

**Energie-Monitoring
der Jahre 2014 bis 2021
für die Wohngebäude im
Passivhaus-Stadtteil
Heidelberg-Bahnstadt**

Erstellt durch:



Klimaschutz- und Energie-Beratungsagentur

Heidelberg – Rhein-Neckar-Kreis gGmbH

Wieblinger Weg 21

69123 Heidelberg

Bearbeitung: Dipl.-Phys. Walter Orlik

Heidelberg, im März 2023

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort.....	2
2	Fernwärme	3
2.1	Energieverbrauch Fernwärme	3
2.2	Verfahren Minimalmonitoring.....	3
2.3	Auswertung Energieverbrauch	5
2.4	Vergleich mit anderen Datenquellen.....	12
2.5	Wärmekosten	15
2.6	Mittlerer Wärmepreis	15
3	Strom.....	16
3.1	Energieverbrauch Strom	16
3.2	Vergleich mit anderen Datenquellen.....	22
4	Gesamtbilanz	25
4.1	Entwicklungsstand und Vergleich mit Planungswerten	25
4.2	Primärenergie (PE).....	26
4.3	Klimaschutz (CO ₂ -Äquivalente)	27
4.4	Abweichende Flächenbezüge	29
5	Fazit	30
Literatur	32

1 Vorwort

In der Bahnstadt entsteht das bisher größte Passivhausgebiet weltweit und somit ein energieeffizienter und vor allem zukunftsweisender Stadtteil. Um die erzielten Ergebnisse zu überprüfen, hat die Stadt Heidelberg die KLiBA gGmbH mit der Auswertung der Verbrauchswerte (Wärme und Strom) beauftragt.

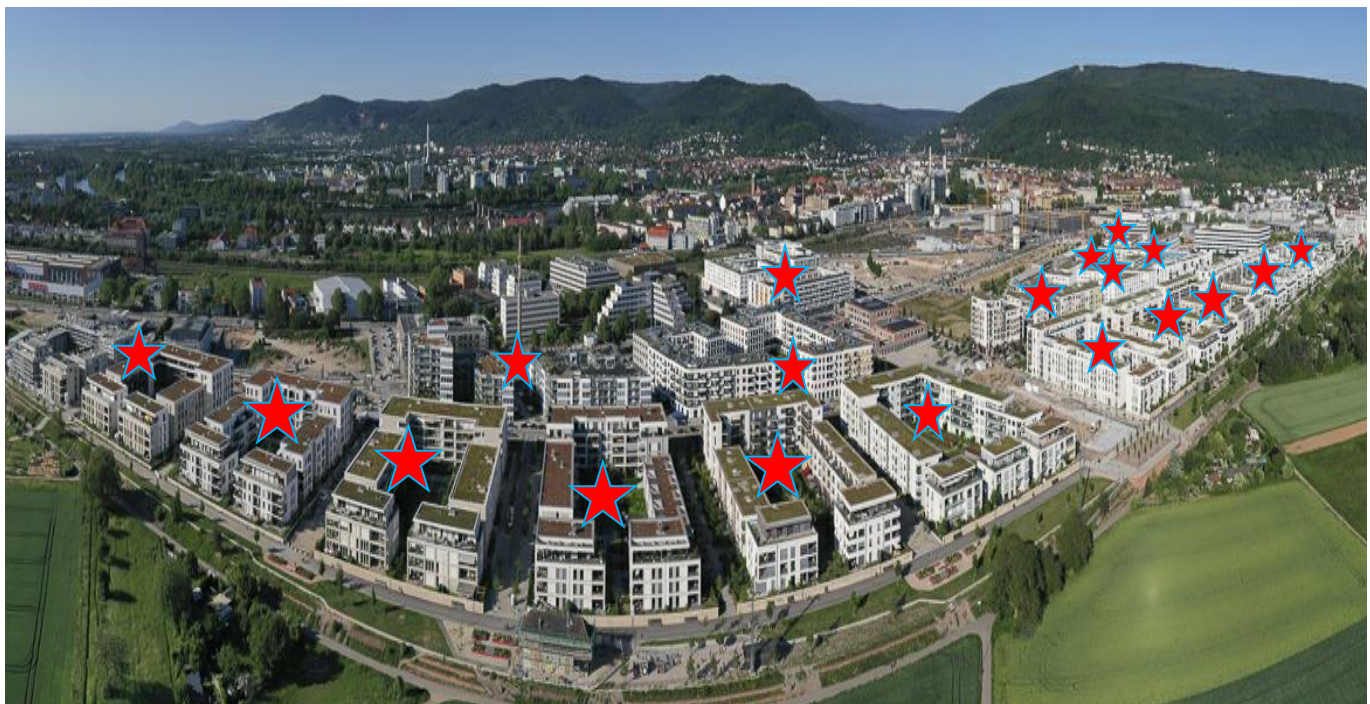
Das Monitoring wird entsprechend des Baufortschritts weitergeführt und erweitert. Im November 2021 wurden die Daten für die Jahre 2014 bis 2020 vorgestellt [KLiBA 2021], die im vorliegenden Bericht bis zum Jahr 2021 fortgeschrieben werden.

Zur Auswertung kommen 19 Baufelder mit überwiegender Wohnnutzung, wobei auch Gewerbeflächen einbezogen sind (meist Ladengeschäfte im Erdgeschoss). Die untersuchten Gebäude haben insgesamt 239.622 m² Energiebezugsfläche, 3.085 Wohneinheiten und 91 Gewerbeeinheiten. Im folgenden Luftbild sind die betroffenen Baufelder mit ★ markiert.

Die Verbrauchsdaten werden von der Stadt Heidelberg bereitgestellt. Sie sind auf Ebene des Baufeldes erhoben und anonymisiert, so dass der erforderliche Datenschutz gewährleistet ist.

Zur Auswertung wird das sog. „Minimal-Monitoring“ verwendet, das vom Passivhaus-Institut (PHI) vorgeschlagen wurde [PHI 2016]. Im Einzelnen werden erarbeitet:

- Jahresverbrauch für Strom und Wärme je Baufeld,
- Ausweisung des Heizwärmeverbrauchs, Warmwasserverbrauchs und der Verluste nach der Methodik der o.g. PHI Studie. Für den Bereich Wärme werden deshalb Monatsdaten benötigt.
- Vergleich des realen Verbrauchs mit den Hauptkriterien der Passivhausbauweise,
- Kennzahlenbildung bzgl. Energiebezugsfläche nach Passivhaus-Kriterien („EBF“), Gebäudenutzfläche nach Gebäudeenergiegesetz (GEG) („A_N“), Wohnfläche nach Wohnflächenverordnung (WoFIV) („WF“) und Netto-Raumfläche nach DIN 277 („NRF“) für den Vergleich mit anderen Statistiken,
- Gesamtbewertung der Primärenergie und der CO₂-Emissionen,
- Tabellarische und grafische Auswertung.



2 Fernwärme

2.1 Energieverbrauch Fernwärme

Die Erschließung der Bahnstadt erfolgt in Baufeldern, die jeweils einen oder maximal zwei Hauptwärmehähler haben. Die Monatsdaten werden jährlich ausgelesen und dann für das Minimalmonitoring weiter verarbeitet.

Die Kennwerte werden mit der Energiebezugsfläche (EBF) ermittelt, die in Wohngebäuden im Wesentlichen aus der beheizten Wohnfläche besteht, jedoch auch die Allgemeinflächen² (mit einem Abschlag von 40%) enthält. Diese Fläche ist typischerweise kleiner als die fiktive „Nutzfläche“ A_N nach GEG, die aus dem Bruttovolumen ermittelt wird.

In den Vorjahren waren nicht alle 19 Baufelder auswertbar wegen

- Teilbezug der Wohnungen. Es werden nur Baufelder berücksichtigt, in denen der Bezug bereits im Vorjahr begonnen hat.
- Datenlücken durch Ausfall der Zähler oder fehlende Ablesung.

Die folgende Tabelle zeigt das Wachstum der Bahnstadt und die Anzahl der Wohnbaufelder, die im Bereich Wärme auswertbar waren.

Jahr	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
Baufelder	10	12	13	14	16	17	18	[Stück]
Energiebezugsfläche (EBF)	109.775	133.444	142.778	153.370	176.655	192.393	224.282	[m ²]
Wohneinheiten (WE)	1.619	2.047	2.151	2.268	2.519	2.624	2.924	[Stück]
Gewerbeeinheiten	19	23	31	31	46	51	76	[Stück]

Tabelle 1: Übersicht der Baufelder Wärme

2.2 Verfahren Minimalmonitoring

Die Methodik folgt im Wesentlichen der Auswertung der Vorjahre [PHI 2016]. Sie ist dort ausführlich beschrieben und wird hier nur zusammengefasst.

Die Summenwerte der Hauptwärmehähler enthalten schwer trennbare Anteile für folgende Nutzungen:

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

² Nebenräume und Verkehrsflächen außerhalb von Wohnungen oder im Keller, sofern sie sich im beheizten Volumen befinden.

Beim Energie-Monitoring interessiert vor allem die Heizwärme, konkret ob der Heizwärme-Kennwert von 15 kWh/(m²a) als zentrales Passivhaus-Kriterium eingehalten werden kann. Die Herleitung dieses Wertes erfolgt in zwei Schritten:

„Erste Näherung“: Bestimmung des Sockel-Verbrauchs

Es wird angenommen, dass der Sommer (heizfreie Zeit, Juni bis September) repräsentativ ist für alle Nutzungen außer „Heizwärme“ und „Sonstiges“. Die folgende Grafik aus [PHI 2016], Seite 8, verdeutlicht dieses Vorgehen. Der Sockel wird auf 12 Monate hochgerechnet und abgezogen.

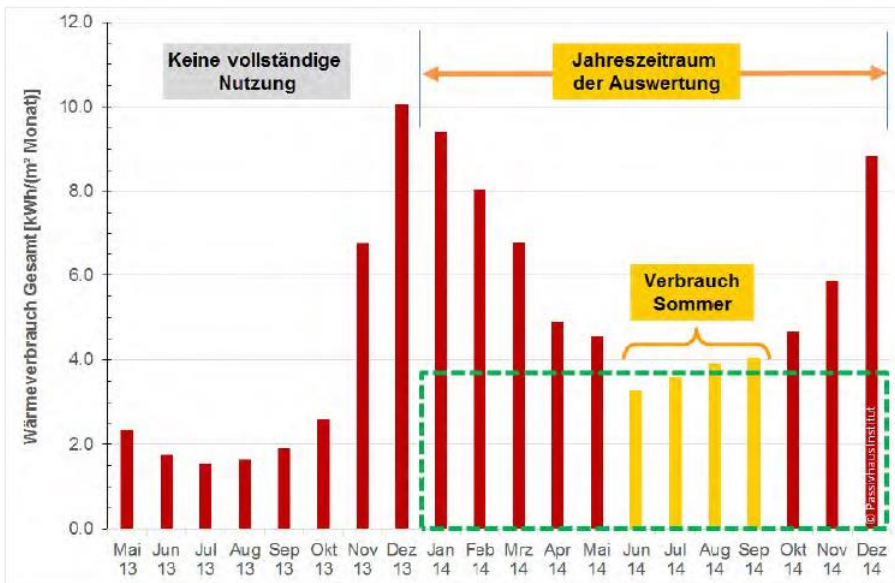


Abbildung 1: Bestimmung des Sockelverbrauchs, aus [PHI 2016]

„Zweite Näherung“: Korrekturen des Sockel-Verbrauchs

Bei der ersten Näherung wird der Sockel eher unterschätzt:

- Warmwasser-Verbrauch: Der Verbrauch ist im Winter höher als im Sommer.
- Rampenheizung: Zum Teil wird die Rampe der Tiefgarage mit Fernwärme frostfrei gehalten.
- Verteilverluste: Die Verluste sind im Winter höher als im Sommer.
- Ungewollte Beheizung: Vor allem im Mai treten Phasen auf, in denen Wärme weggelüftet wird.

Die verschiedenen Korrekturen ergeben zusammen einen Wert von 2,6 bis 3,1 kWh/(m²a), der in der zweiten Näherung ebenfalls abgezogen wird³.

Eine Witterungsbereinigung findet in dieser Systematik nicht statt. In einem Passivhaus müssten nicht nur die Verluste bereinigt werden (Heizgradtage), sondern auch die Gewinne (Globalstrahlung), was eine Nachberechnung aller PHPP-Bilanzen erfordern würde. In [PHI 2016], Kapitel 2.5, wurde das zum Teil unternommen, war im vorliegenden Bericht aber nicht gefordert. Siehe auch Abschnitt „Witterungs-bereinigung“ auf Seite 8.

³ In Anlehnung an [PHI 2016] werden die Anteile a. bis c. in der Summe pauschal zu 2,5 kWh/(m²a) angesetzt; Herleitung und Begründung siehe Quelle. Anteil d. wird projektspezifisch ermittelt.

2.3 Auswertung Energieverbrauch

Fernwärme gesamt

Die folgende Abbildung 2 stellt den Wert „Fernwärme gesamt“ dar, d.h. die Jahresarbeit am Hauptwärmemengenzähler. Dargestellt sind die Jahre 2014 bis 2021, soweit nutzbare Daten vorlagen (EE = Endenergie).

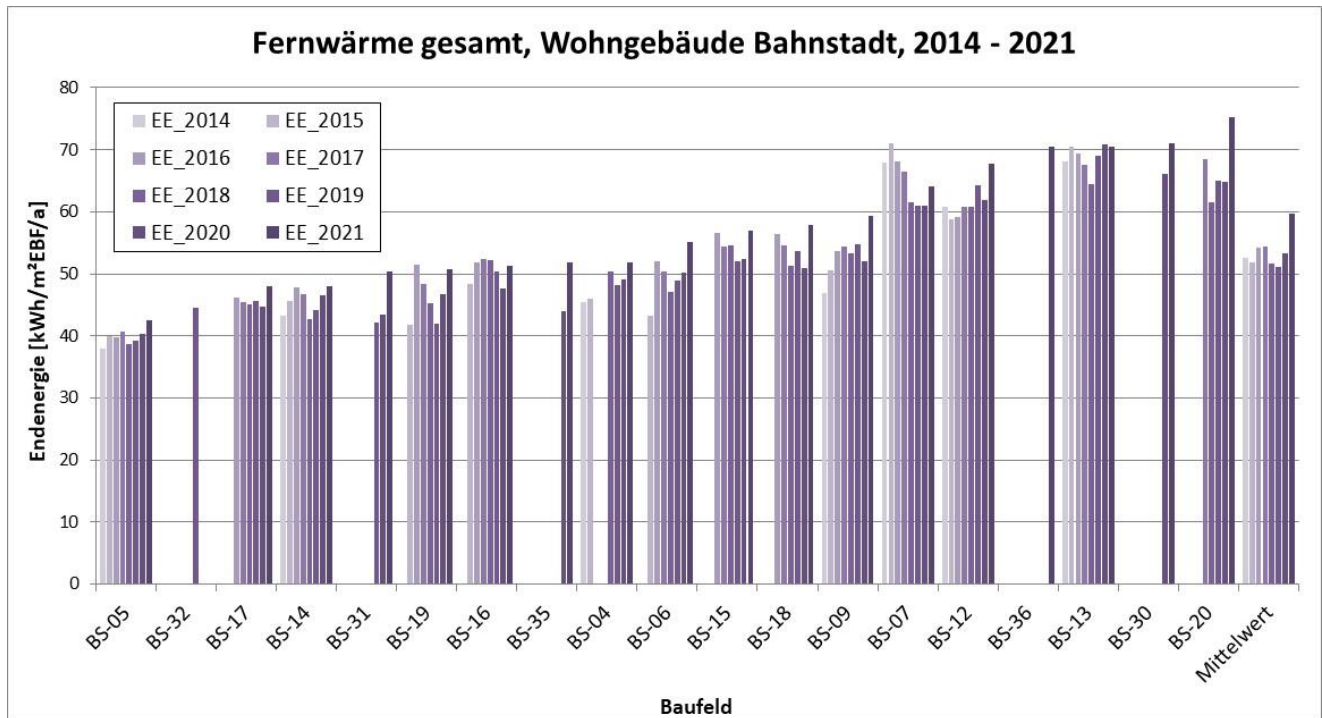


Abbildung 2: Fernwärme gesamt

Die Daten sind aufsteigend geordnet nach dem Wert des Jahres 2021. Es zeigt sich, dass die Werte eine große Spannweite zwischen 42,6 und 75,2 kWh/(m²a) aufweisen. Die Ursache für die teilweise auffallenden Werte und Entwicklungen ist nur durch eine genauere Analyse und im Austausch mit den Nutzern zu klären. Dabei obliegt der energiesparende Betrieb der technischen Anlagen gemäß Gebäudeenergiegesetz dem Eigentümer bzw. dem beauftragten Betreiber (GEG §§ 58-60). Im Bericht [PHI 2021] finden sich nützliche Hinweise zur Betriebsoptimierung und Wärmeleistungsreduktion für Eigentümer, Nutzer und Verwaltungen. Das Amt für Umweltschutz, Gewerbeaufsicht und Energie der Stadt Heidelberg bietet hierzu Beratungsleistung an.

