

Wissenschaftliche Begleitung der Sanierung Rotlintstraße 116-128 in Frankfurt a. M.



Endbericht

Ergebnisse der messtechnischen Erfolgskontrolle

Bauherr: ABG FRANKFURT HOLDING GmbH

Fördermittelgeber des Forschungsprojekts:



Darmstadt, Juli 2013

Autor: Marc Großklos
unter Mitarbeit von
Margrit Schaede und Ulrike Hacke

IWU-Bestellnummer: 02/13

ISBN: 978-3-941140-32-5

Institut Wohnen und Umwelt GmbH
Rheinstraße 65
64295 Darmstadt
Tel. 06151 - 2904-0

Email: info@iwu.de
Internet: www.iwu.de

Inhalt

Zusammenfassung.....	1
1 Kurzbeschreibung des Modernisierungsprojekts.....	9
1.1 Vorwort	9
1.2 Vorstellung des Forschungsprojekts	9
1.3 Vorstellung des Modernisierungsvorhabens	10
1.4 Kenndaten der Gebäude	16
1.5 Danksagung	17
2 Messtechnik und Klimadaten	18
2.1 Übersicht	18
2.2 Datenverfügbarkeit	21
2.3 Klimadaten	23
3 Messergebnisse in den Wohnungen	26
3.1 Raumtemperaturen.....	26
3.2 Raumluftfeuchte.....	35
3.3 Heizwärmeverbräuche	40
3.3.1 Gründe für den Mehrverbrauch bei der Heizwärme	44
3.3.2 Vergleich der Heizwärmeverbräuche mit anderen Gebäuden	49
3.4 Warm- und Kaltwasserverbräuche.....	51
3.5 Haushaltsstrom	54
3.6 Lüftungsstromverbrauch	59
4 Messergebnisse der Zentral- und Anlagentechnik.....	61
4.1 Wärmeerzeugung im Heizhaus	61
4.1.1 Betrieb Rapsöl-Blockheizkraftwerk (BHKW).....	64
4.1.2 Gastherme	68
4.2 Nahwärmenetz	70
4.3 Heizwärmeversorgung	75
4.3.1 Temperaturen der Heizkreise.....	75
4.3.2 Maximale Heizleistung	76
4.3.3 Verluste der Heizungsverteilung	77

4.3.4	Sommerverbrauch.....	79
4.4	Warmwasserbereitung.....	80
4.4.1	Thermische Solaranlagen.....	84
4.5	Elektrische Hilfsenergieverbräuche.....	94
4.5.1	Allgemeinstromverbräuche.....	94
4.5.2	Hilfsenergie Anlagentechnik.....	98
4.5.3	Treppenhauslüftung.....	102
4.5.4	Kellerlüftung.....	103
4.5.5	Wasserbehandlung.....	107
4.6	Elektrischer Gesamtenergieverbrauch.....	111
4.7	Betriebserfahrungen Anlagentechnik.....	112
4.7.1	Anlagenbetrieb.....	113
4.7.2	Regelungstechnik.....	115
5	Vergleich der Energiebilanzen.....	119
5.1	Nutz- und Endenergie.....	119
5.2	Treibhausgas- und Primärenergiebilanz.....	122
5.3	Einsparung durch die Modernisierung.....	124
6	Zusammenfassende Bewertung des Projekts.....	126
6.1	Bewertung des Modernisierungskonzepts.....	126
6.2	Bewertung des Warmmietenmodells.....	128
6.3	Bewertung des Nullemissionsansatzes.....	129
6.4	Fazit.....	132
7	Literatur.....	135
8	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....	137
9	Anhang.....	143

Zusammenfassung

Die sieben Mehrfamilienhäuser der Rotlintstraße 116-128 in Frankfurt am Main wurden in den Jahren 2008 bis 2011 von der ABG FRANKFURT HOLDING einer umfassenden Modernisierung im unbewohnten Zustand unterzogen. Dabei wurde neben einer konsequenten energetischen Modernisierung auch Instandhaltungs- und Wohnwert verbessernde Maßnahmen durchgeführt. In der Planungsphase wurde für die Gebäude der Passivhausstandard angestrebt und im Mittel über die gesamte Energiebezugsfläche auch erreicht. Die Dämmung der thermischen Hülle besteht überwiegend aus nachwachsenden Materialien, weiterhin wurden Maßnahmen zur deutlichen Reduktion der Verteil- und Speicherverluste ergriffen. Für die Wärmeversorgung wurden drei thermische Solaranlagen, ein Rapsöl-Blockheizkraftwerk und ein Erdgas-Spitzenlastkessel installiert. Mit den regenerativen Wärmeerzeugern wurde in der Jahresbilanz ein klimaneutrales Gebäude für Heizung, Warmwasser und Hilfsenergie angestrebt. Eine weitere Besonderheit ist, dass die Wohnungen mit einer Warmmiete vermietet werden, so dass die Kosten für Heizung und Warmwassererwärmung nicht mehr individuell abgerechnet werden.



Die Gesamtanlage besteht aus sieben Gebäuden, die in drei Blocks zusammengefasst sind, die auch gleichzeitig die Bauabschnitte bildeten, in denen die Gebäude nacheinander modernisiert wurden. Sie verfügt über 61 Wohnungen, 54 Zwei- und Dreizimmerwohnungen mit Wohnflächen zwischen 54 m² und 71 m² in den Bestandsgeschosses und 7 Drei- bzw. Vierzimmerwohnungen in den neu aufgestockten Dachgeschossen mit 96 m² bis 119 m² Wohnfläche. Die gesamte vermietete Wohnfläche beträgt 4096 m², die Energiebezugsfläche nach PHPP 3787 m².

Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse des wissenschaftlichen Monitorings aus dem Zeitraum Oktober 2009 bis Ende April 2013 dargestellt. Die Wohnungen des ersten Bauabschnitts waren somit über vier Heizperioden bewohnt, die des zweiten Bauabschnitts über drei Heizperioden und die des dritten Bauabschnitts über zwei Heizperioden.

Raumtemperaturen

Das Temperaturniveau in den Wohnungen im Winter lag zwischen 20,2 °C und 24,4 °C, im Mittel für die gesamte Heizperiode bei 22,2 °C (2011/12) bzw. 22,4 °C (2012/13). Der Mittelwert aller Wohnungen ist im Verlauf eines Winters nicht konstant, sondern es sind Einflüsse der Außentemperatur erkennbar. Die Mitteltemperatur aller Wohnungen schwankte in der Heizperiode 2010/11 zwischen 21 °C Anfang Februar und 23 °C Mitte Januar. Wie die Ergebnisse einer Mieterbefragung im Frühjahr

2012 zeigten, waren 83 % der Mieter mit ihren Raumtemperaturen zufrieden. Bei den wenigen Unzufriedenen („zu kalt“) lag die Mitteltemperatur jedoch auch bei 22,0 °C. Somit ist der thermische Komfort im Winter vergleichsweise hoch und liegt deutlich über den Standard-Randbedingungen im Passivhaus-Projektierungs Paket mit 20 °C oder dem Temperaturansatz von 19 °C in der Energieeinsparverordnung, mit entsprechenden Auswirkungen auf den Heizwärmeverbrauch (siehe unten).

Bei den Sommertemperaturen ist ein deutlicher Einfluss des Verschattungs- und Lüftungsverhaltens der Mieter zu erkennen, da sich in Wohnungen mit gleichen Randbedingungen sehr unterschiedliche Temperaturen einstellten. Die Mitteltemperaturen im Juli und August lagen zwischen 22,5 °C (2011) und 23,7 °C (2012). Am Tag mit den höchsten Außentemperaturen während der Messphase (Tagesmittelwert 22,6 °C, Tagesspitzenwerte bis 36 °C) ergab sich eine Temperaturspreizung von 3,2 K zwischen der kühlfsten (Maximaltemperatur kurzzeitig 25,3 °C) und der wärmsten Wohnung (Maximaltemperatur 28,5 °C).

Bei den Dachgeschosswohnungen zeigte sich im August 2012, dass bei gleichen äußeren Randbedingungen bei extremen Außentemperaturen (4 Tage, an denen die Außentemperaturen nachts nicht unter 24 °C fiel, Tagesspitzenwerte jeweils über 30 °C), die Raumtemperaturen kurzzeitig zwischen 27 °C und 29 °C lagen, sie in den folgenden, kühleren Nächten aber wieder schnell unter 26 °C fielen.

Ein Kriterium zur Bewertung des thermischen Komforts im Sommer ist die Häufigkeit von Raumtemperaturen über 25 °C über das gesamte Jahr. Diese Übertemperaturstunden lagen im Mittel bei 8 % und somit unter dem Grenzwert des PHPP von 10 %, die meisten Wohnungen erreichten Werte von unter 5 % und weisen somit einen sehr guten Sommerkomfort auf. Bei den Wohnungen mit höheren Werten muss berücksichtigt werden, dass die Raumtemperaturen im Winter teilweise so hoch lagen, dass bereits im Winter Übertemperaturstunden anfielen, obwohl sie der Wunschtemperatur der Mieter entsprachen.

Raumluftfeuchten

Bei den drei Bauabschnitten wurden im ersten Messwinter jeweils etwas höhere Raumluftfeuchten gemessen, als in den Folgejahren (zwischen 2 und 5 % rel. Feuchte mehr). Im Mittel der verschiedenen Heizperioden lagen die Raumluftfeuchten zwischen 37,4 % rel. Feuchte und 40,8 % rel. Feuchte. Bei sehr niedrigen absoluten Außenluftfeuchten sank die Raumluftfeuchte in einzelnen Wohnungen - besonders am Ende der Heizperiode - teilweise auf Werte unter 25 % ab. Zeitgleich liegen die Messwerte anderer Wohnungen zwischen 35 und über 40 % rel. Feuchte. Somit ist auch hier ein nennenswerter Einfluss des Nutzers auf die Raumluftfeuchte festzustellen. Im Winter 2011/12 lagen 11,5 % der Messwerte unter einer Raumluftfeuchte von 30 % rel. Feuchte, im Winter 2012/13 waren es 17,5 %. Die Raumluftfeuchte erreichte im Mittel für die Heizperiode 2012/13 einen Wert von 37,4 % rel. Feuchte, was einem vergleichsweise komfortablen Wert entspricht, besonders, wenn die gleichzeitig hohen Raumlufttemperaturen berücksichtigt werden. In der Mieterbefragung gaben 74 % der Mieter an, mit der Luftfeuchtigkeit in ihrer Wohnung zufrieden zu sein.

Heizwärmeverbrauch

Der Heizwärmeverbrauch schwankte in der Heizperiode 2011/12 in den einzelnen Wohnungen zwischen 2 kWh/(m²a) und 66 kWh/(m²a). Der Mittelwert lag im ersten Bauabschnitt bei

28,6 kWh/(m²a), so dass der Bedarfswert von 15,0 kWh/(m²a) deutlich überschritten wurde. Berücksichtigt man jedoch die gemessenen Raumtemperaturen, die tatsächliche Personenbelegung (es wohnen weniger Menschen in den Gebäuden, als in der Planungsphase angesetzt), das Außenklima, sowie die verspätete Umschaltung der Lüftungsanlage vom Sommerbetrieb auf Wärmerückgewinnung im Winter, so kann der gemessene Verbrauch nahezu vollständig erklärt werden. Im zweiten Bauabschnitt lag der gemessene Heizwärmeverbrauch bei 25,0 kWh/(m²a) und im dritten Bauabschnitt bei 20,6 kWh/(m²a). Auch hier können die Abweichungen zwischen Bedarf und Verbrauch mit den oben genannten Einflussgrößen überwiegend erklärt werden. Neben kaum beeinflussbaren Nutzer-abhängigen Faktoren (Temperaturen, Personenbelegung), sind besonders die organisatorischen Einflüsse wie die Sommer-Winter-Umschaltung der Lüftung (ca. 12 % bzw. 28 % höherer Heizwärmebedarf) sowie der Sommerbetrieb der Heizkreise (zwischen 1 kWh/(m²a) und 5 kWh/(m²a) Mehrverbrauch) zu nennen, die ohne Kosten zukünftig verbessert werden können, was den Heizwärmeverbrauch nennenswert reduzieren würde. Weitere Einflussfaktoren auf den Heizwärmeverbrauch, die jedoch nicht quantifiziert werden konnten, sind die Nutzung der Schiebeläden im Winter als Sichtschutz, was die solaren Gewinne reduziert, die teilweise beobachtete Fensterlüftung sowie z. B. Aus- und Trockenheizvorgänge in der ersten Heizperiode.

Der Mittelwert des Heizwärmeverbrauchs über alle Wohnungen lag zwischen 24,6 kWh/(m²a) (2011/12) und 30,1 kWh/(m²a) (2012/13). Zusätzlich muss die nutzbare Wärmeabgabe der Verteilungen berücksichtigt werden, die zwischen 1 kWh/(m²a) und 3 kWh/(m²a) lag. Somit weisen die Gebäude trotz der ungünstigen Randbedingung (Nutzer-abhängige und organisatorische Einflüsse) extrem niedrige Heizwärmeverbräuche in der Praxis auf.

Warmwasserverbrauch

Der Warmwasserverbrauch lag zwischen 75 Liter/(m²a) und 1000 Liter/(m²a) - im Mittel bei 409 Liter/(m²a) bzw. 46,3 Liter/(Person*d). Berücksichtigt man, dass die Warmwassertemperatur bei 51,8 °C lag und rechnet den Energieinhalt auf 60 °C Warmwassertemperatur um, so ergibt sich ein Warmwasserverbrauch von 37,5 Liter/(Person*d), was 50 % über dem Standardwert des PHPP von 25 Liter/(Person*d) liegt. Möglicherweise wirkt sich hier die Berücksichtigung der Warmwassererwärmung in der Warmmiete negativ auf das Verbrauchsniveau aus.

Haushaltsstromverbrauch

Auch beim Haushaltsstromverbrauch ergaben sich große Streuungen zwischen den Wohnungen. Die Wohnung mit dem niedrigsten Verbrauch lag bei 8 kWh/(m²a), der Maximalwert bei 96,7 kWh/(m²a). Im Mittel wurden im Jahr 2012 33,2 kWh/(m²a) im ersten, 27,1 kWh/(m²a) im zweiten und 21,1 kWh/(m²a) im dritten Bauabschnitt gemessen. In diesen Werten sind die Lüftungsstromverbräuche enthalten, die mit 1,6 kWh/(m²a) deutlich unter den Planwerten lagen, da in der Bauphase verbesserte Geräte mit einem niedrigeren Verbrauch als geplant eingesetzt werden konnten. Zieht man diesen Lüftungsstromverbrauch beim Haushaltsstrom ab, so ergibt sich im Mittel aller Wohnungen ein Verbrauchswert von 24,9 kWh/(m²a), der zwar 2 kWh/(m²a) über dem Planungswert liegt, aber ca. 15 % unter den gemessenen Werten anderer energetisch hochwertiger Modernisierungen.

Wärmeerzeugung in der Heizzentrale

Die oben genannten Verbräuche für Heizung und Warmwasser sowie die Verluste, die durch die Wärmeverteilung und -speicherung entstanden sind, wurden einerseits von den drei thermischen Solaranlagen (Unterstützung der Warmwasserbereitung), andererseits von der Heizzentrale gedeckt, in der das Rapsöl-BHKW und die Erdgas-Spitzenlasttherme in einen 2000 Liter Pufferspeicher einspeisen, aus dem das kleine Nahwärmenetz betrieben wird. Die Wärmeerzeugung im Heizhaus schwankte zwischen 48,8 kWh/(m²a) (2011/12) und 55,4 kWh/(m²a) (2012/13). Aus der Differenz zur Abgabe in das Nahwärmenetz ergaben sich Verluste im Heizhaus zwischen 2,6 kWh/(m²a) und 3,9 kWh/(m²a). Dieser Wert liegt höher als geplant, was sich aus dem ganzjährigen Betrieb des Pufferspeichers und der real größeren Leitungslängen sowie nachträglichen Änderungen an der Leitungsisolierung erklären lässt. Das BHKW konnte im Jahr 2012/13 aufgrund zahlreicher technischer Probleme beim Betrieb nur 18 % der benötigten Wärme liefern (Planwert 74 %), in den Jahren davor lag der Deckungsanteil des BHKW noch niedriger, so dass die verbleibende Wärme von der Erdgas-therme geliefert werden musste. Diese erreichte mit einer mittleren Aufwandszahl von 1,10 (bezogen auf den Brennwert) einen guten Wert, wenn man berücksichtigt, dass die Systemauslegung aufgrund zu hoher Rücklauftemperaturen einen Brennwertbetrieb kaum ermöglichte.

Der Gesamtnutzungsgrad des BHKW lag mit 87 % leicht unter den Herstellerangaben, aufgrund der Berechnung über Betankungsabrechnungen ist dieser Wert jedoch mit Unsicherheiten behaftet. Die Stromkennzahl (Verhältnis von erzeugtem Strom zu erzeugter Wärme) liegt mit durchschnittlich 0,42 ebenfalls unter den Herstellerangaben von 0,5. Hier muss aber berücksichtigt werden, dass aufgrund einer gemeinsamen Regelung für das BHKW und die Heizkreise die Heizkreispumpen bei BHKW-Betrieb direkt von diesem versorgt wurden und sich die Nettoeinspeisung dadurch reduzierte.

Nach der Behebung zahlreicher Probleme mit dem BHKW und der Nachrüstung eines Rußfilters, läuft die Anlage seit Februar 2013 vergleichsweise störungsfrei, so dass für die nächsten Jahre höhere Beiträge durch das BHKW zu erwarten sind, was sich auch positiv auf die Treibhausgasbilanz der Gebäude auswirken wird (siehe unten).

Die Verluste des kleinen Nahwärmenetzes, an das alle Gebäude angeschlossen sind, liegen zwischen 3,7 und 4,8 kWh/(m²a), der Planwert lag bei 0,9 kWh/(m²a). Die zusätzlichen Verluste sind mit, gegenüber den Planungen, längeren Leitungen sowie mit den verlängerten Betriebszeiten der Heizkreise und der nicht erfolgten Sommerabschaltung des Nahwärmenetzes zu erklären.

Zentrale Warmwasserbereitung

Die Energieverbräuche für die Warmwasserbereitung lagen je nach Bauabschnitt zwischen 16,0 und 23,3 kWh/(m²a). Diese Werte beinhalten auch alle Verteil- und Zirkulationsverluste. Bezieht man den Wärmeinhalt auf die Personenzahl, so ergeben sich im Mittel ca. 720 kWh/(Person*a). Zur Reduktion der Speicher- und Verteilverluste sollte die Warmwassertemperatur nur 48 °C betragen. Aufgrund von Fühlerabweichungen sowie von Störungen in der Regelung lag sie im Mittel 2012/13 bei 51,8 °C.

Ein Großteil der Warmwasserbereitung (ca. 61 %) sollte laut Planungen über die thermischen Solaranlagen auf jedem Bauabschnitt erfolgen. Die drei Anlagen lieferten zwischen 7,7 kWh/(m²a) (3. Bauabschnitt im Jahr 2011/12) und 11,5 kWh/(m²a) (2. Bauabschnitt im Jahr 2012/13) Kollektorwär-

me (Angaben je Quadratmeter Energiebezugsfläche), die in die Solarspeicher eingespeist wurde. Der niedrige Wert im dritten Bauabschnitt wurde durch den Ausfall einer Solarpumpe verursacht. Die solare Wärmelieferung der identischen Anlagen weicht 2012/13 zwischen den Gebäuden nur um 10 % voneinander ab, die Anlagen funktionierten etwa gleich gut. Damit ergäbe sich für alle Bauabschnitte ein solarer Deckungsgrad zwischen 51 % und 53 %, wenn die Solarwärme durch die Warmwasserwärme geteilt wird. Berücksichtigt man beim Zielwert des solaren Deckungsgrades von 61 % die höheren Warmwassertemperaturen und die etwas höheren Zapfmengen, die zu einer Reduktion der theoretischen Werte führen, liegen Messwerte und Ergebnis der Simulation nahe beieinander.

Allerdings traten bei der Warmwasserbereitung regelungstechnische Probleme auf, die den Nachheizaufwand deutlich erhöht haben. Durch Umschichtungen zwischen Warmwasser-Bereitschaftsspeicher und einem, im Winter meist kalten, Zwischenspeicher zum Solarspeicher, der als hydraulische Weiche eingesetzt wurde, wurde Wasser auf Raumtemperaturniveau mit dem 50 °C warmen Wasser im Bereitschaftsspeicher gemischt, so dass sofort die Nacherwärmung über das Nahwärmenetz den entstehenden Temperatureinbruch kompensierte. Da zusätzlich keine Hysterese bei der zu erreichenden Warmwassertemperatur hinterlegt war, wurde auch bei kleinen Temperaturschwankungen über die Nahwärme nachgeheizt, obwohl teilweise Solarwärme auf einem nutzbaren Temperaturniveau zur Verfügung stand. Inklusiv der Verluste des Bereitschaftsspeichers wurden 70 % bis 75 % der Warmwasserwärme aus dem Nahwärmenetz entnommen. Hier bestehen deutliche Verbesserungsmöglichkeiten, die aber ohne großen Aufwand umgesetzt werden könnten.

Hilfsenergieverbrauch

Die Allgemestromverbräuche der sieben Gebäude weichen deutlich voneinander ab. Während zwei Häuser im ersten Bauabschnitt mit ca. 1 kWh/(m²a) sehr niedrige Werte erreichen, liegt das dritte Gebäude mit 2,1 kWh/(m²a) teilweise noch über den Werten des zweiten und dritten Bauabschnitts, die jedoch einen Aufzug besitzen und dadurch mehr Strom verbrauchen. Mögliche Ursache könnte ein defektes Zeitrelais der Treppenhausbeleuchtung sein. Vergleicht man die Verbräuche der Gebäude mit Aufzug mit den beiden „sparsamen“ Häusern im ersten Bauabschnitt kann geschlossen werden, dass die Stromverbräuche der Aufzüge sehr niedrig liegen.

Beim Hilfsstromeinsatz im Heizhaus und in den Semizentralen erreichen zwei Semizentralen 1,15 kWh/(m²a), der dritte Bauabschnitt liegt mit 0,5 kWh/(m²a) deutlich darunter. Hier sind weitere Optimierungen möglich, um auch bei den beiden anderen Semizentralen den Hilfsstromeinsatz zu reduzieren. Beim Heizhaus sind 2012 1,25 kWh/(m²a) für Hilfsenergie verbraucht worden, der Mittelwert für die gesamte Anlage liegt bei ca. 1,9 kWh/(m²a).

Die Treppenhauslüftung wurde im Messprogramm nicht separat erfasst, durch punktuelle Überprüfungen vor Ort kann ein Stromverbrauch von 0,1 kWh/(m²a) abgeschätzt werden. Die Kellerlüftung, die über die Differenz der absoluten Feuchte zwischen innen und außen gesteuert wurde, funktionierte wie geplant und führte ebenfalls zu einem Stromverbrauch von ca. 0,1 kWh/(m²a).

Damit die Warmwassertemperaturen auf Werte deutlich unter 60 °C reduziert werden können, wurde das gesamte Trinkwasser mit einer Diaphragmalyse keimfrei gehalten. Der für die Anlage erforderliche Hilfsenergieeinsatz lag bei 0,17 kWh/(m²a). Vergleicht man die Einsparung durch die Tempe-

raturreduktion im Warmwasserkreis und die Verbesserungen beim solaren Deckungsgrad, so macht sich dieser zusätzliche Stromverbrauch sowohl end- als auch primärenergetisch bezahlt.

Betriebserfahrungen Anlagentechnik

Aufgrund der Größe der Wohnanlage in der Rotlintstraße 116-128 und der Kombination mehrerer Wärmeerzeuger, sind die Anlagentechnik sowie ihre Regelung recht komplex. Im Verlauf der Messphase konnten eine Reihe von Erkenntnissen zu Stärken und Schwächen der verwendeten Anlagen beobachtet werden. Beim Rapsöl-BHKW-Betrieb sind vor allem die Probleme mit der Zuverlässigkeit und Rußemissionen zu nennen, die zu langen Abschaltzeiten führten, die mittlerweile aber weitgehend behoben sind. Bezogen auf die gesamte Anlagentechnik ist neben hydraulischen Optimierungen vor allem der Ausfall von Pumpen zu nennen, der den Endenergieverbrauch erhöht hat.

Zu den organisatorischen Optimierungspotenzialen mit einem großen Einsparpotenzial von ca. 4,2 kWh/(m²a) gehören eine rechtzeitige Umschaltung der Lüftungsanlagen von Sommer- auf Winterbetrieb und eine frühzeitige Abschaltung der Heizkreise, spätestens zum 01.05., wenn es das Außenklima erlaubt, um den Sommerverbrauch zu minimieren.

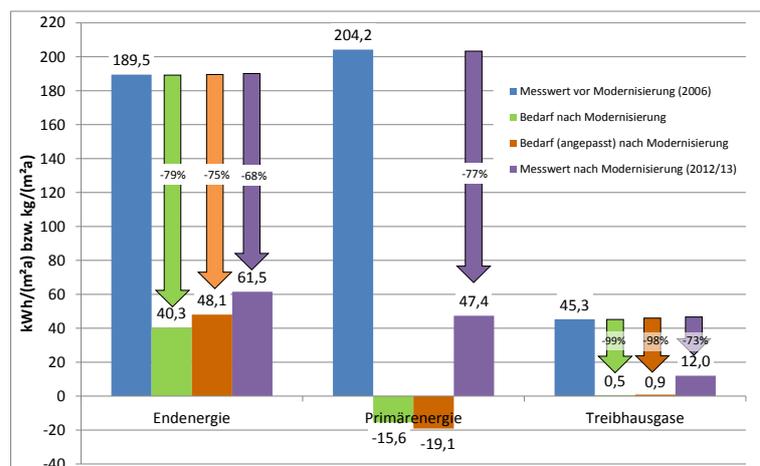
Nachdem kurz nach der Inbetriebnahme die Ansteuerung der Gastherme durch die Zentralregelung verbessert wurde, zeigten sich im Betrieb vor allen Schwierigkeiten bei der Warmwasserbereitung und dem Zusammenspiel von Zentral- und Solarregelung. Sowohl bezüglich der Hysterese bei der Warmwassertemperatur, als auch bei der Nachladung der Bereitschaftsspeicher über die Nahwärme ergeben sich größere Optimierungsmöglichkeiten.

Für zukünftige Projekte unterstreichen die Ergebnisse die Wichtigkeit einer Einregulierungs- und Optimierungsphase in den ersten beiden Jahren nach Fertigstellung einer komplexeren Anlage und die damit verbundene Notwendigkeit eines einfachen Anlagenmonitorings.

Energiebilanzen

Mehr als die Hälfte des Wärmeverbrauchs entfällt 2012/13 auf die Beheizung (30,1 kWh/(m²a)), der Rest verteilt sich auf Warmwasserbereitung (18,4 kWh/(m²a)) sowie die Verteilverluste des Nahwärmenetzes und der Heizung. Der Wärmeverbrauch lag in Summe bei 51,4 kWh/(m²a) (Abgabe ins Nahwärmenetz), da die thermischen Solaranlagen 4,6 kWh/(m²a) des Warmwasserbedarfs gedeckt haben.

Berücksichtigt man zusätzlich die Verluste im Heizhaus und die Umwandlungsverluste der Wärmeerzeuger, so ergibt sich ein Endenergieverbrauch (Erdgas und Rapsöl) für die Wärmeerzeugung von 61,5 kWh/(m²a). Zusätzlich wurden 4,9 kWh/(m²a) Hilfsstrom verbraucht.



Es ergibt sich eine Reduktion des Endenergieverbrauchs gegenüber dem Zustand vor der Modernisierung von 68 % (2011/12: 71 % Reduktion). Vergleicht man die Verbrauchsdaten mit an die reale Nutzung angepassten Bedarfsdaten, so liegt der reale Wärmeverbrauch $9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ über dem Bedarfswert. Hauptursache für diese Abweichungen sind die erhöhten Verluste im Heizhaus und vor allem die Regelungsprobleme bei der Warmwasserbereitung.

Beim Primärenergieverbrauch wurde eine Reduktion um 77 % erreicht, bei der Betrachtung der Bedarfswerte hätten sich sogar negative Werte ergeben. Die Treibhausgasemissionen konnten durch die Modernisierung um 73 % auf $12 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{a})$ reduziert werden, der fast vollständige bilanzielle Ausgleich der Emissionen, der sich bei den Bedarfswerten ergibt, wurde aber hauptsächlich aufgrund der Probleme beim BHKW verfehlt.

Bewertung des Projekts

Die energetische Modernisierung der Rotlintstraße 116-128 zeigt, dass auch Bestandsgebäude extrem niedrige Energieverbräuche für Heizung erreichen können und eine Dämmung mit nachwachsenden Rohstoffen zielführend ist. Nach Auswertung der Messergebnisse ist einerseits von höheren Komfortansprüchen der Mieter auszugehen, als die Standardtemperaturen von 20 °C vorgeben, andererseits zeigten sich einige technische, organisatorische und regelungstechnische Optimierungsmöglichkeiten, die den Energieverbrauch für Heizung und Warmwasser noch um ca. $10 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ weiter senken könnten. Bei der Bewertung der Mehrverbräuche bzw. weiterer möglicher Einsparungen muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Gebäude bereits auf einem sehr niedrigen Verbrauchsniveau liegen und Abweichungen im zweitstelligen Prozentbereich absolut nur wenige $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ausmachen, was teilweise innerhalb der Messgenauigkeit der verwendeten Zähler liegt.

Die Ergebnisse und Erfahrung bilden eine gute Grundlage zur Verwendung in weiteren Modernisierungsprojekten. Das Konzept lässt sich gut übertragen, die hier dargestellten Schwierigkeiten sollten direkt in der zukünftigen Planung berücksichtigt werden. Die Ergebnisse zeigen einerseits, dass extrem niedrige Heizkosten bei sehr hohem Komfort möglich werden. Wie die Befragung zeigte, ist die Zufriedenheit der Mieter mit diesen Gebäuden sehr hoch. Andererseits wird die global wichtige Reduktion des fossilen Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen vorangetrieben. Die Integration regenerativer Energien muss dabei zukünftig noch stärker berücksichtigt werden.

Bei der Bewertung des Warmmietenmodells zeigte sich, dass trotz der erhöhten Heizwärmeverbräuche kein direkter Einfluss des Verzichts auf eine individuelle Heizkostenabrechnung auf die Heizwärmeverbräuche nachgewiesen werden kann. Die hohen personenbezogenen Warmwasserverbräuche deuten jedoch darauf hin, dass eine fehlende Unterscheidung der Kosten von Warm- und Kaltwasser die Verbräuche zu höheren Warmwasserverbräuchen verschiebt, sodass das Warmmietenkonzept für den Bereich Heizung bei Passivhäusern durchaus gangbar erscheint, die Integration der Warmwasserwärme aber vorsichtig geprüft werden muss.

Ob Gebäude in der Jahresbilanz klimaneutral sind, kann auf drei Bewertungsebenen überprüft werden. Betrachtet man die Bedarfswerte, was in den meisten Fällen die einzige Bewertungsebene darstellt, so ergeben sich für die Rotlintstraße mit $0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{a})$ vernachlässigbar geringe Treibhausgasemissionen, so dass die Gebäude als klimaneutral bezeichnet werden können. Wichtig ist aber auch die Betrachtung von realen Verbrauchswerten, die in zwei Schritten erfolgen sollte. Die realen

Effizienzsteigerungen gegenüber dem Zustand vor Modernisierung oder vergleichbaren Gebäuden und die Treibhausgasbilanz. Die Bewertung der Effizienzsteigerungen fällt in der Rotlintstraße ebenfalls sehr positiv aus, da der Endenergieverbrauch für Heizung, Warmwasser und Verteilung um 68 % reduziert werden konnte, was sich generell auch auf die Nebenkosten auswirkt (auch wenn die Heiz- und Warmwasserkosten in der Rotlintstraße nicht individuell umgelegt werden). Werden die niedrig-investiven, organisatorischen Maßnahmen noch umgesetzt, so sind Endenergieeinsparungen über 70 % möglich. Somit verursachen die Gebäude absolut geringe Emissionen. Im dritten Schritt werden die Treibhausgasemissionen inklusive Gutschriften bilanziert. Diese Bewertung ist aufgrund der Gutschriften nicht unumstritten, aber bei Null- und Plus-Energie-Gebäuden gängige Praxis. Bei dieser Bewertungsebene ergeben sich durch die geringen Betriebszeiten des BHKW niedrige Gutschriften, so dass die Gebäude hier das Null-Emissions-Ziel bisher nicht erreicht haben. Die Betriebsergebnisse der letzten Auswertemonate lassen jedoch vermuten, dass in den nächsten Jahren nochmals deutlich reduzierte Treibhausgasemissionen möglich sind.

Generell ist anzunehmen, dass die modernisierten Bestandsgebäude in der Rotlintstraße die zukünftigen Neubauanforderungen der EU Gebäuderichtlinie an „Nearly Zero Energy Buildings“ ab 2021 bereits heute erfüllen.

1 Kurzbeschreibung des Modernisierungsprojekts

1.1 Vorwort

Der Mensch ist seit Jahrtausenden bestrebt seine bisher bekannten Grenzen zu überschreiten und neue Entwicklungen voranzutreiben. Dabei mussten sich Erfindungen immer in der täglichen Praxis bewähren. Auch heutzutage beschäftigen sich Menschen mit der Frage, wie Dinge einfacher, komfortabler, zuverlässiger oder auch umweltfreundlicher werden. Aufgrund der Energieintensität, die das Leben in den industrialisierten Ländern mittlerweile erreicht hat, besteht die Notwendigkeit, den Fokus besonders auf eine umweltfreundliche und ressourcenschonende Entwicklung zu lenken und die Bedürfnisse der Menschen mit deutlich verringerter Umweltbelastung zu stillen. Der Bereich des Wohnens zählt dabei zu den Grundbedürfnissen, der in Deutschland fast 30 % des Endenergieverbrauchs verursacht [Shell 2012]. Hier können nennenswerte Entlastungen bei den Treibhausgasemissionen und dem Verbrauch fossiler Energieträger erreicht werden, wenn die Entwicklungen, die im Neubau in den letzten zwei Jahrzehnten mit dem Niedrigenergiehaus, dem Passivhaus und der verstärkten Nutzung von regenerativen Energieträgern begonnen wurden, konsequent weiter vorangetrieben werden und es vor allem gelingt, diese Konzepte auf den Gebäudebestand zu übertragen.

Ziel der mittelfristigen Entwicklung im Gebäudebereich muss es sein, die Umweltauswirkungen des Wohnens auf ein absolutes Minimum, möglichst auf null, zu reduzieren. Dies gilt für den Energieverbrauch, aber auch z. B. für die Stoffströme in der Bau- und Nutzungsphase. Dieses Ziel ist aber kaum in einem Schritt zu erreichen und auch hierbei müssen sich verschiedene Konzepte in der Praxis bewähren, was objektiv nur mit intensiven wissenschaftlichen Begleituntersuchungen möglich ist.

1.2 Vorstellung des Forschungsprojekts

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse einer modellhaften energetischen Modernisierung von sieben Mehrfamilienhäusern in Frankfurt am Main, bei denen die oben beschriebenen Ziele der Umweltentlastung und Ressourcenschonung bereits soweit optimiert wurden, dass die Gebäude für die Bereiche Heizung, Warmwasser und Hilfsenergie in der Jahresbilanz klimaneutral, d. h. ohne zusätzliche Treibhausgasemissionen sein sollen. Die wichtigsten Ziele in diesem Projekt waren:

- Passivhausstandard bei Bestandsgebäuden
- Überwiegend nachwachsende oder recycelte Dämmmaterialien
- Optimierung der Warmwasserbereitung
- Reduktion der Verteilverluste für Heizung und Warmwasser
- Einsatz überwiegend regenerativer Wärmeerzeuger
- In der Jahresbilanz keine Treibhausgasemissionen für Heizung, Warmwasser und Hilfsenergie („Null-Emissions-Gebäude“)
- Vermietung der Wohnungen im Warmmietmodell

Die energetische Modernisierung begann im Sommer 2008 und wurde in drei Bauabschnitten durchgeführt. Der erste Bauabschnitt wurde ab Oktober 2009 fertiggestellt und bezogen, der zweite im September 2010 und der dritte im Juli 2011. Sowohl die Planungsphase [IWU 2010] als auch die Bauphase [Großklos 2011] wurden jeweils in einem ausführlichen Bericht dokumentiert, so dass hier nur ein grober Überblick über die wesentlichen Elemente der Modernisierung gegeben werden soll. Die

Baukosten wurden in einer wohnungswirtschaftlichen Analyse mit einem eigenen Teilbericht dokumentiert [Hinz, Großklos 2012]. In einer sozialwissenschaftlichen Untersuchung [IWU 2012] wurden die Mieter in einem separaten Projekt zu ihren Einzugsgründen, den Erfahrungen mit den Gebäuden und der Anlagentechnik, verschiedenen Nutzungsgewohnheiten, zu ihrer Einstellung zum Warmmietenkonzept und zu ihrer Zufriedenheit mit den Wohnungen befragt.

Nach Abschluss der Modernisierung hat das IWU vom Oktober 2009 bis April 2013 in Zusammenarbeit mit der ABG FRANKFURT HOLDING und der Mainova ServiceDienste und mit finanzieller Förderung durch das Hessische Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz ein wissenschaftliches Messprogramm in den Wohnungen und in der Anlagentechnik durchgeführt. Unter anderem sollten folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- Wie ist das Komfortniveau in den Wohnungen?
- Wurde der Passivhausstandard in der Praxis erreicht oder wo liegen mögliche Gründe für Abweichungen zwischen Bedarf und Verbrauch?
- Konnten die Verteilverluste reduziert werden und wie haben sich die Wassersparmaßnahmen auf den gemessenen Warmwasserverbrauch ausgewirkt?
- Welchen Anteil erreichen die regenerativen Wärmeerzeuger an der Wärmelieferung, wie haben sie zusammengearbeitet, welche Verbesserungspotenziale ergeben sich?
- Erreichten die Gebäude in der Jahresbilanz den bilanziellen Ausgleich bei den Treibhausgasemissionen?
- Hat sich das Warmmietenmodell bewährt oder führt es zu erhöhten Energieverbräuchen?

Dieser Bericht stellt die Ergebnisse des Messprogramms dar und diskutiert die Schlussfolgerungen.

1.3 Vorstellung des Modernisierungsvorhabens

Die Gebäude der Rotlintstraße 116-128, die von der ABG FRANKFURT HOLDING energetisch modernisiert wurden, umfassen sieben Häuser, die in drei Blöcken zusammengefasst sind. Jeder dieser Blöcke bildete auch gleichzeitig einen Bauabschnitt. Nach Abschluss der Arbeiten verfügt der erste Bauabschnitt (3 Treppenhäuser) über 21 Wohnungen in drei Vollgeschossen und einem neu aufgesetzten Staffelgeschoss. Der zweite Bauabschnitt (2 Treppenhäuser) mit vier Vollgeschossen plus Staffelgeschoss im Dach besitzt 18 Wohneinheiten und der dritte Bauabschnitt (2 Treppenhäuser) mit fünf Vollgeschossen zuzüglich Staffelgeschoss verfügt über 22 Wohnungen. Abb. 1-1 zeigt im Lageplan schematisch die Anordnung der drei Bauabschnitte sowie die Lage des Heizhauses und der drei Semizentralen in je einem Kellerraum.

Der erste und der dritte Bauabschnitt sind mit

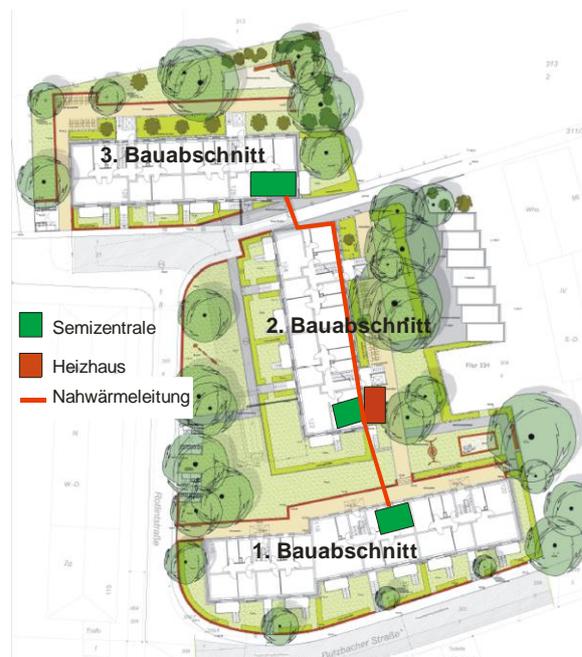


Abb. 1-1: Übersicht über die Lage der Bauabschnitte, von Heizhaus und Semizentrale sowie das neu verlegte Nahwärmenetz (Plan: [freiraum])

ihrer Hauptfassade nach Süden orientiert, der zweite Bauabschnitt besitzt eine Westausrichtung, was aufgrund der geringeren solaren Gewinne zu einem leicht höheren Heizwärmebedarf führte.

Um den Passivhausstandard bei Bestandsgebäuden zu erreichen, erhielten die Häuser einen lückenlosen Wärmeschutz, der überwiegend mit Zelluloseflocken in unterschiedlichen Trag- und Unterkonstruktionen ausgeführt wurde. Tab. 1-1 zeigt die verschiedenen Maßnahmen.

Tab. 1-1: Übersicht der energetischen Maßnahmen an der Gebäudehülle und U-Werte nach Modernisierung

Bauteil	Wärmeschutz	U-Wert [W/(m ² K)]
Kellerwand unterirdisch	10 cm Perimeterdämmung ($\lambda=0,038$ W/(mK))	0,30
Kellerwand oberirdisch	30 cm Perimeterdämmung ($\lambda=0,035$ W/(mK))	0,11
Kellerdecke	26 cm Zellulosedämmung ($\lambda=0,040$ W/(mK))	0,13
Kellertür		1,06
Treppe gegen Keller	8 cm Polyurethandämmung ($\lambda=0,025$ W/(mK)) mit 5 mm Kaschierung aus Holzwerkstoffplatten	0,27
Wand gegen Keller (im Treppenhaus)	4,5 cm Polyurethandämmung ($\lambda=0,025$ W/(mK)) mit Kaschierung	0,40
Außenwand 1. Bauabschnitt	29 cm Zellulosedämmung ($\lambda=0,040$ W/(mK)) mit Stützkonstruktion aus vorgefertigten U-Profilen aus OSB-Platten und Konstruktionsvollholz, Sparschalung, magnesitgebundene Holzwoleplatte, Außenputz	0,13
Außenwand 2. und 3. Bauabschnitt	27 cm Zellulosedämmung mit Stützkonstruktion aus Schichtholzkonsolen an Metallschienen, Sparschalung, magnesitgebundene Holzwoleplatte, Außenputz	0,13
Fenster 1. Bauabschnitt	3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung ($U_g=0,50$ W/(m ² K), g-Wert: 0,51) in Passivhausfensterrahmen ($U_f=0,91$ W/(m ² K)) mit thermisch getrenntem Randverbund	0,74 (im Mittel)
Fenster 2. und 3. Bauabschnitt	3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung ($U_g=0,60$ W/(m ² K), g-Wert: 0,51) in Passivhausfensterrahmen ($U_f=0,74$ W/(m ² K)) mit thermisch getrenntem Randverbund	0,74 (im Mittel)
Haustür	Passivhaus-Haustür Variotec Thermosafe 100 mit Fensterausschnitt	0,78
Dachterrasse	24 cm Zellulosedämmung mit Holzbalken 12 cm im Raster 62,5 cm, zusätzlich 4 cm (im Mittel) Zellulosedämmung ($\lambda=0,04$ W/(mK)) mit punktuellen Distanzhölzern 12 cm und 3 cm Mineralfaser ($\lambda=0,040$ W/(mK)) auf Geschossdecke zum Ausgleich von Unebenheiten, OSB-Platte mit Gefälle + Abdichtung	0,15
Außenwand im Dachgeschoss an Dachterrasse	14 cm Zellulosedämmung mit 6 cm Rahmenhölzern im Raster 62,5 cm mit OSB- und Gipskartonbeplankung, 20 cm Polystyrol-Dämmung ($\lambda=0,035$ W/(mK)), Außenputz	0,11
Außenwand im Dachgeschoss (über Bestandswand)	40 cm Zellulosedämmung mit Holzstegträgern im Raster 62,5 cm mit OSB bzw. DWD-Beplankung, magnesitgebundene Holzwoleplatte	0,10
Dach	40 cm Zellulosedämmung in Konstruktion mit Holzstegträger im Raster 62,5 cm, beplankt mit OSB-Platten, hinterlüftetes Gründach	0,11 bzw. 0,09

Die Bilder in Abb. 1-2 zeigen die Gebäude vor Beginn der Arbeiten sowie einige Maßnahmen an der Gebäudehülle aus der Bauphase.



Abb. 1-2: Ansichten der Gebäude: vor Modernisierung (oben links), Abhängung der Kellerdecke, die später mit Zellulosedämmung gefüllt wurde (oben rechts), Unterkonstruktion der Außenwanddämmung im ersten Bauabschnitt (Mitte links), Unterkonstruktion der Außenwanddämmung auf Höhe der Geschosdecke im zweiten und dritten Bauabschnitt (Mitte rechts), Abdichtung der neuen Passivhausfenster (unten links), Dachkonstruktion im Treppenhauskopf mit 40 cm Holzstegträgern (untern rechts)

Alle Wohnungen erhielten Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, die in einer Nische im Badezimmer montiert wurden. Die Verteilung der Lüftungsleitungen erfolgte in abgehängten Deckenbereichen in Badezimmer und Flur. Außerdem wurden alle Treppenhäuser mit einer mechanischen

Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung ausgestattet, die auf dem ersten Treppenpodest in die Außenwand eingelassen wurden. Im Keller sorgt eine Abluftanlage mit Feuchteregelung für eine an die inneren und äußeren Klimabedingungen angepasste Belüftung der Kellerräume. Abb. 1-3 zeigt die Lüftungsanlagen im montierten Zustand und weitere Komponenten der Anlagentechnik.



Abb. 1-3: Ansichten der Anlagentechnik: Lüftungsgerät im Badezimmer (Pfeil, oben links), Lüftungsgerät im Treppenhaus (oben rechts), Heizzentrale mit BHKW vorne und Erdgastherme hinten (Mitte links), thermische Solaranlage auf dem ersten Bauabschnitt (Mitte rechts), Solarpufferspeicher (blau) und Warmwasser-Bereitsschaftsspeicher (weiß, hinten) sowie hydraulische Weiche (weiß vorn) (Bild unten links), zweilagige Verlegung der Leitungsdämmung (Bild unten rechts)

Im zentralen Heizhaus versorgen ein Rapsöl-Blockheizkraftwerk (BHKW) mit 22 kW thermischer und 11 kW elektrischer Leistung sowie ein Erdgas-Spitzenlastkessel (100 kW) die Gesamtanlage über ein Nahwärmenetz mit Wärme. Außerdem verfügt das Heizhaus über einen 2000 Liter Pufferspeicher für das BHKW. Je eine thermische Solaranlage mit 32 m² Kollektorfläche befindet sich auf dem Dach jedes Bauabschnitts. In den drei Semizentralen im Keller befinden sich jeweils zwei in Reihe geschaltete 800 Liter Solarspeicher, ein Warmwasser-Bereitschaftsspeicher von 500 Liter sowie eine hydraulische Weiche mit 300 Liter für die Warmwasserbereitung. Um die Speicher- und Verteilverluste zu minimieren, wird das Warmwasser nur auf 48 °C erwärmt, gleichzeitig steigert die niedrige Warmwassersolltemperatur den Deckungsgrad der Solaranlagen. Da bei diesem Temperaturniveau keine thermische Desinfektion möglich ist, sorgt eine Diaphragmanalyse im zentralen Kaltwasserzulauf des Gebäudes für keimfreies Trinkwasser.

Zur Reduktion der Verteilverluste wurden alle Verteilleitungen mit dem 2,5-fachen der Anforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) an die Rohrleitungsisolierung gedämmt. Außerdem wurde die horizontale Verteilung im Keller überwiegend in der Kellerdeckendämmung verlegt und an Stelle einer separaten Zirkulationsleitung wurde in der vertikalen Verteilung eine Rohr-in-Rohr-Zirkulation verwendet, die keine separate Zirkulationsleitung benötigt.

Um die Effizienz beim Hilfsenergieeinsatz zu steigern, wurde bei den Aufzügen vor allem auf geringe Standby-Verbräuche geachtet, es sind Umwälzpumpen hoher Energieeffizienz eingesetzt, außerdem ist die Treppenhaus- und Außenbeleuchtung mit Energiesparlampen ausgestattet. Zur Reduktion des Haushaltsstromverbrauchs wurden im Bad und im Flur energiesparende Leuchten installiert, jede Wohnung besitzt einen Trockenschrank, der die Wäsche im Abluftstrang der Lüftungsanlage trocknet, es gibt einen Warmwasseranschluss für die Waschmaschine und einen Standby-Abschalter im Wohnzimmer für die Unterhaltungselektronik. Zur Reduktion der Warmwasserverbräuche wurden im Badezimmer Wasser sparende Armaturen installiert.

Abb. 1-4 zeigt einen typischen Grundriss der Wohnungen nach Modernisierung. Die Gebäude sind als Zweispänner mit je zwei Wohnungen je Etage organisiert, im zweiten und dritten Bauabschnitt ist nachträglich an Stelle eines alten Lastenaufzuges ein neuer Personenaufzug eingebaut worden. In den Wohnungen sind Badezimmer und Küche meist so angeordnet, dass sie gemeinsame Ver- und Entsorgungsleitungen nutzen können. Es wurden neue und größere, thermisch getrennte Balkonanlagen vor den Wohnzimmern aufgebaut, die Erdgeschosswohnungen erhielten kleine Mietergärten.

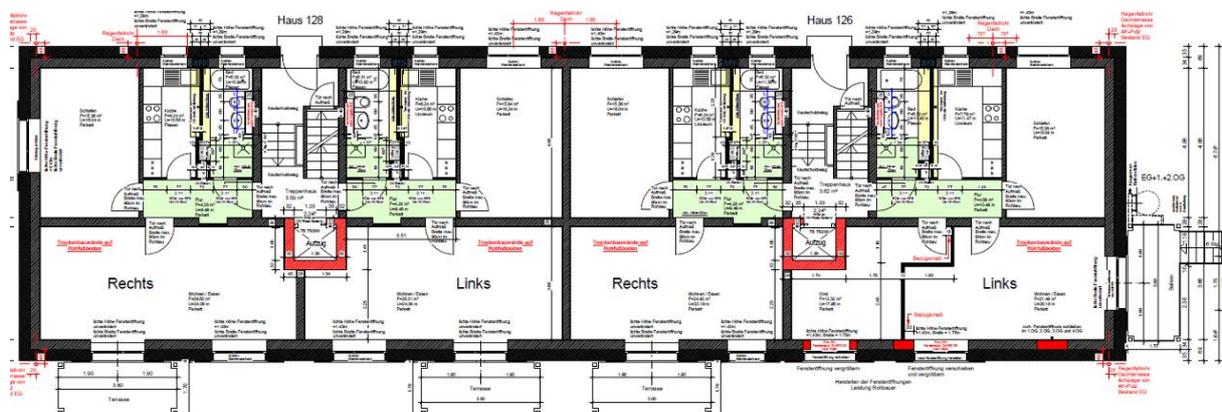


Abb. 1-4: Typischer Grundriss im dritten Bauabschnitt nach der Modernisierung [faktor10]

Abb. 1-5 zeigt einige Außenansichten der Gebäude nach der Modernisierung.



Abb. 1-5: Ansichten der Gebäude nach Abschluss der Arbeiten: erster Bauabschnitt von Süden (oben links), zweiter Bauabschnitt von Nordwesten (oben rechts), dritter Bauabschnitt von Süden (unten links), Luftbild der Anlage mit allen Bauabschnitten von Norden (unten rechts)

Tab. 1-2: Übersicht der wichtigsten Projektbeteiligten

Eigentümer und Bauherr	ABG FRANKFURT HOLDING GmbH, Frankfurt
Architektur, Detailplanung, Konzept Fassadendämmung, Bauleitung	faktor10 Gesellschaft für Siedlungs- und Hochbauplanung mbH, Darmstadt
Statik, Brandschutz, Fassadendämmung	bauart Konstruktions GmbH & Co. KG, Lauterbach
Heizung-, Lüftung-, Sanitär- und Elektroplanung	Ingenieurbüro Baumgartner, Mörlenbach
Schallschutz	ITA Ingenieurgesellschaft für technische Akustik mbH, Wiesbaden
Außenanlagen	freiraum Landschaftsarchitektur, Frankfurt
Wissenschaftliche Begleitung Planungs- und Bauphase, energetische Qualitätssicherung, Planung und Auswertung Monitoring	Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt
Förderung der Begleitforschung	Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz zusammen mit Europäische Union, Investitionen in Ihre Zukunft - Europäischer Fonds für regionale Entwicklung
Förderung Entwicklung Fassadendämmung und Förderung von Maßnahmen zur Modernisierung mit passivhaustauglichen Komponenten	Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz

Bei der Planung und Umsetzung der Gesamtmaßnahme war ein Team von spezialisierten Büros beteiligt. Die wichtigsten Projektbeteiligten für die energetische Modernisierung sind in Tab. 1-2 wiedergegeben.

1.4 Kenndaten der Gebäude

Die Gebäude Rotlintstraße 116-128, die in drei Blöcken zusammen gefasst sind, verfügen über insgesamt sieben Treppenhäuser. Der erste Bauabschnitt umfasst drei (Bestands-)Vollgeschosse sowie ein neu aufgesetztes Staffelgeschoss, der zweite Bauabschnitt vier Vollgeschosse plus Staffelgeschoss und der dritte Bauabschnitt fünf Vollgeschosse zuzüglich Staffelgeschoss.

Die vermietete Wohnfläche der gesamten Anlage liegt bei 4097 m². Zur Bildung von Kennwerten entscheidender ist jedoch die Energiebezugsfläche (ohne Balkone, Terrassen), die aus dem detaillierten Aufmaß der Wohnungen nach Abschluss der Modernisierung berechnet wurde. Tab. 1-3 zeigt diese Energiebezugsflächen der drei Bauabschnitte, insgesamt liegt sie bei 3787 m².

Tab. 1-3: Energiebezugsflächen der Wohnungen in Quadratmetern

Haus Nr.	Bestand Wohnung rechts	Bestand Wohnung links	Anzahl Bestands- geschosse	Dachge- schoss	Summe	Wohnein- heiten gesamt
116	57,0	61,6	3	91,1	447,0	7
118	54,9	62,2	3	89,5	440,7	7
120	62,1	51,6	3	89,3	430,4	7
122	60,7	50,5	4	80,3	524,9	9
124	49,4	60,4	4	83,4	522,4	9
126	56,8	67,6	5	96,3	718,3	11
128	61,2	60,4	5	95,1	703,2	11
Summe					3787,0	61

Für einige Messergebnisse der in den Kapiteln 3 und 4 folgenden Auswertungen ist jedoch ein Bezug auf die Anzahl der versorgten Personen geeigneter als der Bezug auf die Fläche. Für Personen bezogene Kenndaten wurden einerseits die Angaben der Mieter verwendet, die sich an der schriftlichen Mieterbefragung im Frühjahr 2012 beteiligt haben, andererseits wurden die Mieter am Ende der Messphase im Mai 2013 bei Demontage der Datenlogger um Angaben zur Personenbelegung gebeten. Dabei sollten nur die dauerhaft in der Wohnung lebenden Personen angegeben werden, Lebenspartner mit eigenem Wohnsitz, die aber z. B. am Wochenende sich in der Wohnung aufhalten, sind nicht berücksichtigt.

In Tab. 1-4 sind die tatsächliche Anzahl der Personen je Bauabschnitt sowie die angenommenen Werte aus der Planungsphase 2008 dargestellt. Je Person steht im dritten Bauabschnitt mit 45 m²/Person deutlich mehr Wohnfläche zur Verfügung als im ersten und zweiten Bauabschnitt; der Wert wird typischerweise bei Einfamilienhäusern angetroffen. Der erste und zweite Bauabschnitt liegen mit einer Personenbelegungsichte von ca. 36 m²/Person im Bereich typischer Werte für Mehrfamilienhäuser [LEG 1999]. In der Planung wurden mit 32,3 m²/Person noch niedrigere Werte angesetzt. Real leben 20 Personen weniger in den Häusern Rotlintstraße 116-128 als in der Planungsphase angenommen.

Tab. 1-4: Personenbelegung: Planwert und Ist-Wert

	Planwert (2008)	Personen- belegungs- dichte Plan	Istwert (2012/13)	Personen- belegungs- dichte Ist
	[Personen]	[m ² /Person]	[Personen]	[m ² /Person]
1. Bauabschnitt (116-120)	40	33,0	36	36,6
2. Bauabschnitt (122-124)	34	30,8	30	35,5
3. Bauabschnitt (126-128)	43	33,1	31	45,9
Summe	117		97	
Mittelwert		32,3		39,3

1.5 Danksagung

Die Autoren möchten sich ausdrücklich für die Förderung der Begleitforschung beim Hessischen Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz sowie der Europäischen Union – Europäischer Fond für regionale Entwicklung bedanken.

Für die gute Zusammenarbeit im Projekt gilt der Dank der ABG FRANKFURT HOLDING, insbesondere Herrn Wagner und Herrn Theobald, außerdem Herrn Rasch und Frau Grenz vom Büro faktor10 und Herrn Baumgartner und Herrn Petrasch vom IB Baumgartner.

Der Mainova ServiceDienste gilt der Dank für die Unterstützung und Durchführung des Messprogramms und die Bereitstellung der Messdaten.

Den Bewohnern der Rotlintstraße 116-128 gilt der Dank für die Teilnahme und Unterstützung beim Messprogramm und die Beteiligung bei der Mieterbefragung.

2 Messtechnik und Klimadaten

Im folgenden Kapitel wird kurz die verwendete Messtechnik beschrieben und es werden die Datenverfügbarkeit sowie die verwendeten Klimadaten erläutert.

2.1 Übersicht

Zur Erfassung der Verbräuche, Temperaturen und Betriebszustände sowie zur Analyse des Sanierungserfolgs wurde in den Wohnungen und in der Anlagentechnik in der Rotlintstraße ein umfangreiches Messprogramm durchgeführt.

Installation und Betrieb der Messtechnik lagen in Händen der Mainova ServiceDienste, die dies im Auftrag der ABG-Frankfurt Holding durchgeführt und dem IWU die Messdaten zur Auswertung zur Verfügung gestellt hat, wofür sich das IWU bedanken möchte.

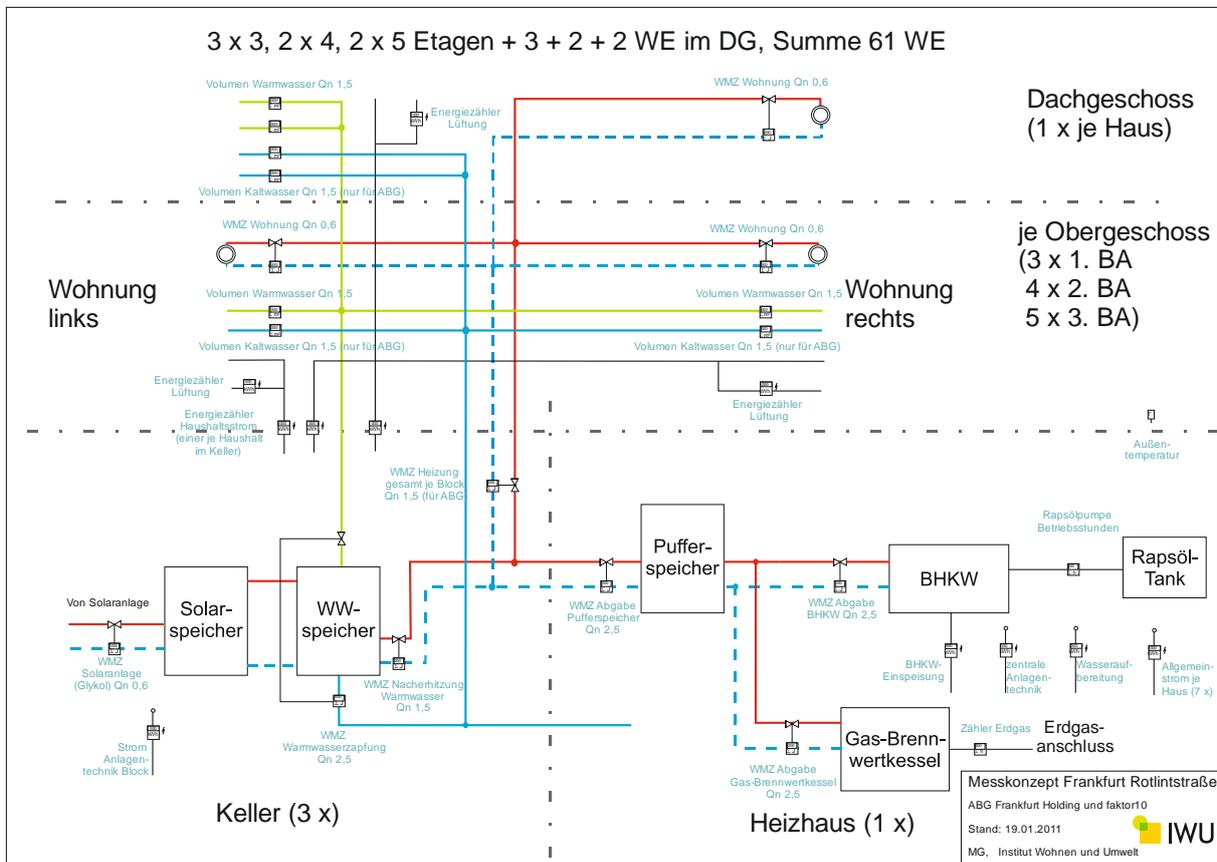


Abb. 2-1: Anlagenschema der Haustechnik mit den vorhandenen Messeinrichtungen

Ausstattung in den Wohnungen

Die messtechnische Ausstattung der Gebäude Rotlintstraße 116-128 (siehe Abb. 2-1) umfasst je Wohneinheit einen Wärmemengen-, einen Kaltwasser-, einen Warmwasser- sowie einen Haushaltsstromzähler. In den Dachgeschosswohnungen ist jeweils ein zusätzlicher Kalt- und Warmwasserzähler in der Küche vorhanden. Alle diese Zähler wurden über einen M-Bus stündlich fernausgelesen (Elektrozähler über Powerline).

Zusätzlich zu dieser Messtechnik wurde in jeder Wohnung ein Miniatur-Datenlogger (Abb. 2-2 und Abb. 2-3) vom Typ Hobo U10-003 zur Ermittlung von Raumtemperatur und Raumluftfeuchte (in den Dachgeschosswohnungen zusätzlich ein Hobo U12-012 mit Temperatur-, Feuchte- und Beleuchtungsmessung) sowie ein Elektro-Unterzähler zur Erfassung des Stromverbrauchs der Lüftungsanlagen montiert. Die Datenlogger speichern Stundenmittelwerte ab und wurden händisch ausgelesen. Bei dieser Ablesung wurde auch der Stand des Elektrozählers der Lüftungsanlage notiert.



Abb. 2-2: Befestigung des Datenloggers in den Bestandsgeschossen auf dem Türrahmen im Flur der Wohnung



Abb. 2-3: In den Dachgeschosswohnungen wurde ein Datenlogger zusätzlich im Wohnzimmer am Fensterahmen befestigt



Abb. 2-4: Je Wohnung wurde im Schacht im Badezimmer ein Wärmemengenzähler für den Heizwärmeverbrauch montiert (Bild aus der Bauphase)



Abb. 2-5: Die Haushaltsstromzähler verfügen über Archivregister mit der stündlichen mittleren Leistung, die über Powerline ausgelesen wurden

Messtechnische Ausstattung in der Anlagentechnik

Für Anlagentechnik ist im zentralen Heizhaus folgende Messtechnik vorhanden:

- 1 Gaszähler
- 3 Wärmemengenzähler (Wärmeerzeugung Gastherme und Rapsöl-BHKW sowie Einspeisung in das Nahwärmenetz nach dem Pufferspeicher),
- Elektrozähler für Hilfsstromverbrauch Anlagentechnik Heizhaus, Einspeisung BHKW, Verbrauch BHKW, Verbrauch Wasseraufbereitung

Die Semizentrale in jedem der einzelnen Bauabschnitte besitzt Wärmemengenzähler für Gesamtwärmeabnahme Heizung sowie Wärmeabnahme Warmwasser, Einspeisung Solaranlage und Nacherwärmung Warmwasser über die Nahwärme. Zusätzlich wird der Elektroenergieverbrauch der Anlagentechnik je Semizentrale gemessen. Für jedes der sieben Häuser wird außerdem der Allgemeinstromverbrauch erfasst.

Alle in diesem Bericht dargestellten Temperaturmesswerte und Volumenströme der Anlagentechnik stammen, wenn nicht anders vermerkt, von den in den Wärmemengenzählern erfassten Daten.

Tab. 2-1 und Tab. 2-2 zeigen eine Liste der installierten Messfühler und Zähler sowie deren Auflösung und Genauigkeit.

Tab. 2-1: Auflistung der installierten Zähler

Art	Beschreibung	Dimension	Anzahl
Warmwasserzähler Sensus Resida MUK	ein Zähler je Wohnung DG je 2 Zähler	Messkapselzähler mit Qn 1,5 m ³ /h	68
Kaltwasserzähler Sensus Resida MUK	ein Zähler je Wohnung, DG je 2 Zähler	Messkapselzähler mit Qn 1,5 m ³ /h	68
Wärmemengenzähler Sensus Pollustat E	ein Zähler je Wohnung	Ultraschallzähler mit Qn 0,6 m ³ /h	61
Energiezähler Haushalts- strom Görlitz Echolon	ein Zähler je Wohnung in der Ver- teilung im Keller jedes Hauses	Haushaltsdrehstromzähler 5 (100) A	61
Energiezähler Lüftungs- strom EcoCount 5(25)A	ein Zähler je Wohnung, händische Ablesung	Hutschienezähler 5(25)A	61
Energiezähler Technik- strom Görlitz Echolon (im Heizhaus, Technik- raum bzw. im Keller)	Zentrale Anlagentechnik, Wasser- aufbereitung, hausweise Anlagen- technik (3) Allgemeinstromzähler (7) Einspeisung BHKW Hilfsstrom BHKW	Drehstromzähler 5 (100) A	14
Wärmemengenzähler Technik (im Keller) Sensus Pollustat E	Einspeisung (th.) BHKW, Einspei- sung Gaskessel Abgabe nach Pufferspeicher, Warmwasserzapfung (3), Nacher- hitzung WW (3), Heizung ges. je Block (3)	Qn 2,5 m ³ /h Qn 1,5 m ³ /h	2 10
PolluCom E	Einspeisung Solar (3) (mit Gly- kol/Wasser als Medium)	Qn 1,5 m ³ /h	3
Verbrauchszähler Erdgas	Elster BK-G16T, Klasse 1,5	Qmax 25 m ³ /h	1
Temperaturfühler	Außentemperatur		1
Betriebsstundenzähler (im Heizhaus)	Rapsölpumpe	230 V	1

Tab. 2-2: Auflösung und Genauigkeit der Messfühler bzw. Zähler

Art	Genauigkeit	Auflösung
Warm- /Kaltwasserzähler	Klasse B	10 Liter
Elektrische Energiezähler (Haushaltsstrom u. Technik)	Klasse 1 für Wirkenergie	0,001 kWh
Elektrische Energiezähler (Lüftungsstrom)	Klasse 1 (entspricht $\pm 11,5$ W)	0,1 kWh
Wärmemengenzähler (Ultraschall; Solar Flügelrad mit fest eingestelltem Glykolgehalt)	Klasse 2 (B)	1 kWh
Temperaturfühler	PT100 DIN A ($\pm 0,15$ K)	0,1 °C
Betriebsstundenzähler	± 10 %	0,01 h
Volumenzähler Erdgas	± 5 %	0,01 m ³
Temperatur-Feuchte-Datenlogger (Hobo U10)	$\pm 0,45$ °C ¹ (zw. 10 °C und 30 °C) $\pm 3,5$ % (zw. 25 % und 85 % rel. F.)	0,14 °C 0,07 % rel. Feuchte
Temperatur-Feuchte-Beleuchtung-Datenlogger (Hobo U12)	$\pm 0,3$ °C ¹ (zw. 10 °C und 30 °C) $\pm 2,5$ % typisch ($\pm 3,5$ % maximal)	0,03 °C 0,03 % rel. Feuchte

2.2 Datenverfügbarkeit

Beim Betrieb einer Messdatenerfassung über mehrere Jahre kann es immer wieder zu Datenausfällen kommen. Grundsätzlich wurden die verfügbaren Messdaten aller drei Bauabschnitte sowie der Heiz- und Semizentralen zur Auswertung berücksichtigt, teilweise ergänzt um Handablesungen. Ein Mieter im ersten Bauabschnitt nimmt nicht am Messprogramm teil, so dass aus dieser Wohnung keine Informationen vorliegen. Soweit nötig, wurden die Verbräuche dieser Wohnung mit Mittelwerten des gesamten Bauabschnitts korrigiert. Im zweiten (18 Wohneinheiten) und dritten (22 Wohneinheiten) Bauabschnitt nahmen alle Mieter am Messprogramm teil.

Der Monatsmittelwert der Datenverfügbarkeit für Wärme, Wasser und Strom ist in Abb. 2-6 grafisch dargestellt. Die Stundenwerte der Haushaltsstromverbräuche liegen für den 1. Bauabschnitt ab 24.06.2010 komplett vor, für den 2. Bauabschnitt ab dem 13.09.2010 und für den 3. Bauabschnitt überwiegend ab 04.07.2011, vollständig aber erst ab 12.09.2011. Bei zwei Wohnungen sind danach nochmals Datenlücken aufgetreten bzw. der Mieter hat einen anderen Tarif mit einem speziellen Zähler beauftragt, der nicht mehr ausgelesen werden konnte. Diese Zähler wurden bei der Berechnung von Kennwerten nicht berücksichtigt.

Bei den Wärmemengen- und Wasserzählern traten immer wieder Datenlücken auf, teilweise periodisch immer einige Stunden am Tag, die nicht oder nur teilweise sinnvoll ergänzt werden konnten. Die Auswertung der Monatssummen ist davon jedoch kaum betroffen. Bei der Anlagentechnik konnten fast alle Datenlücken durch Handablesung auf Basis von Monatswerten sinnvoll ergänzt werden,

¹ Die Datenlogger wurden vor und nach der Messphase jeweils gemeinsam in einem abgeschlossenen Behältnis einer Vergleichsmessung mit einem kalibrierten Temperaturmessgerät unterzogen; vor und nach der Messphase lagen Abweichungen innerhalb der angegebenen Toleranzen

lediglich bei dem Warmwasser-Wärmemengenzähler im zweiten Bauabschnitt, bei dem der Vorlauf-temperaturfühler nicht korrekt montiert war, war dies bis zum 07.02.2011 nicht möglich.

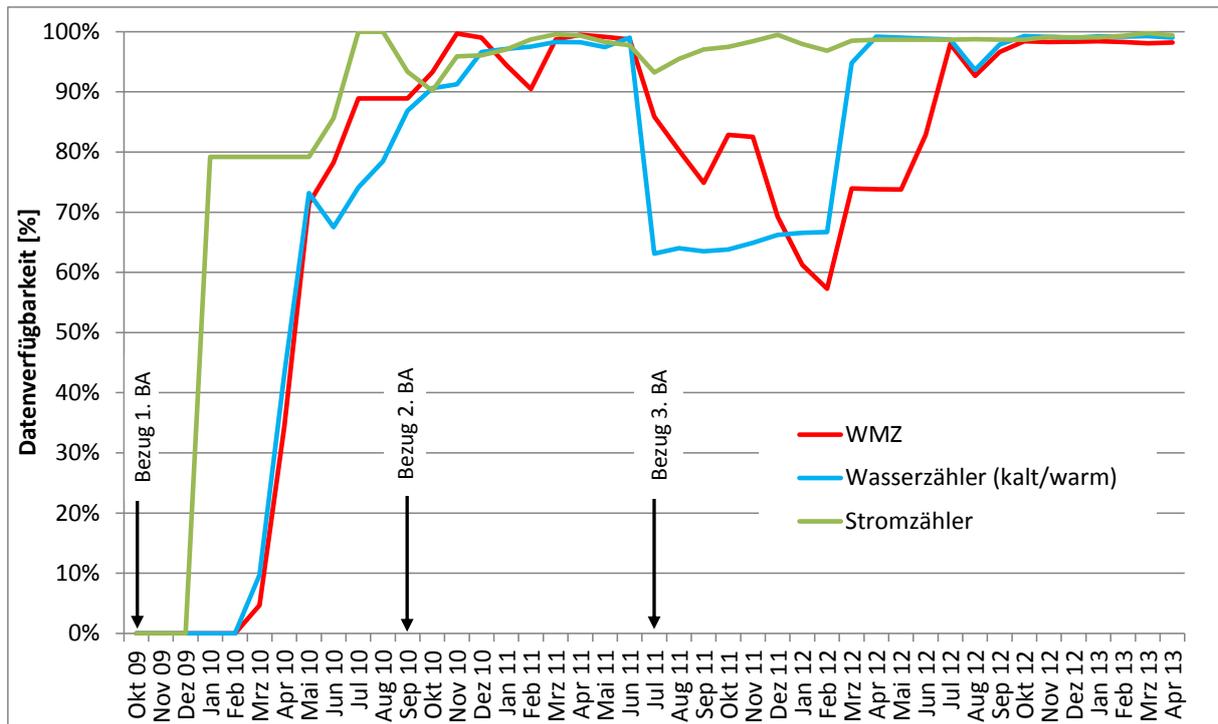


Abb. 2-6: Darstellung der Datenverfügbarkeit auf Basis von Stundendaten im Messzeitraum für Wärme, Wasser und Strom

Der Betriebsstundenzähler, der zur Bestimmung des Rapsölvolumens verwendet werden sollte, das dem BHKW zugeführt wurde, lieferte zwar Betriebszeiten der Pumpe, bei der Auswertung der Daten zeigte sich jedoch, dass die Pumpe das Rapsöl permanent zwischen Tank und Vorratsbehälter am BHKW im Kreis pumpt, auch wenn keine Rapsölabnahme stattfindet, so dass daraus keine brauchbaren Daten gewonnen werden konnten. Der Nutzungsgrad des BHKW wird in Kapitel 4.1.1 auf Basis von Tankrechnungen abgeschätzt.

Der Außentemperaturfühler bereitete Probleme bei der Messdatenerfassung, so dass er schließlich nicht mehr abgefragt wurde. Stattdessen wurden Messdaten der Station Frankfurt-Ost verwendet (siehe Kapitel 2.3).

Die Datenlogger für die Messung von Raumtemperatur und -feuchte lieferten zuverlässige Ergebnisse. Durch die Verlängerung des Messprogramms von Ende Frühjahr 2012 auf April 2013 sind jedoch besonders im ersten Bauabschnitt einige Batterien vor Ende der Messphase Anfang 2013 ausgefallen (Abb. 2-7).

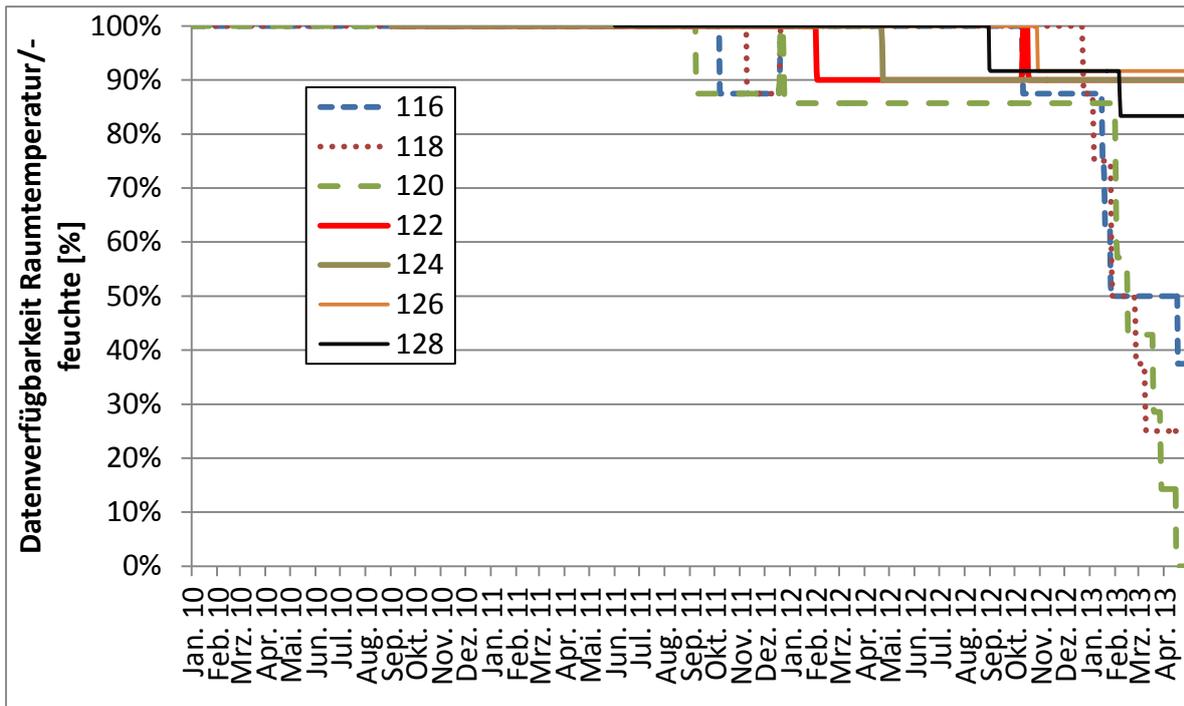


Abb. 2-7: Datenverfügbarkeit der Temperatur- und Feuchtwerte aus den Wohnungen im Messzeitraum

2.3 Klimadaten

Der vor Ort montierte Außentemperaturfühler konnte wegen Softwareproblemen nicht verwendet werden. Für die Auswertungen wurden stattdessen Klimadaten der Wetterstationen Frankfurt-Ost (Außentemperatur und -luftfeuchte) sowie Riedstadt (Temperatur und Globalstrahlung für Klimakorrektur der PHPP-Bedarfswerte [PHPP 2007]) des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie herangezogen [HLUG]. Die Daten stehen als Stundenmittelwerte zur Verfügung.

