



OSTBAYERISCHE
TECHNISCHE HOCHSCHULE
REGENSBURG



Gemeinsam Werte schaffen.

Effizienzhaus Plus Deggendorf-Natternberg

**Modellvorhaben im Netzwerk „Effizienzhaus Plus“ der
Forschungsinitiative Zukunft Bau
gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
(BBSR)**

ENDBERICHT 2017

*Dokumentation, Vorbereitungen und
Ergebnisse der zweijährigen Messperiode vom 01.11.2014 bis 31.10.2016*



AUTOREN

	<p><i>Erwin Seidl Dipl.-Ing.(FH) Architekt, Leiter Geschäftsbereich Karl Bachl GmbH & Co. KG, Deching 3, 94133 Röhrnbach</i></p>
	<p><i>Peter Kemper, Dipl. Ing. Univ. Architekt, DII Architektur Schmiedgasse 30, 94032 Passau</i></p>
	<p><i>Bernhard Nigl, Nigl + Mader Passauer Str. 7, 94133 Röhrnbach</i></p>
	<p><i>Wissenschaftliche Begleitforschung</i></p> <p><i>Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg (OTH Regensburg) Prüfening Str. 58, 93049 Regensburg</i></p> <p><i>Prof. Dr. Oliver Steffens (Projektleitung) Prof. Dipl.-Ing. Nikolaus Neuleitner Prof. Dr.-Ing. Christian Rechenauer</i></p> <p><i>Studentische Mitarbeiter/ Koautoren: Andreas Rozankovic, Johann Laumer, Johannes Stierstorfer, Julian Gerstner, Markus Zacher, Patrick Zimmermann, Sebastian Primbs, Sebastian Schäfer, Florian Schmidbauer, Simon Tretter</i></p>

Tabelle 1

Inhalt

1	Kurzfassung	5
2	Kontext und Zielsetzung	5
3	Gebäudesteckbrief	6
3.1	Allgemeine Daten	6
3.2	Architektur	7
3.3	Wärmeschutz	9
3.4	Anlagentechnik	9
3.5	Wärmerzeuger: Produktname, Heizleistung	12
3.5.1	Solarkollektoren	12
3.5.2	Pufferspeicher	12
3.5.3	Komponenten zur Bereitstellung von Brauchwarmwasser	15
3.5.4	Fußbodenheizung	16
3.5.5	Lüftungsanlage	18
3.6	PV-Anlage	19
3.6.1	PV-Module	19
3.6.2	Batterie	19
3.7	Jalousien	20
3.8	Energiebedarf und Energiedeckung	21
3.9	Bewertung der Effizienz aus Berechnung nach DIN V 18599	22
4	Monitoring	23
4.1	Messkonzept	23
4.2	Verwendete Messtechnik	25
4.2.1	Übersicht	25
4.2.2	Strom	27
4.2.3	Heizung / Wärmemengenzähler	27
4.2.4	Sensorfabrikate	28
4.2.5	Lage der Sensoren	29
4.2.6	Aufbau und Konfiguration des Messsystems	30
4.2.7	Inbetriebnahme	31
4.2.8	Bestimmung des Lüftungsvolumenstroms	31
5	Meteorologische Randbedingungen	33
5.1	Solarstrahlung	33
5.2	Außenklima – Temperatur, relative Feuchte, Windgeschwindigkeit	34

6	Messergebnisse	35
6.1	Endenergiebilanz	35
6.1.1	Endenergie	35
6.1.2	Primärenergie	35
6.2	Stromverbrauch	36
6.2.1	Stromverbrauch für Hausbetrieb	36
6.2.2	Stromverbrauch für projektspezifischen Anteil	36
6.2.3	Stromverbrauch für Elektromobilität	36
6.2.4	Stromversorgung	37
6.2.5	Eigenstromnutzung (Autarkiegrad)	37
6.2.6	Batteriespeicher-Performance	38
6.2.7	PV-Modulperformance	38
6.2.8	Gegenüberstellung von Stromverbrauch und Stromgewinnung	40
6.3	Anlagenperformance	41
6.3.1	Wärmeerzeuger	41
6.3.2	Pufferspeicher Temperaturen	42
6.3.3	Diskussion und Vergleich mit Simulationsrechnungen	42
6.3.4	Vergleich mit Simulationsrechnungen	46
6.3.5	Lüftungsanlage	47
6.4	Raumklima	48
6.4.1	Innentemperaturen	48
6.4.2	Innenraum-Luftfeuchte	48
7	Kosten und Wirtschaftlichkeit	49
7.1	Baukosten, Energie und Betriebskosten	49
7.2	Kosten für Geräteausstattung	50
8	Bewertung	51
8.1	Energieeffizienz des Modellgebäudes	51
8.2	Erkenntnisse und Verbesserungspotentiale	52
8.3	Abschätzung der Wirtschaftlichkeit	54
9	Literatur	56
10	Anhang A	57
11	Anhang B	59
12	Anhang C	61

1 Kurzfassung

Ausgehend von Konzeption und Planungsdaten für das Effizienzhaus Plus der Firma Karl Bachl GmbH & Co. KG in Deggendorf-Natternberg berichten wir über die Ergebnisse des energetischen Monitorings über den Zeitraum von zwei Messjahren vom 01.11.2014 bis 31.10.2016. Die OTH Regensburg wurde mit der wissenschaftlichen Begleitforschung dieses Modellprojekts im Rahmen des Zukunft-Bau-Netzwerks Effizienzhaus Plus¹ beauftragt.

Das Gebäude wird vorwiegend solarthermisch beheizt, ergänzt durch eine elektrische Nachheizung. Neben Solarkollektoren befinden sich auch PV-Module auf dem Dach, deren Erträge den Jahresstrombedarf bilanziell decken. Durch Einsatz eines Batteriespeichers kann der Anteil des selbst genutzten PV-Stroms erhöht werden.

Die Gesamtbilanz des ersten Jahres zeigt, dass das Gebäude primär- und endenergetisch die Anforderungen an den Effizienzhaus Plus Standard erfüllt.

Wir stellen die Energieflüsse, Gewinne und Verbräuche, sowie die Wirkungsgrade, den solaren und elektrischen Deckungsgrad und den Autarkiegrad des Gebäudes im Detail vor und diskutieren den Einfluss des elektrischen Batteriespeichers sowie der thermischen Verluste aus dem Pufferspeicher.