Die Kategorie „Mittelwert“ ganz rechts zeigt die jeweiligen Jahres-Mittelwerte aller Baufelder. Neben dem Einfluss der Witterung spielen hier auch Änderungen bei der Anzahl der Objekte eine Rolle. Im Jahr 2021 ist der Wert deutlich angestiegen; er lag bei 59,7 kWh/(m²a).

Aufteilung nach Sockel und Heizwärme

Abbildung 3 zeigt die Aufteilung nach der Methodik aus Abschnitt 2.2, soweit Daten vorlagen. Die Daten sind aufsteigend geordnet nach dem Summenwert des Jahres 2021. Der Sockel trägt in der Größenordnung 2/3 des Verbrauchs, was der Analyse [PHI 2016] entspricht. Dabei gibt es auffällige „Ausreißer“ mit niedrigen (48%) und hohen (72%) Sockelanteilen.

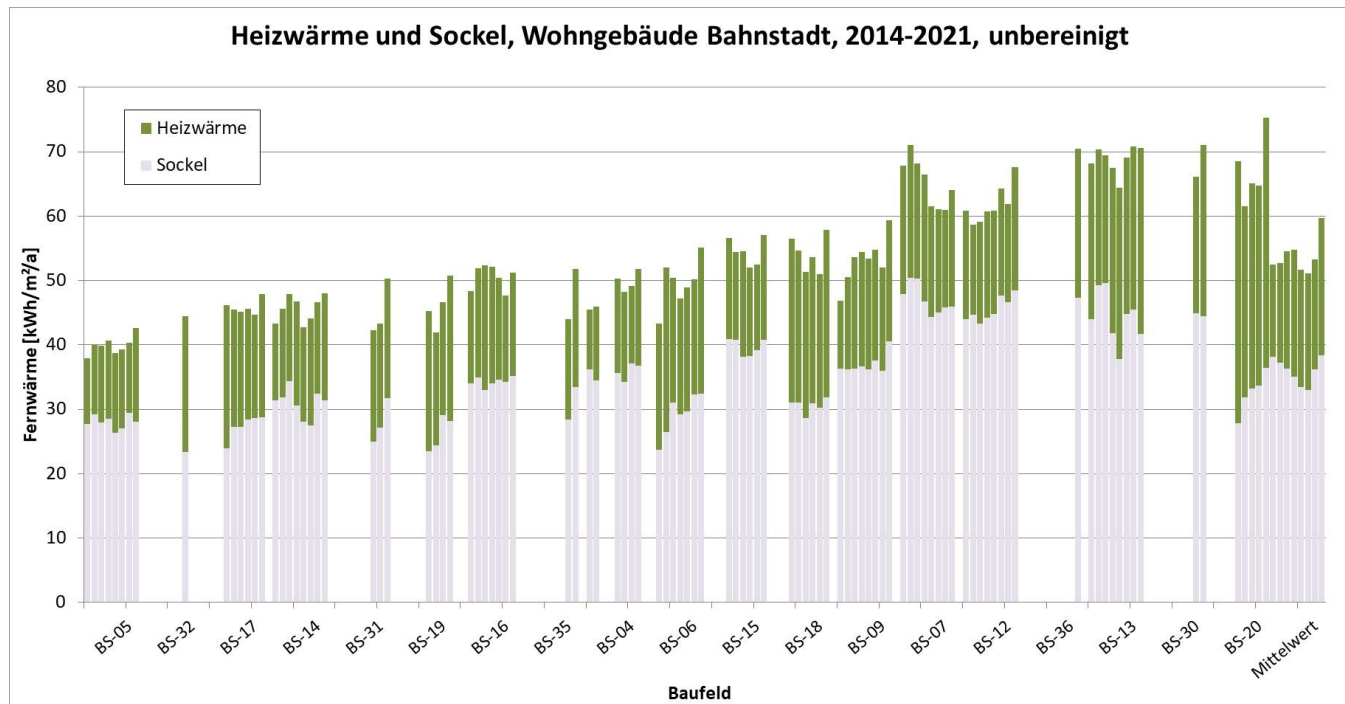


Abbildung 3: Heizwärme und Sockel

Die nachfolgenden Abschnitte diskutieren den Verlauf der beiden Anteile.

Heizwärme

Abbildung 4 beinhaltet die zentrale Aussage im Bereich Wärme und den Vergleich mit dem Passivhaus-Kriterium „Heizwärme bis 15 kWh/(m²a)“, siehe gepunktete Linie.

Die Bandbreite lag in 2021 zwischen 14,5 und 38,3 kWh/(m²a) bei einem Mittelwert von 21,3 kWh/(m²a). Der Mittelwert ist in 2021 angestiegen und liegt deutlich über dem Kennwert von 15 kWh/(m²a). Die Ursachen können wie folgt diskutiert werden:

- Witterungseffekte. Die Baufelder haben in den vergangenen Jahren unterschiedlich auf die Witterung reagiert, z.B. in dem kalten Jahr 2016. Für die Gesamtbilanz der Bahnstadt ist aber anzunehmen, dass der kalte Winter in 2021 zum Anstieg des Mittelwertes beiträgt. Siehe auch Abschnitt „Witterungsbereinigung“. Dieser Aspekt ist vermutlich dominant.
- Messungen in realisierten Gebäuden zeigen typische Innentemperaturen von 21,5 statt 20°C [PHI 2016], siehe auch Abschnitt „Witterungsbereinigung“.
- Änderung der Stichprobe. Neue Baufelder steigen im zweiten Jahr oft nochmals an, vermutlich wegen des fortlaufenden Bezugs; vergleiche Baufelder BS-30 und BS-31.
- Allmählicher Bezug der Wohnungen.

- „Trockenheizen“: Bei Neubauten in Massivbauweise wird manchmal berichtet, dass die Austrocknung von Putzen und Estrichen in der ersten Heizperiode erhöhte Verbrauchswerte verursacht. Ein solcher Effekt ist in der Bahnstadt nicht systematisch erkennbar.

Weiterhin haben die technischen Randbedingungen vermutlich einen starken Einfluss. Die Zusammenhänge könnten nur durch nähere Analysen vor Ort geklärt werden:

- Konzeption Heizung. Alle Gebäude haben eine statische Heizung, teils mit Heizkörpern, teils als Fußbodenheizung.
- Auslegung Lüftung. Bei zentralen Anlagen ist meist auch ein Heizregister vorhanden (Nachheizung nach der Wärmerückgewinnung).
- Betriebsführung

Zu beachten ist auch, dass die Genauigkeit der Methode begrenzt ist; sie wird in [PHI 2016] zu $\pm 4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ abgeschätzt.

Zusammengenommen liegt die Heizwärme auf einem absolut so niedrigen Niveau, dass die Bahnstadt die Erwartungen im Rahmen der Fehlergrenzen durchaus erfüllt hat. Die spannende Aufgabe ist im Grunde die Analyse des Sockelverbrauchs, siehe nächster Abschnitt.

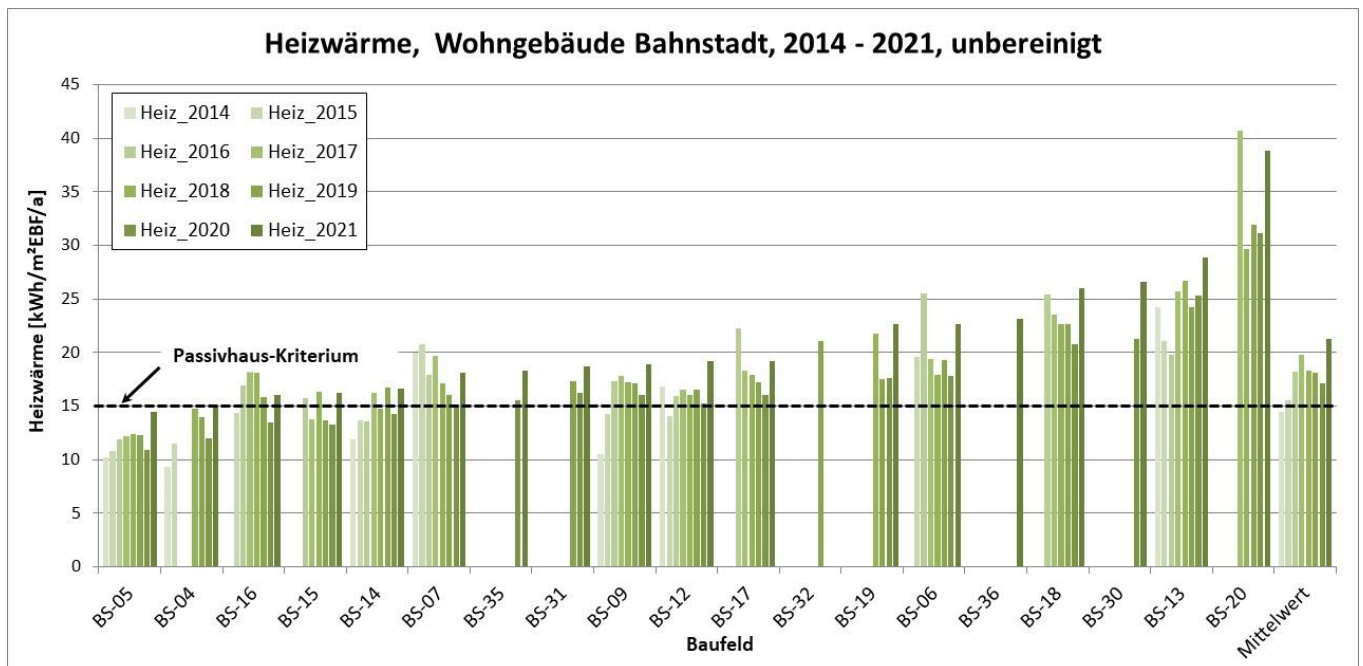


Abbildung 4: Heizwärme der Wohnbaufelder, unbereinigt, Messabweichung im Bereich $\pm 4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$

Sockel

Abbildung 5 zeigt den Sockelverbrauch, soweit Daten vorlagen. Die Daten sind aufsteigend geordnet nach dem Wert des Jahres 2021. Der Mittelwert ist wieder auf das Niveau des Jahres 2014 angestiegen; er lag in 2021 bei einem Wert von $38,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

Auch hier gibt es eine große Spannweite zwischen $28,1$ und $48,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Sofern Daten über 8 Jahre vorliegen, ist die zeitliche Entwicklung sehr uneinheitlich. Während einzelne Baufelder konstant sind, zeigen andere eine deutliche Steigerung oder starke Schwankungen.

In einer zweiten Stufe des Monitoring wäre insbesondere messtechnisch zu erfassen, welcher Anteil einer bestimmten Nutzung zuzuordnen ist (z.B. Warmwasserbereitung) und welcher Anteil als Verlust zu werten ist. In einem Baufeld konnte der Anlagenbetrieb durch Engagement der Nutzer deutlich verbessert werden, was in den Verbrauchswerten auch bereits sichtbar ist.

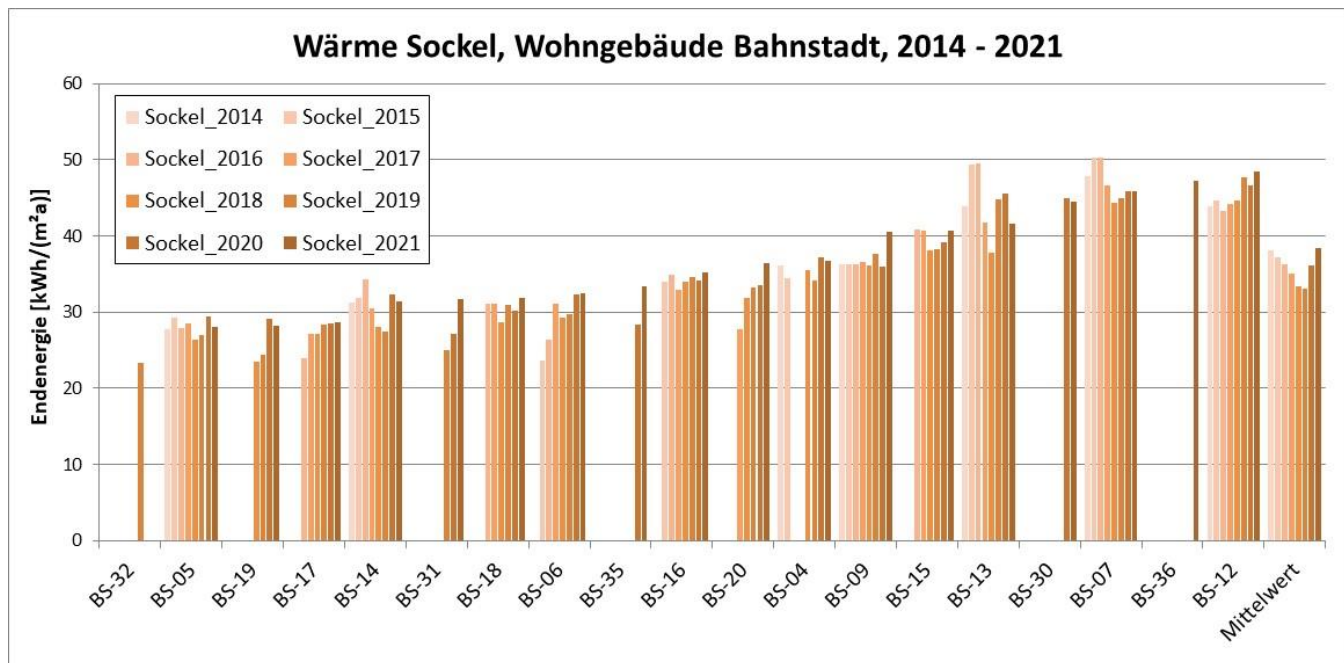


Abbildung 5: Sockel Wärme

Die Minimierung der Verluste ist das zentrale Ziel eines zukünftigen vertieften Monitorings. Dabei liegt das Augenmerk primär auf den Wärmeverlusten der Heiz- und Warmwasserleitungen. Diese fallen bei Passivhäusern durchaus ins Gewicht, obwohl der Dämmstandard durchgehend dem GEG entspricht.

Da die Leitungsdämmung i.d.R. nicht mehr zugänglich ist, liegen die Ansatzpunkte vor allem bei der Betriebsweise (Zeitprogramme und Temperaturniveau).

Besonders spannend ist das bei Anlagen, die auch im Sommer Wärmeverluste haben (Warmwasser-Zirkulation, Wohnungsstationen) und somit eine Gefahr für die Behaglichkeit darstellen.

Weiterhin wird auch eine Analyse der sog. „Mininetze“ angestrebt. Damit ist die Verteilung der Wärme innerhalb des Baufeldes gemeint, die ein wichtiger Baustein des ursprünglichen Wärmeversorgungskonzeptes ist [ebök 2007]. Dabei sind u.a. folgende Aspekte zu diskutieren:

- Das Konzept nimmt an, dass die Wärmeverluste der Rohrleitungen den Gebäuden zugutekommen. Das ist bei kalten Untergeschossen nicht der Fall.

- Weiterhin ist angenommen, dass der Sommerbetrieb des Mininetzes außerhalb der Heizzeit nur bei Beladung der Warmwasserspeicher erfolgt (1 x täglich). Dies wurde – soweit bekannt – in der Bahnstadt noch nicht realisiert.

Witterungsbereinigung

Bei effizienten Gebäuden bedeutet eine Witterungsbereinigung sowohl die Bereinigung der Verluste (Gradtagszahlen) als auch der Gewinne (Globalstrahlung). Letzteres bedingt allerdings die Neuberechnung der PHPP-Dateien, da der Effekt von der Ausrichtung der transparenten Bauteile abhängt. Dies war in [PHI 2016] für die Jahre 2014 und 2015 unternommen worden, ist seitdem aber nicht mehr Teil der Auswertung.

Zur ersten Bewertung der Einflussfaktoren wird im Folgenden eine Bereinigung nur der Verluste nach VDI 2067 vorgestellt. Analog zu [PHI 2016] wird dabei von Innentemperaturen bei 21,5°C ausgegangen, was auf einen erwarteten Kennwert von 18,5 kWh/(m²a) führt, siehe gepunktete Linie in Abbildung 6.

Die Ermittlung der entsprechenden Gradtagszahlen erfolgt über das PHPP-Blatt „Witterung“ mit Hilfe der Monats-Mitteltemperaturen des Deutschen Wetterdienstes⁴. Dabei ist zu beachten, dass die vorliegenden Daten zwar meist das Kalenderjahr betreffen (Jan. – Dez.), teilweise aber auch das Abrechnungsjahr (Mrz. – Feb.). Durch Bezug der gemessenen Gradtage auf das Normjahr ergibt sich der jeweilige Korrekturfaktor⁵ wie folgt:

Jahr	Korrekturfaktor	
	Kalenderjahr	Abrechnungsjahr
2014	1,29	1,27
2015	1,15	1,18
2016	1,05	0,98
2017	1,13	1,24
2018	1,23	1,21
2019	1,14	1,17
2020	1,24	1,21
2021	1,02	1,03

Tabelle 2: Korrekturfaktoren für die Bereinigung der Verluste. Faktoren über 1 bedeuten besonders warme Winter.

