

Endbericht der Modellvorhaben Effizienzhaus Plus Nr. 23

Wissenschaftliche Begleitung des Effizienzhaus Plus

in Kassel

Forschungsprogramm

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

Messperiode

April 2014 bis März 2015

Aktenzeichen

SWD - 10.08.82-12.1

im Auftrag

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

bearbeitet von

Prof. Dr.-Ing. Anton Maas
Dipl.-Ing. Martin Rösler
Universität Kassel
Fachbereich Architektur Stadtplanung Landschaftsplanung
Fachgebiet Bauphysik

Endbericht

Effizienzhaus Plus Kassel

Messperiode 04.2014 bis 03.2016

20.07.2016

Prof. Dr.-Ing. Anton Maas
Dipl.-Ing. Martin Rösler

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	iv
Tabellenverzeichnis.....	vi
1. Kurzfassung.....	1
2. Kontext und Zielsetzung	2
3. Gebäudesteckbrief.....	3
3.1. Allgemeine Daten	3
3.2. Architektur	4
3.3. Wärmeschutz	6
3.4. Anlagentechnik.....	7
3.4.1. Überblick.....	7
3.4.2. Solareisspeicher	10
3.5. Energiebedarf und Energiedeckung	11
3.6. Bewertung der Effizienz aus Berechnung nach DIN V 18599	12
4. Monitoring	13
4.1. Messkonzept	13
4.1.1. Hydraulik.....	13
4.1.2. Elektrik.....	14
4.2. Verwendete Messtechnik	16
4.3. Dokumentation	17
5. Meteorologische Randbedingungen	18
5.1. Solarstrahlung	18
5.2. Außenlufttemperaturen.....	19
5.3. Klimabereinigung	20
6. Messergebnisse.....	20
6.1. Stromverbrauch.....	20
6.1.1. Stromverbrauch für Hausbetrieb.....	22
6.1.2. Stromverbrauch für projektspezifischen Anteil.....	24

6.1.3. Stromverbrauch für Elektromobilität.....	24
6.1.4. Gegenüberstellung von Stromgewinnung und Stromverbrauch	24
6.2. Eigenstromnutzung	25
6.3. Anlagenperformance	29
6.3.1. Wärmeerzeuger	29
6.3.2. Lüftungsanlage	32
6.4. Innenraumtemperaturen.....	33
7. Kosten / Wirtschaftlichkeit.....	36
7.1. Baukosten und laufende Kosten	36
7.2. Kosten Geräte	37
8. Bewertung.....	38
8.1. Energieeffizienz des Modellgebäudes.....	38
8.2. Verbesserungspotentiale.....	38
Anhang A:.....	40
Anhang B:.....	42
Anhang C:	44

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Effizienzhaus Plus Kassel, Außenansicht der Süd-West-Seite	3
Abbildung 3-2: Grundriss Untergeschoss	5
Abbildung 3-3: Grundriss Erdgeschoss.....	5
Abbildung 3-4: Grundriss Obergeschoss	6
Abbildung 3-5: Vereinfachtes Anlagenschema	9
Abbildung 3-6: Bauform Eisspeicher Typ SE-12.....	10
Abbildung 4-1: Hydraulik-Schema.....	13
Abbildung 4-2: Elektro-Schema.....	15
Abbildung 5-1: Mittlere Globalstrahlung von April 2014 bis März 2016	18
Abbildung 5-2: Globalstrahlung (gemessen und nach DIN V 18599) und PV-Ertrag	19
Abbildung 5-3: Mittlere Außenlufttemperatur von April 2014 bis März 2016	19
Abbildung 6-1: Stromverbrauch nach Kategorien	21
Abbildung 6-2: Gesamt-Stromverbrauch des Hauses	21
Abbildung 6-3: Stromverbrauch Heizung und Trinkwarmwasser.....	22
Abbildung 6-4: Stromverbrauch Hilfsenergie und Anlagentechnik.....	22
Abbildung 6-5: Stromverbrauch Lüftung	23
Abbildung 6-6: Speicherverluste Hausbatterie.....	23
Abbildung 6-7: Haushalt und Elektrogeräte	23
Abbildung 6-8: Stromverbrauch Elektroherd	23
Abbildung 6-9: Strom für Beleuchtung	23
Abbildung 6-10: Gegenüberstellung von Stromverbrauch und Stromgewinn.....	25
Abbildung 6-11: Elektrische Leistung von Verbrauchern und Erzeugern sowie Netzbezug, Einspeisung und Batterie-Ladezustand am 04.09.2014	26
Abbildung 6-12: Elektrische Leistungen und Batterie-Ladezustand am 30.10.2014	27
Abbildung 6-13: Monatliche Energiebilanz aus PV-Produktion, Eigenstromnutzung, Eigennutzungs- und Deckungsanteil von April 2014 bis März 2015.....	28
Abbildung 6-14: Monatliche Energiebilanz aus PV-Produktion, Eigenstromnutzung, Eigennutzungs- und Deckungsanteil von April 2015 bis März 2016.....	28
Abbildung 6-15: Kumulierte Darstellung von Endenergieverbrauch, PV-Produktion und Eigenstromnutzung	29

Abbildung 6-16: Wärmemengen des Sole- und Eisspeicher-Regenerationskreises sowie der gemittelte Temperaturverlauf von Außenluft und Eisspeicher	30
Abbildung 6-17: Zeitlicher Verlauf von Wärmeerzeugung und Verbrauch.....	32
Abbildung 6-18: Raumtemperaturen und rel. Luftfeuchten sowie Außenlufttemperatur im Messzeitraum	33
Abbildung 6-19: Mittlere Monatliche Temperaturen am Lüftungsgerät.....	34
Abbildung 6-20: Temperaturen am Lüftungsgerät und Globalstrahlung am 04.07.2015.....	35
Abbildung 6-21: Temperaturen Lüftung und Wohnräume am 02.12.2014	35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Allgemeine Daten Gebäude „Am Kreuzstein 38“	4
Tabelle 3-2: Bauteilliste Gebäudehülle	7
Tabelle 3-3: Anlagentechnik.....	9
Tabelle 3-4: Energiebedarf nach DIN V 18599	11
Tabelle 3-5: Geplante Deckung des Strombedarfs mit PV-Anlage.....	11
Tabelle 3-6: Deckungsanteil Solarstrom	11
Tabelle 3-7: Energiebedarf, Berechnungen nach DIN V 18599.....	12
Tabelle 3-8: Übersicht der berechneten Aufwands-/Arbeitszahlen	12
Tabelle 4-1: Verwendete Wärmemengenzähler.....	14
Tabelle 4-2: Eingesetzte Stromzähler	15
Tabelle 4-3: Temperatur-/Feuchtesensorik und Globalstrahlungsgeber	17
Tabelle 5-1: Gradtagzahl.....	20
Tabelle 6-1: Projektspezifischer Stromverbrauch durch Messtechnik	24
Tabelle 6-2: Stromverbrauch und Stromerzeugung; Vergleich Monitoring und Berechnung	25
Tabelle 6-3: Stromverbrauch und Wärmeerzeugung der Wärmepumpe.....	31
Tabelle 6-4: Wärmebilanz der Anlage inkl. Speicherverluste	31
Tabelle 7-1: Baukosten und laufende Kosten	36
Tabelle 7-2: Haushaltsgeräte und deren Kosten.....	37
Tabelle 8-1: Vergleich von Bedarf nach DIN V 18599 mit gebäudespezifischen Verbräuchen.....	38
Tabelle 8-2: Zusammenstellung des Stromverbrauchs für Bezug und Hausverbrauch von April 2014 bis März 2016.....	40
Tabelle 8-3: Zusammenstellung des Stromverbrauchs für Heizung und Trinkwarmwasser, Elektromobilität und Projektspezifisch von April 2014 bis März 2016.....	41
Tabelle 8-4: Zusammenstellung der Monatsmittelwerte der Raumlufttemperaturen im EG und OG	42
Tabelle 8-5: Zusammenstellung der mittleren monatlichen relativen Raumluftfeuchten im EG und OG	43
Tabelle 8-6: Gradtagszahlen für Standort Kassel im Messzeitraum sowie langjähriges Mittel	44
Tabelle 8-7: Technischen Daten Messgeräte	44
Tabelle 8-8: Energiezähler	45

1. Kurzfassung

Im Rahmen des BBSR-Forschungsvorhabens „Modellprojekt im Plus-Energie-Standard“ führt das Fachgebiet Bauphysik des Fachbereichs Architektur - Stadtplanung - Landschaftsplanung der Universität Kassel Untersuchungen an einem Effizienzhaus Plus in Kassel-Harleshausen durch.

Das energetische Konzept des Effizienzhauses Plus in Kassel beinhaltet neben einer hochwärme-gedämmten Außenhülle und einer Photovoltaikanlage zur Stromerzeugung, einen Latentwärme-Eisspeicher in Verbindung mit einer Sole/Wasser-Wärmepumpe. Die Räume werden von einem zentralen Lüftungsgerät mit einem Wärmerückgewinnungsgrad von 90 % mit Frischluft versorgt.

Über einen Zeitraum von zwei Jahren werden Messdaten sensorisch erhoben, dokumentiert und ausgewertet. Detaillierte Energieflüsse und Verbräuche sowie die ortsbezogenen Klimadaten werden dargestellt und mit berechneten Werten nach DIN V 18599 verglichen.

Der Gesamt-Stromverbrauch für das Gebäude im Messzeitraum von April 2014 bis März 2016 liegt mit 8.395 kWh (Apr. 2014 - Mrz. 2015) bzw. 9.028 kWh (Apr. 2015 – Mrz. 2016) unter dem berechneten Bedarf von 12.209 kWh/a. Die Solarstromerzeugung in diesem Zeitraum entspricht annähernd dem berechneten Wert von 11.975 kWh, ebenso der Deckungsanteil am Stromverbrauch.

2. Kontext und Zielsetzung

Die Klimaschutzinitiative – Modellprojekte im „Plus-Energie-Haus-Standard“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) – unterstützt auf Basis der Nationalen Klimaschutzinitiative Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Zusammenhang mit dem Bau von Plus-Energie-Häusern. Mit Hilfe dieser Förderung sollen Häuser im „Plus-Energie-Haus-Standard“ als Modellvorhaben entwickelt, umgesetzt und evaluiert werden.

Beim vorliegenden Modellprojekt ist im Kasseler Stadtteil Harleshausen ein privat genutztes Zweifamilienhaus errichtet worden, das den baulichen und technischen Anforderungen des Forschungsvorhabens „Plus-Energie-Haus-Standard“ entspricht. In der Monitoringphase werden gemäß dem „Leitfaden für das Monitoring“ Messdaten erhoben und ausgewertet.

Ziel der Bauherren war es, ein architektonisch modernes Gebäude in einer zukunftsorientierten Bauweise zu errichten, um durch einen niedrigen Energieverbrauch den sparsamen Umgang mit den Ressourcen ohne Komforteinbußen zu vereinen und auf Dauer niedrige Energiekosten anzustreben.

Realisiert werden diese Ansprüche durch die Kombination einer hochgedämmten luftdichten Gebäudehülle, einer nach Süden ausgerichteten, großflächigen Glasfassade, moderner Haustechnik mit dem Einsatz erneuerbarer Energie, sowie intelligenter Speichersysteme. Mit der auf dem Dach und an der Westfassade installierten Photovoltaikanlage wird mehr Strom erzeugt als das Gebäude zum eigenen Betrieb benötigt. Durch ein intelligentes Energiemanagement kann der überschüssige Strom in einem Batteriespeicher zwischengespeichert werden und bei Bedarf – zu Zeiten, wenn kein Strom erzeugt wird - genutzt werden. Zusätzlicher Energieüberschuss kann über eine noch in Planung befindliche Ladestation für Elektromobilität zugänglich gemacht werden. Weitere Energieüberschüsse werden in das öffentliche Stromnetz eingespeist.

3. Gebäudesteckbrief

3.1. Allgemeine Daten

Das Effizienzhaus Plus im Kasseler Stadtteil Harleshausen "34128 Kassel" ist im Jahr 2013 erbaut worden. Für die Architektur zuständig ist das Ingenieurbüro Barba in 34277 Fulda. Das Wohnhaus wird im Messzeitraum von drei bzw. ab Dezember 2015 von vier Personen bewohnt. In Abbildung 3-1 ist das Gebäude in der Außenansicht dargestellt.

Die Allgemeinen Daten werden in zusammenfassend Tabelle 3-1 aufgezeigt.



Abbildung 3-1: Effizienzhaus Plus Kassel, Außenansicht der Süd-West-Seite

Tabelle 3-1: Allgemeine Daten Gebäude „Am Kreuzstein 38“

Baujahr	2012/2013
Bruttovolumen	1447 m ³
Nettovolumen	1099,7
Nutzfläche	401,5 m ²
Beheizte Nettogrundfläche	281 m ²
Hüllflächenfaktor A / V	0,53 m ⁻¹
Breitengrad:	
Längengrad:	
Höhenlage:	208 m über NN
Mittlere Jahrestemperatur:	9,3 °C *
Mittlere Wintertemperatur (Oktober – April):	4,7 °C *
Gradtagzahl am Standort G20/12	3480 Kd **
TRY - Klimazone / Referenzstation:	Klimazone TRY 7, Kassel

* mittlere Außenlufttemperaturen für den Standort Kassel DIN V 18599-10

** langjähriges Mittel für den Standort Kassel

3.2. Architektur

Bei der Konzeption des Effizienzhauses Plus in Kassel sollten neben einer energieeffizienten Bauweise insbesondere eine geradlinige Architektur sowie der Wohnkomfort Berücksichtigung finden. Die Wohnräume des Zweifamilienwohnhauses verteilen sich auf drei Ebenen. Eine kleine Wohnung (67 m² Wohnfläche) liegt im Erdgeschoss und Souterrain und ist nach Westen ausgerichtet. Die zweite Wohnung (217 m² Wohnfläche) verteilt sich auf das Erdgeschoss und Obergeschoss. Im Erdgeschoss befindet sich der offen gestaltete Wohn-/Essbereich mit den nach Süden ausgerichteten großen Fensterflächen. Es befindet sich zusätzlich ein Hauswirtschaftsraum, eine Garderobe und ein WC im Erdgeschoss (siehe Abbildung 3-3). Im Obergeschoss (Abbildung 3-4) liegen die Schlafräume, sowie zwei Kinder- und die Badezimmer. Durch eine Galerie sind beide Ebenen optisch miteinander verbunden. Der Haustechnikraum, der alle technischen Funktionen des Hauses steuert, befindet sich im Kellergeschoss (Abbildung 3-2).

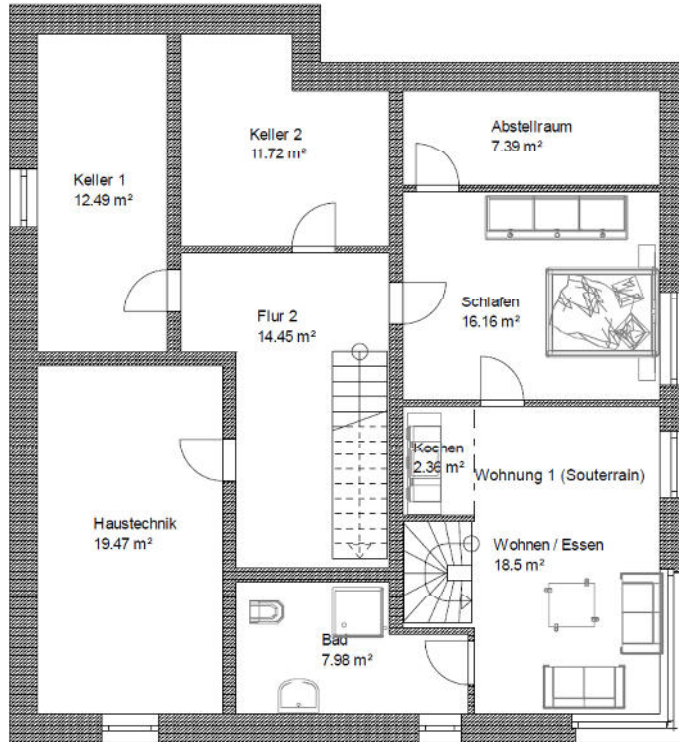


Abbildung 3-2: Grundriss Untergeschoss

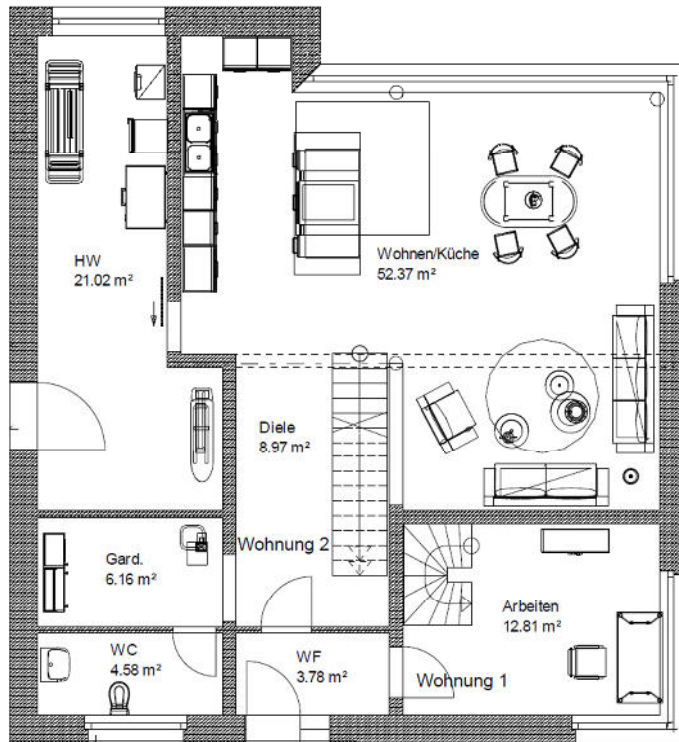


Abbildung 3-3: Grundriss Erdgeschoss

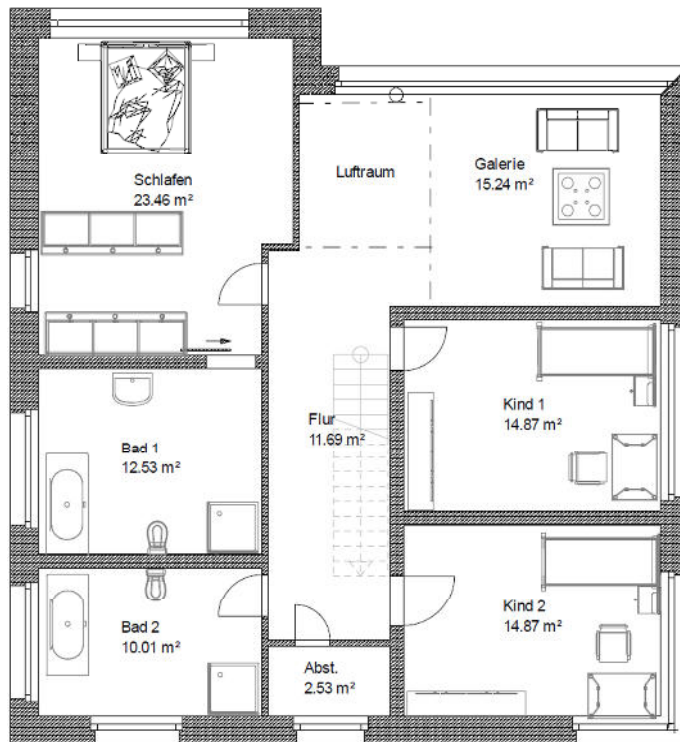


Abbildung 3-4: Grundriss Obergeschoss

3.3. Wärmeschutz

Bei der gewählten konventionellen Bauweise unter Verwendung von Baustoffen mit hoher Rohdichte und einer entsprechenden Dämmung der Außenbauteile, werden die Wärmeverluste beträchtlich minimiert und die Wärmespeicherung in den Bauteilen erhöht. Die nach Süden und Westen ausgerichteten großflächigen Fenster der Glasfassade (Pfosten-Riegelkonstruktion; siehe Abbildung 3-1) sorgen einerseits für eine ideale natürliche Tageslichtversorgung und Lichtdurchflutung im Gebäudeinnern sowie andererseits bei ausreichender Sonneneinstrahlung im Winter für solare Gewinne und liefern genügend Energie um das Gebäude zu temperieren.

