Endbericht der Modellvorhaben Effizienzhaus Plus Nr. 38

Wissenschaftliche Begleitung des Effizienzhaus Plus
Aktiv-Stadthaus in Frankfurt am Main

Forschungsprogramm
Modellhäuser im „Plus-Energie-Standard“, ein Forschungsprogramm des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat (BMI)

Messperiode
Januar 2016 bis Dezember 2017

Aktenzeichen
SWD - 10.08.82-12.12

gefördert durch
das Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)

bearbeitet von
Dr. Boris Mahler
M.Sc. Tobias Nusser
Steinbeis-Transferzentrum Energie-, Gebäude- und Solartechnik
Gropiusplatz 10
70565 Stuttgart

Steinbeis-Transferzentrum
Energie-, Gebäude- und Solartechnik, Stuttgart

Aktiv-Stadthaus Speicherstraße

Ein Projekt der ABG FRANKFURT HOLDING

Bildquelle: Constantin Meyer, Köln

Endbericht zum energetischen Monitoring

Effizienzhaus Plus – Aktiv-Stadthaus - Frankfurt

Messperiode 01/2016 bis 12/2017

Steinbeis-Transferzentrum Energie-, Gebäude- und Solartechnik
Leiter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Norbert Fisch . Gropiusplatz 10 . 70563 Stuttgart
Tel. +49 711 99 007-5 . Fax +49 711 99 007–99 . info@stz-egs.de . www.stz-egs.de

Zentrale: Steinbeis GmbH & Co. KG für Technologietransfer STC . www.stw.de
Haus der Wirtschaft . Willi-Bleicher-Straße 19 . 70174 Stuttgart . Registergericht Stuttgart . HRA 12 480
Komplementär: Steinbeis-Verwaltungs-GmbH . Registergericht Stuttgart . HRB 18 715
Geschäftsführer: Prof. Dr. Michael Auer (Vorsitz) . Dipl.-Kfm. Manfred Mattulat
Ein Unternehmen der Steinbeis-Stiftung

Autor:

Steinbeis-Transferzentrum
Energie-, Gebäude- und Solartechnik
Gropiusplatz 10
70565 Stuttgart

Bearbeiter:

Dr. Boris Mahler
M.Sc. Tobias Nusser

Stuttgart, den 26.06.2018

Inhaltsverzeichnis

1 Kurzfassung 5

2 Kontext und Zielsetzung 6

3 Gebäudesteckbrief 7

3.1 Historie und Projektteam 7

3.2 Allgemeine Daten 10

3.3 Architektur 11

3.3.1 Grundrisse 11

3.3.2 Fassade 12

3.4 Energiekonzept 12

3.5 Wärmeschutz 15

3.6 Anlagentechnik 16

3.6.1 Wärmeerzeugung 16

3.6.2 Abwasserwärmetauscher 16

3.6.3 Wärmespeicher und –verteilung 18

3.6.4 Wärmeübergabe 19

3.6.5 Lüftung 19

3.6.6 Hocheffiziente Haushaltsgeräte 20

3.6.7 Photovoltaik 21

3.6.8 Stromspeicher 22

3.6.9 Energiemanagement und Prognose 23

3.6.10 E-Mobilität 24

3.7 Energiebedarf und Energiedeckung 25

3.8 Bewertung der Effizienz aus Berechnung nach DIN V 18599 27

4 Monitoring 29

4.1 Messkonzept 29

4.2 Verwendete Messtechnik 31

4.3 Dokumentation 32

5 Meteorologische Randbedingungen 33

5.1 Solarstrahlung 33

5.2 Außenlufttemperaturen 34

5.3 Klimabereinigung 37

6 Messergebnisse 39

6.1 Wärmeverbrauch 39

6.1.1 Heizwärme 39

6.1.2 Warmwasser 43
6.1.3 Wärmeverteilverluste 45
6.1.4 Wärmeverbrauch gesamt 45
6.2 Wärmeerzeugung 46
6.3 Stromverbrauch 50
6.3.1 Stromverbrauch für den Gebäudebetrieb 50
6.3.2 Stromverbrauch in den Haushalten (Nutzerstrom) 52
6.3.3 Stromverbrauch für Elektromobilität 54
6.3.4 Stromverbrauch gesamt 56
6.4 Stromerzeugung 57
6.5 Stromspeicherung 59
6.6 Eigenstromnutzung und Eigenversorgungsgrad 61
6.7 Netzaustausch 63
6.8 Gebäudebilanz 65
6.9 Innenraumtemperaturen und Behaglichkeit 68
6.9.1 Behaglichkeit 71
7 Kosten/ Wirtschaftlichkeit 72
7.1 Baukosten 72
7.2 Kosten Geräte 74
7.3 Mietkostenvergleich 75
8 Bewertung 76
8.1 Energieeffizienz des Modellgebäudes 76
8.2 Betriebsoptimierung und Verbesserungspotentiale 77
9 Erfahrungen aus dem sozialwissenschaftlichen Monitoring 78
10 Forschungsprojekt Nutzerinterface 80
10.1 Zielsetzung 80
10.2 Technische Umsetzung 80
10.3 Grafische Umsetzung 81
10.4 Nutzerbefragung während der Entwicklung 83
11 Literaturverzeichnis 86
12 Abkürzungsverzeichnis 87

1 Kurzfassung

In Frankfurt am Main ist eines der ersten großen Mehrfamilienhäuser im Effizienzhaus-Plus Standard gebaut. Das Aktiv-Stadthaus mit 74 Wohnungen und 8 Geschossen wurde durch die ABG FRANKFURT HOLDING realisiert. Der Bauphase vorangegangen ist eine intensive Forschungsphase in der die erforderlichen Grundlagen für die erstmalige Planung eines EffizienzhausPlus-Mehrfamilienhauses erarbeitet wurden. Das Aktiv-Stadthaus befindet sich seit dem Sommer 2015 in Betrieb und ist in den letzten beiden Betriebsjahren einem intensiven Monitoring unterzogen worden.

Das Energiekonzept für das Gebäude basiert auf einer Optimierung zwischen Energiebedarfsreduktion, effizienter Anlagentechnik und der Nutzung lokaler erneuerbarer Energien. Ein hoher baulicher Wärmeschutz und die Verwendung ressourcenschonender Baumaterialien bilden u.a. die architektonische Grundlage für eine optimierte Bauweise im gesamten Lebenszyklus. Die Wärme für Heizung und Warmwasser wird durch eine elektrische Wärmpumpe erzeugt, als Wärmequelle dient dabei ein Abwasserkanal. Zur Minimierung des Haushaltsstroms sind die Wohnungen vom Vermieter mit Haushaltsgeräten der höchsten Effizienzklasse ausgestattet. Für die erneuerbare Stromerzeugung sind auf dem Dach und der Südfassade Photovoltaikmodule mit einer Gesamtleistung von rund 370 kW_p integriert. Ein Stromspeicher hilft den PV-Eigenversorgungsgrad (Strom) auf etwa 50 % zu erhöhen.

Mobilität in Form von Car-Sharing ist ebenfalls Teil des Versorgungskonzepts indem der eigene Solarstrom zur „Betankung“ der Elektromobile im Erdgeschoss eingesetzt wird. Die Wohnungen im Aktiv-Stadthaus werden warm mit einem bedarfsgerechten Energieguthaben für Wärme und Strom vermietet. Über ein Nutzerdisplay in jeder Wohneinheit werden Informationen zur Energienutzung sichtbar gemacht und sollen das Bewusstsein der Bewohner für das Thema „Energie und Wohnen“ stärken.

Das energetische Monitoring zeigt, dass die angestrebte EffizienzhausPlus-Bilanz im ersten Nutzungsjahr erreicht bzw. im zweiten Jahr knapp verfehlt wurde. Der bilanzielle Stromüberschuss lag bei 0,3 kWh/(m^2_{AN}·a) bzw. -0,6 kWh/(m^2_{AN}·a) im zweiten Jahr. Basis hierfür war unter anderem der effiziente Anlagenbetrieb der Wärmepumpe, die eine mittlere Jahresarbeitszahl von 4,3 aufweisen kann. Das Konzept der Vermietung mit hocheffizienten Haushaltsgeräten funktioniert vorbildlich, so dass im Betrieb ein Nutzerstrombedarf (inkl. Lüftung) von 18 kWh/(m^2_{AN}·a) resultiert, der etwa 20 % unter den Bedarfswerten liegt.

Auf der Erzeugungsseite konnte die angestrebte Strommenge nicht produziert werden. Mehrere Anlagenausfälle und Störungen hatten zur Folge, dass im Mittel etwa 20 % weniger Strom als geplant mit den Photovoltaikanlagen erzeugt wurde. Für das Aktiv-Stadthaus resultiert dennoch ein hoher Eigenversorgungsgrad mit lokal erzeugter Energie. Rund 72 % des Energieverbrauchs im Gebäude (Wärme und Strom) werden ressourcenschonend lokal und erneuerbar bereitgestellt.

Das energetische Monitoring bestätigt damit, dass das ganzheitliche Konzept eines EffizienzhausPlus-Mehrfamilienhauses auch im urbanen Umfeld funktionieren kann. Die hohe Nutzungsakzeptanz und Nutzerzufriedenheit im Aktiv-Stadthaus bestärken zusätzlich den zukunftsweisenden Ansatz bei dem beispielhaften Bauprojekt im EffizienzhausPlus-Standard.

2 Kontext und Zielsetzung

Das Gebäude soll in einer Jahresbilanz vollständig seinen Wärme- und Strombedarf selbst decken. Die Bilanzierungsmethode wurde gemäß der Definition des „Effizienzhaus-Plus-Standards“ des BMVBS vorgenommen. Das Aktiv-Stadthaus ist als ein „Nur-Strom“-Gebäude errichtet. Dies bedeutet, dass in dem Projekt zur Wärmeerzeugung auch eine elektrische Wärmepumpe zum Einsatz kommt und lediglich Strom als Energieträger im Haus benötigt wird. Ziel ist es, aufgrund des innerstädtischen Standorts, der unvermeidbaren Verschattung und des ungünstigeren A/V_e-Verhältnisses im Vergleich zu einem typischen Mehrfamilienhaus „auf der grünen Wiese“ den Energiebedarf möglichst weitgehend zu senken und den Restenergiebedarf so effizient wie möglich regenerativ zu decken. Bei einer Analyse von Optimierungspotenzialen im Bedarf hat sich vor allem der Bedarf für Haushaltsstrom als ausschlaggebende Größe herausgestellt. In der Technikkonzeption ist eine Abwasserwärmenutzung über eine Wärmepumpe für die Wärmebereitung vorgesehen. Alternative Energiekonzepte (Solarthermie, BHKW, Fernwärme) haben gezeigt, dass die Zielsetzung Primärenergiebedarf ≤ 0 bei allen Alternativen eingehalten, jedoch ein Endenergiebedarf ≤ 0 nicht erzielt werden kann. Wärmepumpen-PV-Konzeptionen stellen sich somit in diesem Fall als notwendig für das Erreichen des Effizienzhaus-Plus-Standards dar. Die Deckung des Strombedarfs erfolgt über fassaden- und dachintegrierte Photovoltaik. Im innerstädtischen Bereich liegt der Fokus auf der Optimierung des PV-Ertrags in der Dachfläche. Im Vergleich zu einem Einfamilienhaus liegt die Energiebezugsfläche beim ca. 2,5-fachen der solar aktivierbaren Hüllfläche im Dach. Die Kubatur und Geschossigkeit (Bezug Energiebezugsfläche zu solar aktivierbarer Fläche) eines MFH ist ein wichtiger Faktor für das Erzielen des Effizienzhaus-Plus-Standards. Zudem bedeutet die höhere Nutzungsdichte einen erhöhten spezifischen Energiebedarf. Somit spielen Energieeffizienz und Optimierung von solaren Erträgen im Dach, wie auch die solaraktive Nutzung der Fassade im Mehrfamilienhausbau eine wesentliche Rolle.

3 Gebäudesteckbrief

3.1 Historie und Projektteam

Das Forschungsvorhaben "Entwicklungsgrundlagen für städtische Mehrfamilienhäuser in Plus-Energie-Bauweise nach EU 2020 zur Vorbereitung eines Demonstrativ-Bauvorhabens in Frankfurt am Main" war im Jahr 2012 der Startpunkt für die Konzeptionierung des Aktiv-Stadthauses. In einem interdisziplinären Forschungsteam wurden die erforderlichen Grundlagen ermittelt, die für die Planung eines Mehrfamilienhauses im EffizienzhausPlus-Standard erforderlich waren.

Das Aktiv-Stadthaus ist Teil des Netzwerkes „Effizienzhaus Plus“ des Bundesbauministeriums. Als Modellvorhaben erhielt das Projekt eine Förderung für die Planung, die eingesetzten innovativen Komponenten und das energetische Monitoring. Ziel der Förderung war es, durch Forschung und Entwicklung Grundlagen für die Markteinführung des EffizienzhausPlus-Standards zu schaffen. Die Förderung ist Teil der Nationalen Klimaschutzinitiative und wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit bereitgestellt.

Der ganzheitliche Ansatz des Aktiv-Stadthauses hat bereits in frühen Planungsphasen einen intensiven und funktionierenden Abstimmungsprozess zwischen Bauherr, Architekt und Energieplaner bedingt. Die gewerkeübergreifenden Fragestellungen in den einzelnen Planungsphasen konnten durch das interdisziplinäre Team gelöst werden. Grundlage hierfür waren die intensivierte Kommunikation und der gelebte Wissenstransfer zwischen den Architekten und Fachplanern.

Von Ende 2013 bis Sommer 2015 wurde das Gebäude errichtet. Einweihung und Bezug des Gebäudes fanden im Juli 2015 statt. In der Bauphase erforderten die beengten Grundstücksverhältnisse logistische Anstrengungen. Neben den „konventionellen“ Anforderungen waren im Aktiv-Stadthaus insbesondere auch die Verbindung von klassischer Gebäudeautomation, IT-Technik und der Smart-Grid-Welt, wie den vernetzten Haushaltsgeräten in den zehn Versuchswohnungen, eine Herausforderung an Planung und Umsetzung.

In einem ergänzenden Forschungsprojekt wurde für das Aktiv-Stadthaus ein Nutzerinterface entwickelt. Die Bewohner erhalten damit die Möglichkeit sich kontinuierlich über ihren Energieverbrauch zu informieren und interaktiv die eigenen Haushaltsgeräte anzusteuern.

Für das Aktiv-Stadthaus wird ein detailliertes zweijähriges technisches und sozialwissenschaftliches Monitoring durchgeführt (bis Ende 2017). Im Rahmen des technischen Monitorings wird untersucht, ob der angestrebte EffizienzhausPlus-Standard auch im Betrieb erreicht wird. Mit den Ergebnissen soll das Energiemanagement von modernen Gebäuden verbessert und die notwendigen Komponenten für die energieeffiziente Gebäudehülle und die Nutzung erneuerbarer Energien fortentwickelt werden.

Das sozialwissenschaftliche Monitoring verfolgt das Ziel die Nutzerzufriedenheit zu analysieren und Empfehlungen für die Erhöhung des Wohnkomforts und des Wohlempfindens der Bewohner zu formulieren.

Das Projektteam umfasst folgende wesentlichen Partner:

Auftraggeber / Bauherr	ABG FRANKFURT HOLDING Wohnungsbau- und Beteiligungsgesellschaft mbH Niddastraße 107 60329 Frankfurt am Main
Architekt	HHS Planer + Architekten AG Habichtswalder Straße 19 34119 Kassel
Forschungsteam Gebäude und Technik Förderkennzeichen F50-12-1-273/12.12 BBSR	TU Darmstadt (Koordination, Nachhaltigkeit) FG Entwerfen und Energieeffizientes Bauen El-Lissitzky-Str.1 64287 Darmstadt StZ-EGS (Energie, Wirtschaftlichkeit, Monitoring) Gropiusplatz 10 70563 Stuttgart HHS Planer + Architekten AG (Architektur, E-Mobilität)
Forschungsteam Nutzerinterface Förderkennzeichen SWD-10.08.18.7-14.25 BBSR	TU Darmstadt (Koordination) StZ-EGS (Energiebudgets, Berechnungen) BIS Berliner Institut für Sozialforschung (Nutzerbefragung) Brandenburgische Straße 16 10707 Berlin Polynox (Grafik) Alicenstraße 21 64293 Darmstadt Mondayvision (Programmierung) Gropiusplatz 10 70563 Stuttgart

Planung TGA	EGS-Plan Ingenieurgesellschaft für Energie-, Gebäude- und Solartechnik mbH Gropiusplatz 10 70563 Stuttgart
Planung Tragwerk	B+G Ingenieure Westhafenplatz 1 60327 Frankfurt am Main
Förderung	Gefördert im Rahmen der Forschungsinitiative ZukunftBAU des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)

3.2 Allgemeine Daten

Das Aktiv-Stadthaus liegt unweit des Frankfurter Hauptbahnhofs im Gutleutviertel. Das langgestreckte 160 m lange und nur 9 m tiefe innerstädtische Grundstück in der Speicherstraße stellt eine besondere Herausforderung für Energiekonzeption und Architektur dar und erstreckt sich von Osten nach Westen parallel zum Main.

Abbildung 1: Lageplan und Rendering (HHS Planer + Architekten)

In Tabelle 1 sind die wesentlichen Daten des Projekts aufgeführt.

Tabelle 1: Allgemeine Daten

Baujahr:	2015
Bruttogrundfläche	11.688 m²
Beheizte Nettogrundfläche	6.634 m²
Energiebezugsfläche A_N	8.789 m²
Beheiztes Gebäudevolumen	31.217 m³
Hüllflächenfaktor A/V_e	0,34 1/m
Breitengrad:	50.1°N
Längengrad:	8.6°O
Höhenlage:	99 m über NN
Mittlere Jahrestemperatur:	10,8°C
Mittlere Wintertemperatur (Oktober – April):	5,9°C
Gradtagzahl am Standort	3744
TRY - Klimazone / Referenzstation:	12 / Mannheim

3.3 Architektur

Maßgebliche Parameter für das Architekturkonzept sind der hohe energetische Anspruch und der extreme Grundstückszuschnitt. Ersteres erforderte eine Maximierung möglicher Energieerzeugungsflächen auf dem Dach und in der Fassade, letzteres eine geschickte Grundrissgestaltung, um bei der geringen Tiefe funktionierende und attraktive Grundrisse zu erzeugen. Das Grundstück wurde vollständig überbaut und die leichte Faltung der nach Südosten ausgerichteten Fassade gliedert die lange Straßenfront und schafft im Innern des Gebäudes notwendige Grundrisstiefen. Die Fassade gliedert sich in ein öffentlich genutztes, weitgehend transparentes Erdgeschoss, die Hauptwohngeschosse mit optimierten Öffnungsanteilen und das Dachgeschoss mit seinem Abschluss durch das über die Grundrissumrisse auskragende Pultdach. Das äußere Erscheinungsbild der Südfassade wird geprägt durch ein Band aus Glas bzw. in Glas integrierte Photovoltaikelemente welche sich mit geschlossenen Brüstungsbereichen aus Faserzementplatten abwechseln. Die opaken Flächen stellen geometrisch und materiell die Verbindung zur wesentlich geschlosseneren Nordfassade her. Auf diese Weise gelingt es dem freistehenden Gebäude trotz der sehr unterschiedlichen Fassadenanforderungen eine Einheit zu geben. Zur Vermeidung von Verschattungen zeigt die Südfassade keine vorstehenden Elemente, die Rückseite hingegen hat durch die großen Balkone deutlich plastische Elemente.

3.3.1 Grundrisse

Vier Treppenhäuser auf der Nordseite erschließen jeweils 3 Wohnungen. Mittig eine zwei Zimmerwohnung und seitlich zwei drei Zimmerwohnungen mit Wohnflächen zwischen 60 und 120 Quadratmeter. Jede Wohnung verfügt über eine Loggia bzw. einen Balkon sowie eine Wohnküche, um bei knapper Grundfläche eine weitestgehende Großzügigkeit zu erreichen, unterstützt durch geschosshohe Fensteranlagen und sturzfreie Einzelfenster. Der hohe Anteil natürlicher Belichtung fördert zudem ein angenehmes Wohnklima und spart Energie für Beleuchtung. Das Konzept des „Durchwohnens“ verbindet Balkone zum ruhigen Innenhof mit der sonnigen Straßenseite und der dort angeordneten großzügigen Verglasung, auch ein Ausgleich zur sehr stark verkehrsbelasteten Südseite. Schlafräume und Badezimmer werden vom Wohnraum erschlossen, auf reine Flurflächen wurde weitestgehend verzichtet. Im Badezimmer sind sämtliche wohnungsbezogenen technischen Einrichtungen wie Lüftungsgerät, Trinkwasserstation und Fußbodenheizungsverteiler integriert.

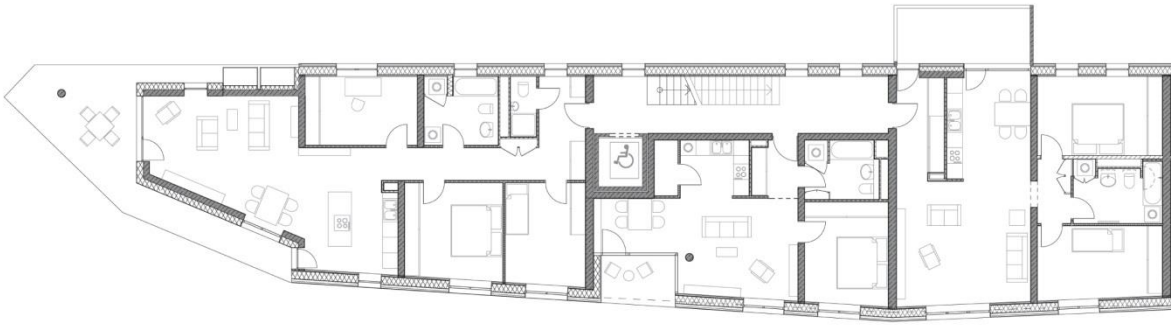


Abbildung 2: Grundriss Regelgeschoss (Ausschnitt)

Im Erdgeschoß sind neben Eingangsbereich, Entsorgungsräumen und zwei Gewerbeeinheiten die Stellplätze für Elektroautos untergebracht, die im Car-Sharing Betrieb genutzt werden und insbesondere den Hausbewohnern eine alternative Mobilität bieten sollen. Die durch Nachverdichtung entstandene zentrale Wohnlage spart unnötige Pendlerwege aus der Peripherie und wirkt sich positiv auf Umwelt und Wohlbefinden der Bewohner aus.

3.3.2 Fassade

Für die Fassaden wurde nach einer ökonomisch und ökologisch sinnvollen Lösung gesucht, dieses Mehrfamilienhaus maximal effizient zu konstruieren. Das konstruktive Prinzip tragender Wandschotten und Betondecken ermöglichte die Ausführung einer Holzständerfassade. So lässt sich der Wandaufbau im KfW-40 Standard mit rund 47 cm bei der Nordfassade (Eternitverkleidung) und bei der Südfassade mit rund 55 cm (Fassadenphotovoltaik mit Hinterlüftungsebene) dünner erstellen als in einer Massivkonstruktion. Dieses schafft auf dem schlanken Grundstück zukünftig mehr vermietbare Fläche und ist somit eine wirtschaftliche und nachhaltige Lösung. Tafelelemente mit einer Größe von ca. 3 x 12-15 m wurden inkl. eingebauter Fenster und vorgehängter Fassade aus Eternittafeln an die Baustelle geliefert und montiert. Sämtliche Elemente stehen aufeinander und leiten ihre Vertikallasten in die Decke über das Erdgeschoß in Fundamente ab. Örtlich ergänzt wurden die Photovoltaikelemente auf der Südseite auf einer Aluminiumunterkonstruktion.

3.4 Energiekonzept

Das Gebäude soll in einer Jahresbilanz seinen Wärme- und Strombedarf vollständig selbst decken. Die Bilanzierungsmethode wurde gemäß der Definition des „EffizienzhausPlus-Standards“ des BMVBS vorgenommen und um die Berücksichtigung der E-Mobilität erweitert.

Das Aktiv-Stadthaus ist als „Nur-Strom“-Gebäude errichtet. Dies bedeutet, dass in dem Projekt zur Wärmeerzeugung auch eine elektrische Wärmepumpe zum Einsatz kommt und im Haus lediglich Strom als Energieträger benötigt wird. Ziel ist, am innerstädtischen Standort, trotz der unvermeidbaren Verschattung und des ungünstigeren A/V_e-Verhältnisses, im Vergleich zu einem Mehrfamilienhaus „auf der grünen Wiese“, den Energiebedarf möglichst weitgehend zu senken und den Restenergiebedarf so effizient wie möglich regenerativ zu decken.

Bei einer Analyse von Optimierungspotenzialen im Betrieb hat sich vor allem der Bedarf für Haushaltsstrom als ausschlaggebende Größe herausgestellt. In der Technikkonzeption ist eine Abwasserwärmenutzung über eine Wärmepumpe für die Wärmebereitung vorgesehen. Alternative Energiekonzepte (Solarthermie, BHKW, Fernwärme) haben gezeigt, dass die Zielsetzung Primärenergiebedarf < 0 bei allen Alternativen eingehalten, jedoch ein Endenergiebedarf < 0 nicht erzielt werden kann. Wärmepumpen-PV-Konzeptionen stellen sich somit in diesem Fall als notwendig für das Erreichen des EffizienzhausPlus-Standards dar.

Die Deckung des Strombedarfs erfolgt über fassaden- und dachintegrierte Photovoltaik. Im innerstädtischen Bereich liegt der Fokus auf der Optimierung des PV-Ertrags in der Dachfläche. Im Vergleich zu einem Einfamilienhaus liegt die Energiebezugsfläche beim ca. 2,5-fachen der solar aktivierbaren Hüllfläche im Dach. Die Kubatur und Geschossigkeit (Bezug Energiebezugsfläche zu solaraktivierbarer Fläche) eines MFH ist ein wichtiger Faktor für das Erzielen des EffizienzhausPlus-Standards. Zudem bedeutet die höhere Nutzungsdichte einen erhöhten spezifischen Energiebedarf. Somit spielen Energieeffizienz und Optimierung von solaren Erträgen im Dach, wie auch die solaraktive Nutzung der Fassade im Mehrfamilienhausbau eine wesentliche Rolle.

Bedarfsreduktion

Ein erster Schritt ist, den Energiebedarf für die Beheizung zu reduzieren. Im Aktiv-Stadthaus wird dazu ein baulicher Wärmeschutz angewandt, der dem Passivhausstandard nahekommt. In Verbindung mit sehr effizienten Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung liegt der planmäßige Heizwärmebedarf bei etwa 16 kWh/m²a. Auch auf den Einsatz ressourcensparender Baumaterialien wird Wert gelegt. Einen Teil trägt dazu die Holzfassade mit Zellulosedämmung bei. Um die Plus-Bilanz zu erreichen, ist die Verwendung besonders sparsamer Haushaltsgeräte notwendig. Im Aktiv-Stadthaus werden die Wohnungen aus diesem Grund inklusive der Haushaltsgeräteausstattung (Herd, Kühlschrank, Gefrierschrank, Waschmaschine, Trockner) warm vermietet.

Energiebereitstellung

Strom für die Wärmebereitung und Versorgung der Wohnungen wird durch PV-Anlagen auf dem Dach und in der Südfassade erzeugt. Im Entwurfsprozess wurden verschiedene Dachformen und Belegungen untersucht, um einen möglichst hohen Stromertrag zu erhalten. Wärme für Heizung und Warmwasser wird durch eine Wärmepumpe erzeugt. Als Wärmequelle dient ein Abwasserkanal, der mit einem Wärmetauscher versehen wurde. Messungen im großen Kanal in der Speicherstraße zeigten sehr niedrige Durchflüsse, so dass die Versorgung des Gebäudes allein dadurch nicht zu sichern gewesen wäre.

Energiemanagement

Der Eigennutzungsgrad des solar erzeugten Stroms soll über einen Stromspeicher erhöht werden, der unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit einen ca. 50-prozentigen Eigennutzungsgrad ermöglicht. Eine weitere Erhöhung des Eigennutzungsgrads wird durch die Einbindung der Wärmepumpe in das Lastmanagement erreicht. Das Lastverschiebepotenzial von Haushaltsgeräten ist beschränkt und aus heutiger Sicht wirtschaftlich nicht zu erschließen. Fünf exemplarische Wohneinheiten werden dennoch zu Forschungszwecken mit ansteuerbaren Haushaltsgeräten ausgestattet. Eine Prognosesteuerung sagt den zu erwartenden Strom und Wärmebedarf und das Solarangebot voraus und regelt damit die Beladung der thermischen und elektrischen Speicher.

Mobilität

Ganzheitliche energetische Gebäudekonzepte der Zukunft betrachten die Grenzen der Energieströme über die Systemgrenze des Gebäudes hinaus. Hier ist als wesentlicher gebäudenaher Energieverbraucher die Mobilität der Bewohner identifiziert. Über die Integration eines E-Mobil-Konzeptes wird die Schnittstelle regenerative Energieerzeugung|Gebäude|E-Mobil mit untersucht. In Verbindung mit dem lokalen Car-Sharing Unternehmen „book'n'drive" wird eine Car-Sharing-Flotte von zunächst zwei E-Mobilen und zwei konventionellen Fahrzeugen, die den Hausbewohnern und der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden, vorgehalten.

In Abbildung 3 ist das Schema des Energiekonzepts dargestellt und alle wesentlichen Versorgungskomponenten und Verbrauchssegmente sowie deren Vernetzung zu erkennen.

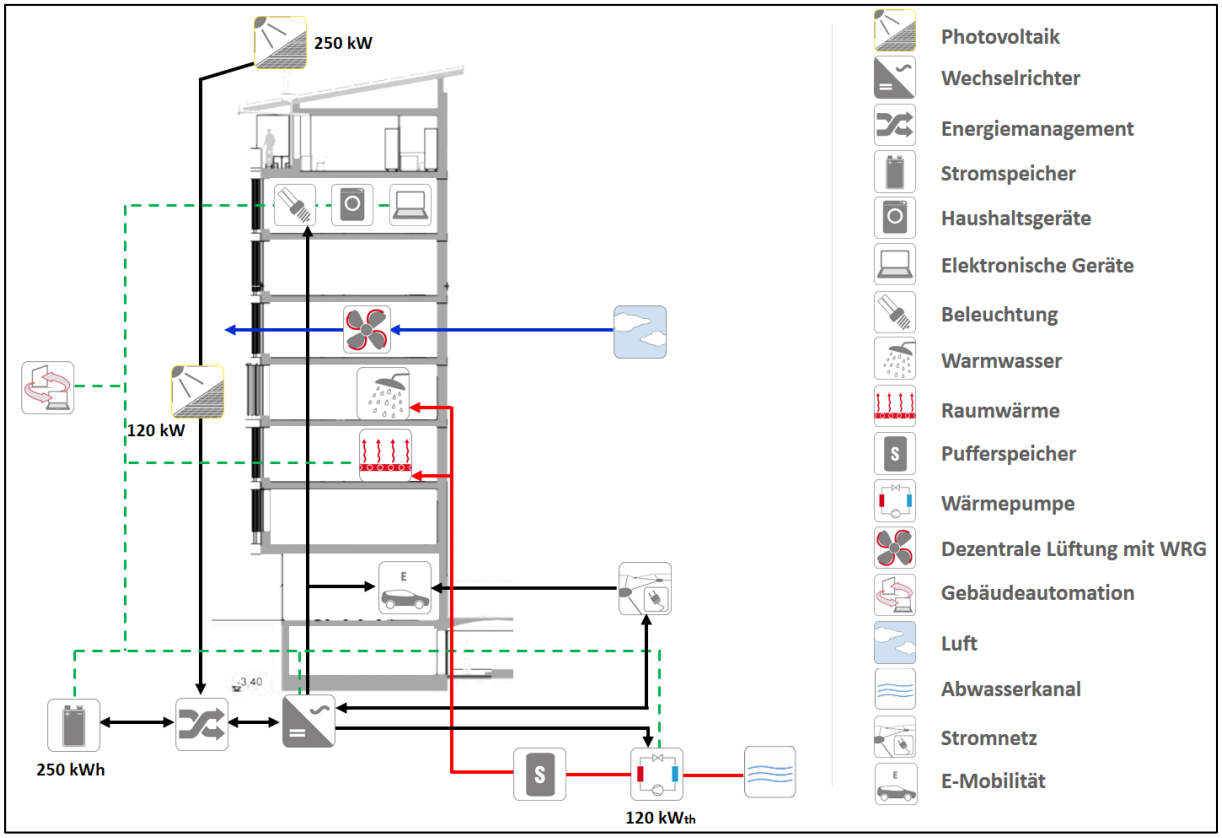


Abbildung 3: Schema Energiekonzept

3.5 Wärmeschutz

Im vorliegenden Abschnitt werden die bauphysikalischen Randbedingungen für das Aktiv-Stadthaus beschrieben. Die Darstellung beschränkt sich hierbei auf die thermische Bauphysik.

Die Grundlage für das Erreichen des Effizienzhaus-Plus-Standards ist die konsequente Bedarfsreduktion durch eine Gebäudehülle mit einer hohen Wärmeschutzqualität. Die Wärmedurchgangskoeffizienten der einzelnen Bauteile sind in Tabelle 2 abgebildet.

Tabelle 2: U-Werte der Außenbauteile

Bauteil	Dämmstärke	U-Wert	Fläche
		[W/(m²*K)]	[m²]
Außenwand	300mm WLG 040	0,127	4.639
Wand gegen Erdreich	300mm WLG 044	0,142	411
Wand gegen Tiefgarage Achse 13-18	250mm WLG 040	0,153	13
Wand gegen Tiefgarage Achse 6-9 und 20-23	230mm WLG040	0,166	33
Wand gegen Tiefgarage_ Achse 28-32	210mm WLG040	0,181	38
Dach	360mm WLG 032	0,087	1.051
Dachterrassen	20mm WLG 024, 50 mm VIP 0,007 W/mK	0,115	213
Boden gegen Erdreich	220mm WLG 044	0,207	541
Boden über Außenluft	40 mm WLG 007 10 mm XPS 40 mm EPS	0,156	183
Boden über Trafo	300mm WLG 035	0,091	98
Boden über Garage	300mm WLG 035	0,092	379
Boden über AL Brandstr.	80mm WLG 010	0,120	3
Wand gegen unbeheizt	300mm WLG 035	0,112	144
Fenster	-	0,720	2.123
Fenster P-R-Fassade EG	-	0,850	298
Tür Keller	-	1,500	13
Tür Garage	-	1,500	11

Für das Aktiv-Stadthaus resultiert bei der gegebenen Gebäudekubatur und Bauteilqualitäten ein Wärmetransmissionskoeffizient H_T‘ in Höhe von 0,30 W/(m²*K). Ein Wärmebrückenzuschlag von 0,04 W/(m²*k) ist hier berücksichtigt.

3.6 Anlagentechnik

In diesem Kapitel werden die relevanten technischen Komponenten des Energiekonzepts aufgeführt und beschrieben.

3.6.1 Wärmeerzeugung

Zur Wärmebereitstellung steht in der Energiezentrale des Aktiv-Stadthauses eine elektrische Wärmepumpe der Firma Combitherm zur Verfügung. Mit der Wärmepumpe wird die im Gebäude erforderliche Wärme für die Heizung und Warmwasser zentral bereitet. Die thermische Leistung der Wärmepumpe beträgt 120 kW_{th} (Betriebspunkt 1 98 kW_{th} B10/W55 COP 3,55; Betriebspunkt 2 145 kW_{th} B10/W35 COP 5,0).

Abbildung 4: Wärmepumpe

Zusätzlich zur Wärmepumpe steht bei einem Ausfall der Anlagen ein Gas-Brennwertkessel mit einer thermischen Leistung von 140 kW_{th} bereit.

3.6.2 Abwasserwärmetauscher

Als Wärmequelle für die Wärmepumpe kommt ein Abwasserwärmetauscher der Firma Uhrig Kanaltechnik GmbH zum Einsatz. Dabei wird dem Abwasser beim Überströmen eines Abwasserwärmetauschers Wärme entzogen. Im Abwasserkanal in der Gutleutstraße konnten bei Messungen gute Voraussetzungen für den Betrieb eines Abwasserwärmetauschers festgestellt werden. In der Messperiode (09.01.2013 – 14.01.2013) lag die minimale Abwassermenge bei 160 l/s bei einer mittleren Temperatur von 17 °C (siehe Abbildung 5). Die dort entzogene Wärme wird über öffentliche Wege und Kellerräume der angrenzenden Gebäude in die Energiezentrale des Aktiv-Stadthauses befördert.

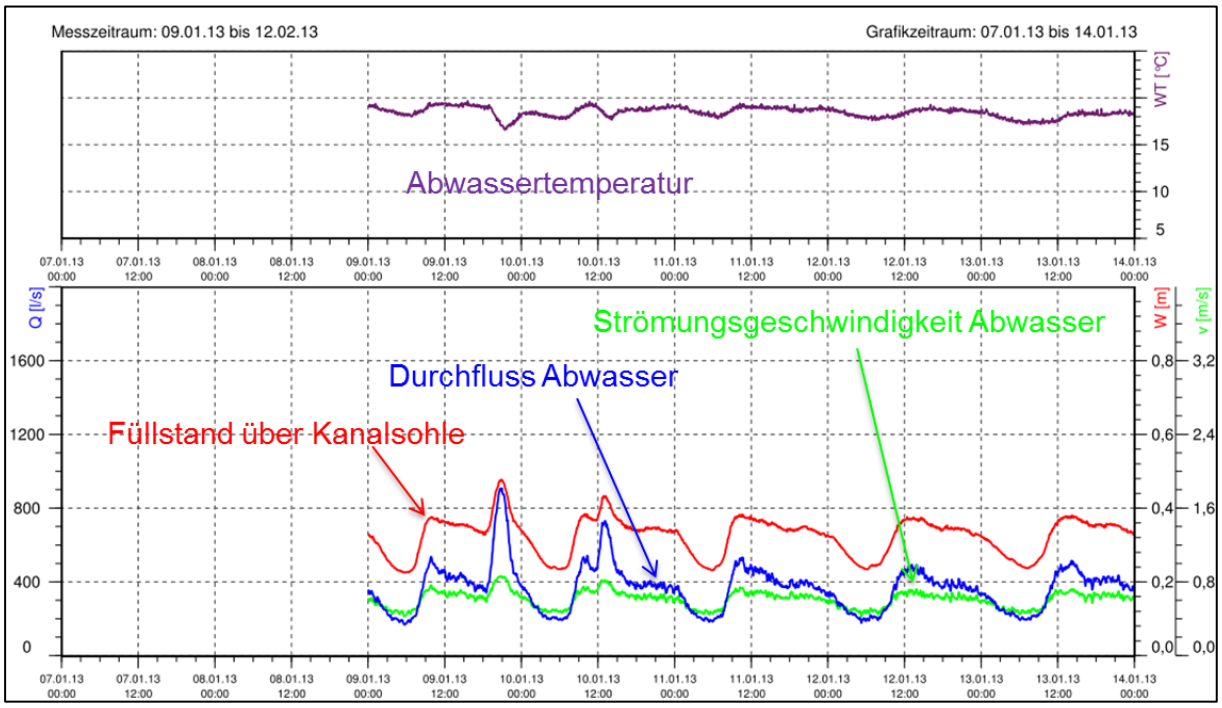


Abbildung 5: Auszug Kanalmessung

Der Abwasserwärmetauscher hat eine Länge von 55 m und eine überströmte Wärmetauscherfläche von ~ 102 m². Die Wärmeentzugsleistung beträgt dabei rund 95 kW_{th}. In den folgenden Abbildungen sind ein Modell und Fotodokumentationen bei der Installation des Abwasserwärmetauschers dargestellt.