Abbildung 6 zeigt das Ergebnis. Demnach liegen die Mittelwerte seit 2017 knapp über 20 kWh/(m²a). Dies ist primär ein Effekt der Stichprobe, da die neueren Baufelder oftmals höhere Kennwerte haben.

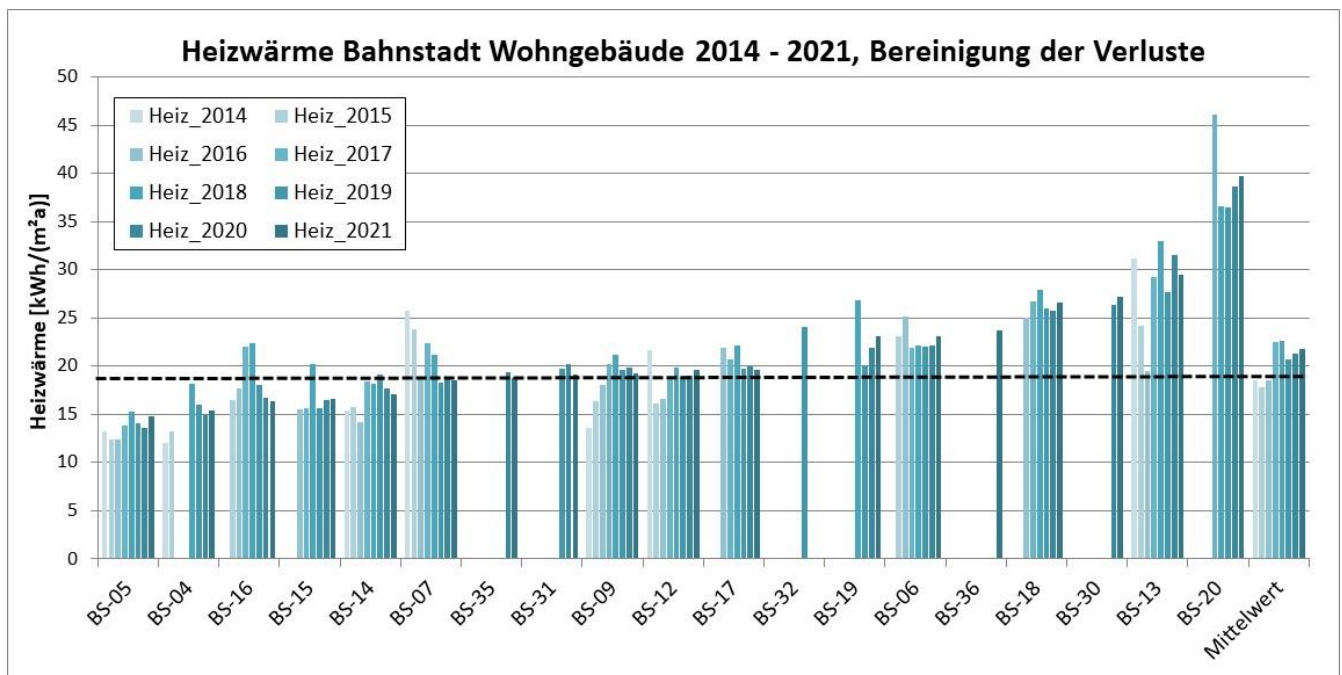


Abbildung 6: Heizwärme der Wohnbaufelder, Verluste witterungsbereinigt, Messabweichung ± 4 kWh/(m²a)

Leistungsbezug und abgerechnete Leistung

Die Wärmemengenzähler erlauben es in der Regel, auch Leistungsdaten (Monatsspitzen) auszulesen. Die höchste bezogene Wärmeleistung der Jahre 2014-2021 wird in Abbildung 7 bezogen auf die EBF dargestellt. Sie variiert zwischen 12,1 und 31,5 W/m² bei einem Mittelwert von 20,0 W/m².

⁴ Die Station Heidelberg ist seit 2012 geschlossen, so dass Daten der Station Mannheim verwendet werden.

⁵ Der Verbrauchswert wird mit dem Korrekturfaktor multipliziert, um den witterungskorrigierten Wert zu erhalten.

Eine Deutung dieser starken Streuung ist ohne weitere Datenaufnahme nicht möglich. Insbesondere haben Gebäude mit hoher Belegung manchmal besonders niedrige, manchmal aber auch besonders hohe spezifische Leistungen.

Im Hintergrund ist die abgerechnete Leistung (Vertragsleistung) dargestellt. In der Regel wird sie bei weitem nicht erreicht; der Mittelwert überschreitet mit $34,7 \text{ W/m}^2$ den tatsächlichen Bedarf um 74%. In diesem Zusammenhang sind folgende Aspekte zu diskutieren:

- Passivhäuser sind thermisch so träge, so dass der Heizbetrieb während der Ladezeiten des Warmwasserspeichers unterbrochen werden kann (Warmwasser-Vorrangschaltung). Dies war bereits Teil des ursprünglichen Wärmeversorgungs-konzeptes [ebök 2007]), das folgende Ansätze enthält:
 - Gesamtleistung 24 bis 28 W/m^2 ,
 - davon Heizleistung 10 W/m^2 und Warmwasser-Leistung 14 bis 18 W/m^2 .
 In der Tat überschreiten die Messwerte der Bahnstadt diese Ansätze nicht. Manche Baufelder haben sogar einen gemessenen Leistungsbedarf von unter 15 W/m^2 , was möglicherweise durch eine besonders wirksame Vorrangschaltung zu erklären ist.
- Durch die Mininetze ergeben sich in der Bahnstadt besonders niedrige Gleichzeitigkeitsfaktoren, die notfalls durch Pufferspeicher noch weiter gesenkt werden können.
- Eine allfällige Reduktion der Vertragsleistung wird durch Drosselung der Durchflussmenge realisiert. In Abhängigkeit der hydraulischen Verhältnisse im Gebäude sind dabei in der Praxis oft Grenzen gesetzt; insbesondere werden Rücklauftemperaturen von 40°C in der Regel nicht erreicht.
- In zwei Baufeldern wurden durch das Passivhaus-Institut genauere Messungen durchgeführt [PHI 2021]. Es ergibt sich, dass eine nominelle Anschlussleistung von 35 W/m^2 bei den gegebenen Netzparametern in der Bahnstadt im Regelfall ausreichen sollte.

In drei Baufeldern wurde die Übergabestation unterdessen bereits gedrosselt. Schon unter der vorsichtigen Maßgabe des vorigen Absatzes (maximal 35 W/m^2 Anschlussleistung) könnte die Vertragsleistung in den 4 betroffenen Wohnbaufeldern um insgesamt rund 825 kW gesenkt werden, wobei Kosteneinsparungen von rund 42.500 € (netto) pro Jahr entstünden.

Somit sind im Bestand weitere Anpassungen zu empfehlen, und auch für zukünftige Bauvorhaben kann diese Erkenntnis genutzt werden, um Investitions- und Betriebskosten zu sparen.

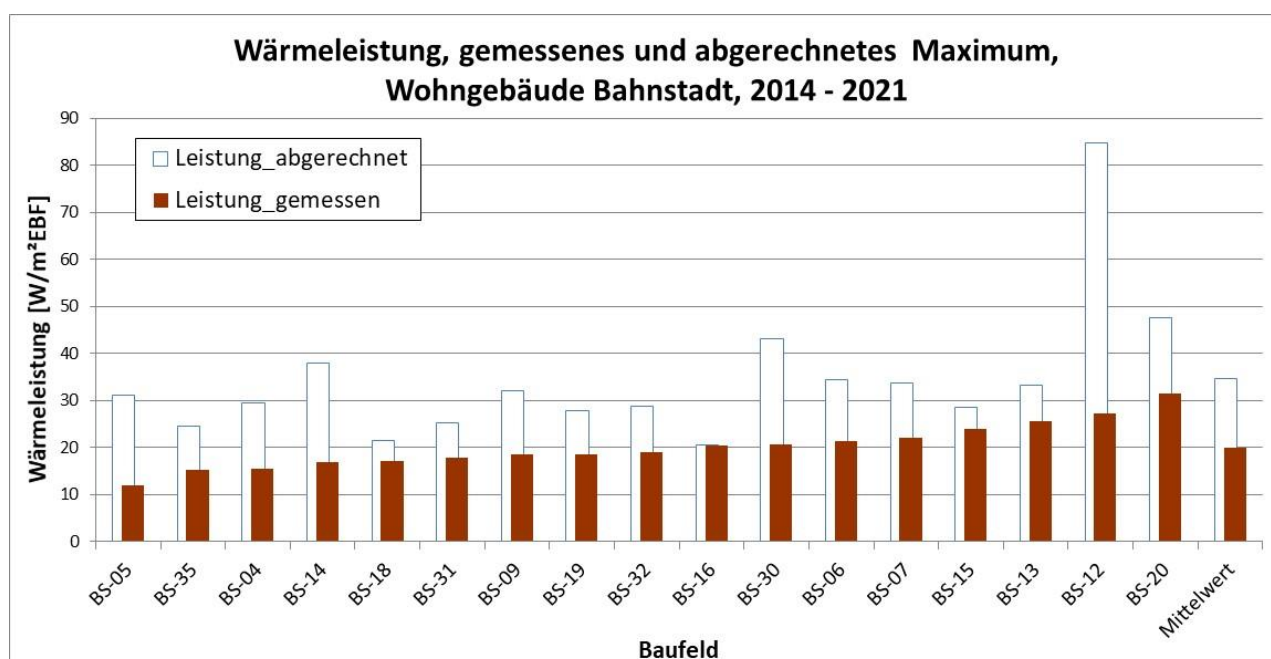
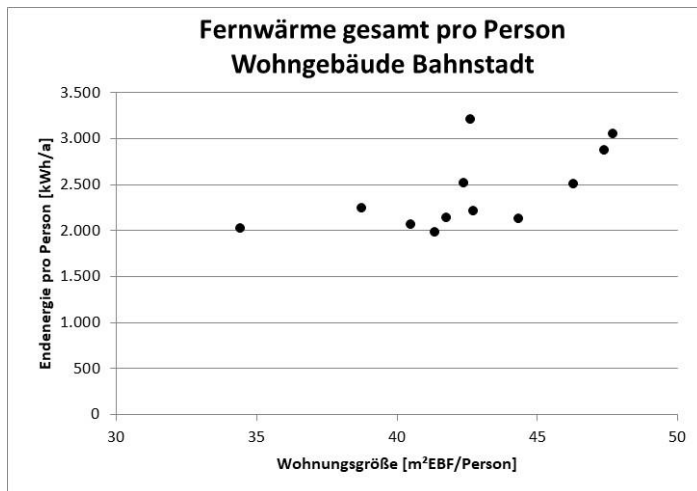


Abbildung 7: Leistungsbezug

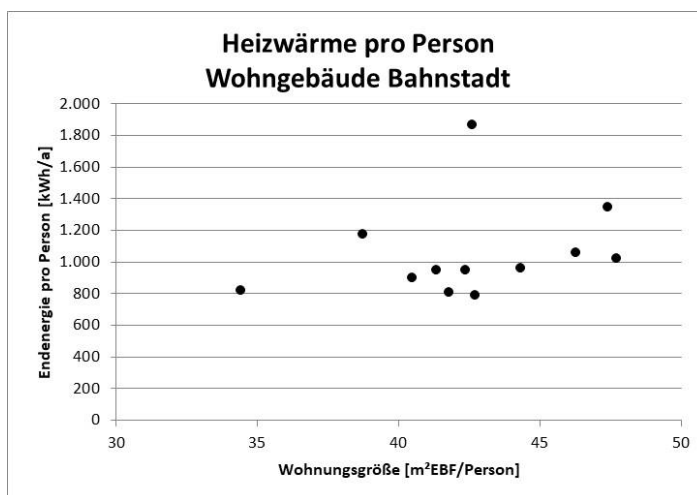
Personenzahlen

Beim Amt für Statistik liegen Personenzahlen für die Wohnbaufelder vor, wobei die neuesten Werte das Jahr 2021 betreffen (5.582 Bewohner zum Stichtag 31.12.2021). Der Bezug auf die Personenzahl könnte neben dem Flächenbezug weitere Aspekte zum Verständnis der Verbrauchswerte liefern.

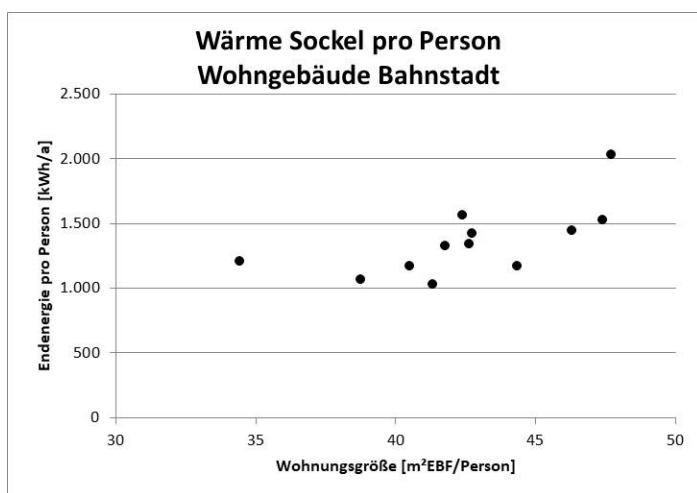
Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse für Gesamtwert, Sockel und Heizwärme, aufgetragen über die Wohnungsgröße (m²_{EBF}/Person). Die dargestellten Einheiten sind hier nicht Baufelder, sondern Baublöcke, welche z.T. mehrere Baufelder enthalten.



Mittelwert 2.403 kWh/Person



Mittelwert 1.046 kWh/Person



Mittelwert 1.357 kWh/Person

Abbildung 8: Wärme 2021 personenbezogen

Es zeigt sich in allen drei Fällen eine leichte Abhängigkeit von der Wohnungsgröße. Insbesondere ist der Pro-Kopf-Verbrauch bei eng belegten Gebäuden etwas niedriger und somit der Flächenbezug durchaus auch hier angemessen.

Weiterhin ist – wie schon beim Flächenbezug – eine breite Streuung sichtbar; z.B. liegen zwei Baublöcke systematisch besonders niedrig. Die Zusammenhänge könnten nur durch nähere Analysen vor Ort geklärt werden.

2.4 Vergleich mit anderen Datenquellen

Gesamtgebäude - Vergleich mit anderen Passivhäusern

Hier erfolgt ein Vergleich mit einer Auswertung des Büros ages (Münster) aus dem Jahre 2015 [ages 2015], in welcher der Gesamt-Wärmeverbrauch (d.h. für Heizung, Warmwasserbereitung und Verluste) von 139 Wohngebäuden mit Passivhausstandard ausgewertet wurde. Dabei ist die Endenergie durchgehend als Heizwert (Hi) angegeben. In der Stichprobe waren immerhin 15 Mehrfamilienhäuser und drei Studentenwohnheime enthalten; der Bezug erfolgte auf Bruttogrundfläche (BGF).

Abbildung 9 basiert auf Grafik 22 der genannten Studie: Die schraffierten Säulen stellen die Mehrfamilienhäuser dar, die gefüllten Säulen die Studentenwohnheime. Die Häufigkeitsverteilung ist offensichtlich sehr breit bei einem Mittelwert von 21,6 kWh(Hi)/m²_{BGF}/a. Die entsprechenden Daten der Bahnstadt (Kategorie „EE“) sind als orangene Quadrate darübergerlegt⁶.

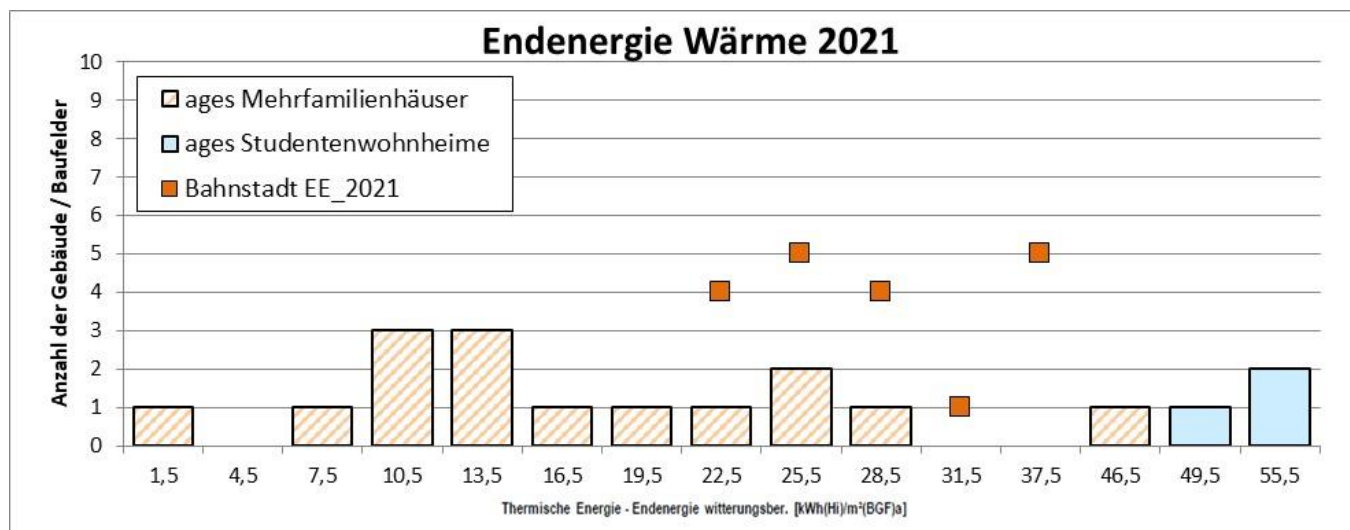


Abbildung 9: Wärmeverbrauch – Häufigkeitsverteilung (in Anlehnung an [ages 2015], Grafik 22)

Zur Verdeutlichung sind die Mittelwerte und Standardabweichungen⁷ in Abbildung 10 nochmals dargestellt. Folgende Aussagen ergeben sich:

- Die Gebäude der Bahnstadt liegen mit einem Mittel von 27,4 kWh(Hi)/m²_{BGF}/a auf den ersten Blick leicht über den Vergleichswerten.
- Auf den zweiten Blick streuen die 18 Objekte der ages-Studie so stark, dass beide Auswertungen sich statistisch decken.

