

Mehrfamilienhaus mit Energiegewinn Cordierstraße 4, Frankfurt am Main

Endbericht der Messphase 2014-2016



Ein Bauvorhaben der ABG FRANKFURT HOLDING



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit

FORSCHUNGSINITIATIVE
ZukunftBAU

 *Plus*
Effizienzhaus

Forschungsprogramm

Modellhäuser im „Plus-Energie-Standard“, ein Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)

Förderkennzeichen

PEH-A3-12 10 01 / 12.20

Auftraggeber

Als Unterauftrag der ABG FRANKFURT HOLDING durch das
Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)

Auftragnehmer

INSTITUT WOHNEN UND UMWELT GMBH
Rheinstraße 65
64295 Darmstadt
www.iwu.de

Titel

Mehrfamilienhaus mit Energiegewinn Cordierstraße 4, Frankfurt am Main
Endbericht der Messphase 2014-2016

Autoren

Marc Großklos,
Margrit Schaede,
Eberhard Hinz

Darmstadt, 29.07.2016

Inhalt

Kurzfassung	1
1 Kontext und Zielsetzung	3
2 Gebäudesteckbrief	4
2.1 Allgemeine Daten	4
2.2 Architektur	5
2.3 Wärmeschutz	9
2.4 Anlagentechnik	10
2.4.1 Wärmeversorgung	10
2.4.2 Elektrische Energie	11
2.5 Energiebedarf und Energiedeckung	15
2.6 Bewertung der Effizienz aus Berechnung nach DIN V 18599	16
3 Monitoring	18
3.1 Messkonzept	18
3.2 Verwendete Messtechnik	20
3.2.1 Inbetriebnahme der Messtechnik	23
3.2.2 Änderungen an der Messtechnik	23
3.2.3 Datenausfälle	24
3.3 Dokumentation	25
4 Meteorologische Randbedingungen	26
4.1 Solarstrahlung	26
4.2 Außenlufttemperaturen	27
4.3 Klimabereinigung	29
5 Messergebnisse	32
5.1 Stromverbrauch	32
5.1.1 Stromverbrauch für Hausbetrieb und Haushaltsstrom	32
5.1.2 Stromverbrauch für Messtechnik (projektspezifischen Anteil)	39
5.1.3 Stromverbrauch für Elektromobilität	39
5.2 Stromerzeugung	40
5.2.1 Gegenüberstellung von Stromverbrauch und Stromgewinnung	43
5.2.2 Strombilanz am Übergabezähler	44
5.3 Eigenstromnutzung und Autarkiegrad	45
5.4 Wärmeerzeugung	48

5.5	Wärmeverbräuche	51
5.5.1	Heizwärme	51
5.5.2	Warmwasserbereitung	52
5.5.3	Verteilverluste für Heizung und Warmwasser	53
5.6	Anlagenperformance	56
5.6.1	Wärmeerzeuger	56
5.6.1.1	Solarthermie	56
5.6.1.2	Biomethan-BHKW	58
5.6.1.3	Biomethan-Therme	59
5.6.2	Lüftungsanlage	60
5.6.3	Photovoltaikanlagen	61
5.6.4	Elektrospeicher	61
5.6.4.1	Betriebserfahrungen	62
5.7	Innentemperaturen	65
5.7.1	Innenraumtemperaturen Sommer	67
5.8	Raumluftfeuchte	68
5.9	Primärenergie- und Treibhausgasbilanz	69
6	Kosten	71
6.1	Baukosten	71
6.2	Kosten der energieeffizienten Küchengeräte	73
6.3	Wirtschaftlichkeit	74
7	Bewertung	77
7.1	Energieeffizienz des Gebäudes	77
7.2	Verbesserungspotenziale / Betriebsoptimierung	79
8	Literatur	84
9	Anhänge	85

Kurzfassung

Die ABG FRANKFURT HOLDING hat im Jahr 2013 in der Cordierstraße 4 in Frankfurt am Main ein Mehrfamilienhaus mit 17 Wohneinheiten als Passivhaus mit Energiegewinn in einem bestehenden Quartier errichtet. Die für eine solare Optimierung ungünstige vorgegebene Ausrichtung des Ersatzneubaus stellte besondere Herausforderungen bei der Erreichung eines Energieüberschusses in der Jahresbilanz dar. Das Gebäude nimmt im Rahmen der Förderinitiative ZukunftBau an den Modellvorhaben zum „Effizienzhaus Plus“ teil. Mit einem detaillierten Monitoring sollten die realen Verbrauchs- und Produktionsdaten sowie Möglichkeiten zur Betriebsoptimierung erfasst werden. Der Bezug des Gebäudes durch die Mieter war Frühjahr 2014. Der vorliegende Endbericht dokumentiert die Ergebnisse des Messzeitraums von Juli 2014 bis Juni 2016.

Der Haushaltsstromverbrauch liegt mit ca. $18,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a})$ noch um 7 % unter den ambitionierten Zielwerten des Effizienzhaus Plus von $20 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a})$, der Gesamtstromverbrauch des Gebäudes inkl. Hilfsenergie liegt im Mittel bei $27,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a})$.

Bei der Stromerzeugung zeigt sich ein vergleichsweise ausgeglichener Jahresgang, da sich PV-Anlagen und BHKW in Kombination mit einer thermischen Solaranlage sehr gut ergänzen. Im Auswertzeitraum erzeugte das BHKW ca. 25 % der gesamten elektrischen Energie, die PV-Anlage auf dem Carport ca. 36 %, die PV-Anlage auf dem Südwestdach 24 % und die PV-Anlage auf dem Nordostdach 12 %. Die Fassadenanlage war mit 2 % an der Stromerzeugung beteiligt.

Es wurde insgesamt 83 % mehr elektrische Energie eingespeist, als aus dem Netz entnommen. Auch auf Monatsbasis wurde außer im November 2015 in jedem Monat ein Stromüberschuss erreicht. Auf Tagesbasis wurde an 85 % der Tage ein Stromüberschuss erreicht.

Der Eigenverbrauch im Mittel über die Messjahre bei einem 42 % bzw. 50 %. Das Gebäude erreichte einen Autarkiegrad von 71 % im ersten und 78 % im zweiten Messjahr. Auch im Winter 2014/15, in dem der elektrische Energiespeicher nicht in Betrieb war, erreichte das Gebäude einen Autarkiegrad von 73 % aufgrund der Stromerzeugung des BHKW.

Im Sommer stammte trotz noch nicht optimaler Regelung der Anlage der größte Teil der benötigten Wärme aus der Solarthermie-Anlage, im Winter dominiert das Biomethan-BHKW die Wärmeerzeugung. Im gesamten Zeitraum lieferte die Solarthermie 31,4 % der Wärme, der Biomethan-Spitzenlastkessel 1,7 % und das BHKW die verbleibende Wärme.

Der Heizwärmeverbrauch lag im Mittel bei $20,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBF}} \cdot \text{a})$ / $16,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2 A_N \cdot \text{a})$. Werden das tatsächliche Klima, die gemessenen Raumtemperaturen und der Mehrverbrauch durch geringere innere Lasten aufgrund der sparsamen Stromnutzung mit berücksichtigt, liegt der gemessene Verbrauch ca. $3,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBF}} \cdot \text{a})$ über dem zu erwartenden Bedarfswert nach PHPP.

Der Warmwasserverbrauch lag bei $16,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBF}} \cdot \text{a})$ / $13,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2 A_N \cdot \text{a})$, die Zirkulationsverluste aufgrund der Rohr-in-Rohr-Zirkulation bei ca. $1,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBF}} \cdot \text{a})$ / $0,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2 A_N \cdot \text{a})$. Bezogen auf die Wärmeabnahme der Frischwasserstation ergeben sich Verluste der Warmwasserbereitung in Höhe von 4,2 % für die Zirkulation und 6,7 % für die Frischwasserstation.

Die Speicherverluste (inkl. Anschlussleitungen) konnten durch die nachträgliche Dämmung des Speicherbodens im April 2015 von 13,5 W/K deutlich auf 7,5 W/K je Speicher reduziert werden. Dadurch reduzierte sich der Wärmeverlust inklusive der Anschlussleitungen in der Jahresbilanz um ca. 640 kWh.

Die Arbeitszahl (Wärmeertrag zur elektrischen Hilfsenergie) der thermischen Solaranlage lag im Mittel bei 20,4. Außerhalb der Heizperiode werden Arbeitszahlen zwischen 30 und 40 erreicht, im Kernwinter mit sehr geringen Solarerträgen jedoch nur Werte zwischen 1 und 4.

Die Aufwandszahl für das BHKW lag bei 1,19 bzw. bei einem Nutzungsgrad von 94,7 % auf H_i bezogen. Die Biomethan-Therme war kaum in Betrieb und erreichte in der Betriebszeit eine Aufwandszahl von 1,11.

Die Innentemperaturen in den Wohnungen lagen im Mittel in beiden Heizperioden bei 22,3 °C, die „kälteste“ Wohnung sank nicht unter 20,5 °C ab. Im Sommer lag die Spanne der Raumtemperaturen zwischen den Wohnungen auf einer ähnlichen Größe, wie im Winter, die Mitteltemperatur erreichte im Sommer 2015 bei 25,4 °C. Zur Verbesserung des thermischen Komforts im Sommer wurde eine Mieterinformation über richtige Lüftung und Verschattung im Frühjahr 2015 verteilt (siehe Anhang C).

Die Primärenergiegutschrift durch Einspeisung ist sowohl bei Verwendung von Primärenergiefaktoren nach Effizienzhaus Plus als auch nach dem Konzept des Passivhauses mit Energiegewinn höher als der Primärenergiebezug, so dass schon im ersten Messjahr ein primärenergetischer Überschuss von 27,0 kWh/(m²A_N*a) (Effizienzhaus Plus) erreicht wurde. Der Planwert von 15,3 kWh/(m²A_N*a) wurde somit deutlich überschritten. Aufgrund des durchgängigen Betriebs des Elektrospeichers im zweiten Messjahr und die durch höheren Eigenverbrauch verringerte Netzeinspeisung und außerdem geringeren Netzbezug lag der Primärenergieüberschuss nur noch bei 22,2 kWh/(m²A_N*a). Die Verbräuche haben sich in diesem Zeitraum aber kaum verändert und die Stromerzeugung sank lediglich um 1,4 kWh/(m²A_N*a). Dies zeigt, dass die Regelungen zur Bilanzierung von Gebäuden mit Energiegewinn besonders bezüglich von Gutschriften durch Netzeinspeisung überdacht werden sollten.

Insgesamt konnte das Gebäude die Ziele der Planung auch in der Praxis bestätigen, obwohl die Nutzer deutlich höhere Temperaturen eingestellt hatten, als in den Standardrandbedingungen der Energiebilanz angesetzt. Durch Veränderungen an der Anlagentechnik im zweiten Betriebsjahr konnten zusätzliche Optimierungen durchgeführt werden.

1 Kontext und Zielsetzung

Das hier betrachtete Mehrfamilienhaus mit 17 Wohneinheiten wurde in der Cordierstraße 4 im Frankfurter Gallusviertel in einem bestehenden Quartier errichtet. Es soll vollständig mit regenerativen Energien versorgt werden und in der Jahresbilanz mehr Energie erzeugen als es im gleichen Zeitraum verbraucht. Das Ziel einen Energieüberschuss zu erwirtschaften, stellt bei diesem Haus jedoch eine besondere Herausforderung dar: Als Ersatzneubau gliedert sich das Gebäude in den bestehenden Stadtteil ein und besitzt daher mit einer Ost-West-Ausrichtung sowie Verschattung durch Baumbestand und Nachbarbebauung erschwerende Rahmenbedingungen für die Solarenergienutzung. Trotzdem kann durch die konsequente Reduzierung des Energieverbrauchs in allen Bereichen und den Einsatz regenerativer Energien ein Energieüberschuss in der Jahresbilanz erreicht werden.

Dazu wird in der Cordierstraße ein spezielles Effizienzkonzept umgesetzt: Aufbauend auf dem Passivhausstandard wird der Energiebedarf auch in den Bereichen Wärmeverteilung und -speicherung, Wärme für Warmwasser, Haushalts- und Hilfsstrom gesenkt. Als regenerative Energien werden Photovoltaik, Solarthermie und ein mit Biomethan betriebenes BHKW eingesetzt. Die Kombination dieser Technologien hat zusätzlich den Vorteil, dass Strombedarf und -erzeugung im Jahresverlauf nahezu ausgeglichen sind. Unterstützt durch einen elektrischen Energiespeicher kann auch der tägliche Ausgleich von Bedarf und Erzeugung wesentlich erhöht werden.

Das Projekt hat den Anspruch, die Möglichkeiten des Plusenergiehaus-Standards in einem vermieteten Mehrfamilienhaus unter typischen Randbedingungen in der Stadt bei begrenztem Kostenbudget aufzuzeigen. Besondere Fragestellungen sind das Zusammenspiel von regenerativ betriebenem BHKW und Solarthermie, die erreichte Effizienz der eingesetzten Techniken und das Betriebsverhalten der verschiedenen Strom- und Wärmeerzeuger in der Praxis.

2 Gebäudesteckbrief

Im folgenden Kapitel werden die Basisdaten des Gebäudes, die Architektur, der Baukörper, die Anlagentechnik und die Ergebnisse der Energiebilanzberechnungen dargestellt.

2.1 Allgemeine Daten

Die wesentlichen Kenndaten des Gebäudes sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Kenndaten des Gebäudes Cordierstraße 4, 60326 Frankfurt am Main

Baujahr:	2013
Bruttogrundfläche	1611,05 m ²
Beheizte Nettogrundfläche	1170 m ²
Energiebezugsfläche EBF des PHPP	1219,4 m ²
Gebäudenutzfläche A _N	1.458,4 m ²
Wohnfläche WF	1238 m ²
Beheiztes Gebäudevolumen	4296,91 m ³
Hüllflächenfaktor A/V	0,39 m ⁻¹
Breitengrad:	50,7 °N
Längengrad:	8,41 °O
Höhenlage:	112 m über NN
Mittlere Jahresaußentemperatur:	11,9 °C (2014/15) 12,3 °C (2015/16)
Mittlere Außentemperatur im Winter (Oktober 2014 – März 2015):	6,6 °C (2014/15) 7,0 °C (2015/16)
Gradtagzahl (G20/12) am Standort	2504 (2014/15) 2513 (2015/16)
TRY - Klimazone / Referenzstation:	TRY 12 / Frankfurt Flughafen

Bauherr des Gebäudes ist die ABG FRANKFURT HOLDING. Die weiteren Beteiligten des Vorhabens in der Planungsphase, sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Übersicht der wichtigsten Projektbeteiligten

Eigentümer und Bauherr	ABG FRANKFURT HOLDING GmbH, Frankfurt
Architektur, Detailplanung, Bauleitung	faktor10 Gesellschaft für Siedlungs- und Hochbauplanung GmbH, Darmstadt
Tragwerksplanung, Brandschutz	Bauart Konstruktions GmbH & Co. KG, Lauterbach
Fachplanung Heizung, Lüftung, Sanitär	Ingenieurbüro Schäfer, Stromberg
Fachplanung Elektro	Steinigeweg Planungs GmbH & Co. KG, Darmstadt
Schallschutz	ITA Ingenieurgesellschaft für technische Akustik mbH, Wiesbaden
Begleitforschung, Konzept Monitoring, wissenschaftliche Erfolgskontrolle	Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt
Förderung der Begleitforschung Planungsphase	Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Wiesbaden
Förderung der messtechnischen Evaluation und spezielle Techniken	Forschungsinitiative ZukunftBau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) / Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)
	Weitere Förderung im Rahmen des Programms „Auf dem Weg zum Effizienzhaus Plus“ der Deutschen Energieagentur / KfW

2.2 Architektur

Die Architektur des Gebäudes vereint die Anforderungen von zeitgemäßem Wohnen, den städtebaulichen Vorgaben des fast 90-jährigen Quartiers im Frankfurter Gallusviertel und den energetischen Anforderungen des Passivhausstandards (Bild 1 bis Bild 8).



Bild 1: Westansicht des Gebäudes



Bild 2: Südansicht des Gebäudes

Großer Wert wurde auf die Diversifizierung des Wohnungsangebots gelegt, um das Gebäude für unterschiedliche Nutzergruppen attraktiv zu gestalten. Es soll Familien mit Kindern genauso ansprechen, wie

Single-Haushalte und Senioren. Dafür wurde eine Laubengangkonzept mit einem vertikalen Erschließungsturm gewählt, welches nicht nur eine barrierefreie Erschließung vom Bürgersteig bis zu den Wohnungen ermöglicht, sondern bedingt durch die entstehende Halböffentlichkeit Hausanonymität verhindert und Kommunikation fördert.



Bild 3: Ostansicht des Gebäudes mit Laubengangerschließung



Bild 4: Die Erdgeschosswohnungen verfügen über eine Terrasse und kleine Mietergärten

Unterschiedliche Wohnungstypen, wie zum Beispiel Maisonette-Wohnungen, die jeweils das EG mit dem 1. OG verbinden und einen eigenen Gartenanteil wie bei einem Reihnhaus besitzen oder 2-Zimmer-, 3-Zimmer- und 4-Zimmer-Etagenwohnungen im 2. bis 4. OG unterstreichen das differenzierte Angebot für unterschiedliche Nutzernachfragen.



Bild 5: Alle Wohnungen sind hell und besitzen Balkon oder Terrasse



Bild 6: Alle Wohnungen sind mit Küchen mit hocheffizienten Elektrogeräten ausgestattet

Mit insgesamt 17 Wohneinheiten auf 1.238 m² vermieteter Wohnfläche und höchstem energetischen Standard dient dieses Gebäude als Vorbild für zukunftsweisende Bauweisen in der Stadt verbunden mit einer behutsamen städtischen Gebäudeerneuerung. Denn dieses Gebäude ersetzt mit weitgehend gleichen Dimensionen einen Vorläuferbau, der aufgrund statischer Probleme abgerissen wurde und kann dadurch als eine "Neubau-Sanierung" bezeichnet werden.

Die Photovoltaikanlagen auf Dach, Carport und an der Südfassade wurden in das Erscheinungsbild des Gebäudes integriert und zeigen, dass das hier umgesetzte Plusenergie-Konzept gut in das bestehende Quartier passt.



Bild 7: Südansicht des Gebäudes mit fassadenintegrierter Photovoltaik



Bild 8: Ein zentrales Treppenhaus mit Aufzug ermöglicht barrierefreien Zugang zu den Wohnungen

Das Plusenergie-Konzept führt zwar zu Brutto-Herstellungskosten, die bei ca. 2.700 €/m² Wohnfläche (Kostengruppen 300/400) liegen (siehe Kapitel 6), jedoch werden die Mehrkosten durch Erlöse aus dem Verkauf von Energie an die Nutzer zum Teil kompensiert.

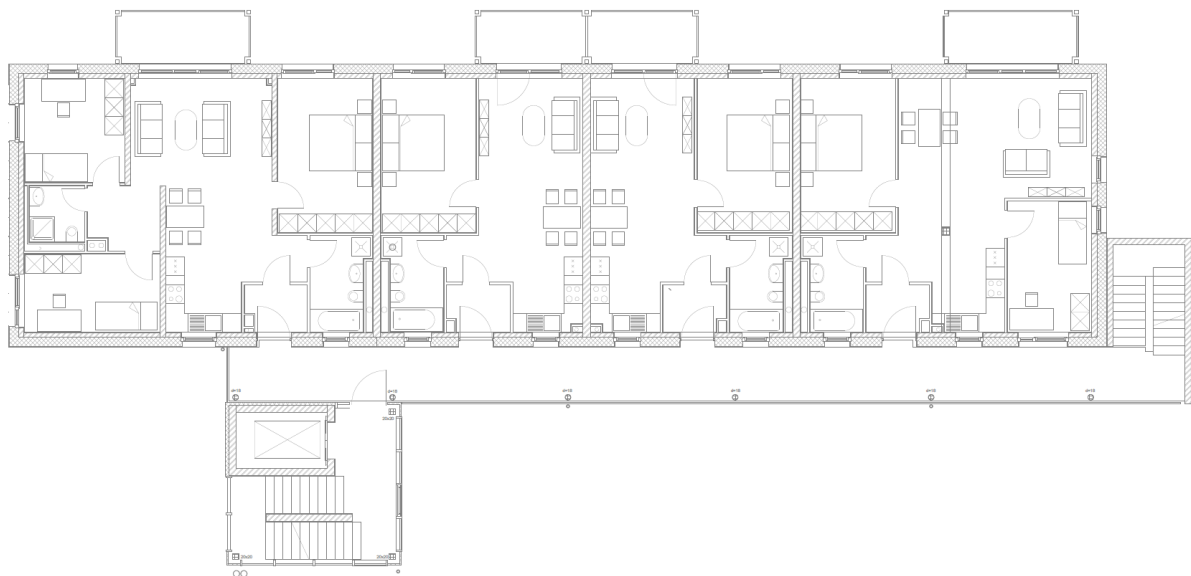


Bild 9: Gebäudegrundriss 2-4 OG [faktor10]



Bild 10: Schnitt durch das Gebäude und das Treppenhaus [faktor10]

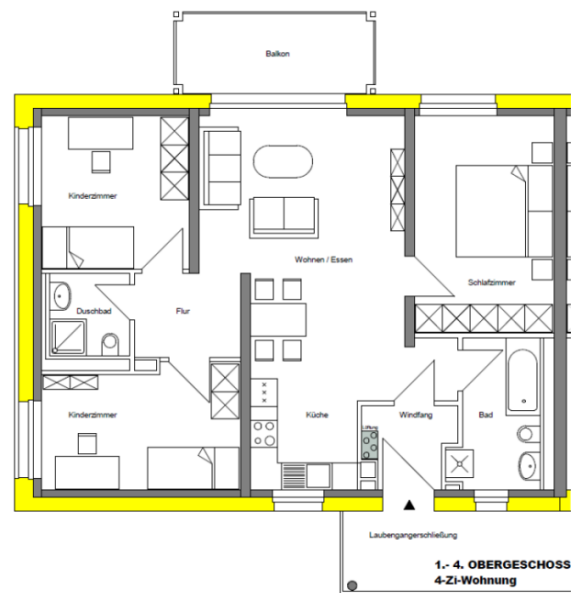
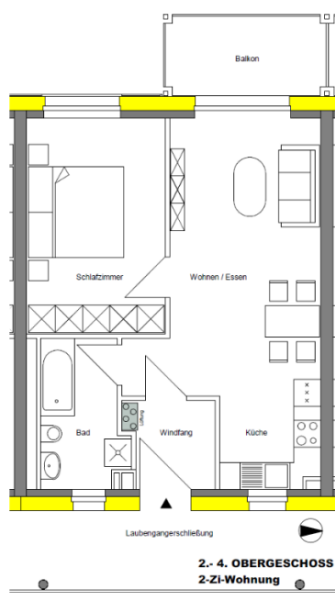


Bild 11: Exemplarische Grundrisse: Grundriss 2-Zimmer-Wohnung (links) und Grundriss 4-Zimmer-Wohnung (rechts) [faktor10]

2.3 Wärmeschutz

Das Gebäude wurde als Passivhaus errichtet (siehe Tabelle 3). Dies ist grundlegender Bestandteil des Effizienzkonzeptes. Die Bauteile leisten mit ihrem sehr hohen Wärmeschutz einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung des Heizwärmebedarfs.

Auch die Architektur leistet hierzu ihren Beitrag: mit einer Erschließung über Laubengänge und vorgestellte Treppenhäuser außerhalb der thermischen Hülle besteht kein Heizwärmebedarf für diese Bereiche des Gebäudes. Wärmebrücken werden weitestgehend vermieden: Beginnend bei einem langjährig von faktor10 erprobten Konzept zur Reduzierung der Wärmebrücken im Bereich der Bodenplatte, über vorgestellte Balkone und den Anschluss der Laubengänge an das Gebäude mittels einer passivhaus-tauglichen thermischen Trennung werden die Wärmebrücken weitestgehend reduziert. Der Bau des Gebäudes wurde durch passivhauserfahrene Firmen vorgenommen, so dass die von den Planern optimierten Details zur Reduzierung der Wärmebrücken in den Bereichen der Fenster, Anschluss der Attika und Verankerung der solaren Energieerzeugungsanlagen sehr gut ausgeführt und Wärmebrücken weitestgehend entschärft werden konnten. Die Bodenplatte musste aus statischen Gründen auf Bohrpfähle aufgelagert werden, die die Dämmung unter der Bodenplatte durchstoßen und eine nicht vermeidbare Wärmebrücke darstellen. Zusätzlich wurde zur Erreichung einer hohen Luftdichtigkeit ein detailliertes Konzept erstellt. Für den sommerlichen Wärmeschutz wurden alle süd- und westorientierten Fenster mit Verschattungselementen ausgestattet.

Tabelle 3: Bauteilaufbauten und U-Werte

Bauteil	Aufbau/Material	Dicke [mm]	U-Wert [W/(m²K)]
Außenwand West und Nord (von innen nach außen)	Innenputz	10	0,103
	Kalksandstein SRD 2,0	175	
	Dämmung EPS (WLS 032)	300	
	Außenputz	15	
Außenwand Süd und Ost (von innen nach außen)	Innenputz	10	0,127
	Kalksandstein SRD 2,0	175	
	Dämmung Mineralwolle	300	
	Außenputz	15	
Fenster	Passivhausfenster mit Kunststoffrahmen	-	0,70
Dach (von oben nach unten)	Substrat	100	0,077
	Folienabdichtung	3	
	Dämmung EPS (WLS 032)	400	
	Betondecke	260	
	Innenputz	10	
Bodenplatte (von oben nach unten)	Linoleum	5	0,105
	Trittschalldämmung	10	
	Estrich	70	
	Trittschalldämmung	15	
	Beton	250	
	Dämmung XPS (WLS 035)	300	

2.4 Anlagentechnik

2.4.1 Wärmeversorgung

Die solarthermische Anlage mit 40 m² Vakuumröhrenkollektoren erzeugt ca. 60 % der Wärme, die für Warmwasser benötigt wird. Das BHKW (5 kW_{el}, 12,3 kW_{th}, zusätzlich 2,3 kW_{th} über einen Kondenser) ist für die Bereitstellung des gesamten darüber hinausgehenden Wärmebedarfs von Heizung und Warmwasser zuständig. Durch den Einsatz von 2 großen Pufferspeichern (insgesamt ca. 6 m³) kann die solarthermische Anlage hohe Erträge liefern und ein BHKW mit geringer thermischer Leistung gewählt werden. Der Gas-Brennwert-Kessel (35 kW) ist als Reserve vorgesehen und soll nur bei Wartung/ Ausfall des BHKW zum Einsatz kommen. Die Kenndaten der Wärmeversorgung sind in Tabelle 4 dargestellt.



Bild 12: Wärmeerzeugung durch Solarthermie (links) und Biomethan-BHKW (rechts)

Die Wärmeübergabe im Gebäude erfolgt auf 5 % der Fläche über statische Heizkörper (in den Bädern) und zu 95 % über Luftheizung. Die Heizkörper und die Heizregister, die in den dezentralen Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung installiert sind, werden aus dem Pufferspeicher versorgt.



Bild 13: Diaphragmalyse (links) und Pufferspeicher Wärme (rechts)

Eine Zellmembranelektrolyse („Diaphragmalyse“) (siehe Bild 13 links) wird zur Hygienisierung des Wassers verwendet. Auf diese Weise kann auf eine thermische Desinfektion verzichtet werden, so dass eine Reduzierung der Warmwassertemperatur auf 48°C möglich wird, was die Verteilverluste deutlich reduziert. Der Einsatz dieser Technik wurde mit dem Gesundheitsamt Frankfurt abgestimmt.

Das Bio-Methan für das BHKW (auch die Gas-Brennwert-Therme wird mit Bio-Methan versorgt) wird von der Firma Infranova in Frankfurt-Höchst nur wenige Kilometer vom Gebäude entfernt aus Reststoffen hergestellt, auf Erdgasqualität aufbereitet und ins Gasnetz eingespeist. Eingespeiste und abgenommene Gasmengen werden im Rahmen des Biogasregisters der Deutschen Energieagentur bilanziert und überwacht. So ist sichergestellt, dass die entnommenen Biomethanmengen in der Jahresbilanz auch in das Gasnetz eingespeist wurden. In Anhang E ist der Auszug des Biogasregisters für 2015 zu finden.

Der Heizwärmebedarf des Gebäudes ist so gering, dass es über eine Warmmiete vermietet wird. In der Warmmiete sind auch die Kosten für die Trinkwassererwärmung enthalten.

Tabelle 4: Kenndaten der Anlagentechnik

Eingesetzte Technologien	Erläuterung und technische Daten
Wärmerzeuger	BHKW, Senertec Dachs G 5.0 Low NOx Brennwert thermische Leistung: 14,6 kW (12,3 kW + 2,3 kW bei Brennwertnutzung) elektrische Leistung: 5,0 kW Hilfsenergie im Betrieb: 0,12 kW elektrischer Wirkungsgrad: 26 % thermischer Wirkungsgrad: 74 % (63 % + 11 % durch den Kondensator)
Wärmeerzeuger Reserve	Gas-Brennwertgerät Paradigma Modula III bis 35 kW
Thermische Speicher	Feuron 2 x 2.900 l
Lüftungsanlagen	Dezentrale Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, Hersteller Vallox: 2-Zimmer-Wohnungen: 6x KWL80SC größere Wohnungen: 11x KWL90SC effektiver Wärmebereitstellungsgrad 75 % bzw. 80 %
Solarthermie	Paradigma Aqua Plasma 19/34 Vakuumröhrenkollektor mit CPC-Spiegel 3 Reihen à 4 Kollektoren (40,2 m ² Bruttokollektorfläche / 36,0 m ² Aperturfläche, Neigung 30°, Ausrichtung Süd mit 25° Abweichung Richtung Ost
Elektrischer Speicher	ASD Sonnenspeicher LiFePo4 Typ Hi Power 3,2 Volt, 300 Ah – 40 St. Inverter: Studer Innotec 3 x 7 kVA = 21 kVA Dauerlast Nutzbare Nettokapazität = 27 kWh (DC) bei 25 % DoD

2.4.2 Elektrische Energie

Der Energiebedarf wird auch im Bereich der elektrischen Energie reduziert. So werden im Bereich der Anlagentechnik energieeffiziente Pumpen eingesetzt. Auch bei Fahrstuhl, Lüftungsanlagen und Allgemeinbeleuchtung wurde auf hohe Energieeffizienz geachtet. Zusätzlich wird für die Mieter des Gebäudes die Grundlage für einen möglichst geringen Haushaltsstromverbrauch geschaffen: Es werden hocheffiziente Haushaltsgeräte in den Küchen vorinstalliert und die Wohnungen verfügen über Trockenschränke, so dass kein Wäschetrockner benötigt wird. Alle Räume wurden außerdem mit hocheffizienter LED-Beleuchtung ausgestattet. Mieter können auch weiterhin eigene Beleuchtung einsetzen,

es wird jedoch davon ausgegangen, dass den meisten Mietern die vorinstallierte Beleuchtung zusagt. Zusätzlich sind schaltbare Steckdosen mit Standby-Abschalter in den Räumen vorhanden, um den Standby-Verbrauch der Unterhaltungselektronik zu reduzieren.



Bild 14: Trockenschrank im Badezimmer jeder Wohnung



Bild 15: Energieeffiziente LED-Beleuchtung in den Räumen



Bild 16: Standby-Abschalter im Wohnzimmer

Die Erzeugung der elektrischen Energie erfolgt über die Photovoltaikanlagen (insgesamt ca. 49,7 kW_p an Fassade, Dach und Carport, siehe Tabelle 5) zusammen mit dem Biomethan-BHKW (5kW_{el}). Entscheidender Vorteil dieses Konzeptes ist, dass sich Photovoltaik und BHKW bei der Stromerzeugung sehr gut ergänzen. Da die solarthermische Anlage im Sommer den Wärmebedarf für Warmwasser deckt, wird das wärmegeführte BHKW hauptsächlich in den Wintermonaten betrieben. Somit erzeugt es genau dann Strom, wenn die Photovoltaik nur geringe Erträge liefert. Um diese Energie vorrangig im Gebäude selbst zu nutzen, wird ein elektrischer Energiespeicher mit 30,7 kWh nutzbarer DC-Kapazität eingesetzt (27 kWh AC-Kapazität).



Bild 17: Photovoltaik auf Dach (links), Carport (Mitte) und an der Südfassade (rechts)



Bild 18: Außenansicht des elektrischen Energiespeichers



Bild 19: Lithium-Ionen-Batterien des elektrischen Energiespeichers sowie Batteriewechselrichter

Tabelle 5: Kenndaten der PV-Anlagen

Anlage / Ausrichtung	Anzahl Module	Leistung in kWp	Ausrichtung (W -90°; S 0°; O +90°)	Neigung	Modul	Wechselrichter
Dach Nordost	28	8,12	115°	15°	LG290N1C	SMA Sunny Tripower STP 7000TL-20
Dach Südwest	52	15,08	-65°	15°	LG290N1C	SMA Sunny Tripower STP 15000TL-10
Carport Süd	82	23,78	25°	10°	LG290N1C	2x SMA Sunny Tripower STP 12000TL-10
Fassade Süd	8	2,7	25°	90°	Solarnova SOL 338 K	Fronius Galvo 2.5-1
SUMME	170	49,68				

Das Anlagenschema ist in Bild 20 dargestellt.

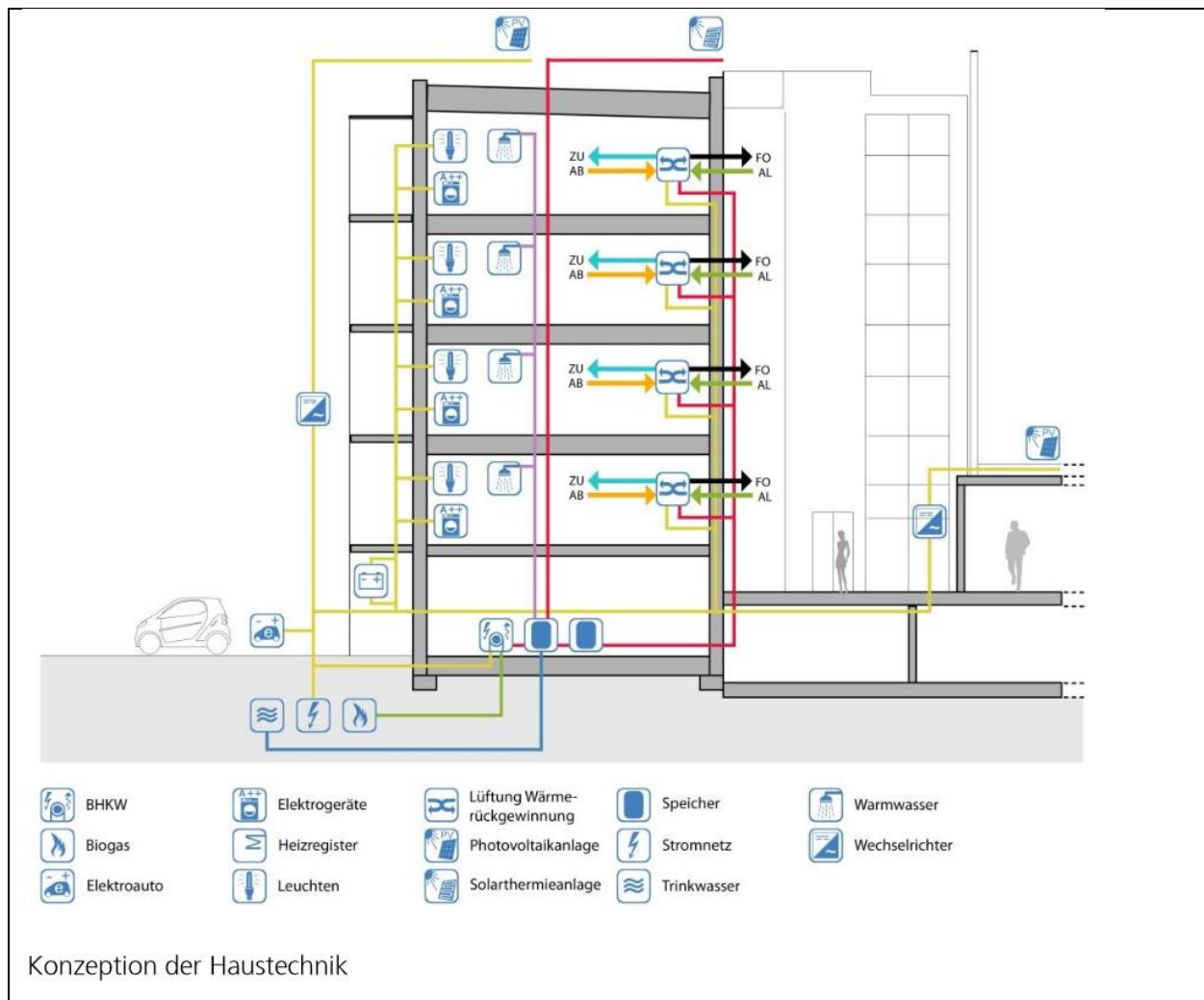


Bild 20: Konzeption der Haustechnik (Abbildungsnachweis: Fraunhofer IBP)

2.5 Energiebedarf und Energiedeckung

Die Energiebilanz des Gebäudes wurde sowohl mit dem Passivhaus-Projektierungs-Paket (PHPP) als auch nach DIN V 18599 berechnet. Die Ergebnisse nach PHPP sind in [Schaede, Großklos 2013] dokumentiert - im Folgenden werden die Ergebnisse nach DIN V 18955 dargestellt, die mit ZUB Helena Ultra nach EnEV 2009 berechnet wurden.

Tabelle 6: Energiebedarfsdaten nach DIN V 18599

Name	Heizung	Warm- wasser	Lüftung	Kühlung	Licht	Haushalt + Kochen	sonstiges
Nutzenergie Q _{x,b} [kWh/a]	13.230	18.722		-	23.402		
Wärme- /Kälteabgabe d. Erzeugung Q _{x,outg} [kWh/a]				-			
Strombedarf [kWh/a]	3.441	110	5.442	-	23.402		
	Gesamt 32.395 kWh/a						

Die prognostizierte jährliche Elektrizitätserzeugung der verschiedenen PV-Anlagen der Cordierstraße sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: PV-Erzeugung der verschiedenen PV-Anlagen

Deckung (geplant)	
Komponente	[kWh/a]
PV-Dach Ost-Ausrichtung	6.270
PV-Dach West-Ausrichtung	13.100
PV-Carport	18.428
PV-Fassade	1.130
Gesamt	38.928

2.6 Bewertung der Effizienz aus Berechnung nach DIN V 18599

In Tabelle 8 sind die spezifischen Bedarfswerte für die Cordierstraße 4 dargestellt. Die Wärme für Warmwasser und Heizung wird in diesem Gebäude durch Solarthermie in Kombination mit einem Biomethan-BHKW bereitgestellt.

