

Energie-Monitoring von Wohngebäuden im Passivhaus- Stadtteil Heidelberg-Bahnstadt



Autor: Søren Peper
Unter Mitarbeit von Javier Flóres und Tim Huyeng

Passivhaus Institut Dr. Wolfgang Feist
Rheinstraße 44/46, 64283 Darmstadt, www.passiv.de

Oktober 2016

Energie-Monitoring von Wohngebäuden im Passivhaus- Stadtteil Heidelberg-Bahnstadt

Im Auftrag der Stadt Heidelberg



Kofinanzierung
im Rahmen des EU-Projektes PassREG



Co-funded by the Intelligent Energy Europe
Programme of the European Union

- In Kooperation mit den Stadtwerken Heidelberg -

Foto Titelseite: Bildrechte Stadt Heidelberg / Foto: Kay Sommer

Disclaimer:

The sole responsibility for the content of this report lies with the authors. It does not necessarily reflect the opinion of the European Union. Neither the EACI nor the European Commission are responsible for any use that may be made of the information contained therein.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Einleitung..... | 4 |
| 2 | Fernwärme | 5 |
| 2.1 | Energieverbrauch Fernwärme Bahnstadt Heidelberg..... | 5 |
| 2.2 | Verfahren Minimalmonitoring Wärmeverbrauch | 7 |
| 2.3 | Auswertung Energieverbrauch Fernwärme | 10 |
| 2.3.1 | Warmwasserbereitung, Verteilung und Speicherung | 15 |
| 2.4 | Bewertung Heizwärmeverbrauch | 17 |
| 2.5 | Vergleich Heizwärmeverbrauch mit PHPP-Planungsdaten | 19 |
| 2.5.1 | Wetterdaten | 21 |
| 2.5.2 | Innentemperaturen..... | 24 |
| 2.5.3 | Zusammenführung PHPP | 24 |
| 2.5.4 | Heizwärmebedarf (PHPP) versus Verbrauch | 27 |
| 2.5.5 | Ursachen des höheren Verbrauchs 2015 | 29 |
| 3 | Elektrischer Strom | 32 |
| 3.1 | Spezifischer Stromverbrauch der Wohnungen (ohne Allgemeinstrom) | 32 |
| 3.2 | Allgemeinstrom..... | 33 |
| 3.3 | Stromverbrauch Tiefgaragen..... | 35 |
| 3.4 | Einordnung der Stromverbrauchswerte | 36 |
| 3.5 | Winter-Sommer Stromverbrauch..... | 37 |
| 4 | Fazit Monitoring Bahnstadt Heidelberg..... | 39 |
| 5 | Quellenangaben | 41 |
| 6 | Anhang..... | 43 |

1 Einleitung

Auf 116 Hektar Fläche des ehemaligen Güter- und Rangierbahnhofs entsteht zur Zeit die weltweit größte Passivhaussiedlung. Durch die Deckung des Wärme- und Strombedarfs zu 100 % aus erneuerbaren Energien wird der Stadtteil zu einer der größten Nullemissionssiedlungen der Welt.

Der Erfolg des Passivhaus-Baugebietes „Heidelberg-Bahnstadt“ soll mit Hilfe eines Monitorings für einen Teil der Wohngebäude überprüft werden. Es liegen monatliche Zählerablesungen für den gesamten Wärmeverbrauch (Heizung, Warmwasser, Verluste etc.) ganzer Baufelder mit jeweils über hundert Wohnungen vor (nur ein Baufeld verfügt über etwas weniger Wohnungen). Mit dem vorhandenen Budget können keine detaillierten Messungen durchgeführt werden: Die Datenauswertung erfolgt aus diesem Grund im Rahmen eines sogenannten Minimalmonitorings [Peper 2012a], bei dem auch unter Zuhilfenahme von Forschungsergebnissen aus anderen Projekten der Heizwärmeverbrauch aus diesen Monatsmittelwerten in einer guten Näherung ermittelt wird.

Im gesamten Baugebiet ist der Passivhaus-Standard verbindlich vorgeschrieben. Damit wird in der Planungsphase der Gebäude u.a. ein Heizwärmebedarf von maximal 15 kWh/(m²a) angestrebt. Zum Vergleich wird die Studie von Fa. Techem zum Heizenergieverbrauch 2013 von Bestandsgebäuden verschiedener Baualtersklassen genannt: Gebäude mit Fernwärmeversorgung benötigten danach als Energieverbrauch für Raumheizwärme durchschnittlich 112 kWh/(m²a) [Techem 2014]).



Abbildung 1: Luftbild des Teils der Bahnstadt, in dem sich die hier untersuchten Gebäude befinden (Foto: Kay Sommer / Bildrechte Stadt Heidelberg)

Die hier vorgelegte Untersuchung analysiert die Energieverbrauchsdaten von Wohngebäuden in der Bahnstadt mit insgesamt 1.400 Wohnungen auf knapp 90.000 m² Wohnfläche für Wärme der Jahre 2014 und 2015 sowie für Strom des Jahres 2015.



Abbildung 2: Ansichten einiger Gebäude in der Bahnstadt (Fotos: PHI)

2 Fernwärme

2.1 Energieverbrauch Fernwärme Bahnstadt Heidelberg

Das Passivhaus Baugebiet Bahnstadt Heidelberg besteht aus vielen großen Baufeldern, welche jeweils mit nur einem zentralen Fernwärmeanschluss versorgt werden. Das bedeutet, dass für bis zu fünf große Mehrfamilienhäuser nur ein zentraler Fernwärmeanschluss zur Abrechnung vorhanden ist. Auf die weiteren Unterzähler in den einzelnen Gebäuden hat der Versorger keinen Zugriff. Diese Hauptwärmehähler an den Übergabestationen wurden bisher bei ungefähr halbjährigen Ortsterminen vom Versorger „Stadtwerke Heidelberg“ ausgelesen. Später soll die Auslesung dieser elektronischen Wärmehähler regelmäßig über eine Datennetzanbindung erfolgen. Für eine Übersicht über die Gesamtfunktion der Siedlung wurden die Monatswerte der Zählerstände wiederholt ausgelesen und dem Passivhaus Institut zur Auswertung übergeben.

Von den in Tabelle 1 zusammengestellten Baufeldern liegen diese Verbrauchsdaten vor. Als Energiebezugsfläche dienen hier die nach PHPP (Passivhaus Projektierungs-Paket; Energiebilanz-Tool) definierten Nutzflächen (bei Wohnungen sind das die Wohnflächen); bei der Einstufung der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die für die Kennwerte nach EnEV bestimmten Flächen A_N bei diesen Gebäuden im Mittel um 28 % größer ausfallen (25 bis 34 %); die spezifischen Verbrauchswerte sind darauf bezogen dann entsprechend noch kleiner. Weiter unten in Abbildung 8 werden die Verbrauchswerte zur Verdeutlichung zusätzlich in Bezug auf die A_N -Fläche dargestellt.

Tabelle 1: Übersicht über die Art der Gebäude der untersuchten Baufelder

| Art | Anzahl | Energie- bezugsfläche | Anzahl Wohneinheiten |
|-------------------|--------|--------------------------|-------------------------|
| Wohnbebauung | 5 | 74.218 m ² | 834 |
| Studentenwohnheim | 2 | 15.457 m ² | 564 |

Für eine sinnvolle Auswertung müssen die Gebäude mindestens ein Jahr vollständig bezogen bzw. genutzt sein, nur dann kann ein belastbarer Jahresverbrauch ermittelt werden. Auswertbare Daten mit diesem Umfang liegen bisher von den Baufeldern mit Wohnnutzungen und den Studentenwohnheimen vor. Diese können für die vollständigen Jahre 2014 und 2015 ausgewertet werden. Bei drei Baufeldern gilt dies für 2014 aber nur mit Einschränkung, da der Vollbezug vermutlich erst um ein bis drei Monate später erfolgte (Januar bis März 2014). Genaue Angaben zum Zeitpunkt der Vollbelegung sind nicht vorhanden. Ob diese Umstände der vollständigen Belegung in diesen Gebäuden zu einem Mehr- oder Minderverbrauch geführt haben, ist nicht bekannt¹.



Abbildung 3: Fernwärmeübergabestationen in zwei der untersuchten Gebäude (Fotos: PHI)

¹ Wird eine Wohnung in einem Gebäude noch nicht genutzt sind folgende zwei Varianten möglich:
 (I) Ein erhöhter Verbrauch ergibt sich, wenn die Beheizung auf Wohnniveau bereits erfolgt, aber die internen Wärmequellen (Personen, elektrischer Verbrauch) noch fehlen. Auch die Einzugsaktivität selbst (offene Türen und Fenster) kann zu erheblichen zusätzlichen Verlusten führen.
 (II) Aber auch eine Reduktion des Verbrauchs ist denkbar, wenn vor dem Bezug keine oder nur eine reduzierte Beheizung erfolgt ist.

2.2 Verfahren Minimalmonitoring Wärmeverbrauch

Mit den gelieferten Monatsständen der zentralen Wärmezähler liegen je Baufeld die Verbräuche für alle Wärmeanwendungen als Summenwerte vor. In diesen Summenwerten sind die folgenden Verbrauchsgrößen enthalten:

- Heizwärmeverbrauch
- Warmwasserwärmeverbrauch
- Wärmeabgabe der Verteilleitungen (nutzbare und nicht nutzbare)
- Übergabeverluste der Fernwärmestation
- Speicherverluste der Warmwasserspeicher
- Sonstiges, wie z.B. Rampenheizung der Tiefgarageneinfahrt

Aus den Summenwerten der Monatsverbräuche lassen sich die einzelnen Verbrauchsgrößen nicht heraus differenzieren. Daher muss ein empirisches Verfahren angewendet werden, welches zumindest eine gute Abschätzung dieser Aufteilung ermöglicht. Dabei ist zu beachten, dass die untersuchten Gebäude über keine thermischen Solaranlagen verfügen und die Warmwassererzeugung in den Wohnbauten vollständig über die Fernwärme erfolgt.

Aus den Monatsverbrauchswerten kann in den Kernsommermonaten der Aufwand für alle Aufwendungen ermittelt werden, welche unabhängig von der Beheizung der Gebäude sind. Dabei wird angenommen, dass ungeplante und unerwünschte Sommerbeheizungen nicht durchgeführt werden. In Passivhäusern gibt es keinen originären Sommerheizenergiebedarf – solche Gebäude weisen wegen ihrer langen Zeitkonstante auch in evtl. mehrwöchigen „Kälteeinbrüchen“ immer noch komfortable Innentemperaturen ohne jede Beheizung auf. Da in der Sommerzeit möglicherweise aufgrund von längeren Urlaubszeiten einige Wohnungen nicht genutzt werden, darf nicht der Monat mit dem niedrigsten Sommerverbrauch angesetzt werden. Da es sich um große Gebäude mit einer Vielzahl von Wohnungen handelt, kann eine geringe Gleichzeitigkeit der Urlaubszeiten unterstellt werden.

Es wird der mittlere Verbrauch der vier Sommermonate (Juni bis September) berechnet und dieser wird für jeden Monat als Verbrauchsgröße **„Aufwendungen ohne Heizung“** angesetzt; in einem Passivhaus in diesem Klima ist der Heizwärmebedarf in diesen Monaten definitiv Null. Wird nun dieser Sommerverbrauchsmittelwert auf das Jahr hochgerechnet, ergibt sich der jährliche Aufwand für die „Aufwendungen ohne Heizung“. In Abbildung 4 ist dieser Verbrauch für das Auswertungsjahr innerhalb des Kastens mit grüner Punktlinie dargestellt. Er wird hier zur Abkürzung als sog. **„Sockelverbrauch“** bezeichnet. Als mittlerer Sommerverbrauchswert hat sich in diesem

Baufeld für den Sommer 2014 ein Wert von 3,72 kWh/(m² Monat) ergeben. Alle Verbrauchswerte in den übrigen Monaten, welche sich nun oberhalb des grünen Kastens befinden, werden als „Heizwärmeverbrauch“ gewertet.

Die Wärmeabgabe der Verteilleitungen wird bei diesem einfachsten Ansatz als im Jahresverlauf konstant angenommen. Die Vorlauftemperatur der Fernwärme richtet sich nach dem Bedarf der ganzjährigen Warmwasserbereitung. In der Hauptsache sind die Wärmeabgaben der Verteilleitungen durch die Temperaturdifferenz Oberfläche Rohrleitung zur Umgebungsluft (z.B. Kellerraum, Tiefgarage) geprägt.

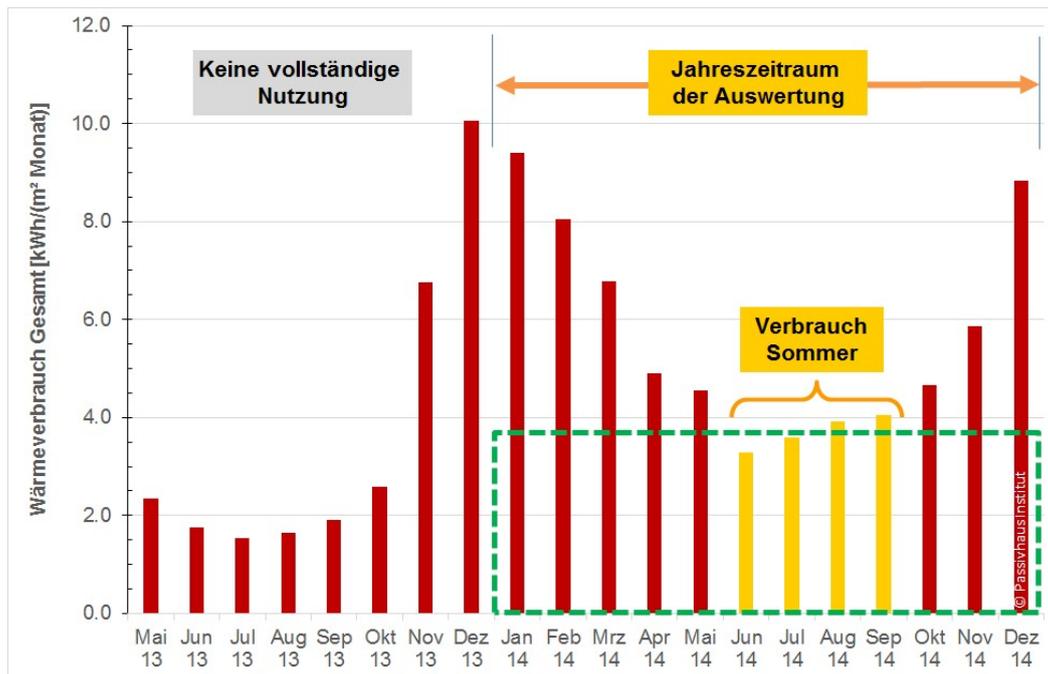


Abbildung 4: Monatsverbrauchswerte Fernwärme eines beispielhaften Baufelds in der Bahnstadt Heidelberg. Das Vorgehen zur Ermittlung des Heizwärmeverbrauchs ist im Text geschildert.

Bei dem in der Abbildung 4 gezeigten Beispiel ergibt sich nach diesem Verfahren der Heizfernwärmeverbrauch für das gesamte Baufeld in erster Näherung zu 23,3 kWh/(m²a). Der Sockelverbrauch beträgt 3,72 kWh/(m²Monat) x 12 Monate = 44,6 kWh/(m²a).

Diese Art der Berechnung erlaubt es grundsätzlich, aus den wenigen verfügbaren Messdaten einen Wert für den Heizwärmeverbrauch zu ermitteln. Sie führt jedoch in dieser ersten Näherung aus verschiedenen Gründen zu einer **Überschätzung des Heizwärmeverbrauchs**:

- Der Warmwasserverbrauch in Wohngebäuden ist im Sommer geringer als im Winter. Durch die Ermittlung des Sockelverbrauchs im Sommer fällt der Abzug

damit für den Winter zu gering aus. In einem Gebäude mit 12 Wohnungen in Ludwigshafen zeigen die Analysen der Messdaten einer dort durchgeführten genaueren Untersuchung [Peper 2012a], dass der Warmwasser-Winterverbrauch um ca. 10 % über dem mittleren Sommerverbrauch liegt. Bei der ersten Näherung würde die Überschätzung des Heizwärmeverbrauchs etwa **1 bis 2 kWh/(m²a)** betragen. In einem anderen Projekt in Frankfurt mit 19 Wohnungen zeigen die Messdaten eine noch stärkere Winter- zu Sommerüberhöhung (um 29 %). In der hier durchgeführten Analyse wird der moderatere Ansatz von 10 % Winter- zu Sommerüberhöhung verwendet.