Die Transmissionswärmeverluste des Gebäudes werden durch niedrige Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäudehülle minimiert. Das Haus erfüllt die Voraussetzungen des KfW-Effizienzhauses 40. Die einzelnen Bauteile erfüllen die Maßgabe eines Passiv-Haus-Niveaus.

Die Außenwände bestehen aus 24 cm Kalksandsteinmauerwerk mit einem 30 cm starken Wärmedämmverbundsystem und besitzen einen U-Wert von 0,10 W/(m²K). Der beheizte Keller ist mit einer bewehrten Fundamentplatte auf einer Wärmedämmung aus einer ca. 40 cm starken Schotterdecke aus Glasschaum im Kaltbereich gegründet und zusätzlich mit 2 Lagen Hart-/ Partikelschaum in 20 cm Stärke im Warmbereich gedämmt. Der Gesamtaufbau besitzt einen U-Wert von 0,08 W/(m²K).

Das Flachdach ist als Betondach mit einer 2-lagigen Dämmung (22 cm PUR WLG 024 plus Gefälleplatten mittlere Stärke 10 cm WLG 031) ausgeführt. Der Gesamtaufbau besitzt ebenfalls einen U-Wert von 0,08 W/(m²K).

Die Fenster sind mit 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung ausgeführt und erreichen U-Werte von 0,66 W/(m²K) bis 0,89 W/(m²K).

Der detaillierte Aufbau ist der Tabelle 3-2 zu entnehmen.

Tabelle 3-2: Bauteilliste Gebäudehülle

Bezeichnung	Fläche [m ²]	Nettofläche [m ²]	Ausrichtung	U-Wert [W/(m ² K)]
Außenwand Süden	77,82	36,46	Süd	0,10
3-Scheiben-WS-Verglasung (Fensterfront)		35,96		0,66
3-Scheiben-WS-Verglasung (Fenster)		5,40		0,89
Außenwand Nord	77,82	67,09	Nord	0,10
3-Scheiben-WS-Verglasung (Über Eck)		6,16		0,66
3-Scheiben-WS-Verglasung (Fenster)		1,05		0,89
Haustür		3,52		1,1
Außenwand Ost	84,31	73,16	Ost	0,10
3-Scheiben-WS-Verglasung		8,18		0,89
Gartentür		2,97		1,1
Außenwand West	84,31	64,75	West	0,10
3-Scheiben-WS-Verglasung (Front und Eckfenster)		14,39		0,66
3-Scheiben-WS-Verglasung		5,17		0,89
Außenwand KG Erdreich Süden	33,66	33,66		0,10
Außenwand KG Erdreich Nord	26,66	26,66		0,10
Außenwand KG Erdreich Ost	33,47	33,47		0,10
Außenwand KG Erdreich West	18,47	18,47		0,10
Außenwand KG Luft Nord	13,00	11,45	Nord	0,10
3-Scheiben-WS-Verglasung (Kellerfenster)		1,55		0,89
Außenwand KG Luft Ost	3,00	2,20	Ost	0,10
3-Scheiben-WS-Verglasung (Keller 1)		0,80		0,89
Außenwand KG Luft West	18,00	14,49	West	0,10
3-Scheiben-WS-Verglasung (Kellerfenster)		3,51		0,89
Dach	149,50	149,50	horizontal	0,08
Bodenplatte	149,50	149,50	horizontal	0,08

3.4. Anlagentechnik

3.4.1. Überblick

Die Beheizung des Gebäudes erfolgt über eine Sole-Wasser-Wärmepumpe der Firma Viessmann vom Typ Vitocal 300-G mit einer Nenn-Wärmeleistung von 6,13 kW bei einer Spreizung von 10 K. Als Wärmequelle dient das Wasser des Solareisspeichers SE12 von Isocal (Inhalt ca. 10 m³).

An die Wärmepumpe ist ein Kombi-Pufferspeicher mit einem Fassungsvermögen von 900 l angeschlossen. Der Kombispeicher der Firma Austria (Typenbeschreibung EMAIL SISS 900/200) besitzt einen internen Trinkwasserspeicher mit 200 l Inhalt. Ebenfalls integriert ist ein Elektro-Einschraub-Heizstab mit 12 kW Leistung als Notsystem bei Ausfall der Wärmepumpe. Die Wärme-

verteilung im Gebäude erfolgt über Niedertemperatur-Flächenheizsysteme im Fußboden. Auf eine Zirkulationspumpe im Trinkwarmwasserzweig wurde verzichtet.

Um eine ausreichende Belüftung sicherzustellen und Lüftungswärmeverluste bei freier Fensterlüftung zu reduzieren, wird das gesamte Gebäude mechanisch be- und entlüftet. Die Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (Novus (F) 450; Paul Wärmerückgewinnung GmbH) erreicht einen Wärmebereitstellungsgrad von 90 % bei 184 m³/h. Die frische Außenluft wird durch einen Erdwärmetauscher (Länge ca. 35 m) vortemperierte.

Auf dem Flachdach des Gebäudes ist eine 88,2 m² große Photovoltaikanlage, ausgerichtet in Ost-West Richtung, bestehend aus 54 monokristallinen Modulen (Eging EG250m) installiert. An der West-Fassade sind weitere 9 Module mit einer Gesamtfläche von 14,7 m² angeordnet. Die gesamte Anlage hat eine Leistung von 15,75 kW_p.

Zur Speicherung von überschüssiger Energie ist ein Batteriespeicher mit Li-Ionen Akku mit einer Speicherkapazität von 6,3 kWh aufgestellt und mit einem intelligenten Stromlast-Management der Firma IBC-Solar gekoppelt. Nicht benötigte elektrische Energie wird in das öffentliche Stromnetz eingespeist.

Zur Erfassung, Überwachung und Visualisierung der gemessenen Energieströme werden verschiedene Sensoren in die Gebäudesystemtechnik eingebunden, so dass die Daten unter Verwendung eines KNX/EIB-Bus-Systems in einem Home-Server gespeichert und abgerufen werden können.

Regenwasser wird in einer 10 m³ großen Zisterne gesammelt, aufbereitet und über eine Pumpe einem separaten Rohrleitungssystem zugeführt. Das Regenwasser wird vorrangig für Toilettenspülung und Gartenbewässerung genutzt und senkt die Wasserkosten. Da beim Monitoring keine Verbrauchsmengen des gesammelten Regenwassers erhoben werden, kann hier nur eine qualitative Aussage getroffen werden.

Das Anlagenschema ist in vereinfachter Form in Abbildung 3-5 ausgeführt und zeigt die zuvor genannten Komponenten des Effizienzhauses Plus in Kassel. Eine Übersicht der Anlagentechnik ist in Tabelle 3-3 ausgeführt.

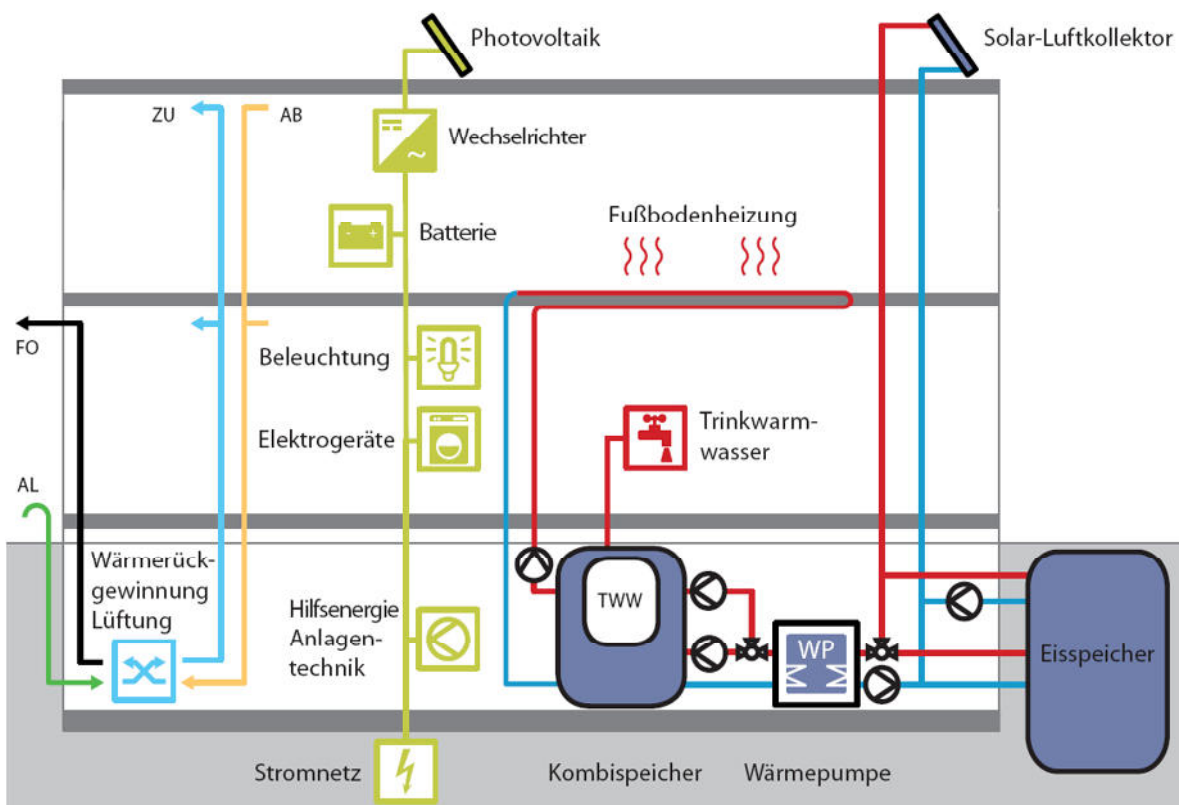


Abbildung 3-5: Vereinfachtes Anlagenschema

Tabelle 3-3: Anlagentechnik

Gerät	Hersteller	Bezeichnung	Leistung	Bemerkung
Wärmeerzeuger	Viessmann	Vitocal 300-G	6,13 kW	
Thermischer Speicher 1	Isocal	Eisspeicher SE12		Volumen 10 m ³
Thermischer Speicher 2	Austria Email AG	SISS 900/200		Brauchwasser 200l Puffer 700l
Elektro-Einschraub-Heizstab	E.G.O	29.60812.000	12 kW	
Lüftungsanlage	Paul	Novus (F) 450	22 W – 209 W	50 m ³ /h – 450 m ³ /h
PV-Module	EGing	EG250m	15,75 kW _{peak}	63 Module / 103 m ²
PV-Anlage	SMA / IBC	Sunnyboy 5000 TL21 Sunnyboy 4000 TL21 IBC- Solguard		
Batteriespeicher	IBC	IBC SolStore 6.3 Li		6,3 kWh / 48 V

3.4.2. Solareisspeicher

Ein Eisspeicher ist ein bei niedrigen Temperaturen betriebener Langzeit-Energiespeicher mit Latentwärmenutzung. Abbildung 3-6 zeigt die Bauform und Maße des Eisspeichers SE12. Der Behälter - eine 10 m³ große Zisterne - wird oberflächennah eingegraben, besitzt keine Wärmedämmung und wird mit Leitungswasser befüllt. Mit Hilfe der Wärmepumpe wird dem Speicher über einen Wärmeübertrager Energie entzogen und der Speicherinhalt bis zum Gefrierpunkt abgekühlt. Beim folgenden Phasenübergang von Wasser zu Eis wird bei gleichbleibender Temperatur Kristallisationswärme freigesetzt. Durch die spezielle Anordnung der Rohre des Wärmetauschers vollzieht sich der Vereisungsprozess von innen nach außen, womit eine mögliche Zerstörung des Behälters durch die Eisbildung vermieden wird.

Zur Regeneration des vereisten Speichers, also der Rückführung in den flüssigen Zustand, ist die Zuleitung von Wärme notwendig. Dies wird über einen Solar-Luftabsorber und einen zweiten Wärmetauscher im Eisspeicher erreicht. Die Regeneration kann schon bei niedrigen Außenlufttemperaturen erfolgen (größer 0°C); Sonneneinstrahlung beschleunigt die Regeneration. Zusätzlich wird der dem Speicher umgebenden Erde Wärme entzogen. Die Phasen der Eisbildung und Regeneration können sich - je nach Witterung - im Heizzeitraum häufig wiederholen.

Der Solar-Luftabsorber kann darüber hinaus auch direkt zur Beladung der Wärmepumpe eingesetzt werden. Die Regelung des Systems entscheidet, welche Wärmequelle für die Wärmepumpe genutzt wird und ob eine Regeneration des Speichers erforderlich ist.

Im Sommer kann der Eisspeicher auch zur natürlichen Kühlung eingesetzt werden. Dafür wird der Speicher zum Ende der Heizperiode hin vollständig vereist, indem die Regeneration des Speichers durch die Regelung unterbunden wird. Die bei dieser passiven Kühlung abgeführte Wärme wird im Eisspeicher eingelagert und steht als Wärmeenergie für die nächste Heizperiode zur Verfügung. Die Kühlvariante ist bei dieser Anlage nicht implementiert.

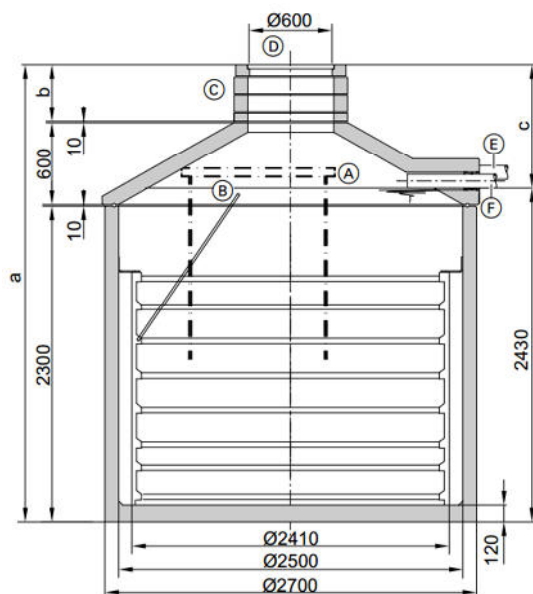


Abbildung 3-6: Bauform Eisspeicher Typ SE-12

3.5. Energiebedarf und Energiedeckung

Der Nutz- und Endenergiebedarf pro Jahr ist in Tabelle 3-4 wiedergegeben. Die Berechnungen nach DIN V 18599 (ZUB-Helena) ergeben einen Nutzenergiebedarf von 9.064 kWh/a für Heizung und Trinkwarmwasserbereitung und einen Endenergiebedarf von 13.907 kWh/a. Der Hilfsenergiebedarf für Pumpen und Regelung des Heizungs-, Warmwasser-, und Lüftungssystems beträgt 2.833 kWh/a. Der Strombedarf errechnet sich zu 12.209 kWh/a inklusive eines Pauschalwertes für Beleuchtung und Haushaltsgeräte von 5.000 kWh/a.

Die Photovoltaikanlage des Hauses liefert zur Deckung des Strombedarfs eine Energie von 11.975 kWh/a (siehe Tabelle 3-5). Dabei soll der Endenergiebedarf mit einem Deckungsanteil von 61,6 % aus erneuerbaren Energien gedeckt werden (Tabelle 3-6). Eine differenzierte Betrachtung der Stromerzeugung zwischen dem PV-Dach und der PV-Wand ist aufgrund der gemeinsam verschalteten Wechselrichter nicht möglich.

Tabelle 3-4: Energiebedarf nach DIN V 18599

Name	Heizung	Warmwasser	Lüftung	Beleuchtung + Hausgeräte
Nutzenergie $Q_{x,b}$ [kWh/a]	4.568,2	4.496,0	---	---
Wärmeabgabe d. Erzeugung $Q_{x,outg}$ [kWh/a]	6.610,5	7.296,2	---	---
Endenergie $Q_{x,f}$ [kWh/a]	1.688,8	2.687,1	---	---
Hilfsenergie $Q_{x,f,oux}$ [kWh/a]	252,6	37,1	2.543,2	---
Strombedarf [kWh/a]	1.941,4	2.724,2	2.543,2	5.000,0
	Gesamt 12.208,8 kWh/a			

Tabelle 3-5: Deckung des Strombedarfs mit PV-Anlage gemäß Planung

Komponente	[kWh/a]
PV (Dach+Wand)	11.975
Gesamt	11.975

Tabelle 3-6: Deckungsanteil Solarstrom

	Bedarf [kWh/a]	Gedeckt durch erneuerbare Energien [kWh/a]	Deckungsanteil [%]
Heizung	4.484,6	1.706,5	38,1
Trinkwarmwasser	2.724,1	2.643,3	97,0
Gesamt	12.208,8	7.522,7	61,6

3.6. Bewertung der Effizienz aus Berechnung nach DIN V 18599

Die Tabelle 3-7 gibt den Nutz- und Endenergiebedarf für Heizung Trinkwarmwasser bzw. die End- und Primärenergie der gesamten Haustechnik als Jahreswert und als spezifischen Wert wieder. Hierbei beträgt der Bezugswert der Gebäudenutzfläche $A_n = 401,4 \text{ m}^2$. In Tabelle 3-8 sind die Aufwands- und Arbeitszahlen von Wärmeerzeuger, Energieverteilung und gesamter Haustechnik berechnet.

Tabelle 3-7: Energiebedarf, Berechnungen nach DIN V 18599

Teilabschnitt	Erläuterung	Energie [kWh/a]	Spez. Energie [kWh/m ² a]
Nutzenergie	Nutzenergiebedarf der Räume für Heizung, Trinkwarmwasser	9.064	22,6
Erzeugerabgabe	Wärmeabgabe der Erzeuger an das Verteilnetz oder die Speicher für Heizung, Trinkwarmwassererwärmung	13.907	34,6
Endenergie Erzeuger	Strombedarf für die Erzeugung von Wärme für Heizung, Trinkwarmwassererwärmung	4.376	10,9
Endenergie Haustechnik	Strombedarf für die Erzeugung von Wärme für Heizung, Trinkwarmwassererwärmung sowie Hilfsenergie für die Anlagentechnik wie Pumpen, Ventilatoren und Regelungen	7.209	18,0
Primärenergie Haustechnik	Nicht erneuerbarer Anteil des Primärenergieinhalts der gesamten Endenergie für die Haustechnik	17.301	43,1

Tabelle 3-8: Übersicht der berechneten Aufwands-/Arbeitszahlen

Bewertete Teilabschnitte	Aufwandszahlen / Arbeitszahlen [kWh/kWh]
Effizienz der Verteilung (Erzeugerabgabe / Nutzenergie)	1,53
Effizienz der Wärmeerzeuger (Endenergie Erzeuger / Erzeugerabgabe)	0,31
Endenergetische Effizienz der Haustechnik (Endenergie Haustechnik / Nutzenergie)	0,80
Effektive Arbeitszahl der gesamten Haustechnik (Nutzenergie / Endenergie Haustechnik)	1,26
Arbeitszahl des Energieerzeugers (Erzeugerabgabe / Endenergie Erzeuger)	3,18
Primärenergetische Effizienz der Haustechnik (Primärenergie Haustechnik/ Nutzenergie)	1,91

4. Monitoring

4.1. Messkonzept

4.1.1. Hydraulik

In Abbildung 4-1 ist das Hydraulikschema der Anlage dargestellt; rote Stränge symbolisieren den Warmwasserstrang, blaue Stränge den Kaltwasserstrang. Zentrales Element der Anlage ist die Wärmepumpe, die dem Solareisspeicher Wärme entzieht, bis das Wasser des Speichers zu Eis umgewandelt ist. Der Dachabsorber dient zur Regeneration des Eisspeichers bei solarer Einstrahlung bis das Eis wieder in den flüssigen Aggregatzustand überführt ist. Auch eine direkte Beladung der Wärmepumpe vom Dachabsorber aus ist möglich.