Tabelle 8: Spezifischer Energiebedarf der Cordierstraße 4, Frankfurt.

Teilabschnitt	Erläuterung	Energie [kWh/a]	Spez. Energie [kWh/(m ² A _N *a)]
Nutzenergie	Nutzenergiebedarf der Räume für Heizung, Trinkwarmwasser und Kühlung	31.952	21,9
Erzeugernutzwärmeabgabe	Wärme-/ Kälteabgabe der Erzeuger an das Verteilnetz oder die Speicher für Heizung, Trinkwarmwassererwärmung und Kühlung	46.199	31,7
Endenergie Wärmeerzeuger	keine sinnvollen Werte aus DIN V 18599:2007 vorhanden, da Biomethanbezug bereits durch Gutschrift bei der Stromerzeugung verrechnet wurde		
Endenergie Haustechnik	Strombedarf für Heizung, Trinkwarmwassererwärmung und Kühlung sowie Hilfsenergie für die Anlagentechnik wie Pumpen, Ventilatoren und Regelungen	8.993	6,2
Endenergie Haushaltsstrom	Erweiterter Bilanzraum Effizienzhaus Plus für Beleuchtung und Haushaltsgeräte	23.402	16,1
Primärenergie Haustechnik	Nicht erneuerbarer Anteil des Primärenergiebedarfs der Endenergie für Haustechnik	21.584	14,6
Primärenergie Haushaltsstrom	Nicht erneuerbarer Anteil des Primärenergiebedarfs für Haushaltsstrom	56.166	38,5
Gutschrift für Stromeinspeisung	43 % des PV-Stroms von 38.928 kWh/a werden eingespeist	-46.824	-32,1
Abzug für selbstgenutzten Strom	57 % des PV-Stroms werden selbst genutzt und mit dem PE-Faktor von Netzbezug vom PE-Bedarf abgezogen	-53.293	-36,5
Primärenergiebilanz	Primärenergiebedarf - (Gutschrift + Abzug)	-22.367	-15,3

Das Gebäude bezieht 27,5 kWh/(m²A_N*a) Biomethan für das BHKW, dessen Stromerzeugung nach DIN V 18599:2007 Teil 9 Punkt 2 „als Abzug vom Endenergiebedarf des Wärmeerzeugers“ verrechnet wird¹.

¹ Der Antrag für die Teilnahme am Feldversuch zum Effizienzhaus Plus wurde im Dezember 2012 nach den damals geltenden Richtlinien nach EnEV 2009 / DIN V 18599:2007 gestellt.

Daher entsteht hier rechnerisch kein Endenergiebedarf für die Wärmeerzeugung. Dies ist jedoch unter dem Aspekt, dass der direkte Vergleich des Endenergiebedarfs als Kriterium für Plus-Energie lediglich bei nur-Strom-Gebäuden praktikabel ist (vgl. [Fisch et. al. 2012] und [Voss et al. 2010]) für die Bewertung nicht zielführend.

Die Aufwandszahlen, die für die Cordierstraße 4 bestimmt werden können, sind in Tabelle 9 dokumentiert.

Tabelle 9: Aufwandszahlen für Haustechnik, angepasst für die Cordierstraße 4

Bewertete Teilabschnitte	Aufwandszahlen / Arbeitszahlen [kWh/kWh]
Effizienz des BHKW (Herstellerangabe) (Endenergie Erzeuger / Erzeugerabgabe) Biomethan Input / abgegebene Wärme + Strom BHKW	Mit Brennwertnutzung: 1 Ohne Brennwertnutzung: 1,12 In der Cordierstraße ist ein Kondensator für die Brennwertnutzung eingebaut
Effizienz der Therme (Herstellerangabe)	1 (bezogen auf H_i)
Effizienz Solarkreis (Input Strom + Beheizung Kollektor/ Wärmeenergie)	keine Herstellerangaben für Hilfs- stromeinsatz Regelung, Pumpen und USV verfügbar, Beheizung der Kollekt- oren im Winter: Herstellerangabe 3 % des jährlichen Wärmeertrages

3 Monitoring

3.1 Messkonzept

Das Messkonzept der Cordierstraße 4 sieht vor, dass alle wesentlichen Energieströme im Gebäude (Wärme für Heizung und Warmwasser, elektrische Energie, Bezug von Biomethan, Wasser) sowie die Wetterbedingungen kontinuierlich erfasst und aufgezeichnet werden (Bild 21).

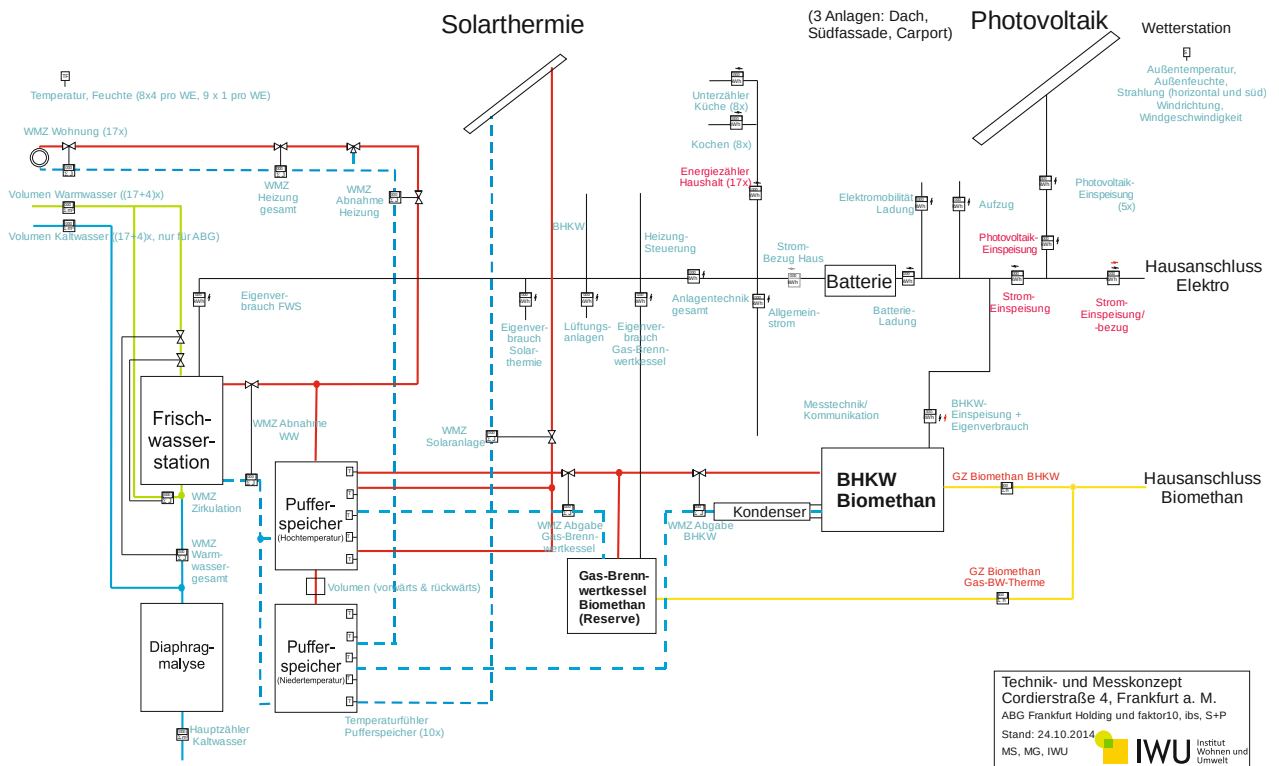


Bild 21: Messkonzept Cordierstraße 4 mit allen Zählern und Sensoren

In allen Wohnungen werden jeweils Heizwärme, Warm- und Kaltwasser, Raumtemperatur und -feuchte im Wohnzimmer sowie Haushaltsstrom gemessen. In den Südwohnungen mit zwei separaten Steigsträngen befinden sich weitere Wasserzähler. In 8 ausgewählten Wohnungen (Bild 22) werden zusätzlich der Energieverbrauch des Herdes und der Küche gemessen sowie Raumtemperaturen und -feuchten in weiteren Räumen. Insgesamt wurden 45 Temperatur-/Feuchtesensoren in den Wohnungen platziert.

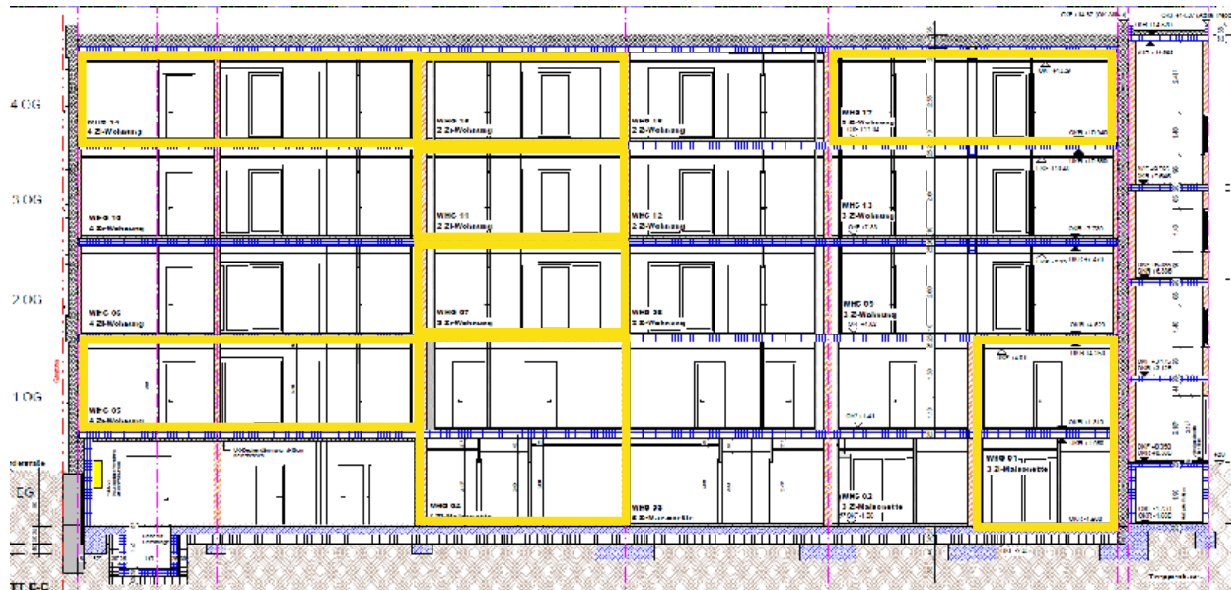


Bild 22: Lage der detailliert vermessenen Wohnungen in gelb markiert (Südseite des Gebäudes links)

Im Bereich der Anlagentechnik wurden, wenn möglich, vor und hinter jedem Erzeuger Zähler installiert, sodass eine Bilanzierung der Anlageneffizienz möglich ist. Außerdem verfügen alle Verbraucher über eigene Zähler. An den beiden Pufferspeichern wurden je 5 Temperaturfühler über die Höhe der Speicher verteilt, um die Temperaturschichtung zu erfassen. Zwischen den Puffern befinden sich zwei Ultraschallvolumenstromzähler, um den Volumenstrom zwischen den Speichern und damit die Belastung zu messen. Zusätzlich werden Statussignale der Ansteuerung des Mischers im Heizkreis und im Solarkreis erfasst.

Die Wetterstation auf dem Dach des Hauses misst Horizontalstrahlung, Solarstrahlung Süd vertikal, Außentemperatur und -feuchte sowie Windrichtung und -geschwindigkeit.

Insgesamt wurden über 200 Sensoren und Zähler in der Cordierstraße 4 mit über 400 Datenpunkten installiert, eine Auswahl ist in Bild 23 bis Bild 28 zu sehen. Die Messtechnik wird einerseits für die Evaluation im Rahmen des Netzwerks EffizienzhausPlus eingesetzt, andererseits teilweise für die Betriebsführung und Nebenkostenabrechnung der ABG FRANKFURT HOLDING.



Bild 23: Stromzähler für Herd und Küche in der Wohnung



Bild 24: Raumtemperatur und Raumluftfeuchtesensor in einem Wohnraum



Bild 25: Wetterstation auf dem Dach des Hauses



Bild 26: Haushaltsstromzähler im Elektroraum mit Impulsschnittstelle



Bild 27: Übergabezähler am Hausanschluss



Bild 28: Temperatursensoren am Pufferspeicher

3.2 Verwendete Messtechnik

Tabelle 10 bis Tabelle 12 zeigen alle für das Monitoring eingesetzten Zähler und Sensoren und deren Kenndaten.

Tabelle 10: Zähler für Wärme- und Wassermessung (alle geeicht)

Art	Ort / Messgröße	Dimension / Genauigkeit	Anzahl	Fabrikat	Ausleseintervall
Wärmezähler Anlagentechnik	Biomethan-BHKW, Biomethan-Brennwertkessel, Frischwasserstation, Heizkreis gesamt, Heizkreis nach Mischer	Qn 2,5 m ³ /h Klasse 2	5	Landis&Gyr T550	5 min
	Abgabe Solar (als Klimazähler mit Wärme und Kälte)	Qn 1,5 m ³ /h, Klasse 2	1	Landis&Gyr T550	5 min
	Warmwasser gesamt, Zirkula- tion, mit DVGW-Zulassung	Qn 6 m ³ /h bzw. Qn 3,5 m ³ /h Klasse 2	2	Techem ultra S3	5 min
Ultraschall- Volumenstrommessung	Volumenstrom zwischen den Speichern, Messung in beide Fließrich- tungen	Qn 6 m ³ /h Klasse 2	2	Landis&Gyr T550	5 min
Wärmezähler Wohnungen	ein Zähler je Wohnung	Qn 0,6 m ³ /h	17	Landis&Gyr T230	60 min
Warmwasserzähler	ein Zähler je Wohnung, Woh- nungen Süd je 2 Zähler	Qn 1,5 m ³ /h, Messkapsel, Klasse C	25	Techem MK m-bus SIII	60 min
Kaltwasserzähler	ein Zähler je Wohnung, Woh- nungen Süd je 2 Zähler	Qn 1,5 m ³ /h, Messkapsel, Klasse C	25	Techem MK m-bus SIII	60 min
Kaltwasserzähler Technik	KW-Zähler Hausanschluss	Qn 2,5 m ³ /h Klasse A	1	Sensus 620 C	5 min
Gaszähler Technik	Biomethan BHKW, Biomethan Therme	G4 <1 %	2	Elster BK-G4AT	5 min

Tabelle 11: Elektrozähler und Temperaturfühler

Art	Ort / Messgröße	Messbereich / Genauigkeit	Anzahl	Fabrikat	Ausleseintervall
Elektrizitätszähler Wohnungen	Je ein Zähler je Wohnung in der Verteilung im Keller, geeicht mit Impulsausgang	Haushaltsdrehstromzähler, 5 (60) A, Klasse 2	17	EMH ITZR	60 min
	Unterzähler 1x Kochen, 1x weitere Haushaltsgeräte in der Küche für 8 ausgewählte Wohnungen, MID-Zulassung	Hutschiene-Drehstromzähler, 5 (63) A, Klasse B	16	Socomec Countis E26	60 min
Elektrizitätszähler Technikstrom	Eigenverbrauch Solarthermie, Lüftungsanlagen, Frischwasserstation, Gastherme, Messtechnik+ Kommunikation, MID-Zulassung	Hutschiene-Wechselstromzähler 5 (80) A, Klasse B	5	Socomec Countis E16	5 min
	Batterie Abnahme, Batterie Ladung, Gesamtverbrauch Gebäude, MID-Zulassung	Hutschiene-Drehstromzähler, (Wandlerzähler) 1 (5) A, Klasse B	3	MBS Professional 3/5	5 min
	Aufzug, PV-Unterzähler 1- 5, BHKW, Summe zentrale Anlagentechnik, Allgemeinstrom, Elektromobilität Ladung, MID-Zulassung	Hutschiene-Drehstromzähler, 5 (63) A, Klasse B	9	Socomec Countis E26	5 min
	Hausübergabezähler, Summe PV-Erzeugung, Bezug/Einspeisung nach PV, 2-Richtungszähler, geeicht (mit Impulsausgang)	Drehstromzähler (Wandlerzähler) 1(6) A	11	Landis&Gyr E650	5 min
Temperatur-/Feuchtefühler	Ein Fühler je Wohnung sowie Zusatzmessung in 8 Wohnungen	0 .. 50 °C 0 .. 100 % re. F. Temp.: +/- 0,2 °C rel. Feuchte: +/- 2 %	45	Elvaco CMA10	60 min
	Temperatur Pufferspeicher	0 .. 140 °C DIN A	10	Danfoss ESMU PT 1000	5 min

Tabelle 12: Messtechnik der Wetterstation

Art	Ort / Messgröße	Messbereich / Genauigkeit	Anzahl	Fabrikat	Ausleseintervall
Wetterstation	Außentemperatur/ - feuchte	-30..+70 °C 0 .. 100 % rel. F. Temp.: +/- 0,2 °K rel. Feuchte: +/- 2 %	1	Thies Hygro-Thermometer Compact	5 min
	Strahlung (horizontal und Süd)	0-1300 W/m ² < +/- 10 %	2	GSM 10.7	5 min
	Windrichtung	0 .. 360 ° +/- 2 %	1	Thies Compact	5 min
	Windgeschwindigkeit	0,5 .. 50 m/s +/- 3 %	1	Thies Compact	5 min

3.2.1 Inbetriebnahme der Messtechnik

Nach Installation der Messtechnik wurden alle Zähler von der ausführenden Firma auf ihre Funktion und die Plausibilität der Ergebnisse kontrolliert. Zusätzlich wurden vom IWU in allen Wohnungen Kontrollen der Elektrozähler mit definierten Lasten durchgeführt und die Genauigkeit der Temperaturfühler stichpunktartig kontrolliert. In der Anlagentechnik konnten so vertauschte Fühler identifiziert werden, die anschließend korrigiert wurden.

Die Inbetriebnahme der Messtechnik begann Ende April 2014 und dauerte aufgrund von Soft- und Hardwareproblemen bis Anfang Juni 2014, so dass erst ab diesem Zeitpunkt für die meisten Messpunkte Werte vorliegen.

3.2.2 Änderungen an der Messtechnik

Da im Laufe der Installation der Anlagentechnik noch Änderungen gegenüber den Planungen vorgenommen wurden, waren bei einigen Messpunkten noch nachträgliche Änderungen des Zählers/Fühlers, der Einbaulage oder der ausgelesenen Datenpunkte erforderlich. Diese Änderungen wurden im Laufe des Jahres 2014 durchgeführt und betrafen z. B. die Auflösung und Einbauposition der Zähler für den Batteriespeicher, die Rückspeisung des BHKW, einzelne Wasserzähler oder die Erfassung der Stellung der Mischventile.

3.2.3 Datenausfälle

Im Berichtszeitraum kam es teilweise zu Datenausfällen. Lücken in einzelnen Messwerten wurden wenn nötig bei Zählern durch Mittelwerte interpoliert, dies war jedoch nur bei Daten hoher zeitlicher Auflösung erforderlich und nicht bei Monatswerten. Temperaturen wurden nicht korrigiert.

Bild 29 zeigt die Häufigkeit von Lücken bei den Stundendaten auf allen Kanälen im Berichtszeitraum. Insgesamt lag ihr Anteil bei 11,2 % im ersten Messjahr und 0,0 % im zweiten Messjahr. Messdatenausfälle auf allen Kanälen traten vor allem in der Anfangszeit häufiger auf und waren im Jahr 2014 insbesondere auf die Überlastung der Automationsstation bei den verschiedenen Aufgaben zurück zu führen. Im Januar 2015 wurde aus diesem Grund ein zusätzlicher Controller für die Aufgaben der Datenspeicherung und -übertragung installiert. In der Folge trat nur noch ein kurzer vollständiger Datenverlust aufgrund einer Umprogrammierung der Software durch das ausführende Unternehmen auf.

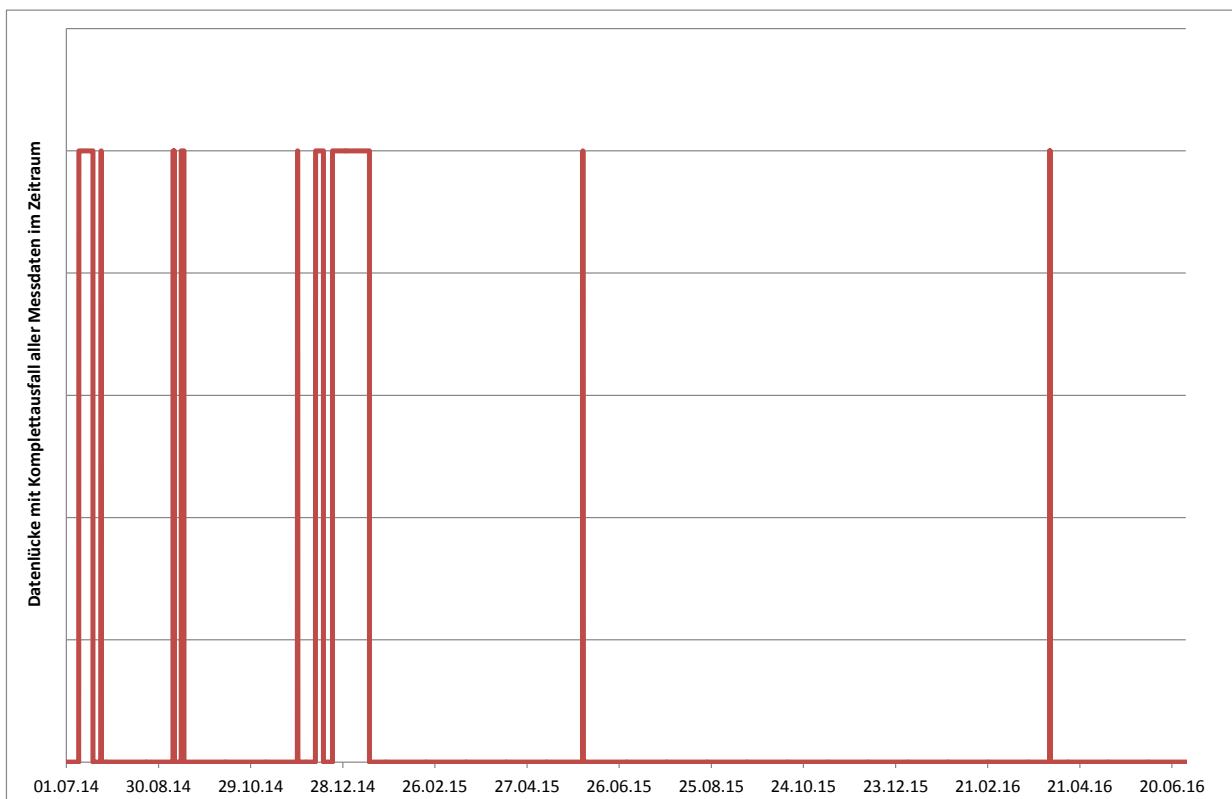


Bild 29: Darstellung der Datenlücken im Berichtszeitraum

Alle Zählerstände wurden durch Handablesungen der Zähler vor Ort überprüft und ggf. ergänzt. Die Datenlücken konnten auf diese Weise nahezu vollständig korrigiert werden. Aufgrund unterschiedlicher Ausleseintervalle und der teilweise vorhandenen Impulsabtastung der Elektrozähler gibt es Abweichungen zwischen den automatisch erfassten und den händig abgelesenen Zählerständen von 1 % - 2 %. In den folgenden Auswertungen wurden die automatisch erfassten Messdaten ausgewertet.

3.3 Dokumentation

Die Messdatenerfassung erfolgte mit Hilfe einer Wago-Automationsstation mit BACnet-Schnittstelle (Bild 30). Alle M-Bus-Zähler und Sensoren in den Wohnungen wurden stündlich abgefragt und gespeichert. Die M-Bus-Zähler der zentralen Anlagentechnik besitzen einen eigenen M-Bus-Master und wurden im 5-Minuten-Takt abgefragt und gespeichert. Die Temperatursensoren der Anlagentechnik sowie die Impulse der Stromzähler ohne M-Bus werden über entsprechende Reihenklempen von Wago gemessen und verarbeitet. Die Wetterstation auf dem Dach verfügt über einen separaten Buskoppler, der die Messdaten sammelt und über Modbus-TCP an die Automationsstation weiter leitet.

Die Messdaten werden viermal täglich über eine abgesicherte VPN-Verbindung auf einem ftp-Server abgelegt, von dem aus sie vom IWU zur Auswertung abgefragt werden können. Die Auswertung erfolgt in unterschiedlicher zeitlicher Auflösung mit MS Excel. Über die BACnet-Schnittstelle werden zusätzlich ausgewählte Messdaten, Betriebszustände und die Störmeldungen an die Betriebsführung der ABG weitergeleitet.

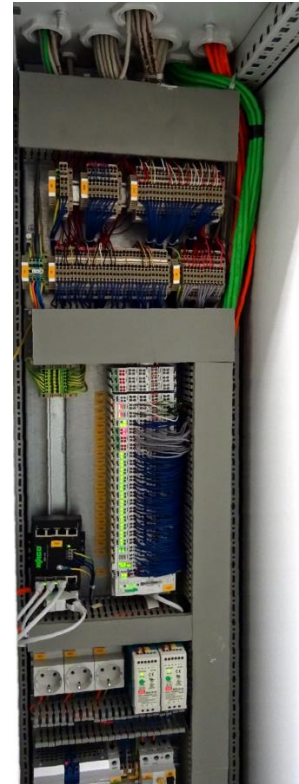


Bild 30: Automationsstation zur Datenerfassung und -übermittlung

4 Meteorologische Randbedingungen

Von der Wettermessstation auf dem Dach in der Cordierstraße 4 liegen ab dem 04.04.2014 mit Unterbrechungen Messdaten vor. Größere Datenlücken wurden ggf. mit Messdaten der Stationen Frankfurt-Höchst und Mörfelden aus dem Klimamessnetz des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie ergänzt [HLUG].

Die wichtigsten Ergebnisse sind in den folgenden Unterkapiteln erläutert.

4.1 Solarstrahlung

Die mittlere Leistung der Solarstrahlung lag am Messort bezogen auf die horizontale Fläche im ersten Messjahr von Juli 2014 bis Juni 2015 um 12,7 % und im zweiten Messjahr von Juli 2015 bis Juni 2016 um 10,9 % über dem langjährigen Mittel (Tabelle 13). Bezogen auf die senkrechte nach Süden ausgerichtete Fläche wurde etwa der Wert des langjährigen Mittels erreicht.

Der zeitliche Verlauf der horizontalen Einstrahlung sowie aus Südrichtung ist exemplarisch für das erste Messjahr (Juli 2014 bis Juni 2015) in Bild 31 auf Basis von Tageswerten dargestellt. Die Einstrahlung aus Süd liegt im Sommer immer deutlich unter der Horizontalstrahlung, im Winter erreicht sie diese oder liegt an strahlungsreichen Tagen sogar darüber.

Tabelle 13: Solarstrahlung horizontal und senkrecht aus Richtung Süd in der Cordierstraße 4 sowie Vergleichswerte der Klimaregion 12 aus der [DIN V 18599], Teil 10

	Einstrahlung horizontal	Planwert Einstrahlung horizontal*	Einstrahlung Süd	Planwert Einstrahlung Süd*
	W/m ²	W/m ²	W/m ²	W/m ²
Jul. 14	250,2	222,0	119,2	117,0
Aug. 14	194,3	191,0	115,2	125,0
Sep. 14	135,2	119,0	118,9	99,0
Okt. 14	68,5	89,0	79,3	117,0
Nov. 14	29,2	37,0	39,0	50,0
Dez. 14	16,5	27,0	15,4	54,0
Jan. 15	24,0	33,0	23,8	59,0
Feb. 15	57,6	59,0	77,9	71,0
Mrz. 15	122,3	131,0	132,1	136,0
Apr. 15	226,5	139,0	169,8	96,0
Mai. 15	233,0	193,0	123,2	107,0
Jun. 15	257,4	193,0	118,5	107,0
Jul. 15	270,9	222,0	126,6	117,0
Aug. 15	221,0	191,0	139,9	125,0
Sep. 15	141,8	119,0	127,0	99,0
Okt. 15	77,4	89,0	90,8	117,0
Nov. 15	32,8	37,0	42,0	50,0
Dez. 15	25,2	27,0	50,8	54,0
Jan. 16	30,2	33,0	48,4	59,0
Feb. 16	48,7	59,0	57,0	71,0
Mrz. 16	100,5	131,0	96,5	136,0
Apr. 16	185,5	139,0	126,0	96,0
Mai. 16	226,9	193,0	119,6	107,0
Jun. 16	228,1	193,0	101,7	107,0
Mittelwert 2014/15	134,6	119,4	94,4	94,8
Mittelwert 2014/15	132,4	119,4	93,9	94,8

* Daten der DIN V 18955-10:2011-12 für Klimaregion 12

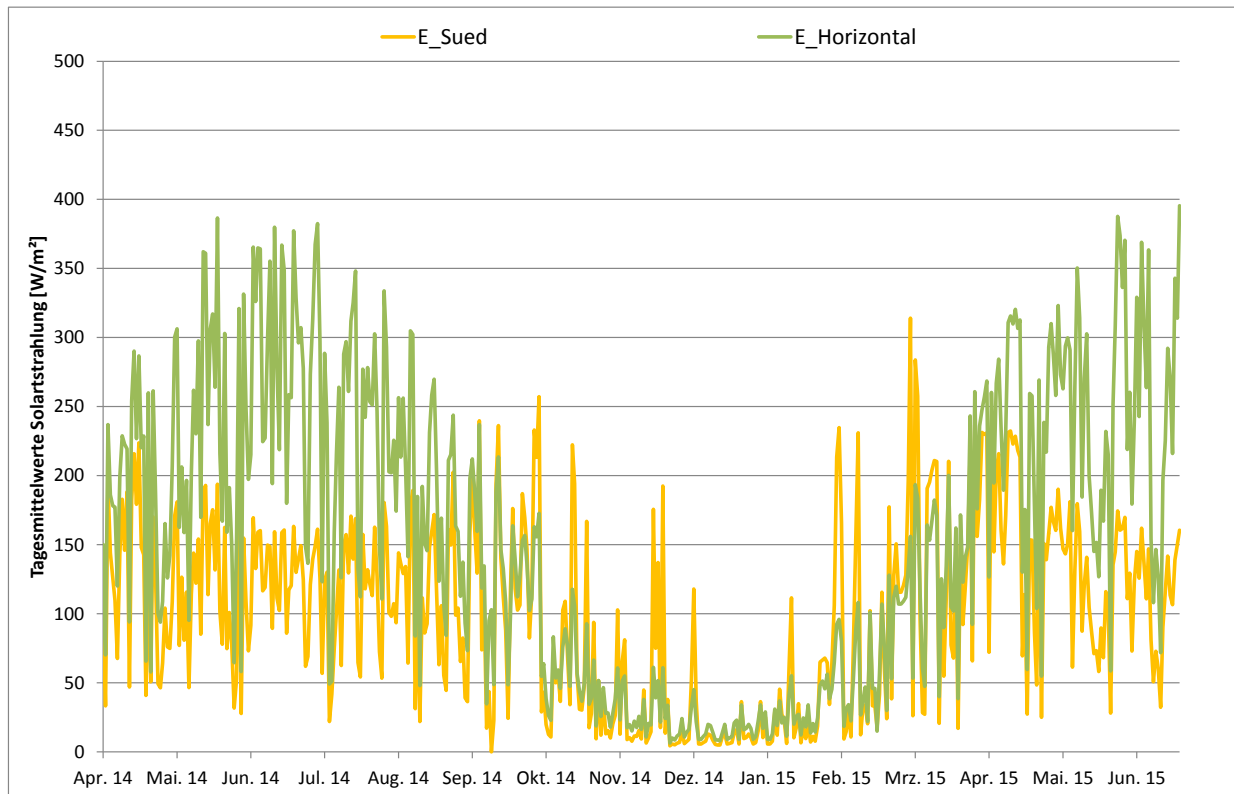


Bild 31: Verlauf des Tagesmittels der Solarstrahlung horizontal bzw. Süd im ersten Messjahr

4.2 Außenlufttemperaturen

Die gemessenen Außenlufttemperaturen sowie die Messdaten an der Klimastation Frankfurt-Flughafen des Deutschen Wetterdienstes (Messjahre und langjähriges Mittel) sind in Tabelle 14 dargestellt. Außerdem sind die Daten für Außenluftfeuchte, Windgeschwindigkeit und die Windrichtung von der Wetterstation in der Cordierstraße enthalten.

Die Jahresmitteltemperatur lag mit 11,9 °C bzw. 12,3 °C leicht über den Daten der Messstation Frankfurt-Flughafen mit 11,2 °C bzw. 11,7 °C. Diese etwas höhere Außentemperatur ist für innerstädtische Standorte plausibel. Das langjährige Mittel an der Messstation Frankfurt Flughafen liegt mit 10,4 °C deutlich niedriger, der Jahresmittelwert für Potsdam (Grundlage für die Energiebilanzberechnung) liegt bei 9,5 °C.

Tabelle 14: Klimadaten der Messstation auf dem Dach der Cordierstraße 4 sowie Messjahre und langjähriges Mittel der Klimastation Frankfurt Flughafen des DWD

	Außentemperatur Cordierstraße 4 °C	Außentemperatur FFM- Flughafen °C	Außentemperatur FFM- Flughafen langjähriges* Mittel °C	Außenluft- feuchte Cordierstraße 4 %rel. Feuchte	Windgeschwindigkeit Cordierstraße 4 m/s	Windrichtung Cordierstraße 4 °
Jul. 14	22,4	21,1	19,8	63,2	1,4	337,1
Aug. 14	18,0	17,5	19,3	72,4	1,2	208,8
Sep. 14	17,1	16,6	15,1	77,7	1,1	341,4
Okt. 14	13,5	12,9	10,2	86,8	1,0	173,7
Nov. 14	8,1	7,5	5,5	89,5	1,0	77,3
Dez. 14	4,2	3,9	2,7	88,5	1,7	211,4
Jan. 15	3,4	3,1	1,7	87,7	1,9	202,7
Feb. 15	2,8	2,2	2,5	80,1	1,4	70,5
Mrz. 15	7,4	6,8	6,2	71,3	1,9	342,5
Apr. 15	11,7	10,5	10,1	57,0	1,6	291,5
Mai. 15	15,5	14,5	14,5	59,1	1,4	251,2
Jun. 15	18,7	18,1	17,7	59,8	1,7	300,2
Jul. 15	23,0	22,3	19,8	54,9	1,7	251,5
Aug. 15	22,4	21,7	19,3	61,9	1,5	316,4
Sep. 15	15,1	14,6	15,1	72,8	1,5	245,1
Okt. 15	10,4	9,8	10,2	81,2	1,1	328,8
Nov. 15	8,6	8,2	5,5	86,0	2,1	205,1
Dez. 15	8,0	7,2	2,7	89,1	1,5	192,9
Jan. 16	3,8	3,3	1,7	87,4	1,7	187,7
Feb. 16	5,2	4,8	2,5	79,2	2,4	207,7
Mrz. 16	6,1	5,6	6,2	74,2	1,8	302,7
Apr. 16	10,2	9,5	10,1	66,0	1,7	257,7
Mai. 16	15,7	15,1	14,5	63,8	1,5	327,9
Jun. 16	18,8	18,0	17,7	75,4	1,3	226,9
Mittelwert 2014/15	11,9	11,2	10,4	74,4	1,5	
Mittelwert 2015/16	12,3	11,7	10,4	74,3	1,6	

* Quelle: [IWU 2016]

In Bild 32 sind exemplarisch für das erste Messjahr die Tagesmittelwerte und die Monatsmittelwerte der Außentemperatur in der Cordierstraße mit dem langjährigen Mittel der Messstation Frankfurt Flughafen dargestellt. Die Monatsmittelwerte der Cordierstraße liegen im Sommer zwischen 0,6 und 1,2 K über den Messwerten vom Flughafen, im Winter etwa 0,3 K bis 0,6 K darüber. Die Jahresspitze trat im Sommer 2014 etwa einen Monat früher auf als im langjährigen Mittel. Auffällig ist, dass von September bis Januar die Temperaturen etwa 2 K höher liegen als im langjährigen Mittel, Februar und März 2015 aber in etwa auf der Höhe des langjährigen Mittels.

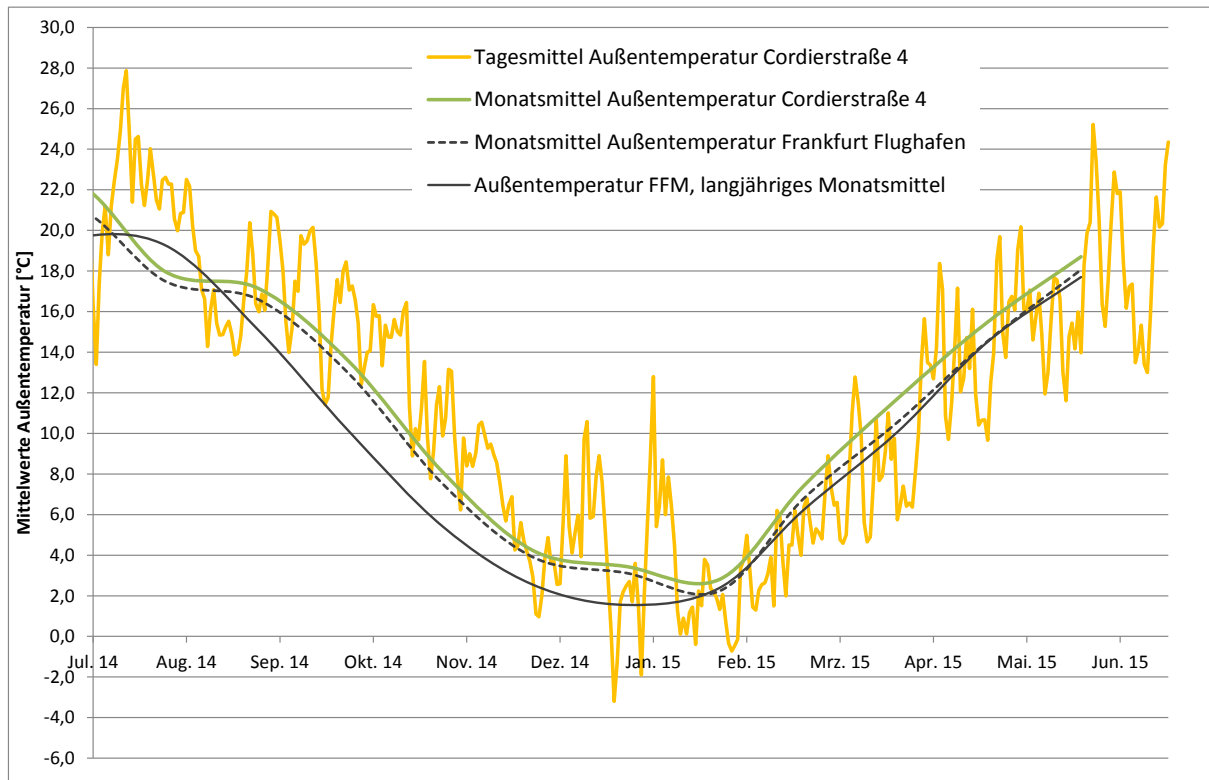


Bild 32: Vergleich des Tagesmittels und Monatsmittels der Außentemperatur in der Cordierstraße 4 mit dem langjährigen Mittel der Temperatur der Messstation Frankfurt Flughafen des Deutschen Wetterdienstes

4.3 Klimabereinigung

Die monatlichen Gradtagzahlen und Heizgradtage sind in Tabelle 15 dargestellt. In beiden Heizperioden 2014/15 lag die Gradtagzahl ca. 20 % niedriger als im langjährigen Mittel am Standort Frankfurt am Main (Tabelle 16).