- Die bei einigen Baufeldern vorhandene Beheizung der Tiefgarageneinfahrten fällt im Sommer nicht an und wird so dem Heizwärmeverbrauch zugerechnet. Eine Abschätzung des Verbrauchsanteils ergibt für diese Baufelder mit zentralen Tiefgaragen Werte um **0,1 bis 0,3 kWh/(m²a)** für die **Tiefgarageneinfahrt-beheizung**.
- Möglicherweise sind ungewollte Beheizungen (z.B. im Monat Mai) aufgrund von Fehlbedienung anzutreffen. Diese Aufwendungen sind im ermittelten „Heizwärmeverbrauch“ enthalten². In den hier untersuchten Projekten mit Wohnnutzung betragen die Heizwärmeverbräuche, welche im Mai über den Sommersockelwerten liegen, zwischen 0,4 und 1,2 kWh/m²; im Mittel **0,7 kWh/m²**.
- Die Wärmeabgabe der Verteilungen im Erdreich und Kellerbereich richtet sich - bei weitgehend konstanter Vorlauftemperatur der Fernwärme - nach der Art und Qualität der Dämmung sowie nach der Umgebungstemperatur der Leitungen. Im Winter liegen die Umgebungstemperaturen niedriger und damit steigt die Abgabe der Wärmeverteilung. Durch die Berechnung der „Sockelwärme“ aus den Sommerwerten wird die erhöhte Abgabe im Winter vollständig dem Heizwärmeverbrauch zugerechnet. Eine Abschätzung der Größenordnung wurde für eines der Baufelder durchgeführt. Dabei wurde nach Leitungslängen im Erdreich und im Keller unterschieden, und die linearen Wärmeverlustkoeffizienten der unterschiedlichen Leitungen wurden berücksichtigt. Es ergibt sich eine Differenz zwischen dem Sommeransatz und einer Berücksichtigung der niedrigeren Temperaturen im Winter von 1800 kWh/a, entsprechend rund

² Dieser Heizwärmeanteil wurde im Mai verbraucht. Aus anderen Passivhaus-Projekten ist bekannt, dass die Beheizung im Mai nicht erforderlich und im Regelfall nicht beabsichtigt ist, häufig führt sie sogar zu Überwärmung. Die Heizzeit in einem energieeffizienten Gebäude endet deutlich früher, spätestens im März / April eines Jahres. Zur Vergleichbarkeit mit dem PHPP werden die Mai-Verbrauchswerte hier herausgerechnet. In der Gesamtsumme Fernwärmebezug sind sie weiterhin enthalten.

0,2 kWh/(m²a). Dieser Wert wird vereinfacht auch für die anderen Baufelder angesetzt.

In der Summe der hier dargestellten Effekte ergibt sich durch die 1. Näherung („Sockel-methode“) eine Überschätzung des Heizwärmeverbrauchs von 1,4 bis 2,5 kWh/(m²a) **plus** dem jeweiligen „ungeplanten“ Heizwärmeverbrauch für den Mai. Mit dem maximalen Wert³ 2,5 kWh/(m²a) und dem projektspezifischen Heizwärmeverbrauch für den Mai ergibt sich die Überschätzung zu **2,9 bis 3,7 kWh/(m²a)**. Dieser Verbrauch muss in der nun erfolgten 2. Näherung abgezogen werden, um einen realitätsnäheren Wert für den Heizungsfernwärmeverbrauch zu erreichen. Für das Baufeld aus Abbildung 4 ergibt sich damit ein Heizwärmeverbrauch (zweite Näherung) von

$$23,3 \text{ kWh/(m}^2\text{a)} - 3,3 \text{ kWh/(m}^2\text{a)} = \mathbf{20,0 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}}$$

Damit sind die größten Effekte, die bei dem Verfahren zur Überschätzung des Heizwärmeverbrauchs führen, berücksichtigt. Die so ermittelten Werte der zweiten Näherung werden nachfolgend wieder verkürzt als „Heizwärmeverbrauch“ betrachtet.

Bei der hier durchgeführten Auswertung der Verbrauchsdaten muss berücksichtigt werden, dass die erreichbare Genauigkeit begrenzt ist. Das Vorgehen arbeitet mit Vereinfachungen und Annahmen welche dazu führen, dass die bei detaillierten Messungen erreichbare Genauigkeit von etwa $\pm 3 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ [Feist 2004] in dieser Analyse keinesfalls unterschritten werden kann. Die mittlere Messabweichung dürfte in einem Bereich von ca. $\pm 4 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ liegen. Auch mit dieser (relativ großen, aber absolut sehr geringen) Fehlermarge ist der Heizwärmeverbrauch in den hier vermessenen fast 90.000 m² Nutzfläche extrem gering. Schon hier wird erkennbar, dass das Projekt Passivhaussiedlung Heidelberg Bahnstadt äußerst erfolgreich ist.

2.3 Auswertung Energieverbrauch Fernwärme

Ausgangspunkt für die Auswertung der Fernwärmeverbräuche für Heizung, Warmwasser und Verteilung sind - wie beschrieben - die Ablesewerte der Übergabezähler. Der Mittelwert bezogen auf die Energiebezugsfläche beträgt im ersten Jahreszeitraum (2014) **54,6 kWh/(m²a)** im zweiten Jahr **53,2 kWh/(m²a)** (2015). Der Mittelwert im zweiten Jahr ist etwas geringer, da ein weiteres Baufeld (BS-05) ausgewertet werden konnte, welches über den insgesamt niedrigsten Messwert verfügt. Betrachtet man die

³ Bei den beschriebenen unterschiedlichen Effekten, welche zur Überschätzung des Heizwärmeverbrauchs führen, wurden tendenziell eher niedrige Werte angesetzt („sichere Seite“). Daher wird in der folgenden Auswertung die obere Grenze dieser vorsichtigen Abschätzung angesetzt.

Messwerte der einzelnen Wohnfelder (Abbildung 5) zeigt sich, dass bei allen Baufeldern im zweiten Messjahr ein moderater höherer Verbrauch zu verzeichnen ist. Die Erhöhungen der Gesamtverbrauchswerte liegen zwischen 0,5 bis 3,6 kWh/(m²a). Weiter unten im Abschnitt zum Vergleich mit den PPHP Planungswerten wird gezeigt, dass diese Erhöhung durch die unterschiedlichen Wetterbedingungen der beiden Jahreszeiträume verursacht ist.

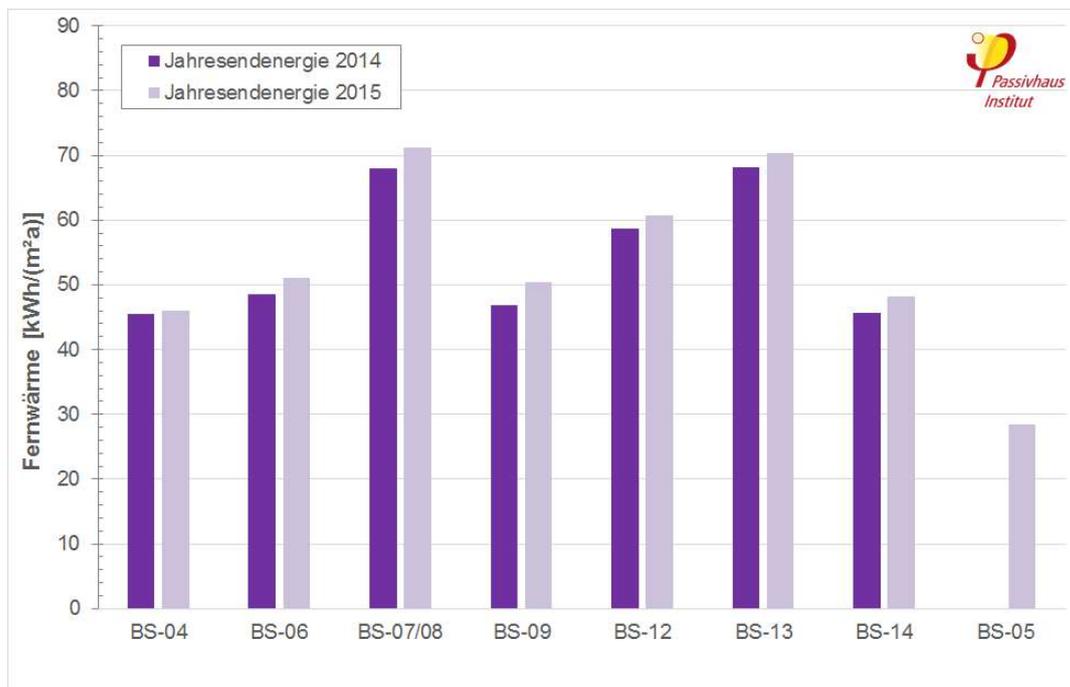


Abbildung 5: Jährliche gemessene Verbrauchswerte „Fernwärme gesamt“ für Wohnnutzung (inkl. Studentenheimen) nach Baufeldern für die Kalenderjahre 2014 sowie 2015.

Nach dem oben beschriebenen Verfahren erfolgte die Auswertung der verfügbaren Baufelder mit Wohnnutzung. Zur Berechnung der Sockelverbrauchswerte (1. Näherung) wurden - separat für jedes der Baufelder - immer die Mittelwerte der gleichen Sommermonate (Juni bis September) herangezogen. Zur Korrektur des Heizfernwärmeverbrauchs für die 2. Näherung werden jeweils die ermittelten Werte zwischen 2,8 bis 3,7 kWh/(m²a) abgezogen und beim „Sockelverbrauch“ aufgeschlagen. Es verschiebt sich damit die Zuordnung der Verbrauchswerte, nicht deren Gesamthöhe.

Als Ergebnis sind die spezifischen Gesamtverbrauchswerte „Fernwärme“ der Baufelder mit Wohnnutzung und deren Aufteilung in beiden Messjahren der nachfolgenden Tabelle sowie den beiden folgenden Grafiken (Abbildung 6 und Abbildung 7) zu entnehmen.

Tabelle 2: Übersicht der Fernwärmeverbrauchswerte und der Aufteilung in die Teilbereiche der Gebäude mit Wohnnutzung in beiden Untersuchungsjahren

| [kWh/(m ² a)] | 2014 | 2015 |
|---|---------------|---------------|
| Bezug Fernwärme | 45,5 bis 68,2 | 28,4 bis 71,1 |
| Warmwasser und Verteilung | 33,0 bis 48,0 | 19,1 bis 47,9 |
| Heizwärme | 9,3 bis 24,2 | 9,3 bis 26,6 |
| Gewichteter Mittelwert Heizwärme | 14,9 | 16,4 |

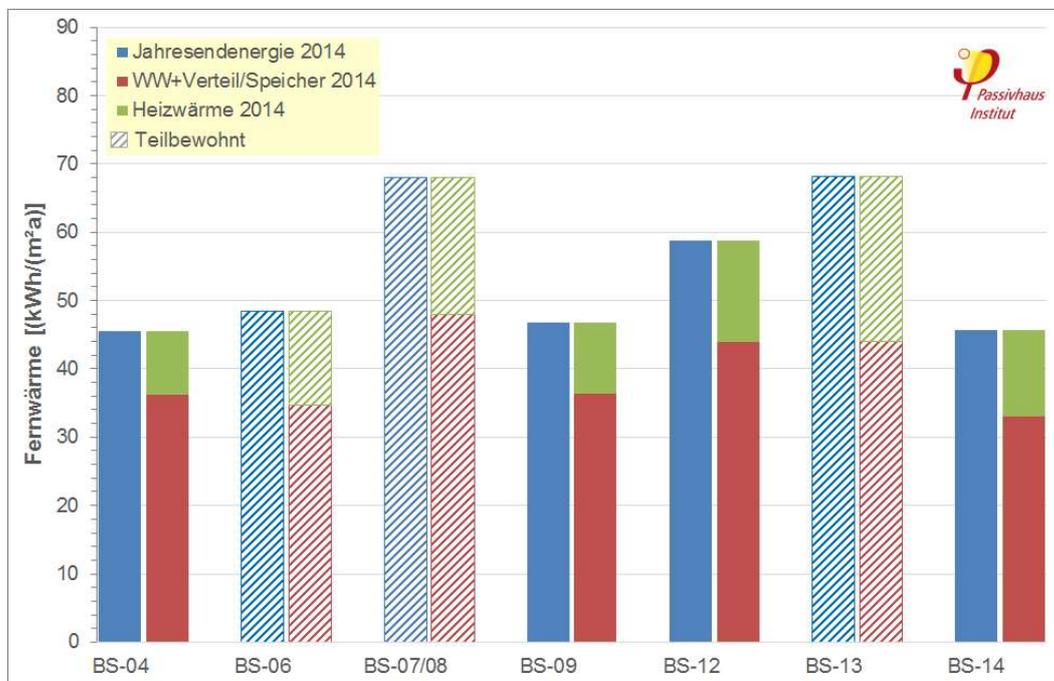


Abbildung 6: Jährliche Verbrauchswerte 2014 der Fernwärme für Wohnnutzung (inkl. Studentenheimen) nach Baufeldern. Nach dem Vorgehen aus Abschnitt 2.2 ist der Gesamtverbrauch (blau) in Heizwärme (grün) und die restlichen Verbräuche (rot) aufgeteilt. Die gestrichelt gekennzeichneten Baufelder waren im Jahr 2014 erst nach ein bis drei Monaten vollständig bezogen („teilbewohnt“).

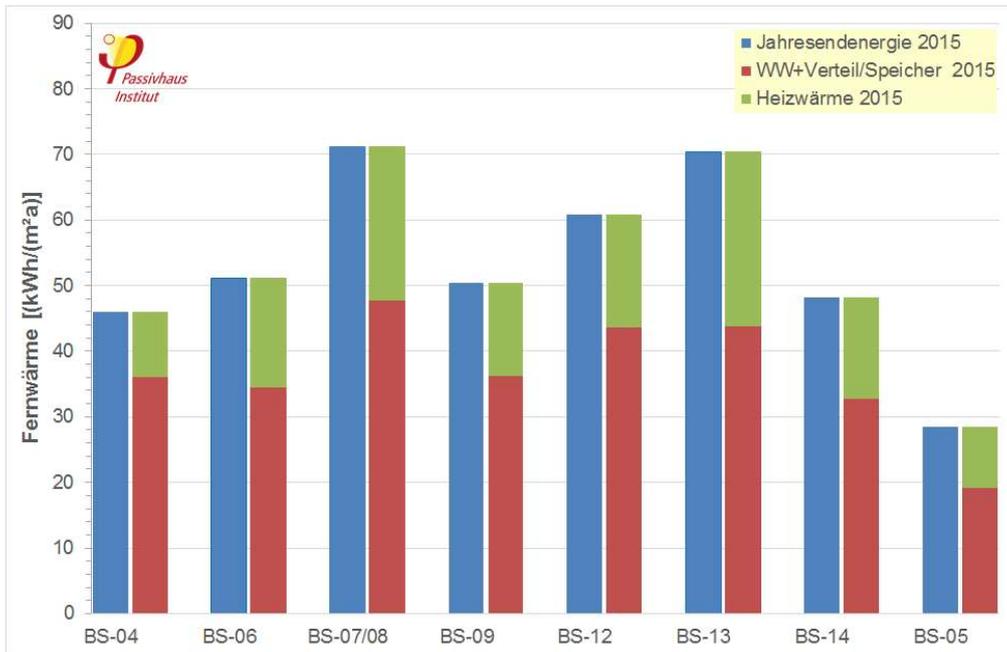


Abbildung 7: Darstellung der jährliche Verbrauchswerte Fernwärme für das Jahr 2015 (Erklärung siehe Text zu Abbildung 6). Für das Jahr 2015 konnte ein Baufeld zusätzlich ausgewertet werden.