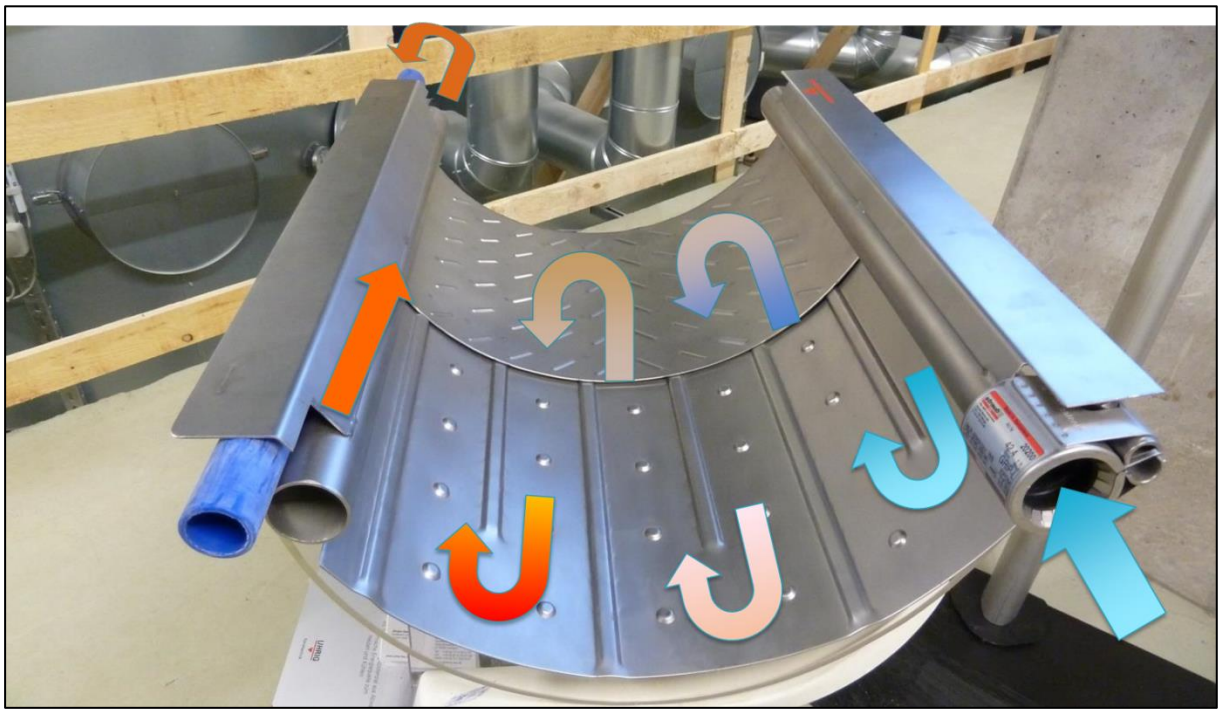


Abbildung 6: Modell Abwasserwärmetauscher

Abbildung 7: Fotodokumentation Installation Abwasserwärmetauscher

3.6.3 Wärmespeicher und –verteilung

Zur Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch und zur Optimierung der Energienutzung im Gebäude sind in der Energiezentrale drei große Wärmespeicher mit je einem Volumen von 5 m³ aufgestellt (Pufferspeicher Heizung 5 m³; Pufferspeicher Warmwasserbereitung 2 x 5 m³).

Abbildung 8: Ansicht Heizzentrale

Die Wärmeverteilung im Gebäude erfolgt über ein 4-Leiter-Netz. Ein Hochtemperaturnetz mit ca. 55°C für die Frischwasserstationen in den Wohnungen und die Badheizkörper. Ein Niedertemperaturnetz mit ca. 35°C für die Fußbodenheizung. Dieses wird nur in der Heizperiode betrieben. Die Verwendung unterschiedlicher Temperaturniveaus ist die Voraussetzung für die hocheffiziente Betriebsweise der Wärmepumpe. Denn je niedriger die Heizwasseraustrittstemperaturen sind desto effizienter funktioniert die Wärmepumpe.

3.6.4 Wärmeübergabe

Die Wärmeübergabe in den einzelnen Wohnungen erfolgt über Wohnungsstationen. Je Wohnung befindet sich ein Installationsschrank mit Fußbodenheizkreisverteiler und Frischwasserstation. In dieser erfolgt im Durchflussprinzip die Warmwasserbereitung. Durch die dezentrale Warmwasserbereitung in den Wohnungen können primärseitige Vorlauftemperaturen unter 60 °C von der Wärmepumpe bereitgestellt werden. Die damit verbundene physikalische Trennung des Gebäude- und des Wohnungsnetzes dient der Vermeidung der Legionellenbildung im Warmwassernetz.

Abbildung 9: Frischwasserstation in den Wohnungen

3.6.5 Lüftung

Zur Minimierung des Heizwärmebedarfs und zur Gewährleistung einer hohen Luftqualität befinden sich in den Wohnungen Lüftungsgeräte „novus 300“ der Firma Paul mit Wärmerückgewinnung. Die Außenluftansaugung erfolgt über die Nordseite. Die Zulufträume wie z.B. Schlafzimmer und Wohnzimmer werden mit frischer vortemperierter Zuluft versorgt. Über die Küchen- und Sanitärräume wird die verbrauchte Abluft aus den Wohnungen abgesaugt. Bevor die Abluft an der Südfassade ausgeblasen wird, erfolgt eine Wärmerückgewinnung zur Vorwärmung der Außenluft. Die dezentralen Lüftungsgeräte weisen dabei einen hohen Wärmerückgewinnungsgrad von 93 % auf.

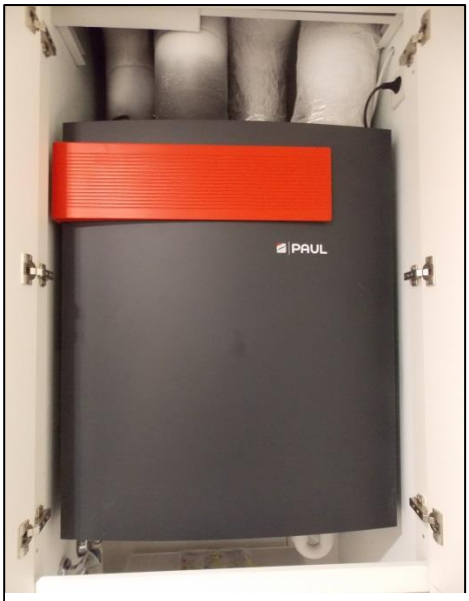


Abbildung 10: Lüftungsgerät

3.6.6 Hocheffiziente Haushaltsgeräte

Der Haushaltsstrombedarf stellt einen wichtigen Bestandteil des Gesamtendenergiebedarfs in Effizienzhäusern-Plus dar. Aus diesem Grund hat sich der Bauherr entschieden, die Wohnungen grundlegend möbliert mit Haushaltsgeräten der höchsten Effizienzklasse auszustatten. Dadurch ist bereits durch die vorhandene Geräte-Infrastruktur der Grundstein für einen reduzierten Haushaltsstrombedarf gelegt.

Diese Haushaltsgeräte der Firma Miele umfassen die weiße Ware in der Küche (Kühlschrank, Gefrierschrank, Herd) als auch in den Badezimmern (Waschmaschine, Trockner). In den fünf Musterwohnungen sind diese Geräte zum Teil ansteuerbar und damit in das übergeordnete Energiemanagement des Gebäudes integrierbar.

Unter anderem sind folgende Haushaltsgeräte in den Wohnungen installiert:

- Kühlschrank Miele K 5122 Ui
- Spülmaschine Miele G 6900
- Trockner Miele TMR 640 WP
- Herd Miele KM 6012
- Waschmaschine Miele WMG 820 WPS
- Waschmaschine Miele WMF 820 WPS:

Abbildung 11: Hocheffiziente Geräteausstattung in den Wohnungen

3.6.7 Photovoltaik

Für die erneuerbare Stromerzeugung im Aktiv-Stadthaus sind auf dem Dach und an der Fassade Photovoltaikmodule installiert.

Auf dem um 10° geneigten und in Richtung SSO ausgerichteten Pultdach sind Photovoltaikmodule der Firma SUNPOWER mit einer gesamten installierten Leistung von 251 kW_p montiert. Die 769 Hocheffizienzmodule SPR327 NE-WHT weisen einen Modulwirkungsgrad von 19,7 % auf. Über einen Zentralwechselrichter der Firma AMK (Typ: AMKASYN S 240-WOB) sind die Module mit dem Batteriesystem und dem hausinternen Stromnetz verbunden.

Auf der gewellten Südfassade gliedern sich die homogenen Photovoltaikmodule in das vorgegebene Fassadenraster ein. Durch die durchgehend schwarze Oberfläche bilden die Module der Firma SOLARNOVA ein ansprechendes Fassadenbild. Insgesamt sind 348 Module vom Typ SOL 338 K mit einer Gesamtleistung von 118 kW_p installiert. Über sechs KACO-Wechselrichter (Typ: Powador 18.0 TL 3) im UG wird der Gleichstrom der Module in Wechselstrom umgewandelt.

Abbildung 12: PV-Fassadenanlage

Abbildung 13: Ausschnitt PV-Dachanlage

Der Solarstromertrag wurde im Rahmen der Planung mit der Software PV SOL Premium 7.5 simuliert. Für den Standort Frankfurt resultiert ein Gesamtertrag in Höhe von rund 300 MWh/a. Der Anteil der Dachanlage ist dabei dominierend und entspricht rund 80 % des Gesamtertrags. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Simulation detailliert abgebildet.

Tabelle 3: Ergebnisse der PV-Simulation für den Standort Frankfurt

	Inst. Leistung	**Ertrag**	**Spez. Ertrag**
	[kWp]	**[MWh/a]**	**[kWh/(kWp·a)]**
Dach	251	246	980
Fassade	118	53	450
Gesamt	**369**	**300**	**810**

3.6.8 Stromspeicher

Im Aktiv-Stadthaus ist ein zentraler Bestandteil des Energiekonzepts der Stromspeicher mit einer Gesamtkapazität von 250 kWh. Das von der Firma SINUSSTROM installierte Speichersystem basiert auf der Lithium-Eisen-Phosphat-Technologie. Mit diesem Batterietyp kann im Vergleich zu Bleibatterien eine höhere Zyklenlebensdauer bei gleichzeitig tieferen Entladetiefen erreicht werden.

Primäres Ziel des Stromspeichers ist die zeitliche Entkopplung von PV-Stromerzeugung und Stromverbrauch im Gebäude. Der tagsüber produzierte Strom kann durch den Stromspeicher in der Hauptnutzungszeit der Wohnungen – in den Abendstunden – nutzbar gemacht werden. Der Eigennutzungsgrad des solar erzeugten Stroms soll damit erhöht werden. Unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit soll dieser Stromspeicher eine Steigerung des PV-Eigennutzungsgrads von 34 auf 50 % ermöglichen.

Abbildung 14: Ansicht Lithium-Eisen-Phosphat-Stromspeicher

3.6.9 Energiemanagement und Prognose

Durch das Energiemanagement im Aktiv-Stadthaus soll die Energienutzung im Gebäude und in den Wohnungen optimiert werden.

Auf Gebäudeebene regelt das Energiemanagementsystem (EMS) die Einsatzzeiten der Wärmepumpe und die Beladung der Pufferspeicher für Heizwärme und Warmwasser. Ebenso beinhalten die hinterlegten Algorithmen die Anweisungen zur Batterieladung und –entladung. In Abhängigkeit von den Speicherzuständen und den Prognosewerten werden Betriebszeiten in verändert und ggf. die Nutzung der Wärmepumpe in Stunden mit Solarstromertrag verschoben.

Das Prognosetool greift hierbei sowohl auf Wetterdaten als auch abgeleitete Bedarfsprognosen für die Bereiche Heizung, Warmwasser und Nutzerstrom zurück. Die Bedarfsprognosen hängen in diesem Fall von mehreren Parametern ab. So beeinflusst die Jahreszeit, der Wochentyptag, die Anzahl der Nutzer und der genutzten Wohnungen den prognostizierten Energiebedarf im Aktiv-Stadthaus.

Auf Wohnungsebene ist das Lastverschiebepotenzial von Haushaltsgeräten nur beschränkt vorhanden und aus heutiger Sicht wirtschaftlich nicht darstellbar. Fünf exemplarische Wohneinheiten sind dennoch zu Forschungszwecken mit ansteuerbaren Haushaltsgeräten ausgestattet. Über ein Nutzerinterface können die Bewohner diese Haushaltsgeräte programmieren und die Betriebszeiten festlegen. Eine Prognosesteuerung sagt den zu erwartenden Strom und Wärmebedarf und das Solarangebot voraus und gibt den Nutzern ein Feedback über geeignete Betriebszeiten in den nächsten 48 h. Ebenso ist eine automatische Startfreigabe dieser Geräte programmierbar, bei der ein geeigneter Startzeitpunkt mit verfügbarem Solarstrom definiert wird.

Abbildung 15: Ansicht Gerätesteuerung auf dem Nutzerdisplay

3.6.10 E-Mobilität

Ganzheitliche energetische Gebäudekonzepte der Zukunft betrachten die Grenzen der Energieströme über die Systemgrenze des Gebäudes hinaus. Hier ist als wesentlicher gebäudenaher Energieverbraucher die Mobilität der Bewohner zu identifizieren.

In Verbindung mit dem lokalen Car-Sharing Unternehmen „book ’n drive“ wird eine Car-Sharing-Flotte von zunächst zwei E-Mobilen und einem konventionellen Fahrzeug im Erdgeschoss des Aktiv-Stadthauses untergebracht sein. Den Mietern und der Öffentlichkeit steht ein innovatives, auf Strom basierendes Mobilitätsangebot zur Verfügung. Die Mobilität wird zu einem Bestandteil des Gebäudeenergiekonzepts indem der eigene Solar- und Batteriestrom zur „Betankung“ der Elektromobile eingesetzt wird. Das angesetzte Stromkontingent von ~ 8.000 kWh/a entspricht bei einem Verbrauch von 16 kWh/100 km einer Jahresfahrleistung von 50.000 km.

Die Ladeinfrastruktur im Aktiv-Stadthaus ist darauf vorbereitet weitere E-Mobil Ladestationen zu integrieren, auch eine induktive Ladung ist vorbereitet.

Abbildung 16: Elektromobilität im Aktiv-Stadthaus

3.7 Energiebedarf und Energiedeckung

Die Energiebilanz nach EnEV/ DIN V 18599 dient als Grundlage zur Bewertung der Einhaltung der gesetzlichen Mindestanforderungen. Dabei wird das Gebäude hinsichtlich der Qualität der Gebäudehülle (Mittlerer Wärmetransmissionskoeffizient H_T') und dem Primärenergiebedarf beurteilt. Die Ergebnisse des EnEV-Nachweises (EnEV 2009) sind in der nachfolgenden Tabelle und Abbildung dargestellt.

Die Energiebedarfsdaten im Rahmen der EnEV-Nachweisführung wurden mit der Software Solarcomputer berechnet. Alle Angaben in Tabelle 4 basieren auf den Berechnungsergebnisse für den Energieausweis (siehe Abbildung 17). Als Flächenbezug dient die Energiebezugsfläche in Höhe von 8.789 m².

Der Haushaltsstrom ist kein Bestandteil des EnEV-Nachweises und wird ergänzend im Rahmen der EffizienzhausPlus-Nachweisführung mit ausgewiesen.

Tabelle 4: Energiebedarf und Energiedeckung

Name	Heizung	Warm-wasser	Lüftung	Sonstiges	Haushaltsstrom (inkl. Licht und Kochen)
Nutzenergie $Q_{x,b}$ [kWh/m²a]	16,3	11,7			
Strombedarf [kWh/m²a]	3,8	5,1		4,5	14,7

Projekt/Variante: E12320 Stadtaktivhaus Speicherstraße / Grundvariante KfW 40_Kanal MW

Energieausweis **Neubau**

Anforderungen EnEV

Die Anforderungen sind erfüllt.

Gebäudedaten

Bezugsfläche:	8789 m²	Volumen Ve:	31217 m³	Fensteranteil:	29.8 %
Wü. Fläche A:	10470 m²	A/Ve:	0.34 1/m		

Energiebedarf

CO2-Emissionen: 8.53 kg/(m²·a)

Endenergiebedarf 13.47 kWh/(m²·a)

0 50 100 150 200 250 300 350 >=400

Primärenergiebedarf 35.02 kWh/(m²·a)

Nachweis der Einhaltung des § 3 oder § 9 Abs. 1 EnEV

Primärenergiebedarf		Energetische Qualität der Gebäudehülle		DIN 4108/2
Gebäude Ist-Wert:	35.02 kWh/(m²·a)	Gebäude Ist-Wert HT´:	0.30 W/(m²·K)	sommerlicher Wärmeschutz
Anforderungswert:	90.26 kWh/(m²·a)	Anforderungswert HT´:	0.50 W/(m²·K)	

Aufteilung Energiebedarf

kWh/(m²a)	Heizung	Warmwasser	Hilfsgeräte (ggf. incl. Kühlung)	Gebäude gesamt
Nutzenergie	16.34	11.70	---	28.04
Endenergie	3.82	5.12	4.53	13.47
Primärenergie	9.92	13.32	11.78	35.02

Endenergiebedarf

Energieträger	Jährlicher Endenergiebedarf in kWh/(m²a) für			
	Heizung	Warmwasser	Hilfsgeräte (ggf. incl. Kühlung)	Gebäude gesamt
Strom-Mix	3.82	5.12	4.53	13.47

Ersatzmaßnahmen (nur bei Neubau im Falle der Anwendung von § 7 Nr.2 Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz)

Anforderungen nach § 7 Nr.2 EEWärmeG ☑ Die um 15% verschärften Anforderungswerte sind eingehalten.

Anforderungen nach § 7 Nr.2 in Verbindung mit § 8 EEWärmeG

Die Anforderungswerte sind um: 40.75 % verschärft.

PE: Verschärfter Anforderungswert: 53.47 kWh/(m²a)

WS: ☑ Die verschärften Anforderungswerte sind eingehalten.

Abbildung 17: EnEV Nachweis (ohne Berücksichtigung von PV, Standort Würzburg)

3.8 Bewertung der Effizienz aus Berechnung nach DIN V 18599

Die in Tabelle 5 aufgeführten Energiebedarfe sind differenziert nach Nutz-, End- und Primärenergie dargestellt und ergänzt um den Haushaltsstrombedarf, der in der Bilanz nach EffizienzhausPlus ebenfalls mit bewertet wird.

Der Endenergiebedarf für die Wärmeerzeugung ist geringer als die Wärmemenge, die durch die Wärmepumpe bereitgestellt wird. Dies ist bedingt durch die Berechnungsmethodik der EnEV-Software, die die genutzte Umweltwärme in der Endenergie nicht berücksichtigt. Ausgehend von dem Endenergiebedarf (Strom) wird der Primärenergiebedarf (nicht erneuerbar) mit einem Primärenergiefaktor für Strom von 2,4 berechnet.

Tabelle 5: Bewertung Effizienz

Teilabschnitt	Erläuterung	Energie [kWh/a]	Spez. Energie [kWh/m²$_{AN}$*a]
Nutzenergie	Nutzenergiebedarf der Räume für Heizung, Trinkwarmwasser und Kühlung	246.443	28,04
Erzeugerabgabe	Wärme- und Kälteabgabe der Erzeuger an das Verteilnetz oder die Speicher für Heizung, Trinkwarmwassererwärmung und Kühlung	309.900	35,26
Endenergie Erzeuger	Strombedarf für die Erzeugung von Wärme und Kälte für Heizung, Trinkwarmwassererwärmung und Kühlung	89.296	10,16
Endenergie Haustechnik	Strombedarf für die Erzeugung von Wärme und Kälte für Heizung, Trinkwarmwassererwärmung und Kühlung sowie Hilfsenergie für die Anlagentechnik wie Pumpen, Ventilatoren und Regelungen	118.387	13,47
Endenergie Haushaltsstrom	Erweiterter Bilanzraum EffizienzhausPlus für Beleuchtung und Haushaltsgeräte	129.600	14,70
Primärenergie Haustechnik	Nicht erneuerbarer Anteil des Primärenergieinhalts der gesamten Endenergie für die Haustechnik	307.790	35,02
Primärenergie Haushaltsstrom	Nicht erneuerbarer Anteil des Primärenergieinhalts des Haushaltsstroms	311.040	35,40

Die Aufwandszahlen, die im Zuge der EnEV-Berechnung ermittelt wurden sind in der Tabelle 6 aufgelistet.

Tabelle 6: Aufwands- und Arbeitszahlen

Bewertete Teilabschnitte	Aufwandszahlen / Arbeitszahlen [kWh/kWh]
Effizienz der Verteilung (Erzeugerabgabe / Nutzenergie)	1,26
Effizienz der Wärme- / Kälteerzeuger (Endenergie Erzeuger / Erzeugerabgabe)	0,29
Endenergetische Effizienz der Haustechnik (Endenergie Haustechnik / Nutzenergie)	0,48
Effektive Arbeitszahl der gesamten Haustechnik (Nutzenergie /Endenergie Haustechnik)	2,08
Arbeitszahl des Energieerzeugers (Erzeugerabgabe / Endenergie Erzeuger)	3,47
Primärenergetische Effizienz der Haustechnik (Primärenergie Haustechnik/ Nutzenergie)	1,25

4 Monitoring

Im Rahmen des technischen Monitorings wurden seit September 2015 alle relevanten Energieverbräuche und Energieflüsse im Gebäude erfasst und ausgewertet. Neben der Bewertung der energetischen Performance des Gebäudes konnten mit Hilfe des technischen Monitorings auch Optimierungen im Betrieb vorgenommen werden. Die folgenden Kapitel zeigen exemplarisch wesentliche Monitoringergebnisse aus den letzten beiden Betriebsjahren auf.

4.1 Messkonzept

Für die Erfassung der Energieverbräuche im Gebäude wurde ein Messstellenkonzept entwickelt, das den Anforderungen des „Leitfaden für das Monitoring“ für Modellprojekte im „Plus-Energie-Haus-Standard“ des BMVBS entspricht. Die umfangreiche Messtechnik besteht dabei u.a. aus:

- • 158 Wärmemengenzählern
- • 143 Stromzählern
- • 79 Wasserzähler
- • 1 Gaszähler
- • 1 Wetterstation

Das Schema für das Messkonzept beinhaltet alle aufgenommenen Datenpunkte und ist gegliedert in Energiequelle, Energieerzeuger, Energiespeicher und Verbraucher.

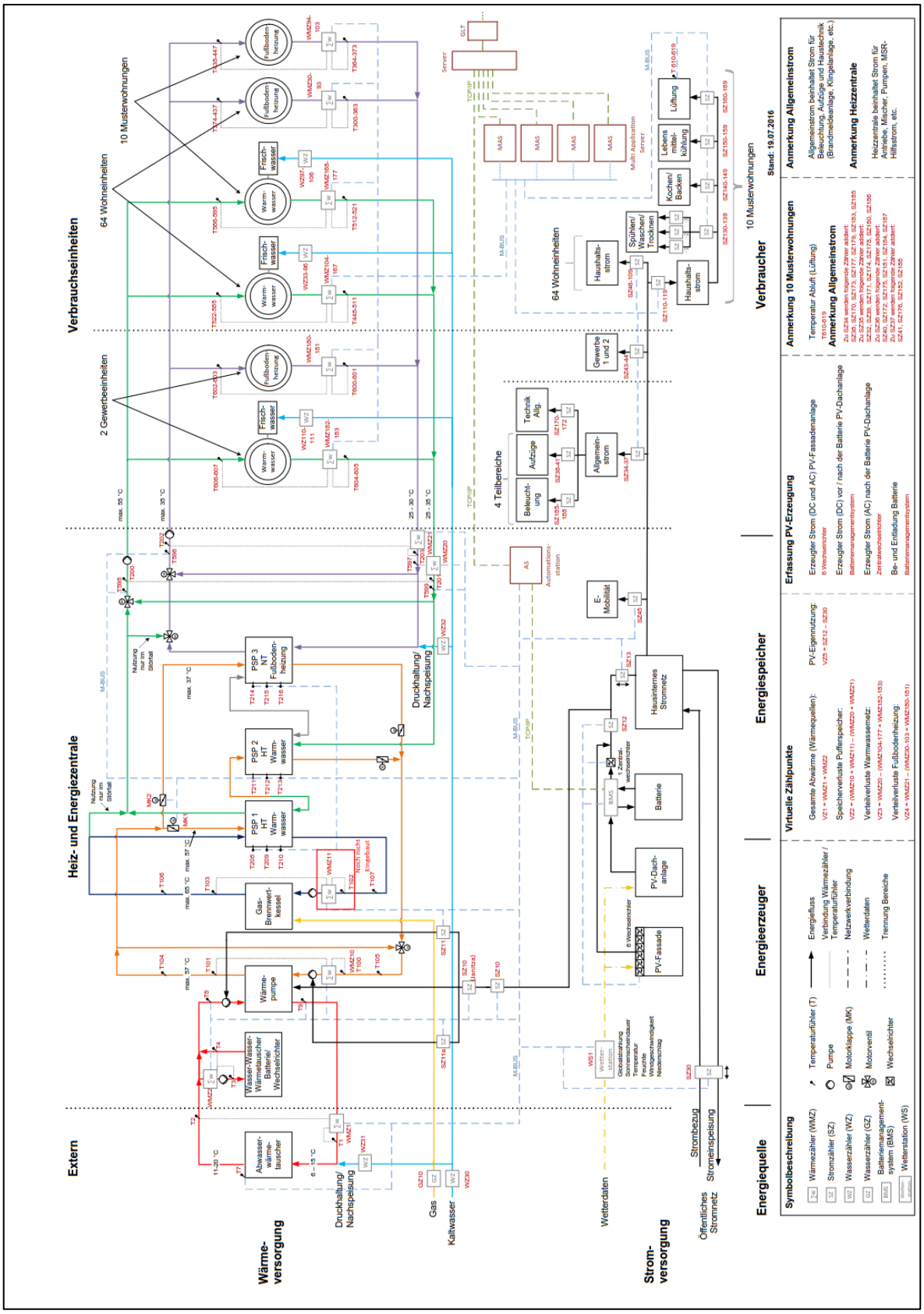


Abbildung 18: Schema Messkonzept

4.2 Verwendete Messtechnik

Es werden 661 Messwerte für das Monitoring erfasst. Davon sind 145 Stromzähler, 154 Wärmemengenzähler und 342 Temperatursensoren, sowie 20 weitere Werte zur Abbildung der Anlagentechnik.

System	Erforderliche Messstelle	Art des Zählers	Bezeichnung im Schema	Bereich
Energiequelle				
Abwasserwärmetauscher	Wärmeerzeugung	Wärmezähler	WMZ1	Energiequelle
		Temperaturfühler	T1, T2	
Abwärme Batterie / Wechselrichter	Wärmeerzeugung	Wärmezähler	WMZ2	Energiequelle
		Temperaturfühler	T3, T4	
Temperatur Abwasser		Temperaturfühler	T7	Energiequelle
Temperatur Wärmequelle gesamt		Temperaturfühler	T8, T9	Energiequelle
Energieerzeuger				
El. Wärmepumpe	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ10	Energieerzeuger
	Wärmeerzeugung	Wärmezähler	WMZ10	
	Vor- und Rücklauftemperatur	Temperaturfühler	T100, T101	
		Temperaturfühler (MSR-Technik)	T104, T105	
	Stromverbrauch Pumpe Primärkreislauf	Stromzähler	SZ11	
	Stromverbrauch Pumpe Sekundärkreislauf	Stromzähler	SZ11a	Energieerzeuger
Gas Brennwertkessel	Gasverbrauch	Gaszähler	SZ10	Energieerzeuger
	Wärmeerzeugung	Wärmezähler	WMZ11	
	Vor- und Rücklauftemperatur	Temperaturfühler	T102, T103	
		Temperaturfühler (MSR-Technik)	T106, T107	
PV-Dach- und Fassadenanlage	Erzeugter Strom	Stromzähler	SZ12	Energieerzeuger
PV Dachanlage	Erzeugter Strom (DC) vor der Batterie	Batteriemanagementsystem	BMS	Energieerzeuger
	Erzeugter Strom (DC) nach der Batterie	Batteriemanagementsystem	BMS	
	Erzeugter Strom (AC) nach der Batterie	Zentralwechselrichter	Zentralwechselrichter	
PV Fassadenanlage	Erzeugter Strom (DC und AC)	6 Wechselrichter	6 Wechselrichter	Energieerzeuger
PV-Dach- und Fassadenanlage und Wärmepumpe	Stromverbrauch und Stromerzeugung PV + Wärmepumpe	Stromzähler (Zweirichtungszähler)	SZ13	Energieerzeuger
Energiespeicher				
Pufferspeicher 1 und 2 (Warmwasser)	Wärme Speicherausgang	Wärmezähler	WMZ20	Energiespeicher
		Temperaturfühler	T200, T201	
Pufferspeicher 1	Temperatur oben	Temperaturfühler	T208	Energiespeicher
	Temperatur mitte	Temperaturfühler	T209	
	Temperatur unten	Temperaturfühler	T210	
Pufferspeicher 2	Temperatur oben	Temperaturfühler	T211	Energiespeicher
	Temperatur mitte	Temperaturfühler	T212	
	Temperatur unten	Temperaturfühler	T213	
Pufferspeicher 3 (Fußbodenheizung)	Wärme Speicherausgang	Wärmezähler	WMZ21	Energiespeicher
		Temperaturfühler	T202, T203	
Pufferspeicher 3	Temperatur oben	Temperaturfühler	T214	Energiespeicher
	Temperatur mitte	Temperaturfühler	T215	
	Temperatur unten	Temperaturfühler	T216	
Batteriespeicher	Beladung	Batteriemanagementsystem	BMS	Energiespeicher
	Entladung			
Energieverbraucher Gesamt/Allgemein				
Strom gesamt	Strombezug	Stromzähler (Zweirichtungszähler)	SZ30	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
	Stromeinspeisung			
Heizzentrale	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ32	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Zentrale Technik	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ33	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Allgemeinstrom	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ34 – 37	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Aufzüge	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ38 - 41	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
E-Mobilität	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ45	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Technik Allgemeinstrom Haus 20	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 170	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Technik Allgemeinstrom Haus 22	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 171	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Technik Allgemeinstrom Haus 24	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 172	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Technik Forschung M-Bus Haus 20	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 173	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Technik Forschung M-Bus Haus 22	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 174	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Technik Forschung M-Bus Haus 26	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 175	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Technik Forschung Netzwerk Haus 26	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 176	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Technik/Forschung M-Bus+Netzwerk Haus 24	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 177	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Rohrbegleitheizung Haus 20	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 179	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Rohrbegleitheizung Haus 22	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 180	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Rohrbegleitheizung Haus 24	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 181	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Rohrbegleitheizung Haus 26	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 182	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Druckerhöhung Haus 20	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 183	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Druckerhöhung Haus 24	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 184	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Dacheinläufe Haus 20	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 185	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Dacheinläufe Haus 22	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 186	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Dacheinläufe Haus 24	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 187	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Dacheinläufe Haus 26	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 188	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Zentrale IT Haus 22	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 189	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Vor- und Rücklauftemperatur Fußbodenheizung		Temperaturfühler	T596, T597	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Vor- und Rücklauftemperatur Warmwasser		Temperaturfühler	T598, T599	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Energieverbraucher Gewerbeeinheiten				
Fußbodenheizung (35 °C)	Wärmeverbrauch	Wärmezähler	WMZ180 - 181	Energieverbraucher Gewerbeeinheiten
		Temperaturfühler	T600 – 601, T602 – 603	
Warmwasser (55 °C)	Wärmeverbrauch	Wärmezähler	WMZ182 - 183	Energieverbraucher Gewerbeeinheiten
		Temperaturfühler	T604 – 605, T606 – 607	
Gewerbestrom	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ43 - 44	Energieverbraucher Gewerbeeinheiten
Energieverbraucher 64 Wohneinheiten				
Fußbodenheizung (35 °C)	Wärmeverbrauch	Wärmezähler	WMZ30 - 93	Energieverbraucher 64 Wohneinheiten
		Temperaturfühler	T300 – 363, T374 - 437	
Warmwasser (55 °C)	Wärmeverbrauch	Wärmezähler	WMZ104 - 167	Energieverbraucher 64 Wohneinheiten
		Temperaturfühler	T448 - 511, T522 - 585	
Haushaltsstromverbrauch	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ46 - 109	Energieverbraucher 64 Wohneinheiten
Energieverbraucher 10 Musterwohnungen				
Fußbodenheizung (35 °C)	Wärmeverbrauch	Wärmezähler	WMZ94 - 103	Energieverbraucher 10 Musterwohnunge
		Temperaturfühler	T364 - 373, T438 - 447	
Warmwasser (55 °C)	Wärmeverbrauch	Wärmezähler	WMZ168 - 177	Energieverbraucher 10 Musterwohnunge
		Temperaturfühler	T512 - 521, T586 - 595	
Haushaltsstromverbrauch	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ110 - 119	Energieverbraucher 10 Musterwohnunge
Beleuchtung	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ120 - 129	Energieverbraucher 10 Musterwohnunge
Wäschewaschen und –trocknen	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ130 - 139	Energieverbraucher 10 Musterwohnunge
Kochen / Backen	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ140 - 149	Energieverbraucher 10 Musterwohnunge
Lebensmittelkühlung	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ150 - 159	Energieverbraucher 10 Musterwohnunge
Lüftung	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ160 - 169	Energieverbraucher 10 Musterwohnunge
	Temperatur Abluft	Temperaturfühler	T610 - 619	
Sonstige Messungen				
Wetter	Globalstrahlung	Wetterstation inkl. Pyranometer	WS1	Sonstige Messungen
	Sonnenscheindauer			
	Temperatur			
	Feuchte			
	Windgeschwindigkeit			
	Niederschlag			
Klappenstellung	Freigabe Speisung PSP 1 und PSP 2	Digitaler Sensor	MK1	Sonstige Messungen
	Freigabe Speisung PSP 3	Digitaler Sensor	MK2	

Abbildung 19: Messstellenliste (siehe Anhang C – Messstellenliste)

4.3 Dokumentation

Die Messdaten der PV-Anlage werden durch die Gebäudeleittechnik über eine Modbus-TCP Schnittstelle ausgelesen bzw. über zusätzlich installierte M-Bus-Zähler erfasst. In den Wohnungen und den Technikzentralen installierte Strom- und Wärmezähler werden ebenfalls über M-Bus erfasst. Aufgrund der großen Anzahl und an Busteilnehmern und deren räumlichen Ausdehnung, ist das M-Bus-Netz in vier Segmente aufgeteilt. Jedes Segment wird lokal auf Ethernet gewandelt und per Glasfaser in die Zentrale verbunden.

Die zentrale Automationsstation erfasst zusätzlich Temperaturen und Anlagenzustände.

Alle Messwerte der Zähler und der Automationsstation werden in viertelstündigem Abstand abgefragt und archiviert und in der Datenbank der Gebäudeleittechnik gespeichert.

Zugriff vor Ort

Manuelle Datenexporte mit Vergleichsdaten aus der kompletten Gebäudeautomation sind in viertelstündlicher Auflösung möglich, außerdem die Darstellung aller im Projekt vorhandenen Informationspunkte wahlweise als Momentanwert oder Einzeltrend.

Schnittstelle Betreiber

Die Betreiber ABG und mainova greifen mit eigenen SCADA Systemen über VPN Zugänge direkt auf die Gebäudeleittechnik zu.

Schnittstelle Monitoring

Die Stundenwerte der Messdaten werden täglich automatisch in eine Datei geschrieben und regelmäßig ausgewertet. Der Zugriff erfolgt über einen dedizierten VPN-Zugang

Schnittstelle Nutzerinterface

Für das Nutzerinterface benötigte Messdaten werden vom Nutzerinterface Gateway per Ethernet viertelstündlich ausgelesen.

5 Meteorologische Randbedingungen

Im Rahmen des energetischen Monitorings wurden die Außentemperaturen direkt am Gebäude gemessen und archiviert. Die Erfassung der Solarstrahlung erfolgte durch eine Wetterstation auf einem weiteren Bauprojekt der ABG FRANKFURT HOLDING, welches sich in örtlicher Nähe zum Aktiv-Stadthaus befindet.

5.1 Solarstrahlung

Die Auswertung der Solarstrahlung zeigt im Monitoringzeitraum 2016 und 2017 etwa gleich hohe Strahlungswerte. Diese Werte entsprechen dem langjährigen Mittel für den Referenzort Mannheim. Im Vergleich zum Referenzort Potsdam sind die Messwerte rund 1,5 % höher.

Tabelle 7: Mittlere monatliche Strahlungsintensitäten

	Messung Speicherstraße 20, FFM	Referenzklima FFM* (Region 12 - Mannheim)	Referenzklima D* (Region 4 - Potsdam)
	W/m²	W/m²	W/m²
Jan 16	28	33	29
Feb 16	47	59	44
Mrz 16	100	131	97
Apr 16	177	139	189
Mai 16	221	193	221
Jun 16	217	246	241
Jul 16	210	222	210
Aug 16	211	191	180
Sep 16	158	119	127
Okt 16	62	89	77
Nov 16	31	37	31
Dez 16	17	27	17
Jan 17	34	33	29
Feb 17	59	59	44
Mrz 17	123	131	97
Apr 17	182	139	189
Mai 17	206	193	221
Jun 17	249	246	241
Jul 17	214	222	210
Aug 17	177	191	180
Sep 17	129	119	127
Okt 17	69	89	77
Nov 17	27	37	31
Dez 17	11	27	17
Mittelwert 2016	**123**		
Mittelwert 2017	**124**	**124**	**122**

* Quelle: [DIN V 18599-10:2011-12]

Die grafische Darstellung in Abbildung 20 verdeutlicht den saisonalen Verlauf der Solarstrahlung. Obwohl die Jahresmittelwerte der Monitoringzeiträume 2016 und 2017 etwa gleich hoch sind, treten beim Vergleich einzelner Monate zum Teil deutliche Unterschiede auf.