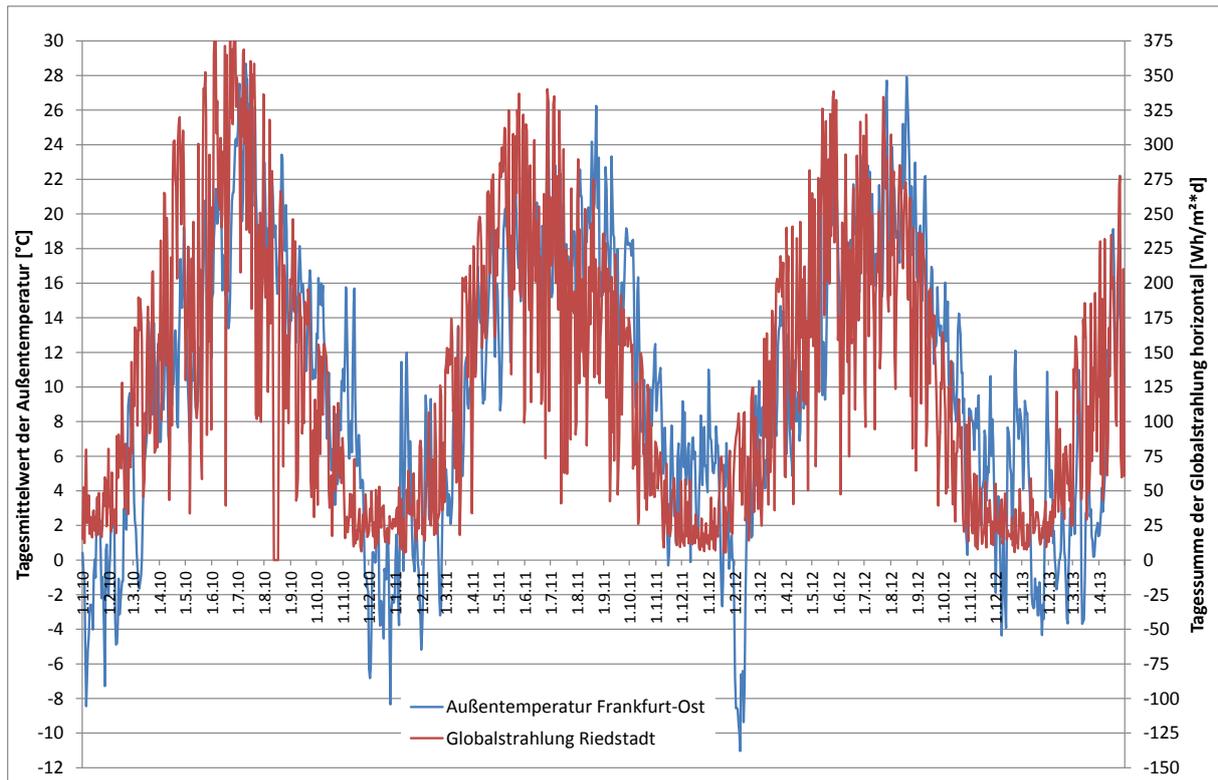


Abb. 2-8: Tagesmitteltemperaturen der Station Frankfurt-Ost sowie Tagessummen der Globalstrahlung (horizontal) der Station Riedstadt im Messzeitraum

Abb. 2-8 zeigt die Tagesmittelwerte der Außentemperatur der Messstation Frankfurt-Ost und die Tagessummen der horizontalen Globalstrahlung der Stationen Riedstadt (34 km südwestlich von Frankfurt). Der Jahresverlauf von Außentemperatur und Globalstrahlung ist in allen Jahren etwa gleich, wobei die Minima in den Wintermonaten sich deutlich unterscheiden. In den Heizperioden 2009/10 bis 2011/12 lagen die niedrigsten Tagesmitteltemperaturen unter -5 °C , im Februar 2012 sogar bis -10 °C . In der Heizperiode 2012/13 sanken die Temperaturen nicht so weit ab, aber sie blieb deutlich länger (bis in den März) um den Gefrierpunkt und gleichzeitig stieg auch die Solarstrahlung im März deutlich später an. Somit waren die Klimabedingungen in den beiden Hauptauswertezwischenräumen (Heizperioden 2011/12 und 2012/13) deutlich unterschiedlich. Auch die Sommerperioden sind schwer miteinander zu vergleichen: im Juli 2010 herrschte eine längere Phase mit hohen Außentemperaturen (Monatsmittelwert: $22,6\text{ °C}$) und gleichzeitig hoher Solarstrahlung. In den Sommern 2011 (August $19,8\text{ °C}$) und 2012 (August $21,3\text{ °C}$) lagen die höchsten Monatsmitteltemperaturen deutlich niedriger. Auch das Solarstrahlungsangebot war in den Sommern 2011 und 2012 deutlich geringer.

Tab. 2-3 zeigt für die beiden Auswerteziträume Juli 2011 bis Juni 2012 sowie Mai 2012 bis April 2013 die mittlere Außentemperatur, die Heizgradtage bezogen auf eine Heizgrenztemperatur von 12 °C, die zugehörigen Heiztage und die Globalstrahlung. Zusätzlich sind zum Vergleich die Daten des langjährigen Mittels der Messtation Frankfurt Flughafen bei den Temperaturen sowie die Globalstrahlung aus dem PHPP-Wetterdatensatz für

Tab. 2-3: Klimadaten Frankfurt: Temperaturdaten Frankfurt-Ost, Globalstrahlung Riedstadt sowie langjähriges Mittel Frankfurt

	Außen- temperatur	Heizgrad- tage HGT12	Heiztage Ht12	Solar- strahlung
	°C	kd	d	kWh/(m ² a)
2011/12	11,2	1298	194	1014
2012/13	10,7	1516	196	976
Klima PHPP FFM	10,4	1458	204	1046

langjähriges Mittel Frankfurt Flughafen
PHPP-Datensatz Frankfurt

Frankfurt dargestellt. Die Außentemperatur lag 2011/12 ca. 0,5 K über der von 2012/13 und beide über dem langjährigen Mittel. Bei den Heizgradtagen, die im Gegensatz zu den Gradtagzahlen für Gebäude mit einer hohen Ausnutzung der internen und solaren Gewinne besser zu Klimakorrektur geeignet sind, liegt das Jahr 2011/12 um 11% unter dem langjährigen Mittel, das Jahr 2012/13 um 4 % darüber. Die Folge ist, dass die Heizwärmeverbräuche 2011/12 tendenziell sinken, 2012/13 leicht ansteigen. Die Anzahl der Heiztage ist in beiden Auswerteziträumen etwa gleich und ca. 5 % niedriger als im langjährigen Mittel. Die Globalstrahlung lag 2011/12 um 3 % unter den PHPP-Daten, 2012/13 um 7 % darunter, sodass die solaren Gewinne in beiden Jahren niedriger waren und der Heizwärmeverbrauch tendenziell stieg.

Vergleicht man die monatsweise aufgetragenen Globalstrahlungsdaten aus dem Klimadatensatz des PHPP für Frankfurt am Main mit den Messwerten der Station Riedstadt, so ergibt sich eine recht gute Übereinstimmung bei den Monatssummen (Abb. 2-9). Der Sommer wies real jeweils eine höhere Globalstrahlung auf (+8 % bis +10 %), dafür lag die Globalstrahlung im Zeitraum von Oktober 2012 bis April 2013 4 % unter den Werten des Standarddatensatzes. Der gleiche Zeitraum im Jahr davor war 13 % strahlungsreicher.

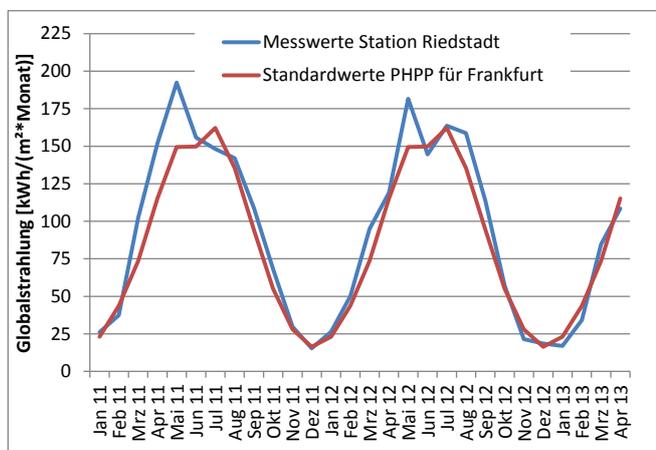


Abb. 2-9: Vergleich der Monatssumme der Globalstrahlung zwischen PHPP-Datensatz für Frankfurt am Main und Messwerte Station Riedstadt

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die beiden Messjahre 2011/12 und 2012/13, in denen alle Wohnungen vermietet waren, unterschiedliche klimatische Randbedingungen aufwiesen, so dass auch Unterschiede in den Verbräuchen zu erwarten sind.

3 Messergebnisse in den Wohnungen

Die Messergebnisse der sieben Gebäude in der Rotlintstraße werden in diesem Kapitel mit wohnungsweisen Auswertungen ausführlich dargestellt. Aus Datenschutzgründen wurde die Zuordnung der Ergebnisse zu einzelnen Wohnungen dadurch verhindert, dass bei den Messdaten alle Wohnungen eine individuelle Kennung erhalten haben, bestehend aus einem Buchstaben (A,B,C) (für den Bauabschnitt) und einer Zufallszahl zwischen 1 und der Anzahl der Wohnungen im entsprechenden Bauabschnitt. Bei allen Auswertungen ist diese Zuordnung immer gleich.

3.1 Raumtemperaturen

Um Informationen über die Temperaturen und somit über das Komfortniveau in den Wohnungen zu erhalten, wurde in jeder Wohnung ein (in den großen Dachgeschosswohnungen zwei) Datenlogger zur stündlichen Aufzeichnung von Temperatur und Raumluftfeuchte installiert, der manuell ausgelesen wurde. Die Mini-Datenlogger sind jeweils an einem zentralen Punkt der Wohnung installiert. Allerdings mussten sie an einer Stelle befestigt werden, die die Mieter nicht in der Nutzung der Wohnung störte, da dies die Gefahr der Beschädigung (z. B. durch Überstreichen) oder Entfernung erhöht hätte. Aus diesem Grund wurden sie auf einem Türrahmen in ca. 2,10 m Höhe (meist im Flur der Wohnung) befestigt, so dass sie sich außerhalb des normalen Bewegungsbereiches befinden (Abb. 2-2 und Abb. 2-3). Durch die oberhalb der Türen vorhandenen Überströmöffnungen stehen sie jedoch in Kontakt mit dem Luftaustausch innerhalb der Wohnung. Die Platzierung der Datenlogger in dieser Höhe entspricht nicht der sonst üblichen Anordnung von Temperaturfühlern in ca. 1,40 m bis 1,70 m Höhe. Durch die Temperaturschichtung im Raum ergibt sich eine etwas höhere gemessene Raumtemperatur. Zusätzlich wird im Winter durch den Betrieb der Zuluftheizung eine größere vertikale thermische Schichtung im Flur erzeugt. Abb. 3-1 zeigt exemplarisch eine gemessene Temperaturschichtung einer Wohnung. Die Temperatur in 1,40 m Höhe liegt danach ca. 0,9 K unter derjenigen in Datenloggerhöhe. Exemplarisch wurde in weiteren Wohnungen im Winter 2012/13 die Temperaturschichtung zwischen 1,40 m und 2,10 m erfasst, die im Mittel bei 1,0 K lag. Bei einigen der folgenden Auswertungen (für den Winterfall) wurde aus diesem Grund eine Korrektur der gemessenen Temperatur um 0,9 K vorgenommen, da dies der minimal erforderlichen Temperaturkorrektur entspricht, die in allen Wohnungen festgestellt wurde. Die entsprechenden Daten sind gekennzeichnet.

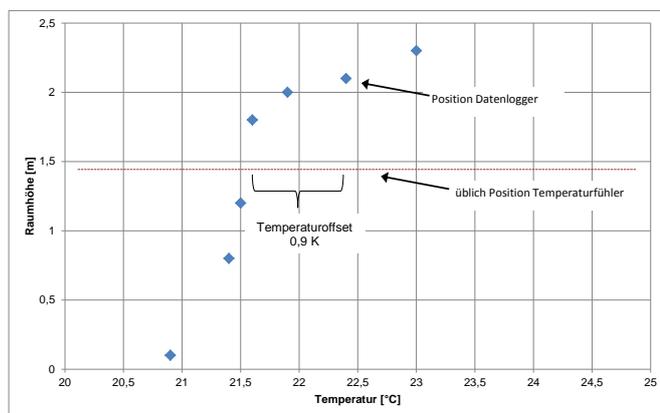


Abb. 3-1: Messwerte des Temperaturgradienten in einer Erdgeschosswohnung zur Korrektur der gemessenen Raumlufttemperaturen auf eine Messhöhe von 1,40 m - 1,70 m

Wintertemperaturen

Die gemittelten, korrigierten Raumtemperaturen der 60 ausgewerteten Wohnungen (eine Wohnung nimmt nicht am Messprojekt teil) sind in Tab. 3-1 für die Heizperioden (Oktober bis Ende März) und in Tab. 3-2 für die Kernheizzeit (November bis Ende Februar) dargestellt. In der ersten vermessenen Heizperiode eines jeden Bauabschnitts lag die Mitteltemperatur der Gebäude immer niedriger, als in den folgenden Jahren. Im ersten Bauabschnitt, der im Oktober/November 2009 bezogen wurde, wurden im Mittel 21,3 °C erreicht, in den Folgejahren stieg die Mitteltemperatur um ca. 1 K an. Im zweiten und dritten Bauabschnitt, die im September 2010 bzw. Juli 2011 bezogen wurden, lagen die Mitteltemperaturen in der Heizperiode von Anfang an bei 22 °C oder nur knapp darunter. Im Mittel ergab sich für alle vermessenen Wohnungen ein Heizperiodenmittelwert von 22,2 °C in 2011/2012 bzw. von 22,4 °C in der Heizperiode 2012/13. Das Temperaturniveau in den Wohnungen liegt somit deutlich über den im PHPP angesetzten 20 °C. Die Auswirkungen auf die Energiebilanz werden in Kapitel 3.3.1 diskutiert.

Tab. 3-1: Korrigierte Raumtemperaturen je Haus in der Heizperiode (Oktober - März)

	Haus 116	Haus 118	Haus 120	Haus 122	Haus 124	Haus 126	Haus 128	Mittelwert
2009/10	21,3	21,3	21,2					21,3
2010/11	22,6	22,2	22,0	21,9	21,8			22,0
2011/12	22,7	22,1	22,2	22,0	22,3	22,0	22,0	22,2
2012/13	22,6	22,2	22,0	22,4	22,4	22,4	22,7	22,4

Betrachtet man nur die Kernheizperiode der Passivhäuser von Anfang November bis Ende Februar (Tab. 3-2) (75 % der Heizwärme 2011/12, 60 % der Heizwärme 2012/13), so unterscheiden sich die Temperaturen kaum von denen aus Tab. 3-1. Möglicherweise sind die Thermostatventile der Zuluft-nachheizung ganzjährig auf ca. 22 °C eingestellt, so dass es nicht zu einem nennenswerten Absinken der Temperaturen in der Übergangszeit kommt, solange die Heizkreise in Betrieb sind. Die Schwankung der Temperaturen zwischen den Gebäuden ist mit 0,7 K als gering einzustufen.

Tab. 3-2: Korrigierte Raumtemperaturen je Haus in der Kernheizperiode (November - Februar)

	Haus 116	Haus 118	Haus 120	Haus 122	Haus 124	Haus 126	Haus 128	Mittelwert
2009/10	21,6	21,2	21,3					21,3
2010/11	22,4	22,3	22,1	21,9	21,8			22,0
2011/12	22,5	21,9	22,1	21,8	22,2	22,0	22,0	22,1
2012/13	22,6	22,2	21,7	22,3	22,4	22,4	22,7	22,4

Abb. 3-2 und Abb. 3-3 zeigen den Verlauf der mittleren Gebäudetemperaturen seit Beginn des Messprojekts. In Abb. 3-2 sind Tagesmittelwerte dargestellt, in Abb. 3-3 Monatsmittelwerte. Die Abbildungen zeigen, dass im ersten Winter die Temperaturen neu bezogener Gebäude niedriger liegen als in den Folgejahren. Danach liegen sie ganzjährig zwischen 21,5 °C und 24 °C. Im Sommer 2010 stiegen diese bis auf ca. 26 °C im Monatsmittel (Juli 2010). Im Sommer 2011 ist keine ausgeprägte Temperaturspitze vorhanden, im Sommer 2012 liegt die Mitteltemperatur bei 25 °C im August. Insgesamt ist nur ein geringer Jahresgang in den mittleren Raumtemperaturen vorhanden.

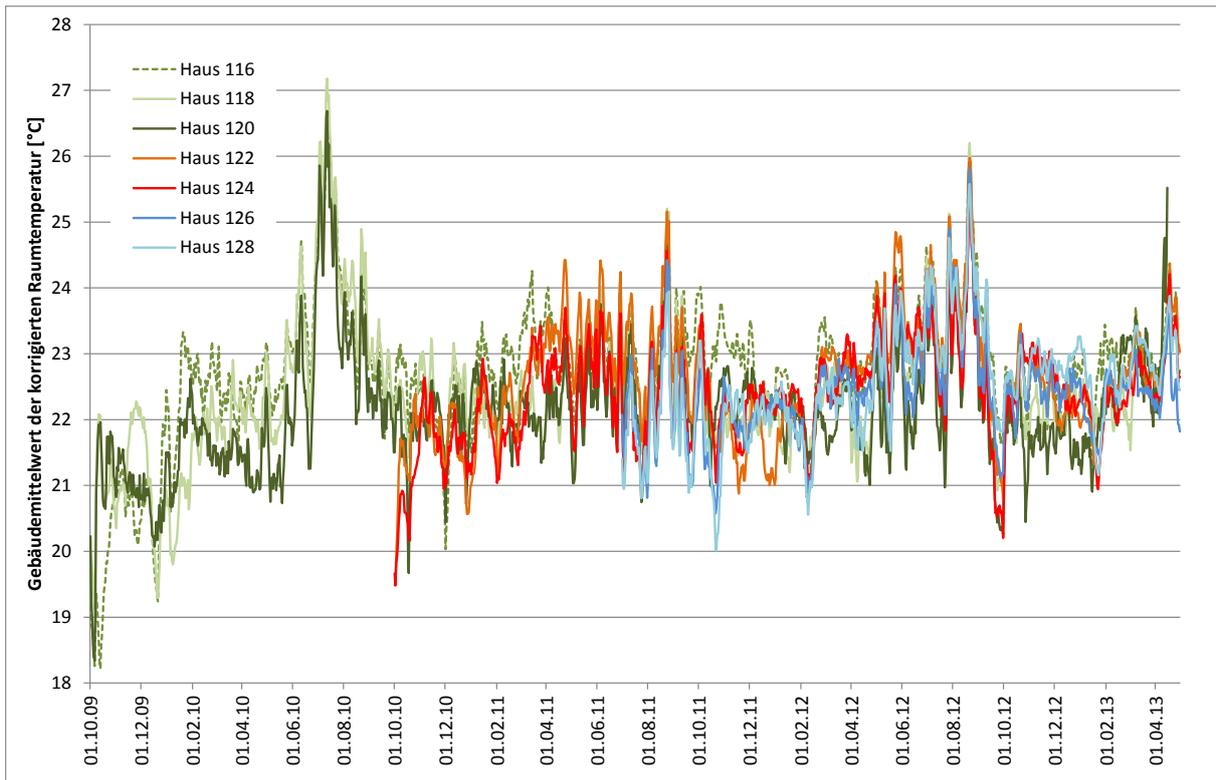


Abb. 3-2: Verlauf der korrigierten Gebäudetagesmitteltemperaturen während der Messperiode

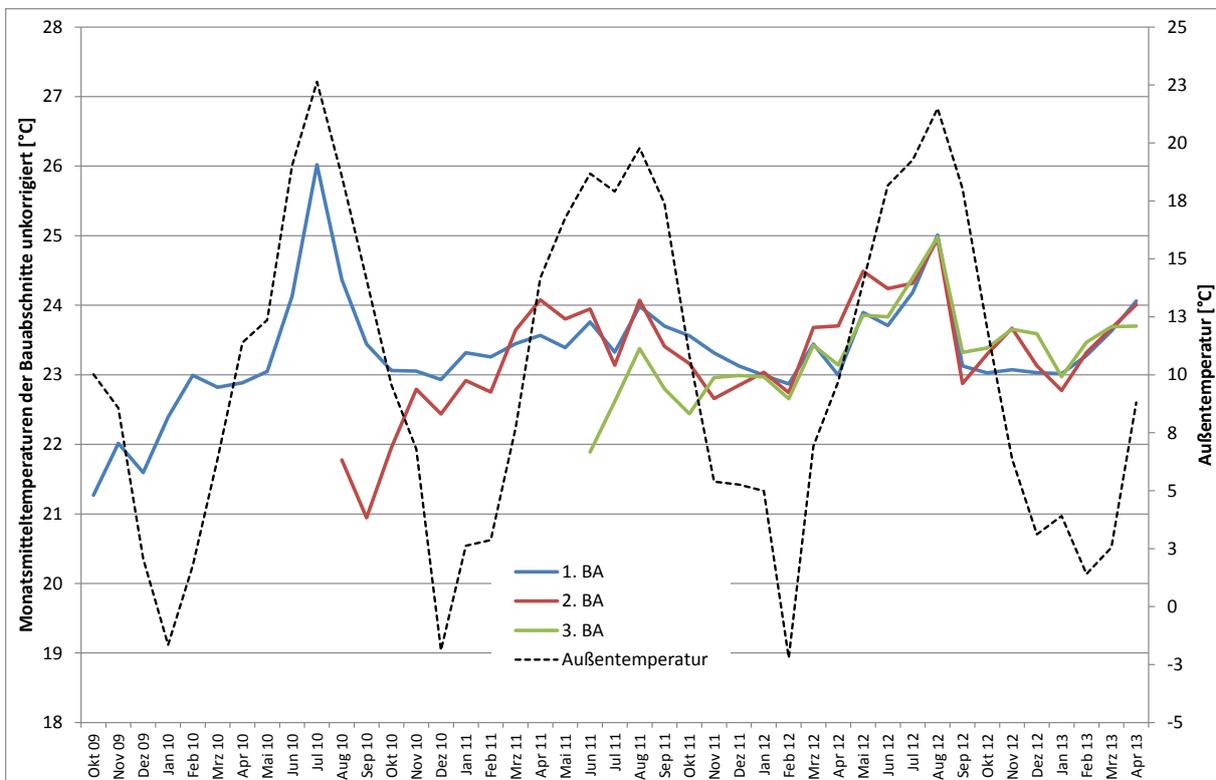


Abb. 3-3: Monatsmittelwerte der unkorrigierten Mitteltemperaturen der Bauabschnitte während der Messperiode sowie der Außentemperatur (rechte Skala)

Die Temperaturstreuung zwischen den Wohnungen ist im Winter vergleichsweise groß. Abb. 3-4 zeigt für den zweiten Bauabschnitt die Monate Januar und Februar 2011 die korrigierten Stundenwerte der Raumtemperatur der Wohnungen im Mittel, Minima und Maxima, den Mittelwert +/- Standardabweichung sowie die Außentemperatur. Im Mittel ist ein leichter Einfluss der Außentemperatur auf die gemessenen Raumtemperaturen erkennbar. Der Mittelwert schwankt in dieser Zeit zwischen 21 °C und 23 °C. Die Tatsache, dass die Kurve „Mittelwert-Standardabweichung“ relativ konstant 1 K unter dem Mittelwert verläuft, zeigt, dass die Schwankungen nach unten vergleichsweise gering ausfallen. Allerdings gibt es eine Wohnung, in der die Raumtemperatur zeitweise deutlich absinkt (Minimumlinie). Hier ist zu berücksichtigen, dass, wenn die Wohnung zu diesem Zeitpunkt nicht beheizt wurde, der Korrekturfaktor für die Raumtemperatur deutlich zu hoch ausfällt und die reale Temperatur höher liegen wird. Die Kurve für „Mittelwert+Standardabweichung“ schwankt weniger von der Außentemperatur beeinflusst zwischen 23 °C und 24 °C. Die korrigierten Maximalwerte liegen fast immer zwischen 24 °C und 26 °C. Insgesamt ergibt sich im Winter eine deutliche Differenzierung der Raumtemperaturen der Wohnungen auf vergleichsweise hohem Niveau.

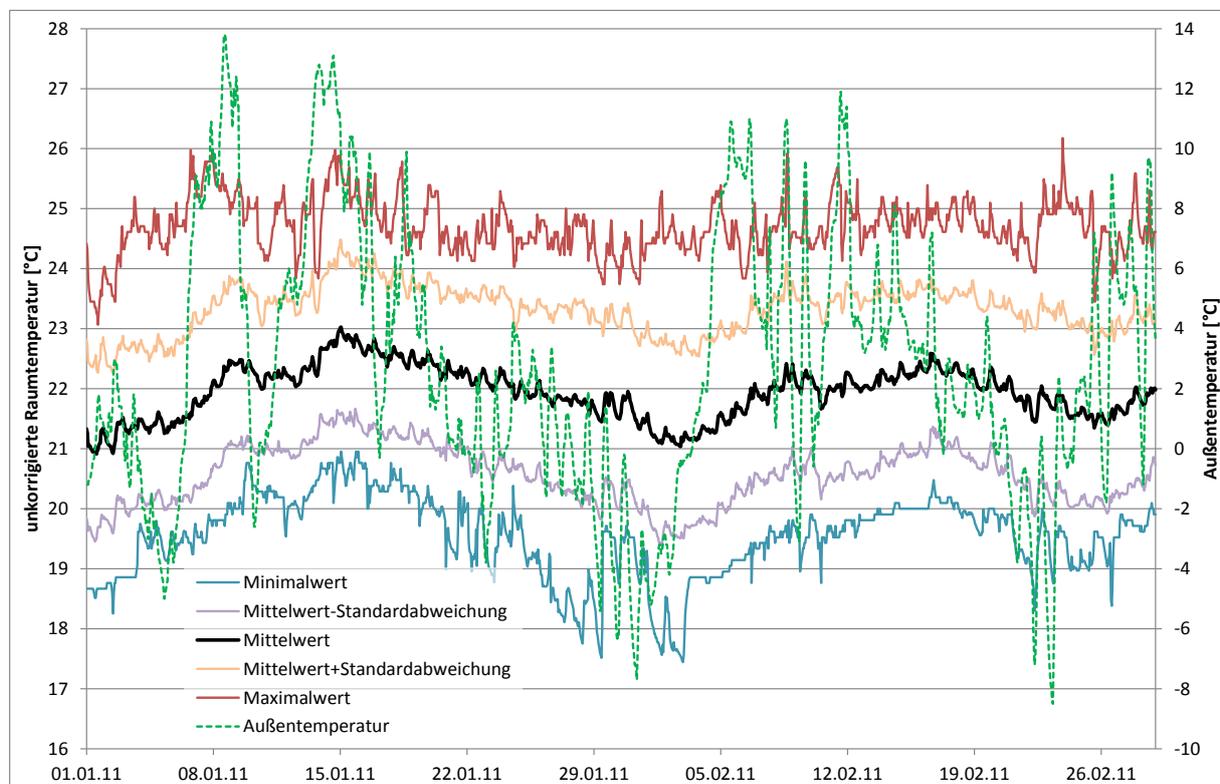


Abb. 3-4: Korrigierte Raumtemperaturen im zweiten Bauabschnitt im Januar und Februar 2011 sowie Außentemperatur (rechte Skala)

Abb. 3-5 zeigt noch einmal für den gesamten Messzeitraum und für alle Wohnungen die unkorrigierten Stundenwerte der Raumtemperatur, Minima und Maxima sowie den Mittelwert +/- Standardabweichung. Es ergibt sich eine sehr starke Differenzierung der Temperaturen in den Gebäuden mit deutlichen Ausreißern nach oben und nach unten. Temperatureinbrüche in einzelnen Wohnungen werden wahrscheinlich durch verstärkte Fensterlüftung verursacht, Temperaturspitzen treten vor allem im Sommerhalbjahr in einzelnen Wohnungen auf (siehe „Sommertemperaturen“).

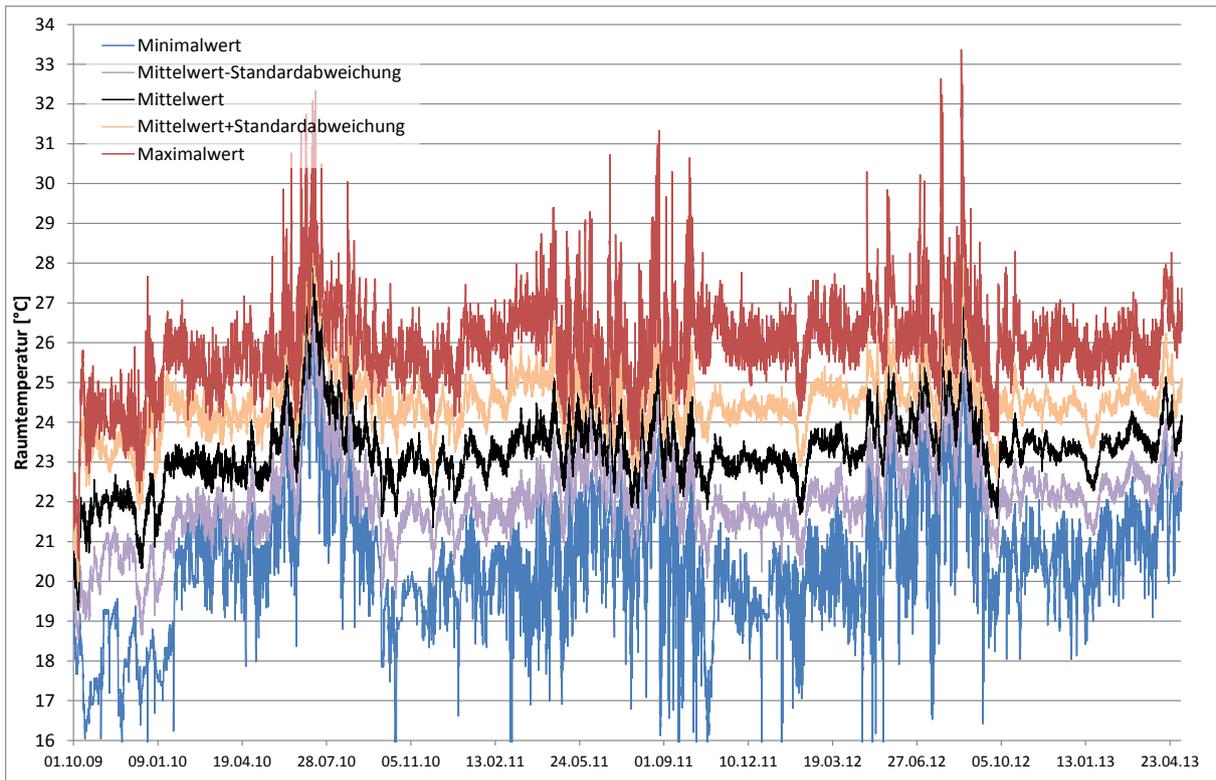


Abb. 3-5: Stundenwerte der unkorrigierten Mitteltemperaturen der Wohnungen während der gesamten Messperiode

Im Rahmen der Mieterbefragung im Frühjahr 2012 wurden auch die Temperatureinstellung am Raumthermostat sowie die Zufriedenheit mit der Raumtemperatur differenziert nach Raumnutzung abgefragt. Abb. 3-6 zeigt die gemessene Raumtemperatur sortiert nach berichteter Thermostateinstellung im Wohnzimmer aufsteigend sortiert. Sieben Wohneinheiten gaben an, eine Temperatur von unter 20 °C am Thermostat eingestellt zu haben, die mittlere Temperatur lag in diesen Wohnungen aber bei 21,9 °C. Mögliche Ursache für die deutlich höheren Temperaturen sind die Wärmeströme innerhalb der Gebäude, so dass sich auch bei niedriger Thermostateinstellung vergleichsweise hohe Temperaturen einstellen. Die meisten Mieter (23) gaben an Temperaturen von 20 °C bis 22 °C einzustellen. Allerdings lag nur bei 7 Wohnungen das Temperaturniveau innerhalb dieser Spanne (grüne Balken), die anderen darüber, wobei die Mitteltemperatur bei 22,3 °C lag. Diese Mitteltemperatur erreichten auch diejenigen, die angaben, ihren Thermostat auf 23 °C bis 25 °C eingestellt zu haben. Allerdings lag nur bei drei von 13 Wohnungen die Temperatur im eingestellten Bereich. Gründe für die Abweichung können Absenkungen bei Abwesenheit sein, die zu niedrigeren Mitteltemperaturen führt, zu geringe Lüftungsstufe oder zu geringe Heizleistung, um das eingestellte Temperaturniveau zu erreichen. Schließlich gaben 8 Mieter an, Temperaturen von über 25 °C am Raumthermostat eingestellt zu haben. Diese Temperatur wurde von keiner der Wohnungen im Heizperiodenmittel erreicht. Hier muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Messwerte im Flur erfasst wurden und nicht mit den Wohnzimmertemperaturen identisch sein müssen.

Beim Auslesen der Temperaturwerte der Datenlogger vor Ort wurde teilweise festgestellt, dass in einigen Wohnungen die Raumthermostate zwar auf 20 °C eingestellt waren, die realen Temperaturen aber deutlich höher lagen. Somit könnte möglicherweise ein Teil der erhöhten Temperaturen neben den Wärmeströmen innerhalb des Gebäudes auch auf ein ungenaues Regelverhalten der

Raumthermostate zurückzuführen sein. Dies kann umgekehrt auch für Wohnungen mit niedrigeren Raumtemperaturen als am Thermostat eingestellt gelten.

Trotz dieser häufigen Abweichungen zwischen eingestellter Wunschtemperatur und (korrigierter) gemessener Raumtemperatur gaben 86 % (43 Wohnungen) an, dass sie mit den realen Temperaturen zufrieden waren (Abb. 3-7). Bei den Unzufriedenen gibt es zwei Wohnungen mit Temperaturen von über 23 °C, bei drei Wohnungen lag die gemessene Raumtemperatur zwischen 20 °C und 21 °C.

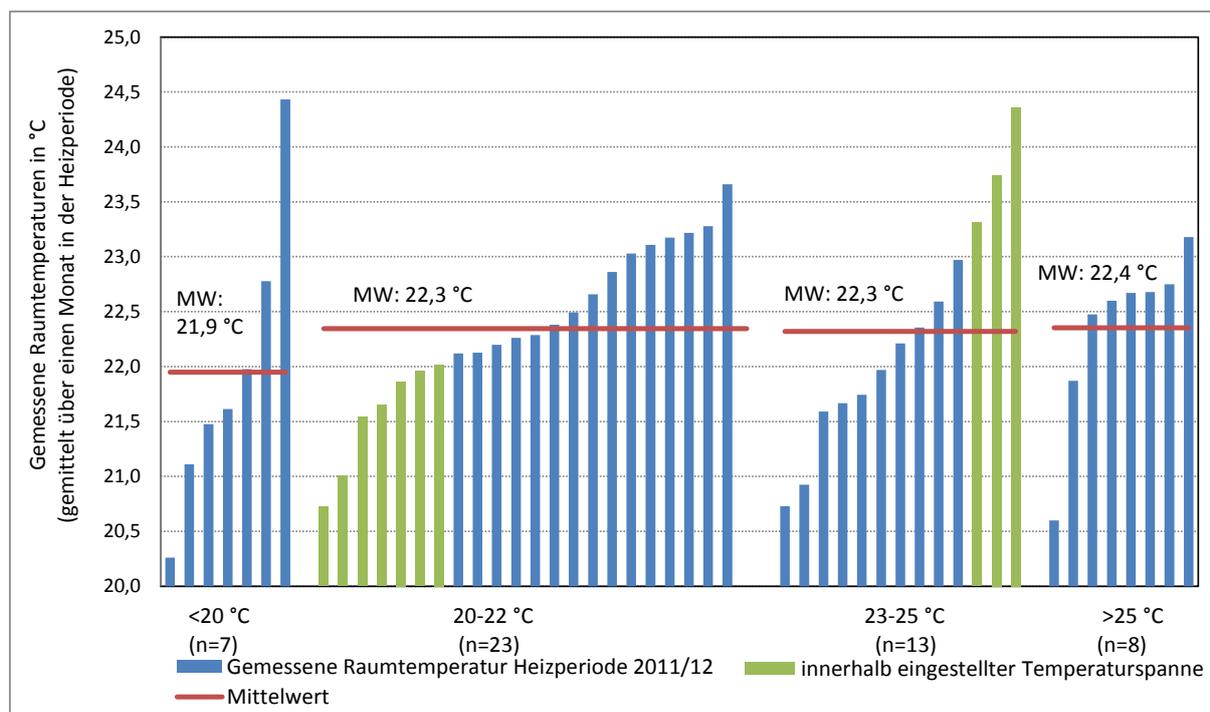


Abb. 3-6: Gemessene Raumtemperaturen und berichtete Temperatureinstellung am Raumthermostat bei Anwesenheit (aktualisiert nach [IWU 2012])²

² Die Unterschiede in den Raumtemperaturen zwischen den Auswertungen in [IWU 2012] auf Basis der Messdaten Mitte Nov. bis Mitte Dez. 2011 und den in Abb. 3-6 und Abb. 3-7 dargestellten Ergebnissen für die gesamte Heizperiode sind mit ca. 0,1 K gering.

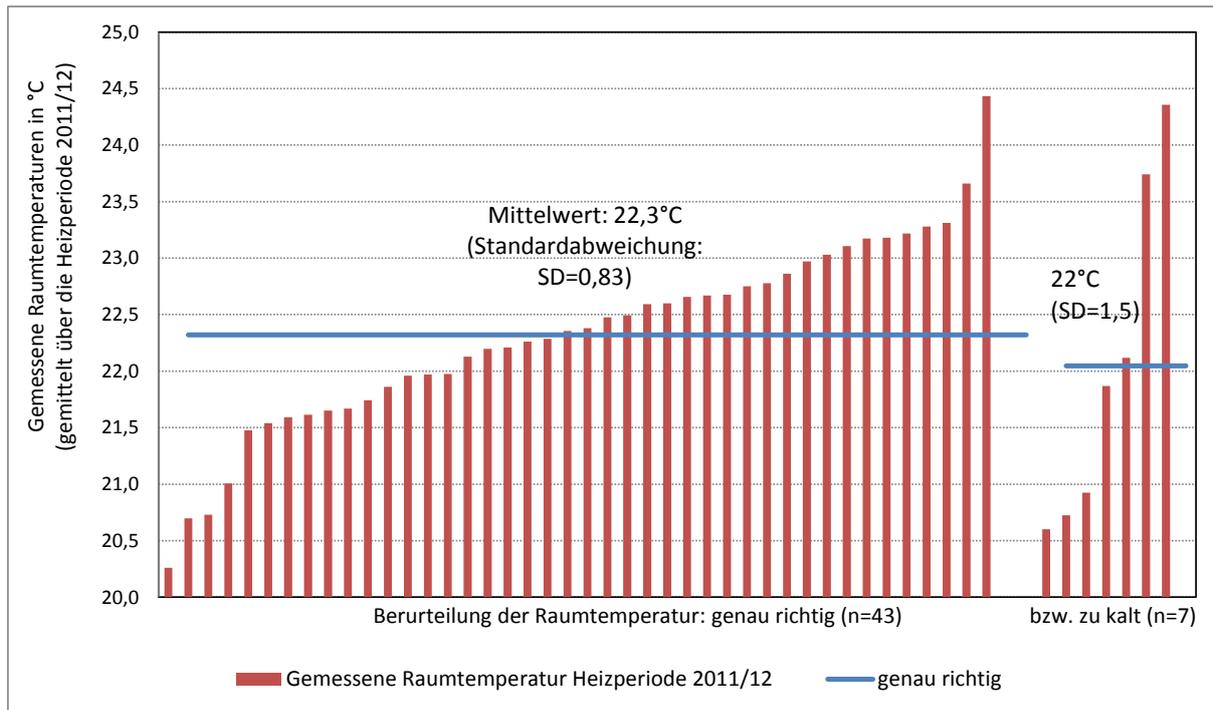


Abb. 3-7: Gemessene Raumtemperaturen und Zufriedenheit mit der Temperatur im Wohnzimmer tagsüber (aktualisiert nach [IWU 2012])²

Sommertemperaturen

Um den Wohnkomfort im Sommer beurteilen zu können, sind in Abb. 3-8 die unkorrigierten Raumlufttemperaturen des ersten Bauabschnitts von Ende Juni 2010 bis Ende Juli 2010 dargestellt. Dieser Zeitraum mit einer mittleren Außentemperatur von 22,6 °C im Juli und Anfang Juli bis zu 36 °C Außentemperatur tagsüber und teilweise tropischen Nächten mit Temperaturen über 20 °C stellten extrem ungünstige Randbedingungen dar. In einigen Wohnungen bleiben auch in dieser Zeit die Raumtemperaturen unter 26 °C, bei anderen Wohnungen schwanken die Raumtemperaturen teilweise direkt mit den Außentemperaturen (Spitzenwert Tagesmittel der Raumtemperatur: 28,6 °C), was darauf hindeutet, dass dort auch tagsüber die Fenster häufig geöffnet sind, was zu einer schnellen Aufheizung der Wohnungen führte. Die Spreizung zwischen der kühlestn und der wärmsten Wohnung liegt bei ca. 3,2 K. Nach Abklingen der hohen Außentemperaturen sanken bei den meisten Wohnungen die Raumtemperaturen sehr schnell unter 26 °C ab, einzelne Wohnungen bleiben aber auf einem vergleichsweise hohen Niveau. Möglicherweise waren in diesen Wohnungen die Mieter zu dieser Zeit in Urlaub, so dass unter Umständen weder die Verschattung heruntergelassen war, noch eine Nachtlüftung betrieben wurde. Die Dachgeschosswohnungen liegen bei der Temperaturspitze um den 10. Juli 2010 im oberen Bereich und werden unten nochmals detailliert dargestellt.

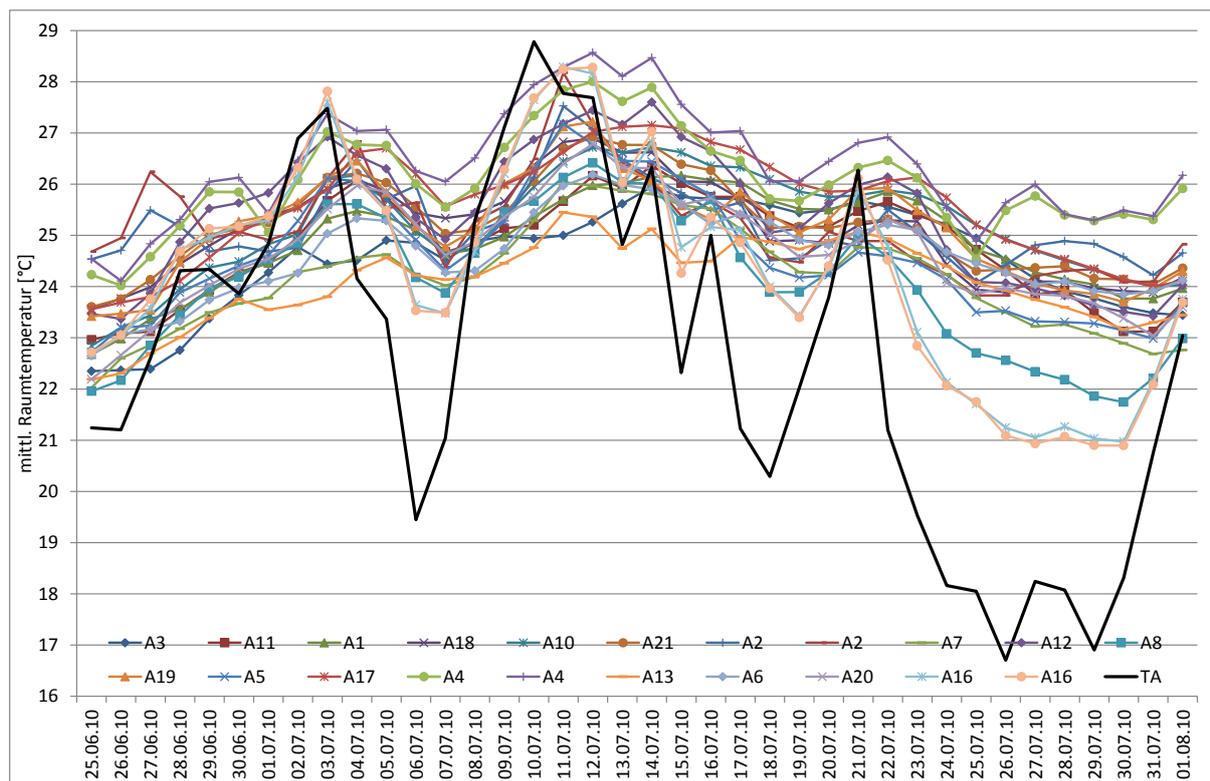


Abb. 3-8: Unkorrigierte Tagesmitteltemperaturen der Wohnungen des ersten Bauabschnitts im Juli 2010 während der Phase mit den höchsten Außentemperaturen in der Messperiode

Tab. 3-3 zeigt für die sieben Gebäude die mittleren Raumtemperaturen in den Sommermonaten Juli und August für die Jahre 2010 bis 2012. Die Schwankung der Mittelwerte zwischen den einzelnen Häusern liegt zwischen 22,0 °C und 23,1 °C im Jahr 2011 und zwischen 23,2 °C und 24,0 °C im Jahr 2012. Im Juli 2010 trat die oben beschriebene längere Hitzeperiode auf (siehe Abb. 3-8), so dass die Sommertemperaturen hier mit 23,7 °C bis 24,5 °C über denen der Folgejahre lagen.

Tab. 3-3: Mittlere Raumtemperaturen je Haus in den Monaten Juli und August

	Haus 116	Haus 118	Haus 120	Haus 122	Haus 124	Haus 126	Haus 128	Mittelwert
2010	24,2	24,5	23,7					23,5
2011	22,9	22,9	22,5	23,1	22,3	22,2	22,0	22,5
2012	24,0	23,7	23,2	24,0	23,3	23,6	23,8	23,7

Für 20 Tage im August 2012 sind in Abb. 3-9 die Temperaturen der Dachgeschosswohnungen dargestellt. Die Außentemperatur steigt tagsüber auf Werte zwischen 25 °C und 35 °C, sinkt nachts aber immer unter 20 °C ab. Es ergeben sich deutliche Unterschiede zwischen den Dachgeschosswohnungen. Während bei Wohnung C8 im dargestellten Zeitraum nur 79 Stunden mit Temperaturen über 26 °C auftraten, lag dieser Wert bei C15 bei 285 Stunden. Die übrigen Dachgeschosswohnungen lagen mit Werte zwischen 137 Stunden 261 Stunden dazwischen. Bei Wohnung A16 ist zu erkennen, dass die Raumtemperatur direkt mit der Außentemperatur schwankt - die Mieter somit auch tagsüber dauerlüften.

Dies zeigt, dass in den Dachgeschosswohnungen trotz überwiegend gleicher Randbedingungen (alle DG-Wohnungen sind praktisch unverschattet durch Nachbarbebauung und Bäume, alle besitzen außen liegende Verschattungen), sich sehr unterschiedliche Temperaturen einstellen. Da diese Wohnungen eine geringere thermisch aktive Speichermasse besitzen als die Bestandsgeschosse, ist hier die Nutzung der Verschattung und die Nutzung von Nachtlüftung Voraussetzung für niedrige Raum-

temperaturen im Sommer; die Messwerte zeigen aber auch, dass niedrige Raumtemperaturen auch unter diesen Bedingungen möglich sind.

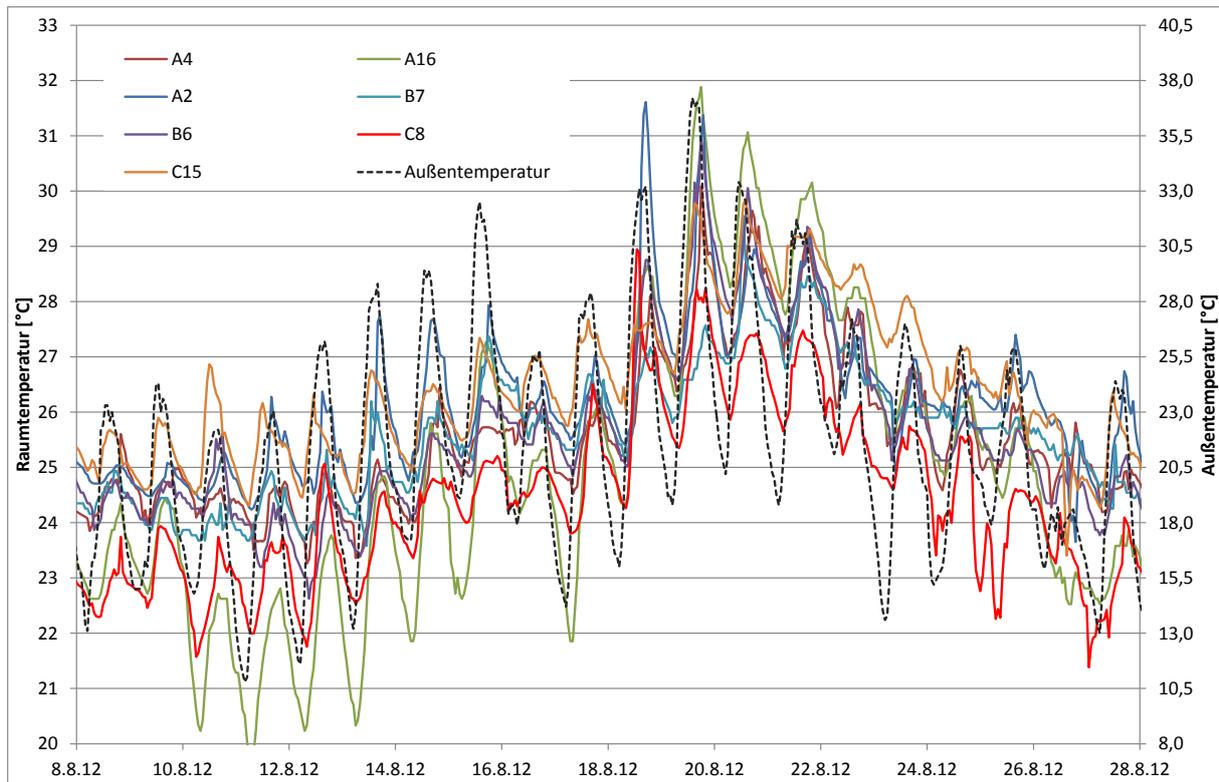


Abb. 3-9: Unkorrigierte Raumtemperaturen der Dachgeschosswohnungen während 20 Tagen im August 2012

Betrachtet man die prozentuale Häufigkeit der korrigierten Übertemperaturstunden mit Raumtemperaturen über 25 °C bei allen Wohnungen und ordnet diese nach dem Stockwerk, in dem sie liegen, dann ergibt sich Abb. 3-10. Dargestellt ist auf der X-Achse das Stockwerk, in dem die Wohnung liegt, beginnend mit 0 im Erdgeschoss. Berücksichtigt ist ein reduzierter Temperaturkorrektur aufgrund der Fühlerplatzierung in 2,10 m Höhe von 0,4 K (Wert abgeschätzt, ohne Einfluss Zuluftnacherwärmung). In allen Stockwerken wurden niedrige Werte für die Übertemperaturstunden erreicht, in jedem Stockwerk gibt es aber auch Wohnungen mit sehr häufigen Temperaturen über 25 °C. Hier ist zu berücksichtigen, dass einige Wohnungen bereits im Winter Raumtemperaturen über 25 °C aufweisen, was sich dann auch auf die sommerliche Bewertung auswirkt (die Übertemperaturstunden sind für das gesamte Jahr berechnet). Während bei 25 °C Grenztemperatur im Mittel 8 % des Jahres Temperaturen darüber herrschen, liegt bei einer Grenztemperatur von 26 °C die mittlere Überschreitung nur noch bei 1 %. Die Unterschiede zwischen den Bauabschnitten sind gering, so dass der westorientierte zweite Bauabschnitt nicht signifikant schlechter abschneidet als die südorientierten Abschnitte.

Das PHPP gibt als sommerliches Gütekriterium eine Übertemperaturhäufigkeit von 10 % bezogen auf eine Grenztemperatur von 25 °C vor. Somit erreichen die Wohnungen im Mittel die Sommeranforderungen des PHPP, trotz der teilweise hohen Wintertemperaturen einiger Wohnungen. Interessanter ist jedoch die Schwankungsbreite zwischen Wohnungen mit gleichen Randbedingungen in identischen Stockwerken. Hier kann wieder ein nennenswerter Einfluss der Mieter auf die Sommertemperatur durch das Lüftungsverhalten und die Verschattung festgestellt werden. Da eine Wohnung mit sehr hohem Elektroenergieverbrauch von fast 10.000 kWh im Jahr (siehe Kapitel 3.5) bei den Raum-

temperaturen im Sommer nicht durch außergewöhnlich hohe Raumtemperaturen auffällt, scheinen die inneren Wärmequellen eine untergeordnete Rolle zu spielen.

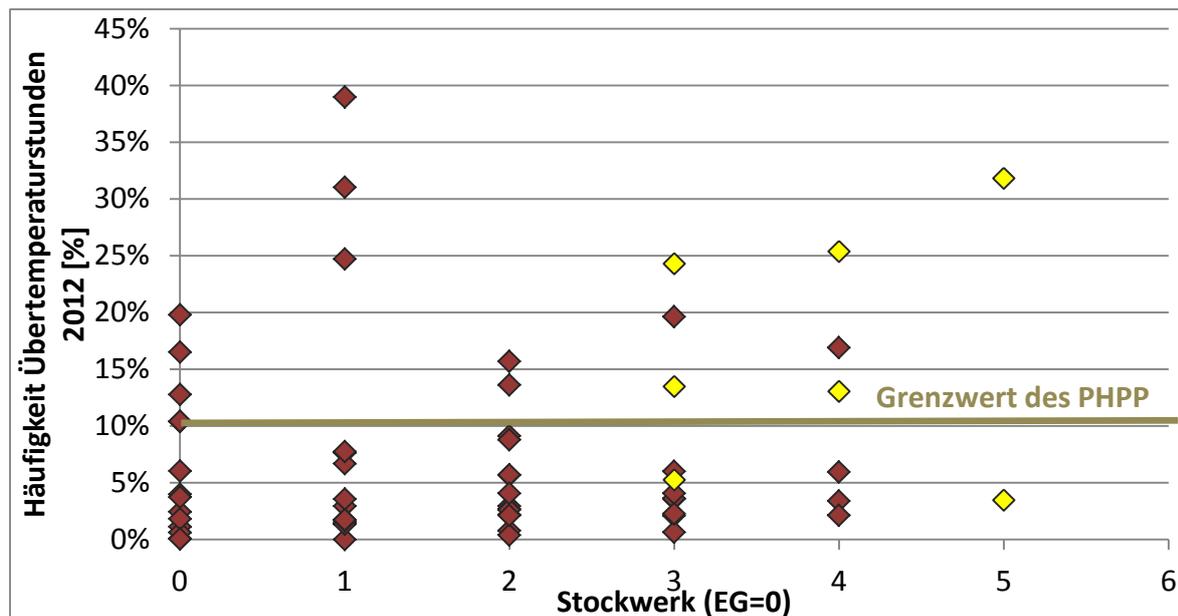


Abb. 3-10: Übertemperaturhäufigkeit der Wohnungen im Jahr 2012 nach Lage im Gebäude (angepasste Grenztemperatur: 25,4 °C); Gelb dargestellte Werte repräsentieren Dachgeschosswohnungen

3.2 Raumlufffeuchte

Ein weiterer Komfortparameter in den Wohnungen ist die relative Raumlufffeuchte. Besonders die Raumlufffeuchten im Winter werden bei Gebäuden mit mechanischer Lüftung oft diskutiert. In der Rotlintstraße muss auch hier wieder das hohe Temperaturniveau in den Wohnungen berücksichtigt werden, da die relative Luftfeuchte mit ansteigender Raumtemperatur bei gleichem absolutem Wassergehalt in der Luft sinkt. Im Folgenden sind die unkorrigierten Raumlufffeuchten der verschiedenen Häuser in den Messjahren dargestellt.

Tab. 3-4: Mittlere Raumlufffeuchte im Winterhalbjahr (Oktober - März)

	Haus 116	Haus 118	Haus 120	Haus 122	Haus 124	Haus 126	Haus 128	Mittelwert
2009/10	40,7	40,8	40,9					40,8
2010/11	35,4	35,9	36,1	44,6	40,7			38,8
2011/12	36,0	37,0	37,1	42,9	38,5	40,4	45,2	40,1
2012/13	37,7	38,8	36,4	39,8	36,2	35,9	37,4	37,4

Tab. 3-4 zeigt die mittleren Raumlufffeuchten der sieben Gebäude für das Winterhalbjahr (Oktober bis März). Bei allen Bauabschnitten fällt auf, dass die Raumlufffeuchte in der ersten Heizperiode höher liegt (40 % bis 45 % rel. F.) als in den Folgejahren. Dies ist sicherlich auf die Austrocknung der Gebäudehülle zurückzuführen, da während der Sanierung z. B. der Innenputz großflächig erneuert wurde. Aus diesem Grund können nur die Werte für die Heizperiode 2012/13 direkt miteinander verglichen werden, da sich hier alle Bauabschnitte mindestens in der zweiten Heizperiode befanden. Die Messdaten unterscheiden sich in diesem Zeitraum aber nur geringfügig (36 % bis 40 % rel. F.), wobei im zweiten Bauabschnitt leicht höhere Raumlufffeuchten gemessen wurden.

Tab. 3-5: Mittlere Raumlufffeuchte in der Kernheizperiode (November - Februar)

	Haus 116	Haus 118	Haus 120	Haus 122	Haus 124	Haus 126	Haus 128	Mittelwert
2009/10	38,8	39,8	40,1					39,6
2010/11	35,0	35,2	35,2	44,3	40,0			38,3
2011/12	34,6	35,5	35,4	42,3	37,5	38,8	44,2	38,9
2012/13	36,3	36,9	35,6	39,4	35,4	35,0	36,4	36,4

Betrachtet man nur den Kernwinter von November bis Februar (Tab. 3-5), so liegen 2012/13 die Messwerte zwischen 35 % und 39 % rel. Feuchte. Aussagekräftiger ist die Streuung der Messwerte für die einzelnen Tage der Messphase. Abb. 3-11 zeigt in schwarz die Mittelwerte aller Gebäude, den Mittelwert +/- Standardabweichung sowie die 10 %- und 90 %-Quantile. Der Mittelwert schwankt im Jahresverlauf zwischen 30 % und 60 % relativer Feuchte, wobei an einzelnen Tagen auch Werte darunter und darüber auftreten. Die 10 %-Quantile erreichen in allen Heizperioden an einzelnen Tagen mit 15 % rel. Feuchte den unteren Anzeigebereich der Datenlogger, so dass in einzelnen Wohnungen sehr niedrige Raumlufffeuchten auftraten. Gleichzeitig liegt die Kurve für das 90 %-Quantil im Winter selten unter 40 % rel. Feuchte.

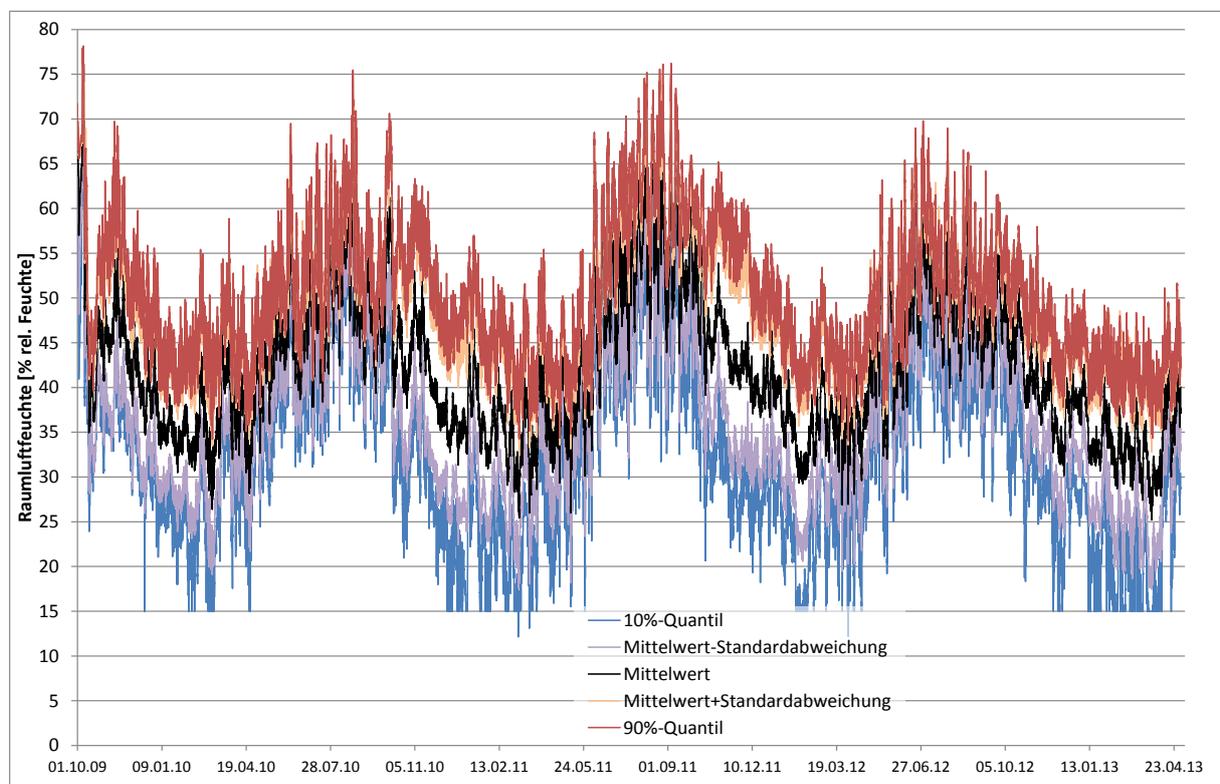

Abb. 3-11: Stundenmittelwerte der Raumlufffeuchte aller Wohnungen sowie Mittelwert +/- Standardabweichung sowie 10%- und 90%-Quantile

Abb. 3-12 zeigt für die Heizperiode 2012/13 einen Ausschnitt von Abb. 3-11, außerdem die absolute Außenluftfeuchte in Gramm je Kubikmeter Luft. Man kann gut erkennen, wie die Raumlufffeuchte von der absoluten Außenluftfeuchte beeinflusst wird. 10 %-Quantil-Werte unter 25 % rel. F. treten in Phasen mit sehr geringer absoluter Außenluftfeuchte auf (am Ende der Heizperiode häufiger, da hier wohl auch die Feuchtepufferung des Baukörpers nachlässt), die mittlere Raumlufffeuchte sinkt jedoch auch nur selten unter den Wert von 30 % rel. Feuchte. Gleichzeitig gibt es auch Wohnungen, in denen auch bei sehr trockener Außenluft die Raumlufffeuchte kaum unter 40 % rel. F. sinkt. Somit ist auch hier die Nutzung der Wohnungen (Pflanzen, ggf. Wäschetrocknen in der Wohnung, Einstellung der Lüftungsanlage) von großer Bedeutung für die Raumlufffeuchte im Winter.

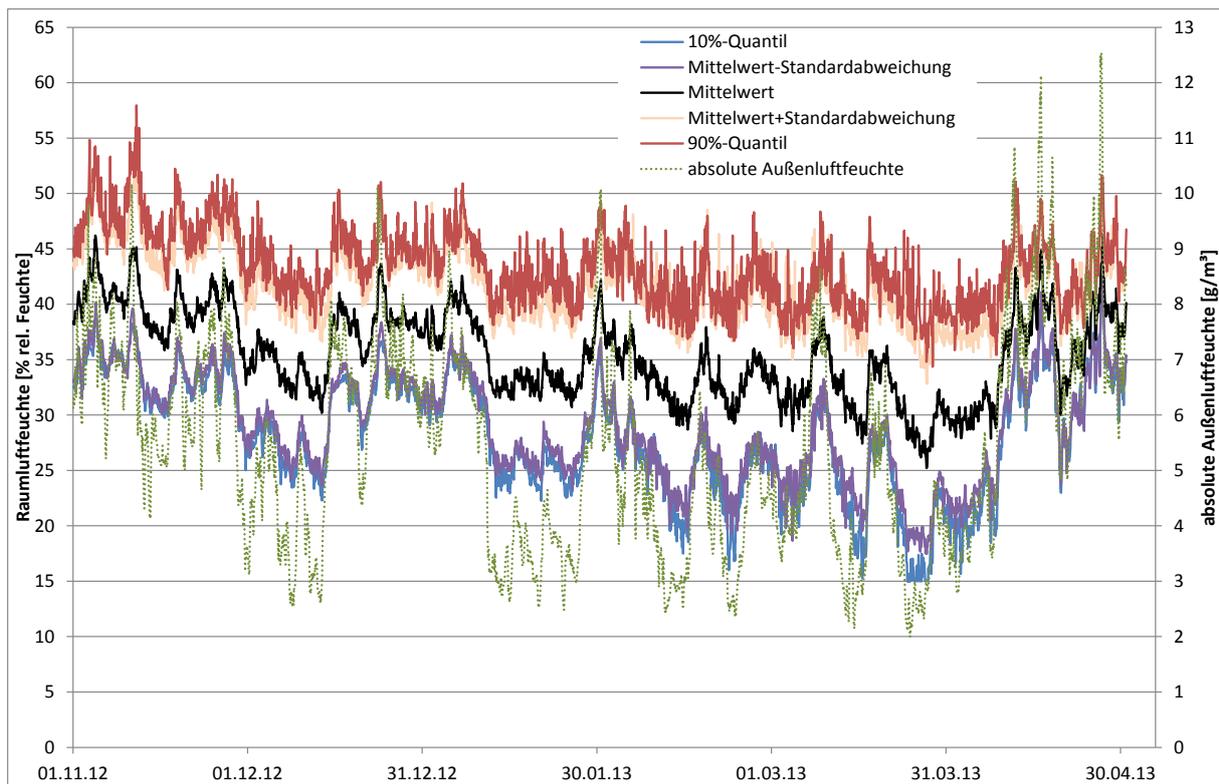


Abb. 3-12: Verlauf der Raumlufffeuchte von November 2012 bis April 2013 sowie Mittelwert +/- Standardabweichung und 10%- und 90%-Quantile und die absolute Außenfeuchte

Für das Winterhalbjahr 2012/13 (Oktober bis Ende März) sind in Abb. 3-13 die Mittelwerte der Wohnungen aufsteigend sortiert. Die Wohnung mit der niedrigsten mittleren Raumlufffeuchte lag bei 28 % rel. F., die Wohnung mit der höchsten Raumlufffeuchte bei 53 % rel. Feuchte. Im Mittel aller Wohnungen ergab sich in diesem vergleichsweise kalten Winter eine Raumlufffeuchte von 37,9 % rel. Feuchte.

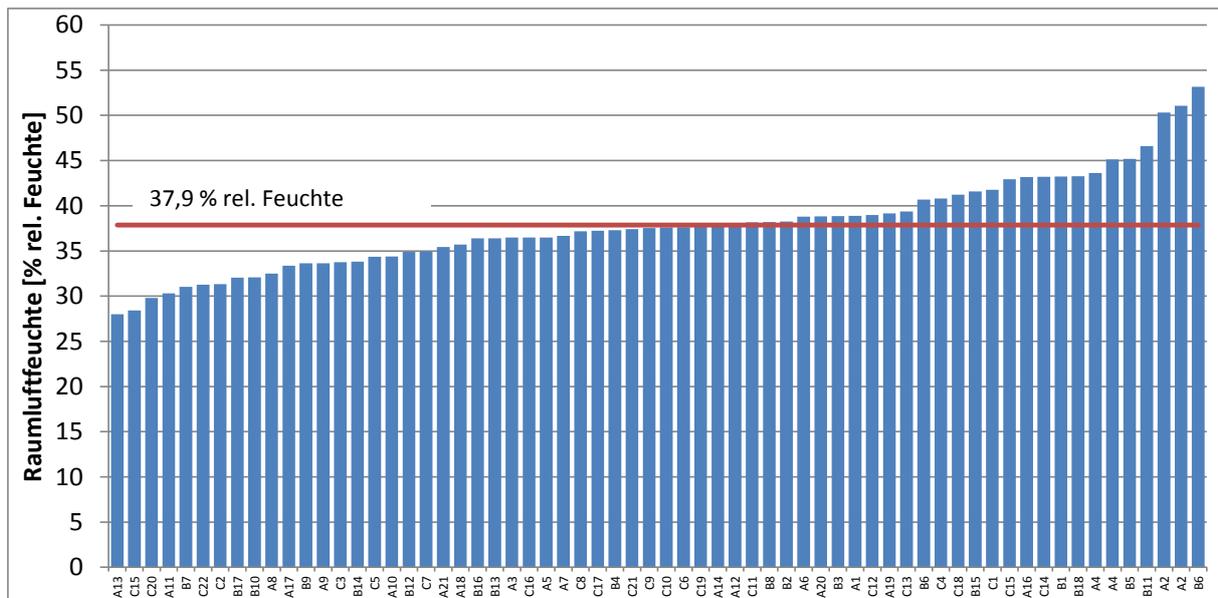


Abb. 3-13: Aufsteigend geordnete Raumlufffeuchten im Winter 2012/13 (Oktober-März)

Abb. 3-14 zeigt die relative Summenhäufigkeitskurve der Raumlufffeuchte für alle Stunden im Zeitraum 01.10.2011 bis 31.03.2012 auf Basis von Stundenwerten (rote Kurve). Es zeigt sich, dass in diesem Winterhalbjahr die relative Raumlufffeuchte in 11,5 % der Zeit einen Wert von 30 % rel. Feuchte unterschritten hat. Dies entspricht einer mittleren Unterschreitung der 30 % Schwelle, die üblicherweise als untere Komfortschwelle angesehen wird, von 23 Tagen je Wohnung. Raumlufffeuchten unter 25 % wurden im Mittel an 5,5 Tagen gemessen. Berücksichtigen muss man bei sehr niedrigen Messwerten unter 25 % rel. Feuchte, dass diese außerhalb des Messbereichs der Datenlogger lagen und der Messfehler hier größer als 3,5 % rel. Feuchte liegen kann. Korrigiert man die gemessene Raumlufffeuchte mit der korrigierten Raumlufftemperatur, so liegen die tatsächlichen Raumlufffeuchten im Mittel um ca. 1,1 %-Punkte höher. Im kälteren und trockeneren Winter 2012/13 (grüne Linie) lagen die Raumlufffeuchten noch etwas niedriger, hier wurden in 17,5 % der Zeit der Wert von 30 % Raumlufffeuchte unterschritten. Dennoch kann das Feuchteniveau im Allgemeinen als noch gut bezeichnet werden.

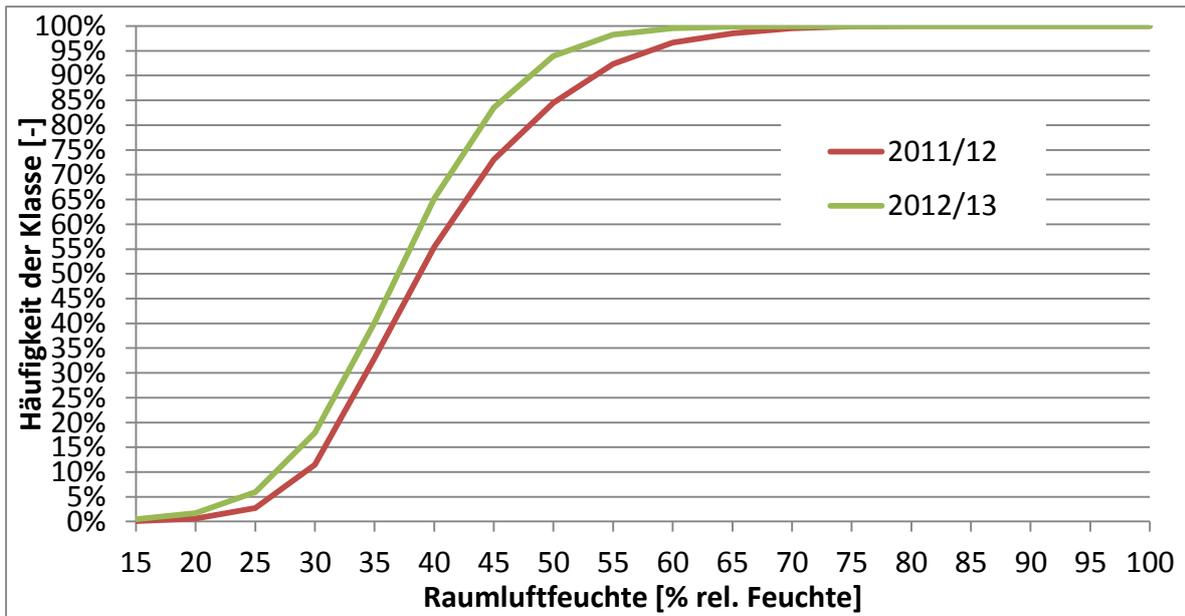


Abb. 3-14: Häufigkeit der Raumluftfeuchte (Stundenwerte aller Wohnungen) in den Heizperioden 2011/12 und 2012/13

Dies wurde auch durch die Ergebnisse der Mieterbefragung im Frühjahr 2012 bestätigt [IWU 2012], in der 74 % der Mieter angaben, mit der Luftfeuchtigkeit in ihrer Wohnung zufrieden oder eher zufrieden zu sein (Abb. 3-15).