Tabelle 15: Gradtagzahlen und Heizgradtage der Messstation auf dem Dach der Cordierstraße 4 sowie die aktuellen Messjahre und langjährigen Mittel der Klimastation Frankfurt Flughafen des DWD

	Gradtagzahl G20/12 Cordierstraße 4, Frankfurt	Gradtagzahl G20/12 FFM Flughafen*	Gradtagzahl G20/12 langjähriges* Mittel FFM	Heizgradtage HGT12 Cordierstraße 4, Frankfurt	Heizgradtage HGT12 FFM Flughafen	Heizgradtage HGT12 langjähriges* Mittel FFM
	Kd	Kd	Kd	Kd	Kd	Kd
Jul. 14	0	0	0	0	0	0
Aug. 14	0	0	1	0	0	0
Sep. 14	17	27	43	1	3	6
Okt. 14	91	114	245	19	26	78
Nov. 14	344	360	426	120	136	195
Dez. 14	489	499	534	241	251	288
Jan. 15	506	516	567	266	276	320
Feb. 15	481	497	494	257	273	269
Mrz. 15	383	409	414	143	161	181
Apr. 15	167	208	246	47	64	83
Mai. 15	27	48	81	3	8	17
Jun. 15	0	0	10	0	0	1
Jul. 15	0	0	0	0	0	0
Aug. 15	0	0	1	0	0	0
Sep. 15	0	0	43	0	0	6
Okt. 15	237	265	245	69	81	78
Nov. 15	270	290	426	118	130	195
Dez. 15	372	397	534	124	149	288
Jan. 16	504	518	567	256	270	320
Feb. 16	420	432	494	196	208	269
Mrz. 16	430	446	414	182	198	181
Apr. 16	226	266	246	66	82	83
Mai. 16	54	67	81	6	11	17
Jun. 16	0	0	10	0	0	1
Summe 2014/15	2504	2678	3059	1096	1198	1439
Summe 2015/16	2513	2682	3059	1017	1130	1439

* Quelle: [IWU 2016]

Tabelle 16: Gradtagzahlen und Heizgradtage für Frankfurt am Standort des Gebäudes, an der Messstation Frankfurt Flughafen sowie für das Referenzklima Deutschland

Standort und Betrachtungsperiode	Gradtagzahl G20/12 [Kd]	Heizgradtage HGT12 [Kd]
Gradtagzahl am Standort Cordierstraße 4, Frankfurt a. M. Messperiode von Juli 2014 bis Juni 2015	2504	1096
Gradtagzahl am Standort Cordierstraße 4, Frankfurt a. M., Messperiode von Juli 2015 bis Juni 2016	2513	1017
Gradtagzahl am Standort Frankfurt a. M. Flughafen für das langjährige Mittel (1970 bis 2014)	3059	1439
Gradtagzahl für das Referenzklima Deutschland	3601	1849*

* Umgerechnet von der Gradtagzahl mit 219 Heiztagen für Potsdam

- Klimafaktor auf Basis G20/12 bezogen auf den Standort Frankfurt Flughafen für den Zeitraum
 2014/15: $KF = 3059 \text{ Kd} / 2678 \text{ Kd} = 1,14$;
 2015/16: $KF = 3059 \text{ Kd} / 2682 \text{ Kd} = 1,14$;
 wird in der Heizperiode von Oktober bis Ende März die Gradtagzahl G20/12 betrachtet, ergibt
 2014/15: sich $KF = 1,12$
 2015/16: sich $KF = 1,14$
- Klimafaktor für Station Cordierstraße 4 bezogen auf deutsches Normklima:
 2014/15: $KF = 3.601 \text{ Kd} / 2504 \text{ Kd} = 1,44$
 2015/16: $KF = 3.601 \text{ Kd} / 2513 \text{ Kd} = 1,43$

Realistischer als die Anwendung eines Korrekturfaktors ist die Berücksichtigung der Klima- und Nutzungsbedingungen in der Energiebilanz. Nur dadurch können der Einfluss der Solarstrahlung im aktuellen Jahr korrekt mit bilanziert sowie die Ausnutzungsfaktoren für Wärmegewinne realistisch bestimmt werden. In Tabelle 17 sind die zugehörigen Bilanzergebnisse des PHPP dargestellt.

Tabelle 17: Heizwärmebedarf des Gebäudes nach PHPP mit Standardrandbedingungen, mit realem Außenklima sowie unter Berücksichtigung der gemessenen Raumtemperatur

	Heizwärmebedarf Cordierstraße 4 nach PHPP [kWh/(m ² _{EBF} *a)]
Standardrandbedingungen (20 °C Raumtemperatur, innere Wärmequellen 2,1 W/m ² , Klima Frankfurt am Main)	15,2
Mit realem Außenklima 2014/15	9,1
Mit realem Außenklima 2014/15 und gemessenen Raumtemperaturen von 22,3 °C im Mittel	14,9
Mit realem Außenklima 2014/15 und gemessenen Raumtemperaturen von 22,3 °C im Mittel sowie inne- ren Wärmequellen von 1,6 W/m ² aufgrund geringe- rem Stromverbrauch	17,0

Bei Standardrandbedingungen bezüglich Innen- und Außenklima besitzt das Gebäude einen Heizwärmebedarf von 15,2 kWh/(m²_{EBF}*a). Durch das wärmere Klima und die tatsächliche Solarstrahlung reduziert sich der Heizwärmebedarf auf 9,1 kWh/(m²_{EBF}*a). Werden die realen Raumtemperaturen von 22,3 °C berücksichtigt, ergibt sich ein Heizwärmebedarf von 14,9 kWh/(m²_{EBF}*a). Im PHPP ergab sich mit der planten Geräteausstattung ein Haushaltsstromverbrauch von 20,9 kWh/(m²_{EBF}*a), dies ergibt zusammen mit der Personenbelegung innere Wärmequellen von 1,56 W/m²_{EBF}. Wird als vorsichtige Abschätzung die PHPP-Bilanz mit inneren Wärmequellen von 1,6 W/m²_{EBF} berechnet, erhöht sich der Heizwärmebedarf auf 17,0 kWh/(m²_{EBF}*a). Der reale Verbrauch liegt mit 20,5 kWh/(m²_{EBF}*a) bzw. 19,9 kWh/(m²_{EBF}*a) (siehe Kapitel 5.5.1) um 3 bis 3,5 kWh/(m²a) über dem angepassten Bedarfswert nach PHPP. Davon entfallen 1,1 kWh/(m²a) auf Heizwärmeverbrauch außerhalb der Heizperiode in den Monaten April bis Juni 2015 durch kühle Witterung und die automatische außentemperaturgesteuerte Heizkreisregelung.

5 Messergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Messergebnisse vorgestellt. Die Kennwerte wurden je nach Bereich auf die Gebäudenutzfläche (A_N), die Energiebezugsfläche (EBF) nach PHPP oder die Nettogrundfläche (NGF) bezogen. Mit den Flächendaten aus Tabelle 1 können diese Kennwerte auch auf andere Bezugsflächen umgerechnet werden.

5.1 Stromverbrauch

Beim Stromverbrauch wird im Folgenden zwischen dem Haushaltsstromverbrauch der Mieter, dem Allgemeinstrom und dem Stromverbrauch der Anlagentechnik unterschieden.

5.1.1 Stromverbrauch für Hausbetrieb und Haushaltsstrom

Der Stromverbrauch der 17 Haushalte lag bei 1826 kWh/Monat im ersten bzw. bei 1778 kWh/Monat im zweiten Messjahr (Tabelle 19, linke Spalte). Je Haushalt ergibt sich im Mittel ein Stromverbrauch von 1289 bzw. 1255 kWh/a. Bezogen auf die Nettogrundfläche ergibt sich ein Verbrauchskennwert von 18,7 bzw. 18,2 kWh/(m²_{NGF}*a). Somit liegen die Verbräuche 6 bis 9 % unter den ambitionierten Vorgaben von 20 kWh/(m²_{NGF}*a), die bei der Energiebilanz des Effizienzhaus Plus angesetzt werden.

Die Mieter erhielten im Mietvertrag abhängig von der Wohnungsgröße ein Strombudget zwischen 800 und 1500 kWh/a, das in der Warmmiete enthalten ist. Im Mittel beträgt das Budget 1035 kWh pro Wohnung und Jahr. In Bild 33 zeigt für das erste Messjahr das Verhältnis von gemessenem Verbrauch zu Strombudget für die einzelnen Wohnungen, aufgetragen über die verschiedenen Wohnungsgrößen. Es zeigt sich, dass bei kleinen Wohnungen das Budget tendenziell unterschritten wurde, bei den großen Wohnungen gibt es sowohl Unter- wie auch Überschreitungen. Zwei Wohnungen mit mittlerer Wohnfläche sind als Ausreißer zu erkennen, da ihr Stromverbrauch mehr als doppelt so hoch liegt wie das Budget. Im Mittel aller Wohnungen liegt der gemessene Verbrauch mit 1260 kWh/WE nur ca. 22 % über dem sparsam kalkulierten Budget (1035 kWh/WE).

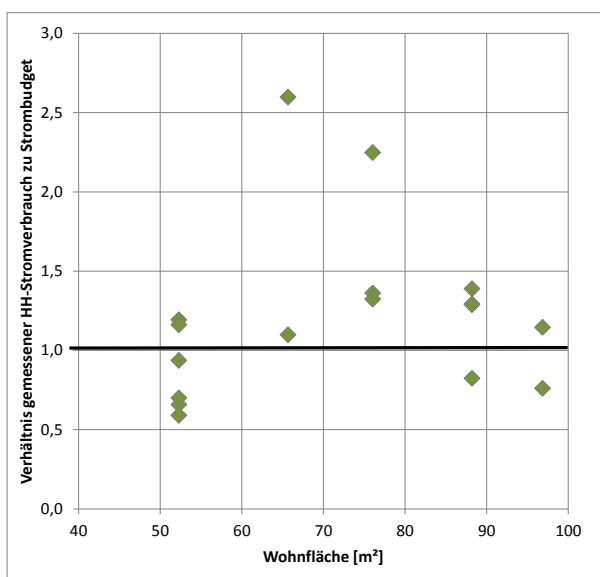


Bild 33: Verhältnis von gemessenem Stromverbrauch zu Strombudget im Mietvertrag der Wohnungen, aufgetragen über die Wohnfläche für das erste Messjahr

Die Haushaltsstromverbräuche der einzelnen Monate sind in Bild 34 für das zweite Messjahr als Monatsmittelwerte der wohnflächenbezogenen Leistungen dargestellt. Zur Anonymisierung wurden andere Wohnungsbezeichnungen verwendet als in den Plänen. Die mittlere Leistung aller Wohnungen liegt bei ca. 2,1 W/m²_{EBF} (entspricht 18,8 kWh/(m²_{EBF}*a)). Zwei Wohnungen (W12 und W16) fallen

durch deutlich höhere Leistungen auf, die meisten Wohnungen liegen jedoch unterhalb des Mittelwertes.

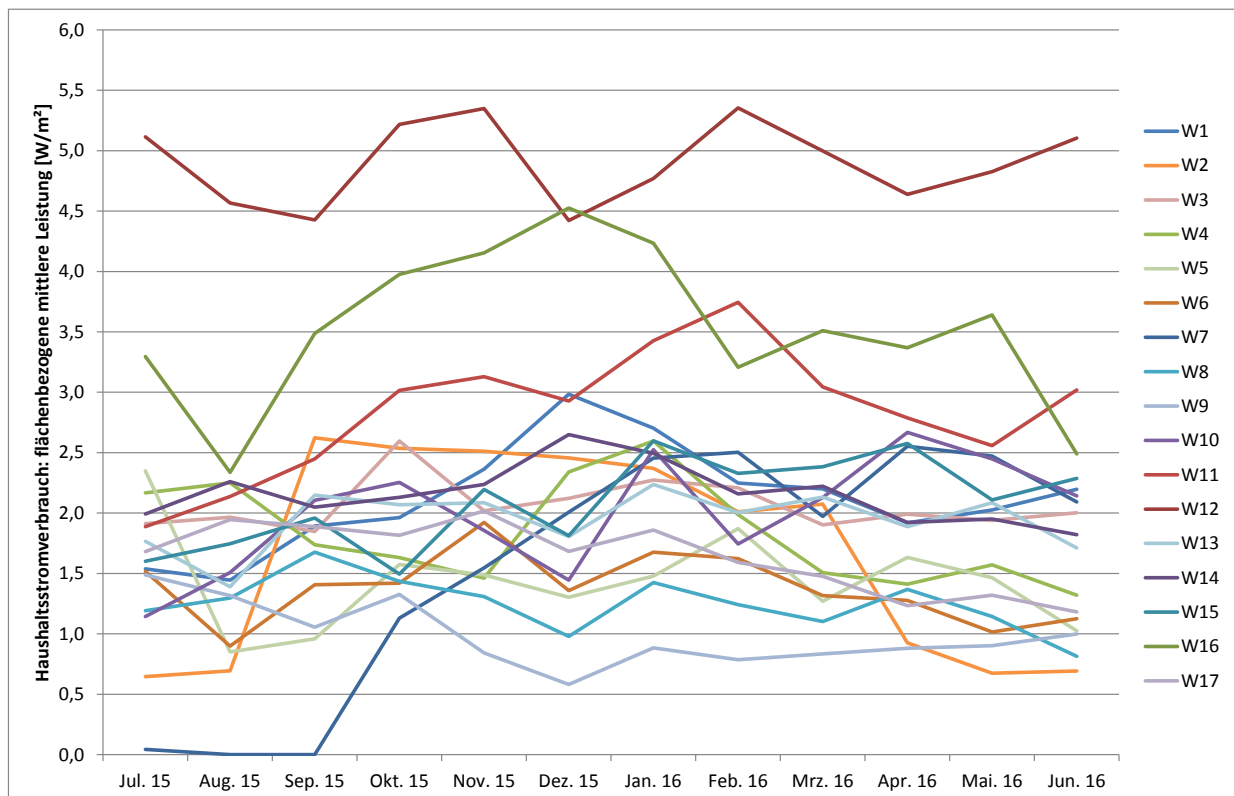


Bild 34: Stromverbräuche der einzelnen Haushalte im zweiten Messjahr als mittlere monatliche flächenbezogene Leistung; Wohnungsnummer anonymisiert

Insgesamt 8 der 17 Wohneinheiten wurden detailliert vermessen. Dazu gehörte auch die separate Erfassung der Stromverbräuche für den Elektroherd und den restlich Stromverbrauch der Küche (der Herd ist somit nicht beim Stromverbrauch der übrigen Küche enthalten). In Bild 35 ist für diese Wohnungen der Anteil des Stromverbrauchs in der Küche am Gesamtverbrauch dargestellt. Je nach Wohnung liegt dieser zwischen 7 % und fast 60 %. In Bild 36 ist der jeweilige Anteil des Elektroherdes am gesamten Haushaltsstromverbrauch dargestellt. Dieser liegt im Bereich zwischen nahe Null und über 50 % des Gesamtverbrauchs. Man erkennt, dass vor allem die Kochgewohnheiten sich deutlich unterscheiden.

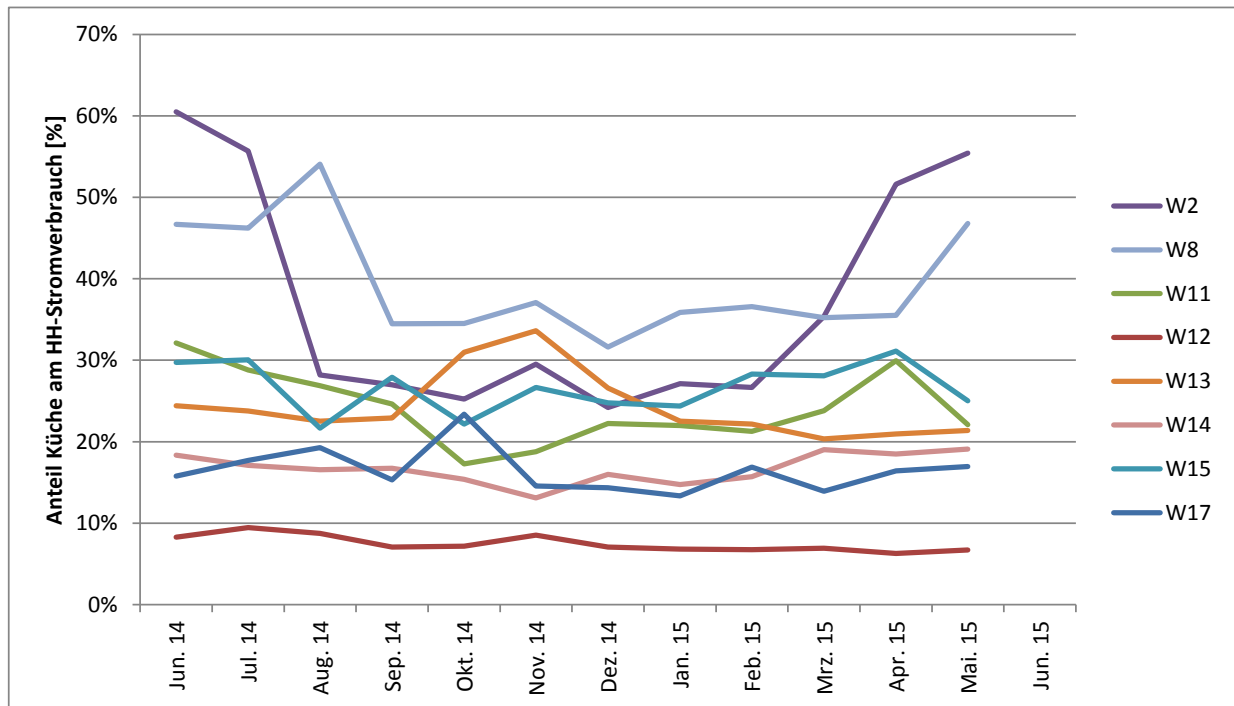


Bild 35: Anteil des Stromverbrauchs in der Küche (ohne Herd) am Haushaltsstromverbrauch in den 8 detailliert vermessenen Wohnungen im zweiten Messjahr; Wohnungsnummer anonymisiert

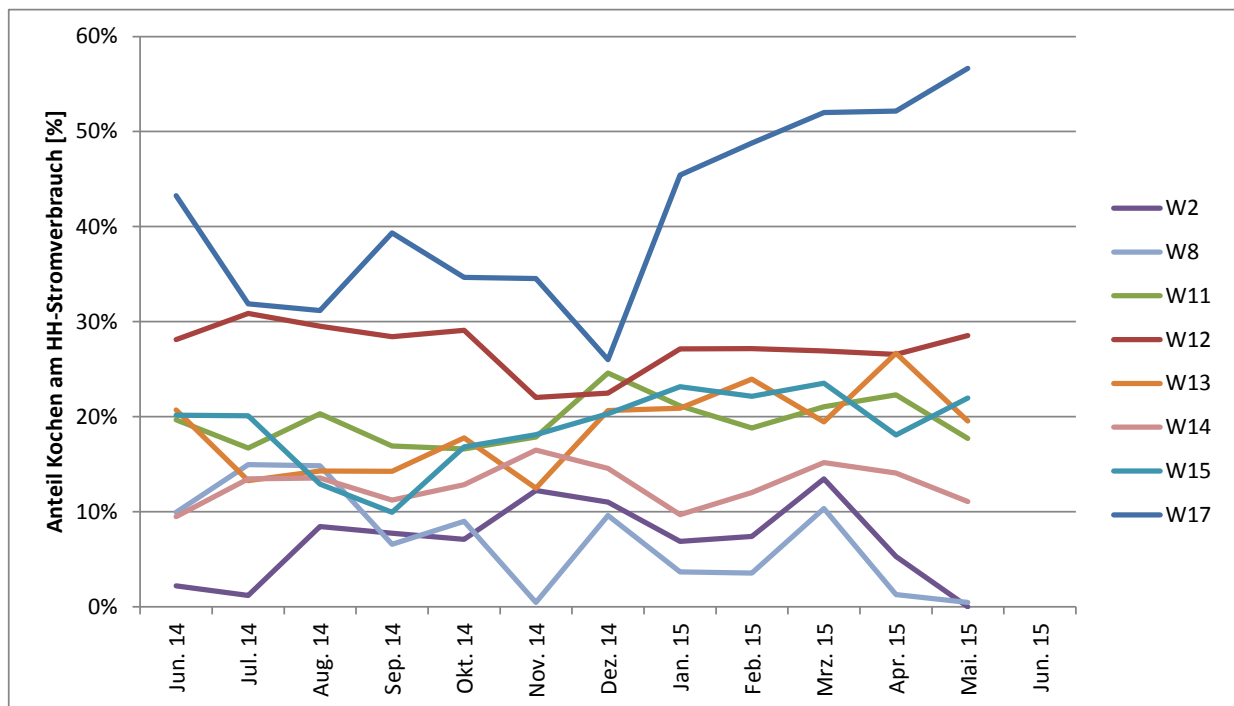


Bild 36: Anteil des Stromverbrauchs des Elektroherdes am Haushaltsstromverbrauch in den 8 detailliert vermessenen Wohnungen im zweiten Messjahr; Wohnungsnummer anonymisiert

In Tabelle 18 sind die Stromverbräuche der detailliert vermessenen Wohnungen nochmals separat dargestellt.

Tabelle 18: Stromverbräuche detailliert vermessene Wohnungen

2014/15	W2			W8			W11			W12		
	HH-Strom	Küche	Herd	HH-Strom	Küche	Herd	HH-Strom	Küche	Herd	HH-Strom	Küche	Herd
	[kWh/Monat]			[kWh/Monat]			[kWh/Monat]			[kWh/Monat]		
Jul. 14	69,5	23,6	7,7	20,9	12,0	0,0	0,0	0,2	0,0	168,2	19,0	44,3
Aug. 14	66,0	17,1	5,3	38,5	16,3	7,3	9,6	3,8	0,2	166,1	19,9	44,1
Sep. 14	72,6	21,6	10,8	33,3	16,9	3,9	116,7	28,3	27,4	198,1	25,3	54,9
Okt. 14	67,7	18,0	7,7	61,3	31,7	9,8	118,2	28,2	23,2	211,0	22,4	57,6
Nov. 14	53,7	14,9	6,2	53,9	22,3	6,9	129,4	34,2	19,4	256,9	20,8	59,1
Dez. 14	43,7	14,0	2,5	26,6	13,8	0,9	177,6	49,4	33,5	277,7	15,4	72,5
Jan. 15	30,4	9,6	0,0	35,3	13,6	1,5	216,6	56,4	52,7	268,5	18,6	71,0
Feb. 15	20,5	8,4	1,6	32,6	10,6	2,0	151,7	40,2	34,1	209,8	18,5	42,4
Mrz. 15	17,3	8,8	1,3	43,8	14,5	4,8	183,8	45,9	44,7	231,2	19,6	57,6
Apr. 15	23,5	11,1	0,4	35,0	16,2	3,1	155,6	46,2	41,0	196,8	16,5	54,0
Mai. 15	37,9	16,1	0,7	49,0	21,4	7,1	164,6	44,4	59,8	212,3	18,2	65,6
Jun. 15	24,0	12,3	1,8	41,8	23,3	5,4	127,1	37,2	29,0	200,6	16,9	56,7
Summe	526,7	175,5	46,0	471,7	212,7	52,7	1550,9	414,5	365,2	2597,4	231,0	679,8

2014/15	W13			W14			W15			W17		
	HH-Strom	Küche	Herd	HH-Strom	Küche	Herd	HH-Strom	Küche	Herd	HH-Strom	Küche	Herd
	[kWh/Monat]			[kWh/Monat]			[kWh/Monat]			[kWh/Monat]		
Jul. 14	109,4	23,8	15,2	3,3	3,2	0,0	66,3	17,0	11,1	117,2	17,9	38,8
Aug. 14	107,8	25,0	25,1	52,3	12,2	0,1	65,1	17,4	12,3	145,1	27,8	38,9
Sep. 14	119,6	26,5	27,5	107,0	19,2	8,7	54,0	14,2	7,5	159,5	27,1	44,8
Okt. 14	155,1	33,2	36,9	131,5	19,4	13,2	50,0	13,6	4,9	162,9	31,9	46,1
Nov. 14	147,4	32,2	30,0	142,5	18,6	16,8	63,2	16,3	11,9	179,2	30,3	48,2
Dez. 14	163,1	35,9	33,1	172,2	20,9	23,8	48,7	14,6	10,2	129,6	25,1	55,1
Jan. 15	158,8	38,6	38,3	138,4	19,9	19,2	69,3	14,8	11,6	150,2	24,0	53,8
Feb. 15	125,0	32,0	28,7	130,0	19,1	10,5	62,4	14,4	9,3	155,3	33,1	44,3
Mrz. 15	127,5	29,3	27,8	133,9	20,4	21,3	78,5	17,0	14,5	159,5	32,9	49,7
Apr. 15	118,0	27,5	29,5	88,3	17,0	10,5	42,8	13,9	5,9	121,8	25,9	42,4
Mai. 15	112,1	26,1	25,1	116,2	21,9	21,8	67,3	18,0	18,7	125,0	26,1	40,3
Jun. 15	102,5	31,4	17,0	107,9	21,2	13,6	81,8	18,8	23,0	111,9	22,0	39,8
Summe	1546,2	361,6	334,2	1323,4	213,1	159,5	749,3	189,9	141,1	1717,2	324,2	542,1

2015/16	W2			W8			W11			W12		
	HH-Strom	Küche	Herd	HH-Strom	Küche	Herd	HH-Strom	Küche	Herd	HH-Strom	Küche	Herd
	[kWh/Monat]			[kWh/Monat]			[kWh/Monat]			[kWh/Monat]		
Jul. 15	24,1	14,6	0,5	44,5	20,8	4,4	118,9	38,2	23,4	239,6	19,8	67,3
Aug. 15	25,9	14,4	0,3	48,4	22,4	7,2	134,6	38,7	22,5	214,0	20,3	66,1
Sep. 15	94,7	26,7	8,0	60,5	32,7	9,0	149,2	40,1	30,3	200,8	17,6	59,3
Okt. 15	94,7	25,5	7,3	53,5	18,5	3,5	189,9	46,8	32,1	244,5	17,2	69,5
Nov. 15	90,7	22,9	6,4	47,2	16,3	4,2	190,6	32,9	31,6	242,6	17,4	70,6
Dez. 15	91,7	27,1	11,2	36,5	13,6	0,2	184,4	34,6	32,9	207,2	17,7	45,7
Jan. 16	88,4	21,4	9,7	53,2	16,8	5,1	215,8	48,0	53,1	223,5	15,8	50,2
Feb. 16	67,7	18,4	4,7	41,9	15,0	1,5	212,9	46,8	45,0	226,6	15,4	61,5
Mrz. 16	77,4	20,6	5,7	41,1	15,0	1,5	191,7	40,8	36,1	234,2	15,8	63,7
Apr. 16	33,4	11,8	4,5	49,4	17,4	5,1	169,9	40,4	35,7	210,3	14,6	56,6
Mai. 16	25,2	13,0	1,3	42,7	15,1	0,5	161,1	48,3	35,9	226,2	14,2	60,0
Jun. 16	25,0	13,9	0,0	29,4	13,7	0,1	184,0	40,6	32,6	231,5	15,5	66,1
Summe	738,9	230,2	59,8	548,3	217,3	42,5	2103,0	496,4	411,2	2701,1	201,3	736,5

2015/16	W13			W14			W15			W17		
	HH-Strom	Küche	Herd	HH-Strom	Küche	Herd	HH-Strom	Küche	Herd	HH-Strom	Küche	Herd
	[kWh/Monat]			[kWh/Monat]			[kWh/Monat]			[kWh/Monat]		
Jul. 15	111,3	27,1	23,0	108,1	19,9	10,3	59,8	17,8	12,1	116,2	18,3	50,3
Aug. 15	87,5	20,8	11,6	122,7	21,0	16,5	65,2	19,6	13,1	134,5	23,8	42,9
Sep. 15	130,9	29,5	18,7	107,6	17,8	14,6	70,7	15,3	9,1	126,3	24,4	39,4
Okt. 15	130,3	29,8	18,6	115,6	19,4	13,0	55,7	15,5	5,5	125,5	19,2	49,4
Nov. 15	127,1	39,4	22,6	117,5	18,1	15,1	79,2	17,6	13,3	135,0	31,6	46,8
Dez. 15	113,7	38,2	14,2	143,8	18,8	23,7	67,6	18,0	12,2	116,4	17,0	40,2
Jan. 16	140,8	37,5	29,1	135,4	21,6	19,7	96,9	24,0	19,7	128,5	18,5	33,4
Feb. 16	113,9	25,7	23,8	105,8	15,6	10,3	78,5	19,1	18,2	99,3	13,3	45,1
Mrz. 16	134,3	29,8	32,1	120,6	19,0	14,5	88,9	25,1	19,7	102,1	17,2	49,8
Apr. 16	115,0	23,4	22,4	101,0	19,2	15,3	93,0	26,1	21,9	82,5	11,5	42,9
Mai. 16	131,3	27,5	35,0	105,9	19,6	14,9	78,7	24,5	14,2	91,2	15,0	47,6
Jun. 16	104,3	22,3	20,4	95,6	18,3	10,6	82,6	20,7	18,1	79,1	13,4	44,8
Summe	1440,4	350,9	271,5	1379,7	228,1	178,5	916,9	243,4	177,2	1336,7	223,1	532,5

Neben dem Haushaltsstrom wurden ca. $1,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a})$ für Allgemeinstrom verbraucht, für die Anlagentechnik $5,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a})$ und zusätzlich für den Aufzug $1,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a})$ (Tabelle 20). Sowohl der Aufzug als auch Teile der Anlagentechnik (z. B. Hebeanlagen, Druckhaltung, Brandmeldeanlagen) werden nach DIN V 18599 üblicherweise nicht bilanziert, sind aber in den obigen Werten enthalten. Insgesamt ergibt sich ein Stromverbrauch für das Gebäude von $27,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a})$ im ersten Messjahr und von $27,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a})$ im zweiten Messjahr.

Tabelle 19: Stromverbrauch der Haushalte, Allgemeinstrom sowie Strom Anlagentechnik und für den Aufzug

	Summe Haushaltsstrom	Allgemein- strom*	Strom Anlagentechnik	Aufzug	Summe
	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]
Jul. 14	2.009	173	586	147	2.915
Aug. 14	1.746	170	586	155	2.658
Sep. 14	1.910	186	564	152	2.812
Okt. 14	1.834	204	567	155	2.760
Nov. 14	1.884	204	567	152	2.807
Dez. 14	1.973	224	575	149	2.921
Jan. 15	1.965	212	596	136	2.909
Feb. 15	1.727	168	539	123	2.558
Mrz. 15	1.962	191	506	141	2.800
Apr. 15	1.516	177	448	131	2.271
Mai. 15	1.783	187	438	143	2.551
Jun. 15	1.604	179	445	154	2.383
Jul. 15	1.618	191	511	144	2.464
Aug. 15	1.492	190	514	150	2.346
Sep. 15	1.689	189	502	156	2.536
Okt. 15	1.943	178	537	159	2.817
Nov. 15	1.910	198	570	131	2.810
Dez. 15	1.889	206	554	137	2.786
Jan. 16	2.132	201	621	141	3.095
Feb. 16	1.763	181	553	122	2.619
Mrz. 16	1.839	186	542	132	2.699
Apr. 16	1.724	175	458	130	2.487
Mai. 16	1.746	182	457	139	2.524
Jun. 16	1.593	178	456	141	2.368
Summe 2014/15	21.913,2	2.277,1	6.415,9	1.737,8	32.343,9
Summe 2015/16	21.338,8	2.255,1	6.275,5	1.683,6	31.553,0
Anteil 2014/15	67,8%	7,0%	19,8%	5,4%	100,0%
Anteil 2015/16	67,6%	7,1%	19,9%	5,3%	100,0%

* ohne projektspezifischen Verbrauch

Tabelle 20: Stromverbrauchskennwerte

2014/15	absolut	bezogen auf A_N	bezogen auf A_{NGF}	bezogen auf A_{EBF}
	[kWh/a]	[kWh/(m ² a)]	[kWh/(m ² a)]	[kWh/(m ² a)]
Haushaltsstrom	21.913	15,0	18,7	18,0
Allgemeinstrom	2.277	1,6	1,9	1,9
Hilfsstrom Anlagentechnik	6.416	4,4	5,5	5,3
Aufzug	1.738	1,2	1,5	1,4
Summe Stromverbrauch	32.344	22,2	27,6	26,5
Messtechnik	479	0,3	0,4	0,4

2015/16	absolut	bezogen auf A_N	bezogen auf A_{NGF}	bezogen auf A_{EBF}
	[kWh/a]	[kWh/(m ² a)]	[kWh/(m ² a)]	[kWh/(m ² a)]
Haushaltsstrom	21.339	14,6	18,2	17,5
Allgemeinstrom	2.255	1,5	1,9	1,8
Hilfsstrom Anlagentechnik	6.275	4,3	5,4	5,1
Aufzug	1.684	1,2	1,4	1,4
Summe Stromverbrauch	31.553	21,6	27,0	25,9
Messtechnik	466	0,3	0,4	0,4

Der Stromverbrauch für die Anlagentechnik ist in Tabelle 21 differenziert ausgewiesen. Den größten Anteil daran hat mit $4,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{NGF} \cdot \text{a})$ der Stromverbrauch der Lüftungsanlagen, gefolgt von der solarthermischen Anlage mit $0,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{NGF} \cdot \text{a})$. Da der Solarkreislauf direkt und ohne Wärmetauscher an den Pufferspeicher angebunden ist, entfällt ein Großteil des Stromverbrauchs auf die unterbrechungsfreie Stromversorgung der Solaranlage zum Frostschutz bei Stromausfall im Winter. In Kapitel 5.6.1.1 ist die Energiebilanz der Solaranlage genauer dargestellt.

Aus der Addition aller Einzelzähler ergibt sich ein Wert, der 1,3 % unter dem des Gesamtzählers für die Anlagentechnik liegt. Bei den weiteren Betrachtungen wird der Verbrauch des Gesamtzählers verwendet.

In Bild 37 ist der monatliche Stromverbrauch des Gebäudes nach Verbrauchsgruppen differenziert dargestellt.

Tabelle 21: Stromverbrauch Anlagentechnik

	Lüftung	Solarthermie	Gaskessel	Frischwasser- station	BHKW- Eigenverbrauch	Heizungs- regelung	Summe	Aufzug
	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]
Jul. 14	443,5	93,1	3,7	15,5	4,9	17,1	577,7	147,2
Aug. 14	431,9	96,6	3,7	22,0	5,3	17,4	576,9	154,8
Sep. 14	426,2	85,2	3,6	22,0	1,8	17,5	556,2	152,3
Okt. 14	429,0	80,5	3,8	20,9	1,9	23,7	559,7	154,8
Nov. 14	416,2	74,3	3,7	22,6	4,5	38,5	559,9	151,5
Dez. 14	424,4	77,2	4,3	30,3	5,3	28,8	570,2	149,0
Jan. 15	448,5	77,7	4,0	30,0	4,9	22,2	587,3	136,5
Feb. 15	402,1	70,8	3,5	27,0	4,6	25,5	533,5	123,1
Mrz. 15	360,7	79,6	3,8	30,1	2,4	23,8	500,5	140,5
Apr. 15	308,1	80,9	3,7	27,4	0,6	21,0	441,6	130,6
Mai. 15	298,4	84,4	3,8	26,2	0,2	18,2	431,2	143,1
Jun. 15	310,4	81,1	3,7	24,6	0,1	17,1	437,0	154,4
Jul. 15	373,6	84,8	3,8	23,3	0,0	17,6	503,2	144,3
Aug. 15	377,6	83,3	3,9	23,6	0,0	17,6	506,0	149,6
Sep. 15	369,9	77,7	3,7	25,6	0,2	17,1	494,3	156,1
Okt. 15	393,0	78,1	5,3	28,9	2,1	21,6	528,9	159,2
Nov. 15	430,2	74,6	5,6	27,2	2,8	21,8	562,1	131,1
Dez. 15	411,1	76,8	3,8	27,7	3,4	22,8	545,5	137,0
Jan. 16	476,5	77,1	3,8	27,9	4,6	23,4	613,2	141,4
Feb. 16	417,1	72,6	3,6	27,4	3,7	21,7	546,0	121,6
Mrz. 16	397,8	78,8	3,8	27,7	3,2	23,1	534,4	132,3
Apr. 16	319,2	78,3	3,7	26,6	1,3	21,5	450,6	130,4
Mai. 16	317,5	83,0	3,9	26,5	0,2	18,8	450,0	139,4
Jun. 16	321,5	80,9	3,7	24,6	0,1	16,9	447,8	141,2
Summe 2014/15	4.699,4	981,4	45,3	298,6	36,5	270,7	6.331,8	1.737,8
Summe 2015/16	4.605,0	946,0	48,5	316,9	21,7	243,9	6.182,1	1.683,6
Anteil 2014/15	74,2%	15,5%	0,7%	4,7%	0,6%	4,3%	100,0%	
Anteil 2015/16	74,5%	15,3%	0,8%	5,1%	0,4%	3,9%	100,0%	

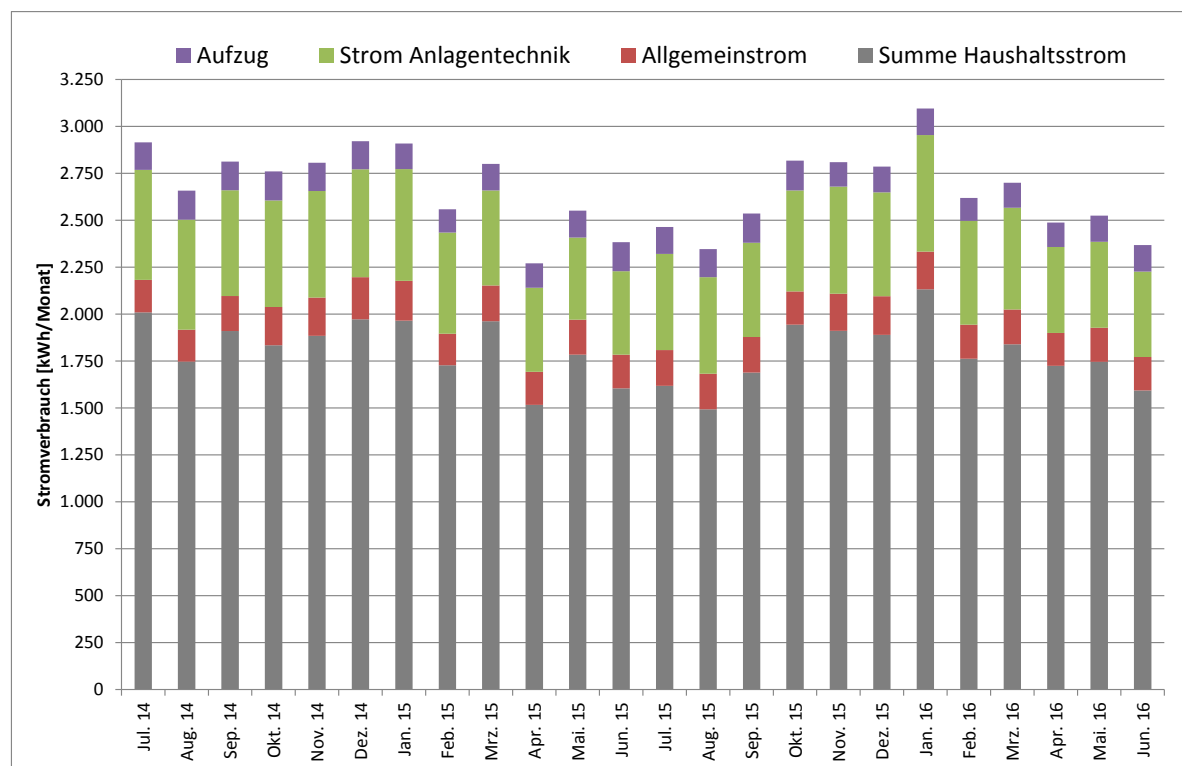


Bild 37: Stromverbrauch in der Cordierstraße 4, differenziert nach den unterschiedlichen Verbrauchern

5.1.2 Stromverbrauch für Messtechnik (projektspezifischen Anteil)

Der projektspezifische Energieverbrauch umfasst den Stromverbrauch für die Automationsstation und die beiden M-Bus-Master. Zusätzlich sind ein VPN-Router, ein DSL-Router sowie zwei Switches für die Internet-Kommunikation erforderlich. Über diese werden aber auch die Fernüberwachung der Anlagentechnik und die Störmeldungen übertragen, die nicht durch die Messdatenerfassung verursacht werden und in einem Gebäude dieser technischen Ausstattung üblich sind.