⁶ Zur Vergleichbarkeit erfolgt eine Flächenumrechnung mit dem Faktor für Mehrfamilienhäuser BGF/bWF = 2,139 ([ages 2015] Abschnitt 8.7; bWF = beheizte Wohnfläche ≈ EBF).

⁷ Statistischer Fehler (korrigierte Stichprobenvarianz)

- Die Studentenwohnheime der Bahnstadt haben keine signifikant höheren Verbrauchswerte als die Mehrfamilienhäuser. Insbesondere kommen Kennwerte über $40 \text{ kWh(H}_i\text{)}/\text{m}^2_{\text{BGF}}/\text{a}$ in der Bahnstadt nicht vor.

Zusammengenommen sind die Werte der Bahnstadt unauffällig.

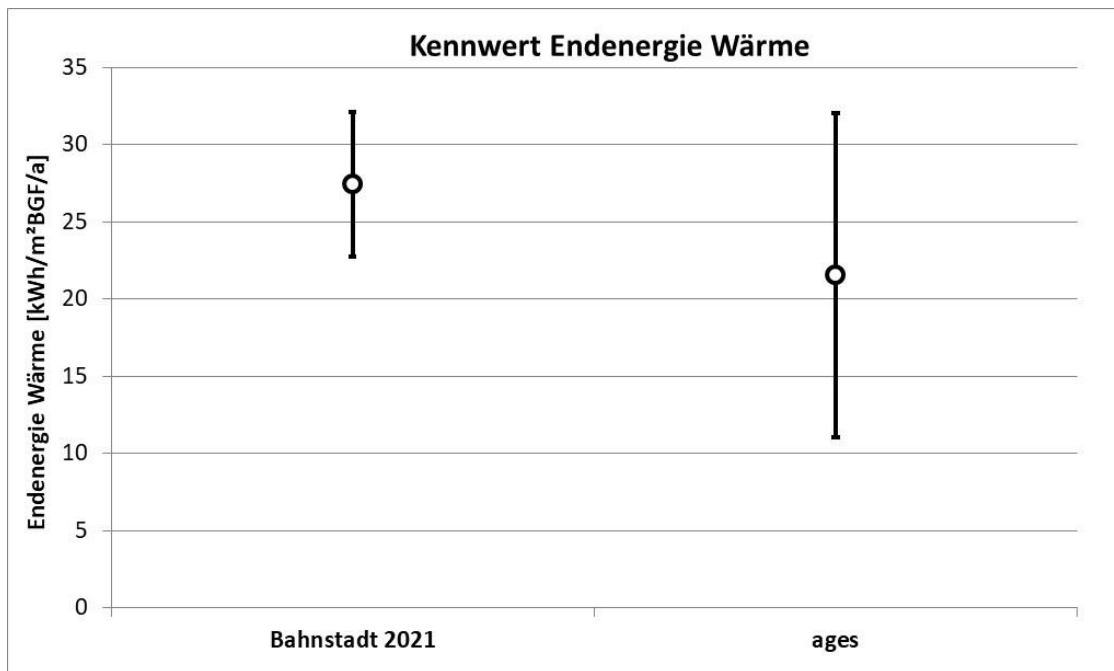


Abbildung 10: Kennwert Endenergie Wärme – Mittelwert und Standardabweichung

Gesamtgebäude – Vergleich mit dem Bundesdurchschnitt

Die Heizkosten-Abrechnungsfirmen veröffentlichen regelmäßig Daten über den von ihnen betreuten Gebäudebestand.

Die folgende Abbildung 11 aus [Techem 2019] zeigt in Grün die Häufigkeitsverteilung von 13.168 Mehrfamilienhäusern mit Fernwärme-Versorgung (Anlagen mit Warmwasser = „verbundene Anlagen“) für das Jahr 2018. Der nicht witterungsbereinigte⁸ Mittelwert⁹ liegt bei $100 \text{ kWh}/\text{m}^2_{\text{WF}}/\text{a}$. (Diese Auswertung wurde in [Techem 2021] leider nicht fortgeschrieben.)

Für die Bahnstadt ist die Kategorie „Gesamt“ zum Vergleich heranzuziehen, siehe Abbildung 2, Seite 5. Hier liegt der Mittelwert¹⁰ bei $59,7 \text{ kWh}/\text{m}^2_{\text{EBF}}/\text{a}$, also bei 60 Prozent des Bundesdurchschnitts. Wie die Häufigkeitsverteilung der Techem zeigt, haben weniger als 15% der Objekte so gute Verbrauchswerte.

Die besten Baufelder der Bahnstadt zeigen, dass Kennwerte von unter $45 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{a}$ möglich sind (BS-05, BS-14, BS-17, BS-32); die Differenz kann womöglich durch eine kontinuierliche Überprüfung von technischen Anlagen und Einstellparametern (Reduktion des „Sockels“) erschlossen werden.

⁸ Bereinigte Daten sind in der Quelle nicht genannt. „Bezüglich der Außentemperatur in der Heizperiode war 2018 ein sehr warmes, weit überdurchschnittliches Jahr.“ Bezugsgröße ist die Wohnfläche.

⁹ Der Wert liegt nicht relevant höher als die Auswertung für „Anlagen ohne Warmwasser“ Zitat Techem: „Die Differenz ist damit insbesondere bei Fernwärme geringer als erwartet. Die Ursache: Gebäude mit verbundenen Anlagen sind im Durchschnitt deutlich jünger, sind daher besser gedämmt und verfügen über eine modernere Anlagentechnik als jene, in denen das Wasser dezentral erwärmt wird.“

¹⁰ Bezugsjahr 2018. Der Kennwert bezieht sich auf die EBF, die leicht von der Wohnfläche abweicht; ein verlässlicher Wert der Wohnfläche liegt jedoch nicht vor (siehe Diskussion in Abschnitt 4.4, Seite 29).

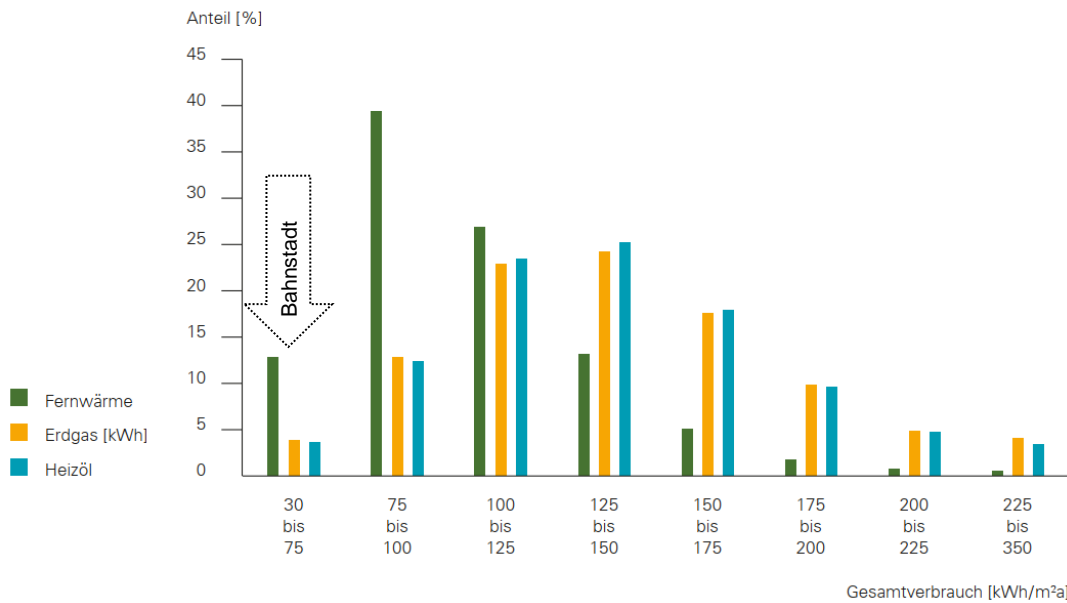


Abbildung 11: Häufigkeitsverteilung des spezifischen Gesamtverbrauchs in verbundenen Anlagen im Bundesdurchschnitt, Bezug auf Wohnfläche (aus [Techem 2019], nicht witterungsbereinigt)

Energieverbrauch für die Trinkwassererwärmung – Vergleich mit dem Bundesdurchschnitt

Die Quelle [Techem 2019] aus dem vorigen Abschnitt enthält auch eine Auswertung zum Energieverbrauch für die Trinkwassererwärmung. Das Ergebnis ist in Abbildung 12 wiedergegeben. Der Mittelwert für Anlagen mit Fernwärmeversorgung liegt bei 29 kWh/m²_{WF}/a bei einer recht hohen Standardabweichung von 9,8 kWh/m²_{WF}/a. (Auch diese Auswertung wurde in [Techem 2021] leider nicht fortgeschrieben.)

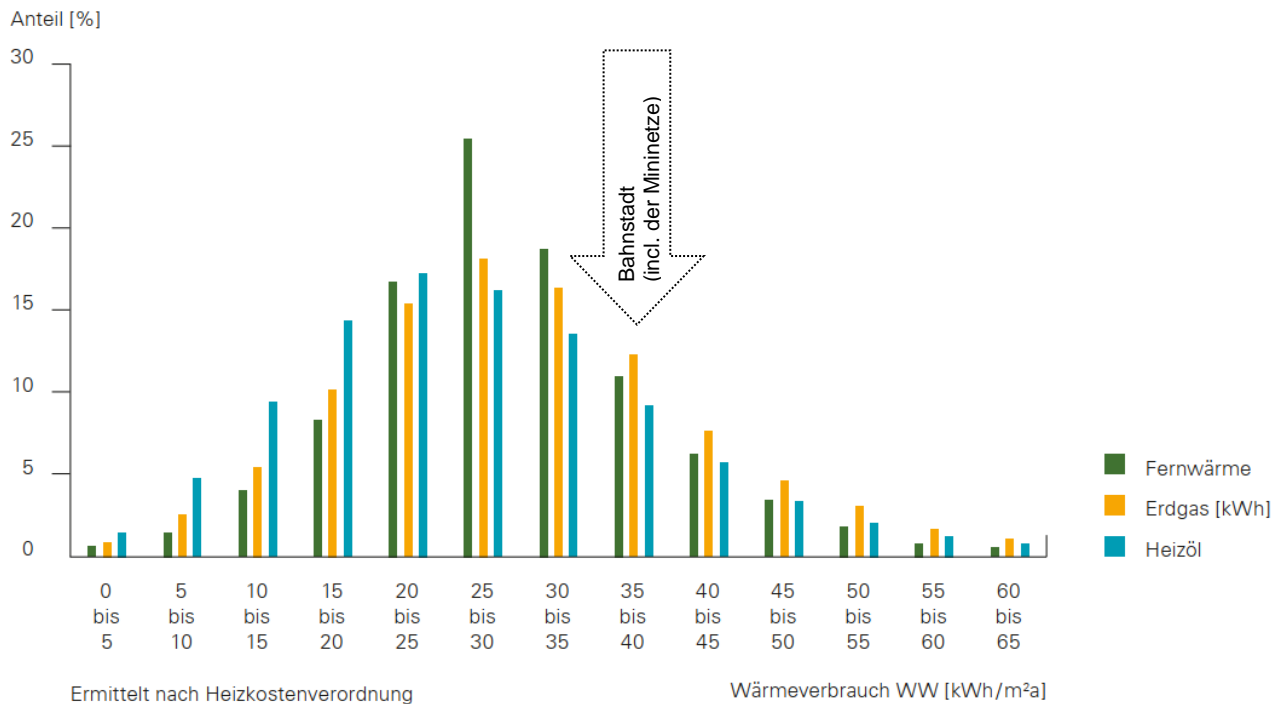


Abbildung 12: Häufigkeitsverteilung des flächenbezogenen Wärmeenergieverbrauchs für die Trinkwassererwärmung im Bundesdurchschnitt, Bezug auf Wohnfläche (aus [Techem 2019], nicht witterungsbereinigt)

Der Vergleichswert „Sockel“ (Abschnitt 2.3, Seite 7) liegt bei $38,4 \text{ kWh/m}^2_{\text{EBF/a}}$. In der Bahnstadt sind zusätzlich auch die Verluste der Mininetze enthalten, was offensichtlich zu einer Erhöhung des Mittelwertes um rund $9 \text{ kWh/m}^2_{\text{a}}$ führt. Zur weiteren Diskussion siehe oben.

2.5 Wärmekosten

Die Wärmekosten setzen sich aus Arbeitskosten und Leistungskosten zusammen. Im Folgenden werden die Fernwärmepreise der Stadtwerke Heidelberg¹¹ zugrunde gelegt.

Für das Berichtsjahr 2021 ergeben sich die Wärmekosten je nach Baufeld zu $4,4$ bis $9,4 \text{ €/m}^2$ (brutto und bezogen auf die EBF); der Mittelwert liegt bei $5,8 \text{ €/m}^2$.

Die reinen Heizkosten (d.h. ohne Sockel, jedoch mit anteiligen Leistungskosten) liegen im Schnitt bei $2,1 \text{ €/m}^2$, wobei die Spannweite $1,4$ bis $3,9 \text{ €/m}^2$ beträgt.

2.6 Mittlerer Wärmepreis

Durch Bezug der Wärmekosten aus Abschnitt 2.5 auf die bezogene Wärmemenge kann ein mittlerer Wärmepreis errechnet werden. Die Ergebnisse für das Jahr 2021 sind in Abbildung 13 dargestellt¹¹.

Die Ist-Werte liegen zwischen $8,5$ und $13,9 \text{ Ct/kWh}$ (brutto), im Mittel bei $9,9 \text{ Ct/kWh}$, wobei die höheren Werte in der Regel durch unnötig hohe Leistungskosten zustande kommen (siehe Abschnitt „Leistungsbezug“ auf Seite 9). Im Hintergrund sind die Werte angedeutet, die bei einer Anpassung der Vertragsleistung auf den Messwert erzielbar wären; diese liegen im Durchschnitt¹² bei $8,2 \text{ Ct/kWh}$.

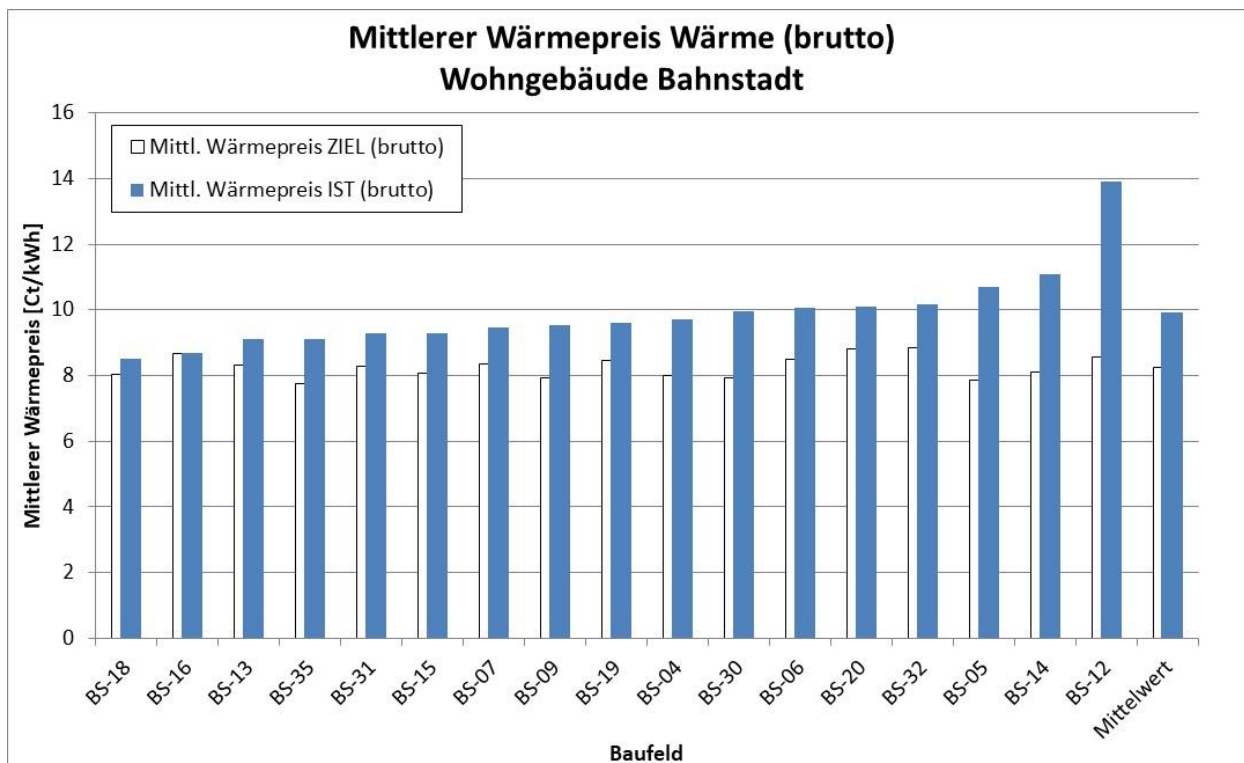


Abbildung 13: Mittlerer Wärmepreis, Bezugsjahr 2021

¹¹ Zugrunde gelegt sind die Brutto-Preise des Vertrags „heidelberg WÄRME“ mit Arbeitspreis $6,229 \text{ Ct/kWh}$ und Leistungspreis $61,25 \text{ €/kW/a}$, Stand 01.01.2021

¹² sofern auswertbare Messdaten vorliegen

3 Strom

3.1 Energieverbrauch Strom

Die Erschließung der Bahnstadt erfolgt in Baufeldern, für deren Stromzähler im Berichtsjahr jeweils Jahresdaten vorlagen.