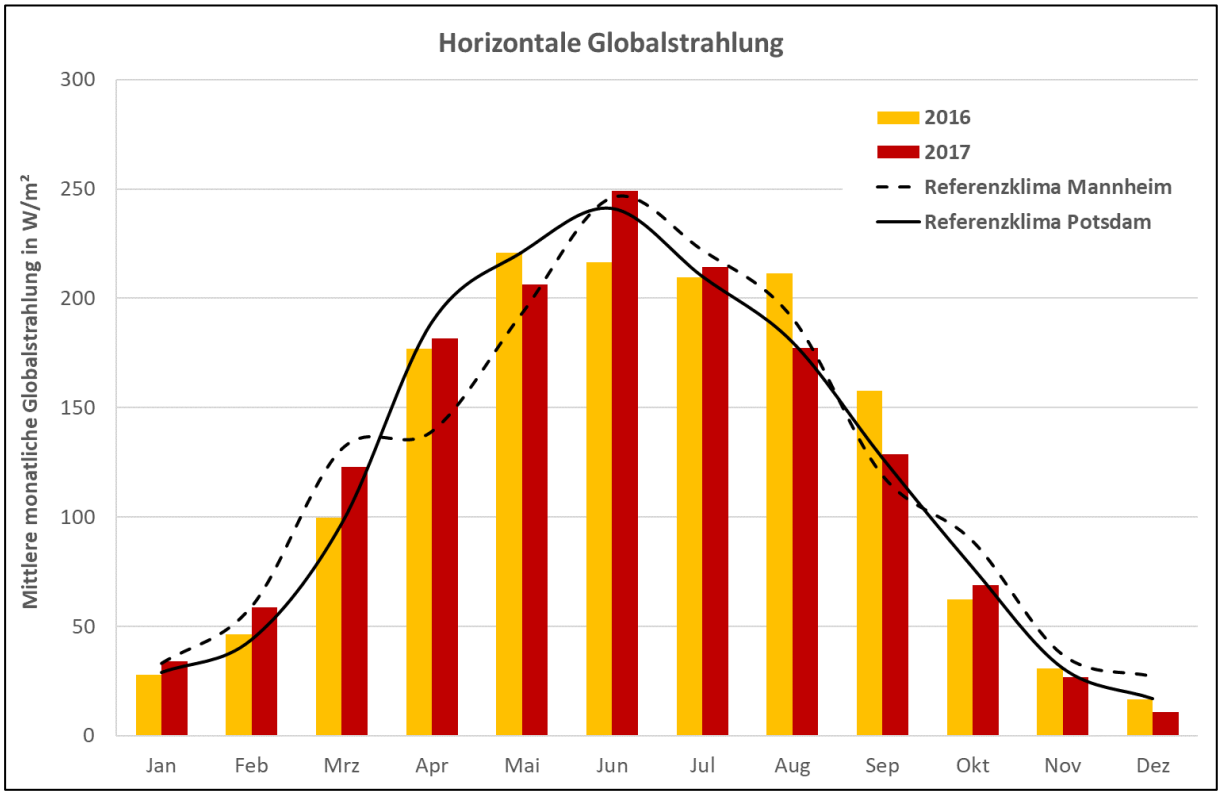


Abbildung 20: Mittlere monatliche Globalstrahlung auf die Horizontale

5.2 Außenlufttemperaturen

Die gemessenen Außenlufttemperaturen am Standort Speicherstraße sind in der Tabelle 8 dargestellt. In den beiden Betriebsjahren lag die mittlere Außenlufttemperatur bei etwa 13,2 °C. Im Vergleich zu den Messwerten am Flughafen Frankfurt sind die Außenlufttemperaturen um ca. 2 K höher und im Vergleich zum langjährigen Mittel um ca. 3 K. Bedingt durch die innerstädtische Lage sind die höheren Temperaturen am Standort Speicherstraße plausibel.

Tabelle 8: Außenlufttemperaturen

	Messung Speicherstraße 20, FFM	Messung Flughafen FFM *	Flughafen FFM, Langjähriges Mittel **
	°C	°C	°C
Jan 16	5,5	3,3	1,6
Feb 16	6,8	4,8	2,5
Mrz 16	7,7	5,6	6,3
Apr 16	11,9	9,5	10,0
Mai 16	17,1	15,1	14,5
Jun 16	20,3	18,0	17,7
Jul 16	23,0	20,5	19,8
Aug 16	21,8	19,8	19,3
Sep 16	20,9	18,8	15,2
Okt 16	12,2	9,8	10,2
Nov 16	7,7	5,3	5,5
Dez 16	4,9	2,5	2,7
Jan 17	1,5	-0,9	1,6
Feb 17	7,0	5,2	2,5
Mrz 17	11,2	9,3	6,3
Apr 17	12,1	9,7	10,0
Mai 17	18,0	15,9	14,5
Jun 17	22,1	20,3	17,7
Jul 17	22,6	20,3	19,8
Aug 17	21,6	19,5	19,3
Sep 17	16,6	14,1	15,2
Okt 17	11,9	11,7	10,2
Nov 17	8,3	5,9	5,5
Dez 17	5,7	3,8	2,7
Mittelwert 2016	**13,3**	**11,1**	**10,5**
Mittelwert 2017	**13,2**	**11,2**	

* Quelle: [IWU Gradtagszahlen 2018]

** Langjähriges Mittel von 1971 -2017

In Abbildung 21 und Abbildung 22 sind die mittleren Außenlufttemperaturen dargestellt. Die jahreszeitliche Verteilung der Temperaturen verdeutlicht, dass bei etwa gleich hohen Jahreswerten die Tages- und Monatsmittelwerte deutlich variieren können. So sind im Februar und Juni 2017 die Temperaturen deutlich höher als 2016. Im Gegensatz hierzu sind in den Monaten Januar und September 2017 die Werte deutlich niedriger als 2016.

Besonders bei der Analyse des Heizwärmeverbrauchs sind die Abweichungen innerhalb der Heizperiode von Interesse. Durch eine Klimabereinigung auf Monatsbasis kann der Heizwärmeverbrauch, unter Berücksichtigung der realen und der in der Berechnung verwendeten Außenlufttemperaturen, besser interpretiert werden.

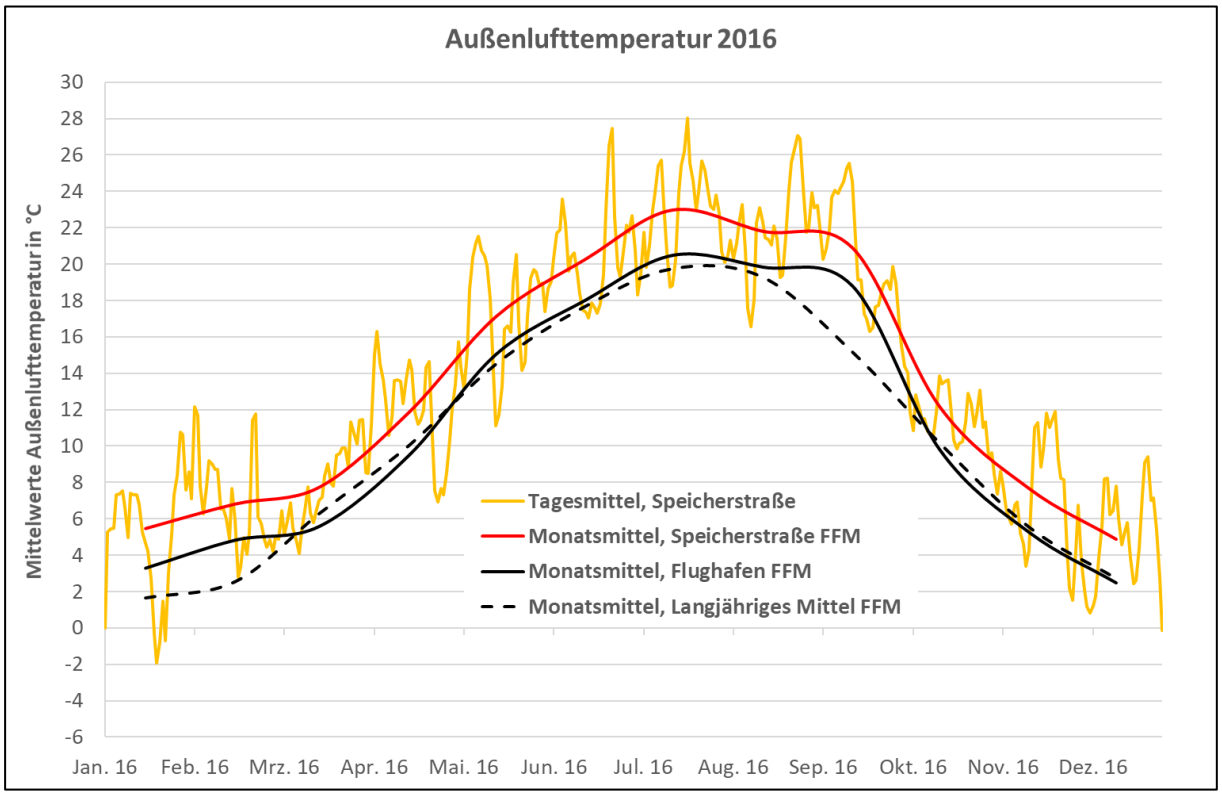


Abbildung 21: Vergleich der Außenlufttemperaturen 2016

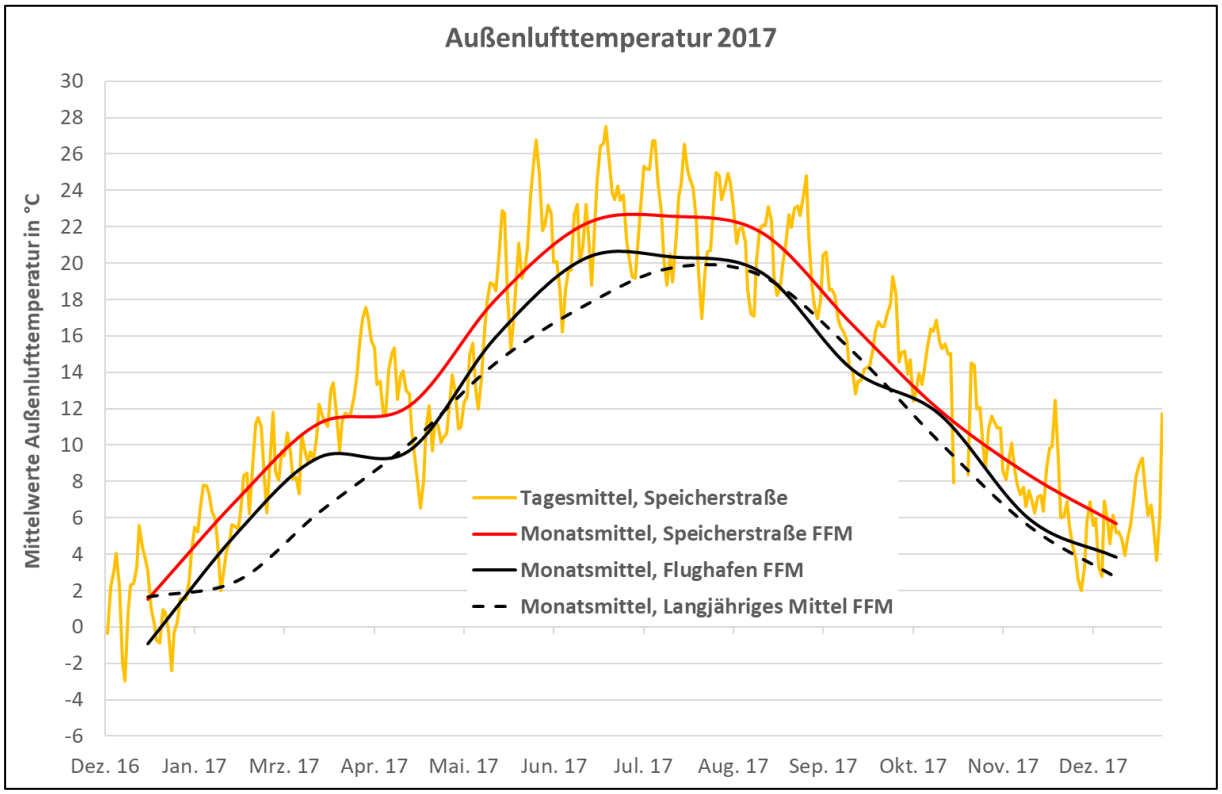


Abbildung 22: Vergleich der Außenlufttemperaturen 2017

5.3 Klimabereinigung

Die monatlichen Gradtagszahlen und Heizgradtage sind in der Tabelle 9 aufgelistet. Bei einer Heizgrenztemperatur von 12 °C resultiert für 2016 eine Gradtagszahl von 2.375 und für 2017 ein Wert von 2.250. Im Vergleich zum langjährigen Mittel am Flughafen Frankfurt liegen die gemessenen Werte in der Speicherstraße um 22 % (2016) und 26 % (2017) niedriger. Gegenüber dem Referenzklima für Deutschland (Potsdam) sind die gemessenen Gradtagszahlen sogar um rund 35 % niedriger.

Tabelle 9: Monatliche Gradtagszahlen und Heizgradtage

	Gradtagszahl G20/12 [Kd]			Heizgradtage HGT12 [Kd]		
	Messung Speicherstraße 20, FFM	Messung Flughafen FFM *	Flughafen FFM, Langjähriges Mittel **	Messung Speicherstraße 20, FFM	Messung Flughafen FFM *	Flughafen FFM, Langjähriges Mittel **
	Kd	Kd	Kd	Kd	Kd	Kd
Jan 16	458	518	569	210	270	321
Feb 16	375	432	492	151	208	267
Mrz 16	380	446	411	132	198	180
Apr 16	153	266	247	33	82	83
Mai 16	17	67	80	1	11	17
Jun 16	0	0	10	0	0	1
Jul 16	0	0	0	0	0	0
Aug 16	0	0	1	0	0	0
Sep 16	0	0	43	0	0	6
Okt 16	154	303	246	18	71	77
Nov 16	370	442	426	130	202	195
Dez 16	469	543	534	221	295	288
Jan 17	573	649	569	325	401	321
Feb 17	375	414	492	143	190	267
Mrz 17	217	293	411	41	93	180
Apr 17	140	276	247	28	76	83
Mai 17	26	79	80	2	15	17
Jun 17	0	0	10	0	0	1
Jul 17	0	0	0	0	0	0
Aug 17	0	0	1	0	0	0
Sep 17	0	73	43	0	9	6
Okt 17	142	156	246	62	28	77
Nov 17	333	422	426	109	182	195
Dez 17	444	494	534	196	254	288
Mittelwert 2016	**2.375**	**3.017**		**895**	**1.337**	
Mittelwert 2017	**2.250**	**2.855**	**3.058**	**906**	**1.247**	**1.436**

* Quelle: [IWU Gradtagszahlen 2018]

** Langjähriges Mittel von 1971 -2017

Der Klimafaktor wird aus dem Verhältnis der Gradtagzahl eines festen Referenzklimas und der des aktuellen Jahres des Messstandorts berechnet und kennzeichnet, wie weit die Außentemperaturen im ausgewählten Jahr am ausgewählten Standort von der mittleren Außentemperatur in Deutschland abweichen. Um den klimabereinigten Heizwärmeverbrauch eines Standortes zu erhalten, ist der Heizwärmeverbrauch mit dem Klimafaktor zu multiplizieren

In Tabelle 10 sind die Basiswerte für die Berechnung der Klimafaktoren dargestellt.

Tabelle 10: Jährliche Gradtagszahlen und Heizgradtage

Standort und Betrachtungsperiode	Gradtagzahl G20/12 [Kd]	Heizgradtage HGT12 [Kd]
Gradtagzahl am Standort Speicherstraße in der Messperiode 2016	2.375	895
Gradtagzahl am Standort Speicherstraße in der Messperiode 2017	2.250	906
Gradtagzahl am Standort Frankfurt für das langjährige Mittel (1971 bis 2017)	3.058	1.436
Gradtagzahl für das Referenzklima Deutschland (Würzburg, EnEV 2009)	3.343	1.631

Das Jahr 2016 war wärmer als das langjährige Mittel am Standort und des Referenzstandorts gemäß der EnEV 2009. Für den Vergleich mit den Bedarfswerten nach EnEV ist daher Heizwärmeverbrauch mit dem Klimafaktor von 1,46 zu multiplizieren.

Klimafaktor 2016

- Klimafaktor bezogen auf den Standort: KF = 3.058 Kd / 2.375 Kd = 1,29
- Klimafaktor bezogen auf deutsches Normklima: KF = 3.343 Kd / 2.375 Kd = 1,41

Für das Jahr 2017 bleibt die Aussage qualitativ gleich. Es war wärmer als das langjährige Mittel am Standort und des Referenzstandorts gemäß der EnEV 2009. Für den Vergleich mit den Bedarfswerten nach EnEV ist hier ein Klimafaktor von 1,54 für die Bereinigung zu verwenden.

Klimafaktor 2017

- Klimafaktor bezogen auf den Standort: KF = 3.058 Kd / 2.250 Kd = 1,36
- Klimafaktor bezogen auf deutsches Normklima: KF = 3.343 Kd / 2.250 Kd = 1,49

6 Messergebnisse

In den folgenden Kapiteln werden die Messergebnisse aus den Monitoringjahren 2016 und 2017 vorgestellt. Zunächst erfolgt eine Analyse der Energieverbräuche im Bereich Wärme und Strom, wobei zuerst die Verbrauchsdaten analysiert und anschließend die Performance der Erzeugungsanlagen bewertet werden. Das Ende des Kapitels bildet die Gesamtbilanz für das Gebäude mit Aussagen zur Einhaltung des EffizienzhausPlus-Standards und zur Energienutzung.

6.1 Wärmeverbrauch

Die Analyse des Wärmverbrauchs im Aktiv-Stadthaus unterteilt sich in die Bereiche Heizwärme und Warmwasser. In dem Gebäude haben diese beiden Verbrauchskategorien einen ähnlich hohen Verbrauchswert. Die Wärmeerzeugung (ab Erzeuger) für Heizwärme beträgt in den beiden Messperioden rund 20 kWh/(m^2_{AN}·a) und die Wärme für Warmwasser beläuft sich auf etwa 18 kWh/(m^2_{AN}·a).

6.1.1 Heizwärme

In dem vorliegenden Abschnitt wird der Heizwärmeverbrauch auf Wohnungsebene analysiert. Die Angaben in den folgenden Tabellen und Abbildungen beinhalten den Heizwärmeverbrauch aller 74 Wohneinheiten, gemessen an den Wohnungsübergabestationen. Insgesamt resultiert in den Jahren 2016 und 2017 ein gleich hoher Heizwärmeverbrauch von 19 kWh/(m^2_{AN}·a) (A_N = Energiebezugsfläche nach EnEV). Dabei wird ersichtlich, dass dieser Verbrauch etwa 15 % über dem berechneten Bedarf (Ref.Standort Würzburg) liegt. Unter Anwendung der Klimafaktoren aus Kapitel 5.3 resultiert ein klimabereinigter Heizwärmeverbrauch von rund 27 kWh/(m^2_{AN}·a), der etwa 65 % höher ist als der berechnete Bedarf nach der DIN V 18599.

Tabelle 11: Jahreswert Heizwärmeverbrauch (Nutzenergie, ohne Badheizkörper)

	Bedarf	2016	2017
	kWh/(m²·a)	kWh/(m²·a)	kWh/(m²·a)
Heizwärme*	16,3	19,0	18,7
klimabereinigt		26,6	27,1

* ab Wohnungsübergabestation (Nutzenergie)

** Standort Würzburg (Bedarf Standort Frankfurt = 14,3 kWh/(m²·a))

In Abbildung 23 und Abbildung 24 ist der signifikante jahreszeitliche Verlauf zu erkennen, der die Heizperiode von Oktober bis Mai beschreibt. Beim Vergleich des monatlichen Heizwärmeverbrauchs der Jahre 2016 und 2017 zeigt vor allem der Januar und März signifikant unterschiedliche Werte, die aber auf die mittleren Außenlufttemperaturen zurückzuführen sind. Alle anderen Monate sind auf einem ähnlich hohen Niveau und zeigen die hauptsächliche Abhängigkeit des Heizwärmeverbrauchs von den Klimarandbedingungen.

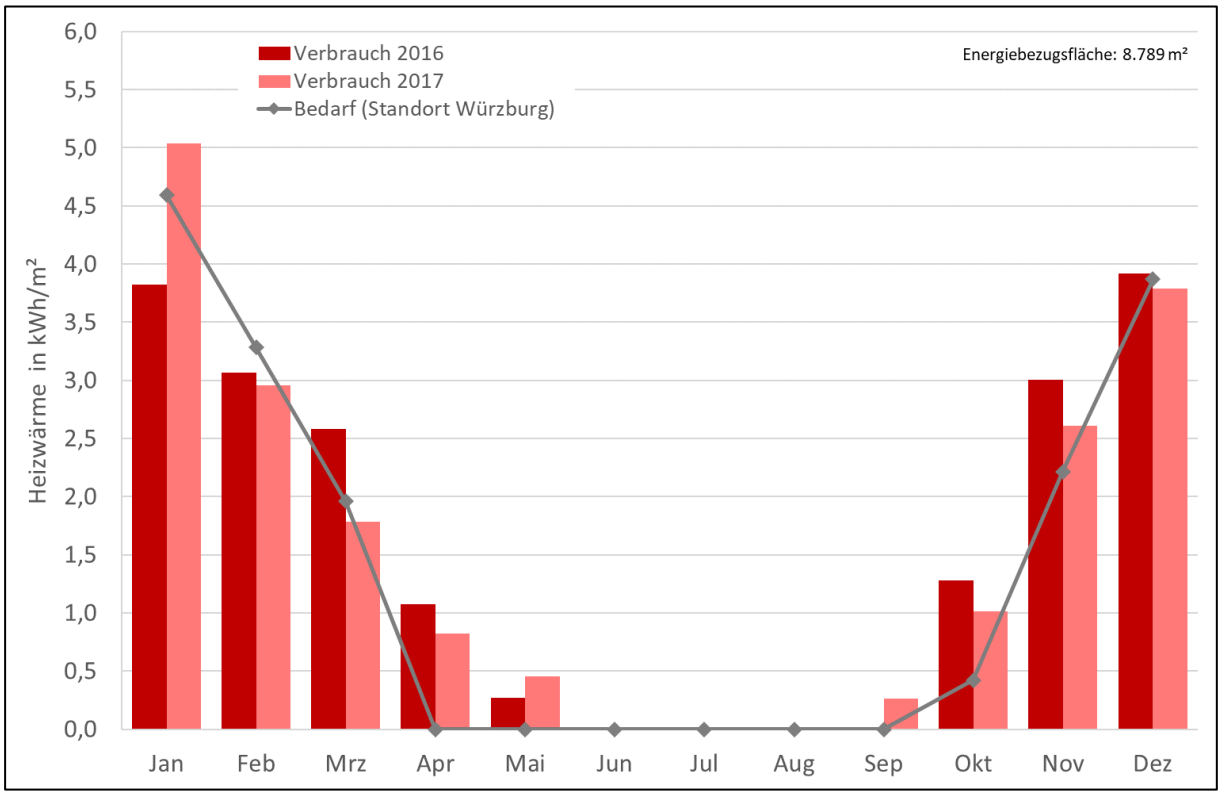


Abbildung 23: Heizwärmeverbrauch auf Wohnungsebene (ohne Badheizkörper)

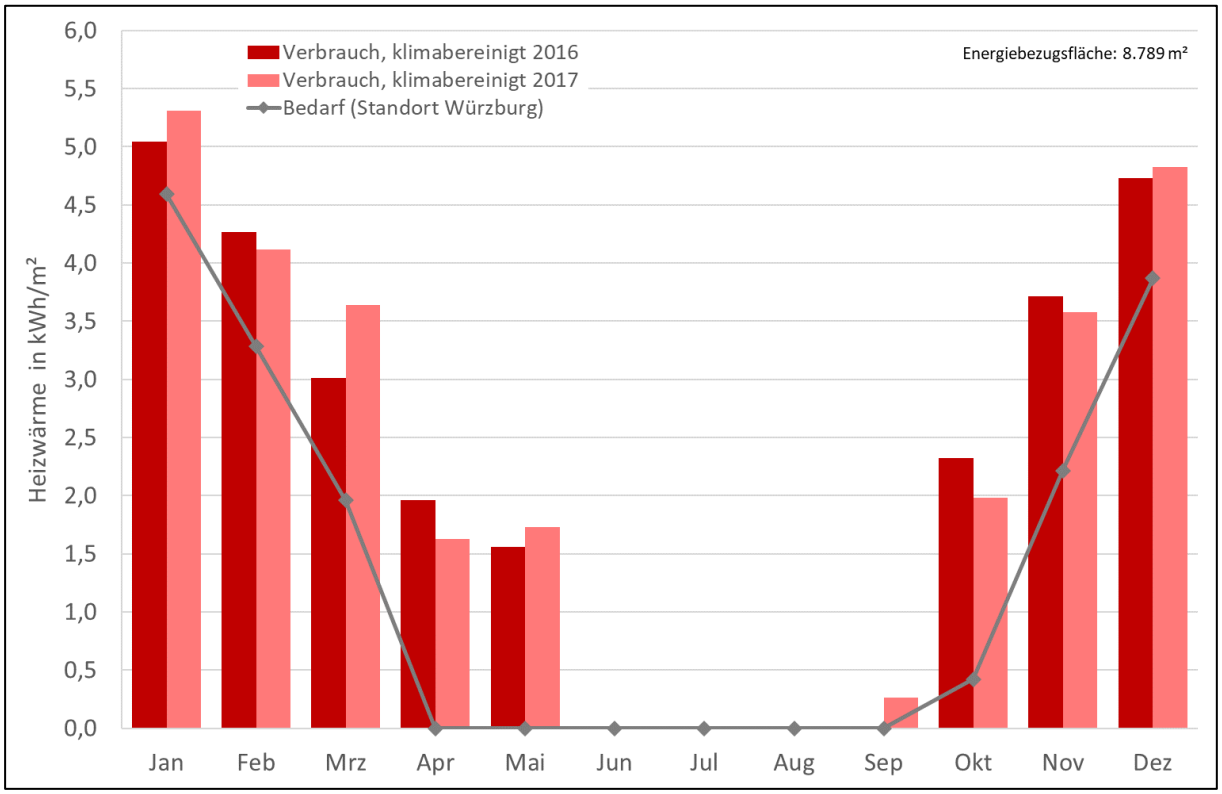


Abbildung 24: Heizwärmeverbrauch auf Wohnungsebene, klimabereinigt (ohne Badheizkörper)

Anmerkung:

Die vorangegangene Analyse des Heizwärmebedarfs beinhaltet alle Wärmemengen, die zur Beheizung über die Fußbodenheizung verwendet werden. Der Wärmebedarf des Badheizkörpers ist darin nicht enthalten. Eine Abschätzung des Badheizkörperanteils erfolgt in Kapitel 6.1.2 und beträgt im Jahr rund 2,5 kWh/(m²$_{AN}$·a).

Die große gemessene Differenz zwischen Bedarfs- und Verbrauchswert war Auslöser für weitere detaillierte Analysen möglicher Ursachen. Im Rahmen einer Bachelorarbeit [1] wurden die möglichen Gründe für die Abweichungen zwischen Heizwärmebedarf und -verbrauch am konkreten Projekt untersucht und zusätzlich die Bewertung der Wärmbedarfsberechnung von Niedrigstenergiegebäuden nach der DIN V 18599 analysiert.

Die Untersuchungen haben aufgezeigt, dass die aufgetretenen Differenzen unter anderem durch folgende Punkte begründet sind:

- Höhere Innenraumtemperaturen in den Räumen gegenüber der Norm-Auslegung
- Niedrigere interne Lasten bei modernen Gebäuden mit hocheffizienten Geräten und Beleuchtung gegenüber dem Norm-Ansatz nach der DIN V 18599.
-

Die Auswirkungen der einzelnen Korrekturmaßnahmen auf den berechneten Heizwärmebedarf sind in der Abbildung 25 visualisiert. Als Referenzwert für den Vergleich dient der Heizwärmeverbrauch aus dem Jahr 2016 (Säule (8)). Ausgehend von den klimabereinigten Bedarfswerten der Säule (2) sind einzelne Anpassungen bei der Bedarfsberechnung vorgenommen worden. Im Folgenden sind die Maßnahmen und deren Auswirkung aufgelistet:

- (3) Anhebung Raumtemperatur von 20 °C auf 20,5 °C → Δ_{HWB} = + 1,5 kWh/(m²$_{AN}$·a)
- (4) Detaillierte Eingabe nach DIN V 18599: Verschattung durch Verschmutzung mit Faktor 0,95 statt 1,0 und die Rahmenanteile detailliert berücksichtigt. → Δ_{HWB} = + 0,3 kWh/(m²$_{AN}$·a)
- (5) Interne Wärmequellen u.a. gemäß Stromverbrauchsdaten. Statt 100 Wh/(m²*d) ergeben sich ca. 52 Wh/(m²*d). → Δ_{HWB} = + 5,4 kWh/(m²$_{AN}$·a)
- (6) Luftwechsel wird außentemperaturbezogen berechnet statt mit Standardwert 0,1 h-1 angesetzt. → Δ_{HWB} = + 0,5 kWh/(m²$_{AN}$·a)
- (7) Kombination der Maßnahmen (3) bis (6) → Δ_{HWB} = + 8,5 kWh/(m²$_{AN}$·a)

Die Kombination der Korrekturmaßnahmen (Säule (7)) in Abbildung 25 liegt nur noch 6 % unter dem gemessenen Verbrauch. Diese geringe Differenz zwischen Bedarf und Verbrauch liegt absolut im Toleranzbereich der zu erwarten ist. Einzelne Einflussfaktoren wie Nutzerverhalten oder z.B. die Anlagenbetriebsweise, die sich zwischen Norm-Berechnung und Realität unterscheiden, können der Grund für diese Abweichungen sein.

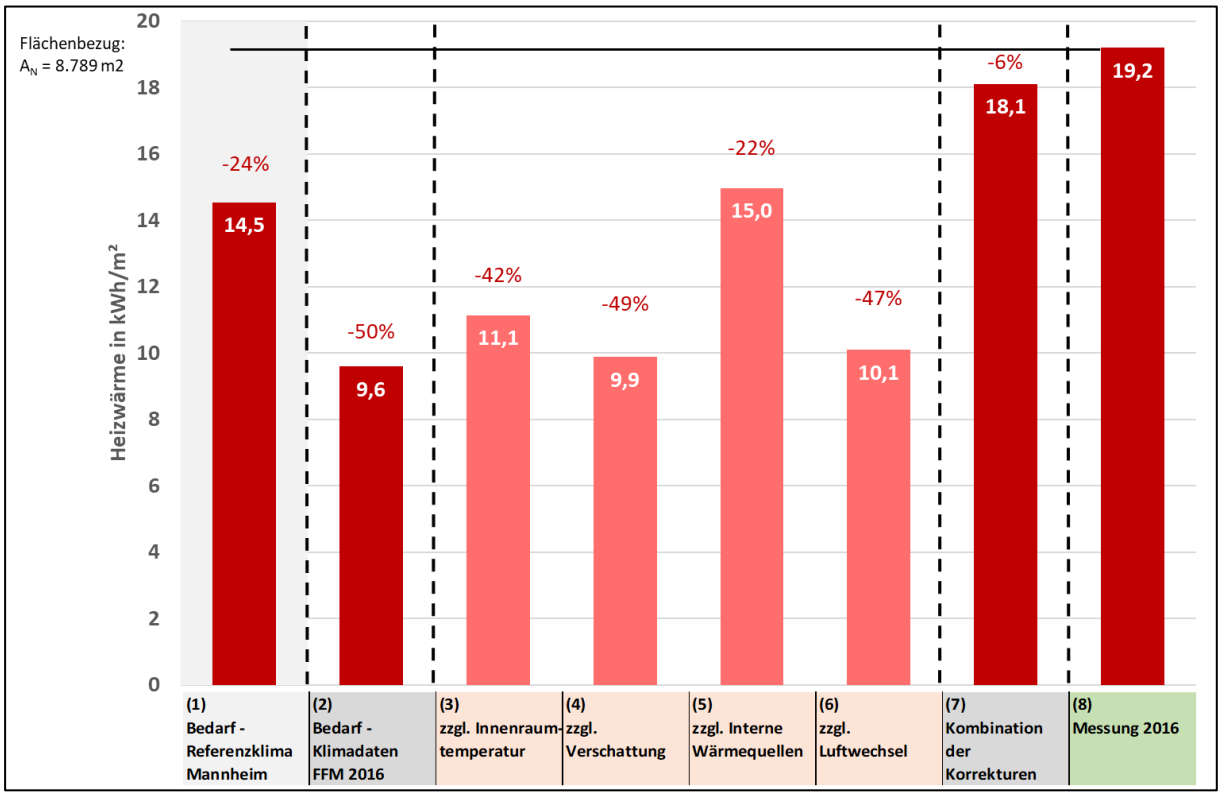


Abbildung 25: Bedarfs- und Verbrauchsabgleich bei Variation der Berechnungsparameter [1]

Hinweis Heizwärmebedarf-Berechnung

Für die praxisnahe Ermittlung des Heizwärmebedarfs von Gebäude im EffizienzhausPlus-Standard mit hocheffizienter Geräteausstattung empfiehlt es sich, die Norm-Berechnung ergänzend mit niedrigeren internen Lasten durchzuführen. Diese zusätzliche Berechnung hat zwar aktuell keinen Einfluss auf das gesetzlich vorgeschriebene Nachweisverfahren nach EnEV, liefert aber dem Bauherrn eine belastbarere Aussage bezüglich des zu erwartenden Wärmebedarfs. Ebenso kann eine Variation der Innentemperaturen aufzeigen, mit welchem Mehr-/Minderbedarf bei geänderten Raumkonditionen für das Gebäude zu rechnen ist.

6.1.2 Warmwasser

Die Analyse des Wärmeverbrauchs für die Warmwasserbereitung beinhaltet den an den Wohnungsübergabestationen gemessenen Wärmeverbrauch der 74 Wohneinheiten. Die Wärmemenge für die Warmwasserbereitung setzt sich projektbedingt aus dem Anteil für die Warmwasserbereitung und einem Anteil für die Versorgung der Badheizkörper zusammen. Die Warmwassererzeugung erfolgt im Aktiv-Stadthaus im Durchlaufprinzip in den Wohnungsübergabestationen.

Die gemessenen Jahresverbrauchsmengen in Tabelle 12 liegen mit etwa 10 kWh/(m^2_{AN}·a) rund 10 % unter dem Bedarfswert.

Tabelle 12: Jahreswert Wärme für Warmwasser (Nutzenergie)

	Bedarf	2016	2017
	kWh/(m²·a)	kWh/(m²·a)	kWh/(m²·a)
Warmwasser *	11,6	9,8	9,9
ohne Badheizkörper		7,2	6,6

* ab Wohnungsübergabestation (Nutzenergie)
inkl. Badheizkörper

Die Analyse der monatlichen Verteilung hat einen stark saisonal geprägten Verlauf der bedingt durch die Mit-Messung des Badheizkörpers in den Wohnungen resultiert. Die Charakteristik des zusätzlichen Verbrauchs des Badheizkörpers entspricht im Wesentlichen dem Profil des Heizwärmeverbrauchs (siehe Abbildung 23). Abbildung 26 zeigt den monatlichen Verlauf im Vergleich zu der Bedarfsberechnung, die einen relativ konstanten Wärmebedarf über das Jahr besitzt.

Unter der Annahme, dass der in den Sommermonaten Juni bis August auftretende Warmwasserverbrauch in gleicher Form auch in der Heizperiode vorliegt, resultiert ein korrigierter Wärmebedarf für die Warmwasserbereitung (ohne Einfluss des Badheizkörpers) in Höhe von rund 7 kWh/(m^2_{AN}·a). Bedingt durch diese Annahme resultiert ein relativ konstanter Warmwasserbedarf, wie in Abbildung 27 dargestellt. Der Wärmebedarf für den Betrieb des Badheizkörpers beträgt somit rund 2,5 kWh/(m^2_{AN}·a).

Der korrigierte Messwert für die Warmwasserbereitung liegt rund 40 % unter dem berechneten Bedarfswert.