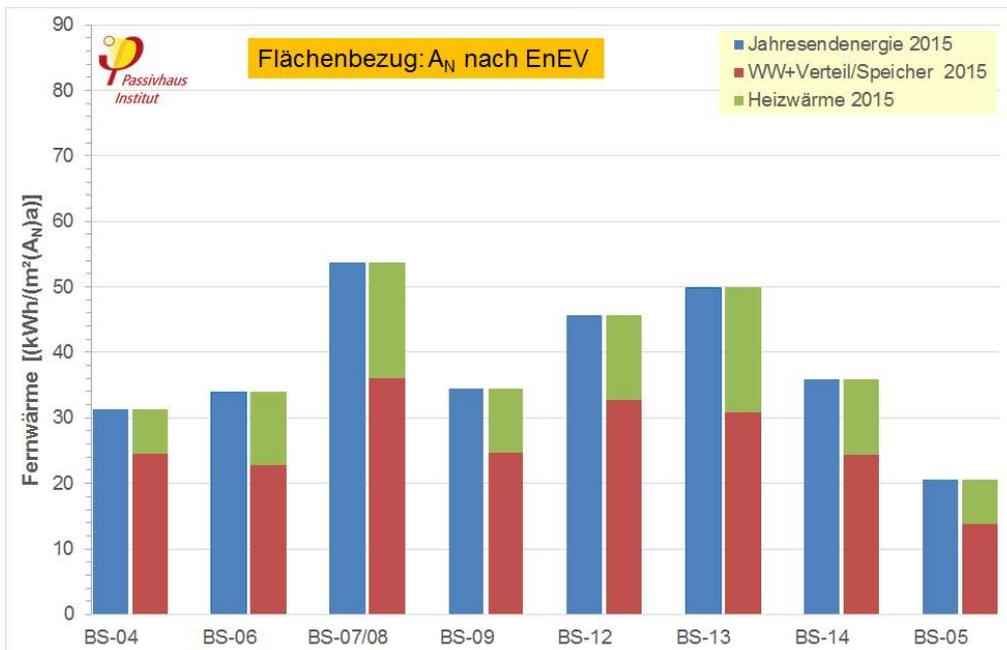


Abbildung 8: Zum Vergleich ist Abbildung 7 hier erneut dargestellt, allerdings mit Flächenbezug nicht - wie in der gesamten übrigen Untersuchung - auf die beheizte Fläche (Energiebezugsfläche) SONDERN AUF DIE FLÄCHE A_N nach EnEV. Aufgrund der deutlich größeren Bezugsflächen fallen die spezifischen Verbrauchswerte noch erheblich geringer aus, sie sind aber gut geeignet für einen Vergleich mit auf A_N bezogenen Werten aus anderen Objekten, diese werden im weiteren Bericht nicht mehr verwendet.

Es wird deutlich, dass eine relativ große Streuung der Verbrauchswerte zwischen den Baufeldern vorhanden ist. Dabei zeigt sich, dass sich in den beiden Jahren keine größeren Veränderungen bei den drei 2014 „teilbewohnten“ Baufeldern (BS-6, BS-07/08 und BS-13) ergeben haben, als bei den dauerbewohnten. Hier wären aufgrund der etwas späteren Einzüge abweichende Verbräuche denkbar gewesen (vgl. Abschnitt 2.2). Die Unterschiede des Fernwärmeverbrauchs können damit nur noch durch

- Nutzungsart (Wohnung oder Studenten-Wohnheim) oder Wohnungsgröße,
- unterschiedliches Nutzerverhalten (Raumtemperatur, Warmwasserverbrauch),
- Unterschiede in der Haustechnik bzw. Art der Wärmeverteilung (Leitungslängen, Übergabestationen) und
- Unterschiede in der Gebäudehülle (Wärmedämmung, Luftdichtheit,...)

verursacht werden. Die Nutzergruppen je Baufeld sind mit mehr als 100 Wohnungen so groß, dass die Auswirkung von einzelnen Bewohnern mit deutlich niedrigerem oder höherem Verbrauch nur sehr geringen Einfluss auf den mittleren Verbrauchswert des gesamten Baufeldes haben. Auch dass sich in einem Baufeld Bewohner mit einem Verhalten kumulieren, welches zu durchschnittlich deutlich höherem oder niedrigerem Verbrauch führen würde, ist unwahrscheinlich. Damit werden die Unterschiede zwischen den Baufeldern in der Hauptsache durch die Performance von Gebäudetechnik und Gebäudehülle bestimmt sein.

Die Größenordnung der Verteilung zwischen Heizwärme und den restlichen Verbräuchen „Sockelwärme“ für Warmwasserbereitung, Verteilung und Speicherung liegt in der Bahnstadt in einem typischen Bereich im Vergleich von zuvor untersuchten Passivhausprojekten. Um dies zu illustrieren, werden die Daten eines genauer untersuchten Gebäudes mit 19 zentral wärmeversorgten Wohnungen dargestellt (Abbildung 9). In der zu Grunde liegenden Untersuchung [Peper/Grove-Smith/Feist 2009] konnten die Heizwärme, der Warmwasserverbrauch, die Verteilwärme und andere detaillierte Größen genauer analysiert werden. Es zeigte sich in diesem Projekt exemplarisch, dass der Anteil der Heizwärme an der gesamten gelieferten Endenergie 33 % betrug. In den hier dargestellten Objekten der Bahnstadt liegen die Anteile mit Werten zwischen 20 bis 36 % (2014) bzw. 22 bis 38 % (2015) und damit in realistischen Größenordnungen.

Mit Sicherheit ist auch bei diesem Projekt, insbesondere bei den Speicher- und Verteilverlusten, noch ein technisches Verbesserungspotential vorhanden. Die beiden Ausreißer mit Werten von 70 kWh/(m²a) sollten diesbezüglich noch näher untersucht und ggf. optimiert werden.

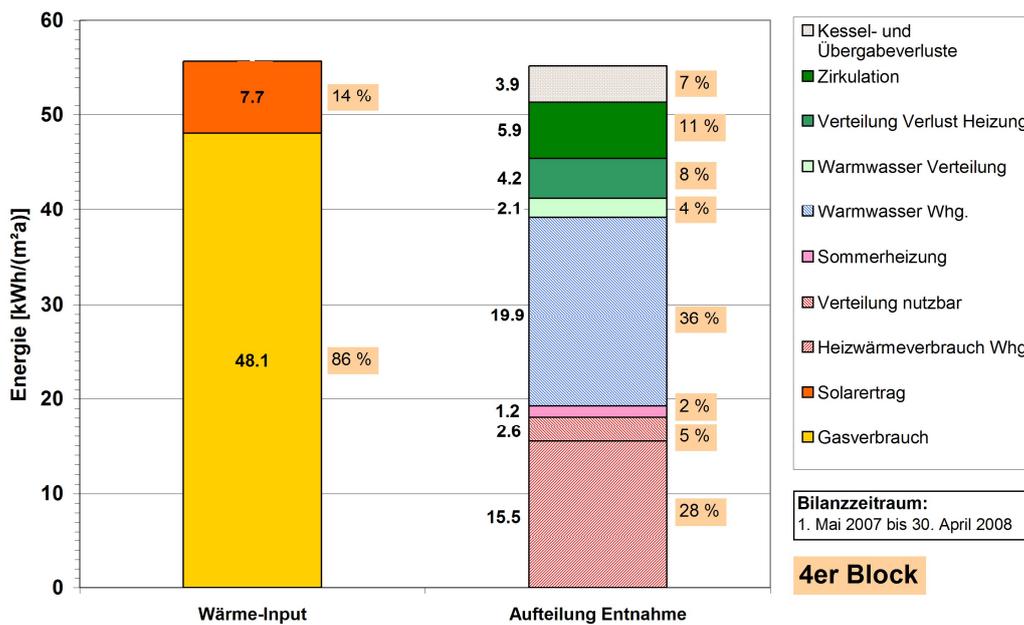


Abbildung 9: Energiebilanz eines Passivhauses mit 19 zentral wärmeversorgten Wohnungen aus der Untersuchung [Peper/Grove-Smith/Feist 2009]. Die Wärmeversorgung und die Verwendung der Wärme konnten hier detailliert messtechnisch aufgeschlüsselt werden. Die Jahresgesamtschritte liegen für dieses Objekt interessanterweise in der gleichen Größenordnung wie die der in diesem Beitrag untersuchten Baufelder der Passivhaussiedlung der Heidelberger Bahnstadt.

2.3.1 Warmwasserbereitung, Verteilung und Speicherung

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, liegt die Größenordnung des sog. „Sockelverbrauchs“ für die Bereiche Warmwasserbereitung, Verteilung und Speicherung in den Baufeldern in einem typischen Bereich. In Abbildung 11 sind nur diese Werte ohne den Heizwärmeverbrauch dargestellt. Diese Verbrauchswerte liegen zwischen 19 und 48 kWh/(m²a), im flächengewichteten Mittel bei 36,7 kWh/(m²a).

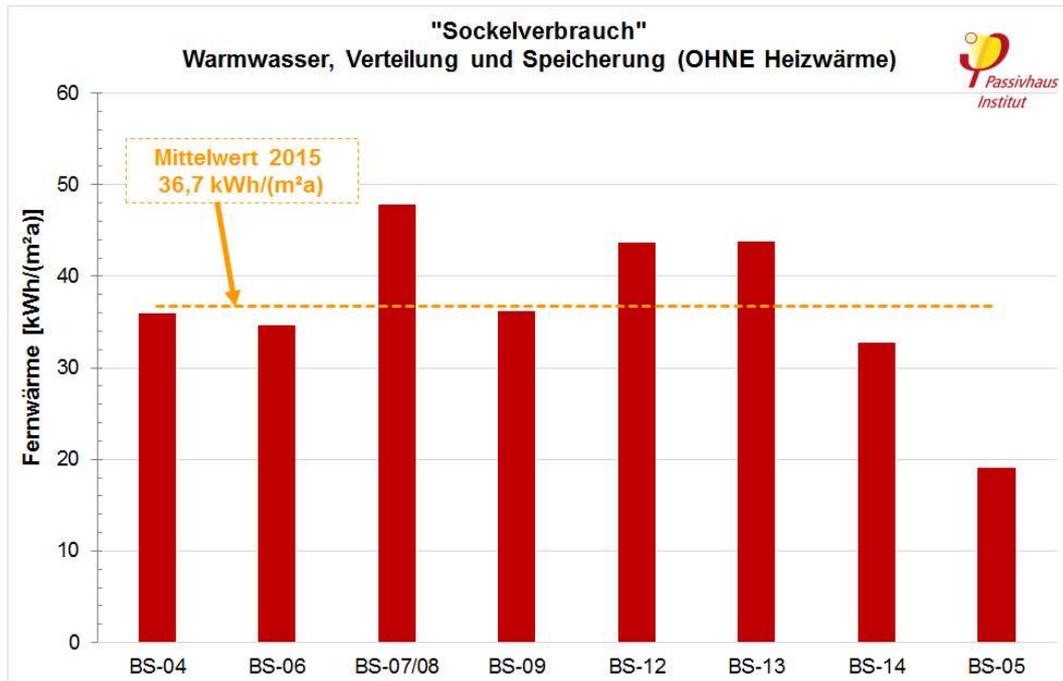


Abbildung 10: Jährlicher Fernwärmeverbrauch für den sog. „Sockel“ (Warmwasser, Verteilung und Speicherung ohne den Heizwärmeverbrauch) für die wohngenutzten Gebäude (inkl. Studentenheimen) nach Baufeldern getrennt für das Jahr 2015 (aus Abbildung 7).

Als Ursache für die unterschiedlichen Sockel-Verbrauchswerte wurde weiter oben bereits fokussiert, dass in der Hauptsache die Performance von Gebäudetechnik und Gebäudehülle in Frage kommen. Auch ohne weitere Informationen über die Details wird damit klar, dass die unterschiedlichen technischen Lösungen in den Baufeldern deutliche Auswirkungen auf diese Verbrauchswerte haben. Bei der Sockelwärme ist – neben dem Warmwasserverbrauch - insbesondere die Art der realisierten Gebäudetechnik ausschlaggebend. Dabei haben eine Vielzahl von Parametern einen deutlichen Einfluss, insbesondere:

- Länge, Verlauf und Dämmqualität der Verteilungen,
- Vor- und Rücklauftemperaturen der internen Verteilung,
- Anzahl und Qualität der Übergabestationen,
- Größe und Qualität von Puffer- und Warmwasserspeichern
- Systemwahl und Dämmung der Warmwasserzirkulation
- Einstellung der Regelparameter und Laufzeiten

Bei den bereits weitgehend optimierten Heizwärmeverbräuchen auf ein minimales Niveau, liegt das entscheidende Einsparpotential vermutlich bei der Verringerung der Verteil- und Bereitschaftsverluste durch Optimierung der Gebäudetechnik und Einregulierung.

2.4 Bewertung Heizwärmeverbrauch

Die Einflussfaktoren *Wetterbedingung* sowie die individuell gewählte *Raumtemperatur* im Untersuchungszeitraum auf den Wärmeverbrauch können in der Planungsphase nicht bekannt sein (vgl. dazu auch [Peper 2012b]). Daher muss das Planungsteam sich normativ festgelegter Auslegungswerte bedienen. Diese „Randbedingungen“ bestimmen ebenso wie die Kennwerte der Gebäude die Verbrauchswerte.

Bei der Beurteilung der Heizwärmeverbrauchswerte muss berücksichtigt werden, dass – bei einem fertiggestellten Gebäude – die Verbrauchsdaten maßgeblich von diesen Einflussfaktoren Wetter und Raumtemperatur abhängen. Es ist also keinesfalls zu erwarten, dass ein Gebäude, welches in der Planung auf z.B. 15,0 kWh/(m²a) projiziert wurde, dann auch genau diesen Verbrauch haben wird. Im Regelfall werden Passivhauswohngebäude mit einer Innentemperatur von 20 °C projiziert. Eine Temperaturänderung auf z.B. 21 °C während der Nutzung führt zu einem Anstieg des Heizwärmeverbrauchs um typischerweise etwa 15 %. Dieser prozentual relativ große Wert entspricht als absolute Verbrauchsänderung etwa 2 kWh/(m²a) je Kelvin Temperaturänderung.

Bei einer Vielzahl von Wohnungen eines Komplexes kommt es immer auf den Verbrauchsmittelwert an; nur dieser ist aussagekräftig für die Gebäudequalität. Verbrauchswerte einzelner Wohnungen in einem Gebäude geben darüber keine belastbare Auskunft. Genau diese Mittelwerte liegen in dieser Untersuchung vor.

Die Auswertung der Verbrauchsdaten zeigt überzeugend, dass die umfangreichen Bemühungen der Stadt Heidelberg mit Vorgaben und Qualitätssicherung einen ganzen Stadtteil energetisch hochwertig zu gestalten, aufgegangen sind. Mit Heizwärmeverbrauchswerten von im Mittel **14,9 kWh/(m²a) (±4; 2014)** bzw. **16,4 kWh/(m²a) (±4; 2015)**, ist hier ein sehr gutes Ergebnis erzielt worden. Besonders beeindruckend ist die Tatsache, dass es sich um eine sehr hohe Zahl (1.400) Wohnungen mit insgesamt knapp 90.000 m² untersuchter Wohnfläche handelt. Mit dieser umfassenden Statistik kann daher signifikant gezeigt werden, dass eine Umsetzung von hoch energieeffizienten Gebäuden in der Breite mit vielen unterschiedlichen Akteuren gut und erfolgreich möglich ist.

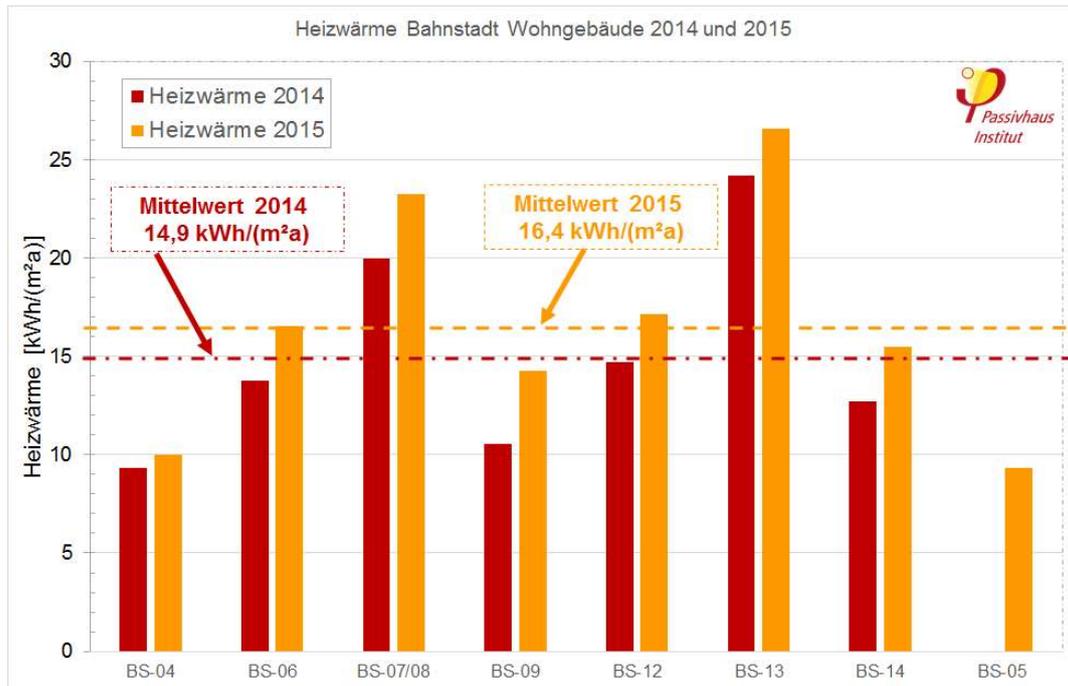


Abbildung 11: Jährliche Heizwärmeverbrauchsweite in der Bahnstadt für wohngenutzte Gebäude (inkl. Studentenheimen) nach Baufeldern getrennt (aus Abbildung 6 und Abbildung 7) für beide Untersuchungsjahre (Fehleranalyse: ± 4 kWh/(m²a))

In Abbildung 11 sind die Heizwärmeverbräuche der Wohngebäude (aus Abbildung 6 und Abbildung 7) sowie der flächengewichtete Mittelwert für beide Untersuchungsjahre gesondert dargestellt. Auch die beiden höheren Verbrauchswerte bewegen sich noch auf sehr niedrigem Niveau und sind keinesfalls als problematisch zu beurteilen.