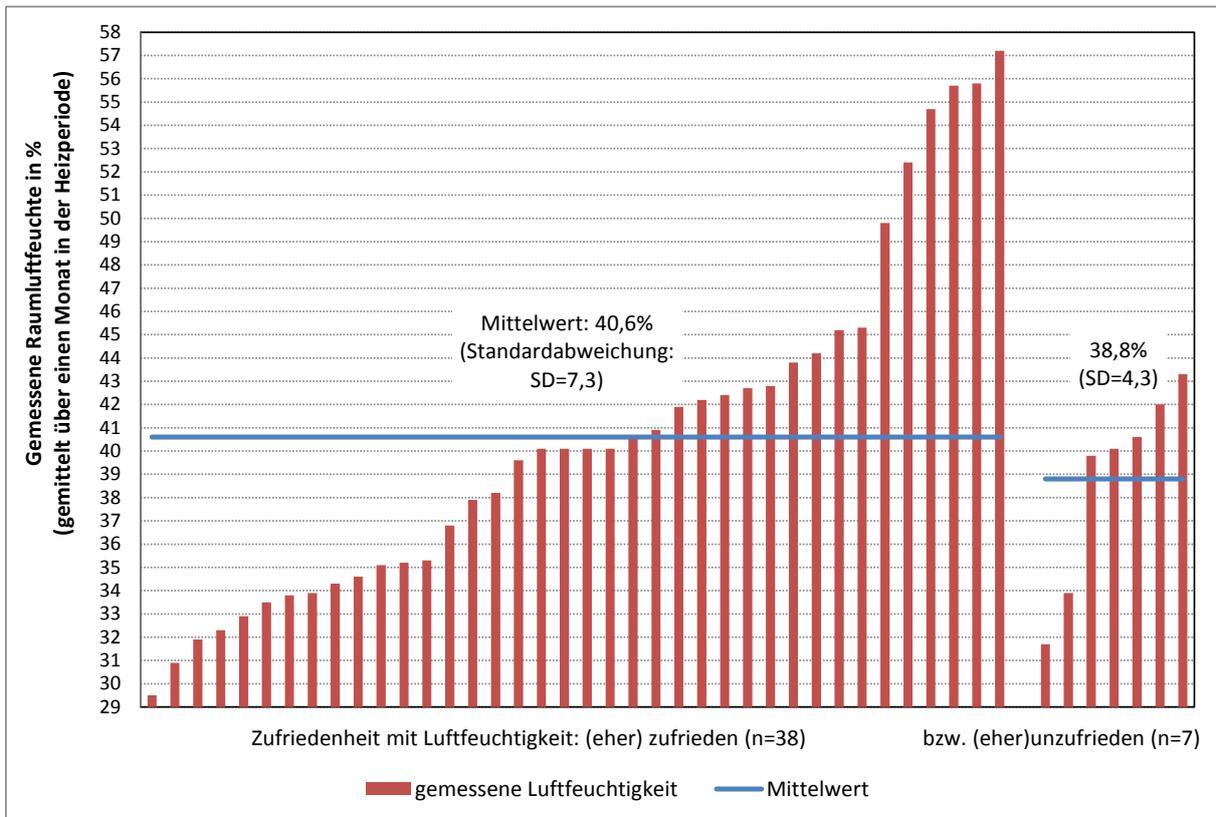


Abb. 3-15: Zufriedenheit der Bewohner mit der Raumluftfeuchte in der Heizperiode 2011/12 (die Messdaten umfassen nur den Zeitraum Mitte November 2011 bis Mitte Dezember 2011) [IWU 2012]

Tab. 3-6 zeigt für das gesamte Jahr die Mittelwerte der Raumlufffeuchte der sieben Häuser. Auch hier sind die Unterschiede zwischen den Gebäuden gering. Tab. 3-7 zeigt für die Sommermonate Juli und August für verschiedene Jahre die Raumlufffeuchte. Auch hier schwanken die Werte zwischen den Häusern nur wenig, die Raumlufffeuchte liegt zwischen 50 % und 56 % rel. Feuchte.

Tab. 3-6: Mittlere Raumlufffeuchte für das gesamte Jahr (Mai - April, 2009/10: Oktober - September)

	Haus 116	Haus 118	Haus 120	Haus 122	Haus 124	Haus 126	Haus 128	Mittelwert
2009/10	43,8	43,4	44,5					45,3
2010/11	41,1	41,1	42,1	46,8	43,5			42,6
2011/12	41,6	42,0	43,2	45,8	43,7	46,6	51,3	45,4
2012/13	42,9	44,0	42,7	43,4	41,4	41,4	43,2	42,6

Tab. 3-7: Mittlere Raumlufffeuchte für die Sommermonate Juli-August

	Haus 116	Haus 118	Haus 120	Haus 122	Haus 124	Haus 126	Haus 128	Mittelwert
2010	52,2	51,7	54,0					54,8
2011	53,6	53,3	54,8	54,4	55,9			56,3
2012	50,5	51,1	51,7	51,2	51,6	51,2	53,0	51,6

3.3 Heizwärmeverbräuche

Eine wichtige Kenngröße zur Beurteilung der Gebäude der Rotlintstraße stellt der gemessene Heizwärmeverbrauch dar. Dieser wurde durch Wärmemengenzähler direkt in der Wohnung erfasst. Abb. 3-16 zeigt die nach Bauabschnitten geordneten Messwerte für den Zeitraum Juli 2011 - Juni 2012. Es ergibt sich eine große Streuung zwischen den Wohnungen. Während einige Wohnungen kaum Heizwärme verbrauchten ($< 10 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$), ergeben sich für andere Werte von über $40 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Im Zeitraum Oktober 2011 bis Ende März 2012 ergaben sich 1206 Heizgradtage bei einer Heizgrenztemperatur von $12 \text{ }^\circ\text{C}$, was ca. 10 % unter dem langjährigen Mittelwert für Frankfurt liegt, so dass die Heizperiode wärmer war als in den Standardrandbedingungen angesetzt.

Für den ersten Bauabschnitt (blau) ergibt sich ein mittlerer Heizwärmeverbrauch (durchgezogene Linie) von $28,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Dies ist für ein modernisiertes Bestandsgebäude ein sehr niedriger Wert, die PHPP-Berechnungen mit Standardrandbedingungen ergaben $15,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ für diesen Bauabschnitt (gestrichelte Linie). Berücksichtigt man jedoch die tatsächlich gemessenen Raumtemperaturen, die mit $22,3 \text{ }^\circ\text{C}$ deutlich über den Standardwerten von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ im PHPP lagen, das reale Außenklima und außerdem die Tatsache, dass die Personenbelegungsdichte niedriger war als in der Planungsphase angesetzt, so ergibt sich ein Heizwärmebedarf von $19,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ (gepunktete Linie), der $9,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ unter dem gemessenen Verbrauch liegt. Die Einordnung dieser Werte und die Erklärung der Abweichungen erfolgt im nächsten Kapitel 3.3.1.

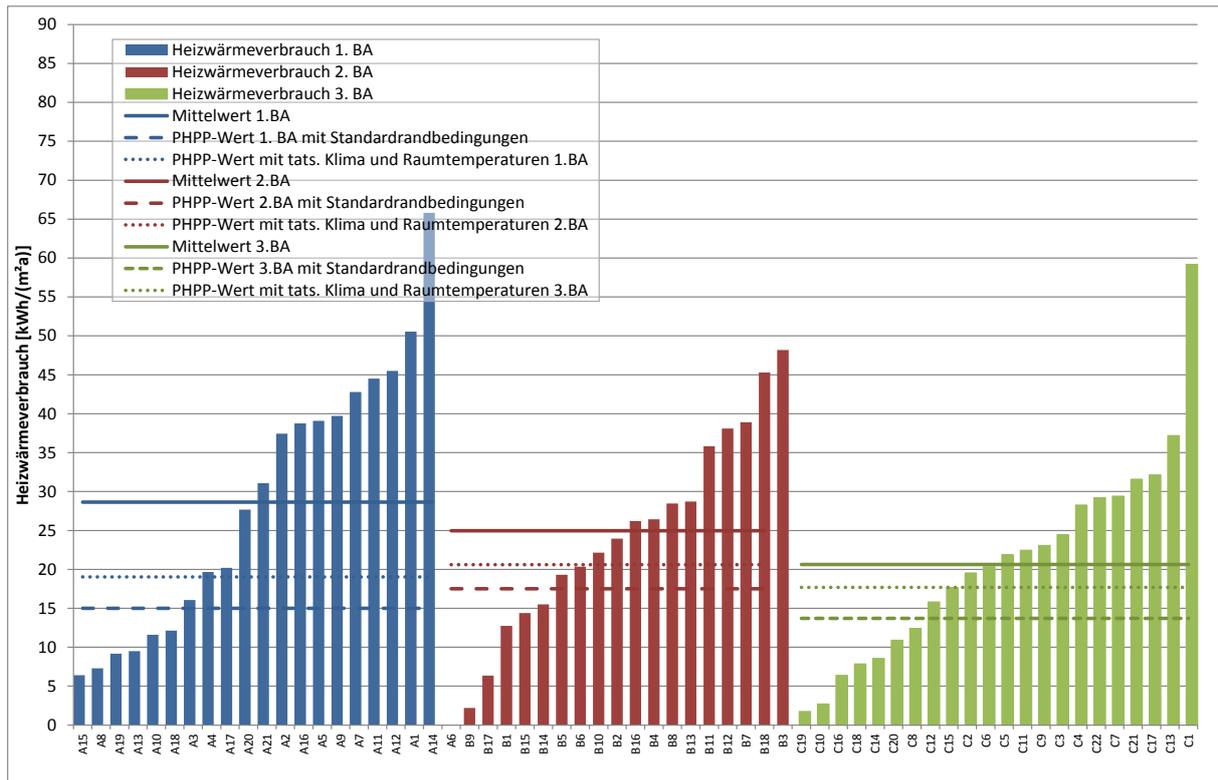


Abb. 3-16: Heizwärmeverbräuche der Wohnungen im Jahr 2011/12 getrennt nach Bauabschnitten aufsteigend sortiert

Beim zweiten Bauabschnitt (rot) liegt der gemessene Mittelwert des Heizwärmeverbrauchs bei 25,0 kWh/(m²a), der Bedarfswert mit Standardrandbedingungen PHPP liegt bei 17,5 kWh/(m²a). Der Bedarfswert liegt über dem der anderen Bauabschnitte, da das Gebäude mit seiner Hauptfensterfront nach Westen orientiert ist und dadurch geringere solare Erträge im Winter erhält (siehe [IWU 2010]). Passt man die PHPP-Berechnung mit der realen Mitteltemperatur und der realen Personenbelegungsdichte an, so ergibt sich ein Heizwärmebedarf von 20,6 kWh/(m²a). Somit liegt die Differenz zwischen Messwert und Bedarfswert hier bei 4,4 kWh/(m²a). Im dritten Bauabschnitt liegt der gemessene Verbrauch bei 20,6 kWh/(m²a), der PHPP-Wert mit Standardrandbedingungen bei 13,7 kWh/(m²a), mit angepassten Temperaturen, angepasstem Klima und tatsächlicher Personenbelegungsdichte bei 17,7 kWh/(m²a). Somit liegt der Mehrverbrauch gegenüber dem Bedarf hier bei 2,9 kWh/(m²a).

In Abb. 3-17 sind die Heizwärmeverbräuche für die Heizperiode 2012/13 dargestellt. Die Außentemperaturen waren in diesem Zeitraum niedriger, so dass die Heizgradtage (HGT12) um 6 % über dem langjährigen Mittel lagen. Dadurch haben sich die mittleren Verbräuche gegenüber 2011/12 um ca. 4 - 6 kWh/(m²a) erhöht. Die Differenz zwischen Verbrauchswert und angepasstem Bedarfswert hat sich jedoch kaum verändert. Auffällig sind aber einzelne Wohnungen, die extrem hohe Verbräuche von bis zu 86 kWh/(m²a) aufweisen. Bei diesen Wohnungen wurden teilweise korrigierte Raumtemperaturen in der Heizperiode von 24,7 °C gemessen oder es handelt sich um Erdgeschosswohnungen, die bei den Ortsbegehungen durch geschlossene Fensterläden aufgefallen sind (siehe Kapitel 3.3.1).

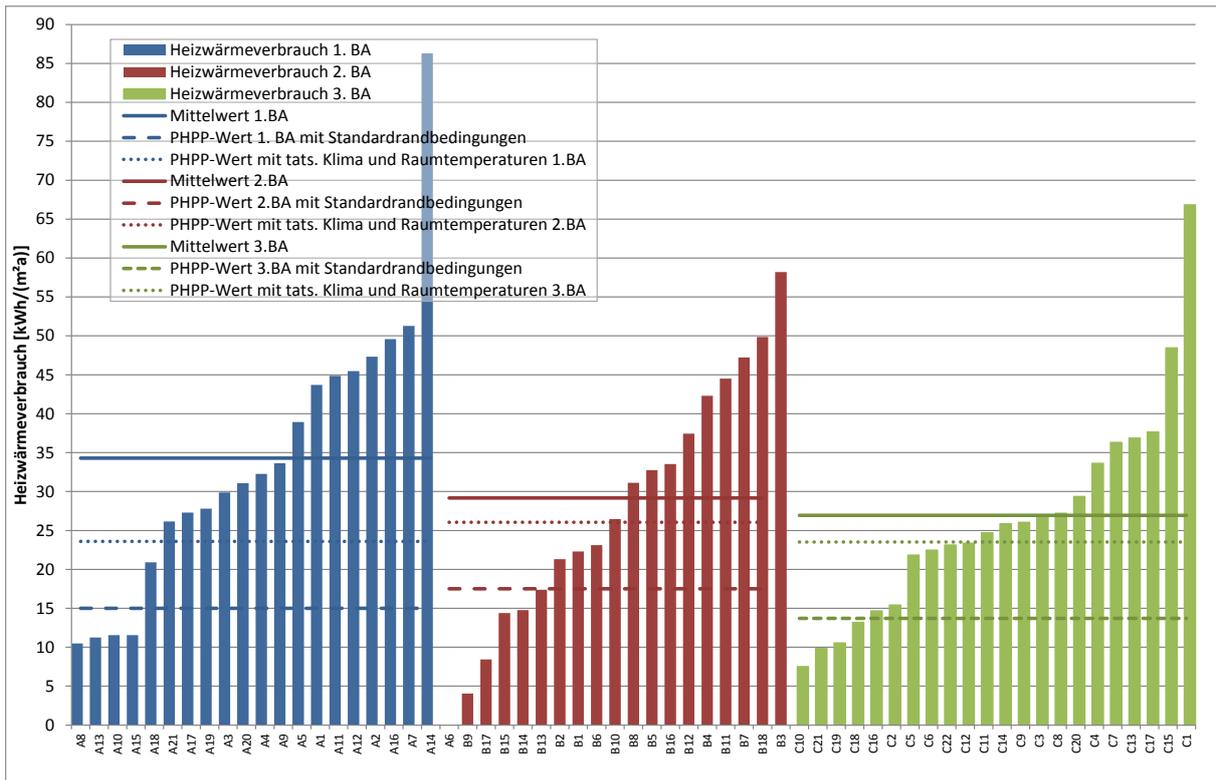


Abb. 3-17: Heizwärmeverbräuche der Wohnungen im Jahr 2012/13, getrennt nach Bauabschnitten sortiert

Betrachtet man die Entwicklung des Heizwärmeverbrauchs im gesamten Messzeitraum (Tab. 3-8), so liegt der auf die Wohnfläche bezogene Kennwert des ersten Bauabschnitts in der ersten Heizperiode 2009/10 bei ca. 28,2 kWh/(m²a). Der Wert wurde auf Basis von Zählerständen abgeschätzt, exakte Werte liegen aufgrund fehlender Messdaten nicht vor. Es ist zu berücksichtigen, dass einige Wohnungen erst im Verlauf des Winters bezogen wurden. In den folgenden Heizperioden schwankt der Heizwärmebedarf zwischen 28,6 kWh/(m²a) und 34,3 kWh/(m²a). Diese Schwankungen wurden hauptsächlich durch die unterschiedlichen Wetterbedingungen verursacht, was in der rechten Spalte an den Heizgradtagen abgelesen werden kann. Beim zweiten Bauabschnitt, der im September 2010 nahezu vollständig bezogen wurde, liegen die gemessenen Verbräuche zwischen 25,0 kWh/(m²a) und 29,2 kWh/(m²a). Im dritten Bauabschnitt steigen die gemessenen Heizwärmeverbräuche von 20,6 kWh/(m²a) im ersten Winter auf 27,0 kWh/(m²a) im zweiten Winter an.

Tab. 3-8: Summe Heizwärmeverbrauch der einzelnen Bauabschnitte

	1. Bauabschnitt		2. Bauabschnitt		3. Bauabschnitt		gesamt		Heizgradtage Okt-Mrz [kd]
	absolut	flächen- bezogen	absolut	flächen- bezogen	absolut	flächen- bezogen	absolut	flächen- bezogen	
	[kWh/a]	[kWh/(m²a)]	[kWh/a]	[kWh/(m²a)]	[kWh/a]	[kWh/(m²a)]	[kWh/a]	[kWh/(m²a)]	
2009/10	37.148	28,2					37.148	28,2	1409
2010/11	42.436	33,5	26.360	25,2			68.796	29,7	1405
2011/12	36.259	28,6	26.148	25,0	29.330	20,6	91.737	24,6	1234
2012/13	43.430	34,3	30.558	29,2	38.311	27,0	112.299	30,1	1434

In Abb. 3-18 ist die monatliche Wärmeabnahme der drei Bauabschnitte über den gesamten Messzeitraum mit Absolutwerten dargestellt. Dabei führen die unterschiedlichen Wohnflächen dazu, dass der zweite Bauabschnitt absolut gesehen deutlich weniger Heizwärme verbraucht als die anderen beiden Blöcke. Auffällig ist, dass auch in den Monaten Mai bis September immer wieder Heizwärmeverbräuche aufgetreten sind. Diese Sommerverbräuche werden in Kapitel 4.3.4 analysiert.

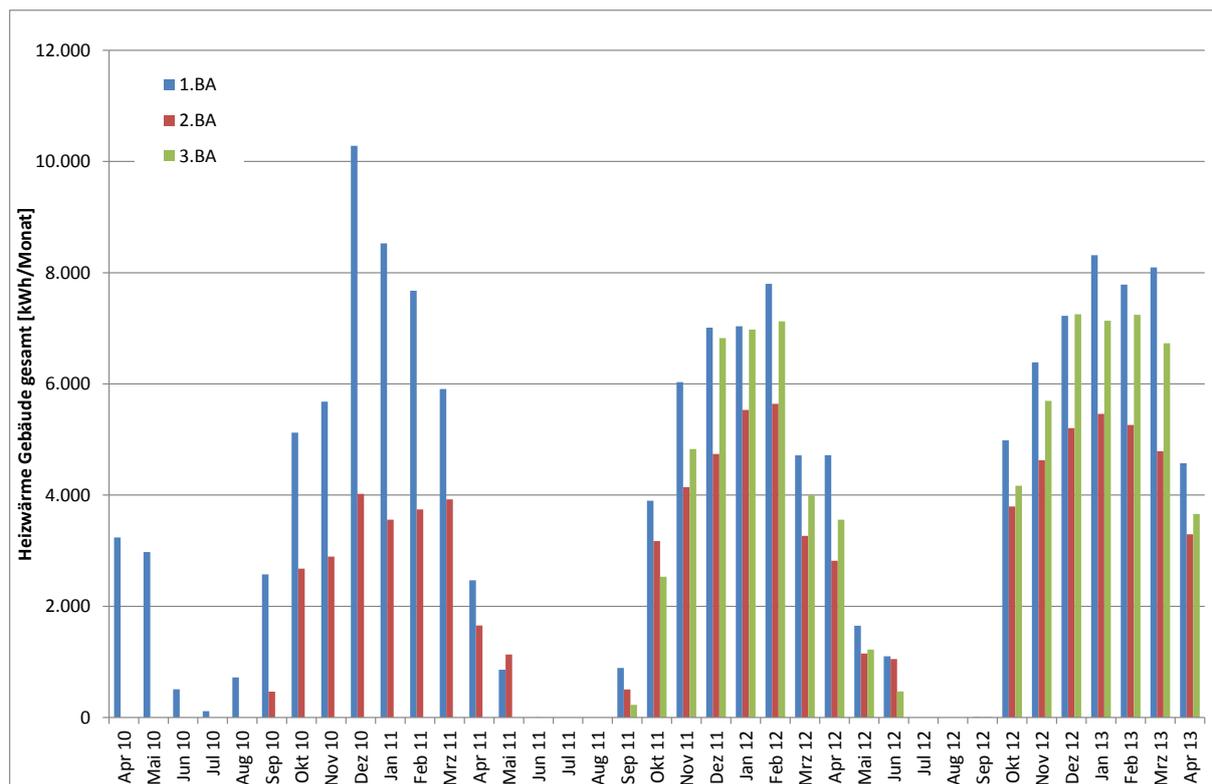


Abb. 3-18: Monatliche Wärmeabnahme der drei Bauabschnitte

Zusätzlich zu den in der Wohnung gemessenen Heizwärmeverbräuchen gibt es noch für die Beheizung nutzbare Verluste der Verteilungen. Diese werden in Kapitel 4.3.3 untersucht. Es ergibt sich ein zusätzlicher Aufschlag zwischen 1 kWh/(m²a) und 3 kWh/(m²a).

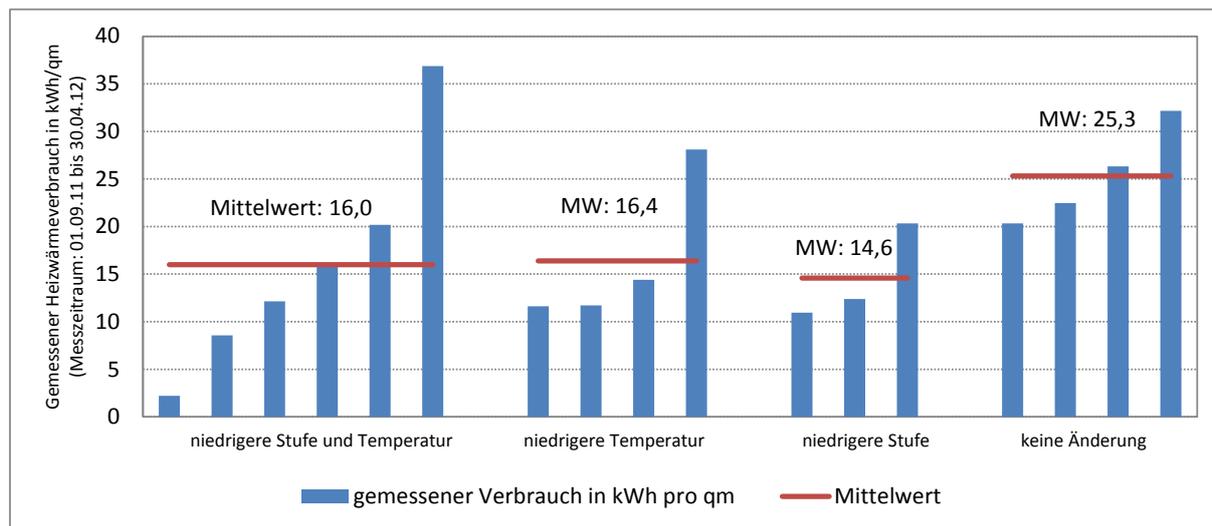


Abb. 3-19: Gemessener Heizwärmeverbrauch in der Heizperiode 2011/2012 und berichtete Änderungen an den Lüftungsstufen und Raumthermostateinstellungen bei mehrtägiger Abwesenheit (nur Befragte, die ihre Einstellungen an den Thermostatventilen der Heizkörper unverändert lassen), aus [IWU 2012]

Bei der Mieterbefragung [IWU 2012] wurde auch gefragt, ob die Mieter bei längerer Abwesenheit die Temperatur am Raumthermostat, die Lüftungsstufe oder beides reduzieren. Trägt man die Antwort-

ten über die gemessenen Heizwärmeverbräuche auf, so zeigt sich, dass in Wohnungen, in denen der Sollwert reduziert wird, der mittlere Heizwärmeverbrauch fast 10 kWh/(m²a) unter dem derjenigen liegt, die nicht reduzieren. Die deutet darauf hin, dass trotz der Wärmeströme im Gebäude nennenswerte Einsparungen durch die Absenkung bei Abwesenheit möglich sind. Allerdings muss die Aufheizleistung bei Rückkehr ausreichend hoch sein, damit die Wiederaufheizung nicht zu lange dauert.

3.3.1 Gründe für den Mehrverbrauch bei der Heizwärme

Bei der Analyse der Messdaten und des Anlagenbetriebs vor Ort konnten eine Reihe von Faktoren ausgemacht werden, die sich auf den Heizwärmeverbrauch der Gebäude ausgewirkt haben. Dazu gehören:

- Erhöhte Raumtemperaturen in den Wohnungen
- Verspätete Umschaltung der Lüftungsanlagen von Sommerbetrieb (Bypass) auf Winterbetrieb (Wärmerückgewinnung) im Rahmen der Wartung (teilweise erst im Januar!)
- Teilweise Sommerbetrieb im Heizkreis aufgrund von Handsteuerung der Heizungsregelung (siehe Kapitel 4.3.4)
- Teilweise Nutzung der Schiebeläden tagsüber im Winter (Reduktion der solaren Gewinne)
- Verstärkte Fensterlüftung im Badezimmer/Schlafzimmer einiger Wohnungen im Winter
- Geringere interne Wärmequellen (vor allem geringere Personenbelegung)
- Auf- und Trockenheizen des Baukörpers

Im Folgenden werden die verschiedenen Einflussfaktoren kurz diskutiert.

Erhöhte Raumtemperaturen

Wie bereits im vorherigen Kapitel dargestellt, führen höhere Raumtemperaturen zu einem Mehrverbrauch bei der Heizwärme (siehe Kapitel 3.1). Dieser Zusammenhang wurde durch die Berücksichtigung der gemessenen Raumtemperatur im angepassten Bedarfswert berücksichtigt. Wie in Kapitel 6.2 gezeigt wird, sind die in der Rotlintstraße gemessenen Raumtemperaturen jedoch nicht untypisch für Mehrfamilienhäuser mit hohem energetischem Standard.

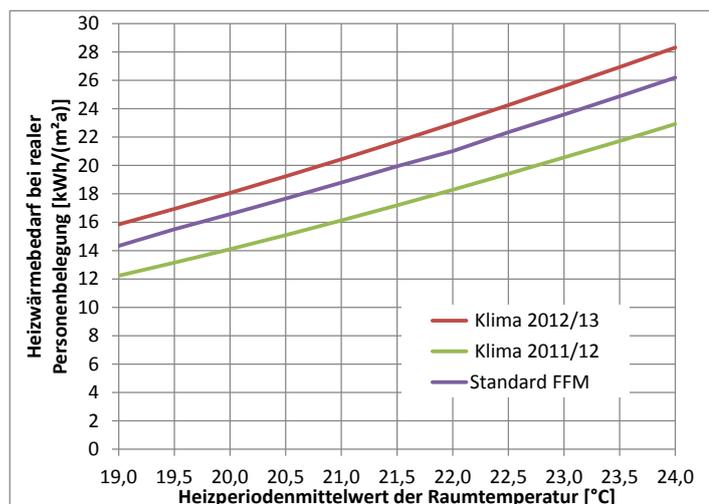


Abb. 3-20: Einfluss der Raumtemperatur auf den Heizwärmeverbrauch des ersten Bauabschnitts, dargestellt für das Standardklima des PHPP für Frankfurt sowie das reale Klima 2011/12 und 2012/13 mit realer Personenbelegung

Wartung Lüftungsanlagen

Die in der Rotlintstraße eingesetzten Lüftungsgeräte besitzen keine automatische Umschaltung von Sommer-Bypass-Betrieb auf Wärmerückgewinnung im Winter, sondern diese Umschaltung wird im Rahmen der halbjährlichen Wartungsarbeiten durch einen beauftragten Handwerksbetrieb durchgeführt. Recherchen ergaben, dass diese Wartungsarbeiten erst im November angesetzt wurden und dabei manche Mieter nicht erreicht wurden, so dass die Lüftungsanlagen Teile des Winters mit Sommerbypass betrieben wurden. Dadurch findet jedoch keine Wärmerückgewinnung statt und es muss zur Deckung der Lüftungswärmeverluste zusätzlich zugeheizt werden. Abb. 3-21 zeigt für die Heizperioden 2011/12 und 2012/13 jeweils den Anteil der Heizgradtage in der Heizperiode ohne Wärmerückgewinnung und den gemessenen Heizwärmeverbrauch. Die meisten Wohnungen wurden in der Heizperiode 2012/13 im November umgestellt, so dass dort nur in ca. 9 % der Heizgradtage keine Wärmerückgewinnung vorhanden war (Beginn der Heizperiode wurde auf den 15.10. festgelegt). Besonders im Jahr 2011/12 gibt es eine Reihe von Wohnungen, in denen zwischen 24 % und 30 % der Heizgradtage und vier weitere Wohnungen, bei denen mehr als die Hälfte der Heizgradtage der Sommer-Bypass in Betrieb war. Schließlich sind in beiden Heizperioden drei oder vier Wohnungen, in denen die Umschaltung nach vorliegenden Angaben überhaupt nicht durchgeführt wurde. Die Wohnungen ohne Lüftungswartung fallen nicht durch besonders hohe Heizwärmeverbräuche auf. Ursache könnte der Umstand sein, dass ohne die Lüftungswartung auch die Filter nicht gewechselt wurden und durch die verschmutzten Filter nur noch ein reduzierter Volumenstrom transportiert wurde, so dass der Effekt der fehlenden Wärmerückgewinnung um den Preis einer schlechteren Luftqualität begrenzt wurde.

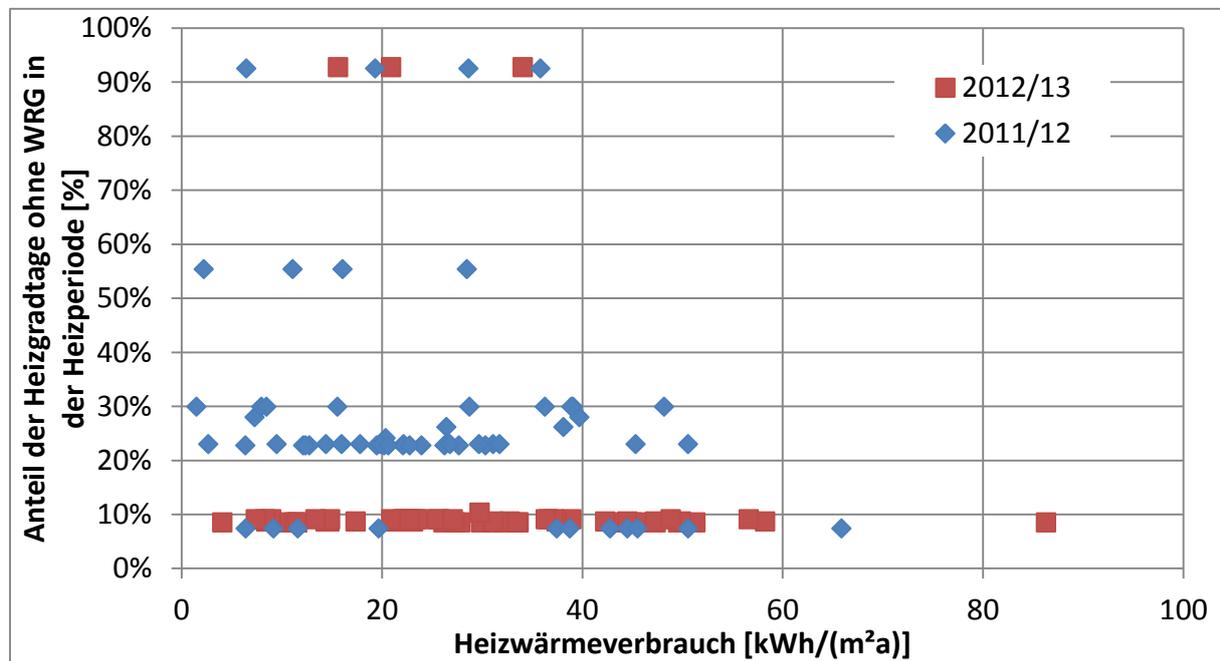


Abb. 3-21: Anteil der Heizgradtage ohne Wärmerückgewinnung im gesamten Winter, aufgetragen über den gemessenen Heizwärmeverbrauch

Berücksichtigt man diese Heiztage ohne Wärmerückgewinnung über eine prozentuale Reduktion der Rückwärmzahl des Lüftungsgerätes, so ergibt sich für den ersten Bauabschnitt eine Erhöhung des Heizwärmebedarfs um ca. 28 % in der Heizperiode 2011/12 und um ca. 12 % in der Heizperiode 2012/13.

Sommerbetrieb der Heizkreise

Im PHPP wird das Gebäude mit einheitlichen Randbedingungen bilanziert. Real herrschen in den verschiedenen Wohnungen aber unterschiedliche Temperaturen und interne Wärmequellen. Somit ist die Heizperiode real unter Umständen länger, als sich aus dem PHPP ergibt. Dem wird durch eine spätere Abschaltung der Heizkreise Rechnung getragen. Die Regelung in der Rotlintstraße sieht eine Abschaltung der Heizkreise vom 15.05. bis zum 30.09. vor. Sollte die Heizgrenztemperatur von 12 °C zwei Tage in Folge unterschritten werden, so werden die Heizkreise wieder angeschaltet.

Allerdings zeigte sich im Anlagenbetrieb, dass durch unterschiedliche Eingriffe und Fehler in der Regelung in den drei beobachteten Sommerquartalen die Heizungspumpen länger in Betrieb waren. Da einige Mieter die Thermostatventile im Frühjahr offensichtlich nicht herunter drehen, führt dies zu einer Wärmeabnahme im Sommer und zusätzlichen Verteilverlusten. Die Sommerverluste konnten jedoch im Laufe der Zeit kontinuierlich von ca. 5 kWh/(m²a) auf 1 kWh/(m²a) gesenkt werden, wie in Kapitel 4.3.4 dargestellt wird.

Verschattung

Ein wichtiger Beitrag zur Reduktion des Heizwärmebedarfs eines Passivhauses ist die Nutzung solarer Wärme Gewinne im Winter. Diese decken im (Kern-)Winter ca. 27 % der Wärmeverluste der Gebäude in der Rotlintstraße. Vor Ort wurde beobachtet, dass im Winter teilweise auch tagsüber die Schiebeläden geschlossen blieben. Dadurch reduziert sich jedoch der solare Heizbeitrag durch die Fenster. In der Mieterbefragung gaben die Befragten als Grund für die Verschattung den Wunsch nach Sichtschutz oder die Nutzung als Einbruchschutz (besonders im Erdgeschoss) an.



Abb. 3-22: Aufnahme des zweiten Bauabschnitts mit geschlossenen Fensterläden an Wintertagen

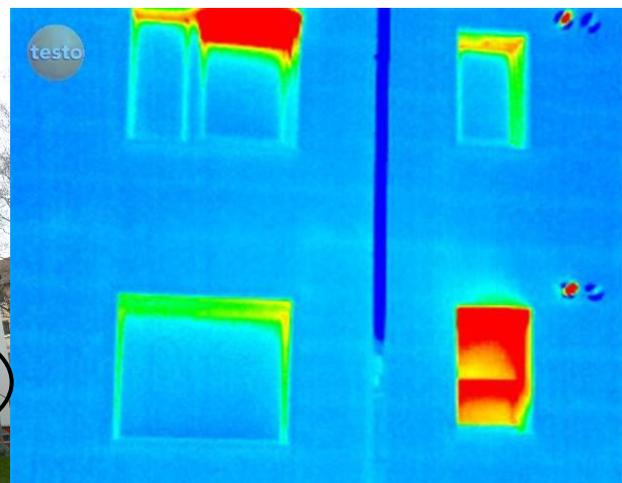


Abb. 3-23: thermografische Aufnahme mit mehreren geöffneten Fenstern (oben links gekippt, unten rechts hinter halb herunter gelassenem Rollladen gekippt) bei Außentemperaturen von 2 °C

Fensterlüftung in einigen Wohnungen

In einigen Wohnungen konnte im Winter bei Terminen vor Ort auch bei sehr niedrigen Außentemperaturen gekippte Fenster beobachtet werden (siehe Abb. 3-23: Thermografische Aufnahme mit zwei gekippten Fenstern, die in der Aufnahme rot zu erkennen sind). Einige Mieter (14 % der Antworten)

gaben in der Befragung [IWU 2012] an, dauerhaft Kipplüftung zu betreiben, weitere 31 % lüfteten gelegentlich per Kipp-, Stoß- oder Querlüftung. Mit zunehmender Wohndauer nahm die zusätzliche Fensterlüftung tendenziell ab. Im September 2012 wurde eine Mieterkurzinformation an alle Wohnungen verteilt, in der auf die Bedienung der Anlagentechnik und das Lüftungsverhalten hingewiesen wurde (siehe Anhang). Eine direkte Auswirkung der zusätzlichen Mieterinformation auf den Heizwärmeverbrauch konnte aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren aber nicht beobachtet werden.

Während das Dauerkippen von Fenstern bei den Passivhäusern in Wiesbaden-Dotzheim [IWU 2003] bei Beheizung über Heizkörper nur zu geringem Mehrverbrauch führte, ist zu erwarten, dass in der Rotlintstraße durch die Zuluftheizung die Auswirkungen von dauerhaft gekippten Fenstern auf den Heizwärmeverbrauch größer ausfallen. Da keine konkreten Werte vorliegen, ist eine Quantifizierung der energetischen Auswirkungen kaum möglich.

Reduzierte interne Wärmegewinne

In den PHPP-Berechnungen wurde mit dem Standardwert für innere Wärmequellen in Wohngebäuden von $2,1 \text{ W/m}^2$ bilanziert. Neben dem Haushaltsstromverbrauch gehen in die inneren Wärmegewinne auch die Personenbelegung ein. Hier ergaben sich jedoch Abweichungen zwischen den Planungswerten, die Erfahrungswerte der ABG FRANKFURT HOLDING darstellten, und der tatsächlichen Personenbelegungsichte vor Ort. Die größte Abweichung ergab sich für den dritten Bauabschnitt, in dem statt 43 Personen nur 31 Personen leben. Dadurch reduzieren sich die inneren Wärmegewinne auf $1,5 \text{ W/m}^2$, was zu einer Erhöhung des Heizwärmebedarfs um $2,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ führt. Im zweiten Bauabschnitt verursacht die Anpassung der Personenbelegungsichte eine Erhöhung des Heizwärmebedarfs um $1,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, im ersten Bauabschnitt um $0,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

Auf- und Trockenheizen des Baukörpers

Der erste Bauabschnitt wurde ab Oktober 2009 bezogen, zuvor war der Baukörper durch die Bauarbeiten teilweise ausgekühlt, wie auch in den Messdaten in Abb. 3-5 zu sehen ist. Dies führte in der ersten Heizperiode zu einem Mehrverbrauch, der aber in den Heizperioden ab 2010/11 längst abgeschlossen war. Beim zweiten und dritten Bauabschnitt ist davon auszugehen, dass zu Beginn der Heizperiode das Aufheizen bereits abgeschlossen war und keinen nennenswerten Einfluss auf den Heizwärmeverbrauch hatte.

Aus den Messdaten für die Raumluftfeuchte (siehe Kapitel 3.2) ist zu erkennen, dass die Feuchte in der ersten Heizperiode um einige Prozent höher lag, als in den Folgejahren. Dies ist vermutlich auf das Trockenheizen der Wohnungen zurückzuführen. Auch dafür musste dann zusätzlich Energie zugeführt werden. Nach der ersten Heizperiode war dieser Vorgang wohl ebenfalls abgeschlossen, so dass zumindest für die Heizperiode 2012/13 keine Einflüsse durch das Trockenheizen der Gebäudemasse mehr zu erwarten sind.

Mögliche weitere Einflussfaktoren

Es ist auffällig, dass die Abweichungen zwischen Bedarf und Verbrauch im zweiten und dritten Bauabschnitt durch die zuvor dargestellten Einflussfaktoren nahezu vollständig erklärt werden können, beim ersten Bauabschnitt verbleibt jedoch eine Differenz zwischen 4 und 7 kWh/(m²a). Da die Fassadenkonstruktion im ersten Bauabschnitt anders ausgeführt wurde als im zweiten und dritten Bauabschnitt, besteht die Möglichkeit, dass hier bei der Ausführung Abweichungen von der in der Planungsphase bilanzierten Konstruktion auftraten, die zu erhöhten Wärmeverlusten führten. In der Baubegleitung sind keine solchen Abweichungen aufgefallen. Sensitivitätsanalysen zeigten, dass auch z. B. bei einer Verdreifachung des Holzanteils der Konstruktion oder einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs um 20 % (z. B. durch Feuchteintrag) der Heizwärmebedarf um nicht mehr als 1 kWh/(m²a) gestiegen wäre.

Ein weiterer möglicher Einflussfaktor auf die Wärmeverluste sind unvollständig ausgefüllte Gefache in der Außenwanddämmung oder Setzungserscheinungen im Laufe der Jahre. Thermografische Aufnahmen zeigten, dass tatsächlich an einigen wenigen Stellen im ersten und dritten Bauabschnitt sowie in einer gesamten Fensterreihe des zweiten Bauabschnitts kleine Gefache über den Fenstern beim Befüllen mit Zelluloseflocken vergessen worden waren (siehe Abb. 3-25 rechts) oder nicht vollständig gefüllt wurden. Die Schwachstellen wurden teilweise bis zur darauffolgenden Heizperiode durch die ausführende Firma behoben. Die Fensterreihe im zweiten Bauabschnitt sowie einige Schwachstellen im Dachgeschoss des dritten Bauabschnitts erforderten zwei Heizperioden zur Nachbesserung, so dass für den zweiten Bauabschnitt ein Mehrverbrauch nach PHPP von 0,35 kWh/(m²a) angefallen ist. Nachträgliche Setzungserscheinungen des Dämmstoffs konnten bei den Fassaden ebenso wenig festgestellt werden, wie Durchfeuchtungen des Dämmstoffs (exemplarisch: siehe Abb. 3-24 links, die gleichmäßige blaue Farbe zeigt gleich geringe Wärmeverluste).



Abb. 3-24: Nordseite 1. Bauabschnitt am 25.01.2012 (3,5 Jahre nach Ausflocken); rote Stellen mit erhöhter Temperatur werden durch geöffnete Fenster verursacht

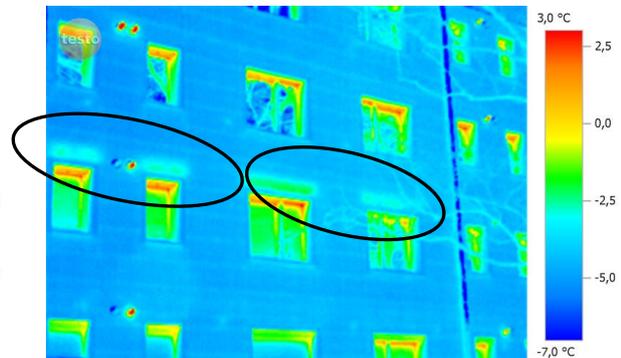


Abb. 3-25: Thermografie Ostseite 2. Bauabschnitt vor nachträglicher Dämmung der Gefache

Bewertung der verschiedenen Gründe für Mehrverbrauch

Es konnten eine Reihe von Gründen identifiziert werden, die zu den beobachteten Mehrverbräuchen gegenüber den Planungen beigetragen haben. Die beiden gewichtigsten Einflussfaktoren sind die erhöhten Raumtemperaturen und die verspätete Umschaltung der Lüftungsanlagen von Sommer- auf Winterbetrieb (siehe Abb. 3-26). Die Raumtemperaturen entspringen dem Komfortbedürfnis der Mieter und lassen eher die Frage aufkommen, ob eine Raumtemperatur von 20 °C in Passivhäusern eine realistische Randbedingung darstellt. Die Umschaltung der Lüftungsanlage kann durch eine bessere Terminierung der Lüftungswartung ohne Zusatzaufwand und Kosten behoben werden. Auch der Sommerverbrauch sollte zuverlässig verhindert werden, indem nicht manuell in die Anlagenregelung eingegriffen wird. Die Fensterlüftung und die Verschattung im Winter sind Nutzer-abhängige Faktoren, die aber nur bedingt beeinflussbar sind, ihr Einfluss auf die Verbrauchswerte wird aber mit nicht mehr als 1 kWh/(m²a) abgeschätzt. Insgesamt beträgt die nicht erklärte Differenz zwischen Verbrauchswerten und angepassten Bedarfswerten nur 1,3 bzw. 1,6 kWh/(m²a), das entspricht jeweils 5 %. Auch wenn die nutzbare Wärmeabgabe der Verteilungen berücksichtigt wird, können die Verbräuche somit gut erklärt werden.

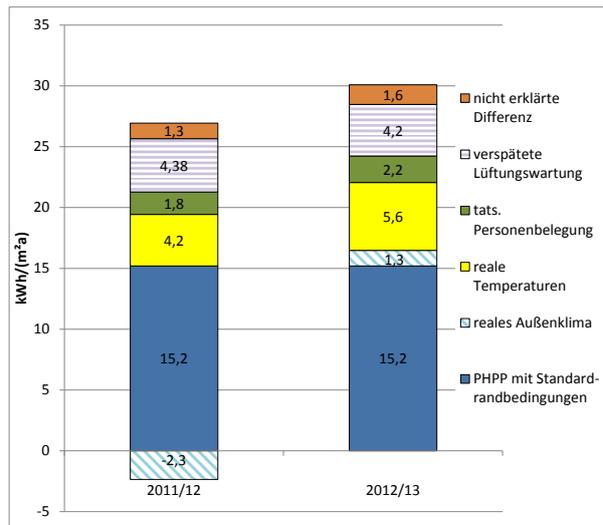


Abb. 3-26: Quantifizierung der Einflussgrößen auf den Heizwärmebedarf im Vergleich mit dem gemessenen Verbrauch

3.3.2 Vergleich der Heizwärmeverbräuche mit anderen Gebäuden

Die Messergebnisse zeigen zwar deutlich erhöhte Heizwärmeverbräuche, die jedoch überwiegend auf die gemessenen Raumtemperaturen und verspätete Umschaltung der Lüftungsanlage von Sommer- auf Winterbetrieb zurück geführt werden können.

Die Raumtemperaturen selbst zeigen ein vergleichbares Niveau wie andere energetisch hochwertig modernisierte Mehrfamilienhäuser, die detailliert vermessen wurden, und bei denen, anders als in der Rotlintstraße, eine verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung durchgeführt wurde (Abb. 3-27). Dargestellt sind die gemessenen Raumtemperaturen über den Heizwärmeverbräuchen bei zwei Heizperioden der Rotlintstraße und in fünf weiteren Modernisierungsprojekten [FBU 2001], [Karlsruhe 2004], [IGE 2007], [PHI 2008], [PHI 2009], [PHI 2011]. Die älteren Projekte in Wittenberg und Karlsruhe Gördeler Straße (KA_Görderler) sowie die Niedrigenergiehaus-Variante in Ludwigshafen (LU_NEH) wiesen einen sehr guten Standard auf, der jedoch über dem Passivhaus-Standard lag. In diesen Gebäuden wurden Raumtemperaturen zwischen 20 °C und 21,5 °C gemessen. Die Gebäude in Frankfurt (FFM_Teves) und Ludwigshafen (LU_PiB), die mit Passivhauskomponenten saniert wurden, weisen Raumtemperaturen zwischen 21,8 °C und 22,8°C auf und besitzen somit das gleiche Temperaturniveau wie die Wohnungen der Rotlintstraße, obwohl dort verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnungen durchgeführt wurden. Somit ist gegenüber diesen Vergleichsprojekten kein nennenswerter Einfluss des Warmmietenmodells nachzuweisen.

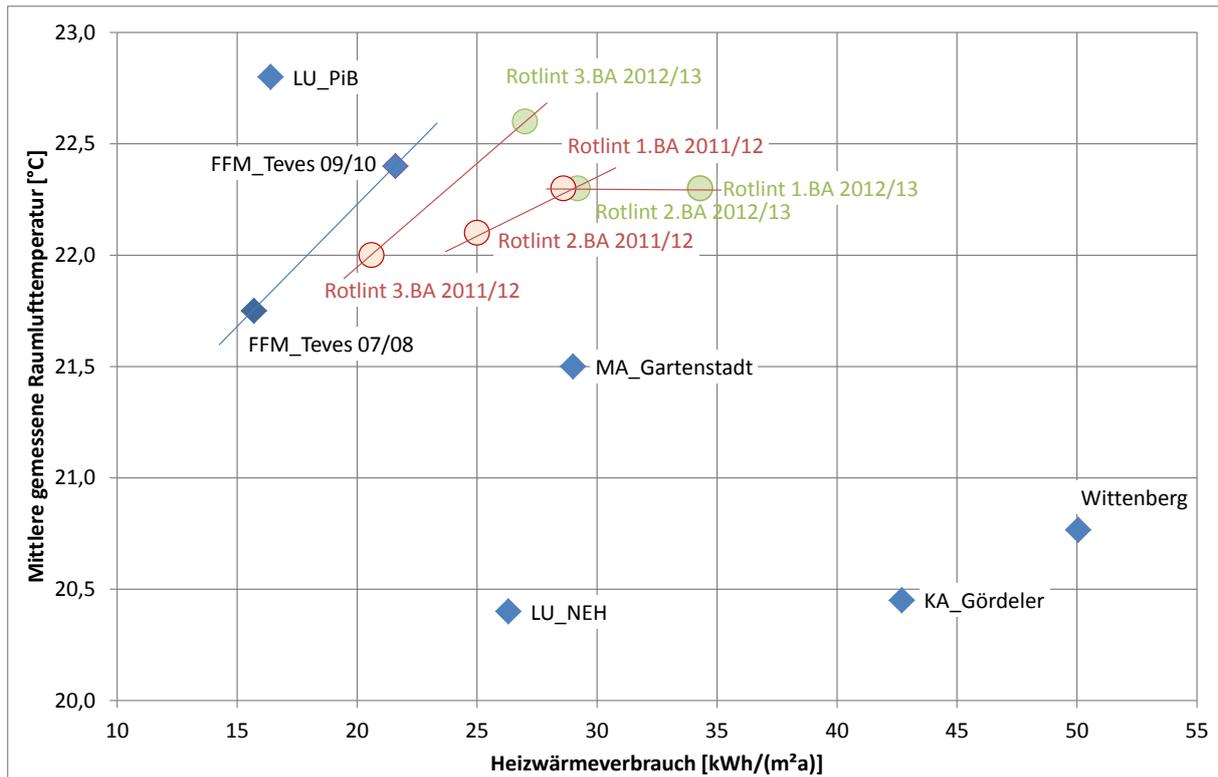


Abb. 3-27: Mittlere Raumtemperatur in der Heizperiode und gemessener Heizwärmeverbrauch von zwei Heizperioden der Rotlintstraße und 5 weiteren energetischen Modernisierungen von Bestands-Mehrfamilienhäusern

Möglicherweise wäre die Raumtemperatur mit Heizkostenabrechnung aber etwas niedriger ausgefallen. In einer zusätzlichen Information wurden die Mieter vor der Heizperiode 2012/13 über die korrekte Bedienung der Technik in der Wohnung und optimales Lüften und Verschatten informiert. Die Ergebnisse zeigen jedoch keinen Einfluss auf den Heizwärmeverbrauch, da der gemessene Verbrauch klimabedingt weiter angestiegen ist.

In Abb. 3-27 sind zusätzlich zueinander gehörende Messwerte des gleichen Gebäudes aus unterschiedlichen Heizperioden dargestellt und mit einer dünnen Linie verbunden. Die Steigung dieser Linie zeigt den Anstieg des Heizwärmeverbrauchs bei zunehmender Raumtemperatur. Für FFM_Teves und den 3. Bauabschnitt der Rotlintstraße sind diese Anstiege nahezu gleich (Geraden verlaufen fast parallel). Beim zweiten Bauabschnitt in der Rotlintstraße, der einen höheren Heizwärmebedarf aufweist und gleichzeitig geringere solare Gewinne, verläuft die Gerade flacher, so dass bei zunehmender Raumtemperatur der Heizwärmeverbrauch schneller ansteigt. Beim ersten Bauabschnitt in der Rotlintstraße stieg der Verbrauch bei gleicher Raumtemperatur von 2011/12 nach 2012/13 um ca. 5 kWh/(m²a). Hauptursache sind neben Einflüssen durch die verspätete Umschaltung der Lüftungsanlage von Sommer auf Winterbetrieb, das veränderte Außenklima der beiden Messjahre. Ein verändertes Nutzerverhalten aufgrund der Warmmiete ist als Erklärung in der vierten Heizperiode nach Bezug nicht wahrscheinlich.

3.4 Warm- und Kaltwasserverbräuche

Zur Reduktion des Warmwasserverbrauchs in den Wohnungen wurden im Badezimmer Spararmaturen installiert. Hier stellte sich die Frage, ob die Verbräuche in der Rotlintstraße - besonders beim Warmwasser - niedriger, oder wegen der Warmmiete für die Warmwasserwärme höher ausfallen als bei individueller Abrechnung üblich. Die Kalt- und Warmwasserverbräuche der Wohnungen wurden mit Volumenzählern jeweils im Badezimmer erfasst. Da die Zählerdaten des dritten Bauabschnitts erst ab März 2012 regelmäßig zur Verfügung standen, werden von den Wasserverbräuchen hier nur der Zeitraum von Mai 2012 bis April 2013 dargestellt.

Warmwasser

Abb. 3-28 zeigt die aufsteigend sortierten Warmwasserverbräuche der einzelnen Wohnungen in Liter je Quadratmeter und Jahr (rot) sowie die zugehörigen Kaltwasserverbräuche (blau). Es ergibt sich eine extrem breite Streuung der Verbrauchswerte beim Warmwasser zwischen 75 Liter/(m²*a) und 1000 Liter (m²*a). Im Mittel wurden 409 Liter/(m²*a) Warmwasser verbraucht. Im Vergleich dazu liegt der Mittelwert des Kaltwasserverbrauchs bei 612 Liter/(m²*a) nur 50 % über dem Warmwasserverbrauch. Bei einigen wenigen Wohnungen sind jedoch Datenlücken vorhanden, was teilweise erklärt, warum bei manchen Wohnungen die Kaltwasserverbräuche niedriger ausfallen als die jeweiligen Verbräuche von Warmwasser. Die grundsätzliche Aussage der Ergebnisse wird dadurch jedoch nicht verändert.

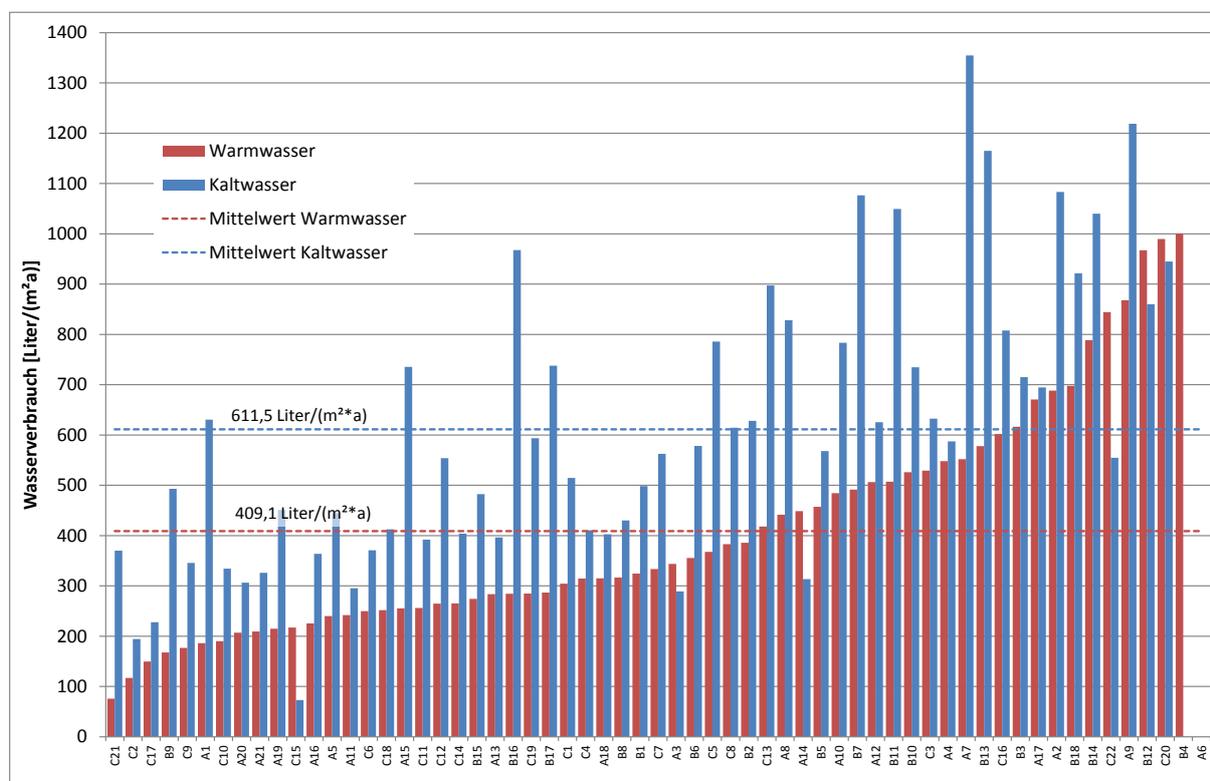


Abb. 3-28: Aufsteigend sortierte Warmwasserverbräuche in Liter pro Quadratmeter und für das Jahr 2012/13 sowie der zugehörige Kaltwasserverbrauch

Da für die Wohnungen Personenbelegungen bekannt sind, können auch Personen bezogene Verbrauchswerte angegeben werden, die zur Bewertung hier deutlich besser geeignet sind (Abb. 3-29).

Im Mittel lag der Warmwasserverbrauch bei 46,3 Liter je Person und Tag, was deutlich über den Standardannahmen von 25 Liter/Person und Tag im PHPP liegt. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Standardrandwerte des Warmwasserverbrauchs für 60 °C Zapftemperatur angegeben sind. In der Rotlintstraße lag die Warmwassertemperatur jedoch im Mittel nur bei 51,7 °C (siehe Kapitel 4.4). Somit müssen die Verbrauchswerte bei gleichem Wärmeinhalt auch korrigiert werden. Dann reduziert sich der mittlere Warmwasserverbrauch auf 37,5 Liter/(Person*d), was 50 % über den Standardannahmen liegt.

Tab. 3-9: Zusammenstellung verschiedener Personen bezogener Warmwasserverbräuche aus [IWU 2008] im Vergleich zur Rotlintstraße

	Liter/Pers*d	individuelle Abrechnung WW	Anmerkungen
Rotlintstraße	46,3	nein	Passivhaus, 61 WE, Messwert 2012/13, vermietet
Projekt "Wohnsinn"	26,3	nein	Passivhaus, 39 WE, Messwerte 2004-2006, Wohnprojekt
Projekt "Bautifosi"	45,2	ja	Niedrigenergiehaus mit 13 WE , Eigentümergemeinschaft
Projekt "Känguru"	32,3	ja	Niedrigenergiehaus mit 19 WE, Eigentümer

Vergleicht man die Messwerte der Rotlintstraße mit Zusammenstellungen von Warmwasserverbräuchen aus [IWU 2008], so zeigt sich, dass sich dort bei nicht abgerechneten Warmwasserkosten niedrige Warmwasserverbräuche („Wohnsinn“: 26,3 Liter/Person*d)) genauso einstellten, wie hohe Verbräuche auf dem Niveau der Rotlintstraße („Bautifosi“: 45,2 Liter/Person*d)) trotz individueller Abrechnung. Somit ist eine Bewertung der Ergebnisse der Rotlintstraße auch im Vergleich mit diesen Angaben nicht einfach. Es spricht jedoch einiges dafür, dass durch die Kostenneutralität für die Mieter, es eine Verschiebung der Verbräuche von Kalt- zu Warmwasser in begrenztem Umfang gegeben hat. Eine Einsparung bei Kalt- oder Warmwasser aufgrund der Spararmaturen konnte nicht beobachtet werden. Nicht bekannt ist jedoch, wie hoch die Verbräuche ohne diese sparsamen Armaturen ausgefallen wären.

Kaltwasser

Die Kaltwasserverbräuche liegen im Mittel bei 67 Liter/(Person*d) bzw. der Gesamtwasserverbrauch inklusive Warmwasser bei 113,8 Liter/(Person*d). Laut [BDEW 2012] lag der Wasserverbrauch der privaten Haushalte in den letzten Jahren bei 122 Liter/(Einwohner*d), wobei laut Umweltbundesamt ca. 11 Liter/(Person*d) für Kleingewerbe abgezogen werden müssen [UBA Wasser]. Somit liegen die Wohnungen in der Rotlintstraße ungefähr im statistischen Mittel.

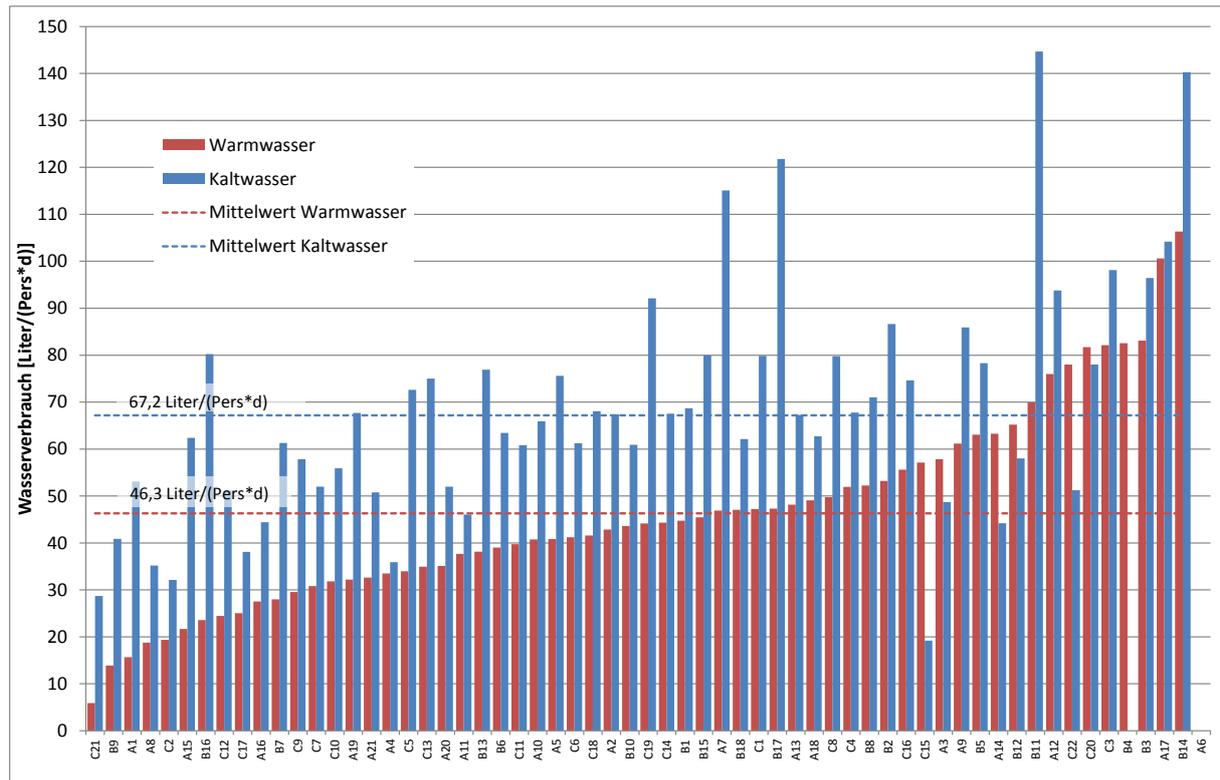


Abb. 3-29: Aufsteigend sortierte Warmwassererbräuche in Liter pro Person und Jahr für das Jahr 2012/13 sowie zugehöriger Kaltwasserverbrauch

Bei der Beurteilung des Warmwasserverbrauchs ist auch die Information von Interesse, wie sich die Zapfungen zeitlich über den Tag verteilen. In Abb. 3-30 diese Profile exemplarisch für den ersten Bauabschnitt 2010, differenziert nach Wochentag und Wochenende dargestellt. Wochentags liegt in der Zeit zwischen 6:00 und 7:00 (angegeben ist das Ende der ausgewerteten Stunde) die Tagesspitze mit ca. 170 l/h, abends tritt nochmals ein erhöhter Verbrauch von ca. 110 l/h

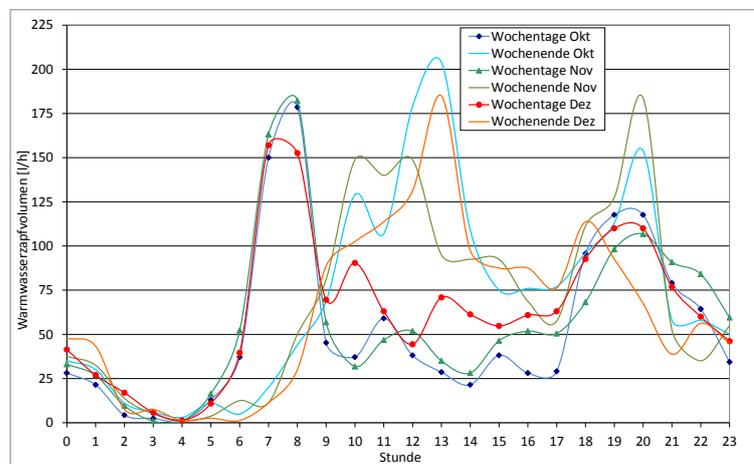


Abb. 3-30: Exemplarische Zapfprofile Warmwasser des ersten Bauabschnitts in drei Monaten des Jahres 2010

zwischen 17:00 und 19:00 auf. Am Wochenende ist die Struktur des Zapfprofils weniger einheitlich und das Maximum tritt später auf, die Höhe ist aber vergleichbar. Das Abendmaximum ist vergleichbar mit den Wochentagen, fällt aber etwas höher aus.

3.5 Haushaltsstrom

Für die Haushaltsstromverbräuche liegen stündliche Messwerte der mittleren Leistung vor. Eine Kontrolle mit Zählerablesungen zu zwei Zeitpunkten erbrachte eine mittlere Abweichung zwischen Handablesung und Messdatenerfassung von 0,5 %, so dass nur ein minimaler Fehler durch die Erfassung der Leistungen entstanden sein kann. Die Messwerte von zwei Wohnungen im dritten Bauabschnitt waren unplausibel niedrig bzw. wegen eines Wechsels in einen Smart-Meter-Tarif nicht vorhanden, so dass diese beiden Wohnungen nicht in der Auswertung berücksichtigt wurden bzw. durch den Mittelwert aller Bestandswohnungen ersetzt wurden.

Abb. 3-31 zeigt die Haushaltsstromverbräuche der Wohnungen, getrennt nach den drei Bauabschnitten geordnet. Die Werte enthalten auch den Verbrauch für Lüftung, die in der Bilanz dem Hilfsenergieverbrauch zuzurechnen ist (siehe Kapitel 4.5). Die Verbräuche fallen in den drei Bauabschnitten sehr unterschiedlich aus. Bedingt durch einen sehr hohen Einzelverbraucher mit untypischer Nutzung (96,7 kWh/(m²a)) liegt der Mittelwert im ersten Bauabschnitt bei 33,2 kWh/(m²a). Ohne diese Wohnung, liegt der Haushaltsstromverbrauch bei 28,4 kWh/(m²a). Im zweiten Bauabschnitt liegt der Mittelwert bei 27,1 kWh/(m²a), im Dritten bei 21,1 kWh/(m²a). Die sparsamsten Haushalte erreichen Verbräuche von 14 bis 16 kWh/(m²a).

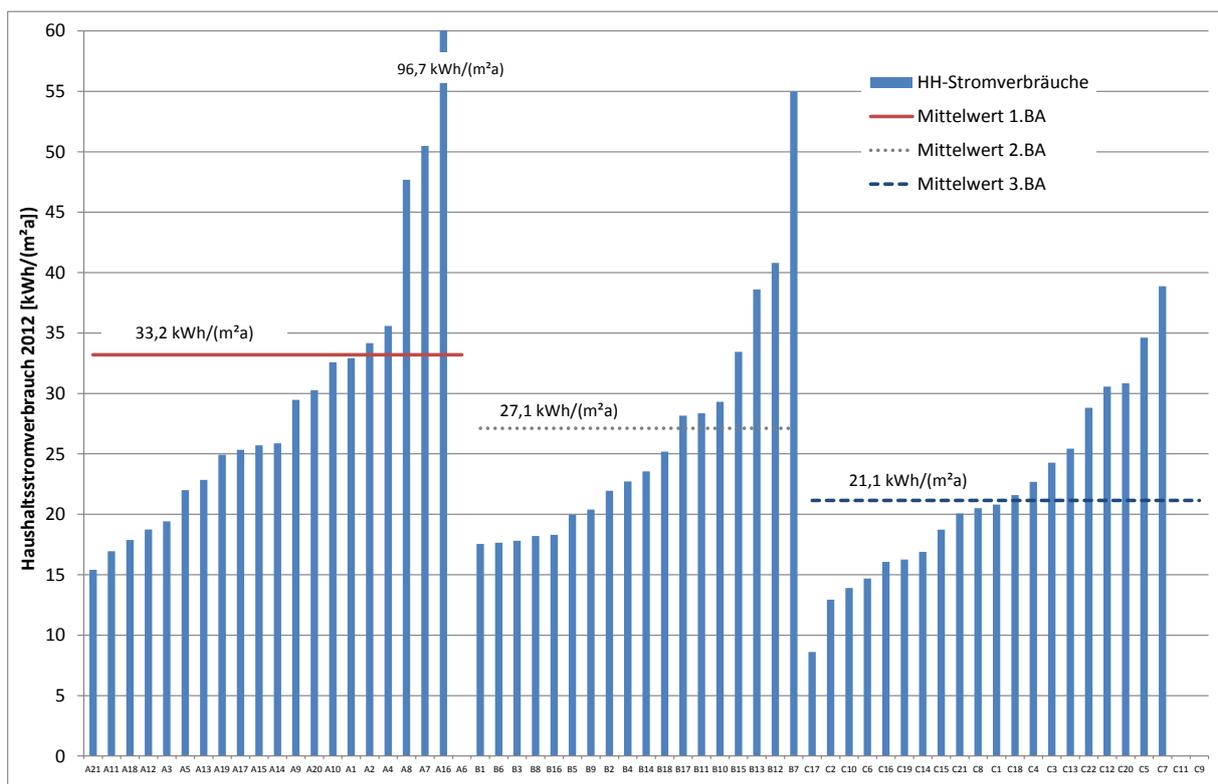


Abb. 3-31: Aufsteigend sortierte Haushaltsstromverbräuche im Jahr 2012 (nach Bauabschnitten getrennt, inkl. Lüftungsstromverbrauch)

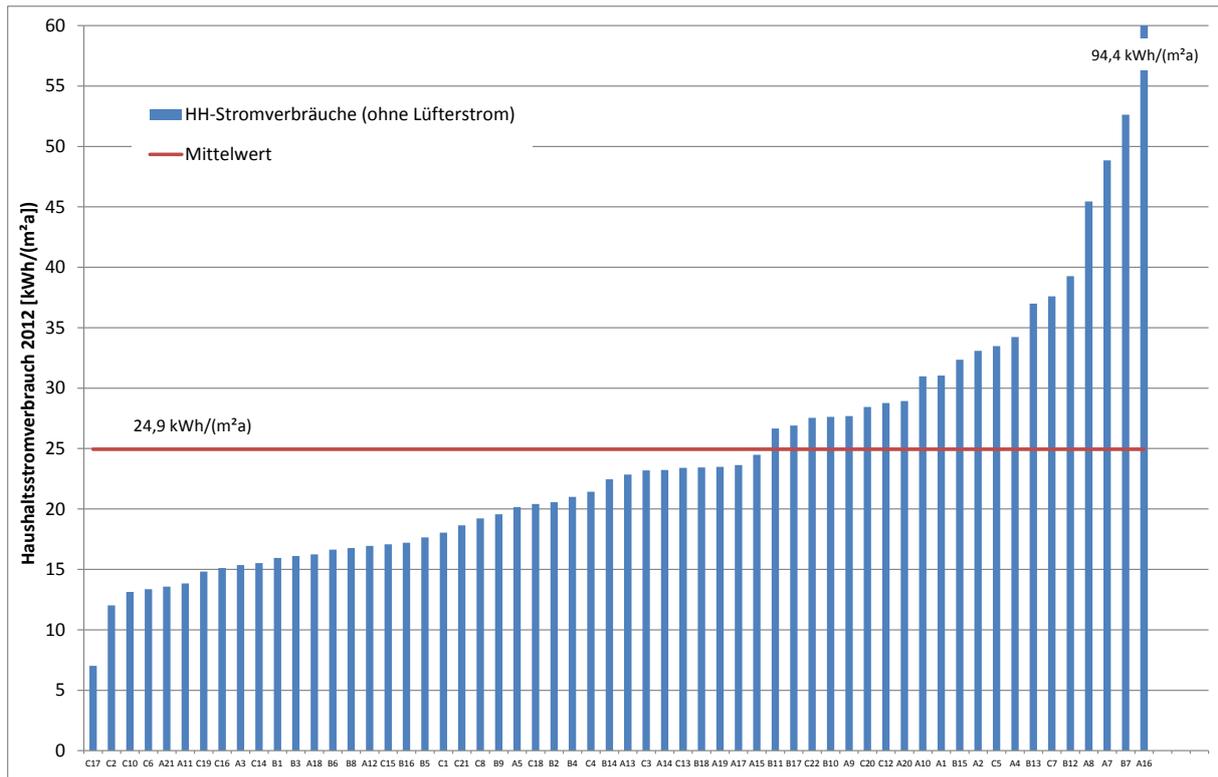


Abb. 3-32: Aufsteigend sortierte Haushaltsstromverbräuche im Jahr 2012 (ohne Lüftungsstromverbrauch)

Zieht man den Lüftungsstromverbrauch (siehe Kapitel 3.6) vom Haushaltsstromverbrauch ab und sortiert alle Wohnungen aufsteigend, ergibt sich das Diagramm in Abb. 3-32. Der Mittelwert des Haushaltsstromverbrauches liegt bei 24,9 kWh/(m²a) und somit 2 kWh/(m²a) über dem Planungswert von 22,9 kWh/(m²a).

Tab. 3-10 zeigt die absoluten Haushaltsstromverbräuche der drei Bauabschnitte für unterschiedliche Jahreszeiträume. Das erste dargestellte Messjahr eines jeden Bauabschnitts umfasst teilweise noch Wohnungen, die noch nicht bezogen sind und ist daher wenig aussagefähig. Der Gesamtstromverbrauch, der ab der Heizperiode 2011/12 alle Wohnungen umfasst, liegt mit knapp unter 100.000 kWh/a auf einem relativ konstanten Niveau.

Tab. 3-10: Absolute Haushaltsstromverbräuche im Messzeitraum (inkl. Lüftungsstrom)

	1.BA	2.BA	3.BA	Gesamt
	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]
2010	33.896			33.896
2010/11 (Okt-Sept)	41.049	25.030		66.079
2011	41.004	25.563		66.566
2011/12 (Jul-Juni)	41.417	26.854	27.759	96.031
2012	42.042	28.392	28.768	99.202
2012/13 (Mai-April)	41.493	28.163	28.285	97.940

Aussagekräftiger sind flächenbezogene Kennwerte des Haushaltsstromverbrauchs (Tab. 3-11). Hier zeigt sich, dass die Messwerte im Laufe der Jahre Schwankungen unterworfen sind, aber kein genereller Trend zu einem Anstieg der Verbräuche zu erkennen ist. Im dritten Bauabschnitt liegen die Werte flächenbezogen am niedrigsten, dies ist auch auf die besonders geringe Personenbelegungsdichte in diesem Bauabschnitt zurückzuführen.

Tab. 3-11: Flächenbezogene Haushaltsstromverbräuche im Messzeitraum (inkl. Lüftungsstrom)

	1.BA	2.BA	3.BA	Gesamt
	[kWh/(m ² a)]	[kWh/(m ² a)]	[kWh/(m ² a)]	[kWh/(m ² a)]
2010	26,8			26,8
2010/11 (Okt-Sept)	32,4	23,9		18,0
2011	32,4	24,4		18,1
2011/12 (Jul-Juni)	32,7	25,6	20,4	26,1
2012	33,2	27,1	21,1	27,0
2012/13 (Mai-April)	32,8	26,9	20,8	26,7

In den Tabellen Tab. 3-12 sind ergänzend die Kennwerte ohne Lüftungsstromverbrauch ausgewiesen (Summe Lüftungsstrom je Bauabschnitt von Summe Haushaltsstrom subtrahiert).

Tab. 3-12: Flächenbezogene Haushaltsstromverbräuche im Messzeitraum (ohne Lüftungsstrom)

	1.BA	2.BA	3.BA	Gesamt
	[kWh/(m ² a)]	[kWh/(m ² a)]	[kWh/(m ² a)]	[kWh/(m ² a)]
2010	25,0			25,0
2010/11 (Okt-Sept)	30,6	22,4		26,9
2011	30,6	22,9		27,1
2011/12 (Jul-Juni)	30,9	24,1	18,9	24,5
2012	31,4	25,6	19,7	25,4
2012/13 (Mai-April)	31,0	25,4	19,3	25,1

Tab. 3-13: Personenbezogene Haushaltsstromverbräuche im Messzeitraum (ohne Lüftungsstrom)

	1.BA	2.BA	3.BA	Gesamt
	[kWh/(Pers.a)]	[kWh/(Pers.a)]	[kWh/(Pers.a)]	[kWh/(Pers.a)]
2010	903			903
2010/11 (Okt-Sept)	1108	795		965
2011	1106	813		972
2011/12 (Jul-Juni)	1118	857	830	944
2012	1136	909	862	977
2012/13 (Mai-April)	1120	901	847	964

Da in diesem Projekt auch die Personenbelegungen bekannt sind, können auch personenbezogene Kennwerte bestimmt werden (Tab. 3-13). Auch hier zeigt sich, dass im dritten Bauabschnitt mit ca. 850 kWh/(Person a) die niedrigsten Kennwerte erreicht werden. Im zweiten Bauabschnitt liegt der Kennwert bei ca. 900 kWh/(Pers a). Deutlich darüber liegt der erste Bauabschnitt mit knapp 1120 kWh/(Pers a), was jedoch hauptsächlich an der Wohnung mit dem Spitzenverbrauch liegt (dort 4300 kWh/(Pers a)).