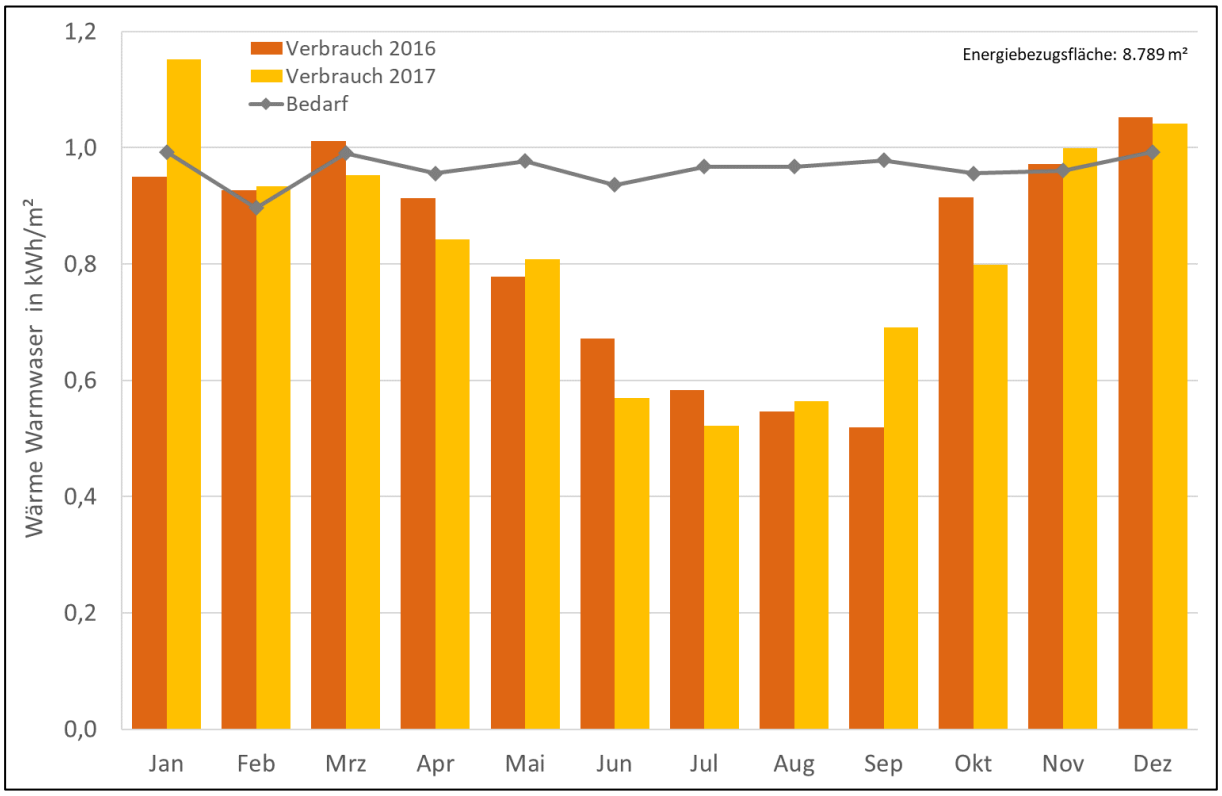


Abbildung 26: Wärmeverbrauch für Warmwasser auf Wohnungsebene

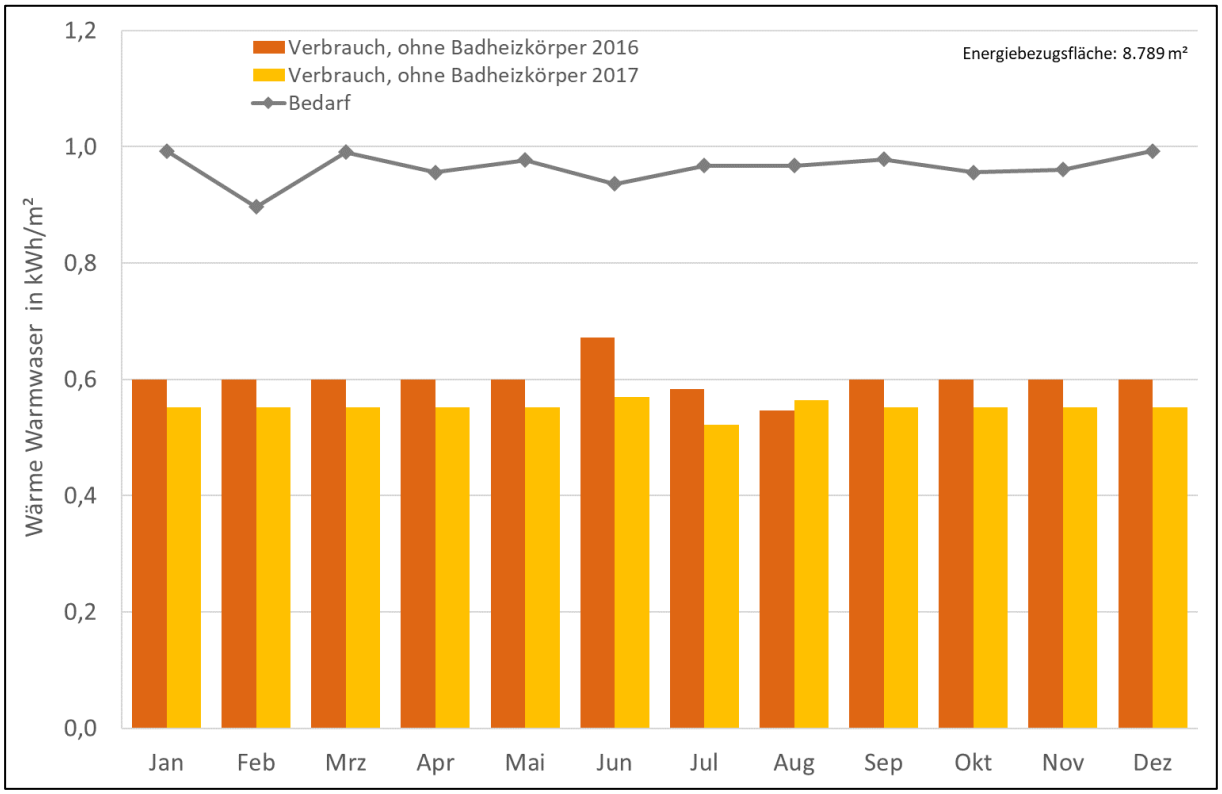


Abbildung 27: Wärmeverbrauch für Warmwasser auf Wohnungsebene, ohne Badheizkörper

6.1.3 Wärmeverteilverluste

Die Wärmeverteilverluste beschreiben die Wärmeverluste im Gebäude die zwischen dem Wärmespeicher und den Wohnungsübergabestationen auftreten Im Aktiv-Stadthaus kommt ein Vier-Leiter-Netz zum Einsatz, bei dem die Verteilleitungen zu den Wohnungen für Heizwärme und Warmwasser getrennt sind (siehe Abbildung 28).

Im Heizwärmenetz betragen die Wärmeverteilverluste rund 2 kWh/(m^2_{AN}·a). Bezogen auf die gesamte Wärmemenge aus dem Speicher entsprechen die Verluste im Jahr 2016 einem Anteil von 10 %. Das Wärmeverteilnetz für die Warmwasserbereitung wird ganzjährig genutzt und hat im Vergleich zum Heizwärmenetz (bis zu 35°C) deutlich höhere Vorlauftemperaturen von bis zu 55 °C. Die Verteilverluste im Warmwassernetz belaufen sich im Jahr 2016 auf 8 kWh/(m^2_{AN}·a). Dies entspricht einem Anteil von 44 % bezogen auf die Wärmeentnahme aus dem Speicher.

Die Wärmeverluste der drei Pufferspeicher betragen rund 1,7 %

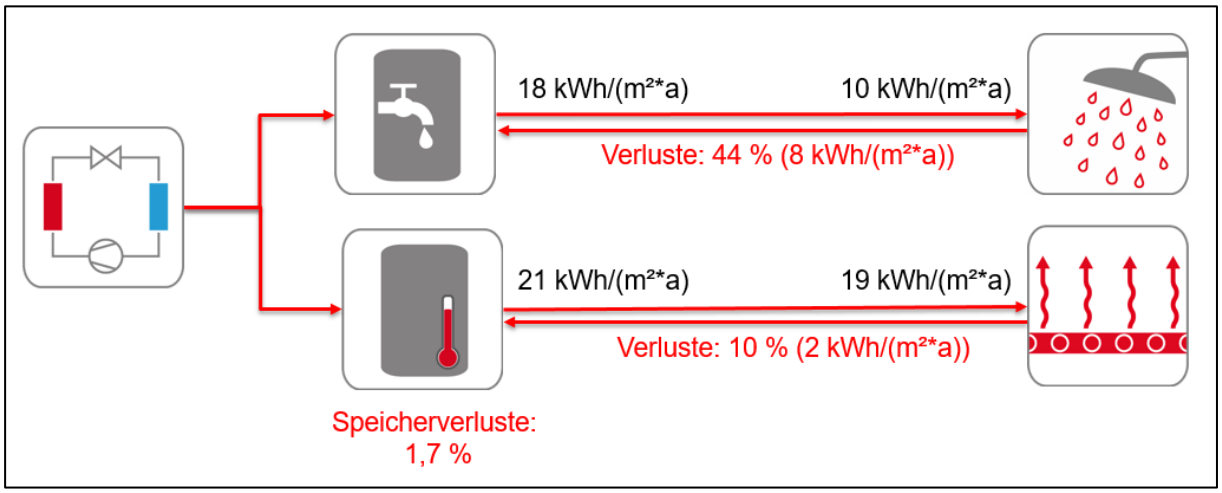


Abbildung 28: Wärmeverteilverluste 2016

6.1.4 Wärmeverbrauch gesamt

Die gesamten Energiekennwerte des Wärmeverbrauchs sind in Tabelle 13 zusammengefasst. Neben den absoluten Verbrauchszahlen beinhaltet die Tabelle die flächenbezogenen Kennwerte. Mit dieser Übersicht wird verdeutlicht, dass die Angabe Flächenbezuges stets erforderlich ist, da die Kennwerte zum Teil um 80 % unterscheiden können. Die in der Tabelle verwendeten Flächenwerte sind:

- Wohnfläche 6.644 m²
- Energiebezugsfläche A_N 8.789 m²
- Netto-Grundfläche (NGF) 9.828 m²
- Brutto-Grundfläche (BGF) 11.688 m²

Tabelle 13: Übersicht Wärmeverbrauchskennwerte

Wärmeverbrauchskennwerte					
2016	absolut	bezogen auf A_{WFL}	bezogen auf A_N	bezogen auf A_{NGF}	bezogen auf A_{BGF}
	[kWh/a]	[kWh/(m²·a)]	[kWh/(m²·a)]	[kWh/(m²·a)]	[kWh/(m²·a)]
Verbräuche					
Heizwärmeverbrauch	167.311	25,2	19,0	17,0	14,3
Wärme Warmwasserbereitung	86.472	13,0	9,8	8,8	7,4
Verluste					
Verluste Heizwärmeverteilung	17.735	2,7	2,0	1,8	1,5
Verluste Warmwasserverteilung	68.689	10,3	7,8	7,0	5,9
Speicherverluste	5.946	0,9	0,7	0,6	0,5
Erzeugernutzwärmeabgabe	**346.153**	**52,1**	**39,4**	**35,2**	**29,6**
2017	absolut	bezogen auf A_{WFL}	bezogen auf A_N	bezogen auf A_{NGF}	bezogen auf A_{BGF}
	[kWh/a]	[kWh/(m²·a)]	[kWh/(m²·a)]	[kWh/(m²·a)]	[kWh/(m²·a)]
Verbräuche					
Heizwärmeverbrauch	164.560	24,8	18,7	16,7	14,1
Wärme Warmwasserbereitung	86.789	13,1	9,9	8,8	7,4
Verluste					
Verluste Heizwärmeverteilung	8.829	1,3	1,0	0,9	0,8
Verluste Warmwasservereitung	77.331	11,6	8,8	7,9	6,6
Speicherverluste	8.936	1,3	1,0	0,9	0,8
Erzeugernutzwärmeabgabe	**346.445**	**52,1**	**39,4**	**35,3**	**29,6**

6.2 Wärmeerzeugung

Die Wärmeerzeugung erfolgt im Aktiv-Stadthaus über eine elektrische Wärmepumpe mit einer thermischen Leistung von 120 kW. Als Wärmequelle dient die Abwärme des Abwassers aus einem Kanal in der Gutleutstraße.

Die energetische Effizienz der Wärmepumpe wird mit der Jahresarbeitszahl (JAZ) bewertet. Sie entspricht der Verhältniszahl aus „Erzeugter Wärme“ zu „Stromeinsatz“. Die Definition der Bilanzgrenze orientiert sich an dem Schema in Abbildung 29 und beinhaltet auf der Stromseite sowohl den Verdichterstrom der Wärmepumpe als auch den Strom für die primärseitigen Solepumpen zur Nutzung der Abwasserwärme (Bilanzgrenze AZ 1).

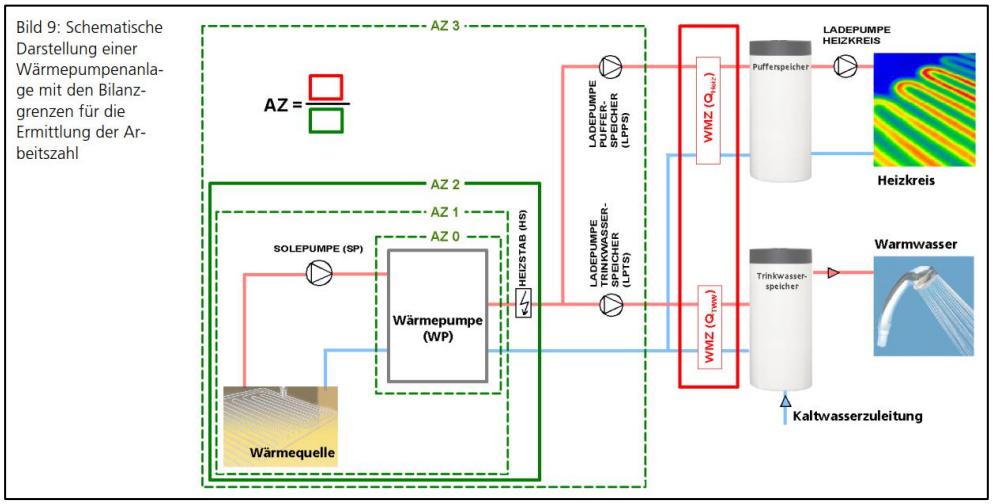


Abbildung 29: Bilanzgrenzen für die Ermittlung der Jahresarbeitszahl [2]

Hinweis Jahresarbeitszahl:

Die Höhe der Jahresarbeitszahl einer elektrischen Wärmepumpe wird wesentlich durch die Temperaturen der Primär- und Sekundärseite beeinflusst. Je höher die Temperaturen der Wärmequelle sind (Primärseite), desto höher ist grundsätzlich die Jahresarbeitszahl. Für die Sekundärseite gilt umgekehrt, dass möglichst niedrige Vorlauftemperaturen für Heizwärme und Warmwasser zur Effizienzsteigerung beim Wärmepumpenbetrieb beitragen.

Im Monitoringzeitraum 2016/ 2017 liegt die Jahresarbeitszahl bei einem Wert von etwa 4,3 und damit deutlich über den Ansätzen aus der Bedarfsberechnung nach der DIN V 18599. Die jeweiligen Jahreswerte sind in Tabelle 14 und der monatliche Verlauf in Abbildung 30 dargestellt.

Tabelle 14: Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe, jährlich

	2016	2017
	-	-
JAZ-Ist	4,28	4,33
JAZ-Soll	3,32	3,32

Der Jahresverlauf in Abbildung 30 weist in den Sommermonaten eine reduzierte Arbeitszahl in Höhe von 3,5 auf. Bedingt durch die ausschließliche Warmwasserbereitung bei relativ hohen Vorlauftemperaturen (gegenüber der Heizwärme) sinkt in dieser Zeit die Arbeitszahl. In der Heizperiode steigt die Arbeitszahl auf einen Wert von bis zu 4,5 an. Grund hierfür ist der erhöhte Anteil der Heizwärme an der gesamten Wärmebereitstellung.

Grundsätzlich gilt, dass der Betrieb der Wärmepumpe in der bisherigen Monitoringphase sehr effizient erfolgt. Die erreichten Jahresarbeitszahlen liegen im Durchschnitt bei etwa 4,3 und sind damit deutlich über den durchschnittlichen Vergleichswerten von

- Erdreichwärmepumpen mit 3,9 oder
- Außenluft-Wärmepumpen mit 2,9

aus der Studie zur Effizienz von Wärmepumpen im realen Betrieb [2].

Die gute Effizienz der Wärmepumpe ist auf der einen Seite auf die relativ niedrigen Vorlauftemperaturen zurückzuführen, die durch die getrennte Wärmeverteilung von Warmwasser und Heizwärme sowie durch den Einsatz der Wohnungsübergabestationen erst ermöglicht werden. Auf der anderen Seite sind die Abwassertemperaturen auf der Primärseite der Wärmequelle relativ hoch. In Abbildung 31 sind die primärseitigen Abwassertemperaturen aufgezeigt. In den Wintermonaten betragen diese rund 16 °C und steigen in den Sommermonaten auf 20 – 22 °C an. Damit liegen optimale Voraussetzungen für den effizienten Wärmepumpenbetrieb vor.

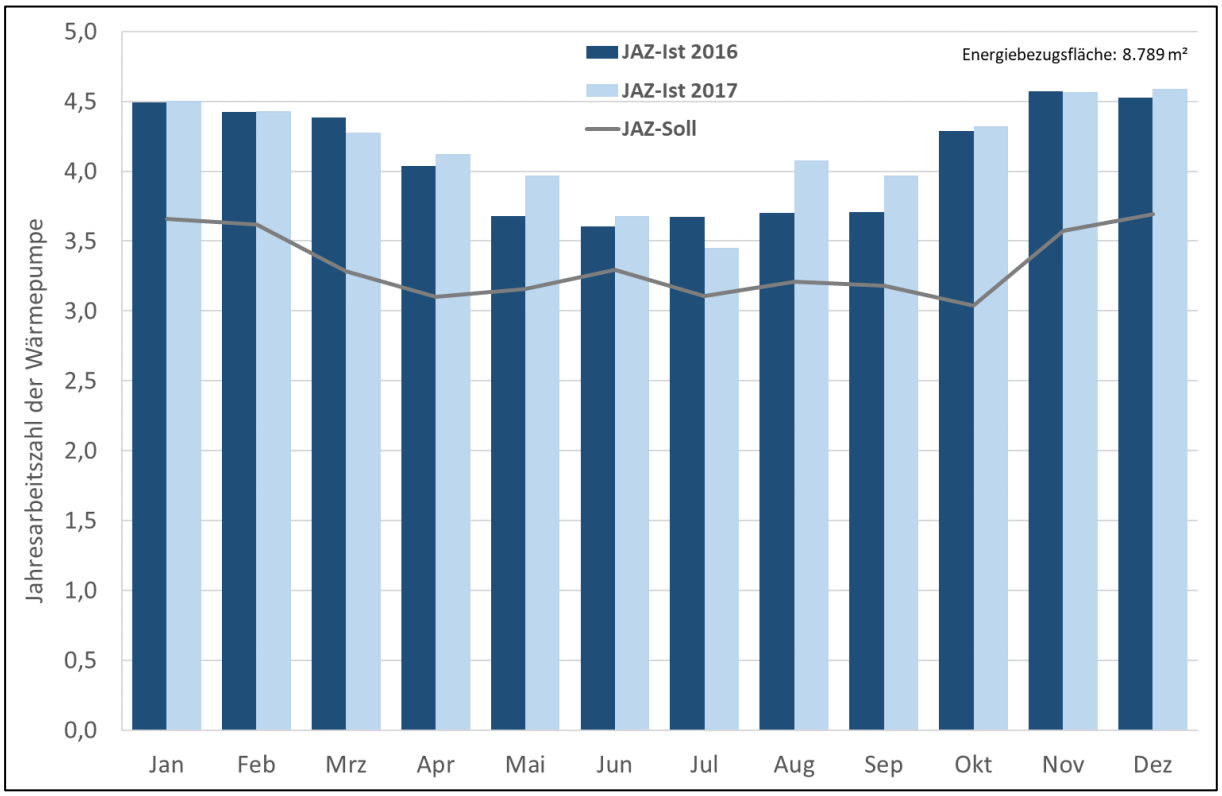


Abbildung 30: Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe, monatlich

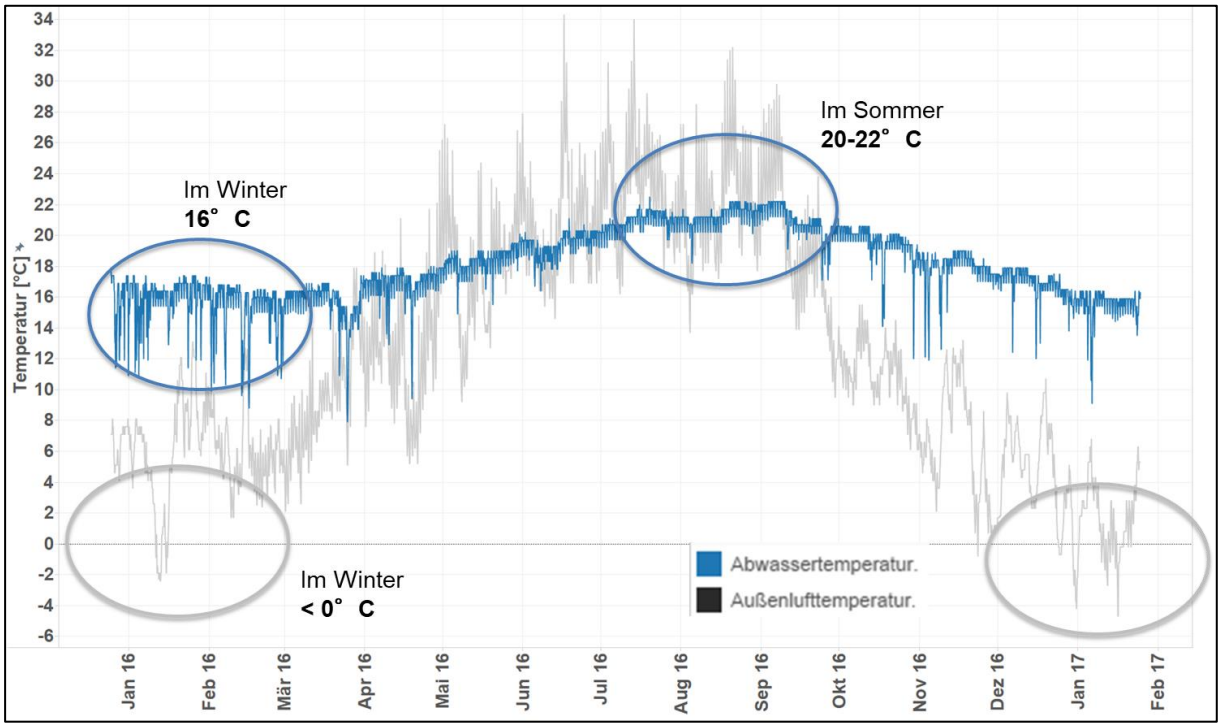


Abbildung 31: Auswertung der Abwassertemperaturen

Anteil Gaskessel

Zur Sicherung der Versorgungssicherheit kommt in dem Mehrfamilienhaus ein Gaskessel zum Einsatz. Zwar ist der Anlagenbetrieb auf einen monovalenten Betrieb ausgelegt, jedoch muss die Versorgung des Mehrfamilienhauses auch in Zeiten von möglichen Wartungsarbeiten im Abwasserkanal als auch in Zeiten in denen die Abwassertemperaturen über einen längeren Zeitraum deutlich unter 10 °C liegen.

In den beiden Monitoringjahren liegt der Anteil des Gaskessels an der gesamten Wärmeerzeugung bei unter 2 % (siehe Tabelle 15). Zu Beginn des Jahres 2016 waren die Gründe hierfür Störungen, die aus dem Einsatz der Prognoseregelung entstanden sind. Nach Identifikation und Behebung dieses Problems ist der Gaskessel lediglich punktuell durch manuelle Aktivierung in Betrieb gegangen. Im Rahmen von Wartungsarbeiten wurde der Gaskesselbetrieb vom ausführenden Personal nicht wieder deaktiviert und bis zur Detektion im Rahmen des Monitorings blieb dieser in Betrieb. Für die Vermeidung des ungeplanten Gaskesselbetriebes über einen längeren Zeitraum wird seitdem automatisiert eine Warnmeldung an den Analgenbetreiber verschickt.

Tabelle 15: Anteil Gaskessel an Wärmeerzeugung

		2016	2017
Anteil Gas*	%	1,9%	1,7%
Gas (H_i)	kWh/(m²·a)	0,7	0,6

Flächenbezug: A_N

* Bezogen auf gesamte Wärmeerzeugung

6.3 Stromverbrauch

Der Stromverbrauch im Aktiv-Stadthaus kann unterteilt werden in zentrale Bereiche, wie z.B. der Wärmepumpen- und Allgemeinstrom, die dem Betrieb des Gebäudes dienen, sowie der dezentrale Stromverbrauch in den einzelnen Wohneinheiten durch die Mieter. In den folgenden Abschnitten sind die jeweiligen Stromverbrauchsanalysen aufgeführt und in einem abschließenden Kapitel um eine Übersicht über den Gesamtstromverbrauch im Gebäude ergänzt.

6.3.1 Stromverbrauch für den Gebäudebetrieb

Der Stromverbrauch für den Gebäudebetrieb beinhaltet sowohl den Strombedarf für die Wärmeerzeugung der elektrischen Wärmepumpe (inkl. der primärseitigen Solepumpen) als auch den Allgemeinstrom. Der Allgemeinstrom setzt sich unter anderem aus dem Strom für die Beleuchtung der Treppenhäuser und Kellerräume, dem Aufzugsstrom, dem Strombedarf für die MSR-Technik (z.B. M-Bus-Datenerfassung) und Hilfsaggregaten für die Aufrechterhaltung des Anlagenbetriebs (z.B. Rohrbegleitheizung). Die Jahreswerte sind in Tabelle 16 aufgeführt.

Tabelle 16: Jahreswert Stromverbrauch Gebäudebetrieb

	Bedarf	2016	2017
	kWh/(m²·a)	kWh/(m²·a)	kWh/(m²·a)
WP-Strom *	9,6	9,1	9,1
Allgemeinstrom **	1,5	4,4	4,2
M-Bus		0,3	0,3
Rohrbegleitheizung		0,1	0,1
Aufzug		0,6	0,6
Beleuchtung		1,7	1,6

* Inkl. Primärseitige Umwälzpumpe

** Treppenhausbeleuchtung, Aufzüge, MSR, Verteilpumpen, …

Der **Wärmepumpenstrom** in Abbildung 32 weist einen deutlichen saisonalen Charakter auf und ist bedingt durch die deutlich erhöhten Wärmeerzeugungsmengen im Winter für die Bereitstellung von Heizwärme. Das Profil des Wärmepumpen-Strombedarfs korreliert dabei mit den Wärmeverbrauchen aus Abbildung 24 und Abbildung 26. Die gemessenen Verbrauchswerte liegen rund 5 % unter dem berechneten Bedarfswert aus der EnEV-Berechnung.

Die Darstellung des **Allgemeinstroms** in Abbildung 33 enthält erkennbar höhere Verbrauchswerte im Winter. Diese sind u.a. auf einen erhöhten Beleuchtungsbedarf, die Rohrbegleitheizung und den Pumpenstrom zurückzuführen. Die deutliche Differenz zwischen Bedarf und Verbrauch ist u.a. auf eine Unterschätzung des Strombedarfs für die zahlreichen M-Bus-Zähler zurückzuführen, die allein einen Verbrauch von 1,7 kWh/(m²·a) besitzen.

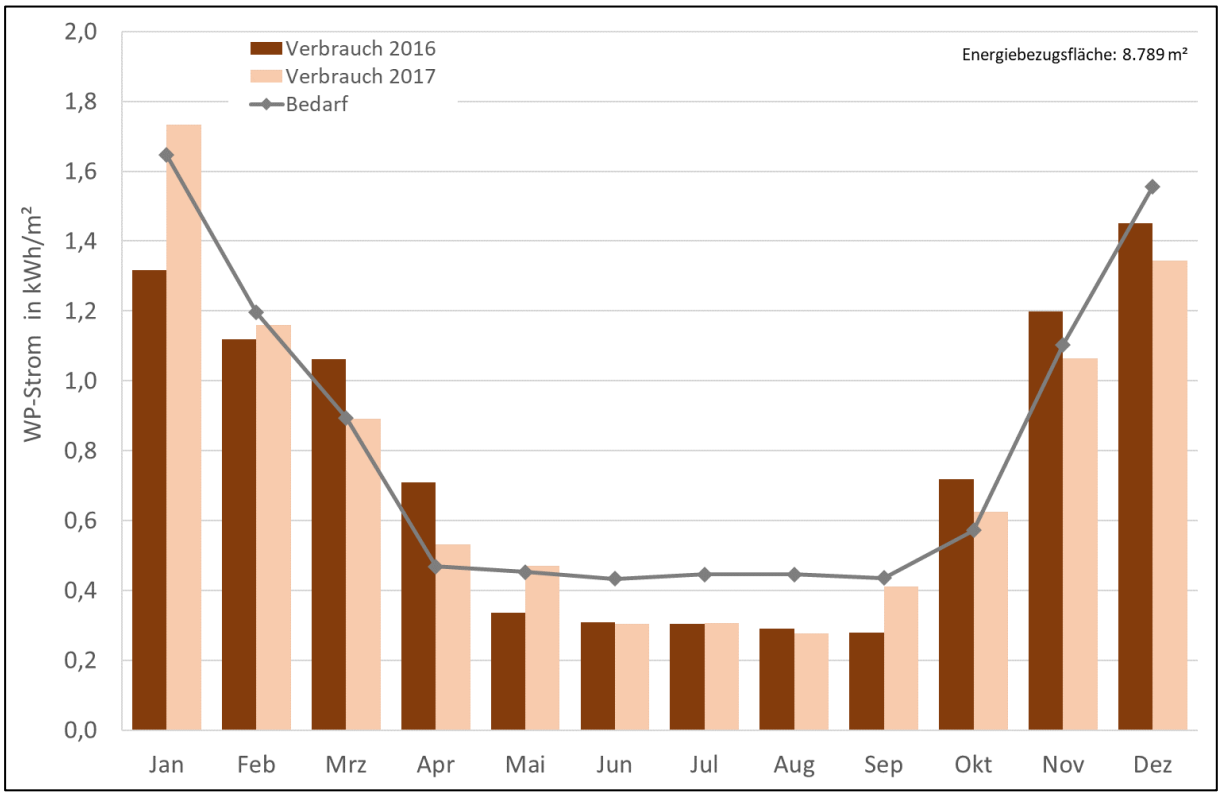


Abbildung 32: Stromverbrauch Wärmepumpe, monatlich

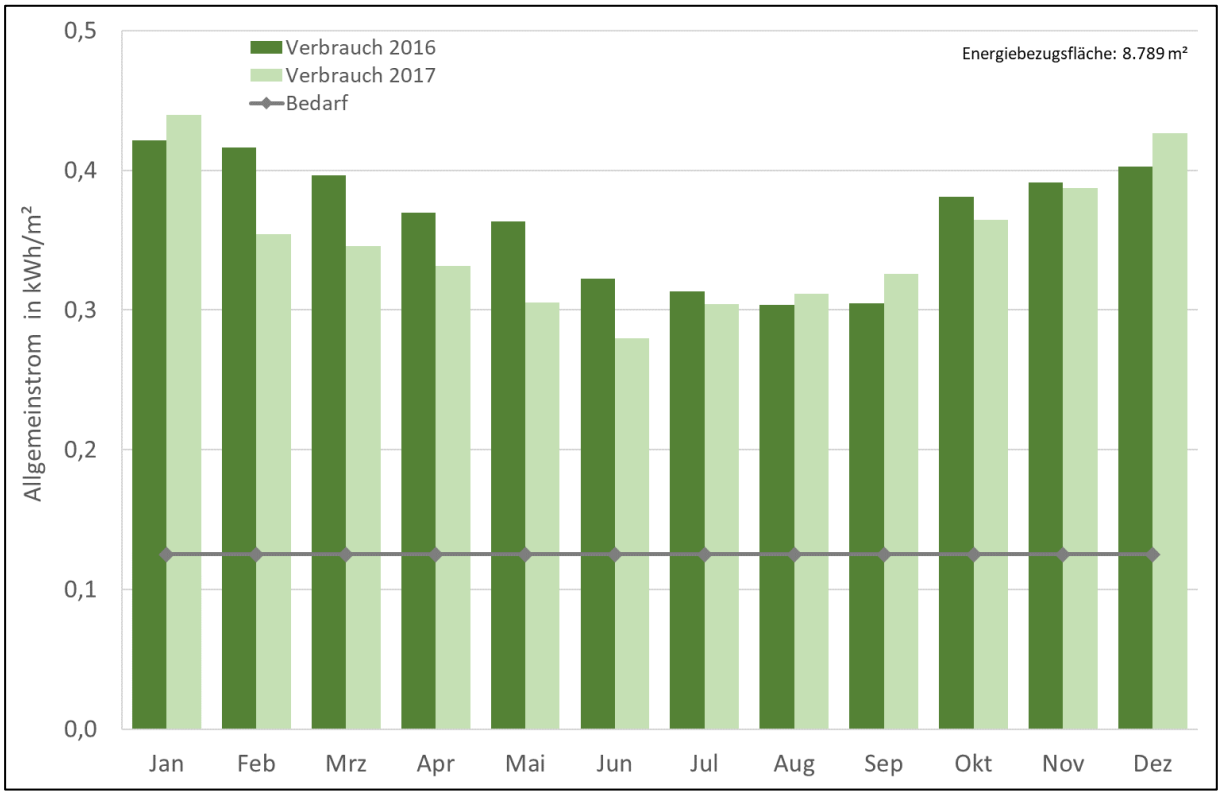


Abbildung 33: Stromverbrauch Allgemeinstrom, monatlich

6.3.2 Stromverbrauch in den Haushalten (Nutzerstrom)

Der Stromverbrauch in den Wohnungen beinhaltet den gesamten Strombedarf in den Wohnungen für den Betrieb der Haushaltsgeräte, der Beleuchtung und der Lüftungsanlagen. Die Auswertung der Verbrauchsmessung in Tabelle 17 verdeutlicht, dass die gemessenen Werte im Jahr 2016 um 26 % und 2017 um 19 % unterschritten werden.

Tabelle 17: Jahreswert Nutzerstrom

	Bedarf	2016	2017
	kWh/(m²·a)	kWh/(m²·a)	kWh/(m²·a)
Nutzerstrom *	17,8	13,5	14,4

* Inkl. Lüftungsstrom

Der Bedarf entspricht dem Ansatz des EffizienzhausPlus-Standards, bei dem mit einem Wert von 20 kWh/($m^2_{Wfl.}$·a) gerechnet wird. Die Unterschreitung dieses bereits ambitionierten Wertes wird im Aktiv-Stadthaus, unter anderem durch die konsequente Ausstattung der Haushaltsgeräte mit der höchsten Effizienzklasse A++ oder besser, erreicht. Das Wohnungsbauunternehmen ABG FRANKFURT HOLDING zeigt hier einen zukunftsweisenden Weg auf, wie eine energieeffiziente Grundausstattung dabei helfen kann, einen niedrigen Strombedarf im Betrieb zu erreichen. Die Basismiete beinhaltet dabei je Wohneinheit eine Vollausstattung mit:

- Spülmaschine,
- Kühlschrank,
- Waschmaschine und
- Trockner.

Neben der effizienten Geräteausstattung ist auch sicherlich die Sensibilisierung der Mieter für ihr eigenes Verbrauchsverhalten über das Nutzerinterface (NIF) ein Grund für den niedrigen Haushaltsstromverbrauch. Auswertungen zeigen, dass die eigenen Verbrauchsinformationen auf dem NIF im Alltag von Interesse sind und den Mietern einen bewussten Umgang mit dem Thema Energie ermöglichen.

Abbildung 34 verdeutlicht, dass der Nutzerstrom in dem Mehrfamilienhaus über das Jahr einen relativ gleichmäßigen Verlauf hat. Lediglich in den Wintermonaten steigt der Bedarf geringfügig an, bedingt durch längere Nutzungszeiten der Beleuchtung und möglicherweise durch längere Aufenthaltszeiten innerhalb der Wohnung. Der Bedarfskurve liegt das dynamisierte Standardlastprofil H0 zugrunde, das auf den Bedarfswert von 17,8 kWh/(m^2_{AN}·a) hochskaliert wurde. Dieses weist einen deutlichen saisonal geprägten Charakter auf und ist für die Abbildung eines Lastprofils für den Nutzerstrom in einem Mehrfamilienhaus nur bedingt geeignet.

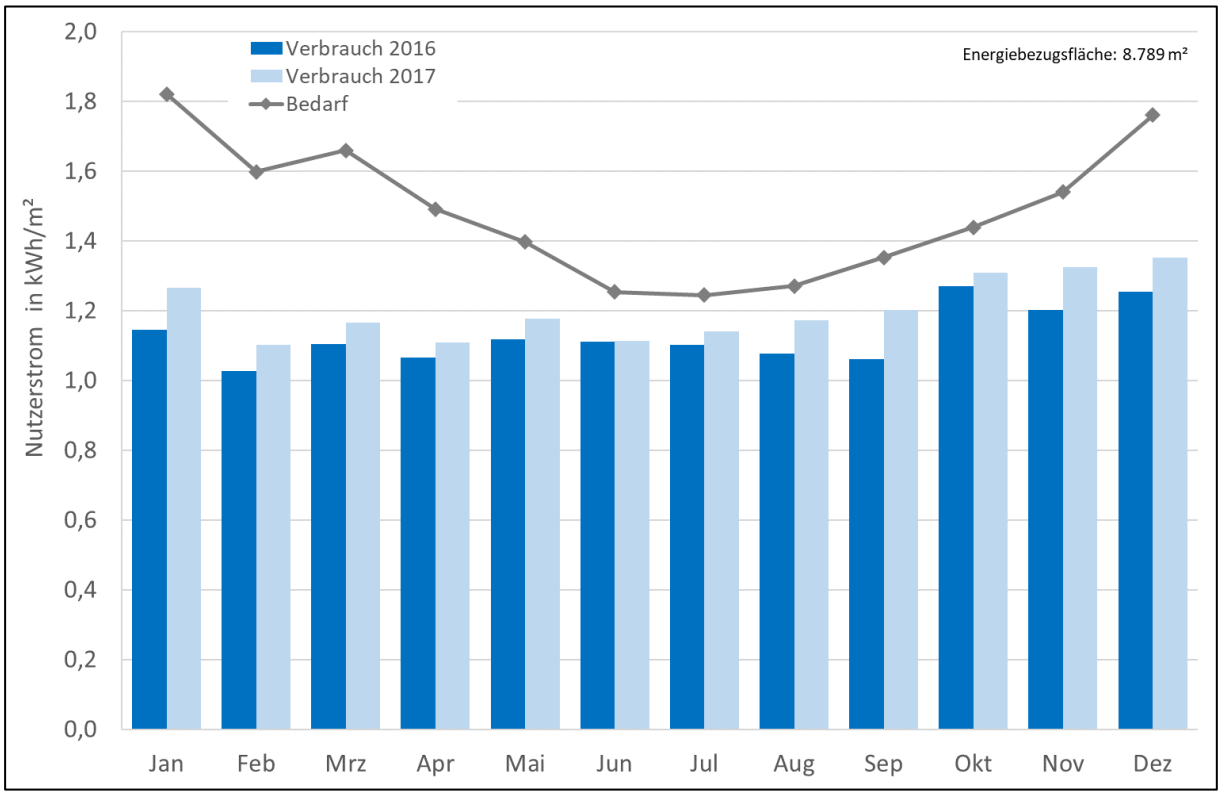


Abbildung 34: Nutzerstrom in den Wohneinheiten, inklusive Lüftungsstrom

In Abbildung 35 sind zwei unterschiedliche Ansätze für die Ermittlung des Nutzerstrombedarfes gegenübergestellt und mit den gemessenen Verbrauchsdaten verglichen. Die beiden Berechnungsansätze sind wie folgt definiert:

- **EffizienzhausPlus**: Nutzerstrombedarf = 20 kWh/(m²·a) mit einer Begrenzung auf 2.500 kWh/a je Wohneinheit
- **aktivplus e.V.**: Nutzerstrombedarf = $500 \cdot (1{,}4 + A_N/50/n_{WE})$ kWh/a je Wohneinheit mit A_N = Energiebezugsfläche des Gebäudes und n_{WE} = Anzahl der Wohneinheiten (Alternativ: Mittlere Personenzahl je WE anstelle des Terms „$A_N/50/n_{WE}$“)

Der Vergleich zeigt zunächst auf, dass der Ansatz nach aktivplus e.V. bei kleinen Wohnflächen bereits einen Basissockel enthält, der in der Realität tatsächlich auch so vorliegt. Denn einzelne Geräte wie z.B. Kühlschränke haben einen Grundbedarf der unabhängig von der Wohnungsgröße ist. Bis zu einer Wohnungsgröße von 75 m² ist der Ansatz nach aktivplus höher und bis zu einer Wohnungsgröße von 175 m² bleibt der aktivplus-Ansatz geringer als der gemäß EffizienzhausPlus.