Die Heizwärmeverbrauchsweite zeigen durchgängig eine leichte Erhöhung der mittleren Verbräuche im zweiten Messjahr. Prozentual liegen die Verbrauchserhöhungen zwischen 7 und 35 %. Wie weiter oben bereits angedeutet wurde, ist die Hauptursache dafür der Unterschied der Wetterbedingung in den Untersuchungszeiträumen. Dies wird im folgenden Abschnitt mit Hilfe des PHPP analysiert.

Zur Erläuterung soll hier der Unterschied zwischen dem individuellen Heizwärmeverbrauch einer Wohnung und dem Mittelwert aller Wohnungen eines Gebäudes verdeutlicht werden. Dazu sind in Abbildung 12 typische Ergebnisse aus einem anderen, detaillierteren Monitoring-Projekt dargestellt. Es handelt sich dabei um die Messergebnisse eines Wohngebäudes in Frankfurt a.M., welches mit Passivhaus-Komponenten saniert wurde [Peper/Schnieders/Feist 2011]. Die Verbrauchsschwankungen zwischen den energetisch baugleichen Einzelwohnungen sind sehr groß. Das ist ein typisches Ergebnis für solche Messungen. Derartige Streuungen um den Mittelwert treten unabhängig vom energetischen Standard eines Gebäudes auf. Sie sind also genauso auch bei Niedrigenergiehäusern oder Altbauten zu finden.

Wie oben bereits beschrieben ist nur der Mittelwert der energetisch baugleichen Wohnungen für die Qualität des Gesamtgebäudes aussagekräftig. Mit diesen Mittelwerten wird in dieser Untersuchung zur Bahnstadt gearbeitet. An der Grafik wird aber deutlich, dass der individuelle Verbrauchswert einer Wohnung stark von diesem Mittelwert abweichen kann. So sind Abweichungen vom Mittelwert von +100 bis -50% und mehr nicht ungewöhnlich. Damit ist auch klar, dass mit Messwerten aus nur einer Wohnung keine Aussage zur Gebäudequalität sinnvoll oder möglich ist.

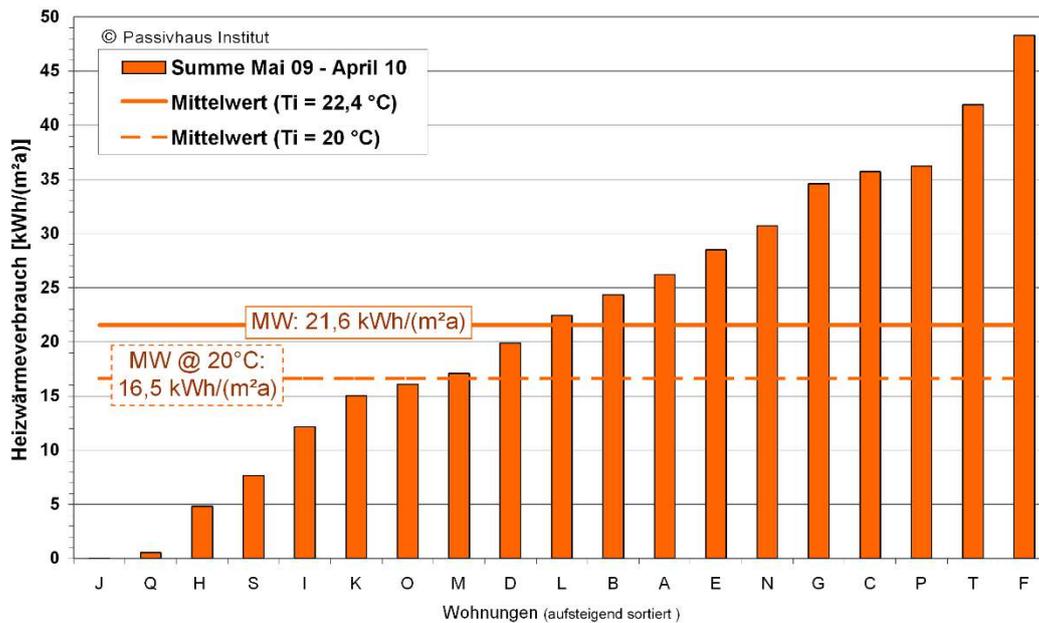


Abbildung 12: Jährliche Heizwärmeverbrauchswerte von 19 zentralversorgten Wohnungen als Wohnungs-Einzelwerte eines mit Passivhaus-Komponenten sanierten Mehrfamilienhauses in Frankfurt (Heizperiode 2009/2010). Die Bandbreite der Verbrauchswerte zeigt die großen Unterschiede zwischen den Wohnungen. Diese zeigen die typische Streuung bei baugleichen Wohnungen aufgrund von Nutzerbedürfnissen unabhängig vom Gebäudestandard. Neben dem flächengewichteten Mittelwert ist hier auch der Mittelwert bei umgerechnet 20 °C Innentemperatur eingetragen [Peper, Schnieders, Feist 2011].

2.5 Vergleich Heizwärmeverbrauch mit PHPP-Planungsdaten

Als Planungstool wird bei allen Gebäuden in der Bahnstadt das PHPP (Passivhaus Projektierungs-Paket) verwendet. Dies ermöglicht im Planungsprozess eine energetische Optimierung des Gebäudes. Das PHPP wird von der Stadt Heidelberg auch zur Qualitätssicherung der Planung herangezogen. Eine Zertifizierung der Gebäude durch das Passivhaus Institut oder einer akkreditierten Zertifizierungsstelle erfolgte aber nur

in wenigen Einzelfällen; von den Gebäuden der hier untersuchten Baufelder nur bei einem Gebäude.

Entscheidend für eine realitätsnahe Berechnung ist die korrekte und vollständige Nachführung des PHPP mit den Veränderungen während der Planung und insbesondere des Bauprozesses. Dies stellt keine triviale Anforderung dar und nur wenn dies erfolgreich durchgeführt wird, ist ein belastbarer Vergleich zwischen Berechnung und Messung überhaupt möglich und sinnvoll.

Wird dies mit der notwendigen Sorgfalt durchgeführt, liefert das PHPP erfahrungsgemäß einen realistischen Heizwärmebedarf, entsprechend der verwendeten Randbedingungen wie Klimadaten, Belegungsdichte, interne Wärmequellen, Innentemperatur etc. Bei genauer untersuchten Projekten zeigt der Vergleich zwischen Verbrauchsdaten und den PHPP-Bedarfsberechnungen regelmäßig ziemlich gute Übereinstimmungen (vgl. Abbildung 13). Dafür müssen – wie oben ausgeführt - die Klimadaten und die Innentemperatur als wichtigste Parameter für den Vergleich zur Messung nach den real vorliegenden Randbedingungen bestimmt und in das PHPP eingesetzt werden.

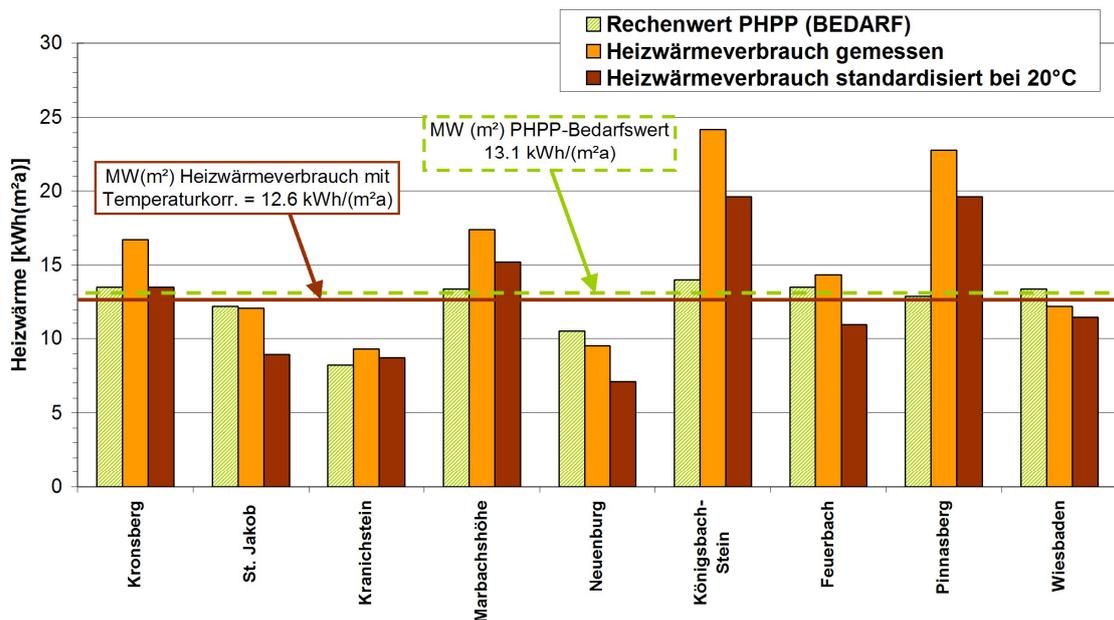


Abbildung 13: Gemessener Heizwärmeverbrauch im Vergleich mit dem Projektierungswert von Reihen-, Doppel- und Mehrfamilienhäusern im Passivhaus Standard. Der PHPP Rechenwert ist jeweils für 20°C Raumtemperatur berechnet worden (aus [Peper 2008])

2.5.1 Wetterdaten

Die Verbrauchsdaten der untersuchten Wohngebäude in der Bahnstadt sollen in einem weiteren Schritt mit den Planungsdaten der PHPPs verglichen werden. So lassen sich die Daten auf Plausibilität untersuchen und Ausreißer identifizieren. Für die Untersuchung in der Bahnstadt werden die tatsächlichen Wetterdaten von Heidelberg im Untersuchungszeitraum 2014 und 2015 benötigt. Dazu sind zumindest die monatliche Außentemperatur und die monatliche Globalstrahlungssumme (horizontal) notwendig. Als Außentemperatur wurden Daten einer Messstation in Heidelberg-Kirchheim genutzt (<http://heidelberg-kirchheim-wetter.de>). Diese befindet sich in ca. 2,5 km Entfernung. Der Vergleich mit Messungen aus Ludwigshafen und Speyer zeigte nur geringe Abweichungen.

Für den Bezug von Globalstrahlungsdaten aus Heidelberg konnte keine belastbare Quelle ausfindig gemacht werden. Die Strahlungsdaten wurden daher vom ZIMEN Messnetz des Landes Rheinland-Pfalz (www.luft-rlp.de) vom Standort Ludwigshafen-Mundenheim bezogen. Die Außenlufttemperaturen Heidelberg zeigten die geringsten Abweichungen zum Standort in Ludwigshafen-Mundenheim im Vergleich zur verfügbaren Alternative (Speyer). Daher wurde auch bei der Globalstrahlung für den Messstandort Ludwigshafen entschieden. Der so erstellte Wetterdatensatz wird im Weiteren als „Wetter LU/HD“ bezeichnet.

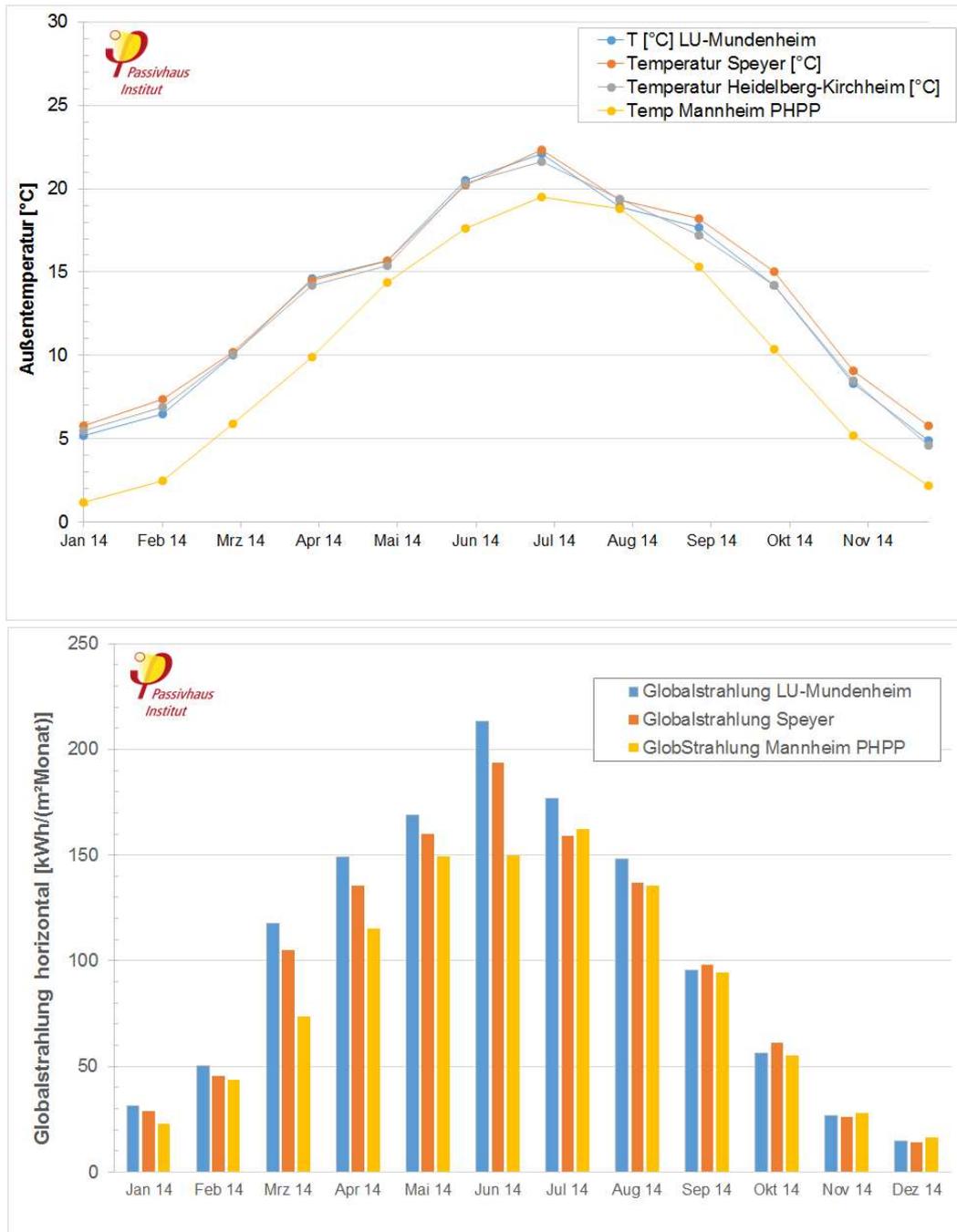


Abbildung 14: Vergleich der Wetterdatensätze für Außentemperatur und Globalstrahlung horizontal für das Messjahr 2014.

Der Vergleich der vorliegenden Wetterdaten von 2014 für Heidelberg mit dem während der Planung im PHPP verwendeten Standard-Klimatensatz „Mannheim“ zeigt deutlich, dass der Zeitraum 2014 ausgesprochen mild war: Die Wintermonate sind deutlich wärmer als im Klimatensatz Mannheim. Die Globalstrahlung zeigt Unterschiede insbesondere während der hier nicht relevanten Sommermonate (vgl. Abbildung 14).