Bezieht man die gemessenen Haushaltsstromverbräuche auf die Haushaltsgröße, so erreicht ein 1-Personen-Haushalt einen Stromverbrauch von 1038 kWh/a, der 2-Personen-Haushalt mit 1978 kWh/a fast den doppelten Wert (Tab. 3-14). Der Verbrauch der 4-Personen-Haushalte steigt mit 3323 kWh/a nicht linear an, was möglicherweise an kleineren Kindern liegt, die in diesen Wohnungen leben und (noch) nicht den Stromverbrauch von Erwachsenen erreichen, aber auch an der bereits vorhandenen Grundausstattung (z. B. Kühlschrank). Zusätzlich sind die Kennwerte auch inklusive Lüftungsstromverbrauch dargestellt.

Tab. 3-14: Mittlere Stromverbräuche für Haushalte unterschiedlicher Größe im Jahr 2012 (mit und ohne Lüftungsstrom)

	Anzahl [-]	Verbrauch [kWh/a]	
		ohne Lüftung	mit Lüftung
1 Person	33	1038	1132
2 Personen	22	1978	2076
3 Personen	0	-	-
4 Personen	4	3323	3462

Vergleicht man die Verbrauchswerte mit Daten, die von der EnergieAgentur Nordrhein-Westfalen erhoben wurden [EA-NRW 2006], so sind die Messwerte aus der Rotlintstraße als niedrig einzuschätzen. Bei der NRW-Umfrage ergaben sich 2000 kWh für einen Einpersonenhaushalt, 3100 kWh/a bei zwei und 3908 kWh/a bei drei Personen im Haushalt. In der Rotlintstraße liegen die Personen bezogenen Daten mit 1040 kWh bei einem Einpersonenhaushalt und ca. 2000 kWh bei einem Zweipersonenhaushalt deutlich niedriger (siehe Tab. 3-14). Aus der Quelle [EA-NRW 2006] ging jedoch nicht hervor bei wie vielen der Befragten die Warmwasserbereitung elektrisch erfolgt.

Der Vergleich mit anderen energetisch hochwertig modernisierten und vermieteten Gebäuden (Tab. 3-15) zeigt, dass die Haushaltsstromverbräuche in der Rotlintstraße ca. 15 % unter den Werten der anderen Gebäude liegen. Inwieweit dieses Ergebnis durch die geringe Personenbelegungsdichte in der Rotlintstraße mitbeeinflusst wird, kann nicht quantifiziert werden, da für die Vergleichsobjekte keine Personen bezogenen Kennwerte vorliegen.

Tab. 3-15: Vergleich der Messergebnisse zum Haushaltsstromverbrauch mit Literaturangaben energetisch hochwertiger Modernisierungen im Bestand

Projekt	Verbrauchskennwert Haushaltsstrom [kWh/(m ² a)]	Quelle
Rotlintstraße, Frankfurt (vermietet)	26,7 (mit Lüftungsstrom) bzw. 25,1 (ohne Lüftungsstrom)	
Tevesstraße, Frankfurt (vermietet)	33,0	[PHI 2009]
St. Jacob, Frankfurt (Eigentum)	29,4	[PHI 2004]
3-Liter-Haus, Mannheim (vermietet)	31,0	[IGE 2007]

Für den Haushaltsstromverbrauch kann eine geordnete Jahresdauerlinie der mittleren stündlichen Leistung erstellt werden (Abb. 3-33), vergleichbar der für Wärme, die in Kapitel 4.2 dargestellt wird. Die maximale Summenleistung aller Haushalte lag bei 32 kW, die minimale Summenleistung bei 4,4 kW. Die Jahresdauerlinie Haushaltsstrom besitzt einen ähnlichen Verlauf wie die Jahresdauerlinie Wärme (Kapitel 4.2), ist aber weniger steil.

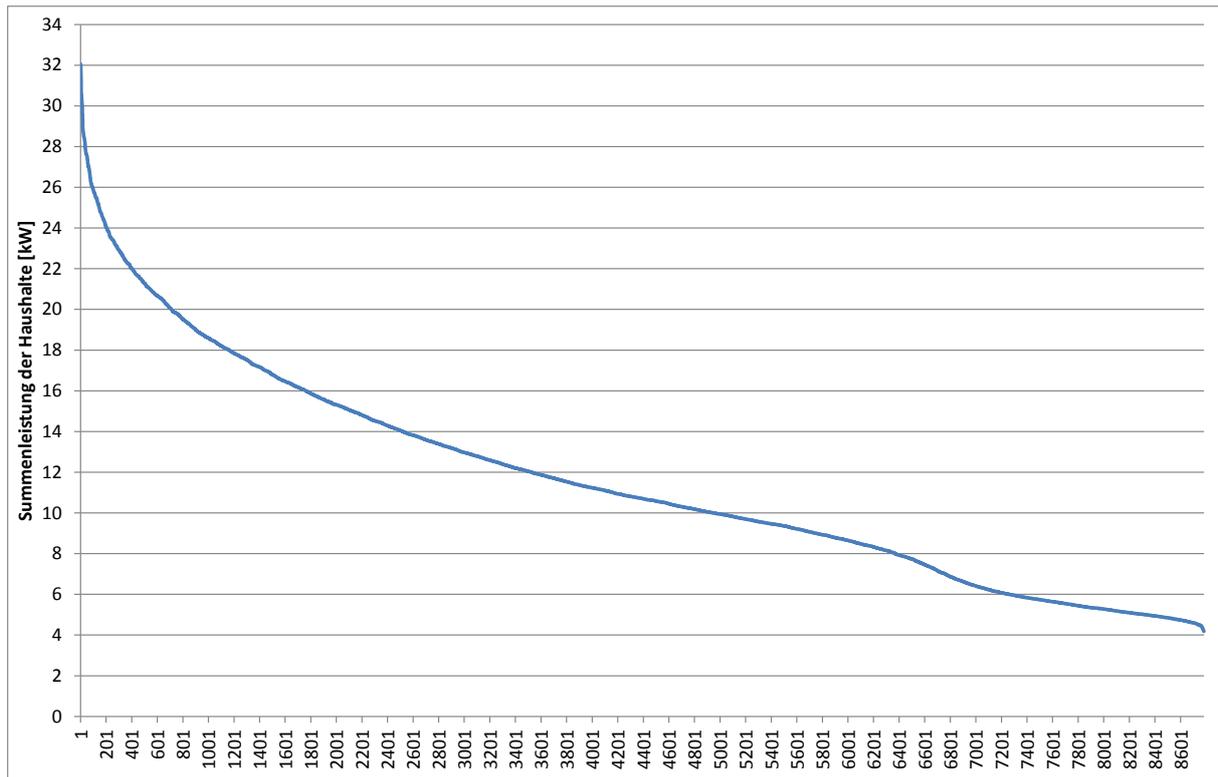


Abb. 3-33: Geordnete Jahresdauerlinie des Haushaltsstromverbrauchs aller Wohneinheiten (inkl. Lüftungsanlagen)

Abb. 3-34 zeigt mittlere monatliche Tagesprofile der Summe des Haushaltsstromverbrauchs. In den Nachtstunden ergeben sich nur geringe Unterschiede zwischen den Monaten. Tagsüber ist zu erkennen, dass in den Sommermonaten die mittlere elektrische Leistung deutlich niedriger ausfällt, als in den Wintermonaten. Während sich im Winter eine deutliche Spitze um 20 Uhr ergibt, verlaufen die Kurven im Sommer in den Abendstunden flacher. Die Differenz von Sommer- und Winterspitze liegt bei ca. 10 kW. Eine ausgeprägte Spitze in den Mittagsstunden ist nicht zu erkennen. Bei der Darstellung wurde keine Korrektur zwischen Sommer- und Winterzeit vorgenommen.

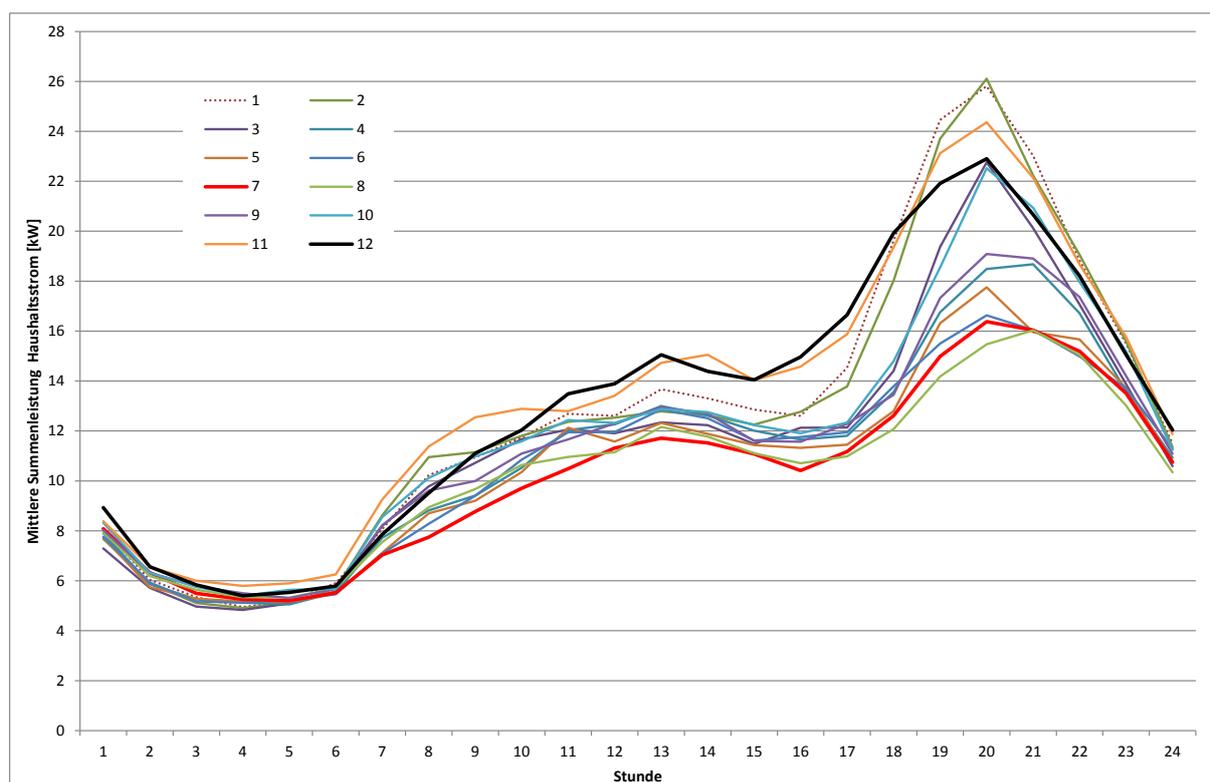


Abb. 3-34: Mittlere Gesamtleistung für Haushaltsstrom in den Monaten Januar bis Dezember (ausgewertet wurden Daten des Jahres 2012) im Tagesverlauf inklusive Hilfsenergie für Wohnungslüftung

3.6 Lüftungsstromverbrauch

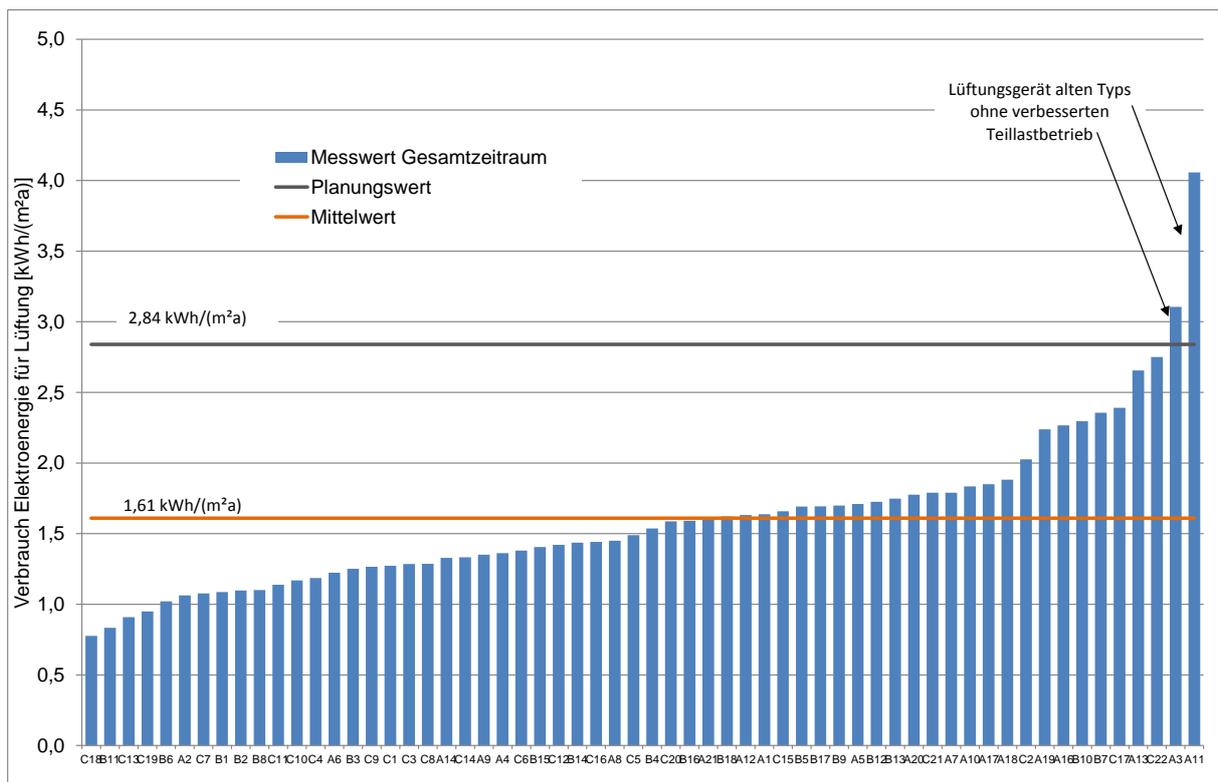
In allen Wohnungen wurden Unterzähler für den elektrischen Energieverbrauch der Lüftungsanlagen installiert, die zusammen mit den Temperatur-Feuchte-Datenloggern manuell abgelesen wurden. Es wurden unterschiedlich viele Auslesungen durchgeführt und eine mittlere Leistung über den Gesamtzeitraum berechnet. Die Messwerte würden auch evtl. auftretende Verbräuche für eine elektrische Frostfreihaltung beinhalten, im Auslieferungszustand der Geräte war diese elektrische Vorheizung jedoch deaktiviert [Kink 2012].

Abb. 3-35 zeigt die geordneten, auf die Energiebezugsfläche bezogenen Lüftungsstromverbräuche der Wohnungen über den gesamten Zeitraum der Nutzung vom Einbau (kurz vor Bezug durch die Mieter) bis zum 07.05.2013. Es ergibt sich eine gewisse Streuung der Messwerte, die einerseits durch unterschiedliche Lüfterstufen hervorgerufen werden³, andererseits durch die unterschiedlichen Wohnungsgrößen. Im Mittel lag der Lüftungsstromverbrauch bei 1,6 kWh/(m²a), was fast bei der Hälfte des Planungswertes von 2,84 kWh/(m²a) liegt. Ursache ist wohl, dass überwiegend eine verbesserte Version des Lüftungsgeräts mit einem niedrigeren Stromverbrauch (besonders in niedrigen Betriebsstufen) eingesetzt wurde.

³ Welche Lüfterstufe die Mieter normalerweise ausgewählt haben, wurde im Rahmen der Mieterbefragung [IWU 2012] erhoben. Dort gaben von 40 Antworten 3 Mieter an, bei Anwesenheit im Winter die Lüftungsstufe 1 einzustellen, 24 die Stufe 2, 10 die Stufe 3 und 3 die Stufe 4.

Zwei Wohnungen wurden mit der älteren Version des Lüftungsgerätes ausgestattet, bei dem Optimierungen zur Reduktion des Stromverbrauchs noch nicht umgesetzt waren. Diese beiden Lüftungsgeräte erreichen die höchsten Lüftungsstromverbräuche und liegen zum Teil noch über den Planwerten.

Die Messdaten liefern keinen Hinweis, dass die elektrischen Frostschutzregister entgegen den Voreinstellungen in Betrieb gegangen sind. Stattdessen wurde der Frostschutz durch eine Intervallschaltung der Ventilatoren gelöst. Einzig die Wohnung mit dem höchsten Lüftungsstromverbrauch (ältere Version des Gerätes) weist einen deutlich erhöhten Verbrauch auf, der auch durch zusätzliche elektrische Frostfreihaltung verursacht sein könnte. Hier ist nicht sichergestellt, ob in diesem Gerät der Frostschutz deaktiviert war.



4 Messergebnisse der Zentral- und Anlagentechnik

Neben der wohnungsweisen Auswertung ist auch die Versorgung der Wohnungen mit Heizung und Warmwasser durch die zentrale Anlagentechnik sowie deren Hilfsstromeinsatz zu untersuchen. In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der zentralen Technik der gesamten Anlage Rotlintstraße 116-128 dargestellt und ausgewertet.

4.1 Wärmeerzeugung im Heizhaus

Im zentral gelegenen Heizhaus wird einerseits mit dem Rapsöl-BHKW (22 kW thermische Leistung), andererseits mit der Erdgas-Spitzenlastkessel (100 kW max. thermische Leistung) die benötigte Wärme für Heizung und Warmwasser erzeugt, in einem 2000 Liter Puffer zwischengespeichert und dann über ein kleines Nahwärmenetz, das teilweise in den Kellern der Gebäude, teilweise im Erdreich verlegt ist, zu den Semizentralen in jedem der drei Bauabschnitte verteilt (siehe Abb. 1-1).

Tab. 4-1: Absolutwerte der Wärmeerzeugung im Heizhaus sowie Verluste im Heizhaus

	Gasverbrauch kWh/(m ² a)	Wärmeerzeugung Gastherme kWh/(m ² a)	Aufwandszahl Gastherme	Wärmeerzeugung BHKW kWh/(m ² a)	Deckungsanteil BHKW %	Wärmeerzeugung Heizhaus kWh	Wärmeabgabe Nahwärme kWh/(m ² a)	Wärmeverluste Heizhaus kWh/(m ² a)	Wärmeverluste Heizhaus %	mittlere Verlustleistung Heizhaus W/m ²
2011 *)	31,7	28,8	1,11	11,8	29%	40,6	37,4	3,2	8%	0,36
2011/12	48,5	44,3	1,10	4,5	9%	48,8	46,2	2,6	5%	0,30
2012	52,5	48,1	1,09	3,6	7%	51,7	48,5	3,2	6%	0,36
2012/13	49,8	45,4	1,10	10,0	18%	55,4	51,4	3,9	7%	0,45

*) erst ab Sommer 2011 w. waren alle Bauabschnitt bezogen

Tab. 4-1 zeigt die absoluten Werte der Wärmeerzeugung für die unterschiedlichen Auswertezentren. Entgegen den Planungen, konnte das BHKW aufgrund unterschiedlicher Probleme den angestrebten Deckungsanteil von ca. 74 % nicht erreichen (siehe Kapitel 4.1.1). Stattdessen wurde ein Großteil der Wärme mit der Erdgasbrennwerttherme erzeugt. Addiert man die Wärmeerzeugung von Therme und BHKW und zieht davon die Einspeisung in das Nahwärmenetz ab, so erhält man die Wärmeverluste im Heizhaus inklusive Pufferspeicher, die zwischen 9.800 kWh/a und 14.900 kWh/a lagen. Diese Verluste liegen zwischen 5 % und 8 % bezogen auf die Wärmeerzeugung im Heizhaus. Daraus ergibt sich eine Verlustleistung von ca. 1,4 kW.

Der Planwert der Verluste im Heizhaus lag bei 4100 kWh/a (1,1 kWh/(m²a)), wobei über 70 % der Verluste am Pufferspeicher (Verlustleistung 5,6 W/K) anfallen sollten. Mögliche Gründe für diese deutliche Abweichung bei den Messwerten (um den Faktor 3) sind: einerseits Armaturen, bei denen die Dämmung fehlte (Schmutzfänger) oder nachträglich entfernt wurde (z. B. Wärmemengenzähler) (siehe Abb. 4-1), die real größeren Leitungslängen im Heizhaus, andererseits der Ansatz im PHPP, dass die Verteilleitungen nur bei Heizbetrieb auf Temperatur gehalten werden, die Heizzentrale aber ganzjährig Vor-



Abb. 4-1: Pumpe, die nach Montagearbeiten nicht mehr korrekt isoliert wurde (links), ungedämmter Wärmemengenzähler und Schmutzfänger (rechts)

lauftemperaturen von ca. 60 °C bereit hielt. Die hohen Temperaturen im Heizraum deuten ebenfalls auf erhöhte Wärmeverluste hin.

In Tab. 4-2 sind die zugehörigen Kennwerte für die Wärmeerzeugung im Heizhaus sowie die Verluste dargestellt. Gründe für die ansteigende Wärmeabgabe des Heizhauses sind neben dem kälteren Klima 2012/13 die Probleme bei der Warmwasserbereitung vor allem im dritten Bauabschnitt (siehe Kapitel 4.4).

Tab. 4-2: Kennwerte der Wärmeerzeugung im Heizhaus sowie Verluste im Heizhaus

	Gasverbrauch	Wärmeerzeugung Gastherme	Aufandszahl Gastherme	Wärmeerzeugung BHKW	Deckungsanteil BHKW	Wärmeerzeugung Heizhaus	Wärmeabgabe Nahwärme	Wärmeverluste Heizhaus	Wärmeverluste Heizhaus	mittlere Verlustleistung Heizhaus
	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)		kWh/(m ² a)	%	kWh	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	%	W/m ²
2011 *)	31,7	28,8	1,11	11,8	29%	40,6	37,4	3,2	8%	0,36
2011/12	48,5	44,3	1,10	4,5	9%	48,8	46,2	2,6	5%	0,30
2012	52,5	48,1	1,09	3,6	7%	51,7	48,5	3,2	6%	0,36
2012/13	49,8	45,4	1,10	10,0	18%	55,4	51,4	3,9	7%	0,45

*) erst ab Sommer 2011 w aren alle Bauabschnitt bezogen

Abb. 4-2 zeigt die Wärmeerzeugung der Heizzentrale, bestehend aus Rapsöl-BHKW und Erdgas-Spitzenlastkessel. Dargestellt ist die jeweilige Wärmeeinspeisung in den Pufferspeicher der Heizzentrale gestapelt sowie die Wärmeabnahme aus dem Pufferspeicher durch das Nahwärmenetz. Erkennbar ist der Jahrgang des Wärmeverbrauchs mit niedrigen Werten zur Warmwassernacherwärmung im Sommer und einem deutlichen Anstieg im Winter. Es ist deutlich zu erkennen, dass das BHKW einen deutlich geringeren Anteil an der Wärmeversorgung liefert, als die Erdgastherme. Details zum Betrieb des Rapsöl-BHKWs sind in Kapitel 4.1.1 dargestellt.

Abb. 4-3 zeigt für den Zeitraum November 2010 bis April 2013 als Monatswerte die Wärmeerzeugung im Heizhaus sowie die Wärmeverluste im Heizhaus und im Nahwärmenetz. Die Verluste folgen einem Jahrgang analog dem der Wärmeerzeugung, wobei berücksichtigt werden muss, dass im Winter 2010/11 noch einige Veränderungen an der Anlagentechnik vorgenommen wurden und der dritte Bauabschnitt erst im Sommer 2011 bezogen wurde. Insgesamt sind die Nahwärmeverluste im Laufe der Messphase gesunken, bei den Verlusten im Heizhaus ist ein Zusammenhang mit der Außentemperatur zu vermuten.

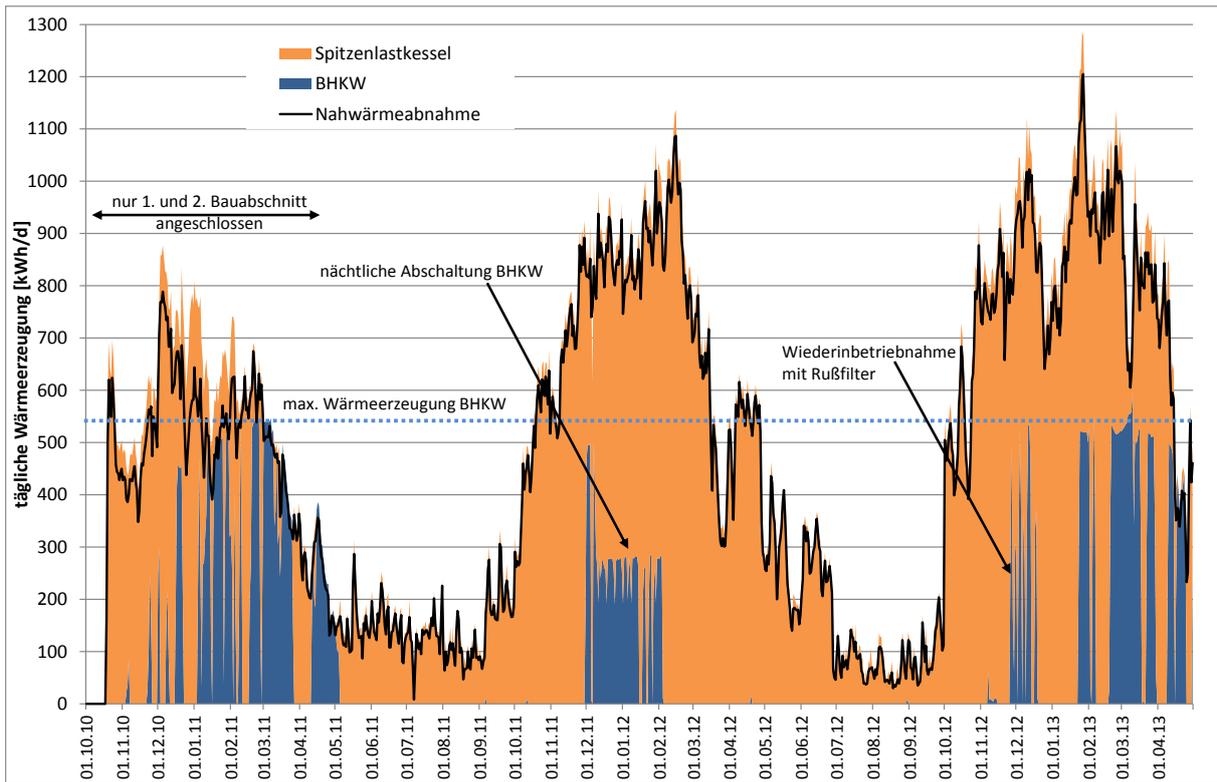


Abb. 4-2: Wärmeerzeugung von BHKW (blau) und Spitzenlastkessel (orange) als gestapelte Linien sowie Wärmeabnahme Nahwärmenetz im Messzeitraum

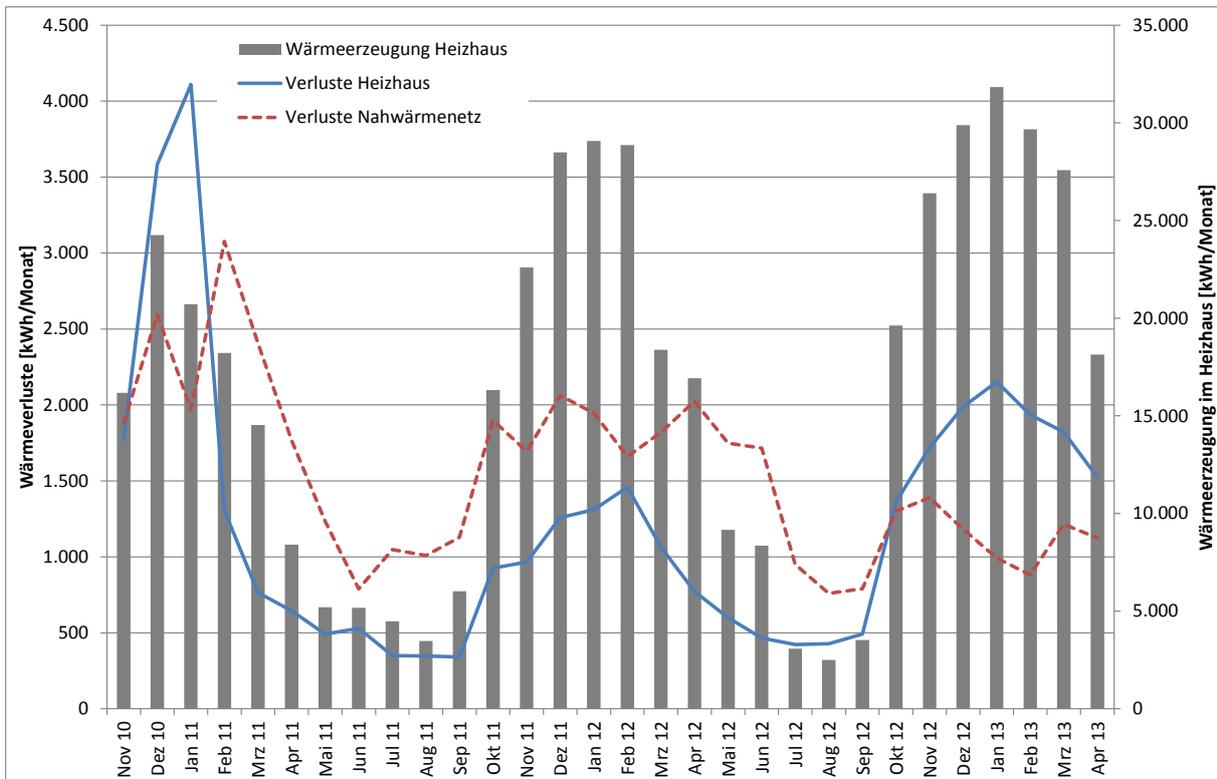


Abb. 4-3: Wärmeerzeugung im Heizhaus sowie Wärmeverluste im Heizhaus und im Nahwärmenetz

4.1.1 Betrieb Rapsöl-Blockheizkraftwerk (BHKW)

Das Blockheizkraftwerk mit dem nachwachsenden Energieträger Rapsöl sollte den größten Teil der Wärmeversorgung der Gebäude übernehmen - geplant war ein Deckungsanteil von 74 %. Wie im Folgenden dargestellt, haben sich jedoch einige Probleme ergeben, wodurch dieses Ziel bisher nicht erreicht wurde.

Das BHKW wurde im Winter 2009/10 auf die Baustelle geliefert und im Heizhaus aufgestellt, aber noch nicht angeschlossen. Da sich der Fortgang der Sanierung im zweiten Bauabschnitt, in dessen Keller die Rapsöltanks untergebracht werden sollten, verzögerte, wurde das Blockheizkraftwerk erst im November 2010 in Betrieb genommen. Durch die lange Stillstandszeit fielen nach Inbetriebnahme einige Komponenten wie Schalter, Schütze oder Pumpen immer wieder aus, so dass sie ausgetauscht werden mussten und das BHKW erst im Februar 2011 in Dauerbetrieb ging. Ende März 2011 verschmutzte nach einer Wartung Rußanfall die Terrasse eines Mieters, so dass es wieder zeitweise außer Betrieb genommen wurde. Das BHKW wurde über den Sommer abgeschaltet und es wurden Wartungsarbeiten zur Behebung des Problems an der Anlage durchgeführt. Auf die Wiederinbetriebnahme Ende November 2011 folgten Probleme, die durch Schallemissionen am Schornstein verursacht wurden. Aus diesem Grund wurde das BHKW zeitweise nur tagsüber zwischen 7:00 Uhr und 19:00 Uhr betrieben. Rußprobleme im Februar 2012 führten erneut zum Abschalten des BHKW. Mit Hilfe eines Sachverständigen wurde die Ursache analysiert (die Rußentwicklung tritt nur nach dem Start des BHKW in nennenswertem Umfang auf, wenn die Verbrennung noch nicht optimal läuft und der Kamin noch eine zu geringe Temperatur aufweist) und in der Folge wurden Möglichkeiten für die Nachrüstung eines Rußfilters gesucht. Mit einem Rußfilter, der aus dem Bereich der Flurfördertechnik stammt, wurden im Sommer Anfahrtests unternommen, um die Rußmenge beim Kalt- und Warmstart zu bestimmen, die von dem Filter abgeschieden wird. Es zeigte sich, dass sich bei einem Kaltstart nach mehreren Monaten Stillstand des BHKW fast 10 g Ruß im Filter abgelagert hatten. Bei einem Warmstart waren es deutlich unter 2 g (Messungen IB Baumgartner am 30.08.2012 [IBB 2012]). Im November 2012 wurde die Anlage mit einem stationären Rußfilter mit wechselbaren Filterelementen ausgestattet, der eine Abscheidung von 97 % aller Partikel garantieren soll [Baumüller] (siehe Abb. 4-4 und Abb. 4-5). Der anschließende Probetrieb musste nach einigen Wochen wegen eines Filterdefekts (mechanische Beschädigung des Filters) unterbrochen werden. Seit Februar 2013 läuft die Anlage weitgehend störungsfrei, auftretende Probleme (wie z. B. Kühlwasseraustritt) konnten zeitnah behoben werden. Parallel wurden Veränderungen an der Schornsteinbefestigung und am Schornsteinkopf vorgenommen, so dass auch die Schallemissionen vermindert werden.

Die Schilderungen zeigen, dass für alle Beteiligten ein hoher Aufwand erforderlich war, um das Rapsöl-BHKW in einen Dauerbetrieb zu versetzen. Dadurch ergeben sich auch nennenswerte Auswirkungen auf die Energieerzeugung und die Treibhausgasemissionen (siehe Kapitel 5.2)



Abb. 4-4: Außenansicht des Rußfilters [Baumüller]



Abb. 4-5: Rußfilter nach der Montage über dem BHKW

Wärme- und Stromerzeugung BHKW

Aufgrund der zahlreichen Probleme beim BHKW-Betrieb ist die Anlage nur vergleichsweise selten in Betrieb gewesen und hat 2010/11 bzw. 2012/13 ca. 38.000 bis 39.000 kWh Wärme und 9.600 bis 15.400 kWh elektrische Energie eingespeist (Tab. 4-3). In der Heizperiode 2011/12 lag die Energieumwandlung noch deutlich niedriger, so dass sich nur 777 Vollbetriebsstunden ergaben, während in den anderen beiden Heizperioden das BHKW ca. 1.750 Stunden in Vollast lief. Diese Werte liegen verständlicherweise deutlich unter den 3.000 Betriebsstunden, die in der Planungsphase angestrebt wurden.

Tab. 4-3: Wärme- und Stromerzeugung des BHKW

	Wärmeerzeugung	Netto Stromerzeugung	Vollbetriebsstunden
	kWh/a	kWh/a	h/a
2010/11	39.254	9.612	1.784
2011/12	17.099	7.372	777
2012/13	37.971	15.455	1.726

Elektrische Energieerzeugung

Laut Herstellerdatenblatt liefert das BHKW eine elektrische Leistung von 7 bis 11 kW [Greentherm]. Die tatsächliche Stromerzeugung war in der Rotlintstraße nicht konstant auf einen Wert eingestellt, sondern variiert immer wieder, ebenso wie die Wärmeeinspeisung. In Abb. 4-6 sind die Brutto- und Nettoerzeugung elektrischer Energie im Zeitraum vom 03.12.2012 bis 03.05.2013 dargestellt. In diesem Zeitraum lieferte das BHKW vergleichsweise häufig Energie. Man erkennt, dass die elektrische Bruttoerzeugung anfangs bei 10,3 kW lag, dann im Februar 2013 auf 10 kW reduziert wurde und Mitte März dann auf 9,8 kW. Die Nettoerzeugung liegt ca. 520 W (2011) bis 620 W (2012/13) unter der Bruttoerzeugung. Somit erreicht das BHKW eine Nettoerzeugung von ca. 9,2 kW bis 9,7 kW. Höher aufgelöste Auswertungen des Eigenverbrauchs des BHKW sind aufgrund von Ausleseproblemen mit dem Bruttoerzeugungszähler nicht möglich. Die Differenz zwischen Brutto- und Nettoerzeugung umfasst einerseits den Eigenverbrauch für Pumpen und Heizung, andererseits auch den Eigenverbrauch der Zentralregelung mit der SPS, dem Visualisierungsrechner und den Heizungspumpen, die über die Zentralregelung geschaltet werden. Am Übergang von Winter- auf Sommerbetrieb kann der Anteil der Heizungspumpen auf ca. 190 W abgeschätzt werden. Der Eigenverbrauch der Zentralrege-

lung belüftet sich dann auf ca. 210 W. Zieht man diesen Pumpen- und Regelungsverbrauch in Höhe von ca. 400 W ab, so ergibt sich ein Eigenverbrauch des BHKW von ca. 200 W.

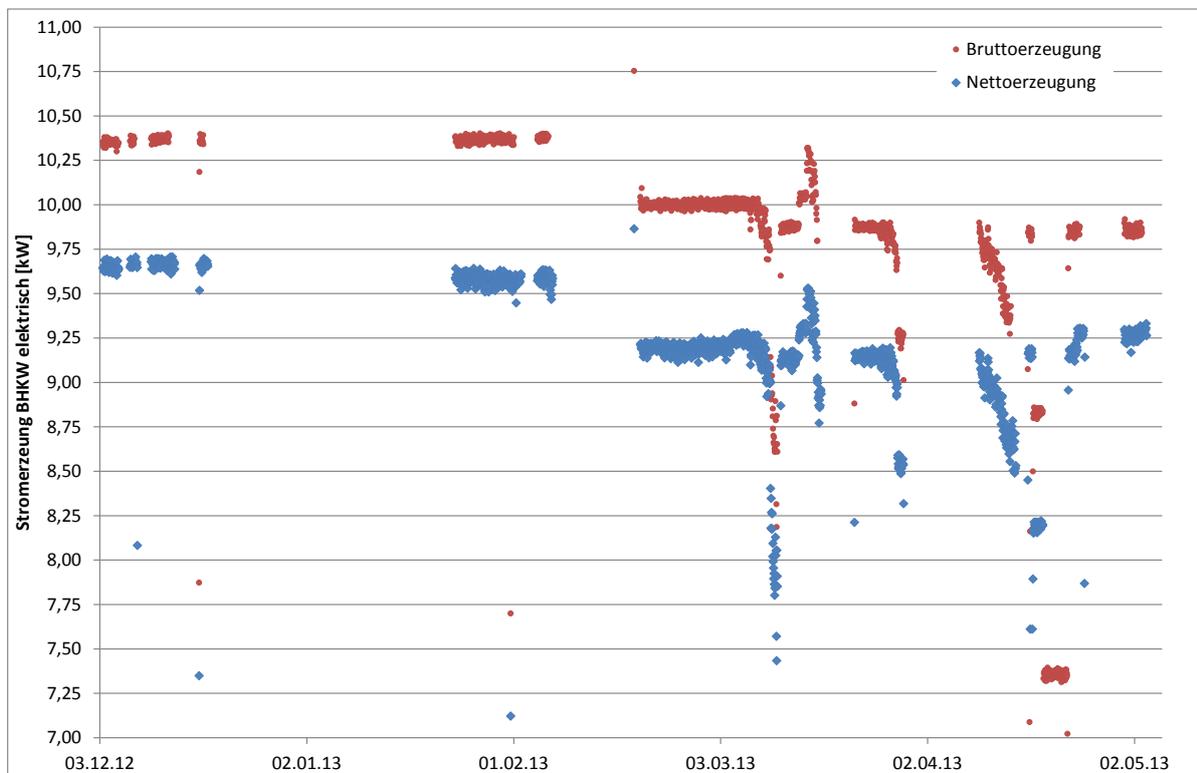


Abb. 4-6: Messdaten der Brutto- und Nettostromerzeugung des BHKW zwischen 03.12.2012 und 03.05.2013

Die Absenkung der Nennleistung, die auch wärmeseitig beobachtet werden konnte, ist vermutlich durch Anpassungen des Herstellers im Rahmen von Wartungsarbeiten zurückzuführen, um den Anlagenbetrieb zuverlässiger zu gestalten.

In der Folge sank auch die Stromkennzahl des BHKW, die das Verhältnis von elektrischer zu thermischer Energieerzeugung beschreibt, von 0,43 im Jahr 2010/11 auf 0,40 im Jahr 2012/13. Damit liegt sie deutlich unter den Herstellerangaben von 0,5.

Gesamtnutzungsgrad des BHKW

Ein Gesamtnutzungsgrad für das BHKW konnte nicht ohne weiteres berechnet werden. Aufgrund der Verschaltung der Rapsölpumpe (das Rapsöl wird bei Bereitschaft des BHKW immer im Kreis gepumpt), konnten mit dem Betriebsstundenzähler keine Nutzungsgrade des Rapsöl-BHKW bestimmt werden. Zur Auswertung stehen jedoch zusätzlich die Daten von zwei Tankvorgängen [ABG 2013a] zur Verfügung. Wird unterstellt, dass bei den Tankvorgängen 2011 und 2013 die Rapsöltanks immer vollständig gefüllt wurden, so kann für den 31.01.2013 über einen Zeitraum von 659 Tagen ein Gesamtnutzungsgrad abgeschätzt werden. Allerdings ist das BHKW im fraglichen Zeitraum von April 2011 bis Januar 2013 selten in Betrieb gewesen (ca. 60,3 Volllasttage) und aufgrund der Probleme mit den Rußemissionen öfter im Probetrieb. Zusätzlich war der Stromzähler für die Bruttostromerzeugung des BHKW nicht immer erreichbar, so dass die Stromerzeugung auf Basis der Nettostromerzeugung, korrigiert um den Faktor Netto- zu Bruttoerzeugung an den auswertbaren Tagen, berechnet

wurde. Die Auswertung des Gesamtnutzungsgrades des BHKW ist somit mit einer größeren Unsicherheit verbunden. Im Zeitraum von Februar bis Mai 2013 war das BHKW häufig in Betrieb, allerdings enden die Messdaten für Wärme am 05.05.2013. Aufgrund von hoch aufgelösten Betriebszeiten der Regelung des BHKW und nachträglichen Auslesungen der Stromzähler wurde der fehlende Zeitraum hochgerechnet, damit ein Zeitraum mit realistischem Gesamtnutzungsgrad ausgewertet werden kann.

Tab. 4-4: Füllungen der Rapsöltanks (die Füllstandsanzeige wurde erst im Jahr 2012 nachgerüstet) , Betankungsvolumen, Strom- und Wärmeerzeugung sowie Gesamtnutzungsgrad des BHKW

	Füllstand vorher*	Füllstand nachher*	Betankungsvolumen [Liter]	Wärmeerzeugung BHKW seit Tankvorgang [kWh]	Bruttostromerzeugung BHKW seit Tankvorgang [kWh]	Gesamtnutzungsgrad BHKW [%]
25.08.2010	-	-	4000			
09.09.2010	-	-	4000			
13.04.2011	-	-	5946			
31.01.2013	8%	100%	5845	31852	16099	85%
23.05.2013	?	100%	5936	34235	15775	87%

* die Füllstandsanzeige wurde erst im Jahr 2012 nachgerüstet

Daten BHKW-Wärme nur bis 30.04.13; verbleibende Zeit mit Stromerzeugung hochgerechnet

Tab. 4-4 zeigt die Betankungsdaten, die Wärme- und Stromerzeugung sowie den Gesamtnutzungsgrad des BHKW. Als Heizwert für Rapsöl wurden 9,7 kWh/Liter nach [Wiki Rapsöl] angesetzt, wobei dieser Wert produktspezifischen Schwankungen unterliegen kann. Es ergibt sich im ersten Auswertzeitraum ein Gesamtnutzungsgrad von 85 %. Im zweiten Auswertzeitraum (Februar bis Mai 2013) ergibt sich ein Gesamtnutzungsgrad von 87 %. Die Herstellerangabe (> 90 %) wurde in beiden Zeiträumen, unter Berücksichtigung der Unsicherheiten bei der Berechnung, nicht erreicht.

In [ASUE 2011] sind Herstellerangaben von Heizöl- und Rapsöl-BHKWs im Leistungsbereich zwischen 2 kW_{el} und 15 kW_{el} zu finden. In Abb. 4-7 sind die dort angegebenen Gesamtnutzungsgrade über die elektrische Anlagenleistung aufgetragen und mit dem BHKW in der Rotlintstraße verglichen (großes grünes Dreieck). Es zeigt sich, dass der Gesamtnutzungsgrad in der Rotlintstraße im unteren Bereich sowohl bei den Rapsöl-, als auch bei den Heizöl-BHKWs liegt, aber trotz der Betriebsprobleme keinen extremen Ausreißer darstellt. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die elektrische Nennleistung in der Rotlintstraße unter den Herstellerangaben lag (siehe oben).

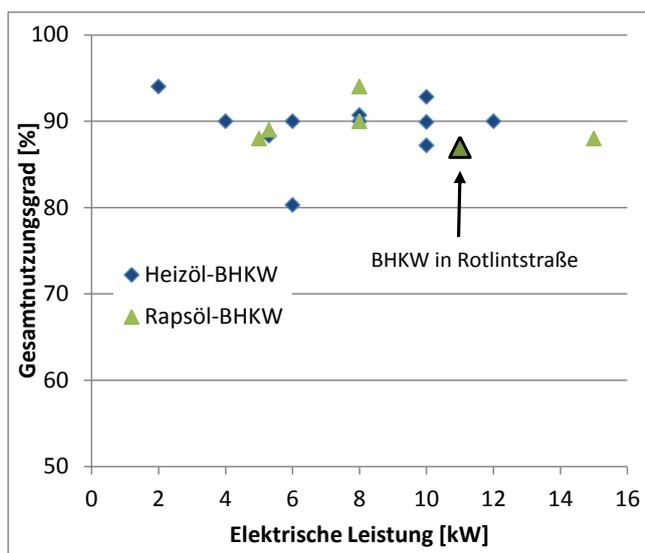


Abb. 4-7: Gesamtnutzungsgrad kleiner Heizöl- und Rapsöl-BHKW nach [ASUE 2011] und Ergebnis BHKW aus der Rotlintstraße

Temperaturen im BHKW-Kreis

Während in der ersten Heizperiode 2010/11 die Vorlauftemperaturen des BHKW im Mittel bei 78,5 °C mit einer Spreizung von 16,9 K (nur bei Betrieb) lagen, reduzierte sich die Vorlauftemperatur in der Heizperiode 2011/12, in der das BHKW selten in Volllast in Betrieb war auf 63,7 °C und 12,4 K Temperaturspreizung. Im Jahr 2012/12 stieg die Vorlauftemperatur wieder auf 70,4 °C an und auch die mittlere Temperaturspreizung stieg auf 14,2 K. Die maximalen Temperaturen im BHKW-Vorlauf steigen bis auf 92,4 °C an.

4.1.2 Gastherme

Die Gastherme verfügt über eine maximale Leistung von 100 kW, die bis auf 20 kW herunter geregelt werden kann. Sie sollte die Spitzenlastversorgung mit Wärme übernehmen, wenn die Leistung des Blockheizkraftwerks nicht ausreicht oder dieses nicht in Betrieb ist.

Die Betriebsweise der Anlagentechnik hat sich im Laufe der Messphase mehrfach geändert. Zu Beginn waren in der Anlagentechnik im Heizhaus noch Fehler entdeckt und behoben worden (defekte Rückschlagklappe im Wasserkreis der Gastherme, Vorrangschaltung des BHKW nicht korrekt umgesetzt). Danach wurden BHKW und Spitzenlastkessel weitgehend gemäß den Planungen betrieben. Zwischen 05.05.2011 und 30.11.2011 war das BHKW jedoch wegen Rußproblemen vollständig abgeschaltet, so dass die Gastherme die Wärmeversorgung komplett übernehmen musste. Ab 05.12.2011 wurde das BHKW wegen Geräuschproblemen nur noch tagsüber betrieben, so dass die Gastherme nachts die Wärmeversorgung wieder vollständig übernehmen musste. Von März bis November 2012 bildete die Gastherme die einzige Wärmeversorgung der Gebäude. Seit Dezember 2012 wird die Therme wieder überwiegend zur Spitzenlastdeckung eingesetzt.

Bei der Berechnung der Aufwandszahl der Gas-Brennwert-Therme wurde ein Brennwert H_o des Gases von 10,79 kWh/m³ im Netz der Mainova verwendet. Abb. 4-8 zeigt die Ergebnisse im Zeitraum von Oktober 2010 bis April 2013. Die Monatsmittelwerte der Aufwandszahlen schwanken zwischen 1,08 und 1,12; der Mittelwert über den Gesamtzeitraum liegt bei 1,10. Die Verluste des Gasbrennwertkessels

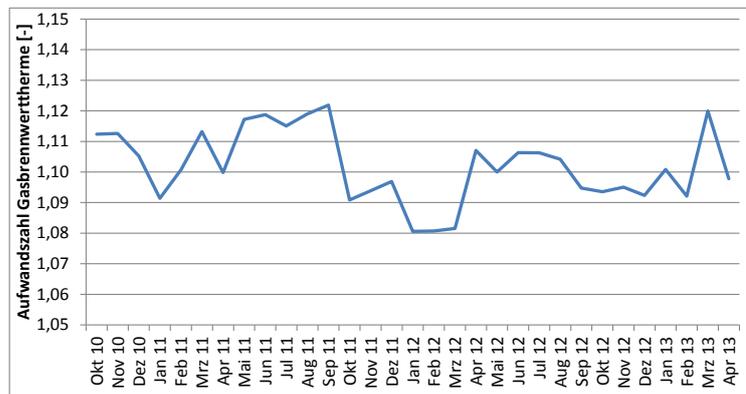


Abb. 4-8: Monatswerte der Aufwandszahlen der Erdgas-Brennwerttherme im Messzeitraum

von ca. 10 % im Mittel sind als normaler Wert einzuordnen, wenn man berücksichtigt, dass die Brennwerttherme normalerweise in einem Bereich betrieben wurde, in dem kaum eine Nutzung der Kondensationswärme möglich war. Eine Rücklauftemperatur von 48 °C, die für eine Nutzung der Kondensationswärme erforderlich wäre, wurde nur bei 4 % der Messwerte unterschritten.

Die maximale gemessene Leistung der Therme lag bei 64 kW am 28.10.2012 um 02:00 Uhr. Das BHKW war zu diesem Zeitpunkt nicht in Betrieb und die Außentemperatur lag bei 1,2 °C. Der Mittelwert der Wärmeerzeugung der Therme an diesem Tag lag nur bei 36,25 kW, was etwa der Hälfte der

maximalen gemessenen Leistung entspricht. Möglicherweise wurde die Leistungsspitze durch die Regelung verursacht, da die Therme ebenfalls auf den 2000 Liter-Pufferspeicher arbeitet, der die Wärmeabnahme puffern könnte.

Betrachtet man die Häufigkeit der von der Gastherme gelieferten Leistung (Stundenmittelwerte) über den Messzeitraum (Abb. 4-9), so gibt es im Bereich von 1 kW bis zur minimalen Leistung von 20 kW durch Takten der Therme einen gleich hohen Bereich von Werten, gefolgt von einem deutlichen Anstieg der Häufigkeit bei 20 kW. Bei höheren Leistungen fällt die Häufigkeit bei gleichzeitigem BHKW-Betrieb etwas niedriger aus als ohne das BHKW. Die maximale Leistung der Therme ohne BHKW lag bei 66 kW, wenn das BHKW in Betrieb war, bei 56 kW.

Die Monatsmitteltemperaturen von Vor- und Rücklauftemperatur der Therme sind in Abb. 4-10 dargestellt. Bei der Vorlauftemperatur ist ein Jahrgang erkennbar (höhere Temperaturen im Winter), der zwischen 60 °C und 71 °C liegt, wobei in der ersten Heizperiode die Regelung der Anlagentechnik noch nicht korrekt funktionierte. Die Rücklauftemperatur liegt ab Sommer 2011 vergleichsweise konstant zwischen 54 °C und 59 °C. Die sich ergebende Temperaturspreizung der Gastherme schwankt im Jahresverlauf zwischen 5 und 13 K.

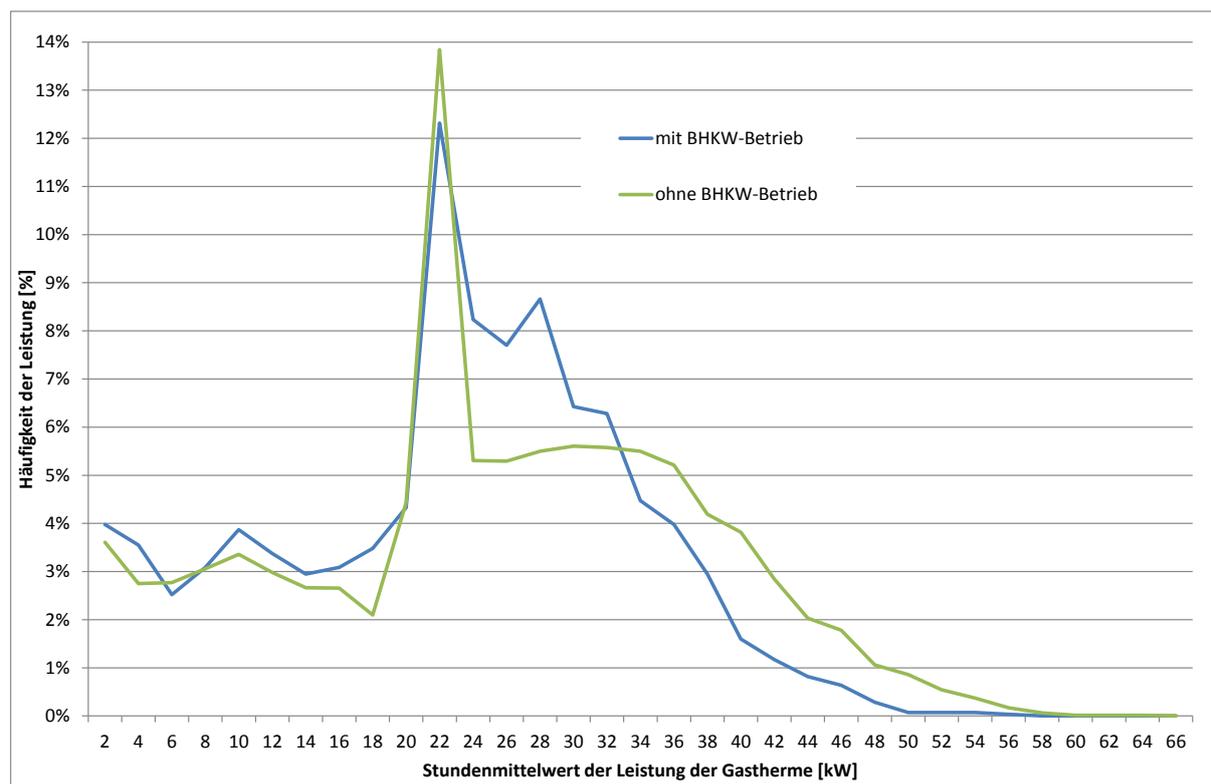


Abb. 4-9: Leistung Brennwerttherme: Häufigkeitsverteilung der Stundenmittelwerte im Messzeitraum für Zeiten mit und ohne BHKW-Betrieb

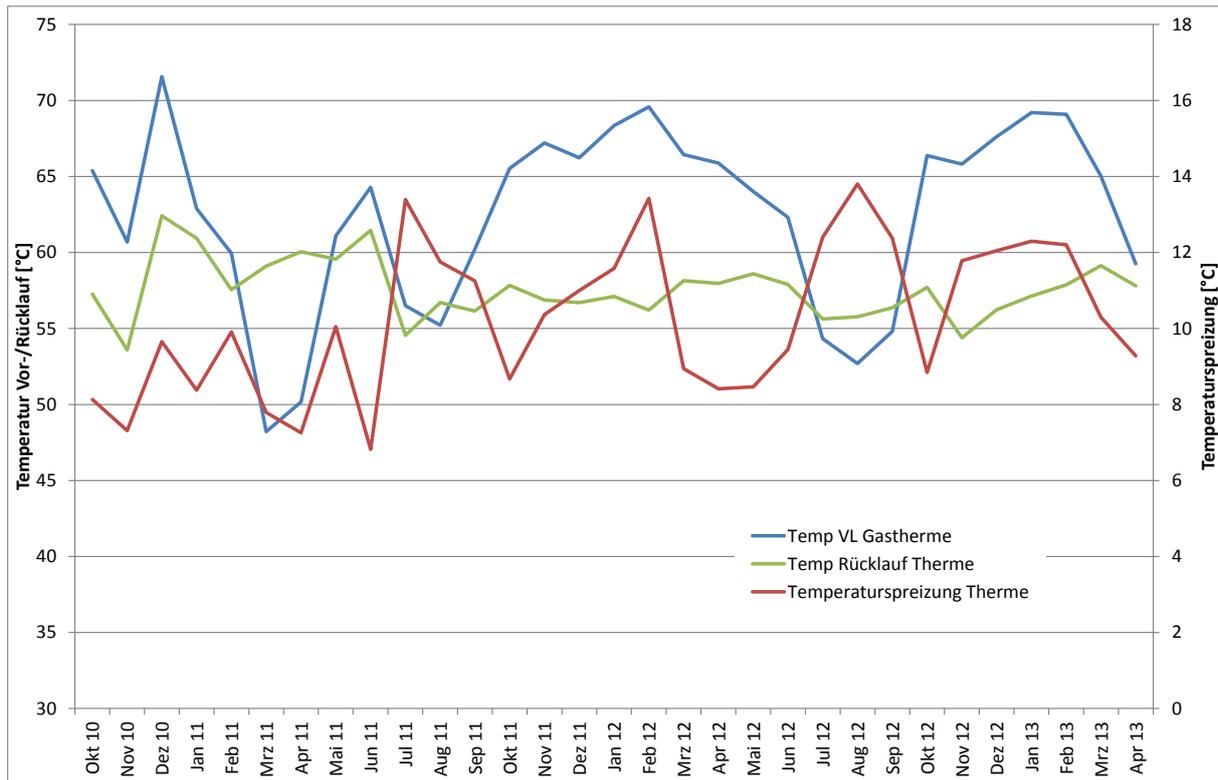


Abb. 4-10: Monatsmittelwerte der Temperaturen der Erdgas-Brennwerttherme im Messzeitraum

4.2 Nahwärmenetz

Die drei Bauabschnitte werden über eine kurze Nahwärmeleitung mit Wärme versorgt, die teilweise im Keller des zweiten Bauabschnitts, teilweise mit kurzen Erdleitungen verlegt ist. Die Wärmeabgabe in diese Nahwärmeleitung im Heizhaus repräsentiert somit die Gesamtwärmeabnahme für Heizung und Warmwasser des gesamten Projekts. In den Semizentralen wird die Warmwasserbereitung durch thermische Solaranlagen unterstützt. Da der dritte Bauabschnitt erst ab Sommer 2011 fertig gestellt und bezogen wurde, stehen hier nur die beiden Heizperioden 2011/12 und 2012/13 zur Auswertung vollständig zur Verfügung.

Tab. 4-5 oben zeigt die absolute Wärmeeinspeisung in das Nahwärmenetz sowie die Summe der Wärmeabnahme in den Semizentralen. Die untere Tabelle zeigt die auf die Energiebezugsfläche bezogenen Kennwerte. In der Heizperiode 2011/12 wurden 46,2 kWh/(m²a) Wärme in das Nahwärmenetz eingespeist, die Abnahme in den Semizentralen lag bei 41,4 kWh/(m²a), so dass Verluste in Höhe von 4,8 kWh/(m²a) entstanden sind. Diese Verluste sind in der folgenden Heizperiode 2012/13 trotz gesteigerter Wärmeabnahme in den Semizentralen auf 3,7 kWh/(m²a) gesunken. Der Planwert für die Verluste der Nahwärmeverteilung lag bei 0,9 kWh/(m²a). Ursache für die Differenz ist einerseits die verlängerte Heizzeit aufgrund der höheren Raumtemperaturen sowie die Tatsache, dass die ursprünglich geplante Sommerabschaltung des Nahwärmenetzes, wenn keine Wärme zur Warmwassernacherwärmung benötigt wird, nicht realisiert wurde. Außerdem fehlte in der Regelung der Warmwassernacherwärmung eine Hysterese, so dass sofort bei Unterschreiten des Schwellwertes die Nahwärme zur Nacherwärmung genutzt wurde (siehe Kapitel 4.7).

Tab. 4-5: Wärmeverteilung im Nahwärmenetz: oben absolute Daten, unten Kennwerte auf Energiebezugsfläche bezogen

	Einspeisung Nahwärme	Summe Wärmeab- nahme Semi- zentralen	davon Wärme Heizung	davon Wärme Warm- wasser	Verluste Nahwärme- netz	Verluste Nahwärme prozentual	Verlust- leistung Nahwärme- verteilung
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	%	kW
2011/12	175.137	156.821	110.260	47.738	18.316	10%	2,09
2012	183.653	166.366	119.346	47.020	17.287	9%	1,97
2012/13	194.807	180.759	128.542	52.217	14.048	7%	1,60

	Einspeisung Nahwärme	Summe Wärmeab- nahme Semi- zentralen	davon Wärme Heizung	davon Wärme Warm- wasser	Verluste Nahwärme- netz	Verluste Nahwärme prozentual	Verlust- leistung Nahwärme- verteilung
	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kWh/(m ² a)	%	W/m ²
2011/12	46,2	41,4	29,1	12,6	4,8	10%	0,55
2012	48,5	43,9	31,5	12,4	4,6	9%	0,52
2012/13	51,4	47,7	33,9	13,8	3,7	7%	0,42

Betrachtet man die prozentuale Verteilung über das Jahr sowohl der Einspeisung ins Nahwärmenetz als auch der Wärmeabnahme in den Heizkreisen und zur Warmwasserbereitung, so ergibt sich für beide Heizperioden ein ähnliches Bild (Abb. 4-11). Während im Sommer nur 1 % bis 2 % der Gesamtwärme in das Nahwärmenetz eingespeist wurden, liegt dieser Wert im Januar jeweils bei 15 % des Jahreswertes. Bei der Wärmeabnahme für die Warmwassernacherwärmung (zusätzlich zur thermischen Solaranlage) ergibt sich ebenfalls ein ausgeprägter Jahresgang, da der solare Deckungsgrad auf Monatsbasis nie auf 100 % ansteigt, sinkt die Wärmeabnahme für die Nacherwärmung im Sommer auch nicht auf null. Bei der Heizwärmeabnahme ist die Sommerabschaltung gut zu erkennen, jedoch auch, dass im September 2011 die Heizkreise bereits wieder eingeschaltet, bzw. im Juni 2012 erst abgeschaltet wurden. Die höchste winterliche Heizwärmeabnahme fand im Februar 2012 bzw. im Januar 2013 statt.

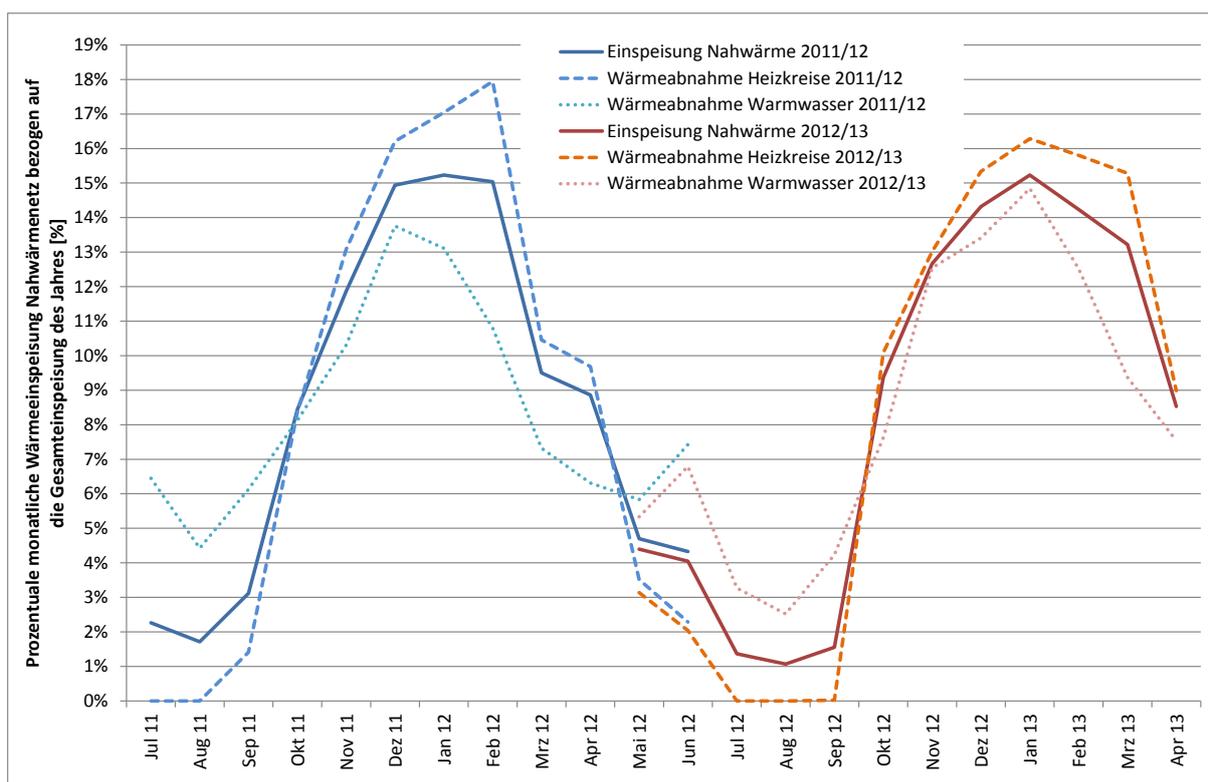


Abb. 4-11: Prozentuale Aufteilung der Einspeisung ins Nahwärmenetz sowie der Abnahme in den Heizkreisen und zur Warmwassernacherwärmung für die Heizperioden 2011/12 und 2012/13

Abb. 4-12 zeigt einen Zeitraum von 10 Tagen im September/Oktober 2012, in dem die Heizkreise zum 01.10. angeschaltet wurden. Dargestellt sind die Wärmeabnahme der Heizkreise in den Semizentralen, die Summe der Wärmeabnahme aller Wohnungen sowie die mittlere Raumtemperatur aller Wohnungen und die Außentemperatur. Am 01.10. um 01:00 Uhr wurden die Heizkreispumpen automatisch von der Zentralregelung in Betrieb genommen. Da offensichtlich in einer Reihe von Wohnungen die Thermostatventile geöffnet waren, entsteht eine Leistungsspitze von 21 kW in den Wohnungen bzw. 28 kW in den Semizentralen. Die mittlere Raumtemperatur in den Wohnungen lag zu diesem Zeitpunkt bei 22 °C und aus den Messdaten ist gut zu erkennen, dass in den nächsten Tagen die Raumtemperaturen im Mittel auf ca. 23,5 °C ansteigen. Das gleitende Zweitagesmittel der Außentemperatur lag beim Einschalten der Heizkreise bei 12 °C, so dass sich die Gebäude im Bereich der Heizgrenztemperatur befanden.

Dass sofort beim Einschalten der Heizungspumpen die Hälfte der gemessenen maximalen Heizleistung abgerufen wurde (bei 22 °C Raumtemperatur), lässt die Frage nach Optimierungen bei der Inbetriebnahme der Heizkreise aufkommen. Beim Übergang vom Sommer- in den Heizbetrieb wäre zur Reduktion der Energieverbräuche eine Reaktion der Bewohner besonders bei der Fensterlüftung sinnvoll, um im Herbst die passive Erwärmung der Gebäude durch die Sonne nutzen zu können. Da sofort nachgeheizt wird, fällt es den Bewohnern jedoch wahrscheinlich kaum auf, dass z. B. die Fenster jetzt nicht mehr so lange geöffnet werden sollten. In den Übergangsmontaten Oktober und April wurden jeweils ca. 10 % des Jahresheizwärmeverbrauchs abgerufen. Bei optimierter Nutzung von Passivhäusern wird in diesen Monaten meist keine Heizwärme benötigt. Hier stellt sich auch die Frage, ob es energetisch sinnvoller wäre, die Lüftungsanlage ganzjährig mit Wärmerückgewinnung zu betreiben, um den Heizwärmebedarf der Wohnungen in der Übergangszeit nicht zusätzlich durch den Bypass-Betrieb zu steigern.

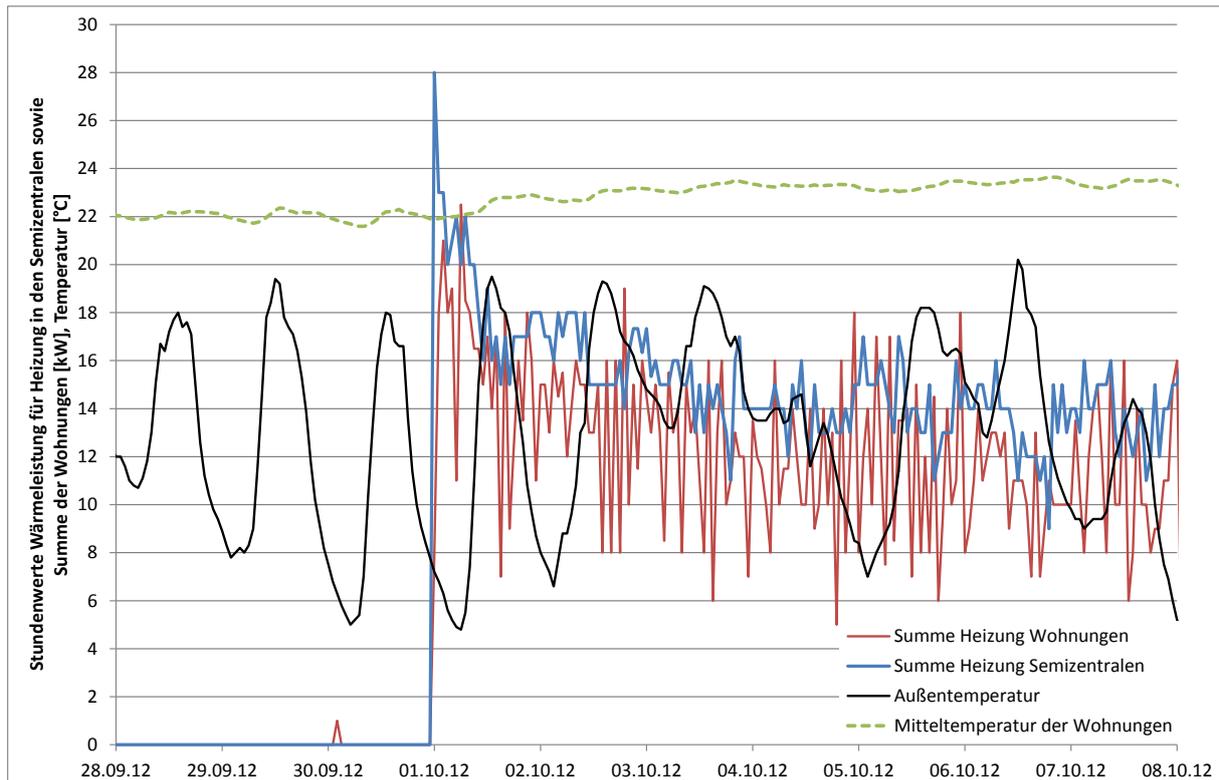


Abb. 4-12: Heizwärmeabnahme der Semizentralen und Summe der Wohnungen sowie mittlere Raumtemperatur der Wohnungen und Außentemperatur

Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs

Zur Auslegung von anlagentechnischen Komponenten ist es hilfreich die Jahresdauerlinie zu kennen, d. h. die (Wärme-)Leistungen aller Stunden des Jahres aufsteigend sortiert. Diese Jahresdauerlinie ist in Abb. 4-13 für die beiden Heizperioden 2011/12 und 2012/13 für Wärmeeinspeisung in das Nahwärmenetz dargestellt. Während in der Heizperiode 2011/12 die maximale Leistung bei 65 kW (Sonntag, 29.01.2012 13:00 Uhr bei 0 °C Außentemperatur) lag und danach vergleichsweise flach abfiel, war die Spitzenleistung 2012/13 mit 85 kW (Donnerstag, 21.02.2013 20:00 Uhr bei -1,9 °C Außentemperatur) etwa 20 % über dem nächstniedrigeren Wert von 67 kW. Dies bedeutet, dass diese Spitze über den vorhandenen Pufferspeicher geglättet worden ist, so dass bei der Wärmeerzeugung diese Leistung nicht abgerufen wurde.

Zusätzlich ist in Abb. 4-13 auch die Jahresdauerlinie nur für Heizung (Summe Heizkreise in den Semizentralen) für die Heizperiode 2012/13 dargestellt. Die maximale Heizleistung lag bei 41 kW (10,8 W/m²). Insgesamt wurde an 6440 Stunden Heizwärme in die Heizkreise eingespeist, dies ist deutlich länger als die 4920 Stunden, die sich aufgrund der Länge der Heizperiode von 205 Tage aus dem PHPP ergeben hätte. Grund ist auch hier wieder die verspätete Abschaltung / verfrühte Anschaltung der Heizkreise im Sommer. Für die Heizperiode 2011/12 konnte keine Jahresdauerlinie erstellt werden, da stündliche Messdaten aus dem dritten Bauabschnitt erst ab Februar 2012 vorliegen.

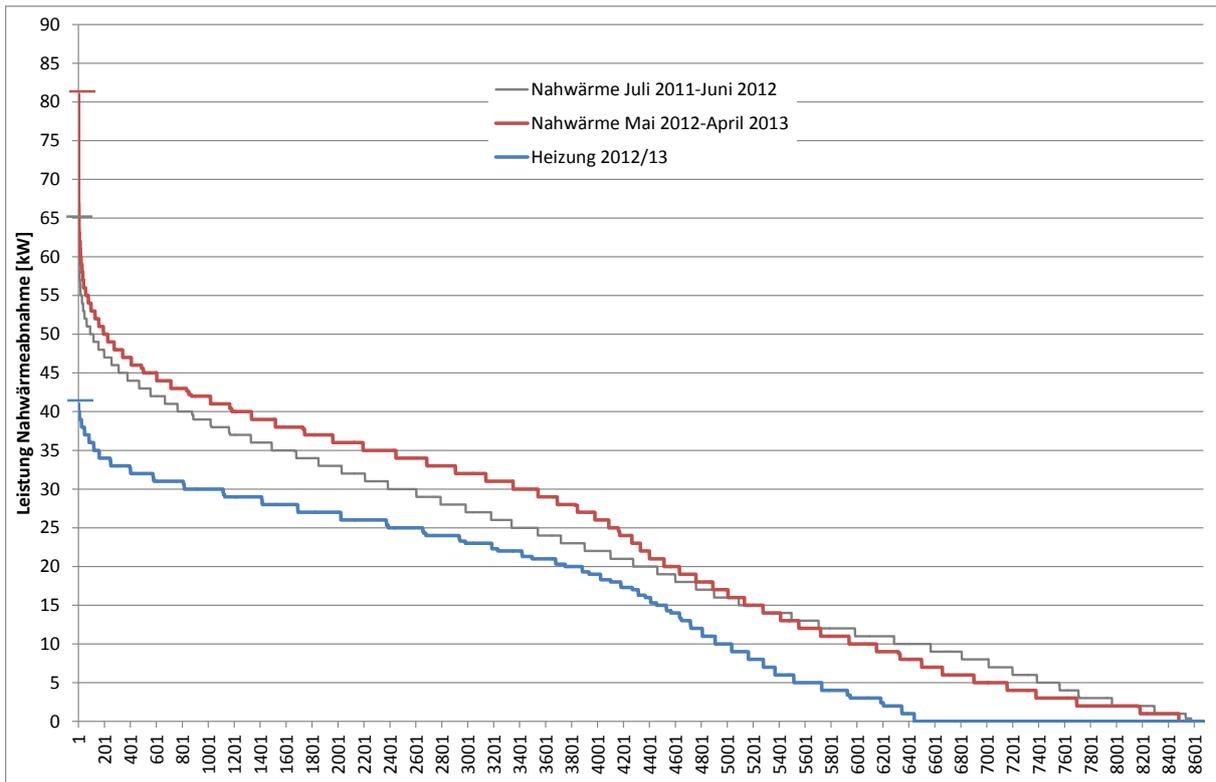


Abb. 4-13: Jahresdauerlinien im Nahwärmenetz (Summe Heizung, Warmwasser, Verteilung für alle 61 Wohneinheiten) für die Heizperioden 2011/12 und 2012/13 sowie Jahresdauerlinie Heizung 2012/13

In Abb. 4-14 sind neben der Jahresdauerlinie der Nahwärmeeinspeisung die zugehörigen Leistungen für Heizung und Warmwasser-Nacherwärmung dargestellt. Die Summe von Heizung und Warmwassernacherwärmung sollte immer unter der Nahwärmeeinspeisung liegen. Aufgrund der Pufferwirkung des Netzes, Zeitfehlern bei der Messdatenerfassung und der Korrektur von Datenlücken ist dies jedoch nicht in allen Zeitschritten der Fall.