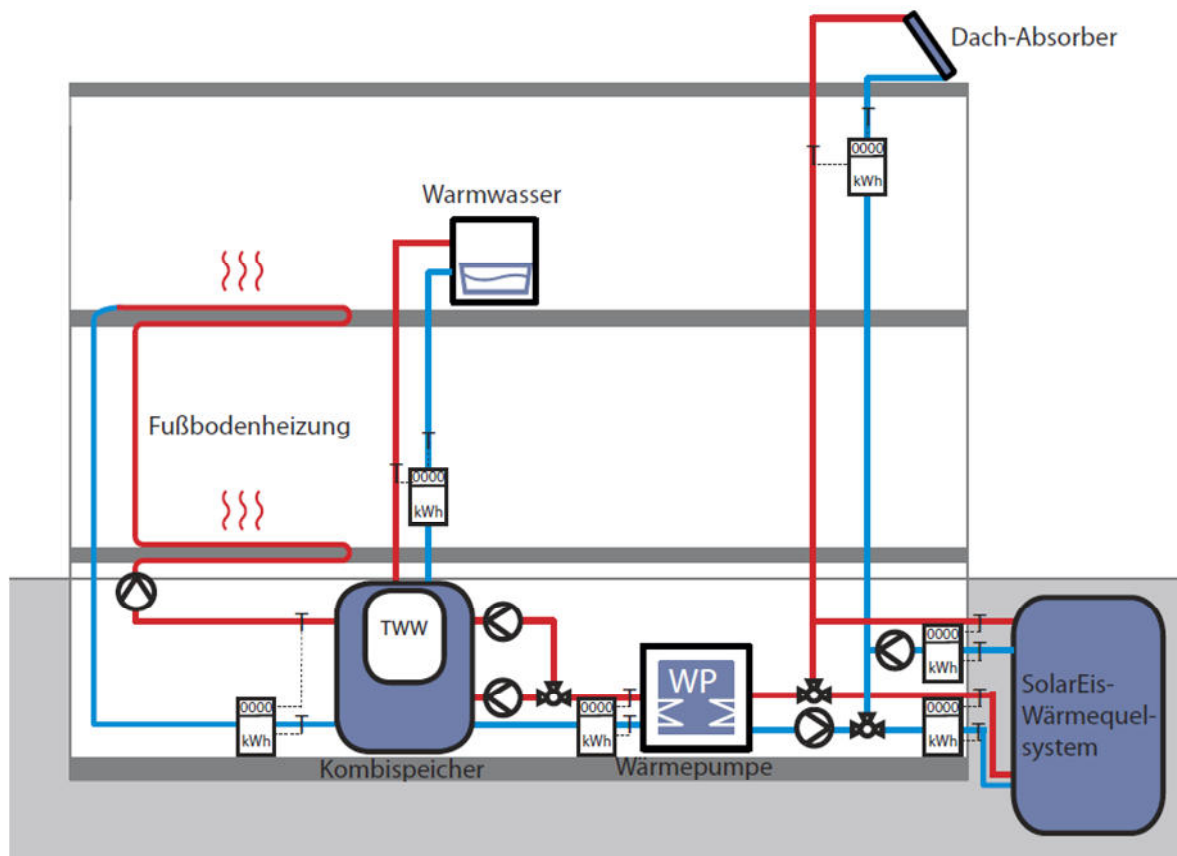


Abbildung 4-1: Hydraulik-Schema

Folgende sechs Wärmemengenzähler erfassen die Energieströme im System (siehe Abbildung 4-1 von links nach rechts): Am Speicherausgang befindet sich der Wärmemengenzähler im Heizkreis der Fußbodenheizung und misst die Energiemenge, die dem Heizungssystem zugeführt wird. Ein weiterer Wärmemengenzähler am Ausgang des Kombispeichers ermittelt die im Brauch-Warmwasser enthaltene Energie. Der Wärmemengenzähler zwischen der Wärmepumpe und dem Kombispeicher

quantifiziert die Beladungsenergie für den Kombispeicher. Im Absorberkreislauf misst ein Wärmemengenzähler die Wärme, die dem Eisspeicher oder der Wärmepumpe zugeführt wird. Der im Regenerationskreis platzierte Wärmemengenzähler ermittelt die Energie, die zur Regeneration des Eisspeichers verwendet wird. Der letzte Zähler ist im Solekreis positioniert und misst die Energiemenge, die die Wärmepumpe dem Eisspeicher entzieht.

Tabelle 4-1: Verwendete Wärmemengenzähler

Bezeichnung Messstelle	Kurzbezeichnung	Sensor /Hersteller
Dachabsorber Wärme	Q_SOLAR	Kamstrup Wärmehzähler Multical 602
Solekreis Wärme	Q_SOLE	Kamstrup Wärmehzähler Multical 602
Regeneration Wärme	Q_REG	Kamstrup Wärmehzähler Multical 602
Speicherladung Wärme	Q_SP	Kamstrup Wärmehzähler Multical 602
Heizung Wärme	Q_HZ	Kamstrup Wärmehzähler Multical 602
Warmwasser Wärme	Q_WW	Kamstrup Wärmehzähler Multical 602

4.1.2. Elektrik

Die von der PV-Anlage erzeugte Energie wird zunächst im Haushalt selbst genutzt oder im Batteriespeicher zwischengespeichert, sofern keine Verbraucher eingeschaltet sind. Im Falle des Stromüberschusses erfolgt eine Einspeisung ins öffentliche Netz. Tritt ein Energiebedarf im Haushalt auf, der nicht von der Solaranlage gedeckt werden kann, wird zunächst die Batterie entladen. Erst wenn die Kapazität des Energiespeichers auf 12 % gefallen ist, wird die Energie aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen. Dazu siehe auch Kapitel 6.2 „Eigenstromnutzung“.

Um alle Energieflüsse detailliert zu erfassen, sind für die unterschiedlichen elektrischen Verbraucher im Haushalt eine Reihe von Stromzählern installiert. Dies sind im einzelnen Zähler für die Wärmepumpe, den Elektro-Heizstab des Kombispeichers, den Haushaltsstrom sowie Unterzähler für die Lüftungsanlage, die Brauchwasserpumpe, die Zisternenpumpe, den Elektroherd und diverse Umwälzpumpen und Regelungen. Die Verbrauchswerte der Beleuchtung werden nicht direkt gemessen, sondern über die Einschaltzeiten der einzelnen Lampen berechnet. Da jede Lampe und jeder Schalter am KNX/EIB-Bussystem angeschlossen ist, ist es möglich, die Einschaltzeiten im Einzelnen abzufragen und aus der Einschaltzeit den Energieverbrauch zu bestimmen. Die Verbrauchswerte der Haushaltsgeräte werden über die Differenz des Hauptzählers und der weiteren Unterzähler ermittelt. Das Elektro-Schema ist in Abbildung 4-2 wiedergegeben.

Der Strombezug aus dem öffentlichen Stromnetz sowie die Stromerzeugung und die Einspeisung ins Netz werden von Abrechnungszählern des Energieversorgers gemessen. Dies sind Zweizeigzähler, die sowohl Einspeisung als auch Bezug aufzeichnen.

Tabelle 4-2: Eingesetzte Stromzähler

Bezeichnung Messstelle	Kurzbezeichnung	Sensor /Hersteller
Netzbezug	QEL_BEZ	Easymeter Q3DA1026, 3-phasig
Netzeinspeisung	QEL_ESP	Easymeter Q3DA1026, 3-phasig
PV-Erzeugung	QEL_PVE	Easymeter Q3DA1026, 3-phasig
PV-Regelung	QEL_PVR	Easymeter Q3DA1026, 3-phasig
Batteriespeicher-Abgabe	QE_Total_528	IBC-Solguard
Wärmepumpe	QEL_WP 1/2	Finder 7E.46, 3-phasig
Heizstab	QEL_HZ	Finder 7E.46, 3-phasig
Haushalt gesamt	QEL_GES	Finder 7E.46, 3-phasig
Pumpe Solekreis	QEL_SOL	Finder 7E.23, 1-phasig
Speicher Ladepumpe	QEL_SP	Finder 7E.23, 1-phasig
Heizkreispumpe	QEL_HZP	Finder 7E.23, 1-phasig
Pumpe Regenerationskreis inkl. Regelung	QEL_REG	Finder 7E.23, 1-phasig
Lüftungsgerät	QEL_RLT	Finder 7E.23, 1-phasig
Pumpe Zisterne	QEL_ZIS	Finder 7E.23, 1-phasig
Elektroherd	QEL_EH	Finder 7E.46, 3-phasig

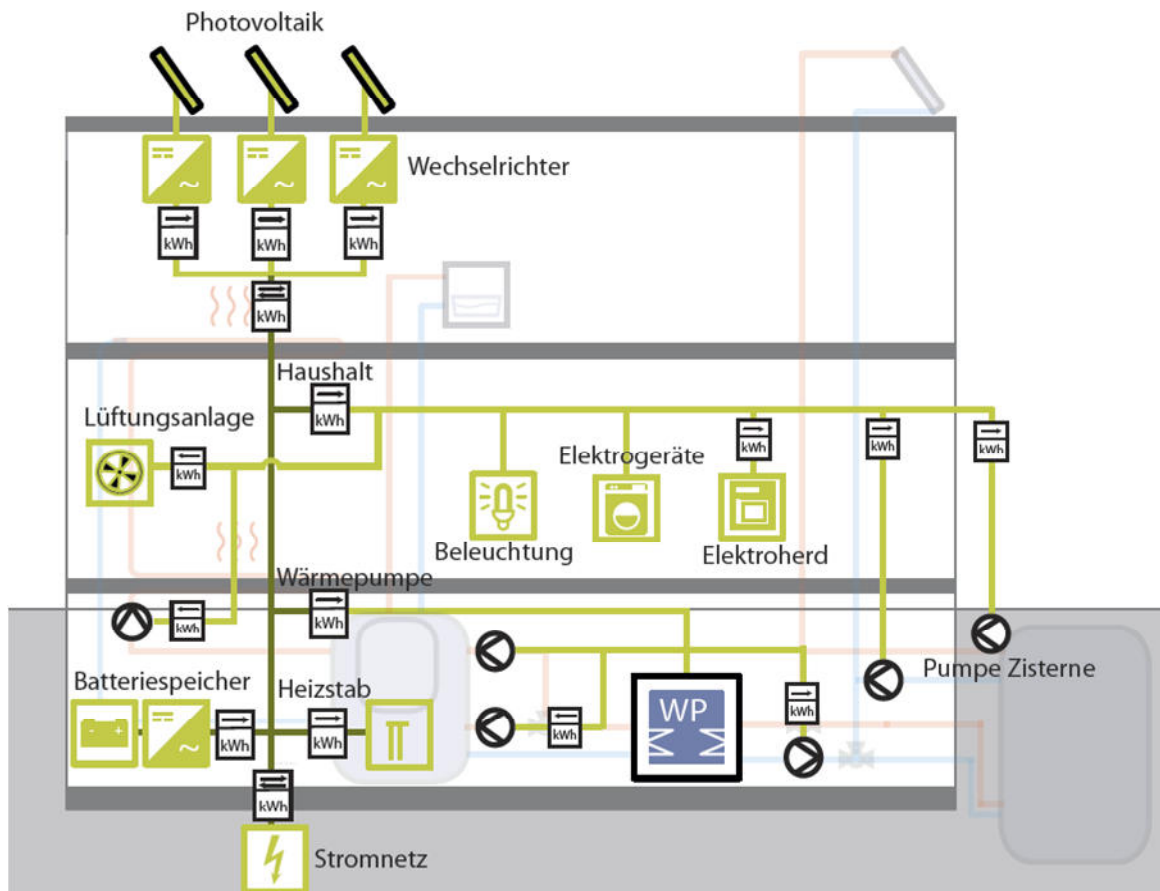


Abbildung 4-2: Elektro-Schema

4.2. Verwendete Messtechnik

Bei den sechs Wärmemengenzählern handelt es sich um Geräte der Firma Kamstrup, Typ MULTICAL 602 (Tabelle 4-1). An ein Rechenwerk zur Wärme- bzw. Kältemessung sind ein Ultraschall-Durchflusssensor sowie zwei Temperatursensoren zur Ermittlung der Temperaturdifferenz angeschlossen. Ein Kommunikationsmodul für den KNX/EIB-Bus ist im Zähler eingebaut.

Als elektronische Wirkstrom-Energiezähler sind ein- und dreiphasige Zähler eingesetzt (Tabelle 4-2). Die vom Energieversorgungs-Unternehmen zu Abrechnungszwecken eingebauten Zähler (EasyMeter Q3DA 1026) sind mit einer optischen Schnittstelle ausgestattet, die es ermöglicht, aktuelle Messwerte sowie Energie-Zählerstände über das Bussystem abzufragen. Diese Zähler sind Zweirichtungszähler und messen den Strombezug und die Einspeisung ins öffentliche Netz sowie die Stromerzeugung und den Eigenverbrauch der PV-Anlage (Regelung und Elektronik der Wechselrichter). In Reihe dazu sind zwei weitere Drehstromzähler installiert, die die gleichen Werte messen und diese der Solaranlagen-Regelung zur Verfügung stellen (Hager EHZ363).

Die Stromverbraucher im Haus werden über drei- und einphasige Stromzähler erfasst. Den drei Hauptzählern „Finder 7E.46“ für den Bereich Haushaltsstrom, die Wärmepumpenanlage und den Elektro-Heizstab sind die Zähler für den Elektroherd, die Zisternenpumpe, die Lüftungsanlage sowie die Pumpen und Regelsysteme der Heizung untergeordnet (Finder 7E.23). Alle Zähler sind M-Bus-Zähler und über einen M-Bus-Adapter an das KNX/EIB-Bussystem angeschlossen.

Die Lufttemperaturen und relativen Luftfeuchten im Gebäude werden mit Sensoren gemessen, deren nachgeschaltete Elektronik den direkten Anschluss an das KNX/EIB-Bussystem ermöglicht. In Tabelle 4-3 sind die Messgeräte für Temperatur, Luftfeuchte und Globalstrahlung aufgeführt.

Technische Daten und Genauigkeitsklassen der verwendeten Messtechnik sind im Anhang C zusammengestellt.

Tabelle 4-3: Temperatur-/Feuchtesensorik und Globalstrahlungsgeber

Bezeichnung Messstelle	Kurzbezeichnung	Sensor /Hersteller
Globalstrahlung horizontal	I_GLOBAL	Kipp & Zonen CM11
Außenlufttemperatur	TL_A	Rotronic Hygroclip S3
Außenluftfeuchte	RF_A	Rotronic Hygroclip S3
Temperatur Wohnküche	TL_R1	Arcus eds SK03-TFK
Luftfeuchte Wohnküche	RF_R1	Arcus eds SK03-TFK
Temperatur Arbeitsraum	TL_R2	Arcus eds SK03-TFK
Luftfeuchte Arbeitsraum	RF_R2	Arcus eds SK03-TFK
Temperatur Empore	TL_R3	Arcus eds SK03-TFK
Luftfeuchte Empore	RF_R3	Arcus eds SK03-TFK
Lüftung Temperatur Erdkanal	TL_EK	Arcus eds SK01-T-ESTF
Lüftung Temperatur Zuluft	TL_ZU	Arcus eds SK01-T-ESTF
Lüftung Temperatur Abluft	TL_AB	Arcus eds SK01-TFK-RPFF-MMF
Lüftung Rel. Feuchte Abluft	RF_AB	Arcus eds SK01-TFK-RPFF-MMF
Lüftung Temperatur Fortluft	TL_FO	Arcus eds SK01-T-ESTF
Temp. Eisspeicher 1 (intern)	T_EIS1	Arcus edsSK08-T8
Temp. Eisspeicher 2 (Wandung)	T_EIS2	Arcus edsSK08-T8
Temp. Eisspeicher 3 (1 m)	T_EIS3	Arcus edsSK08-T8

4.3. Dokumentation

Über das KNX-EIB Bussystem werden sämtliche Messfühler und Energiezähler abgefragt. Sie senden die aktuellen Werte und Zählerstände in einem vorher festgelegten Intervall von 15 Minuten über einen KNX IP-Router an den im System integrierten Homeserver. Dieser wiederum versendet die gesammelten Daten alle 24 Stunden in einer Tagesdatei im Textformat an das Fachgebiet Bauphysik der Universität Kassel. Die Tagesdateien werden in einer Datenbank zusammengefasst.

5. Meteorologische Randbedingungen

5.1. Solarstrahlung

Auf dem Dach des Hauses befindet sich die Messtechnik für meteorologischen Daten. Die globale Solarstrahlung wird mit einem horizontal ausgerichteten Pyranometer gemessen, die Außenlufttemperatur und die relative Außenluftfeuchte werden über einen kombinierten Messwertgeber erfasst, der in einer Strahlenschutzhütte angebracht ist. Abbildung 5-1 und Abbildung 5-3 zeigen die Globalstrahlung und die Außenlufttemperatur im Jahresverlauf von April bis März als Stundenmittelwerte. Diese Werte werden den berechneten Werten nach DIN V 18599 gegenübergestellt. Die gemessenen Werte von 2014/15 bis 2015/16 unterscheiden sich nur geringfügig.

In Abbildung 5-2 wird die von der Photovoltaikanlage erzeugte Energie und die Solarstrahlung am Standort den nach DIN V 18599 berechneten Werten gegenübergestellt.