Verbesserungspotentiale werden in der Beseitigung von haustechnischen Fehlfunktionen und in einer stärkeren Dämmung des Pufferspeichers gesehen. Dieser ist zudem für den beabsichtigten Zweck nach den Erkenntnissen aus den empirischen Messungen zu groß dimensioniert, wodurch sich für künftige Projekte ein Einsparungspotential ergibt.

2 Kontext und Zielsetzung

Primäres Ziel für das Modellprojekt Effizienzhaus Plus in Form eines Einfamilienhauses ist die Einhaltung eines möglichst niedrigen Kostenrahmens für die Errichtung und den Betrieb des Gebäudes. Die Grundidee ist, einer Durchschnittsfamilie mit zwei Kindern und eineinhalb Einkommen ein kostengünstiges und vor allem energieeffizientes Haus zu ermöglichen.²

Die Baukosten inkl. technischer Ausstattung sollen 220.000 € nicht überschreiten, zuzüglich der jeweiligen Grundstücks- und Anschlusskosten. Das Haus zeichnet sich durch eine kompakte Kubatur und ein auf das Nötigste reduziertes Raumprogramm aus. Aufgrund dieser Zielvorgabe geht der Vorentwurf von einem zweigeschossigen, quaderförmigen Baukörper (ca. 150 m² Wohnnutzfläche) mit Kalt-Satteldach aus.

Im Unterschied zu vielen anderen Modellhäusern des Effizienzhaus-Plus-Netzwerks wurde als technisches Ziel ein hoher Autarkiegrad hinsichtlich Wärmeversorgung und Strombedarf gesetzt. In Anlehnung an das Sonnenhauskonzept wurden Solarkollektoren und ein großer Pufferspeicher integriert.³

¹ Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2011): Wege zum Effizienzhaus-Plus. Referat Bürgerservice und Besucherdienst. Berlin.

² Ein Haus, das mehr gibt, als es nimmt. Gartenschau Deggendorf: Energieeffizienzhaus Plus in Natternberg (2014). In: *Beton*, 2/2014, S. 4.

³ Erhorn, Hans; Hegner, Hans-Dieter (2014): Technikkonzepte und -erfahrungen im Netzwerk "Effizienzhaus Plus". In: Jürgen Pöschk (Hg.): Energieeffizienz in Gebäuden - Jahrbuch 2014. Unter Mitarbeit von Barbara Hendricks, Franz-Georg Rips, Axel Gedaschko, Alexander Rychter, Christian Noll, Jürgen Blazejczak et al. neue Ausg. Berlin: v m e Verlag und Medienservice Energie, S. 93–101.

3 Gebäudesteckbrief

Das Haus zeichnet sich durch eine kompakte Kubatur und ein auf das Nötigste reduziertes Raumprogramm aus. Aufgrund dieser Zielvorgabe geht der Vorentwurf von einem zweigeschossigen, quaderförmigen Baukörper (ca. 150 m² Wohnnutzfläche) mit Kalt-Satteldach aus.

Betonfertigteile mit Wärmedämmverbundsystem ermöglichen einen hohen Vorfertigungsgrad ohne dabei eine Individualisierung auszuschließen. Das Haus verzichtet auf eine Unterkellerung, wodurch die Baukosten sowie die Bauzeit auf ein Minimum reduziert werden.

Ein vorgelagertes, offenes Nebengebäude beherbergt ein Carport mit Stellmöglichkeit für zwei PKW inklusive Solartankstelle, die auch extern genutzt werden kann, Abstellraum, Wärmespeicher und den überdachten Hauseingang. Um die Kosten auf Dauer niedrig zu halten, wird auf eine autarke Energieversorgung im Low-Tech-Standard gesetzt.

Die Ausführung mit Satteldach in regionaltypischer Neigung ermöglicht Solarthermie-Felder auf der südlich ausgerichteten Dachfläche, an der Südfassade sowie hinter dem Carport. Diese speisen Wärme in den, in einem Technikraum (Nebengebäude) platzierten, Wasserspeicher. Photovoltaikpaneele auf der Dachfläche decken den Bedarf an elektrischer Energie. Große nach Süden gerichtete Fensterelemente erhöhen den passiven Eintrag an solarer Wärmeenergie, welche sich nachhaltig im Heizenergieverbrauch bemerkbar macht.

Das Nutzerverhalten hinsichtlich Lüftung und Behaglichkeit sollte nur geringfügigen Einfluss haben. Dazu kommt eine geregelte Be- und Entlüftung zum Einsatz.

3.1 Allgemeine Daten

Baujahr	2013/2014
Bruttogrundfläche	185,30 m ²
Beheizte Nettogrundfläche	151,50 m ²
Beheiztes Gebäudevolumen	576 m ³
Hüllflächenfaktor A/V	0,85 m ⁻¹
Breitengrad	48,84
Längengrad	12,96
Höhenlage	ca. 310m NN
Mittlere Jahrestemperatur	ca. 13°C
Mittlere Wintertemperatur (Oktober – April)	ca. 7°C
Gradtagzahl am Standort	3927
TRY - Klimazone / Referenzstation	Straubing

Tabelle 2: Allgemeine Daten

3.2 Architektur

Bei dem Gebäude in Natternberg handelt es sich um einen rechteckigen Baukörper mit Satteldach, ohne Vor- oder Rücksprünge. Die Fensterflächen sind hauptsächlich süd-west orientiert. Der Dachstuhl wurde als Kaltraum ausgeführt und ist nicht ausgebaut. Unmittelbar anschließend befindet sich ein Nebengebäude mit Flachdach. In diesem Nebengebäude, das sich außerhalb der gedämmten Gebäudehülle befindet, sind der 9,2 m³ fassende Pufferspeicher, alle Solarstationen, der Batteriespeicher der PV-Anlage, die Heizungspumpe und die Frischwasserstation (FRIWASTA) untergebracht. Die Wände dieses Nebengebäudes bzw. des Pufferspeicherraums wurden in Kerndämmung mit einer 8 cm starken Schicht EPS 035 und die Decke mit 12 cm EPS 035 gedämmt. Des Weiteren befindet sich in diesem Raum die Regelungs- und Steuerungseinheit des Wärmeversorgungssystems.