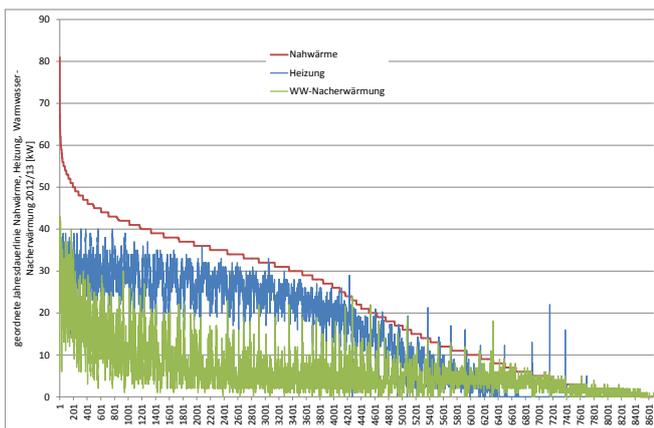


Abb. 4-14: Jahresdauerlinien für Nahwärme, Heizung, und Warmwasser-Nacherwärmung im Jahr 2012/13, sortiert nach der Nahwärmeabnahme

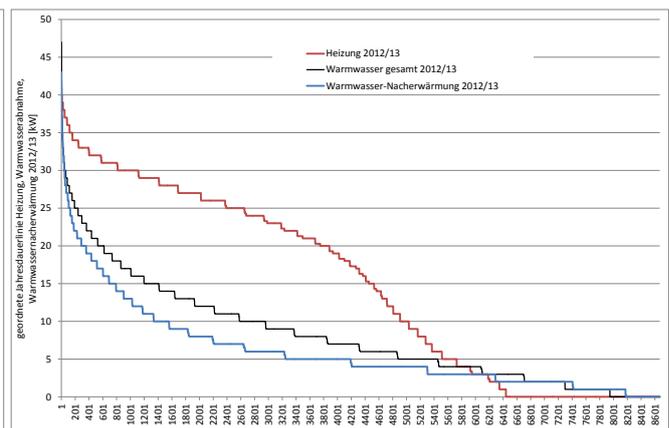


Abb. 4-15: Jahresdauerlinien für Heizung, Warmwasserabnahme gesamt und Warmwassernacherwärmung im Jahr 2012/13

Abb. 4-15 zeigt nochmals die Jahresdauerlinie der Heizkreise 2012/12 sowie die geordneten Jahresdauerlinien für Warmwasser (Summe Energieinhalt am Ausgang Warmwasserspeicher inklusive Zirkulation) und die Jahresdauerlinie der Warmwassernacherwärmung. Die Differenz zwischen Warm-

wasser gesamt und Warmwasser-Nacherwärmung wurde durch die thermischen Solaranlagen gedeckt.

Insgesamt zeigt sich bei der Auswertung der Jahresdauerlinien, dass das Verhältnis von maximaler Lastspitze zur mittleren Winterlast bei der Heizung gering ausfällt und somit für die Beheizung keine Spitzenlasterzeuger im eigentlichen Sinne benötigt werden. Die Lastspitzen bei der Nahwärme resultieren wohl aus ungünstigen Konstellationen bei der Warmwasserbereitung und der Regelung und sollten vermindert werden können, da die Warmwasserbereitung über Pufferspeicher verfügt.

4.3 Heizwärmeversorgung

4.3.1 Temperaturen der Heizkreise

Die Zentralregelung ist so programmiert, dass unter einer Außentemperatur von $+10\text{ °C}$ die Vorlauf-temperatur im Heizkreis linear von 55 °C bis auf 70 °C mit dem Abfall der Außentemperatur ansteigt. In Abb. 4-16 sind für einen Zeitraum von 21 Tagen bei niedrigen Außentemperaturen die Vor- und Rücklauftemperaturen der drei Heizkreise sowie die Außentemperatur dargestellt. Die Vorlauf-temperatur steigt am Anfang des dargestellten Zeitraums leicht von 65 °C auf 70 °C und verbleibt auf nahezu gleichem Niveau. Die Rücklauf-temperatur schwankt deutlich stärker, hier sind einzelne ausgeprägte Rückgänge bei der Rücklauf-temperatur zu erkennen, die bis zu Temperaturspreizungen von 30 K führen. Außerhalb dieser Phase mit sehr niedrigen Außentemperaturen beträgt die Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf ca. 6 K . Somit liegen die Rücklauf-temperaturen überwiegend oberhalb der Staubverschmelzungsgrenze in den Luft-Wasser-Nachheizregistern der Wohnungen von 52 °C . Eine Staubverschmelzung könnte den Komfort der Nutzer beeinträchtigen, in der Befragung [IWU 2012] wurden jedoch keine diesbezüglichen Probleme geschildert.

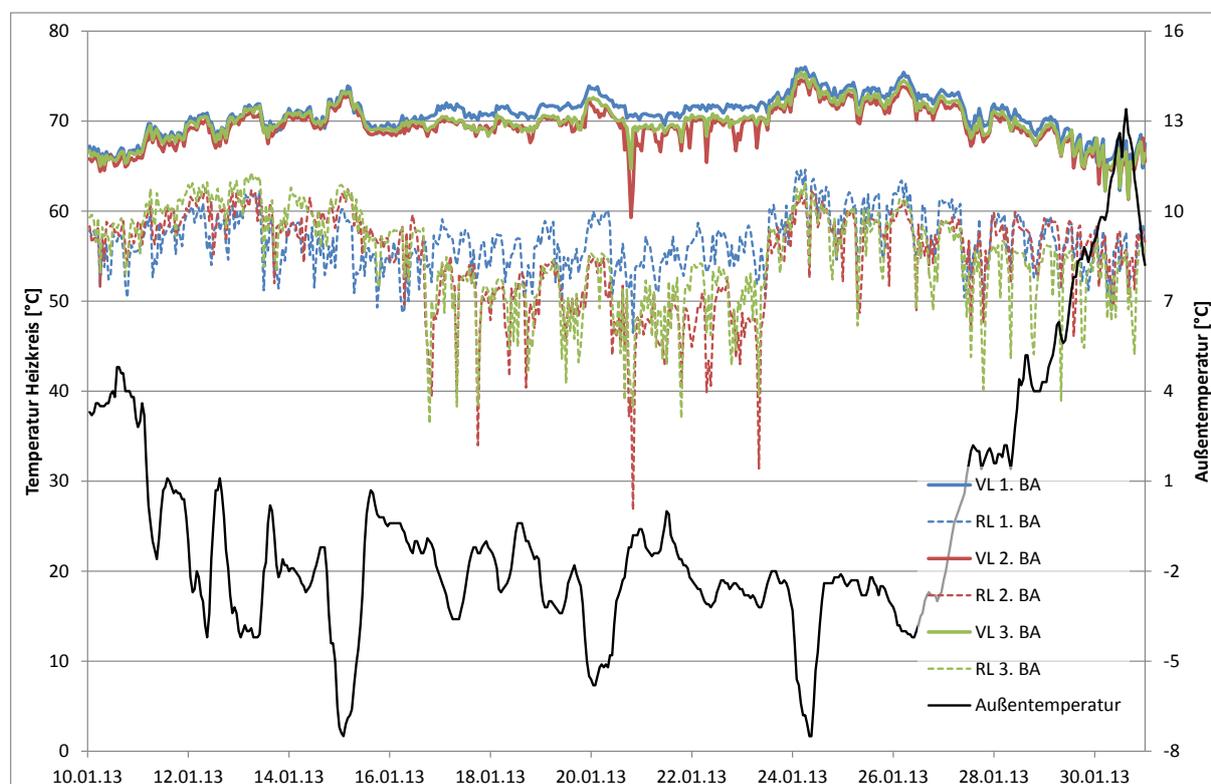


Abb. 4-16: Vor- und Rücklauf-temperaturen der drei Heizkreise sowie die Außentemperatur im Zeitraum 10.01.13 bis 30.01.13

Trägt man die Vorlauftemperatur der Heizkreise über die Außentemperatur auf, so ergibt sich Abb. 4-17. Selbst bei Außentemperaturen über 20 °C sind die Heizkreise noch in Betrieb, wenn diese hohe Außentemperatur innerhalb des eingestellten Heizzeitraums 01.10. bis 01.05. auftritt. Die minimale Vorlauftemperatur lag dabei bei ca. 65 °C und somit höher als der Ende des Messprogramms eingestellte Sollwert von 55 °C, was die Verteilverluste erhöht. Unter einer Außentemperatur von ca. 12 °C steigen die Vorlauftemperaturen langsam an und erreichen bei sehr niedrigen Außentemperaturen Werte von ca. 75 °C. Gleichzeitig gibt es eine Reihe von Punkten zwischen 9 °C und 27 °C Außentemperatur, bei denen die Vorlauftemperatur bei 40 °C oder darunter lag. Diese Messwerte liegen im Sommerhalbjahr und stellen Stillstandstemperaturen dar, die durch Wärmeleitung vom Nahwärmenetz beeinflusst werden, das für die Brauchwasserbereitung in Betrieb war.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass das Temperaturniveau in den Heizkreisen sehr hoch lag und auch die Außentemperaturführung der Regelung nicht die erhofften Reduktionen in der Übergangszeit gebracht hat.

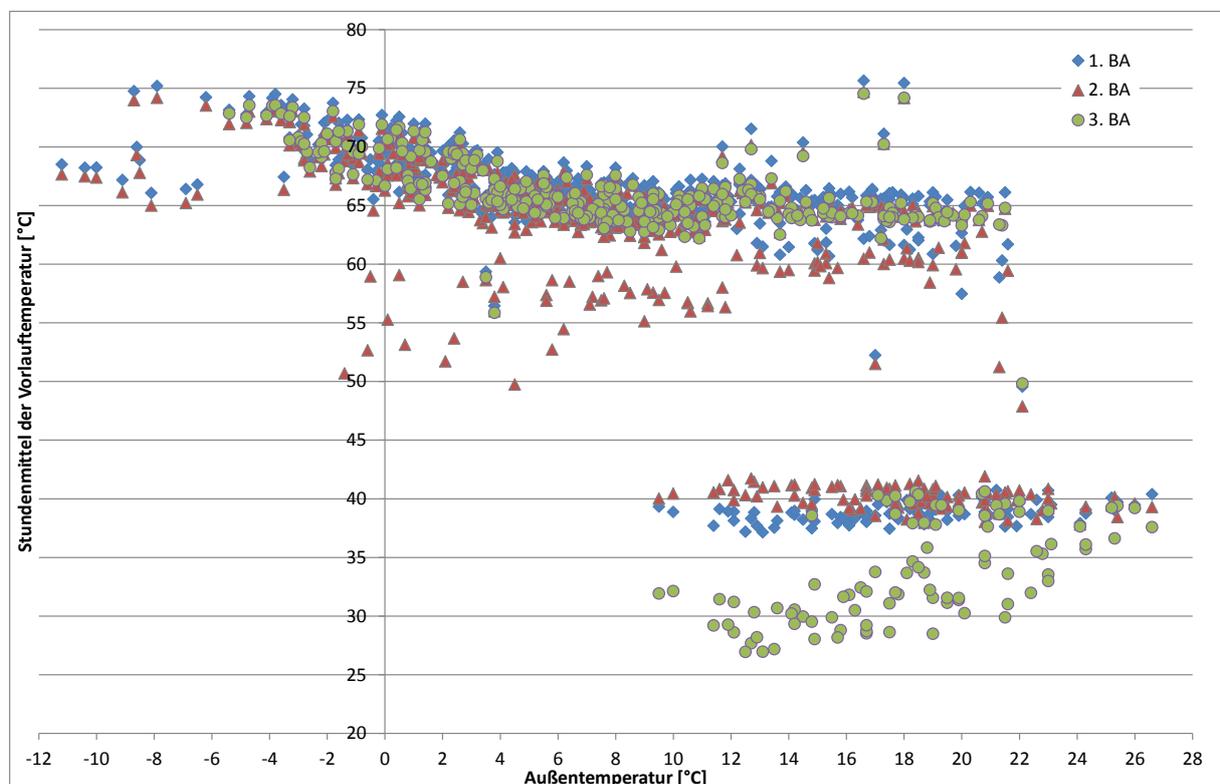


Abb. 4-17: Vorlauftemperatur der drei Heizkreise im Zeitraum vom 01.09.2011 bis 30.04.2013 in Abhängigkeit von der Außentemperatur

4.3.2 Maximale Heizleistung

Die maximale Heizleistung, die als Summenwert in den drei Semizentralen aufgetreten ist, lag in der Heizperiode 2012/13 bei 10,8 W/m². Bei Standardrandbedingungen ergibt sich für den ersten Bauabschnitt eine maximale Heizlast von 8,8 W/m², verwendet man das reale Klima, die gemessenen Raumtemperaturen, die tatsächliche Personenbelegung sowie die Zeiten ohne Wärmerückgewinnung, so ergibt sich eine maximale Heizlast von 10,9 W/m². Die Heizlast lässt sich somit gut mit den

realen Randbedingungen nachvollziehen. Dies ist gleichzeitig ein Indiz dafür, dass der Mehrverbrauch im ersten Bauabschnitt nicht durch höhere Lasten im Bereich der Heizlast aufgetreten ist, sondern über die gesamte Heizperiode verteilt angefallen ist. Eine mögliche Erklärung könnte hier verstärkte Fensterlüftung in Verbindung mit reduzierten solaren Erträgen sein.

4.3.3 Verluste der Heizungsverteilung

Von der Semizentrale im Keller eines jeden Blockes wird im Heizkreis die Wärme erst horizontal im Keller zu den Steigsträngen verteilt und dann vertikal in die Wohnungen. Die Wärmeverluste der horizontalen Verteilung werden in den Keller abgegeben und stehen für die Beheizung des Gebäudes kaum zur Verfügung (nur indirekt durch eine erhöhte Kellertemperatur), die Verluste der vertikalen Verteilung fallen innerhalb der thermischen Hülle an und müssen in der Heizperiode dem Heizwärmebedarf zugerechnet werden. In den Wohnungen wird die Wärmeabnahme gemessen und dem Heizregister sowie dem Heizkörper zugeführt (bei Bestandsgeschoss im Bad, in den Dachgeschossen sind noch weitere Heizkörper in den Wohnungen vorhanden). Bildet man die Differenz zwischen der in der Semizentralen gemessenen Einspeisung und der Summe der Wärmeabnahme in den Wohnungen, so erhält man die Wärmeverluste der Heizungsverteilung zuzüglich des Messfehlers durch die Summation von vielen (ca. 20) kleinen Energiemengen. Wie groß der Fehler tatsächlich ausfällt, ist davon abhängig, ob die Wärmeabnahme in den Wohnungen selten und mit großen Volumenströmen (geringerer Fehler) oder häufig mit geringen Volumenströmen erfolgt (größerer Fehler). In der Heizperiode 2012/13 lagen im ersten Bauabschnitt mehr als 50 % aller Volumenströme unter 10 % des Nennvolumenstroms der Wärmemengenzähler, in keinem der Monate wurde ein Volumenstrom von mehr als 25 % des Nennvolumenstroms gemessen. In diesem unteren Messbereich ist mit einem Messfehler von 2 % bis 5 % (bezogen auf den Messwert) je Zähler zu rechnen.

In Abb. 4-18 sind die monatlichen Wärmeeinspeisungen in die Heizkreise der drei Bauabschnitte sowie die prozentualen Verteilverluste, bezogen auf die Einspeisung dargestellt. Die Einspeisung im ersten Bauabschnitt liegt in allen Monaten am Höchsten, gefolgt vom dritten Bauabschnitt, obwohl dieser eine 80 m² höhere Energiebezugsfläche besitzt. Dies ist eine Folge des höheren Heizwärmeverbrauchs im ersten Bauabschnitt. Die niedrigste Einspeisung findet im kleinsten, zweiten Bauabschnitt statt. Wenn die Wärmeabnahme in den Wohnungen gering ist, steigen die prozentualen Verluste deutlich an, wie in der Übergangszeit im Herbst und Frühjahr deutlich zu erkennen ist. Entscheidend sind jedoch die absoluten Verluste.

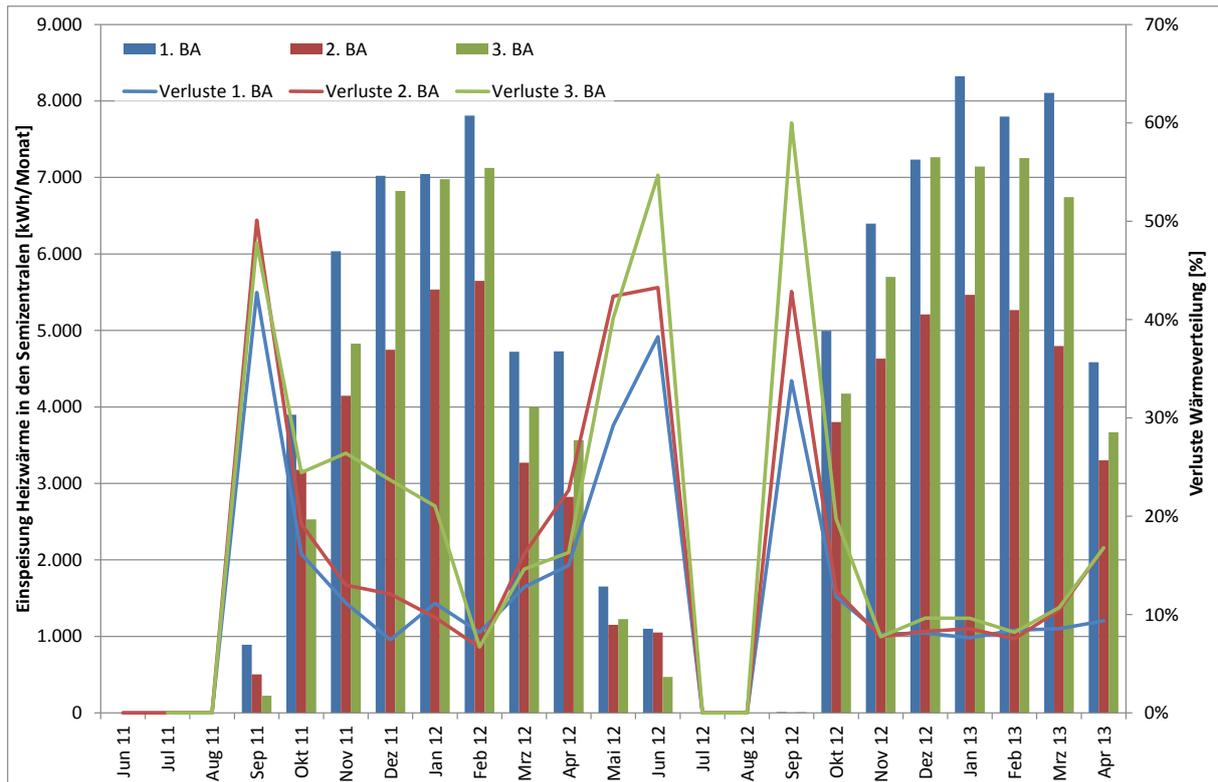


Abb. 4-18: Monatsweise Einspeisung der Heizwärme in den drei Bauabschnitten und prozentuale Wärmeverluste bei der Heizungsverteilung

Die absoluten Verluste sind in Tab. 4-6 für die beiden Heizperioden 2011/12 und 2012/13 dargestellt, in denen alle Bauabschnitte bewohnt waren. Die Heizwärmeverluste liegen je nach Bauabschnitt zwischen 4.130 kWh/a und 6.728 kWh/a, letzterer trat im dritten Bauabschnitt in seinem ersten Bezugsjahr aufgrund von nicht korrigierbaren Datenlücken auf (falsch angeschlossene Wärmemengenzähler). Bezogen auf die eingespeiste Wärme gehen 10 bis 18 % durch die Verteilung verloren (inklusive Messfehler).

Tab. 4-6: Heizwärmeabnahme in den Bauabschnitten, Einspeisung Heizwärme und Verluste Heizungsverteilung

	1. Bauabschnitt				2. Bauabschnitt				3. Bauabschnitt			
	Verbrauch Wohnungen (korrigiert)	Einspeisung Heizwärme	Verlust Heizwärme	Verlust Heizwärme	Verbrauch Wohnungen	Einspeisung Heizwärme	Verlust Heizwärme	Verlust Heizwärme	Verbrauch Wohnungen (teilw. kor.)	Einspeisung Heizwärme	Verlust Heizwärme	Verlust Heizwärme
	kWh	kWh	kWh	%	kWh	kWh	kWh	%	kWh	kWh	kWh	%
Summe 2011/12	37.742	43.014	5.272	12,3%	26.148	30.989	4.841	15,6%	29.349	36.077	6.728	18,6%
Summe 2012/13	45.188	50.201	5.013	10,0%	30.558	34.688	4.130	11,9%	38.311	43.653	5.342	12,2%

Von den Wärmeverlusten entfallen im ersten Bauabschnitt 73 % (2,8 kWh/(m²a) auf die Heizperiode (Oktober-März). Weist man diese Verluste anteilig ihres Anfalls im Keller bzw. in der thermischen Hülle zu, dann ergeben sich nutzbare Wärmeverluste innerhalb der thermischen Hülle von ca. 1,7 kWh/(m²a) (Tab. 4-7). Im zweiten Bauabschnitt liegt der Anteil zwischen 1,8 und 2,1 kWh/(m²a), im dritten zwischen 2,0 und 3,1 kWh/(m²a). Der Wert von 3,1 kWh/(m²a) wird durch Probleme mit zwei Wohnungswärmemengenzählern in der Heizperiode 2011/12 verursacht. Unterstellt man einen Messfehler von 5 % bei der Addition der Einzelzähler, so reduziert sich der nutzbare Anteil wegen der

dann höheren Wärmeabnahme und kleineren Verlusten auf 0,9 kWh/(m²a) im ersten und zweiten bzw. 1,2 kWh/(m²a) im dritten Bauabschnitt in der Heizperiode 2012/13.

Tab. 4-7: Wärmeverluste im Heizkreis gesamt, in der Heizperiode sowie in den Wohnungen nutzbare Verteilungsverluste

	1. Bauabschnitt				2. Bauabschnitt				3. Bauabschnitt			
	Verlust Heizwärme gesamt	Verlust Heizwärme Okt-Mrz	nutzbarer Heizwärmeverlust	nutzbarer Heizwärmeverlust	Verlust Heizwärme gesamt	Verlust Heizwärme Okt-Mrz	nutzbarer Heizwärmeverlust	nutzbarer Heizwärmeverlust	Verlust Heizwärme gesamt	Verlust Heizwärme Okt-Mrz	nutzbarer Heizwärmeverlust	nutzbarer Heizwärmeverlust
	kWh	kWh	kWh	kWh/(m ² a)	kWh	kWh	kWh	kWh/(m ² a)	kWh	kWh	kWh	kWh/(m ² a)
Heizperiode 2011/12	5.272	3.856	2.348	1,78	4.841	3.166	2.232	2,13	6.728	6.039	4.391	3,09
Heizperiode 2012/13	5.013	3.677	2.239	1,70	4.130	2.630	1.854	1,77	5.342	3.971	2.887	2,03

In der Planungsphase wurden für die Heizungsverteilung Verluste von 3,05 kWh/(m²a) bei 20 °C Raumtemperatur angesetzt und von 4,1 kWh/(m²a) bei 22,4 °C Raumtemperatur (wegen der Verlängerung der Heizperiode). Somit liegen die gemessenen Wärmeverluste unterhalb der Planwerte.

Abb. 4-19 zeigt den auf den Meter Heizungsrohr und die Temperaturdifferenz zwischen Heizleitung und Raumluft bezogenen Wärmeverlust in Watt pro Meter und Kelvin. In den Sommermonaten, wenn die Heizungsverteilung abgeschaltet ist, sinkt auch die spezifische Verlustleistung auf null. In der Heizperiode liegen die Verlustleistungen zwischen 0,050 und 0,09 W/(mK), jedoch immer unter dem berechneten Bedarfswert. Mögliche Ursache können reduzierte Verteilverluste aufgrund von höheren Kellertemperaturen

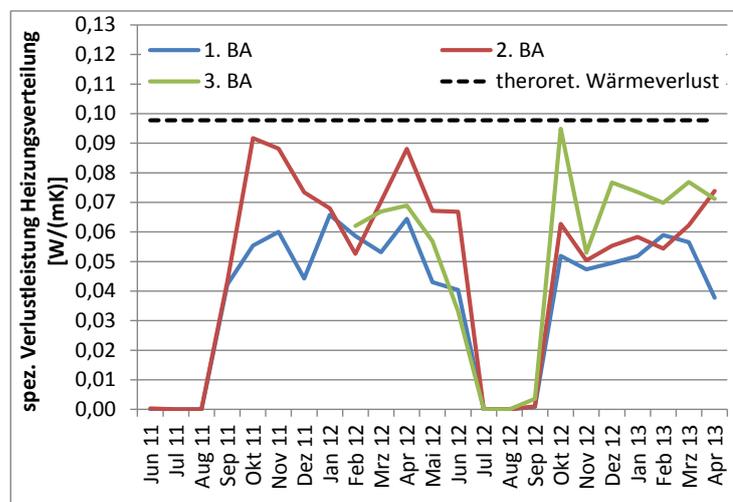


Abb. 4-19: Spezifische Verlustleistung der Heizungsverteilung, monatlich aufgetragen

sowie isolierender Luftschichten hinter der Vorwandinstallation in den Badezimmern sein. Positiv anzumerken ist, dass die Wärmeverluste niedriger ausfallen, als in der Planungsphase angesetzt.

4.3.4 Sommerverbrauch

Die Zentralregelung der Heizungsanlage ist so programmiert, dass die Heizkreise von Anfang Mai bis Ende September komplett abgeschaltet werden, so dass keine Wärmeverluste durch Sommerbetrieb entstehen. Im Sommer 2010, in dem nur der erste Bauabschnitt vermietet und die Zentralregelung noch nicht in Betrieb war, wurden 5,2 kWh/(m²a) in die Heizkreise eingespeist (Tab. 4-8). Dem steht auch eine nennenswerte Wärmeabnahme in den Wohnungen gegenüber, die bei ca. 70 % der eingespeisten Wärme lag. Dies bedeutet, dass in einigen Wohnungen die Raumtemperaturfühler bzw. die Heizkörperventile im Sommer nicht abgedreht werden, so dass auch bei Raumtemperaturen von über 24 °C noch nachgeheizt wird. Diese Annahme wird aus den Ergebnissen der Mieterbefragung bestätigt, bei der 29 % der Mieter angaben, dass sie im Winter bei Anwesenheit den Raumthermostat auf über 22 °C einstellen und teilweise auch die Heizkörper betreiben. Werden diese Einstellungen nicht verändert, führt dies zu den beobachteten Heizwärmeverbräuchen.

Nach Inbetriebnahme der Zentralregelung im Oktober 2010 ist in den zwei Sommerhalbjahren 2011 und 2012 zu erkennen, dass die Heizkreise entweder verspätet abgeschaltet oder zu früh eingeschaltet wurden, da sie zuvor auf Handregelung umgeschaltet worden waren und die Automatikfunktion nicht wieder aktiviert wurde. Dies führte zu vermeidbaren Sommerverbräuchen von 1 bis 1,5 kWh/(m²a), die zusätzliche Wärme in die Gebäude eingebracht hat.

Tab. 4-8: Wärmeeinspeisung in das Nahwärmenetz von Anfang Mai bis Ende September

	1. Bauabschnitt		2. Bauabschnitt		3. Bauabschnitt		Gesamtprojekt	
	Wärmeeinspeisung		Wärmeeinspeisung		Wärmeeinspeisung		Wärmeeinspeisung	
	kWh	kWh/(m ² a)						
Sommer 2010	6.902	5,24					6.902	5,24
Sommer 2011	1.753	1,33	600	0,57			2.353	0,99
Sommer 2012	2.765	2,10	1.265	1,21	1.706	1,20	5.736	1,51

Grundsätzlich stellt sich die Frage, ob in einem Passivhaus die Heizungsverteilung nicht noch vor Mai abgeschaltet werden kann, wenn die Außentemperaturen hoch sind bzw. die Solareinstrahlung die Gebäude erwärmt. Aufgrund der teilweise hohen Raumtemperaturen von über 24 °C im Winter wird die Heizperiode in einzelnen Wohnungen jedoch verlängert.

4.4 Warmwasserbereitung

Die Warmwasserbereitung erfolgt in der Rotlintstraße blockweise in den Semizentralen. Dort wird jeweils ein Bereitschaftsspeicher mit 500 Liter Volumen auf die Warmwassertemperatur erwärmt. Diese Temperatur wurde entgegen üblicher Vorgehensweise in Mehrfamilienhäusern nicht auf 60 °C eingestellt, sondern die Warmwassertemperatur sollte lediglich 48 °C betragen, um einerseits die Speicher- und Verteilverluste zu minimieren, andererseits, um einen höheren solaren Deckungsgrad erreichen zu können, da dieser mit abnehmender Warmwassertemperatur deutlich zunimmt. Abb. 4-20 zeigt diesen Zusammenhang auf Basis von Simulationen.

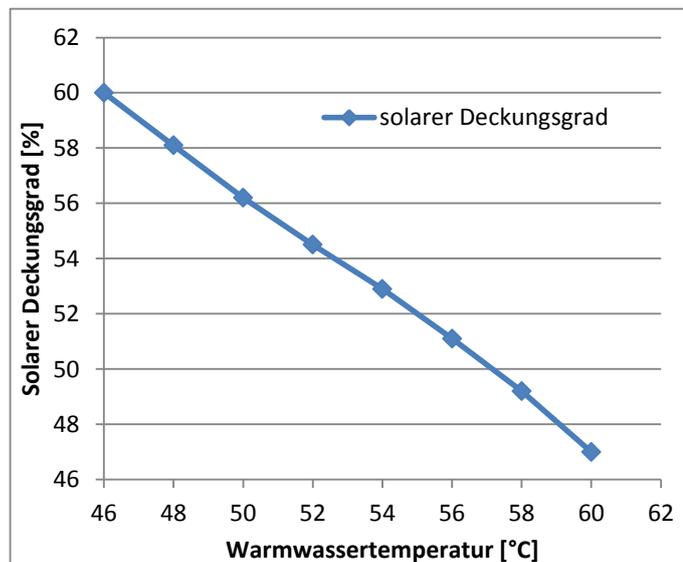


Abb. 4-20: Solarer Deckungsgrad in Abhängigkeit von der Warmwassertemperatur (Berechnungen mit dem Programm Polysun für die Anlagenkonfiguration in der Rotlintstraße)

Bei 60 °C Warmwassertemperatur ergäbe sich ein solarer Deckungsgrad von 47 %, der in der Simulation auf 58 % ansteigt, wenn die Warmwassertemperatur nur 48 °C beträgt.

Um bei niedrigen Warmwassertemperaturen eine Verkeimung (z. B. Legionellenbefall) auszuschließen, wurde eine Diaphragmalyse installiert, die eine Verkeimung chemisch verhindert (siehe Kapitel 4.5.5).

Warmwasserverbräuche

Der Wärmeverbrauch für die Warmwasserbereitung war im ersten Bauabschnitt in allen Messjahren annähernd konstant bei 17,3 kWh/(m²a) (siehe Tab. 4-9), umgerechnet sind dies ca. 630 kWh/(Person*a). Dieser Wert beinhaltet auch die Verteil- und Zirkulationsverluste. Im zweiten Bauabschnitt war die eingesetzte Warmwasserwärme absolut zwar niedriger, je Quadratmeter Energiebezugsfläche ergaben sich 20,7 kWh/(m²a) (2011/12) bzw. sogar 23,2 kWh/(m²a)(2012/13). Auch personenbezogen lagen die Kennwerte mit 734 kWh/(Person*a) bzw. 828 kWh/(Person*a) deutlich höher. Der dritte Bauabschnitt schließlich liegt beim absoluten Verbrauch zwischen den beiden anderen Blöcken, flächenbezogen wurde der niedrigste Wert 2012/13 mit 16 kWh/(m²a) erreicht.

Tab. 4-9: Warmwasserverbräuche in unterschiedlichen Jahren in den Semizentralen gemessen

	WW-Verbrauch 1.BA			WW-Verbrauch 2.BA			WW-Verbrauch 3.BA		
	kWh/a	kWh/(m ² a)	kWh/(Pers*a)	kWh/a	kWh/(m ² a)	kWh/(Pers*a)	kWh/a	kWh/(m ² a)	kWh/(Pers*a)
2010/11	22.634	17,2	628,7						
2011/12	22.840	17,3	634,4	21.640	20,7	733,6	24.140	17,0	778,7
2012/13	22.591	17,1	627,5	24.428	23,3	828,1	22.709	16,0	732,5

Vergleicht man die gemessenen Warmwasservolumina der Wärmemengenzähler in den Semizentralen mit der Summe der Wohnungswassermesszähler, so ergibt sich die in Tab. 4-10 dargestellte Bilanz. Die gemessenen Volumina in der Semizentrale sind im ersten Bauabschnitt um 2 % - 3 % größer als die Summe der Wohnungen, wobei aus einer Wohnung keine Messdaten vorliegen, so dass sie mit dem Mittelwert des Bauabschnitts ergänzt wurde. Im zweiten Bauabschnitt, von dem die Messdaten vollständig vorliegen, beträgt die Differenz 6 % (2011/12) bzw. 4 % (2012/13). Im dritten Bauabschnitt ist nur die letzte Heizperiode auswertbar - hier liegt die Differenz bei nur 1 %, allerdings musste auch hier ein fehlender Zähler korrigiert werden. Insgesamt passen die Messwerte der Semizentralen und die Summe der Einzelwerte recht gut zusammen.

Tab. 4-10: Warmwasserverbräuche der Semizentralen und Summe der Wohnungswarmwassermesszähler (fehlende Zähler wurden mit Mittelwerten ergänzt)

	WW-Verbrauch 1. BA [m ³]			WW-Verbrauch 2. BA [m ³]			WW-Verbrauch 3. BA [m ³]		
	Summe WE*	Semizentrale	Differenz [%]	Summe WE	Semizentrale	Differenz [%]	Summe WE*	Semizentrale	Differenz [%]
2011/12	539,1	549,65	2%	442,9	469,06	6%	339,3		
2012/13	528,1	544,12	3%	513,4	536,68	4%	503,8	510,27	1%

* eine WE mit Mittelwert ergänzt

* einen Zähler mit Mittelwert ergänzt

In Abb. 4-21 ist ein mittlerer Wochengang des Energieaufwands für die Warmwasserbereitung in Wattstunden je Quadratmeter Energiebezugsfläche und Tag dargestellt (Mittelungszeitraum von Februar 2011 bis Ende April 2013). Im Mittel liegt der Wärmeverbrauch an Wochentagen zwischen 46 und 50 Wh/(m²d) und steigt bis zum Sonntag bis auf 60 Wh/(m²d) an.

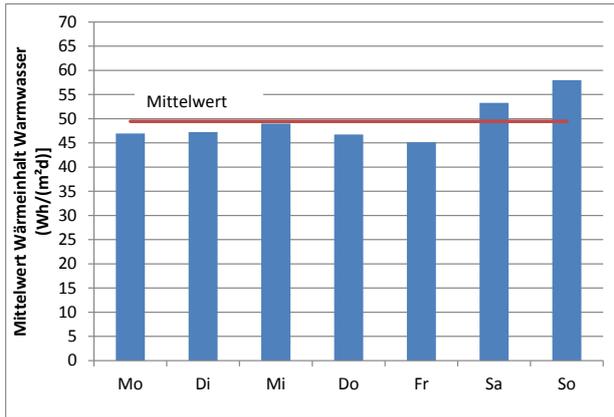


Abb. 4-21: Mittlerer Wochengang Wärmeinhalt Warmwasser

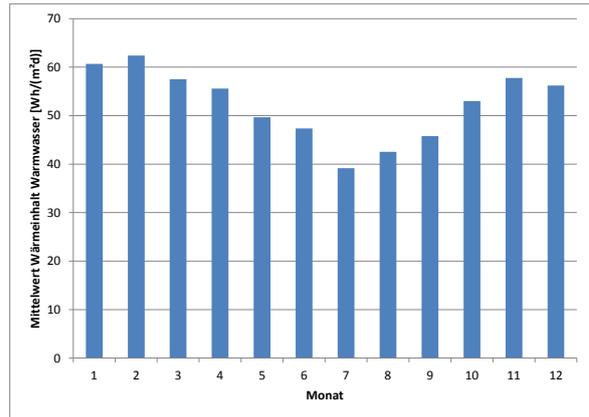


Abb. 4-22: Mittlerer Jahrgang Wärmeinhalt Warmwasser

Im Jahrgang fallen die Sommermonate durch deutlich niedrigere Verbräuche auf (ca. 40 Wh/(m²d)), im Januar und Februar steigen die Verbräuche bis auf 60 Wh/(m²d) an. Der Jahresmittelwert liegt bei 52,3 Wh/(m²d).

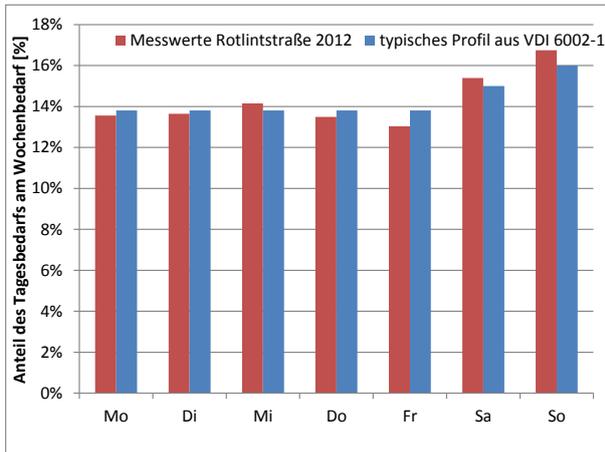


Abb. 4-23: Normierte Wochengänge der Warmwasserverbräuche Rotlintstraße und aus [VDI 6002-1]

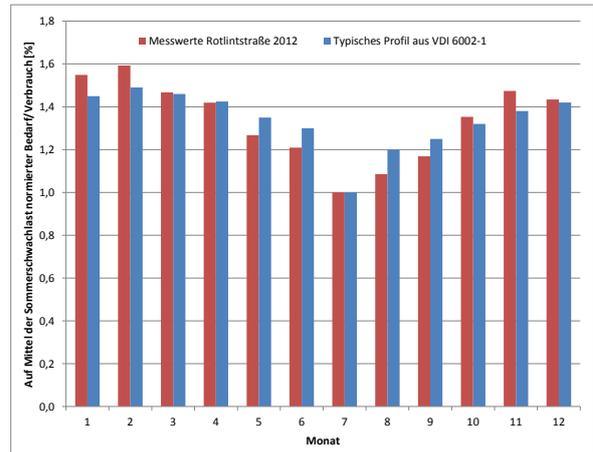


Abb. 4-24: Normierte Jahrgänge der Warmwasserverbräuche Rotlintstraße und aus [VDI 6002-1]

Vergleicht man den Wochengang des Anteils des Tagesbedarfs am Wochenbedarf der Messwerte aus der Rotlintstraße mit dem typischen Wochengang aus [VDI 6002-1] (siehe Abb. 4-23), so ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung bei der Verteilung. In der Rotlintstraße lagen die Verbräuche am Wochenende etwas höher als in der Richtlinie, Donnerstag und Freitag ein wenig niedriger. Bei der Jahresverteilung, die auf das Minimum in der Sommer-Schwachlastzeit normiert ist (siehe Abb. 4-24), liegen die Verbräuche der Rotlintstraße im Winter, wenn ein geringer solarer Deckungsgrad vorhanden ist, höher und im Frühjahr und im Herbst niedriger als die Referenzwerte der Richtlinie.

Warmwassertemperaturen

Die Warmwassersolltemperatur lag bei 48 °C, wie die Abb. 4-25 zeigt, lag sie jedoch mehrfach über dem eingestellten Wert. Im Jahr 2010 gab es noch Probleme mit der Zentralregelung, die auch für die Warmwasserbereitung zuständig ist, so dass sich unterschiedliche Ist-Temperaturen ergeben haben. Ab Anfang 2011 lag die Warmwassertemperatur im ersten Bauabschnitt erst bei 51 °C, nach dem Sommer bei ca. 48,5 °C. Im zweiten und dritten Bauabschnitt lag die Warmwassertemperatur zwi-

schen 50 °C und 51 °C. Diese Abweichung resultiert aus der Tatsache, dass die dargestellten Temperaturen mit den Vorlauffühlern der Wärmemengenzähler erfasst wurden, die Zentralregelung aber mit eigenen Fühlern arbeitet, die auch an anderen Stellen montiert sind. Wird unterstellt, dass in den Wärmemengenzählern die Temperaturen exakter gemessen wurden (die Genauigkeit der Sensoren der Zentralregelung ist unbekannt, zusätzlich fallen ggf. nennenswerte Digitalisierungsfehler an), so wurde durch diese real erhöhte Warmwassertemperatur von ca. 2 K im zweiten und dritten Bauabschnitt ein Teil der Effizienzvorteile bei Speicherung und Verteilung verschenkt.

In mehreren Zeitabschnitten fällt zusätzlich auf, dass im Frühjahr und im Spätsommer teilweise deutlich höhere Warmwassertemperaturen aufgetreten sind. Diese wurden wahrscheinlich durch die Umschaltung der Zentralregelung auf Handbetrieb verursacht, da z. B. im Juni 2012 die Heizkreise bis 27.06. durch Übersteuerung der Automatikfunktion in Betrieb waren und am gleichen Tag, an dem bei der Heizung von Hand- auf Automatikfunktion zurück geschaltet wurde, auch die Warmwassertemperaturen wieder auf die Sollwerte abgesunken sind. Hier sind somit durch Wartungsfunktionen, die entweder nicht zurückgesetzt wurden oder durch einen beabsichtigten längeren Heizbetrieb auch die Warmwassertemperaturen angehoben worden, was zu höherem Energieverbrauch für Warmwasser führte. Auffällig ist, dass gerade im Juni 2011 und 2012 die solaren Deckungsgrade besonders niedrig sind (siehe Kapitel 4.4.1).

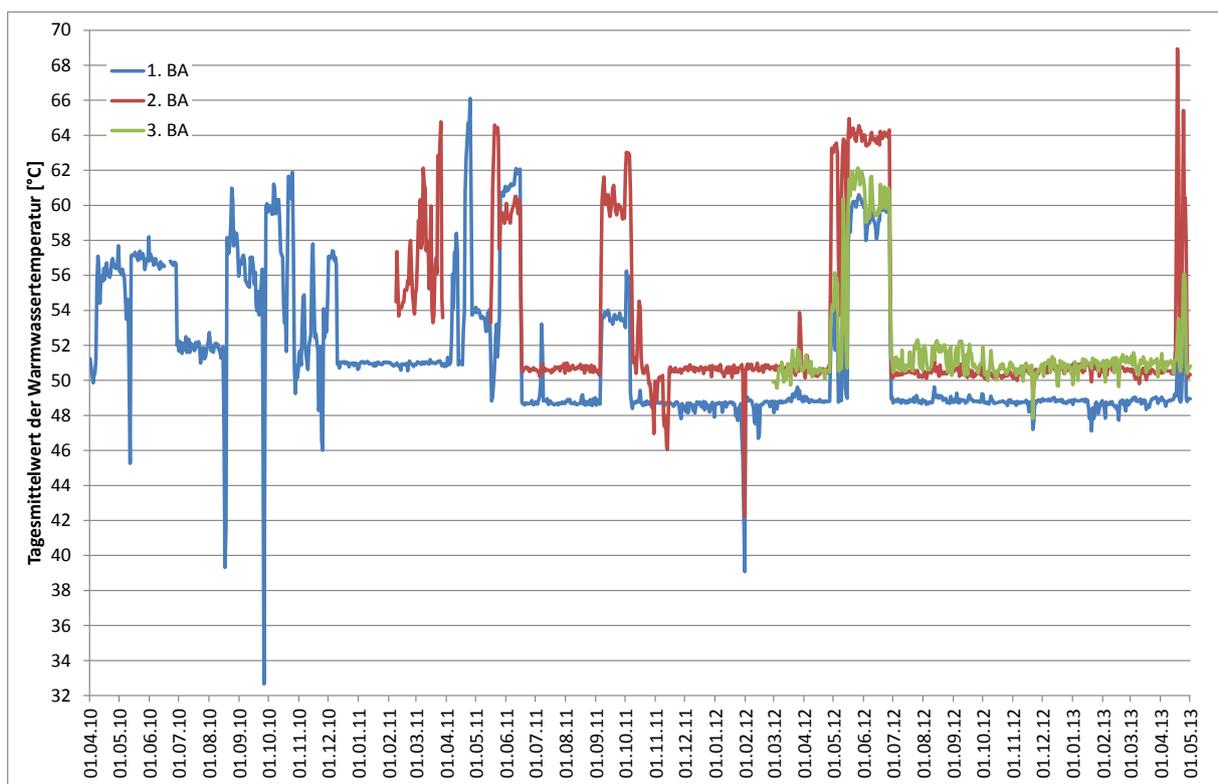


Abb. 4-25: Tagesmittelwerte der Warmwassertemperaturen der drei Bauabschnitte am Ausgang des Bereitschaftsspeichers

Kaltwassertemperaturen

Da der Energieaufwand für die Warmwasserbereitung nicht nur von der Warmwassertemperatur, sondern auch von der Kaltwassertemperatur abhängt, ist in Abb. 4-26 die Kaltwassertemperatur dargestellt, die der Rücklauffühler des Wärmemengenzählers in der Warmwasserbereitung erfasst

hat, wenn die Zapfmenge 50 Liter/h überschritten hatte. Man erkennt einen Jahrgang, der zwischen 11 °C im Winter und ca. 17 °C im Sommer liegt. Besonders im zweiten Bauabschnitt liegen die Temperaturen in der Semizentrale vergleichsweise hoch, so dass hier der Schwellwert von 50 Liter/h bei der Auswertung im Sommer teilweise nicht ausgereicht hat und die Messwerte stark schwanken bzw. die dargestellten Werte mehr einer Stillstandstemperatur entsprechen. Der Mittelwert der Kaltwassertemperatur über alle Bauabschnitte liegt bei 14,1 °C

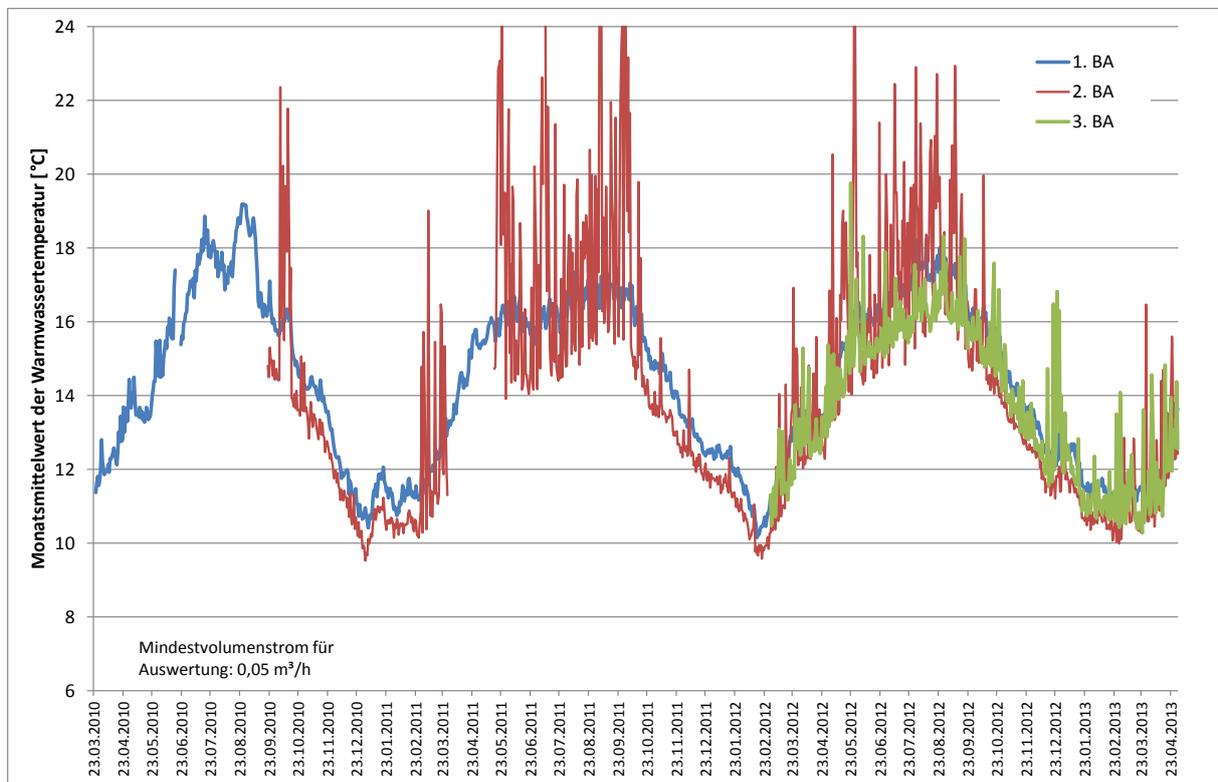


Abb. 4-26: Kaltwassertemperaturen in den Semizentralen bei einem Mindestvolumenstrom von 50 Liter/h

4.4.1 Thermische Solaranlagen

Die drei Bauabschnitte besitzen jeweils eine gleich dimensionierte, 32 m² brutto / 28,7 m² Aperturfläche große, südorientierte thermische Solaranlage, die jeweils zwei in Reihe geschaltete 800 Liter Solarspeicher in der Semizentrale versorgen (siehe Abb. 4-27). Die Anlagen unterscheiden sich aufgrund der unterschiedlichen Gebäudehöhen durch die Länge der Solarleitungen zum Keller.

Solare Wärmelieferung

Abb. 4-28 zeigt die absoluten Monatssummen der solaren Wärmelieferung im Messzeitraum in den Solarspeicher. Im Winter ist die solare Wärmeerzeugung der drei Anlagen nahezu identisch, im Sommer liegen der erste und dritte Bauabschnitt bis zu 20 % über den Werten des zweiten Bauabschnitts. Bei den konkreten Zahlen muss berücksichtigt werden, dass die solare Wärmelieferung sinkt, wenn z. B. wegen geringerer Wärmeabnahme die Speicher gefüllt sind und die Solarkreispumpe abschaltet. Im dritten Bauabschnitt gab es im Jahr 2011 zwei Probleme mit den Pumpen (Defekt Solarkreispumpe sowie Umschichtpumpe). Ohne das wissenschaftliche Monitoring wären diese De-

fekte wahrscheinlich viel später entdeckt worden und der solare Deckungsgrad wäre noch weiter abgesunken. Abgesehen von den Defekten können die drei thermischen Solaranlagen bezüglich ihrer Wärmelieferung als weitgehend identisch angesehen werden.

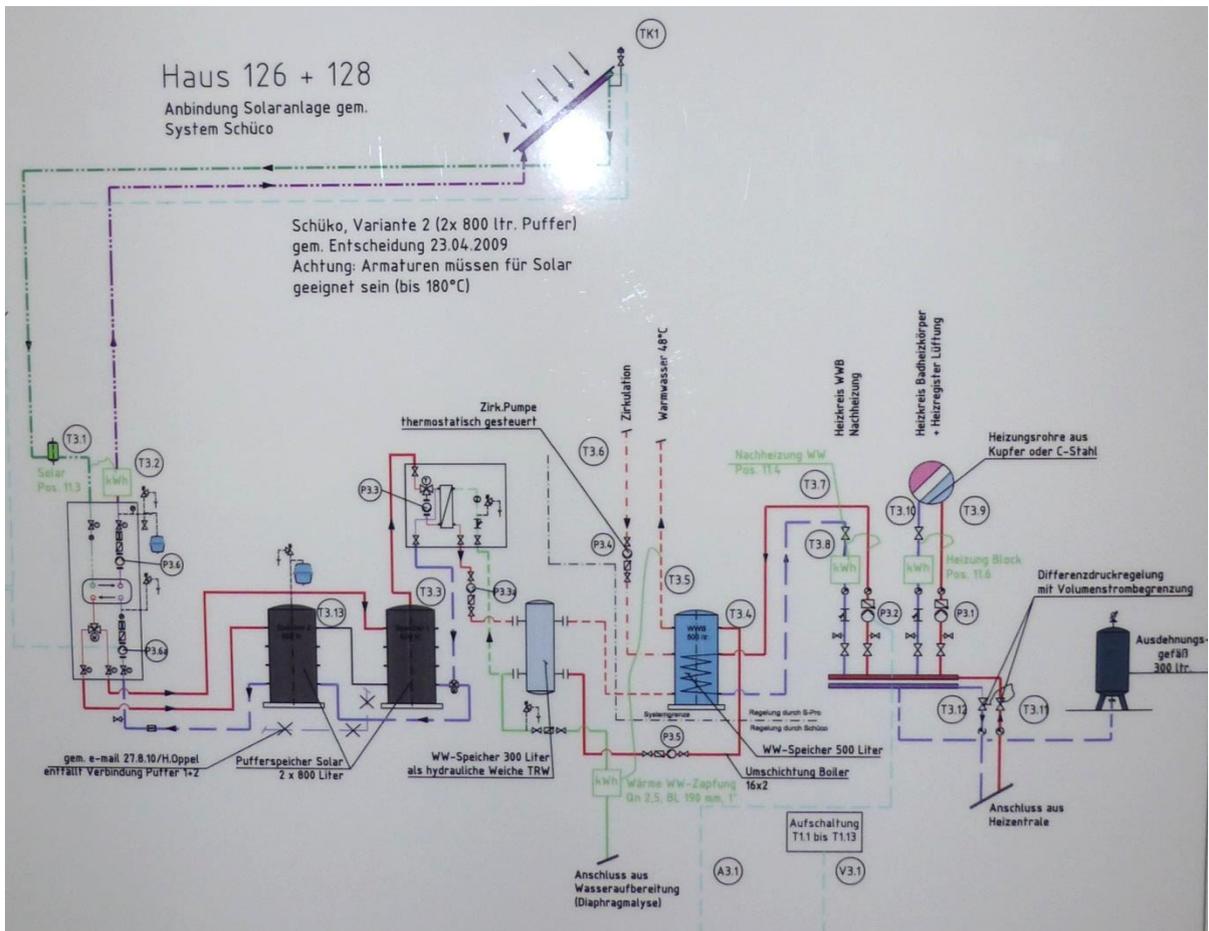


Abb. 4-27: Anlagenschema der Solaranlage (Auszug aus dem Gesamtanlagenschema) [Baumgartner 2009]

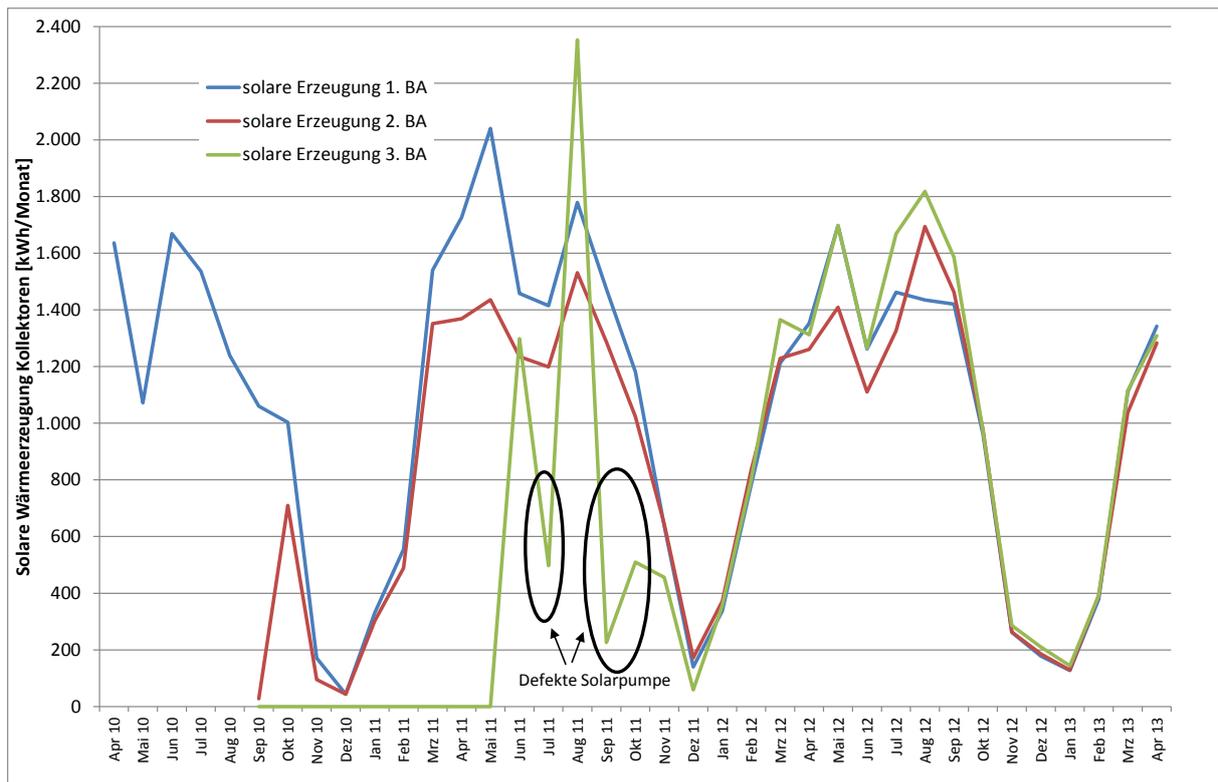


Abb. 4-28: Monatssummen der Solarwärmeeinspeisung in die Solarspeicher im Messzeitraum

Insgesamt wurde von der Solaranlage im ersten Bauabschnitt 11.635 kWh im Jahr 2012/13 (bzw. 405,7 kWh/m²KF*a) in die Solarspeicher eingespeist, im zweiten Bauabschnitt 11.269 kWh (392,9 kWh/m²KF*a) und im dritten Bauabschnitt 12.464 kWh (434,6 kWh/m²KF*a), so dass in der Jahressumme die Werte nur um ca. 10 % voneinander abweichen.

Solarer Deckungsgrad

Entscheidender als die solare Wärmelieferung ist jedoch der solare Deckungsgrad SD der Warmwasserbereitung. Hier ergeben sich jedoch, wie weiter unten noch gezeigt wird, Probleme der korrekten Zuordnung von Verlusten zu Solar- und Nachheizkreis.

$$\text{Gl. 1} \quad SD = \frac{Q_N + Q_{SP} - Q_{zu}}{Q_N + Q_{SP}} \quad \text{nach [Quaschnig 2008]}$$

Der solare Deckungsgrad ist nach (Gl. 1) definiert als die Summe aus Warmwasser-Nutzwärme Q_N (inklusive Zirkulationsverluste) zuzüglich Speicherverluste Q_{SP} , abzüglich der Nachheizenergie Q_{zu} aus dem Nahwärmenetz, geteilt durch die Summe aus Nutzwärme und Speicherverlusten.

Da die Speicherverluste nicht gemessen werden konnten, wird in einem ersten Berechnungsansatz von der entnommenen Warmwasser-Nutzwärme Q_N (inklusive Zirkulationsverluste) die Nachheizenergie Q_{zu} abgezogen (Gl. 2), d. h. alle Verluste der Solarspeicher sowie die Verluste des Bereitschaftsspeichers Q_{SP} für Warmwasser (500 Liter) werden dem Solarsystem zugeschlagen. Diese Betrachtung ist nicht ganz korrekt, da der Bereitschaftsspeicher auch ohne Solaranlage vorhanden gewesen wäre, die Bilanzierung ließ sich aber aufgrund der Einbausituation der Wärmemengenzähler nicht anders durchführen. Weiter unten wird ein abgewandelter Ansatz dargestellt und begründet.

$$\text{Gl. 2} \quad SD = \frac{Q_N - Q_{zu}}{Q_N}$$

Der solare Deckungsgrad SD schwankt verständlicher Weise im Jahresverlauf mit der Sonneneinstrahlung. Weiterhin wird er von der Warmwasserzapfung beeinflusst (je höher der Warmwasserverbrauch ausfällt, desto kleiner wird der solare Deckungsgrad). In Abb. 4-29 ist der solare Deckungsgrad getrennt für alle drei Bauabschnitte aufgetragen. In den Wintermonaten sinkt er auf null, da die vorhandene Solarwärme die Verluste nicht decken kann. In den Sommermonaten steigt er im zweiten Bauabschnitt im August 2011 und August 2012 bis auf 75 % - 80 % an. Allerdings ist im Sommer die Warmwasserabnahme aufgrund der Urlaubszeit zwischen 8 % und 30 % niedriger als im übrigen Jahr. Aufgrund der Regelung der Warmwassernacherwärmung wird nur an wenigen sonnigen Tagen eine vollständige Deckung – durch die Solaranlage erreicht. Im Sommer 2012 erreichen die anderen Bauabschnitte ebenfalls hohe Deckungsgrade von nahezu 70 %, der Einbruch im Juni 2012 ist aber deutlich stärker als im zweiten Bauabschnitt. Hier wirkt sich die Erhöhung der Warmwassertemperatur auf 60 °C bis 64 °C für Mai und Juni deutlich aus (siehe Kapitel 4.4).

Auffällig ist neben der Reduktion des Deckungsgrades im dritten Bauabschnitt wegen einer defekten Pumpe die Tatsache, dass er im gesamten Jahr 2013 deutlich unter den Werten der anderen beiden Bauabschnitt liegt. Hier trat ein regelungstechnisches Problem auf, das im Folgenden erläutert wird.

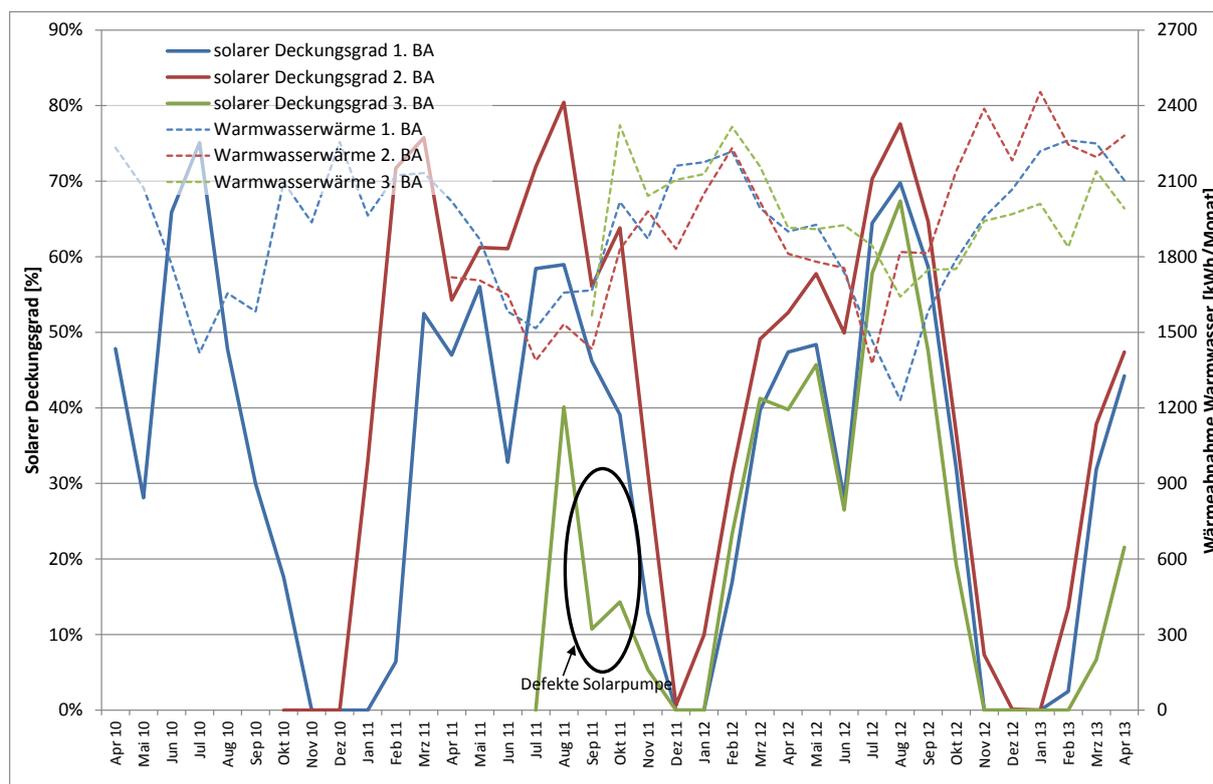


Abb. 4-29: Solarer Deckungsgrad bei Warmwasserbereitung

Einschub 1: Umschichtung der hydraulischen Weiche ohne solares Wärmeangebot

Beim Vergleich der solaren Deckungsgrade der drei Bauabschnitte in der Rotlintstraße ist der dritte Bauabschnitt (aber auch der erste) bei Auswertungen aufgefallen, da dort ein höherer Anteil an Nacherwärmung für das Warmwasser erforderlich war. Abb. 4-30 zeigt die Warmwasser-

Temperaturen der letzten beiden Wochen im Januar 2013 als Stundenmittelwerte. Es sind regelmäßig wiederkehrende, deutliche Einbrüche bei der Warmwassertemperatur zu kennen. Auch die Detailauswertung der Messwerte der Regelung auf Basis von Minutenwerten zeigt ein immer wiederkehrendes dramatisches Einbrechen der Warmwassertemperatur um ca. 18:00 Uhr an den meisten Tagen im Winter.

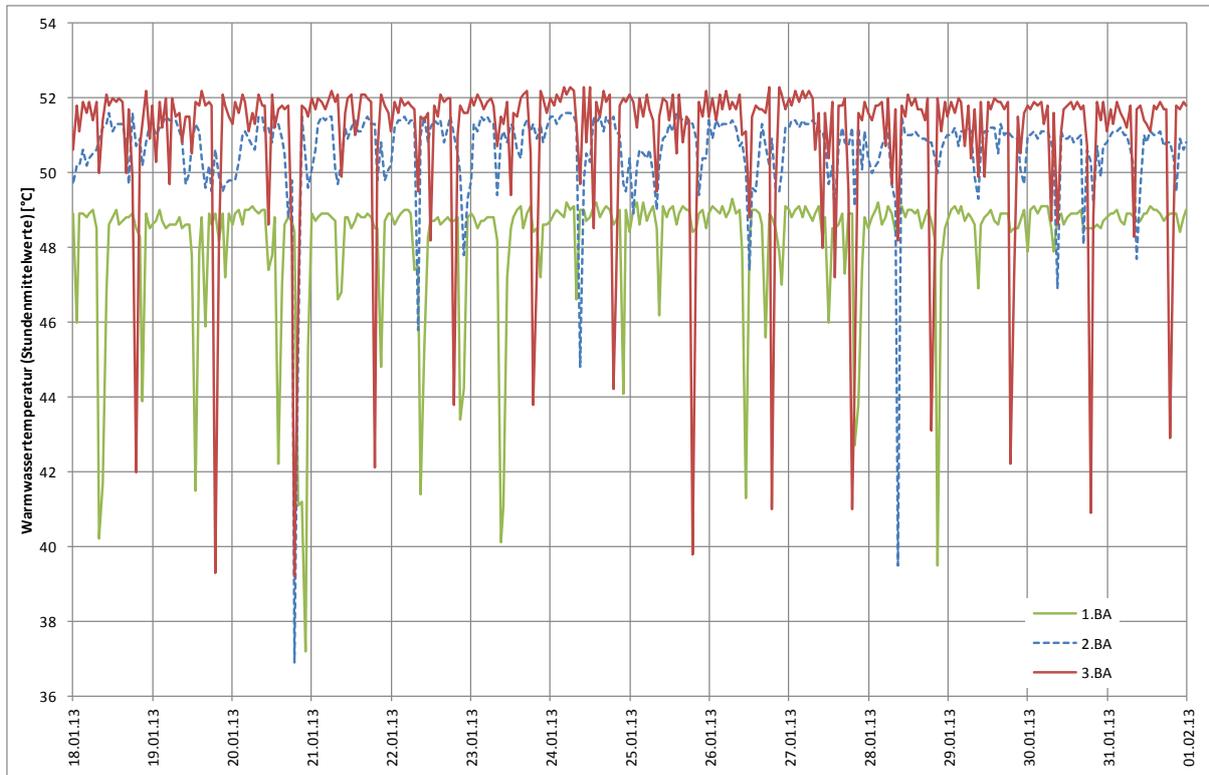


Abb. 4-30: Warmwassertemperaturen (Ausgang Bereitschaftsspeicher) der drei Bauabschnitte Ende Januar 2013 (Stundenmittelwerte)

Die folgenden beiden Abbildungen (Abb. 4-31 und Abb. 4-32) zeigen für den 19.12.2012 und den 03.02.2013 die Warmwasser- und Zirkulationstemperatur, die Temperaturen der Warmwassernachheizung, die Temperatur der Verbindungsleitung zum Umschichtspeicher und den Status der Nachheizpumpe.

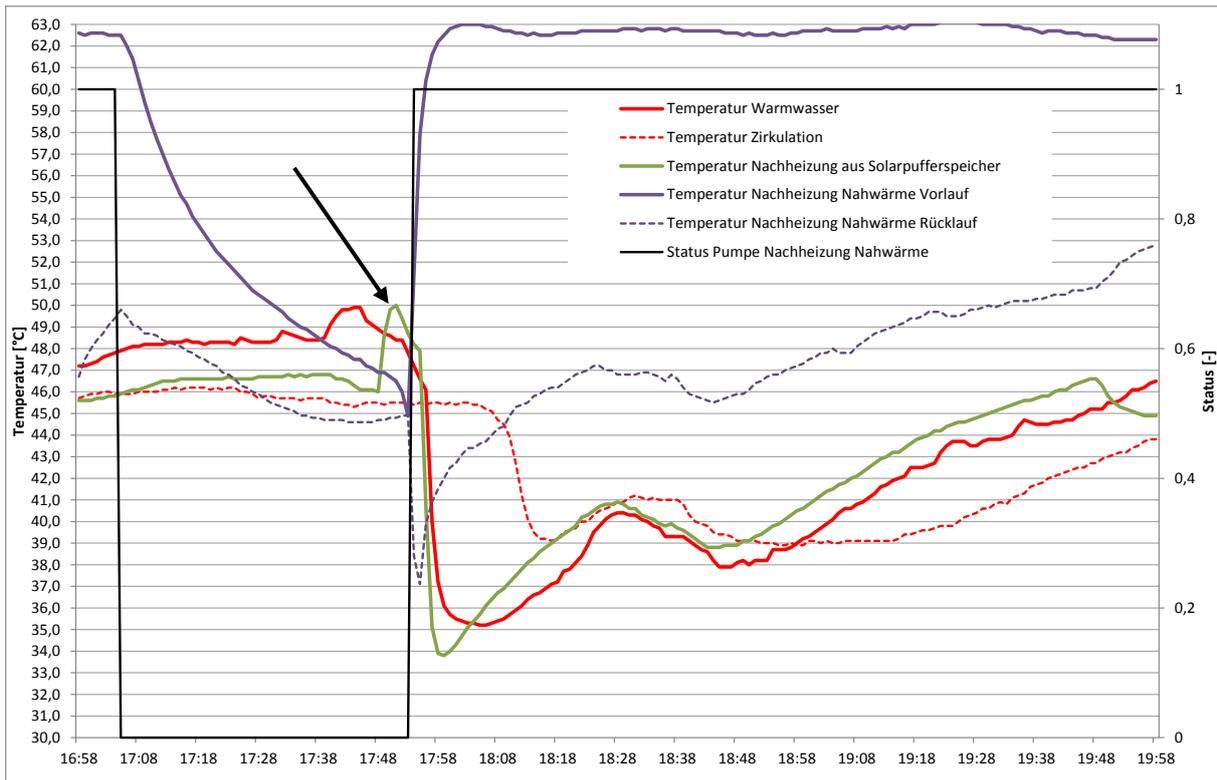


Abb. 4-31: Warmwasserbereitung am 19.12.2012

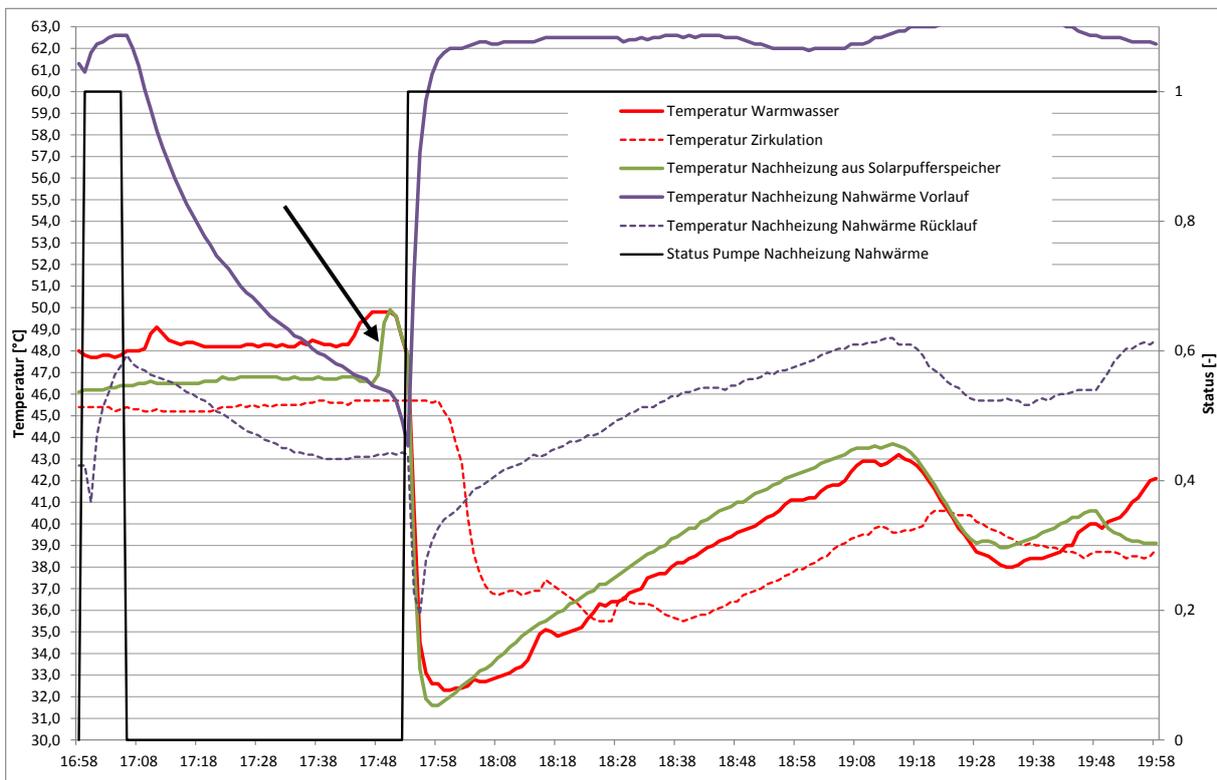


Abb. 4-32: Warmwasserbereitung am 03.02.2013

Immer zur gleichen Zeit wird an diesen beiden Tagen die Nachheizung aktiviert, da die WW-Temperatur einbricht. Die Auswertung von Stundendaten der WW-Verbräuche zeigt hier zwar Zapfungen, diese sind aber nicht höher als zu anderen Zeiten, in denen die Temperatur nicht einbricht. Analysiert man die obigen Diagramme genauer, so sieht man, dass die „Temperatur Nachheizung aus

Solarpufferspeicher“ (grün) vor dem Beginn der Nachheizung ansteigt. Dieser Fühler liegt wahrscheinlich außerhalb an der Rohrleitung (T3.4 im Schaltbild in Abb. 4-27), deswegen liegt seine Temperatur normalerweise immer ca. 2 K unter der WW-Temperatur. Sie steigt jedoch kurz vor der dem Abfallen der WW-Temperatur (rot) an, was darauf hindeutet, dass die Leitung zur hydraulischen Weiche, die normalerweise nicht durchströmt werden sollte und nur durch Wärmeleitung an den WW-Speicher angekoppelt ist, doch durchströmt wird. Dann sinken beide Werte drastisch ab und die Nachheizung springt an.

Aus unbekanntem Gründen scheint die Umschichtpumpe (P 3.5) um diese Uhrzeit eingeschaltet zu werden. Diese pumpt Wasser aus der hydraulischen Weiche (300 Liter mit Raumtemperatur der Semizentrale, also ca. 22 °C) in den WW-Speicher, dessen Temperatur drastisch abfällt, so dass die Nacherwärmung einschaltet. Die Temperatur des Solarpufferspeichers 2 (T 3.3) ändert sich nur minimal (hier nicht dargestellt), so dass es unwahrscheinlich ist, dass P 3.3 (Wärmeabnahme aus dem Solarspeicher) in Betrieb ist.