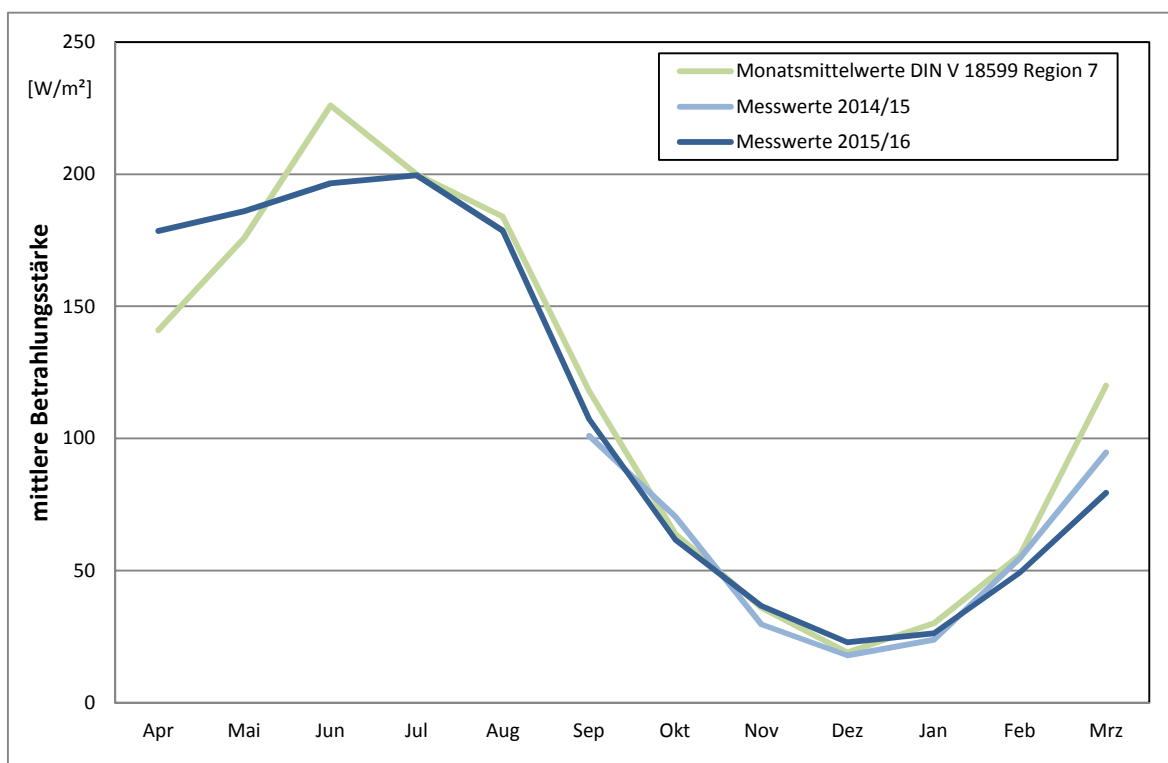


Abbildung 5-1: Mittlere Globalstrahlung von April 2014 bis März 2016

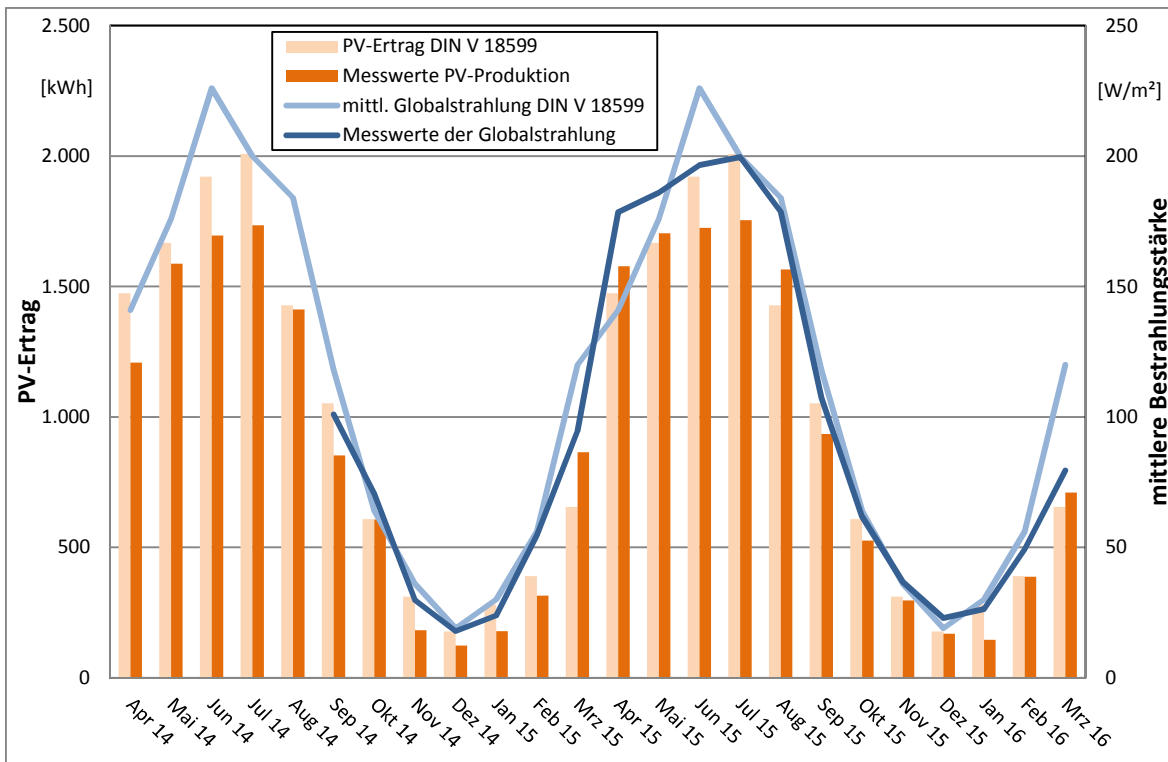


Abbildung 5-2: Globalstrahlung (gemessen und nach DIN V 18599) und PV-Ertrag

5.2. Außenlufttemperaturen

Die gemessenen Außenlufttemperaturen liegen im Mittel um ca. 2 K höher als die Standard-Klimadaten nach DIN V 18599 (Abbildung 5-3).

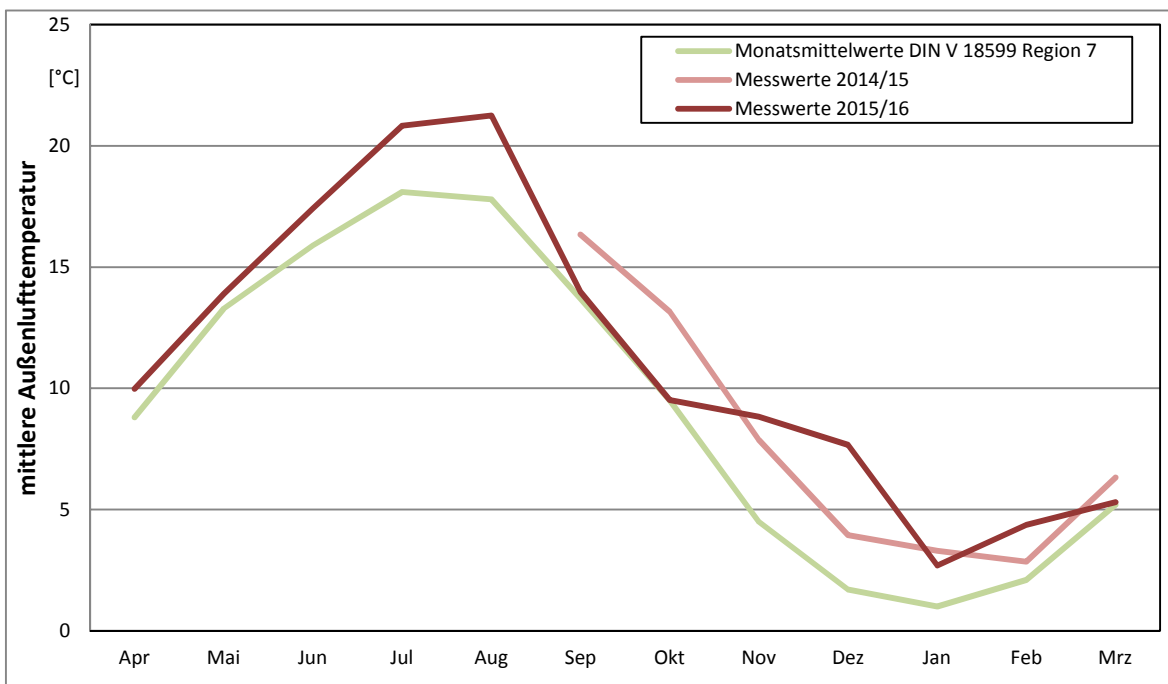


Abbildung 5-3: Mittlere Außenlufttemperatur von April 2014 bis März 2016

5.3. Klimabereinigung

Die Gradtagzahlen am Standort Kassel für den Messzeitraum sind in Tabelle 5-1 dargestellt. Daraus ergeben sich die Klimafaktoren für den Standort Kassel. Während des Messzeitraums waren die Temperaturen am Standort deutlich höher als im langjährigen Mittel und ebenfalls deutlich höher als bei mittleren Klimaverhältnissen in Deutschland üblich.

Tabelle 5-1: Gradtagzahl

Standort und Betrachtungsperiode	Gradtagzahl G20/12 [Kd]
Gradtagzahl am Standort Kassel, Zeitraum Sep. 14 bis Aug. 15*	2688
Gradtagzahl am Standort Kassel, Zeitraum Jan. bis Dez. 15*	2483
Gradtagzahl am Standort Kassel für das langjährige Mittel (43 Jahre bis 2015)**	3480
Gradtagzahl für das Referenzklima Deutschland	3601

* berechnet aus Messwerten nach VDI 3807 Blatt 1 siehe Anhang

** Institut Wohnen und Umwelt (IWU) mit Daten des DWD

- Klimafaktor bezogen auf den Standort Kassel:
 $KF = 3480 \text{ Kd} / 2688 \text{ Kd} = 1,29$ für Sep. 14 bis Aug. 15
 $KF = 3480 \text{ Kd} / 2483 \text{ Kd} = 1,40$ für Jan. bis Dez. 15
- Klimafaktor bezogen auf deutsches Normklima:
 $KF = 3601 \text{ Kd} / 2688 \text{ Kd} = 1,34$ für Sep. 14 bis Aug. 15
 $KF = 3601 \text{ Kd} / 2483 \text{ Kd} = 1,45$ für Jan. bis Dez. 15

6. Messergebnisse

6.1. Stromverbrauch

Die Zählerstände der Hauptzähler mit den Verbräuchen für Haushalt, Wärmepumpe und Elektro-Heizstab werden ab April 2014 erfasst. Im August 2014 wird die automatische Messerfassung in Betrieb genommen, die es ermöglicht, Energieflüsse mit einer Auflösung von 15 Minuten zu betrachten. Nach der Installation der restlichen Stromzähler können ab Ende Oktober 2014 die Stromverbräuche für die Anlagentechnik, Haushaltsgeräte und Beleuchtung separat erfasst werden. In Abbildung 6-1 ist der Stromverbrauch nach Kategorien für die Monate Oktober bis März 2014/2015 und 2015/2016 dargestellt. Die vergleichende Darstellung der Wintermonate wird gewählt, da detaillierte Daten der einzelnen Kategorien erst ab Okt. 2014 vorliegen. Der monatliche Stromverbrauch als Gesamtverbrauch ist in Abbildung 6-2 dargestellt. Im Diagramm erkennt man ab Dezember 2015 einen im Vergleich zum Vorjahr höheren Verbrauch. Dies kann im Zusammenhang mit dem Nachwuchs der Bewohner gesehen werden; ab Dezember 2015 wird das Haus von vier Personen bewohnt.

6 Messergebnisse

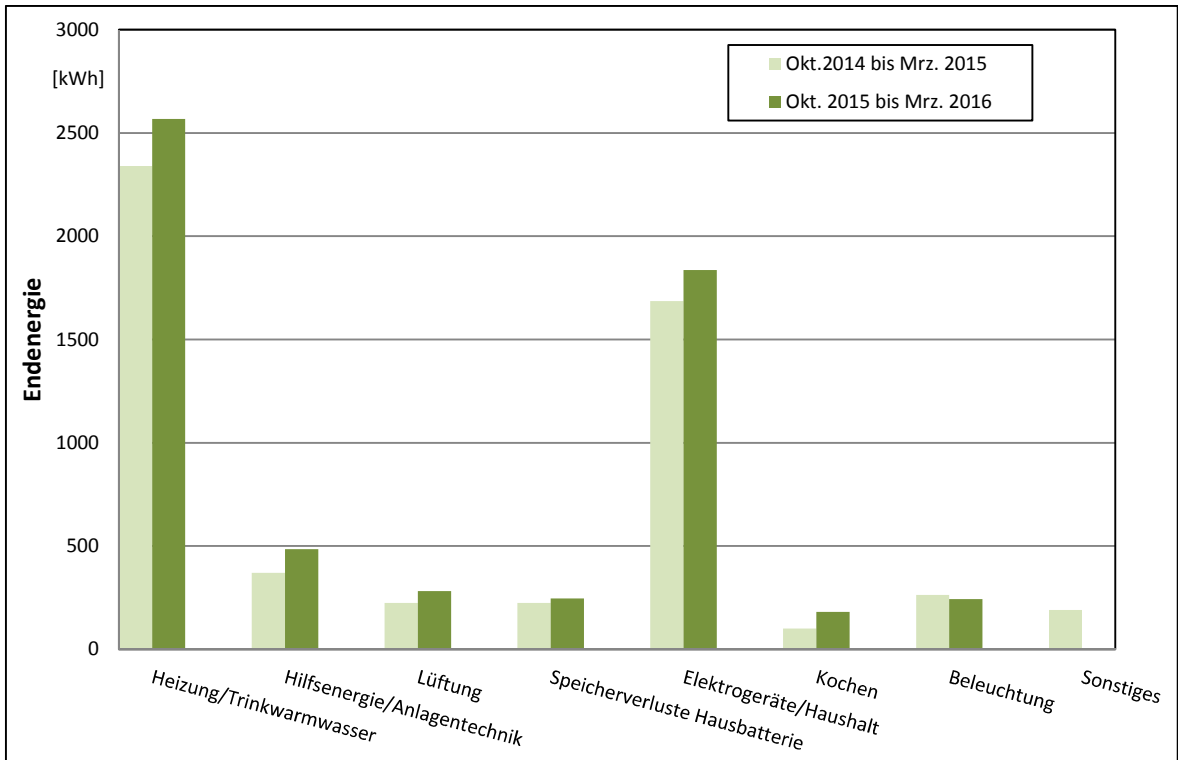


Abbildung 6-1: Stromverbrauch nach Kategorien

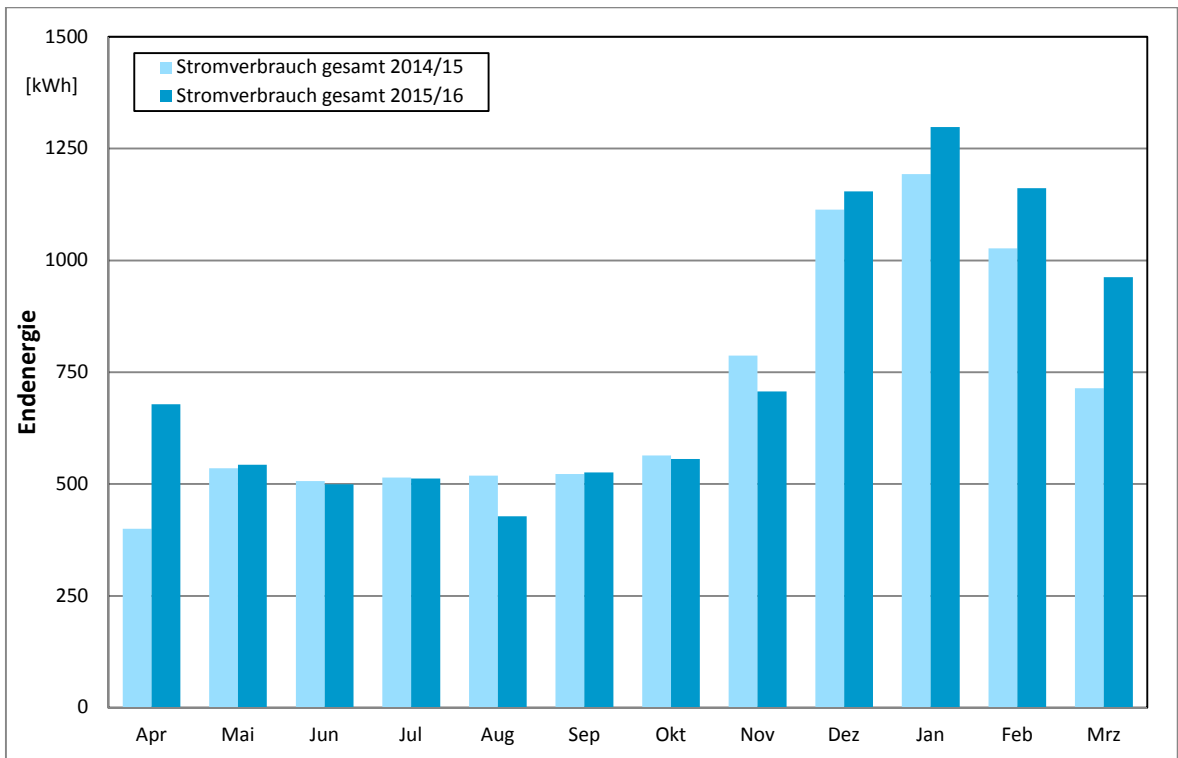


Abbildung 6-2: Gesamt-Stromverbrauch des Hauses

6.1.1. Stromverbrauch für Hausbetrieb

Der Stromverbrauch für den Hausbetrieb ist in folgenden Kategorien unterteilt

- Heizung und Trinkwarmwasser
- Hilfsenergie und Anlagentechnik (beinhaltet Pumpe Solekreis QEL_SOL, Pumpe Regenerationskreis inkl. Regelung Eisspeicher QEL_REG, Speicherladepumpe Hzg. QEL_SP, Ladepumpe TWW QEL_SPWW, Heizkreispumpe QEL_HZP, Zisterne QEL_ZIS, Regelung Wechselrichter QEL_PVR)
- Lüftung
- Speicherverluste Hausbatterie
- Elektrogeräte Haushaltsstrom
- Elektroherd
- Beleuchtung

In den Diagrammen Abbildung 6-3 bis Abbildung 6-9 werden die Monatssummen der einzelnen Kategorien dargestellt. Einige Energiezähler sind erst ab Juli bzw. Oktober 2014 in Betrieb.