Der Verbrauch für die projektspezifischen Komponenten wird über einen Unterzähler hinter dem Allgemeinstromzähler separat erfasst. Die projektspezifischen Verbräuche sind in Tabelle 22 dokumentiert und sind bei den Messdaten des Allgemeinstroms in Tabelle 19 abgezogen. Im Oktober 2014 wurde die Internetkommunikation zur Verbesserung der Betriebssicherheit aus dem Elektroanschlussraum herausgelegt, um Störstrahlung und Übertemperaturen auszuschließen. In der Folge sinkt der Verbrauch ab, so dass ab diesem Zeitpunkt in den projektspezifischen Verbräuchen wohl nur noch die Automationsstation und der Verbrauch für den M-Bus enthalten sind. Vor dem Umbau lag die mittlere Leistung bei 66,0 W, nach dem Umbau bei 51,8 W, somit entfallen auf die gemeinsam mit der regulären Betriebsüberwachung genutzten Kommunikationsgeräte ca. 15 W. Dieser Wert deckt sich mit anderen Messwerten des IWU. Der projektspezifische Stromverbrauch liegt mit $0,40 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a})$ vergleichsweise niedrig.

Tabelle 22: Projektspezifische Verbräuche für Messtechnik und Kommunikation

	projektspezifischer Verbrauch
	[kWh/Monat]
Jul. 14	49,0
Aug. 14	50,2
Sep. 14	43,2
Okt. 14	35,2
Nov. 14	34,6
Dez. 14	37,7
Jan. 15	38,5
Feb. 15	36,4
Mrz. 15	38,6
Apr. 15	38,4
Mai. 15	39,2
Jun. 15	37,9
Jul. 15	39,3
Aug. 15	39,2
Sep. 15	37,9
Okt. 15	35,8
Nov. 15	37,8
Dez. 15	39,8
Jan. 16	41,7
Feb. 16	38,7
Mrz. 16	40,7
Apr. 16	38,4
Mai. 16	39,3
Jun. 16	37,8
Summe 2014/15	479,0
Summe 2015/16	466,2

5.1.3 Stromverbrauch für Elektromobilität

Bei dem Gebäude wurde die Infrastruktur für Nutzung der Elektromobilität vorgerüstet (Elektrozähler, Anschlusskabel zum Carport verlegt). Da sich aber kein Nutzer für ein Elektroauto gefunden hat, wurde aufgrund der hohen Kosten keine Ladestation aufgestellt. Sollte bei einem Mieterwechsel ein Abnehmer für Strom für Elektromobilität einziehen, kann eine Ladestation unkompliziert nachgerüstet werden.

5.2 Stromerzeugung

Zur Stromerzeugung stehen in dem Gebäude 4 PV-Anlagen und das Biomethan-BHKW zur Verfügung. Die Anlage auf dem Carport ist in zwei Einzelanlagen unterteilt. Aufgrund der identischen Ausrichtung sind die Ergebnisse der beiden Anlagen im Folgenden zusammengefasst.

Bild 38 zeigt die monatliche Stromerzeugung. Der größte PV-Ertrag stammt vom Carport (23,78 kW_p), gefolgt von der Dachanlage Südwest (15,06 kW_p). In der Abbildung ist gut zu erkennen, dass sich die Erzeugung der Photovoltaik und des BHKW sehr gut ergänzen.

Während in den Sommermonaten die PV-Anlagen über 98 % der gesamten Erzeugung übernehmen, liegt ihr Anteil im Kernwinter (November- Januar) bei ca. 20 % im ersten und bei 28 % im zweiten Messjahr. Das Gebäude erreicht durch die Kombination von PV und BHKW ganzjährig eine Stromerzeugung von ca. 3.000 kWh/Monat, was etwas dem Verbrauch des Hauses entspricht.

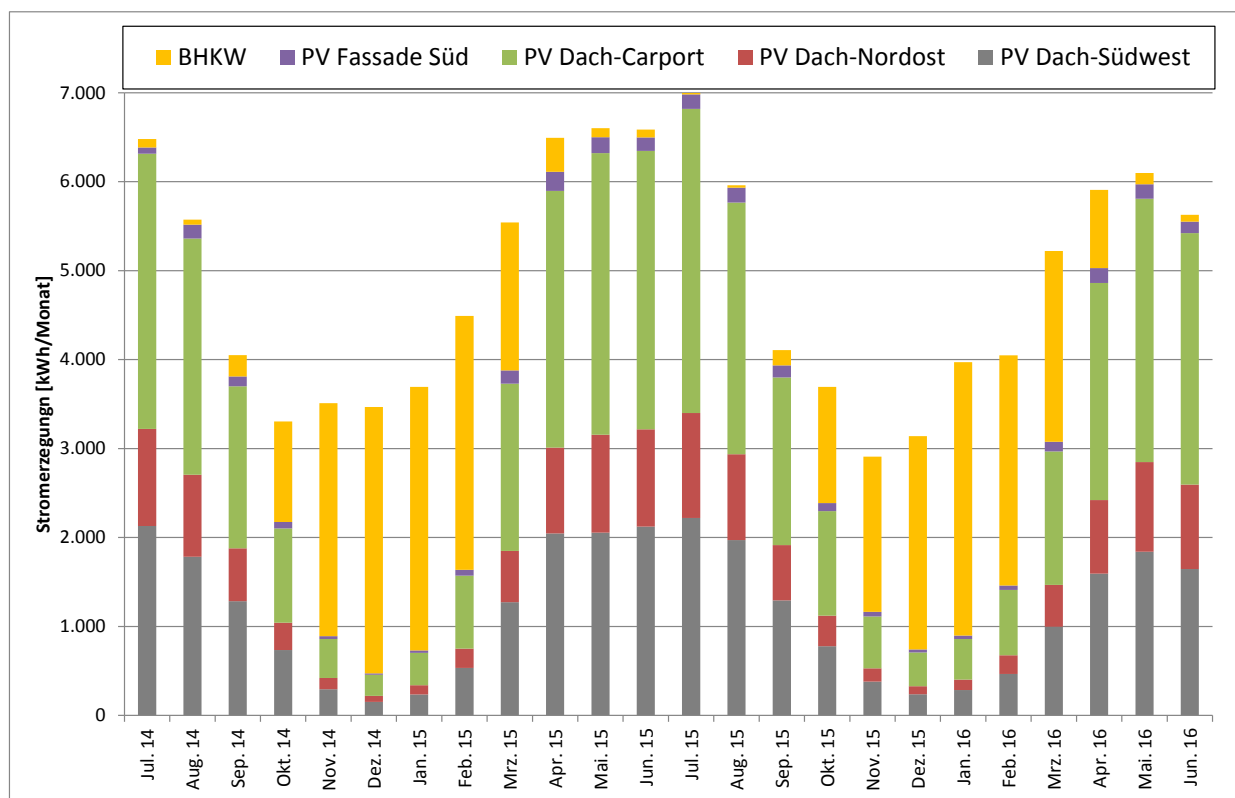


Bild 38: Stromerzeugung in der Cordierstraße 4, differenziert nach den unterschiedlichen Anlagen

Tabelle 23: Stromerzeugung nach Anlage differenziert

	PV Dach- Südwest	PV Dach- Nordost	PV Dach- Carport	PV Fassade Süd	BHKW	Summe Unterzähler	Summe Hauptzähler
	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]
Jul. 14	2.129	1.092	3.094	70	93	6.479	6.550
Aug. 14	1.784	923	2.655	156	57	5.574	5.573
Sep. 14	1.285	594	1.821	111	241	4.051	4.051
Okt. 14	735	308	1.060	71	1.130	3.303	3.241
Nov. 14	293	127	439	31	2.619	3.509	3.508
Dez. 14	151	69	236	16	2.994	3.467	3.396
Jan. 15	234	105	364	28	2.963	3.694	3.734
Feb. 15	534	216	820	66	2.855	4.492	4.450
Mrz. 15	1.272	576	1.880	149	1.665	5.543	5.412
Apr. 15	2.046	965	2.887	213	384	6.494	6.341
Mai. 15	2.055	1.101	3.166	179	101	6.602	6.429
Jun. 15	2.121	1.096	3.129	151	89	6.586	6.529
Jul. 15	2.219	1.181	3.419	164	15	6.997	6.992
Aug. 15	1.971	966	2.828	169	28	5.961	5.951
Sep. 15	1.293	621	1.886	135	172	4.107	4.105
Okt. 15	778	343	1.175	92	1.304	3.692	3.691
Nov. 15	379	150	584	51	1.746	2.909	2.907
Dez. 15	237	91	380	33	2.399	3.140	3.139
Jan. 16	286	117	457	38	3.072	3.970	3.968
Feb. 16	466	211	733	49	2.589	4.048	4.047
Mrz. 16	998	470	1.500	108	2.145	5.221	5.220
Apr. 16	1.594	827	2.440	167	879	5.908	5.890
Mai. 16	1.840	1.009	2.959	163	128	6.099	6.095
Jun. 16	1.644	951	2.827	129	77	5.628	5.624
Summe 2014/15	14.639,9	7.171,4	21.550,4	1.241,6	15.190,3	59.793,6	59.213,9
Summe 2015/16	13.705,8	6.935,9	21.187,3	1.299,1	14.553,1	57.681,2	57.627,1
Anteil 2014/15	24,5%	12,0%	36,0%	2,1%	25,4%	100,0%	99,0%
Anteil 2015/16	23,8%	12,0%	36,7%	2,3%	25,2%	100,0%	99,9%

Zwischen der Summe der Unterzähler und den beiden Hauptzähler der Stromerzeugung ergab sich im ersten Messjahr eine Differenz von 0,9 %, die einerseits in der Aufsummierung der Messfehler, andererseits in den unterschiedlichen Möglichkeiten zur Korrektur von Datenlücken begründet liegt. Im zweiten Messjahr konnte diese Differenz auf 0,1 % abgesenkt werden.

Vergleicht man die in der Planungsphase prognostizierte Stromerzeugung, so zeigt sich, dass alle PV-Anlagen, aber auch das BHKW eine höhere Stromerzeugung erreichten, als in der Vorfeld prognostiziert. Die PV-Anlagen lieferten zwischen 5 % und 17 % höhere Erträge als vorab geplant, das BHKW übertraf die Planwerte aufgrund des höheren Heizwärmebedarfs um 55 % bis 62 %.

Tabelle 24: Vergleich zwischen geplanter und tatsächlicher Stromerzeugung im Gebäude

	Werte Planung	Messwerte 2014/15	Messwerte 2015/16
	[kWh/a]	[kWh/a]	[kWh/a]
PV-Dach Nordost	6.270	7.171	6.936
PV-Dach Südwest	13.100	14.640	13.706
PV-Carport	18.428	21.550	21.187
PV-Fassade	1.130	1.242	1.299
<i>Summe PV</i>	<i>38.928</i>	<i>44.603</i>	<i>43.128</i>
BHKW	9.401	15.190	14.553
Summe Unterzähler	48.329	59.794	57.681
Summe Hauptzähler		59.214	57.627

Der Wirkungsgrad eines PV-Moduls wird normalerweise bei Standard-Testbedingungen bei 1000 W/m² mit senkrechter Einstrahlung und bei 25 °C ermittelt. Vergleicht man den gemessenen PV-Ertrag mit der auf die horizontale Ebene eingestrahltene Sonnenenergie, so muss berücksichtigt werden, dass die Ausrichtung und Neigung der Module in der Cordierstraße deutlich von diesen Standardbedingungen abweichen. Dennoch können hierüber Informationen über die Effizienz der unterschiedlichen Anlagen extrahiert werden. In Bild 39 ist der gemessene mittlere monatliche Ertrag der PV-Module bezogen auf die, auf die horizontale Kollektorfläche eingestrahelte Energie als Wirkungsgrad dargestellt. Für die Dach- und Carport-Anlagen gibt der Hersteller einen Normwirkungsgrad von 17,7 % an, der Wechselrichterwirkungsgrad wird mit 97,5 % bis 97,9 % angegeben. Je nach Jahreszeit (und damit je nach Sonnenstand und Modultemperatur) ergibt sich ein monatlicher Wirkungsgrad bezogen auf die Horizontalstrahlung zwischen 10,9 % (Dach Nordost im Dezember 2015) und 18,8 % (Dach Südwest im November 2015). Auffällig ist der nennenswerte Unterschied zwischen der Anlage PV Dach Südwest und PV Dach Nordost. Letztere erreicht dauerhaft nur einen Wirkungsgrad zwischen 10,9 % und 14,4 % bezogen auf die horizontale Einstrahlung. Mögliche Gründe sind neben der Neigung der Fläche von 15 ° nach Ostnordost (gegenüber 15 ° nach Westsüdwest) auch die unterschiedliche Dimensionierung der PV-Strings und der Wechselrichter.

Bei der PV-Fassade liegt der gemessene mittlere Wirkungsgrad zwischen 4,1 % und 9,1 % bezogen auf die Einstrahlung aus Richtung Süd. Herstellerangaben für den Wirkungsgrad bei Standardtestbedingungen liegen trotz schriftlicher Nachfragen nicht vor. Berechnet man aus der Modulfläche und der Herstellerangabe zur Leistung des Moduls von 338,4 W einen Wirkungsgrad, ergibt sich ein Wert von 12,0 %. Für den Wechselrichter werden 95,2 % Wirkungsgrad bei Nennleistung angegeben. Die Fassade ist um 25 ° aus der Südrichtung herausgedreht, so dass Abweichungen von dem Ertrag bei Südausrichtung zu berücksichtigen sind. Dennoch fällt der niedrige mittlere Wirkungsgrad zwischen 4 % und 9 % auf. Gründe sind wahrscheinlich die Abschattung der unteren Modulreihen und ein häufiger Teillastbetrieb des Wechselrichters.

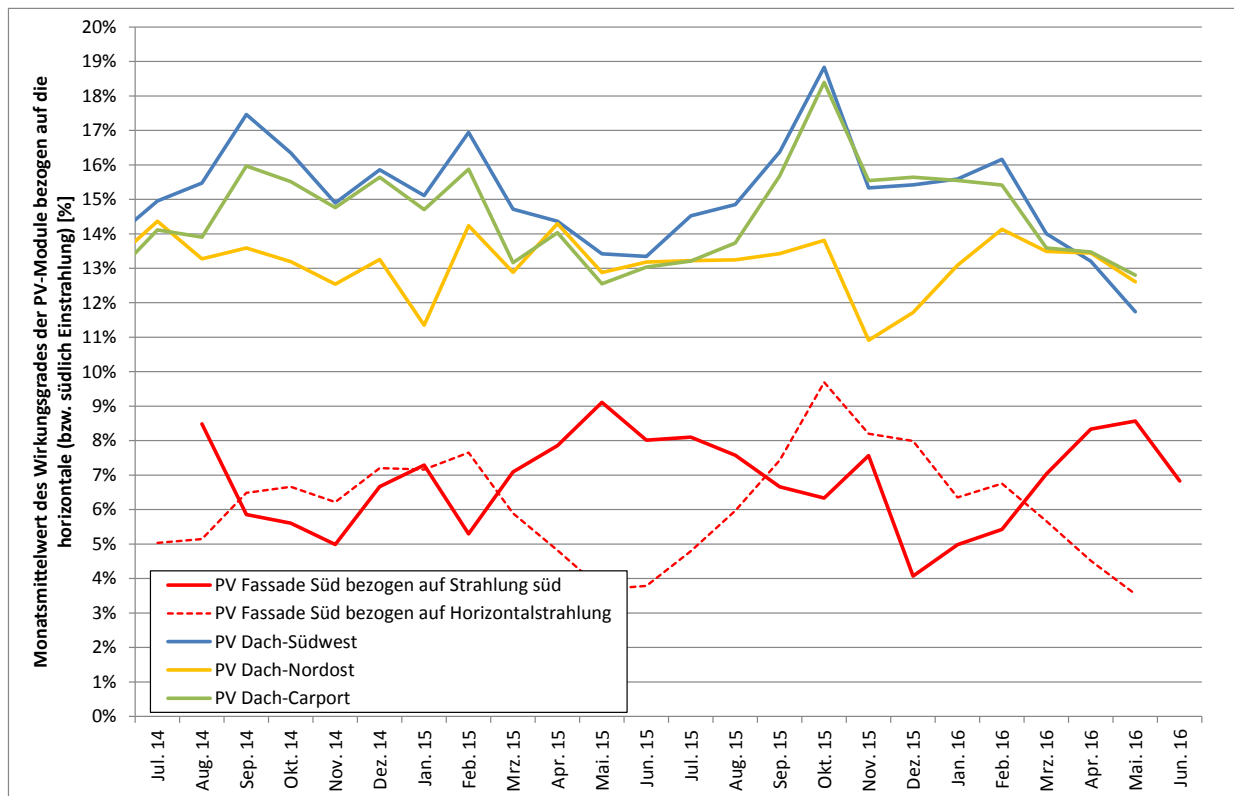


Bild 39: Gemessener mittlerer monatlicher Wirkungsgrad der PV-Module bezogen auf die horizontale Strahlung bzw. zusätzlich bezogen auf die Solarstrahlung Süd bei der Fassaden-PV

5.2.1 Gegenüberstellung von Stromverbrauch und Stromgewinnung

In Bild 40 sind die monatlichen Werte für Stromerzeugung und -verbrauch dargestellt. Es zeigt sich, dass das Gebäude in jedem Monat einen Überschuss bei der Stromerzeugung erreichte. Die kumulierte Erzeugung lag im ersten Messjahr bei 59.214 kWh, der Verbrauch bei 32.344 kWh. Im zweiten Messjahr wurden 57.627 kWh erzeugt und 31.553 kWh verbraucht. Somit wurde in jedem Jahr etwa 83 % mehr elektrische Energie erzeugt als verbraucht. Hervorzuheben ist jedoch, dass in jedem Monat ein Stromüberschuss erreicht wird. In Kapitel 5.2.2 wird gezeigt, dass auch in fast allen Monaten die Stromspeisung über dem Bezug lag.

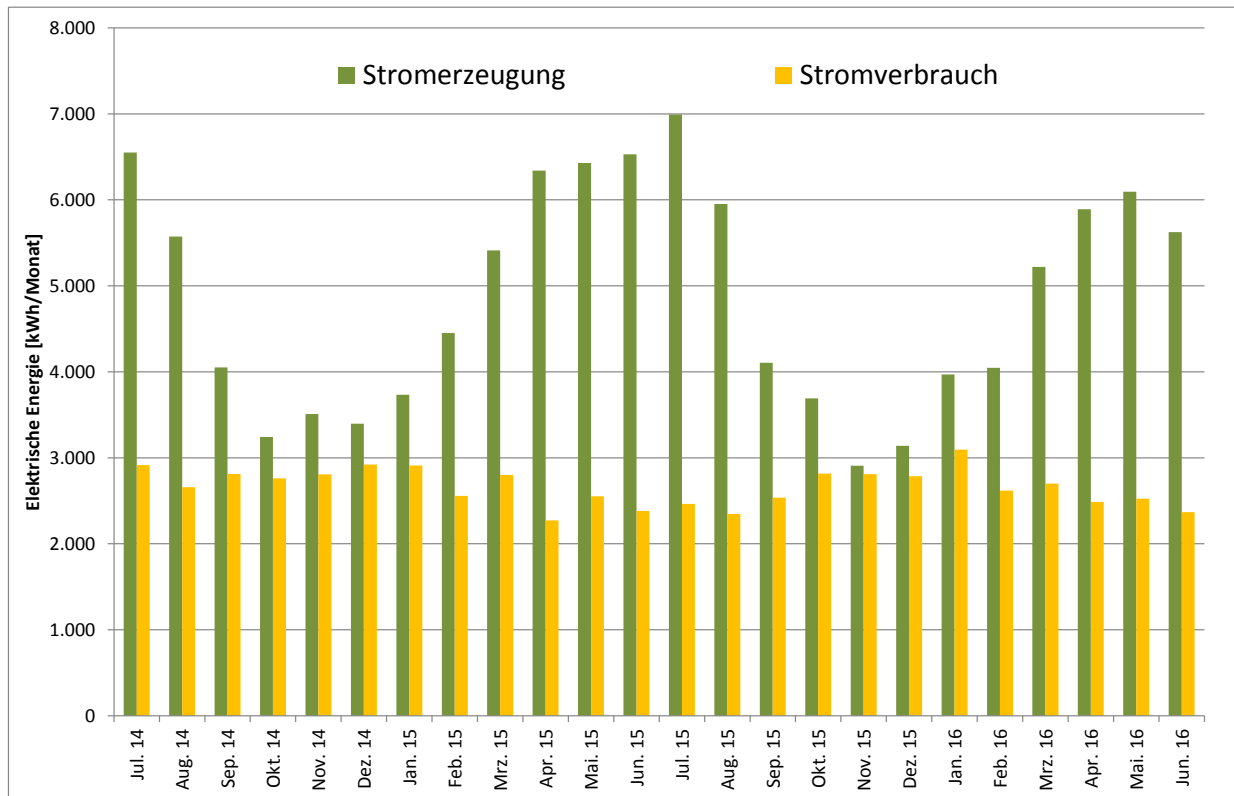


Bild 40: Vergleich von Stromerzeugung und Stromverbrauch

5.2.2 Strombilanz am Übergabezähler

Während in Kapitel 5.2.1 das Verhältnis von Stromerzeugung und Stromverbrauch im Gebäude dargestellt war, soll im Folgenden das Verhältnis von Einspeisung und Bezug elektrischer Energie (Strombilanz) dargestellt werden. In Bild 41 ist links die Strombilanz auf Tagesbasis und rechts auf Monatsbasis dargestellt. Im ersten Messjahr lag der Bezug aus dem Netz höher (Werte nach rechts verschoben) als im darauffolgenden Zeitraum, was durch den fehlenden Speicher im Winter 2014/15 und dem dadurch reduzierten Autarkiegrad zurückzuführen ist. Insgesamt liegen im ersten Messjahr aber 315 Tage (86 % des Jahres) oberhalb der Winkelhalbierenden, d. h. das Gebäude erreichte während des überwiegenden Teils des Jahres auch auf Tagesbasis einen Stromüberschuss. Durch den Elektro-speicher, der im zweiten Messjahr in Betrieb war, stieg der Autarkiegrad (weniger Reststrombezug aus dem Netz). Bedingt durch zwei Störungen des BHKW lag die Anzahl der Tage mit Stromüberschuss bei 300 bzw. bei 82 %.

Betrachtet man die Monatsbilanz von Stromeinspeisung und -bezug (Bild 41 rechts), so erreichte das Gebäude im ersten Messjahr nicht nur in der Jahresbilanz einen Stromüberschuss (22.866 kWh) sondern auch in jedem Monat – auch in den Wintermonaten. Im zweiten Messjahr (Stromüberschuss 22.032 kWh) erreichten alle Monate einen Stromüberschuss außer dem November 2015, in dem das BHKW vier Tage nicht in Betrieb war. Rechnet man die durch diese Störung „entgangene“ Stromerzeugung hinzu, so hätte sich auch im Jahr 2015/16 in jedem Monat ein Überschuss bei der Stromerzeugung ergeben.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch das Anlagenkonzept in der Cordierstraße das elektrische Netz weniger belastet wird als bei einem Konzept, das ausschließlich auf hoher Stromerzeugung im Sommer und überwiegend Strombezug im Winter basiert. Beide Konzepte müssen für einen klimaneutralen Gebäudebestand der Zukunft kombiniert werden, um möglichst geringe Verschiebungen vom Wärme in den Stromsektor zu erzeugen.

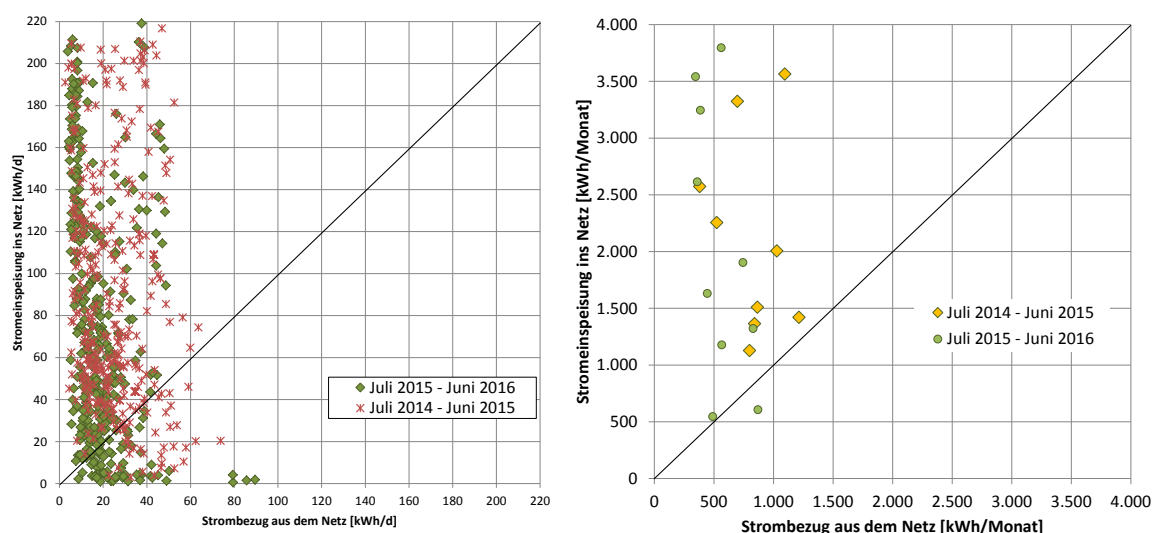


Bild 41: Strombilanz des Gebäudes: links auf Tagesbasis: sowohl im Sommer (überwiegend PV-Stromerzeugung) als auch im Winter (überwiegend BHKW-Stromerzeugung) kann auch auf Tagesbasis an den meisten Tagen ein Überschuss erzielt werden; rechts auf Monatsbasis: in jeden Monat wurde ein Stromüberschuss erreicht.

5.3 Eigenstromnutzung und Autarkiegrad

Die Eigenstromnutzung (bzw. Eigenverbrauch) wurde getrennt nach BHKW-Eigenstromnutzung und PV-Eigenstromnutzung sowie als Gesamtwert berechnet. Aufgrund eines nicht korrekt arbeitenden Zählers, konnte diese differenzierte Bilanz erst ab Anfang Oktober 2014 erstellt werden, zuvor wird ein Summenwert für Photovoltaik und BHKW angegeben. Da das BHKW bis Ende September 2014 nur 2,8 % der gesamten Stromproduktion bereitgestellt hat, ist der Fehler durch diese Vereinfachung gering.

Tabelle 25 zeigt den gemessenen Stromverbrauch des Gebäudes, die Erzeugung aus PV und BHKW und die jeweilige Eigenstromnutzung sowie die gesamte elektrische Energieerzeugung, die Einspeisung und die daraus berechnete Eigenstromnutzung des Gebäudes. Im Sommer 2015 (Juni - August) liegt die Eigenstromnutzung bei 37,2 % und im Winter (November-Februar) bei 59 % im ersten Messjahr (ohne Betrieb des Elektrospeichers) und bei 72 % im zweiten Messjahr (mit Elektrospeicher). Für das gesamte erste Messjahr ergibt sich ein Eigenverbrauch von 42 %, im zweiten von 50 %. Somit liegt der Eigenverbrauch des Gebäudes recht hoch.

Tabelle 25: Eigenstromnutzung getrennt nach PV und BHKW-Erzeugung sowie für die gesamte Energieerzeugung

	Stromverbrauch h Gebäude	Summe PV- Erzeugung	Eigenstrom- nutzung PV	el. Erzeugung BHKW	Eigenstrom- nutzung BHKW	el. Gesamt- erzeugung	el. Netzbezug	el. Einspeisung	Eigenstrom- nutzung gesamt
	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[%]
Jul. 14	2.915	6.457	2.156	93		6.550	697	4.301	34%
Aug. 14	2.658	5.516	2.223	57		5.573	381	3.293	41%
Sep. 14	2.812	3.810	1.560	241		4.051	1.028	2.250	44%
Okt. 14	2.760	2.111	958	1.130	842	3.241	1.214	1.420	56%
Nov. 14	2.807	890	255	2.619	1.799	3.508	842	1.364	61%
Dez. 14	2.921	402	118	2.994	2.086	3.396	799	1.127	67%
Jan. 15	2.909	771	96	2.963	2.022	3.734	866	1.510	60%
Feb. 15	2.558	1.594	168	2.855	1.940	4.450	524	2.255	49%
Mrz. 15	2.800	3.748	626	1.665	1.155	5.412	1.095	3.564	34%
Apr. 15	2.271	5.957	1.407	384	142	6.341	845	4.692	26%
Mai. 15	2.551	6.328	2.053	101	101	6.429	729	4.290	33%
Jun. 15	2.383	6.441	2.401	89	81	6.529	270	4.040	38%
Jul. 15	2.464	6.977	2.590	15	-3	6.992	274	4.386	37%
Aug. 15	2.346	5.923	2.382	28	7	5.951	346	3.541	40%
Sep. 15	2.536	3.933	2.030	172	148	4.105	743	1.904	54%
Okt. 15	2.817	2.386	1.149	1.304	1.175	3.691	829	1.321	64%
Nov. 15	2.810	1.161	659	1.746	1.581	2.907	869	607	79%
Dez. 15	2.786	740	358	2.399	2.148	3.139	489	546	83%
Jan. 16	3.095	896	230	3.072	2.438	3.968	566	1.178	70%
Feb. 16	2.619	1.457	305	2.589	2.012	4.047	444	1.631	60%
Mrz. 16	2.699	3.074	730	2.145	1.782	5.220	361	2.615	50%
Apr. 16	2.487	5.011	1.076	879	656	5.890	971	4.103	30%
Mai. 16	2.524	5.968	2.190	128	68	6.095	561	3.796	38%
Jun. 16	2.368	5.547	2.308	77	40	5.624	386	3.245	42%
Summe 2014/15	32.344	44.024	14.021	15.190	10.169	59.214	9.288	34.107	42%
Summe 2015/16	31.553	43.074	16.007	14.553	12.054	57.627	6.840	28.873	50%

Differenzen zwischen der Summe der Einzelwerte und den Daten für das gesamte Gebäude sind darin begründet, dass die Impulsausgänge der Haupteinspeise- und -bezugszähler nur mit einer Genauigkeit von ca. 3 % erfasst werden. Für die Monatsübersichten wurden die Messwerte mit Stichtagsregistern dieser drei Zähler korrigiert, die jedoch nicht vollständig mit den hochaufgelösten Messwerten übereinstimmen.

In Bild 42 sind der Autarkiegrad² des Gebäudes, die Eigenstromnutzung³ sowie die Betriebszeiten des Elektrospeichers dargestellt. Im Messzeitraum ist der Elektrospeicher (siehe Kapitel 5.6.4) vor allem zu Beginn aufgrund von Hardware- und Softwareproblemen einige Male ausgefallen. Zwischen 15.10.2014 und 14.04.2015 war er zur Klärung von Sicherheitsfragen komplett abgeschaltet, im Frühjahr 2016 war er erneut zweimal ca. 2 Wochen außer Betrieb.

Im Winter 2014/15 erreichte das Gebäude ohne den Elektrospeicher einen Autarkiegrad von 73 %. Mit den Speicher stieg der Autarkiegrad im zweiten Winter auf 80 % an. Im vollständig vermessenen Sommer 2015 erreichte das Gebäude einen Autarkiegrad von 85 %. Betrachtet man die Messjahre, so wurden 71 % im ersten bzw. 78 % zweiten Messjahr erreicht.

Somit erreicht das Gebäude bei hoher Eigenstromnutzung gleichzeitig einen sehr hohen Autarkiegrad. Gleichzeitig wird das elektrische Netz vor allem im Winter kaum durch erhöhten Strombezug belastet.

² Anteil des Verbrauchs, der aus der eigenen Erzeugung gedeckt wird

³ Anteil, der von der eigenen Stromerzeugung selbst genutzt und nicht eingespeist wird

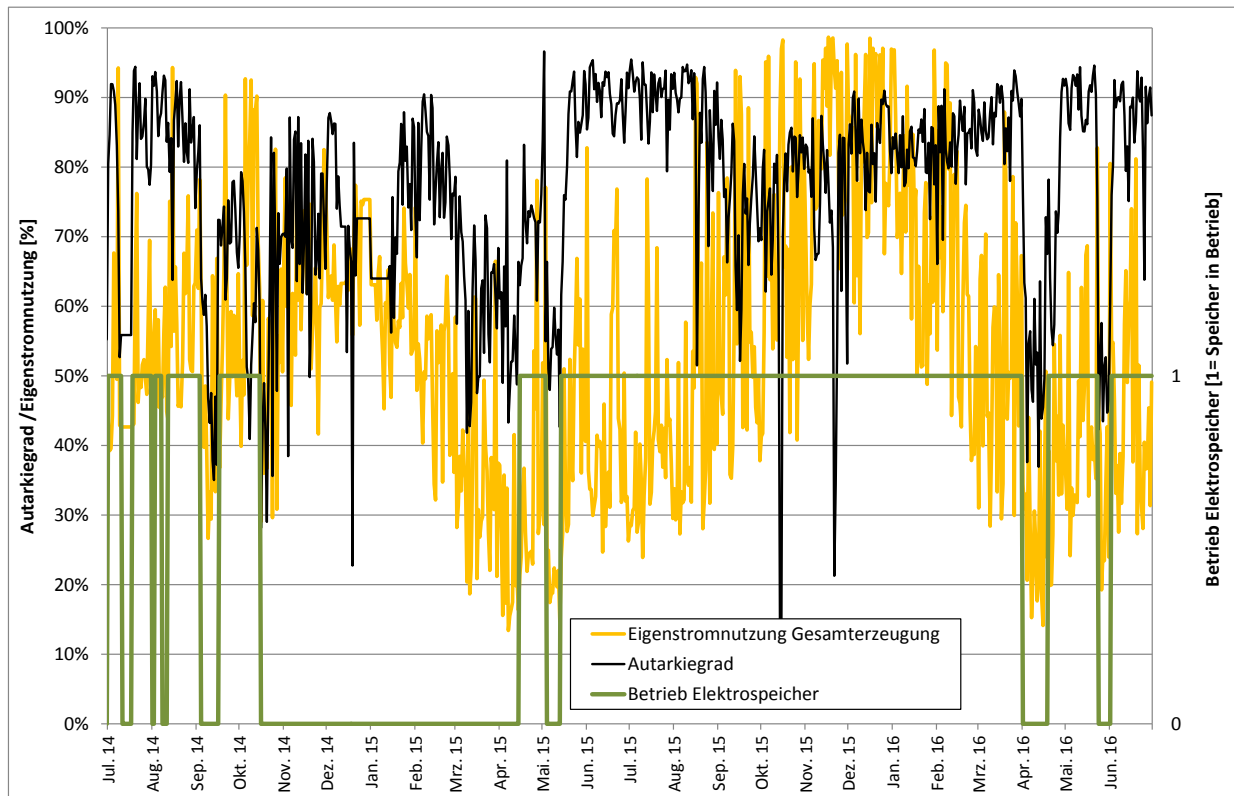


Bild 42: Autarkiegrad, Eigenstromnutzung und Betrieb Elektrospeicher

5.4 Wärmeerzeugung

Zur Wärmeerzeugung werden in dem Gebäude die solarthermischen Kollektoren sowie das Biomethan-BHKW eingesetzt (Tabelle 26 und Tabelle 27). Die solarthermische Anlage lieferte 2014/15 31,7 % der gesamten Wärmeerzeugung (2015/16: 31,0 %), das Biomethan-BHKW 67,6 % (66,2 %). Der mit Biomethan betriebene Spitzenlastkessel wurde kaum genutzt und lieferte nur 0,7 % (2,8 %) der Wärme.