Der Vergleich mit dem gemessenen Verbrauch verdeutlicht, dass die einzelnen Wohnungen sehr unterschiedlich hohe Nutzerstromverbräuche haben und keine grundlegende Tendenz abzulesen ist. Ein Blick auf die aus den Messwerten gebildeten Trendlinien zeigt, dass diese grundsätzlich unter dem Ansatz gemäß EffizienzhausPlus liegen. Bemerkenswert ist dabei die Tatsache, dass beide Berechnungsansätze den Lüftungsstrom nicht beinhalten, die Messwerte aber inklusive dem Lüftungsstrom sind. Dies lässt den Schluss zu, dass der

gewählte Ansatz gemäß EffizienzhausPlus, den Nutzerstrombedarf zu hoch einstuft. Der Ansatz nach aktivplus wäre nach Bereinigung der Verbrauchswerte (Lüftungsstrom beträgt etwa 250 – 400 kWh/a) auch noch zu hoch, bildet jedoch hinsichtlich der absoluten Höhe und der Steigung der Trendlinie das reale Verbrauchsmuster besser ab.

Hinweis für die Ermittlung des Nutzerstrombedarfs

Für die Berechnung des Nutzerstrombedarfs in EffizienzhausPlus-Mehrfamilienhäusern liefert der Berechnungsansatz nach aktivplus e.V. bessere Ergebnisse, die näher an den zu erwartenden realen Verbrauchsdaten liegen als der Ansatz nach EffizienzhausPlus. Ergänzend zur Verwendung des Ansatzes nach EffizienzhausPlus für den Nachweis des Standards empfiehlt es sich, den Nutzerstrom nach dem Ansatz von aktivplus e.V. für eine belastbare Bedarfsabschätzung zu berechnen.

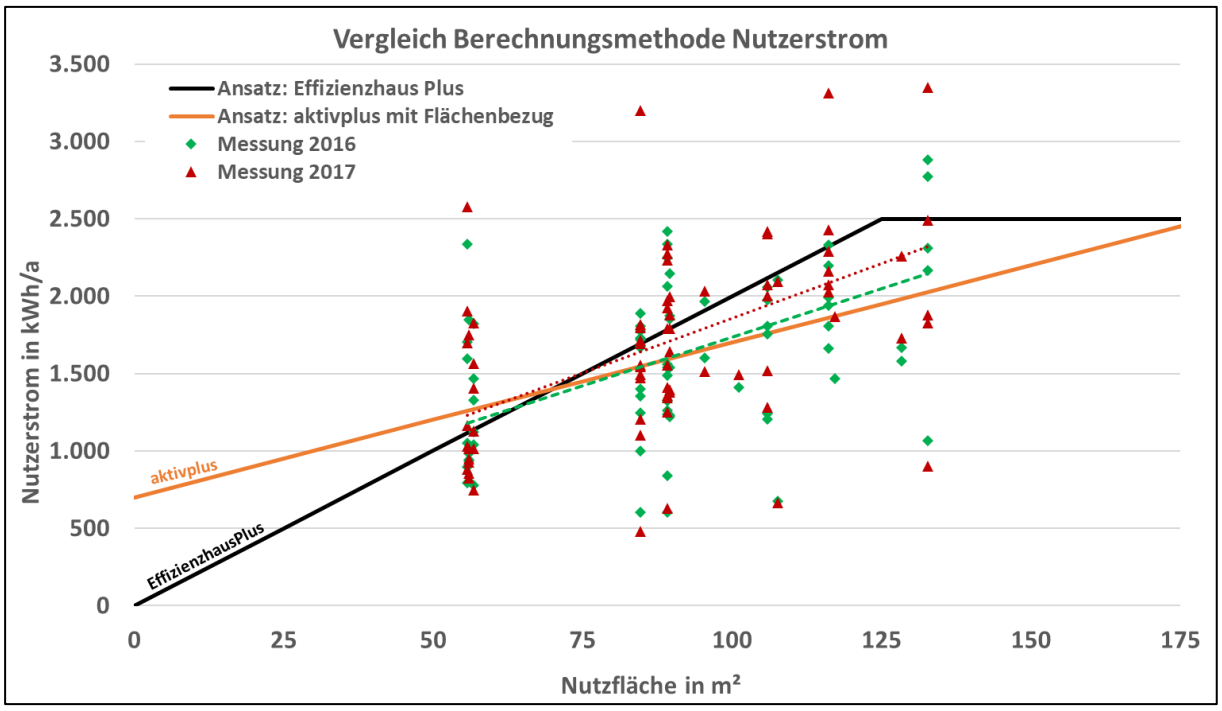


Abbildung 35: Vergleich Berechnungsmethode Nutzerstrom

6.3.3 Stromverbrauch für Elektromobilität

Im Erdgeschoss des Aktiv-Stadthauses bietet der Car-Sharing-Anbieter „book'n'drive" zwei Elektromobile zur Nutzung an. Die Fahrzeuge können sowohl von den Bewohnern als auch der Öffentlichkeit genutzt werden. Der Bedarfsberechnung in Tabelle 18 liegt eine jährliche Fahrleistung von 25.000 km je Fahrzeug zugrunde. Der Vergleich der Strommengen zeigt auf, dass in den beiden Monitoringjahren rund 40 % weniger Strom gegenüber dem Bedarfswert verbraucht wurde. Die absolute Höhe des Stromverbrauchs für die Mobilität ist in den beiden Messjahren dabei relativ konstant.

Tabelle 18: Jahreswert Strom für E-Mobilität

		Bedarf	2016	2017
Strombedarf E-Mobilität	kWh/(m²·a)	0,9	0,6	0,5
Fahrleistung gesamt	km/a	50.000	31.000	28.000

Der monatliche Verlauf des Stromverbrauchs für die Elektromobilität ist in Abbildung 36 dargestellt. Aus der Analyse der Stromverbrauchsmengen lässt sich keine Charakteristik ableiten, die einen saisonalen Zusammenhang aufweist.

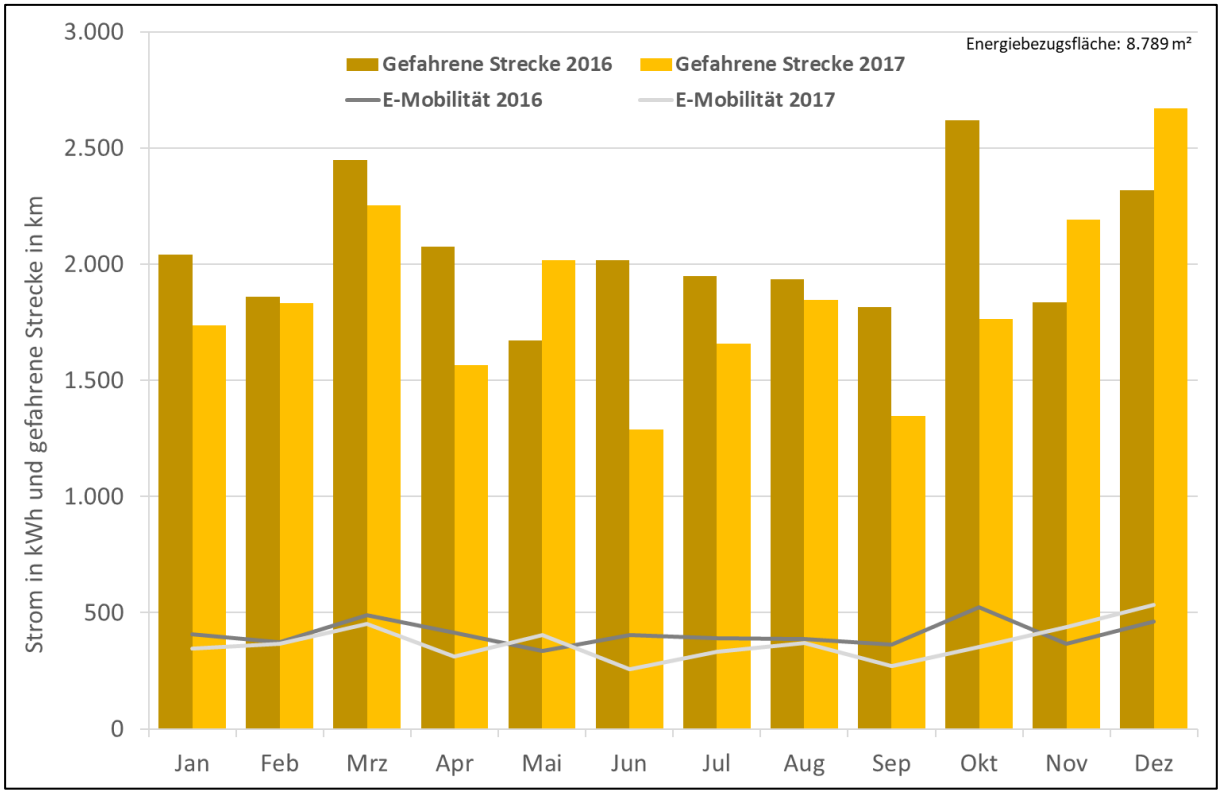


Abbildung 36: Stromverbrauch der Elektromobilität

Die tageszeitabhängige Analyse der Lademengen für die Elektromobilität in Abbildung 37 zeigt ein charakteristisches Profil über den Tagesverlauf auf. Dort sind die mittleren Stromverbräuche aus den Jahren 2016 und 2017 über die Tagesstunden dargestellt. Die höchsten Strombedarfe für die Ladung sind in den Abend- und Nachstunden zwischen 18 Uhr und 1 Uhr zu finden. In den frühen Morgenstunden sinkt der Ladestrom jedoch nicht auf null, sondern bleibt auf einem mittleren Grundlastniveau, das etwa 25 % der Maximalmengen entspricht.

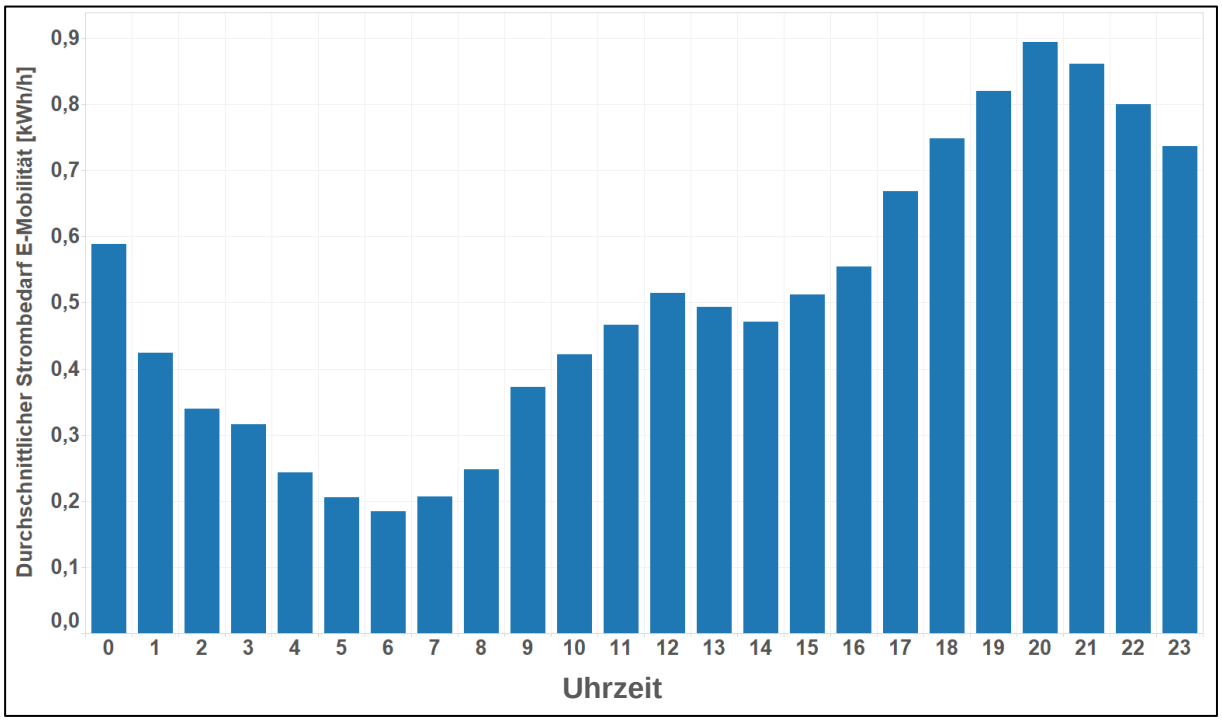


Abbildung 37: Diskrete Auswertung der Ladezeiten- und mengen, 2016 und 2017

6.3.4 Stromverbrauch gesamt

Für eine bessere Übersicht sind die untersuchten Stromverbrauchskennwerte in Tabelle 19 zusammengefasst. Analog zur Analyse der Wärmeverbrauchskennwerte beinhaltet die Übersicht sowohl die absoluten Verbrauchsmengen als auch die relevanten flächenbezogenen Werte (Flächenangaben siehe Kapitel 6.1.4).

Tabelle 19: Übersicht Stromverbrauchskennwerte

Stromverbrauchskennwerte					
2016	absolut	bezogen auf A_{WFL}	bezogen auf A_N	bezogen auf A_{NGF}	bezogen auf A_{BGF}
	[kWh/a]	[kWh/(m²·a)]	[kWh/(m²·a)]	[kWh/(m²·a)]	[kWh/(m²·a)]
Wärmepumpe und Hilfsstrom	79.899	12,0	9,1	8,1	6,8
Allgemeinstrom	32.866	4,9	3,7	3,3	2,8
Aufzug	5.684	0,9	0,6	0,6	0,5
Haushaltsstom	118.951	17,9	13,5	12,1	10,2
Gewerbe	8.908	1,3	1,0	0,9	0,8
Elektromobilität	5.684	0,9	0,6	0,6	0,5
Summe Stromverbrauch	**251.992**	**37,9**	**28,7**	**25,6**	**21,6**
2017	absolut	bezogen auf A_{WFL}	bezogen auf A_N	bezogen auf A_{NGF}	bezogen auf A_{BGF}
	[kWh/a]	[kWh/(m²·a)]	[kWh/(m²·a)]	[kWh/(m²·a)]	[kWh/(m²·a)]
Wärmepumpe und Hilfsstrom	80.145	12,1	9,1	8,2	6,9
Allgemeinstrom	31.052	4,7	3,5	3,2	2,7
Aufzug	5.645	0,8	0,6	0,6	0,5
Haushaltsstom	126.415	19,0	14,4	12,9	10,8
Gewerbe	4.524	0,7	0,5	0,5	0,4
Elektromobilität	5.645	0,8	0,6	0,6	0,5
Summe Stromverbrauch	**253.426**	**38,1**	**28,8**	**25,8**	**21,7**

6.4 Stromerzeugung

Die Stromerzeugung erfolgt durch eine Photovoltaikanlage auf dem Pultdach (251 kW_p) und einer fassadenintegrierten Photovoltaikanlage (118 kW_p) auf der Südfassade. Die erzeugten Strommengen sind in Tabelle 20 aufgeführt. Die Dachanlage hat an der Stromerzeugung einen Anteil von 85 % im Jahr 2016 und im Jahr 2017 80 %.

In den beiden Monitoringjahren wurde die berechnete Stromerzeugungsmenge aus der Simulation mit der Software PVSol um 15 bis 20 % unterschritten. Gründe hierfür waren vor allem technische Ausfälle der Anlagen, abweichende Klimadaten gegenüber der Simulation (3 – 5 %) und ein Anteil von 1 % ist auf eine fehlende Verschattung der Dachaufbauten in der Simulation zurückzuführen.

Tabelle 20: Jahreswerte Stromerzeugung

	Soll	2016	2017	Soll	2016	2017
	MWh/a	MWh/a	MWh/a	kWh/(kW_p·a)	kWh/(kW_p·a)	kWh/(kW_p·a)
PV-Erzeugung	300	253	238	810	690	640
PV-Erzeugung Fassade	53	39	47	450	330	400
PV-Erzeugung Dach	246	214	191	980	850	760

Das monatliche Profil der Stromerzeugungsmengen ist in Abbildung 38 dargestellt.

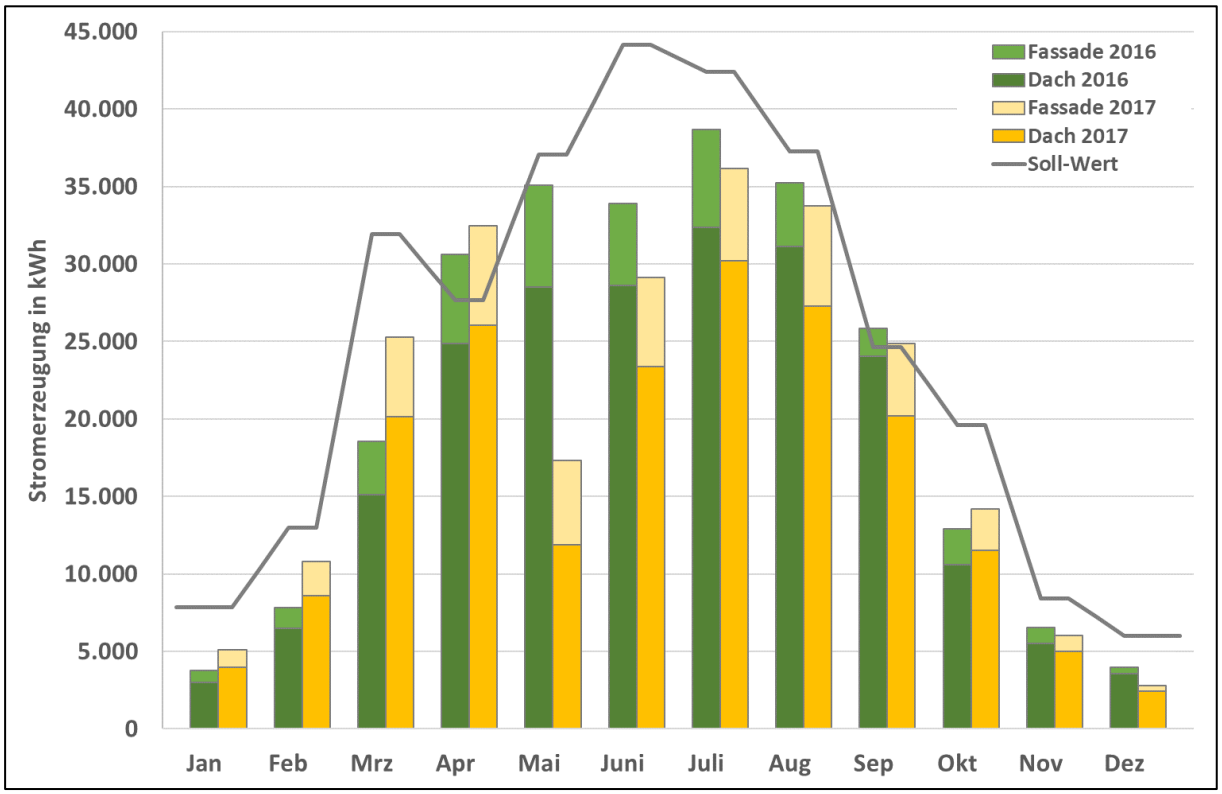


Abbildung 38: Stromerzeugung Photovoltaik, monatlich

Der Vergleich der Monatswerte in Abbildung 38 zeigt den typisch saisonalen Verlauf der Stromerzeugung mit den Erzeugungsspitzen in den Sommermonaten. Darüber hinaus gibt die Darstellung Aufschluss über die zeitliche Verteilung der Anlagenausfälle. Diese sind wie folgt über den Monitoringzeitraum verteilt und in der Abbildung durch die reduzierten Erträge ersichtlich:

- 2016: Juni und Dezember
- 2017: Januar, Mai, Juni, Juli und Dezember

Abbildung 39 zeigt das spezifische Erzeugungspotenzial der Dachanlage gegenüber der Fassadenanlage auf der Südseite, die über sechs Geschosse verteilt ist. Der spezifische Jahresertrag der Fassadenanlage im 6.OG ist etwa halb so hoch wie der Ertrag der PV-Dachanlagen mit 10° Neigung und der Ausrichtung in Richtung SSO. Ebenso halbiert sich etwa der spezifische Ertrag der Fassadenanlage im 1. OG im Vergleich zur Anlage im 6. OG. Der spezifische Ertrag in den unteren Geschossen liegt unter 300 kWh/kW$_p$. Ein wirtschaftlicher Betrieb ist bei diesen Erträgen nicht möglich, jedoch ist die konsequente Aktivierung der Fassade erforderlich für den konzeptionellen Energieüberschuss und das architektonische Gesamtkonzept.

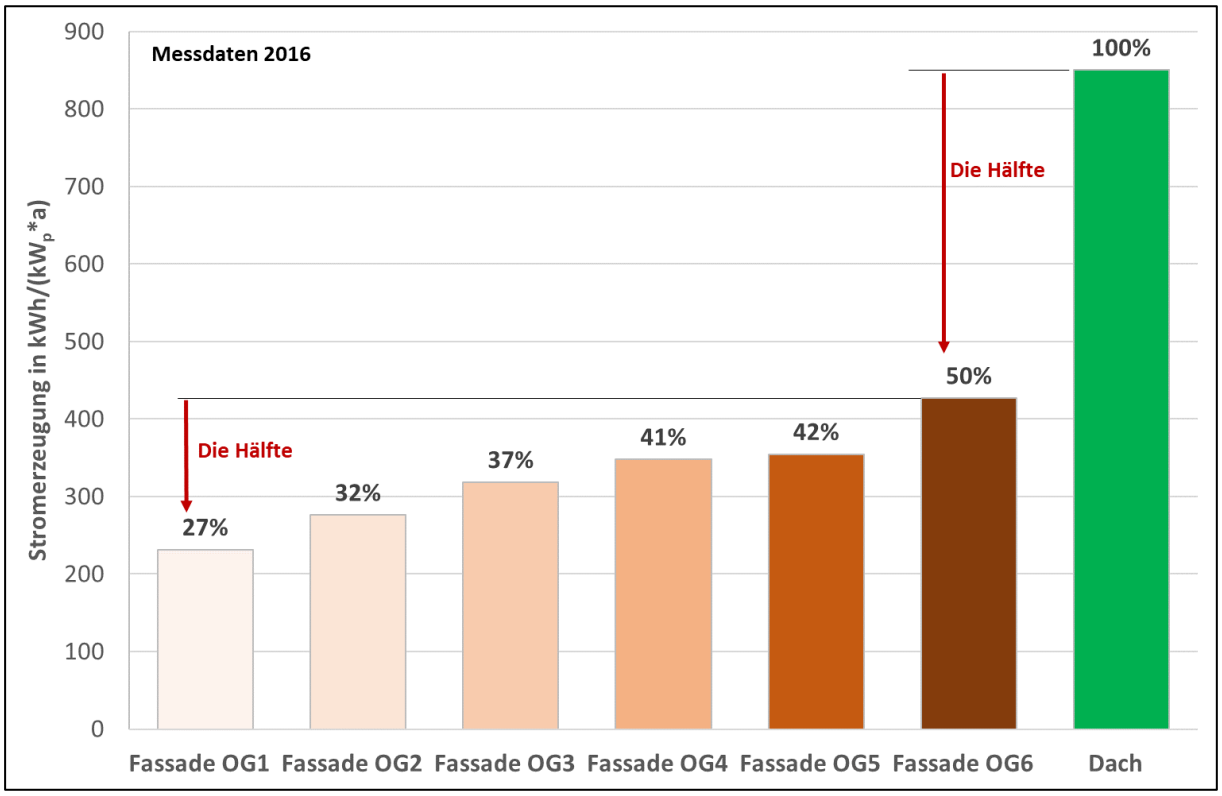


Abbildung 39: Vergleich Fassaden- und Dach-PV, 2016

6.5 Stromspeicherung

Der zentrale Stromspeicher dient der zeitlichen Entkopplung von PV-Produktion und Stromverbrauch im Gebäude. Ziel ist eine Kurzzeitspeicherung von PV-Erzeugungsüberschüssen, die tagsüber im Gebäude nicht direkt genutzt werden können. Die in die Batterie eingespeicherten Überschussstrommengen werden in den Abend- und Nachtstunden an die Verbraucher im Haus abgegeben.

Der Lithium-Eisen-Phosphat-Stromspeicher besitzt eine Nennkapazität von 250 kWh. In Abbildung 40 ist der Ladezustand der Batterie aus einer beispielhaften Woche im Juni dargestellt. Der Ladezustand steigt durch die Beladung mit PV-Überschüssen tagsüber auf 100 %an und sinkt durch die Entnahme in den Nachtstunden bis auf die untere Entladegrenze von ca. 30 % ab.

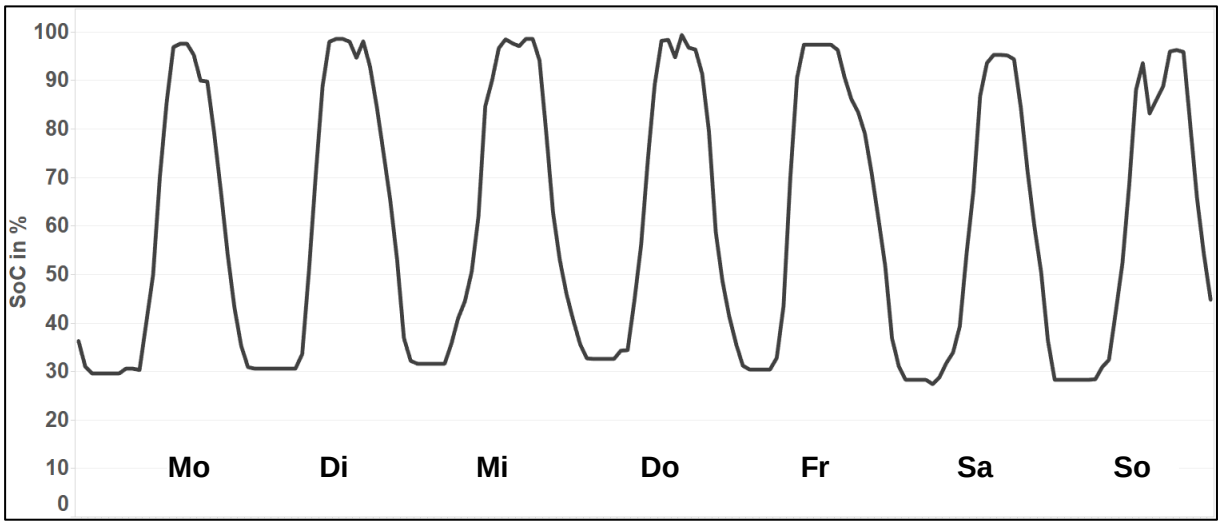


Abbildung 40: Detailanalyse Ladezustand, Juniwoche 2016

Ergänzend ist in Abbildung 41 der Ladezustand über einen längeren Zeitraum von einem Jahr dargestellt. In dieser Grafik sind nur noch die unteren und oberen Ladegrenzen zu erkennen. Zusätzlich zeigt die Grafik, dass im Mai 2017 die Batterie zwar in Betrieb war, aber keine Messdaten aufgrund einer Kommunikationsstörung für die Auswertung zur Verfügung stehen. Ebenso ist die Batterie aufgrund einer defekten Batteriemanagementsteuerung und defekten Platinen in den Batterie-Strings zwischen September 2017 und Februar 2018 nicht in Betrieb gewesen.

Insgesamt zeigt die Analyse der Belade- und Entnahmemengen, dass der Stromspeicher einen signifikanten Anteil an der Erhöhung des Eigenversorgungsgrades (EVG) hat. Durch die Nutzung des Stromspeichers konnte im Jahr 2016 der elektrische Eigenversorgungsgrad um 18 % (5,2 kWh/(m^2_{AN}·a)) und im Jahr 2017 um 11 % (3,4 kWh/(m^2_{AN}·a)) erhöht werden. Die Anzahl der äquivalenten Vollladezyklen lag dabei in 2016 bei 260 und im Jahr 2017 bei 170.

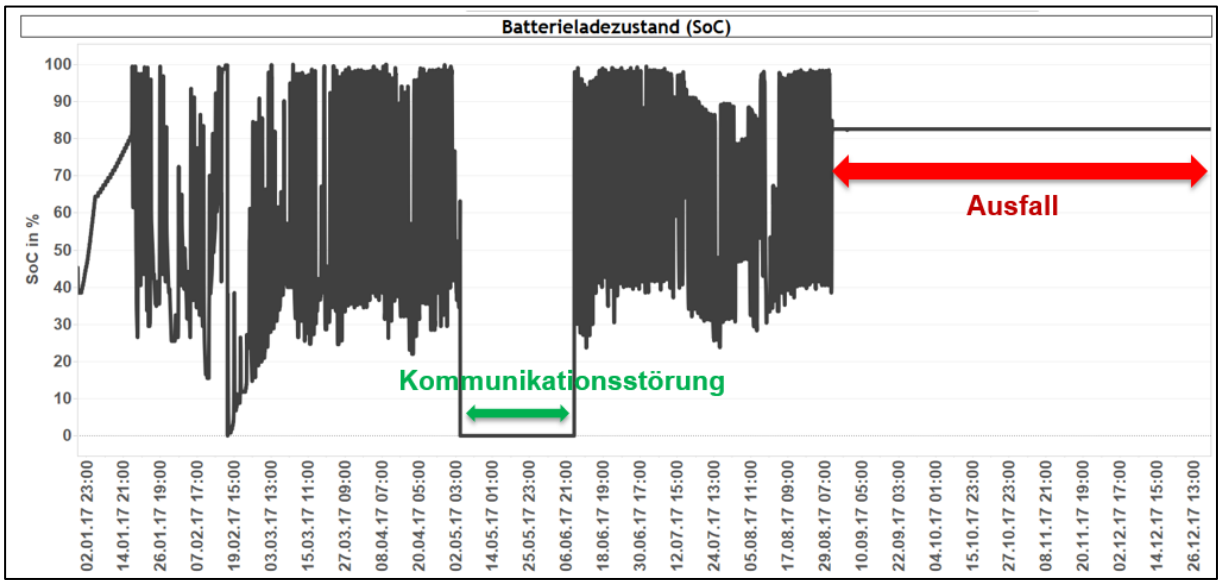


Abbildung 41: Ladezustand der Batterie, 2017

In Abbildung 42 ist der Energiewirkungsgrad des Stromspeichers abgebildet. Er beschreibt das Verhältnis von eingespeichertem und entnommenem Strom in den Batteriespeicher (DC-DC, ohne Lade- und Entladeverluste durch Batteriemanagementsystem). Er liegt konstant hoch, im Mittel zwischen 90 und 98 %.

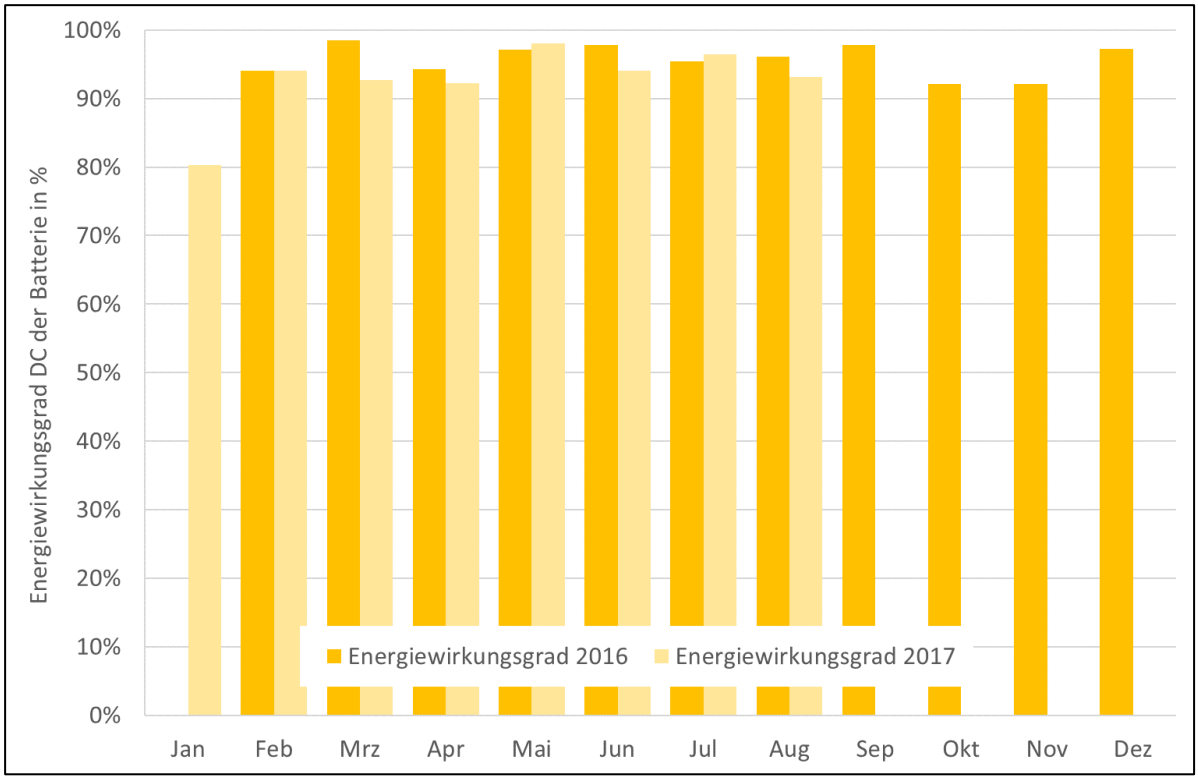


Abbildung 42: Energiewirkungsgrad des Stromspeichers monatlich

6.6 Eigenstromnutzung und Eigenversorgungsgrad

Die Eigenstromnutzung und der Eigenversorgungsgrad (EVG) geben Auskunft, wieviel des lokal erzeugten Stroms und der lokal nutzbar gemachten Wärme aus Abwasser direkt für die Deckung des Energiebedarfs im Gebäude genutzt werden kann. Der Eigenversorgungsgrad bezieht sich auf das Gesamtgebäude und beinhaltet alle relevanten Energiemengen (Endenergie) für die Wärme- und Stromversorgung. Per Definition berechnet sich der Eigenversorgungsgrad wie folgt:

$$\boldsymbol{Eigenversorgungsgrad} = \frac{Direkt\ genutzte\ und\ lokal\ erzeugte\ Energie\ (Wärme\ und\ Strom)}{Energiebedarf\ (Wärme\ und\ Strom)}$$

Die im Aktiv-Stadthaus lokal nutzbar gemachten erneuerbaren Energien sind in Tabelle 21 aufgelistet. Der Eigenversorgungsgrad lag im Jahr 2016 bei 72,5 % und im Jahr 2017 bei 72,1 % und damit lediglich rund 1 bis 1,5 Prozentpunkte unter den berechneten Werten. Der Anteil des Stroms beträgt dabei rund 30 % der lokal nutzbar gemachten Energien, die restlichen 70 % entsprechen der Wärmemenge aus dem Abwasser als Wärmequelle für die elektrische Wärmepumpe.

Tabelle 21: Jahreswerte Eigenversorgung und Eigenversorgungsgrad

	Berechnung	2016	2017	Berechnung	2016	2017
	kWh/(m²$_{AN}$·a)	kWh/(m²$_{AN}$·a)	kWh/(m²$_{AN}$·a)	%	%	%
Eigenstrom direkt	12,2	8,6	10,5	21%	14%	17%
Eigenstrom Stromspeicher	5,4	5,2	3,4	9%	9%	6%
Abwasserwärme	25,6	29,5	29,4	44%	49%	49%
Gesamte Eigenversorgung	**43,2**	**43,3**	**43,4**	**73,7%**	**72,5%**	**72,1%**
Endenergiebedarf (Wärme und Strom)	58,6	59,7	60,1			

Ergänzend zu den Tabellenwerten ist in Abbildung 43 die Berechnung des Eigenversorgungsgrades schematisch dargestellt. In dem Energiedreieck sind alle relevanten Endenergien und Energieflüsse im Aktiv-Stadthaus enthalten. Vertikal von oben fließen die lokal nutzbaren Energien Photovoltaikstrom und Abwasserwärme in das Energiedreieck ein. Die linke Seit des Dreiecks bildet den Austausch mit der externen Energieinfrastruktur ab. Hierzu gehören die PV-Netzeinspeisemengen, der Netzstrombezug und der Gasbezug. Auf der rechten Seite des Energiedreiecks sind alle verbrauchten Energiemengen enthalten, die sich aus den lokal nutzbar gemachten Energien und dem Bezug von extern zusammensetzen. Das Verhältnis von lokalen erneuerbaren Energien zum Gesamtendenergiebedarf bildet den Eigenversorgungsgrad für das Jahr 2016 von rund 72 %.

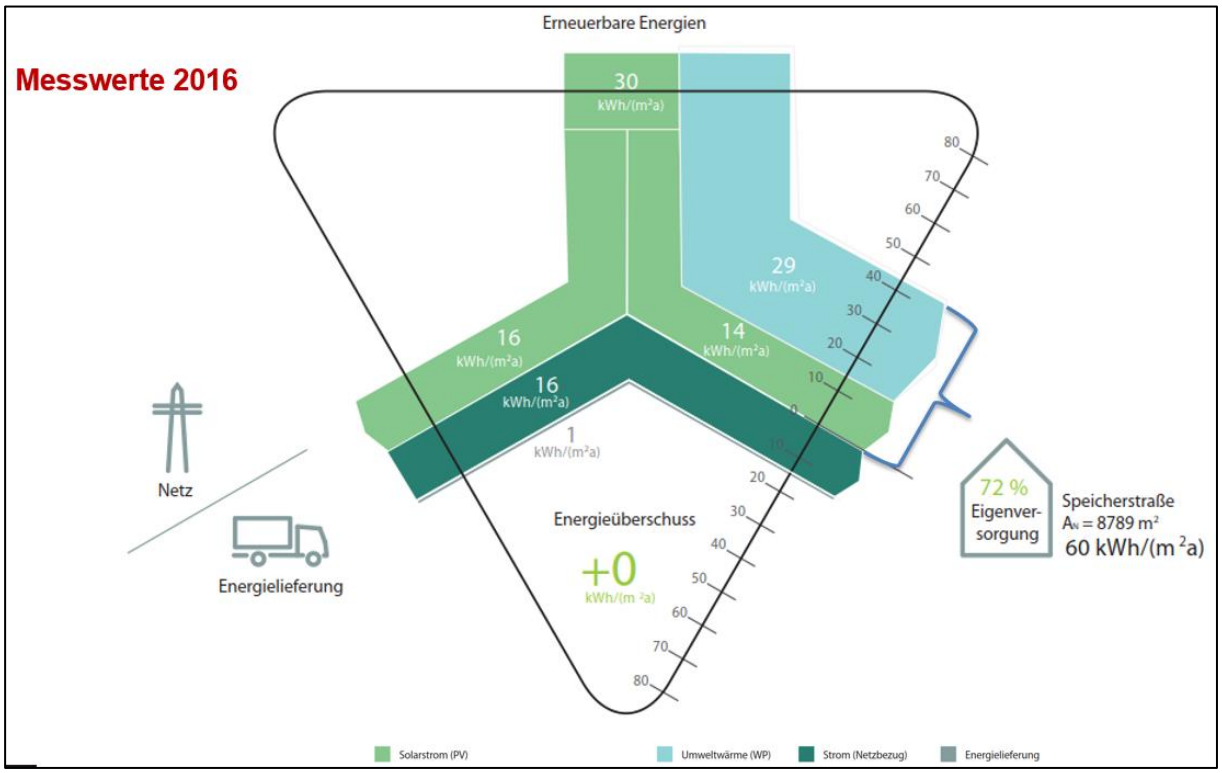


Abbildung 43: Energiedreieck - Eigenversorgungsgrad 2016

Zusatzinfo: Eigenversorgung elektrisch

Die elektrische Eigenversorgung wird hier rein ergänzend für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse aufgeführt, da in den anderen Modellprojekten die Eigennutzung auf den Strombereich beschränkt bleibt. Dieser elektrische Eigenversorgungsgrad beträgt im Aktiv-Stadthaus rund 47 % und liegt leicht unter dem berechneten Wert von 53 %. Bedingt ist diese Differenz hauptsächlich durch die verringerte PV-Erzeugungsmenge gegenüber der Bedarfsberechnung.