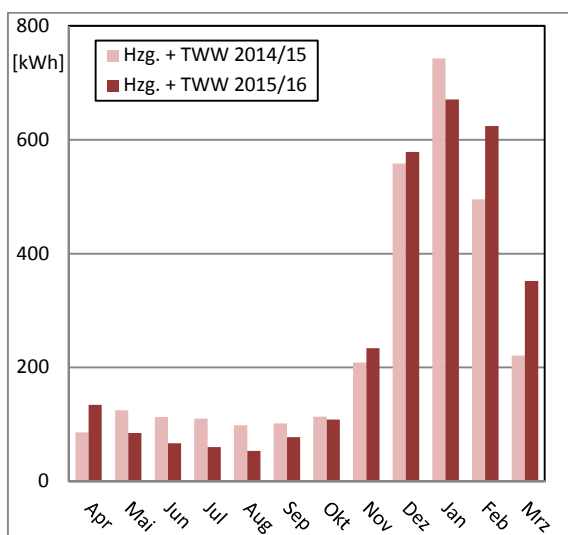


Abbildung 6-3: Stromverbrauch Heizung und Trinkwarmwasser

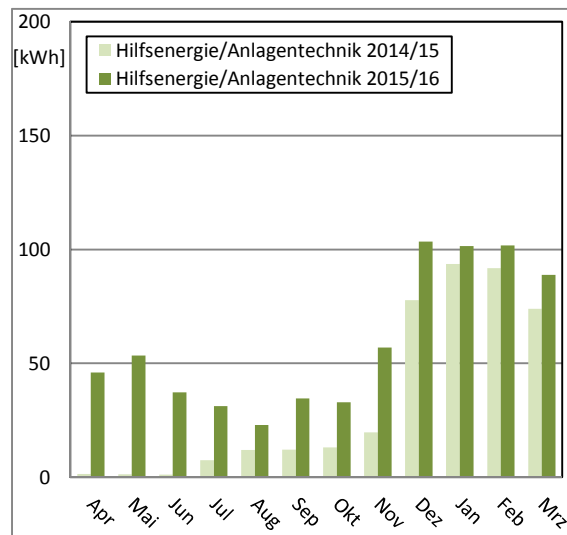


Abbildung 6-4: Stromverbrauch Hilfsenergie und Anlagentechnik

6 Messergebnisse

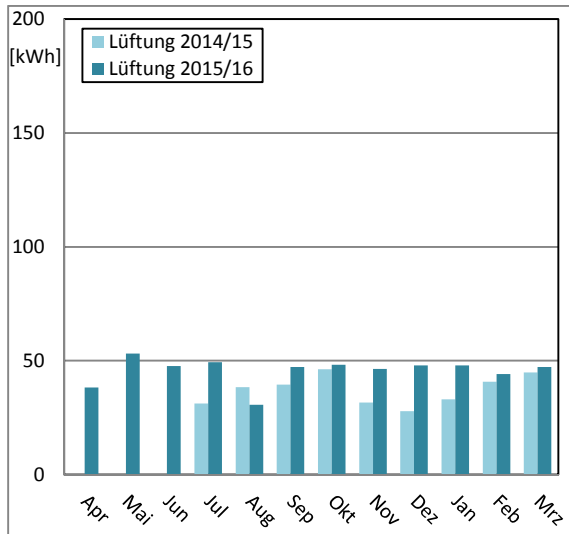


Abbildung 6-5: Stromverbrauch Lüftung

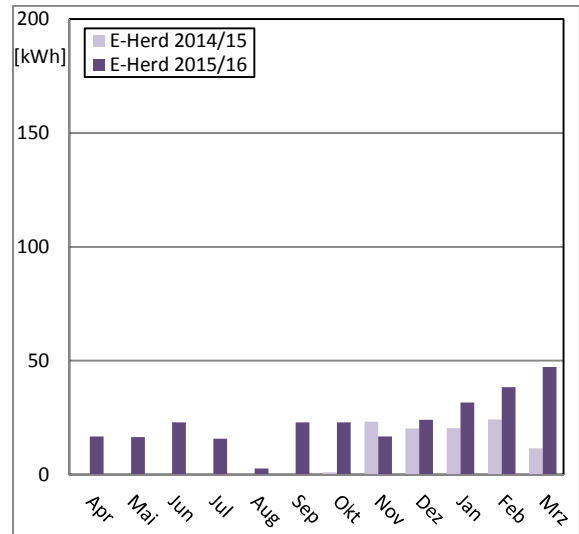


Abbildung 6-8: Stromverbrauch Elektroherd

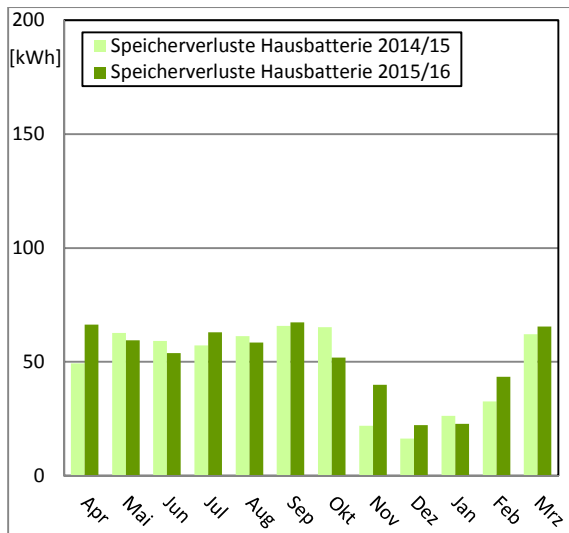


Abbildung 6-6: Speicherverluste Hausbatterie

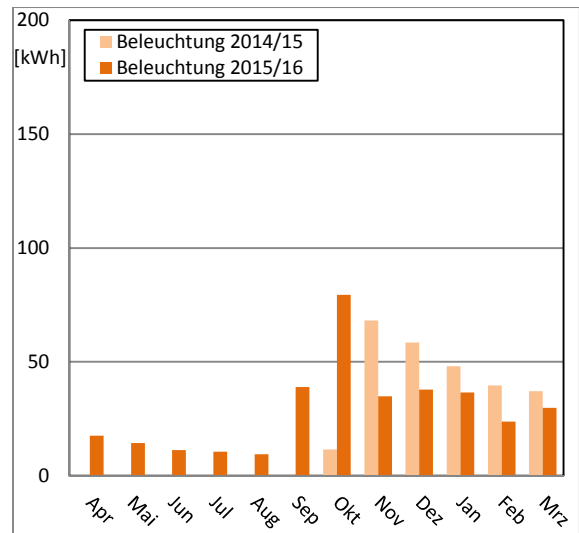


Abbildung 6-9: Strom für Beleuchtung

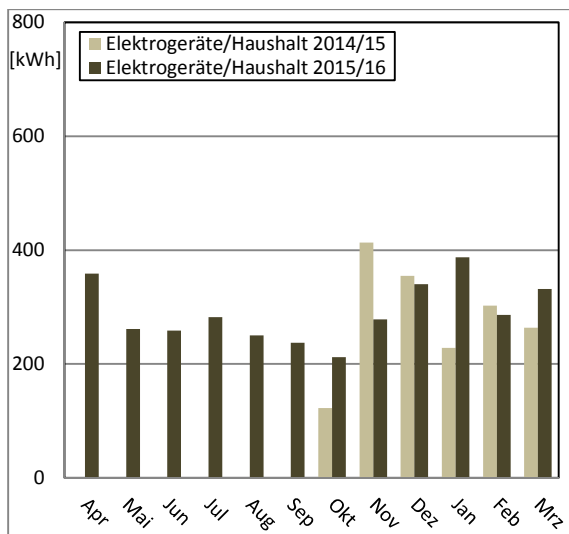


Abbildung 6-7: Haushalt und Elektrogeräte

6.1.2. Stromverbrauch für projektspezifischen Anteil

Der projektspezifische Anteil am Stromverbrauch reduziert sich auf den Verbrauch der Energiezähler und Messfühler. Der Wärmemengenzähler MULTICAL 602 hat einen Leistungsverbrauch von weniger als 1 W. Die Verlustleistungen bei den Stromzählern betragen max. 4,5 W beim Drehstromzähler bzw. 0,4 W beim einphasigen Modell. Die Stromzähler sind nur während des Zählbetriebs verlustbehaftet. Die Messtechnik, bestehend aus Temperatur-/Feuchtesensoren und einem Pyranometer mit Verstärker, hat deutlich geringere Verlustleistungen. Die Leistungsaufnahme aller Geräte ist in der Regel als Maximalwert zu verstehen. In Tabelle 6-1 sind die Verlustleistungen der projektbezogenen Messtechnik aufgelistet. Weitere Stromzähler sind als Abrechnungszähler oder als Teile der Regelungstechnik der PV-Anlage eingesetzt und somit nicht projektspezifisch. Ebenso verhält es sich mit dem Datenbus, der unabhängig vom Projekt installiert ist, um Steuerungen der Gebäudetechnik zu ermöglichen. Berechnet man den Energieverbrauch der projektspezifischen Messtechnik, so erhält man einen Maximalwert von 23,0 kWh pro Monat bzw. 276 kWh/a. Dieser Stromverbrauch ist den jeweiligen Stromzweigen zuzurechnen und wird, da es sich um einen theoretischen Maximalwert handelt, nicht separat dargestellt.

Tabelle 6-1: Projektspezifischer Stromverbrauch durch Messtechnik

Gerät	Verlustleistung [W]	Anzahl	Gesamt [W]
Wärmemengenzähler MULTICAL 602	1	6	6
Verstärker für Pyranometer	0,5	1	0,5
Temperatur-/Feuchtefühler Hygroclip S3	0,07	1	0,07
Analogeingang ABB-AE/S 4.2	3	1	3
Modul für PT100 SK08-T8	0,24	1	0,24
Temperatur-/Feuchtefühler SK03-TFK	0,24	3	0,72
Temperaturfühler SK01-T-ESTF	0,24	3	0,72
Temperatur-/Feuchtefühler SK01-TFK-RPFF-MMF	0,24	1	0,24
Finder 7E.46	3 x 1,5	4	18
Finder 7E.23	0,4	6	2,4
Summe		20	31,9

6.1.3. Stromverbrauch für Elektromobilität

Elektromobilität ist im Effizienzhaus Plus in Kassel derzeit nicht umgesetzt.

6.1.4. Gegenüberstellung von Stromgewinnung und Stromverbrauch

Die Gegenüberstellung von Stromverbrauch und Stromerzeugung zeigt sowohl in der Berechnung als auch bei den aufgezeichneten Messwerten einen moderaten Überschuss an produzierten Strom (siehe Tabelle 6-2).

Tabelle 6-2: Stromverbrauch und Stromerzeugung; Vergleich Monitoring und Berechnung

	Messwerte Apr.14 – Mrz. 15	Messwerte Apr.15 – Mrz. 16	Berechnung
Verbrauch gesamt	8.396 kWh	9.027 kWh	9.665 kWh
Erzeugung	10.761 kWh	11.496 kWh	11.975 kWh
Überschuss	2365 kWh	2469 kWh	2.310 kWh

In Abbildung 6-10 wird der monatliche Stromgewinn und Stromverbrauch gegenübergestellt. Deutlich zeigen sich Stromüberschüsse in den Monaten April bis September, während in den Monaten November bis Februar der Stromverbrauch steigt und über der Stromproduktion liegt. Dieser Verbrauch wird jedoch teilweise aus der in der Hausbatterie zwischengespeicherten Energie gedeckt.

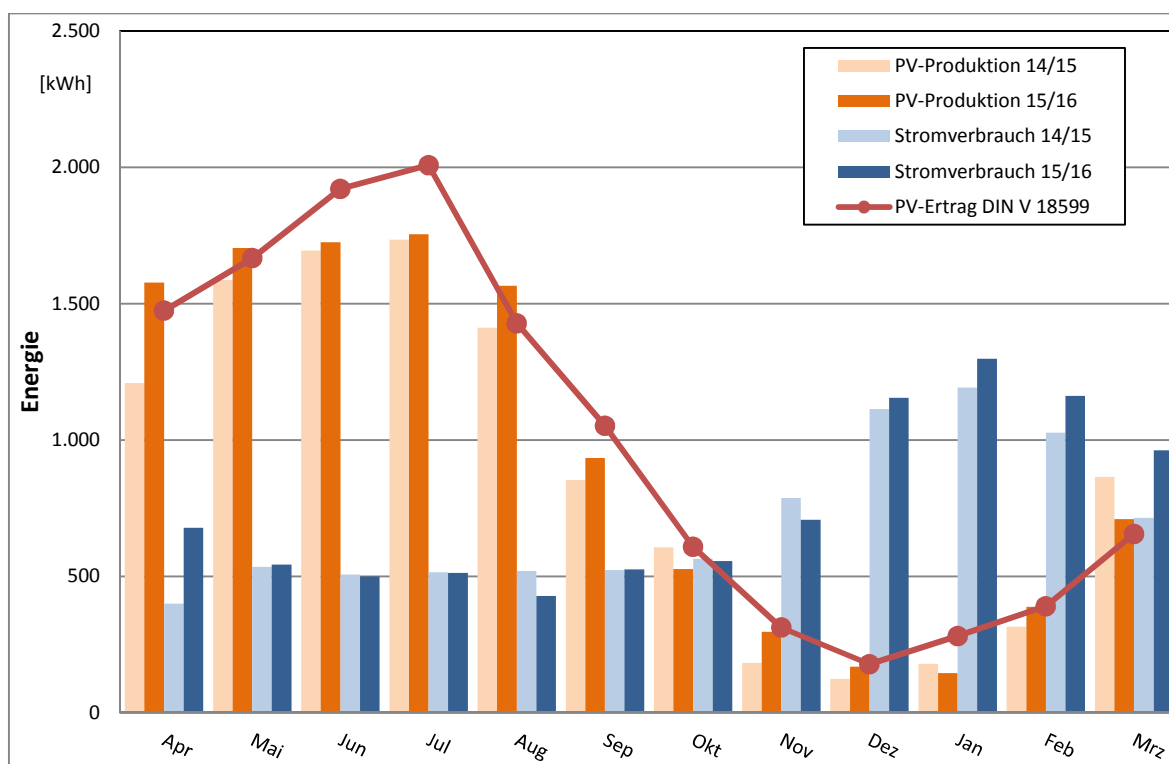


Abbildung 6-10: Gegenüberstellung von Stromverbrauch und Stromgewinn

6.2. Eigenstromnutzung

Die Eigenstromnutzung erfolgt einerseits aus dem direkt erzeugten Strom, andererseits über die in der Batterie zwischengespeicherte Energie. Ein Beispiel für die direkte Nutzung ist der Wärmepumpenbetrieb zur Brauchwassererwärmung, der meist um die Mittagszeit realisiert wird, da zu diesem Zeitpunkt die von der PV-Anlage abgegebene Energie in der Regel am höchsten ist. Die im Batteriepuffer gespeicherte Energie wird zu Zeiten genutzt, in denen kein Strom produziert wird, also vornehmlich für Beleuchtung am Abend und in der Nacht, für den Nachtbetrieb von Geräten

im Standby und für permanent betriebene Geräte (Kühlschrank, Lüftungsanlage u.a.). Erst wenn der Speicher auf einen Ladezustand von 12 % gefallen ist, wird die Energie aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen. Dieser Mindestwert von 12 % dient dazu, Tiefentladungen zu vermeiden und damit Schädigungen der Batterie zu verhindern. Bei den Beispielen in den Abbildung 6-11 und Abbildung 6-12 ist der Mindestladezustand noch auf 20 % eingestellt; der Wert wurde unterdessen vom Hersteller des Systems auf 12 % reduziert, um die nutzbare Speicherkapazität zu erhöhen.

In Abbildung 6-11 ist deutlich zu erkennen, dass die Speicherladung Priorität vor der Netzeinspeisung hat. Diese erfolgt erst nach vollständiger Ladung der Batterie. Der Betrieb der Wärmepumpe kann allein aus dem Solarstrom erfolgen. Ebenfalls zu erkennen ist, dass der Strombedarf während der Nacht bis zur Entladegrenze von 12 % aus dem Speicher gedeckt wird.

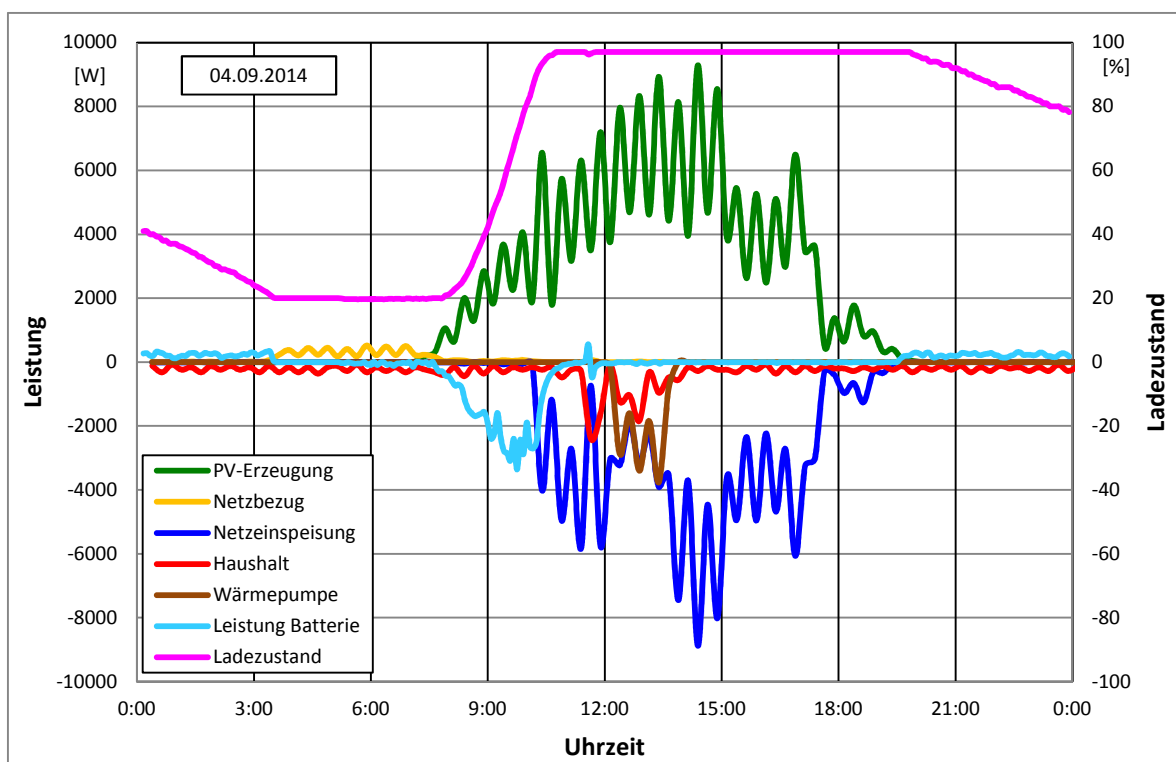


Abbildung 6-11: Elektrische Leistung von Verbrauchern und Erzeugern sowie Netzbezug, Einspeisung und Batterie-Ladezustand am 04.09.2014

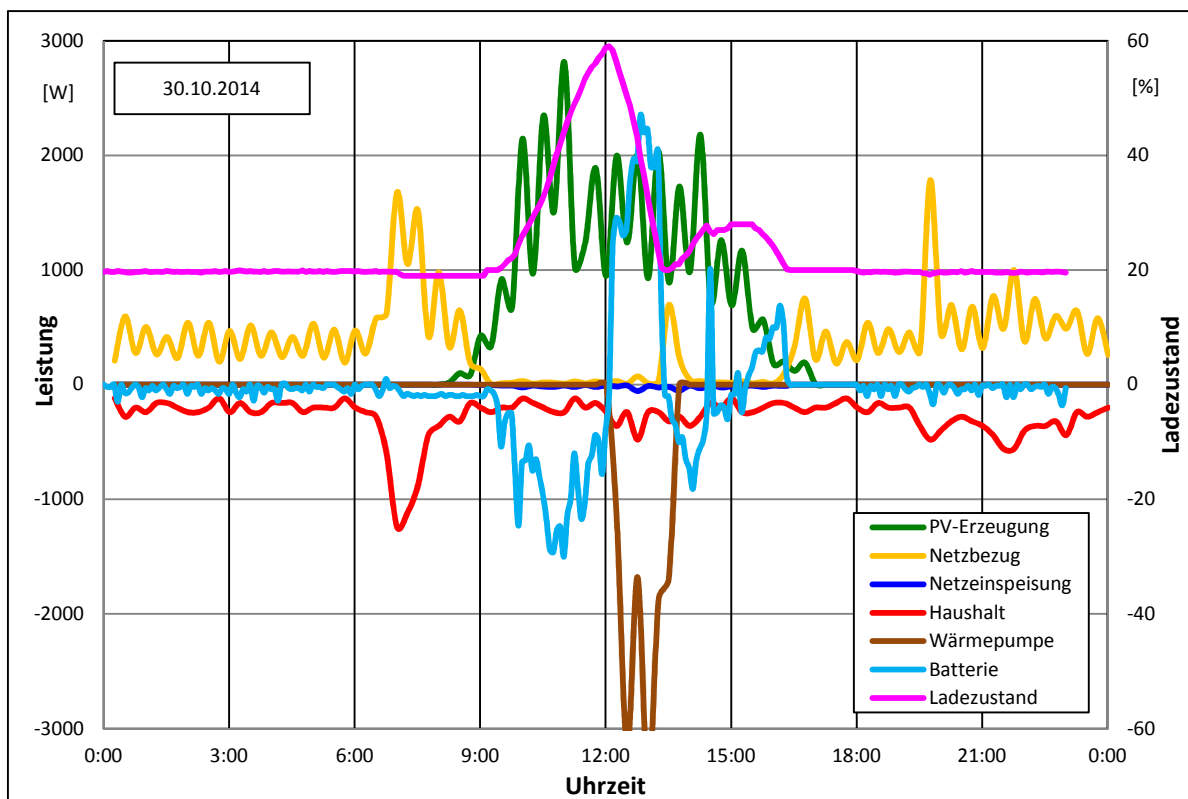


Abbildung 6-12: Elektrische Leistungen und Batterie-Ladezustand am 30.10.2014

Im Beispiel vom 30.10.2014 (Abbildung 6-12) kann die Batterie wegen geringer Solarstrahlung nicht vollständig geladen werden. Des Weiteren reicht der direkt erzeugte Solarstrom nicht aus, um die Wärmepumpe in der Mittagszeit zu betreiben. Deshalb wird zusätzlich die Energie des Batteriespeichers verwendet. Erst wenn auch hier durch die Entladegrenze keine Energie mehr abgegeben werden kann, wird der Strom für den Betrieb der Wärmepumpe dem öffentlichen Stromnetz entnommen.