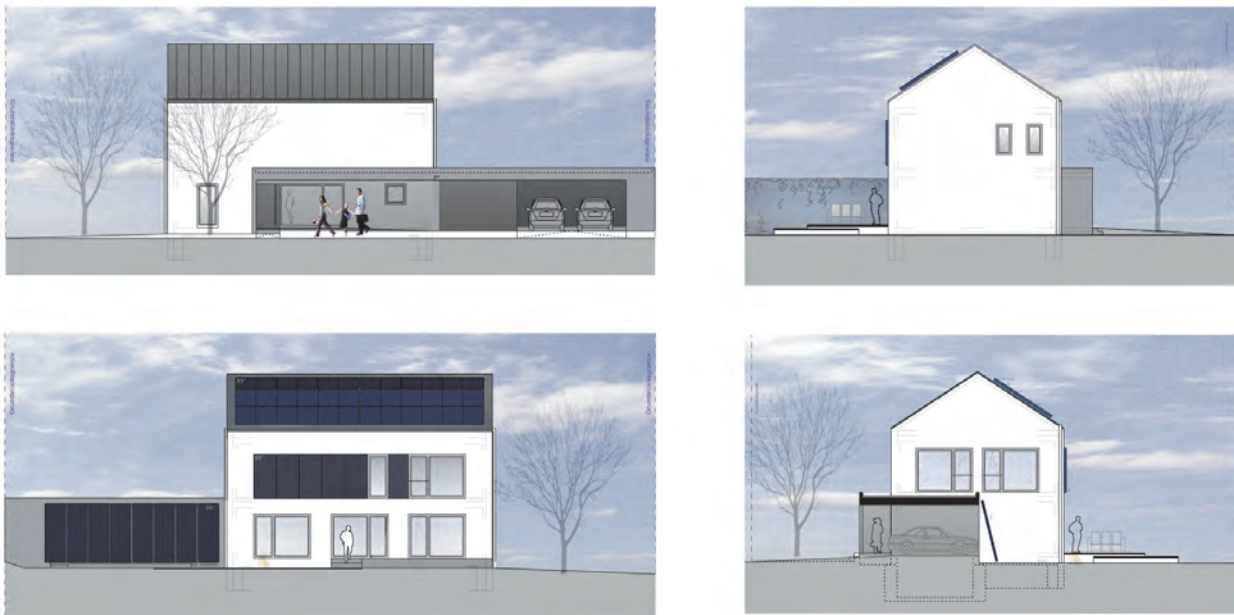


Abbildung 1: Ansichten

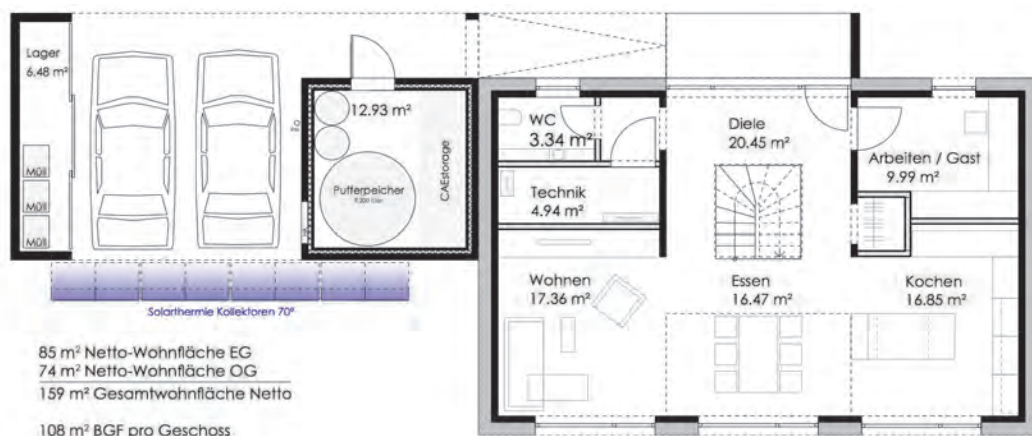


Abbildung 2: Grundriss Erdgeschoss

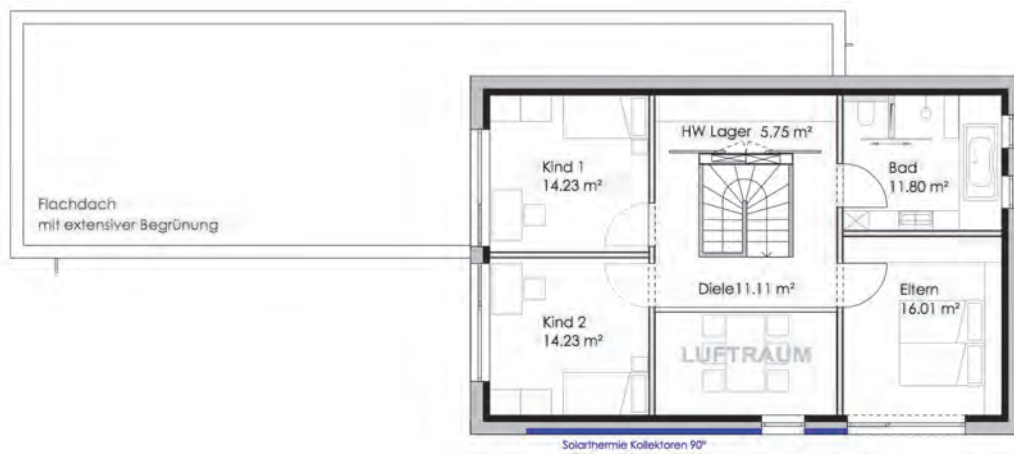


Abbildung 3: Grundriss Obergeschoss

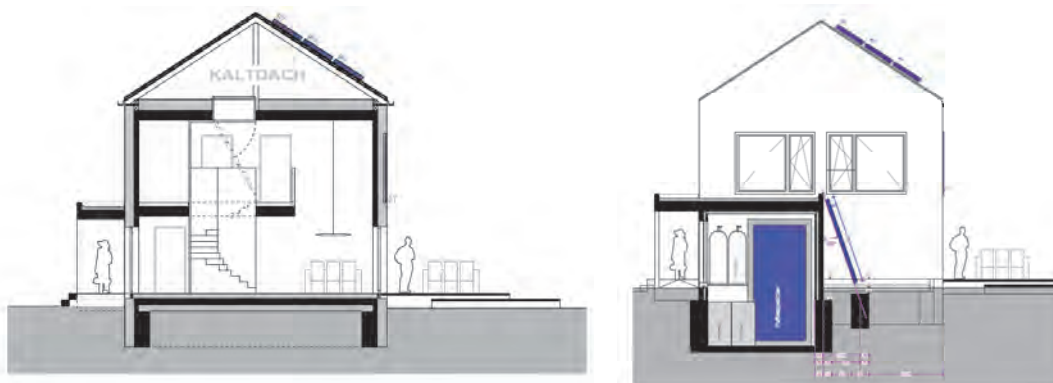


Abbildung 4: Schnitte

3.3 Wärmeschutz

Die verwendeten, passivhaustauglichen Bauteile weisen folgende U-Werte $[W/(m^2 \cdot K)]$ auf:

Bauteil	Aufbau/Material	Dicke [mm]	U-Wert $[W/(m^2 \cdot K)]$
Außenwand (von innen nach außen)	Gipsputz	20	0,10
	Beton	150	
	Dämmung (WLG 032)	300	
	Leichtputz	20	
Fenster	Kunststofffenster mit Dreifachverglasung (g-Wert: 0,5)	–	0,65
Oberste Geschossdecke (von oben nach unten)	Wärmedämmung (WLG – 025)	260	0,09
	Stahlbetondecke	240	
	Gipsputz	30	
Bodenkonstruktion (von oben nach unten)	Estrich	–	0,14
	Trittschalldämmung (WLG 045)	25	
	Wärmedämmung (WLG 025)	20	
	Wärmedämmung (WLG 035)	40	
	Betonplatte	150	
	Perimeterdämmung	160	

Tabelle 3: U-Werte der Bauteile

3.4 Anlagentechnik

Die beiden zentralen Komponenten im Versorgungskonzept des Hauses sind die Solarthermie- und die Photovoltaik-Anlage, um dezentral Wärme und Strom zu erzeugen.

Die Kollektoren sind sowohl auf dem Dach, als auch auf der Fassade und vor dem Carport installiert. Die unterschiedlichen Winkel ermöglichen es zu jeder Jahreszeit, d.h. zu jedem Sonnenwinkel, ausreichende Erträge zu erzielen.