Der Vergleich der Wetterdaten von beiden Jahreszeiträumen dieser Untersuchung ist in den beiden folgenden Grafiken dargestellt (Abbildung 15). Der Temperaturmittelwert 2014 lag bei 13,2°C im Folgejahr 2015 bei 12,6°C:

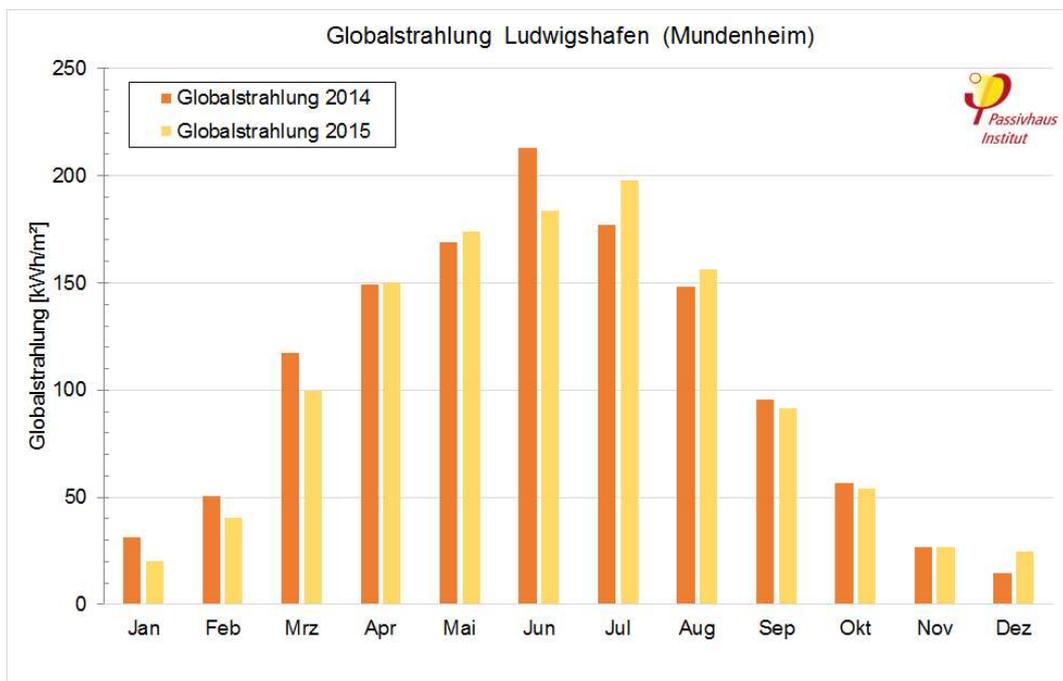
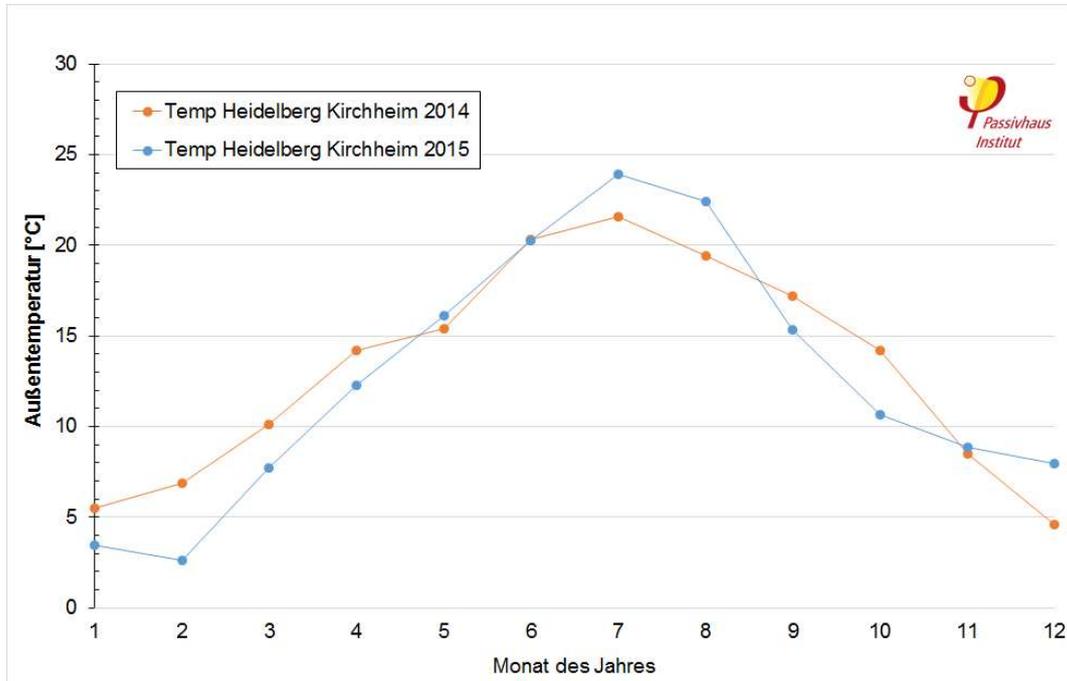


Abbildung 15: Vergleich der im PHPP verwendeten Wetterdaten für Außentemperatur (Heidelberg-Kirchheim) und Globalstrahlung horizontal (Ludwigshafen-Mundenheim) für das Messjahr 2014 und 2015.

Es ist erkennbar, dass die Außentemperatur in den ersten Wintermonaten 2015 (Januar bis April) deutlich niedriger liegt als im Vorjahr. Auch der Oktober 2015 fiel deutlich kühler aus, der Dezember 2015 war dafür deutlich moderater. Für die Heizwärme ist die Außentemperatur im Winter entscheidend. Der Mittelwert der Monate Januar bis März sowie November und Dezember betrug im Jahr 2014 $7,1^{\circ}\text{C}$, dagegen lag der Wintermittelwert von 2015 mit $6,1^{\circ}\text{C}$ um 1 K niedriger. Das führt zu höheren Heizwärmeverbrauchswerten.

Ebenso zeigen sich die Globalstrahlungswerte in Abbildung 15 (unten): Diese sind in der Summe und insbesondere auch in den Wintermonaten 2015 niedriger als im Vorjahr. Die Summe der Wintermonate (erneut Januar bis März sowie November und Dezember) ergibt mit 211 kWh/m^2 eine um 12% niedrigere Globalstrahlung. Auch dieser Umstand führt zu einer Erhöhung des Heizwärmeverbrauchs. Verwendet und hier dargestellt wurde nur die gemessene Globalstrahlung horizontal. Im PHPP wird die Strahlung nach Himmelsrichtungen berücksichtigt und die Einstrahlung nach Fensterflächen unter Berücksichtigung der Verschattung ermittelt. Die Solarstrahlung trägt in einem Passivhaus mit etwa einem Drittel zur Heizwärmebilanz bei.

2.5.2 Innentemperaturen

Bei dem hier durchgeführten Minimalmonitoring liegen für die 1.400 Wohneinheiten keine gemessenen Innentemperaturen vor. Dieser wichtige Parameter für die Anpassung der Planungs-PHPPs kann damit nur von anderen Messprojekten übernommen werden. Bei anderen Messungen in Passivhäusern mit Wohnnutzung wurden im Mittel Winter-Innentemperaturen von etwa $21,5^{\circ}\text{C}$ gemessen [Peper 2012b]. Aus diesem Grund wird diese höhere Innentemperatur hier ebenfalls für beide Messjahre angesetzt und im PHPP als Randbedingung verwendet. Zum Vergleich wird ergänzend auch ein Sollwert von 20°C betrachtet.

2.5.3 Zusammenführung PHPP

Die hier mittels Minimalmonitoring untersuchten Wohngebäude und Studentenwohnheime sind in insgesamt 35 PHPPs bilanziert worden. Da nur ein Wärmezähler je Baufeld vorhanden ist, müssen die Bedarfswerte der Heizwärme aus den einzelnen PHPPs des Baufeldes flächengewichtet zu einem Vergleichswert zusammengefasst werden. Für die Studentenwohnheime liegen die Daten in je einem PHPP vor. Für die Baufelder mit den Wohngebäuden sind es drei bis fünf, in einem Fall zehn PHPP-Bilanzen. Diese PHPP-Datensätze werden alle jeweils mit dem Wetterdatensatz von „HD/LU 2014“ sowie „HD/LU 2015“ als Randbedingung gerechnet und im zweiten Schritt die Raumtemperatur von 20 auf $21,5^{\circ}\text{C}$ erhöht. Das Ergebnis des auf diesem Weg berechneten Bilanzwertes eines Baufeldes kann nun mit dem Verbrauchswert aus dem vorherigen Abschnitt verglichen werden.

Die dem PHI zur Verfügung gestellten PHPP Berechnungen konnten im Rahmen dieser Untersuchung nicht geprüft werden. Während der Bearbeitung der PHPPs, wie dem Einfügen der Wetterdatensätze, sind dennoch einige Punkte aufgefallen. Einige davon haben einen nennenswerten Einfluss auf den Heizwärmebedarf und wurden daher angepasst:

- Einige PHPPs waren anstelle des **Monatsverfahrens** auf das Jahresverfahren eingestellt. Beide Verfahren waren zu der Zeit der Planung zulässige Nachweisverfahren für den Passivhausstandard. Hier wird zur besseren Vergleichbarkeit ausschließlich das genauere Monatsverfahren verwendet. Es ergibt sich eine Erhöhung des Heizwärmebedarfs in den betroffenen Gebäuden um bis zu 2,4 kWh/(m²a).
- Bei Stichproben der PHPP-Berechnungen ergaben sich Fragen zu einzelnen Punkten der thermischen Gebäudehülle im Kellerbereich sowie zu einzelnen Wärmebrücken. Eine detaillierte Klärung im Rahmen dieser Untersuchung konnte im Rahmen dieser Auswertung nicht herbeigeführt werden.
- Einzelne Gebäude von drei Baufeldern wurden stichprobenartig auf deren **Verschattungssituation** geprüft. Dabei stellte sich heraus, dass innerhalb eines Feldes sowie z.T. zwischen den Feldern die Verschattung nicht komplett berücksichtigt wurde. Aus diesem Grund wurde die Verschattung für ein Baufeld exemplarisch aktualisiert. Der Heizwärmebedarf hat sich dadurch um 0,2 bis 0,4 kWh/(m²a) erhöht (je nach Wetterdatensatz und Innentemperatur). Da die Abweichung nur gering ist, wurde diese Korrektur nicht weiter berücksichtigt.
- Die beiden untersuchten Studentenwohnheime wurden für den Vergleich mit dem Verbrauchsdaten einheitlich mit internen Wärmequellen (IWQ) von 2,1 W/m² berechnet. Dazu wurden in einem der PHPPs die IWQ verändert. Welche Werte für moderne Studentenwohnheime passend sind, sollte in einem eigenen Forschungsprojekt genauer untersucht werden. Aufgrund der heute typischen Zimmergrößen und zusätzlichen Gemeinschaftsflächen scheint eine Annäherung an die üblichen Werte von 2,1 W/m² für Wohnnutzung realistisch.
- Bei zwei Gebäuden eines Baufeldes waren die IWQ in projektspezifischen Berechnungen erstellt worden. Hier wurde ebenfalls auf die Standardwerte von 2,1 W/m² umgestellt.

Weitere Prüfungen und Änderungen an den PHPPs wurden nicht durchgeführt. Die durchgeführten Anpassungen sind bei den im Folgenden dargestellten Werten berücksichtigt.

Um den Einfluss der unterschiedlichen Raumtemperaturen und Klima-/ Wetterdatensätze zu illustrieren, sind in Abbildung 16 die Ergebnisse der PHPP-Berechnungen für die Heizwärme unter Verwendung der veränderten Randbedingungen dargestellt. Die Ergebnisse für die Berechnungen mit dem Klimadatensatz Mannheim (PHPP-Standard) verdeutlichen die besondere Milde des ersten Untersuchungsjahres 2014. In dem kühleren und strahlungsärmeren Jahr 2015 sind entsprechend höhere Bedarfswerte abzulesen. Insgesamt zeigen allerdings beide Messjahre deutlich mildere Bedingungen an, als der Standardklimadatensatz Mannheim (langjähriges Durchschnitt früherer Jahre). Aber sogar bei Verwendung des Klimadatensatzes Mannheim ergeben sich im Vergleich niedrige Bedarfswertewerte von nur 16 bis 18,5 kWh/(m²a).

Auch der Einfluss der jeweils höheren Raumtemperaturen kann für die drei Klima- bzw. Wetterdatensätze gut abgelesen werden: Es ergeben sich Erhöhungen der Bedarfswerte Heizwärme je Kelvin Temperaturerhöhung der Raumluft im Mittel 15,5 %. Die Bandbreite liegt je nach Klima-/Wetterdatensatz und Baufeld zwischen 9,6 und 18 %. Darin zeigt sich der prozentual bedeutende Einfluss der Temperaturerhöhung der Raumluft auf den Heizwärmebedarf, welcher allerdings in absoluten Werten nicht entscheidend ist.

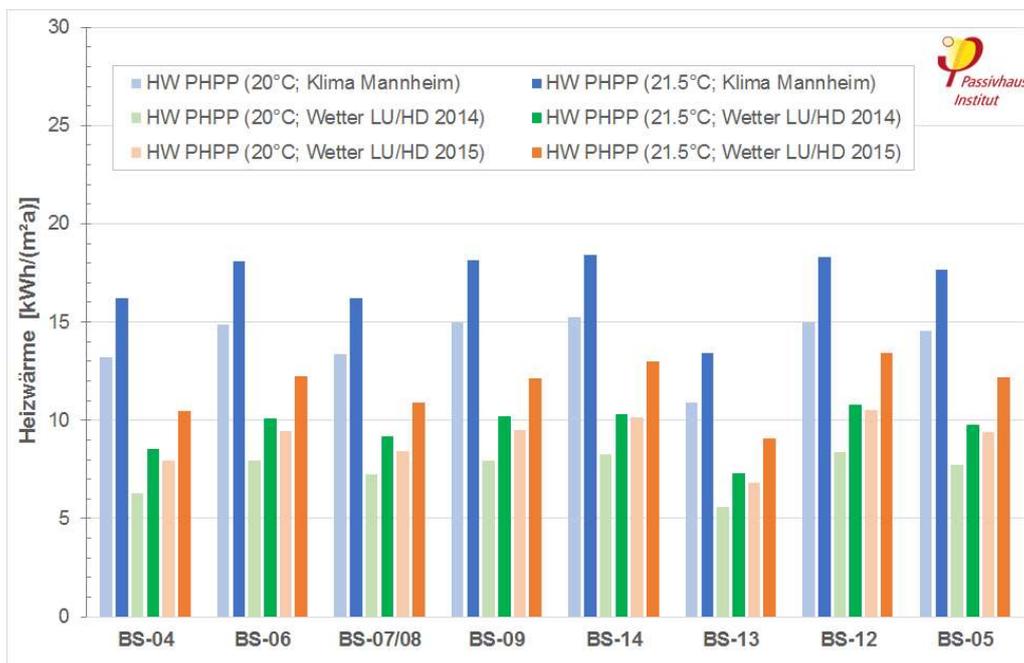


Abbildung 16: Vergleich der Bedarfswerte Heizwärme aus den PHPP-Berechnungen für die unterschiedlichen Klima-/Wetterdatensätze und Raumtemperaturen für die untersuchten Baufelder der Bahnstadt in beiden Untersuchungszeiträumen.

2.5.4 Heizwärmebedarf (PHPP) versus Verbrauch

Um die aus den Messdaten ermittelten Heizwärmeverbrauchswerte beurteilen zu können, sollen diese mit den angepassten PHPP-Berechnungen (siehe vorheriger Abschnitt) verglichen werden. Der Vergleich erfolgt für beide Jahreszeiträume getrennt. In Abbildung 17 sind die Heizwärmeverbrauchswerte (vgl. Abschnitt 2.4) mit den je Baufeld zusammengeführten PHPP-Berechnungen dargestellt. Für die PHPP-Bedarfswerte sind die Ergebnisse mit dem Wetterdatensatz für HD/LU 2014 dargestellt. Dabei ist der Heizwärmebedarfswert für 20 sowie auch für 21,5°C abgebildet.