In Abbildung 6-13 und Abbildung 6-14 sind die monatliche Bilanz des Solarertrags und die Eigenstromnutzung dargestellt. Die Grafiken zeigen auch den solaren Deckungsanteil sowie den Eigennutzungsanteil an der PV-Produktion. Über den Zeitraum von April bis November beträgt der solare Deckungsanteil am Gesamtstromverbrauch in beiden Jahren ca. 80 %. Darüber hinaus wird deutlich, dass die Eigenstromnutzung im jahreszeitlichen Verlauf entgegengesetzt dem regenerativen Ertrag im Sommer prozentual abnimmt und in den Wintermonaten zunimmt. Der direkt genutzte PV-Stromanteil ist umso größer, je geringer die PV-Anlage überdimensioniert wird. Umgekehrt verhält es sich mit den solaren Deckungsanteilen am Gesamt-Stromverbrauch.

6 Messergebnisse

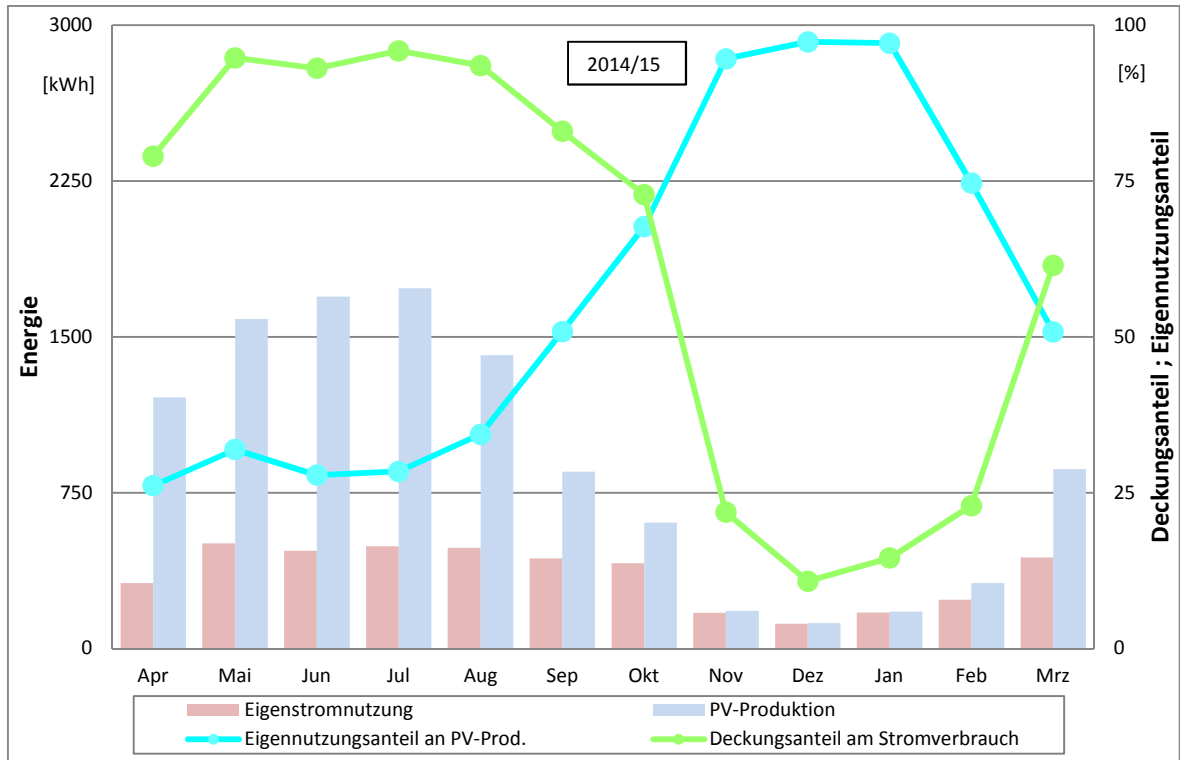


Abbildung 6-13: Monatliche Energiebilanz aus PV-Produktion, Eigenstromnutzung, Eigennutzungs- und Deckungsanteil von April 2014 bis März 2015

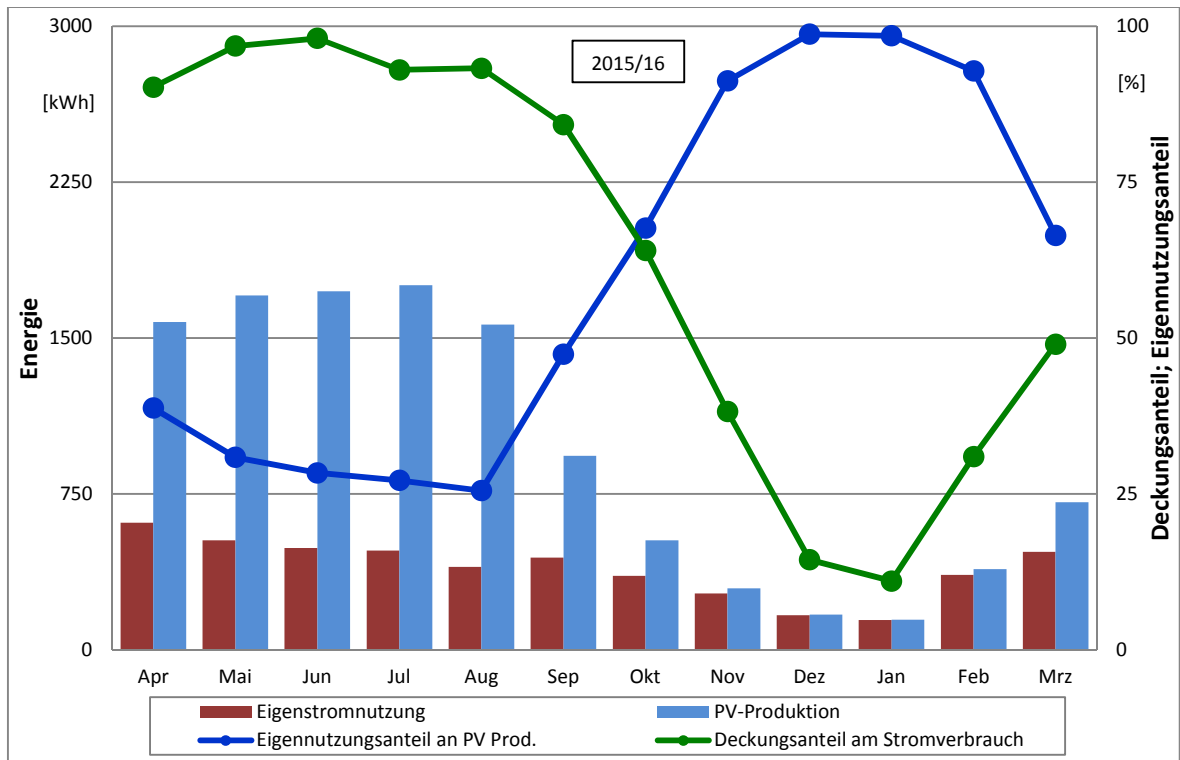


Abbildung 6-14: Monatliche Energiebilanz aus PV-Produktion, Eigenstromnutzung, Eigennutzungs- und Deckungsanteil von April 2015 bis März 2016

In der kumulierten Betrachtung in Abbildung 6-15 sind die Stromerzeugung, der Stromverbrauch und die Eigenstromnutzung dargestellt. Aus den Endwerten (Differenz aus Produktion und Verbrauch) ergibt sich ein jährlicher bilanzieller Überschuss von jeweils ca. 2500 kWh.

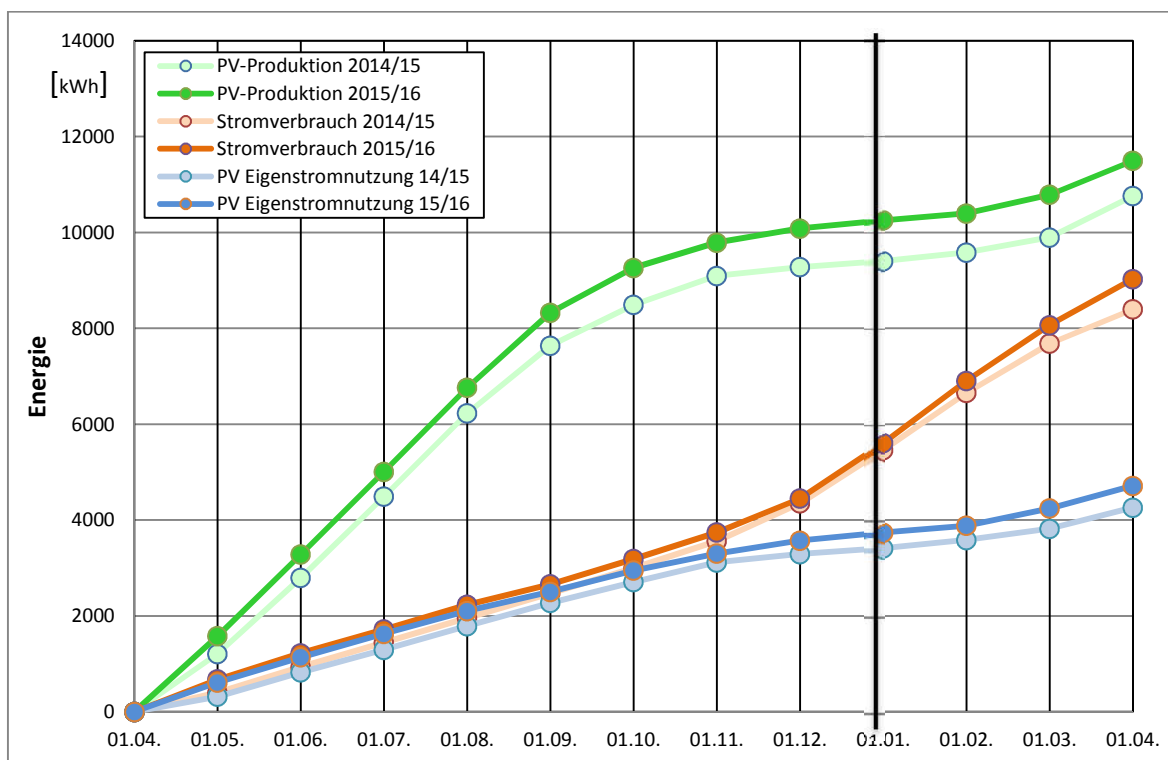


Abbildung 6-15: Kumulierte Darstellung von Endenergieverbrauch, PV-Produktion und Eigenstromnutzung

6.3. Anlagenperformance

6.3.1. Wärmeerzeuger

Wie in Kapitel 3.4 „Anlagentechnik“ beschrieben, wird zur Wärmeerzeugung eine Wärmepumpe mit Eisspeicher eingesetzt. Ein Elektro-Heizstab ist im Kombi-Pufferspeicher integriert, der bei Ausfall der WP oder in dem Fall, dass ein Wärmeentzug aus dem Eisspeicher nicht mehr möglich ist, manuell in Betrieb genommen werden kann, um Wärme für Heizung und Trinkwarmwasser zu produzieren. Im untersuchten Zeitraum musste der Heizstab im ersten Winter manuell zugeschaltet werden (November bis Februar). Aufgrund von Regelungsproblemen beim Eisspeichersystem wurde der Speicher nicht ausreichend über die Solarkollektoren regeneriert, so dass nicht genug Wärme für die Wärmepumpe zur Verfügung stand. Dies ist in Abbildung 6-16 ist zu erkennen. Man erkennt auch, dass die Temperatur des Eisspeichers bereits im Dezember 2014 Werte nahe des Gefrierpunktes einnimmt und in den folgenden Monaten noch tiefer absinkt.

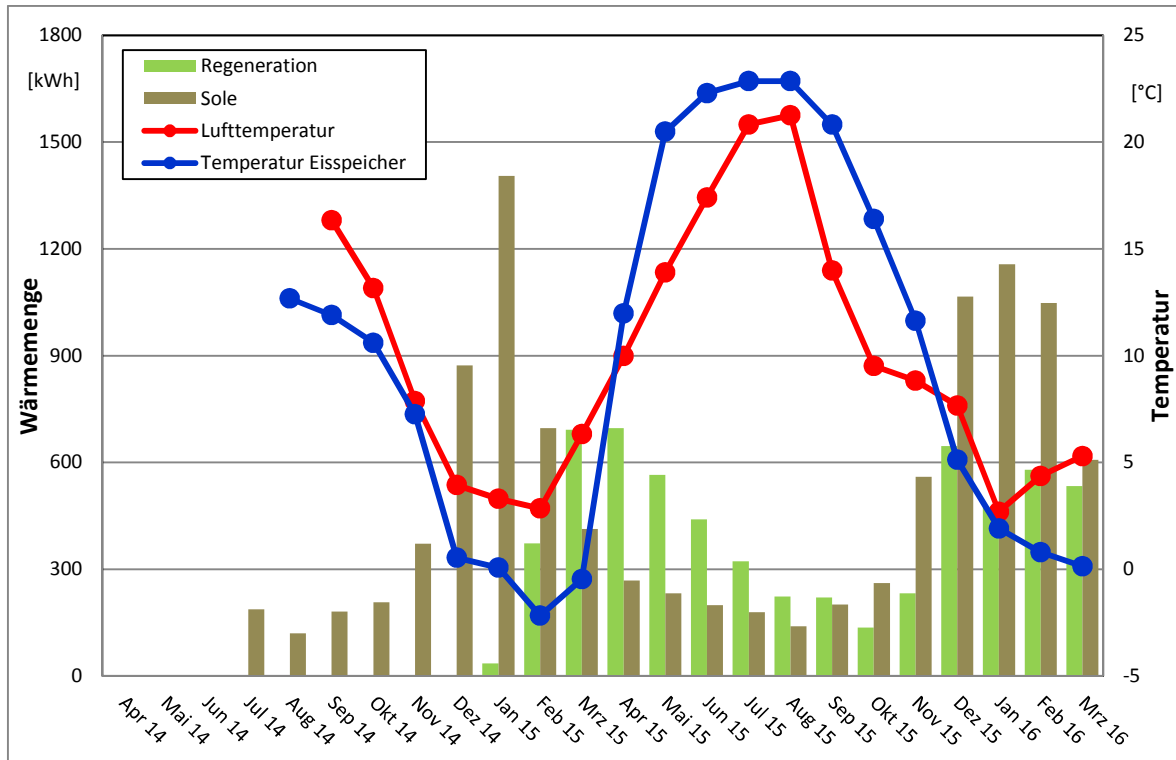


Abbildung 6-16: Wärmemengen des Sole- und Eisspeicher-Regenerationskreises sowie der gemittelte Temperaturverlauf von Außenluft und Eisspeicher

In Tabelle 6-3 wird der Stromverbrauch der Sole-Wasser-Wärmepumpe der erzeugten Wärmemenge monatsweise gegenübergestellt und die daraus resultierende Jahresarbeitszahl (JAZ) dargestellt. Die JAZ wird aus dem Verhältnis der Wärmeabgabe der Wärmepumpe zu dem Stromverbrauch der Wärmepumpe berechnet. Der Jahreswert für 2015 beträgt 3,0. Wird der Stromverbrauch der Umwälzpumpen (Sole- und Ladepumpen) der Wärmepumpe mit einbezogen, ergibt sich ein Jahreswert von 2,86. Die Monatswerte hierfür sind ebenfalls in Tabelle 6-3 wiedergegeben.

Durch anfänglich falsch verschaltete Primärkreise zwischen Eisspeicher, Dachabsorber und Wärmepumpe und eine jahreszeitlich zu früh einsetzende Vereisung des Speichers, ergeben sich niedrige Jahresarbeitszahlen. Die Verschaltung im Hydrauliksystem wird gegen Ende des Messzeitraums korrigiert, eine weitere regelungstechnische Justierung könnte das System zusätzlich verbessern.

Tabelle 6-3: Stromverbrauch, Wärmeerzeugung und Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe

Monat	Stromverbrauch [kWh]	Wärmeerzeugung [kWh]	JAZ	JAZ (inkl. Pumpen)
Apr 14	86,0			
Mai 14	125,0			
Jun 14	113,0			
Jul 14	110,4			
Aug 14	98,7	121	1,23	1,21
Sep 14	101,8	264	2,59	2,53
Okt 14	113,9	298	2,62	2,56
Nov 14	188,7	531	2,81	2,74
Dez 14	427,4	1233	2,88	2,75
Jan 15	640,9	1957	3,05	2,91
Feb 15	304,4	896	2,94	2,78
Mrz 15	220,8	548	2,48	2,37
Apr 15	134,5	342	2,54	2,47
Mai 15	85,14	271	3,18	3,08
Jun 15	67,4	230	3,41	3,29
Jul 15	60,3	210	3,48	3,20
Aug 15	53,7	174	3,24	3,06
Sep 15	77,5	243	3,14	3,04
Okt 15	108,7	319	2,93	2,84
Nov 15	233,7	695	2,97	2,86
Dez 15	578,4	1485	2,57	2,48
Jan 16	670,5	1679	2,50	2,42
Feb 16	624,1	1511	2,42	2,34
Mrz 16	351,7	867	2,47	2,39

Tabelle 6-4: Wärmebilanz der Anlage inkl. Speicherverluste

November 2014 – März 2015				April 2015 – März 2016			
Erzeugung [kWh]		Verbrauch [kWh]		Erzeugung [kWh]		Verbrauch [kWh]	
WP	5165,0	TWW	572,0	WP	8026,0	TWW	1435,0
Heizstab	443,6	Fußboden- heizung	4517,0	Heizstab	0	Fußboden- heizung	4946,0
		Verluste	519,6			Verluste	1645,0
Summe	5608,6	Summe	5608,6	Summe	8026,0	Summe	8026,0

Aus der Gegenüberstellung von Wärmeerzeugung und Nutzwärme für Fußbodenheizung und Trinkwarmwasser lassen sich die Speicherverluste beziffern. Die Wärmebilanz für den Winter 1014/15 und für den Zeitraum von April 15 bis März 16 ist in Tabelle 6-4 wiedergegeben. Da die Verbrauchswerte von Heizung und Trinkwarmwasser erst ab November 1014 zur Verfügung stehen, werden hier keine kompletten Jahre verglichen. Reduziert man den zweiten Messzeitraum auch auf die Winterperiode von November bis März, vergleicht also gleiche Zeiträume, zeigen sich ähnliche Verluste (Nov 14 bis Mrz 15: 519,6 kWh, Nov 15 bis Mrz 16: 612 kWh).

Abbildung 6-17 zeigt den zeitlichen Verlauf der erzeugten Wärmemengen und deren Verteilung. Zusätzlich ist die dem Eisspeicher entzogene Wärmemenge im Solekreis eingezeichnet.