Eine Auswertung erfolgt nur, soweit der Datenschutz gewährleistet werden kann. Die Verbrauchswerte werden möglichst in folgende Bereiche aufgetrennt:

- Allgemeinstrom („Allg“). Hier ist die Allgemeinbeleuchtung o.ä. inbegriffen, aber auch zentrale Dienste wie Druckerhöhungsanlage und zentrale Lüftungsanlagen, sofern vorhanden.
- Tiefgarage („TG“). In der Mehrzahl der Fälle liegt hierfür ein eigener Zähler vor; manchmal ist der Anteil aber im Allgemeinstrom enthalten.
- Nutzer („Nutz“). Hier ist der Anteil gemeint, der allein auf die Wohnungen entfällt. Eine Auswertung ist nur möglich, wenn Daten zum Allgemeinstrom vorliegen. Zu beachten ist, dass dieser Posten auch den Lüfterstrom enthält, wenn dezentrale Lüftungsanlagen vorliegen. In einigen Baufeldern sind im Erdgeschoss verschiedene Einheiten des Einzelhandels und/oder der Gastronomie vorhanden; diese Verbrauchswerte sind in den Daten jeweils enthalten.

Die Auftrennung ist in denjenigen Fällen nicht möglich, in denen die Daten nur über einen Hauptzähler erfasst werden.

Die Kennwerte werden mit der Energiebezugsfläche (EBF) ermittelt, die in Wohngebäuden im Wesentlichen aus der beheizten Wohnfläche besteht, jedoch auch die Allgemeinflächen (mit einem Abschlag von 40%) enthält. Diese Fläche ist typischerweise kleiner als die fiktive „Nutzfläche“ A_N nach GEG, die aus dem Bruttovolumen ermittelt wird.

Im Jahr 2020 konnten 19 Baufelder ausgewertet werden. Es wurden nur Baufelder berücksichtigt, in denen der Bezug bereits im Vorjahr begonnen hat.

Die folgende Tabelle zeigt das Wachstum der Bahnstadt und die Anzahl der Wohnbaufelder, die im Bereich Strom auswertbar waren.

Jahr	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
Baufelder	----	9	13	14	14	16	18	19	[Stück]
Energiebezugsfläche (EBF)	----	103.758	144.036	153.370	153.370	176.655	207.733	231.423	[m ²]
Wohneinheiten (WE)	----	1.381	2.164	2.268	2.268	2.519	2.785	3.085	[Stück]
Gewerbeeinheiten	----	19	23	31	31	46	66	89	[Stück]

Tabelle 3: Übersicht der Baufelder Strom

Strom gesamt

Die folgende Abbildung 14 stellt die gesamte Stromabnahme des Baufeldes dar, wobei die Tiefgaragen inbegriffen sind. Die Daten enthalten auch die Gewerbeeinheiten. Dargestellt sind 7 Jahre, nämlich 2015 bis 2021 („Geb“ = „Nutz“ + „Allg“).

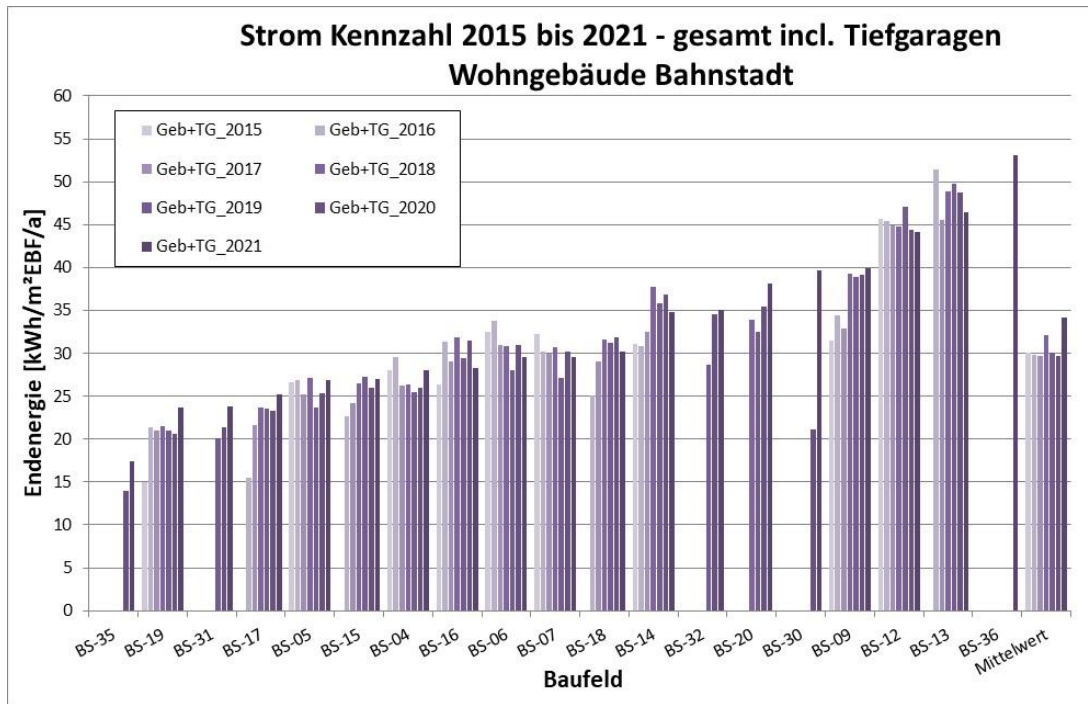


Abbildung 14: Strom gesamt incl. Tiefgaragen

Die Daten sind aufsteigend geordnet nach dem Wert des Jahres 2021. Es zeigt sich, dass die Werte eine große Spannweite zwischen 17,4 und 53,1 kWh/(m²a) aufweisen.

Die Kategorie ganz rechts zeigt den Mittelwert aller Baufelder; dieser ändert sich einerseits durch Nutzereinflüsse, andererseits vermutlich auch durch den allmählichen Bezug der Objekte. Im Jahr 2021 ist er auf 34,2 kWh/(m²a) angestiegen.

In Abbildung 15 ist der Anteil der Tiefgaragen abgezogen, soweit nutzbare Daten vorlagen. Diese Daten dienen zum Vergleich mit anderen Datenquellen, siehe Abschnitt 3.2.

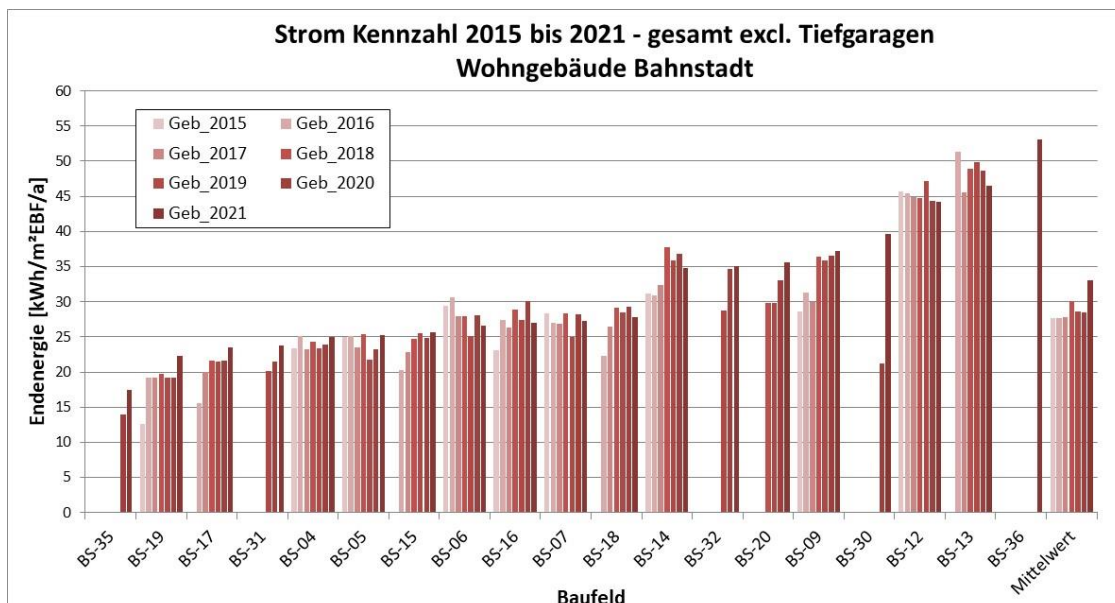


Abbildung 15: Strom gesamt excl. Tiefgaragen

In Abbildung 16 sind die Daten aus Abbildung 14 in die Anteile „Nutz“, „Allg“ und „TG“ aufgetrennt, soweit nutzbare Daten vorlagen. Die Säule „Nutz“ enthält in dieser Grafik auch die Anteile „Allg“ und „TG“, sofern diese nicht abtrennbar sind.

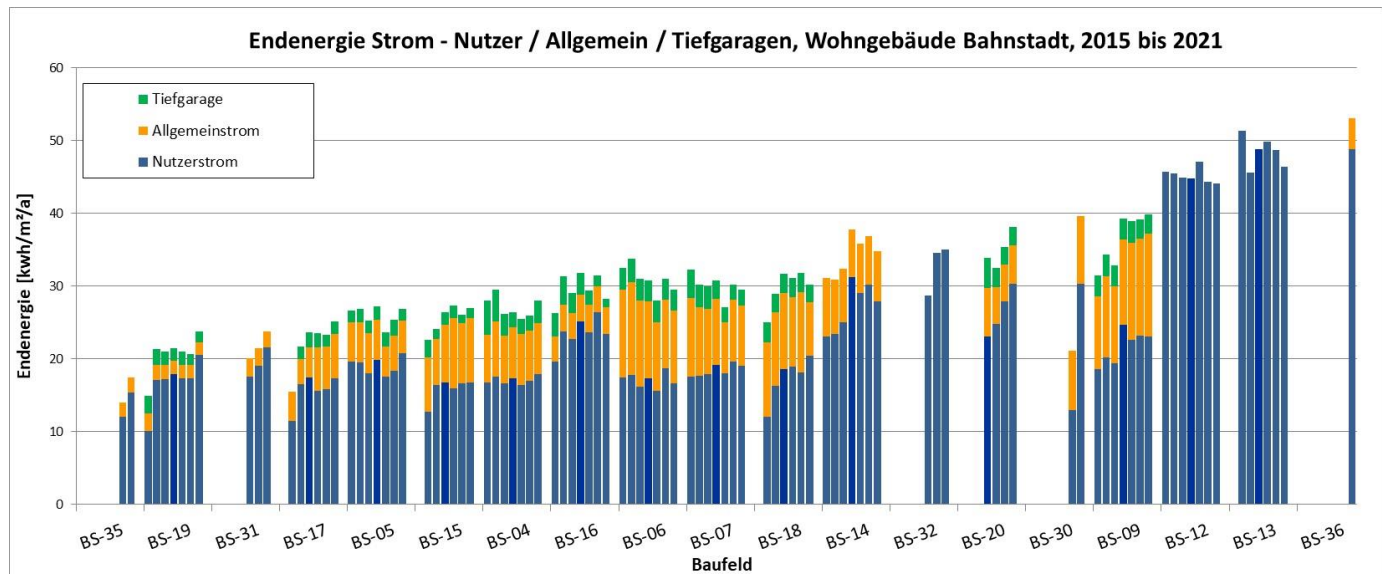


Abbildung 16: Strom gesamt - aufgetrennt

Nutzerstrom und Allgemeinstrom

Abbildung 17 zeigt die Anteile der Nutzer, sofern diese identifiziert werden können. Die Streuung der Werte liegt zwischen 15,4 und 48,8 kWh/(m²a), was die unterschiedliche Intensität der Nutzung wieder spiegelt (z.T. Studentenappartements, z.T. Gewerbe, ...). Weiterhin zeigt sich in vielen Fällen, dass im ersten Jahr noch keine volle Belegung der Wohnungen gegeben war, obwohl das Baufeld bereits im Vorjahr an die Nutzer übergeben worden war. Es ergibt sich ein Mittelwert von 25,4 kWh/(m²a).

Für diese 16 Baufelder kann entsprechend auch der Mittelwert des Allgemeinstroms ermittelt werden (orangene Anteile in Abbildung 16). Er ergibt sich zu 6,6 kWh/(m²a) bei einer Bandbreite zwischen 1,8 und 14,1 kWh/(m²a) und macht im Schnitt einen Anteil von 21% des Gesamtwertes aus.

Interessant ist der Einfluss Lüftungskonzepts (zentral / dezentral). Eine Darstellung der Ergebnisse ist in Abbildung 18 gegeben, wobei die Baufelder entsprechend für jedes Jahr gemittelt sind (8 zentrale und 8 dezentrale Konzepte). Es zeigt sich, dass der Summenwert (Ges. = Allg. + Nutz) nicht signifikant vom Konzept abhängt, wohl jedoch die Aufteilung: Bei zentralen Anlagen liegt der Allgemeinstrom rund 4,5 kWh/m²/a höher.

Dies liegt im Bereich des erwarteten Lüfterstroms: Eine einfache Abschätzung¹³ führt auf rund 4 kWh/m²/a. Direkte Messwerte für den Lüfterstrom liegen für zwei Baufelder aus Zählerdaten vor, sie sind aber mit anderen Nutzungsbereichen vermischt und nicht ohne Weiteres auswertbar.