Ein Pufferspeicher mit 9.200 Litern Volumen dient der erweiterten Nutzbarkeit der Solarwärme in den Übergangsmonaten, um den Stromverbrauch für die Nachheizung mittels Elektro-Heizstäben möglichst gering zu halten.

Auf den Einsatz einer Wärmepumpe wurde verzichtet.

Das Gebäude ist mit einem KNX-Bussystem ausgestattet, mit dem die Beleuchtung, Steckdosen, die Jalousien, die Lüftungsanlage und die Heizung gesteuert werden. Zur Bedienung wurde im Haus ein Tablet installiert, auf das KNX-System konnte auch über das Internet zugegriffen werden. Für die Heizungsregelung wurde

eine freiprogrammierbare Universalregelung eingesetzt, die über einen CAN Buskonverter auch mit dem KNX-System kommunizieren kann, z. B. für die Übermittlung der Raum- oder Außentemperaturen.

Weitere Kenndaten zur Technik sind Tabelle 4 zu entnehmen:

Kollektorfläche Solarthermie	12 m ² 33° Dach 14 m ² 90° Fassade 24 m ² 70° Carport
Pufferspeicher Wasser	9200 l
Nachheizung	3 kW + 6 kW
Ertrag Solarthermie	8600 kWh
Solardeckungsgrad	80%
Kollektorfläche Photovoltaik	39 m ² 33° Dach
Maximalleistung Photovoltaik	7,8 kWp
Ertrag Photovoltaik	8700 kWh
Art des Batteriespeichers	Lithium-Eisenphosphat-Akku
Batteriekapazität	8,04 kWh
Strombedarfsdeckung	350%
Eigenverbrauch	30%

Tabelle 4

Die hydraulische Verschaltung der Wärmeversorgung kann der folgenden Abbildung entnommen werden:

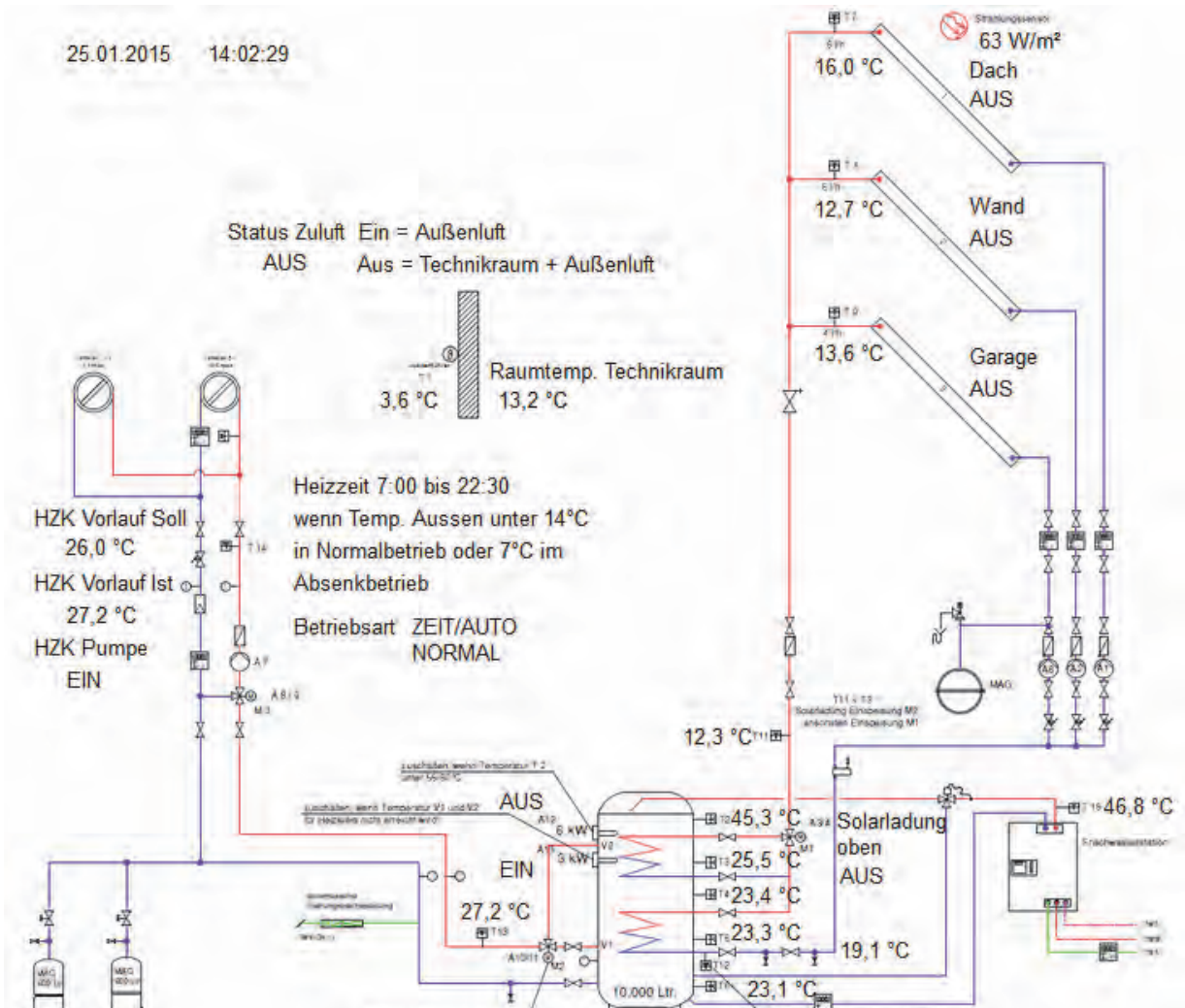


Abbildung 5: Schema des Wärmeversorgungssystems

Legende zum Online-Schema des Wärmeversorgungssystems:

Beschreibung	Abkürzung	Einbauhöhe
Vorlauftemperatur Solarkollektoren	T11	
Rücklauftemperatur Solarkollektoren	T12	
Vormischtemperatur Heizkreis	T13	
Vorlauftemperatur Heizkreis	T14	
Eintrittstemperatur Frischwasserstation	T15	
Außentemperaturfühler	T1	
Temperaturfühler Pufferspeicher 1	T2	ca. 355 cm
Temperaturfühler Pufferspeicher 2	T3	ca. 320 cm
Temperaturfühler Pufferspeicher 3	T4	ca. 280 cm
Temperaturfühler Pufferspeicher 4	T5	ca. 195 cm
Temperaturfühler Pufferspeicher 5	T6	ca. 80 cm
Vorlauftemperatur Solarkreis "Dach"	T7	
Vorlauftemperatur Solarkreis "Wand"	T8	
Vorlauftemperatur Solarkreis "Fassade"	T9	
Dreiwegeventil zur Regelung der Speicherbeladung	M1	
Dreiwegeventil zur Regelung der Temperatur T13	M2	
Dreiwegeventil zur Regelung der Temperatur T14	M3	
Wasserentnahme für Heizkreis unteres Temperaturniveau	V1	
Wasserentnahme für Heizkreis oberes Temperaturniveau	V2	
Elektroheizstab mit 6-kW Leistung	A12	
Elektroheizstab mit 3-kW Leistung	A13	
Solarkreispumpe "Dach"	A1	
Solarkreispumpe "Garage"	A6	
Solarkreispumpe "Fassade"	A2	
Heizkreispumpe	A7	

Tabelle 5: Legende des Wärmeversorgungssystems

3.5 Wärmerzeuger: Produktname, Heizleistung

Solarthermie: Art, Fläche, Leistung	Hochleistungsflachkollektor, 56,80m ²
Thermische Speicher: Art, Größe, u. U. Leistung Heizstab	Edelstahl WW Speicher; 9200l, 2 Heizstäbe
Lüftungsanlage: Art, Wärmebereitstellungsgrad	kontrollierte Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung

Tabelle 6

3.5.1 Solarkollektoren

Zur Erzeugung von Wärme sind am „Effizienzhaus Plus“ in Natternberg auf der Südseite des Daches, an der Südseitenwand hinter dem Carport und integriert in die Südseitenfassade des Gebäudes Flachkollektoren verbaut. Durch die unterschiedlichen Neigungswinkel der Kollektoren soll garantiert werden, dass zu den unterschiedlichen Jahreszeiten, das heißt beispielsweise auch bei tiefstehender Sonne im Winter, ein Wärmeertrag durch die Solarkollektoren erbracht werden kann. Alle wichtigen Daten der einzelnen Kollektorfelder können Tabelle 7 entnommen werden. Der zusätzliche Kollektor an der Fassade ist eine Sonderanfertigung mit den Maßen 2,01 m x 1,07 m (H x B). Dieser Kollektor musste angefertigt werden, da es im Produktkatalog der Fa. Tisun GmbH keinen Kollektor gab, der genau die Abmessung besaß, die für die vorgesehene Aussparung für den zusätzlichen Kollektor in der Fassade nötig gewesen wäre.

	Modell	Anzahl	Absorberfläche	Neigung
Kollektorfeld "Dach"	Tisun FA 1/6	2	11,18 m ²	33°
Kollektorfeld "Garage"	Tisun FA 3/4	2	22,66 m ²	70°
Kollektorfeld "Fassade"	Tisun FA 2/6	1	11,18 m ²	90°
Kollektor "Fassade_Zusatz"	Tisun FA	1	2,15 m ²	90°