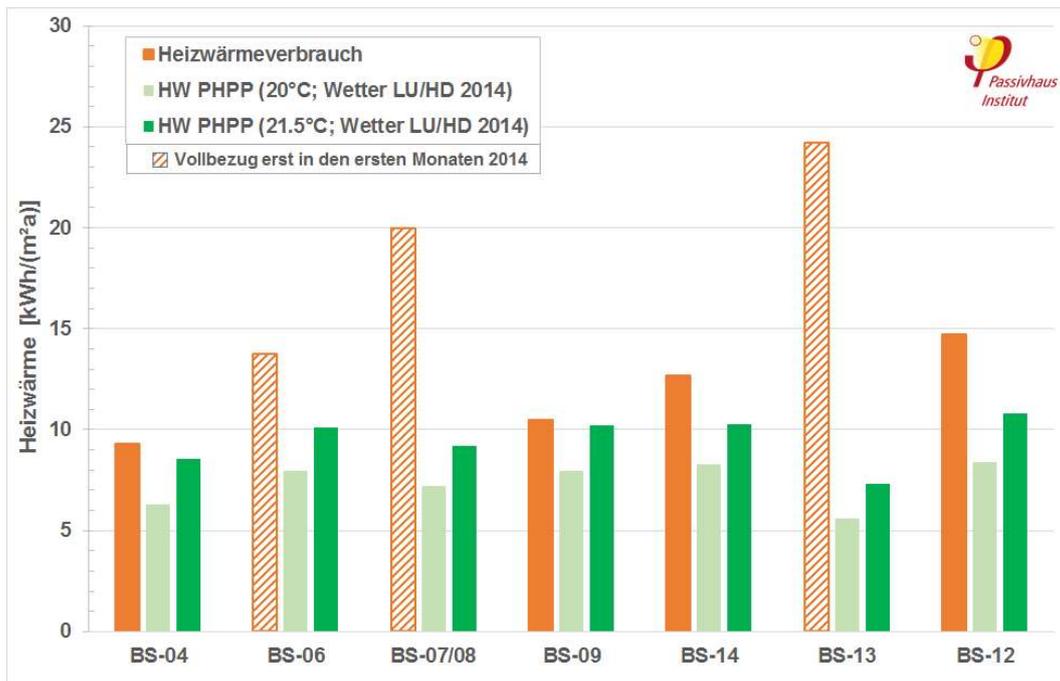


Abbildung 17: Vergleich der Verbrauchsdaten Heizwärme (orange) mit den PHPP-Bedarfswerten für den Wetterdatensatz HD/LU 2014 und unterschiedliche Raumtemperaturen für die sieben untersuchten Baufelder in der Bahnstadt (Messabweichungen im Bereich ± 4 kWh/(m²a)).

Mit den oben beschriebenen aktuellen Randbedingungen (übliche Raumlufttemperatur 21,5°C und Wetterdaten „HD/LU 2014“) im Untersuchungszeitraum können die Verbrauchsdaten am sinnvollsten verglichen werden (orange zur dunkelgrünen Säule). Für fünf der sieben Baufelder zeigen sich dabei sehr gute Übereinstimmungen mit Abweichungen zwischen 0,3 bis 3,9 kWh/(m²a). Das ist für Vergleiche von Verbrauchsmessungen als hervorragend zu bewerten, insbesondere da es sich hier um ein Minimalmonitoring mit zu erwartenden Messabweichungen in der gleichen Größenordnung handelt. Es kann damit davon ausgegangen werden, dass verlässliche PHPP-Berechnungen vorliegen.

Zwei der untersuchten Projekte (BS-07/08 und BS-13) zeigen allerdings mit 10,8 bzw. 16,9 kWh/(m²a) deutlich höhere Unterschiede zwischen den gemessenen Verbrauchsdaten und den PHPP-Berechnungen. Es handelt sich gleichzeitig um die Baufelder mit den höchsten gemessenen Verbrauchswerten.

Zur weiteren Analyse wird die gleiche Untersuchung für die Messwerte aus dem Jahr 2015 durchgeführt. Mit Abbildung 18 ergibt sich ein ähnliches Bild wie für das vorausgehende Jahr. Das Baufeld BS-05 ist für das Jahr 2015 dazugekommen.

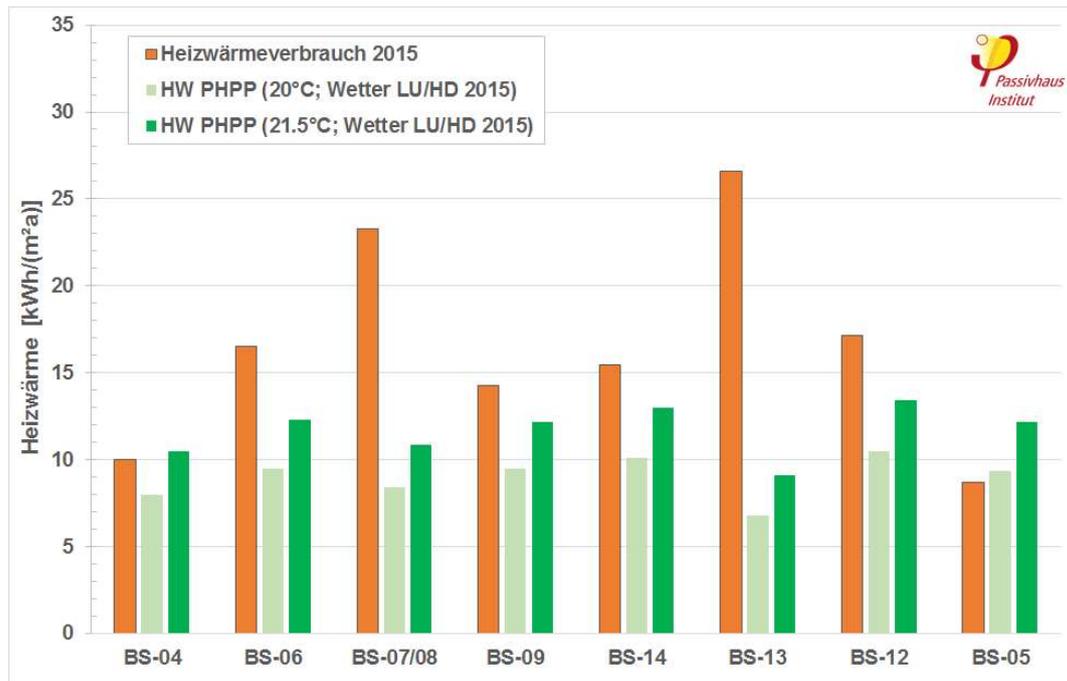


Abbildung 18: Vergleich der Verbrauchsdaten Heizwärme (orange) mit den PHPP-Bedarfswerten für den Wetterdatensatz HD/LU 2015 und unterschiedliche Raumtemperaturen für die jetzt acht untersuchten Baufelder in der Bahnstadt. Im Jahr 2015 sind alle Gebäude vollständig bezogen.

Auch hier zeigen sich sehr gute Übereinstimmungen bei sechs der jetzt acht Baufelder. Die Abweichungen der Messwerte „Heizwärme“ zu den PHPP Bedarfswerten bei 21,5 °C liegen zwischen einem Minderverbrauch von 3,5 bis zu einem Mehrverbrauch von 4,3 kWh/(m²a). Diese Werte bestätigen deutlich die für 2014 gezogene Annahme, dass verlässliche PHPP-Berechnungen vorliegen.

Erneut fallen die gleichen beiden Baufelder BS-07/08 und BS-13 mit deutlich erhöhten Abweichungen von 12,4 und 17,5 kWh/(m²a) aus dem Rahmen. Da im Jahr 2015 die Gebäude dieser Baufelder vollständig bezogen waren, kann der Einfluss des späteren Bezugs einiger Wohnungen nicht der Grund für die signifikanten Abweichungen sein. Als Hauptursachen für die Verbrauchsabweichung sind denkbar:

- Möglicherweise sind einzelne Änderungen an Gebäuden im Bauverlauf in den abschließenden PHPPs dieser Baufelder nicht vollständig eingearbeitet worden.
- Das durchschnittliche Nutzerverhalten der Bewohner dieser Gebäude weicht – trotz der großen Anzahl der Wohnungen - sehr stark von der angenommenen Nutzung ab (das ist an sich nicht wahrscheinlich, ließe sich aber durch Komfortmessungen beproben).
- Suboptimale Regeleinstellungen oder technische Fehler bei z.B. der Haus- oder Lüftungstechnik, welche zu einer Verbrauchserhöhung führen (z.B. Überströmung im hausinternen Wärmeverteilnetz, Fehler bei den Thermostaten, Laufzeiten oder Regelparameter sind nicht optimal).

Möglicherweise liegt eine Mischung aus unterschiedlichen Gründen vor – eine Entscheidung darüber wäre mit den den Autoren zugänglichen Informationen reine Spekulation. Ein Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, genau solche Projekte ausfindig zu machen, um möglicherweise hier genauere Untersuchungen folgen zu lassen. Diese Möglichkeit besteht mit den vorliegenden Ergebnissen.

Es kann trotz der signifikanten Abweichung zur PHPP Bilanz dieser beiden Projekte festgehalten werden, dass sogar die dort vorliegenden Verbrauchswerte von 23 und 27 kWh/(m²a) im Vergleich zu sonstigen Neubauten immer noch extrem niedrige Werte darstellen.

2.5.5 Ursachen des höheren Verbrauchs 2015

Zur Beantwortung der Frage nach der Ursache des in 2015 gegenüber 2014 etwas höheren Heizwärmeverbrauchs werden die Daten aus beiden Jahren nochmals verglichen. Dazu werden die PHPP Daten des Heizwärmbedarfs beider Jahre berechnet mit den Wetterdatensätzen LU/HD des jeweiligen Jahres und bei 21,5 °C Innentemperatur neben die Messdaten gestellt (Abbildung 19). Bei dem erst in 2015 auswertbaren Baufeld BS-05 kann kein Messwert für 2014 angegeben werden.

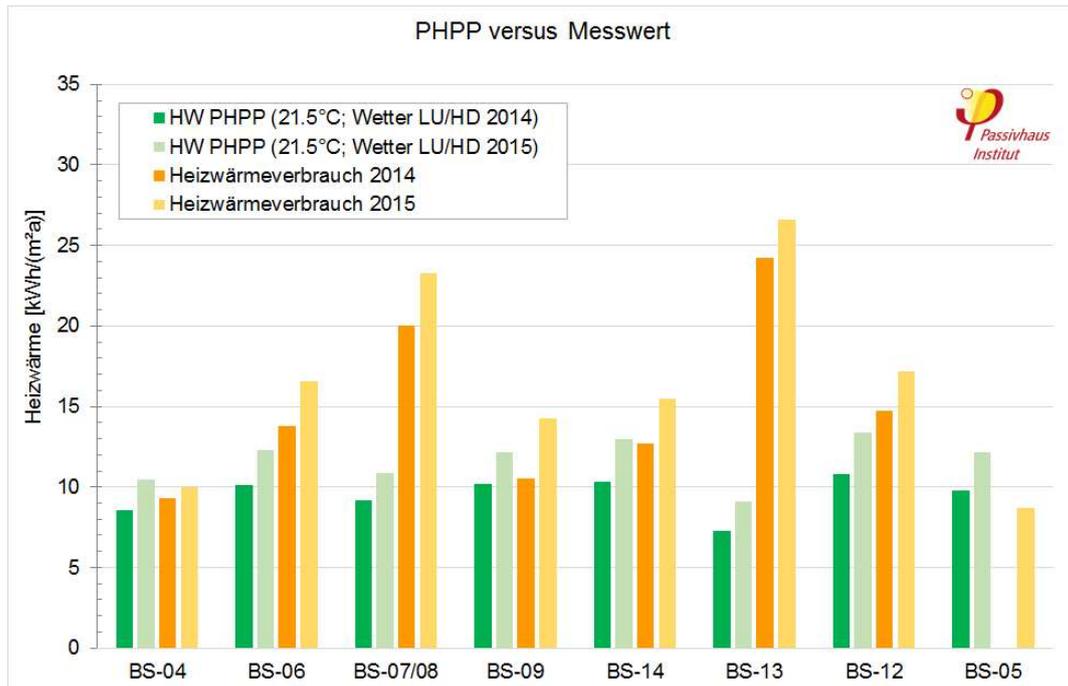


Abbildung 19: Vergleich der PHPP Bedarfswerte Heizwärme bei 21,5 °C mit den gemessenen Verbrauchsdaten für beide Untersuchungsjahre, Die Anstiege von 2014 zu 2015 lassen sich durch die veränderten Wetterbedingungen erklären.

Der Vergleich der PHPP Bedarfswerte (für 21,5 °C) der beiden Messjahre zeigt Unterschiede je Baufeld zwischen 1,7 bis 2,7 kWh/(m²a). Bei den Messwerten schwanken die Änderungen zwischen den beiden Messjahren zwischen 0,7 und 3,8 kWh/(m²a) je nach Baufeld. Die Einzelwerte je Baufeld sind Tabelle 3 zu entnehmen. Der Zuwachs an Heizwärme bei den PHPP Berechnungen liegt damit in der gleichen Größenordnung wie der bei den gemessenen Verbrauchswerten. Es ist damit anzunehmen, dass der Großteil der für 2015 festgestellten veränderten Heizwärmeverbräuche allein durch die veränderten Wetterbedingungen verursacht ist.

Tabelle 3: Vergleich der Abweichungen des Heizwärmebedarfs zwischen den beiden Messjahren 2014 und 2015 der angepassten PHPP Berechnungen (Wetterdaten des Jahres und $T_i = 21,5^\circ\text{C}$) sowie zwischen den Messwerten des Heizwärmeverbrauchs zwischen den beiden Messjahren.

| Baufeld | Differenz PHPP ¹⁾ Heizwärme 2015 minus 2014 | Differenz Messwert Heizwärmeverbrauch 2015 minus 2014 | Unterschied der Differenz |
|----------|--|---|------------------------------|
| | [kWh/(m ² a)] | [kWh/(m ² a)] | [kWh/(m ² a)] |
| BS-04 | 1,9 | 0,7 | -1,2 |
| BS-06 | 2,2 | 2,8 | 0,6 |
| BS-07/08 | 1,7 | 3,3 | 1,6 |
| BS-09 | 1,9 | 3,8 | 1,9 |
| BS-14 | 2,7 | 2,8 | 0,1 |
| BS-13 | 1,8 | 2,4 | 0,6 |
| BS-12 | 2,6 | 2,4 | -0,2 |
| BS-05 | 2,4 | --- | --- |

¹⁾ PHPP Berechnung mit den Wetterdatensätzen LU/HD 2014 bzw. 2015 bei $21,5^\circ\text{C}$ Innentemperatur.

Werden die Ergebnisse aller Baufelder flächengewichtet gemittelt, ergeben sich folgende Werte:

Tabelle 4: Mittelwerte Heizwärme aller Baufelder für die PHPP-Berechnung mit den entsprechenden Wetterdaten LU/HD bei $21,5^\circ\text{C}$ Innentemperatur sowie die Messwerte Heizwärme für beide Untersuchungsjahre.

| Heizwärme [kWh/(m ² a)] | 2014 | 2015 | Differenz |
|--|-------------|-------------|-----------|
| Bedarf | | | |
| Mittelwert PHPP Wetter LU/HD bei $21,5^\circ\text{C}$ (flächengewichtet) | 9,6 | 11,8 | 2,2 |
| Verbrauch | | | |
| Mittelwert Messwert (flächengewichtet) | 14,9 | 16,4 | 1,5 |
| Differenz | 5,3 | 4,6 | ---- |

Die Wetterbedingungen in den Folgejahren werden erneut Veränderungen – nach oben oder unten – in den festgestellten Größenordnungen bedingen. Es ist damit auch geklärt, dass kein Anlass für eine weitere Steigerung der Verbrauchswerte aus anderen Gründen zu vermuten ist.

3 Elektrischer Strom

Um ein vollständiges Bild der Energieverbrauchswerte der Gebäude zu bekommen, ist neben dem Wärmeverbrauch insbesondere der Stromverbrauch von Interesse. Die Stromverbrauchsdaten von fast 1.200 Einzelzählern (Wohnungs-, Allgemein- und Tiefgaragenzählern) von sechs der acht untersuchten Baufeldern sind dem PHI durch die Stadtwerke Heidelberg anonymisiert und nur nach Gebäuden mit Hausnummern übermittelt worden. Die Einzelwohnungen sind damit aus Datenschutzgründen nicht zu identifizieren.

3.1 Spezifischer Stromverbrauch der Wohnungen (ohne Allgemeinstrom)

Zur Auswertung liegen jeweils die 12 Monatswerte für das gesamte Jahr 2015 vor. Als Bezugsfläche liegen die Quadratmeter immer eines gesamten Gebäudes oder eines Hauseingangs vor, nie der Einzelwohnungen. Entsprechend werden die Zählerwerte der Wohnungsstromzähler addiert und auf die Fläche des Gebäudes bzw. des Gebäudeabschnitts bezogen.



Abbildung 20: Beispiel für 10 der ca. 1.200 Smart Meter Stromzähler in einem der untersuchten Gebäude (Technikkeller).

Auf diesem Weg können bei der Auswertung der Stromverbräuche für 33 Gebäude und Gebäudeabschnitte spezifische Stromverbrauchswerte für das Jahr 2015 berechnet werden. In Abbildung 21 sind diese Stromverbrauchswerte mit einer Streuung zwischen 11,5 und 24,0 kWh/(m²a) dargestellt. Als flächengewichteter Mittelwert ergibt sich mit **17,9 kWh/(m²a)** ein vergleichsweise niedriger Wert. Die Gebäude bestehen überwiegend aus Wohnungen und Studentenzimmern, nur in den Erdgeschossen sind

zum Teil vereinzelte Ladengeschäfte wie z.B. Café, Bäcker, Bank, Kiosk, Friseur vorhanden. Es handelt sich damit um eine überwiegende aber nicht ausschließliche Wohnnutzung.