Tabelle 22:Rein elektrische Eigenversorgung

	Berechnung	2016	2017	Berechnung	2016	2017
	kWh/(m²$_{AN}$·a)	kWh/(m²$_{AN}$·a)	kWh/(m²$_{AN}$·a)	%	%	%
Eigenstrom direkt	12,2	8,6	10,5	37%	29%	35%
Eigenstrom Stromspeicher	5,4	5,2	3,4	16%	18%	11%
Gesamte Strom-Eigenvers.	**17,6**	**13,9**	**13,9**	**53,3%**	**46,9%**	**46,3%**

Endenergiebedarf (Strom)	33,0	29,6	30,1

6.7 Netzaustausch

Neben dem Eigenversorgungsgrad erlaubt die Analyse der Stromnutzung im Gebäude auch Rückschlüsse über die Interaktion mit dem vorgelagerten Stromnetz. Die Interaktion beinhaltet zwei Komponenten:

- **Netzbezug**: Wenn nicht genügend PV-Strom zur Versorgung zur Verfügung steht
- **Netzeinspeisung**: PV-Stromerzeugung übersteigt den Strombedarf im Gebäude

In Abbildung 44 ist die summierte Strombilanz auf Tagesbasis beschrieben. Auf der vertikalen Achse sind die Stromeinspeisemengen und auf der horizontalen Achse die Strombezüge aus dem Netz dargestellt. Die Ergebnisse aus den beiden Monitoringjahren zeigen deutliche saisonale Unterschiede auf.

In den **Wintermonaten** steigt der Bezug aus dem Netz deutlich an und gleichzeitig sinkt die Stromeinspeisung. Bedingt ist dies durch den erhöhten Strombedarf, der reduzierten Stromerzeugung und der relativ hohen PV-Stromeigennutzung, die in dieser Zeit im Mittel bei über 90 % liegt.

Für die **Sommermonate** ergibt sich eine Verschiebung der Bilanzpunkte. Auf Tagesbasis wird nun deutlich mehr Strom in das Netz eingespeist als vom Netz bezogen wird. Im Mittel liegt in dieser Zeit ein sehr hoher Stromeigenversorgungsgrad von etwa 80 % vor, der auf die hohe Stromerzeugung und den reduzierten Stromverbrauch in dieser Zeit zurückzuführen ist. Gleichzeitig kann von der großen Stromerzeugungsmenge nur etwa 35 % direkt im Gebäude genutzt werden. Die Überschüsse führen zu der Verschiebung der Bilanzpunkte nach links und oben.

Die maximalen Bezugsmengen auf Tagesbasis liegen ungefähr bei 1.000 kWh/d und die maximalen Einspeisemengen bei etwa 1.300 kWh/a. Die maximalen Bezugsmengen treten nur im Winter auf und an diesen Tagen findet nahezu keine Einspeisung statt. Im Gegensatz hierzu besteht an den Tagen mit den maximalen Einspeisemengen weiterhin ein erkennbarer Netzstrombezug von 100 bis 200 kWh/d.

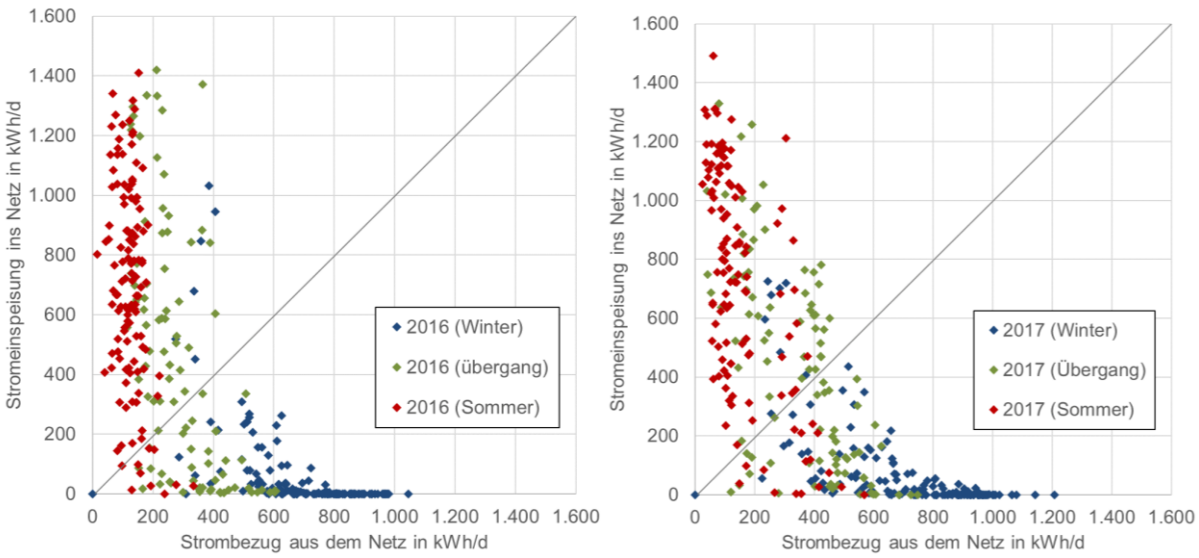


Abbildung 44: Strombilanz auf Tagesbasis (links 2016, rechts 2017)

Das Diagramm mit der Strombilanz auf Monatsebene für den gesamten Monitoringzeitraum kann in Abbildung 45 eingesehen werden. Die Werte aus dem Jahr 2016 sind darin als Rauten und die Werte von 2017 als Quadrate abgebildet. Auch hier ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den Bilanzdaten auf Tagesbasis in Abbildung 44. Die Sommermonate haben deutlich mehr Einspeisung als Bezug und die Wintermonate weisen einen hohen Bezug bei niedriger Einspeisung auf. Die maximalen Einspeise- und Bezugsmengen gleichen sich auf Monatsebene jedoch an und liegen bei rund 25.000 kWh/Monat.

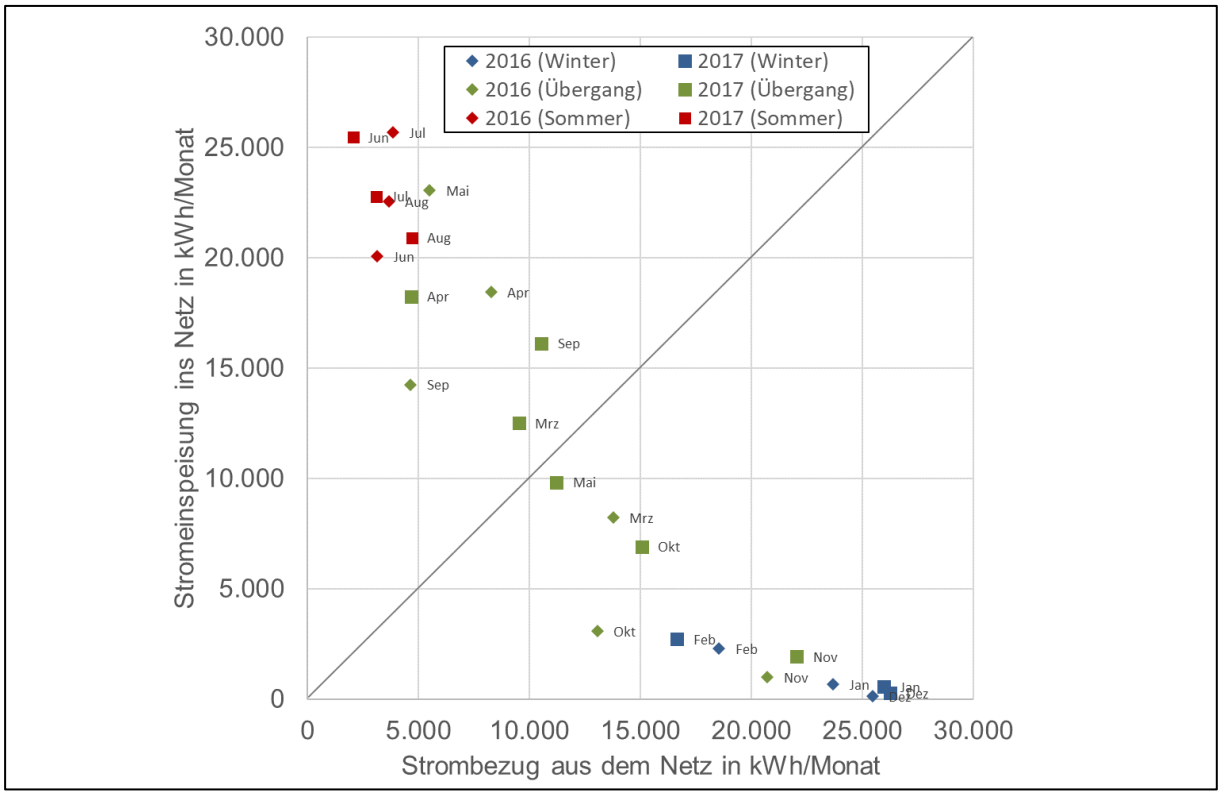


Abbildung 45: Strombilanz auf Monatsebene (2016 und 2017)

6.8 Gebäudebilanz

Die Gebäudeenergiebilanz dient als Hauptindikator zur Bewertung der Energieüberschüsse, die im Aktiv-Stadthaus angestrebt werden. Ein Überschuss liegt vor, wenn die in einem Jahr erzeugte und nutzbar gemachte erneuerbare Endenergiemenge höher ist als der gesamte Endenergiebedarf im Gebäude. Für die Bewertung der Energiebilanz gemäß dem EffizienzhausPlus-Standard beinhaltet der Energiebedarf den Bedarf nach EnEV (Heizung, Warmwasser, Lüftung und Hilfsstrom) sowie den Nutzerstrom. Ist die Differenz zwischen Bedarf und Erzeugung negativ, so liegt ein bilanzieller Energieüberschuss vor. In Tabelle 23 sind die Ergebnisse der Jahresbilanzen abgebildet. Neben der Bilanz nach EffizienzhausPlus werden in der Tabelle auch die Gesamtbilanzen des Gebäudes mit gelistet, die zusätzlich noch den Energiebedarf für die Gewerbeeinheiten und die Elektromobilität enthalten.

Die Bilanzergebnisse nach EffizienzhausPlus weisen im Monitoringjahr 2016 einen Überschuss und in 2017 ein Defizit auf. Im Jahr 2016 lag der knappe Überschuss bei 0,3 kWh/(m^2_{AN}·a) und entspricht einem Überschuss von 1 %. Im Folgejahr 2017 beträgt die Erzeugungsmenge etwas weniger als der Bedarf und es resultiert ein geringes Defizit von 0,6 kWh/(m^2_{AN}·a). Die gemessenen Energiebilanzen liegen dabei unter den berechneten Zielwerten. Die Gründe hierfür sind unter anderem:

- Ausfälle der PV-Anlage
- Außerplanmäßiger Betrieb des Gaskessels

Wird als Bilanzrahmen der gesamte Energiebedarf des Gebäudes inklusive Gewerbe und Elektromobilität verwendet, so wird der Energieüberschuss nicht erreicht. Die Erzeugung liegt hierbei im Jahr 2016 1,3 kWh/(m^2_{AN}·a) und in 2017 2,3 kWh/(m^2_{AN}·a) unter den Bedarfswerten.

Tabelle 23: Jahreswert Energiebilanz Gesamtgebäude

	Berechnung	2016	2017
	kWh/(m^2_{AN}·a)	kWh/(m^2_{AN}·a)	kWh/(m^2_{AN}·a)
Erzeugung	34,1	29,7	29,1
Endenergiebedarf Eff.Plus	29,1	29,4	29,7
Endenergiebedarf gesamt	33,0	31,0	31,4
Bilanz Eff.Plus	**-4,9**	**-0,3**	**0,6**
Bilanz gesamt	-1,1	1,3	2,3

* Bedarf und Erzeugung ohne Wärme aus Abwasser, Energiebezugsfläche A_N = 8.789 m²

In Abbildung 46 sind die kumulierten Erzeugungs- und Verbrauchsmengen gemäß der EffizienzhausPlus-Bilanz (ohne Abwasserwärme) dargestellt. Die durchgezogenen Linien sind die Messwerte aus 2016 und die dick gestrichelte Linie zeigt die Werte von 2017. Neben der bereits getätigten Aussage über die Jahresbilanz ermöglicht das Diagramm, Schlüsse über die jahreszeitliche Verteilung der Energiemengen zu bekommen. Der Verlauf der Erzeugungskurve ist dabei am Jahresanfang und –ende relativ flach und in den

Sommermonaten steil und entspricht der klassischen Erzeugungscharakteristik aus Abbildung 38. Die rote Verbrauchskurve dagegen hat in den Wintermonaten und der Übergangszeit einen höheren Bedarf der gegenüber den Sommermonaten etwa doppelt so hoch sein kann. Die Abbildung verdeutlicht zudem, dass die Verbrauchslinie relativ gut der Bedarfslinie folgt. Im Gegensatz hierzu ist durch die Ertragsausfälle der PV-Anlage die Differenz zwischen berechneter und gemessener Erzeugung gut sichtbar. Bei den dargestellten Jahresbilanzen ist jeweils im Juni der Zeitpunkt erreicht, bei dem die erzeugte PV-Strommenge den Verbrauch übersteigt.

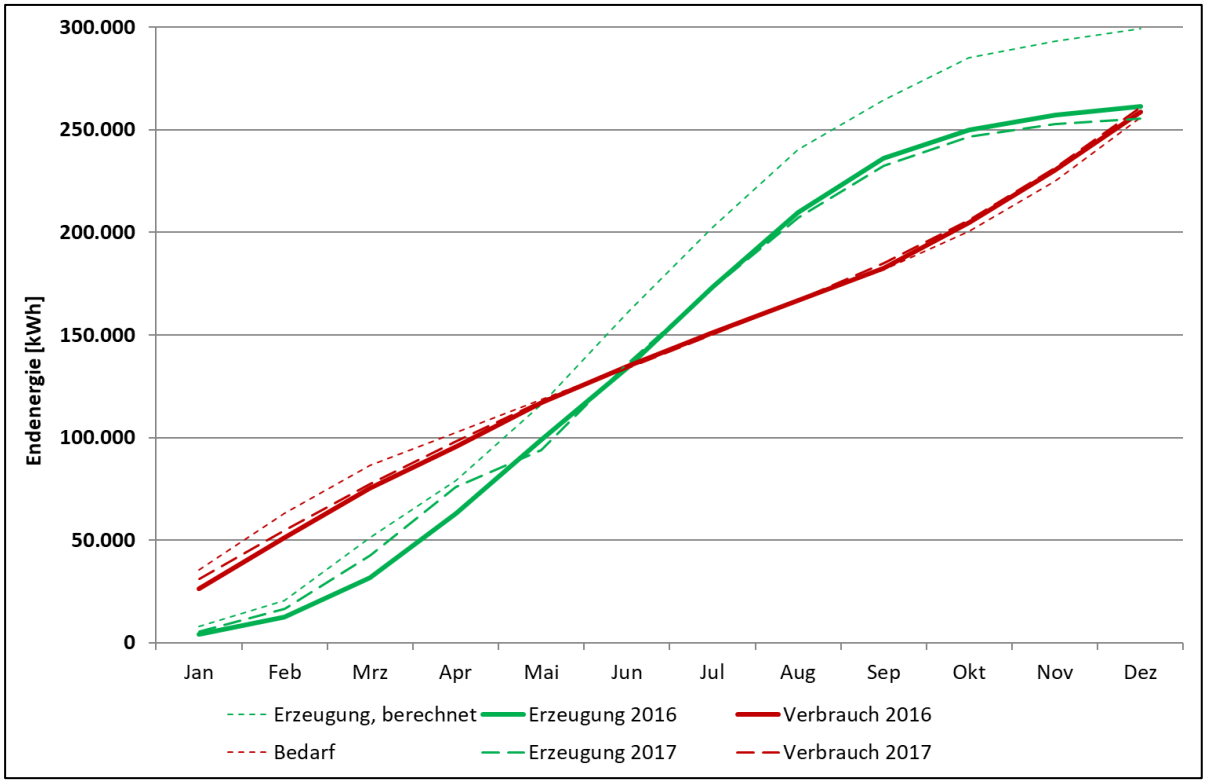


Abbildung 46: Kumulierte Gebäudebilanz nach EffizienzhausPlus (Endenergie ohne Abwasserwärme)

Die Abbildung 47 enthält ebenfalls die kumulierten Erzeugungs- und Verbrauchsmengen, die aber um den Energieverbrauch für die Gewerbeeinheiten und die Elektromobilität ergänzt sind. Grundsätzlich bleibt der qualitative Kurvenverlauf auf der Verbrauchsseite gleich. In den Wintermonaten und der Übergangszeit ist der Verbrauch deutlich höher als im Sommer. Durch den zusätzlichen Verbrauch verschieben sich jedoch die Endpunkte der Verbrauchskurve nach oben und übersteigen jeweils in den Jahren 2016 und 2017 die Erzeugungsmengen am Jahresende.

Ergänzend hierzu sind in Abbildung 48 die Endenergiebilanzen in der klassischen Diagrammform (Säulendiagramm) dargestellt. Zur vereinfachten Lesbarkeit ist darin die Bilanzgrenze nach EffizienzhausPlus als horizontale Vergleichslinie mit eingeblendet.

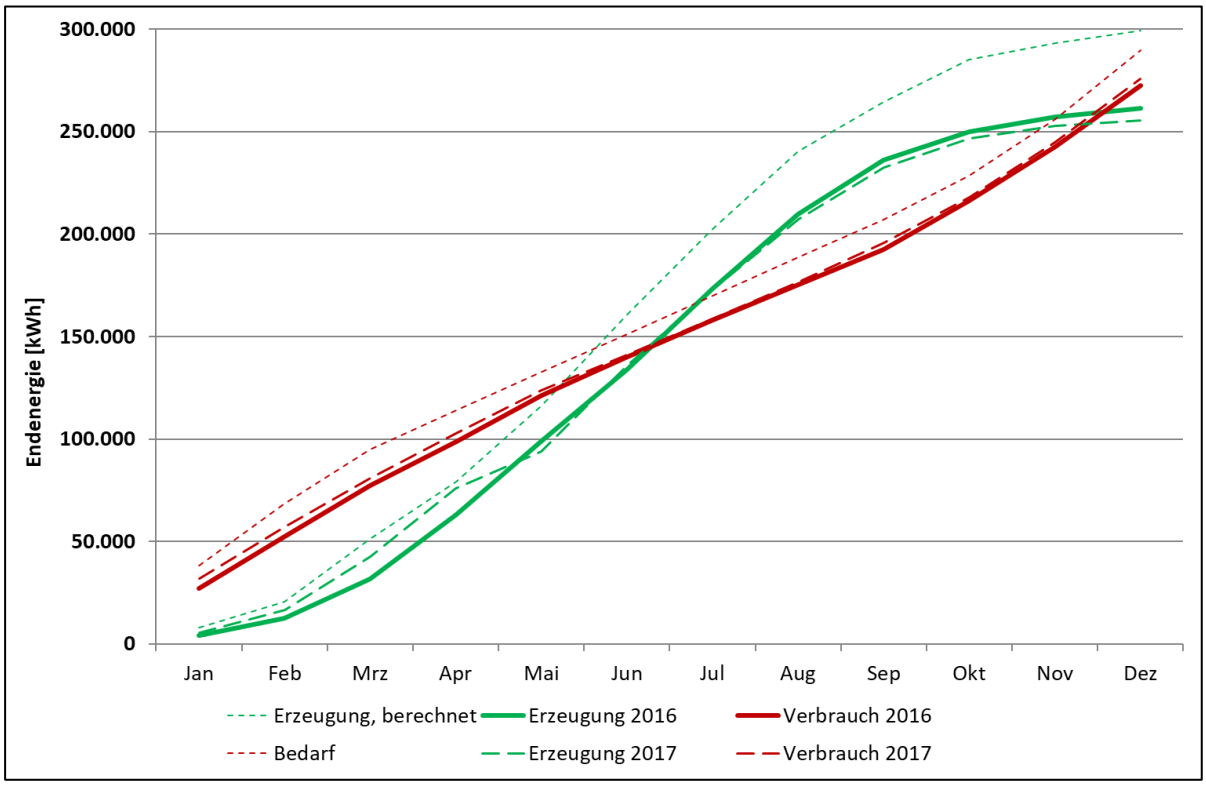


Abbildung 47: Kumulierte Gebäudebilanz nach EffizienzhausPlus zzgl. Mobilität und Gewerbe (Endenergie ohne Abwasserwärme)

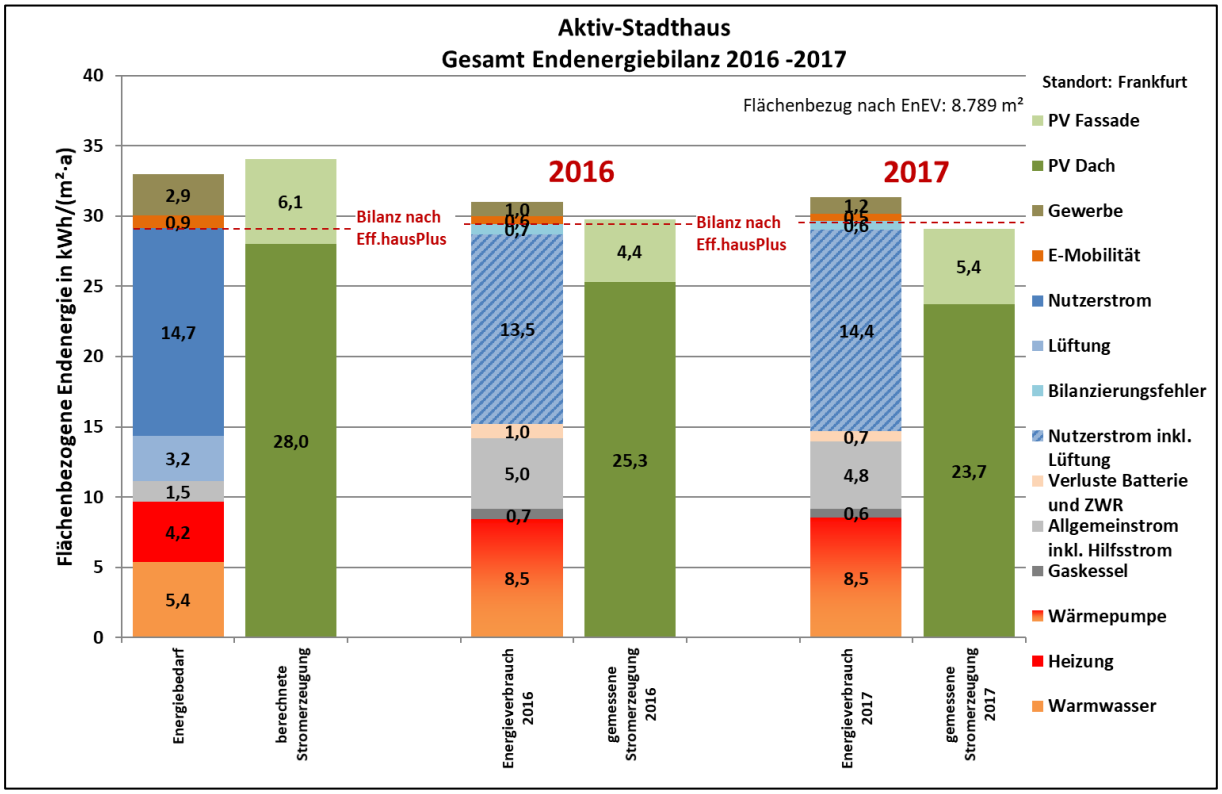


Abbildung 48: Übersicht der Endenergiebilanzen (Säulendiagramm)

6.9 Innenraumtemperaturen und Behaglichkeit

Die Innenraumtemperaturen werden lediglich in den 10 Musterwohnungen erfasst. Die Temperaturmessung erfolgt hierbei in der Abluft der Lüftungsanlage. In der Tabelle 24 sind die mittleren Raumtemperaturen aufgeführt. Diese liegt im Jahresmittel zwischen 22,1 °C (2016) und 22,5 C (2017). In der Heizperiode sinkt das Jahresmittel jeweils auf 20,8 °C (2016) und auf 21,5 °C (2017). Die detaillierte Auswertung der Raumtemperaturen in Tabellenform kann zusätzlich im Anhang B - Raumtemperaturen eingesehen werden.

Tabelle 24: Übersicht der mittleren Raumtemperaturen

	2016	2017
	°C	°C
Mittlere Raumtemperatur	22,1	22,5
Mittl. Raumtemperatur in Heizperiode*	20,8	21,5

* Jan bis Mai und Okt bis Dez

Die Detailanalyse der Raumlufttemperaturen zeigt für das Jahr 2016 Raumtemperaturen in der Heizperiode zwischen 18 und 24 °C. In den Sommermonaten steigen die Raumtemperaturen auf etwa 22 bis 27 °C an (siehe Abbildung 49). Hierbei sind deutliche Temperaturunterschiede zwischen der Wohnung mit der höchsten Raumtemperatur und der Wohnung mit der niedrigsten Temperatur zu erkennen (siehe Abbildung 50). Die Analyse der Lage der Musterwohnungen konnte jedoch keine Hinweise liefern, ob die Raumtemperaturen durch die Lage im Gebäude mit beeinflusst wird (wie z.B. Geschoss, reine Südfassade, Randwohnung). Viel mehr ist die Raumtemperatur durch das Nutzerverhalten, wie dem Lüftungsverhalten und damit indirekt auch dem individuellen Temperaturempfinden, geprägt.

Die gleiche Aussage gilt auch für das Jahr 2017. Dort befinden sich die Raumtemperaturen in der Heizperiode zwischen 18 und 24 °C. In den Sommermonaten steigen die Raumtemperaturen erneut auf etwa 23 bis 27 °C an.

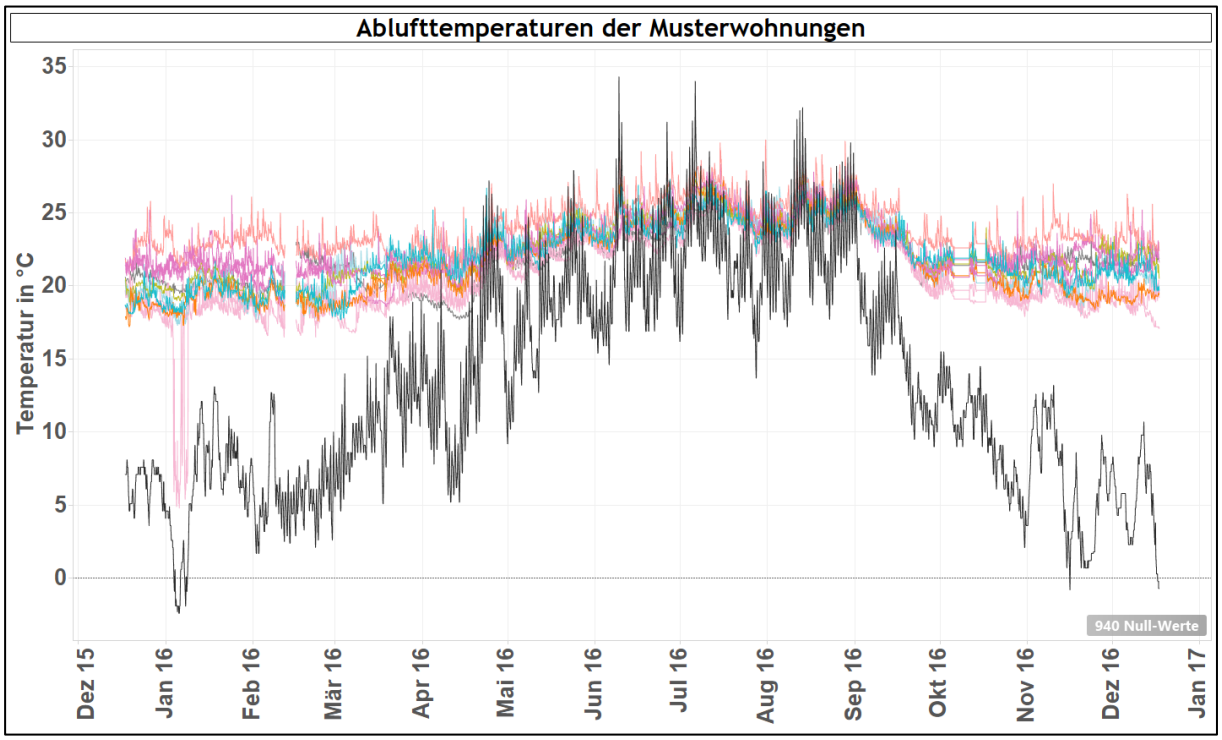


Abbildung 49: Ablufttemperaturen der Musterwohnungen, 2016

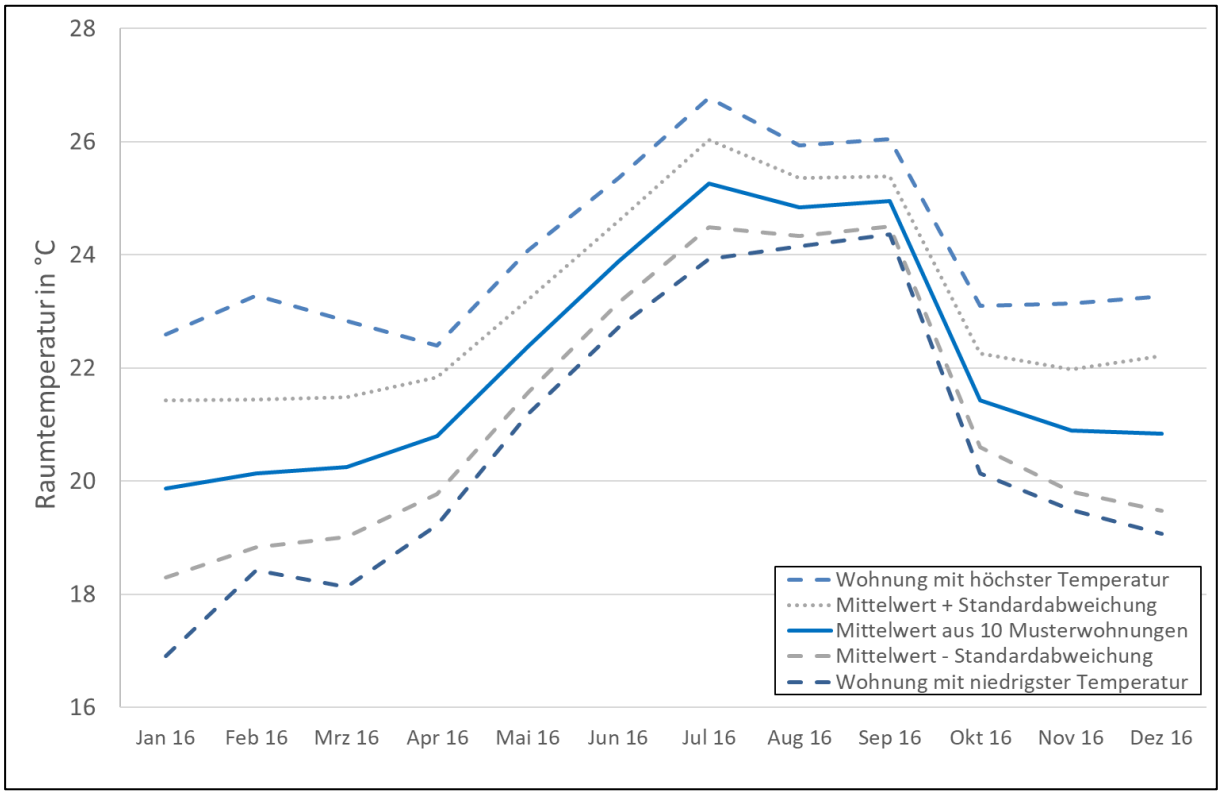


Abbildung 50: Raumtemperaturanalyse, monatlich 2016

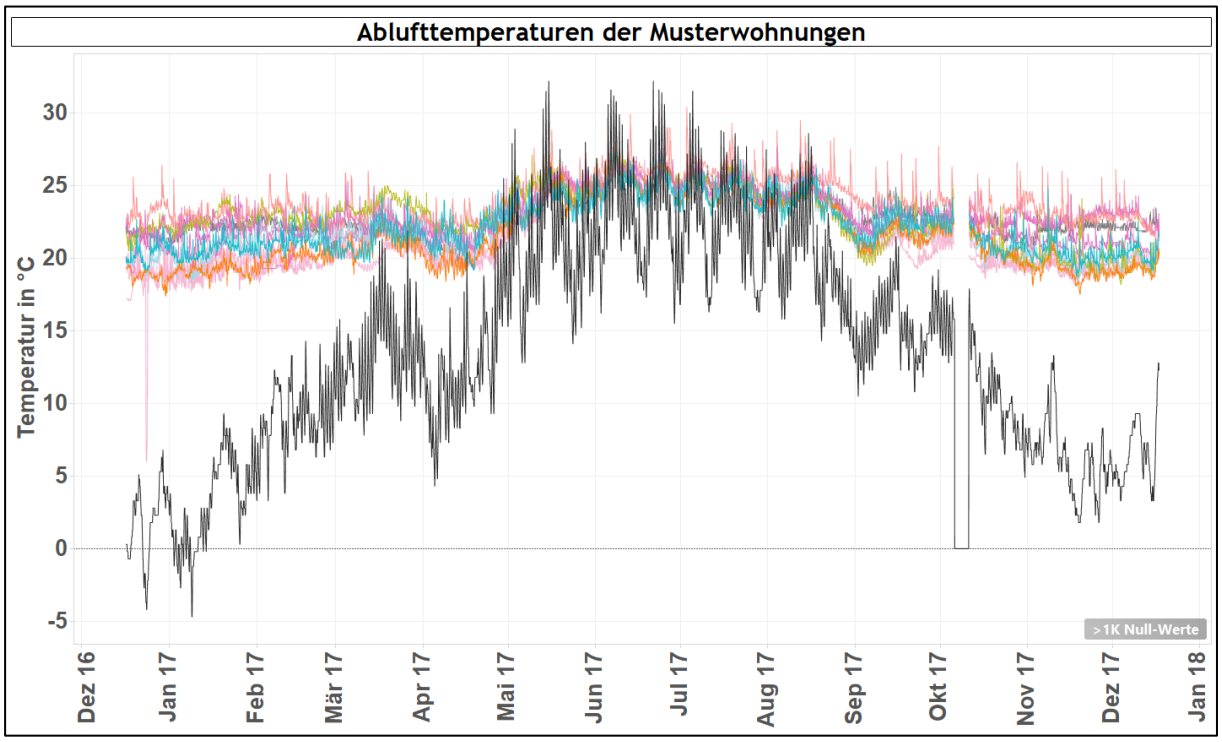


Abbildung 51: Ablufttemperaturen der Musterwohnungen, 2017

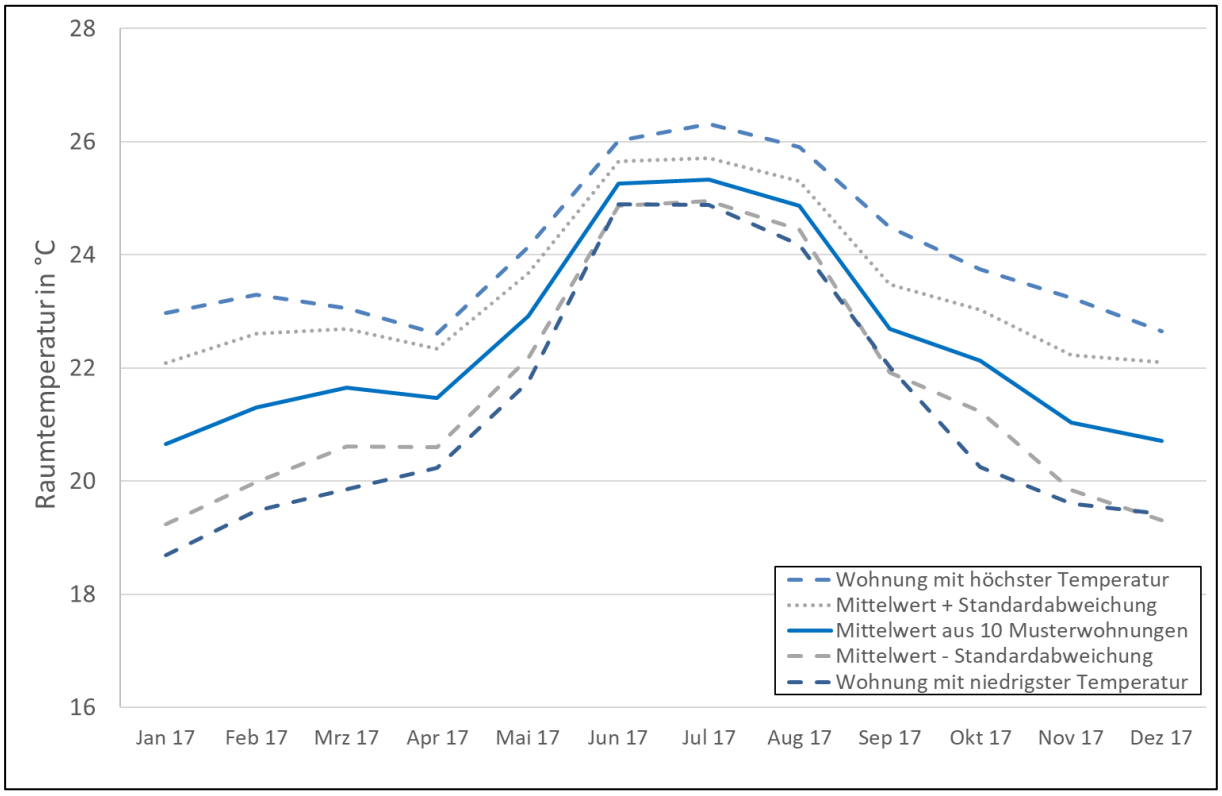


Abbildung 52: Raumtemperaturanalyse, monatlich 2017

6.9.1 Behaglichkeit

Die Bewertung der Behaglichkeit erfolgt in Anlehnung an die DIN EN 15251:2012-12. Mit den in der Norm formulierten Kriterien für die thermische Behaglichkeit kann eine quantifizierbare Bewertung des Raumklimas vorgenommen werden. Die Norm gibt dabei einen Behaglichkeitsbereich für die Rauminnentemperaturen vor, der in Abhängigkeit von der Außentemperatur zu ermitteln ist.