¹³ Für 1 m² EBF ergibt sich bei einer Raumhöhe von 2,55 m ein Luftvolumen von 2,55 m³. Weiterhin kann angesetzt werden: Luftwechsel im Mittel 0,4 h⁻¹, Elektroeffizienz 0,45 Wh/m³, Laufzeit 8.760 h/a. Damit ergibt sich die elektrische Jahresarbeit zu 2,5 x 0,4 x 0,45 x 8.760 kWh/m²/a = 4,0 kWh/m²/a

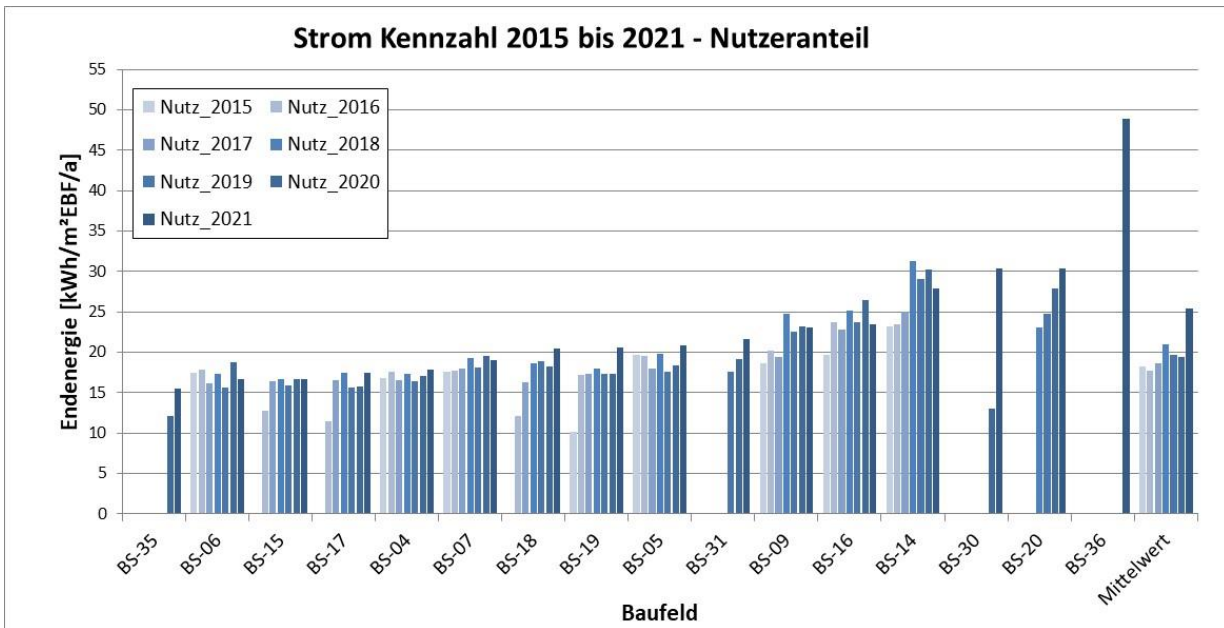


Abbildung 17: Strom Nutzer

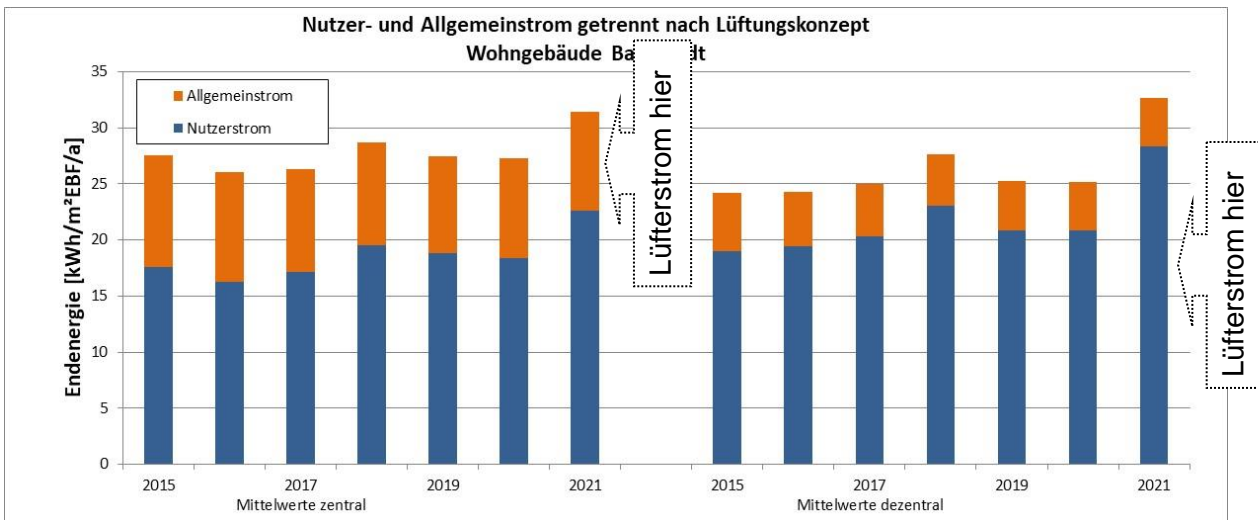
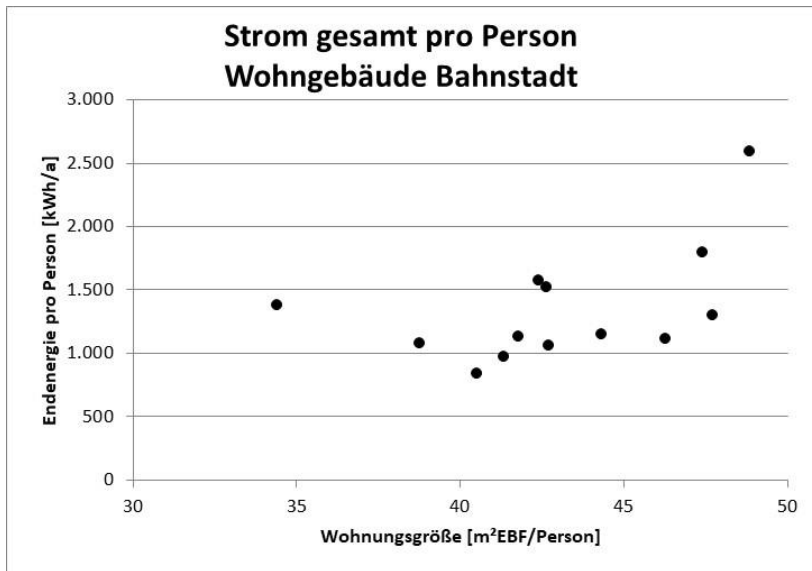


Abbildung 18: Mittelwerte der Baufelder mit zentralem / dezentralem Lüftungskonzept

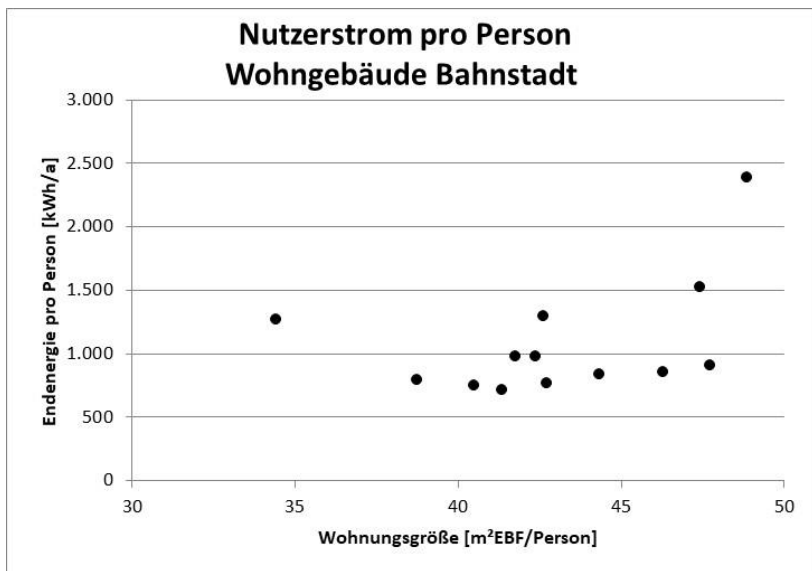
Personenbezug

Analog zur Wärme (siehe Seite 11) kann auch hier eine Auswertung auf die Personenzahl (Bewohner zum 31.12.2021) erfolgen. Dabei wird wiederum unterschieden zwischen der Gesamtmenge (excl. Tiefgarage und Außenanlagen, incl. Gewerbe), Allgeminstrom und Nutzerstrom.

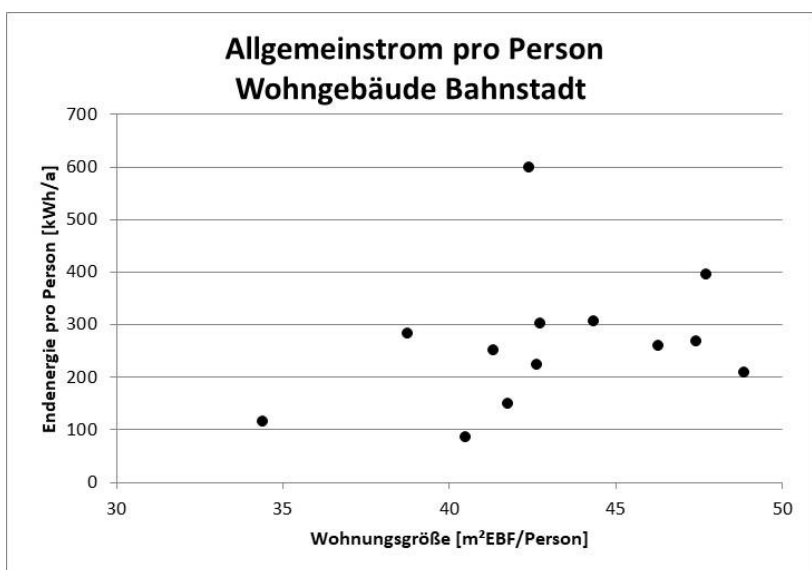
Die Ergebnisse zeigen die Grafiken in Abbildung 19. Es zeigt sich, dass der Gesamtwert – abgesehen von „Ausreißern“ mit hohem Gewerbeanteil – mit recht geringer Streuung bei 1.200 kWh/Person/a liegt. Nach Abzug des Allgeminstroms ergibt sich der Nutzerstrom zu 900 bis 1.000 kWh/Person/a, wiederum abgesehen von den „Ausreißern“. Einen tendenziell höheren Verbrauch haben Bewohner in besonders kleinen Wohnungen (Studentenappartements).



Mittelwert 1.417 kWh/Person



Mittelwert 1.171 kWh/Person



Mittelwert 246 kWh/Person

Abbildung 19: Strom 2021 personenbezogen

Tiefgaragen

Für 11 Baufelder ist der Stromverbrauch der Tiefgarage bekannt; er wird auch hier auf die EBF bezogen. Abbildung 20 zeigt den Verlauf und den Mittelwert, der zuletzt zwischen 1,3 und 3,1 kWh/(m²a) und bei einem Mittelwert von 2,1 kWh/(m²a) lag. Bemerkenswert ist, dass die Werte in den meisten Baufeldern in den letzten Jahren gesunken sind; die Gründe dafür sind in den meisten Fällen unbekannt.

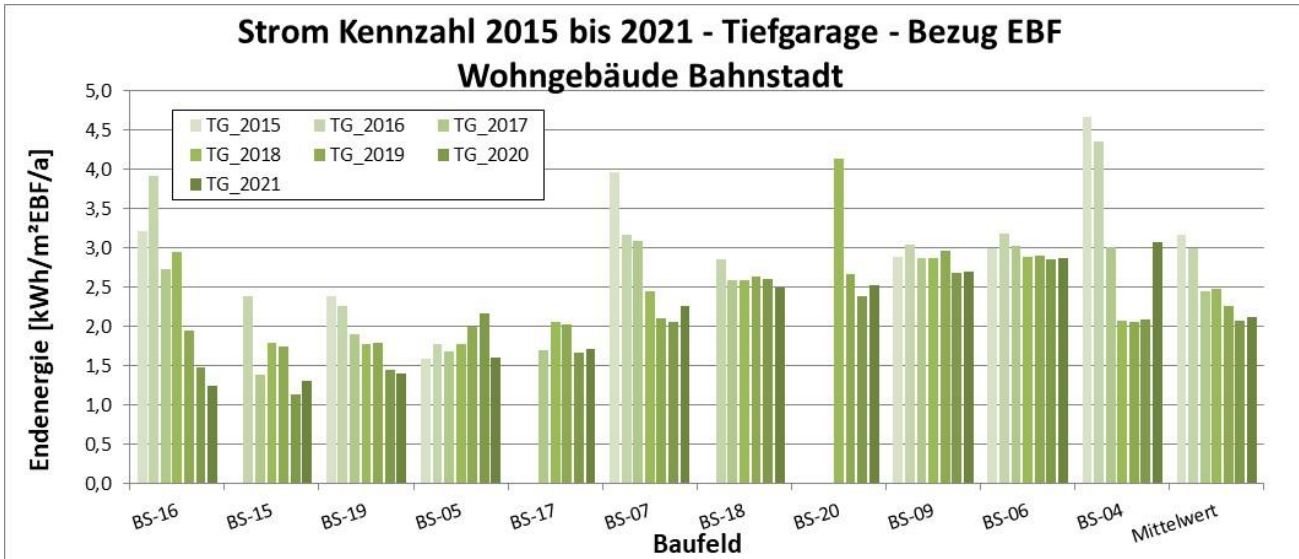


Abbildung 20: Strom Tiefgarage, Bezug EBF

Bezug auf Stellplätze

Abbildung 21 zeigt die gleichen Verbrauchsdaten mit Bezug auf die Anzahl der Stellplätze, sofern diese bekannt ist [Heidelberg 2018]. Auch hier ist die Bandbreite mit 100 bis 296 kWh/Stellplatz/a recht hoch bei einem Mittelwert von 202 kWh/Stellplatz/a im Jahr 2021. Insgesamt wurden 1.321 Stellplätze erfasst.

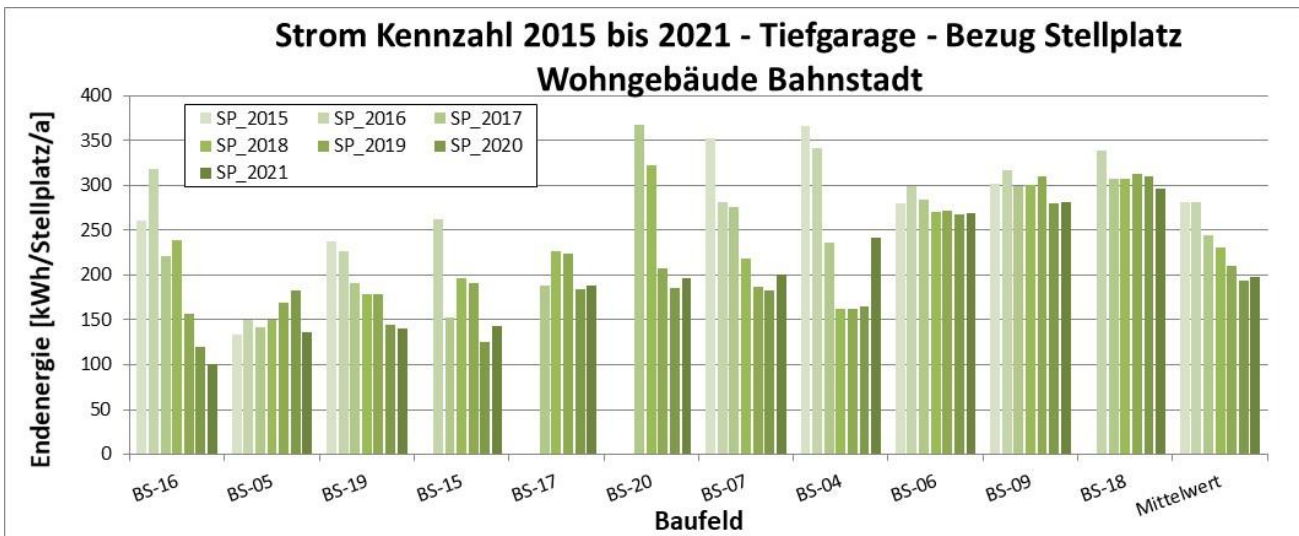


Abbildung 21: Strom Tiefgarage, Bezug Stellplatz

3.2 Vergleich mit anderen Datenquellen

Gesamtgebäude - Vergleich mit anderen Passivhäusern

Es sind nur wenig belastbare Untersuchungen zum Stromverbrauch von Wohngebäuden im energiesparenden Neubau verfügbar.

Hier erfolgt ein Vergleich mit einer Studie des Büros ages (Münster) aus dem Jahre 2015 [ages 2015], in welcher der Gesamt-Stromverbrauch von 140 Wohngebäuden mit Passivhausstandard ausgewertet wurde. In der Stichprobe waren immerhin 16 Mehrfamilienhäuser und ein Studentenwohnheim enthalten; der Bezug erfolgte auf die Bruttogrundfläche (BGF).

Abbildung 22 basiert auf Grafik 20 der genannten Studie [ages 2015]. Für die 17 bewerteten Objekte ist die Häufigkeitsverteilung offensichtlich sehr breit bei einem Mittelwert von 12 kWh/m²_{BGF}/a. Die entsprechenden Daten der Bahnstadt (Kategorie „Geb“ = „Nutz“ + „Allg“, Abbildung 15, Seite 17) sind als orangene Quadrate darübergelegt¹⁴.

Zur Verdeutlichung sind die Mittelwerte und Standardabweichungen¹⁵ in Abbildung 23 nochmals dargestellt. Die Werte der Bahnstadt sind bei einem Mittel von 15,5 kWh/m²_{BGF}/a – im Rahmen der Genauigkeit – auf dem gleichen Niveau wie die Vergleichsdaten, obwohl hier auch Gewerbeeinheiten inbegriffen sind.

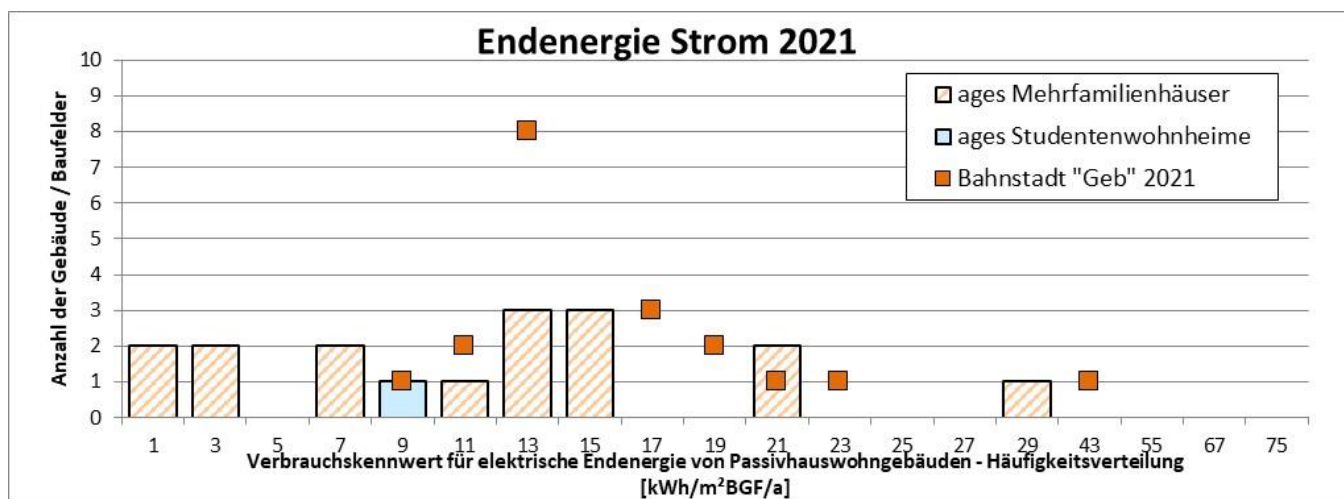


Abbildung 22: Stromverbrauch – Häufigkeitsverteilung (in Anlehnung an [ages 2015], Grafik 20)

¹⁴ Zur Vergleichbarkeit erfolgt eine Flächenumrechnung. Der Faktor zwischen bWF und BGF ist in der Quelle mit 2,139 angegeben ([ages 2015] Abschnitt 8.7, bWF = beheizte Wohnfläche ≈ EBF).