Tabelle 26: Monatswerte der Wärmeerzeugung

	Solarthermie	Biomethan-BHKW	Biomethan-Therme	Summe
	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]
Jul. 14	2.838	258	0	3.096
Aug. 14	2.485	150	0	2.635
Sep. 14	1.842	664	0	2.506
Okt. 14	932	3.207	1	4.140
Nov. 14	278	7.356	13	7.647
Dez. 14	177	8.901	210	9.288
Jan. 15	179	8.550	168	8.897
Feb. 15	740	8.233	41	9.014
Mrz. 15	1.980	4.823	1	6.804
Apr. 15	3.271	1.104	1	4.376
Mai. 15	3.044	286	0	3.330
Jun. 15	2.797	254	1	3.052
Jul. 15	2.659	37	0	2.696
Aug. 15	2.419	75	14	2.508
Sep. 15	2.105	492	1	2.598
Okt. 15	1.236	3.865	731	5.832
Nov. 15	551	5.178	907	6.636
Dez. 15	332	7.027	1	7.360
Jan. 16	351	8.779	0	9.130
Feb. 16	581	7.388	25	7.994
Mrz. 16	1.416	6.097	1	7.514
Apr. 16	2.533	2.498	21	5.052
Mai. 16	2.936	361	40	3.337
Jun. 16	2.546	217	10	2.773
Summe 2014/15	20.563	43.786	436	64.785
Summe 2015/16	19.665	42.014	1.751	63.430
Anteil 2014/15	31,7%	67,6%	0,7%	100,0%
Anteil 2015/16	31,0%	66,2%	2,8%	100,0%

Tabelle 27: Kennwerte der Wärmeerzeugung

	absolut	bezogen auf A_N	bezogen auf A_{EBF}	Bedarf nach PHPP bzgl. auf A_{EBF}
	[kWh/a]	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]
2014/15				
Solarthermie	20.563	14,1	16,9	14,8
Biomethan-BHKW	43.786	30,0	35,9	35,6
Biomethan-Therme	436	0,3	0,4	0,0
Summe Wärmeerzeugung	64.785	44,4	53,1	50,4
2015/16				
Solarthermie	19.665	13,5	16,1	14,8
Biomethan-BHKW	42.014	28,8	34,5	35,6
Biomethan-Therme	1.751	1,2	1,4	0,0
Summe Wärmeerzeugung	63.430	43,5	52,0	50,4

Die Tagessummen der Wärmeerzeugung sind in Bild 43 für die drei Wärmeerzeuger dargestellt. Bis Anfang bzw. Mitte Oktober wurde die Wärme überwiegend von der solarthermischen Anlage geliefert. Durch Fehlfunktionen in der Regelung (durchgängiger Betrieb der Umwälzpumpe des BHKW) im ersten Messjahr wurde der Speicher jedoch permanent durchmischt, so dass immer wieder das Biomethan-BHKW angesprungen ist. Zusätzlich wurde durch eine falsche Betriebsweise des BHKW das komplette Puffervolumen vollständig beladen, so dass erhöhte Verluste aufgetreten sind. Diese Einstellung wurde am 11.09.2014 korrigiert. Am 22.10.2014 wurde im ersten Messjahr der Heizkreis in Betrieb genommen. In der Folgezeit liefert das BHKW den größten Teil der Wärme. Bild 44 zeigt die monatliche Bilanz der Wärmeerzeugung.

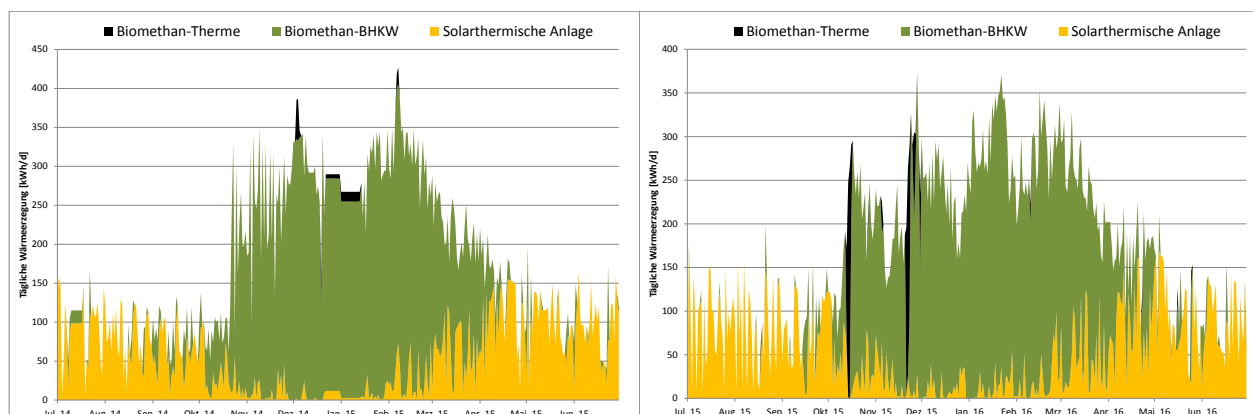


Bild 43: Tagessummen der Wärmeerzeugung aus Solarthermie, Biomethan-BHKW und Biomethan-Therme (gestapelt), links 2014/15, rechts 2015/16

Im zweiten Messjahr erfolgte die Inbetriebnahme der Heizkreise abhängig von der Außentemperatur. Durch einen Kälteeinbruch Ende September wurden dadurch der Heizbetrieb bereits am 28.09.2015 gestartet, ohne dass nennenswert Wärme in den Wohnungen abgenommen wurde, es entstanden jedoch Verteilverluste. Die Heizkreispumpen wurden dann am 05.10.2015 wieder abgeschaltet um dann am 10.10.2015 endgültig in den Heizbetrieb zu gehen. Die Raumtemperatur in dem Gebäude lag zu diesem Zeitpunkt bei ca. 22,3 °C.

Im Oktober und November 2015 trat am BHKW jeweils eine Störung über 4 Tage auf, so dass die Biomethan-Therme in dieser Zeit die Wärmeversorgung des Gebäudes übernehmen musste. Zusätzlich war die Biomethan-Therme am Jahreswechsel 2014/15 in Betrieb. Dies waren der einzigen Zeiträume während der gesamten Messphase, in denen die Biomethan-Therme das BHKW bei der Wärmeerzeugung unterstützen musste. Den Rest der Messphase war die Therme nur zu Wartungszwecken in Betrieb (siehe auch Bild 44).

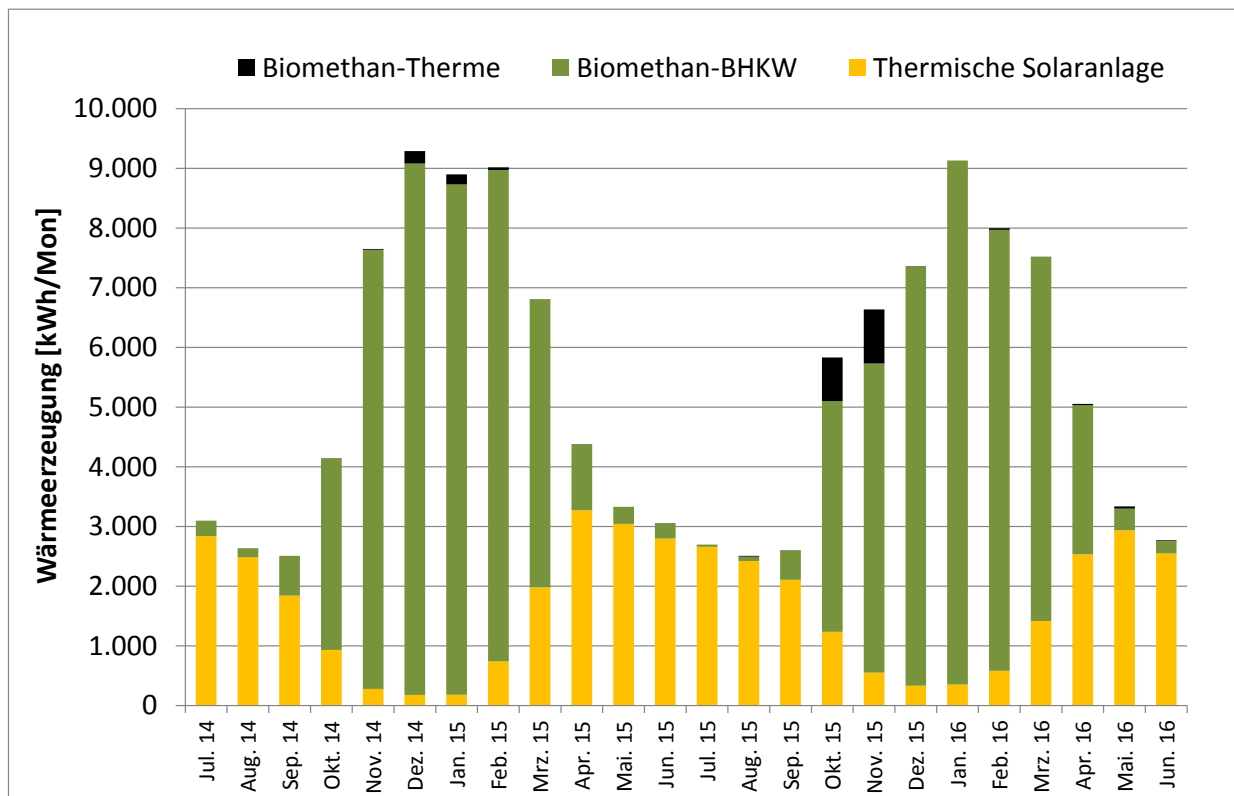


Bild 44: Monatliche Bilanz der Wärmeerzeugung aus Solarthermie, Biomethan-BHKW und Biomethan-Therme (gestapelt)

5.5 Wärmeverbräuche

In Tabelle 28 sind die Verbrauchswerte des Gebäudes für Wärme dargestellt. Differenzen zwischen der Erzeugernutzwärmeabgabe und der gesamten Wärmeerzeugung in Tabelle 27 sind durch den Wärmeverbrauch für die Frostfreihaltung der solarthermischen Anlage begründet (siehe Kapitel 5.6.1.1).

Tabelle 28: Kennwerte des Wärmeverbrauchs

	absolut	bezogen auf A_N	bezogen auf A_{EBF}	Bedarf nach PHPP bzg. auf A_{EBF}
	[kWh/a]	[kWh/(m ² a)]	[kWh/(m ² a)]	[kWh/(m ² a)]
2014/15				
Verbräuche				
Heizwärmeverbrauch	24.959	17,1	20,5	15,2
Wärme Warmwasserbereitung	19.489	13,4	16,0	16,6
Verluste				
Verluste Heizwärmeverteilung	4.375	3,0	3,6	0,9
Verluste Warmwasserbereitung	2.565	1,8	2,1	3,5
Verluste Wärmespeicherung	13.015	8,9	10,7	1,0
Erzeugernutzwärmeabgabe	64.403	44,2	52,8	37,3
2015/16				
Verbräuche				
Heizwärmeverbrauch	24.307	16,7	19,9	15,2
Wärme Warmwasserbereitung	19.766	13,6	16,2	16,6
Verluste				
Verluste Heizwärmeverteilung	4.236	2,9	3,5	0,9
Verluste Warmwasserbereitung	2.248	1,5	1,8	3,5
Verluste Wärmespeicherung	12.380	8,5	10,2	1,0
Erzeugernutzwärmeabgabe	62.937	43,2	51,6	37,3

5.5.1 Heizwärme

Von der erzeugten Wärme wurden im ersten Messjahr 45 % bzw. 29.334 kWh in den Heizkreis eingespeist (Rest: Warmwasser) (Tabelle 29). In den Wohnungen wurden 24.959 kWh für die Heizung abgenommen, so dass sich insgesamt Verteilverluste für die Heizwärme von 15 % ergeben, die erwartungsgemäß zum Ende der Heizzeit im März aufgrund der geringer werdenden Wärmeabnahme ansteigen. Der Heizwärmeverbrauch der Wohnungen lag bei 20,5 kWh/(m²_{EBF}*a) im ersten bzw. bei 19,9 kWh/(m²_{EBF}*a) im zweiten Messjahr. Auf die die Gebäudenutzfläche A_N bezogen lagen der Heizwärmeverbrauch bei 17,1 kWh/(m²_{AN}*a) bzw. 16,7 kWh/(m²_{AN}*a). Der Bedarfswert für die Heizwärme lag nach PHPP bei 15,2 kWh/(m²_{EBF}*a), so dass ein Mehrverbrauch von ca. 5 kWh/(m²_{EBF}*a) aufgetreten ist.

Werden in der PHPP-Bilanz das reale Außenklima, die tatsächliche Raumtemperatur von 22,3° C (statt 20 °C nach Standardrandbedingung) und die reduzierten inneren Wärmequellen durch den geringen Haushaltsstromverbrauch (1,6 statt 2,1 W/m²), ergibt sich ein Bedarfswert von 17,0 kWh/(m²_{EBF}*a) (siehe auch Kapitel 4.3), so dass das Gebäude nur leicht über dem zu erwartenden Verbrauch liegt. Gründe hierfür können sein:

- die verspätete Sommer/Winter-Umschaltung der Wärmerückgewinnung der Lüftungsanlagen, die vor allem im ersten Messjahr erst Anfang November nach Beginn des Heizbetriebs erfolgte
- eine niedrigere Personenanwesenheit als geplant (reduziert die internen Gewinne zusätzlich)

- die Nutzung der Schiebeläden im Winter als Sichtschutz (reduziert die solaren Gewinne)
- Fensterlüftung
- Messfehler der Wärmemengenzähler im unteren Messbereich

Insgesamt wird der Planwert nach PHPP unter Berücksichtigung der realen Raumtemperatur aber sehr gut erreicht. Der Bedarfswert nach DIN V 18599 ist mit 9,2 kWh/(m²A_Na) für dieses Gebäude unrealistisch niedrig.

Tabelle 29: Effizienz Heizungsverteilung

	Wärmeerzeugung gesamt	Einspeisung Heizkreis	Abnahme Heizung WE	Verluste Heizungsverteilung
	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[%]
Jul. 14	3.096	0	0	
Aug. 14	2.635	1	1	
Sep. 14	2.506	1	2	
Okt. 14	4.140	1.165	999	14%
Nov. 14	7.647	4.800	4.103	15%
Dez. 14	9.288	6.032	5.112	15%
Jan. 15	8.897	5.707	4.999	12%
Feb. 15	9.014	6.155	5.363	13%
Mrz. 15	6.804	3.675	3.035	17%
Apr. 15	4.376	1.595	1.213	24%
Mai. 15	3.330	185	120	35%
Jun. 15	3.052	18	12	
Jul. 15	2.696	0	0	
Aug. 15	2.508	1	1	
Sep. 15	2.598	87	73	16%
Okt. 15	5.832	2.915	2.502	14%
Nov. 15	6.636	3.765	3.264	13%
Dez. 15	7.360	4.275	3.674	14%
Jan. 16	9.130	5.723	4.973	13%
Feb. 16	7.994	4.840	4.176	14%
Mrz. 16	7.514	4.414	3.730	15%
Apr. 16	5.052	2.127	1.642	23%
Mai. 16	3.337	395	272	31%
Jun. 16	2.773	1	0	
Summe 2014/15	64.785	29.334	24.959	
Summe 2015/16	63.430	28.543	24.307	
Anteil 2015/16		45%	38%	15%

5.5.2 Warmwasserbereitung

Für die Warmwasserbereitung wurden insgesamt 22.054 kWh/a bzw. 22.014 kWh/a Wärme an die Frischwasserstation geliefert, die Wärme des erzeugten Warmwassers betrug 19.489 kWh/a bzw. 19.766 kWh/a (Tabelle 30). Die Verluste der Warmwasserbereitung liegen bei insgesamt 11,6 % bzw. 10,2 %, die sich auf 6,8 % für die Frischwasserstation und angeschlossenen Hydraulik sowie 4,8 % für die Zirkulation verteilen.

Tabelle 30: Effizienz Warmwasserbereitung

	Wärmeerzeugung gesamt	Abnahme Frischwasser- station	Wärme Warmwasser	Wärme Zirkulation	Verluste Warmwasser- bereitung
	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[%]
Jul. 14	3.096	1.427	1.228	159	2,8%
Aug. 14	2.635	1.391	1.197	113	5,8%
Sep. 14	2.506	1.647	1.436	72	8,4%
Okt. 14	4.140	1.989	1.692	94	10,2%
Nov. 14	7.647	1.951	1.691	53	10,6%
Dez. 14	9.288	2.051	1.794	52	10,0%
Jan. 15	8.897	2.162	1.905	51	9,5%
Feb. 15	9.014	1.955	1.748	52	7,9%
Mrz. 15	6.804	2.207	1.971	60	8,0%
Apr. 15	4.376	1.717	1.564	62	5,3%
Mai. 15	3.330	1.879	1.732	88	3,1%
Jun. 15	3.052	1.678	1.531	86	3,6%
Jul. 15	2.696	1.425	1.315	119	-0,6%
Aug. 15	2.508	1.299	1.187	109	0,2%
Sep. 15	2.598	1.675	1.514	70	5,4%
Okt. 15	5.832	2.057	1.850	94	5,5%
Nov. 15	6.636	1.978	1.773	134	3,6%
Dez. 15	7.360	2.012	1.807	121	4,2%
Jan. 16	9.130	2.258	2.028	131	4,4%
Feb. 16	7.994	2.124	1.899	130	4,5%
Mrz. 16	7.514	2.018	1.790	141	4,3%
Apr. 16	5.052	1.907	1.696	155	2,9%
Mai. 16	3.337	1.791	1.605	175	0,6%
Jun. 16	2.773	1.470	1.302	176	-0,5%
Summe 2014/15	64.785	22.054	19.489	942	
Summe 2015/16	63.430	22.014	19.766	1.555	

Es ergibt sich eine Wärmeabnahme von $18,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBF}} \text{ a})$ (beide Jahre) durch die Frischwasserstation, eine Erzeugung von Warmwasser $16,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBF}} \text{ a})$ / $16,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBF}} \text{ a})$ sowie Zirkulationsverlusten von $0,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBF}} \text{ a})$. Ende April 2015 wurde der Volumenstrom im Zirkulationskreis von der maximalen auf die mittlere Stufe der Pumpe umgeschaltet, da kaum eine Auskühlung im Zirkulationskreis auftrat und zu warmes Wasser in den Speicher zurück geleitet wurde. In der Folge stiegen die gemessenen Zirkulationsverluste auf $1,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$ an. Ursache könnte eine Verringerung des Messfehlers des Wärmezählers bei größerer Temperaturdifferenz sein.

Vergleicht man den absoluten Bedarfswert für Warmwasser nach EnEV von 18.722 kWh/a (siehe Kapitel 2.5), so stimmen Bedarf und Messwert (ca. 19.600 kWh/a) sehr gut überein.

5.5.3 Verteilverluste für Heizung und Warmwasser

Wärmeverluste entstehen beim Transport vom Wärmeerzeuger zum Puffer, in den Pufferspeichern sowie bei der Verteilung und Übergabe im Gebäude. Tabelle 31 zeigt die Bilanz der Pufferspeicher und der Wärmeverteilung. Die Gesamtverluste belaufen sich im Betrachtungszeitraum auf 25,0 % bzw. 23,7 %. Die Gesamtverluste teilen sich auf in 20,1 % für Verluste des Speichers, der Anschlüsse und durch Fehlzirkulationen im ersten und 19,5 % im zweiten Messjahr. Für die Verteilung und Übergabe der Heiz- und Warmwasserwärme im Gebäude traten Verluste in Höhe von 4,9 % bzw. 4,2 % auf. Einen Anteil an den Speicherverlusten im ersten Messjahr haben die ungedämmten Unterseiten der Puffer-

speicher, deren Dämmung geplant war, aber erst am 23.04.2015 nachträglich umgesetzt wurde. Bei den niedrigen Verlusten für die Verteilung zeigt sich die Dämmung der Verteilleitung mit 250 % der EnEV-Anforderungen und die Rohr-in-Rohr-Zirkulation als sehr wirksam.

Tabelle 31: Bilanz der Wärmespeicherung und -übergabe

	Beladung Speicher	Entladung Speicher	Abgabe an das Gebäude	Verluste Speicher, Anschlüsse & Fehlzirkulationen	Verluste Verteilung HZ+WW	Verluste Gesamt
	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]
Jul. 14	3.096	1.427	1.228	1.669	199	1.868
Aug. 14	2.635	1.409	1.204	1.226	205	1.431
Sep. 14	2.506	1.650	1.437	856	213	1.069
Okt. 14	4.140	3.154	2.831	986	323	1.309
Nov. 14	7.647	6.766	6.416	881	350	1.231
Dez. 14	9.288	8.167	7.789	1.121	378	1.499
Jan. 15	8.897	8.000	7.605	897	395	1.292
Feb. 15	9.014	8.201	7.874	813	327	1.140
Mrz. 15	6.804	5.916	5.613	888	303	1.191
Apr. 15	4.376	3.319	3.148	1.057	171	1.228
Mai. 15	3.330	2.065	1.915	1.265	150	1.415
Jun. 15	3.052	1.696	1.548	1.356	148	1.504
Jul. 15	2.696	1.425	1.316	1.271	109	1.380
Aug. 15	2.508	1.300	1.187	1.208	113	1.321
Sep. 15	2.598	1.762	1.601	836	161	997
Okt. 15	5.832	4.976	4.772	856	204	1.060
Nov. 15	6.636	5.771	5.564	865	207	1.072
Dez. 15	7.360	6.305	6.098	1.055	207	1.262
Jan. 16	9.130	8.050	7.812	1.080	238	1.318
Feb. 16	7.994	7.010	6.785	984	225	1.209
Mrz. 16	7.514	6.466	6.235	1.048	231	1.279
Apr. 16	5.052	4.327	3.712	725	615	1.340
Mai. 16	3.337	2.187	2.004	1.150	183	1.333
Jun. 16	2.773	1.471	1.302	1.302	169	1.471
Summe 2014/15	64.785	51.770	48.608	13.015	3.162	16.177
Summe 2015/16	63.430	51.050	48.388	12.380	2.662	15.042

Bild 45 zeigt die monatlichen Verluste und die Nutzwärme grafisch.

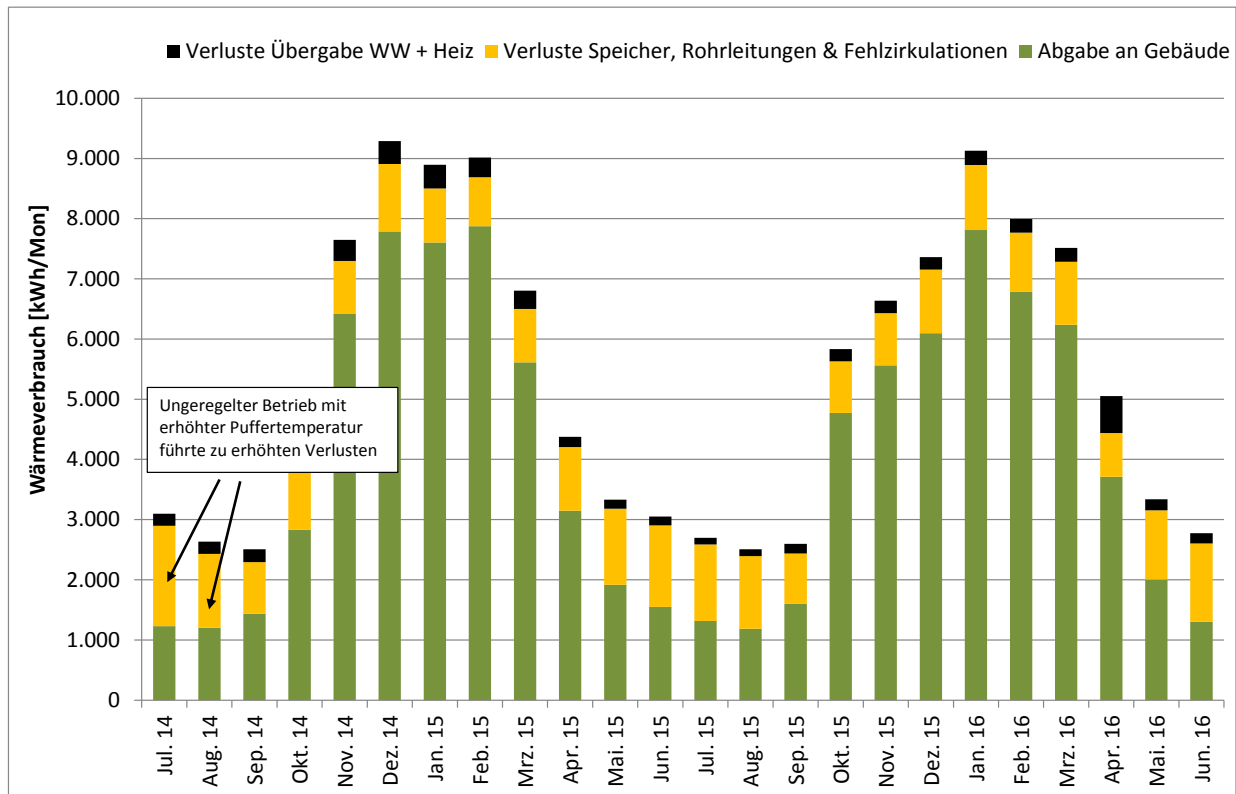


Bild 45: Monatliche Bilanz der Wärmeabnahmen sowie Verluste der Übergabe und der Speicherung

In Bild 46 ist das gleitende Mittel der Wärmeverluste über 7 Tage der beiden Speicher in Abhängigkeit der Mitteltemperatur vor und nach der nachträglichen Dämmung der Speicherunterseite aufgetragen. Es ergibt sich zwischen 40 °C und 75 °C eine vergleichsweise lineare Abhängigkeit der Verluste von der Speichermitteltemperatur. Die Steigung der Ausgleichsgeraden liegt vor der Dämmung der Speicherböden bei 0,6559 kWh/(Kd), was einer Verlustleistung von ca. 27 W/K (für 2 Speicher, 13,5 W/K für einen Speicher) entspricht. Ein Speicher dieser Größenordnung sollte maximal bei 10 W/K liegen. Nach Dämmung der Speicherböden liegen die Wärmeverluste im zweiten Messjahr bei 0,3599 kWh/Kd, was 7,5 W/K je Speicher entspricht. Auch wenn bei dieser Auswertung nennenswerte Unsicherheiten vorhanden sind (Verluste der Rohrleitungen zum Speicher, Messunsicherheiten durch Verrechnung von 5 Wärmezählerwerten, langes Mittelungsintervall von einer Woche, schlechtes R^2), sind die Verbesserungen durch die nachträgliche Speicherdämmung messtechnisch zu erkennen. In der Jahresbilanz liegen die Speicherverluste ca. 2000 kWh unten denen des ersten Messjahres, allerdings bei reduzierter Gesamtwärmeproduktion.

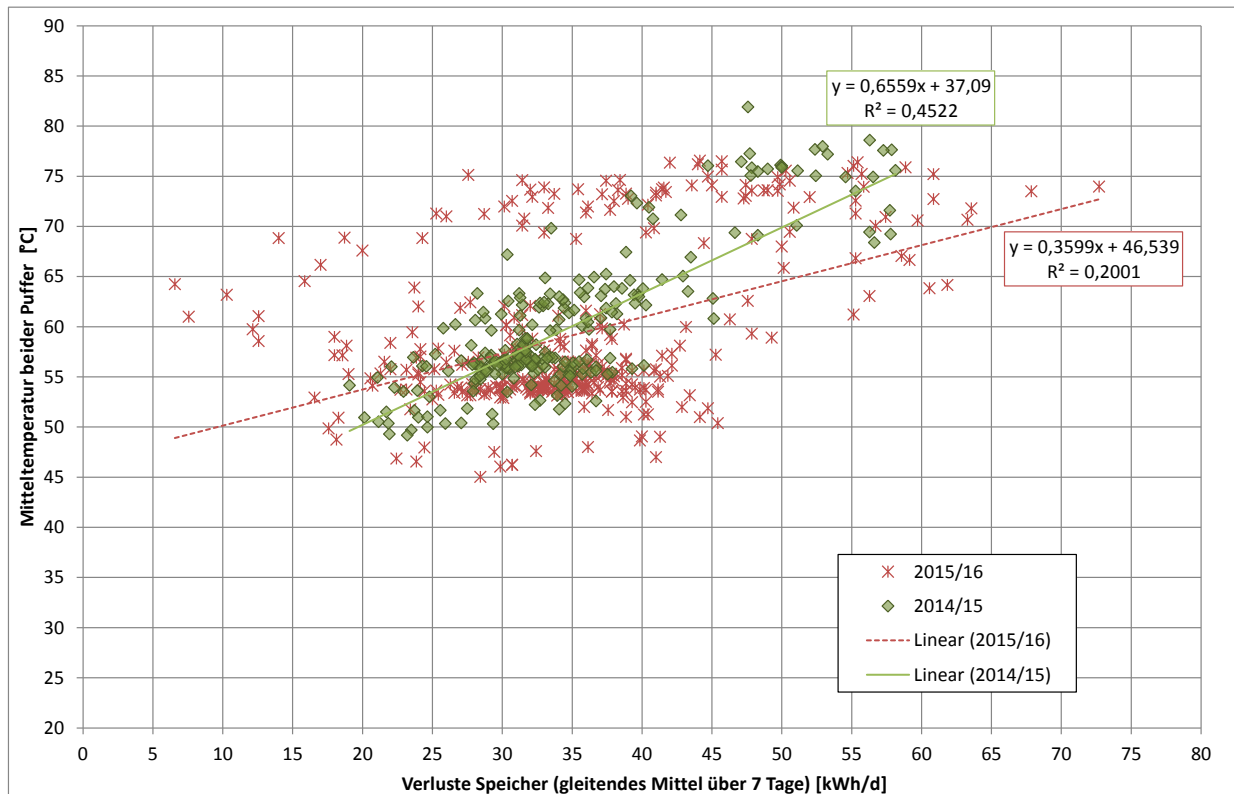


Bild 46: Verluste der Speicher in Abhängigkeit von der Temperatur in Speicher 2 vor Dämmung der Unterseite der Speicher

5.6 Anlagenperformance

5.6.1 Wärmeerzeuger

Im Folgenden sind die Aufwandszahlen der Solarthermie, des Biomethan-BHKW und der Biomethan-Therme dargestellt.

5.6.1.1 Solarthermie

Die solarthermische Anlage lieferte im Auswertezeitraum 22.553 kWh Wärme im ersten und 19.665 kWh im zweiten Messjahr in die Pufferspeicher, was 31,7 % bzw. 31,0 % der gesamten Wärmeerzeugung entspricht. Von der Wärmelieferung der Anlage muss die Wärme für die Frostfreihaltung des Solarkreises im Winter abgezogen werden. Diese summiert sich auf 395 kWh bzw. 493 kWh, d. h. 1,9 % bzw. 2,5 % der übers Jahr erzeugten Wärme wurde im Winter wieder entnommen, jedoch als Niedertemperaturwärme aus dem kalten Bereich des Pufferspeichers. Allerdings führt die Rückspeisung des abgekühlten Vorlaufs wohl zu einer gewissen Durchmischung der Puffer, die jedoch nicht messtechnisch belegt werden konnte.

Der Nettowärmelieferung steht der Hilfsstromverbrauch gegenüber, der mit 981 kWh bzw. 946 kWh/a vergleichsweise hoch ausfällt. Auf die Nettogrundfläche bezogen, liegt der Kennwert für den Hilfsstrom Solar bei $0,84 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a})$ bzw. $0,81 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a})$. Grund ist wahrscheinlich die unterbrechungsfreie Stromversorgung, die bei Ausfall des elektrischen Netzes den Betrieb der Solarpumpe zur Frostfreihaltung sicherstellen soll. Dennoch lag die mittlere Arbeitszahl der solarthermischen Anlage (Nettowärmelieferung zu Hilfsstrom Solar) lag im Betrachtungszeitraum bei 20,6 bzw. 20,3. Im Som-

mer wird mit Arbeitszahlen zwischen 30 und 40 eine sehr hohe Effizienz erreicht. Im Dezember 2014 / Januar 2015, mit geringem Solarertrag und zusätzlichem Frostschutzbetrieb wurde endenergetisch etwa genau so viel Energie verbraucht, wie aus Solarthermie gewonnen wurde. Im zweiten Messjahr lag die Arbeitszahl bei vergleichbarer solarer Einstrahlung immer noch bei etwa 4.

Tabelle 32: Monatliche Daten der thermischen Solaranlage

	solare Einstrahlung horizontal	solare Wärmeabgabe	Wärme für Frostschutz	Nettowärme- lieferung	Hilfsstrom	Arbeitszahl
	[W/m ²]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[-]
Jul. 14	250	2.838	0	2.838	93,1	30,5
Aug. 14	194	2.485	-17	2.468	96,6	25,5
Sep. 14	135	1.842	-2	1.840	85,2	21,6
Okt. 14	69	932	0	932	80,5	11,6
Nov. 14	29	278	-15	263	74,3	3,5
Dez. 14	17	177	-84	93	77,2	1,2
Jan. 15	24	179	-131	48	77,7	0,6
Feb. 15	58	740	-91	649	70,8	9,2
Mrz. 15	122	1.980	-34	1.946	79,6	24,4
Apr. 15	226	3.271	-7	3.264	80,9	40,3
Mai. 15	233	3.044	-1	3.043	84,4	36,1
Jun. 15	257	2.797	0	2.797	81,1	34,5
Jul. 15	271	2.659	0	2.659	84,8	31,4
Aug. 15	221	2.419	0	2.419	83,3	29,0
Sep. 15	142	2.105	0	2.105	77,7	27,1
Okt. 15	77	1.236	-4	1.232	78,1	15,8
Nov. 15	33	551	-28	523	74,6	7,0
Dez. 15	25	332	-18	314	76,8	4,1
Jan. 16	30	351	-69	282	77,1	3,7
Feb. 16	49	581	-46	535	72,6	7,4
Mrz. 16	101	1.416	-34	1.382	78,8	17,5
Apr. 16	185	2.533	-293	2.240	78,3	28,6
Mai. 16	227	2.936	-1	2.935	83,0	35,4
Jun. 16	228	2.546	0	2.546	80,9	31,5
Summe 2014/15		20.563	-382	20.181	981	
Summe 2015/16		19.665	-493	19.172	946	
Mittelwert 2014/15	134,6					20,6
Mittelwert 2015/16	132,4					20,3

In Bild 47 sind die Monatsmittelwerte der Wirkungsgrade des Vakuumröhrenkollektorfeldes, bezogen auf die horizontale Solarstrahlung dargestellt. Im ersten Sommer wurde die Anlagentechnik noch nicht optimal betrieben, so dass die Vorlauftemperaturen der Kollektoren recht hoch ausfielen, was die Effizienz reduzierte. Die Wirkungsgrade lagen zwischen 35 % und 56 % im Sommer und in der Übergangszeit. Dabei muss berücksichtigt werden, dass im Sommer nicht die gesamte verfügbare Solarwärme eingespeichert werden kann, wenn die Wärmeabnahme gering ist. Dadurch ergibt sich rechnerisch ein niedrigerer Wirkungsgrad. Im Winter sank der Wirkungsgrad bei sehr niedrig solarer Einstrahlung auf 25 % im Januar 2015 ab.

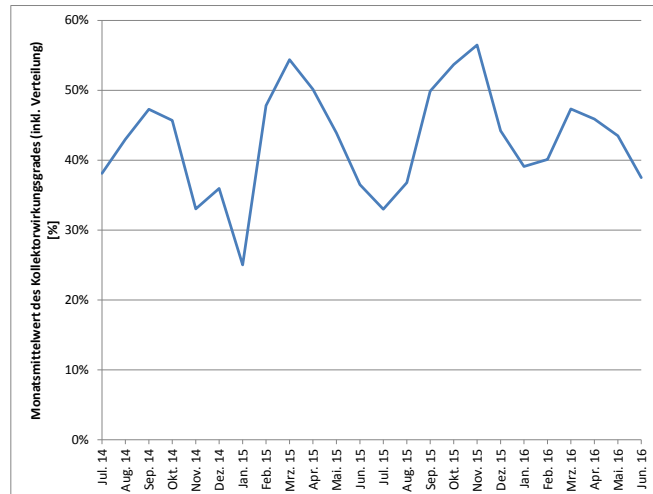


Bild 47: Monatsmittelwerte des Kollektorwirkungsgrades, bezogen auf die horizontale Einstrahlung inkl. Verteilung vom Dach in den Technikraum

Der ertragsgewichtete mittlere Wirkungsgrad des Kollektorfeldes lag bei 44 % bzw. 42,6 %. Die Regelung schaltet den Solarkreis ab einer Kollektortemperatur von 65 °C ein, wenn diese Temperatur im Speicher eingeschichtet werden kann. Herstellerangabe bei einer Einstrahlung von 400 W/m² und einer Lufttemperatur von 0 °C ist für diesen Betriebspunkt ist ein Wirkungsgrad von ca. 50 %. Somit kommt das Kollektorfeld dieser Angabe recht nahe, wenn man die Abweichung des Kollektors aus der Südrichtung (Orientierung wie die PV-Anlage auf dem Carport) berücksichtigt.

5.6.1.2 Biomethan-BHKW

Das BHKW liefert besonders im Winter den größten Teil der benötigten Wärme des Gebäudes. In Tabelle 33 sind die wichtigsten Größen dargestellt. Die Stromkennzahl (Verhältnis von elektrischer zu thermischer Energie) liegt bei 0,347, wird der erforderliche Hilfsstrom berücksichtigt, erreicht sie einen Wert von 0,344. Die auf Brennwert H₅ bezogene Aufwandszahl liegt im Mittel bei 1,19, bezogen auf den Heizwert H_i ergibt sich ein Nutzungsgrad von 94,7 %. Die Herstellerangaben für das BHKW liegen bei 89 % Brennstoffnutzung ohne Brennwertwärmetauscher und 100 % mit Brennwertwärmetauscher, der in der Cordierstraße vorhanden ist. Das Potenzial der Brennwertnutzung konnte somit nicht voll genutzt werden. Die Rücklauftemperaturen lagen in der Kernheizperiode (Nov-Feb), in der das BHKW fast permanent in Betrieb war, im Mittel bei 43,2 °C bzw. 38,5 °C.

