsweise mit Nachlaufzeiten. Dadurch konnte die Luftmenge von im Mittel 4.260 m<sup>3</sup>/h schlagartig auf 1.660 m<sup>3</sup>/h – also um gut 60 % – reduziert werden. Nun wird der Wert von 4.000 m<sup>3</sup>/h nur noch als seltene Spitzenanforderung erreicht. Diese Änderung macht sich entsprechend positiv beim Stromverbrauch bemerkbar: Die benötigte elektrische

Leistung sinkt von im Mittel 3 kW auf nur 0,6 kW. Das entspricht einer Reduktion um 80 %. Wird diese Betriebsweise beibehalten, reduziert sich der Verbrauch um monatlich über 1.700 kWh/Monat.

Wird die Reduktion der Volumenströme beibehalten, werden die unerwünschten Auswirkungen auf den Heizwärmeverbrauch, die Luftfeuchte, den Stromverbrauch wie auch den mechanischen Stress des Kanalsystems dauerhaft erfolgreich abgestellt.

Als dritter großer Stromverbraucher im Technikbereich werden die Verbrauchssummen der beiden **Wärmepumpen** und ihrer Regelung mit knapp 11 kWh/(m<sup>2</sup>a) identifiziert. Darin ist der Verbrauch für die Regelung und zwei Pumpenkreisläufe bereits enthalten.

### **Wärmepumpe**

Als einzige Wärmeversorgung des Gebäudes ist die Wärmepumpe (mit angeschlossenem Erdsondenfeld und Kühlturm) von besonderem Interesse. Die Wärmepumpe versorgt vier Kälte- bzw. Wärmespeicher mit den Temperaturniveaus von 12, 16, 28 sowie 50 °C. Die Arbeitszahl der Anlage konnte mit den Wärmezählern der Hauptbereiche Kühlturm, Erdsonden sowie der vier Speicher inkl. Leitungs- und Speicherverlusten ermittelt werden. Mit Arbeitszahlen von im Sommer 3,2 und im Winter sogar 4,9 werden sehr gute Ergebnisse erzielt. Wird dazu noch der Stromverbrauch der Kreislaufpumpen berücksichtigt, sinken die Werte auf 2,8 bzw. 4,6 und liegen damit noch immer gut, wenn man berücksichtigt, dass auch Rohrleitungs- und Speicherverluste enthalten sind. Als Ganzjahreswerte ergeben sich Arbeitszahlen von 4,2 bzw. 3,5 (inkl. Strom Förderpumpen). Die optimalen Betriebsbedingungen für die Wärmepumpe ergeben sich im Kernwinter bei Heizbetrieb und gleichzeitigem Kühlbedarf der Serverräume. Dann wird sogar eine Arbeitszahl von 5,1 bzw. 4,7 (inkl. Strom Förderpumpen) erreicht. Damit wird deutlich, dass der Betrieb der Wärmepumpe erfolgreich ist und wie gewünscht funktioniert.

### **Thermische Behaglichkeit**

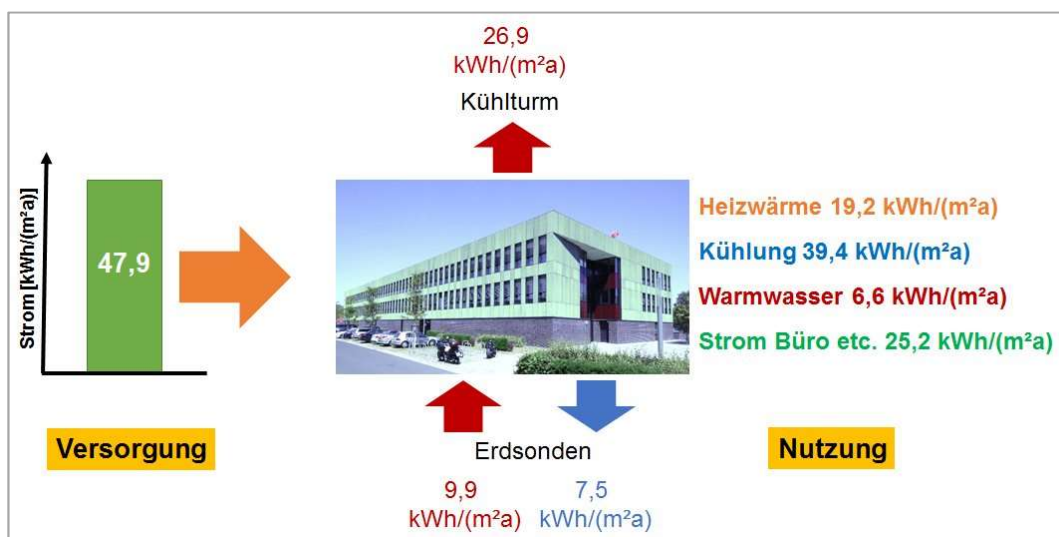
In vier ausgewählten Büroräumen wurden im Winter umfangreiche Untersuchungen der thermischen Behaglichkeit durchgeführt. Es handelt sich durchweg um Räume, die hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit relativ ungünstige Eigenschaften, wie etwa mehr als eine Außenwand oder aber Wärmebrücken (z.B. zum Erdreich) aufweisen. Zur Ermittlung der operativen Raumtemperatur, der Strahlungstemperatursymmetrie und der Luftgeschwindigkeit wurde in allen Räumen eine ca. 30-minütige Messung durchgeführt. Zusätzlich wurden die Raumumfassungen thermographisch untersucht.