¹⁵ Statistischer Fehler (korrigierte Stichprobenvarianz)

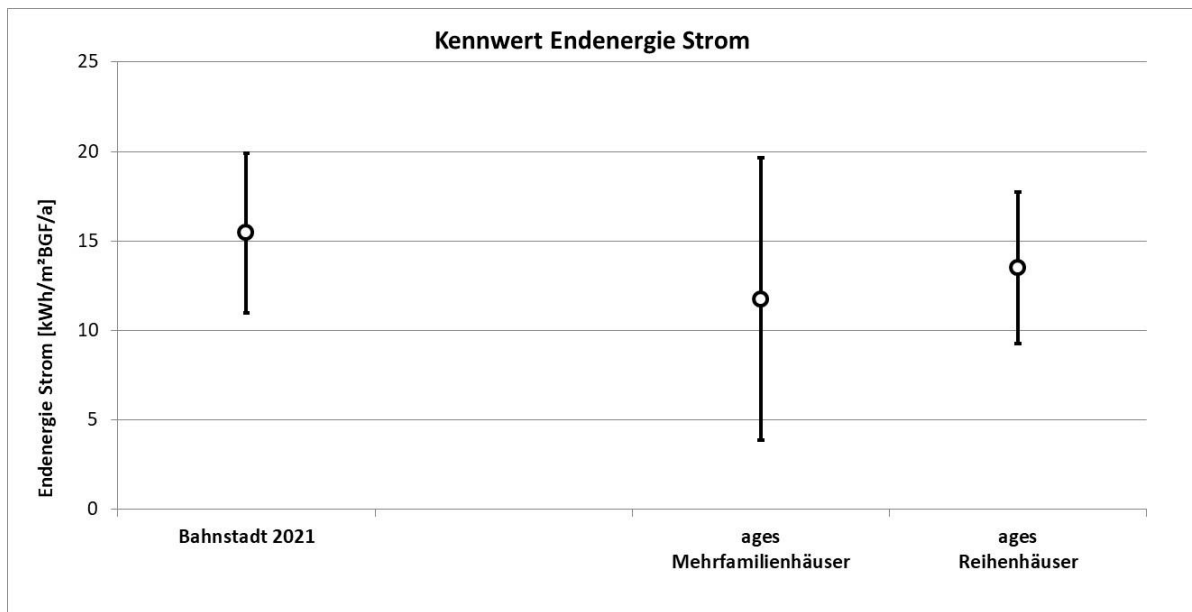


Abbildung 23: Kennwert Endenergie Strom – Mittelwert und Standardabweichung

Wohnungen - Vergleich mit bundesweiten Statistiken

In Zusammenarbeit zwischen Umweltbundesamt und den Verbänden der Stromwirtschaft werden regelmäßig Statistiken veröffentlicht, zuletzt im Jahr 2021 [co2online 2021]. Hier wird der Haushaltsstromverbrauch pro Wohnung dargestellt, wobei nach Wohnungsgrößen (Personenzahl) unterschieden wird.

Für eine Vergleichbarkeit werden die Verbrauchswerte über typische Wohnflächen (WF) aus [Destatis 2018] auf Kennwerte umgerechnet¹⁶. Für Wohnungen ohne elektrische Warmwasserbereitung ergibt sich die Spanne der Vergleichskennwerte wie folgt:

Vergleichskennwerte Strom	Kennwert niedrig [kWh/m²WF/a]	Kennwert durchschnittlich [kWh/m²WF/a]	Kennwert hoch [kWh/m²WF/a]
1 Person	14	26	38
2 Personen	16	27	45
3 Personen	18	30	49
4 Personen	18	30	49
5 und mehr Personen	16	32	59

Tabelle 4: Übersicht der Vergleichskennwerte Strom

In der Systematik der Bahnstadt wird die Kategorie „Nutz“ zur Bewertung herangezogen. Ergebnis: Der oben diskutierte Mittelwert liegt bei 25,4 kWh/m²EBF/a (Abbildung 17) und ist damit als moderat zu bewerten.

Sogar Kennwerte von 30 kWh/m²EBF/a, wie sie in den Baufeldern BS 20 und 30 verzeichnet werden, sind noch durchschnittlich; dabei sind in zwei Fällen sogar dezentrale Lüftungsanlagen inbegriffen.

¹⁶ Die Wohnflächen für die Bahnstadt liegen nicht vor; hier wird die EBF als annähernd gleichwertig betrachtet.

Es sei darauf hingewiesen, dass auch der Mittelwert in der Kategorie „Gesamt“ von 33,1 kWh/m²EBF/a in diesem Zusammenhang noch unauffällig ist. Anders formuliert ist der Zuschlag für den Allgemeinstrom trotz des Lüfterstroms noch in der normalen Bandbreite.

Strom pro Person - Vergleich mit bundesweiten Statistiken

Für 12 Baublöcke sind Einwohnerzahlen bekannt, siehe Seite 19. Es ergab sich in der Kategorie „Nutz“ ein Kennwert von 900 bis 1.000 kWh/Person/a. Auch dieser Wert kann mit der genannten Statistik verglichen werden (Tabelle 5); er liegt je nach Wohnungsgröße in der Kategorie B bis F und im Mittelwert durchschnittlich.

Belegung / Kategorie	A	B	C	D	E	F	G
1 Person	800	1.000	1.200	1.500	1.600	2.000	2.200
2 Personen	600	750	900	1.050	1.250	1.500	1.717
3 Personen	500	633	733	867	1.000	1.233	1.400
4 Personen	425	500	625	725	875	1.025	1.175

Tabelle 5: Übersicht der Vergleichskennwerte Strom in kWh/Person/a. Die Klassen A bis G bilden jeweils 14,3 Prozent der Haushalte ab (von gut nach schlecht)

4 Gesamtbilanz

4.1 Entwicklungsstand und Vergleich mit Planungswerten

Die Bahnstadt wurde von Anfang an als CO₂-neutraler Stadtteil entwickelt. Neben der durchgehenden Passivhaus-Bauweise ist die Errichtung des Holzheizkraftwerkes im Pfaffengrund zur Versorgung mit Wärme und Strom der zweite wichtige Baustein.

Die Rahmendaten des Heizkraftwerkes sind¹⁷:

- Leistung: 3 MW elektrisch und 10,5 MW thermisch.
- Erzeugung: 24.000 MWh Strom und rund 80.000 MWh Wärme pro Jahr.
- Brennstoff: Pro Jahr werden 60.000 Tonnen Holzmaterial angeliefert (90 Prozent Grünschnitt und Landschaftspflegematerial aus der Region).
- Bilanziell soll das Holz-Heizkraftwerk den gesamten Energiebedarf von Heidelberg-Bahnstadt decken.

Die Daten in Tabelle 6 geben Auskunft darüber, wie sich die aktuelle Entwicklung zu den Planungsdaten verhält. Dabei sind auch weitere Rahmendaten aus der Stadtplanung genannt¹⁸.

Außer den 19 Wohnbaufeldern dieses Berichtes sind in diesem Abschnitt auch Informationen über 12 Nichtwohnbaufelder enthalten.¹⁹

	EBF	BGF ²⁰	EE_Wärme	Lstg_Wärme ²¹	EE_Strom ²²	Bewohner	Wohneinheiten
	m ²	m ²	MWh	kW	MWh	Kopf	Stück
Stand 2021							
Summe erfasste Objekte ²³	350.800	644.854	19.765	6.331	13.201	-----	-----
davon Wohnbau	239.622	512.551	14.060	3.936	7.915	5.582	3.085
Planungswert		1.250.872	80.000	10.500	24.000	6.800	3.700
Quelle		Stadt HD	Stadt HD	Stadt HD	Stadt HD	Stadt HD	Stadt HD
Anteil 2021 am Planungswert							
erfasste Objekte		52%	25%	60%	55%	-----	-----
nur Wohnbau		41%	18%	37%	33%	82%	83%

Tabelle 6: Übersicht der Rahmendaten 2021 im Vergleich zum Planungswert

Aus den Zeilen „Anteil 2021 am Planungswert“ ergibt sich:

- Gemessen an der BGF ist aktuell fast die Hälfte der Bahnstadt fertiggestellt.
- Gemessen an der Bewohnerzahl ist die Wohnbebauung bereits zu 82% fertiggestellt.

¹⁷ Auslegungswerte lt. <https://www.swhd.de/holz-heizkraftwerk> (26.08.2021). Reale Erzeugung in 2017 lt. SWH: 17 MWh Strom und 71 MWh Wärme.

¹⁸ <https://www.heidelberg-bahnstadt.de/Lde/968135.html> (26.08.2021) und [Heidelberg 2007]

¹⁹ Wg. Datenschutz mussten z.T. Daten der Vorjahre verwendet werden.

²⁰ Überschlägig aus der EBF ermittelt. Flächenumrechnung Wohnbau: Siehe Fußnote 6.

Flächenumrechnung Nichtwohngebäude: Faktor für „Verwaltungsgebäude, höhere technische Ausstattung“ BGF/NGF = 1,19 ([ages 2015] Abschnitt 8.7).

²¹ Höchste gemessene Wärmeleistung der Jahre 2015-2021, einfache Summe der Baufelder

²² Gesamtwert des Baufeldes, d.h. inklusive Tiefgaragen. Wegen des Datenschutzes sind die Verbrauchswerte insbesondere beim Gewerbe nicht vollständig erfasst.

²³ Für ein NWG-Baufeld lagen – bedingt durch den Datenschutz – keine Werte zum Stromverbrauch vor. Die Bezugsflächen reduzieren sich daher für Strom auf 333.414 m² (EBF).

- Das Heizkraftwerk ist bilanziell in der Tat gut an die Bahnstadt angepasst, was sich vor allem beim Strom (EE_Strom) zeigt. Im Bereich Wärme (EE_Wärme) werden in der Jahresbilanz absehbar sogar Überschüsse entstehen, die im sonstigen Stadtgebiet nutzbar sind.

4.2 Primärenergie (PE)

Nach den Richtlinien der Passivhausbauweise sind zwei wesentliche Zielwerte einzuhalten:

- Heizwärmebedarf $\leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$
- Primärenergiebedarf $\leq 95 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

Die Nachweise erfolgen durch die Fachplaner auf der Basis von Bedarfsberechnungen. Die interessante Frage ist, ob sich die Zielwerte auch auf der Ebene der Verbrauchswerte einhalten lassen.

Der erste Zielwert „Heizwärmebedarf“ wurde in Abschnitt „Heizwärme“ in Kapitel 2.3 näher betrachtet. Es zeigte sich eine leichte Erhöhung, die im Wesentlichen durch höhere Raumtemperaturen im Winter zu erklären ist.

Der zweite Zielwert „Primärenergiebedarf“ wird in Tabelle 7 näher betrachtet. Die Bewertung der Energieträger erfolgt mit folgenden Ansätzen:

- PE-Faktor Fernwärme Heidelberg: 0,31 (Quelle: Stadtwerke Heidelberg 2020)
- PE-Faktor Strommix Deutschland: 1,8 (Quelle: GEG 2020)

Stand 2021	PE_Wärme	PE_Strom ²⁴	PE_Summe	PE_Kennwert ²³
	MWh	MWh	MWh	kWh/(m ² a)
Summe erfasste Objekte	6.127	23.290	29.418	97
davon Wohnbau	4.359	13.776	18.134	85
davon Nichtwohngebäude	1.769	9.515	11.283	126

Tabelle 7: „Nicht erneuerbare Primärenergie (PE)“, Übersicht der Absolutwerte und Kennwerte (Bezug EBF)

Die Ergebnisse in Schlaglichtern:

- Der Sektor Strom dominiert die Bilanz, auch für den Wohnbau.
- Der PE-Kennwert liegt für den Wohnbau mit $85 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ deutlich unter dem Zielwert. Dieses Ergebnis ist als hervorragend zu bewerten.
- Die Nichtwohngebäude haben deutlich höhere Kennwerte von $126 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Das ist nicht überraschend, denn außer dem Strom der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) sind auch die vielfältigen speziellen Nutzungen im Gebäude erfasst, die für das Passivhaus eigentlich gar nicht zu bilanzieren wären. Um diese Problematik im Vorfeld zu entschärfen, hat die Stadt Heidelberg umfangreiche Stromsparkkonzepte herausgegeben²⁵.
- Der Mittelwert aller erfassten Objekte liegt – trotz der o.g. speziellen Nutzungen – mit $97 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ immer noch nahe bei Zielwert von $95 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Damit hat das Energiekonzept der Bahnstadt die Erwartungen auch in der Praxis erfüllt. und gezeigt, dass das Passivhauskonzept für Wohn- und Gewerbeobjekte gleichermaßen geeignet ist.

²⁴ Ohne Tiefgaragen, soweit abtrennbar.

²⁵ Siehe <https://www.heidelberg.de/Bahnstadt/downloads.html> (26.08.2021)

4.3 Klimaschutz (CO₂-Äquivalente)

Mittels einer CO₂-Bilanz können die Verbrauchswerte auch bezüglich des Klimaschutzes bewertet werden. Dabei werden zwei Varianten zur Diskussion gestellt:

Bewertung mit Durchschnittsfaktoren für Heidelberg

Hier wird der Treibhauseffekt mit folgenden CO₂-Äquivalenten bewertet:

- CO₂äqu-Faktor Fernwärme Heidelberg: 0,1568 kg/kWh (Quelle: Stadtwerke Heidelberg 2020)
- CO₂äqu-Faktor Strommix Deutschland: 0,560 kg/kWh (Quelle: GEG 2020)

Tabelle 8 stellt die Ergebnisse zusammen.

Stand 2021	CO ₂ äqu_Wärme	CO ₂ äqu_Strom ²²	CO ₂ äqu_Summe	CO ₂ äqu_Kennwert ²³
	t/a	t/a	t/a	kg/(m ² a)
Summe erfasste Objekte	3.099	7.393	10.492	34
davon Wohnbau	2.205	4.432	6.637	31
davon Nichtwohngebäude	895	2.960	3.855	43

Tabelle 8: CO₂-Äquivalente, Übersicht der Absolutwerte und Kennwerte (Bezug EBF)

Im Sektor Wohnbau kann auch ein Bezug auf die Bewohnerzahl (siehe S. 11) erfolgen. Es ergibt sich ein Kennwert von 1,19 t/Person/a.

Bewertung mit den Faktoren des Holz-Heizkraftwerkes

Wie in Abschnitt 4.1 erläutert ist das Holz-Heizkraftwerk perspektivisch in der Lage, den Stadtteil zu versorgen. Auf Basis der Betriebsdaten der Stadtwerke (Fußnote 17) lassen sich über die BSKO-Methode eigene Emissionsfaktoren bestimmen [BSKO 2018]:

- CO₂-Faktor Wärme: 0,017 kg/kWh
- CO₂-Faktor Strom: 0,080 kg/kWh

Damit ergeben sich:

Stand 2021	CO ₂ Wärme	CO ₂ Strom ²²	CO ₂ Summe	CO ₂ Kennwert ²³
	t/a	t/a	t/a	kg/(m ² a)
Summe erfasste Objekte	336	1.061	1.397	5
davon Wohnbau	239	636	875	4
davon Nichtwohngebäude	97	425	522	6

Tabelle 9: CO₂-Emissionen, Übersicht der Absolutwerte und Kennwerte (Bezug EBF)

Der personenbezogene CO₂-Kennwert (Sektor Wohnbau) ergibt sich zu 0,16 t/Person/a.

Vergleichsdaten Wohnbau

Die ermittelten personenbezogene Kennwerte für den Wohnbau sind bei beiden Bilanzierungsmethoden vergleichsweise niedrig:

- für die Stadt Heidelberg wurde ein Wert von 1,97 t/Person/a bestimmt (Bezugsjahr 2015, [ifeu 2019]),

- für den Rhein-Neckar-Kreis liegt der Durchschnittswert bei 2,86 t/Person/a (Bezugsjahr 2017, [RNK 2021]).

Abbildung 24 zeigt die Ergebnisse der Bahnstadt mit den beiden oben diskutierten Bilanzmethoden im Vergleich zum Durchschnittswert in der Stadt Heidelberg. Die Passivhaus-Bauweise führt zusammen mit der Versorgung durch das Holz-Heizkraftwerk zu einer CO₂-Einsparung von 92%.