Tabelle 33: Monatliche Daten des BHKW

	Gasverbrauch	Gasverbrauch (H ₂)	Wärmeerzeugung	Stromerzeugung	Aufwandszahl	Hilfsstrom
	[m ³ /Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[-]	[kWh/Monat]
Jul. 14	39,6	428	258	93	1,22	16,4
Aug. 14	24,2	261	150	57	1,26	27,8
Sep. 14	101,9	1.100	664	241	1,22	7,3
Okt. 14	473,2	5.110	3.207	1.130	1,18	6,0
Nov. 14	1.090,0	11.771	7.356	2.619	1,18	6,2
Dez. 14	1.259,2	13.600	8.901	2.994	1,14	8,4
Jan. 15	1.247,3	13.470	8.550	2.963	1,17	6,8
Feb. 15	1.195,4	12.910	8.233	2.855	1,16	5,5
Mrz. 15	706,9	7.634	4.823	1.665	1,18	6,1
Apr. 15	165,4	1.787	1.104	384	1,20	5,8
Mai. 15	43,7	471	286	101	1,22	6,7
Jun. 15	38,0	411	254	89	1,20	6,1
Jul. 15	6,3	68	37	15	1,32	8,1
Aug. 15	11,8	127	75	28	1,24	5,4
Sep. 15	73,5	794	492	172	1,20	5,2
Okt. 15	553,0	5.972	3.865	1.304	1,16	7,2
Nov. 15	738,4	7.975	5.178	1.746	1,15	8,1
Dez. 15	1.004,1	10.844	7.027	2.399	1,15	5,7
Jan. 16	1.288,7	13.918	8.779	3.072	1,17	5,7
Feb. 16	1.088,6	11.756	7.388	2.589	1,18	5,7
Mrz. 16	905,5	9.779	6.097	2.145	1,19	5,9
Apr. 16	372,8	4.026	2.498	879	1,19	5,8
Mai. 16	54,1	584	361	128	1,20	6,4
Jun. 16	32,8	354	217	77	1,20	8,8
Summe 2014/15	6.385	68.954	43.786	15.190		109
Summe 2015/16	6.129	66.197	42.014	14.553		78

Der Biomethanverbrauch lag bei 47,3 kWh/(m²A_N*a) bzw. 45,4 kWh/(m²A_N*a) für die Wärme- und Stromerzeugung bzw. 47,6 kWh/(m²A_N*a) bzw. 46,7 kWh/(m²A_N*a) inkl. der Therme (siehe folgendes Kapitel 5.6.1.3). Wird nur der Anteil für die Wärmeerzeugung betrachtet, so liegt der Biomethanverbrauch bei 36,6 kWh/(m²A_N*a) bzw. bei 36,2 kWh/(m²A_N*a). Die Überschreitung des Biomassebudgets von 35 kWh/(m²_{WF}*a), das in [Diefenbach 2002] vorgeschlagen wurde, liegt somit bei ca. 20 % (bei Umrechnung von Wohnfläche auf A_N). Ursache sind dabei vor allem der höhere Wohnkomfort mit den erhöhten Raumtemperaturen im Winter.

5.6.1.3 Biomethan-Therme

Die mit Biomethan betriebene Therme wurde nur als Sicherheitsreserve bei Ausfall des BHKW und ggf. als Spitzenlastwärmeerzeuger im Winter vorgesehen. Die Betriebszeiten im Messzeitraum beschränken sich auf kurze Intervalle (siehe auch Kapitel 5.4). Die Aufwandszahl beträgt bezogen auf den Brennwert H₂ 1,11. Sie konnte den vom Hersteller angegebenen Wirkungsgrad (102,2 % bei Teillast, bezogen auf H₂) etwa erreichen. Der elektrische Energieverbrauch liegt mit 3,91 kWh/Monat bei reinem Standby-Betrieb sehr gering und entspricht einer Standby-Leistung von 5,4 W.

Tabelle 34: Wärmeerzeugung der Biomethan-Therme

	Gasverbrauch	Gasverbrauch (H ₂)	Wärmeer- zeugung	Aufwandszahl	Hilfsstrom
	[m ³ /Monat]	[kWh/Monat]	[kWh/Monat]	[-]	[kWh/Monat]
Jul. 14	0,0	0	0		3,7
Aug. 14	0,0	0	0		3,7
Sep. 14	0,0	0	0		3,6
Okt. 14	0,0	0	1		3,8
Nov. 14	1,4	15	13	1,15	3,7
Dez. 14	21,3	230	210	1,10	4,3
Jan. 15	17,8	192	168	1,14	4,0
Feb. 15	4,2	45	41	1,10	3,5
Mrz. 15	0,0	0	1		3,8
Apr. 15	0,0	0	1		3,7
Mai. 15	0,0	0	0		3,8
Jun. 15	0,0	0	1		3,7
Jul. 15	0,0	0	0		3,8
Aug. 15	1,5	16	14	1,14	3,9
Sep. 15	0,0	0	1		3,7
Okt. 15	74,1	801	731	1,10	5,3
Nov. 15	92,8	1.002	907	1,10	5,6
Dez. 15	0,0	0	1		3,8
Jan. 16	0,0	0	0		3,8
Feb. 16	2,5	27	25	1,07	3,6
Mrz. 16	0,0	0	1		3,8
Apr. 16	2,0	22	21	1,05	3,7
Mai. 16	4,2	46	40	1,14	3,9
Jun. 16	1,0	11	10	1,08	3,7
Summe 2014/15	45	482	436		45
Summe 2015/16	178	1.924	1.751		49

5.6.2 Lüftungsanlage

Der Stromverbrauch der Lüftungsanlagen aller 17 Wohnungen wird gemeinsam über einen Unterzähler erfasst. Es zeigt sich bis Februar 2015 nur eine geringe monatliche Schwankung in den Verbräuchen. Im April erhielten die Mieter neben der Rückmeldung ihres individuellen Verbrauchs auch ein 2-seitiges Informationsblatt im Hinweisen zur Bedienung der Anlagentechnik in den Wohnungen und zum Lüften (siehe Anhang D). Die darin enthaltene Empfehlung zur Reduktion des Luftvolumenstroms in den Sommermonaten scheint teilweise umgesetzt worden zu sein, da der Lüftungsstromverbrauch um ca. 25 % abgenommen hat. Die mittlere Leistung je Wohnung lag im gesamten Zeitraum bei ca. 32 W, was 0,46 W/m²_{NGF} entspricht.

Tabelle 35: Monatliche Stromverbräuche der Lüftungsanlagen, mittlere Leistung und spezifische Leistung

	Lüftungsstrom- verbrauch	mittlere Leistung	spez. Leistung
	[kWh/Monat]	[W]	[W/m ² A _{NGF}]
Jul. 14	443,5	615,9	0,53
Aug. 14	431,9	599,8	0,51
Sep. 14	426,2	591,9	0,51
Okt. 14	429,0	595,8	0,51
Nov. 14	416,2	578,1	0,49
Dez. 14	424,4	589,4	0,50
Jan. 15	448,5	622,9	0,53
Feb. 15	402,1	558,5	0,48
Mrz. 15	360,7	501,0	0,43
Apr. 15	308,1	427,9	0,37
Mai. 15	298,4	414,5	0,35
Jun. 15	310,4	431,2	0,37
Jul. 15	373,6	519,0	0,44
Aug. 15	377,6	524,5	0,45
Sep. 15	369,9	513,8	0,44
Okt. 15	393,0	545,8	0,47
Nov. 15	430,2	597,5	0,51
Dez. 15	411,1	570,9	0,49
Jan. 16	476,5	661,8	0,57
Feb. 16	417,1	579,3	0,50
Mrz. 16	397,8	552,5	0,47
Apr. 16	319,2	443,3	0,38
Mai. 16	317,5	441,0	0,38
Jun. 16	321,5	446,6	0,38
Summe 2014/15	4.699,4		
Summe 2015/16	4.605,0		
Mittelwert 2014/15		543,9	0,46
Mittelwert 2015/16		533,0	0,46

5.6.3 Photovoltaikanlagen

Die Auswertungen zur Performance der Photovoltaikanlagen findet sich in Kapitel 5.2.

5.6.4 Elektrospeicher

Um die elektrische Energie vorrangig im Gebäude selbst zu nutzen, wird ein elektrischer Energiespeicher mit 30,7 kWh nutzbarer DC-Kapazität eingesetzt (27 kWh AC-Kapazität) (Bild 18 und Bild 19). Der Speicher besitzt 40 Lithium-Eisenphosphat-Zellen (LiFePO₄) mit je 300 Ah Kapazität, die dreiphasig (AC) mit dem Gebäude und den Energieerzeugern verbunden sind. Die Entladetiefe wurde vom Hersteller auf 25 % festgelegt, um auch bei längerem Stillstand Tiefentladungen zu verhindern und so die Lebensdauer der Zellen zu verlängern. Aus dem gleichen Grund wurde der Lade-/Entladestrom auf 0,3 C bzw. 100 A begrenzt. Der Speicher wird nur dann geladen, wenn mehr elektrische Energie im Haus erzeugt als verbraucht wird, wobei zur Verlängerung der Lebensdauer eine möglichst gleichmäßige Ladung der Zellen angestrebt ist. Eine Ladung aus dem Netz ist nur zur Verhinderung von Tiefentladung bei längerem Stillstand vorgesehen.

Die Verluste der LiFePO₄-Zellen liegen nach Herstellerangaben bei 3 %, die Verluste der Wechselrichter bei 4 % (Laden) bzw. 6 % (Entladen), so dass der AC-Gesamtwirkungsgrad des Speichers mit 88 % angegeben wird.

Besonderheit der Speicherregelung ist, dass das Gebäude bei Versorgung aus dem Speicher komplett vom Netz getrennt wird (Netzalternativbetrieb). Der Vorteil dieser Regelung liegt in der vollständigen Versorgung des Verbrauchs im Gebäude auf allen drei Phasen aus dem Speicher. Ein „bilanzieller“ Ausgleich zwischen den Phasen über das elektrische Netz ist hierbei ausgeschlossen. Nachteil ist einerseits, dass in Zeiten, in denen die Stromerzeugung aus PV oder BHKW nicht zur Bedarfsdeckung ausreicht, die fehlende Leistung nicht wie beim Netzparallelbetrieb aus dem Speicher entnommen werden kann, da bei Versorgung aus dem Speicher das Gebäude vom Netz getrennt sein muss. Somit wird auch bei vollem Speicher gegebenenfalls Restenergie aus dem Netz bezogen. Andererseits führt das Umschalten von Netz- auf Speicherbetrieb zu kurzen Unterbrechungen in der Energieversorgung im Bereich von wenigen Millisekunden. Über Probleme durch diese kurze Unterbrechung wurde von den Bewohnern nicht berichtet.

Der Speicher sollte im Sommer den Abend- und Nachtverbrauch des gesamten Hauses decken können. Weniger und Quaschnig empfehlen für Einfamilienhäuser eine Dimensionierung zur Eigenverbrauchserhöhung von 1 kWh/kW_p [Weniger, Quaschnig 2013]. Für das Gebäude in der Cordierstraße liegt die Speichergröße jedoch nur bei 0,54 kWh/kW_p. Das Verhältnis von 0,54/1 entspricht etwa dem Gleichzeitigkeitsfaktor, der bei der Elektroplanung in Mehrfamilienhäusern dieser Größe angesetzt wird. Die elektrische Leistung des BHKW wurde hierbei nicht berücksichtigt, da dessen Betriebszeiten abhängig vom Wärmebedarf im Jahresverlauf zwischen 0 h und 24 h am Tag liegen. Aufgrund der hohen Anlaufströme kann der Aufzug nicht vom Speicher versorgt werden, da die Dauerleistung des Speichers auf 7 kW pro Phase begrenzt ist (maximale Spitzenleistung 8 kW je Phase).

5.6.4.1 Betriebserfahrungen

Der Elektrospeicher wurde im Mai 2014 in Betrieb genommen. In der Anfangszeit traten Probleme bei den elektrischen Schaltanlagen und bei der Speicherregelung auf. Außerdem war der Elektrospeicher zur Abklärung von Fragen zur Kurzschlussleistung bei Versorgung aus dem Speicher von Oktober 2014 bis April 2015 außer Betrieb. Seit Mai 2015 ist er in Dauerbetrieb, mit zwei Ausfällen von ca. 2 Wochen im April und Juni 2016.

Der Gesamtstromverbrauch des Hauses lag im Jahr 2015 bei 21,4 kWh/(m²A_{Na}), die Stromerzeugung bei 40,9 kWh/(m²A_{Na}) (Tabelle 36). Vom erzeugten Strom wurden 21,1 kWh/(m²A_{Na}) ins Netz eingespeist, während zusätzlich 4,6 kWh/(m²A_{Na}) aus dem Netz bezogen wurden. Die Verluste des Elektrospeichers lagen im Betriebszeitraum 2015 (251 d) bei 3,2 kWh/(m²A_{Na}), entsprechend 15 % der abgegebenen Energie. Diese liegen somit etwas über den Herstellerangaben von 12 % Verlust auf der AC-Seite.

Die gemessene nutzbare AC-Speicherkapazität liegt bei ca. 30,5 kWh, was einer Entladetiefe von 80 % entspricht, so dass der Hersteller die nutzbare Kapazität im Rahmen eines Softwareupdates gegenüber der bei Inbetriebnahme erhöht hat.

Der Verlauf der monatlichen Erzeugung aus PV-Anlage und BHKW, der Stromverbrauch des Gebäudes sowie Tageswerte des Autarkiegrads (siehe auch Kapitel 5.3) sind in Bild 48 für den gesamten Messraum dargestellt. Grau hinterlegt ist die Zeit, in der der Elektrospeicher nicht in Betrieb war. In den Sommermonaten mit hohen PV-Erträgen werden durch den Speicher Autarkiegrade bis zu 95 % erreicht. Im Winterhalbjahr 2014/2015 schwankt der Autarkiegrad zwischen 40 % und 90 %. Bei Gebäuden mit reiner PV-Erzeugung liegen die Werte im Winter meist unter 25 %. Diese hohen Autarkiegrade werden aufgrund des BHKW erreicht, das die mittlere elektrische Last des Gebäudes abdecken kann. In der Übergangszeit, wenn das BHKW nur wenige Stunden am Tag in Betrieb ist und die PV-Erträge meist gering sind, wurden die niedrigsten Deckungsanteile erreicht.

2015	absolut	bezogen auf A _N
	[kWh/a]	[kWh/(m ² a)]
Stromverbrauch	31.231	21,4
Haushaltstrom	21.099	14,5
Hilfsstrom	10.132	6,9
Stromerzeugung	59.678	40,9
Photovoltaik	45.958	31,5
Biomethan-BHKW	13.720	9,4
Stromaustausch mit dem elektrischen Netz		
Netzeinspeisung gesamt	30.751	21,1
Netzbezug gesamt	6.765	4,6
Elektrospeicher		
Verluste Speicher	4.670	3,2
Verluste Speicher (2. Halbjahr)	15%	

Tabelle 36: Kenndaten Stromerzeugung und -verbrauch im Jahr 2015

Da der Aufzug nicht aus dem Speicher versorgt werden kann und aufgrund des Netzalternativbetriebs können jedoch kaum Autarkiegrade deutlich über 90 % erreicht werden, da die Erzeugungsanlagen an das Netz angeschlossen sein müssen und so fehlende Energiemengen nicht durch den Speicher geliefert werden können. Mit einem Speicher im Netzparallelbetrieb wäre noch eine gewisse Steigerung des Autarkiegrads zu erreichen gewesen.

Insgesamt zeigt sich die gleichmäßige Deckung des Elektroenergiebedarfs in diesem Gebäude durch die Kombination von PV-Anlage, BHKW und Elektrospeicher.

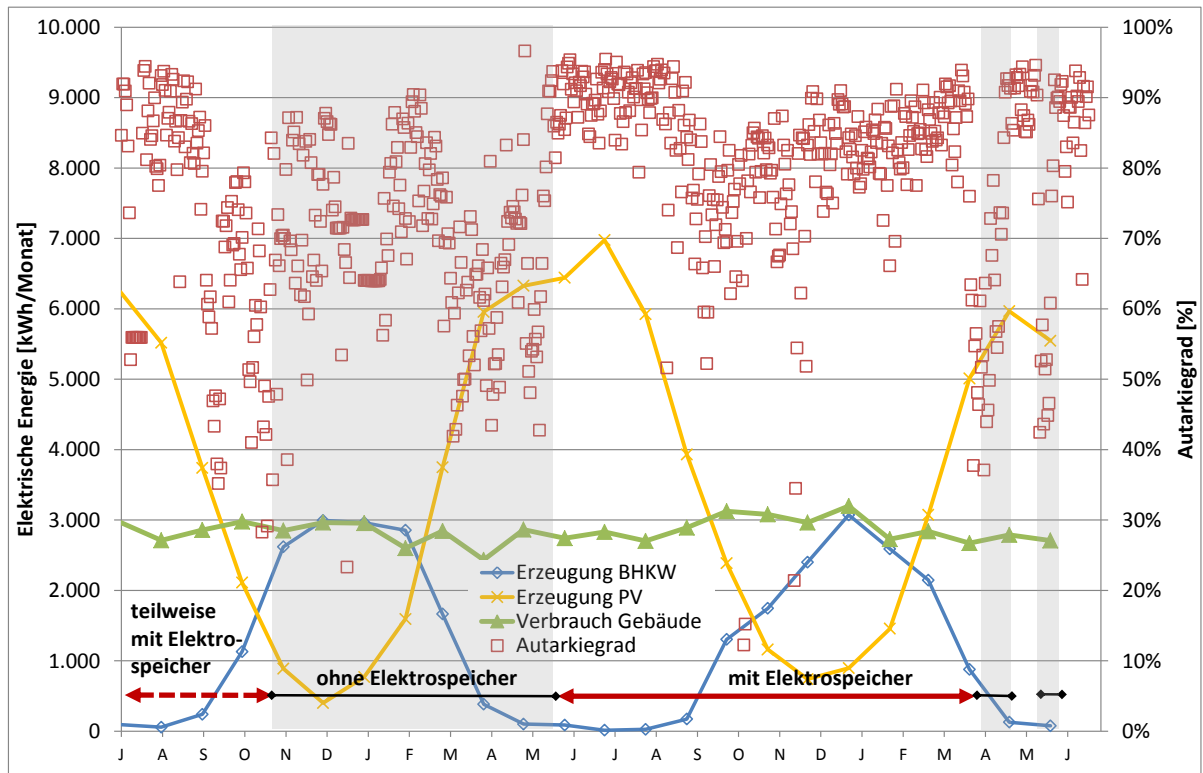


Bild 48: Stromerzeugung aus PV und BHKW und Stromverbrauch des Gebäudes (jeweils als Monatsmittelwerte) mit und ohne Elektrospeicher sowie Autarkiegrad des Gebäudes (als Tagesmittelwerte)

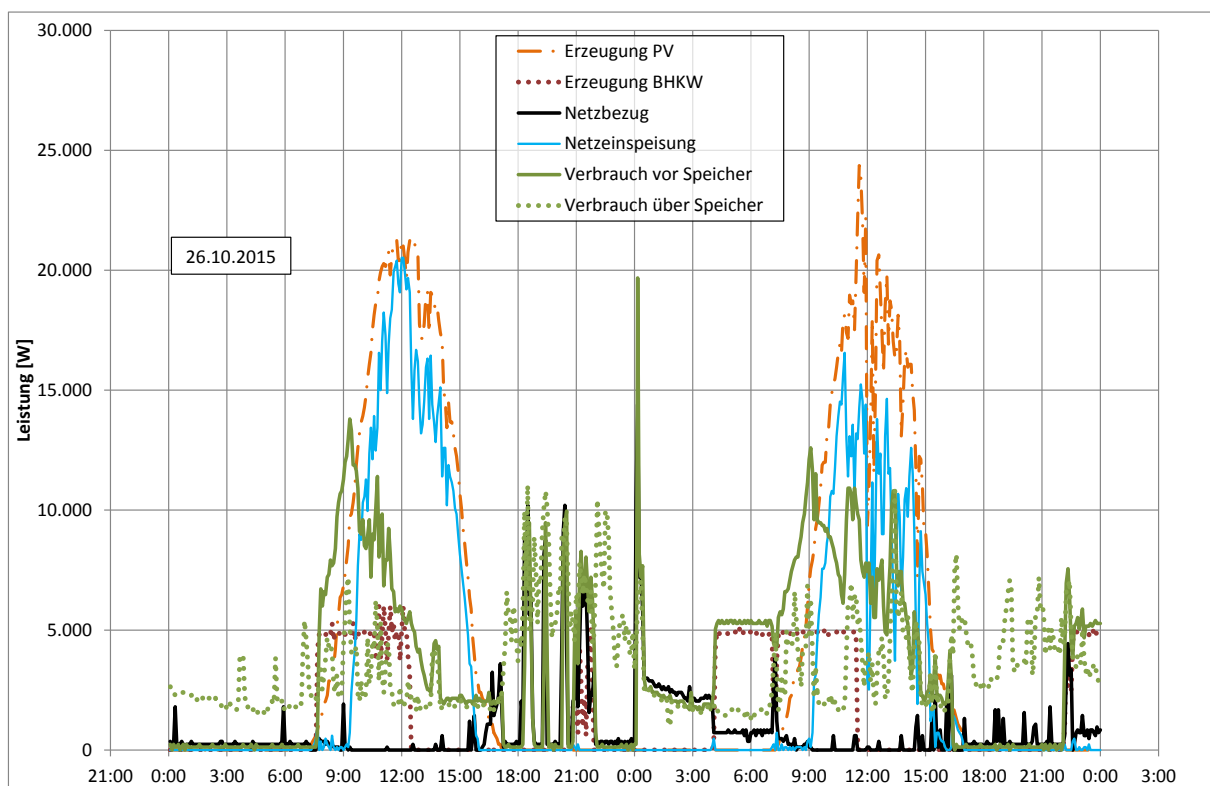


Bild 49: Stromerzeugung und -verbrauch über zwei Tage (26./27. Oktober 2015)

Bild 49 zeigt Elektroenergieerzeugung und Verbrauch für zwei Tage in der Übergangszeit mit guten Solarerträgen. Bei BHKW-Betrieb in der Nacht (zweiter Tag, 4:00 bis 7:00 Uhr) zeigt sich ein Bezug aus dem Netz von 700 W, obwohl der Verbrauch im Haus unter der Erzeugung des BHKW liegt. Erst wenn PV-Erzeugung hinzukommt, geht der Netzbezug auf null zurück. Grund ist eine ungenaue Erfassung der BHKW-Erzeugung und somit eine zu hohe Speicherladung, die Eigenverbrauch und Autarkiegrad mindert. Weiterhin treten beim Umschalten von Speicher- auf Netzbetrieb immer wieder hohe Leistungsspitzen auf, die durch eine kurzzeitige Ladung des Speichers aus dem Netz hervorgerufen werden. Vermutlich ist hier bei einzelnen Zellen die Kapazität stärker abgesunken, so dass deren Ladung von der Regelung ausgeglichen wird.

5.7 Innentemperaturen

Die Innentemperaturen sind ein Indikator für das Komfortniveau in den Wohnungen. Die folgenden Auswertungen zeigen die flächengewichteten mittleren Raumtemperaturen aller Wohnungen (Tabelle 37) sowie zusätzlich die Temperaturen der Wohnungen mit der niedrigsten und der höchsten Raumtemperatur (Bild 50). In beiden Heizperioden (Oktober-März) lag die Raumtemperatur im Mittel bei 22,3 °C. Die Standardabweichung der Mitteltemperaturen zwischen den einzelnen Wohnungen betrug in beiden Heizperioden 0,7 K. Im Januar 2015 sank die Raumtemperatur von zwei Wohnungen bis auf 20,5 °C ab. Nach Rückfragen der Mieter wurde der Volumenstrom im Heizkreis angehoben und die Raumtemperaturen stiegen auf das Niveau der Nachbarwohnungen. Insgesamt ergibt sich ein sehr komfortables Temperaturniveau in den Wohnungen (siehe Anhang B).

Im komplett vermessenen Sommer 2015 lagen die Temperaturen mit ca. 25,4 °C bei einer Standardabweichung von nur 0,4 K auf einem noch komfortablen Niveau.

Tabelle 37: Monatswerte der Innentemperatur und der Raumluftheuchte in den einzelnen Wohnungen

	Mitteltemperatur aller Wohnungen	Standardabw. der Mitteltemperatur	Mittlere Raumluftheuchte Wohnungen	Standardabw. der Raumluftheuchte
	[°C]	+/- [K]	[% rel. F.]	+/- [% rel. F.]
Jul. 14	25,9	0,8	53,4	2,5
Aug. 14	24,4	0,7	52,8	1,8
Sep. 14	23,2	0,5	58,3	1,9
Okt. 14	22,3	0,5	58,0	2,4
Nov. 14	22,4	0,5	45,9	3,3
Dez. 14	22,2	0,7	39,8	6,6
Jan. 15	21,7	0,8	38,4	9,0
Feb. 15	22,4	0,9	35,1	8,6
Mrz. 15	22,9	0,8	37,1	6,9
Apr. 15	23,3	0,7	37,6	6,1
Mai. 15	23,2	0,5	43,7	4,3
Jun. 15	23,9	0,4	47,6	2,6
Jul. 15	26,1	0,5	49,0	2,4
Aug. 15	26,1	0,4	51,1	2,0
Sep. 15	23,5	0,6	50,2	2,6
Okt. 15	22,4	0,5	47,5	2,8
Nov. 15	22,6	0,5	45,5	4,1
Dez. 15	22,5	0,6	44,6	4,2
Jan. 16	21,9	0,8	39,8	5,0
Feb. 16	22,1	0,8	39,5	5,1
Mrz. 16	22,4	0,8	36,9	4,7
Apr. 16	22,8	0,7	39,9	3,7
Mai. 16	23,2	0,4	45,6	2,6
Jun. 16	24,2	0,4	57,4	2,0
Jul. '14 - Juni '15	23,1		45,6	
Heizperiode 2014/15	22,3		42,4	
Sommer 2015	25,4		49,2	
Jul. '15 - Juni '16	23,3		45,6	
Heizperiode 2015/16	22,3		42,3	

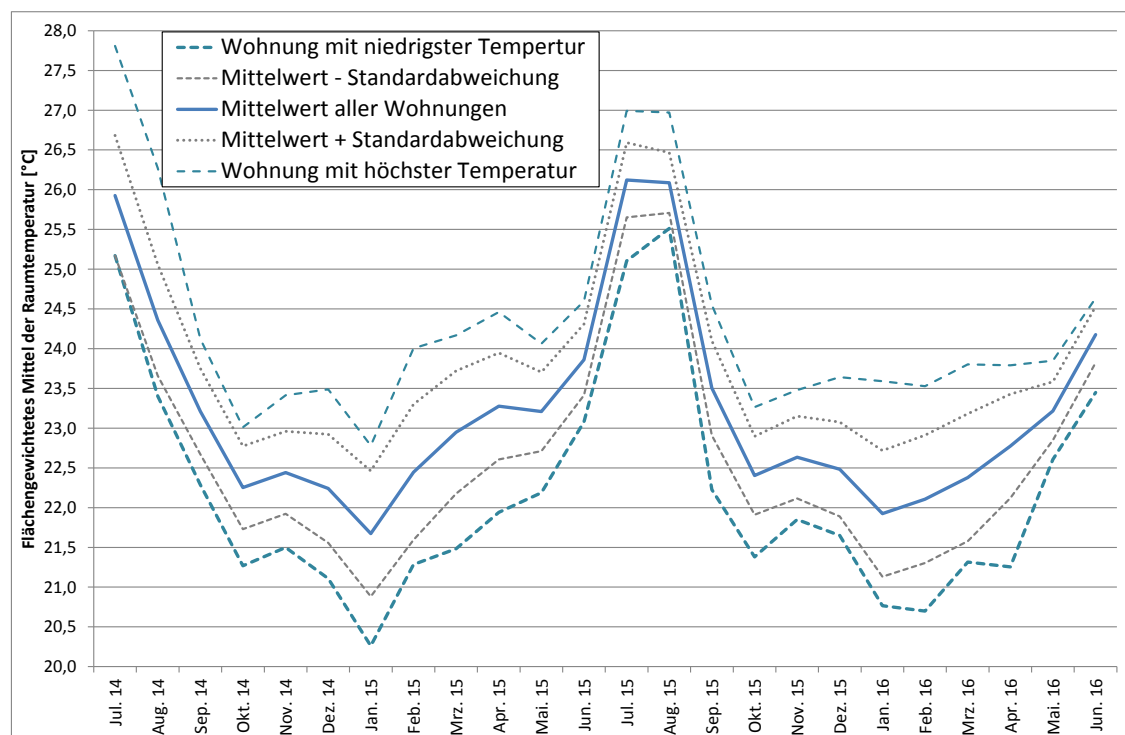


Bild 50: Nach Wohnfläche gewichtetes Mittel der Raumtemperatur aller Wohnungen; Mittelwert der Raumtemperatur +/- Standardabweichung sowie Wohnung mit niedrigster und Wohnung mit höchster Temperatur

5.7.1 Innenraumtemperaturen Sommer

Die mittleren Temperaturen in den Wohnungen lagen im Sommer meist unter 26 °C. Anfang Juli 2015 herrschte jedoch eine Hitzeperiode mit Außentemperaturen von deutlich über 30 °C im Tagesmittel. Bild 51 zeigt für den Zeitraum von 02.07.2015 bis 06.07.2015 die Stundendaten der mittleren Wohnungstemperaturen. Die meisten Wohnungen erreichten auch an den heißesten Tagen Temperaturen zwischen 26 °C und 28 °C, allerdings sind auch einzelne Wohnungen zu erkennen, in denen die Temperaturen deutlich drüber ansteigen. Bei diesen ist meist auch ein Tagesgang parallel zur Entwicklung der Außentemperatur zu erkennen. Aus diesem Grund ist zu vermuten, dass in diesen Wohnungen tagsüber intensiv gelüftet wurde und so die warme Außenluft in die Wohnung gelangte. Bei einzelnen Wohnungen sind darüber hinaus leicht zeitverzögerte Temperaturspitzen zu erkennen, was auf unverschattete Westfenster hindeutet. Eine Wohnung liegt in ihrem Temperaturniveau fast immer über dem der anderen Wohnungen. Diese liegt direkt über dem Raum mit den Wärmespeichern. Aufgrund der Höhe der Speicher konnte keine Wärmedämmung an der Decke zu diesem Raum angebracht werden und es kam zu einem zusätzlichen Wärmeeintrag in die Wohnung im Sommer. Nach Ende der extremen Hitze sinken die Wohnungstemperaturen aber schnell wieder ab. Insgesamt ist der sommerliche Komfort in den Wohnungen jedoch als gut zu bezeichnen.

Im April 2015 wurden die Mieter zusätzlich mit einer kurzen Infobroschüre über optimales Lüften im Sommer aufgeklärt.

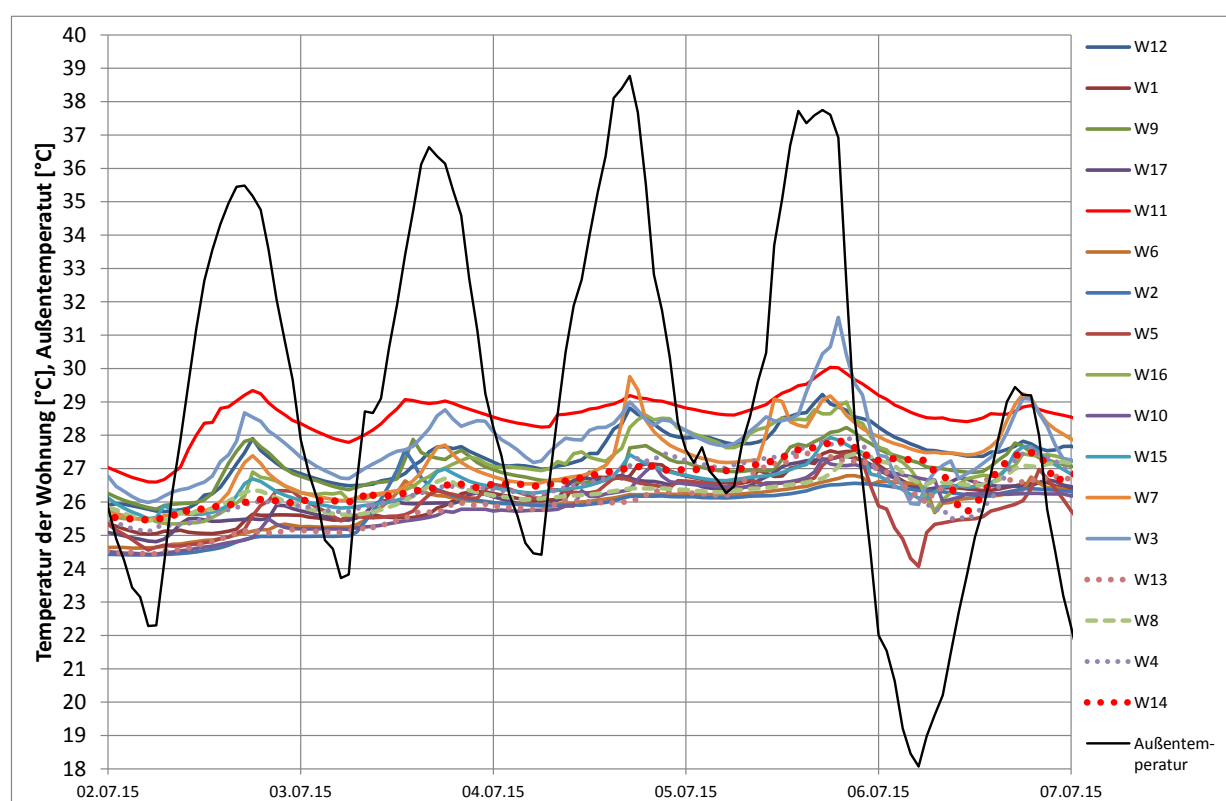


Bild 51: Mittlere Raumtemperaturen aller Wohnungen in einer Hitzeperiode Anfang Juli 2015 sowie Außentemperatur

5.8 Raumlufffeuchte

In Bild 52 sind die mittlere Raumlufffeuchte, der Mittelwert $\pm$ Standardabweichung sowie die Wohnung mit der niedrigsten und der höchsten Raumlufffeuchte dargestellt (siehe auch Tabelle 37). Zu Beginn der Messphase im Sommer 2014 liegt die Raumlufffeuchte der meisten Wohnungen im Bereich zwischen 45 % rel. F. und 59 % rel. F., bei geringer Streuung zwischen den Wohnungen an. Ab Dezember sinkt die Feuchte unter 40 % rel. F. ab. Auffällig ist die deutliche Zunahme der Standardabweichung. So sinkt die Raumlufffeuchte in der Wohnung mit der niedrigsten Feuchte bis auf 26 % rel. F. im Februar, in der Wohnung mit der höchsten Feuchte steigt sie jedoch bis über 60 % rel. F. an. Die Ursache für diese ungewöhnlich hohe Raumlufffeuchte in allen gemessenen Räumen der entsprechenden Wohnung war in einem Ausfall der Lüftungsanlage begründet, die dann im Rahmen der Wartung wieder in Betrieb genommen wurde. In der zweiten Heizperiode erreichte die Wohnung mit der höchsten relativen Feuchte nur noch Werte zwischen 45 % und 50 % rel. Feuchte.

Die mittlere Feuchte in der Heizperiode 2014/15 lag bei 42,4 % relativer Feuchte, der Jahresmittelwert bei 45,6 % relativer Feuchte. Im Messjahr 2015/16 waren die Ergebnisse nahezu unverändert.

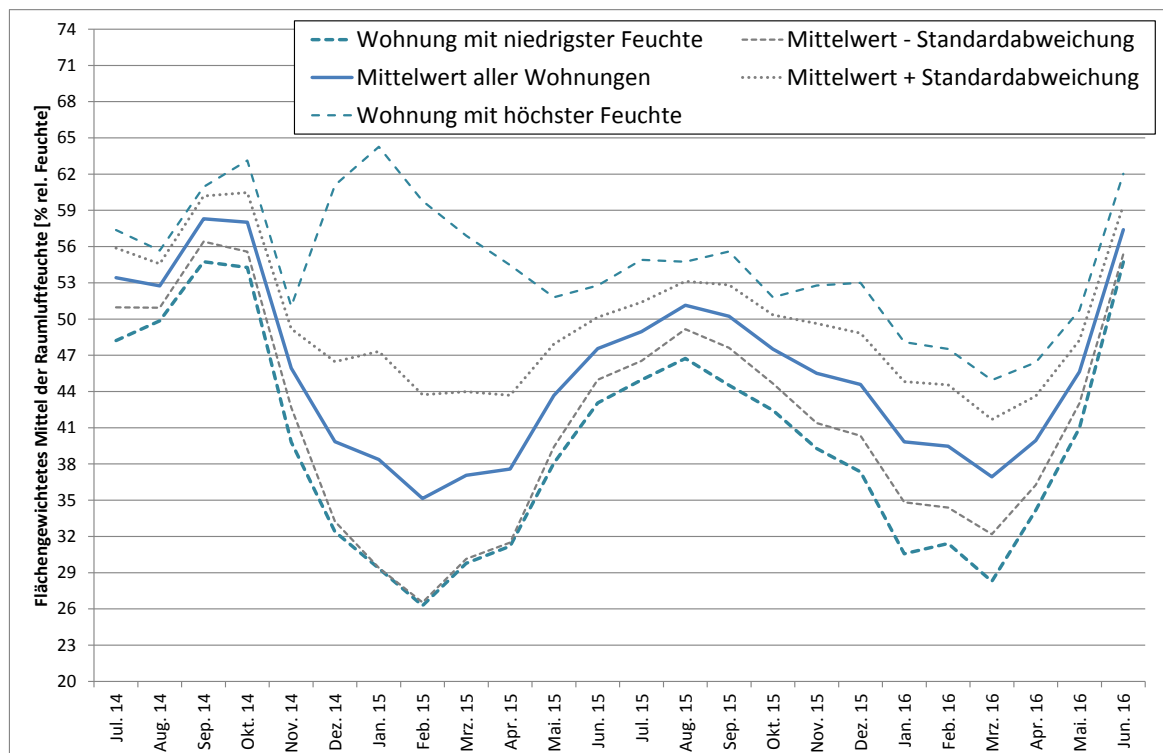


Bild 52: Nach Wohnfläche gewichtetes Mittel der Raumfeuchte aller Wohnungen; Mittelwert der Raumlufffeuchte $\pm$ Standardabweichung sowie Wohnung mit niedrigster und Wohnung mit höchster Raumlufffeuchte

5.9 Primärenergie- und Treibhausgasbilanz

Bewertet man den Energiebezug und die Energieeinspeisung mit Primärenergiefaktoren, so ergibt sich die Primärenergiebilanz des Gebäudes. Bild 53 zeigt den primärenergetisch bewerteten Verlauf von Bezug und Einspeisung für die Cordierstraße 4. Als Primärenergiefaktoren wurden die Werte für das Effizienzhaus Plus aus Tabelle 38 verwendet.

Tabelle 38: Primärenergiefaktoren für die Bewertung nach Effizienzhaus Plus [DIN V 18599] sowie als Passivhaus mit Energiegewinn [GEMIS 2013]

		Bezug aus elektrischem Netz	Einspeisung in elektrisches Netz	Biomethan	PV-Strom
Effizienzhaus Plus					
Primärenergie	kWh/kWh	2,40	2,80	0,50	0,00
Passivhaus mit Energiegewinn					
Primärenergie	kWh/kWh	2,21	2,21	0,30	0,40
Treibhausgasemissionen	kg/kWh	0,594	0,594	0,200	0,092

Beginnend im Sommer besitzt das Gebäude in beiden Messjahren immer eine höhere Primärenergiegutschrift durch Einspeisung (durchgezogene Linie) als einen Primärenergieverbrauch durch Bezug von Energie (gestrichelte Linie). Der Überschuss durch Gutschriften aus der Einspeisung wird in den Wintermonaten durch erhöhten Bezug von Biomethan geringer, bleibt jedoch durchgehend über dem Primärenergiebezug. Über das erste Messjahr ergibt sich nach dem Bewertungsverfahren des Effizienzhaus Plus ein Primärenergieüberschuss von 39.410 kWh/a bzw. 27,0 kWh/(m²A_N a). Im zweiten Messjahr erreichte das Gebäude einen Primärenergieüberschuss von 32.306 kWh/a bzw. 22,2 kWh/(m²A_N a) bei der Betrachtung als EffizienzhausPlus.