Die in den Musterwohnungen gemessenen Raumtemperaturen sind als Punktewolke in Abbildung 53 dargestellt. Das grau hinterlegte Band steht für den Komfortbereich der Norm. Über die gesamte Monitoringdauer von zwei Jahren sind gemäß der Norm rund 73 % der stündlich gemessenen Raumtemperaturen als behaglich einzustufen. Im Jahr 2016 lagen rund 70 % der gemessenen Werte und in 2017 rund 76 % in dem Behaglichkeitsbereich.

Der dargestellte Komfortbereich beschreibt jedoch nur normativ einen Komfortbereich, der vom individuellen und subjektiv wahrgenommenen Wohlbefinden in der Realität auch stark abweichen kann.

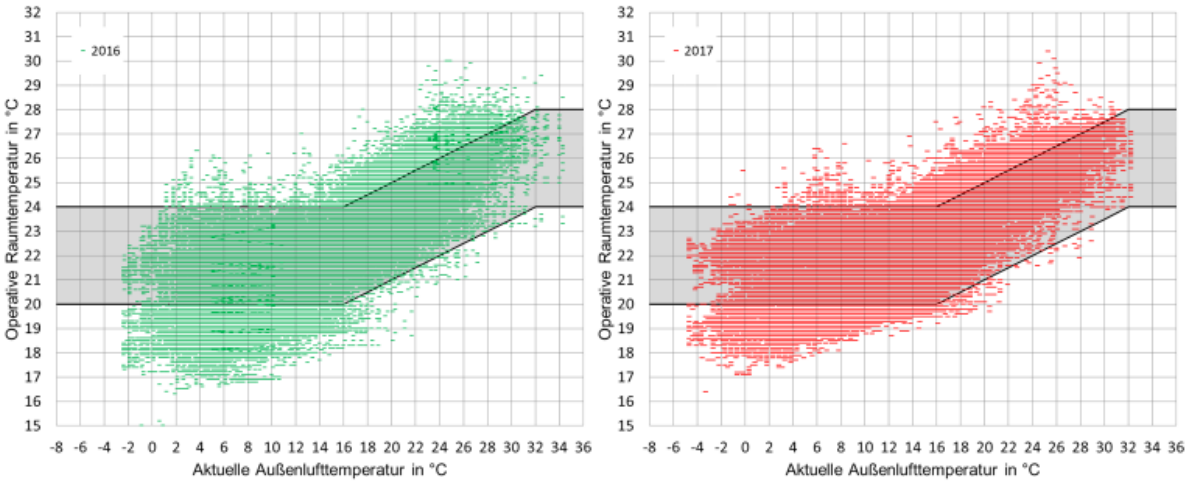


Abbildung 53: Komforttemperaturbereich nach DIN EN 15251:2012-12

7 Kosten/ Wirtschaftlichkeit

7.1 Baukosten

Konkrete Aussagen zur Wirtschaftlichkeit von Einzelbauteilen oder ein Vergleich mit einer alternativen Bauweise und Anlagentechnik können mit den vorliegenden Informationen nicht getroffen werden. Im Folgenden werden daher die vorhandenen Kosten analysiert und im Kontext von anderen Bauten mit ähnlicher Gebäudetypologie und aus dem EffizienzhausPlus-Netzwerk vergleichend gegenübergestellt.

Die Baukosten für das vorliegende Projekt sind in der nachfolgenden Auflistung als Brutto-Kosten aufgeführt.

KG 300: 10.843.000 € (927 €/m²$_{BGF}$)

KG 400: 6.015.000 € (514 €/m²$_{BGF}$)

In Abbildung 54 sind die Anteile der einzelnen Kostengruppen dargestellt. Die KG 300 – Baukonstruktion hat mit 54 % den höchsten Anteil. Der nächstgrößte Anteil geht auf die KG 400 mit rund 25 % zurück. Diese Kostengruppe beinhaltet die Komponenten der technischen Anlagen im Gebäude. Zusammen sind diese beiden Kostengruppen für rund 80 % der Gesamtkosten verantwortlich (ohne Berücksichtigung der Grundstückskosten der KG 100).

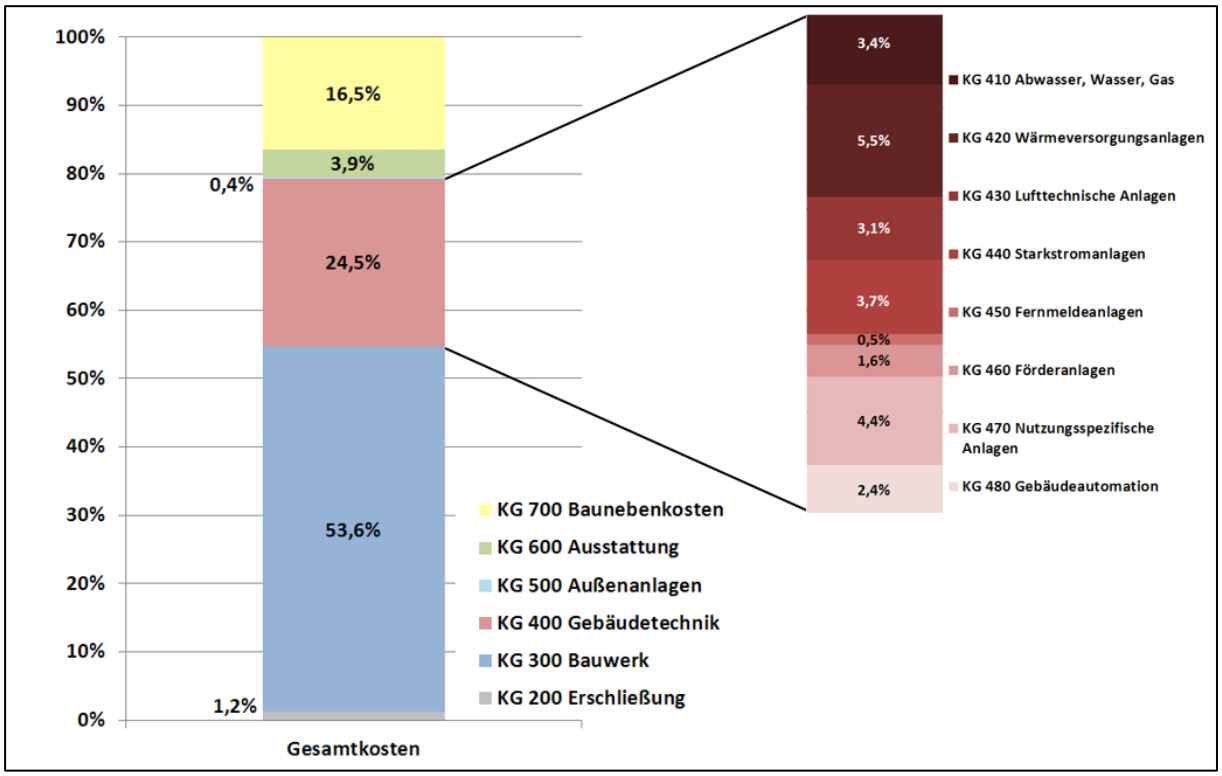


Abbildung 54: Anteile der Kostengruppen an den Gesamtkosten

Die Kostengruppe 400 beinhaltet die Komponenten der technischen Anlagen im Gebäude. Die Aufschlüsselung der Kostengruppe 400 zeigt die einzelnen Anteile der technischen Anlagen für z.B. die Wärmeversorgung, Lüftung und die PV-Anlage.

Folgende Einzelkomponenten im Aktiv-Stadthaus waren hierbei essentiell für das Erreichen des EffizienzhausPlus-Standards:

Abwasserwärmetauscher:	169.000 €	(14 €/m²$_{BGF}$)
Wärmepumpe:	157.000 €	(13 €/m²$_{BGF}$)
Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung:	715.000 €	(61 €/m²$_{BGF}$)
PV-Anlage Dach und Batteriespeicher: (PV 250 kWp, LiFePo-Speicher 250 kWh)	604.000 €	(52 €/m²$_{BGF}$)
PV-Anlage Fassade:	884.650 €	(76 €/m²$_{BGF}$)

Als Vergleichswerte zur Einordnung der Baukosten (KG 300 + 400) sind hierzu Projektkosten von realisierten Bauvorhaben der ABG FRANKFURT HOLDING in Tabelle 25 aufgeführt. Die flächenbezogenen Bauwerkskosten der KG 300 liegen rund 20 bis 25 % über den Vergleichsprojekten ohne Tiefgarage. Die KG 400 im Aktiv-Stadthaus hat im Vergleich zu den aufgeführten Projekten Investitionsmehrkosten von 40 bis 100 %. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Mehrkosten für die Sonderkomponenten zu niedrigeren Kosten im Betrieb führen. So ist die Nutzung der PV-Dachanlage über die gesamte Nutzungsphase absolut wirtschaftlich.

Tabelle 25: Kostenvergleich KG 300 + 400

	Baujahr	KG 300	KG 400	Baustandard	Anmerkungen
	[-]	[€/m²$_{BGF}$]	[€/m²$_{BGF}$]	[-]	[-]
Aktiv-Stadthaus	2015	927	514	KfW 40	ohne TG
Projekt 1	2011-2012	718	237	EnEV	ohne TG
Projekt 2	2011-2012	756	252	EnEV	ohne TG
Projekt 3	2013-2014	1.543	372	EnEV - 30 %	mit TG
Projekt 4	2013-2014	1.381	325	EnEV - 30 %	mit TG

In Abbildung 55 sind die Bruttokosten (KG 300 + 400) der Modellprojekte des EffizienzhausPlus-Netzwerks abgebildet. Diese sind hauptsächlich Einfamilienhäuser und weisen eine mittlere Kostenspanne von 1.000 bis 2.000 €/m²$_{Nutzfläche}$ (Nutzfläche = A_N). Das Aktiv-Stadthaus hat Bruttokosten von 1.920 €/m²$_{AN}$ bzw. 2.600 €/m²$_{Wfl.}$ und liegt damit innerhalb der Kostenspanne der Modellvorhaben.

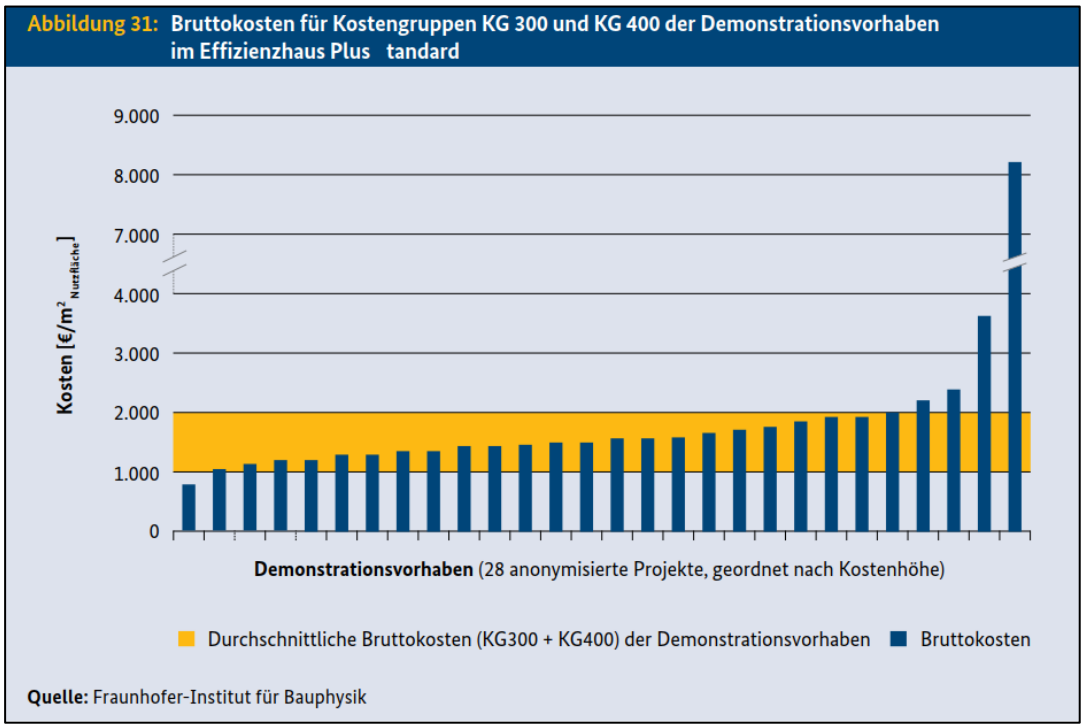


Abbildung 55: Kostenübersicht der Modellvorhaben EffizienzhausPlus-Netzwerk [3]

7.2 Kosten Geräte

„Alle Wohnungen sind barrierefrei zugänglich und verfügen über eine hochwertige Ausstattung. Parkett mit Fußbodenheizung, eine Einbauküche mit Energiespargeräten, weitere Geräte wie Waschmaschine und Wäschetrockner sowie modern gestaltete Bäder, Balkon, Terrasse oder Loggia gehören in diesem Haus zum Standard" [4].

Die ABG FRANKFURT HOLDING als Vermieter hat entschieden, die Wohnungen grundlegend möbliert mit Haushaltsgeräten der höchsten Effizienzklasse auszustatten. Dadurch ist bereits durch die vorhandene Geräte-Infrastruktur der Grundstein für einen reduzierten Haushaltsstrombedarf gelegt. Die nachfolgende Kostenübersicht enthält beispielhafte Kosten für die Geräteausstattung der Wohnungen durch den Bauherrn.

Tabelle 26: Übersicht Investitionskosten für Haushaltsgeräte

Gerät	Effizienzklasse	Kosten [€]
Herd	A	370
Backofen	k. A.	230
Dunstabzugshaube	k. A.	860
Spülmaschine	A+++	1.070
Waschmaschine	A+++	1.210
Wäschetrockner	A++	1.000

7.3 Mietkostenvergleich

Die Wohnungen im Aktiv-Stadthaus werden vermietet. Im Gegensatz zu selbst genutzten Gebäuden hat der Bewohner nicht die Investitionskosten als Referenzgröße für die Bewertung von günstigem Wohnraum im Blick, sondern die auf dem Wohnungsmarkt in Frankfurt gehandelten Mietkosten.

Abbildung 56 enthält dazu ein Mietkostenvergleich zwischen einer Beispielwohnung im Aktiv-Stadthaus und dem Mietspiegel der Stadt Frankfurt. Für den korrekten Vergleich ist zu berücksichtigen, dass im Aktiv-Stadthaus die Wohnungen mit einer Energieflatrate vermietet werden, die auf die Kaltmiete aufgeschlagen wird. Die Wärmenutzung ist bei diesem Konzept frei von zusätzlichen Kosten und der Stromverbrauch innerhalb eines festgelegten Kontingents ebenso. Darüber hinaus sind in der Kaltmiete die Ausstattung der Wohnung mit einer komplett möblierten Küche und energieeffizienten Haushaltsgeräten inbegriffen. Unter Berücksichtigung der genannten Ausstattungsmerkmale resultiert für die gewählte 4-Zimmer-Wohnung im **Aktiv-Stadthaus** monatliche Mietkosten von **13,40 €/m²** (netto).

Für den Vergleich werden nun die Mietkosten für eine vergleichbare Wohnung auf Basis des Mietspiegels der Stadt Frankfurt berechnet. Neben der Basis-Nettomiete sind in der Kaltmiete Zu-/Abschläge für Wohnungstyp, Grundriss, Badausstattung und Wohnlage enthalten. Zusätzlich müssen die Kosten für Heizung, Warmwasser und Strom sowie die Kosten für die Haushaltsgeräte in dem Vergleich berücksichtigt werden. Für eine vergleichbare Wohnung in der Frankfurter Innenstadt resultieren auf Basis des **Mietspiegels** Mietkosten von **15,31 €/m²** (netto).

Mietkosten – Beispiel 105,9 m² 4 Zimmer Wohnung

monatlich	Warmmiete ABG	Mietspiegel
Kaltmiete	enthalten	13,89
Heizung + WW	Flatrate	1,22
Strom	2.500 kWh/a	0,12
Küche	mit Herd, Kühlschrank, Spülmaschine…	-
Haushaltsgeräte	A+++ (WM/Trockner)	0,09/-
Lüftung	Mit WRG	-
Warmmiete	**13,40 €/m²**	**15,31 €/m²**

Mainova Classic für 2.500 kWh/a

Ohne Küche, Lüftungsanlage, Trockner

Abbildung 56: Mietkostenvergleich (Nettomiete je Monat)

8 Bewertung

8.1 Energieeffizienz des Modellgebäudes

Die energetische Effizienz des Aktiv-Stadthauses kann als sehr hoch eingestuft werden. In den Auswertungen der Messergebnisse wird bestätigt, dass sowohl die verwendete zentrale Anlagentechnik effizient betrieben wird als auch die Energieverbräuche in den Wohnungen relativ niedrig einzustufen sind.

Die zentrale Wärmepumpe weist gegenüber dem Bedarfswerten (JAZ = 3,3) und vergleichenden Angaben aus der Literatur (JAZ = 3,9) eine deutlich höhere JAZ von 4,3 auf. Bedingt ist der effiziente Wärmepumpenbetrieb u.a. durch das im Projekt realisierte getrennte Verteilnetz für Warmwasserwärme und Heizwärme sowie durch die hervorragenden Wärmequellentemperaturen im Abwasserkanal.

Der niedrige Heizwärmeverbrauch (Nutzenergie) von 19 kWh/(m^2_{AN}·a) liegt zwar höher als der berechnete Bedarf, kann jedoch durch Klimabereinigung und unter Anpassung der Berechnungsmethode an die realen Randbedingungen als absolut plausibel eingestuft werden.

Ebenso liegt der Warmwasserbedarf (Nutzenergie) mit unter 10 kWh/(m^2_{AN}·a) deutlich unter den Bedarfsansätzen.

Der Nutzerstrombedarf in den Wohnungen (Nutzerstrom inkl. Lüftungsstrom) ist bedingt durch die konsequente Geräteausstattung der höchsten Effizienzklasse ebenfalls deutlich unter den bereits ambitionierten Bedarfswerten von 18 kWh/(m^2_{AN}·a) geblieben. Die gemessenen Werte von rund 14 kWh/(m^2_{AN}·a) unterschreiten die Bedarfswerte um über 20 %.

Auf der Verbrauchsseite wurden daher die Effizienzziele weitestgehend übererfüllt und ergeben für ein positives Gesamtbild für den Betrieb der zentralen Komponenten in der Energiezentrale und beim dezentralen Verbrauch in den Wohnungen.

Auf der Erzeugungsseite konnten bedingt durch mehrere Anlagenausfälle die Erzeugungsmengen aus der Berechnung im Betrieb nicht erreicht werden. Die gemessene Stromproduktion liegt im Monitoringzeitraum im Mittel rund 20 % unter den Berechnungswerten. Eine Analyse unter Berücksichtigung der Ausfallzeiten hat jedoch einen grundsätzlich funktionierenden Anlagenbetrieb bestätigen können.

In der Jahresbilanz erzeugt das Aktiv-Stadthaus gemäß der Bilanz nach EffizienzhausPlus in 2016 einen knappen energetischen Überschuss und im Jahr 2017 ein leichtes Defizit von 0,6 kWh/(m^2_{AN}·a). Unter Berücksichtigung des Strombedarfs für Gewerbe und Elektromobilität wird der Überschuss um 1,3 bis 2,3 kWh/(m^2_{AN}·a) verfehlt.

Für das Gebäude resultiert zudem ein hoher Eigenversorgungsgrad mit lokal erzeugter und nutzbar gemachter Energie. Rund 72 % des Energieverbrauchs im Gebäude werden ressourcenschonend lokal und erneuerbar erzeugt.

8.2 Betriebsoptimierung und Verbesserungspotentiale

Das Monitoring im Aktiv-Stadthaus diente seit der Inbetriebnahme im September 2015 neben der Bewertung der energetischen Gebäudeperformance auch der laufenden Betriebsoptimierung. Im Folgenden werden einzelne exemplarische Bereiche dargestellt, in denen Fehler korrigiert bzw. Optimierungen vorgenommen wurden.

- Zu Beginn des Monitorings wurden starke Abweichungen der Stromverbrauchsmengen festgestellt. Eine systematische Analyse mit ergänzenden Handablesungen der Abrechnungszähler hat zu der Erkenntnis geführt, dass für einzelne Zähler falsche Wandlerfaktoren verwendet wurden. Diese wurden korrigiert.
- Detektion von Fehlermeldungen und Störungen an der PV-Fassadenanlage. U. a. durch Probleme bei der Feuerwehrabschaltung (Fehler in der Steuerung)
- Zeitnahe Detektion mehrerer Ausfälle der PV-Dachanlage durch das Monitoring und Information des Anlagenbetreibers
- Feststellung des Ausfalls der Zentralwechselrichterkühlung (Betrieb funktionierte ohne Kühlung) und Identifikation der Fehlerursache durch das Monitoring
- Identifikation von auffälligem Batterieladeverhalten und –ladezustände durch das Monitoring. Batterie war in Betrieb, jedoch einzelne Platinen in den Batteriestrings defekt, die zu einer längeren Außerbetriebnahme des zentralen Stromspeichers führten.
- Optimierung der Vorlauftemperaturen für Warmwasserwärme: Unter Berücksichtigung der Rückmeldungen der Bewohner konnte eine Vorlauftemperatur für den Normalbetrieb von 55 °C gewählt werden. → Optimierter Wärmepumpenbetrieb

Konkrete Verbesserungspotenziale bestehen vor allem im Bereich der Photovoltaikanlage und des zentralen Stromspeichers. Die mehrmals aufgetretenen Störungen und damit verbundenen Ertragsausfälle der PV-Dachanlage sollten vermieden werden. Für eine schnelle Reaktion auf Störungen wurde im Rahmen des Monitorings eine automatische Benachrichtigung an den Anlagenbetreiber eingerichtet, sobald der PV-Ertrag ausbleibt.

Ebenso besteht aufgrund des langen Ausfalls des Stromspeichers in der zweiten Jahreshälfte 2017 ein Verbesserungspotenzial bezüglich der Robustheit der Steuerung des Batteriemanagementsystems und der Platinen in den Batteriestrings. Auf Betreiberseite sollten daher aufgrund der langen Beschaffungszeiträume Ersatzteile vorgehalten werden, um stör- und fehleranfällige Komponenten zeitnahe nach einem Defekt austauschen und den Normalbetrieb wieder aufnehmen zu können.

9 Erfahrungen aus dem sozialwissenschaftlichen Monitoring

Mit dem sozialwissenschaftlichen Monitoring, durchgeführt durch das Berliner Institut für Sozialforschung, wird der Frage nachgegangen, wie alltagstauglich das Gebäude für die Bewohner im Hinblick auf die Gebäudetechnik, das Raumklima und die Energienutzungsgewohnheiten ist. Das Feedback der Mieter trägt zudem zur Optimierung des Gebäudebetriebs im Verlauf der ersten beiden Betriebsjahre bei. Dafür wurden die Mieter zwei Mal zu ihrer Wohnerfahrung mittels Online-Fragebögen befragt. An der ersten Befragung kurz nach Einzug (Oktober 2015 – Februar 2016) nahmen 64 und an der zweiten Befragung sechs bis zwölf Monate (September bis Oktober 2016) später 53 Mieter teil.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Entscheidung der Mieter in ein Effizienzhaus-Plus zu ziehen, in der Lage des Gebäudes, dessen energetischem Konzept und im Grundriss bzw. der Größe der Wohnung zu finden sind. Dass die Energieeffizienz des Gebäudes unter den ersten drei wichtigsten Einzugsmotiven rangiert, deutet auf ein zunehmendes Interesse von Mietern an ressourcenschonender Energiegewinnung und effizientem Energieverbrauch.

Erwartungen und Befürchtungen

Die meisten Mieter sind das erste Mal in ein energieeffizientes Haus gezogen. Dies ist mit verschiedenen Erwartungen und Befürchtungen verbunden. Retrospektiv danach gefragt, zeigt sich, dass ein geringerer Energieverbrauch sowie reduzierte Heizkosten bei beinahe allen, die diese Erwartungen hatten, auch eingetreten sind. Die Befürchtungen, wie entstehender Schimmel durch die Dämmung oder dass die Fenster nicht geöffnet werden könnten, haben sich natürlich nicht bewahrheitet. Jedoch bestätigte sich bei der Mehrheit, die diese Befürchtung hatten, die Störanfälligkeit der Technik.

Haustechnik und Raumklima

Der Umzug in ein energieeffizientes Gebäude mit luftdichten Gebäudehüllen und Belüftungssystemen sowie mit Flächenheizungen bedeutet für viele Mieter eine Umstellung zu ihren früheren Bedingungen und erfordert eine gewisse Eingewöhnungszeit. Die Bewertung des Raumklimas (Raumtemperatur und Luftfeuchtigkeit) fällt etwas unterschiedlich aus. Insgesamt wird sie überwiegend positiv beurteilt, wobei die Bewertung der Luftfeuchtigkeit etwas negativer ausfällt. Das Raumklima im Wohnbereich wird besser bewertet als das im Schlafbereich. Die Mehrheit der Mieter findet die Wohnung in den kalten Jahreszeiten ausreichend warm.

Die Bewertung der Heizungsanlage durch die Mieter ist unterschiedlich. Die Mehrheit ist mit der Funktionsweise zufrieden, jedoch zeigen die Bewertungen zur Heizung, dass die komplexen Beheizungssysteme zum Teil einen erhöhten Einregulierungsbedarf der Technik und einen Gewöhnungsbedarf der NutzerInnen mit sich bringen.

Die Bewertung der Lüftungsanlagen fällt positiver aus. Die Mehrheit der Mieter meint, dass sich die Anlage leicht bedienen lasse und sie zuverlässig funktioniere. Die Meisten finden die Luftqualität in der Wohnung gut. Nur wenige Mieter berichten von Problemen mit der Lüftungsanlage: Hauptkritikpunkte dabei sind vor allem die Geräusche und die mangelnde Regulierbarkeit.

Die Beurteilung der Warmwasserversorgung fällt insgesamt recht positiv aus. Nur einige bemängeln eine unzureichende Temperatur des Warmwassers und zu lange Wartezeiten bis warmes Wasser kommt. Dies ist in den Küchen häufiger der Fall als in den Bädern.

Die Antworten der beiden Fragebogenerhebungen zeigen ein ausgeprägtes Interesse am Energiekonzept des Gebäudes und eine hohe Wohnzufriedenheit, auch wenn das Wohnen ein paar Umgewöhnungen mit sich bringt, wie z.B. der regelmäßige Lüftungsfiltertausch oder die Wärme und Regulierung einer Fußbodenheizung. Die Gebäudetechnik wird mehrheitlich als zuverlässig und leicht zu handhaben beschrieben. Das Raumklima in Wohn- und Schlafbereich wird überwiegend als angenehm wahrgenommen.

Die zeitnahe Rückmeldung zum Energieverbrauch über das Nutzerinterface wird als sinnvoll erachtet und i.d.R. wöchentlich genutzt. Das Feedback zum eigenen Strom- und Wärmeverbrauch ist dabei von größtem Interesse. Der Aussage „Ich bin motiviert mit meinem Verhalten zu einer guten Energiebilanz des Hauses beizutragen“ stimmte die Mehrheit der befragten Bewohner zu. Es ist davon auszugehen, dass neben der hocheffizienten Geräteausstattung der Wohnungen auch diese Motivation, auf den Stromverbrauch zu achten, zum bilanziellen Plus des Gebäudes beiträgt.

Dass die Mehrzahl der Befragten ihre Wohnung „ganz sicher“ oder „ziemlich wahrscheinlich“ an Freunde und Verwandte weiterempfehlen würde, verdeutlicht die grundsätzlich hohe Akzeptanz dieses Gebäudes bei seinen Bewohnern.

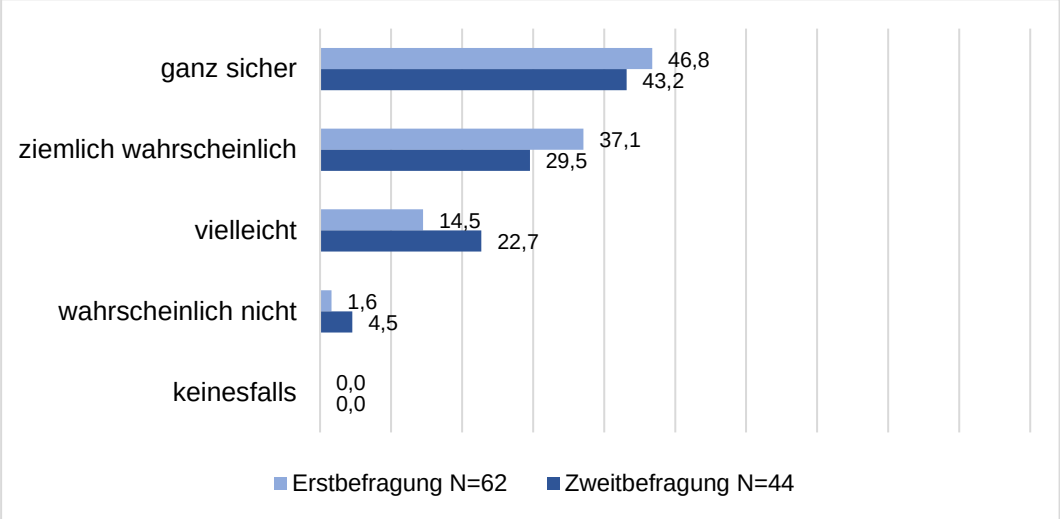


Abbildung 57: Würden Sie Ihren Verwandten und Freund das Wohnen im Aktiv-Stadthaus empfehlen?

10 Forschungsprojekt Nutzerinterface

10.1 Zielsetzung

In einem weiteren Forschungsprojekt wurde ein Nutzerinterface für den Einsatz im Aktiv-Stadthaus entwickelt und getestet. Jede Wohnung erhält über ein Display Informationen über den aktuellen Stand des Strom- und Wärmekontingents und Vergleiche zum Rest des Gebäudes.

Neben innovativen Technologien der Energieerzeugung sollen die Nutzer über ein Nutzerinterface zum Energiesparen angeregt werden. Über Touchpanels in den Wohneinheiten werden ihr Energieverbrauch sowie die regenerative Energieerzeugung des Gebäudes sichtbar gemacht. Ein Warmmietenkonzept mit einem bedarfsgerechten Energieguthaben soll zudem einen verstärkten Anreiz zur Energieeinsparung schaffen. Jede Wohnung erhält für die Energiedienstleistungen Budgets, die mit der Miet- bzw. Nebenkostenzahlung abgegolten sind. Darüber hinaus gehende Verbräuche sind mit Marktpreisen zu begleichen.

Das Projekt soll die Voraussetzungen für einen spielerischen Umgang der Gebäudenutzer mit der Schnittstelle Mensch:Technik:Energie hinsichtlich Hardware, Software und Benutzeroberfläche schaffen. Nicht nur der Energieverbrauch an sich, sondern auch für den immer wichtiger werdende Eigenversorgungsgrad der regenerativ erzeugten Energie soll der Nutzer sensibilisiert werden. Der Nutzereinfluss auf Energieeinsparung und die Erhöhung des Eigenversorgungsgrads sollen, neben den in Bezug auf Lastverschiebepotentiale der Haushaltsgeräte ermittelten Angaben, möglichst in dem laufenden Monitoring untersucht werden.

10.2 Technische Umsetzung

Für alle Wohneinheiten in der Speicherstraße ist ein festintegriertes Nutzerinterface (NIF) auf einem iPad installiert. Es wurde als App konzipiert und ist primär für das gebräuchliche Hochformat optimiert. Durch die webbasierte Programmierung kann das NIF ebenfalls über eine Internetseite vom Computer aus angesehen werden. In den Wohnungen befindet sich im Eingangsbereich an der Wand eine Halterung mit dem Nutzerdisplay. Folgende Inhalte sind darin enthalten:

- Datums- und Zeitanzeige
- Aktuelles Wetter
- Prognose über die Verfügbarkeit von Sonnenstrom
- Verbrauchverhalten der letzten sieben Tage
- Platzierung beim Energieverbrauch im Haus
- Verbrauchsinformation über das Strom- und Wärmekontingent
- Energieverbrauch und Solarstromerzeugung des Gesamtgebäudes
- Mobilitätsangebot des Car-Sharing-Anbieters „Book'n'drive"
- Benutzerhandbuch „Nutzerdisplay"

Im NIF sind drei Nutzermodi verfügbar, die unterschiedliche Informations- und Funktionstiefen ermöglichen. Der Mietermodus ist die Basisvariante. Der Experten- und der Aktivmodus sind Versionen mit einem erweiterten Informations- bzw. Funktionsgehalt. In fünf Wohnungen ist über das NIF außerdem die Steuerung smarter Haushaltsgeräte möglich. Zudem werden außerdem die Verbräuche der Haushaltsgeräte erfasst und angezeigt sowie ein Energiemanagement angeboten, das die Nutzung der Haushaltsgeräte zu den Ertragszeiten des Hauses optimieren hilft. Im Aktiv-Stadthaus wird in den meisten Wohneinheiten der Mietermodus verwendet (64 Wohneinheiten). Fünf Wohnungen haben im Expertenmodus Einsicht in die detaillierte Aufschlüsselung des Stromverbrauchs nach Verbrauchern. Weiteren fünf Wohnungen steht die Option offen, über das iPad den Betrieb der Haushaltsgeräte zu steuern und zu programmieren, also zum Beispiel den Start der Spülmaschine in das Zeitfenster am Tag zu legen, an dem Sonnenschein vorhergesagt wurde und damit den Energieeigenverbrauch zu optimieren.

10.3 Grafische Umsetzung

Im oberen Kopfbereich der Startseite erhält der Nutzer allgemeine Informationen zu Datum, Uhrzeit, Wetter und optional zur Raumtemperatur (nur Aktiv- und Expertenmodus). Im zentralen Bereich sind folgende Menüpunkte vorhanden (siehe Abbildung 58):

- Sonnenstrom
- Feedback
- Ranking
- Strom
- Wärme
- Aktiv-Stadthaus

Sonnenstrom bezeichnet den Überschuss an regenerativ erzeugtem Eigenstrom des Aktivs-Stadthauses (gewonnen über die hauseigenen Photovoltaik-Anlagen). Angezeigt wird, wann oder wie lange er überschüssig vorhanden ist. Im Untermenü wird ebenfalls die prognostizierte Verfügbarkeit bis zu 48 Stunden angezeigt. Der Nutzer erhält damit gewissermaßen eine Orientierungshilfe, wann er seinen Verbrauch mit diesen Zeiträumen abstimmen möchte.

Im Menüpunkt **Feedback** erfährt der Nutzer, ob er in den vergangenen sieben Tagen seine Energieguthaben ausgeschöpft hat. Jedes Budget (Strom, Heizung oder Trinkwarmwasser) wird durch einen Stern repräsentiert. Dieser zeigt an, ob man sein Guthaben an mehr als drei Tagen über- oder unterschritten hat.

Im Punkt **Ranking** wertet das NIF aus, in wie weit der Bewohner die Energiebudgets ausschöpft und zeigt seine durchschnittliche Position im Vergleich zu anderen Mietern in der Hausgemeinschaft an.

Unter **Strom** sieht der Mieter, wie viel er aktuell von seinem Energiebudget bereits aufgebraucht hat. Im Untermenü kann der Verlauf des individuellen Verbrauchs im Diagramm angesehen werden und der Nutzer kann verschiedene Zeitspannen wählen (Jahr/Woche) oder seinen Verbrauch zurückverfolgen.

Der Punkt **Wärme** zeigt an, wie viel Energie für Heiz- und Trinkwasserwärme benötigt wird. Beide Komponenten sind unter dem Begriff „Wärme“ zusammengefasst. Der Bildschirm ist analog zum Strom-Screen gestaltet. Der Nutzer kann dementsprechend seine Daten in der vertrauten, gleichen Weise erfassen.

Unter **Aktiv-Stadthaus** wird der Anteil des aktuellen Stromverbrauchs dargestellt, der durch die hauseigenen Photovoltaikanlagen gedeckt wird.

Abbildung 58: Startseite des Nutzerinterfaces

Die Informationen und Analysen zum Verbrauch werden ergänzt durch weitere Dienste, die unter anderem den Nutzer beim Energiemanagement unterstützen. Sie sind im Bereich der Statusleiste aufgereiht: Benutzerhandbuch, Energiespartipps, Mobilität (Internetseite von „book‘n’drive“, die im Gebäude ansässig sind), Profile, Gerätesteuerung (Aktivmodus), Mitteilungen (interner Mitteilungsdienst) und Login.

Insgesamt sollen Bewohner von Mehrfamilienhäusern im Effizienzhaus-Plus-Standard durch ein spielerisches Informationstool via Touch Panel beim Optimieren ihres Energieverbrauchs unterstützt werden. Es legt den Energieverbrauch auf Nutzer- und Gebäudeebene offen und kündigt die Verfügbarkeit von regenerativ erzeugtem PV-Strom an. Im Gegensatz zu marktüblichen Modellen liegt der Fokus dabei nicht auf der Gebäudeautomation, sondern auf der Nutzerinformation.