Auch in anderen Bauabschnitten sind solche dramatischen Einbrüche der WW-Temperatur seit Ende 2012 festzustellen, jedoch nicht so regelmäßig wie im dritten Bauabschnitt. Dennoch ist auch beim ersten Bauabschnitt das gleiche Problem zu vermuten. Ursache ist wahrscheinlich jeweils die Solarregelung, da sie die Umschichtpumpen ansteuert. Das Problem verursacht nicht nur eine Erhöhung des Energieverbrauchs für die Warmwasserbereitung, sondern bedeutet auch Komforteinbußen bei den Mietern. Obwohl das Problem seit Februar 2013 bekannt war, ist es aus organisatorischen Gründen bis zur Abfassung dieses Berichts nicht gelungen, die Fehlfunktion zu beheben. Im Sommer, wenn die Solarspeicher gefüllt sind, führt das beschriebene Phänomen zu erhöhten Temperaturen im Bereitschaftsspeicher.

Einschub 2: Hysterese Warmwasserbereitung

Auch bei der Nacherwärmung des Trinkwarmwassers durch die Nahwärme zeigten sich Probleme. Die Auswertung der Messdaten der drei Semizentralen ergab, dass die Warmwassernacherwärmung aus dem Nahwärmenetz in sehr kurzen Abständen erfolgt. Im ersten Bauabschnitt ist die Nacherwärmung sehr häufig und dann meist nur für 3 Minuten in Betrieb. Dadurch wird kontinuierlich das Nahwärmenetz auf Temperatur gehalten (siehe Abb. 4-33). Sobald die Warmwassertemperatur minimal unter die Solltemperatur von 48 °C sinkt, wird solange mit der Nahwärme nachgeladen, bis der Sollwert wieder erreicht wird. Jedoch fehlt der Regelung offensichtlich eine Hysterese, so dass die Nacherwärmung in sehr kurzen Abständen immer wieder aktiviert wird. Ein vergleichbares Verhalten konnte auch bei teilweise gefüllten Solarspeichern beobachtet werden.

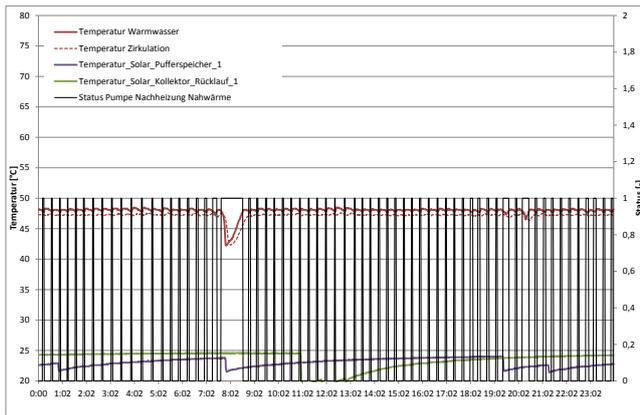


Abb. 4-33: Warmwasserbereitung im ersten Bauabschnitt am 29.11.2012

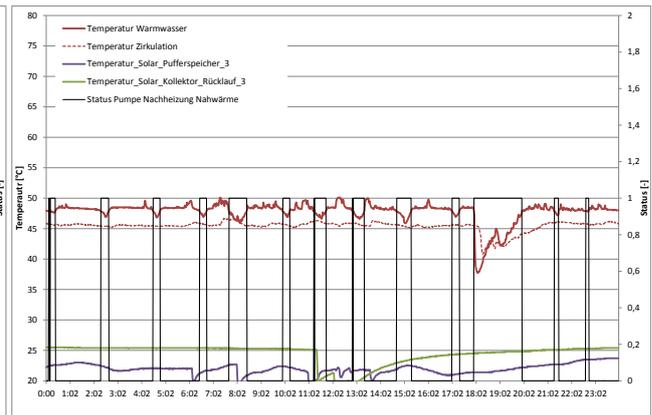


Abb. 4-34: Warmwasserbereitung im dritten Bauabschnitt am 29.11.2012

Beim zweiten und dritten Bauabschnitt, sind die Nachladeintervalle etwas länger (3. BA ca. 15 Minuten, siehe Abb. 4-34) mit längeren Pausen dazwischen. Die kurzen Nachladeintervalle im ersten Bauabschnitt wurden auch durch einen deutlich höheren Volumenstrom der Warmwasserzirkulation verursacht - die Zirkulationspumpe stand auf maximalem Fördervolumen, möglicherweise eine Reaktion auf die Temperatureinbrüche, die jedoch durch die Ansteuerung der Umwälzpumpen verursacht wurde (siehe oben). Durch eine Verminderung der Einstellungen der Zirkulationspumpe auf den Wert in den anderen Bauabschnitten ist nicht nur die Nachladehäufigkeit etwas reduziert worden, sondern es konnte auch die Temperaturspreizung zwischen Warmwasser und Zirkulationsrücklauf von 0,5 K auf ca. 2,5 K angehoben werden, gleichzeitig wurde Hilfsenergie eingespart und die Wärmeverluste etwas abgesenkt (siehe zum Vergleich Abb. 4-35: Differenz zwischen „Temperatur Warmwasser“ und „Temperatur Zirkulation“).

In Abb. 4-35 ist aber auch zu erkennen, dass an einem sonnigen Tag (15.04.2013), an dem ab 12:00 Uhr die Temperatur im Solarpufferspeicher die Warmwassersolltemperatur übersteigt, dennoch mehrmals über die Nahwärme nachgeladen wird. Dadurch wird Wärme aus dem Heizhaus für die Warmwasserbereitung angefordert, obwohl ausreichend Solarwärme vorhanden war. Ursache für diese Fehlfunktion ist wahrscheinlich die Schnittstelle zwischen Solarregelung und Zentralregelung.

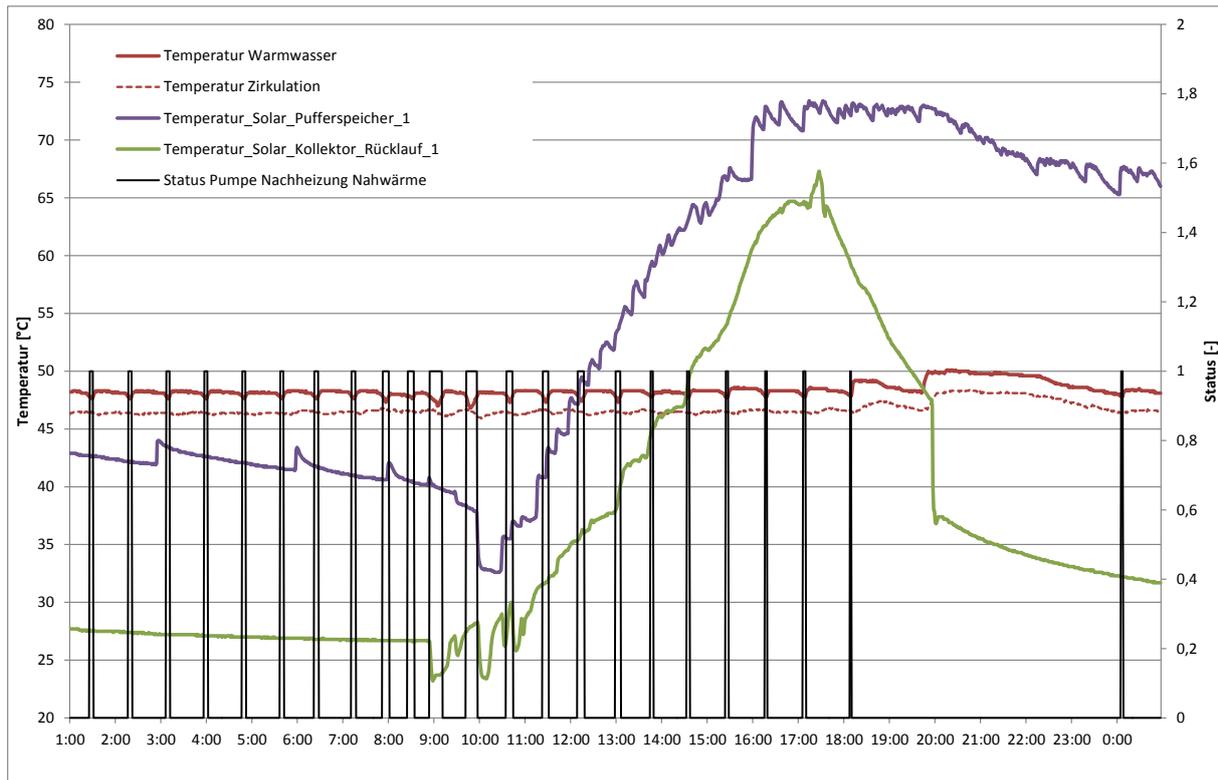


Abb. 4-35: Warmwasserbereitung im ersten Bauabschnitt am 15.04.2013

Auswertung der Solaranlagen mit modifiziertem solaren Deckungsgrad SD^*

In der Übersicht ergeben sich nach der oben beschriebenen Berechnungsmethode für den solaren Deckungsgrad SD die Werte in Tab. 4-11. Dargestellt sind die Jahressummen der solaren Erzeugung, die Nacherwärmung, der solare Deckungsgrad sowie die Solarstrahlung. Interessant ist vor allem die Entwicklung im zweiten Bauabschnitt. Im Jahr 2011 lag der solare Deckungsgrad bei 58 %. In der Folgezeit ist er kontinuierlich bis auf 35 % gesunken, obwohl die solare Erzeugung nahezu gleich geblieben ist. Gründe sind unter Anderem einerseits der angestiegene Warmwasserverbrauch (siehe Tab. 4-9), aber auch die erhöhten Warmwassertemperaturen im September 2011 und Mai/Juni 2012. Die beiden anderen Bauabschnitte schneiden noch deutlich ungünstiger ab, da hier einerseits Probleme mit der Solarpumpe (3. BA 2011/12), andererseits mit der Regelung der Warmwasserbereitung (siehe oben) die Effizienz deutlich reduziert haben.

Tab. 4-11: Solare Erzeugung, Nacherwärmung Warmwasser aus dem Nahwärmenetz sowie solarer Deckungsgrad für die drei Bauabschnitte und solare Einstrahlung im jeweiligen Zeitraum

	1. BA			2. BA			3. BA			Solarstrahlung
	solare Erzeugung	Nacherwärmung	solarer Deckungsgrad	solare Erzeugung	Nacherwärmung	solarer Deckungsgrad	solare Erzeugung	Nacherwärmung	solarer Deckungsgrad	
	kWh/a	kWh/a	%	kWh/a	kWh/a	%	kWh/a	kWh/a	%	
2011	14.276	15.544	31%	12.038	8.618	58%				1.060
2011/12	13.270	16.083	30%	12.071	12.059	44%	10.895	19.596	19%	1.018
2012	12.362	15.569	29%	12.124	14.101	40%	13.336	17.350	25%	1.029
2012/13	11.635	16.592	27%	11.269	15.802	35%	12.464	19.823	13%	1.010

Da die Gründe für den erhöhten Nacherwärmungsaufwand aufgrund der fehlenden Hysterese bei der Warmwassertemperatur sowie durch den Fehlbetrieb der Umschichtpumpen nicht dem Solarsystem anzulasten sind, wird im Folgenden ein abweichender Ansatz zur Berechnung des solaren Deckungs-

grades SD^* verfolgt (Gl. 3). Dabei werden in den Wintermonaten, wenn die Solarenergie nahezu keinen Beitrag zur Warmwasserbereitung liefert, die Verluste der Warmwasserbereitung (ohne Solar) Q_{SP} als Summe von Nacherwärmung Q_{zu} und Solarkreis Q_{KN} minus der Warmwasserwärme Q_N berechnet und als mittleren Abzug bei der Berechnung des solaren Deckungsgrades von der Nacherwärmung subtrahiert. Auch bei dieser Berechnungsmethode geht die gemessene Solareinspeisung nicht in das Ergebnis ein, so dass die erhöhten Verluste der Solarspeicher bei höheren Temperaturen das Ergebnis nicht verfälschen.

$$\text{Gl. 3} \quad SD^* = \frac{Q_N - (Q_{zu} - Q_{SP})}{Q_N}$$

Bei einer Schwelle von maximal 15 % solarem Deckungsgrad zu Berechnung von Q_{SP} ergeben sich Speicherverluste von 407 ± 73 kWh/Monat im ersten, 138 ± 41 kWh im zweiten und 561 ± 360 kWh/Monat im dritten Bauabschnitt⁴. Bei letzterem ergibt sich jedoch das Problem, dass die Verluste durch die defekte Regelung im Winter 2012/13 kontinuierlich ansteigen und im März bereits bei 972 kWh/Monat liegen. Aus diesem Grund ist eine Korrektur im dritten Bauabschnitt 2012/13 nicht sinnvoll möglich.

Tab. 4-12: Solarer Deckungsgrad SD^* für die drei Bauabschnitte

	solare Deckung (unter Berücksichtigung der Verluste des Bereitschaftsspeichers)		
	1. BA	2. BA	3. BA
2011	53%	64%	
2011/12	51%	51%	51%
2012	52%	45%	57%
2012/13	48%	41%	-

Tab. 4-12 zeigt die Ergebnisse für den solaren Deckungsgrad SD^* . Die Werte liegen im ersten und zweiten Bauabschnitt 2011 bis 2012 im Bereich der erwarteten Werte, sinken im Jahr 2012/13 aber deutlich unter 50 % ab. Ursache ist einerseits die etwas geringere solare Einstrahlung, andererseits der ansteigende Warmwasserverbrauch im zweiten Bauabschnitt. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass nicht die gesamte eingespeiste Solarwärme auf einem nutzbaren Temperaturniveau liegt, so dass die realen solaren Deckungsgrade leicht unter den Werten in Tab. 4-12 liegen werden. Dennoch liegen für den ersten und zweiten Bauabschnitt die solaren Deckungsgrade SD^* unter Berücksichtigung des Warmwasser-Temperatureinflusses (siehe Abb. 4-20) im erwarteten Bereich.

Abb. 4-36 zeigt den korrigierten solaren Deckungsgrad SD^* für den ersten und zweiten Bauabschnitt im Jahresverlauf. Trotz der auftretenden Schwankungen zwischen den Jahren ergibt sich ein Jahresgang, der in der Übergangszeit weitgehend den Planwerten entspricht. Im Frühjahr und im (absolut gesehen) weniger wichtigen Winter, werden die geplanten solaren Deckungsgrade um ca. 10 %-Punkte unterschritten. Hauptgrund für die Reduktion beim solaren Deckungsgrad im Frühjahr dürften die erhöhten Warmwassertemperaturen durch den Handbetrieb der Regelung sein.

⁴ Die beiden Bauabschnitte, in denen Probleme mit der Umschichtung festgestellt wurden (siehe Einschub 1), weisen deutlich erhöhte Speicherverluste auf

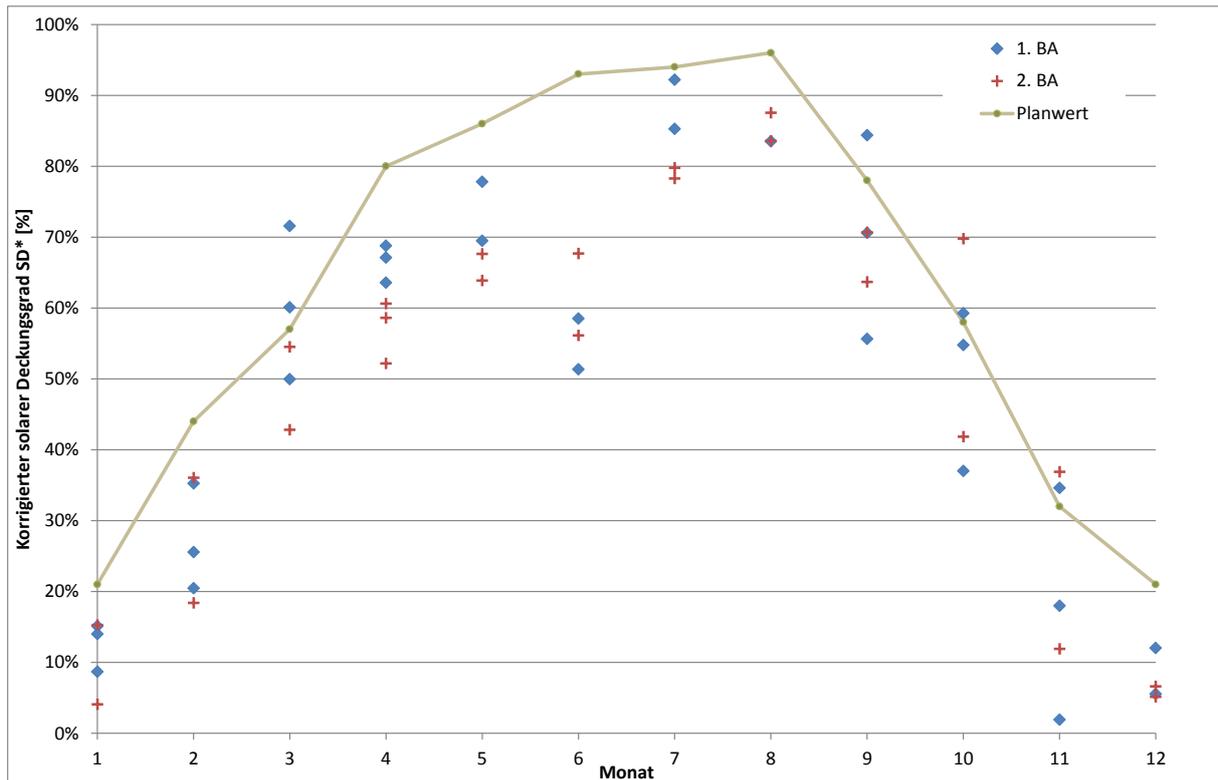


Abb. 4-36: Korrigierter solarer Deckungsgrad SD^* im Jahresverlauf sowie Jahressgang der Planwerte

4.5 Elektrische Hilfsenergieverbräuche

Zum Bereich der elektrischen Hilfsenergieverbräuche zählen die Allgemeinstromverbräuche der einzelnen Gebäude (je Treppenhaus), die Hilfsenergieverbräuche in den Semizentralen und im Heizhaus, zu denen auch der Stromverbrauch der Solaranlagen gehört. Die Energieverbräuche für die Keller- und Treppenhauslüftung sowie die Wasserbehandlung werden in den folgenden Kapiteln nochmals separat betrachtet.

4.5.1 Allgemeinstromverbräuche

Die Allgemeinstromverbräuche der sieben Gebäude beinhalten die Treppenhausbeleuchtung (zunehmende Anzahl von Lampen mit zunehmender Anzahl von Stockwerken), Kellerbeleuchtung, Außenbeleuchtung (zwischen einer und drei Leuchten je Haus), Klingel- und Verstärkeranlagen (Kabelfernsehen), Keller- und Treppenhauslüftung sowie gegebenenfalls Aufzüge und Brandmelde- und Entrauchungsanlagen (Häuser Nr. 122-128). In Tab. 4-13 sind für unterschiedliche Zeiträume von 12 Monaten jährliche Kennwerte der Allgemeinstromverbräuche der einzelnen Häuser dargestellt. Während bei den Häusern ohne Aufzug Nr. 116 und Nr. 120 mit ca. $1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ auf einem vergleichbaren Niveau liegen, erreicht Haus 118 mit ca. $2,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ den doppelten Wert, der sogar höher liegt, als bei einigen Gebäuden mit Aufzug. Bei diesen werden im Mittel $1,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ für Allgemeinstrom verbraucht.

Tab. 4-13: Jährliche Kennwerte des Allgemeinstromverbrauchs der sieben Gebäude auf die jeweils versorgte Energiebezugsfläche bezogen

[kWh/(m ² a)]	116	118	120	122	124	126	128	Gesamt
2010	0,89	2,00	0,53					1,15
2010/11 (Okt-Sept)	0,87	2,10	1,00	2,11	1,84			1,61
2011	0,90	2,11	1,01	1,89	1,76			1,55
2011/12 (Jul-Juni)	0,89	2,09	1,04	2,13	1,79	1,40	1,71	1,59
2012	0,85	2,02	0,99	2,14	1,93	1,43	2,01	1,66
2012/13 (Mai-April)	1,00	2,14	1,14	2,28	2,15	1,50	2,06	1,78
Häuser ohne Aufzug								

In [Clausnitzer 2009] werden auf Basis der Auswertung von 50 Mehrfamilienhäusern Stromverbräuche für den Aufzug von 0,8 bis 3,6 kWh/(m²a) angegeben, im Mittel 1,7 kWh/(m²a). Der Stromverbrauch der Aufzüge in der Rotlintstraße ist im Detail nicht bekannt, da der gesamte Allgemeinstromverbrauch der Gebäude mit Aufzug aber im Bereich des Mittelwertes der in [Clausnitzer 2009] ausgewerteten Aufzugsstromverbräuche liegt, kann indirekt geschlossen werden, dass die Aufzüge in der Rotlintstraße sehr effizient sind.

In Tab. 4-14 sind beispielhaft die Monatssummen der absoluten Allgemeinstromverbräuche für das Jahr 2012 dargestellt. Bei allen Häusern ergibt sich ein deutlicher Jahresgang mit niedrigeren Verbräuchen im Sommer, bedingt durch die kürzere Betriebszeit der Außenbeleuchtung und der sparsameren Nutzung der Treppenhausbeleuchtung. Bei Haus 128 treten im Sommer zwei Phasen auf (34 Tage im Mai/Juni und 31 Tage im August/September), in denen die Leistungsaufnahme beim Allgemeinstrom konstant um ca. 320 W erhöht ist. Eine ähnliche Erhöhung, aber nur um 60 W, war in Haus 122 über 15 Tage im Sommer 2011 zu beobachten. Wodurch diese Verbrauchserhöhungen verursacht wurden, ist nicht bekannt.

Tab. 4-14: Monatssummen des Allgemeinstromverbrauchs der sieben Gebäude im Jahr 2012

		116	118	120	122	124	126	128	Gesamt
Jan 12	kWh	38,6	91,3	50,0	100,6	85,0	96,6	85,5	547,7
Feb 12	kWh	28,5	77,8	32,2	92,4	75,4	85,0	78,3	469,5
Mrz 12	kWh	28,4	74,3	33,0	95,5	75,1	86,4	79,8	472,5
Apr 12	kWh	27,8	67,1	28,9	89,0	72,6	79,1	72,6	437,0
Mai 12	kWh	25,6	63,3	38,6	88,9	78,6	81,0	201,9	577,9
Jun 12	kWh	23,7	58,2	25,4	85,7	75,3	77,5	206,8	552,5
Jul 12	kWh	23,8	61,2	25,6	88,5	74,9	78,9	72,1	425,0
Aug 12	kWh	25,4	66,3	29,0	89,1	81,8	82,0	255,7	629,3
Sep 12	kWh	33,5	70,4	35,2	88,4	82,2	82,3	130,0	521,8
Okt 12	kWh	40,9	81,5	39,3	100,4	95,7	90,1	77,7	525,7
Nov 12	kWh	44,7	88,8	43,2	100,8	101,9	93,4	76,9	549,8
Dez 12	kWh	38,7	89,7	47,1	104,4	108,6	96,2	74,7	559,4
Summe 2012	kWh	379,4	889,8	427,5	1123,7	1007,1	1028,5	1412,1	6268,1
Kennwert	kWh/(m ² a)	0,85	2,02	0,99	2,14	1,93	1,43	2,01	1,66

In den Abb. 4-37 bis Abb. 4-39 sind die Tagesprofile der einzelnen Häuser zu unterschiedlichen Jahreszeiten dargestellt. In den Abbildungen repräsentiert jeder Farbpunkt einen Allgemeinstromverbrauch für eine Stunde. Aufgetragen sind die Stunden des Tages vertikal und die Tage des Monats horizontal. Man erkennt in Abb. 4-37 (erster Bauabschnitt), dass der Allgemeinstromverbrauch tagsüber am geringsten ausfällt (dunkle Farben entsprechen niedrigen Verbräuchen). Nachts wird aufgrund der Außenbeleuchtung, die jahreszeitabhängig geschaltet wird, ein höheres Grundniveau erreicht. Allerdings unterscheidet sich Haus 118 nennenswert von den anderen beiden Gebäuden (siehe oben). Da die Verbräuche in der Mittagszeit annähernd gleich sind, liegen die Ursachen für den Mehrverbrauch bei einem Verbraucher, der nachts eingeschaltet wird. In 118 und 120 sind zwei Außenlampen vorhanden, in 116 nur eine. Eine Kontrolle vor Ort ergab keine Anhaltspunkte auf unterschiedliche Leuchtmittel. Bei einem Ortstermin am 17.01.2012 fiel auf, dass die Treppenhausbeleuchtung in Haus 118 nahezu permanent in der Zeit zwischen ca. 18:00 Uhr und 20:30 Uhr in Betrieb

war. Möglicherweise ist ein defektes oder nicht korrekt eingestelltes Zeitrelais der Treppenhausbeleuchtung die Ursache für den Mehrverbrauch in diesem Haus.

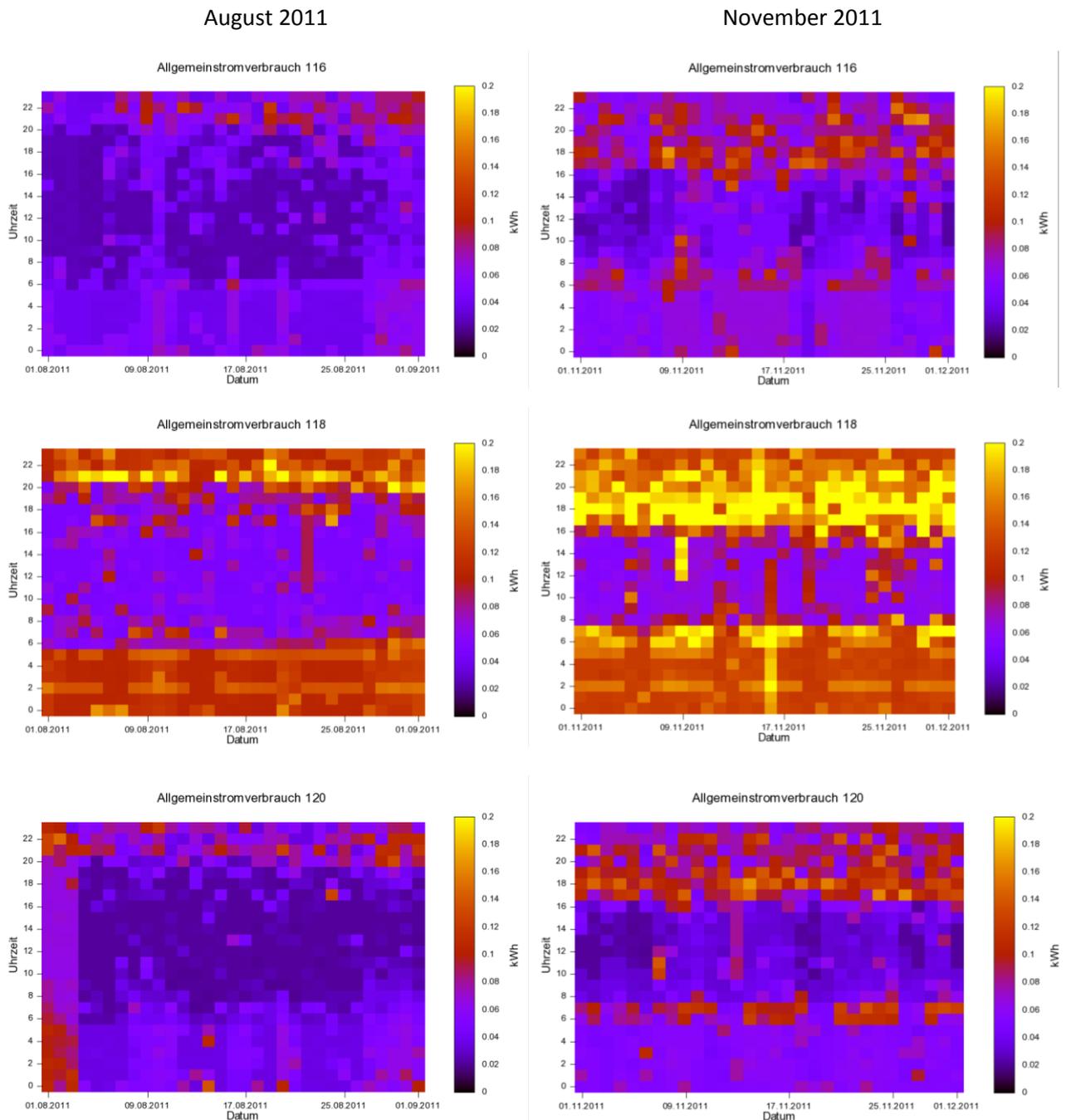


Abb. 4-37: Allgemeinstromverbräuche der Häuser 116, 118 und 120 (erster Bauabschnitt) für die Monate August und November 2011

In Abb. 4-38 (zweiter Bauabschnitt) ist in der Abbildung oben links zu erkennen, dass im Haus 122 im August die Verbräuche erst niedriger lagen, dann aber Mitte des Monats für sechs Tage erhöht waren und seit 24.08. liegt das Verbrauchsniveau durchgängig höher. Diese Verbrauchserhöhung wurde bereits oben dargestellt.

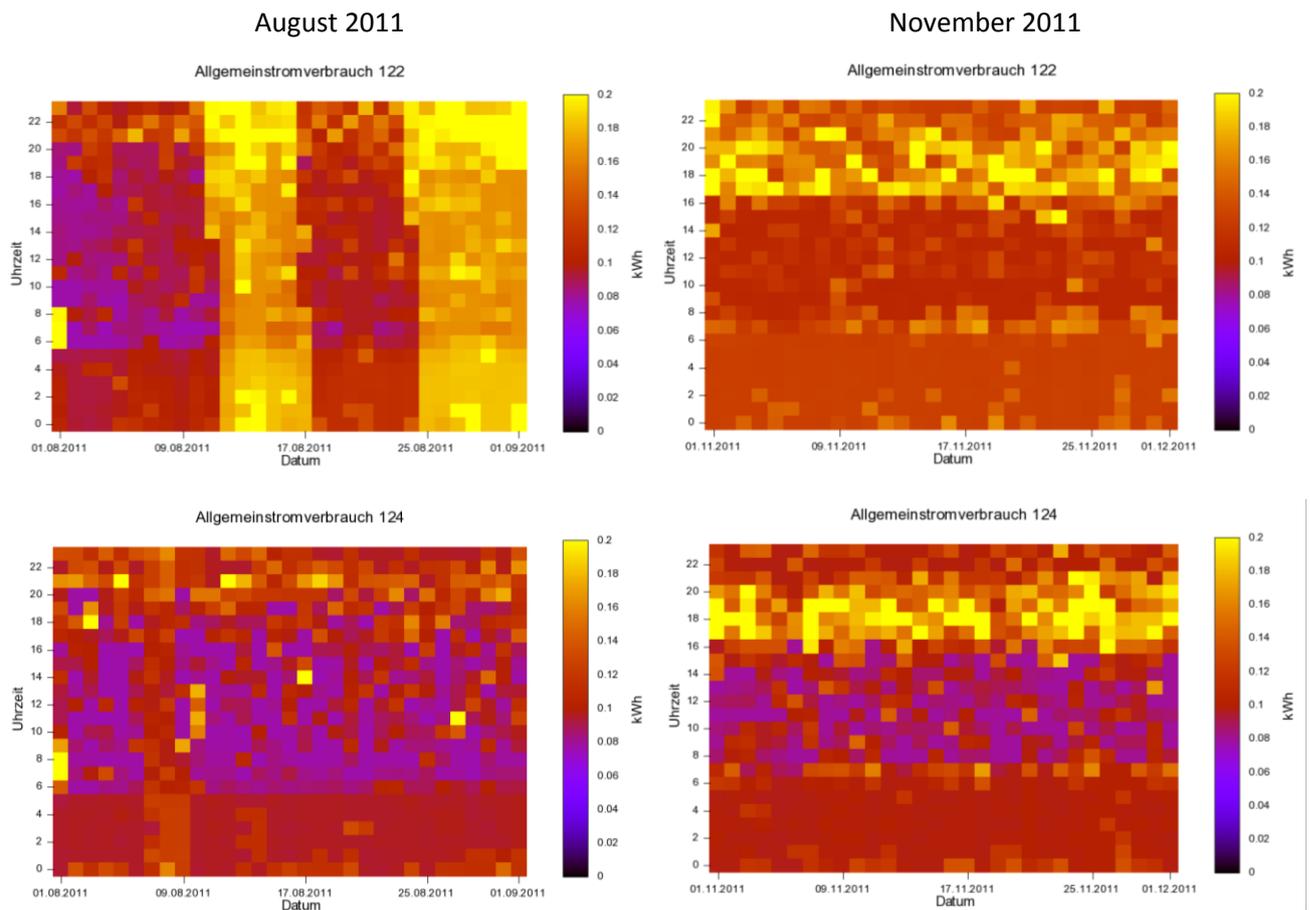


Abb. 4-38: Allgemeinstromverbräuche der Häuser 122 und 124 (zweiter Bauabschnitt) für die Monate August und November 2011

Grundsätzlich ist in den Abbildungen festzustellen, dass die Farben weiter Richtung rot/gelb verschoben sind – die Verbräuche somit höher liegen als im ersten Bauabschnitt. Dies liegt in den Standby-Verbräuchen der Aufzüge und der Smoke-Control (Fahrstuhlschacht-Entrauchung) begründet. Besonders in den Abendstunden fallen die vielen gelben Punkte auf. Diese sind wahrscheinlich auf die Nutzung der Aufzüge zurückzuführen, die scheinbar am Morgen (Treppe abwärts) seltener zum Einsatz kommen. Diese Struktur ist in ähnlicher Weise auch im dritten Bauabschnitt zu erkennen (Abb. 4-39). Hier liegen die Werte im August jedoch höher – wahrscheinlich haben einige Mieter in dieser Zeit ihre Wohnungen bezogen und dabei verstärkt den Aufzug genutzt.

August 2011

November 2011

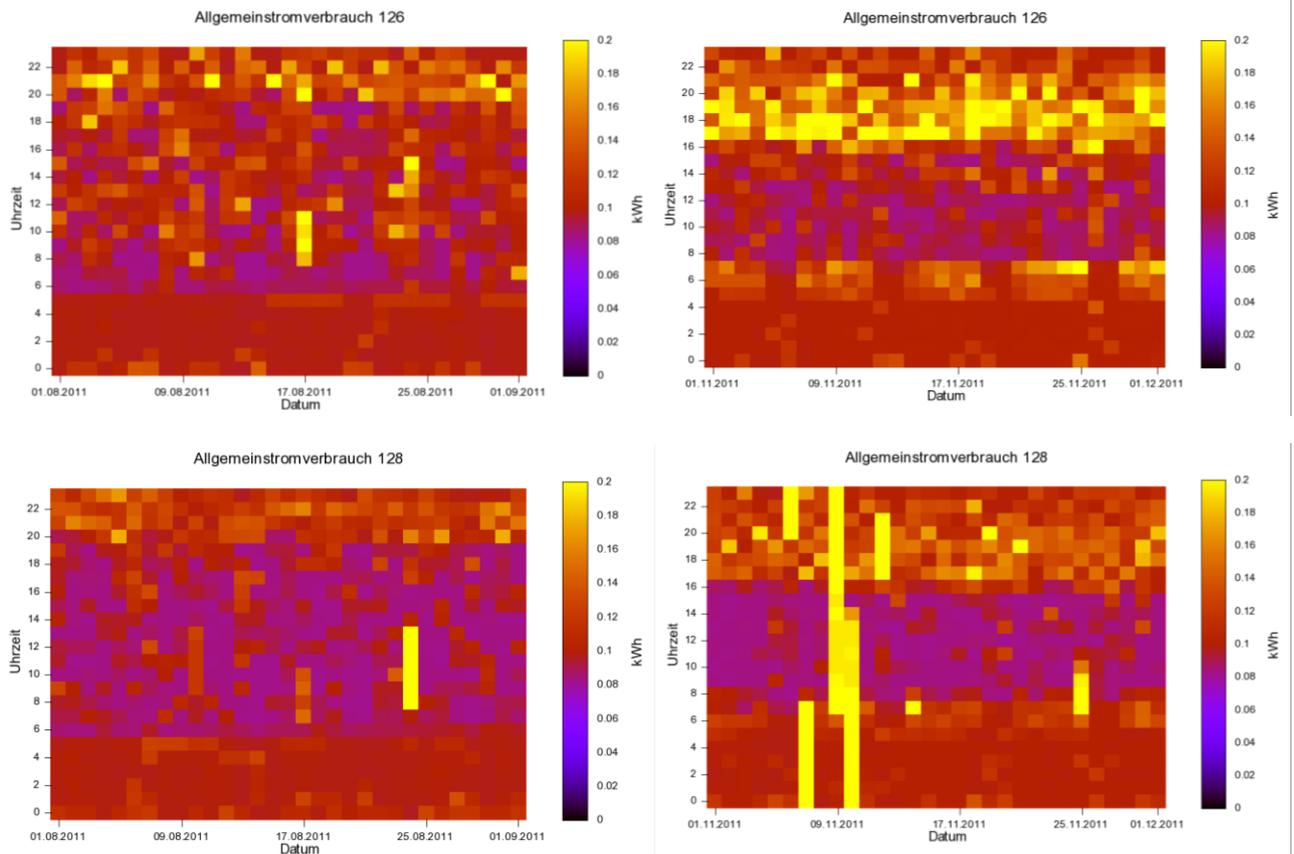


Abb. 4-39: Allgemeinstromverbräuche der Häuser 126 und 128 (dritter Bauabschnitt) für die Monate August und November 2011

4.5.2 Hilfsenergie Anlagentechnik

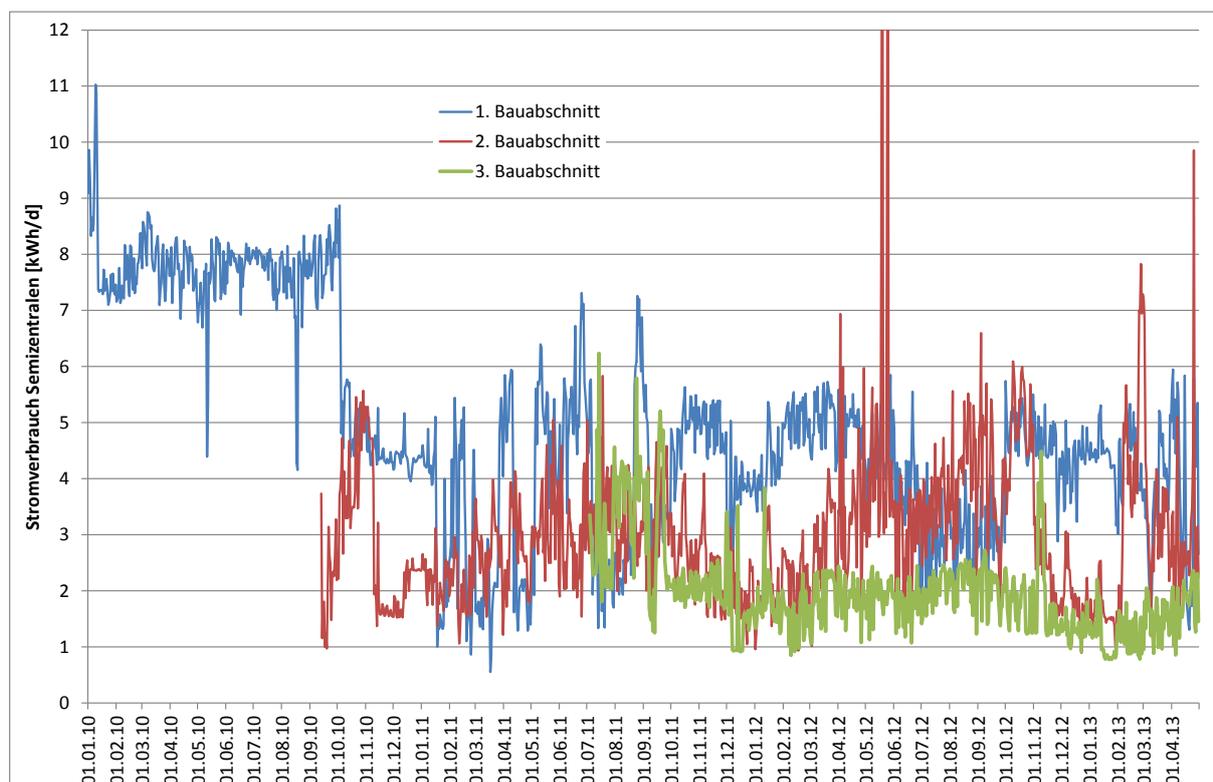
Die gesamte Wohnanlage verfügt über eine Heizzentrale und drei Semizentralen, die jeweils in einem Keller jedes Bauabschnitts platziert wurden. In den Semizentralen befinden sich die Heizungsverteilung, die Warmwasserbereitung mit Solar-, Umschicht- und Zirkulationspumpe sowie die Solarregelung. In der Heizzentrale werden die Gas-Brennwerttherme, das BHKW, die Nahwärmepumpe, sowie die zentrale Regelung der Gesamtanlage erfasst. Außerdem werden die Heizungsumwälzpumpen der Semizentralen von der Zentralregelung freigegeben, so dass deren Energieverbrauch ebenfalls im Schaltschrank der Zentralregelung erfasst wird. Die Trinkwasserbehandlung (Diaphragmalyse) im Nachbarkeller (eigener Unterzähler) wird über den Zähler des Hilfsenergieeinsatzes in der Heizzentrale mit erfasst.

Tab. 4-15 zeigt für das Jahr 2012 die Hilfsstromverbräuche der drei Bauabschnitte und der Heizzentrale sowohl als Absolutwerte sowie als Kennwerte. Für den ersten und zweiten Bauabschnitt liegt der Jahreskennwert bei $1,15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, der dritte Bauabschnitt liegt mit $0,48 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ weit unter den beiden anderen Bauabschnitten. Hier kann die Ursache für diesen Unterschied nicht geklärt werden. Bei einer Ortsbegehung am Ende der Messphase war bei allen Umwälzpumpen die gleiche Voreinstellung gewählt. Die Unterschiede müssen sich somit überwiegend aus dem Betrieb ergeben.

Tab. 4-15: Monatlicher Verbrauch für Hilfsstrom der Anlagentechnik im Jahr 2012 für die drei Bauabschnitte und das Heizhaus

	1. BA		2. BA		3. BA		Heizhaus	
	kWh	kWh/(m ² a)	kWh	kWh/(m ² a)	kWh	kWh/(m ² a)	kWh	kWh/(m ² a)
Jan 12	129,5	0,098	64,5	0,062	55,9	0,039	372,9	0,098
Feb 12	145,7	0,111	62,3	0,059	44,3	0,031	555,4	0,147
Mrz 12	156,2	0,119	85,9	0,082	58,6	0,041	549,2	0,145
Apr 12	149,0	0,113	104,9	0,100	56,2	0,040	486,7	0,129
Mai 12	136,4	0,104	154,5	0,148	60,4	0,042	340,1	0,090
Jun 12	115,5	0,088	91,9	0,088	53,7	0,038	248,4	0,066
Jul 12	90,1	0,068	109,2	0,104	63,3	0,045	245,4	0,065
Aug 12	87,7	0,067	128,9	0,123	66,4	0,047	257,8	0,068
Sep 12	89,7	0,068	119,1	0,114	63,3	0,045	267,5	0,071
Okt 12	151,8	0,115	152,6	0,146	54,4	0,038	467,9	0,124
Nov 12	135,7	0,103	71,5	0,068	59,3	0,042	573,7	0,152
Dez 12	132,6	0,101	58,7	0,056	41,0	0,029	379,9	0,100
Summe 2012	1520,0		1204,1		676,8		4744,8	
Kennwert		1,15		1,15		0,48		1,25

Weiterhin zeigt sich, dass die Schwankungen des Hilfsstromverbrauchs bei den drei Bauabschnitten völlig unterschiedlich ausfallen (Abb. 4-40). Der erste Bauabschnitt wurde im ersten Betriebsjahr nahezu unregelmäßig betrieben, da die Zentralregelung erst ab Herbst 2010 einsatzbereit war. Danach schwankt der tägliche elektrische Energieverbrauch zwischen 1,5 und 7 kWh/d, wobei im Sommer tendenziell niedrigere Verbrauchswerte auftraten. Beim zweiten Bauabschnitt fallen die Verbrauchswerte im Sommer jedoch höher aus als im Winter. Beim dritten Bauabschnitt ist die Schwankungsbreite nach einer Einregelungsphase nach Inbetriebnahme vergleichsweise konstant. Insbesondere die niedrigen Verbrauchswerte im dritten und größten Bauabschnitt lassen die Fragen aufkommen, warum die anderen beiden Abschnitte mehr als doppelt so viel Hilfsenergie verbrauchen (absolut und spezifisch)?

**Abb. 4-40: Hilfsenergieverbräuche der Semizentralen über die gesamte Messphase**

Tab. 4-16 zeigt die Jahressummen und Kennwerte des Hilfsenergieverbrauchs der Semizentralen und des Heizhauses für unterschiedliche Zeiträume von 12 Monaten. Die Zahlen unterliegen Schwankungen, aufgrund der geringen Zahl von Auswertejahren ist jedoch keine eindeutige Tendenz zu erkennen. Der gesamte Hilfsenergieverbrauch liegt zwischen 1,8 und 2,0 kWh/(m²a). Allerdings muss berücksichtigt werden, dass die Heizungspumpen über den Schaltschrank der Zentralregelung erfasst werden und dessen Stromverbrauch bei Betrieb des BHKW direkt von diesem gedeckt wird (als erhöhter Eigenverbrauch, messbar als Energiebezug in Zeiten ohne BHKW-Betrieb). Rechnet man den gemessenen Verbrauch aus Zeiten ohne BHKW-Betrieb 2012/13 auf das gesamte Jahr hoch und subtrahiert davon den über Zähler gemessene Verbrauch so kann man den Anteil des Heizungspumpenstromverbrauchs, der direkt über das BHKW gedeckt wurde auf zusätzlich ca. 840 kWh/a bzw. 0,22 kWh/(m²a) abschätzen.

Tab. 4-16: Jahres- und Kennwerte des Verbrauchs für Hilfsstrom der Anlagentechnik für die drei Bauabschnitte und das Heizhaus

	1. BA		2. BA		3. BA		Heizhaus		gesamt	
	kWh/a	kWh/(m ² a)	kWh/a	kWh/(m ² a)	kWh/a	kWh/(m ² a)	kWh/a	kWh/(m ² a)	kWh/a	kWh/(m ² a)
2010	2556	1,94								
2010/11 (Okt-Sept)	1409	1,07	1059	1,01			2809 *)	0,74	5277	1,79
2011	1383	1,05	1007	0,96			3143	0,83	5533	1,84
2011/12 (Jul-Juni)	1555	1,18	1090	1,04	791	0,56	3345	0,88	6780	1,79
2012	1520	1,15	1204	1,15	677	0,48	3681	0,97	7082	1,87
2012/13 (Mai-April)	1426	1,08	1252	1,20	631	0,44	4085	1,08	7394	1,95

*) Okt 2010 ergänzt

Tab. 4-17 zeigt mittlere monatliche Leistungen der Semizentralen und im Heizhaus für das Jahr 2012. Auch hier zeigen sich die großen Unterschiede zwischen den Bauabschnitten.

Tab. 4-17: Mittlere Leistung für Hilfsstrom der Anlagentechnik im Jahr 2012 für die drei Bauabschnitte und das Heizhaus

	1. BA	2. BA	3. BA	Heizhaus
Jan 12	174	87	75	501
Feb 12	209	90	64	798
Mrz 12	210	115	79	738
Apr 12	207	146	78	676
Mai 12	183	208	81	457
Jun 12	160	128	75	345
Jul 12	121	147	85	330
Aug 12	118	173	89	347
Sep 12	125	165	88	372
Okt 12	204	205	73	629
Nov 12	189	99	82	797
Dez 12	178	79	55	511
Mittelwert	173	137	77	542

Thermische Solaranlagen

Die drei Bauabschnitte verfügen über drei identisch dimensionierte thermische Solaranlagen mit je 32 m² Kollektorfläche mit Südorientierung und je 2 x 800 Liter Pufferspeicher im Keller des Gebäudes. Die Solarleitungen sind aufgrund der unterschiedlichen Höhe der Gebäude verschieden lang und werden innerhalb der thermischen Hülle in die Semizentrale im Keller geführt.

Da keine separaten Messdaten vom Stromverbrauch der thermischen Solaranlagen vorliegen (Solarpumpen, Umschichtpumpen, Solarregelung), wurde in Abb. 4-41 der Einfluss der Solarstrahlung auf die gesamte Leistungsaufnahme in den Semizentralen analysiert. Dazu wurden ein unterer Schwellwert mit geringer Solarstrahlung und ein oberer Schwellwert mit hoher Solarstrahlung definiert und die Differenz der Leistungsaufnahme für alle Tage des Messzeitraumes dargestellt, die unter bzw. über der jeweiligen Schwelle liegen. Die beiden Schwellen repräsentieren Tage, an denen die thermischen Solaranlagen sicher abgeschaltet bzw. wahrscheinlich in Betrieb waren. Für die Semizentrale des 2. Bauabschnitts („Semi 122“) ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen ansteigender Solarstrahlung und Leistungserhöhung in der Semizentrale, da bei höherer Solarstrahlung die solare Umwälzpumpe länger in Betrieb ist. Beim ersten Bauabschnitt (Semi 118) ist ebenfalls ein deutlicher Anstieg der Leistungsaufnahme mit der Solarstrahlung zu erkennen, der Zusammenhang kann aber am besten mit einer logarithmischen Funktion beschrieben werden. In der nicht korrekt funktionierenden Semizentrale des dritten Bauabschnitts (Semi 126) steigt die Leistung mit zunehmender Solarstrahlung leicht an, um dann wieder leicht abzufallen. Dies ist nur dadurch zu erklären, dass die Pumpenlaufzeit dieser Solaranlage nicht an das tatsächliche Solarangebot angepasst wird oder die Solarwärme nicht korrekt an die Warmwasserbereitung übergeben wird und die Speicher ab einer bestimmten Einstrahlung gefüllt sind. Die Temperaturmesswerte der Solaranlage deuten aber eher auf eine Fehlfunktion der Regelung der Solarumwälzpumpe hin.

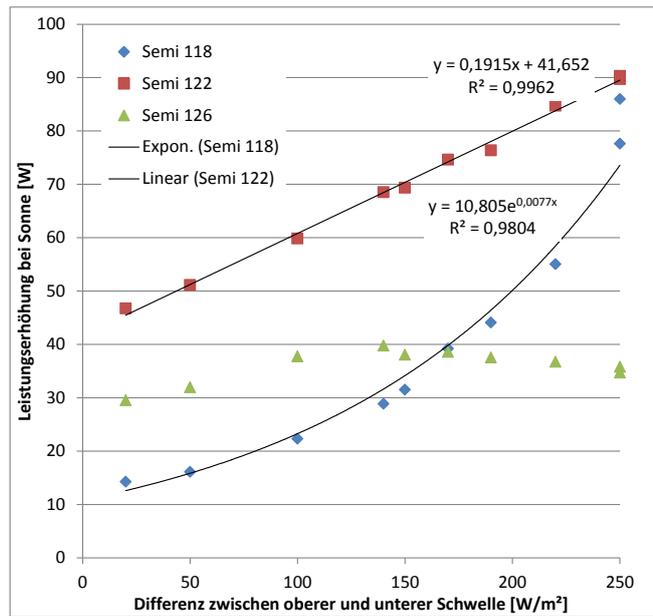


Abb. 4-41: Erhöhung der Leistungsaufnahme in den Semizentralen in Abhängigkeit der Differenz zwischen hoher und niedriger solarer Einstrahlung

Die beiden Schwellen repräsentieren Tage, an denen die thermischen Solaranlagen sicher abgeschaltet bzw. wahrscheinlich in Betrieb waren. Für die Semizentrale des 2. Bauabschnitts („Semi 122“) ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen ansteigender Solarstrahlung und Leistungserhöhung in der Semizentrale, da bei höherer Solarstrahlung die solare Umwälzpumpe länger in Betrieb ist. Beim ersten Bauabschnitt (Semi 118) ist ebenfalls ein deutlicher Anstieg der Leistungsaufnahme mit der Solarstrahlung zu erkennen, der Zusammenhang kann aber am besten mit einer logarithmischen Funktion beschrieben werden. In der nicht korrekt funktionierenden Semizentrale des dritten Bauabschnitts (Semi 126) steigt die Leistung mit zunehmender Solarstrahlung leicht an, um dann wieder leicht abzufallen. Dies ist nur dadurch zu erklären, dass die Pumpenlaufzeit dieser Solaranlage nicht an das tatsächliche Solarangebot angepasst wird oder die Solarwärme nicht korrekt an die Warmwasserbereitung übergeben wird und die Speicher ab einer bestimmten Einstrahlung gefüllt sind. Die Temperaturmesswerte der Solaranlage deuten aber eher auf eine Fehlfunktion der Regelung der Solarumwälzpumpe hin.

In Abb. 4-42 ist für einen Zeitraum von fünf Tagen im April 2013 die Leistung der Hilfsenergie als Stundenwert aufgetragen, gleichzeitig ist die Solarstrahlung angegeben. Der 29.04.2013 war sehr strahlungsreich und an diesem Tag stieg die elektrische Leistung aller drei Bauabschnitte um ca. 140 W. Da die Solarregelung den Volumenstrom im Solarkreis in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf variiert, um diese möglichst konstant zu halten, kann diese Leistung der Solaranlage nur als überschlägiger Wert gelten, der sowohl nach oben als auch nach unten abweichen kann. Exemplarische Auswertungen unterschiedlicher Zeiträume stützten jedoch die oben gezeigten unterschiedlichen Abhängigkeiten der Leistungsaufnahme von der Solarstrahlung.

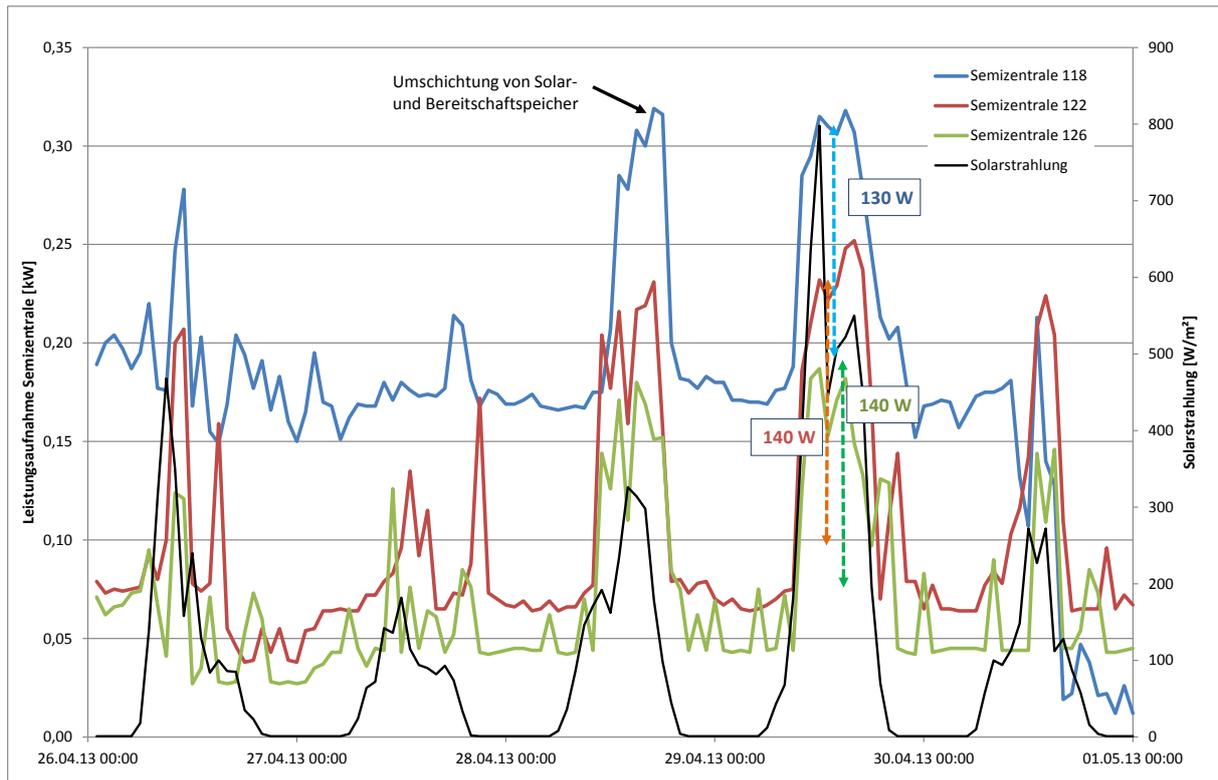


Abb. 4-42: Hilfsenergie der drei Semizentralen für fünf Tage im April 2013 mit unterschiedlich starker Solareinstrahlung und Kennzeichnung des Energieverbrauchs der Solaranlagen

4.5.3 Treppenhauslüftung

Die Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung in jedem Treppenhaus wurden im Rahmen des Messprogramms nicht separat vermessen. Allerdings wurde bei mehreren Vorortterminen auch die eingestellte Lüftungsstufe der Treppenhauslüftung notiert, die jedoch bei allen Treppenhäusern immer in der mittleren Schalterstellung verblieb. Mit der Leistungsaufnahme aus den Datenblättern des Herstellers [Ventomaxx 2008] kann somit der Stromverbrauch der Treppenhauslüftung berechnet werden. Für die drei Lüfterstufen werden Leistungsaufnahmen von 3,8 W, 5,2 W bzw. 12,5 W angegeben, für die Berechnung werden aufgerundete Werte verwendet, da ein Abluftkanal angeschlossen war und der dadurch leicht erhöhte Strömungswiderstand die Leistungsaufnahme der Lüftung leicht erhöht. Die Herstellerangabe für den Volumenstrom in freiblasendem Betrieb lag bei 15, 30 bzw. 60 m³/h.

Tab. 4-18: Berechneter Energieverbrauch der Treppenhauslüftung

	116	118	120	122	124	126	128
Leistung	6 W	6 W	6 W	6 W	6 W	6 W	6 W
Stromverbrauch [kWh/a]	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6
Stromverbrauch [kWh/(m ² a)]	0,118	0,119	0,122	0,100	0,101	0,072	0,073

Tab. 4-18 zeigt die berechneten Kennwerte für den Stromverbrauch der Treppenhauslüftung, in der Summe über alle Gebäude ergibt sich ein Gesamtverbrauch von 368 kWh/a bzw. 0,1 kWh/(m²a).

Exemplarisch wurden am 24.06.2010 an den drei Lüftungsgeräten des ersten Bauabschnitts mit dem Volumenstrom-Messgerät FlowFinder225 die Frisch- und Fortluftvolumenströme gemessen (Tab. 4-19). Bei allen drei Anlagen ergab sich trotz der Tatsache, dass die Frischluft direkt ohne Kanalnetz angesaugt wurde, die Abluft aber über einen Kunststoffkanal von Treppenhauskopf zum Lüftungsgeräte auf dem

ersten Treppenabsatz in der Außenwanddämmung geführt wurde, eine gute Übereinstimmung zwischen Frisch- und Fortluft, so dass für die Lüftungsgeräte von einer Volumenstrombalance ausgegangen werden kann. Bei einem Treppenvolumen von 123 m³ ergibt sich daraus ein Luftwechsel von 0,16 1/h im ersten Bauabschnitt. Für den dritten Bauabschnitt ergibt sich aufgrund der zusätzlichen Stockwerke nur noch ein Luftwechsel von 0,1 1/h.

In der Mieterbefragung [IWU 2012] gaben 71 % der Befragten an, im Sommer mit der Luftqualität im Treppenhaus zufrieden zu sein, im Winter waren 63 % damit zufrieden. Somit hat sich die Treppenhauslüftung durchaus bewährt, aufgrund der Tatsache, dass bei Terminen vor Ort im Winter einzelne Fenster im Treppenhaus hin und wieder geöffnet waren, lässt sich die Schlussfolgerung ableiten, dass der Luftaustausch im Treppenhaus, je nach Anzahl der Geruchsquellen, etwas höher ausfallen könnten.

Tab. 4-19: Gemessene Volumenströme der Treppenhauslüftung im ersten Bauabschnitt

	Frischluft	Fortluft
Haus 116	19	20
Haus 118	20	21
Haus 120	22	22

4.5.4 Kellerlüftung

Im Rahmen der energetischen Modernisierung wurden alle Öffnungen der Kellerfenster geschlossen und durch einfache Zuluftöffnungen ersetzt (Abb. 4-43). In jedem Gebäude ist im Keller ein zentraler Abluftventilator montiert, der die verbrauchte Luft aus den Kellerräumen ansaugt und nach draußen befördert. Gleichzeitig strömt frische Außenluft durch die Zuluftelemente in den Keller. Diese mechanische Lüftung soll unkontrolliertes Lüften im Keller durch die Mieter verhindern, das unabhängig vom energetischen Standard des Gebäudes zu Feuchteakkumulationen besonders im Frühjahr und im Sommer bei hoher absoluter Außenluftfeuchte und niedrigen Kellertemperaturen führen kann. Damit durch die mechanische Lüftung nicht bei ungünstigen Außenklimabedingungen die Kellerräume gelüftet werden, wurde ein Regler vom Typ LogiDry eingesetzt, der den Abluftventilator über die Differenz der absoluten Feuchte zwischen Keller und Außenluft steuert (Abb. 4-44). Die Sollwerte waren so eingestellt, dass die Innentemperatur von 15 °C und eine Innenfeuchte von 40 % nicht unterschritten werden sollten. Die Schalthysterese war mit 1,25 g/kg absoluter Feuchte und die Mittelungszeit mit ca. 11 Minuten eingestellt (alle Einstellungen entsprechen den Standardeinstellungen des Herstellers).



Abb. 4-43: Zuluftelement im Kellersockel



Abb. 4-44: Regelung der Kellerlüftung und Messdatenerfassung unter dem Innenfühler der Regelung

Wie diese Regelung funktionierte, wurde über eine exemplarische, zusätzliche Messung des Innenklimas im Abluftraum des Kellers von Haus 120 zwischen Mai 2011 und April 2013 gemessen. In diesem Haus ist keine Semizentrale vorhanden, so dass außer der Wärmeabgabe der in der Kellerdecke verlegten Verteilleitungen und dem Wärmestrom durch die Kellerdecke nur geringe innere Wärmequellen vorhanden sind (z. B. Kellerbeleuchtung). Neben Raumtemperatur und –feuchte wurde auch der Betriebszustand des Abluftventilators über einen Datenlogger vom Typ Hobo U12-013 mit einem Relais und einem Spannungsteiler gemessen und als 15 Minuten-Mittelwert abgespeichert.

Das Kellervolumen liegt bei etwa 220 m³, die Druckverluste im Kanalsystem des Abluftventilators sind nicht bekannt, werden aber aufgrund der kurzen Leitungsführung durch die Kellerwand nach außen mit ca. 20 Pa abgeschätzt. Damit ergibt sich für den Abluftventilator ein Volumenstrom von 140 m³/h in der kleinsten Lüfterstufe, die in der Rotlintstraße eingestellt ist.

In Tab. 4-20 sind die Monatsmittelwerte der gemessenen Kellertemperatur und –feuchte, die Differenz der absoluten Feuchte zwischen Keller und außen sowie der sich aus der Laufzeit des Ventilators ergebende mittlere Luftwechsel im Keller und der Stromverbrauch für den Ventilatorstrom dargestellt.

Die Kellermitteltemperatur schwankt im Jahresverlauf zwischen 15,31 °C im (Februar 2012) und 21,3 °C (September 2011). Die niedrigste gemessene Kellertemperatur im Abluftraum wurde am 11.02.2012 mit 13,9 °C erreicht (Außentemperatur: -13 °C). Dabei muss berücksichtigt werden, dass im Abluftraum höhere Temperaturen herrschen als in den Zuluft-

Tab. 4-20: Monatsmittelwerte der Kellertemperatur- und -feuchte, Differenz der absoluten Feuchte sowie Luftwechsel im Keller und Stromverbrauch der Kellerlüftung

	Kellertemperatur [°C]	rel. Kellerfeuchte [% rel. F]	Diff abs. Feuchte Keller-Außen [g/kg]	Luftwechsel (berechnet) [1/h]	Stromverbrauch (berechnet) [kWh]
Mai 11	19,98	49,62	-0,25	0,12	1,47
Jun 11	20,82	56,98	-0,37	0,08	1,02
Jul 11	20,96	60,97	0,52	0,12	1,73
Aug 11	21,21	64,94	0,13	0,11	1,51
Sep 11	21,33	62,22	0,74	0,16	2,11
Okt 11	20,70	55,42	1,81	0,28	3,94
Nov 11	19,27	50,30	2,11	0,28	3,84
Dez 11	18,44	49,10	1,20	0,16	1,45
Jan 12	17,49	46,88	1,68	0,23	3,22
Feb 12	15,31	39,00	1,36	0,03	0,42
Mrz 12	17,27	47,07	0,57	0,09	1,32
Apr 12	18,22	47,14	0,76	0,13	1,71
Mai 12	19,32	52,75	0,06	0,12	1,02
Okt 12	20,00	52,80	1,38	0,27	2,45
Nov 12	19,04	50,11	1,53	0,26	3,49
Dez 12	17,79	45,48	1,17	0,22	3,15
Jan 13	17,02	44,21	1,40	0,25	3,48
Feb 13	16,35	42,33	1,54	0,18	2,30
Mrz 13	16,43	41,44	1,48	0,18	2,54
Apr 13	17,33	45,45	-0,12	0,07	0,97

räumen, in die die kalte Außenluft direkt einströmt. Dennoch liegen die Kellertemperaturen im Mittel auch in der Heizperiode vergleichsweise hoch.

In Abb. 4-45 wurde für Monate, in denen über die Jahre mehrere Messwerte vorliegen, der Mittelwert gebildet (sonst Einzelwerte) und im Jahresverlauf dargestellt. Es zeigt sich, dass im Monatsmittel die Raumlufffeuchte nicht über 65 % rel. Feuchte ansteigt, also keine kritischen Feuchtezustände im Abluftraum erreicht werden. Im Winter sinkt die Feuchte im Monatsmittel nicht unter den eingestellten Wert von 40 % rel. Feuchte. Der Luftwechsel liegt zwischen Februar

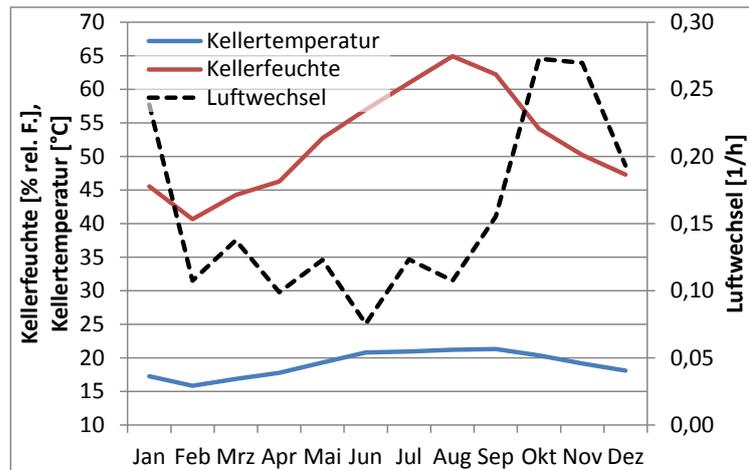


Abb. 4-45: Mittlere Monatswerte von Kellertemperatur, Kellerfeuchte und Luftwechsel im Jahresverlauf

und August bei ca. 0,1 1/h, nur im Herbst und im Winter steigt er auf Werte bis zu 0,27 1/h an. Dies ist die Folge der Reglereinstellungen, da die Lüftung in Betrieb genommen wird, wenn die absolute Feuchte im Kellerraum um die Hysterese über der absoluten Außenluftfeuchte liegt und gleichzeitig die minimale Temperatur und Feuchte im Kellerraum nicht unterschritten sind. Zusammen mit der Raumlufffeuchte wird auch die Feuchte der sorptionsfähigen Bauteile im Keller abnehmen, so dass diese bis zum nächsten Sommer „entladen“ werden.

Der Stromverbrauch für den Kellerventilator kann aufgrund der Herstellerangaben für die Ventilatorleistung in der kleinsten Stufe (12 W) und der gemessenen Laufzeiten auf ca. 25 kWh/a berechnet werden. Die Leistungsaufnahme der Regelung wird vom Hersteller mit ca. 3 W angegeben, so dass sich für die Regelung zusätzlich ein Stromverbrauch von 26 kWh/a ergibt. Somit entsteht im Jahr ein Stromverbrauch von ca. 50 kWh/a für die Kellerlüftung bzw. 0,1 kWh/(m²a).

Abb. 4-46 zeigt die Messwerte für den Zeitraum vom 24. bis 29.08.2011, in dem auch die höchste gemessene Raumlufffeuchte liegt. In den ersten drei Tagen mit sehr hohen Außentemperaturen tagsüber liegt die absolute Außenluftfeuchte immer über der Kellerfeuchte, so dass der Ventilator nur dreimal kurz für wenige Minuten in Betrieb ist. Auch in den Stunden, in denen kurzfristig 80 % Luftfeuchte erreicht werden, geht der Ventilator nicht in Betrieb, da die absolute Außenluftfeuchte die Hysterese von 1,25 g/kg nicht unterschritten wurde. Die Feuchtespitze von 80 % in der Raumluff, die möglicherweise durch Einbringen von feuchten Gegenständen entstanden ist (der Raum wird als Fahrradkeller genutzt), wird aber dennoch schnell abgebaut, da wahrscheinlich die Wände und Decken die Feuchte abpuffern. An den letzten beiden dargestellten Tagen liegt die Außenluftfeuchte deutlich unter der Raumlufffeuchte, so dass der Ventilator wieder regelmäßig in Betrieb ist.

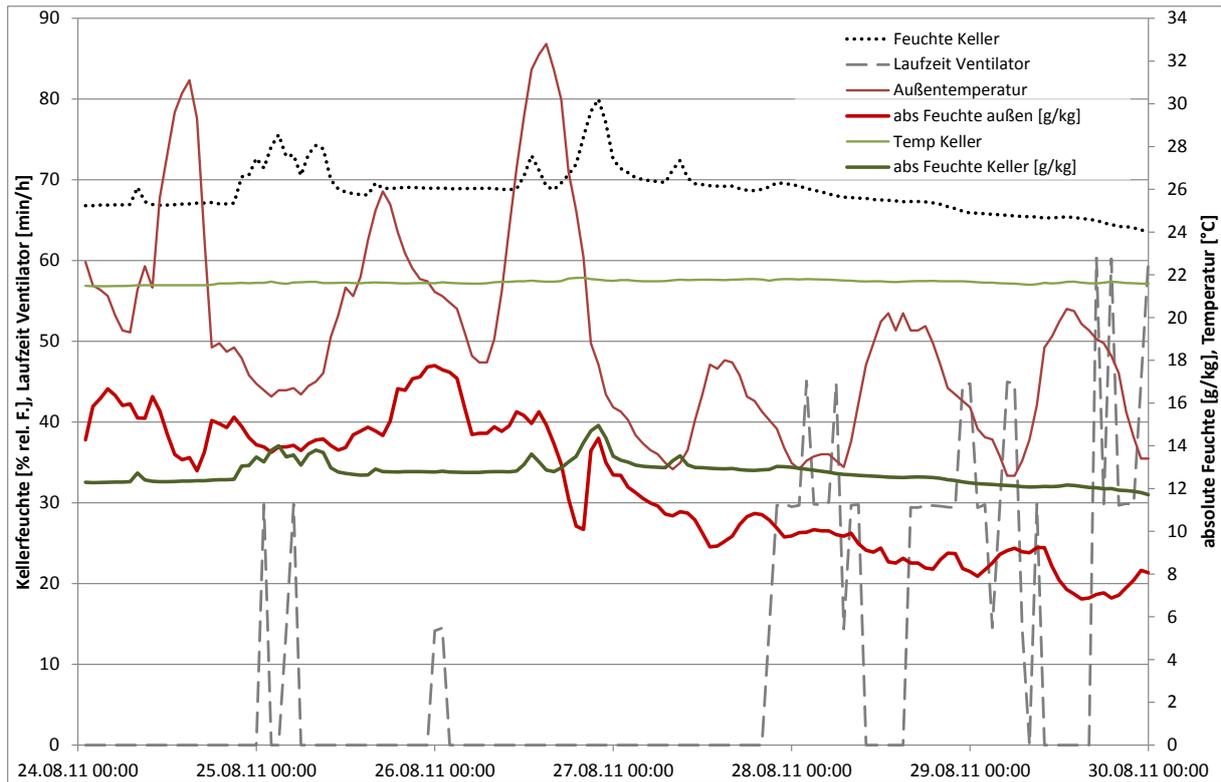


Abb. 4-46: Stundendaten der Messwerte vom 24.08.11 bis 29.08.11 mit Zeitraum höchster Kellerfeuchte

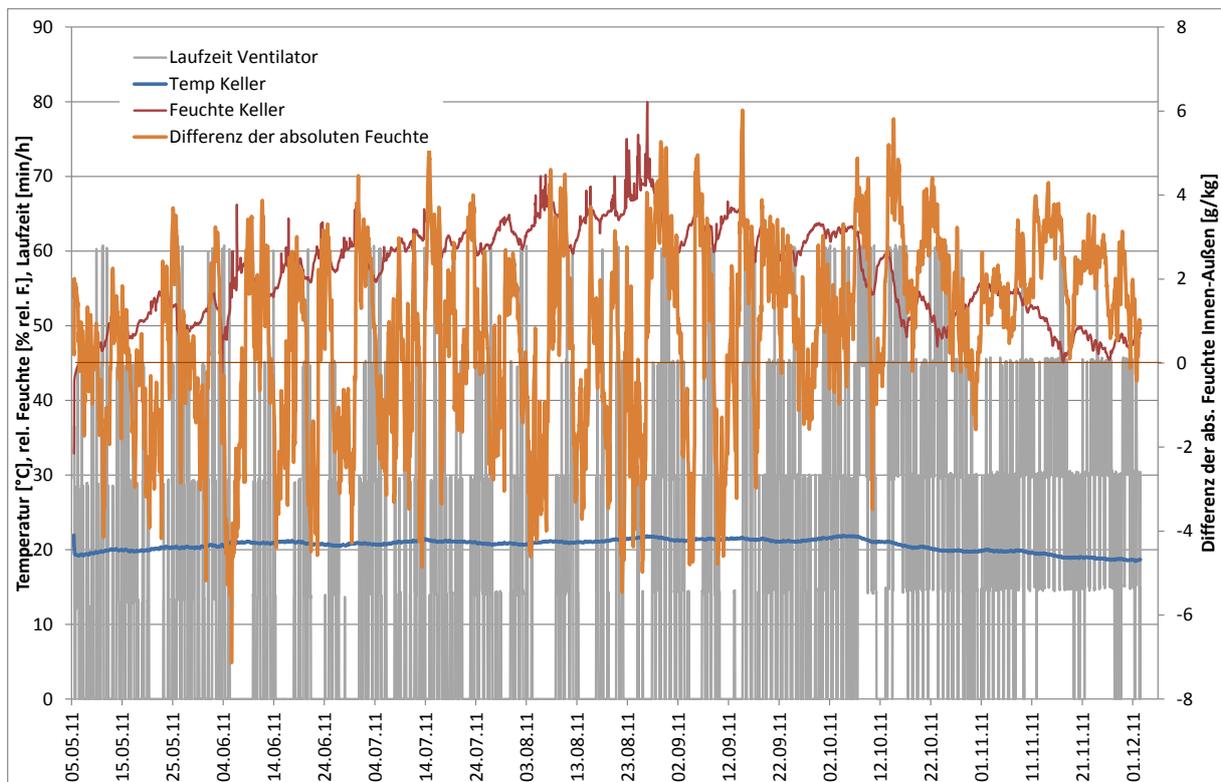


Abb. 4-47: Verlauf von Kellertemperatur und –feuchte, sowie Laufzeit Ventilator und Differenz der absoluten Feuchte innen/außen von Mai bis November 2011

In Abb. 4-47 sind für den Zeitraum von Mai bis November 2011 die Messdaten von Kellertemperatur und -feuchte sowie die Laufzeit und die Differenz der absoluten Feuchte innen/außen dargestellt. Man erkennt auch hier, dass in Zeiten, in denen die absolute Außenluftfeuchte über der Kellerfeuchte liegt, der Ventilator kaum in Betrieb ist und so eine Auffeuchtung des Kellers verhindert wird. Es kann allerdings längere Phasen geben, in denen aufgrund des Außenklimas nicht aktiv gelüftet wird. Im Keller von Rotlintstraße 120 dauerte die längste Phasen ohne mechanische Lüftung 110 h (5.6.11-9.6.11) bzw. 112 h (4.8.-8.8.11). Diese Zeitspanne scheint aufgrund der dann ungünstigen Außenklimabedingungen tolerabel zu sein.