Tabelle 7: Daten der Solarkollektoren

3.5.2 Pufferspeicher

Das zweite zentrale Bauteil der Wärmeversorgung ist der saisonale Pufferspeicher. Er ist mit 9200 Litern Fassungsvermögen dafür ausgelegt, die Wärme über einen langen Zeitraum speichern und somit die sonnenarmen Wintermonate überbrücken zu können. Andere Wärmeversorgungskonzepte von Häusern mit dem „Effizienzhaus Plus“-Standard verzichten komplett auf eine solarthermische Anlage und greifen zur Wärmeerzeugung beispielsweise auf ein Wärmepumpensystem zurück, wie es zum Beispiel im „Effizienzhaus Plus“ am Standort Berlin verwirklicht wurde. Der Pufferspeicher im „Effizienzhaus Plus“ in Natternberg wurde von der Fa. Lorenz GmbH & Co. KG aus Landshut als Sonderanfertigung hergestellt und besitzt zwei innenliegende Glattrohrwärmetauscher, die es ermöglichen, die über die Solarkollektoren erzeugte Wärme einzuspeichern. Dabei ist der einlagige Wärmetauscher im oberen Bereich des Speichers und der andere, zweilagige Wärmetauscher weiter unten verbaut. Der obere Wärmetauscher besitzt eine Fläche von 6,01 m², der untere Wärmetauscher eine Fläche von 10,09 m². Durch die beiden unterschiedlichen Höhen der Wärmetauscher wird eine optimale Temperaturschichtung im Speicher ermöglicht. Des Weiteren sind im oberen Drittel des Speichers zwei E-Heizstäbe verbaut. Der E-Heizstab an der oberen Position besitzt 6 kW Leistung und ist in etwa auf der Höhe des Fühlers T2 angebracht. Der zweite (3 kW Leistung) E-Heizstab befindet sich in etwa auf Höhe des Fühlers T3 im Pufferspeicher. Die E-Heizstäbe werden bedarfsorientiert betrieben. Der Pufferspeicher war bis zum 11.12.14 mit einer Schicht aus 200 mm Mineralwolle gedämmt. Im Laufe der Auswertung des Monitorings stellte sich jedoch heraus,

dass die Umsetzung der Dämmung nicht den Ansprüchen an die Wärmedämmung eines saisonalen Pufferspeichers genüge, aus diesem Grund wurde am 11.12.2014 die Dämmung um weitere 100 mm erweitert. Der Pufferspeicher besitzt somit letztendlich eine Dämmung von 300 mm Mineralwolle. Die Anschlüsse am Pufferspeicher sind in Abbildung 6 ersichtlich und werden in Tabelle 8 näher beschrieben.

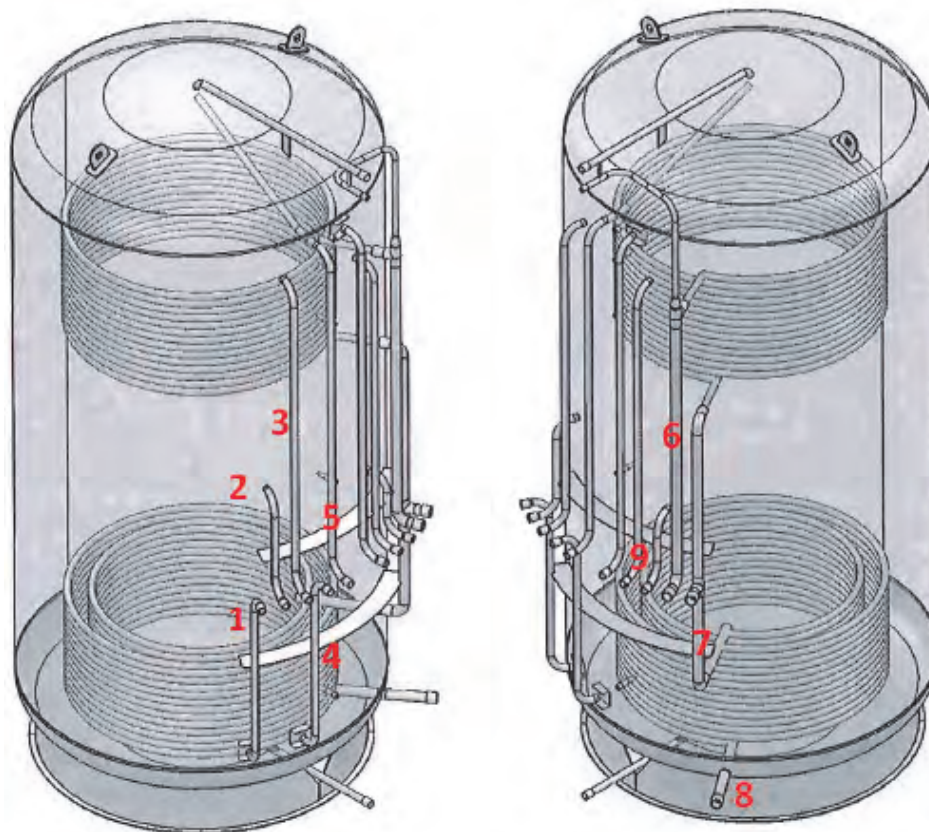


Abbildung 6: 9200 Liter Pufferspeicher der Lorenz GmbH & Co. KG mit Anschlussbeschriftungen

Nummer	Anschluss
1	Rücklauf des abgekühlten Heizungswassers in den Speicher
2	Vorlauf aus dem Speicher für die Heizung, unteres Temperaturniveau
3	Vorlauf aus dem Speicher für die Heizung, oberes Temperaturniveau
4	Rücklauf in den Speicher, aus der Frischwasserstation kommend
5	Vorlauf aus dem Speicher, zur Frischwasserstation fließend
6	Vorlauf aus dem Solarkreis in den oberen Wärmetauscher
7	Vorlauf aus dem Solarkreis in den unteren Wärmetauscher
8	Rücklauf aus den Wärmetauschern zu den Kollektoren
9	Diese drei Anschlüsse sind vorhanden, werden aber nicht verwendet