Der Grund für die große Differenz der Bilanzergebnisse der beiden Messjahre – bei nur ca. 2.100 kWh geringerer Stromerzeugung und vergleichbarem Energieverbrauch – liegt in dem fast durchgängigen Betrieb des Elektrospeichers im zweiten Messjahr. Durch den Speicher stieg der Eigenverbrauch an (siehe Kapitel 5.3), wodurch die Netzeinspeisung deutlich reduziert wurde (um 5.234 kWh/a), was aber gleichzeitig zu einer Reduktion der Gutschriften durch Netzeinspeisung führte. Diese unter dem Aspekt der Entlastung des Stromnetzes sinnvolle und wünschenswerte Erhöhung des Eigenverbrauchs führt somit zu einem schlechteren Ergebnis in der Primärenergiebilanz des Gebäudes. Zusätzlich wird durch die Differenz im Primärenergiefaktor zwischen Strombezug und Stromeinspeisung (0,4 kWh_{PE}/kWh_{End} höhere Gutschrift für die Einspeisung) ein Anreiz gesetzt, hohe Einspeisungen z. B. im Sommer zu erzielen. Dann schneidet ein energetisch schlechtes Gebäude mit ausreichend Dachfläche für die PV-Stromerzeugung, das einen hohen Strombezug im Winter aufweist ggf. besser ab, als ein Gebäude, das das elektrische Netz nur wenig durch Strombezug im Winter belastet und dabei nur wenig fossilen Strom im Winter benötigt. Hier sollten die Definitionen des Effizienzhaus Plus zukünftig angepasst werden, um Fehlanreize zu vermeiden.

Dennoch erreichte das Gebäude in beiden Messjahren einen höheren Primärenergieüberschuss (27,0 bzw. 22,2 kWh/(m²A_Na), als in der Planung angesetzt (15,3 kWh/(m²A_Na)).

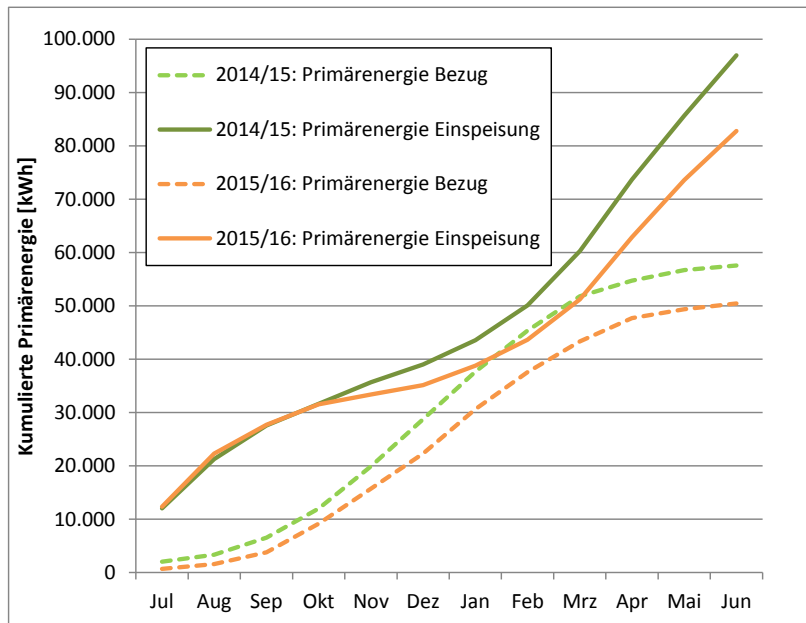


Bild 53: Verlauf von Primärenergiebezug und -einspeisung mit den Primärenergiefaktoren des Effizienzhaus Plus

Auch unter den Randbedingungen des Passivhaus mit Energiegewinn (Bild 54 links) ergibt sich eine höhere Primärenergiegutschrift als für bezogene Energie angerechnet werden muss. Allerdings liegt das Niveau der Verbräuche und Gutschriften absolut niedriger als mit den Primärenergiefaktoren nach Effizienzhaus Plus, da insbesondere dem PV-Strom auch ein Primärenergieverbrauch zugewiesen wird. Es ergibt sich ein Primärenergieüberschuss von 21.277 kWh/a bzw. $17,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBFa}})$ im ersten und 10.863 kWh/a bzw. $8,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBFa}})$ im zweiten Messjahr.

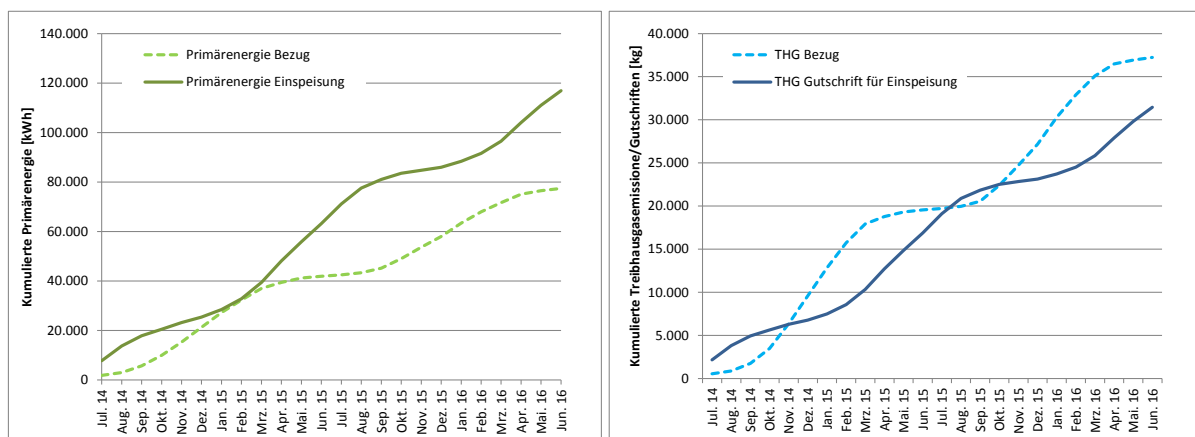


Bild 54: Primärenergie- und Treibhausgasbilanz mit den Randbedingungen des Passivhauses mit Energiegewinn

Im Bild 54 rechts ist die Treibhausgasbilanz dargestellt. Hier ergibt sich durch den Biomethanbezug im Winter ein anderer Verlauf als bei der Primärenergie. Nach Ende des Winters nähern sich die Kurven für Verbrauch und Gutschriften wieder aneinander an. Die vorausberechneten Treibhausgasemissionen lagen bei $1,75 \text{ kg}/(\text{m}^2_{\text{EBF}} \cdot \text{a})$ bzw. ca. 2100 kg/a , im ersten Messjahr ergaben sich in der Bilanz Treibhausgasemissionen von 2.658 kg/a bzw. $2,2 \text{ kg}/(\text{m}^2_{\text{EBFa}})$, im zweiten Messjahr 3.115 kg/a bzw. $2,6 \text{ kg}/(\text{m}^2_{\text{EBFa}})$. Auch hier wirkt sich die Art der Bilanzierung des Elektrospeichers negativ auf die Primärenergie- bzw. Treibhausgasbilanz aus.

6 Kosten

6.1 Baukosten

Die Gesamtkosten des Vorhabens lagen bei 3.294.729 € bzw. 2811 €/m²_{WF} inkl. Umsatzsteuer. Die Aufschlüsselung nach Kostengruppen ist in Tabelle 39 dargestellt. Für die Kostengruppen 300 und 400 ergeben sich Kosten von 2693,48 €/m²_{WF}.

Tabelle 39: Gesamtkosten des Vorhabens nach Kostengruppen

Kostengruppe	Kosten absolut (inkl. Umsatzsteuer)	Kosten je Quadratmeter vermietete Wohnfläche (inkl. Umsatzsteuer)
200 Herrichten und Erschließen	40.654 €	34,69 €/m ² WF
300 Bauwerk – Baukonstruktion	2.175.820 €	1856,50 €/m ² WF
400 Bauwerk – Technische Anlagen	981.179 €	837,18 €/m ² WF
500 Außenanlagen	97.076 €	82,83 €/m ² WF
Summe	3.294.729 €	2811,20 €/m ² WF

Tabelle 40 zeigt die Ergebnisse der Auswertung der Kostenfeststellungen für die Dämmungen an den Bauteilen der thermischen Hülle sowie für die Heizanlage, die Lüftungsanlage, die PV-Anlage, den Batteriespeicher und die Diaphragmalyseanlage. Detaillierte Kostenfeststellungen wurden von der ABG für die Fenster und für das Flachdach zur Verfügung gestellt. Die weiteren Kostenauswertungen basieren auf zusammenfassenden Angaben des Büros faktor10. Die im Folgenden genannten Vergleichswerte stammen aus der Auswertung des IWU von Kostenfeststellungen bei Sanierungsprojekten bei Wohngebäuden [Hinz 2015], die von der KfW-Förderbank im Rahmen des Programmes „Energieeffizientes Sanieren“ gefördert wurden.

Zur Bildung der Kostenkennzahlen wurden die absoluten Kostenangaben auf eine jeweils gleiche Fläche bezogen. Für die Anlagentechnischen Komponenten ist dies die beheizte Wohnfläche. Für die Lüftungsanlage ist die Bezugsfläche die durchschnittliche beheizte Wohnfläche je Wohneinheit. Für die Bauteile der thermischen Hülle ist dies die jeweilige tatsächlich gedämmte Bauteilfläche.

Tabelle 40: Auswertung Kostenfeststellungen, Bruttopreise

	Kosten	Fläche	Kennwert
	[€]	[m ²]	[€/m ²]*
Heizanlage			
BHKW + anteilig Solarthermie	60.362	1172	52
Gas BW + anteilig Solarthermie	37.200	1172	32
Peripherie	72.810	1172	62
Lüftungsanlage			
Lüftungsanlage - KWL	73.779	-	-
Luftleitungen mit Zubehör	36.307	-	-
Wärmedämmungen Luftleitungen	29.632	-	-
Sonstige Leistungen Lüftung	999	-	-
Summe	140.717	69	120
Dämmung Fassade	197.456	1207	164
Dämmung Flachdach	54.479	321	170
Dämmung Bodenplatte	33.757	321	105
Passivhausfenster (A<=2,5 m ²)	36.212	71,2	509
Passivhausfenstertüren (A>2,5 m ²)	63.550	161	395
Batteriespeicher	49.980	1172	43
Diaphragmalyse	4.873	1172	4
Photovoltaik	2700 €/kW _p		

* Nettogrundfläche (NGF), Wohneinheit, Bauteilfläche, kW_p

Fassade: Die spezifischen Kosten betragen 164 €/m² Bauteil, nach [Hinz 2015] 186 €/m² Bauteil. Die Maßnahme wurde somit im Vergleich zu abgerechneten Wärmedämmverbundsystem im Wohngebäudebestand günstig ausgeführt.

Flachdach: Die spezifischen Kosten betragen 170 €/m² Bauteil, nach [Hinz 2015] 256 €/m² Bauteil. In den hohen Kosten nach [Hinz 2015] sind jedoch auch Kosten von ca. 90 €/m² Bauteil für die Entsorgung des alten Daches im Zuge einer Modernisierung im Bestand enthalten. Ohne diese Entsorgungskosten sind die Kennwerte vergleichbar.

Bodenplatte: Die spezifischen Kosten betragen 105 €/m² Bauteil, nach [Hinz 2015] liegen für die entsprechende Maßnahme keine Vergleichswerte vor.

Passivhausfenster: Die spezifischen Kosten betragen 509 €/m² Bauteil für die kleinformatischen Fenster und 395 €/m² für die großformatigen Fenstertüren. Die entsprechenden Kosten nach [Hinz 2015] betragen 592 €/m² bzw. 460 €/m² Bauteil. Darin sind jedoch zusätzlich Kosten für die Demontage und Entsorgung der alten Elemente enthalten.

Heizanlage: Die Kosten für die Abgasanlage sowie für die solarthermische Anlage wurden pauschal zu je 50 % den Kosten für das BHKW und der Gastherme zugeordnet. Somit ergeben sich 52 €/m² Wohnfläche für die BHKW-Anlage mit solarthermischer Unterstützung der Warmwasserbereitung und der Heizung bzw. 32 €/m² Wohnfläche für die Gas-Heizanlage mit solarthermischer Unterstützung der Warmwasserbereitung und der Heizung. In [Hinz 2015] wurden Kosten für Gas-Heizanlagen mit solarthermischer Unterstützung der Warmwasserbereitung und der Heizung deutlich höhere spezifische Kosten von 60 €/m² Wohnfläche ermittelt. Allerdings wurden diese Kosten auf Basis von Kostenfest-

stellungen in der Altbaumodernisierung ermittelt. Tatsächlich wird der Aufwand in der Altbaumodernisierung deutlich höher sein. Die Kennzahlen sind daher nur bedingt vergleichbar.

Lüftungsanlage: Die spezifischen Kosten liegen bei 120 €/m² Wohnfläche in einer Wohneinheit mit durchschnittlich 69 m² Wohnfläche. Nach [Hinz 2015] ergeben sich deutlich geringere Kosten für zentrale Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung in vergleichbar großen Wohnungen von lediglich ca. 80 €/m² Wohnfläche. Dabei muss beachtet werden, dass in [Hinz 2015] auf Grund der vorliegenden Kostenfeststellungen nicht ausgeschlossen werden kann, dass z. B. die Kosten für Leichtbauarbeiten wie die Einkofferung von Rohrleitungen nicht vollständig erfasst wurden. Zudem zeigte sich in [Hinz 2015] eine große Streuung der Kosten.

Sonstige Anlagentechnik: Die Kosten für die Photovoltaikanlage lagen bei 2700 €/kW_p. Diese Kosten liegen deutlich über typischen PV-Anlagenkosten, die im Bereich von 1400 €/kW_p liegen. Gründe sind einerseits der Einsatz von monokristallinen Hocheffizienzmodulen, andererseits die erhöhten Kosten für die Fassaden-PV-Anlage, die ebenfalls in den Kosten enthalten sind, deren Kosten aber nicht auf Basis der vorliegenden Unterlagen beziffert werden können.

Die Kosten für den Batteriespeicher lagen bei 43 €/m² Energiebezugsfläche bzw. bei 1301 €/kW installierter Batteriekapazität bzw. 1735 €/kW nutzbarer DC-Kapazität.

Für den Umbau der Diaphragmalyseanlage entstanden Kosten von 4 €/m². Hierbei handelt es sich jedoch nicht um die Anschaffungskosten, da eine vorhandene Anlage im Besitz der ABG FH in der Cordierstraße montiert wurde, sondern nur um die Kosten für Demontage, Transport und Einbindung in der Cordierstraße 4.

Eine weitergehende Analyse der Kosten und Kostenstrukturen lässt sich auf Basis der funktionalen Leistungsverzeichnisse nicht durchführen, weil im Rahmen der funktionalen Ausschreibung die Kosten für einzelne Elemente nicht detailliert ausgewiesen werden müssen. Relevant sind ohnehin die Kosten für die gesamte Maßnahme.

In den Mietverträgen wurde ein Strombudget von 1035 kWh/Wohnung im Mittel vereinbart, das nicht separat abgerechnet wird. Stromverbrauch, der oberhalb des Budgets liegt, wird mit einem Strompreis von einem 1 Ct/kWh unter dem Vergleichsstrompreis des örtlichen Versorgers abgerechnet. Dadurch ergeben sich bessere Erträge, als bei Einspeisung ins Netz.

6.2 Kosten der energieeffizienten Küchengeräte

Für den Einbau der Küchen in den Wohnungen wurde mit der Küchenfirma ein Pauschalpreis für Küchenmöbel, Elektrogeräte und Einbau vereinbart. Die mittleren Kosten lagen bei 4872 € pro Küche. Kosten für die einzelnen Elektrogeräte konnten aus den Rechnungen des Küchenbauers nicht entnommen werden. Die eingebauten Geräte sind in Tabelle 41 dokumentiert.

Tabelle 41: Daten der Elektrogeräte in den Küchen, die vom Vermieter gestellt werden.

Gerät	Effizienzklasse
Herd (Bosch NXN645H14D)	A
Backofen (Bosch HEN201E2)	A
Dunstabzugshaube (Bosch DHU635D, abweichend mit LED-Beleuchtung)	Nicht bekannt, da vor dem 01.01.2015 eingebaut
Mikrowelle	-
Spülmaschine (Bosch SMV63M90)	A+++
Kühl-Gefrierkombination (Bosch KIS77AD40)	A+++
Waschmaschine	Wurde nicht vom Vermieter gestellt
Wäschetrockner	Nicht erforderlich, da Trockenschrank in der Abluft ohne Energiebedarf
Beleuchtung	LED-Beleuchtung in jedem Raum

6.3 Wirtschaftlichkeit

Aussagen zur Wirtschaftlichkeit von Einzelbauteilen oder der Gesamtmaßnahme können mit den vorliegenden Informationen nicht getroffen werden. Dennoch sollen im Folgenden die Kosten und die Erträge aus Sicht des Vermieters und des Mieters gegenüber gestellt werden.

Die Differenzkosten zwischen dem realisierten Standard und dem Neubau nach EnEV von 53.171 € resultieren bei der Heizungsanlage aus dem geringeren Aufwand für einen herkömmlichen Gas-Brennwertkessel in Kombination mit solarthermisch unterstützter Warmwasserbereitung gegenüber dem realisierten komplexen Heizsystem (Tabelle 42). Erhebliche zusätzliche Kosten von 103.213 € entstehen durch die Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung im Vergleich zu einer einfachen Abluftanlage entsprechend den Anforderungen an einen Neubau nach EnEV 2009. Der gegenüber dem realisierten Standard schlechtere bauliche Wärmeschutz nach EnEV 2009 führt zu einer Kostenersparnis von 60.998 €. Weitere 54.853 € ließen sich durch den Verzicht auf den Batteriespeicher und die Diaphragmalyse einsparen. Für die PV-Anlage wurden 134.190 € zusätzlich ausgegeben.

In der Summe ergeben sich Mehrkosten für den realisierten Standard von 406.425 € gegenüber einem Neubau nach EnEV 2009. Dabei tragen die Heizanlage mit 13 %, der bauliche Wärmeschutz mit 15 % sowie der Batteriespeicher mit der Diaphragmalyse zu 13 % zu den Mehrkosten bei, die Lüftungsanlage dagegen zu etwa 25 %. Schließlich trug die PV-Anlage zu 33 % der Mehrkosten bei.

Tabelle 42: Abschätzung der Mehrkosten des EffizienzhausPlus gegenüber dem Mindeststandard EnEV2009

Auswertung	Kosten	geschätzte Kosten	Kosten	Differenzkosten
Kostenfeststellung	[€]	Neubau nach EnEV 2009	[€]	[€]
Heisanlage		Heisanlage		
BHKW + anteilig Solarthermie	60.362			
Gas BW + anteilig Solarthermie	37.200	Gas BW + Sol WW	44.536	
Peripherie	72.810	Peripherie	72.664	
Summe	170.371	Summe	117.200	53.171
Lüftungsanlage		Lüftungsanlage		
Lüftungsanlage - KWL	73.779	RLT - Abluft	37.504	
Luftleitungen mit Zubehör	36.307			
Wärmedämmungen Luftleitungen	29.632			
Sonstige Leistungen Lüftung	999			
Summe	140.717	Summe	37.504	103.213
Dämmung Fassade	197.456	Dämmung Fassade	185.443	
Dämmung Flachdach	54.479	Dämmung Flachdach	50.383	
Dämmung Bodenplatte	33.757	Dämmung Bodenplatte	29.661	
Passivhausfenster ($A \leq 2,5 \text{ m}^2$)	36.212	2WSV ($A \leq 2,5 \text{ m}^2$)	20.007	
Passivhausfenstertüren ($A > 2,5 \text{ m}^2$)	63.550	2WSV ($A > 2,5 \text{ m}^2$)	38.962	
Summe	385.454	Summe	324.456	60.998
Batteriespeicher	49.980			49.980
Diaphragmalyse	4.873			4.873
Photovoltaik	134.190			134.190
Geräte Küche	82.824	Geräte Küche	82.824	0
Summe über alles	968.409	Summe über alles	561.984	406.425

Bei dem untersuchten Gebäude handelt es sich um ein vermietetes Mehrfamilienhaus. Im Gegensatz zu selbstgenutzten Gebäuden ist der Vermieter als Investor somit nicht der Nutzer des Gebäudes, dem eingesparte Energiekosten zu Gute kommen. Vielmehr müssen die zusätzlichen Aufwendungen des Investors für die energietechnische Modernisierung über einen begrenzten Zeitraum aus zusätzlichen Mieterträge refinanziert werden. Um eine Aussage über die ökonomische Sinnhaftigkeit der Maßnahmen treffen zu können, erfolgt daher im Folgenden eine vereinfachte Abschätzung der erforderlichen Mietmehrerträge zur Refinanzierung der Maßnahmen einerseits und die Abschätzung der eingesparten Energiekosten andererseits. Aus der Differenz der erforderlichen Mietmehrerträge zur Refinanzierung der Maßnahmen und der zu erwartenden Energiekosteneinsparung lässt sich ableiten, ob die Maßnahmen näherungsweise warmmietenneutral umgesetzt werden können, oder ob das Unternehmen einen verbleibenden Fehlbetrag zusätzlich erwirtschaften bzw. abdecken muss.

Die Mehrkosten könnten vollständig gedeckt werden, wenn für die Wohnung als EffizienzhausPlus ein dauerhafter monatlicher Mietmehrertrag gegenüber einer Ausführung als EnEV-Neubau von 91 Ct/(m²*Monat) erzielt werden kann (bei 30 Jahren Betrachtungszeitraum, ohne Refinanzierungskosten).

Den Mehrkosten bei der Errichtung stehen auf Seite des Vermieters zusätzliche Kosten für den Bezug von Reststrom und Biomethan sowie Einnahmen aus der Warmmiete und dem Strombudget gegenüber (Tabelle 43). Für den Vermieter ergeben sich in der Summe zusätzliche Einnahmen von 4.347 €/a, was ca. 30 Ct/(m²*Monat) entspricht und den erforderlichen Mietermehrertrag von 91 Ct/m²*Monat) reduziert.

Für den Mieter reduzieren sich die warmen Betriebskosten durch die Pauschalen bei Strom und Wärme um 43 Ct/(m²*Monat) gegenüber einem Gebäude im EnEV2009-Standard. Dabei steht dem Bedarfswert nach EnEV mit 20 °C Raumtemperatur die pauschale Warmmiete unabhängig von der individuellen Raumtemperatur gegenüber. Bei gleichen Randbedingungen (auch im EnEV2009-Gebäude 22,3 °C Raumtemperatur) würde die Einsparung für den Mieter noch höher ausfallen.

Zusammen mit den Mehrerträgen auf der Vermieterseite erscheint das umgesetzte Gebäudekonzept sowohl für den Investor als auch den Mieter letztlich vorteilhaft zu sein.

Tabelle 43: Einnahmen und Ausgaben aus Sicht des Vermieters und der Mieter

Alle Angaben inkl. MwSt.	A _N	1458 m ²	
	A _{NGF}	1172 m ²	
	Wohnfläche	1238 m ²	

Cordierstraße			
		Effizienzhaus-Plus	Referenzgebäude EnEV
Endenergiebedarf nach DIN V 18599			
Heizung	kWh/(m ² A _N a)	12,53	66,74
Trinwarmwasser	kWh/(m ² A _N a)	8,58	23,3
Summe	kWh/(m ² A _N a)	21,11	90,04
Endenergiebilanz 2015			
Gas	kWh/a		150.970
Biomethan	kWh/a	67.008	
Stromverbrauch	kWh/a	31.553	44.438
Strombezug	kWh/a	6.840	44.438
Stromeinspeisung PV	kWh/a	41.620	
Stromeinspeisung BHKW	kWh/a	2.499	

Kosten (+) / Vergütung (-) Vermietersicht			
Gas (Tarif Buissness Smart Direkt, Mainova, Stand 13.07.2016)	€/a		Durchlaufender Posten (hier ohne Berücksichtigung der Abrechnungskosten)
Wartung Gastherme (1 %)	€/a		
Biomethan (abgerechnete Kosten Cordierstraße)	€/a	6.752,72	
Wartung BHKW (2 %)	€/a	1.207,24	
Strombezug	€/a	1.849,62	
Stromeinspeisung PV (Vergütungssatz bei Inbetriebnahme bis März 2014)	€/a	-5.198,34	
Stromeinspeisung BHKW (Baseload-Preis 2015 zzgl. KWK-Zuschlag von 5,41 Ct/kWh)	€/a	-214,21	
Einnahmen Warmmiete (Annahme)	€/a	-5.942,40	
Einnahmen Strombudget (Annahme)	€/a	-4.224,00	
Abgaben für Stromlieferung (EEG-Umlage: 6,17 Ct/kWh; Abrechnung, Messung, Messstellenbetrieb 0,62 Ct/kWh; MWSt)	€/a	1.422,10	
Summe	€/a	-4.347,27	

spez. Preis (inkl. Messung)	Preis bei niedrigem Verbrauch
5,28 Ct/kWh	
10,08 Ct/kWh	
25,94 Ct/kWh	27,04 Ct/kWh
12,49 Ct/kWh	
8,57 Ct/kWh	
40 Ct/kWh/m ² WF/Monat	
24 Ct/kWh	
8,08 Ct/kWh	

Kosten Mieter			
Gas (Tarif Buissness Smart Direkt, Mainova, Stand 13.07.2016)	€/a		7.978,54
Wartung Gastherme (1 %)	€/a		372,00
Pauschale für Warmmiete	€/a	5.942,40	
Strombudget	€/a	4.224,00	
zusätzlicher Strombezug	€/a	3.773,06	12.016,58
Summe	€/a	13.939,46	20.367,12
spezifische Kosten für Mieter			
Wärme	€/(m ² _{WF} *Monat)	0,40	0,56
Strom	€/(m ² _{WF} *Monat)	0,54	0,81
Summe	€/(m ² _{WF} *Monat)	0,94	1,37
Bilanz aus Sicht der Mieter:	€/(m ² _{WF} *Monat)	-0,43	

7 Bewertung

7.1 Energieeffizienz des Gebäudes

Wie in Kapitel 5.5.1 dargestellt, liegt der gemessene tatsächliche Heizwärmeverbrauch bei ca. $20,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBF}} \cdot \text{a})$ bzw. $16,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{AN}} \cdot \text{a})$ und somit extrem niedrig bei gleichzeitig hohem Komfort der Bewohner. Die Differenz zu den Bedarfswerten (siehe auch Tabelle 44) ist teilweise durch die veränderten Personenbelegungsdichten und Haushaltsstromverbräuche sowie erhöhte Raumtemperaturen zu erklären. Zusätzlich wurde bei den Lüftungsanlagen erst nach Beginn der Heizperiode die Wärmerückgewinnung in Betrieb genommen. Ein Vergleich zwischen den Berechnungsergebnissen von DIN V 18599 und PHPP zeigt, dass das PHPP den gemessenen Verbrauch genauer abbildet. Insgesamt hat das Gebäude die Erwartungen bezüglich des Heizwärmeverbrauchs voll erfüllt.

Der Warmwasserverbrauch stimmt mit $16,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBF}} \cdot \text{a})$ bzw. $13,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{AN}} \cdot \text{a})$ im zweiten Messjahr sehr gut mit den Bedarfswerten beider Berechnungsverfahren überein.

Beim Haushaltsstrombedarf konnten die ambitionierten Zielvorgaben des Effizienzhaus Plus von $20,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a})$ sogar um mindestens 6 % unterboten werden. Der Hilfsenergieverbrauch lag (ohne Aufzug, der nach DIN V 18599 nicht mitbilanziert wird) ca. $2 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a})$ unter dem Bedarfswert. Der Stromverbrauch für die projektspezifische Messtechnik lag mit $0,40 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a})$ ebenfalls sehr niedrig. Hier sind jedoch keine Vergleichswerte für Mehrfamilienhäuser verfügbar.

Tabelle 44: Vergleich der Planwerte mit den gemessenen Verbräuchen für die Betrachtung als Passivhaus mit Energiegewinn (PH+E) und als Effizienzhaus Plus

		Kennwerte				
		Verbrauch	PH+E		EffizienzhausPlus	
		absolut	Bedarf	Verbrauch	Bedarf	Verbrauch
Nutzenergie 2014/15	Bezugsfläche		1219,4	1219,4	1458,4	1458,4
	Heizung	24.959	15,2	20,5	9,6	17,1
	Warmwasser	19.489	16,6	16,0	12,8	13,4
	elektrische Hilfsenergie	6.332	6,9	5,2	6,2	4,3
Nutzenergie 2015/16	Haushaltsstrom	21.913	14,4	18,0	16,1	15,0
	Heizung	24.307	15,2	19,9	9,6	16,7
	Warmwasser	19.766	16,6	16,2	12,8	13,6
	elektrische Hilfsenergie	6.182	6,9	5,1	6,2	4,2
	Haushaltsstrom	21.339	14,4	17,5	16,1	14,6

Die elektrische Energieerzeugung aus den PV-Anlagen übertrifft mit 44.603 kWh/a bzw. 43.128 kWh/a die Berechnungen aus dem Programm Polysun (41.300 kWh/a) um 4 % bis 8 %. Die Ertragsberechnungen nach DIN V 18599 wurden sogar um ca. 13 % übertroffen. Wichtiger Grund für diese Differenz ist die unzureichende Abbildung der komplexen realen Ausrichtung der Anlage mit den Pauschalwerten der Norm. Die elektrische Stromerzeugung des BHKW lag mit 15.190 kWh/a bzw. 14.553 kWh/a deutlich über dem Planwert von 9.401 kWh/a .

Das Gebäude erzeugte nicht nur in der Jahresbilanz deutlich mehr elektrische Energie, als es verbrauchte, sondern auch in allen Monaten des Jahres, lediglich im November 2015 wurde der Überschuss aufgrund einer Störung des Biomethan-BHKWs nicht erreicht.

Für die thermische Solaranlage war nach PHPP ein Ertrag von 18.065 kWh/a prognostiziert worden. Der Gemessene Solarertrag lag mit 20.114 kWh/a auch nach Abzug des Wärmeeinsatzes für den Frostschutz ca. 12 % über dem prognostizierten Wert.

Für das BHKW ergab sich nach PHPP eine Wärmebereitstellung von 43.464 kWh/a. Gemessen wurde eine Wärmeabgabe von 43.786 kWh/a im ersten bzw. 42.014 kWh/a im zweiten Messjahr. Zählt man zu diesem Wert die Wärmelieferung der Biomethan-Therme von 436 kWh/a bzw. 1.751 kWh/a hinzu, so liegt die gemessene Wärmeerzeugung nur 1 % bis 4 % über dem Bedarfswert. Da der Heizwärmeverbrauch ca. 6.400 kWh/a über dem Bedarfswert nach PHPP lag, wurde ein nennenswerter Teil des Mehrverbrauchs durch die solarthermische Anlage gedeckt. Der verbleibende Anteil stammt aus der Brennwertnutzung des BHKW, die in der PHPP-Bilanz noch nicht berücksichtigt war.

Bei der primärenergetischen Bewertung ergab sich ein Überschuss von 27,0 kWh/(m²A_{Na}) im ersten und 22,2 kWh/(m²A_{Na}) im zweiten Messjahr. Die Differenz resultiert auf dem Bilanzierungsverfahren, das Netzeinspeisung mit einer Primärenergiegutschrift belohnt, wohingegen Eigenverbrauch nicht adäquat in die Bilanz eingeht. Die Treibhausgasemissionen aufgrund der realen Verbräuche des Gebäudes liegen nach dem Bewertungsverfahren des Passivhaus mit Energiegewinn bei lediglich 2,2 kg/(m²_{EBFa}) bzw. 2,6 kg/(m²_{EBFa}) (für Wärme und Strom) und somit im vernachlässigbaren Bereich. Beim Vergleich mit anderen Gebäuden und Kennwerten muss berücksichtigt werden, dass hier der gesamte Stromverbrauch inkl. Haushaltsstrom und sonstiger Anlagentechnik enthalten ist, die üblicherweise nicht mit bilanziert werden.

Auch wenn sich aus der detaillierten Auswertung des Betriebsverhaltens der Anlagentechnik noch gewisse Optimierungsmöglichkeiten ergeben, hat das Gebäude seine Zielwerte voll erreicht.

7.2 Verbesserungspotenziale / Betriebsoptimierung

In dem Gebäude wurde von Beginn an intensiv die Funktion der Anlagentechnik überwacht und ggf. nachgesteuert. Die folgende Liste beschreibt die umgesetzten Maßnahmen zur Betriebsoptimierung der Anlagentechnik.

	Problemstellung / Fehlfunktion	Lösungsansatz
März 2014	Es stellt sich heraus, dass der Boden der Pufferspeicher nicht gedämmt wurde. Hierdurch entstehen hohe Wärmeverluste.	Nachträgliches Ausschäumen des Holraumes unter den Puffern mit PU-Schaum oder Zellulose. Wurde nachträglich am 23.04.2015 mit PU-Ortschaum gedämmt.
Mai 2014	Provisorische Einstellung der (Heizungs-)Regelung, die Solaranlage, BHKW und Brennwertkessel regelt.	Die Standard-Regelung und herstellerseitigen Einstellungen passten nicht auf die umgesetzte Anlagentechnik. Einstellungen hinsichtlich Einschalt- und Ausschaltkriterien, Heizgrenze und weitere wurden optimiert. Bearbeitungsstand: später korrigiert.

Mai/Juni 2014	Die Regelung der Wärmeerzeuger wurde nicht so realisiert wie ursprünglich geplant. Dies führte in der Sommerzeit nur zu geringen Problemen, jedoch war absehbar dass mit der realisierten Regelung das BHKW nicht den Hauptteil der Wärmeerzeugung übernehmen kann. Mit der umgesetzten Regelung hätten BHKW und Therme parallel (zeitgleich) lediglich auf Puffer 1 gearbeitet. Wesentliche Zielsetzungen der Anlagentechnik hätten mit dieser Regelung nicht erreicht werden können: Die Nutzung des großen Puffervolumens im Winter als Leistungsreserve, auch konnte keine differenzierte Regelung des Brennwertkessels (nur für den Notfall vorgesehen) realisiert werden, was vermutlich zu häufigen Betrieb geführt hätte.	Im Juli wurde durch den Fachplaner ein Konzept zur Änderung der Regelung entworfen, das nach Einbezug aller Beteiligten mit geringen Änderungen so umgesetzt wurde. Zielsetzungen gemäß Planung und Konzept der Änderung: - gleich bleibt: Vorrang für Solarthermie, durch die Änderungen erhält diese mehr Potenzial zur Wärmeerzeugung in der Übergangszeit und den Sommermonaten. - BHKW regelt abhängig von der Außentemperatur auf verschiedene Fühler an den Speichern, sodass im Sommer/Übergangszeit vom BHKW 1.000 l Puffervolumen dauerhaft auf Temperatur gehalten werden, falls die solarthermische Wärmeerzeugung nicht ausreicht, im Winter lädt das BHKW bis zu 4.500 l Puffervolumen - Brennwertkessel schaltet erst ein wenn die Puffertemperatur deutlich unter der Einschalttemperatur des BHKWs gefallen ist und belädt ein deutlich kleineres Puffervolumen, max. 800 l. Technische Umsetzung: - BHKW nutzt eigene interne Steuerung / eigene Fühler und ist unabhängig von der Heizungsregelung - Solarthermie und Brennwertkessel werden von der Heizungsregelung übergeordnet gesteuert - alle Fühler (BHKW und Heizungsregelung) sind Anlegefühler deren Platzierung zur Optimierung der verschiedenen beladenen Puffervolumina geändert werden können. Umsetzung ist am 22.10.2014 erfolgt.
Juli 2014	Durchgängiger Volumenstrom des BHKWs aufgrund der thermostatisch geregelten Pumpe (abhängig von den Puffertemperaturen ca. 230-500 l/h). Für den Monat Juli entstanden dadurch Wärmeverluste von 250 kWh/Mon (nur direkte Verluste des BHKWs)	Fachplaner und Hersteller sind sich einig, dass dies keine Fehlfunktion, sondern die Standardregelung des BHKWs ist, damit die Regelung des BHKW eine Absenkung der Heizkreistemperatur erkennt. Trotzdem muss für dieses Projekt eine Lösung gefunden werden: Der Hersteller regt an, den Pumpenkontakt der thermostatisch geregelten Pumpe des BHKWs mit auf den Kontakt der Kraftstoffpumpe des BHKWs zu legen. Umsetzung erfolgt erst am 11.09.2014, seitdem weist das BHKW keinen durchgängigen Volumenstrom mehr auf.

Juli 2014	In manchen Betriebszuständen durchgängiger Volumenstrom an der Frischwasserstation (heizungsseitig)	Optimierung der Einstellungen der FWS auf Basis von Vorschlägen des IWU. Im Zuge einer Havarie im April waren hier die Standardeinstellungen der FWS geändert worden und wahrscheinlich nicht wieder komplett auf die Planwerte zurück gestellt worden. Nach den Änderungen der Einstellungen war ein durchgängiger Volumenstrom an der FWS seltener zu sehen. Ggf. hängt dieser Volumenstrom auch mit dem nachträglichen Einbau eines Vormischsets zusammen, das auf eine Heizungsseitige Vorlauftemperatur von 70°C regelt. Der Volumenstrom tritt nur in bestimmten Betriebszuständen/bei bestimmten Puffertemperaturen auf.
Juli 2014	Zu hohe Rücklauftemperaturen der Frischwasserstation (im Zapfbetrieb ca. 30 °C) wahrscheinlich wegen überdimensionierter FWS für die vorliegenden Zapfungen	Optimierung durch Reduktion der heizungsseitigen Pumpenstufe auf minimalen Wert. Generelles ist die FWS für vorhandenen Zapfvolumina etwas zu groß, so dass sie bei Zapfungen aufgrund der Volumenströme weit unterhalb ihres Auslegungsbereichs arbeitet.
Juli 2014	Regelung des Stellventils zur temperaturabhängigen Rücklaufeinspeisung der FWS in Puffer 1 / 2 funktioniert anscheinend nicht: In vielen Betriebszuständen Einspeisung des Rücklaufs der Frischwasserstation in den ersten, theoretisch wärmeren Pufferspeicher (gemäß Regelsignal des Stellventils).	Optimierungen wurden umgesetzt (Optimierung der Fühlerplatzierungen für das Stellventil (am Rücklauf der FWS und Pufferspeicher). Trotzdem zeigt das Regelsignal des Stellmotors ein unplausibles Verhalten, weiterhin in den meisten Betriebszuständen Einspeisung in Puffer 1 obwohl die Rücklauftemperatur der FWS unterhalb der Puffertemperatur von Puffer 2 ist.
Juli 2014	Das Stellventil im Rücklauf der Frischwasserstation schließt nicht ordnungsgemäß, bzw. speist über längere Zeiträume in beide Speicher gleichzeitig ein.	Monteur und Fachplaner haben Schwierigkeiten das Stellventil auf ordnungsgemäße Funktion zu überprüfen, von außen ist die Stellung „nicht sichtbar“. Erst Ende Oktober wird ein Fehler gefunden: Im Ventil der Frischwasserumschaltung war das Ventilküken verdreht, außerdem waren die Ansteuerleitungen nicht korrekt verdrahtet. Das Ventil wird mittlerweile korrekt angesteuert. Bei hohen Zapfmengen gelangt am Anfang wegen der Ventillaufzeit teilweise aber immer noch kaltes Rücklaufwasser der Frischwasserstation in Speicher 1.