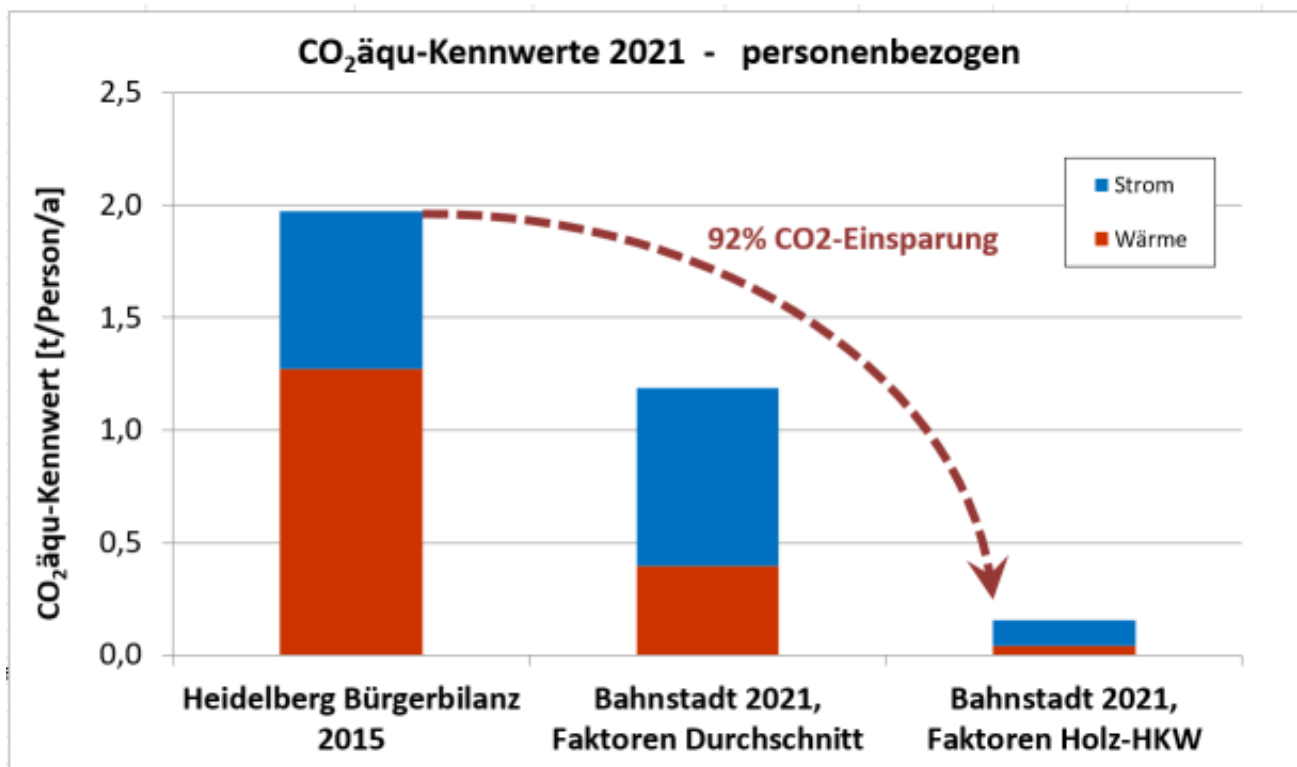


Abbildung 24: CO₂-Emissionen, Kennwerte pro Person

Masterplan 100% Klimaschutz

Heidelberg beteiligt sich als eine Modellkommune am Förderprogramm „Masterplan 100% Klimaschutz“ des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) [Heidelberg 2014]. Ziel ist die klimaneutrale Kommune: Bis 2050 will Heidelberg den Energiebedarf der Kommune um die Hälfte reduzieren und die CO₂-Emissionen um 95% senken.

Die Bahnstadt ist dabei ein wichtiger Baustein. Abbildung 24 zeigt, dass eine Einsparung von 92% für den Wohnbau des Stadtteils bereits Realität ist.

4.4 Abweichende Flächenbezüge

Die Energiebezugsfläche, die in Abschnitt 2.1 eingeführt wurde, ist nur im Passivhausbau üblich. Zum Vergleich mit anderen Baustandards sind andere Flächenbezüge erforderlich²⁶:

- Gebäudenutzfläche (A_N) nach GEG § 3. Diese fiktive Fläche ist nur für Wohngebäude definiert und wird aus dem Bruttovolumen V_e hergeleitet (in der Regel gilt $A_N = 0,32 \text{ m}^{-1} \cdot V_e$).
- Wohnfläche (WF) nach Wohnflächenverordnung (WoFIV 2003)
- Nutzfläche (NF) nach DIN 277
- Bruttogrundfläche (BGF) nach DIN 277

Leider ist die Datenbasis für diese alternativen Bezugsflächen meist schlecht:

- A_N : Dieser Bezug ist im GEG normativ für Wohngebäude, er spielt bei der Qualitätssicherung für die Bahnstadt aber keine Rolle. Die Energieausweise, aus denen der Wert hervorgehen müsste, waren der KLiBA nicht zugänglich.
- WF: Nur beheizte Flächen (bWF) sind relevant, die WoFIV berücksichtigt aber auch Loggien und Balkone (mit Abschlügen). Die vorliegenden Werte geben in der Regel nicht an, ob diese Anteile inbegriffen sind oder nicht.
- NF: Die mitgeteilten Flächen erscheinen zum Teil überhöht; eventuell wurden Verkehrs- und Funktionsflächen nicht durchgehend herausgerechnet.
- BGF: Nur beheizte Flächen (bBGF) sind relevant. Die vorliegenden Werte geben in der Regel nicht an, ob unbeheizte Anteile inbegriffen sind oder nicht. Weiterhin ist nicht sichergestellt, dass „konstruktiv verbundene“ Flächen (Balkone, Außentreppe) herausgerechnet sind. Die Verwendung in den Kapiteln 2.4 und 3.2 ist deshalb wenig belastbar.

Mit dem vorliegenden Datenbestand lassen sich die Kennwerte für die Endenergie der Wohngebäude wie folgt zusammenstellen:

	EBF	A_N	WF + NF	BGF
Wärme [kWh/(m ² a)]	59	49	56	27
Strom [kWh/(m ² a)]	37	29	35	17
Fläche Bahnstadt [m ²]	239.622	287.565	251.005	512.551
Datenqualität	sehr gut	gut	schlecht	schlecht

Tabelle 10: Kennwerte Endenergie Wohnbau, verschiedene Bezugsflächen. Zur Datenqualität siehe Text.

²⁶ Im Einklang mit den Planerangaben wird die Nomenklatur der (veralteten) DIN 277:2005 verwendet.

5 Fazit

Der Stadtteil „Bahnstadt“ wird ausschließlich in Passivhaus-Bauweise errichtet. Die Stadt Heidelberg begleitet die durchgehende Passivhaus-Pflicht nicht nur mit einer Qualitätssicherung (siehe z.B. [Passivhaustagung 2013]), sondern auch mit der kontinuierlichen Auswertung der realisierten Verbrauchswerte (siehe z.B. [Passivhaustagung 2016]).

Für den vorliegenden Bericht liegen nun die Verbrauchswerte über acht Jahre vor; zur Auswertung kommen 19 Baufelder mit überwiegender Wohnnutzung, wobei auch Gewerbeflächen einbezogen sind (meist Ladengeschäfte im Erdgeschoss). Die Gebäude haben insgesamt 239.622 m² Energiebezugsfläche, 3.085 Wohneinheiten und 91 Gewerbeeinheiten.

Die Ergebnisse lassen sich in folgenden Schlaglichtern zusammenfassen²⁷:

- Die Bahnstadt wächst dynamisch, die Nachfrage ist ungebrochen. Die Passivhaus-Bauweise ist sowohl für die Planer als auch für die Käufer mehr Anreiz als Problem.
- Der Heizwärmeverbrauch liegt zuletzt im Mittel bei 21,3 kWh/(m²a). Gemessen am Zielwert von 15 kWh/m²/a deutet das tatsächlich auf leicht erhöhte Raumtemperaturen hin, der Wert ist aber absolut noch auf so niedrigem Niveau, dass die Erwartungen – in Rahmen der Fehlergrenzen – durchaus erfüllt sind (Seite 7). Die Jahreskosten für die reine Beheizung liegen im Schnitt bei 2,1 €/m² mit einer Spanne von 1,4 bis 3,9 €/m² (Seite 15).
- Der gesamte Wärmeverbrauch liegt zuletzt im Mittel bei 59,7 kWh/(m²a). Das sind rund 60% des Bundesdurchschnitts für Mehrfamilienhäuser mit Fernwärme-Versorgung (Seite 13). Die besten Baufelder der Bahnstadt zeigen, dass Kennwerte von unter 45 kWh/m²/a möglich sind. Die Jahreskosten für Wärme liegen im Schnitt bei 5,8 €/m² mit einer Spanne von 4,4 bis 9,4 €/m² (Seite 15).
- Der Stromverbrauch liegt im Mittel der Wohnbaufelder bei 33,1 kWh/(m²a). Darin ist neben dem Haushaltsstrom auch der Allgemeinstrom enthalten, d.h. Allgemeinbeleuchtung, Aufzug und sogar alle Lüftungsanlagen²⁸. Dennoch liegt der Wert im Vergleich mit bundesweiten Statistiken innerhalb der normalen Bandbreite (Seite 24).
- Ein Tiefgaragenstellplatz benötigt bis zu 300 kWh Strom pro Jahr, das entspricht etwa 1/4 des Strombedarfs eines Bahnstädters bzw. dem Strombedarf einer Wohnungsfläche von 12 m² (Seite 21).
- Die Gesamtbewertung der Bahnstadt ist – obwohl die Entwicklung noch nicht abgeschlossen ist – sehr positiv:
 - die Primärenergie-Bilanz entspricht den Vorgaben der Passivhaus-Bauweise (Seite 26),
 - die CO₂-Emissionen liegen deutlich unter dem Heidelberger Durchschnittswert (Seite 27) und
 - die Ziele des „Masterplan 100% Klimaschutz“ sind für den Wohnbau nahezu realisiert (Seite 28).

²⁷ Kennwerte jeweils mit Bezug auf das Jahr 2020 und die Energiebezugsfläche „EBF“

²⁸ Jedoch nicht die Tiefgaragen, soweit abtrennbar

Ansatzpunkte für weitere Analysen ergeben sich wie folgt:

- Da innerhalb der Baufelder bereits eine Mittelbildung über viele Wohnungen stattfindet, ist die starke Streuung auf Ebene der Baufelder unerwartet (Wärme Seite 5, Strom Seite 17).
- Der Wärmesockel (Seite 8) ist teilweise unbefriedigend hoch und macht verfeinerte Messungen erforderlich. Insbesondere kann eine Verlustreduktion bei der Wärmeverteilung auch zur Bekämpfung der sommerlichen Überhitzung beitragen.
- Die Vertragsleistung der Fernwärme kann in den meisten Baufeldern besser an den Bedarf angepasst werden, wodurch die Betriebskosten deutlich sinken (Seite 9). Ggf. sind auch Investitionen in eine verbesserte Hydraulik sinnvoll.
- Im Bericht [PHI 2021] finden sich nützliche Hinweise zur Betriebsoptimierung und Wärmeleistungsreduktion für Eigentümer, Nutzer und Verwaltungen.
- Eine kontinuierliche Überprüfung der technischen Anlagen und Einstellparameter erscheint notwendig. Das Amt für Umweltschutz, Gewerbeaufsicht und Energie der Stadt Heidelberg unterstützt interessierte Eigentümer, Nutzer und Verwaltungen dabei gerne.

Literatur

[ages 2015] Energieverbrauchskennwerte energetisch hocheffizienter Gebäude, ages GmbH, Abschlussbericht, September 2015,

https://ages-gmbh.ageslogger.de/images/downloads_von_der_homepage/20160222_kweff_kurzfassung.pdf

[BISKO 2018] „Berechnungshilfe Emissionsfaktoren Fernwärme und lokaler Strommix“, ifeu GmbH, Heidelberg 2018

<https://www.ifeu.de/publikation/bisko-bilanzierungs-systematik-kommunal/>

[co2online 2021] Stromspiegel 2021, co2online, Berlin 2021

<https://www.stromspiegel.de/stromverbrauch-verstehen/stromspiegel-stromverbrauch-vergleichen/>

[ebök 2007] Baugebiet Bahnstadt in Heidelberg - Städtebauliches Energie- und Wärmeversorgungskonzept, ebök, Tübingen 2007

[https://www.heidelberg-](https://www.heidelberg-bahnstadt.de/site/HD_Satelliten/get/documents_E1257570320/heidelberg/Objektdatenbank/Bahnstadt/heidelberg-bahnstadt.de/Pdf/2020_A1_Energiekonzept_Bahnstadt.pdf)

[bahnstadt.de/site/HD_Satelliten/get/documents_E1257570320/heidelberg/Objektdatenbank/Bahnstadt/heidelberg-bahnstadt.de/Pdf/2020_A1_Energiekonzept_Bahnstadt.pdf](https://www.heidelberg-bahnstadt.de/site/HD_Satelliten/get/documents_E1257570320/heidelberg/Objektdatenbank/Bahnstadt/heidelberg-bahnstadt.de/Pdf/2020_A1_Energiekonzept_Bahnstadt.pdf)

[Destatis 2018] Fachreihe 15 Sonderheft 1, Ausgabe 2018

<https://www.destatis.de/DE/Service/Bibliothek/publikationen-fachserienliste-15.html>

[Heidelberg 2007] Städtebauliche Rahmenplanung „Bahnstadt 2007“, Begründung, Stadtplanungsamt

<https://docplayer.org/58110982-Staedtebauliche-rahmenplanung-bahnstadt-2007.html>

[Heidelberg 2014] Masterplan 100% Klimaschutz

<https://www.heidelberg.de/hd/HD/Leben/masterplan+100+prozent+klimaschutz.html>

[Heidelberg 2018] Zählung der realisierten Stellplätze vor Ort, Stadt Heidelberg, Stand Juni 2018

[ifeu 2019] „CO₂-Bilanzierung bis 2018 für die Stadt Heidelberg“, Endbericht, ifeu GmbH, Heidelberg 2019

https://www.heidelberg.de/site/Heidelberg_ROOT/get/documents_E2103137505/heidelberg/Objektdatenbank/31/PDF/01_Ifeu_Studie_CO2_Bilanzierung_bis_2018_fuer_die_Stadt_Heidelberg.pdf

[KLiBA 2021] Energie-Monitoring der Jahre 2014 bis 2020 für die Wohngebäude im Passivhaus-Stadtteil Heidelberg-Bahnstadt, KLiBA gGmbH Heidelberg 2021

https://www.heidelberg.de/site/HD_Satelliten/get/documents_E1950080651/heidelberg/Objektdatenbank/Bahnstadt/heidelberg-bahnstadt.de/Pdf/Energiemonitoring%202014-2020%20Bahnstadt.pdf

[Passivhaustagung 2013] 17. Internationale Passivhaustagung 2013, Tagungsband

https://passiv.de/former_conferences/siebzehnte/index.html

[Passivhaustagung 2016] 20. Internationale Passivhaustagung 2016, Tagungsband

<https://passivhaustagung.de/de/rueckblick/>

[PHI 2015] Monitoring in der Passivhaus-Siedlung Bahnstadt Heidelberg, Zwischenbericht 2014, Passivhaus-Institut, Juli 2015

https://www.heidelberg.de/site/Heidelberg_ROOT/get/documents_E-1180914969/heidelberg/Objektdatenbank/31/PDF/Energie%20und%20Klimaschutz/31_pdf_passivhausstudie_bahnstadt_2014_by_passivhaus_institut.pdf

[PHI 2016] Energie-Monitoring von Wohngebäuden im Passivhaus-Stadtteil Heidelberg-Bahnstadt, Endbericht, Passivhaus-Institut Darmstadt, Oktober 2016

https://www.heidelberg.de/site/HD_Satelliten/get/documents_E-525468453/heidelberg/Objektdatenbank/Bahnstadt/heidelberg-bahnstadt.de/Pdf/2016_monitoring_in_der_passivhaus-siedlung_heidelberg_bahnstadt.pdf

[PHI 2021] Betriebsoptimierung Bahnstadt Heidelberg, Endbericht, Passivhaus-Institut Darmstadt, Mai 2021

https://www.heidelberg.de/site/HD_Satelliten/get/documents_E199486790/heidelberg/Objektdatenbank/31/PDF/31_pdf_Betriebsoptimierung%202021%20in%20der%20Passivhaussiedlung%20Heidelberg-Bahnstadt.pdf

[RNK 2021] CO₂-Bilanzen Rhein-Neckar-Kreis

<http://klimaschutz-rnk.de/klimaschutz-rnk/co2bilanzen>

[Techem 2019] Energiekennwerte 2019, Techem-Studie, Eschborn

<https://www.techem.com/content/dam/techem/downloads/newsroom/studien/Techem-Energiekennwerte-Studie-2019.pdf>

[Techem 2021] Verbrauchskennwerte 2021, Techem-Studie, Eschborn

<https://www.techem.com/content/dam/techem/downloads/vkw-studie/22-44-001-VKW-2021-Leseversion.pdf>