3.2 Allgemeinstrom

Mit den individuellen Wohnungszählern werden die allgemeinen Verbrauchswerte der Gebäude nicht gemessen. Die zusätzlichen **Allgemeinzähler** erfassen in allen Objekten die Bereiche wie Treppenhaus-, Außen- und Kellerlicht, Heizungspumpen, zentrale Lüftungsanlagen, Fahrstühle etc. Welche Verbraucher in den Gebäuden vorhanden sind, ist unterschiedlich. Als besonders deutliches Beispiel können die wenigen Reihenhäuser genannt werden: Dort fallen nur minimale Gemeinschaftsstromverbrauchswerte an, da die Lüftungsanlagen und Außenbeleuchtungen vermutlich über die Wohnungszähler erfasst werden⁴; Fahrstühle gibt es dort nicht. Damit besteht eine ganz andere Situation als in den Mehrfamilienhäusern mit zentraler Lüftung, Treppenhausbeleuchtung sowie Fahrstuhlbetrieb.

Durch ergänzende Analysen und mehrfache Ortstermine konnten die Allgemeinzähler in allen Gebäuden von den Wohnungszählern unterschieden werden. Für diese gemeinschaftlichen Stromverbräuche sind in den Objekten unterschiedlich viele Zähler im Einsatz. Sie werden hier je Gebäude/Gebäudeteil zum Wert „Allgemeinstrom“ summiert und ebenfalls auf die Fläche des Gebäudes/Gebäudeteils bezogen.

Als Ergebnis der gemeinschaftlichen Stromverbräuche ergeben sich dabei sehr unterschiedliche Werte, zwischen **0,7 bis 15,4 kWh/(m²a)**. Die einzelnen Ursachen für die großen Unterschiede und die exakten Zuordnungen der Verteilung der Verbrauchswerte auf Allgemein- bzw. Wohnungszähler können – wie beschrieben - nicht ermittelt werden.

Für die Summen der Verbrauchswerte aus Wohnungs- und Allgemeinstrom ergibt sich in Abbildung 22 ein Mittelwert von **26,3 kWh/(m²a)**. Der Mittelwert gegenüber den Verbräuchen allein innerhalb der Wohnungen erhöht sich damit um **8,4 kWh/(m²a)** (Mittelwert Allgemeinstrom).

⁴ Für die Reihenhäuser bedeutet dies als Ausnahme gegenüber allen anderen Wohnungszählerwerten, dass der Stromverbrauch der Wohnungslüftungsanlagen und Außenbeleuchtung dann ggf. im Haushaltsstromverbrauch enthalten ist. Detailinformationen dazu liegen aufgrund des Datenschutzes nicht vor.

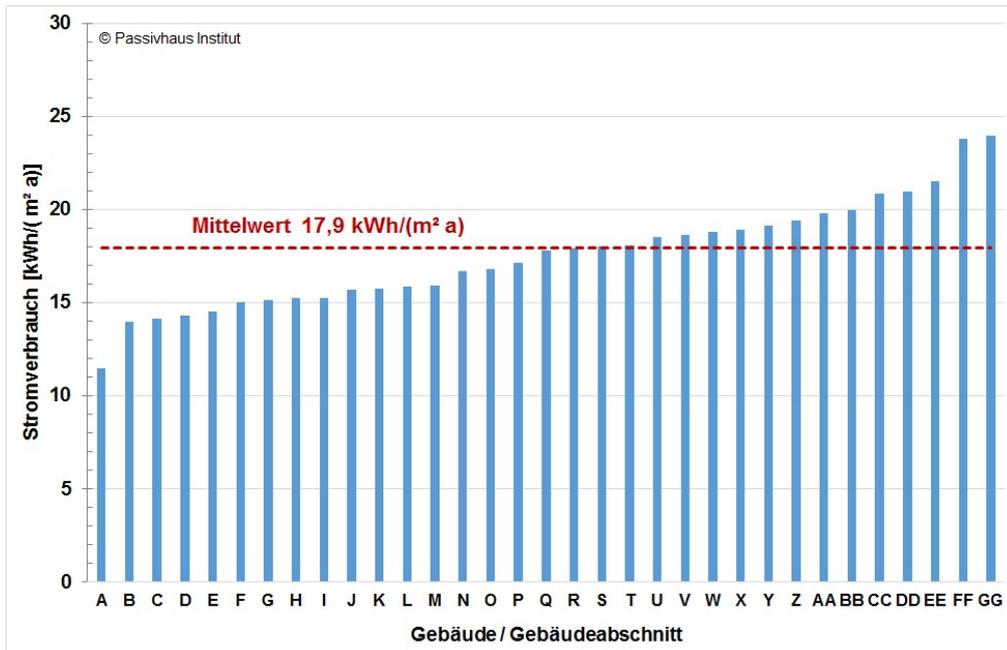


Abbildung 21: Spezifischer Stromverbrauch der 33 Gebäude bzw. Gebäudeabschnitte (Haus-eingänge) in der Heidelberger-Bahnstadt mit überwiegender Wohnnutzung im Jahr 2015 aufsteigend sortiert. Dargestellt sind die Verbräuche der Wohnungszähler OHNE Allgemiestrom (Nur bei den wenigen Reihenhäusern ist der Lüftungsstrom enthalten). Der flächengewichtete Mittelwert beträgt 17,9 kWh/(m²a).

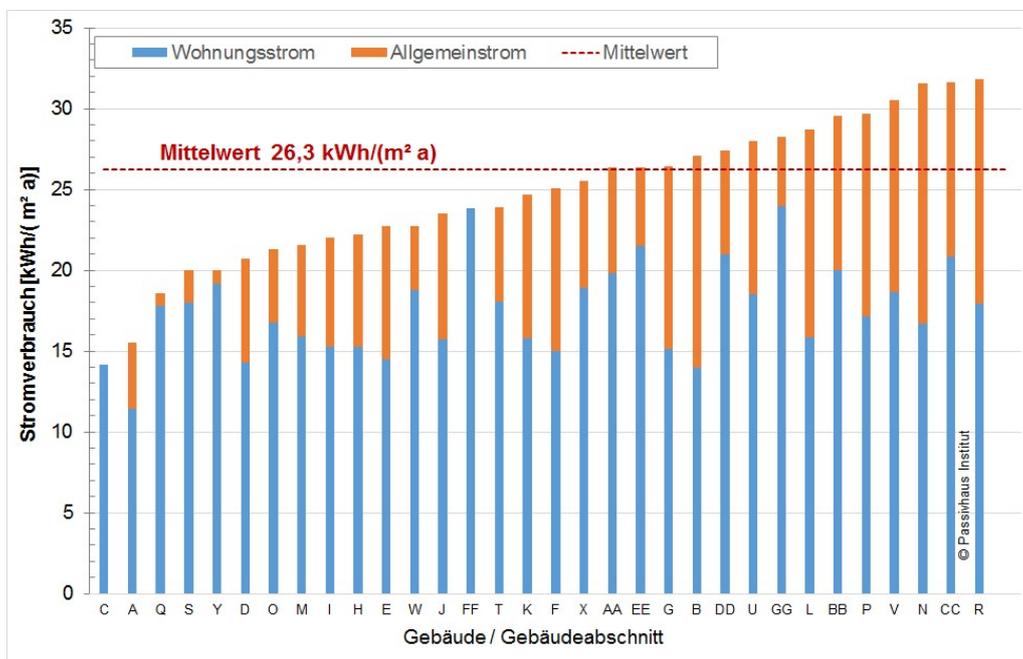


Abbildung 22: Spezifischer Stromverbrauch der 33 Objekte aus Abbildung 21 in der Heidelberger-Bahnstadt für das Jahr 2015 ergänzt um die Verbräuche der Allgemiestromzähler (ohne Stromverbrauch der Tiefgaragen). Der flächengewichtete Mittelwert beträgt 26,3 kWh/ (m²a).

3.3 Stromverbrauch Tiefgaragen

Die Stromverbräuche der gemeinschaftlichen Tiefgaragen für z.B. Beleuchtung, Schrankenanlage, Rolltore, ggf. Lüftungsanlagen etc. sind in allen bisher dargestellten Werten noch nicht enthalten. In fünf der sechs stromseitig untersuchten Baufeldern gibt es Tiefgaragen, die über separate Stromzähler erfasst werden. Für das eine Baufeld liegt kein separater Messwert für die Tiefgarage vor; der Stromverbrauch ist auch nicht im oben ausgewerteten Allgeinstrom des Baufeldes enthalten. Damit die Verbrauchsdaten mit den spezifischen Wohnungswerten und dem Allgeinstrom direkt verglichen werden können, wurde hier als Bezugsgröße ebenfalls die Wohnfläche (Energiebezugsfläche) gewählt. Dafür sind je Baufeld die Energiebezugsfläche aller Gebäude eines Baufeldes addiert worden. Es liegt eine Schwankung zwischen 1,6 bis 4,7 kWh/(m²a) vor. Der flächengewichtete Mittelwert ergibt sich zu 3,3 kWh/(m²a).

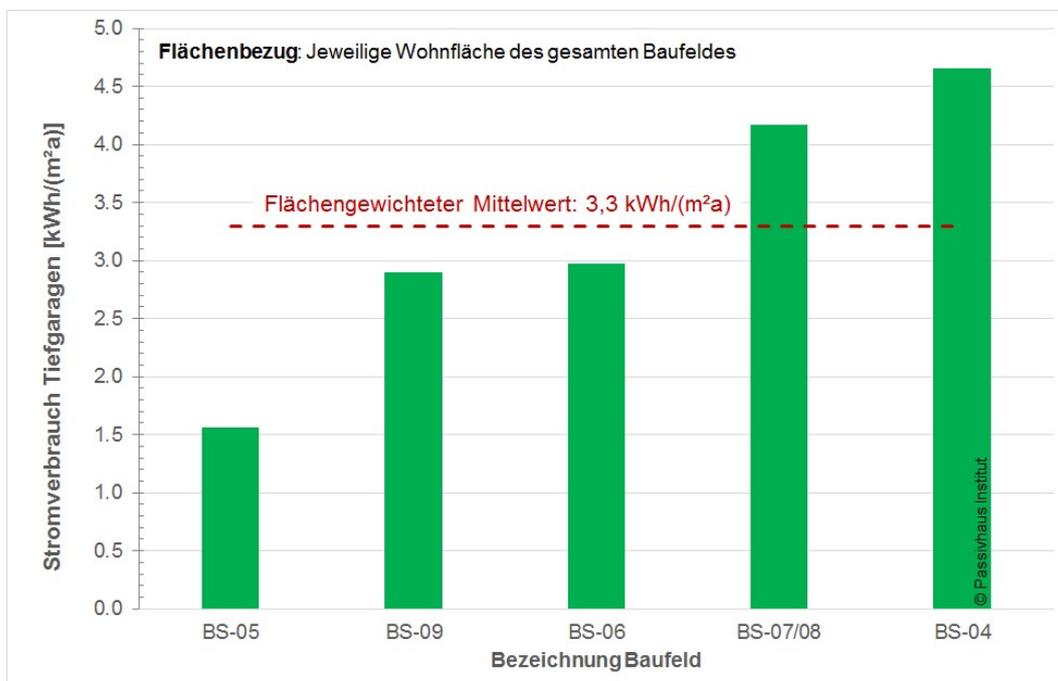


Abbildung 23: Spezifischer Stromverbrauch für den Betrieb der Gemeinschaftstiefgaragen je Baufeld. Als Flächenbezug wird hier die Wohnfläche (Energiebezugsfläche) des gesamten Baufeldes (Summe der Gebäude) verwendet. Damit können diese Werte direkt mit den anderen Verbrauchsdaten verglichen werden.

3.4 Einordnung der Stromverbrauchswerte

Zur Einordnung der gemessenen Verbrauchswerte werden Literaturdaten herangezogen.

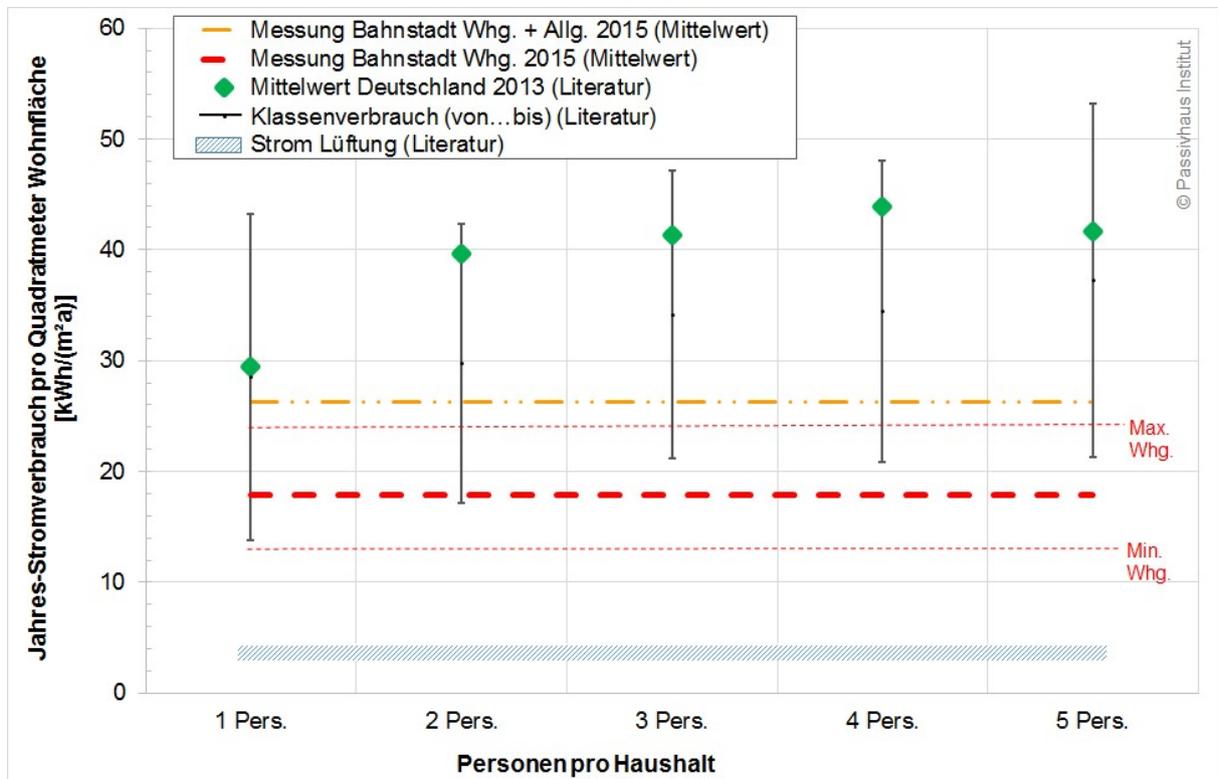


Abbildung 24: Vergleich der gemessenen Stromverbräuche in der Bahnstadt (2015) mit Durchschnittswerten aus der Literatur (Erläuterung siehe Text). Der Tiefgaragenstrom ist hier nicht aufgetragen.

In [BDEW 2013] ist als geeigneter Vergleichswert der Stromverbrauch je Haushalt nach Haushaltsgröße (ohne elekt. Warmwasserbereitung sowie ohne Heizstrom) für das Jahr 2013 angegeben. Die Wohnflächen der Haushalte nach Personengröße sind [DESATIS 2013] für den Bereich „Wohngebäude mit 3 und mehr Wohnungen“ entnommen. Werden daraus die spezifischen Stromverbrauchswerte berechnet, ergeben sich minimal für den 1 Personen Haushalt 29,4 und maximal für den 4 Personen Haushalt 43,9 kWh/(m²a). Die Werte für alle Haushaltsgrößen sind in der folgenden Grafik (Abbildung 24) als grüne Vierecke dargestellt. Die Messwerte der Wohnungszähler aus der Bahnstadt sind als Mittelwert sowie mit dem Minimal- und dem Maximalwert der 33 Gebäude/Gebäudeteile angegeben (rote gestrichelte Linie). Für diese Messwerte sind keine Haushaltsgrößen (Personenanzahl) bekannt. Die gelbe Punkt-Strich-Linie zeigt den Mittelwert der Messung inkl. des Allgemeinstromverbrauchs (vgl. vorherige Seiten). Als weitere Vergleichsgröße ist die Bandbreite aller Klassen (A

„gering“ bis G „sehr hoch“) des Stromspiegels Deutschland 2016 für jede Haushaltsgröße eingetragen [BMUB 2016]. Verwendet wurden die Daten für Mehrfamilienhäuser ohne elektrische Warmwassererzeugung.