Juli 2014	An der solarthermischen Anlage treten in den Abendstunden und morgens ab ca. 04:00 Uhr (sehr geringe) Volumenströme auf , durch die die Pufferspeicher theoretisch etwas ausgekühlt werden.	Wahrscheinlich schloss das Zonenventil nicht richtig (Ursache ggf. Schmutz oder eine defekte Feder). Der Hersteller Paradigma wertete die von der solarthermischen Anlage aufgezeichneten Daten diesbezüglich selbst aus und machte Optimierungsvorschläge. Seit September/Okttober treten diese nächtlichen Volumenströme deutlich seltener auf.
September 2014	Bei Betrieb des BHKWs schaltet dieses häufig kurzzeitig ab /die Leistung schwankt.	Die Ursache konnte nicht geklärt werden. Ggf. lag dies in der Regelung des BHKWs durch die übergeordnete Heizungsregelung. Nach den Umbauten/Änderungen der Regelung des BHKWs auf eine eigenständige Regelung (siehe oben) trat dieses kurzzeitige Abschalten nahezu nicht mehr auf.
Oktober 2014	Der Betrieb der Lüftungsanlagen wurde nicht wie avisiert im September von Sommer auf Winterbetrieb umgeschaltet , daher wurde die Heizung bereits im Oktober in Betrieb genommen (vor Umstellung der Lüftungsanlagen) um die Lüftungswärmeverluste auszugleichen.	Auf diese Problematik wurde frühzeitig hingewiesen, trotzdem dauerte es bis Anfang November bis die Lüftungsanlagen Umgestellt wurden. Ursache: manuelle Umstellung erforderlich, da die automatisch geregelte Umstellung aus Kostengründen nicht gewünscht war. Wurde am 4. November 2014 bzw. 13./14. Oktober 2015 vorgenommen
Oktober 2014	Das BHKW läuft nach den Änderungen nahezu durchgängig , da bei den Änderungen ein falscher Code in der Regelung eingestellt wurde. Abschaltung erfolgt erst bei einer Rücklauftemperatur des BHKWs von ca. über 60°C. Diese Betriebsweise ist nicht effizient.	Code wurde jedoch nach einigen Tagen korrigiert.
Oktober 2014	Bei testweisem Betrieb des Brennwertkessels steigen Volumenstrom und Temperaturen im Heizkreis, auch wohnungsseitig, an . Die Temperatur im Heizkreis steigt innerhalb kürzester Zeit von 45°C auf über 70°C.	Änderungen in der Regelung des Therme durchgeführt.
November 2014	Hohe Volumenströme und teilweise sehr geringe Temperaturspreizung im Heizkreis .	Änderung des Volumenstroms im Heizkreis mit Umstellung der Umwälzpumpe auf „Autoadapt“

März 2015	Vergleichsweise hohe Temperaturen im Heizkreis in der Übergangszeit	Am 23.04.2015 wurde die Heizkennlinie von 70/40 auf 70/35 verändert, außerdem die Heizgrenztemperatur von 15 °C auf 14 °C reduziert. Dadurch sinkt die Vorlauftemperatur in der Übergangszeit und der Heizkreis wird etwas früher abgeschaltet. Zusätzlich wurde der Abschaltfühler des BHKW weiter oben platziert, um ein früheres Abschalten des BHKW und ein größeres nutzbares Volumen für die thermische Solaranlage zu erreichen.
März 2015	Sehr geringe Temperaturspreizung im Zirkulationskreis aufgrund eines hohen Volumensstroms	Am 23.04.2015 wurde die Zirkulationspumpe von Stufe 3 auf Stufe 2 reduziert.

8 Literatur

- [Diefenbach 2002] Diefenbach, Nikolaus: Bewertung der Wärmeerzeugung in KWK-Anlagen und Biomasse-Heizsystemen; Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2002
- [DIN V 18599] DIN V 18599: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten; Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2011
- [faktor10] Planunterlagen zum Bauvorhaben Cordierstraße 4, in Frankfurt am Main, Büro faktor 10 Gesellschaft für Hochbau-und Städteplanung mbH, Darmstadt, 2012
- [Fisch et. al. 2012] Fisch, Norbert; Wilken, Thomas; Stähr, Christina (2012): EnergiePLUS – Gebäude und Quartiere als erneuerbare Energiequellen; Leonberg; 2012, S. 28
- [GEMIS 2013] GEMIS – Globales Emissions-Modell integrierter Systeme, Version 4.8.1 <http://www.iinas.org/gemis-de.html>
- [Hinz 2015]: Hinz, Eberhard: Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energietechnischen Modernisierung von Altbauten; Institut Wohnen und Umwelt 2015
- [HLUG] Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie: Messdaten des Stationsnetzes in Hessen für Frankfurt-Höchst und Mörfelden-Walldorf. URL: <http://www.hlug.de/?id=7122&station=606>
- [IWU 2016] Gradtagzahlen Deutschland - Berechnungstool; Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2016. URL: <http://www.iwu.de/downloads/fachinfos/energiebilanzen/#c205>
- [Weniger, Quaschnig 2013] Weniger, J.; Quaschnig, V.: Begrenzung der Einspeiseleistung von netzgekoppelten Photovoltaiksystemen mit Batteriespeichern. 28. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Kloster Banz, 06.–08. März 2013
- [Schaede, Großklos 2013] Schaede, Margrit; Großklos, Marc: Passivhäuser mit Energiegewinn - Teilbericht Wissenschaftliche Begleitung Cordierstraße 4 in Frankfurt am Main. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2013
- [Voss et al. 2010] Voss, Karsten; Musall, Eike; Lichtmeß, Markus (2010): Vom Niedrigenergie- zum Nullenergiehaus: Standortbestimmung und Entwicklungsperspektiven; Bauphysik 32 (2010), Heft 6, S. 430

9 Anhänge

Anhang A

Tabelle 45:
Zusammenstellung der Stromerzeugung und des Eigenverbrauchs von Juli 2014 bis Juni 2016.

Monat	Erzeugung / Bezug			BHKW		PV		Hausverbrauch					Summe Verbrauch Haus*
	Netz- bezug	PV-Ertrag	BHKW- Erzeugung	Ein- speisung	Eigenver- brauch	Ein- speisung	Eigenver- brauch	Heizung, Lüftung, Pumpen	Allgemein- strom	Messtech- nik	Haushalts- strom	Aufzug	
kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	
Jul. 14	697	6.550	93	93	0	4.394	2.156	586	173	49	2.009	147	2.964
Aug. 14	381	5.573	57	57	0	3.350	2.223	586	170	50	1.746	155	2.708
Sep. 14	1.028	4.051	241	241	0	2.491	1.560	564	186	43	1.910	152	2.855
Okt. 14	1.214	3.241	1.130	288	842	2.282	958	567	204	35	1.834	155	2.795
Nov. 14	842	3.508	2.619	819	1.799	3.253	255	567	204	35	1.884	152	2.841
Dez. 14	799	3.396	2.994	908	2.086	3.278	118	575	224	38	1.973	149	2.958
Jan. 15	866	3.734	2.963	941	2.022	3.638	96	596	212	39	1.965	136	2.948
Feb. 15	524	4.450	2.855	916	1.940	4.282	168	539	168	36	1.727	123	2.594
März. 15	1.095	5.412	1.665	509	1.155	4.786	626	506	191	39	1.962	141	2.838
Apr. 15	845	6.341	384	241	142	4.934	1.407	448	177	38	1.516	131	2.309
Mai. 15	729	6.429	101	0	101	4.377	2.053	438	187	39	1.783	143	2.590
Jun. 15	270	6.529	89	8	81	4.129	2.401	445	179	38	1.604	154	2.421
Jul. 15	274	6.992	15	18	-3	4.401	2.590	511	191	39	1.618	144	2.504
Aug. 15	346	5.951	28	20	7	3.569	2.382	514	190	39	1.492	150	2.386
Sep. 15	743	4.105	172	24	148	2.075	2.030	502	189	38	1.689	156	2.574
Okt. 15	829	3.691	1.304	129	1.175	2.541	1.149	537	178	36	1.943	159	2.853
Nov. 15	869	2.907	1.746	165	1.581	2.247	659	570	198	38	1.910	131	2.848
Dez. 15	489	3.139	2.399	251	2.148	2.781	358	554	206	40	1.889	137	2.826
Jan. 16	566	3.968	3.072	633	2.438	3.738	230	621	201	42	2.132	141	3.137
Feb. 16	444	4.047	2.589	577	2.012	3.742	305	553	181	39	1.763	122	2.658
März. 16	361	5.220	2.145	363	1.782	4.490	730	542	186	41	1.839	132	2.740
Apr. 16	971	5.890	879	223	656	4.814	1.076	458	175	38	1.724	130	2.526
Mai. 16	561	6.095	128	59	68	3.905	2.190	457	182	39	1.746	139	2.564
Jun. 16	386	5.624	77	37	40	3.316	2.308	456	178	38	1.593	141	2.406
Summe 2014/15	9.288	59.214	15.190	5.022	10.169	45.192	14.021	6.416	2.277	479	21.913	1.738	32.823
Summe 2015/16	6.840	57.627	14.553	2.499	12.054	41.620	16.007	6.275	2.255	466	21.339	1.684	32.019

* Die hier dargestellte Summe des Hausverbrauchs liegt im Mittel ca. 1,2 % höher als der zugehörige Summenzähler

Tabelle 46:

Zusammenstellung des Hilfsstromverbrauchs für Heizung und Trinkwarmwasser, Elektromobilität etc. und Projektspezifisch von Juli 2014 bis Juni 2016.

Monat	Heizung+TWW+Lüftung+Solarthermie						Elektro- mobilität	Messtechnik (projektspe- zifisch)
	Heizung	BHKW- Hilfsstrom	Biomethan- kessel Hilfsstrom	Solaranlage	Lüftung	Warm- wasser		
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh		
Jul. 14	17,1	4,9	3,7	93,1	443,5	15,5	0,0	49,0
Aug. 14	17,4	5,3	3,7	96,6	431,9	22,0	0,0	50,2
Sep. 14	17,5	1,8	3,6	85,2	426,2	22,0	0,0	43,2
Okt. 14	23,7	1,9	3,8	80,5	429,0	20,9	0,0	35,2
Nov. 14	38,5	4,5	3,7	74,3	416,2	22,6	0,0	34,6
Dez. 14	28,8	5,3	4,3	77,2	424,4	30,3	0,0	37,7
Jan. 15	22,2	4,9	4,0	77,7	448,5	30,0	0,0	38,5
Feb. 15	25,5	4,6	3,5	70,8	402,1	27,0	0,0	36,4
Mrz. 15	23,8	2,4	3,8	79,6	360,7	30,1	0,0	38,6
Apr. 15	21,0	0,6	3,7	80,9	308,1	27,4	0,0	38,4
Mai. 15	18,2	0,2	3,8	84,4	298,4	26,2	0,0	39,2
Jun. 15	17,1	0,1	3,7	81,1	310,4	24,6	0,0	37,9
Jul. 15	17,6	0,0	3,8	84,8	373,6	23,3	0,0	39,3
Aug. 15	17,6	0,0	3,9	83,3	377,6	23,6	0,0	39,2
Sep. 15	17,1	0,2	3,7	77,7	369,9	25,6	0,0	37,9
Okt. 15	21,6	2,1	5,3	78,1	393,0	28,9	0,0	35,8
Nov. 15	21,8	2,8	5,6	74,6	430,2	27,2	0,0	37,8
Dez. 15	22,8	3,4	3,8	76,8	411,1	27,7	0,0	39,8
Jan. 16	23,4	4,6	3,8	77,1	476,5	27,9	0,0	41,7
Feb. 16	21,7	3,7	3,6	72,6	417,1	27,4	0,0	38,7
Mrz. 16	23,1	3,2	3,8	78,8	397,8	27,7	0,0	40,7
Apr. 16	21,5	1,3	3,7	78,3	319,2	26,6	0,0	38,4
Mai. 16	18,8	0,2	3,9	83,0	317,5	26,5	0,0	39,3
Jun. 16	16,9	0,1	3,7	80,9	321,5	24,6	0,0	37,8
Summe 2014/15	270,7	36,5	45,3	981,4	4.699,4	298,6	0,0	479,0
Summe 2015/16	243,9	21,7	48,5	946,0	4.605,0	316,9	0,0	466,2

Anhang B

Tabelle 47:

Zusammenstellung der Monatsmittelwerte der Raumlufttemperaturen der Wohnungen Juli 2014 bis Juni 2015.

	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	W11	W12	W13	W14	W15	W16	W17
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Jul. 14	25,8	26,5	27,4	25,5	27,8	25,4	25,5	25,2	25,7	25,5	25,3	26,4	26,1	25,3	25,2	25,5	25,8
Aug. 14	23,8	24,7	25,1	24,4	26,3	23,7	23,8	23,4	24,4	24,4	23,6	24,6	24,5	24,2	23,4	23,8	24,5
Sep. 14	23,0	23,3	24,1	23,9	23,6	22,3	22,5	22,4	23,7	22,9	22,6	22,9	23,6	23,4	22,8	23,1	23,3
Okt. 14	22,4	22,5	22,8	22,4	22,4	21,6	22,0	21,3	23,0	21,6	21,6	21,9	22,4	22,4	21,6	22,6	22,9
Nov. 14	22,8	22,5	23,0	22,0	22,3	21,8	22,2	21,5	22,8	21,9	22,9	22,7	22,2	22,5	23,4	23,2	22,5
Dez. 14	22,5	22,2	23,2	21,5	21,7	21,5	22,0	22,1	22,9	21,1	22,7	23,0	22,0	22,0	23,5	23,2	22,4
Jan. 15	21,9	21,7	22,2	20,6	20,3	21,2	21,6	20,5	22,8	21,0	22,1	22,2	22,0	21,7	22,8	22,8	22,2
Feb. 15	22,0	21,7	23,1	21,3	21,3	21,4	21,3	22,3	24,0	22,8	23,4	23,4	22,6	22,9	23,2	22,8	22,9
Mrz. 15	21,5	22,3	23,6	22,0	22,7	22,4	21,9	22,6	23,5	23,8	24,2	23,6	23,0	23,7	23,7	22,7	22,9
Apr. 15	21,9	22,6	24,5	22,6	23,2	23,0	22,6	22,6	23,7	23,7	24,1	23,3	23,6	24,0	23,7	23,2	22,8
Mai. 15	22,4	23,4	24,1	23,3	23,2	22,6	22,6	22,2	23,1	23,2	23,4	23,6	23,7	23,4	22,8	23,1	23,7
Jun. 15	23,7	24,1	24,6	23,8	24,2	23,4	23,4	23,1	24,2	23,6	23,9	24,1	24,4	23,5	23,4	23,2	24,3
Mittelwerte																	
Jahr	22,8	23,1	24,0	22,8	23,2	22,5	22,6	22,4	23,6	23,0	23,3	23,5	23,3	23,3	23,3	23,3	23,4
Heizperiode	22,2	22,1	23,0	21,6	21,8	21,6	21,8	21,7	23,2	22,0	22,8	22,8	22,4	22,5	23,0	22,9	22,6

Tabelle 48:

Zusammenstellung der Monatsmittelwerte der Raumlufttemperaturen der Wohnungen Juli 2015 bis Juni 2016.

	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	W11	W12	W13	W14	W15	W16	W17
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Jul. 15	26,4	26,1	26,7	26,1	27,0	25,6	25,8	25,1	26,0	25,8	26,2	26,9	26,1	25,9	25,8	26,0	26,2
Aug. 15	26,2	26,1	26,6	26,0	26,5	25,7	26,0	26,3	26,2	25,6	26,0	27,0	26,0	26,0	25,5	25,7	26,1
Sep. 15	23,2	24,2	24,6	24,1	23,2	22,2	22,4	23,3	23,7	23,3	23,4	23,9	23,4	24,0	23,2	23,2	23,8
Okt. 15	22,0	22,2	23,1	22,4	22,1	21,4	22,0	22,8	23,3	22,2	22,7	22,7	22,4	22,4	21,8	22,6	23,0
Nov. 15	22,0	22,2	22,9	21,9	22,3	21,9	22,5	23,0	23,2	23,0	23,1	22,9	22,7	22,4	22,4	23,4	23,5
Dez. 15	22,0	22,5	22,5	21,7	22,0	22,1	22,7	23,2	23,6	22,6	23,0	22,8	22,7	21,7	21,9	22,5	23,6
Jan. 16	21,3	21,6	22,0	20,8	20,8	21,6	22,4	23,0	22,9	22,4	22,5	21,9	22,1	21,3	21,1	22,3	23,6
Feb. 16	21,3	21,8	22,1	20,7	21,0	21,9	22,8	23,5	22,8	22,6	22,9	22,3	22,2	21,7	21,5	22,6	23,5
Mrz. 16	21,6	22,2	22,9	21,3	21,4	22,2	23,0	23,8	23,3	22,4	23,4	22,5	22,4	21,4	21,6	22,8	23,6
Apr. 16	21,3	22,3	23,1	21,9	22,3	22,4	22,9	23,4	23,8	23,4	23,6	23,2	22,8	22,8	22,4	23,2	23,0
Mai. 16	22,6	23,1	23,6	22,6	23,3	22,8	23,2	23,3	23,8	23,3	23,4	23,7	23,4	23,5	22,6	23,3	23,3
Jun. 16	24,1	24,5	24,6	23,7	24,6	23,7	24,2	24,3	24,6	23,9	24,0	24,5	24,1	24,2	23,4	24,1	24,3
Mittelwerte																	
Jahr	22,8	23,2	23,7	22,8	23,0	22,8	23,3	23,7	23,9	23,4	23,7	23,7	23,4	23,1	22,8	23,5	24,0
Heizperiode	21,7	22,1	22,6	21,4	21,6	21,8	22,5	23,2	23,2	22,5	22,9	22,5	22,4	21,8	21,7	22,7	23,5

Tabelle 49:
Zusammenstellung der mittleren monatlichen relativen Raumlufffeuchten der Wohnungen Juli 2014- Juni 2015.

	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	W11	W12	W13	W14	W15	W16	W17
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Jul. 14	53,7	56,6	48,2	57,4	50,7	54,1	54,1	54,2	53,6	56,8	52,8	52,2	51,0	56,2	51,9	51,9	51,7
Aug. 14	53,5	54,9	49,8	55,5	50,2	53,3	52,9	52,8	51,4	55,7	53,0	50,8	51,0	55,0	52,5	51,6	51,8
Sep. 14	60,0	60,9	54,8	60,3	57,1	59,8	59,7	58,7	55,9	59,1	59,5	56,1	55,9	59,7	58,5	56,4	59,1
Okt. 14	58,7	60,7	54,3	60,0	56,9	58,4	57,2	58,8	56,1	60,2	58,5	54,5	55,6	58,9	59,1	54,4	63,1
Nov. 14	47,8	48,0	43,3	49,7	45,7	45,8	43,4	44,9	46,6	49,1	41,1	40,6	45,6	47,6	43,3	39,8	51,0
Dez. 14	40,5	41,4	34,6	41,0	42,7	39,7	34,8	37,8	39,2	42,2	34,6	33,4	38,6	40,9	32,6	32,4	61,1
Jan. 15	41,6	42,3	32,3	38,9	53,0	34,2	29,4	34,8	35,5	37,2	32,2	31,8	33,8	38,2	31,3	29,8	64,3
Feb. 15	40,7	41,9	30,2	35,6	46,8	32,4	28,2	30,3	31,7	32,6	28,8	26,3	32,1	33,8	27,4	27,7	59,8
Mrz. 15	41,9	45,7	32,1	39,3	43,3	35,2	35,7	32,6	34,9	33,7	32,1	29,8	33,0	35,0	31,1	31,5	56,9
Apr. 15	38,2	46,4	32,2	41,6	38,9	37,6	42,3	34,4	35,4	33,5	33,2	31,2	33,0	37,2	34,3	31,5	54,5
Mai. 15	43,8	51,6	40,6	51,3	43,0	42,5	44,1	42,3	41,8	40,5	41,1	38,1	41,5	44,0	41,2	38,4	51,8
Jun. 15	49,1	52,8	45,0	51,8	46,0	47,1	47,4	47,3	46,4	46,7	46,6	43,1	44,7	48,4	48,2	45,3	51,1
Mittelwerte																	
Jahr	47,5	50,3	41,5	48,5	47,8	45,0	44,1	44,1	44,0	45,6	42,8	40,7	43,0	46,2	42,6	40,9	56,3
Heizperiode	45,2	46,7	37,8	44,1	48,1	41,0	38,1	39,8	40,7	42,5	37,9	36,1	39,8	42,4	37,4	35,9	59,4

Tabelle 50:
Zusammenstellung der mittleren monatlichen relativen Raumlufffeuchten der Wohnungen Juli 2015- Juni 2016.

	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	W11	W12	W13	W14	W15	W16	W17
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Jul. 15	48,7	54,9	47,2	52,0	45,0	49,0	48,5	50,4	50,3	48,5	48,3	45,5	46,7	50,7	47,6	47,5	50,5
Aug. 15	51,7	54,7	50,5	54,1	49,2	50,3	48,9	50,1	51,4	51,0	51,7	46,7	49,7	51,4	50,3	51,7	53,8
Sep. 15	52,0	54,2	50,0	52,0	50,1	51,0	49,1	47,7	50,2	48,0	51,0	44,5	48,0	49,6	49,9	47,8	55,6
Okt. 15	51,3	51,8	47,2	49,5	50,9	48,4	45,9	42,4	49,8	45,1	45,8	44,2	45,9	47,8	45,4	42,9	47,8
Nov. 15	50,4	51,7	44,3	47,4	52,8	44,9	41,8	39,7	49,7	42,5	45,7	44,2	44,5	46,5	41,4	39,3	41,0
Dez. 15	49,0	53,0	42,6	45,8	50,0	43,5	40,2	37,3	50,0	41,4	44,6	43,1	43,3	46,8	41,5	41,2	39,9
Jan. 16	43,0	48,1	37,7	41,2	45,7	37,3	33,8	30,6	45,1	36,0	39,7	45,7	42,6	41,0	35,2	37,2	33,7
Feb. 16	42,8	47,5	38,7	41,5	47,0	36,5	32,6	31,4	43,8	34,8	39,8	45,7	39,3	41,1	34,7	36,0	33,4
Mrz. 16	41,9	44,9	35,1	38,1	44,1	34,8	31,7	28,3	41,8	33,1	37,6	39,7	36,1	38,7	32,3	32,4	32,6
Apr. 16	42,5	46,4	37,9	40,5	46,1	38,1	35,5	35,0	43,2	37,3	39,4	41,9	38,2	40,3	35,9	34,2	42,4
Mai. 16	47,7	50,7	45,0	46,9	46,5	42,7	41,0	43,4	47,2	45,0	46,3	46,7	44,0	45,6	43,4	41,8	49,4
Jun. 16	59,1	62,0	55,8	59,4	56,8	56,5	55,5	54,7	57,3	57,2	60,6	55,9	56,1	57,3	57,1	55,1	58,8
Mittelwerte																	
Jahr	48,3	51,7	44,3	47,4	48,7	44,4	42,0	40,9	48,3	43,3	45,9	45,3	44,5	46,4	42,9	42,3	44,9
Heizperiode	46,4	49,5	40,9	43,9	48,4	40,9	37,7	35,0	46,7	38,8	42,2	43,8	41,9	43,7	38,4	38,2	38,0

Anhang C

Mieterinformation, verschickt am 22.04.2015

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, Rolläden 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 wenden Sie sich an Herr Schlesinger, Telefon: 069/2608-447

Weitere Hinweise für den Umgang mit Techniken Ihrer Wohnung

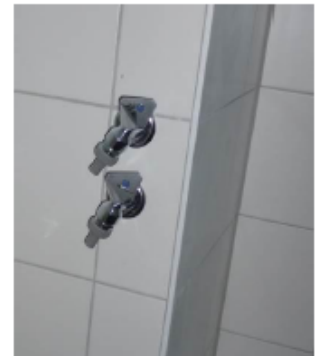
Trockenschrank

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 ist wichtig, dass die Lüftungsanlage auf Stufe 3 eingestellt ist, 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

In den Zimmern besitzen Sie einen Schalter, mit dem alle Geräte an den Steckdosen, die mit „geschaltete Steckdose“ bezeichnet sind, zentral abgeschaltet werden können. Damit ist es möglich, mit einem Schaltvorgang alle Standby-Verbräuche z. B. der Fernseh-, Hifi- oder sonstiger Anlagen auf null zu reduzieren. Der Standby-Verbrauch kann einen nennenswerten Anteil Ihrer Stromrechnung verursachen!



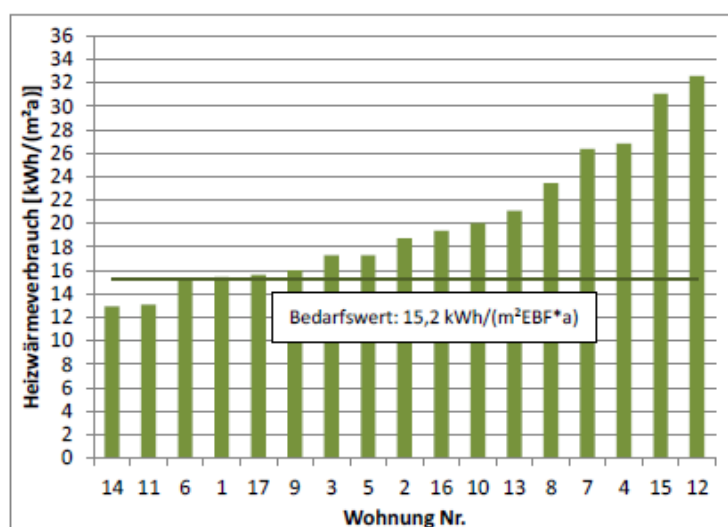
Anhang D

Mieterrückmeldung, verschickt am 22.04.2015

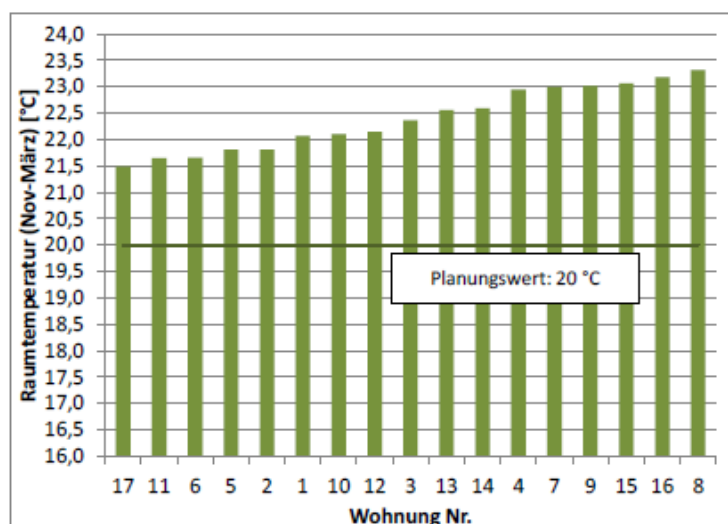


Auswertung der Verbrauchsdaten der Wohnungen Cordierstraße 4

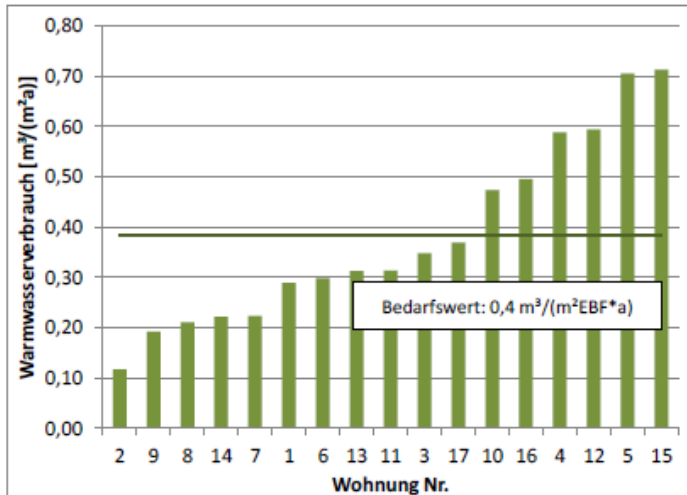
Im folgenden Diagramm sind die Heizwärmeverbräuche aller Wohnungen nach der Höhe des gemessenen Verbrauchs aufsteigend sortiert dargestellt. Die einzelnen Werte schwanken zwischen 13 kWh/(m²*a) und 33 kWh/(m²*a). Im Mittel ergibt sich ein Heizwärmeverbrauch von 20,1 kWh/(m²*a), der um einiges über dem vorausgerechneten Bedarfswert von 15,2 kWh/(m²*a) liegt. Dennoch erreicht das Gebäude einen Heizwärmeverbrauch, der fast 60 % unter dem eines üblichen Neubaus liegt.



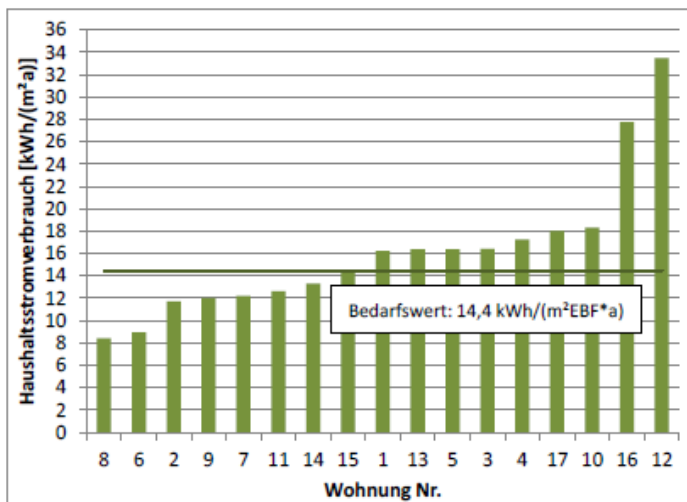
Wesentlicher Grund für den Heizwärmeverbrauch ist der hohe Temperaturkomfort in den Wohnungen. Die Mitteltemperatur lag im Winter zwischen November 2014 und Ende März 2015 bei 22,4 °C und somit mehr als 2 Grad höher als der Planungswert von 20 °C.



Der Warmwasserverbrauch unterscheidet sich sehr stark zwischen den einzelnen Wohnungen - u.a. bedingt durch die unterschiedlichen Haushaltsgrößen - und liegt zwischen $0,117 \text{ m}^3$ und $0,713 \text{ m}^3$ je Quadratmeter Wohnfläche im Zeitraum von April 2014 bis März 2015. Der Bedarfswert und der Mittelwert der Verbräuche stimmen hier sehr gut überein.



Der Haushaltsstromverbrauch im Auswertzeitraum (April 2014 bis März 2015) liegt zwischen $8,4 \text{ kWh/m}^2$ und $33,5 \text{ kWh/m}^2$. Im Mittel ergeben sich $16,1 \text{ kWh/m}^2$, dieser Wert liegt leicht über dem ursprünglich vorausgerechneten Wert.



Darmstadt, 14.04.2015

Anhang E

Biomethannachweise

Hinweis: die Nachweise beziehen sich auf das gesamte Jahr 2015.

Biomethannachweis 2015 für das BHKW



Biogasregister Deutschland

Biogasregister-Auszug über eine Biogas-Lieferung

Nr. Mainova2016021017292318419

1 Produktion und Einspeisung

Nach Angaben des Biogasproduzenten und bestätigt durch ein (oder mehrere) Sachverständigen-Gutachten (Auditberichte) wurde in der Anlage

Infranova
Industriepark Höchst C 526
65926 Frankfurt am Main
Inbetriebnahme der Anlage: 07.07.2011

eine Menge Biogas wie folgt produziert und in das Erdgasnetz eingespeist:

Menge:	67.009 kWh
Einspeisezeitraum Beginn:	01.01.2015 06:00
Einspeisezeitraum Ende:	01.01.2016 05:59
Zählpunkt Einspeisung:	DE701033659290000000000000916090
Zählernummer:	75107070

Biogasregister Deutschland

Biogasregister-Auszug über eine Biogas-Lieferung

Nr. Mainova2016021017292318419

2 Kriterien

Einem (oder mehreren) Sachverständigen-Gutachten zufolge wurden für diese Biogasmenge und die Produktionsanlage das Vorliegen folgender Kriterien gemäß des Kriterienkatalogs des Biogasregister Deutschland bestätigt:

Kriterien:

01 Biomasse i.S.d. BiomasseV	02 Ausschließlichkeit
03 sonstige Biomasse	04 Mengengerüst plausibel
05 Einsatzstofftagebuch	06 Einspeisemenge in Erdgasnetz
07 Erdgasqualität für gesamte Menge	08 max. Methanemissionen (EEG2009)
09 max. Stromverbrauch (EEG 2009/2012 und EEWärmeG 2009/2011)	10 regenerative Prozesswärme (EEG 2009/2012)
13 Verklammerung von Gasaufbereitungs-Anlagen lag nicht vor	16 eine Anlage/Betriebsgelände
17 Gärrestabdeckung/Gasfackel	21 Methanemissionen (EEWärmeG 2009)
22 Prozesswärme/Abwärme (EEWärmeG 2009)	27 Massenbilanzierung bis zur Einspeisung in das Erdgasnetz
28 Einsatzstoffvergütungsklasse 0	29 Einsatzstoffvergütungsklasse 1
30 Einsatzstoffvergütungsklasse 2a	31 Einsatzstoffvergütungsklasse 2b (Gülle)
33 Nennleistung 700-1000 Nm³/h	35 Gärrestlager, Verweildauer, Gasverbrauchseinrichtung
38 max. Methanemissionen (EEG 2012 und EEWärmeG 2011)	41 Biomasse i.S.d. EEWärmeG

Dokumentation von gemischten Einsatzstoffen

28 Einsatzstoffvergütungsklasse 0	67.009 kWh	100,0000 %
29 Einsatzstoffvergütungsklasse 1	0 kWh	0,0000 %
30 Einsatzstoffvergütungsklasse 2a	0 kWh	0,0000 %
31 Einsatzstoffvergütungsklasse 2b (Gülle)	0 kWh	0,0000 %



Biogasregister Deutschland

Biogasregister-Auszug über eine Biogas-Lieferung

Nr. Mainova2016021017292318419

3 Entnahme und Verbrauch

Die Ausstellung dieses Biogasregister-Auszugs wurde von folgendem Nutzer des Biogasregister Deutschland vorgenommen (Ausbucher):

Mainova AG
Solmsstraße 38
60623 Frankfurt am Main

Gemäß der Angaben dieses Nutzers wurde dem Empfänger

ABG Frankfurt - Holding GmbH
60329 Frankfurt
am Ort der Übergabe

VHP

eine Menge Biogas für den folgenden Zeitraum zugeordnet:

Verwendungszeitraum Beginn: 01.01.2015

Verwendungszeitraum Ende: 01.01.2016

Verwendungszweck: EEG

Diese Menge Gas entspricht im Wärmeäquivalent der oben dokumentierten eingespeisten Menge Biogas mit den angegebenen Kriterien.

Biogasregister Deutschland

Biogasregister-Auszug über eine Biogas-Lieferung

Nr. Mainova2016021017292318419

4 Datenbankauszug eines Massenbilanzsystems

Dieser Biogasregister-Auszug gilt als Auszug einer unabhängigen Datenbank im Sinne der Auslegungshilfe des BMU nach § 27c Absatz 1 Nummer 2 EEG 2012 sowie des Anwendungshinweises zum Vollzug des EEWärmeG und als Bestätigung, dass die oben genannte Menge Biomethan innerhalb des Massenbilanzsystems Biogasregister Deutschland entsprechend der Anforderungen an die Massenbilanzierung dokumentiert wurde. Dieser Biogasregister-Auszug ist gegenüber Stromnetzbetreibern bzw. zuständigen Behörden im Sinne der Massenbilanzierung nur mit der zusätzlichen Vorlage von Dokumenten gültig, welche die physikalische Entnahme der genannten Biomethanmenge dokumentieren.



Biogasregister Deutschland

Biogasregister-Auszug über eine Biogas-Lieferung

Nr. Mainova2016021017292318419

5 Hinweise des Registerführers

Dieser Biogasregister-Auszug wurde am 10.02.2016 um 17:29:23 erstellt und trägt die Nummer Mainova2016021017292318419. Mit Hilfe dieser Nummer können die Existenz und der Status dieses Biogasregister-Auszuges unter www.biogasregister.de überprüft werden. Zudem erlaubt sie eine eindeutige Rückverfolgung durch den Registerführer.

Dieser Biogasregister-Auszug dokumentiert die Angaben des Biogasproduzenten und ggf. weiterer Nutzer des Biogasregisters sowie die Angaben der Gutachten eines oder mehrerer Sachverständigen. Unter www.biogasregister.de finden Sie weitere Informationen hierzu, insbesondere in Form der "Allgemeinen Grundsätze zur Funktionsweise" des Biogasregister Deutschland (in ihrer aktuellen Fassung).

Die Nutzer des Biogasregister Deutschland haben sich verpflichtet, bei einer Vermarktung von Biogas mit Hilfe des Biogasregister Deutschland keine weiteren Nachweis- oder Dokumentationssysteme zur Vermarktung derselben Biogasmenge zur Erlangung von Vergütungs- oder Nachweistatbeständen gemäß EEG und EEWärmeG zu nutzen. Weiterhin haben sich die Nutzerunternehmen des Biogasregister Deutschland zur Einhaltung der Anforderungen an das Doppelvermarktungsverbot gemäß § 56 EEG 2009/2012 und § 80 EEG 2014 verpflichtet.

Dieser Biogasregister-Auszug ist kein Gutachten über biogene Eigenschaften und kann die unmittelbare Vorlage eines Gutachtens als Nachweis über Biogaseigenschaften nur ersetzen, wenn dies zwischen den Handelspartnern vertraglich vereinbart wurde. Die Einsicht in die diesem Auszug zugrunde liegenden Gutachten kann beim Registerführer beantragt werden.