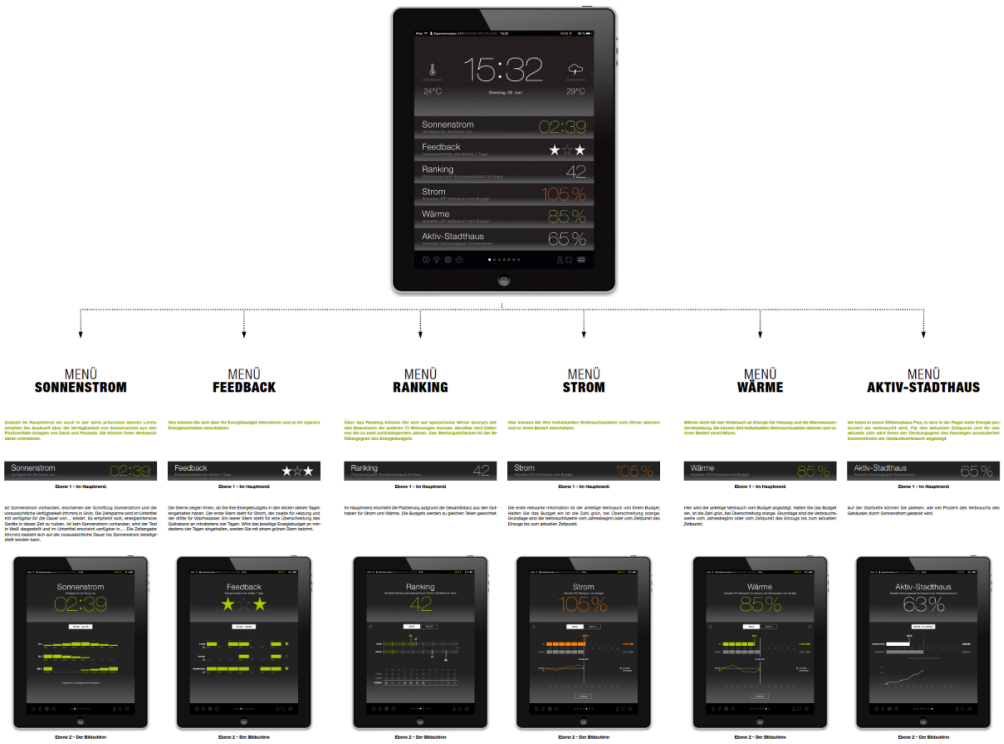


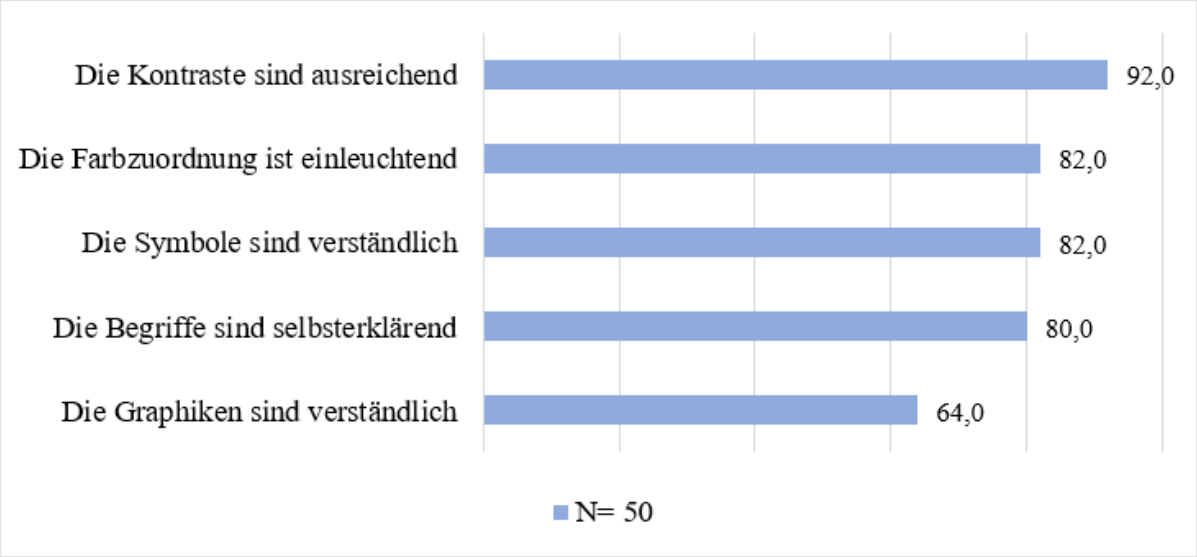
Abbildung 59: Detaillierte Übersicht der Menüstruktur des Nutzerinterfaces im Aktiv-Stadthaus

10.4 Nutzerbefragung während der Entwicklung

Zur Bewertung der Nutzerfreundlichkeit und Bedienbarkeit fand ein umfängliches sozialwissenschaftliches Monitoring statt. Schon nach der Entwicklung des ersten Prototyps fanden ein Usability Test und weitere Untersuchungen statt. Ziel dieser sozialwissenschaftlichen Studien war es, Hinweise zur Überarbeitung bezüglich der Bedienbarkeit, Übersichtlichkeit und Verständlichkeit des Nutzerinterfaces (NIF) zu bekommen.

Im Anschluss wurden vor allem die grundsätzliche Farbgebung des NIF, die Struktur und Symbolik einzelner Menüpunkte überarbeitet.

Das Nutzerinterface (NIF) im Frankfurter Aktiv-Stadthaus wird vom Großteil der Mieter benutzt. Die wichtigsten Menüpunkte des Nutzerinterfaces sind für die Befragten die Angaben zum Strom, zur Wärme und das Ranking. Nach eigenen Angaben kommen die Mieter mit der Benutzung des NIFs überwiegend gut zurecht, was auf die intuitive Bedienbarkeit des iPads und die Gestaltung der Software zurückzuführen ist. Letztere wird von den Mietern als gut und verständlich beurteilt.



** Kategorien "stimmt genau" und "stimmt eher" sind zusammengefasst dargestellt*

Abbildung 60: Wie beurteilen Sie die Gestaltung des Nutzerinterfaces? (in %)

Für die Mehrheit der Nutzer hat das NIF eine hohe Bedeutung in ihrem Alltag erlangt, was auch durch die Nutzungshäufigkeit belegt wird: Über zwei Drittel benutzen das NIF mindestens einmal pro Woche.

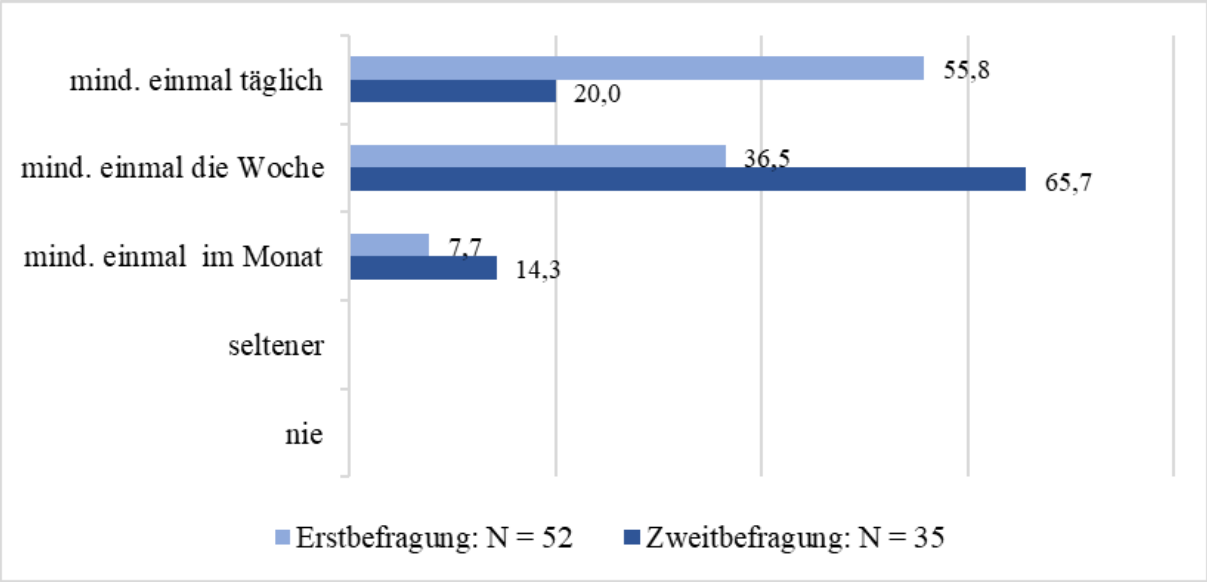


Abbildung 61: Wie häufig nutzen Sie das Nutzerinterface? (in %)

Aber es gab auch Probleme mit dem NIF, an deren Lösung durch das Nutzer-Feedback gearbeitet wird. Ein Drittel der Bewohner berichtete von den unterschiedlichen Hard- und Softwareproblemen. Hauptkritikpunkte sind dabei einerseits das häufige Abstürzen und die Trägheit des Systems. Anderseits wird auch bemängelt, dass die dargestellten Verbrauchsdaten nicht mit dem wahrgenommenen Nutzungsverhalten übereinstimmen.

Insgesamt wird die Verbrauchsrückmeldung via Nutzerinterface positiv beurteilt: Sowohl die Rückmeldung der eigenen Verbräuche wird von einer Mehrheit als hilfreich zum Energiesparen und der Vergleich mit den Verbräuchen der anderen Hausbewohner als motivierend empfunden. Die Skepsis einiger Mieter gegenüber dem Ranking und den dargestellten Verbrauchswerten ist dagegen gering. Eine Belohnung, wenn das Strombudget nicht ausgeschöpft wurde, fänden viele Mieter wünschenswert. Die absolute Mehrheit ist aber auch so motiviert, durch ihr Verhalten zu einer guten Energiebilanz des Gebäudes beizutragen.

11 Literaturverzeichnis

[1] T. Schuster, „Heizwärmebedarf und Heizwärmeverbrauch in Niedrigstenergiebäuden," HfT Stuttgart, Stuttgart, 2018.

[2] Fraunhofer ISE, „Wärmepumpen Effizienz - Abschlussbericht," Freiburg, 2011.

[3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Wege zum EffizienzhausPlus, Berlin, 2016.

[4] ABG Frankfurt Holding AG, „www.abg-fh.com," [Online]. Available: https://www.abg-fh.com/projekte/projekte-daten/3-abgeschlossen/speicherstrasse.php. [Zugriff am 11 04 2018].

[5] IWU, „Gradtagszahlen_Deutschland.xls," 20 März 2018. [Online]. Available: http//www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/.../Gradtagszahlen_Deutschland.xls.

12 Abkürzungsverzeichnis

A_N	Energiebezugsfläche nach EnEV
EnEV	Energieeinsparverordnung
EVG	Eigenversorgungsgrad
HWB	Heizwärmebedarf
JAZ	Jahresarbeitszahl
k. A.	keine Angabe
KG	Kostengruppe
LiFePo	Lithium-Eisen-Phosphat
NIF	Nutzerinterface
PV	Photovoltaik
TG	Tiefgarage
WE	Wohneinheit

Anhang A – Detaillierte Energieauswertung

Tabelle 27: Zusammenstellung der Endenergie, 2016

Monat	Bezug	Photovoltaik			Hausverbrauch										Summe Hausverbrauch	
	Netz-bezug	PV-Ertrag	Ein-speisung	Eigen-verbrauch	WP HW + TWW	Gaskessel HW + WW	Aufzug	Beleuchtung (Treppenhaus)	Verluste Batterie und ZWR	Allgemein-strom inkl. Hilfsenergie	Nutzerstrom inklusive Lüftung	Gewerbe	E-Mobilität	Bilanz-ierungs-fehler	Gesamt	Gesamt ohne E-Mobilität und Gewerbe
	Strom	Strom	Strom	Strom	Strom	Gas	Strom	Strom	Strom	Strom	Strom	Strom	Strom	Strom	Endenergie	Endenergie
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
Jan	23.666	**4.115**	683	3.432	10.653	20	474	1.403	348	2.735	10.058	208	408	810	27.118	**26.502**
Feb	18.526	**8.338**	2.291	6.047	9.112	847	449	1.351	537	2.590	9.022	295	372	844	25.419	**24.753**
Mrz	13.768	**19.151**	8.238	10.912	8.681	46	471	1.175	587	2.480	9.693	319	490	784	24.727	**23.918**
Apr	8.263	**31.510**	18.462	13.048	5.824	280	468	1.099	870	2.093	9.368	625	415	549	21.592	**20.552**
Mai	5.477	**35.904**	23.067	12.837	2.793	4.070	484	1.188	848	1.674	9.827	819	334	347	22.384	**21.230**
Jun	3.137	**34.760**	20.079	14.681	2.593	1.153	469	1.109	859	1.383	9.763	991	403	248	18.970	**17.576**
Jul	3.852	**39.681**	25.683	13.997	2.558	0	480	1.138	998	1.258	9.689	979	390	360	17.849	**16.480**
Aug	3.672	**36.196**	22.551	13.645	2.438	20	479	1.081	974	1.225	9.456	964	387	313	17.337	**15.986**
Sep	4.646	**26.614**	14.269	12.345	2.334	0	463	1.117	775	1.210	9.327	1.063	363	340	16.991	**15.565**
Okt	13.060	**13.702**	3.097	10.605	5.766	0	507	1.308	782	2.075	11.160	850	529	688	23.665	**22.286**
Nov	20.714	**7.073**	1.003	6.070	9.722	10	463	1.287	549	2.504	10.569	956	368	365	26.793	**25.470**
Dez	25.442	**4.369**	147	4.222	11.887	0	476	1.278	387	2.643	11.019	840	463	670	29.664	**28.360**
2016	**144.221**	**261.412**	**139.571**	**121.841**	**74.361**	**6.446**	**5.684**	**14.534**	**8.513**	**23.871**	**118.951**	**8.908**	**4.922**	**6.319**	**272.508**	**258.678**

- WP enthält rein den Verdichterstrom für die WP
- Umwälzpumpen sind in der Kategorie Allgemeinstrom inkl. Hilfsenergie enthalten
- ZWR = Zentralwechselrichter

Tabelle 28: Zusammenstellung der Endenergie, 2017

Monat	Bezug	Photovoltaik			Hausverbrauch										Summe Hausverbrauch	
	Netz-bezug	PV-Ertrag	Ein-speisung	Eigen-verbrauch	WP HW + TWW	Gaskessel HW + WW	Aufzug	Beleuchtung (Treppenhaus)	Verluste Batterie und ZWR	Allgemein-strom inkl. Hilfsenergie	Nutzerstrom inklusive Lüftung	Gewerbe	E-Mobilität	Bilanz-ierungs-fehler	Gesamt	Gesamt ohne E-Mobilität und Gewerbe
	Strom	Strom	Strom	Strom	Strom	Gas	Strom	Strom	Strom	Strom	Strom	Strom	Strom	Strom	Endenergie	Endenergie
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
Jan	27.042	**5.472**	574	4.898	14.161	92	470	1.235	368	3.220	11.124	589	434	339	32.031	**31.009**
Feb	16.640	**11.294**	2.723	8.571	9.506	0	429	1.200	495	2.167	9.688	942	367	419	25.211	**23.902**
Mrz	10.076	**26.037**	12.563	13.473	7.339	71	478	1.094	769	1.967	10.243	805	451	403	23.621	**22.365**
Apr	4.866	**33.306**	18.778	14.528	4.408	2.559	457	1.025	849	1.702	9.740	731	313	169	21.954	**20.910**
Mai	11.378	**17.862**	9.845	8.017	3.910	1.460	483	981	538	1.447	10.335	935	403	363	20.855	**19.517**
Jun	2.259	**41.638**	26.521	15.117	2.546	20	473	898	1.010	1.206	9.777	975	257	235	17.397	**16.164**
Jul	3.303	**37.092**	22.830	14.262	2.587	0	473	1.091	910	1.222	10.018	936	331	-4	17.564	**16.297**
Aug	4.933	**34.616**	21.434	13.182	2.323	10	482	1.134	871	1.239	10.311	929	369	456	18.125	**16.826**
Sep	10.888	**25.189**	17.115	8.075	3.419	0	472	1.207	303	1.380	10.551	828	269	534	18.963	**17.865**
Okt	15.559	**14.285**	7.435	6.850	5.124	0	485	1.307	171	1.778	11.302	974	358	909	22.408	**21.077**
Nov	22.652	**6.107**	2.320	3.787	8.647	143	467	1.349	75	2.289	11.504	877	438	793	26.582	**25.267**
Dez	27.231	**2.727**	294	2.433	11.016	1.345	477	1.354	35	2.719	11.822	1.004	534	703	31.009	**29.472**
2017	**156.826**	**255.626**	**142.433**	**113.193**	**74.986**	**5.701**	**5.645**	**13.875**	**6.393**	**22.336**	**126.415**	**10.525**	**4.524**	**5.320**	**275.720**	**260.670**

- WP enthält rein den Verdichterstrom für die WP
- Umwälzpumpen sind in der Kategorie Allgemeinstrom inkl. Hilfsenergie enthalten
- ZWR = Zentralwechselrichter

Tabelle 29: Gesamtübersicht Energie 2016

Aktiv-Stadthaus, Frankfurt

Ergebnisse Monitoring Effizienzhaus Plus **Jahr 2016** **Monatsbilanz** **Jahr 2016**

Verbrauch/ Produktion Strom und Wärme	Monat	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember	**Gesamt**
Öffentliches Stromnetz														
Versorgung aus dem Netz	[kWh]	23.666	18.526	13.768	8.263	5.477	3.137	3.852	3.672	4.646	13.060	20.714	25.442	**144.221**
Rückspeisung in das Netz	[kWh]	683	2.291	8.238	18.462	23.067	20.079	25.683	22.551	14.269	3.097	1.003	147	**139.571**
Aktive Erschließung von Umweltenergie Photovoltaik														
PV-Produktion gesamt (Fassade+Wechselrichter)	[kWh]	4.115	8.338	19.151	31.510	35.904	34.760	39.681	36.196	26.614	13.702	7.073	4.369	**261.412**
PV-Produktion Fassade (AC)	[kWh]	762	1.331	3.428	5.752	6.542	5.308	6.326	4.120	1.800	2.302	991	434	**39.095**
PV-Produktion Dach	[kWh]	3.353	7.007	15.723	25.758	29.363	29.452	33.354	32.076	24.815	11.400	6.082	3.934	**222.317**
SZ12	[kWh]	3.767	7.801	18.564	30.640	35.057	33.901	38.682	35.222	25.840	12.920	6.524	3.982	**252.899**
Batterie und Wechselrichterverluste (zentral)	[kWh]	348	537	587	870	848	859	998	974	775	782	549	387	**8.513**
Batterieverluste	[kWh]	303	440	360	496	420	430	513	507	414	623	466	334	**5.306**
Verluste Zentralwechselrichter	[kWh]	45	97	227	373	428	429	485	467	361	159	83	53	**3.207**
PV-Eigenverbrauch	[kWh]	3.432	6.047	10.912	13.048	12.837	14.681	13.997	13.645	12.345	10.605	6.070	4.222	**121.841**
PV-Eigennutzungsgrad	[%]	83%	73%	57%	41%	36%	42%	35%	38%	46%	77%	86%	97%	**47%**
PV-Eigenversorgungsgrad	[%]	13%	25%	44%	61%	70%	82%	78%	79%	73%	45%	23%	14%	**46%**
PV-Rückspeisung	[kWh]	683	2.291	8.238	18.462	23.067	20.079	25.683	22.551	14.269	3.097	1.003	147	**139.571**
Abwasserwärmetauscher														
Stromverbrauch Umwälzpumpe	[kWh]	911	730	643	413	152	125	121	117	111	543	815	858	**5.538**
gelieferte Wärme AWT	[kWh]	40.070	33.214	30.789	19.387	8.431	7.461	7.330	6.928	6.610	20.477	34.869	43.309	**258.875**
Anteil Abw an Gesamtwärme	%	77,1%	74,8%	75,2%	76,1%	56,9%	68,3%	74,5%	73,1%	73,0%	75,8%	76,5%	76,5%	**74,8%**
Wärmeerzeuger el. Wärmepumpe														
Stromverbrauch	[kWh]	10.653	9.112	8.681	5.824	2.793	2.593	2.558	2.438	2.334	5.766	9.722	11.887	**74.361**
Wärmeerzeugung	[kWh]	51.750	43.554	40.884	25.191	10.839	9.801	9.840	9.458	9.060	27.022	45.588	56.635	**339.623**
JAZ (AZ1)	[-]	4,48	4,43	4,38	4,04	3,68	3,61	3,67	3,70	3,71	4,28	4,33	4,44	4,25
Gaskessel														
Gasverbrauch	[kWh]	20	847	46	280	4.070	1.153	0	20	0	0	10	0	**6.446**
Wärmeerzeugung	[kWh]	20	830	45	275	3.990	1.130	0	20	0	0	10	0	**6.320**
Speichersysteme Hausbatterie														
Hausbatterie Abgabe	[kWh]	2.171	2.396	4.073	3.444	4.436	6.387	4.637	5.389	5.631	3.896	2.085	1.579	**46.124**
Hausbatterie Ladung	[kWh]		2.548	4.145	3.652	4.568	6.529	4.862	5.608	5.757	4.231	2.263	1.625	**45.788**
Pufferspeicher														
Wärme Speichereingang	[kWh]	51.980	44.384	40.930	25.466	14.829	10.931	9.840	9.478	9.060	27.022	45.598	56.635	**346.153**
Wärme Speicherausgang WW	[kWh]	14.290	13.513	14.645	13.781	12.231	10.689	9.442	8.986	8.708	13.568	16.287	19.020	**155.161**
Wärme Speicherausgang HW	[kWh]	36.700	30.197	25.583	11.393	2.770	180	0	0	0	13.030	28.565	36.627	**185.046**
Verluste Pufferspeicher	%	-1,9%	-1,5%	-1,7%	-1,1%	1,2%	-0,6%	-4,0%	-5,2%	-3,9%	-1,6%	-1,6%	-1,7%	**-1,7%**
Nutzenergie														
Haushaltsstrom	[kWh]	10.058	9.022	9.693	9.368	9.827	9.763	9.689	9.456	9.327	11.160	10.569	11.019	**118.951**
Gewerbe	[kWh]	208	295	319	625	819	991	979	964	1.063	850	956	840	**8.908**
Allgemeinstrom	[kWh]	3.702	3.661	3.483	3.247	3.194	2.835	2.754	2.669	2.678	3.347	3.440	3.539	**38.550**
Elektromobilität	[kWh]	408	372	490	415	334	403	390	387	363	529	368	463	**4.922**
Bilanzierungsungenauigkeit	[kWh]	810	844	784	549	347	248	360	313	340	688	365	670	**6.319**

Tabelle 30: Gesamtübersicht Energie 2017

Aktiv-Stadthaus, Frankfurt

Ergebnisse Monitoring Effizienzhaus Plus **Jahr 2017** **Monatsbilanz** **Jahr 2017**

Verbrauch/ Produktion Strom und Wärme	Monat	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember	**Gesamt**
Öffentliches Stromnetz														
Versorgung aus dem Netz	[kWh]	27.042	16.640	10.076	4.866	11.378	2.259	3.303	4.933	10.888	15.559	22.652	27.231	**156.826**
Rückspeisung in das Netz	[kWh]	574	2.723	12.563	18.778	9.845	26.521	22.830	21.434	17.115	7.435	2.320	294	**142.433**
Aktive Erschließung von Umweltenergie Photovoltaik														
PV-Produktion gesamt (Fassade+Wechselrichter)	[kWh]	5.472	11.294	26.037	33.306	17.862	41.638	37.092	34.616	25.189	14.285	6.107	2.727	**255.626**
PV-Produktion Fassade (AC)	[kWh]	1.112	2.212	5.109	6.388	5.435	5.730	5.990	6.469	4.695	2.681	1.033	383	**47.237**
PV-Produktion Dach	[kWh]	4.360	9.082	20.928	26.918	12.427	35.908	31.102	28.147	20.494	11.603	5.075	2.344	**208.388**
SZ12	[kWh]	5.104	10.799	25.268	32.457	17.324	40.629	36.182	33.745	24.886	14.113	6.032	2.693	**249.233**
Batterie und Wechselrichterverluste (zentral)	[kWh]	368	495	769	849	538	1.010	910	871	303	171	75	35	**6.393**
Batterieverluste	[kWh]	308	366	466	458	360	486	457	462	0	0	0	0	**3.363**
Verluste Zentralwechselrichter	[kWh]	60	129	302	391	178	523	453	409	303	171	75	35	**3.030**
PV-Eigenverbrauch	[kWh]	4.898	8.571	13.473	14.528	8.017	15.117	14.262	13.182	8.075	6.850	3.787	2.433	**113.193**
PV-Eigennutzungsgrad	[%]	90%	76%	52%	44%	45%	36%	38%	38%	32%	48%	62%	89%	**44%**
PV-Eigenversorgungsgrad	[%]	15%	34%	57%	75%	41%	87%	81%	73%	43%	31%	14%	8%	**42%**
PV-Rückspeisung	[kWh]	574	2.723	12.563	18.778	9.845	26.521	22.830	21.434	17.115	7.435	2.320	294	**142.433**
Abwasserwärmetauscher														
Stromverbrauch Umwälzpumpe	[kWh]	1.062	684	501	272	226	119	111	117	195	369	699	804	**5.159**
gelieferte Wärme AWT	[kWh]	51.532	33.890	25.170	14.260	12.150	7.220	6.890	7.330	10.480	17.470	31.722	40.618	**258.732**
Anteil Abw an Gesamtwärme	%	76,5%	76,5%	76,3%	66,3%	69,1%	74,4%	74,8%	74,6%	74,1%	74,9%	75,6%	74,4%	**74,7%**
Wärmeerzeuger el. Wärmepumpe														
Stromverbrauch	[kWh]	14.161	9.506	7.339	4.408	3.910	2.546	2.587	2.323	3.419	5.124	8.647	11.016	**74.986**
Wärmeerzeugung	[kWh]	67.246	44.310	32.930	18.990	16.160	9.680	9.210	9.820	14.140	23.310	41.793	53.267	**340.856**
JAZ (AZ1)	[-]	4,42	4,35	4,20	4,06	3,91	3,63	3,41	4,02	3,91	4,24	4,47	4,51	4,25
Gaskessel														
Gasverbrauch	[kWh]	92	0	71	2.559	1.460	20	0	10	0	0	143	1.345	**5.701**
Wärmeerzeugung	[kWh]	90	0	70	2.509	1.431	20	0	10	0	0	140	1.319	**5.589**
Speichersysteme Hausbatterie														
Hausbatterie Abgabe	[kWh]	1.716	2.775	5.005	5.240	2.437	4.696	4.931	3.264	0	0	0	0	**30.064**
Hausbatterie Ladung	[kWh]	2.136	2.948	5.398	5.686	2.449	4.994	5.172	3.503	0	0	0	0	**32.287**
Pufferspeicher														
Wärme Speichereingang	[kWh]	67.336	44.310	33.000	21.499	17.591	9.700	9.210	9.830	14.140	23.310	41.933	54.586	**346.445**
Wärme Speicherausgang WW	[kWh]	19.523	16.100	15.389	13.231	12.637	9.170	8.605	9.312	11.105	13.251	17.129	18.668	**164.120**
Wärme Speicherausgang HW	[kWh]	46.703	27.455	16.940	7.830	4.290	0	0	0	2.540	9.450	23.761	34.420	**173.389**
Verluste Pufferspeicher	%	-1,6%	-1,7%	-2,0%	-2,0%	-3,8%	-5,5%	-6,6%	-5,3%	-3,5%	-2,6%	-2,5%	-2,7%	**-2,6%**
Nutzenergie														
Haushaltsstrom	[kWh]	11.124	9.688	10.243	9.740	10.335	9.777	10.018	10.311	10.551	11.302	11.504	11.822	**126.415**
Gewerbe	[kWh]	589	942	805	731	935	975	936	929	828	974	877	1.004	**10.525**
Allgemeinstrom	[kWh]	3.863	3.112	3.038	2.912	2.685	2.457	2.675	2.738	2.864	3.201	3.406	3.747	**36.697**
Elektromobilität	[kWh]	434	367	451	313	403	257	331	369	269	358	438	534	**4.524**
Bilanzierungsungenauigkeit	[kWh]	339	419	403	169	363	235	-4	456	534	909	793	703	**5.320**

Anhang B - Raumtemperaturen

Tabelle 31: Zusammenstellung der Monatsmittelwerte der Raumlufttemperaturen in den Musterwohnungen, 2016

Monat	MW 1	MW 2	MW 3	MW 4	MW 5	MW 6	MW 7	MW 8	MW 9	MW 10
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
Jan 16	19,1	21,5	18,8	20,0	18,8	22,6	19,4	21,4	16,9	20,3
Feb 16	19,5	20,8	19,4	20,0	19,1	23,3	19,5	21,3	18,4	20,1
Mrz 16	19,7	21,1	19,0	20,3	19,4	22,8	20,4	20,5	18,1	21,2
Apr 16	21,8	21,3	20,7	21,0	19,9	22,4	21,8	20,8	19,2	19,2
Mai 16	22,7	22,7	22,4	22,7	21,7	24,1	23,0	22,2	21,2	21,2
Jun 16	23,9	24,2	23,8	24,4	23,6	25,4	24,4	23,5	22,7	23,0
Jul 16	24,9	25,9	25,5	25,7	25,1	26,8	25,6	24,8	23,9	24,4
Aug 16	24,5	25,2	24,9	24,9	24,4	25,9	25,4	24,8	24,1	24,4
Sep 16	24,7	25,2	25,1	25,0	24,8	26,0	24,9	24,9	24,4	24,5
Okt 16	22,0	21,2	21,2	21,9	20,2	23,1	21,2	21,8	20,1	21,5
Nov 16	20,8	21,2	20,1	21,2	19,3	23,1	20,4	21,7	19,5	21,7
Dez 16	20,8	21,5	19,2	21,8	18,9	23,3	20,4	21,8	19,1	21,7
Mittelwert 2016	**22,0**	**22,7**	**21,7**	**22,4**	**21,3**	**24,1**	**22,2**	**22,4**	**20,6**	**21,9**
Mittelwert Heizperiode*	**20,8**	**21,4**	**20,1**	**21,1**	**19,7**	**23,1**	**20,8**	**21,4**	**19,1**	**20,9**

*Heizperiode Januar bis Mai und Oktober bis Dezember

Tabelle 32: Zusammenstellung der Monatsmittelwerte der Raumlufttemperaturen in den Musterwohnungen, 2017

Monat	MW 1	MW 2	MW 3	MW 4	MW 5	MW 6	MW 7	MW 8	MW 9	MW 10
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
Jan 17	21,2	22,5	19,3	23,1	19,9	22,9	20,7	20,3	19,3	22,1
Feb 17	21,0	22,2	19,6	23,0	20,2	23,3	21,4	20,5	19,5	22,4
Mrz 17	21,0	22,4	20,6	23,1	20,7	23,1	22,0	21,6	19,9	22,2
Apr 17	21,6	21,9	20,4	24,1	20,7	22,6	21,5	21,6	20,2	21,0
Mai 17	23,0	23,3	22,6	25,5	22,0	24,1	23,2	22,8	21,8	22,5
Jun 17	24,9	25,7	25,3	25,5	25,0	26,0	25,2	25,5	24,9	24,7
Jul 17	24,9	25,5	25,1	25,5	25,4	26,3	25,2	25,3	24,9	25,1
Aug 17	24,6	25,2	24,8	24,9	24,7	25,9	25,0	24,6	24,2	24,8
Sep 17	22,5	23,2	22,3	21,7	21,9	24,5	22,6	22,8	20,3	23,3
Okt 17	22,3	22,7	21,6	21,9	21,2	23,7	21,8	22,3	20,3	22,7
Nov 17	20,7	21,4	19,8	20,1	19,6	23,2	20,2	22,5	19,6	21,8
Dez 17	20,1	21,0	19,0	19,7	19,2	22,7	19,6	22,8	19,4	22,2
Mittelwert 2017	**22,3**	**23,1**	**21,7**	**23,2**	**21,7**	**24,0**	**22,4**	**22,7**	**21,2**	**22,9**
Mittelwert Heizperiode*	**21,3**	**22,2**	**20,3**	**22,6**	**20,4**	**23,2**	**21,3**	**21,8**	**20,0**	**22,1**

*Heizperiode Januar bis Mai und Oktober bis Dezember

Anhang C – Messstellenliste

Tabelle 33: Messstellenliste

EGS-plan Ingenieurgesellschaft
für Energie-, Gebäude- und Solartechnik GmbH

System	Erforderliche Messstelle	Art des Zählers	Bezeichnung im Schema	Bereich
Energiequelle				
Abwasserwärmetauscher	Wärmeerzeugung	Wärmezähler	WMZ1	Energiequelle
		Temperaturfühler	T1, T2	
Abwärme Batterie / Wechselrichter	Wärmeerzeugung	Wärmezähler	WMZ2	Energiequelle
		Temperaturfühler	T3, T4	
Temperatur Abwasser		Temperaturfühler	T7	Energiequelle
Temperatur Wärmequelle gesamt		Temperaturfühler	T8, T9	Energiequelle
Energieerzeuger				
El. Wärmepumpe	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ10	Energieerzeuger
	Wärmeerzeugung	Wärmezähler	WMZ10	
	Vor- und Rücklauftemperatur	Temperaturfühler	T100, T101	
		Temperaturfühler (MSR-Technik)	T104, T105	
	Stromverbrauch Pumpe Primärkreislauf	Stromzähler	SZ11	
	Stromverbrauch Pumpe Sekundärkreislauf	Stromzähler	SZ11a	Energieerzeuger
Gas Brennwertkessel	Gasverbrauch	Gaszähler	GZ10	Energieerzeuger
	Wärmeerzeugung	Wärmezähler	WMZ11	
	Vor- und Rücklauftemperatur	Temperaturfühler	T102, T103	
		Temperaturfühler (MSR-Technik)	T106, T107	
PV-Dach- und Fassadenanlage	Erzeugter Strom	Stromzähler	SZ12	Energieerzeuger
PV Dachanlage	Erzeugter Strom (DC) vor der Batterie	Batteriemanagementsystem	BMS	Energieerzeuger
	Erzeugter Strom (DC) nach der Batterie	Batteriemanagementsystem	BMS	
	Erzeugter Strom (AC) nach der Batterie	Zentralwechselrichter	Zentralwechselrichter	
PV Fassadenanlage	Erzeugter Strom (DC und AC)	6 Wechselrichter	6 Wechselrichter	Energieerzeuger
PV-Dach- und Fassadenanlage und Wärmepumpe	Stromverbrauch und Stromerzeugung PV + Wärmepumpe	Stromzähler (Zweirichtungszähler)	SZ13	Energieerzeuger
Energiespeicher				
Pufferspeicher 1 und 2 (Warmwasser)	Wärme Speicherausgang	Wärmezähler	WMZ20	Energiespeicher
		Temperaturfühler	T200, T201	
Pufferspeicher 1	Temperatur oben	Temperaturfühler	T208	Energiespeicher
	Temperatur mitte	Temperaturfühler	T209	
	Temperatur unten	Temperaturfühler	T210	
Pufferspeicher 2	Temperatur oben	Temperaturfühler	T211	Energiespeicher
	Temperatur mitte	Temperaturfühler	T212	
	Temperatur unten	Temperaturfühler	T213	
Pufferspeicher 3 (Fußbodenheizung)	Wärme Speicherausgang	Wärmezähler	WMZ21	Energiespeicher
		Temperaturfühler	T202, T203	
Pufferspeicher 3	Temperatur oben	Temperaturfühler	T214	Energiespeicher
	Temperatur mitte	Temperaturfühler	T215	
	Temperatur unten	Temperaturfühler	T216	
Batteriespeicher	Beladung	Batteriemanagementsystem	BMS	Energiespeicher
	Entladung			
Energieverbraucher Gesamt/Allgemein				
Strom gesamt	Strombezug	Stromzähler (Zweirichtungszähler)	SZ30	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
	Stromeinspeisung			
Heizzentrale	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ32	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Allgemeinstrom	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ34 – 37	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Aufzüge	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ38 - 41	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
E-Mobilität	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ45	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Technik Haus 20 (Steckdose Fahrrad)	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 170	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Technik Haus 22 (Steckdosen Technikzentrale)	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 171	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Technik Haus 24 (Beleuchtung)	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 172	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
M-Bus Haus 20	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 173	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
M-Bus Haus 22	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 174	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
M-Bus+Netzwerk Haus 24	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 175	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
M-Bus+Netzwerk Haus 26	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 176	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
IT-Schrank Haus 20	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 177	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
IT-Schrank Haus 22	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 178	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Rohrbegleitheizung Haus 20	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 179	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Rohrbegleitheizung Haus 22	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 180	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Rohrbegleitheizung Haus 24	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 181	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Rohrbegleitheizung Haus 26	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 182	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Druckerhöhung Haus 20	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 183	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Druckerhöhung Haus 24	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 184	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Beleuchtung Technik Haus 20	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 185	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Beleuchtung Technik Haus 22	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 186	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Beleuchtung Technik Haus 24	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 187	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Beleuchtung Technik Haus 26	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ 188	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Vor- und Rücklauftemperatur Fußbodenheizung		Temperaturfühler	T596, T597	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein
Vor- und Rücklauftemperatur Warmwasser		Temperaturfühler	T598, T599	Energieverbraucher Gesamt/Allgemein

Energieverbraucher Gewerbeeinheiten				
Fußbodenheizung (35 °C)	Wärmeverbrauch	Wärmezähler	WMZ180 - 181	Energieverbraucher Gewerbeeinheiten
		Temperaturfühler	T600 – 601, T602 – 603	
Warmwasser (55 °C)	Wärmeverbrauch	Wärmezähler	WMZ182 - 183	Energieverbraucher Gewerbeeinheiten
		Temperaturfühler	T604 – 605, T606 – 607	
Gewerbestrom	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ43 - 44	Energieverbraucher Gewerbeeinheiten
Energieverbraucher 64 Wohneinheiten				
Fußbodenheizung (35 °C)	Wärmeverbrauch	Wärmezähler	WMZ30 - 93	Energieverbraucher 64 Wohneinheiten
		Temperaturfühler	T300 - 363, T374 - 437	
Warmwasser (55 °C)	Wärmeverbrauch	Wärmezähler	WMZ104 - 167	Energieverbraucher 64 Wohneinheiten
		Temperaturfühler	T448 - 511, T522 - 585	
Haushaltsstromverbrauch	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ46 - 109	Energieverbraucher 64 Wohneinheiten
Energieverbraucher 10 Musterwohnungen				
Fußbodenheizung (35 °C)	Wärmeverbrauch	Wärmezähler	WMZ94 - 103	Energieverbraucher 10 Musterwohnungen
		Temperaturfühler	T364 - 373, T438 - 447	
Warmwasser (55 °C)	Wärmeverbrauch	Wärmezähler	WMZ168 - 177	Energieverbraucher 10 Musterwohnungen
		Temperaturfühler	T512 - 521, T586 - 595	
Haushaltsstromverbrauch	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ110 - 119	Energieverbraucher 10 Musterwohnungen
Spülen/Waschen/Trocknen Gesamt	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ130 - 139	Energieverbraucher 10 Musterwohnungen
Spülen (L1)	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ130-1 - 139-1	
Waschen (L2)	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ130-2 - 139-2	
Trocknen (L3)	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ130-3 - 139-3	
Kochen / Backen	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ140 - 149	Energieverbraucher 10 Musterwohnungen
Lebensmittelkühlung	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ150 - 159	Energieverbraucher 10 Musterwohnungen
Lüftung	Stromverbrauch	Stromzähler	SZ160 - 169	Energieverbraucher 10 Musterwohnungen
	Temperatur Abluft	Temperaturfühler	T610 - 619	
Sonstige Messungen				
Wetter	Globalstrahlung	Wetterstation inkl. Pyranometer	WS1	Sonstige Messungen
	Sonnenscheindauer			
	Temperatur			
	Feuchte			
	Windgeschwindigkeit			
	Niederschlag			
Klappenstellung	Freigabe Speisung PSP 1 und PSP 2	Digitaler Sensor	MK1	Sonstige Messungen
	Freigabe Speisung PSP 3	Digitaler Sensor	MK2	
Dateiname: 160426_Zählerliste.xlsx				Stand: 26.04.2016