Insgesamt kann für die untersuchte Kellerlüftung festgehalten werden, dass die Regelung wie geplant funktionierte und den Keller immer dann entlüftete, wenn die Klimabedingungen dafür geeignet waren. Diese feuchteoptimierte Lüftung ist ohne mechanische Lüftung mit der entsprechenden Regelung kaum möglich.

Anmerkungen zur Kellerlüftung

Alle Fühler der Regelung wurden ursprünglich in gleicher Art montiert, so dass der Innenfühler direkt neben dem Abluftventilator befestigt wurde. In den Gebäuden mit Semizentrale im Keller befindet sich der der Abluftventilator ebenfalls im Raum der Semizentrale. Dieser ist durch die Abwärme der Rohrleitungen und Speicher aber deutlich wärmer als normale Kellerräume, die relative Raumluftfeuchte sinkt dadurch. In der Konsequenz konnte die Regelung in diesen Kellern nicht funktionieren. Erst nach versetzen der Innenfühler in einen Raum außerhalb der Semizentrale war eine korrekte Funktion der Regelung möglich.

Wichtig ist beim dargestellten Konzept auch die gleichmäßige Durchströmung aller Kellerräume. Der Abluftventilator muss etwa mittig im Kellergrundriss angeordnet werden und es muss ein lüftungstechnischer Kurzschluss (z. B. direkte Ansaugung von Außenluft im Abluftraum) verhindert werden. Weiter entfernte Räume benötigen gegebenenfalls einen größeren Außenluftdurchlass, um einen geringeren Strömungswiderstand zu erreichen. In der Rotlintstraße wurde die Durchströmung der Räume nicht im Detail untersucht, es wurde aber keine Probleme mit Feuchtigkeit in einzelnen Räumen bekannt.

4.5.5 Wasserbehandlung

Die Warmwasserbereitung erfolgt in der Rotlintstraße mit Temperaturen von ca. 50 °C. Dadurch steigt der solare Deckungsgrad und gleichzeitig sinken die Speicher- und Verteilverluste. Bei diesen Temperaturen erfolgt jedoch keine thermische Desinfektion der Speicher und der Warmwasserleitungen zur Verhinderung von Legionellenbefall. Aus diesem Grund wurde am zentralen Trinkwasseranschluss für alle Gebäude eine Zellmembran-Elektrolyse, oder Diaphragmalyse genannt, installiert, die jederzeit keimfreies Warmwasser sicherstellt. Für den Betrieb der Diaphragmalyse wird neben Salz und Zitronensäure auch elektrische Energie für Elektrolyse, Enthärtung, Dosierpumpen und Regelung benötigt, die über einen Unterzähler zusätzlich gemessen wurde.

Hilfsenergieverbrauch

Abb. 4-48 zeigt für einen Zeitraum von 4 Wochen im Sommer 2012 die Stundenwerte der elektrischen Leistungsaufnahme der Diaphragmalyse. Es ergibt sich eine Dauerleistung von ca. 72 W, zusätzlich findet meist einmal am Tag (um 01:00 Uhr) ein Umpumpen von Sole statt, was sich durch den zusätzlichen Pumpenstromverbrauch als Peak in den Messwerten zeigt. Die mittlere Leistung der Wasserbehandlung lag bei 75 W, der Jahresstromverbrauch bei 656 kWh/a. Somit ergibt sich ein zusätzlicher Elektroenergieverbrauch für die Wasserbehandlung von 0,17 kWh/(m²a). Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Anlage für den Gesamtwasserverbrauch dimensioniert ist (Kalt- und Warmwasser). Grundsätzlich wäre auch eine kleinere Anlage möglich gewesen, die nur der Warmwasserverbrauch chemisch behandelt. Welche Auswirkungen die Dimensionierung auf den Elektroenergieverbrauch hat, ist nicht bekannt.

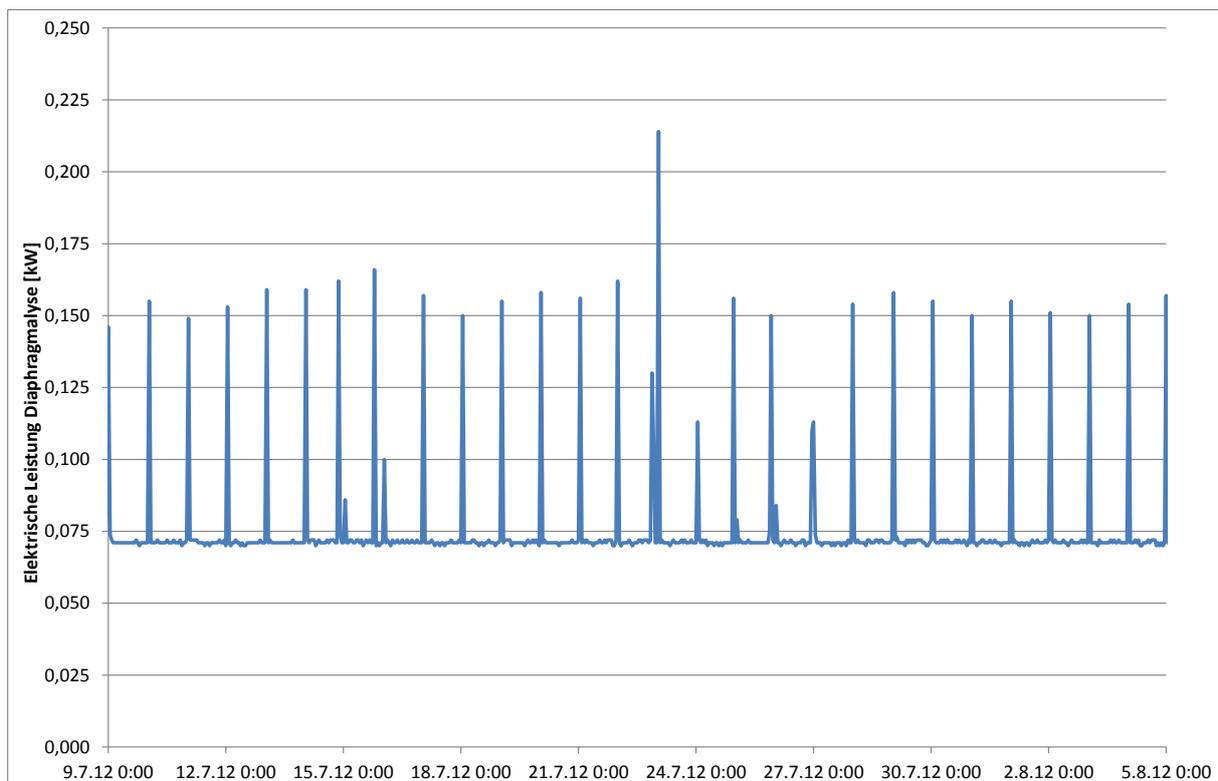


Abb. 4-48: Leistungsaufnahme der Diaphragmalyse über 4 Wochen im Sommer 2012

Über die gesamte Messphase ergaben sich nur geringe Abweichungen beim täglichen Energieverbrauch von ca. 1,8 kWh/d (Abb. 4-49). Im Jahr 2012 gab es einige Phasen, in denen an einzelnen Tagen höhere Verbräuche bis 5 kWh/d auftraten. Im März 2013 war die Anlage nach einem elektrischen Defekt einer Pumpe für zwei Wochen außer Betrieb.

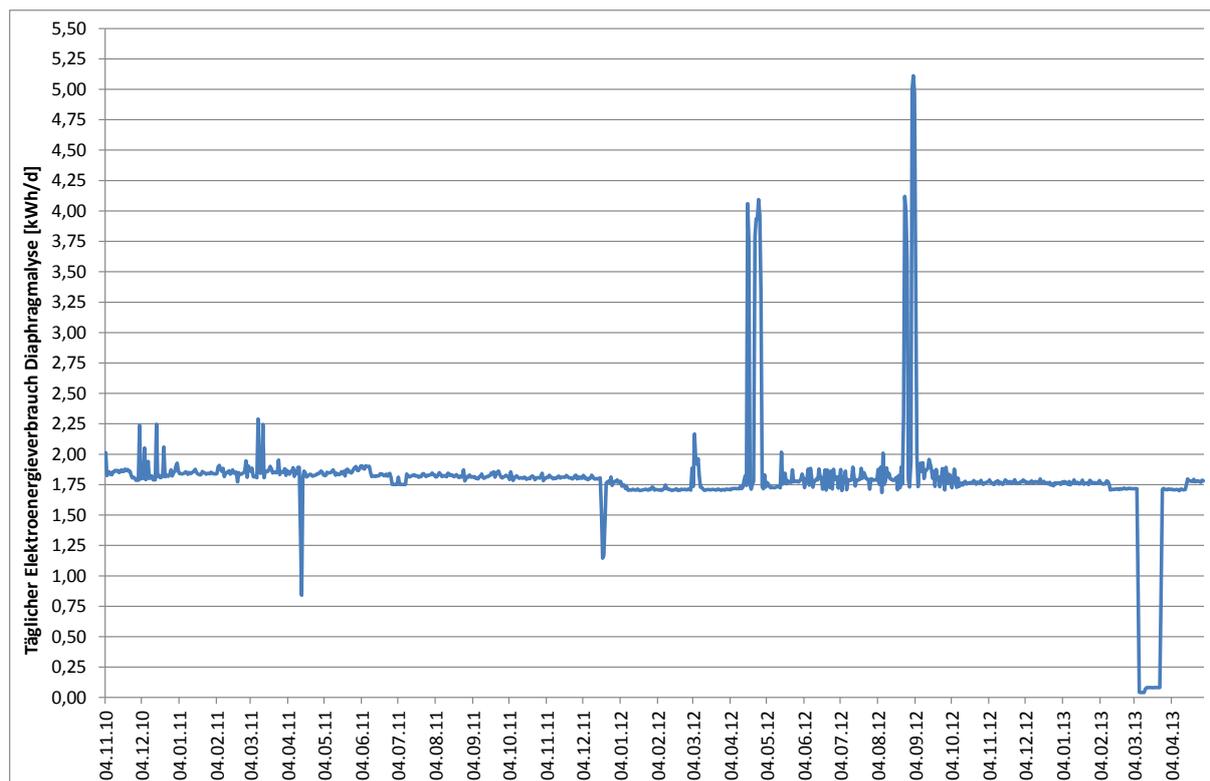


Abb. 4-49: Täglicher Elektroenergieverbrauch Diaphragmalyse im Messzeitraum

Energiebilanz der Diaphragmalyse

Dem Stromverbrauch der Diaphragmalyse steht neben den hygienischen Vorteilen, dass der gesamte Kalt- und Warmwasserstrang (inklusive z. B. Duschköpfen) keimfrei gehalten wird und nicht nur der Teil, den die Trinkwasserverordnung betrachtet, auch eine Wärmeeinsparung durch geringere Verteilverluste und ein höherer solarer Deckungsgrad gegenüber. Durch die Reduktion der Warmwassertemperatur von 60 °C auf 48 °C vermindern sich in der PHPP-Bilanz die Verteilverluste für Warmwasser bei der Ausführung, wie in der Rotlintstraße mit 250 % Dämmung (bezogen auf die EnEV-Anforderungen) von 5,3 auf 4,2 kWh/(m²a), also um 1,1 kWh/(m²a) (Abb. 4-50). Aufgrund der Warmwassertemperatur von 51,8 °C, liegt die reale Einsparung bei 0,84 kWh/(m²a). Zusätzlich ergeben sich Verbesserungen beim solaren Deckungsgrad (siehe Abb. 4-20) von ca. 8 %, was einer Einsparung bei der Warmwassernacherwärmung von 1,05 kWh/(m²a) entspricht (bei 48 °C Warmwassertemperatur: 1,5 kWh/(m²a)). Bei einer Wärmeerzeugung aus Erdgas ergibt sich somit eine Primärenergieeinsparung von 2,2 kWh/(m²a). Bewertet man den Stromverbrauch der Diaphragmalyse

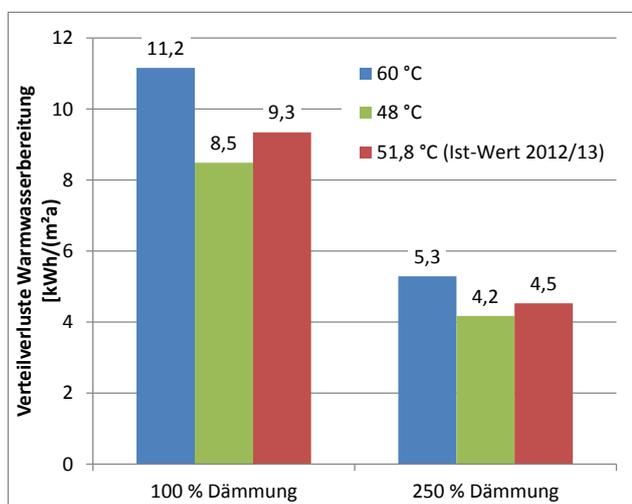


Abb. 4-50: Auswirkungen unterschiedlicher Warmwassertemperaturen auf die Verteilverluste bei Warmwasser bei unterschiedlicher Leitungsdämmung

se mit dem Standardwert des PHPP von 2,7, so entsteht dadurch ein Primärenergieverbrauch von 0,47 kWh/(m²a). Somit wird fast fünf Mal so viel Primärenergie eingespart, wie für Hilfsenergie aufgewendet werden muss. Wird der Hilfsstrom primärenergetisch günstiger bewertet (Verwendung von Öko-Strom oder Eigenerzeugung), so schneidet die Diaphragmalyse noch deutlich besser ab. Das gilt auch dann, wenn die Rohrleitungen nur mit den Mindestanforderungen der EnEV gedämmt werden (100 %). Dann liegt die Gesamteinsparung bei 3,5 kWh_{PE}/(m²a) bei 51,8 °C bzw. 5,1 kWh_{PE}/(m²a) bei 48 °C.

Chemische Analyseergebnisse

Die Diaphragmalyse wird zweimal im Jahr vom Hersteller gewartet, zusätzlich verfügt sie über eine Fernüberwachung, die im Fehlerfall eine Störungsmeldung absetzt. Das Trinkwasser in der Rotlintstraße wird regelmäßig an mehreren Stellen in unterschiedlichen Gebäuden entnommen und auf Legionellen, weitere Keime sowie freies und gebundenes Chlor untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchung vom 25.02. 2011 sind in Tab. 4-21 (Kaltwasser) und Tab. 4-22 (Warmwasser) dargestellt.

Tab. 4-21: Ergebnisse der Trinkwasseruntersuchung vom 25.02.2011 - Kaltwasser [CAL 2011]

	freies Chlor	gebundenes Chlor	Escherichia coli	Coliforme Keime	Koloniezahl bei 20 °C	Koloniezahl bei 36 °C	Pseudomonas aeruginosa
Grenzwert	0,3		0	0	100	100	0
Hauseinspeisung von Wasserbehandlung (vor Diaphragmalyse)	0,08	< 0,05	0	0	0	0	0
Semizentrale nach KW Aufbereitung	< 0,05	< 0,05	0	0	0	1	0
DG Wohnung 1. BA, Bad	0,05	< 0,05	0	0	0	2	0
DG Wohnung 2. BA, Küche	0,09	0,1	0	0	0	1	0

Tab. 4-22: Ergebnisse der Trinkwasseruntersuchung vom 25.02.2011 - Warmwasser [CAL 2011]

	freies Chlor	gebundenes Chlor	Beurteilungswert Legionellen
Grenzwert	0,3		
Semizentrale Abgang WW-Speicher	0,05	0,06	0
DG Wohnung 1. BA, Bad, Waschtisch	0,08	< 0,05	nicht untersucht
DG Wohnung 1. BA, Bad, Dusche	nicht untersucht	nicht untersucht	0
EG Wohnung 1. BA, Dusche	nicht untersucht	nicht untersucht	0
DG Wohnung 2. BA, Dusche	nicht untersucht	nicht untersucht	0

Die Messwerte für freies Chlor liegen sowohl beim Kalt- wie auch beim Warmwasser alle weit unterhalb des Grenzwertes, teilweise unterhalb der Nachweisgrenze. Gleiches gilt für gebundenes Chlor.

Der Chlorgehalt im Trinkwasserzulauf vom Versorger (vor der Wasserbehandlung) weist überwiegend gleiche oder höhere Werte auf als die Zapfstellen in den Wohnungen. Bei den Legionellenuntersuchungen konnten in keiner der Proben Kolonien bildende Einheiten (KbE) gefunden werden und auch bei den übrigen untersuchten Keimen wurden keine oder nur extrem geringe Anzahlen von Kolonien bildenden Einheiten gefunden werden. Keine der Wasserproben war zu beanstanden. Die Diaphragmalyse war zum Beprobungszeitpunkt ein halbes Jahr in Betrieb, die Warmwassertemperatur lag im ersten Bauabschnitt im Mittel dieser Zeit bei ca. 53 °C (im Sommer übersteigt die WW-Temperatur teilweise die Solltemperatur durch die solare Erwärmung). Somit war zu diesem Zeitpunkt eine gute Wasserqualität sicher gestellt.

4.6 Elektrischer Gesamtenergieverbrauch

Zusammen mit dem Hilfsstrombedarf war in der Planungsphase ein Gesamtverbrauch an elektrischer Energie von 28,2 kWh/(m²a) vorausgerechnet worden. Der Gesamtstromverbrauch der Gebäude Rotlintstraße 116-128 lag mit 30,1 kWh/(m²a) um 1,9 kWh/(m²a) über den Planwerten. Der gemessene Haushaltsstromverbrauch lag im Jahr 2012 mit 24,9 kWh/(m²a) um 2 kWh/(m²a) über den Planwerten (Abb. 4-51). Durch den geringeren Lüftungsstromanteil der Wohnungen wurden die Planwerte für Hilfs- und Allgemeinstrom leicht unterschritten. Wird in der Wohnung des ersten Bauabschnitts mit extrem hohem Elektroenergieverbrauch der Mittelwert der anderen Wohnungen berücksichtigt, so liegen die Verbrauchswerte der Gesamtanlage nur 0,6 kWh/(m²a) über den Planwerten.

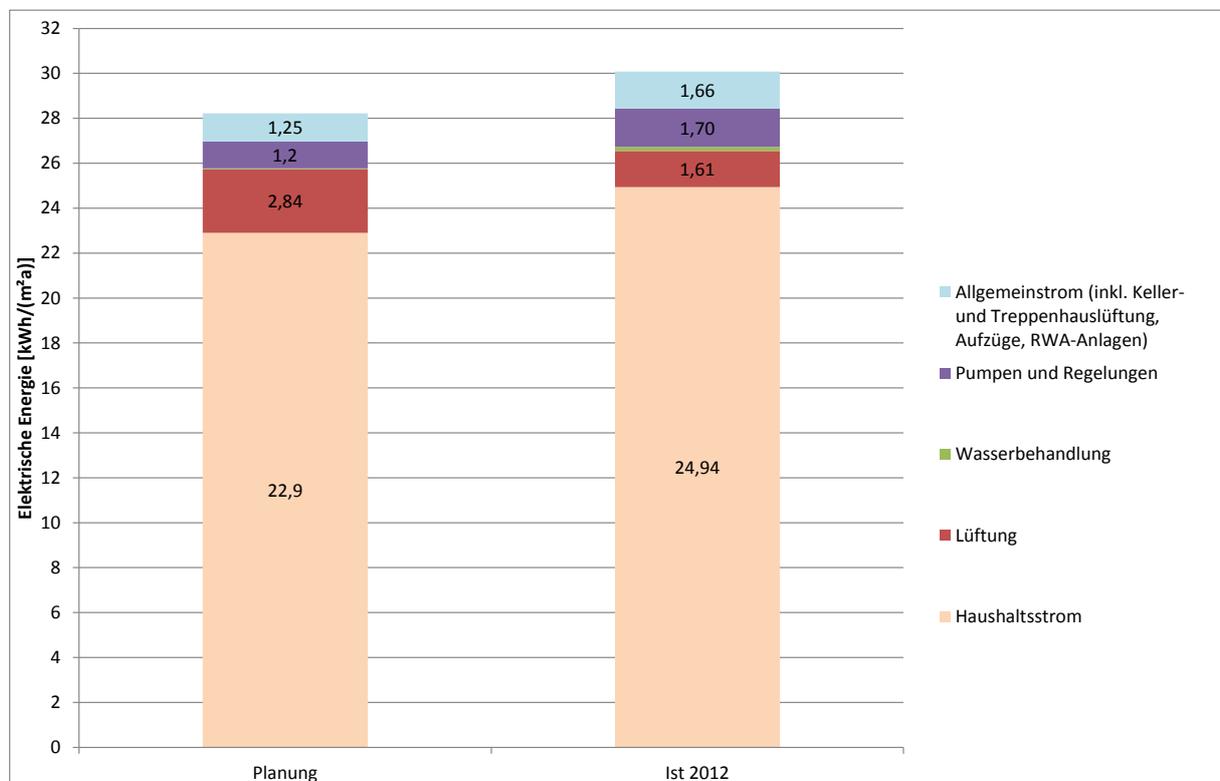


Abb. 4-51: Vergleich der Planwerte für elektrische Energie mit den Messwerten 2012

Abb. 4-52 zeigt exemplarisch den Jahrgang 2012 des mittleren Gesamtstromverbrauches pro Tag inklusive Allgemein- und Hilfsstrom (rote Säule), den monatlichen mittleren Stromverbrauch je Haushalt sowie die mittlere Leistung je Haushalt. Es ergibt sich ein Jahrgang mit höchsten Werten im November (5,67 kWh/(d*WE)) und niedrigsten Werten im Juli (4,21 kWh/(d*WE)). Die Dynamik zwischen minimalem und maximalem Monatswert beträgt 35 %, bezogen auf den niedrigsten Wert. Zusätzlich zeigt das Diagramm noch die mittlere Leistung pro Haushalt und den Jahrgang des Haushaltsstromverbrauches.

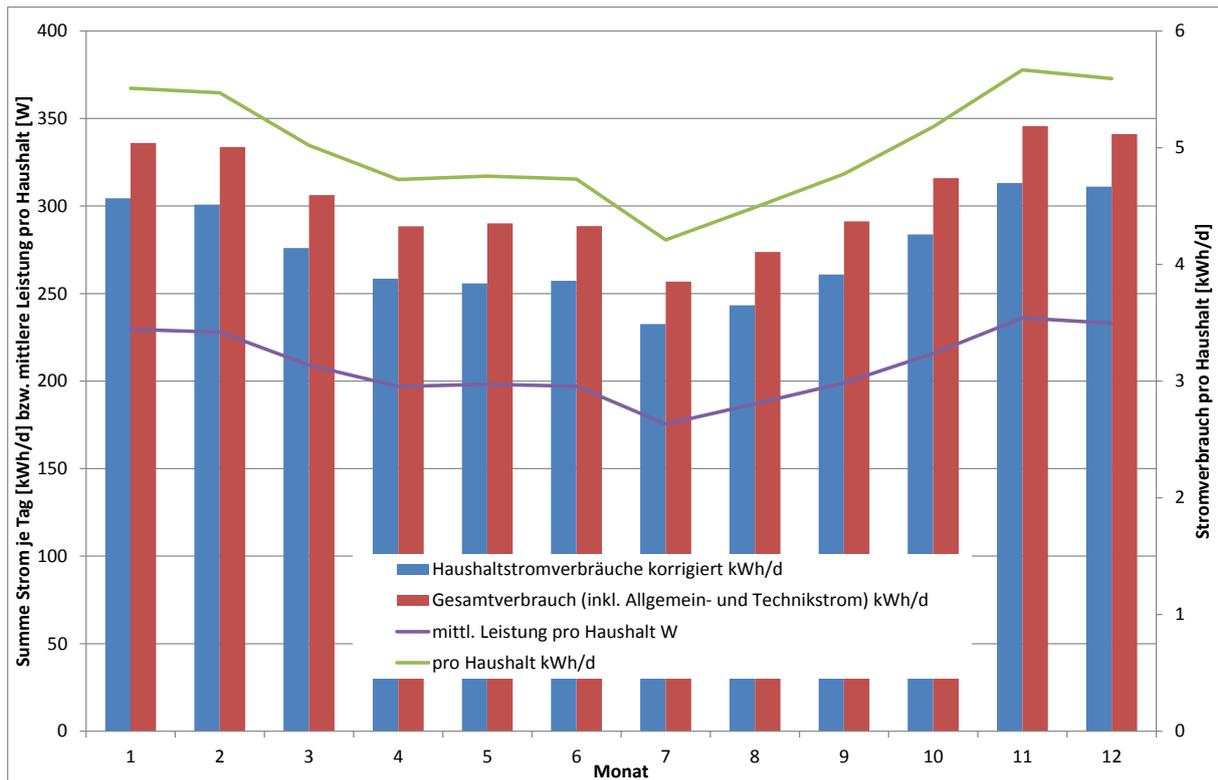


Abb. 4-52: Mittlerer absoluter Gesamtverbrauch Elektroenergie (inkl. Allgemein- und Technikstrom) pro Tag [kWh/d], Stromverbrauch je Haushalt [kWh/(WE*d)] (korrigiert um die Wohnung mit dem Spitzenverbrauch) sowie mittlere Leistung pro Haushalt [W] im Jahresverlauf 2012

4.7 Betriebserfahrungen Anlagentechnik

In diesem Kapitel werden Betriebserfahrungen aus der Messphase sowie aufgetretene Störungen und Fehlverhalten der Regelung dokumentiert und umgesetzte sowie mögliche Verbesserung vorgestellt. Ziel ist es, die Erfahrung für zukünftige Projekte verfügbar zu machen, da im Wohnungsbau Überwachungs- und Monitoringfunktionen, die in Nichtwohngebäuden häufiger z. B. über eine Gebäudeleittechnik vorhanden sind, aus Kostengründen selten eingesetzt werden. Für einen effizienten und störungsfreien Anlagenbetrieb ist es aber sehr wichtig, mögliche Schwachstellen der Anlagentechnik zu kennen. Es werden auch Betriebserfahrungen aufgeführt, die bereits in vorherigen Kapiteln diskutiert wurden.

4.7.1 Anlagenbetrieb

Blockheizkraftwerk

Wie in Kapitel 4.1.1 detailliert beschrieben, gab es zahlreiche Probleme bei der Inbetriebnahme und dem störungsfreien Betrieb des Blockheizkraftwerks. Als Gründe sind hier einerseits der lange Zeitraum zwischen Lieferung der Anlage auf die Baustelle und Inbetriebnahme des BHKWs zu nennen, andererseits traten eine Reihe von Betriebsstörungen auf, die nicht direkt mit Brennstoff Rapsöl in Verbindung stehen (Ausfall von Schaltern, Schützen, Undichtigkeiten im Kühlwasserkreislauf), außerdem musste die Befestigung des Abgaskamins an der Fassadenkonstruktion verändert werden, um die Schallemissionen zu reduzieren. Die Rußemissionen, die nach Untersuchungen eines Sachverständigen hauptsächlich in der Startphase des kalten Motors auftraten, stehen in direktem Zusammenhang mit dem verwendeten Rapsöl bzw. dessen Verbrennung. Warum die Rußprobleme erst nach ca. einem halben Betriebsjahr auftraten, konnte nicht geklärt werden.

Im Betrieb zeigte sich zusätzlich, dass das Abgasrohr von BHKW zum Schornsteinanschluss nachträglich gedämmt werden musste, da die Temperatur im Heizhaus durch die Abstrahlung des über 100 °C heißen Rohres zu weit anstieg.

Hydraulik

Bei der Messdatenauswertung wurde festgestellt, dass die Gastherme heißes Wasser durch den BHKW-Kreis drückt und dieser bei abgeschaltetem BHKW als „Kühler“ wirkte. Bei einem Ortstermin wurde festgestellt, dass die vorgesehenen Rückschlagklappen nicht montiert waren. Sie wurden im Januar 2011 nachgerüstet.

Die Gastherme speist auf der gleichen Ebene in den Pufferspeicher ein, wie das BHKW und auch die Rückläufe sind parallel angeschlossen. Dies bedeutet, dass die Therme den gesamten Pufferspeicher erwärmt, obwohl sie aufgrund ihrer thermischen Leistung von 100 kW keinen Pufferspeicher benötigt. Das führte besonders in Zeiten, in denen die Gastherme die Gesamtversorgung übernommen hat, zu zusätzlichen Wärmeverlusten im Heizhaus. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass der Volumenstrom der Gastherme auf die Nennleistung von 100 kW ausgelegt ist (ca. 2,6 m³/h), sie im Teillastbetrieb diesen aber nicht reduziert, sondern nur taktet. Der hohe Volumenstrom führt aber zu einer starken Durchmischung des Pufferspeichers. Dies kann einerseits die nutzbare Vorlauftemperatur reduzieren, andererseits dem BHKW im Rücklauf ggf. eine höhere Temperatur zuführen. Würde die Therme nur den oberen Teil des Puffers erwärmen, könnten die Speicherverluste deutlich reduziert werden und die Durchmischung des Pufferspeichers würde vermindert.

Ausfall von Pumpen im Solarkreis

Im Laufe der Messphase von ca. 3 Jahren sind zwei Solarpumpen bzw. Umschichtpumpen ausgefallen. Ein solcher Defekt wird von den Nutzern normalerweise nicht bemerkt, da die Warmwasser-nacherwärmung dann die fehlende Solarwärme ersetzt. Aus diesem Grund ist es besonders in Bereichen, in denen die regenerativen Energieerzeuger durch ein konventionelles Backup-System unterstützt werden, wichtig, dass die Anlage grundlegende Selbstüberwachungs- und Benachrichtigungs-

funktionen besitzt, damit Probleme beim regenerativen Energieerzeuger schnell erkannt und behoben werden können.

Hilfsenergie

Ein wichtiger Bereich ist auch die korrekte Einstellung und Funktion der Pumpen, da sie ganz wesentlich den Hilfsenergieverbrauch beeinflussen. So wurde versucht die zentrale Nahwärmepumpe stillzulegen, da die Pumpen in den Semizentralen den benötigten Volumenstrom aufgrund fehlender Höhendifferenzen zwischen Heiz- und Semizentralen auch ansaugen können (die Nahwärmepumpe wurde demontiert). Leider zeigte sich in einer Dachgeschosswohnung im dritten Bauabschnitt (sechs Geschosse), dass dann aufgrund der intermittierenden Nutzung dieser Wohnung nicht mehr ausreichend Wärme für die Zuluftnachheizung vorhanden war, so dass die Veränderungen wieder rückgängig gemacht wurden.

Auch beim Hilfsstromverbrauch in den Semizentralen ergaben sich größere Abweichungen zwischen den Bauabschnitten. Der Hilfsenergieverbrauch im ersten Bauabschnitt liegt mehr als doppelt so hoch wie im dritten Bauabschnitt. Mit Ausnahme der Zirkulationspumpe (siehe unten) waren alle Pumpen gleich voreingestellt. Die genauen Gründe für diesen Mehrverbrauch konnten nicht gefunden werden.

Allgemeinstrom

Die Auswertung der Messdaten ergab einen nicht erklärbaren Mehrverbrauch beim Allgemeinstrom im Haus 118, der teilweise über demjenigen im zweiten und dritten Bauabschnitt lag, obwohl in Nr. 118 weniger Stockwerke und kein Aufzug vorhanden sind. Der Mehrverbrauch liegt im Mittel bei ca. 50 W und tritt hauptsächlich nachts auf, was jährlich zu 440 kWh zusätzlichem Stromverbrauch führt. Mögliche Ursache ist ein defektes Zeitrelais im Treppenhaus, das die Treppenhausbeleuchtung erst verspätet oder kaum abschaltet, da bei Terminen vor Ort die Beleuchtung in diesem Treppenhaus sehr häufig in Betrieb war.

Lüftungsanlagen

Die Wartung der Lüftungsanlagen (Filteraustausch, Umschaltung von Winter auf Sommerbetrieb, Reinigung der Anlage und der Ventile) wird im Rahmen eines Wartungsvertrages zweimal im Jahr durchgeführt. Dabei sollte eine Wartung direkt vor der Heizperiode durchgeführt werden (Ende September bzw. Anfang Oktober). Wird die Umstellung zu spät vorgenommen, steigt der Heizwärmeverbrauch, da die Anlagen dann ohne Wärmerückgewinnung betrieben werden. Außerdem können verschmutzte Filter zu einer Disbalance der Lüftungsanlage und somit zu einer Reduktion der Rückwärmzahl führen. In der Rotlintstraße ist dieser Fall mehrfach aufgetreten, da die Wartungsfirma die Termine für den Filteraustausch und die Sommer-Winter-Umschaltung erst im November vereinbart hat und dabei auch einige Mieter nicht erreicht hat. Die energetischen Auswirkungen dieses verspäteten Wartungstermins ist in Kapitel 3.3.1 diskutiert.

Es sollte zukünftig überlegt werden, ob die Lüftungsanlage nicht ganzjährig mit Wärmerückgewinnung betrieben werden sollte, wenn keine automatische Umschaltung möglich ist, um diesen Mehr-

verbrauch zu verhindern. Mögliche Probleme mit Überhitzung im Sommer könnten minimiert werden, wenn die Lüftungsanlage im Sommer in kleinster Stufe betrieben wird, was zur Reduktion des Stromverbrauchs ohnehin sinnvoll ist. Bei hohen Außentemperaturen bringt die sommerliche Wärmerückgewinnung wieder Vorteile für den Raumkomfort, da hohe Temperaturspitzen gekappt werden.

Lüftungsanlagen erhöhen den Komfort der Mieter und sie können über ihre Filter Verunreinigungen der Außenluft zurück halten. Gerade für Allergiker können sich durch Lüftungsanlagen zusätzliche Vorteile ergeben, wenn anstelle der normalen Zuluftfilter der Klasse F7 noch bessere Filter eingesetzt werden. Da diese die Druckverluste und somit den Stromverbrauch erhöhen, sollten sie jedoch nicht generell verwendet werden, sondern nur bei Bedarf. Hier stellt sich bei dezentralen Anlagen, wie in der Rotlintstraße die Frage, ob die Beschaffung solcher Filter und deren Einbau durch die Mieter möglich sind? Außerdem muss je nach Anlagentyp auch die Luftbalance neu eingestellt werden. Mit dieser Option könnte aber die Attraktivität von Passivhauswohnungen weiter gesteigert werden; die zusätzlichen Kosten sind entsprechende Mieter aber gegebenenfalls gerne bereit zu tragen.

4.7.2 Regelungstechnik

Heizungsregelung

Zu Beginn der Wärmeversorgung aus dem Heizhaus war aus den Messdaten zu erkennen, dass die Umwälzpumpe der Gastherme mit konstantem Volumenstrom betrieben wurde, auch wenn die Therme keine Wärme lieferte (Abb. 4-53). Um dieses Problem zu beheben wurde die Kommunikation zwischen Zentralregelung und Therme so erweitert, dass sie eine Solltemperatur vorgegeben bekommt und die Umwälzpumpe abschaltet, wenn sie keine Wärme mehr liefern soll. Dadurch wird die Zwangsdurchmischung des Pufferspeichers vermindert und die Effizienz der Anlage verbessert.

Die geplante Sommerabschaltung der Heizkreise funktionierte nicht wie geplant: im ersten Messjahr war sie noch nicht umgesetzt, was zu einem Sommerverbrauch bei der Heizwärme von über 5 kWh/(m²a) führte, teilweise wurde sie von Hand übersteuert, da sie mit anderen manuellen Funktionen der Regelung kombiniert war. Dieser Sommerverbrauch konnte zwar im zweiten Messjahr auf ca. 1 kWh/(m²a) reduziert werden (siehe Kapitel 4.3.4), intelligente Regelungen, die z. B. im Frühjahr bei hohen Temperaturen im April die Sommerabschaltung aktivieren, wären aber denkbar und könnten den Heizenergieverbrauch weiter senken.

Warmwasserbereitung

Die ursprünglich geplante Funktion der Abschaltung des Nahwärmenetzes, wenn im Sommer die Heizkreise abgeschaltet sind und die Warmwasserspeicher keine Wärme anfordern, wurde nicht umgesetzt, was die Nahwärmeverluste im Sommer deutlich vergrößerte. Grundsätzlich sollte bei Unterstationen oder entfernten Wärmeabnahmen eine Statusinformation über einen bestehenden Wärmebedarf übermittelt werden, damit die Zentrale nicht ausschließlich durch eine Veränderung der Temperaturspreizung im Netz den Wärmebedarf registrieren kann. Dann ist eine Netzabschaltung einfach zu realisieren.

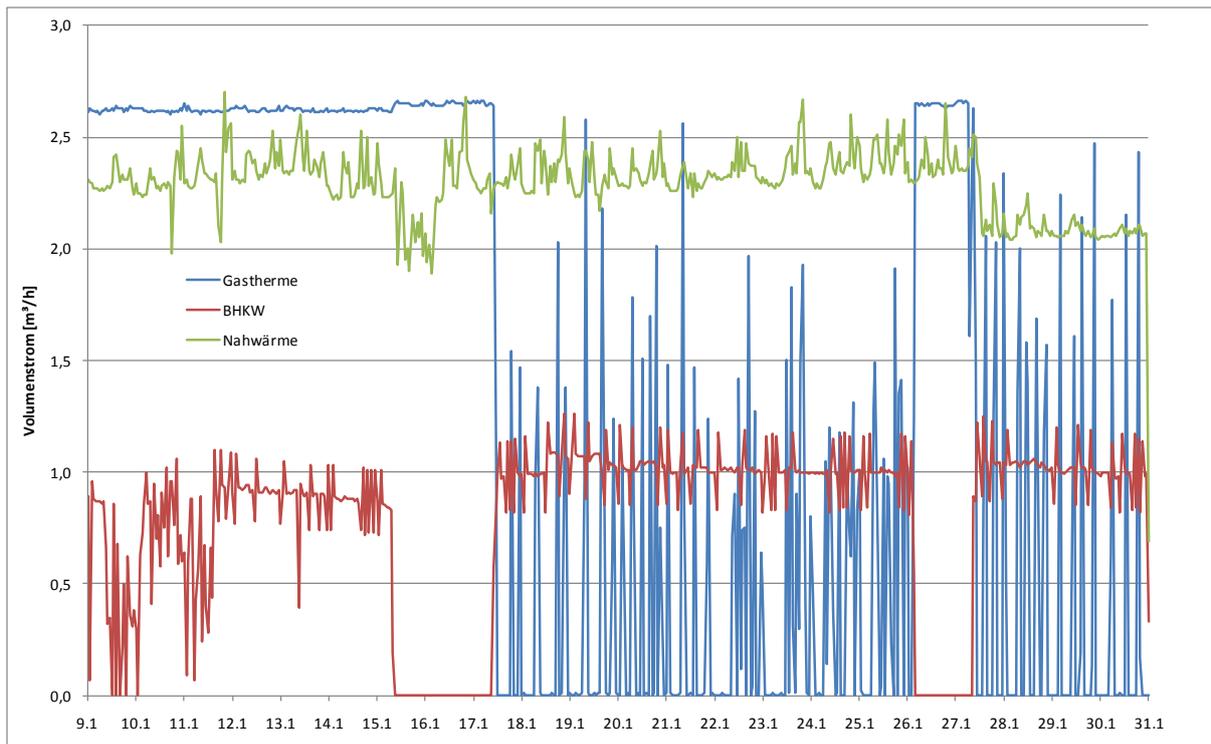


Abb. 4-53: Volumenströme im Heizhaus im Januar 2011: am 17.01. wurde die Ansteuerung der Therme, wie oben beschrieben, geändert und man erkennt, dass in der Folge der Volumenstrom im Thermenkreis nur noch dann vorhanden ist, wenn die Therme in Betrieb ist.

Temperaturspreizung Zirkulation

Die Detailauswertung der Messdaten der Zentralregelung ergab, dass einerseits die Temperaturspreizung zwischen Warmwasser(vorlauf) und Zirkulation(srücklauf) im ersten Bauabschnitt nur ca. 0,5 K bis 1 K betrug, in den beiden anderen Bauabschnitten aber 4 K bis 5 K. Gleichzeitig wurde im ersten Bauabschnitt in sehr kurzen Abständen der Bereitschaftsspeicher aus dem Nahwärmenetz nacherwärmt. Da die Regelung der Warmwasserbereitung keine Hysterese besitzt, ist verständlich, dass die Nachheizung in sehr kurzen Abständen (wie in Abb. 4-54 dargestellt) in Betrieb war. Ein Vergleich mit den Zirkulationspumpen der anderen Bauabschnitte zeigte, dass dort die Einstellung Stufe 3 war, im ersten Bauabschnitt aber auf Stufe 5 (Maximum) eingestellt war. Am 04.03.2013 wurde die Zirkulationspumpe von Stufe 5 auf Stufe 3 reduziert. Die Auswirkungen sind in Abb. 4-54 direkt zu sehen. Die Temperaturspreizung vergrößerte sich gegen 11:00 Uhr von 1 K auf 4 K und die Nachladeintervalle wurden seltener (am Nachmittag konnte die thermische Solaranlage die Warmwassernacherwärmung übernehmen).

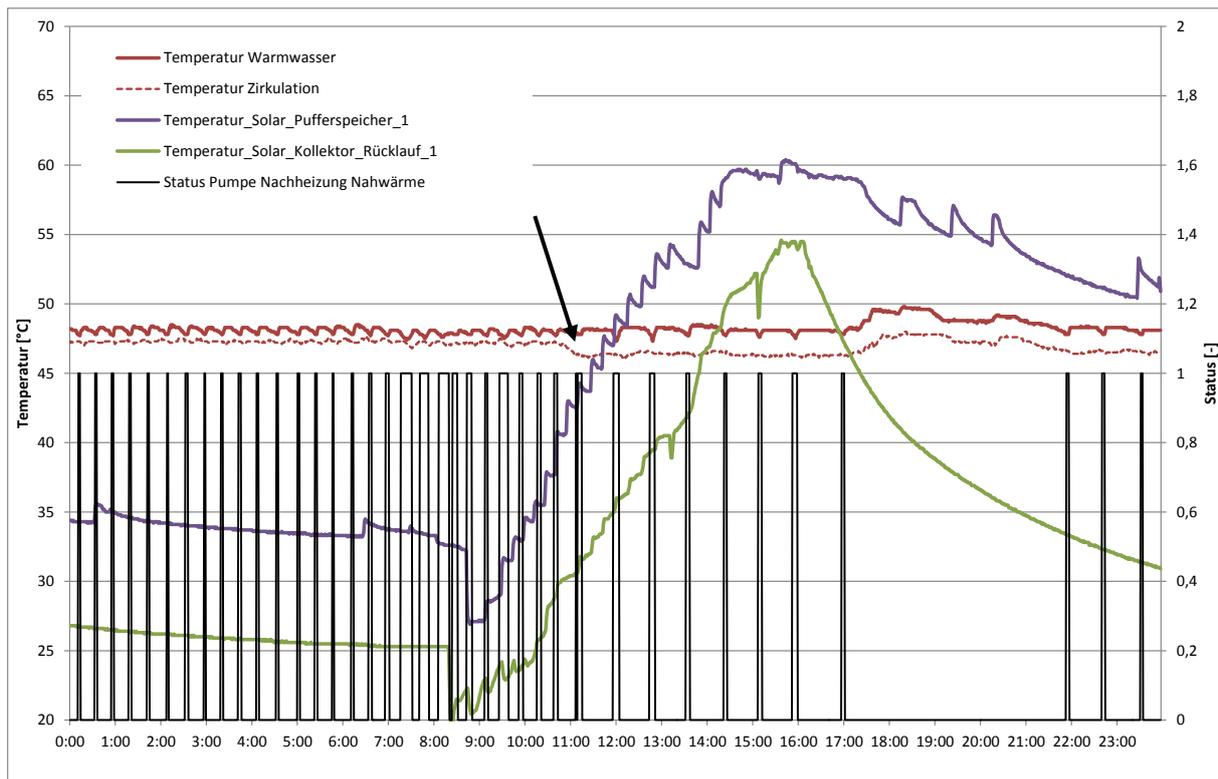


Abb. 4-54: Temperaturen im Warmwasserkreis des ersten Bauabschnitts sowie Betriebszeit der Warmwasser-Nachheizung am 04.03.2013, an dem die Zirkulationspumpe von maximalem Fördervolumen auf die Einstellung der beiden anderen Bauabschnitte reduziert wurde

Mögliche Auslöser für die hohe Einstellung der Zirkulationspumpe im ersten Bauabschnitt könnten Probleme mit der Warmwassernacherwärmung/Warmwassertemperatur gewesen sein, wie sie im Folgenden beschrieben werden. Durch den erhöhten Zirkulationsvolumenstrom wurde das Problem nicht behoben, die Einstellung blieb aber bestehen.

Solaranlagen

Bei den thermischen Solaranlagen sind mehrere Fehler in der Regelung beobachtet worden, was umso erstaunlicher ist, da es sich hier um eine häufiger eingesetzte „Standard“-Regelung des Herstellers handelte.

Eine Ursache für den geringen solaren Deckungsgrad im ersten Bauabschnitt im Jahr 2011 lag u. a. an einem Fehler der Solarregelung, der sich in den Messdaten zeigte. In unregelmäßigen Abständen war die Umwälzpumpe des Solarkreises auch nachts in Betrieb, was zu einer Auskühlung des Solarspeichers führte (siehe Abb. 4-55). Kleinere Kriechströme im Bereich von wenigen Litern traten seit Mai auf, ab Mitte Mai 2011 schaltete die Solarregelung teilweise die gesamte Nacht die Solarpumpe auf maximalen Volumenstrom. Seit Anfang September 2011 war das Problem behoben. Auffällig ist weiterhin, dass der Volumenstrom im Solarkreis im ersten Bauabschnitt mit Maximalwerten von ca. 670 Liter/h deutlich höher liegt, als beim zweiten und dritten (hier nicht dargestellten) Bauabschnitt, deren Volumenstrom bei maximal 540 Liter/h liegt. Ein zu hoher Volumenstrom erhöht zumindest den Hilfsstromverbrauch, kann aber auch die nutzbare Temperaturdifferenz im Solarkreis reduzieren. Bei einer Auswertung der Wärmeeinspeisung des Solarkreislaufs wären diese Fehler nicht erkannt

worden, da Wärmemengenzähler üblicherweise nicht rückwärts zählen. Erst durch die Auswertung der Volumina konnte der reduzierte solare Deckungsgrad in dieser Zeit erklärt werden.

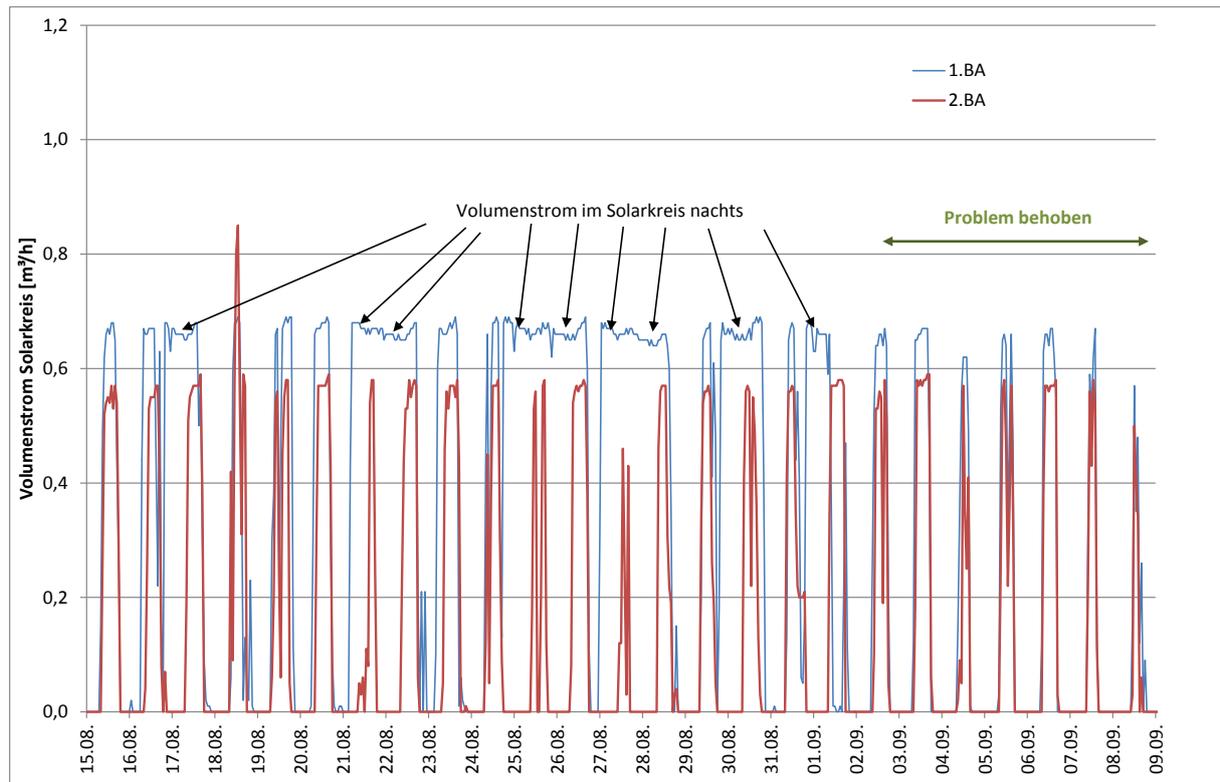


Abb. 4-55: Volumenströme im Solarkreis des ersten und zweiten Bauabschnitts im August 2011 mit nächtlichem Betrieb der Umwälzpumpe Solar im ersten Bauabschnitt

Ein weiteres Problem, das im Zusammenhang mit der Solarregelung aufgetreten ist, sind die Temperatureinbrüche durch Umschichtung aus dem kaltem Zwischenspeicher in den warmen Bereitschaftsspeicher, wie in Kapitel 4.4 bereits ausführlich beschrieben. Hier schaltete eine Fehlfunktion der Regelung im dritten Bauabschnitt regelmäßig zur gleichen Uhrzeit, im ersten Bauabschnitt unregelmäßig, die Umschichtung ein, was zu einem Temperatureinbruch im Bereitschaftsspeicher führte, da das warme Wasser mit Wasser etwa auf Raumtemperatur gemischt wurde. Dieses Problem führte zu einer deutlichen Erhöhung des Nachheizaufwandes bei der Warmwasserbereitung.

Manueller Betrieb

Grundsätzlich stellt sich die Frage, inwieweit die Funktionen für Handbetrieb der Anlagenregelung bei Heizung und Warmwasser entkoppelt werden können, damit nicht zur Überbrückung eines Problems in einem Bereich, auch der andere sich im Dauerbetrieb befindet (mit zum Teil sehr hohen Temperaturen). Außerdem sollte eine klare Information (Anzeige/Leuchte) signalisieren, dass die Anlage nicht im Normalmodus fährt, damit sie möglichst schnell wieder auf Automatik geschaltet wird.

5 Vergleich der Energiebilanzen

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Elemente der Energiebilanz der Gebäude einem Vergleich von Planwerten und von angepassten PHPP-Bilanzen mit den Messdaten unterzogen.

5.1 Nutz- und Endenergie

Im Heizhaus muss die Wärmemenge bereitgestellt werden, die für die Beheizung, die Warmwasserbereitung und die Deckung der Verteil- und Speicherverluste erforderlich ist. Somit ergeben sich für den Wärmebedarf bzw. -verbrauch mehrere Einzelkomponenten. Sie sind in der Summe gleich groß, wie die Wärmeerzeugung, die sich aus den drei Wärmeerzeugern thermische Solaranlage, Rapsöl-BHKW und Erdgas-Therme zusammensetzt. Da der für das Null-Emissions-Ziel definierte Bilanzumfang die Bereiche Wärme und Hilfsenergie umfasst, muss der Hilfsstrombedarf bzw. -verbrauch (Endenergie) ebenfalls in der Bilanz berücksichtigt werden.

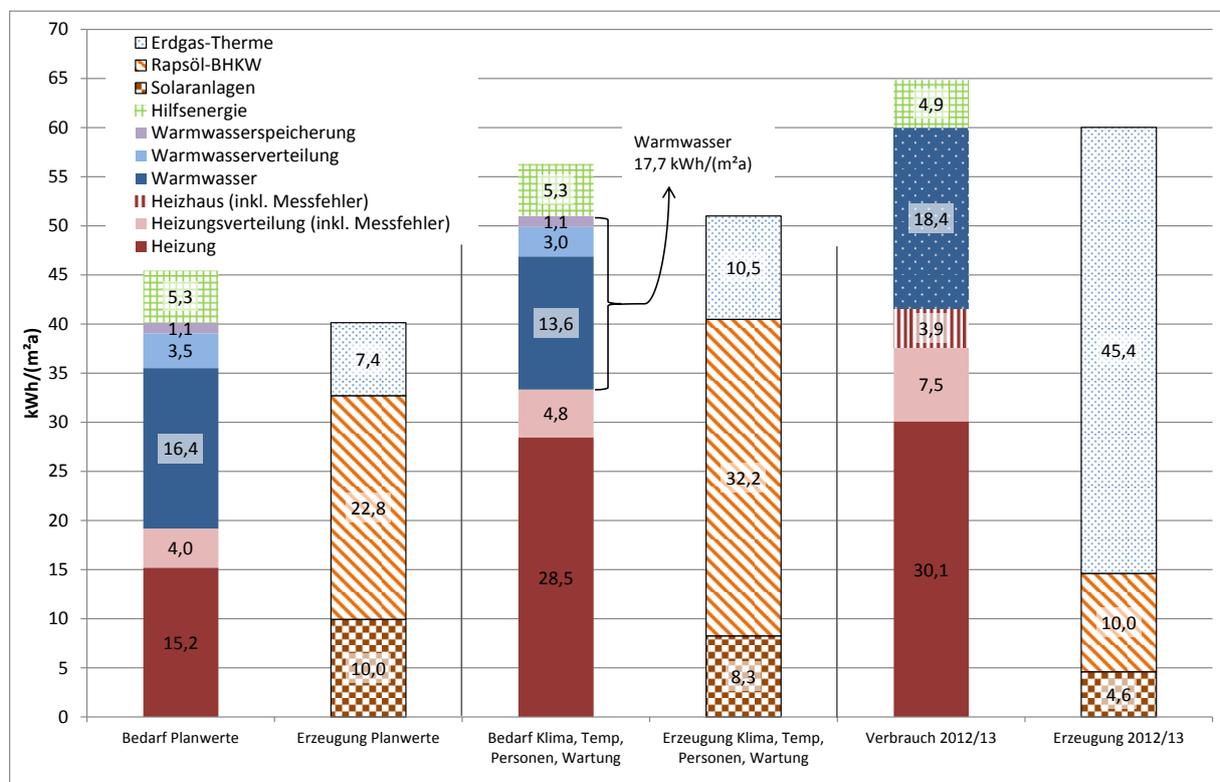


Abb. 5-1: Energiebilanz Rotlintstraße: Planwerte, an die Nutzung angepasste PHPP-Werte sowie Messwerte 2012/13

Abb. 5-1 zeigt drei solcher Gebäudebilanzen (ohne Haushaltsstrom). Die linken beiden Stapelsäulen zeigen die Bilanz von Bedarf und Erzeugung auf Basis der PHPP-Berechnungen mit Standardrandbedingungen. Der Wärmebedarf lag auf Basis der Planwerte bei 40,1 kWh/(m²a), zuzüglich 5,3 kWh/(m²a) für Hilfsenergie (inklusive Lüftungsanlagen). Wichtigste Bestandteile sind der Heizwärmebedarf (15,2 kWh/(m²a)), der Warmwasserbedarf (16,4 kWh/(m²a)) sowie die Verluste für Heizungsverteilung (4 kWh/(m²a)) und Warmwasserverteilung (3,5 kWh/(m²a)). Trotz der umfangreichen Maßnahmen zur Reduktion der Verteilverluste sind diese aufgrund der Größe der Gesamtanlage für ca. ein Fünftel des Gesamtwärmebedarfs verantwortlich. Dem steht eine Wärmeerzeugung in

gleicher Größe gegenüber, bestehend aus 10 kWh/(m²a) aus den thermischen Solaranlagen, 22,8 kWh/(m²a) vom Rapsöl-BHKW und 7,4 kWh/(m²a) von der Erdgasterme.

Im Messjahr 2012/13 wichen die Randbedingungen aber auf unterschiedliche Art von den Standardwerten des PHPP ab. Aus diesem Grund wurde bei der dritten und vierten Säule das tatsächliche Außenklima, die gemessenen Raumtemperaturen, die Personenbelegung und die verspätete Lüftungswartung in der PHPP-Bilanz berücksichtigt. Im Ergebnis stiegen vor allem der Heizwärmebedarf, aber auch die Verteilverluste der Heizung, da sich die Heizperiode verlängerte. Der Energiebedarf für Warmwasser nahm aufgrund der geringeren Personenbelegungsdichte ab, der Hilfsenergieeinsatz ist nahezu unverändert. Somit ergibt sich in der Summe ein Wärmebedarf von 51,0 kWh/(m²a), dem eine verringerte Solarwärmeerzeugung (geringerer Warmwasserbedarf) und eine deutlich gestiegene Wärmeerzeugung aus dem BHKW sowie leicht gestiegene Erzeugung aus der Erdgas-Therme gegenüber steht. Im Rahmen der PHPP-Bilanz kann die Frage, ob das BHKW aufgrund seiner Dimensionierung diese Wärmemenge überhaupt bereits stellen kann, nicht direkt untersucht werden.

Die letzten beiden Säulen in Abb. 5-1 zeigen die gemessene Bilanz des Jahres 2012/13. Der gemessene Heizwärmeverbrauch lag um 1,6 kWh/(m²a) oder 5 % über dem angepassten Bedarfswert, was aufgrund der in Kapitel 3.3.1 diskutierten zusätzlichen Einflüsse der Verschattung und der Fensterlüftung eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse darstellt. In [PHI 2011] wird abgeschätzt, dass es mit dem PHPP möglich ist den Heizwärmebedarf eines Gebäudes mit ± 3 kWh/(m²a) Genauigkeit vorauszuberechnen. Hier sind auch die zur Beheizung nutzbaren Verteilverluste mit zu berücksichtigen, die in der Darstellung als separate Position dargestellt sind. Die Verteilverluste für Heizung inklusive Nahwärmenetz liegen deutlich über den Bedarfswerten (an dieser Stelle wurde keine Aufteilung der Verluste des Nahwärmenetzes auf die Bereiche Heizung und Warmwasserbereitung vorgenommen). Etwa die Hälfte verursacht das Nahwärmenetz, da es ganzjährig auf Temperatur gehalten wird und nicht, wie geplant, im Sommer bei ausreichendem Solarenergieertrag abgeschaltet wurde. Außerdem wurden im zweiten Bauabschnitt ein Teil der Nahwärmeleitungen aus statischen Gründen nicht in der Kellerdeckendämmung verlegt (nur begrenzte Anzahl von Kernbohrungen in statisch tragenden Wänden möglich), so dass der Wärmeverlust je Meter Leitung etwa ein Drittel höher ausfiel und gleichzeitig die Leitungslänge vergrößert wurde. Die Verluste im Heizhaus wurden bei den Messwerten separat ausgewiesen, obwohl die Verluste des Pufferspeichers im Heizhaus bei den Bedarfswerten in den Verteilverlusten Heizung enthalten sind. Gründe für die zusätzlichen Verluste ist einerseits die Tatsache, dass aufgrund des durchgehenden Betriebs des Nahwärmenetzes und der ungünstigen Einbindung von Therme und BHKW (beide erwärmen den gesamten Speicher), das gesamte Speichervolumen ganzjährig auf Temperaturen von über 50 °C gehalten wird. Zusätzlich sind die Leitungslängen im Heizhaus länger ausgefallen als geplant und durch nachträgliche Änderungen und Reparaturen wurden Teile der Leitungen nicht wieder so gedämmt, wie ursprünglich ausgeführt (siehe Abb. 4-1).

Bei den Messwerten für Warmwasser kann nicht zwischen Nutzwärme und Verteil- und Zirkulationsverlusten unterschieden werden. Die Summe der Wärmeabgabe an das Warmwasser in den Semi-zentralen deckt sich mit 18,4 kWh/(m²a) vergleichsweise gut mit der Summe der Einzelpositionen bei den Bedarfswerten von 17,7 kWh/(m²a). Der Hilfsenergieeinsatz ist mit 4,9 kWh/(m²a) sogar etwas niedriger ausgefallen als im PHPP vorausberechnet. Hauptgrund dafür sind vor allem die niedrigeren Lüftungsstromverbräuche, da überwiegend sparsamere Modelle eingebaut werden konnten. Einige andere Bestandteile des Wertes für den Hilfsenergieverbrauch, wie z. B. der Stromverbrauch der

Anlagentechnik im ersten Bauabschnitt lagen dagegen etwas höher als ursprünglich vorausberechnet.

Bei der Wärmeerzeugung ergeben sich deutliche Verschiebungen gegenüber der mit dem PHPP prognostizierten Verteilung. Die thermischen Solaranlagen lieferten aufgrund der beschriebenen Regelungsprobleme nur etwa die Hälfte der geplanten Wärme (4,6 kWh/(m²a)). Durch die lange Abschaltung des BHKW erreicht dieses nur einen Beitrag von 10,0 kWh/(m²a) zur Wärmeversorgung der Gebäude und die Erdgas-Therme musste mit 45,4 kWh/(m²a) den größten Teil der Wärme bereitstellen. Somit wurden 75 % der benötigten Wärme aus Erdgas geliefert, nur 25 % aus regenerativen Quellen.

Tab. 5-1 zeigt die angepassten Bedarfswerte nach PHPP und die Verbrauchskennwerte 2012/13 sowohl auf die Energiebezugsfläche nach PHPP als auch auf die Fläche A_N der EnEV bezogen. Durch die im Vergleich zur Energiebezugsfläche nach PHPP (3787 m²) deutlich größere Bezugsfläche A_N der EnEV (5381 m²) liegen die Kennwerte nach EnEV mit gemessenen 42,2 kWh/(m² A_N*a) noch deutlich niedriger als bei PHPP-Bezug.

Tab. 5-1: Vergleich von PHPP-Bedarfswerten und Messwert 2012/13 bezogen auf die Energiebezugsfläche nach PHPP sowie auf die Fläche A_N der EnEV

		PHPP-Fläche		EnEV-Fläche	
		angepasster Bedarfswert	2012/13	angepasster Bedarfswert	2012/13
Wärmeverbrauch	Heizwärmeverbrauch	28,5	30,1	20,1	21,2
	Verluste Heizungsverteilung	4,8	7,5	3,4	5,3
	Verlust Heizhaus		3,9		2,8
	Warmwasserverbrauch (inkl. Verluste)	17,7	18,4	12,4	12,9
	Summe	51,0	60,0	35,9	42,2
Wärmeerzeugung	Solaranlagen	8,3	4,6	5,8	3,2
	Rapsöl-BHKW	32,2	10,0	22,7	7,1
	Erdgas-Therme	10,5	45,4	7,4	32,0

Insgesamt kann festgehalten werden, dass sich gegenüber den PHPP-Planwerten mit Standardrandbedingungen ein Mehrverbrauch von ca. 20 kWh/(m²a) für die Wärmeversorgung ergibt. Ein Teil des Mehrverbrauchs resultiert aus dem tatsächlichen Klima des Messjahres 2012/13, besonders aber aus den erhöhten Temperaturansprüchen der Mieter und der verspäteten Umschaltung der Lüftungsanlagen auf Winterbetrieb. Dieses organisatorische Problem ist in Zukunft leicht zu beheben, so dass der Verbrauch um ca. 4 kWh/(m²a) reduziert werden kann. Die Behebung der Probleme mit der Regelung der Warmwassernacherwärmung könnte den Verbrauch um weitere 4-5 kWh/(m²a) senken. Schließlich bestehen noch Verbesserungsmöglichkeiten im Heizhaus mit der Einbindung der Therme in den Pufferspeicher und den Betriebszeiten des Nahwärmenetzes im Sommer. Bei der Wärmeerzeugung ist davon auszugehen, dass die wesentlichen Probleme mit dem BHKW mittlerweile behoben sind und im nächsten Jahr der Deckungsanteil des BHKW wesentlich höher ausfällt.

5.2 Treibhausgas- und Primärenergiebilanz

Mit der Nutzung von Erdgas und Strom, aber auch durch die Verbrennung von Rapsöl sind sowohl Treibhausgasemissionen (Rapsöl: Emissionen in vorgelagerten Prozessen und beim Anbau von Raps) als auch ein Primärenergieverbrauch verbunden. Für die Bilanzierung in der Rotlintstraße wurden für den Energieträger Rapsöl in [IWU 2010] Emissionsfaktoren für das eingesetzte Rapsöl bestimmt. Tab. 5-2 zeigt die verwendeten Faktoren. Im Bereich des Stromverbrauchs für Hilfsenergie wurde in der Rotlintstraße ein Vertrag über die Lieferung von Ökostrom abgeschlossen, außerdem wurde ein Teil des Pumpenstroms direkt aus dem BHKW gedeckt. Auch für diesen Ökostrom wurden Emissionsfaktoren bestimmt.

Tab. 5-2: Verwendete Emissionsfaktoren für Treibhausgase und Primärenergie (bzw. kumulierter Energieaufwand KEA) (nach [IWU 2010])

	Kumulierter Energieaufwand (Primärenergiefaktor)	Treibhausgas-Emissionsfaktor (CO ₂ -Äquivalent)
	kWh/kWh _{End}	kg/kWh _{End}
Rapsöl	0,143	0,144
Erdgas	1,120	0,244
Ökostrom aus regenerativen Quellen	0,055	0,032
Strom-Mix Deutschland	2,700	0,647

Bilanziert man die Gebäude der Rotlintstraße mit diesen Emissionsfaktoren, so ergeben sich für die drei Varianten Planwerte mit PHPP-Standardrandbedingungen, PHPP-Werte mit angepassten Nutzungsbedingungen, sowie Messwerte 2012/13 die Ergebnisse in Abb. 5-2. Mit Planwerten (linke Säule) hätten sich Treibhausgasemissionen von 5,4 kg/(m²a) durch das Rapsöl ergeben, zusätzlich 2,3 kg/(m²a) für das Erdgas im Spitzenlastkessel. Der Einfluss des Hilfsstroms mit 0,2 kg/(m²a) ist aufgrund des extern eingekauften Stromes aus regenerativen Energiequellen kaum sichtbar. Dem steht eine Gutschrift für eingespeisten Strom aus dem BHKW von 7 kg/(m²a) gegenüber, so dass sich mit 0,8 kg/(m²a) ein nahezu klimaneutrales Gebäude ergeben hätte. Mit angepassten Nutzungsbedingungen steigen die Treibhausgasemissionen in Summe um 3 kg/(m²a) an (dritte Säule von links), dem steht aber auch eine größere Einspeisung durch längere Laufzeiten des BHKW gegenüber, so dass die Bilanz mit 0,9 kg/(m²a) ebenfalls nahezu ausgeglichen ist. Die Ist-Situation im Messjahr 2012/13 mit langen Stillstandszeiten des BHKW und statt dessen Einsatz des Spitzenlastkessels, führt zu einer deutlichen Verschiebung der Bilanz (5. Säule von links). Aufgrund der höheren Kohlendioxid-Emissionen von Erdgas steigt die Summe der Emissionen auf 14,7 kg/(m²a) an, dem stehen aber nur Gutschriften in Höhe von 2,6 kg/(m²a) gegenüber, so dass sich in der Summe Treibhausgasemissionen von 12 kg/(m²a) ergeben. Eine Darstellung der Einsparungen zur Situation vor der Modernisierung folgt in Kapitel 5.3.

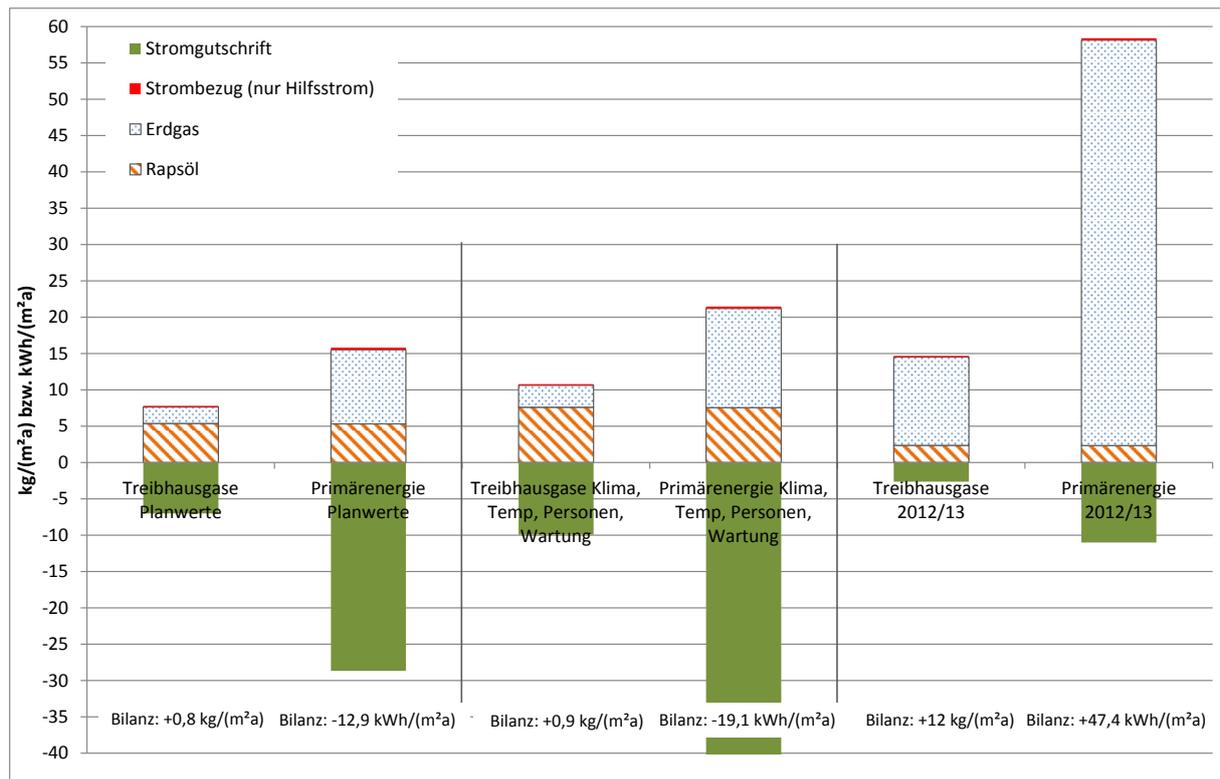


Abb. 5-2: Treibhausgas- und Primärenergiebilanz der Rotlintstraße: Planwerte, an die Nutzung angepasste PHPP-Werte, Messwerte 2012/13

Betrachtet man die Primärenergiebilanz, ausgedrückt durch den kumulierten Energieaufwand (KEA), so liegen die Gebäude sowohl bei den PHPP-Planwerten (2. Säule von links) als auch mit angepassten Nutzungsbedingungen (4. Säule von links) bei einem Primärenergiebedarf, der deutlich unter den Gutschriften für den eingespeisten Strom liegt. Die Gebäude wären damit Plus-Energie-Gebäude für die Bereiche Wärme und Hilfsenergie (Primärenergiegutschrift von 12,9 bzw. 19,1 kWh/(m²a) größer als Verbrauch). Im Messjahr 2012/13 wurde jedoch mehr Erdgas verbrannt und weniger Strom eingespeist, so dass die Bilanz von Primärenergieverbrauch und -gutschrift ein Verbrauch von +47,4 kWh/(m²a) ergibt. Berücksichtigt man die veränderten Nutzungsbedingungen, so liegt dieser Wert in der Größenordnung, die von Passivhaus-Neubauten für den Bereich Wärme und Hilfsenergie benötigt wird.

Die verwendeten Emissionsfaktoren haben sich insbesondere im Bereich des deutschen Strom-Mixes seit 2008 deutlich verändert. Der kumulierte Energieaufwand für eine Kilowattstunde Strom liegt im Jahr 2012 bei 2,2 kWh/kWh_{End} (entspricht gegenüber 2,7 kWh/kWh_{End} einer Reduktion um ca. 20 %) und die Treibhausgasemissionen haben sich leicht von 647 g/kWh auf 595 g/kWh reduziert [GEMIS 2013]. Dadurch vermindert sich insbesondere die Gutschrift für eingespeisten Strom. Dies führt bei den Messdaten aufgrund der geringen Stromerzeugung nur zu minimalen Verschiebungen bei der Treibhausgasbilanz (ca. 0,2 kg/(m²a)) (Tab. 5-3). Berücksichtigt man auch den Haushaltsstrom, so verringern sich die Gesamtemissionen von 28,3 auf 27,2 kg/(m²a). Etwas größer ist der Unterschied bei der Primärenergiebilanz, da hier der Unterschied der Emissionsfaktoren von Rapsöl und Strom-Mix größer ausfällt. Während bei der Bilanzgrenze Wärme und Hilfsenergie der Primärenergieverbrauch um 2 kWh/(m²a) im Jahr 2012/13 ansteigt, führt die Berücksichtigung des Haushaltsstroms dazu, dass der Gesamtprimärenergieverbrauch von 115,1 kWh/(m²a) auf 104,6 kWh/(m²a) sinkt, da der Haushaltsstrom einen größeren Anteil am Gesamtprimärenergieverbrauch einnimmt als Heizung

oder Warmwasser. Bei den angepassten Bedarfswerten kompensiert sich bei den Treibhausgasemissionen die Verschlechterung durch geringere Gutschriften und günstigeren Haushaltsstrombezug in etwa (Gesamtwerte Strom inkl. Haushaltsstrom: 12,2 kg/(m²a)), beim Primärenergieverbrauch ergibt sich für die Haustechnik immer noch ein negativer Gesamtverbrauch (-11,6 kWh/(m³a)), die Gesamtemissionen sinken durch die stärkere Reduktion beim Haushaltsstrom ebenfalls leicht ab (Summe Gesamtgebäude inkl. Haushaltsstrom: 27,4 kWh/(m²a)).

Tab. 5-3: Vergleich der Treibhausgas- und Primärenergieemissionen ohne und mit Haushaltsstrom für unterschiedliche Emissionsfaktoren

		Planwerte		angepasste Bedarfswerte: Klima, Temp, Personen, Wartung		2012/13	
		Treibhausgase	Primärenergie	Treibhausgase	Primärenergie	Treibhausgase	Primärenergie
		kg/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kg/(m ² a)	kWh/(m ² a)	kg/(m ² a)	kWh/(m ² a)
ohne HH-Strom	Summe (Emissionsfaktoren 2008)	0,80	-12,87	0,89	-19,13	12,03	47,37
	Summe (Emissionsfaktoren 2012)	1,36	-7,56	1,68	-11,61	12,24	49,41
	Veränderungen	0,56	5,31	0,80	7,52	0,21	2,04
mit HH-Strom	Summe (Emissionsfaktoren 2008)	13,85	41,60	12,36	28,74	28,27	115,14
	Summe (Emissionsfaktoren 2012)	13,36	36,82	12,23	27,39	27,17	104,63
	Veränderungen	-0,49	-4,78	-0,13	-1,35	-1,09	-10,51

Somit ergibt sich durch diese veränderten Emissionsfaktoren keine nennenswerte Veränderung in der Treibhausgas- und Primärenergiebilanz.

5.3 Einsparung durch die Modernisierung

Bei den Gebäuden Rotlintstraße 116-128 sind aufgrund von vorliegenden Verbrauchsausweisen der Jahre 2006 bis 2008 auch die Endenergieverbräuche Erdgas für Beheizung und Warmwasser im unsanierten Zustand bekannt (siehe [IWU 2010]). Vernachlässigt man den Hilfsstromverbrauch der Erdgastermen, die vor der Modernisierung vorhanden waren (obwohl deren Stromverbrauch nennenswert sein kann, dieser ist jedoch nicht bekannt), so kann man in einem Vorher/Nachher-Vergleich die Einsparungen bestimmen, die sich real durch die Modernisierung ergaben.

Abb. 5-3 zeigt für die drei Kategorien Endenergie für Heizung, Warmwasser und Hilfsenergie (Hilfsenergie nach Modernisierung hier berücksichtigt), Primärenergie und Treibhausgas-Emissionen die Messwerte vor Modernisierung, berechneter Bedarfswert mit Standard-Randbedingungen, Bedarfswert mit angepassten Randbedingungen und gemessener Verbrauchswert 2012/13. Die gemessene Endenergieeinsparung gegenüber der Zeit vor der Modernisierung zum modernisierten Zustand beträgt 129,2 kWh/(m²a) oder 68 %. Gelingt es die organisatorischen (Lüftungswartung) und regelungstechnischen (Warmwasserbereitung) Probleme zu lösen, so kann mit geringem Aufwand der Verbrauch auf ca. 50 kWh/(m²a) reduziert werden, was dann einer Reduktion um 73 % entsprechen würde. Bei den Bedarfswerten hätte sich eine Einsparung von 75 % (angepasste Berechnung) bzw. 79 % (Standard-Randbedingungen) ergeben.