Tabelle 8: Legende zu den Pufferspeicheranschlüssen

Beladung des Pufferspeichers

Die Beladung des Pufferspeichers kann auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen. Im ersten Fall bezieht die frei programmierbare Universalregelung (UVR) von den Temperaturfühlern an den einzelnen Solarkreisen (T7, T8, T9) das aktuell vorliegende Temperaturniveau. Sobald an einem dieser Fühler ein Temperaturniveau vorliegt, das um 5 Kelvin höher als das am Fühler T5 *oder* T3 ausfällt, wird die jeweilige Solarkreispumpe (A1, A2, A6) eingeschaltet. Es müssen also nicht zwingend alle Solarkreisläufe simultan in Betrieb sein, sondern vielmehr erfolgt das Ein- und Abschalten der Solarkreisumpen anhand des Vergleichs der einzelnen Solarkreistemperaturen durch die UVR untereinander. Anhand dieses Vergleichs wird die maximal zu erreichende gesamte Vorlauftemperatur, die aus den Kollektoren austritt, ermittelt. Diese wird am Temperaturfühler T11 gemessen. Dabei werden die Solarkreisumpen so gesteuert, dass ein maximal mögliches Temperaturniveau erreicht wird. Kann zu einem Zeitpunkt X ein einzelner Solarkreis ein wesentlich höheres Temperaturniveau als die anderen Solarkreisläufe an den Speicher liefern, so wird nur die Umwälzpumpe dieses Kollektorfeldes aktiviert. Ebenso verläuft es, wenn zwei der Solarkreisläufe auf einem etwa gleichen, aber im Vergleich zum dritten Solarkreislauf weitaus höherem Temperaturniveau liegen. In diesem Fall werden die Umwälzpumpen dieser beiden Kreisläufe aktiviert. Für den Fall, dass sich alle drei Solarkreisläufe auf ca. demselben Temperaturniveau befinden, werden alle drei Umwälzpumpen aktiviert.

In welche Schicht des Speichers eingeladen wird, bestimmt die Heizungssteuerung anhand der am Fühler T11 gemessenen Temperatur. Liegt die Temperatur am Fühler T11 um mindestens 5 Kelvin über der Temperatur an Fühler T3, so wird über die UVR das Dreiwegemischventil M1 so geschaltet, dass das heiße Fluid aus dem Solarkreislauf durch den oberen Wärmetauscher (Anschluss 6, Abbildung 6) und danach durch den unteren Wärmetauscher fließt. Somit werden beide Schichten des Speichers beladen und es bleibt eine gute Temperaturschichtung des Speicherwassers erhalten. Das nach dem Durchlaufen der Wärmetauscher abgekühlte Fluid der Solarkollektoren wird über den Anschluss 8 (Abbildung 6) des Pufferspeichers wieder zu den Solarkollektoren, deren Pumpen zu diesem Zeitpunkt arbeiten, zurückbefördert und kann sich dort wieder erwärmen. Sofern die Temperatur am Fühler T11 nur ein Niveau erreicht, das um minimal 5 Kelvin über der aktuellen Temperatur am Fühler T5 liegt, aber nicht um minimal 5 Kelvin über der Temperatur an Fühler T3, wird das M1 von der UVR so geschaltet, dass nur der untere Wärmetauscher durchströmt wird, da in diesem Fall das Durchströmen durch den oberen Wärmetauscher dem Speicher Energie in Form von Wärme entziehen würde. Auch bei dieser Beladungsweise wird das Kollektorfluid nach dem Durchströmen des Wärmetauschers wieder über den Anschluss 8 (Abbildung 6) zurück zu den Kollektoren befördert und dort im Anschluss daran erneut aufgeheizt. Welche Solarkreispumpe aktuell in Betrieb ist und ob der Speicher aktuell über den unteren oder über beide Wärmetauscher beladen wird, kann dem Online-Schema (Abbildung 5) des Heizsystems entnommen werden. Findet die Beladung zum Zeitpunkt X gerade über beide Wärmetauscher statt, so zeigt das Online-Schema dies durch die Beschriftung „Solarladung oben EIN“ an. Wird nur der untere Wärmetauscher durchströmt, wird dies im Online-Schema anhand der Beschriftung „Solarladung oben AUS“ verdeutlicht. Diese Beschriftung stellt zudem gleichzeitig die Beschriftung für den Fall dar, dass alle Solarkreisumpen abgeschaltet sind. Welche und wie viele Solarkreisumpen gerade in Betrieb sind, ist in den Textfeldern neben den im Schema visualisierten Kollektoren ersichtlich. Ist beispielsweise die Solarkreispumpe des Kollektorfeldes „Dach“ (A1) in Betrieb, befindet sich unter der Beschriftung die Anzeige „EIN“, andernfalls die Anzeige „AUS“.

Der Pufferspeicher kann aber nicht nur durch die Solarkollektoren beladen werden, sondern auch durch die bereits erwähnten zwei elektrisch betriebenen Wärmeerzeuger. Die beiden E-Heizstäbe sind verbaut, um sicherzustellen, dass zu jedem Zeitpunkt genug Wärme für die Erwärmung des Brauchwassers und der Fußbodenheizung zur Verfügung steht. Für den Fall, dass am Fühler T2 die Temperatur unter 43 °C fällt, wird der 6 kW Wärmeerzeuger (S19) mit voller Leistung in Betrieb genommen und ist so lange in Betrieb, bis am Fühler T2 wieder eine Temperatur von 50 °C anliegt. Der untere Wärmeerzeuger dient dazu, die für den Betrieb der Fußbodenheizung notwendige Vorlauftemperatur zu jedem Zeitpunkt sicherstellen zu können. Er schaltet zu, wenn auch nach dem Öffnen der Entnahmestelle V2 die notwendige Soll-Heizkreisvormischtemperatur, gemessen am Fühler T13, nicht erreicht wird. Diese Soll-Temperatur hängt direkt von der eingestellten Heizkurve für die Fußbodenheizung ab. Der 3 kW Wärmeerzeuger bleibt dann solange mit voller Leistung in Betrieb, bis die jeweilige Solltemperatur erreicht werden kann. Die Wärmeerzeuger arbeiten unabhängig von den Solarkreisläufen. Dies bedeutet, dass sie auch in Betrieb sein

können, wenn die Solarkreisumpen arbeiten. Auf Höhe der beiden E-Heizstäbe wird dort dann die Statusmeldung „EIN“ oder „AUS“ angezeigt.