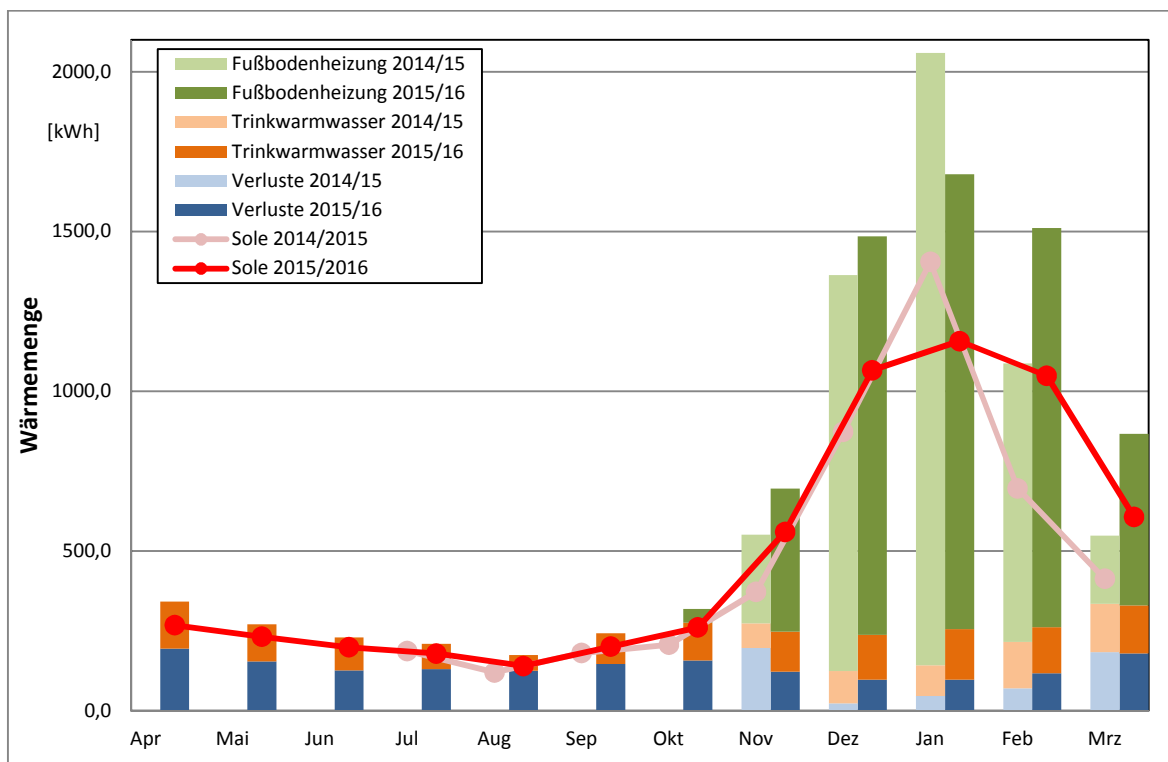


Abbildung 6-17: Zeitlicher Verlauf von Wärmeerzeugung und Verbrauch

6.3.2. Lüftungsanlage

In dem Zu- und Abluftsystem des Gebäudes ist das Wärmerückgewinnungsgerät Novus (F) 450 der Firma „Paul Wärmerückgewinnung“ eingesetzt. Es besitzt einen Gegenstrom-Wärmetauscher und drei Lüfterstufen, die einen Volumenstrom von 50 bis 450 m³ erzeugen können. Die Außenluft wird über einen ca. 35 m langen Erdrohrwärmetauscher vortemperiert. Die Anlage verfügt über einen Bypass, der im Sommerbetrieb automatisch den Wärmetauscher umgeht und dafür sorgt, dass die kühlere Luft aus dem Erdkanal direkt an die Zuluftöffnungen gelangt.

Folgende Messgrößen werden beim Monitoring erfasst:

- Außenlufttemperatur (meteorologische Messgröße, wird auf dem Dach gemessen)
- Erdkanal-Temperatur am Eingang zum Lüftungsgerät
- Zulufttemperatur
- Ablufttemperatur
- Fortlufttemperatur
- relative Luftfeuchte der Abluft

Der Stromverbrauch der Lüftung ist in Abbildung 6-5 dargestellt. Aus den Werten ergibt sich ein mittlerer monatlicher Verbrauch von 42 kWh.

6.4. Innenraumtemperaturen

Die Innenraumtemperaturen und relativen Luftfeuchten werden in drei Räumen erfasst:

- Wohnküche EG
- Arbeitsraum EG
- Empore OG

Daneben werden die Temperaturen am Lüftungsgerät sowie die Außenlufttemperatur und die Temperatur im Erdkanal aufgezeichnet.

In Abbildung 6-18 ist der zeitliche Verlauf der Raumlufttemperaturen und rel. Luftfeuchten im Monatsmittel für den Messzeitraum wiedergegeben. Zusätzlich ist die Außenlufttemperatur aufgetragen. Während der Heizperiode sind die mittleren Temperaturen relativ konstant auf 20 °C (10/14/15) bzw. 21 °C (2015/16), hingegen steigen die Werte in den Sommermonaten stark an und erreichen im Monatsmittel Werte bis zu 29 °C. Die Stundenmittelwerte können dann auf Werte über 30 °C steigen.

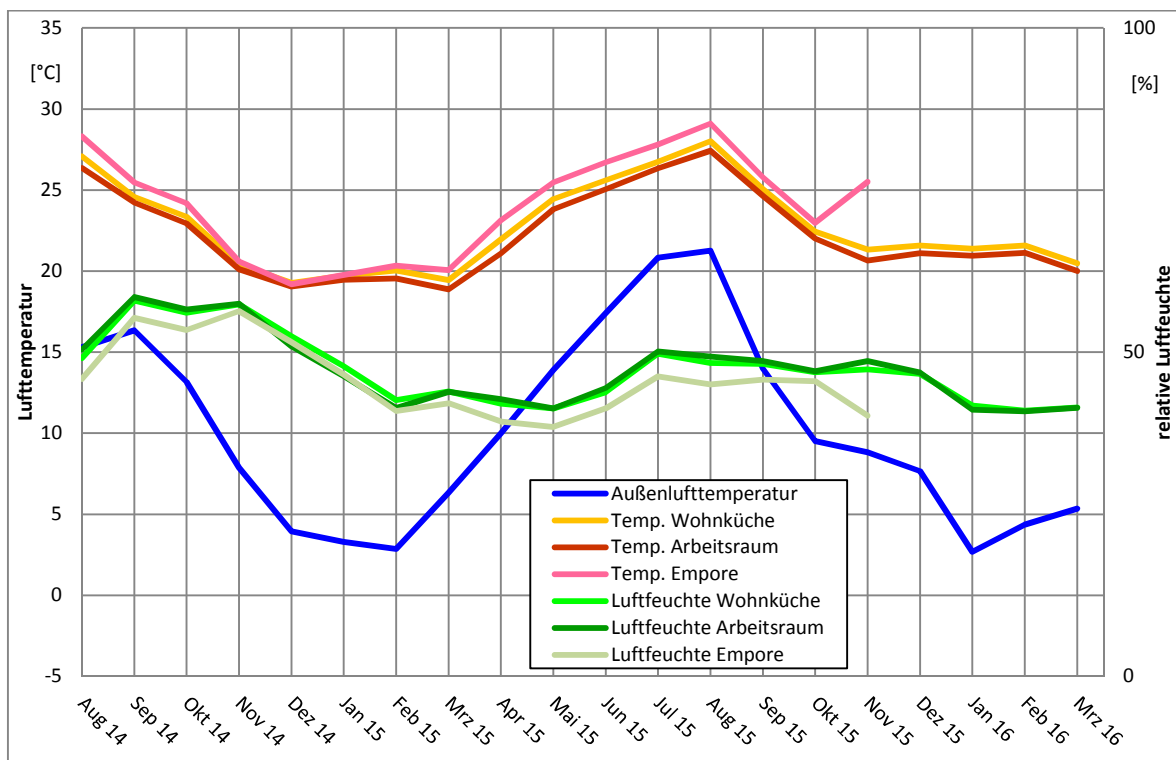


Abbildung 6-18: Raumtemperaturen und rel. Luftfeuchten sowie Außenlufttemperatur im Messzeitraum

6 Messergebnisse

Bei der Betrachtung der Temperaturen am Lüftungsgerät (Abbildung 6-19) ist zu erkennen, dass während hoher Außenlufttemperaturen im Sommer die Zuluft über den Bypass des Gerätes geleitet wird, was zu einer niedrigeren Zulufttemperatur von Juni bis August 2015 führt. Dies verdeutlicht auch der exemplarische Temperaturverlauf über den Zeitraum eines Tages mit hoher Außenlufttemperatur und hohem solaren Wärmeeintrag in Abbildung 6-20. Die Temperatur im Erdkanal ist mit ca. 20 °C vergleichsweise niedrig und die Zulufttemperatur ist nur um ca. 1,5 K höher. Hier ist auch zu erkennen, dass der Abluft keine Wärme entzogen wird ($T_{\text{fortluft}} = T_{\text{abluf}}$). Durch die Vortemperierung über den Erdkanal und den Bypass-Betrieb wird hier allerdings keine starke Abkühlung erzielt.

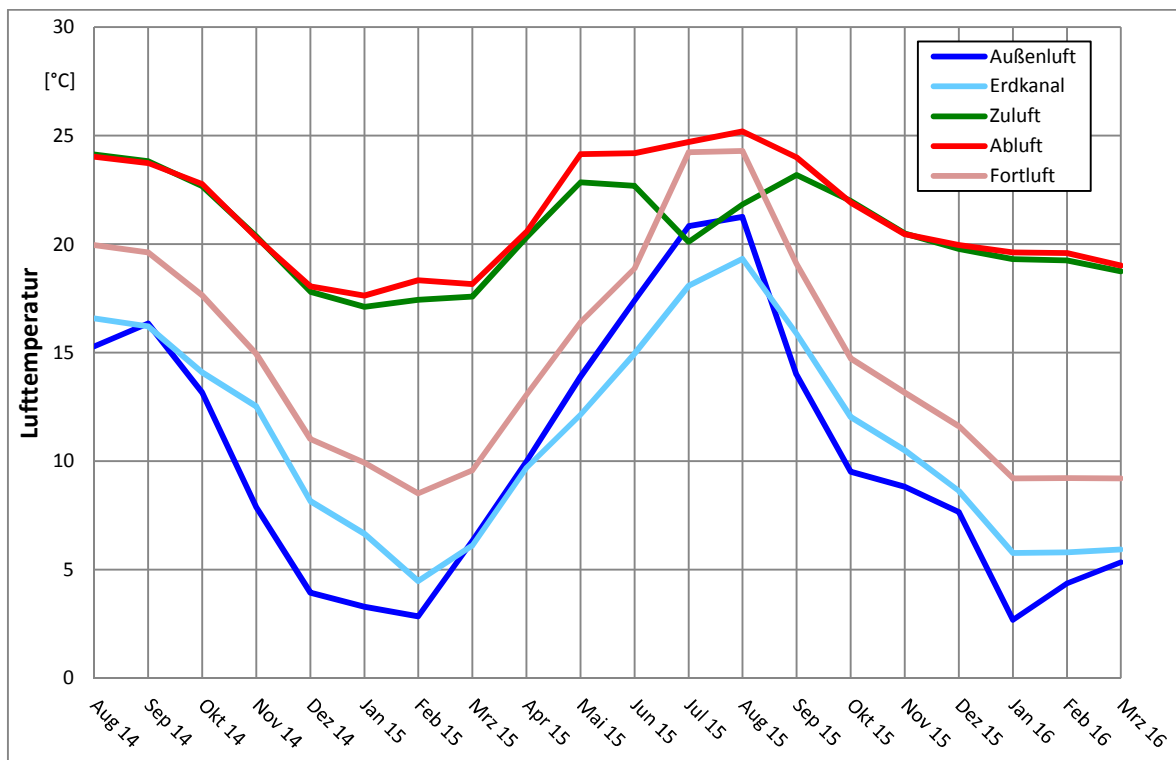


Abbildung 6-19: Mittlere Monatliche Temperaturen am Lüftungsgerät

Das Zeitdiagramm in Abbildung 6-21 veranschaulicht den Betrieb der Lüftung bei niedriger Außenlufttemperatur. Über den Erdkanal wird die Außenlufttemperatur um ca. 9 K angehoben bevor durch den Wärmeübertrager im Lüftungssystem das Temperaturniveau weiter angehoben wird. Zu- und Abluft sowie die Raumtemperaturen liegen auf fast gleicher Höhe. Die solaren Wärmegewinne an diesem Tag sind aufgrund der geringen Einstrahlung zu vernachlässigen. Der Lüftermotor der Anlage läuft mit konstanter Leistung von ca. 20 W.

6 Messergebnisse

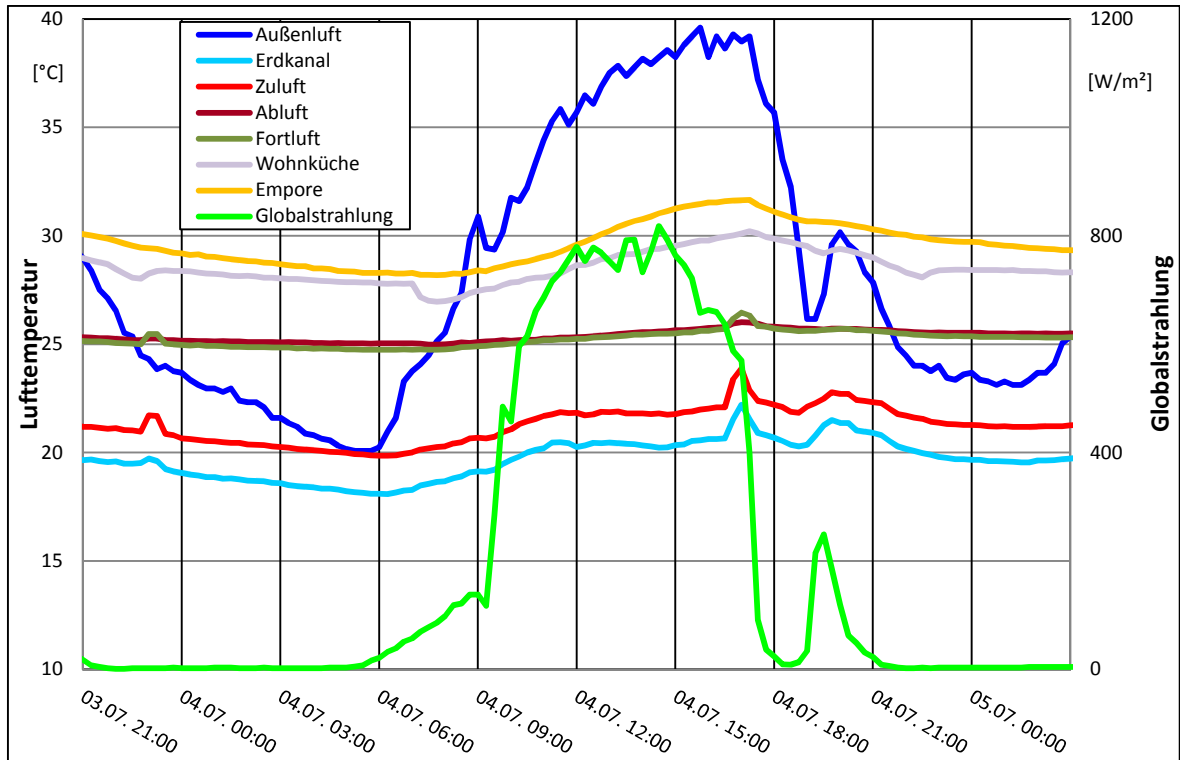


Abbildung 6-20: Temperaturen am Lüftungsgerät und Globalstrahlung am 04.07.2015

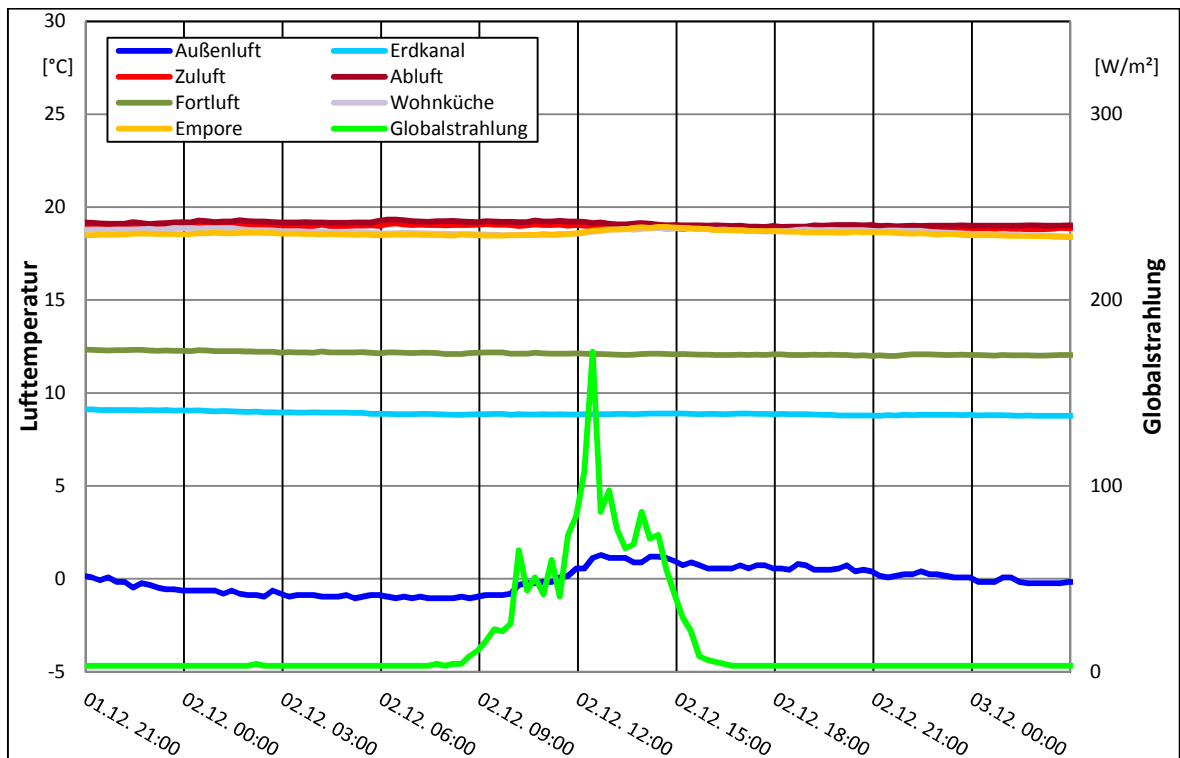


Abbildung 6-21: Temperaturen Lüftung und Wohnräume am 02.12.2014

7. Kosten / Wirtschaftlichkeit

7.1. Baukosten und laufende Kosten

Die in Tabelle 7-1 gemachten Angaben über die Baukosten des Gebäudes sind mit dem Bauherren abgestimmt. Die zur Verfügung gestellte Kostenaufstellung beinhaltet die tatsächlichen Baukosten, wobei zu berücksichtigen ist, dass Anlagenteile in Eigenleistung erstellt wurden, also lediglich die Gerätekosten aufgeführt sind.

Tabelle 7-1: Baukosten und laufende Kosten

Bauteil / Anlage	Tatsächliche Kosten inkl. MwSt. Effizienzhaus Plus
Außenwand	144 000 € ohne Bodenaushub (incl. 35 000 € Lohnkosten) + Dachdämmung 26 000 €
Dach	
Wand gegen Erdreich	
Bodenplatte	
Fenster und Türen	50 000 € inkl. Türen 7 000 €
Heizungsanlage inkl. Speicher	50 500 €
Eisspeichersystem incl. Steuerung	14 000 €
Solarthermie	-
Lüftungsanlage	15 000 €
Photovoltaik	29 000 €
Batterie (incl. Steuerung)	11 000 €
Beleuchtung	15 000 €
Energie- und Betriebskosten	Jahr 2015
Gas	-
Strom	1161 €
Wartung Heizung	-
Wartung Lüftungsanlage*	268 €
Netzeinspeisevergütung	-1548 €
Laufende Kosten pro Jahr	-119 €

* Austausch der Filtermatten nach Vorgabe und Kostenangaben des Herstellers

Die Mehrkosten in dem Projekt lassen sich etwa wie folgt beziffern:

- Investitionsmehrkosten baulicher Wärmeschutz und Anlagentechnik ca. 28.500,- €
- Investitionsmehrkosten PV-Anlage (inkl. Strompeicher) ca. 30.000,- €
- Planungsmehrkosten ca. 2.000,- €

Die Minderkosten durch reduzierte Betriebsaufwendungen gegenüber dem Niveau EnEV 2009 (Referenzgebäude) liegen bei rd. 2.200 €/a.