Bei der Primärenergie ergaben sich Einsparungen von 77 % (von 204 auf 47,4 kWh/(m²a)), obwohl deutlich weniger Rapsöl eingesetzt wurde als geplant und weniger Sonnenenergie der thermischen Solaranlagen genutzt werden konnte. Die Einsparungen beim Primärenergieverbrauch sind somit ganz überwiegend durch Effizienzmaßnahmen erzielt worden und nicht durch einen Energieträgerwechsel. Bei den Treibhausgasen schließlich konnten die Emissionen von 45,3 kg/(m²a) auf 12,0 kg/(m²a) reduziert werden, was einer Einsparung um 73 % entspricht, das Ziel der Klimaneutralität wurde jedoch verfehlt. Wie bereits weiter oben erwähnt, ist dafür vor allem der störungsfreie BHKW-Betrieb von Bedeutung. Die Voraussetzungen dafür sind mittlerweile geschaffen, so dass die Gebäude in den nächsten Jahren netto noch niedrigere Emissionen erreichen können. Mit den Bedarfswerten hätte sich eine Treibhausgasreduktion von ca. 98 % ergeben.

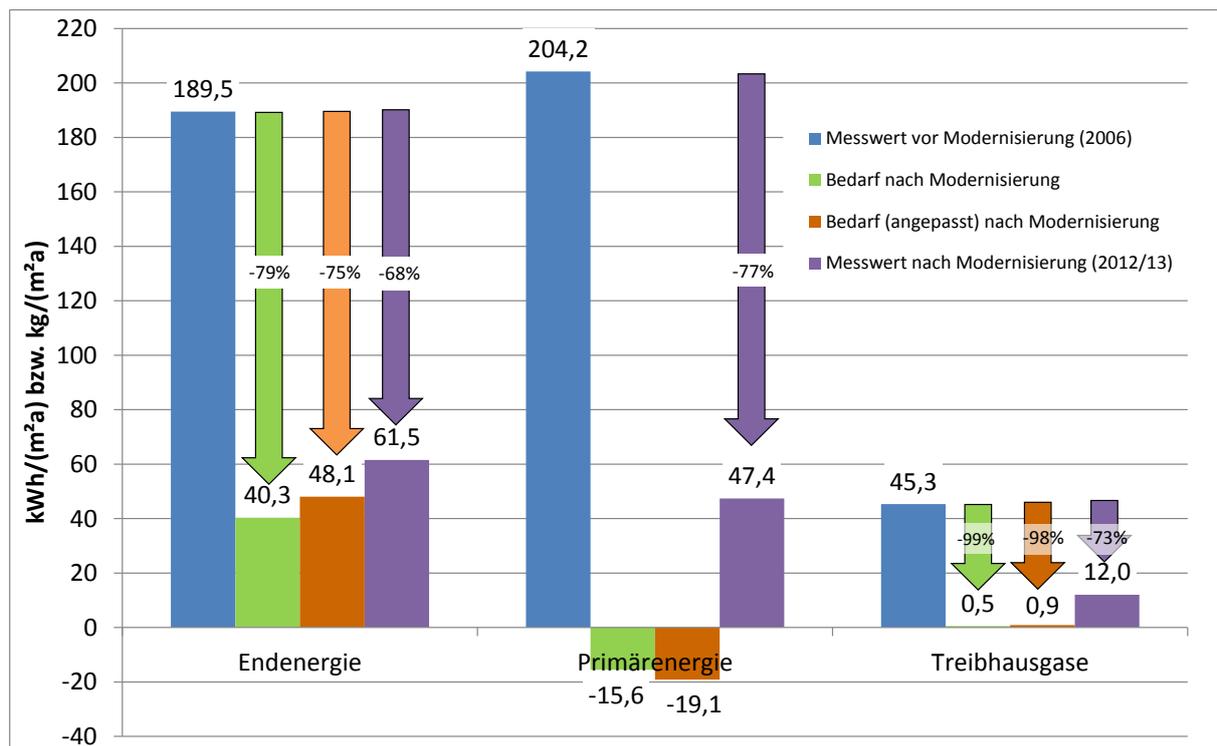


Abb. 5-3: Vergleich Endenergie, Primärenergie und Treibhausgas-Emissionen vor und nach Modernisierung

Die Ergebnisse des Vorher/Nachher-Vergleichs zeigen auch, welche Bedeutung einer Reduktion auf der Bedarfsseite zukommt, bevor durch entsprechende Anlagentechnik schließlich Null-Emissions- oder Null-Energiegebäude realisiert werden. Trotz der anlagentechnischen Schwierigkeiten, die in den letzten Jahren aufgetreten sind, erreichen die modernisierten Bestandsgebäude in der Rotlintstraße sehr niedrige Verbrauchswerte und somit auch niedrige Nebenkosten. Würde ein Null-Emissionsansatz mit geringer Bedarfsreduktion und überwiegend mit hohen Gutschriften (z. B. durch Photovoltaik) verfolgt, hätte dies bei Problemen mit der Anlagentechnik nicht nur höhere Emissionen, sondern auch deutlich höhere Nebenkosten zur Folge.

6 Zusammenfassende Bewertung des Projekts

6.1 Bewertung des Modernisierungskonzepts

Die Gebäude Rotlintstraße 116-128 wurden einem umfassenden Gesamtkonzept folgend in den Jahren 2008-2011 energetisch modernisiert (siehe [IWU 2010] und [Großklos 2011]). Im Bereich der Gebäudehülle kamen dabei zwei unterschiedliche, neuartige Konstruktionen der Fassadendämmung zum Einsatz, die beide anschließend mit Zelluloseflocken ausgefüllt wurden. Die Konstruktion des ersten Bauabschnitts erwies sich dabei in der Montage sehr zeitaufwändig und damit teurer, außerdem musste sie aufgrund eines höheren Holzanteils mit einer dickeren Dämmstoffstärke ausgeführt werden. Im zweiten und dritten Bauabschnitt wurde eine Konstruktion aufbauend auf dem System „LambdaPlus“ verwendet, das für Mehrfamilienhäuser angepasst wurde und aufgrund des geringeren Holzanteils eine 2 cm dünnere Dämmung erhielt. Die Kosten dieser Fassadenkonstruktion lagen mit 140 €/m² ca. 30 €/m² über den Kosten eines Wärmedämmverbundsystems aus Polystyrol mit vergleichbarer Dämmwirkung [Hinz, Großklos 2012]. Diese Mehrkosten einer Fassade aus nachwachsenden oder recycelten Materialien sind nicht zu vernachlässigen, dennoch konnte gezeigt werden, dass auch bei Mehrfamilienhäusern mit bis zu sechs Geschossen Alternativen zu Wärmedämmverbundsystemen bestehen.

Zellulose wurde auch im Bereich der Kellerdeckendämmung mit 26 cm Dicke eingesetzt, so dass auch die horizontale Wärmeverteilung überwiegend in der Dämmung verlegt werden konnte, was die Verteilverluste reduziert. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass in der Rotlintstraße für die Baualtersklasse ungewöhnliche Kellerdeckenhöhen von 2,30 m vorlagen. Bei niedrigeren Kellerhöhen kann es sinnvoller sein auf Dämmstoffe mit niedrigerer Wärmeleitfähigkeit zurückzugreifen. Die Aufstockungen im Dachgeschoss mit Holzleichtbaukonstruktionen wurden ebenfalls mit Zellulose gedämmt, nur die Außenwände zu den Dachterrassen erhielten ein WDVS aus Polystyrol. Das Ausblasen der Gefache in den Außenwänden, Kellerdecken und im Dachgeschoss hat grundsätzlich gut funktioniert. Wichtig sind jedoch Qualitätssicherungsmaßnahmen (z. B. Thermografieaufnahmen) um die korrekte Füllung der Gefache zu überprüfen. Bei solchen Aufnahmen konnten vergessene kleinere Gefache und nicht vollständig gefüllte Gefache im Dachgeschoss des dritten Bauabschnitts festgestellt werden, die nachgebessert wurden. Allerdings war es nicht möglich die Ausführung der Kellerdeckendämmung zu kontrollieren, da die Temperaturdifferenz zwischen Erdgeschoss und Keller mit maximal 5 K zu gering waren.

Der Einbau der neuen Passivhausfenster und die Abdichtung der Fenster auf den alten Außenputz hat in Verbindung mit einer flächigen Ausbesserung des Innenputzes gut funktioniert, wie die für Bestandsgebäude sehr guten Ergebnisse der Luftdichtheittest mit 0,3 1/h im Mittel über alle Gebäude zeigen. Die wohnungsweise vorhandenen Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, die in den Bädern der Wohnungen eingebaut sind, ließen sich mit vertretbarem Aufwand in den unbewohnten Gebäuden installieren.

Alle Verteilleitungen wurden entweder mit dem 2,5-fachen der EnEV-Anforderungen gedämmt oder im Bereich der Kellerdecke in deren Dämmung verlegt, so dass die effektive Dämmdicke dort noch höher ausfällt. Der zusätzliche Platzbedarf für die Leitungsdämmung konnte im Bereich der Zirkulationsleitung dadurch eingespart werden, dass in der vertikalen Verteilung eine Rohr-in-Rohr-Zirkulation eingesetzt wurde, die Zirkulationsleitung also innerhalb der Warmwasserleitung als dün-

nes Kunststoffrohr eingezogen wurde. Nach Aussagen des ausführenden Handwerkers, der das System zuvor nicht kannte, war die Installation nach kurzer Zeit problemlos und effizient möglich. Dadurch können sowohl Platz im Schacht als auch Dämmaufwand und Deckendurchbrüche für die Zirkulationsleitungen eingespart werden, gleichzeitig sinken die Verteilverluste. Das Gesamtkonzept zur Reduktion des Wärmebedarfs für Warmwasser und der Verteilverluste hat sich im Rückblick bewährt.

Die Semizentralen in jedem Block, die die Heizungsverteilung sowie die Warmwasserbereitung übernehmen, besitzen einen 300 Liter Speicher als hydraulische Weiche zwischen Solarsystem und Bereitschaftsspeicher der Warmwasserbereitung. Dieser Speicher verursachte zusätzliche Wärmeverluste und gleichzeitig war er an den Problemen mit der Warmwassernacherwärmung beteiligt und hat sich somit nicht bewährt. Weiterhin zeigte sich, dass auch die Dämmung der Rohrleitungen an besonderen Armaturen nicht immer zufriedenstellend ausgeführt werden konnte, außerdem wurde nach Nacharbeiten, z. B. an den Wärmemengenzählern oder Absperrarmaturen die Dämmung nicht mehr korrekt angebracht.

In der Heizzentrale hat das Rapsöl-BHKW viel Zeitaufwand bei den beteiligten Planern, Firmen und dem Forschungsteam verursacht, bis die Probleme beim Dauerbetrieb, den Schallemissionen und vor allem den Rußemissionen behoben waren. Zukünftig sollten konkrete Grenzwerte für Abgasqualität und Geräuschemissionen vertraglich vereinbart werden, um Verzögerungen aufgrund von Streitigkeiten zwischen den Parteien zu vermeiden.

Zusätzlich wurden umfangreiche Instandsetzungsmaßnahmen (z. B. neue Bäder, Verbesserungen Schallschutz in den Wohnungen, neue Elektroinstallation), Grundrissanpassungen (z. B. Zusammenlegung von kleinen Zimmern) und Wohnwertverbesserungen (z. B. nachträglicher Einbau eines Personenaufzuges im Gebäudegrundriss) in der Gesamtanlage umgesetzt, die die Wohnungen nahezu in einen Neubaustandard versetzten.

Die Kosten des Modernisierungsvorhabens (ohne Dachaufstockung) wurden in [Hinz, Großklos 2012] exemplarisch für den dritten Bauabschnitt ausgewertet. Die Gesamtkosten der Kostengruppen 300 und 400 von 1.278 €/m² teilen sich auf in 818 €/m² für Instandhaltung und Wohnwertverbesserung sowie 461 €/m² für die energetische Modernisierung, so dass etwa ein Drittel der Gesamtkosten der Energieeinsparung zuzurechnen sind. Berechnet man die Break-Even-Miete, die bei Neuvermietung erforderlich ist, um die Gesamtmaßnahme (inkl. Instandhaltung) zu refinanzieren, so sind je nach Eigenkapitalansatz zwischen 6,69 €/m² und 7,83 €/m² erforderlich, damit die Kosten gedeckt werden. In städtischen Ballungsräumen liegt dieser Wert unter der örtlichen Vergleichsmiete, in ländlichen Regionen wäre zum Erreichen der Wirtschaftlichkeit eine finanzielle Förderung erforderlich.

Insgesamt konnte in den Gebäuden ein vorbildliches Modernisierungskonzept umgesetzt werden, das gewährleistet, dass die Gebäude auch in den nächsten Jahrzehnten die Anforderungen an den Klimaschutz erfüllen.

6.2 Bewertung des Warmmietenmodells

Die Heizkosten der Wohnungen werden gemäß der Ausnahmeregelung in §11 Abs. 1 Nr. 1a der Heizkostenverordnung (HeizkV) für Passivhäuser nicht individuell abgerechnet, sondern es wurde eine pauschale Warmmiete vereinbart. Neben den Heizkosten wird auch die Wärme für die Warmwasserbereitung pauschaliert abgerechnet (nicht jedoch das Warmwasservolumen), da die Warmwasserbereitung überwiegend mit Solarenergie bzw. Kraft-Wärmekopplung erfolgt (§11, Abs.2 HeizkV). Ursprünglich wurde die HeizkV eingeführt, um neben einer Steigerung der Abrechnungsgerechtigkeit auch Anreize für eine Reduktion des individuellen Verbrauchs zu schaffen. Nun stellt sich die Frage, ob durch die fehlende Abrechnung der Anreiz der Mieter zu sparsamem Verhalten nachlässt. Indikatoren waren hierbei der gemessene Heizwärmeverbrauch der Wohnungen, die individuellen Raumtemperaturen sowie der Warmwasserverbrauch, jeweils bezogen auf die Wohnfläche oder pro Person.

Heizung

Beim Vergleich der gemessenen Raumtemperaturen der Rotlintstraße mit anderen energetisch hochwertig modernisierten Mehrfamilienhäusern (siehe Kapitel 3.3.2) zeigten sich keine nennenswerten Unterschiede, obwohl in den anderen Projekten die Heizkosten individuell abgerechnet wurden. Da bei dem Vergleich von Bilanzberechnungen und Messwerten gezeigt werden konnte, dass die gemessenen Verbräuche überwiegend mit den Raumtemperaturen (nicht untypisch für Gebäude dieser Qualität), der Personenbelegung, dem Außenklima und der Lüftungswartung erklärt werden können, ergibt sich somit auch kein Hinweis, dass aufgrund der Warmmiete die Verbräuche angestiegen sind. Somit kann auf Basis der Messdaten der Rotlintstraße keine Auswirkung der Warmmiete auf den Heizwärmeverbrauch festgestellt werden.

Warmwasser

Die personenbezogenen Warmwasserverbräuche liegen im Jahr 2012 mit 46,3 l/(Pers*d) deutlich über den projektierten Werten (25 l/(Pers*d)). Auch wenn auf eine einheitliche Zapftemperatur von 60 °C umgerechnet wird, liegt der Verbrauchswert mit 37,5 l/(Pers*d) um 50 % über dem Standardansatz. Es konnten in der Literatur nur wenige gemessene Vergleichswerte gefunden werden, da die exakte Personenbelegung selten bekannt ist. Dennoch ist nicht unwahrscheinlich, dass eine Ursache des höheren Verbrauches wahrscheinlich im Warmmietmodell liegt. Es besteht kein Anreiz für die Mieter kaltes Wasser zu nutzen (z. B. zum Hände waschen oder beim Putzen von Gemüse).

Mieterbefragung

Neben der messtechnischen Überprüfung wurden die Mieter [IWU 2012] in einer umfangreichen Erhebung u. a. nach ihrer Einschätzung des Warmmietenmodells befragt. Es zeigte sich, dass 55 % der Befragten das Warmmietenmodell gut finden, 35 % präferieren jedoch eine gebäudebezogene oder individuelle Abrechnung. Die Zustimmung zur Warmmiete war bei niedrigen und hohen Haushaltseinkommen höher als bei mittleren Einkommen. Unabhängig von der individuellen Präferenz beurteilen die meisten Mieter das Warmmietenmodell gut bis sehr gut (87 %), sinnvoll (77 %) und zeitgemäß (80%), allerdings wird es als weniger gerecht bewertet und es ist ihnen noch eher fremd. Berücksichtigt man die Wohndauer (die Mieter wohnten zum Zeitpunkt der Befragung zwischen 1

und 3 Heizperioden in ihrer Wohnung), so steigt die Vertrautheit mit dem Abrechnungsmodell, je länger die Wohndauer ausfällt, die Zustimmung zum Abrechnungsmodell sinkt aber leicht. Als Vorteile der Warmmiete wurde in einer offenen Frage vor allem die Planungssicherheit für den Mieter und die Kostensenkung bei Technik und Personal genannt. Als Nachteile wurden angeführt, dass man für andere mitbezahlt bzw. das Vertrauen unter den Mietern bezüglich achtsamen Verhaltens vorhanden sein muss.

Interessant sind auch die Antworten zur Frage, inwieweit das Warmmietenmodell die Mietentscheidung beeinflusst hat. So geben 54 % derjenigen, die das Abrechnungsmodell befürworten an, dass es auf jeden Fall oder zumindest vielleicht ein Mietentscheidungsgrund war. Aber auch 44 % derjenigen, die die Warmmiete nicht präferieren, ließen sich bei Abschluss des Mietvertrages dadurch positiv beeinflussen. Die Warmmiete war bei allen Einkommensgruppen bei ca. 35 % der Befragten ein wichtiger Grund für die Mietentscheidung. Rechnet man die Angaben „ja, vielleicht“ mit hinzu, so lag die höchste Zustimmung (80 %) bei den niedrigen Einkommen, bei mittleren und hohen Einkommen immer noch 47 % - 64 %. Bei den Einzugsgründen wurde die Höhe der Gesamtmiete als drittwichtigstes Kriterium nach Lage (Nähe zur Innenstadt) und Vorhandensein von Balkon/Terrasse genannt.

Fazit

Somit fällt die Bewertung des Warmmietenmodells unterschiedlich aus: Bei den Heizkosten ist ein Mehrverbrauch zwar möglicherweise vorhanden, ein Einfluss der Warmmiete ist aus den Messdaten aber nicht direkt belegbar, so dass das Warmmietenmodell für die Heizung in Passivhäusern mit ihren begrenzten Verbräuchen nach den vorliegenden Daten als vertretbar angesehen werden kann. Wird jedoch nicht zwischen den Kosten von warmem und kaltem Wasser unterschieden, so ist auf Basis der Messergebnisse in der Rotlintstraße von einer deutlichen Verschiebung zur Warmwassernutzung und somit zu erhöhtem Energieverbrauch auszugehen. Selbst bei regenerativer Energieversorgung sind die Auswirkungen kritisch zu bilanzieren. Die Mieterbefragung zeigte, dass eine Warmmiete ein wichtiges Kriterium sein kann, sich für eine Wohnung zu entscheiden. Somit kann das Warmmietkonzept einen Anreiz für die Wohnungswirtschaft schaffen, energetisch hochwertige Wohnungen im Passivhausstandard zu errichten.

Für den Vermieter steigt durch die Warmmiete gegenüber einer Umlegung aller Kosten auf die Mieter der Anreiz den Anlagenbetrieb zu optimieren, da dadurch die einkalkulierte Marge optimiert werden kann. Somit bietet die Warmmiete auch die Chance für weitere Einsparungen bei der Anlagentechnik, wenn die Strukturen in der Wohnungswirtschaft dafür geschaffen werden.

6.3 Bewertung des Nullemissionsansatzes

Die Treibhausgasemissionen in Deutschland und in den westlichen Industrieländern müssen in den nächsten Jahren und Jahrzehnten sehr stark reduziert werden, um die Emissionsziele der Bundesregierung, der Europäischen Union und der Vereinten Nationen zur Begrenzung des Klimawandels noch zu erreichen. Aus diesem Grund hat unter anderem die Europäische Union mit der Novellierung der Richtlinie zur Gesamteffizienz von Gebäuden [EU 2010] Ziele für Neubauten in der EU ab dem Jahr 2019 formuliert, die mit dem englischen Begriff „nearly zero energy building“ (deutsche Übersetzung: Niedrigstenergiehaus) beschrieben werden können und die auch in Deutschland umgesetzt werden müssen. Neben einer weitgehenden Reduktion des Primärenergiebedarfs bis fast auf null sollen auch

überwiegend regenerative Energieträger zur Deckung des Restenergiebedarfs eingesetzt werden. Auch wenn sich im Detail Unterschiede zwischen der Bilanzierung auf Basis von Primärenergie oder Treibhausgasemissionen ergeben können, ist jedoch anzunehmen, dass Null-Emissions- und Null-Energie-Gebäude sehr ähnliche Konzepte hervorbringen werden.

Während die zurzeit intensiv diskutierten und in der Entwicklung befindlichen Null- und Plus-Energie-Gebäude alle Energieströme im Gebäude inklusive dem Haushaltsstrom betrachten, werden sowohl beim Niedrigstenergiehaus als auch bei den Gebäuden in der Rotlintstraße die Bereiche Heizung, Warmwasser, Verteilung und Hilfsenergie betrachtet, der Haushaltsstrom wird aber ausgespart. Diese Abgrenzung lässt sich jedoch durchaus begründen, da einerseits der Haushaltsstrom beim Mehrfamilienhaus nur begrenzt vom Bauherrn beeinflusst werden kann, andererseits bereits die Deckung aller anderen Energieverbräuche mit überwiegend regenerativen Energien eine große Herausforderung darstellt, die, wie die Ergebnisse der Rotlintstraße zeigen, erst bewältigt werden müssen.

Das Konzept zur energetischen Modernisierung in der Rotlintstraße wurde in den Jahren 2007 und 2008 entwickelt, also noch vor der Novellierung der Richtlinie zur Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden. Der Schwerpunkt lag auf einer Reduktion der Bedarfswerte in den Bereichen Heizung, Warmwasser, Verteilung und Hilfsenergie, aber es sollten auch Anreize für die Mieter zur Reduktion des Haushaltsstromverbrauchs geschaffen werden. Der verbleibende Restenergiebedarf sollte überwiegend regenerativ mit Solarthermie und dem Rapsöl-BHKW gedeckt werden, so dass die Gebäude in der Jahresbilanz klimaneutral sind. In der Rotlintstraße wurde das Konzept des klimaneutralen Gebäudes bei Bestandsgebäuden umgesetzt, was den Aufwand im Vergleich zu einem Neubau erhöht, und zusätzlich auch noch der Herstellungsenergieinhalt der Wärmedämmung durch die überwiegende Verwendung von Zellulosedämmung (recyceltes Material, nachwachsender Rohstoff) minimiert.

Die Bewertung des Zero-Emission-Ansatzes in der Rotlintstraße soll gemäß den folgenden Teilschritten erfolgen:

1. Energiebilanz in der Planung (PHPP)
2. Verbrauchswerte: Effizienzsteigerungen
3. Verbrauchswerte: Deckung Restenergie mit regenerativen Energien

1. Energiebilanz in der Planung

Wie in Kapitel 5.1 dargestellt, erreichen die Gebäude bei den Bedarfswerten nach PHPP den Passivhausstand im Mittel über die gesamte Energiebezugsfläche, obwohl es sich um energetisch modernisierte Bestandsgebäude mit erschwerten Randbedingungen handelt. Dies ist für die Erreichung des Null-Emissions-Ziels ein wichtiger Schritt in Richtung eines klimaneutralen Gebäudes. Die Dämmung der Verteilleitungen mit dem 2,5-fachen der EnEV-Anforderungen ist ebenfalls ein wichtiger Schritt zur Minimierung des Energiebedarfs. Auch bei der Warmwasserspeicherung und Verteilung konnten mit Reduktion der Warmwassertemperatur und der Verwendung der Rohr-in-Rohr-Zirkulation der Energiebedarf deutlich reduziert werden (siehe [IWU 2010]). Weiterhin lag der Hilfsenergieeinsatz unter demjenigen üblicher Gebäude, so dass auch hier alle Voraussetzungen für ein klimaneutrales Gebäude geschaffen wurden.

Die Energieerzeugung mit thermischen Solaranlagen und dem Rapsöl-BHKW sorgt für eine Versorgung zu über 80 % aus regenerativen Energiequellen, so dass trotz des Erdgas-Spitzenlastkessels die Gebäude in der Jahresbilanz fast keine Treibhausgasemissionen mehr verursachen (Restemissionen: ca. 0,8 kg/m²). Dies entspricht einer Reduktion der Treibhausgasemissionen um 98 % gegenüber dem Zustand der Gebäude vor der Sanierung (siehe Abb. 5-3).

Somit kann festgehalten werden, dass die Gebäude das Projektziel „Null-Emissions-Konzept“ auf Basis der Planungsdaten nahezu ideal erreichen. Diese Betrachtungsweise ist für die absolute Mehrheit aller Gebäude die einzig praktizierte, da nur selten eine detaillierte messtechnische Überprüfung der Planungsdaten in der Praxis erfolgt. Auf dieser Betrachtungsebene würden die Bestandsgebäude der Rotlintstraße wohl die Neubauanforderungen der EU an „nearly zero energy buildings“ ab 2021 bereits heute erfüllen.

2. Verbrauchswerte: Effizienzsteigerung

Aus den Gebäuden der Rotlintstraße stehen mittlerweile Betriebserfahrungen aus zwei bis vier Nutzungsjahren zur Verfügung. Dabei zeigte sich, dass die Verbrauchswerte für Heizwärme zwischen 25 kWh/(m²a) und 30 kWh/(m²a) lagen und damit 10 bis 15 kWh/(m²a) über den Bedarfswerten. Die Abweichungen sind größtenteils mit den vorliegenden Messdaten zu erklären, einerseits sind es höhere Komfortansprüche der Mieter (Raumtemperaturen ca. 22,4 °C im Mittel an Stelle von 20 °C im PHPP) und andere Nutzung der Wohnungen (verringerte Personenbelegung), andererseits die Einflüsse des Klimas in den Messjahren sowie technische Gründe wie die verspätete Wartung der Lüftungsanlagen oder den teilweisen Sommerbetrieb der Heizkreise. Dennoch verbrauchen die Gebäude extrem wenig Heizwärme - weit unterhalb ambitionierter Neubaustandards (außer Passivhaus) - und es lassen sich nur wenige energetisch modernisierte Gebäude in Deutschland finden, die ein vergleichbar niedriges Verbrauchsniveau erreichen.

Die Warmwasserbereitung ist hauptsächlich über die Energie zu bewerten, die für die Nacherwärmung des benötigten Warmwassers erforderlich ist. Durch die beschriebenen Probleme bei den Solaranlagen, vor allem aber bei der Regelung der Nacherwärmung und Umschichtung war mehr Nachheizenergie erforderlich, als geplant. Dennoch lag dieser Energieaufwand inklusive aller Verluste zwischen 11,0 kWh/(m²a) und 13,8 kWh/(m²a) (Planwert: 7,4 kWh/(m²a)) und somit immer noch vergleichsweise niedrig.

Auch beim Haushaltsstrom konnten niedrige Verbrauchswerte von 27 kWh/(m²a) erreicht werden, die unter den Ergebnissen in anderen energetisch modernisierten Gebäuden lagen (siehe Tab. 3-15). Dennoch ist der Haushaltsstrom, der bei der Null-Emissions-Bilanz bewusst ausgenommen wurde, bei Gebäuden solcher energetischen Qualität auch endenergetisch einer der größten Einzelverbrauchsbereiche, in dem zukünftig wohl nur schrittweise weitere Reduktionen erreicht werden können.

Somit fällt die Bewertung der tatsächlichen Effizienzsteigerung überwiegend sehr positiv aus, auch wenn noch niedrigere Werte und weitere Optimierungen möglich gewesen wären.

3. Verbrauchswerte: Deckung Restenergie mit regenerativen Energien

Im dritten Schritt zum Null-Emissions-Gebäude soll der Restenergiebedarf überwiegend durch regenerative Energieträger gedeckt werden. Hierzu wurden in der Rotlintstraße thermische Solaranlagen und Rapsöl in Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt.

Die thermischen Solaranlagen lieferten im Mittel ca. 36.000 kWh/a Solarwärme bei einem Wärmeverbrauch für Warmwasser von 69.000 kWh/a (inkl. Zirkulations- und Speicherverluste), was einem nominellen Deckungsgrad von 52 % entspräche. Da die Regelung der Nacherwärmung nicht wie geplant funktionierte, wurde noch in der Größenordnung von 50.000 kWh/a nachgeheizt. Die Abweichungen zwischen Plan- und Messwerten bei der Warmwasserbereitung führten zu einer Erhöhung der Wärmeabnahme aus dem Nahwärmenetz, das einerseits vom Rapsöl-BHKW, andererseits vom Erdgas-Spitzenlastkessel gespeist wurde.

Aufgrund der technischen Probleme mit dem BHKW lieferte es in der Heizperiode 2012/13 nur 10,0 kWh/(m²a) anstelle der geplanten 39,1 kWh/(m²a). Zusätzlich lag der Gesamtwärmebedarf aufgrund des höheren Heizwärmeverbrauchs und des höheren Nacherwärmungsaufwand beim Warmwasser statt 48,8 kWh/(m²a) im Jahr 2012/13 bei 55,4 kWh/(m²a). Dadurch konnten die erforderlichen Gutschriften durch die Stromerzeugung im BHKW nicht erreicht werden, was deutliche Auswirkungen auf die Emissionsbilanz hat. In der Gesamtbilanz ergaben sich für die Gebäude Treibhausgasemissionen von 12 kg/(m²a), so dass das Ziel eines klimaneutralen Gebäudes im Messzeitraum noch nicht erreicht wurde. Allerdings stehen die Chancen in den kommenden Jahre gut, dass die Gebäude das Ziel erreichen, da die Probleme mit dem BHKW behoben wurden und die Anlage z. B. im März 2013 schon 47 % der Wärme im Heizhaus erzeugte. Durch den Mehrverbrauch, besonders bei der Heizwärme, verschiebt sich auch die Jahresdauerlinie der Gebäude bei nahezu unveränderter maximaler Heizlast zu höheren Werten in der Übergangszeit. Da die dann erforderlichen Leistungen teilweise oberhalb der maximalen thermischen Leistung des BHKW liegen, muss diese zusätzliche Wärme überwiegend vom Spitzenlastkessel geliefert werden, die Laufzeit des BHKW verlängert sich nur in begrenztem Maße, so dass der Mehrverbrauch ebenfalls negative Auswirkungen auf die Treibhausgasbilanz hat, da die Auslegung des BHKW für die Planwerte optimiert ist. In der Heizperiode 2012/13 hätte das BHKW bei vollständiger Verfügbarkeit nur 56 % der Gesamtwärmeerzeugung beisteuern können, was fast 20 % unter dem Auslegungswert liegt.

6.4 Fazit

Null-Emissions-Gebäude, aber auch Null- oder Plusenergie-Gebäude, sollten immer als hocheffiziente Gebäude (Passivhäuser) geplant werden, damit ist eine wesentliche Voraussetzung für niedrige Treibhausgasemissionen geschaffen. Der wesentliche Unterschied in der Treibhausgas- oder Primärenergiebilanz ist hauptsächlich ihre zusätzliche Anlagentechnik zur regenerativen Restenergieversorgung bzw. die Erzeugung von zusätzlicher elektrischer Energie zur Kompensation von unvermeidlichen Verbräuchen oder Emissionen. Damit wird die Komplexität bei der Anlagentechnik in einem Null-Emissions-Gebäude immer deutlich höher liegen, als bei einem Passivhaus mit Erdgastherme. Diese zusätzliche Komplexität muss im laufenden Betrieb anlagentechnisch, aber auch regelungstechnisch beherrscht werden, was in der Rotlintstraße nicht von Anfang an gelang. Im Laufe der Messphase konnten zahlreiche Optimierungen vorgeschlagen und teilweise auch umgesetzt werden,

die die Effizienz gesteigert haben, so dass die Gebäude das Null-Emissionsziel zukünftig nahezu erreichen können.

Allerdings hat sich auch gezeigt, dass das Erreichen einer Bilanz in der Praxis auch bedeuten kann, bereits in der Planung Reserven für spätere Abweichungen von den Standardwerten einzuplanen. Hier ist vor allem die Berücksichtigung einer höheren Raumtemperatur in Passivhäusern von 22 °C zu nennen. Diese hätte, zumindest theoretisch, zu einer veränderten Auslegung des BHKW geführt, so dass dieses auch größere Anteile der Wärmelast decken kann. Real scheitern solche „Überdimensionierungen“ teilweise auch an den im unteren Leistungsbereich verfügbaren BHKW-Motoren. Gleichzeitig wird die Entscheidung des Bauherren für ein solches BHKW schwieriger, da ein mit Standardrandbedingungen überdimensioniertes BHKW geringere Laufzeiten und somit eine schlechtere Wirtschaftlichkeit aufweist. Hier muss aber bei Gebäuden mit ambitionierten energetischen Zielsetzungen beachtet werden, dass sich das BHKW in das Gesamtkonzept integriert und nicht einzeln betrachtet werden sollte.

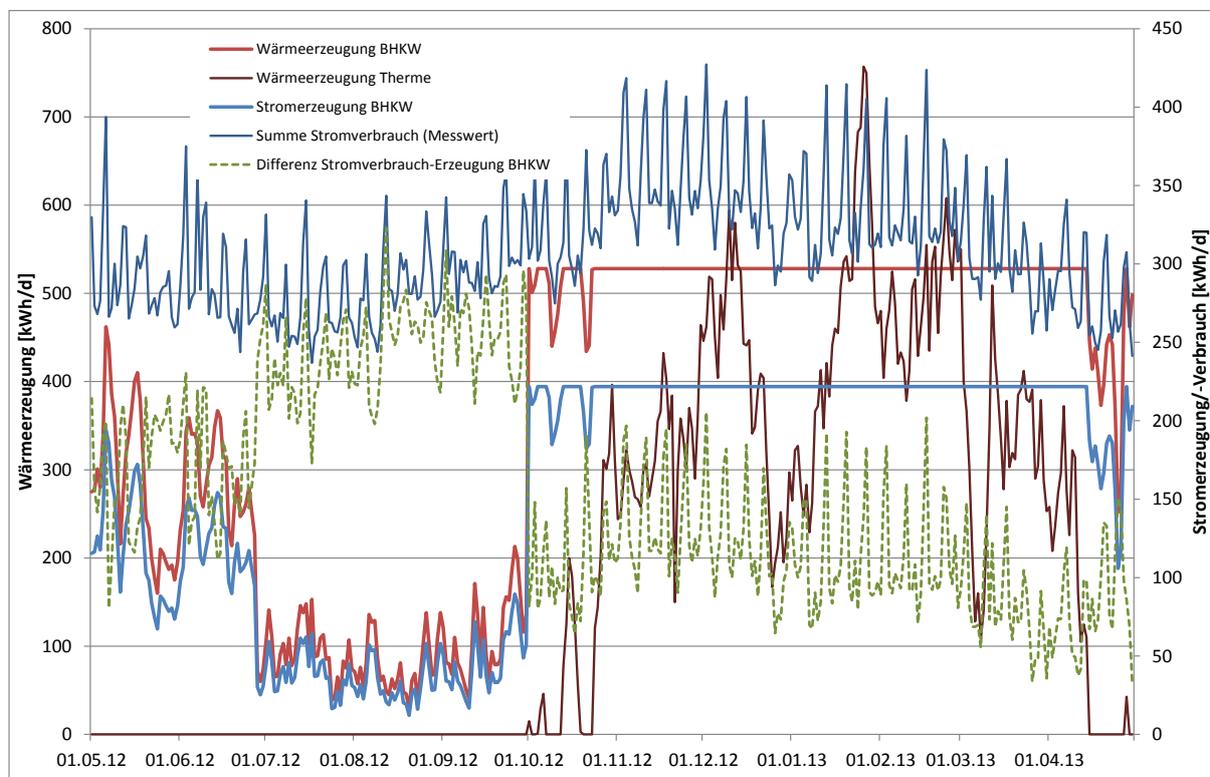


Abb. 6-1: Realer Jahresgang 2012/13 mit theoretischer Wärme- und Stromerzeugung des BHKW, Erzeugung Therme, gemessenem Gesamtstromverbrauch sowie Differenz zwischen Stromverbrauch und -erzeugung

Das Null-Emissionskonzept für die Rotlintstraße wurde 2008 entwickelt. Mittlerweile hat die Planung von Null- und Plusenergiegebäuden in der Forschung deutlich Fahrt aufgenommen. Aus dem Einfamilienhausbereich kommend, werden nun sehr häufig Kombinationen von Wärmepumpen in Verbindung mit einer großen Photovoltaikanlage angestrebt. Im Mehrfamilienhausbereich gibt es jedoch Grenzen bei der Umsetzung solcher Konzepte, da die verfügbaren Photovoltaikflächen bei größeren Gebäuden unter Umständen nicht ausreichen. Zusätzlich erfordert die Photovoltaik-Wärmepumpen-Kombination eine „Speicherung“ der sommerlichen Solarstromerträge bis in den Winter. Da eine solche Speicherung zurzeit nicht möglich ist, bedeutet dies, dass im Winter ein Großteil der benötigten Energie für die Wärmepumpe aus dem elektrischen Netz entnommen wird. Diese Diskrepanz zwischen Erzeugung und Bedarf tritt beim Einsatz eines BHKW deutlich weniger auf (siehe Abb. 6-1).

Rapsöl ist zwar ein nachwachsender Energieträger, er steht aber nicht in unbegrenztem Umfang zur Verfügung. Deswegen muss er mit einem Maximum an Effizienz eingesetzt werden (Nutzungsgrad >90 %), sonst ist eine energetische Nutzung nicht vertretbar. Dies wurde in der Rotlintstraße annähernd erreicht. Außerdem sollte der Biomasseeinsatz auf ca. 35 kWh/(m²a) begrenzt werden, da aufgrund des nicht beliebig verfügbaren Biomassepotenzials [Diefenbach 2002] die Versorgung der Gebäude sonst keine nachhaltige Lösung darstellt. Der Planwert des Biomasseverbrauchs lag mit 39 kWh/(m²a) nur knapp über der Grenze des Biomassepotenzials.

Schließlich lässt sich aus dem Modernisierungsvorhaben Rotlintstraße 116-128 für zukünftige Projekte die Schlussfolgerung ziehen, dass beim Übergang von Modernisierung zu Gebäudebetrieb die Kompetenzen und Zuständigkeiten geklärt werden müssen, sodass Fehler schnell erkannt und Betriebsoptimierungen zeitnah umgesetzt und kontrolliert werden. Hier gilt es nicht nur Planer und Handwerker, sondern auch Herstellerfirmen frühzeitig einzubinden. Mögliche Garantieansprüche gegen ein anderes Gewerk verhinderten teilweise eine schnellere Reaktion auf erkannte Probleme. Wartungsverträge sollten frühzeitig und, wie am Beispiel der verspäteten Wartung der Lüftungsanlagen gesehen, mit konkreten Zeitvorgaben abgeschlossen werden. Verbesserungen könnten erreicht werden, wenn mit den Herstellern und Lieferanten garantierte Effizienzstandards vereinbart würden, die die vollständige Auszahlung der vertraglich vereinbarten Summe an den Nachweis von vorher spezifizierten Effizienzkennwerten nach ein oder zwei Betriebsjahren koppelt.

7 Literatur

[Baumüller]	Unterlagen der Firma Baumüller & Partner GmbH zum BP 250-1.22, Neustadt a. d. Weinstraße, 2013
[BDEW 2012]	Wasserfakten im Überblick (Stand: April 2012); Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.; http://www.bdew.de/internet.nsf/id/F3937385ECB47B16C12578230041A224 ; abgerufen am 25.06.2013
[BMU AT 2009]	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Wegweiser für eine gesunde Raumluft; Wien, 2009 http://www.ibo.at/de/publikationen/index.htm#Inhalt
[CAL 2011]	Chemisch Analytisches Laboratorium: Untersuchungsbericht 20110919 zur Analyse von Trinkwasserproben aus dem 1. Und 2. Bauabschnitt in der Rotlintstraße; Untersuchung im Auftrag der ABG FRANKFURT HOLDING, Darmstadt, März 2011
[Clausnitzer 2009]	Clausnitzer, K.-D.; Hoffmann, N.: Allgemeinstrom in Wohngebäuden; Untersuchung im Auftrag des BBR, Bremen, 2009
[Diefenbach 2002]	Diefenbach, N.: Bewertung von KWK und Biomasse; Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2002
[EA-NRW 2006]	EnergieAgentur Nordrhein-Westfalen: Erhebung zum Stromverbrauch von 28.000 Haushalten; Presseinfo der EnergieAgentur Nordrhein-Westfalen vom 06.04.2006
[EU 2010]	Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, Amtsblatt der Europäischen Union vom 18.06.2010
[faktor10]	Büro faktor10 Gesellschaft für Siedlungs- und Hochbauplanung mbH: Planungsunterlagen Modernisierung, Darmstadt 2008
[FBU 2001]	Forschungsgesellschaft BAU UND UMWELT mbH: Beispielhafte Sanierung eines fünfgeschossigen Plattenbaus vom Typ P2 unter Einbeziehung solarer Energietechnik; Berlin, 2001
[freiraum]	Freiraum Landschaftsarchitektur: Unterlagen Außenplanung, Frankfurt, 2008
[GEMIS 2013]	Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme, Version 4.8.1, Öko-Institut / IINAS, Darmstadt, Darmstadt, 2013
[Greentherm]	S-PRO Automation GmbH: Datenblatt für das BHKW GreenTherm 11-22, Version 1.6 (Stand Januar 2011), Nauroth
[Großklos 2011]	Großklos, M.: Wissenschaftliche Begleitung der Sanierung Rotlintstraße 116-128 in Frankfurt am Main, „Teilbericht Baudokumentation“; Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2011
[Hinz, Großklos 2012]	Hinz, E.; Großklos, M.: Wissenschaftliche Begleitung der Sanierung Rotlintstraße 116 - 128 in Frankfurt am Main, Teilbericht Wohnungswirtschaftliche Analyse; Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2012
[HLUG]	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie: Messdaten des Luftmessnetzes Hessen im Zeitraum 01.01.2010 bis 30.04.2013; http://www.hlug.de/popups/luftmessdaten.html
[IBB 2012]	Messung des Ingenieurbüro Baumgartner am 30.08.2012, unveröffentlicht
[IGE 2007]	Schmidt, M.; Schmidt, S.; Treiber, M.; Arnold, J.: Entwicklung eines Konzepts für energetische Modernisierungen kleiner Wohngebäude auf 3-Liter-Haus-Niveau in Mannheim-Gartenstadt, final report, Institut für GebäudeEnergetik der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2007

[IWU 2003]	Ebel W.; M. Großklos; J. Knissel; T. Loga; K. Müller: Wohnen in Passiv- und Niedrigenergiehäusern – Teilprojekt: Bauprojekt, messtechnische Auswertung, Energiebilanzen und Analysen zum Nutzereinfluss; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt, 2003
[IWU 2008]	Behr, I.; Enseling, A.; Hacke, U.; Hinz, E.; Loga, T.: Heizkosten im Passivhaus - Warmmiete oder Flatrate-Modell; Endbericht im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, IWU, Darmstadt, 2008
[IWU 2010]	Großklos, M.; Koch, T.; Diefenbach, N.: Wissenschaftliche Begleitung der Sanierung Rotlintstraße 116-128 in Frankfurt am Main, Teilbericht "Planungsphase und Null-Emissions-Konzept"; Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2010
[IWU 2012]	Hacke, U.; Großklos, M., Lohmann, G.: „Wissenschaftliche Begleitung der Sanierung Rotlintstraße 116-128 in Frankfurt - Mieterbefragung zum Wohnverhalten im Passivhaus und zur Akzeptanz des Warmmietmodells“, IWU, Darmstadt, 2012
[Karlsruhe 2004]	Autorenkollektiv: EnSan-Projekt Karlsruhe-Gördelerstraße: Modellhafte integrale Gesamtsanierung eines Gebäudekomplexes mit 147 Wohneinheiten in Karlsruhe, Volkswohnung Karlsruhe, 2004
[Kink 2012]	Auskunft per Mail von Herrn Kink, Firma Heinemann vom 02.03.2012
[LEG 1999]	Institut Wohnen und Umwelt: Heizenergie im Hochbau - Leitfaden für energiebewußte Gebäudeplanung (LEG) (1999): Standardnutzungsbedingungen für LEG, Darmstadt, 1999
[PHI 2004]	Peper, S.; Feist, W.; Pfluger, R.: Ein nordorientiertes Passivhaus - Passivhaus „Wohnen bei St. Jakob“, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2004
[PHI 2008]	Peper, S.; Feist, W.: Gebäudesanierung „Passivhaus im Bestand“ in Ludwigshafen / Mundenheim Messung und Beurteilung der energetischen Sanierungserfolge; Passivhaus Institut, Darmstadt, 2008
[PHI 2009]	Peper, S.; Grove-Smith, J.; Feist, W.: Sanierung mit Passivhauskomponenten; Messtechnische Untersuchung und Auswertung Tevesstraße Frankfurt a. M., Passivhaus Institut, Darmstadt, 2009
[PHI 2011]	Peper, S.; Schnieders, J.; Feist, W.: Monitoring Altbausanie rung zum Passivhaus Verbrauch Raumluftqualität, Kellerfeuchte; Messtechnische Untersuchungen an den Sanierungsbauten Tevesstraße Frankfurt a.M., Passivhaus Institut, Darmstadt, 2011
[PHPP]	Passivhaus Projektierungs Paket 2007, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2007
[Quaschning 2008]	Quaschning, V.: Regenerative Energien - Technologie-Berechnung-Simulation, Hanser Verlag, München, 2008
[Shell 2012]	Shell, HWWI, IFEU: Shell Hauswärme-Studie 2012, Shell Deutschland Oil GmbH, Hamburg, November 2011
[UBA Wasser]	Öffentliche Wasserversorgung; Internetseite des Umweltbundesamtes: http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2302 , abgerufen 25.06.2013
[VDI 6002-1]	Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie 6002 Blatt 1 - Solare Trinkwassererwärmung, Ausgabe 2004, Beuth Verlag, Berlin, 2004
[Ventomaxx 2008]	Fa. Ventomaxx: Produktdatenblatt des Lüftungsgerätes V-WRG, 2008
[Wiki Rapsöl]	Wikipedia-Eintrag zu Pflanzenöl-Kraftstoff, abgerufen am 10.06.2013 http://de.wikipedia.org/wiki/Pflanzen%C3%B6l-Kraftstoff

8 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungen

Abb. 1-1: Übersicht über die Lage der Bauabschnitte, von Heizhaus und Semizentrale sowie das neu verlegte Nahwärmenetz (Plan: [freiraum]).....	10
Abb. 1-2: Ansichten der Gebäude: vor Modernisierung (oben links), Abhängung der Kellerdecke, die später mit Zellulosedämmung gefüllt wurde (oben rechts), Unterkonstruktion der Außenwanddämmung im ersten Bauabschnitt (Mitte links), Unterkonstruktion der Außenwanddämmung auf Höhe der Geschossdecke im zweiten und dritten Bauabschnitt (Mitte rechts), Abdichtung der neuen Passivhausfenster (unten links), Dachkonstruktion im Treppenhauskopf mit 40 cm Holzstegträgern (untern rechts).....	12
Abb. 1-3: Ansichten der Anlagentechnik: Lüftungsgerät im Badezimmer (Pfeil, oben links), Lüftungsgerät im Treppenhaus (oben rechts), Heizzentrale mit BHKW vorne und Erdgastherme hinten (Mitte links), thermische Solaranlage auf dem ersten Bauabschnitt (Mitte rechts), Solarpufferspeicher (blau) und Warmwasser-Bereitsschaftsspeicher (weiß, hinten) sowie hydraulische Weiche (weiß vorn) (Bild unten links), zweilagige Verlegung der Leitungsdämmung (Bild unten rechts).....	13
Abb. 1-4: Typischer Grundriss im dritten Bauabschnitt nach der Modernisierung [faktor10].....	14
Abb. 1-5: Ansichten der Gebäude nach Abschluss der Arbeiten: erster Bauabschnitt von Süden (oben links), zweiter Bauabschnitt von Nordwesten (oben rechts), dritter Bauabschnitt von Süden (unten links), Luftbild der Anlage mit allen Bauabschnitten von Norden (unten rechts).....	15
Abb. 2-1: Anlagenschema der Haustechnik mit den vorhandenen Messeinrichtungen	18
Abb. 2-2: Befestigung des Datenloggers in den Bestandsgeschossen auf dem Türrahmen im Flur der Wohnung.....	19
Abb. 2-3: In den Dachgeschosswohnungen wurde ein Datenlogger zusätzlich im Wohnzimmer am Fensterrahmen befestigt	19
Abb. 2-4: Je Wohnung wurde im Schacht im Badezimmer ein Wärmemengenzähler für den Heizwärmeverbrauch montiert (Bild aus der Bauphase).....	19
Abb. 2-5: Die Haushaltsstromzähler verfügen über Archivregister mit der stündlichen mittleren Leistung, die über Powerline ausgelesen wurden	19
Abb. 2-6: Darstellung der Datenverfügbarkeit auf Basis von Stundendaten im Messzeitraum für Wärme, Wasser und Strom	22
Abb. 2-7: Datenverfügbarkeit der Temperatur- und Feuchtwerte aus den Wohnungen im Messzeitraum	23
Abb. 2-8: Tagesmitteltemperaturen der Station Frankfurt-Ost sowie Tagessummen der Globalstrahlung (horizontal) der Station Riedstadt im Messzeitraum	24
Abb. 2-9: Vergleich der Monatssumme der Globalstrahlung zwischen PHPP-Datensatz für Frankfurt am Main und Messwerte Station Riedstadt	25
Abb. 3-1: Messwerte des Temperaturgradienten in einer Erdgeschosswohnung zur Korrektur der gemessenen Raumlufttemperaturen auf eine Messhöhe von 1,40 m - 1,70 m.....	26
Abb. 3-2: Verlauf der korrigierten Gebäudetagesmitteltemperaturen während der Messperiode.....	28
Abb. 3-3: Monatsmittelwerte der unkorrigierten Mitteltemperaturen der Bauabschnitte während der Messperiode sowie der Außentemperatur (rechte Skala)	28
Abb. 3-4: Korrigierte Raumtemperaturen im zweiten Bauabschnitt im Januar und Februar 2011 sowie Außentemperatur (rechte Skala)	29
Abb. 3-5: Stundenwerte der unkorrigierten Mitteltemperaturen der Wohnungen während der gesamten Messperiode....	30
Abb. 3-6: Gemessene Raumtemperaturen und berichtete Temperatureinstellung am Raumthermostat bei Anwesenheit (aktualisiert nach [IWU 2012])	31
Abb. 3-7: Gemessene Raumtemperaturen und Zufriedenheit mit der Temperatur im Wohnzimmer tagsüber (aktualisiert nach [IWU 2012]) ²	32
Abb. 3-8: Unkorrigierte Tagesmitteltemperaturen der Wohnungen des ersten Bauabschnitts im Juli 2010 während der Phase mit den höchsten Außentemperaturen in der Messperiode	33
Abb. 3-9: Unkorrigierte Raumtemperaturen der Dachgeschosswohnungen während 20 Tagen im August 2012.....	34
Abb. 3-10: Übertemperaturhäufigkeit der Wohnungen im Jahr 2012 nach Lage im Gebäude (angepasste Grenztemperatur: 25,4 °C); Gelb dargestellte Werte repräsentieren Dachgeschosswohnungen	35
Abb. 3-11: Stundenmittelwerte der Raumluftfeuchte aller Wohnungen sowie Mittelwert +/- Standardabweichung sowie 10%- und 90%-Quantile.....	36

Abb. 3-12: Verlauf der Raumlufffeuchte von November 2012 bis April 2013 sowie Mittelwert +/- Standardabweichung und 10%- und 90%-Quantile und die absolute Außenfeuchte	37
Abb. 3-13: Aufsteigend geordnete Raumlufffeuchten im Winter 2012/13 (Oktober-März).....	38
Abb. 3-14: Häufigkeit der Raumlufffeuchte (Stundenwerte aller Wohnungen) in den Heizperioden 2011/12 und 2012/13. 39	
Abb. 3-15: Zufriedenheit der Bewohner mit der Raumlufffeuchte in der Heizperiode 2011/12 (die Messdaten umfassen nur den Zeitraum Mitte November 2011 bis Mitte Dezember 2011) [IWU 2012]	39
Abb. 3-16: Heizwärmeverbräuche der Wohnungen im Jahr 2011/12 getrennt nach Bauabschnitten aufsteigend sortiert ...	41
Abb. 3-17: Heizwärmeverbräuche der Wohnungen im Jahr 2012/13, getrennt nach Bauabschnitten sortiert.....	42
Abb. 3-18: Monatliche Wärmeabnahme der drei Bauabschnitte.....	43
Abb. 3-19: Gemessener Heizwärmeverbrauch in der Heizperiode 2011/2012 und berichtete Änderungen an den Lüftungsstufen und Raumthermostateinstellungen bei mehrtägiger Abwesenheit (nur Befragte, die ihre Einstellungen an den Thermostatventilen der Heizkörper unverändert lassen), aus [IWU 2012].....	43
Abb. 3-20: Einfluss der Raumtemperatur auf den Heizwärmeverbrauch des ersten Bauabschnitts, dargestellt für das Standardklima des PHPP für Frankfurt sowie das reale Klima 2011/12 und 2012/13 mit realer Personenbelegung	44
Abb. 3-21: Anteil der Heizgradtage ohne Wärmerückgewinnung im gesamten Winter, aufgetragen über den gemessenen Heizwärmeverbrauch	45
Abb. 3-22: Aufnahme des zweiten Bauabschnitts mit geschlossenen Fensterläden an Wintertagen.....	46
Abb. 3-23: thermografische Aufnahme mit mehreren geöffneten Fenstern (oben links gekippt, unten rechts hinter halb herunter gelassenem Rollladen gekippt) bei Außentemperaturen von 2 °C.....	46
Abb. 3-24: Nordseite 1. Bauabschnitt am 25.01.2012 (3,5 Jahre nach Ausflocken); rote Stellen mit erhöhter Temperatur werden durch geöffnete Fenster verursacht.....	48
Abb. 3-25: Thermografie Ostseite 2. Bauabschnitt vor nachträglicher Dämmung der Gefache	48
Abb. 3-26: Quantifizierung der Einflussgrößen auf den Heizwärmebedarf im Vergleich mit dem gemessenen Verbrauch ...	49
Abb. 3-27: Mittlere Raumtemperatur in der Heizperiode und gemessener Heizwärmeverbrauch von zwei Heizperioden der Rotlintstraße und 5 weiteren energetischen Modernisierungen von Bestands-Mehrfamilienhäusern.....	50
Abb. 3-28: Aufsteigend sortierte Warmwassererbräuche in Liter pro Quadratmeter und für das Jahr 2012/13 sowie der zugehörige Kaltwasserverbrauch	51
Abb. 3-29: Aufsteigend sortierte Warmwassererbräuche in Liter pro Person und Jahr für das Jahr 2012/13 sowie zugehöriger Kaltwasserverbrauch.....	53
Abb. 3-30: Exemplarische Zapfprofile Warmwasser des ersten Bauabschnitts in drei Monaten des Jahres 2010	53
Abb. 3-31: Aufsteigend sortierte Haushaltsstromverbräuche im Jahr 2012 (nach Bauabschnitten getrennt, inkl. Lüftungsstromverbrauch).....	54
Abb. 3-32: Aufsteigend sortierte Haushaltsstromverbräuche im Jahr 2012 (ohne Lüftungsstromverbrauch)	55
Abb. 3-33: Geordnete Jahresdauerlinie des Haushaltsstromverbrauchs aller Wohneinheiten (inkl. Lüftungsanlagen)	58
Abb. 3-34: Mittlere Gesamtleistung für Haushaltsstrom in den Monaten Januar bis Dezember (ausgewertet wurden Daten des Jahres 2012) im Tagesverlauf inklusive Hilfsenergie für Wohnungslüftung	59
Abb. 3-35: Geordnete Lüftungsstromverbräuche der Wohnungen über den gesamten Messzeitraum.....	60
Abb. 4-1: Pumpe, die nach Montagearbeiten nicht mehr korrekt isoliert wurde (links), ungedämmter Wärmemengenzähler und Schmutzfänger (rechts)	61
Abb. 4-2: Wärmeerzeugung von BHKW (blau) und Spitzenlastkessel (orange) als gestapelte Linien sowie Wärmeabnahme Nahwärmenetz im Messzeitraum	63
Abb. 4-3: Wärmeerzeugung im Heizhaus sowie Wärmeverluste im Heizhaus und im Nahwärmenetz	63
Abb. 4-4: Außenansicht des Rußfilters [Baumüller]	65
Abb. 4-5: Rußfilter nach der Montage über dem BHKW	65
Abb. 4-6: Messdaten der Brutto- und Nettostromerzeugung des BHKW zwischen 03.12.2012 und 03.05.2013	66
Abb. 4-7: Gesamtnutzungsgrad kleiner Heizöl- und Rapsöl-BHKW nach [ASUE 2011] und Ergebnis BHKW aus der Rotlintstraße	67
Abb. 4-8: Monatswerte der Aufwandszahlen der Erdgas-Brennwerttherme im Messzeitraum	68
Abb. 4-9: Leistung Brennwerttherme: Häufigkeitsverteilung der Stundenmittelwerte im Messzeitraum für Zeiten mit und ohne BHKW-Betrieb	69
Abb. 4-10: Monatsmittelwerte der Temperaturen der Erdgas-Brennwerttherme im Messzeitraum	70
Abb. 4-11: Prozentuale Aufteilung der Einspeisung ins Nahwärmenetz sowie der Abnahme in den Heizkreisen und zur Warmwassernacherwärmung für die Heizperioden 2011/12 und 2012/13	72

Abb. 4-12: Heizwärmeabnahme der Semizentralen und Summe der Wohnungen sowie mittlere Raumtemperatur der Wohnungen und Außentemperatur.....	73
Abb. 4-13: Jahresdauerlinien im Nahwärmenetz (Summe Heizung, Warmwasser, Verteilung für alle 61 Wohneinheiten) für die Heizperioden 2011/12 und 2012/13 sowie Jahresdauerlinie Heizung 2012/13.....	74
Abb. 4-14: Jahresdauerlinien für Nahwärme, Heizung, und Warmwasser-Nacherwärmung im Jahr 2012/13, sortiert nach der Nahwärmeabnahme	74
Abb. 4-15: Jahresdauerlinien für Heizung, Warmwasserwärme gesamt und Warmwassernacherwärmung im Jahr 2012/13	74
Abb. 4-16: Vor- und Rücklauftemperaturen der drei Heizkreise sowie die Außentemperatur im Zeitraum 10.01.13 bis 30.01.13	75
Abb. 4-17: Vorlauftemperatur der drei Heizkreise im Zeitraum vom 01.09.2011 bis 30.04.2013 in Abhängigkeit von der Außentemperatur	76
Abb. 4-18: Monatsweise Einspeisung der Heizwärme in den drei Bauabschnitten und prozentuale Wärmeverluste bei der Heizungsverteilung.....	78
Abb. 4-19: Spezifische Verlustleistung der Heizungsverteilung, monatlich aufgetragen	79
Abb. 4-20: Solarer Deckungsgrad in Abhängigkeit von der Warmwassertemperatur (Berechnungen mit dem Programm Polysun für die Anlagenkonfiguration in der Rotlintstraße).....	80
Abb. 4-21: Mittlerer Wochengang Wärmehalt Warmwasser.....	82
Abb. 4-22: Mittlerer Jahresgang Wärmehalt Warmwasser.....	82
Abb. 4-23: Normierte Wochengänge der Warmwasserverbräuche Rotlintstraße und aus [VDI 6002-1]	82
Abb. 4-24: Normierte Jahresgänge der Warmwasserverbräuche Rotlintstraße und aus [VDI 6002-1].....	82
Abb. 4-25: Tagesmittelwerte der Warmwassertemperaturen der drei Bauabschnitte am Ausgang des Bereitschaftsspeichers	83
Abb. 4-26: Kaltwassertemperaturen in den Semizentralen bei einem Mindestvolumenstrom von 50 Liter/h.....	84
Abb. 4-27: Anlagenschema der Solaranlage (Auszug aus dem Gesamtanlagenschema) [Baumgartner 2009]	85
Abb. 4-28: Monatssummen der Solarwärmeeinspeisung in die Solarspeicher im Messzeitraum	86
Abb. 4-29: Solarer Deckungsgrad bei Warmwasserbereitung.....	87
Abb. 4-30: Warmwassertemperaturen (Ausgang Bereitschaftsspeicher) der drei Bauabschnitte Ende Januar 2013 (Stundenmittelwerte).....	88
Abb. 4-31: Warmwasserbereitung am 19.12.2012	89
Abb. 4-32: Warmwasserbereitung am 03.02.2013	89
Abb. 4-33: Warmwasserbereitung im ersten Bauabschnitt am 29.11.2012.....	91
Abb. 4-34: Warmwasserbereitung im dritten Bauabschnitt am 29.11.2012.....	91
Abb. 4-35: Warmwasserbereitung im ersten Bauabschnitt am 15.04.2013.....	92
Abb. 4-36: Korrigierter solarer Deckungsgrad SD^* im Jahresverlauf sowie Jahresgang der Planwerte	94
Abb. 4-37: Allgemeinstromverbräuche der Häuser 116, 118 und 120 (erster Bauabschnitt) für die Monate August und November 2011.....	96
Abb. 4-38: Allgemeinstromverbräuche der Häuser 122 und 124 (zweiter Bauabschnitt) für die Monate August und November 2011.....	97
Abb. 4-39: Allgemeinstromverbräuche der Häuser 126 und 128 (dritter Bauabschnitt) für die Monate August und November 2011.....	98
Abb. 4-40: Hilfsenergieverbräuche der Semizentralen über die gesamte Messphase.....	99
Abb. 4-41: Erhöhung der Leistungsaufnahme in den Semizentralen in Abhängigkeit der Differenz zwischen hoher und niedriger solarer Einstrahlung	101
Abb. 4-42: Hilfsenergie der drei Semizentralen für fünf Tage im April 2013 mit unterschiedlich starker Solareinstrahlung und Kennzeichnung des Energieverbrauchs der Solaranlagen	102
Abb. 4-43: Zuluftelement im Kellersockel	104
Abb. 4-44: Regelung der Kellerlüftung und Messdatenerfassung unter dem Innenfühler der Regelung.....	104
Abb. 4-45: Mittlere Monatswerte von Kellertemperatur, Kellerfeuchte und Luftwechsel im Jahresverlauf	105
Abb. 4-46: Stundendaten der Messwerte vom 24.08.11 bis 29.08.11 mit Zeitraum höchster Kellerfeuchte	106
Abb. 4-47: Verlauf von Kellertemperatur und -feuchte, sowie Laufzeit Ventilator und Differenz der absoluten Feuchte innen/außen von Mai bis November 2011.....	106
Abb. 4-48: Leistungsaufnahme der Diaphragmalyse über 4 Wochen im Sommer 2012	108
Abb. 4-49: Täglicher Elektroenergieverbrauch Diaphragmalyse im Messzeitraum.....	109

Abb. 4-50: Auswirkungen unterschiedlicher Warmwassertemperaturen auf die Verteilverluste bei Warmwasser bei unterschiedlicher Leitungsdämmung	109
Abb. 4-51: Vergleich der Planwerte für elektrische Energie mit den Messwerten 2012	111
Abb. 4-52: Mittlerer absoluter Gesamtverbrauch Elektroenergie (inkl. Allgemein- und Technikstrom) pro Tag [kWh/d], Stromverbrauch je Haushalt [kWh/(WE*d)] (korrigiert um die Wohnung mit dem Spitzenverbrauch) sowie mittlere Leistung pro Haushalt [W] im Jahresverlauf 2012	112
Abb. 4-53: Volumenströme im Heizhaus im Januar 2011: am 17.01. wurde die Ansteuerung der Therme, wie oben beschrieben, geändert und man erkennt, dass in der Folge der Volumenstrom im Thermenkreis nur noch dann vorhanden ist, wenn die Therme in Betrieb ist.	116
Abb. 4-54: Temperaturen im Warmwasserkreis des ersten Bauabschnitts sowie Betriebszeit der Warmwasser-Nachheizung am 04.03.2013, an dem die Zirkulationspumpe von maximalem Fördervolumen auf die Einstellung der beiden anderen Bauabschnitte reduziert wurde	117
Abb. 4-55: Volumenströme im Solarkreis des ersten und zweiten Bauabschnitts im August 2011 mit nächtlichem Betrieb der Umwälzpumpe Solar im ersten Bauabschnitt	118
Abb. 5-1: Energiebilanz Rotlintstraße: Planwerte, an die Nutzung angepasste PHPP-Werte sowie Messwerte 2012/13	119
Abb. 5-2: Treibhausgas- und Primärenergiebilanz der Rotlintstraße: Planwerte, an die Nutzung angepasste PHPP-Werte, Messwerte 2012/13	123
Abb. 5-3: Vergleich Endenergie, Primärenergie und Treibhausgas-Emissionen vor und nach Modernisierung	125
Abb. 6-1: Realer Jahresgang 2012/13 mit theoretischer Wärme- und Stromerzeugung des BHKW, Erzeugung Therme, gemessenem Gesamtstromverbrauch sowie Differenz zwischen Stromverbrauch und -erzeugung	133

Tabellen

Tab. 1-1: Übersicht der energetischen Maßnahmen an der Gebäudehülle und U-Werte nach Modernisierung	11
Tab. 1-2: Übersicht der wichtigsten Projektbeteiligten	15
Tab. 1-3: Energiebezugsflächen der Wohnungen in Quadratmetern	16
Tab. 1-4: Personenbelegung: Planwert und Ist-Wert	17
Tab. 2-1: Auflistung der installierten Zähler	20
Tab. 2-2: Auflösung und Genauigkeit der Messfühler bzw. Zähler	21
Tab. 2-3: Klimadaten Frankfurt: Temperaturdaten Frankfurt-Ost, Globalstrahlung Riedstadt sowie langjähriges Mittel Frankfurt	25
Tab. 3-1: Korrigierte Raumtemperaturen je Haus in der Heizperiode (Oktober - März)	27
Tab. 3-2: Korrigierte Raumtemperaturen je Haus in der Kernheizperiode (November - Februar)	27
Tab. 3-3: Mittlere Raumtemperaturen je Haus in den Monaten Juli und August	33
Tab. 3-4: Mittlere Raumlufteuchte im Winterhalbjahr (Oktober - März)	35
Tab. 3-5: Mittlere Raumlufteuchte in der Kernheizperiode (November - Februar)	36
Tab. 3-6: Mittlere Raumlufteuchte für das gesamte Jahr (Mai - April, 2009/10: Oktober - September)	40
Tab. 3-7: Mittlere Raumlufteuchte für die Sommermonate Juli-August	40
Tab. 3-8: Summe Heizwärmeverbrauch der einzelnen Bauabschnitte	42
Tab. 3-9: Zusammenstellung verschiedener Personen bezogener Warmwasserverbräuche aus [IWU 2008] im Vergleich zur Rotlintstraße	52
Tab. 3-10: Absolute Haushaltsstromverbräuche im Messzeitraum (inkl. Lüftungsstrom)	55
Tab. 3-11: Flächenbezogene Haushaltsstromverbräuche im Messzeitraum (inkl. Lüftungsstrom)	56
Tab. 3-12: Flächenbezogene Haushaltsstromverbräuche im Messzeitraum (ohne Lüftungsstrom)	56
Tab. 3-13: Personenbezogene Haushaltsstromverbräuche im Messzeitraum (ohne Lüftungsstrom)	56
Tab. 3-14: Mittlere Stromverbräuche für Haushalte unterschiedlicher Größe im Jahr 2012 (mit und ohne Lüftungsstrom) .	57
Tab. 3-15: Vergleich der Messergebnisse zum Haushaltsstromverbrauch mit Literaturangaben energetisch hochwertiger Modernisierungen im Bestand	57
Tab. 4-1: Absolutwerte der Wärmeerzeugung im Heizhaus sowie Verluste im Heizhaus	61
Tab. 4-2: Kennwerte der Wärmeerzeugung im Heizhaus sowie Verluste im Heizhaus	62
Tab. 4-3: Wärme- und Stromerzeugung des BHKW	65
Tab. 4-4: Füllungen der Rapsöltanks (die Füllstandsanzeige wurde erst im Jahr 2012 nachgerüstet) , Betankungsvolumen, Strom- und Wärmeerzeugung sowie Gesamtnutzungsgrad des BHKW	67
Tab. 4-5: Wärmeverteilung im Nahwärmenetz: oben absolute Daten, unten Kennwerte auf Energiebezugsfläche bezogen 71	

Tab. 4-6: Heizwärmeabnahme in den Bauabschnitten, Einspeisung Heizwärme und Verluste Heizungsverteilung	78
Tab. 4-7: Wärmeverluste im Heizkreis gesamt, in der Heizperiode sowie in den Wohnungen nutzbare Verteilverluste	79
Tab. 4-8: Wärmeeinspeisung in das Nahwärmenetz von Anfang Mai bis Ende September	80
Tab. 4-9: Warmwasserverbräuche in unterschiedlichen Jahren in den Semizentralen gemessen	81
Tab. 4-10: Warmwasserverbräuche der Semizentralen und Summe der Wohnungswarmwasserzähler (fehlende Zähler wurden mit Mittelwerten ergänzt)	81
Tab. 4-11: Solare Erzeugung, Nacherwärmung Warmwasser aus dem Nahwärmenetz sowie solarer Deckungsgrad für die drei Bauabschnitte und solare Einstrahlung im jeweiligen Zeitraum	92
Tab. 4-12: Solarer Deckungsgrad SD* für die drei Bauabschnitte	93
Tab. 4-13: Jährliche Kennwerte des Allgemeinstromverbrauchs der sieben Gebäude auf die jeweils versorgte Energiebezugsfläche bezogen	95
Tab. 4-14: Monatssummen des Allgemeinstromverbrauchs der sieben Gebäude im Jahr 2012	95
Tab. 4-15: Monatlicher Verbrauch für Hilfsstrom der Anlagentechnik im Jahr 2012 für die drei Bauabschnitte und das Heizhaus	99
Tab. 4-16: Jahres- und Kennwerte des Verbrauchs für Hilfsstrom der Anlagentechnik für die drei Bauabschnitte und das Heizhaus	100
Tab. 4-17: Mittlere Leistung für Hilfsstrom der Anlagentechnik im Jahr 2012 für die drei Bauabschnitte und das Heizhaus	100
Tab. 4-18: Berechneter Energieverbrauch der Treppenhauslüftung	102
Tab. 4-19: Gemessene Volumenströme der Treppenhauslüftung im ersten Bauabschnitt	103
Tab. 4-20: Monatsmittelwerte der Kellertemperatur- und -feuchte, Differenz der absoluten Feuchte sowie Luftwechsel im Keller und Stromverbrauch der Kellerlüftung	104
Tab. 4-21: Ergebnisse der Trinkwasseruntersuchung vom 25.02.2011 - Kaltwasser [CAL 2011]	110
Tab. 4-22: Ergebnisse der Trinkwasseruntersuchung vom 25.02.2011 - Warmwasser [CAL 2011]	110
Tab. 5-1: Vergleich von PHPP-Bedarfswerten und Messwert 2012/13 bezogen auf die Energiebezugsfläche nach PHPP sowie auf die Fläche A_N der EnEV	121
Tab. 5-2: Verwendete Emissionsfaktoren für Treibhausgase und Primärenergie (bzw. kumulierter Energieaufwand KEA) (nach [IWU 2010])	122
Tab. 5-3: Vergleich der Treibhausgas- und Primärenergieemissionen ohne und mit Haushaltsstrom für unterschiedliche Emissionsfaktoren	124

9 Anhang

Mieterkurzinformation vom Oktober 2012

Hinweise für den Umgang mit Ihrer Passivhauswohnung

Lüftungsanlage und Fenster

Die Lüftungsanlage versorgt Ihre Wohnung mit ausreichend frischer Luft, die Fenster müssen im Winter nicht geöffnet werden und sollten geschlossen bleiben. Wählen Sie je nach Ihren Bedürfnissen die Lüftungsstufe 2 oder 3 aus. Wenn viele Personen anwesend sind, kann Stufe 4 („Party“) sinnvoll sein. Wenn Sie von Frühjahr bis Herbst die Fenster häufig öffnen, können Sie die Lüftung auf Stufe 1 reduzieren.



Heizung

Ihre Wohnung wird über die Lüftungsanlage auch beheizt. Im Winter können Sie die gewünschte Temperatur am Thermostat im Wohnzimmer einstellen. Sollte es draußen sehr kalt sein, kann es erforderlich werden die Lüftungsanlage höher einzustellen. Dadurch erhalten Sie mehr frische Luft und mehr Wärme und können die Raumtemperatur auch schneller anheben. Reduzieren Sie die Stufe der Lüftung jedoch wieder, wenn die niedrigere Stufe ausreicht, da in einer höheren Stufe auch mehr Feuchtigkeit abtransportiert wird.



Schalten Sie im Winter auch bei längerer Abwesenheit nicht auf Stufe 1, da sonst die Temperatur unter Umständen nicht gehalten werden kann.

Ein Passivhaus kühlt ohne Heizung viel langsamer aus als andere Gebäude. Es erwärmt sich aber auch langsamer, wenn die Temperatur abgesenkt wurde. Berücksichtigen Sie dies, wenn Sie z. B. in Urlaub fahren und die Temperatur reduziert haben.

Verschattung

Im Winter soll die Sonne die Wohnung heizen. Deswegen schließen Sie tagsüber bitte nicht die Verschattung. Nur so kann die Sonne auch bei starkem Frost die Wohnung warm halten.

Im Sommer dagegen verschatten Sie die Fenster tagsüber mit den Schiebeläden bzw. den außen liegenden Jalousien. Dann kann die Sonne die Wohnung nicht aufheizen. Innen liegende Verschattung (z. B. Vorhänge) ist dazu weniger geeignet. Wenn Sie zusätzlich bei sehr hohen Außentemperaturen die Fenster tagsüber geschlossen halten und nachts, wenn es draußen kälter ist als in der Wohnung, kräftig querlüften, werden Sie angenehm niedrige Temperaturen erreichen.

Das Passivhaus bietet Ihnen ein komfortables Wohnklima, die Bedienung der Anlagentechnik ist gar nicht schwer.

Für Rückfragen können Sie sich an Herrn Röser wenden.
Telefon: 069 / 2608-280; E-Mail: a.roeser@abg-fh.de

Weitere Hinweise für den Umgang mit Techniken Ihrer Wohnung

Trockenschrank

Mit dem Trockenschrank im Badezimmer kann die Wäsche getrocknet werden. Dazu muss die Wäsche im Schrank aufgehängt und die Schranktüren geschlossen werden. Für die Trocknungszeit sind folgende Dinge wichtig:

- Unter dem Schrank befindet sich ein Schieber, mit dem die Luftmenge eingestellt werden kann. Dieser Schieber darf nie ganz geschlossen werden. Am besten ist ein mittlerer Öffnungsspalt bzw. die Stellung ausprobieren, in der die Wäsche bei der jeweiligen Beladung und der vorhandenen Restfeuchtigkeit am schnellsten trocknet.
- Außerdem sollte die Lüftungsanlage auf Stufe 3 eingestellt sein, wenn Wäsche im Schrank trocknet, damit genügend Luft durch ihn hindurch strömt und die Trocknung nicht zu lange dauert.



Warmwasseranschluss der Waschmaschine

Jede Wohnung besitzt einen Warmwasseranschluss im Badezimmer. Damit können Sie Ihre Stromkosten reduzieren, da das Waschwasser nicht mehr elektrisch, sondern überwiegend mit der Solaranlage auf dem Dach erwärmt wird. Voraussetzung ist entweder eine Waschmaschine mit separatem Warmwasseranschluss oder ein Vorschaltgerät. Diese sorgen dafür, dass zum Waschen warmes Wasser verwendet wird, zum Spülen aber kaltes und stellen die erforderliche Temperatur im Wasserzulauf ein.



Standby-Abschalter

Im Wohnzimmer besitzen Sie an der Tür zum Flur bzw. in der Nähe der Tür zum Schlafzimmer einen Schalter, mit dem alle Geräte im Bereich des Fernsehanschlusses zentral abgeschaltet werden können. Damit ist es möglich, mit einem Schaltvorgang alle Standby-Verbräuche der Fernseh-, Hifi- und sonstiger Anlagen auf null zu reduzieren.

Der Standby-Verbrauch kann einen nennenswerten Anteil Ihrer Stromrechnung verursachen!