Bei der Untersuchung hielten die Räume in Bezug auf die operative Temperatur die höchste bzw. die zweithöchste Kategorie ein. Die festgestellten Temperaturschichtungen waren, erwartungsgemäß für ein gut wärmegeämmtes und luftdichtes Gebäude, außerordentlich gering. Auch bei der Strahlungstemperatur-Asymmetrie wird mit großem Abstand in allen Räumen die Anforderung eingehalten, es herrscht jeweils ein sehr homogenes Temperaturfeld vor. Die angetroffenen relativen Luftfeuchten sind gering und unterschreiten die Empfehlung von 30 % r.F. als Mittelwert über längere Perioden. Die Ursache wurde in der Lüftungsanlage, die mit deutlich zu hohem Volumenstrom betrieben wurde, festgestellt. Diese Betriebsweise konnte inzwischen geändert

werden, was in Zukunft deutlich höhere Luftfeuchtwerte erwarten lässt. Die gemessenen mittleren Luftgeschwindigkeiten sind sehr gering. In allen Räumen wurden  $0,1 \text{ m/s}$  auch in den Spitzenwerten unterschritten. Die Mittelwerte lagen unterhalb von  $0,07 \text{ m/s}$ . Jede Beeinträchtigung des thermischen Komforts durch Luftbewegungen kann auf dieser Grundlage ausgeschlossen werden.

Aus Einzelparametern können die zusammenfassenden Bewertungs-Indizes PMV ("vorausgesagtes mittlere Votum") und PPD ("vorausgesagter Prozentsatz Unzufriedener") nach [EN ISO 7730] abgeleitet werden. In allen Räumen des zweiten Obergeschosses wird die optimale Behaglichkeit nach Kategorie A erreicht, das PMV liegt deutlich unterhalb eines Betrages von  $0,2$ . Für die weniger stark exponierten Räume des zweiten Obergeschosses und sämtliche Räume des ersten Obergeschosses kann ein noch geringeres PMV erwartet werden. Die Bedingungen auf ca.  $90 \%$  der beheizten Gebäudefläche bieten damit auch unter schärfsten Anforderungen ein optimales Umgebungsklima.

## Fazit



**Abbildung 84: Ergebnisübersicht der Versorgung und Nutzung des Verwaltungsgebäudes.**

Als Gesamtbewertung kann festgestellt werden, dass ein funktionierendes energieeffizientes Verwaltungsgebäude realisiert wurde, in welchem ein hoher Behaglichkeitsstandard nachgewiesen ist. Dies wird aufgrund der sehr hochwertigen Gebäudehülle und einer angepassten Gebäudetechnik mit nur niedrigem Energieeinsatz erreicht. Die Sinnhaftigkeit eines Monitorings zeigt sich erneut am noch vorhandenen Verbesserungspotential. Der Passivhausstandard erweist sich auch bei dieser Nutzungsart erneut als sehr gut umsetzbar und praktikabel. Er bietet schon heute eine gute und erprobte Lösung für zukünftige Gebäudeanforderungen.



## 11 Quellen

- [AKkP 25] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 25: Temperaturdifferenzierung in der Wohnung. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2004
- [EN 15251] Bewertungskriterien für den Innenraum einschließlich Temperatur, Raumluftqualität Licht und Lärm – Entwurf. Deutsches Institut für Normung e.V.
- [EN ISO 7730] Ermittlung des PMV und des PPD und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit. Deutsches Institut für Normung e.V. 2005
- [Feist 2004] Feist, W.: Wärmeübergabeverluste im Licht der Baupraxis. In: Wärmeübergabe- und Verteilverluste im Passivhaus. Protokollband Nr. 28 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser. Passivhaus Institut, Darmstadt.
- [Feist 2012] Feist, W.: Zusammenfassung: Richtig Messen. In: Richtig messen in Energiesparhäusern; Protokollband des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase V, Passivhaus Institut, Darmstadt.
- [Huse 2009] Huse, A.: Wirtschaftlichkeit eines Dienstgebäudes: Passivhaus vs. EnEV 2009. In: Tagungsband der 14. Intern. Passivhaustagung 2010, Dresden, Passivhaus Institut Darmstadt, 2010
- [Peper 2012] Peper, S.: Messkonzepte, Störgrößen und adäquate Lösungen. In: Richtig messen in Energiesparhäusern; Protokollband des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase V, Passivhaus Institut, Darmstadt.
- [Pfluger 2014] Habilitationsschrift "Einsatz des Passivhaus-Konzepts zur bauphysikalischen und gebäudetechnischen Effizienzsteigerung bei Neubau und Sanierung". Universität Innsbruck, 2014