Zur Einordnung der Stromaufwendungen für eine zentrale **Lüftungsanlage**, welche in den Gebäuden nicht separat gemessen wurden aber im Messwert „Allgemeinstrom“ enthalten sind, wurde ein Vergleichswert aus der Literatur herangezogen. In [Lodenareal 2012] wurden in einem großen Mehrfamilienhaus mit zentraler Lüftungsanlage der Jahresstromverbrauch mit 4,1 bzw. 4,2 kWh/(m²a) gemessen. Bei Messungen mit dezentralen (wohnungswesisen) Lüftungsanlagen wurden Werte von 3,8 kWh/(m²a) [Peper/Feist 2008] und 3,1 kWh/(m²a) [Peper/Schnieders/Feist 2011] gemessen. Der Bereich dieser Verbrauchsgrößen für den Lüftungsstrom ist als blau schraffierte Fläche im Diagramm eingetragen.

Die Messdaten der Haushalte in der Bahnstadt zeigen erfreulich niedrige Stromverbrauchswerte der Haushalte im Vergleich zum deutschen Durchschnittsverbrauch. Selbst wenn die Allgemeinstromverbräuche mit berücksichtigt werden, zeigen sich Ergebnisse deutlich unter den Durchschnittswerten; und dies, obwohl die Messwerte den Verbrauch für die Wohnungslüftung, die es in allen Passivhäusern der Bahnstadt gibt, enthalten. Dafür gibt es vermutlich mehrere Ursachen:

- Auswirkungen der Informationen und Stromsparberatung der Stadt Heidelberg für die Bewohner der Bahnstadt
- Durchschnittlich sehr moderne Ausstattung der Neubauwohnungen mit neuen Elektrogeräten, Beleuchtungstechniken etc.
- Verhältnismäßig große Wohnungsgrößen, insbesondere der Eigentumswohnungen

Geschlossen werden kann aus diesen Ergebnissen auch, dass der Stromverbrauch für die Komfort-Wohnungslüftung so gering ist, dass die Messwerte insgesamt immer noch unter dem deutschen Durchschnitt liegen. Die Wohnungslüftung spart daher erheblich mehr Primärenergie und CO₂ ein als für ihren Betrieb benötigt wird.

3.5 Winter-Sommer Stromverbrauch

Aufgrund der zeitlich aufgelösten Strommessungen mittels Smart-Meter (Monatswerte) und der statistisch belastbaren Anzahl an Haushaltsstromzählern kann untersucht werden, wie groß der Unterschied zwischen dem sommerlichen und dem winterlichen Stromverbrauch ist. Dafür werden die monatlichen Verbrauchswerte aller individuellen Wohnungszähler summiert, auf die Wohnfläche bezogen und durch die

Anzahl der Tage des Monats geteilt. Damit wird die unterschiedliche Länge der Monate berücksichtigt.

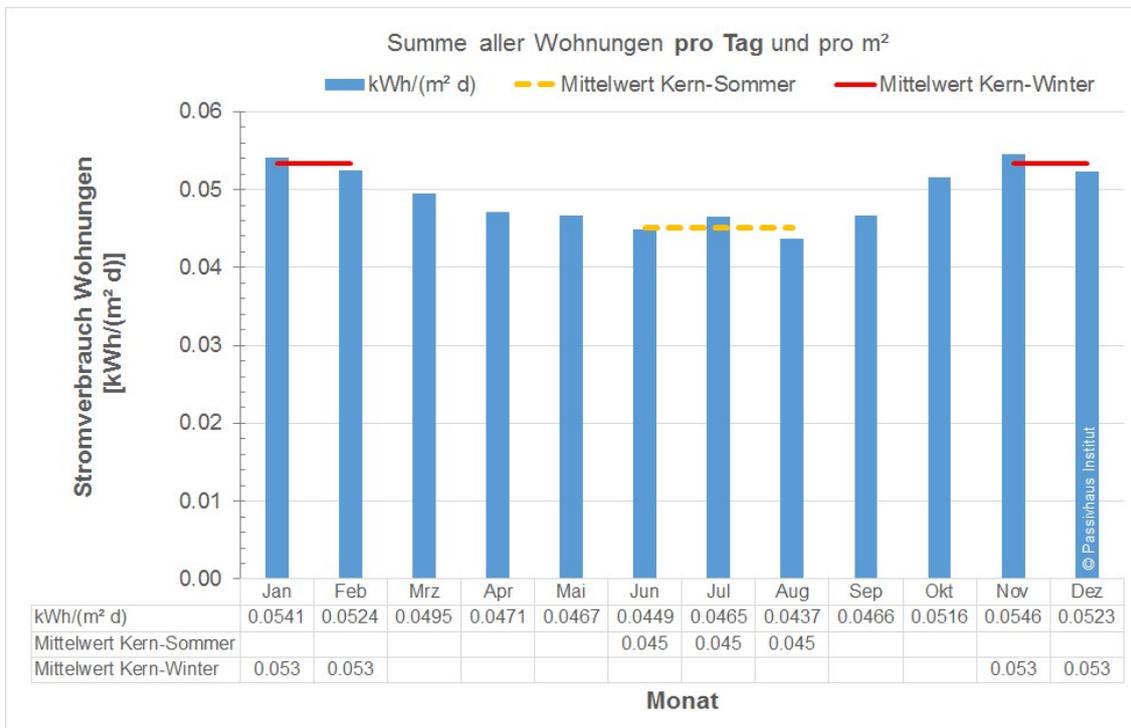


Abbildung 25: Durchschnittliche monatliche Stromverbrauchswerte für den Haushaltsstrom aller untersuchten Gebäude umgerechnet auf spezifische mittlere Tagesverbrauchswerte. Die Mittelwerte der drei Kern-Sommer sowie der vier Kern-Wintermonate sind eingezeichnet.

Die so aufbereiteten Verbrauchsdaten zeigen in Abbildung 25 den erwarteten insgesamt geringeren Sommerverbrauch. Als geringfügige, unerwartete Ausreißer zeigen sich der etwas höhere Juli-Wert sowie der geringere Wert im Dezember. Die Ursachen dazu lassen sich aus den Daten nicht ermitteln; es wurde aber überprüft, dass es sich nicht um einzelne Ausreißer einzelner Gebäude handelt.

Um auch für andere Untersuchungen die Sommer-Winter-Schwankung im Stromverbrauch von Haushalten beurteilen zu können, werden für die drei Kern-Sommermonate (Juli bis August) und die vier Kern-Wintermonate (November bis Februar) die Durchschnittsverbrauchswerte bestimmt und verglichen. Es zeigt sich für den Sommer eine Reduktion um durchschnittlich **15,6 %** gegenüber den Wintermonaten. Wird das gesamte Jahr in die zwei Teile „Sommer“ (April bis September) und Winter (Oktober bis März) zu je sechs Monaten geteilt ergibt sich ein Unterschied von **12,4 %**. Mit diesen Unterschieden können z.B. Messwerte von kurzzeitigen Messungen verlässlicher auf Jahreswerte hochgerechnet werden.

Der Verbrauch an stromspezifischen Anwendungen (in keiner der Wohnungen gibt es elektrische Heizungen oder nennenswerte Beiträge einer elektrischen Warmwasserbereitung) ist somit im Winter signifikant höher als im Sommer. Die Ursachen dafür sind sowohl der höhere Lichtstrombedarf (kürzere Tageslichtzeit) als auch der längere Zeitraum des Aufenthalts in den Wohnungen mit entsprechender Nutzung von IT und Unterhaltungselektronik. Weitere Analysen dazu finden sich im Anhang.

4 Fazit Monitoring Bahnstadt Heidelberg

Die Bemühungen, mit der Bahnstadt Heidelberg ein energetisch vorbildliches Stadtquartier zu schaffen, sind in Bezug auf die hier untersuchten Wohnbauten als sehr erfolgreich zu bewerten. Zusammenfassend zeigt die vorliegende Analyse, dass die untersuchten Baufelder im Gesamtdurchschnitt nur 55 kWh/(m²a) (2014) bzw. 53 kWh/(m²a) (2015) Endenergie für alle Wärmeanwendungen verbrauchten. Das ist nur etwa ein Drittel des Fernwärmeverbrauchs von vergleichbaren bestehenden Gebäuden für Heizung, Warmwasser, Verteil- und Speicherverluste zusammen. Es handelt sich mit in der Summe knapp 90.000 m² Nutzfläche in 1.400 Wohnungen um eine statistisch aussagekräftige Erhebung. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit denen von zuvor detailliert untersuchten Passivhäusern mit Fernwärmeanschluss.

Der Fernwärmeverbrauch für die Raumheizung beträgt im Durchschnitt um 15 bzw. 16 kWh/(m²a) (± 4), das ist ein hervorragendes Ergebnis.

Der Vergleich mit den Werten der PHPP-Projektierung (neu berechnet mit den aktuellen Wetterdaten) liefert eine sehr gute Korrelation, mit Mess-/Berechnungsabweichungen von maximal $\pm 4,3$ kWh/(m²a), die somit fast im Rahmen der Messgenauigkeit dieser Untersuchung liegen – nur zwei Baufelder liegen jenseits dieser Marke. Grundsätzlich wird eine kontinuierliche Überprüfung von technischen Anlagen und Einstellparametern, insbesondere bei den „Ausreißern“, empfohlen.

Bei der Untersuchung der Stromverbräuche der Einzelwohnungen zeigen sich sehr niedrige Ergebnisse: Der Mittelwert der Haushaltszähler liegt bei nur 17,9 kWh/(m²a), der zusätzliche Allgemeinstrom bei 8,6 kWh/(m²a). Ursächlich werden hier die Stromsparberatung der Stadt, die modernen Ausstattungen der Wohnungen sowie die Größe der Wohnungen sein.

Mit der Entscheidung, im gesamten Baugebiet Heidelberg-Bahnstadt den Passivhausstandard festzuschreiben, sind für den Heizwärmebedarf 15 kWh/(m²a) vorgegeben. In anderen fernwärmeversorgten Mehrfamilienhäusern (Bestandsgebäude) wurden für die Heizwärmeversorgung Durchschnittswerte von 112 kWh/(m²a) gemessen [Techem

2014]. Gegenüber diesem Verbrauch im Bestand wurde mit dem Passivhausstandard also eine Heizwärmeeinsparung von 87% angestrebt. Die vorliegende Auswertung der Verbräuche zeigt, dass trotz der beiden Ausreißer tatsächlich sehr erfolgreich Einsparungen in der angestrebten Größe realisiert werden konnten. Die Realisierung der Wohngebäude in der Bahnstadt im Großmaßstab durch unterschiedliche Planerteams und mit ganz unterschiedlichen Nutzern belegt die Robustheit des Passivhausstandards. Wird die notwendige Qualitätssicherung verlässlich durchgeführt, steht einer flächenhaften Umsetzung auf diesem geringen Energieverbrauchsniveau zur nachhaltigen Entwicklung nichts entgegen.

5 Quellenangaben

- [BDEW 2013] **Stromverbrauch im Haushalt.** Energie-Info. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 2013
- [BMUB 2016] **Stromspiegel für Deutschland 2016.** Klimaschutz zu Hause. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Berlin 2016
- [DESATIS 2013] **Wirtschaftsrechnungen, Einkommens- und Verbrauchsstichprobe, Wohnverhältnisse privater Haushalte.** Fachserie 15, Sonderheft 1, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2013
- [Feist 2004] Feist, W.: **Wärmeübergabeverluste im Licht der Baupraxis,** In: Wärmeübergabe- und Verteilverluste im Passivhaus, Protokollband Nr. 28 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase III, Passivhaus Institut, Darmstadt 2004,
- [Lodenareal 2012] W. Wagner, M. Spörk-Dür, R. Kapferer, M. Braitto, R. Pfluger, F. Ochs, J. Suschek-Berge **Forschungsprojekt Passivhauswohnanlage Lodenareal,** Endbericht; Projektleitung: Energie Tirol, Innsbruck. Gleisdorf 2012
- [Peper 2008] Peper, S.: **Passivhaus-Heizsysteme in der Praxis, Ergebnisse und Erfahrungen aus der Feldmessung,** In: Protokollband 38 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase IV; Passivhaus Institut; Darmstadt 2008,
- [Peper 2012a] Peper; S.: **Messung zur Verbrauchskontrolle – „Minimal-monitoring“,** In: Richtig messen in Energiesparhäusern; Protokollband 45 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase V, Passivhaus Institut, 2012
- [Peper 2012b] Peper; S.: **Messkonzepte, Störgrößen und adäquate Lösungen,** In: Richtig messen in Energiesparhäusern; Protokollband des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase V, Passivhaus Institut, 2012
- [Peper/Feist 2008] Peper, S.; Feist, W.: **Gebäudesanierung „Passivhaus im Bestand“** in Ludwigshafen/Mundenheim, Messung und Beurteilung der energetischen Sanierungserfolge. Passivhaus Institut, Darmstadt 2008

[Peper/Schnieders/Feist 2011] Peper, S.; Schnieders, J.; Feist, W.: **Monitoring, Altbausanierung zum Passivhaus, Verbrauch - Raumluftqualität - Kellerfeuchte**. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2011
Download unter: www.passiv.de

[Peper/Grove-Smith/Feist 2009]: Peper, S.; Grove-Smith, J.; Feist, W.: **Sanierung mit Passivhauskomponenten, Messtechnische Untersuchung und Auswertung Tevesstraße Frankfurt a.M**, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2009, Download unter: www.passiv.de

[Techem 2014] **Energiekennwerte 2014**. Hilfen für den Wohnungswirt.
(Verbrauchsdaten für das Jahr 2013) Techem, Eschborn 2014

6 Anhang

Ergänzende Fourieranalyse zum Haushaltsstromverbrauch aus Abschnitt 3.5:

Tatsächlich lässt sich der Jahresverlauf des Stromverbrauchs gut durch eine harmonische Näherung darstellen (vgl. Abbildung 26). Mittels Fourieranalyse ergeben sich folgende Koeffizienten:

Der zeitlich konstante Basisverbrauch (absolutes Glied) beträgt $49,2 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{d})$, die Jahresamplitude des jahreszeitlich abhängigen Kosinus-Terms beträgt $4,7 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{d})$ und damit $9,5 \%$ des Durchschnittsverbrauchs; die Spanne zwischen Winter und Sommer liegt mit dieser Auflösung bei $9,4 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{d})$ oder $19,1\%$ des Durchschnittes.

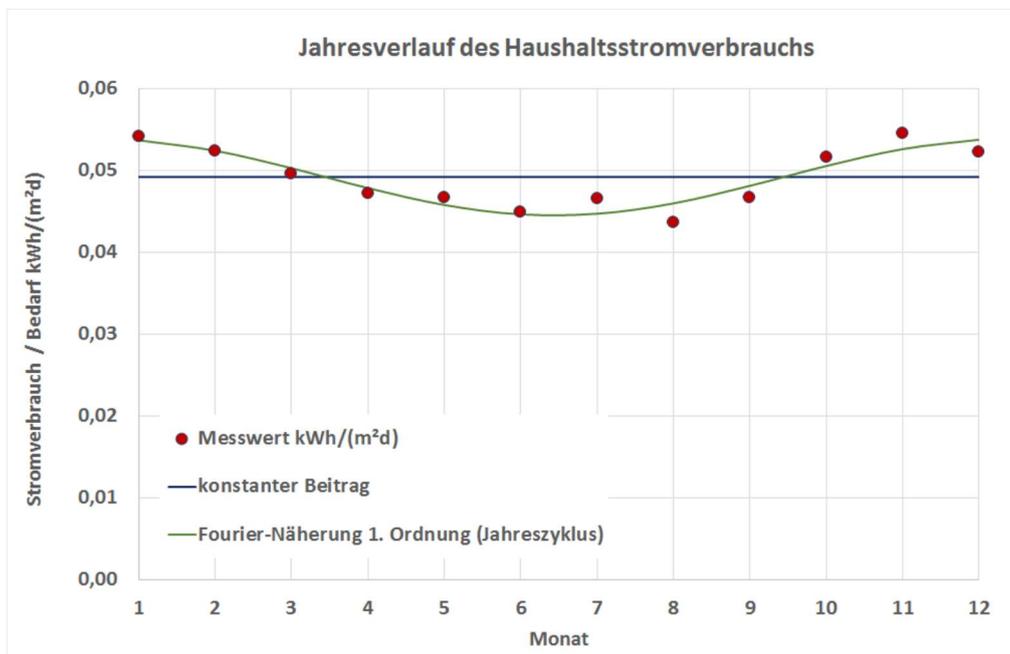


Abbildung 26: Harmonische Näherung in der Jahresperiode für die gemessenen spezifischen Haushaltsstromverbräuche. Der Verbrauch zeigt in guter Näherung einen Kosinus-förmigen Jahresgang (Phasenlage 14 Tage vor Jahresende) mit einer Amplitude, die $9,5\%$ des mittleren Verbrauchs beträgt.