Durch den Effizienzhaus Plus Standard ergeben sich Mehrkosten der Investition gegenüber einer Ausführung nach Mindeststandard der EnEV 2009 von ca. 60.500,- Euro. Demgegenüber stehen jährliche Minderkosten in Höhe von ca. 2.200,- Euro. Mit den angegebenen Mehr- und Minderkosten resultiert eine statistische Amortisationszeit von rd. 28 Jahren.

7.2. Kosten Geräte

Die installierten Geräte und deren Kosten sind in Tabelle 7-2 aufgelistet. Bei der Küchenausstattung handelt es sich um ein Ausstellungsstück mit einem Gesamtpreis, weswegen die Kosten der einzelnen Komponenten nicht differenziert angegeben werden können. Angaben zu den Effizienzklassen können aufgrund von fehlenden Informationen nicht vollständig gemacht werden. Eine Mikrowelle und ein Wäschetrockner sind nicht vorhanden, zusätzlich ist jedoch ein fest installierter Staubsauger mit einem Kaufpreis von 2000 Euro zu nennen (Tabelle 7-2).

Tabelle 7-2: Haushaltsgeräte und deren Kosten

Gerät	Gerätebezeichnung	Effizienzklasse	Kosten
Herd	Gaggenau V 411/421/ Vp421 Teppanyaki	-	Gesamtpreis Ausstellungsstücke inkl. aller Geräte 18 750 €
Backofen	Gaggenau BO 270	A	
Dunstabzugshaube	Felmecc	-	
Mikrowelle	Nicht vorhanden		
Spülmaschine	Smeg	-	
Kühlschrank	Bosch KIF 27	A++	
Gefrierschrank	Siemens	-	
Waschmaschine	Siemens WM14E493	A++	
Wäschetrockner	Nicht vorhanden		
Beleuchtung	LED, Halogen verschiedener Hersteller	A bis A++	15 000 €
Staubsaubersystem, fest installiert	-	-	2 000 €
Investitionskosten			35 750 €

8. Bewertung

8.1. Energieeffizienz des Modellgebäudes

Den nach DIN V 18599 berechneten Bedarfswerten werden die gebäudebezogenen Verbrauchswerte gegenübergestellt (Tabelle 8-1). Dafür werden Messwerte von Januar bis Dezember 2015 exemplarisch herangezogen. Es zeigt sich, dass die tatsächlichen Verbrauchswerte niedriger ausfallen, als in den Berechnungen prognostiziert. Bei Heizung und Trinkwarmwasser liegt der Verbrauch ca. 16 % niedriger, bei Hausstrom und Beleuchtung ca. 11 %. Für den Betrieb der Lüftungsanlage wird nur etwa 1/5 der prognostizierten Energie benötigt. Lediglich bei der Hilfsenergie für die Anlagentechnik ist der Verbrauch deutlich höher. Fast 60 % der Hilfsenergie werden jedoch für die Umwälzpumpe im Regenerationskreis des Eisspeichers und die Regelung dieser Systemkomponente benötigt (477 kWh). Wird die Hilfsenergie ohne die Komponente Eisspeicher mit dem Rechenwert verglichen, liegt der Verbrauch nur 16 % höher (338 kWh).

Tabelle 8-1: Vergleich von Bedarf nach DIN V 18599 mit gebäudespezifischen Verbräuchen

Kategorie	Strombedarf nach DIN V 18599 [kWh]	Stromverbrauch Jan. bis Dez. 2015, klimabereinigt [kWh]
Heizung und TWW	4.376	3.654
Hilfsenergie/Anlagentechnik ohne RLT	290	815
Lüftungsanlage	2.543	528
Haushalt/Elektrogeräte	5.000	4.469

Der im Vergleich zu den Bedarfswerten insgesamt geringe Verbrauch lässt sich insbesondere aus der geringen Anzahl der Nutzer in dem großen Gebäude erklären.

Die tatsächliche Stromerzeugung der PV-Anlage ist mit 11.612 kWh im Jahr 2015 (Jan. bis Dez.) etwa so hoch wie die in der Berechnung prognostizierte Energiemenge (11.975 kWh/a). Ähnlich verhält es sich mit dem Deckungsanteil am gesamten Stromverbrauch. Dem berechneten Wert von 61,6 % steht der aus den Messwerten ermittelte Anteil von 64,3 % gegenüber.

8.2. Verbesserungspotentiale

Aus der Analyse von Messergebnissen und auch aus Gesprächen mit den Bauherren ergeben sich folgende Aspekte:

- Die zunächst falsch verschalteten Primärkreise zwischen Eisspeicher bzw. Absorber und Wärmepumpe sind nach einer Korrektur weiterhin regelungstechnisch nicht optimal eingerichtet. Durch eine verbesserte Regelstrategie könnte hier bei hinreichend solarem Strahlungseintrag das hohe Temperaturniveau des Absorbers für den Wärmepumpen-Primärkreis genutzt werden.
- Um einen Einsatz des elektrischen Heizstabes zu vermeiden ist es erforderlich, die Regeneration des Eisspeichers frühzeitig einzuleiten. Dies könnte auch durch eine verbesserte Regelung des Eisspeichersystems erfolgen.

- Getrennte Pufferspeicher für Heizung und Trinkwarmwasser könnten Speicherverluste reduzieren. Für den Pufferspeicher der Heizung ist ein niedrigeres Temperaturniveau erforderlich als für den Trinkwarmwasser-Speicher und dieses muss auch nur etwa 6 Monate zur Verfügung stehen.
- Eine bedarfsabhängige Volumenstromregelung der Lüftungsanlage kann den Energieverbrauch reduzieren und bei hohem Wärmeeintrag im Sommer helfen, zu hohe Raumtemperaturen zu vermeiden. Bisher wird lediglich die Betriebszeit durch eine Programmierung der Lüfterstufen an die Nutzungszeit angepasst.
- Der Stromverbrauch im Messzeitraum für Haushalt und Elektrogeräte ist mit 4.469 kWh (Jan. bis Dez. 2015) verhältnismäßig hoch. Im Durchschnitt liegt der Stromverbrauch für einen 3-Personen-Haushalt in Deutschland bei 3500 kWh/a (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 2014). Eine Analyse der Verbrauchsstruktur im Gebäude und der Gewohnheiten der Nutzer könnte zu einer Reduzierung des Haushaltsstroms führen.
- Insgesamt sind bei der Anlagentechnik sehr viele manuelle Eingriffe notwendig. Um einen dauerhaft niedrigen Energieverbrauch zu erzielen und die Nutzerakzeptanz zu erhöhen, wäre es vorteilhafter, mehr automatische Regelvorgänge zu realisieren.

Anhang A:

Tabelle 8-2: Zusammenstellung des Stromverbrauchs für Bezug und Hausverbrauch von April 2014 bis März 2016.

Monat	Bezug		Photovoltaik		Hausverbrauch								Summe Hausverbrauch
	Netzbezug	PV-Ertrag	PV-Einspeisung	PV-Eigenverbrauch	Heizung + TWW	Umwälzpumpen + Regelung	Lüftung	Beleuchtung	Haushaltsgeräte	E-Herd	Speicher- verluste Batterie	sonstiges	
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh		kWh	kWh
Apr 14	84,0	1209,0	893,0	316,0	86,0	1,5	---	---	---	---	49,4	263,1	400,0
Mai 14	28,0	1587,0	1080,0	507,0	125,0	1,3	---	---	---	---	62,7	346,0	535,0
Jun 14	35,0	1695,0	1223,0	472,0	113,0	1,1	---	---	---	---	59,2	333,7	507,0
Jul 14	21,1	1734,7	1241,5	493,2	110,4	7,4	31,3	---	---	---	57,2	308,0	514,3
Aug 14	33,5	1412,0	926,4	485,6	98,7	12,0	38,4	---	---	---	61,3	308,7	519,1
Sep 14	88,9	852,4	418,7	433,8	101,8	12,2	39,5	---	---	---	65,7	303,5	522,6
Okt 14	153,1	606,6	195,9	410,7	113,9	13,1	46,3	11,5	122,7	1,1	65,3	190,0	563,8
Nov 14	614,9	182,0	9,8	172,2	209,0	19,8	31,7	68,2	413,4	23,2	21,9	0	787,1
Dez 14	922,9	123,8	3,3	120,5	558,2	77,7	27,8	58,5	354,6	20,3	16,3	0	1113,4
Jan 15	1119,3	178,6	5,1	173,5	742,7	93,6	33,1	48,1	228,6	20,4	26,3	0	1192,8
Feb 15	791,2	315,4	79,8	235,6	495,1	91,8	40,8	39,7	302,5	24,2	32,7	0	1026,8
Mrz 15	274,8	864,4	425,2	439,2	220,8	73,9	44,8	37,2	263,6	11,6	62,1	0	714,0
Apr 15	66,1	1578,1	966,1	612,0	134,5	46,0	38,2	17,6	358,7	16,8	66,3	0	678,1
Mai 15	17,1	1704,7	1178,5	526,2	85,1	53,5	53,1	14,4	261,3	16,5	59,4	0	543,3
Jun 15	9,6	1725,1	1235,3	489,8	67,4	37,2	47,7	11,3	258,9	23,0	53,9	0	499,4
Jul 15	35,8	1754,6	1277,8	476,8	60,3	31,2	49,4	10,6	282,3	15,8	63,0	0	512,6
Aug 15	28,8	1565,4	1165,9	399,5	53,7	22,9	30,7	9,5	250,2	2,8	58,5	0	428,3
Sep 15	82,8	934,2	491,2	443,0	77,5	34,6	47,3	39,0	237,1	23,0	67,3	0	525,8
Okt 15	199,8	526,4	170,2	356,2	108,7	32,9	48,2	79,4	212,0	23,0	51,9	0	556,1
Nov 15	436,9	296,3	25,9	270,4	233,7	57,0	46,4	34,9	278,5	16,8	40,0	0	707,3
Dez 15	987,7	168,8	2,1	166,8	578,4	103,4	48,0	37,9	340,4	24,1	22,3	0	1154,5
Jan 16	1155,0	145,3	2,2	143,1	670,5	101,5	47,9	36,6	387,1	31,7	22,8	0	1298,1
Feb 16	801,8	387,6	27,7	359,9	624,1	101,7	44,1	23,8	286,1	38,4	43,5	0	1161,7
Mrz 16	490,5	709,9	238,0	471,9	351,7	88,9	47,3	29,8	331,9	47,3	65,5	0	962,4

Tabelle 8-3: Zusammenstellung des Stromverbrauchs für Heizung und Trinkwarmwasser, Elektromobilität und Projektspezifisch von April 2014 bis März 2016.

Monat	Heizung + TWW + Lüftung + Kühlung			Elektromobilität	Projektspezifisch
	Hzg. + TWW	Lüftung	Kühlung		
	[kWh]	[kWh]	[kWh]		
Apr 14	86,0		---	---	max. 23
Mai 14	125,0		---	---	max. 23
Jun 14	113,0		---	---	max. 23
Jul 14	110,4	31,3	---	---	max. 23
Aug 14	98,7	38,4	---	---	max. 23
Sep 14	101,8	39,5	---	---	max. 23
Okt 14	113,9	46,3	---	---	max. 23
Nov 14	209,0	31,7	---	---	max. 23
Dez 14	558,2	27,8	---	---	max. 23
Jan 15	742,7	33,1	---	---	max. 23
Feb 15	495,1	40,8	---	---	max. 23
Mrz 15	220,8	44,8	---	---	max. 23
Apr 15	134,5	38,2	---	---	max. 23
Mai 15	85,1	53,1	---	---	max. 23
Jun 15	67,4	47,7	---	---	max. 23
Jul 15	60,3	49,4	---	---	max. 23
Aug 15	53,7	30,7	---	---	max. 23
Sep 15	77,5	47,3	---	---	max. 23
Okt 15	108,7	48,2	---	---	max. 23
Nov 15	233,7	46,4	---	---	max. 23
Dez 15	578,4	48,0	---	---	max. 23
Jan 16	670,5	47,9	---	---	max. 23
Feb 16	624,1	44,1	---	---	max. 23
Mrz 16	351,7	47,3	---	---	max. 23

Anhang B:

Tabelle 8-4: Zusammenstellung der Monatsmittelwerte der Raumlufttemperaturen im EG und OG.

Monat	Wohnküche (EG)	Arbeitsraum (EG)	Empore (OG)
	[°C]	[°C]	[°C]
Aug 14	25,2	24,9	26,2
Sep 14	24,6	24,2	25,5
Okt 14	23,4	22,9	24,2
Nov 14	20,4	20,1	20,6
Dez 14	19,3	19,0	19,2
Jan 15	19,7	19,5	19,8
Feb 15	20,0	19,6	20,3
Mrz 15	19,4	18,9	20,1
Apr 15	22,0	21,1	23,1
Mai 15	24,4	23,8	25,5
Jun 15	25,6	25,1	26,7
Jul 15	26,7	26,3	27,8
Aug 15	28,0	27,4	29,1
Sep 15	25,0	24,6	25,8
Okt 15	22,4	22,0	23,0
Nov 15	21,3	20,7	25,5
Dez 15	21,6	21,1	---
Jan 16	21,4	21,0	---
Feb 16	21,6	21,1	---
Mrz 16	20,5	20,0	---
Mittelwert Heizperiode*	21,0	20,5	21,8

* Oktober 14 bis April 15; Oktober 15 bis März 16

Tabelle 8-5: Zusammenstellung der mittleren monatlichen relativen Raumlufffeuchten im EG und OG.

Monat	Wohnküche (EG)	Arbeitsraum (EG)	Empore (OG)
	[%]	[%]	[%]
Aug 14	54,1	54,7	52,2
Sep 14	57,9	58,5	55,3
Okt 14	56,1	56,6	53,4
Nov 14	57,4	57,5	56,3
Dez 14	52,4	50,9	51,6
Jan 15	47,8	46,3	46,5
Feb 15	42,6	41,4	40,9
Mrz 15	44,0	43,9	42,1
Apr 15	42,0	42,8	39,3
Mai 15	41,3	41,3	38,5
Jun 15	43,8	44,5	41,3
Jul 15	49,7	50,1	46,3
Aug 15	48,3	49,3	45,0
Sep 15	48,2	48,6	45,8
Okt 15	46,9	47,0	45,5
Nov 15	47,4	48,6	40,2
Dez 15	46,7	46,8	---
Jan 16	41,8	41,1	---
Feb 16	41,0	40,9	---
Mrz 16	41,5	41,4	---

Anhang C:

Tabelle 8-6: Gradtagszahlen für Standort Kassel im Messzeitraum sowie langjähriges Mittel

Monat	Gradtagszahl G20/12 aus Messwerten [K*d]	Monat	Gradtagszahl G20/12 langjähriges Mittel für den Standort Kassel (IWU/DWD) [K*d]
Sep 14	9	Sep	84
Okt 14	88	Okt	286
Nov 14	344	Nov	457
Dez 14	498	Dez	568
Jan 15	518	Jan	601
Feb 15	446	Feb	529
Mrz 15	493	Mrz	467
Apr 15	240	Apr	307
Mai 15	54	Mai	129
Jun 15	0	Jun	41
Jul 15	0	Jul	4
Aug 15	0	Aug	7
Sep 15	37	Sep	84
Okt 15	290	Okt	286
Nov 15	275	Nov	457
Dez 15	382	Dez	568
Jan 16	537	Jan	601
Feb 16	453	Feb	529
Mrz 16	454	Mrz	467
Summe Sep 14 - Aug 15	2688	Summe Apr – Mrz	3480
Summe Apr 15 – Mrz 16	2723		

Tabelle 8-7: Technische Daten der Messgeräte

Gerät	Pyranometer
Hersteller	Kipp & Zonen
Typ	CM 11 - Sekundärstandard
Spektralbereich	305 – 2800 nm
Messbereich	0 – 1400 W/m ²
Ansprechzeit	< 15 s
Empfindlichkeit	4,71 µV/m ² /W
Genauigkeit	± 3 %

Gerät	Temperatur / Feuchte-Messwertgeber - außen
Hersteller	Rotronic AG, Bassersdorf
Typ	Hygroclip S3
Messbereich Temperatur	-40 bis 60 °C
Genauigkeit	± 0,3 K
Messbereich Feuchte	0 bis 100 % rF
Genauigkeit	± 1 %
Gerät	Temperatur-Messwertgeber
Hersteller	arcus-eds gmbh, Berlin
Typ	SK08-T8
Messbereich	-20 bis 80 °C
Genauigkeit	± 0,3 K
Gerät	Temperatur / Feuchte-Messwertgeber - innen
Hersteller	arcus-eds gmbh, Berlin
Typ	SK03-TKF
Messbereich Temperatur	-25 bis 45 °C
Genauigkeit	± 0,5 K
Messbereich Feuchte	0 bis 100 % rF
Genauigkeit	±3 %
Gerät	Temperatur / Feuchte-Messwertgeber - Lüftung
Hersteller	arcus-eds gmbh, Berlin
Typ	SK01-TFK-RPFF-MMF
Messbereich Temperatur	-20 bis 80 °C
Genauigkeit	± 0,5 K
Messbereich Feuchte	0 bis 100 % rF
Genauigkeit	±3 %
Gerät	Temperatur-Messwertgeber
Hersteller	arcus-eds gmbh, Berlin
Typ	SK01-T-ESTF
Messbereich	-25 bis 105 °C
Genauigkeit	± 0,5 K

Tabelle 8-8: Energiezähler

Gerät	Wechselstromzähler
Hersteller	Finder, Almese
Typ	Typ 7E.23
Referenzstrom	5 A
Maximalstrom	32 A
Anlaufstrom	20 mA
Eigenverbrauch	< 0,4 W
Genauigkeitsklasse	B, gemäß EN 50470-3, 1 gemäß IEC 62053-21
Ausgang	Integrierte M-Bus Schnittstelle

Anhang

Gerät	Drehstromzähler
Hersteller	Finder, Almese
Typ	Typ 7E.46
Referenzstrom	10 A
Maximalstrom	65 A
Anlaufstrom	40 mA
Eigenverbrauch	< 1,5 W
Genauigkeitsklasse	B, gemäß EN 50470-3, 1 gemäß IEC 62053-21
Ausgang	Integrierte M-Bus Schnittstelle
Gerät	Drehstromzähler
Hersteller	EasyMeter GmbH, Bielefeld
Typ	Q3DA 1026 Zweirichtungszähler
Referenzstrom	5 A
Maximalstrom	60 A
Anlaufstrom	10 mA
Eigenverbrauch	< 2 W
Genauigkeitsklasse	A
Ausgangsschnittstelle	10.000 Impulse / kWh
Gerät	Drehstromzähler
Hersteller	Hager, Blieskastel
Typ	EHZ363ZA, Zweirichtungszähler
Referenzstrom	5 A
Maximalstrom	60 A
Anlaufstrom	0,02 A
Eigenverbrauch	< 2 W
Genauigkeitsklasse	A
Ausgangsschnittstelle	10.000 Impulse / kWh
Gerät	Drehstromzähler
Hersteller	Hager, Blieskastel
Typ	EHZ363LA, Lieferzähler mit Rücklauf Sperre
Referenzstrom	5 A
Maximalstrom	60 A
Anlaufstrom	0,02 A
Eigenverbrauch	< 2 W
Genauigkeitsklasse	A
Ausgangsschnittstelle	10.000 Impulse / kWh

Anhang

Gerät	Wärmezähler mit KNX-Schnittstelle
Hersteller	Kamstrup, Skanderborg
Typ	Multical 602
Durchflusssensoren	Ultraflow DN15 – DN125 Mechanische Zähler mit elektronischer Abtastung
Durchflussgrößen – [kWh] - [MWh]	0,6 m³/h bis 15 m³/h 0,6 m³/h bis 1500 m³/h
Temperaturfühler	Pt500, Zweileiteranschluss
Temperaturbereich	2 bis 180 °C
Versorgungsspannung	230 VAC +15 / -30 %, 50/60 Hz
Leistungsverbrauch	< 1W
Ausgang	Integrierte KNX-Schnittstelle