Eine Besonderheit in Bezug auf die Steuerung der elektrischen Wärmeerzeuger ergibt sich aus deren Ansteuerung: Das komplette System für die Wärmeerzeugung, sowie die Be- und Entladung des Speichers wird durch die UVR geregelt. Die E-Heizstäbe allerdings werden nicht von der UVR zugeschaltet, sondern vom KNX-System. Zu diesem Zwecke ist ein Buskonverter notwendig, denn die Komponenten des KNX-Systems kommunizieren über den KNX-Bus und die des UVR/CMI-Systems über einen CAN-Bus miteinander. Damit das KNX-System die Anforderung durch die UVR zum Ein- oder Abschalten der E-Heizstäbe korrekt verarbeiten kann, muss der Buskonverter das Signal des CAN-Bus in ein KNX-Bus-kompatibles Signal umwandeln. Die Anforderung, dass ein oder beide Wärmeerzeuger benötigt werden, wird von der UVR an das KNX-System gesendet. Das KNX-System schaltet dann über einen Schaltaktor den oder die angeforderten elektrischen Wärmeerzeuger ein oder aus. Diese Ansteuerung der E-Heizstäbe wurde deshalb so geregelt, da bereits eine KNX-Datenverbindung vom Pufferspeicherraum zur Elektroverteilung vorhanden war.

3.5.3 Komponenten zur Bereitstellung von Brauchwarmwasser

Die wesentlichen Komponenten zur Bereitstellung von warmem Brauchwasser - auch Trinkwarmwasser (TWW) genannt - sind die Frischwasserstation und das Zirkulationssystem.

Frischwasserstation

In der Frischwasserstation „FRIWASTA P 40“ der Firma Sailer GmbH wird über einen Plattenwärmetauscher mit Gegenstromprinzip das kalte Brauchwasser (TWK) mit einer Durchschnittstemperatur von ca. 10 °C auf eine Temperatur von 45 °C erwärmt. Dazu wird dem Speicher vom Anschluss 5 (Tabelle 8) heißes Wasser entnommen. Über ein temperaturgesteuertes Dreiwegemischventil wird bei Bedarf kaltes Wasser aus dem Bodenbereich des Pufferspeichers zugemischt, um die erforderliche Temperatur von 60 °C am Eingang des Plattenwärmetauschers (T15, Abbildung 5) zu erzeugen.

Die gewünschte Zapftemperatur des TWW beträgt 45 °C. Für die Erwärmung wird dem Plattenwärmetauscher in der FRIWASTA heißes Wasser mit einer Temperatur von 60 °C zugeführt und nach dem Durchfluss durch den Plattenwärmetauscher mit einer Temperatur von ca. 25 °C wieder in den Speicher zurückgeführt (Anschluss 4, Tabelle 8). Die Höhe der Temperaturspreizung beträgt somit 35 K. Dabei ergibt sich eine Zapfleistung von 40 l/min⁴. Es kann vorkommen, dass die Temperatur des Wassers an der Entnahmestelle für die FRIWASTA (Anschluss 5, Tabelle 8) am Pufferspeicher keine 60 °C beträgt, beispielsweise nach langen Kaltwetterperioden oder nach vielen Tagen ohne entsprechenden Wärmeertrag durch die Solarkollektoren. In diesem Fall wird die höchste Schicht des Pufferspeichers durch den oberen elektrischen (6 kW) Wärmeerzeuger auf einer Temperatur von lediglich 50 °C gehalten. Die Zapfleistung der FRIWASTA verringert sich in diesem Fall bei sonst gleichbleibenden Temperaturwerten für TWW und TWK und einer Temperaturspreizung von 35 Kelvin beim Vor- und Rücklauf in den Plattenwärmetauscher auf 32 l/min⁴.

⁴ Sailer GmbH, „Leistungstabelle FRIWASTA P,“ [Online]. Available: <http://www.sailergmbh.de/fileadmin/daten/bilder/downloadbereich/auslegungsratgeber/leistungstabelle.pdf> [Zugriff am 26 Februar 2015]

Zirkulation

Um an jeder Warmwasserzapfstelle im Gebäude (Dusche, Badewanne, etc.) möglichst rasch warmes Wasser entnehmen zu können, wurde eine Trinkwasserzirkulation (TWZ) installiert. Die Zirkulationspumpe (ZKP) befindet sich im gedämmten Kasten der FRIWASTA. Die ZKP startet, sobald die Temperatur des in den Brauchwasserleitungen befindlichen TWW an einem bestimmten Temperaturfühler – dieser sitzt direkt über der ZKP – unter eine Temperatur von 30 °C fällt. In diesem Fall pumpt die ZKP das Wasser in den Brauchwasserleitungen mit 2 l/h solange im Kreis durch den Plattenwärmetauscher, bis am genannten Temperaturfühler wieder eine Temperatur von 35 °C anliegt. Die Inbetriebnahme der ZKP bedeutet also, dass – nur um gewährleisten zu können, dass an den TWW-Zapfstellen im Gebäude eine schnelle Bereitstellung von bis zu 45 °C heißem Warmwasser vorhanden ist – dem Pufferspeicher Wärme entzogen wird.

Simulation des TWW-Bedarfs

Das betrachtete Gebäude wird, wie bereits erwähnt, zum Untersuchungszeitpunkt der vorliegenden Arbeit als reines Modellprojekt ohne Bewohner betrieben. Um die Förderleistungen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ zu erhalten, wird im Zuge des Monitorings vorgeschrieben, die Energieströme des Gebäudes im bewohnten Zustand aufzuzeichnen⁵. Eine Simulationseinrichtung zum Betrieb der Gebäudebeheizung ist im vorliegenden Fall nicht nötig, da das Gebäude im Winter auch im unbewohnten Zustand geheizt werden muss, um nicht auszukühlen. Im Falle der Simulation des Brauchwarmwasserbedarfs musste ein elektrisch angesteuertes Magnetventil im Technikraum verbaut werden. Über dieses Magnetventil wird dreimal täglich zu den in Tabelle 9 ersichtlichen Zeiten und in den dort angegebenen Mengen TWW gezapft. Durch die in Tabelle 9 angegebenen Zapfmengen wird ein bewohnter Zustand mit 4 Personen und einem gesamten TWW-Bedarf von ca. 160 l/d (40 Liter pro Tag und Person) simuliert.

Uhrzeit	Menge [kWh]	Menge [l]
07:00	3	ca. 80
12:00	1	ca. 30
19:00	2	ca. 50

Tabelle 9: Einstellungen für die TWW-Entnahme durch das Magnetventil

3.5.4 Fußbodenheizung

Im EG wurden insgesamt zehn und im OG acht Heizkreise verlegt. Der Tabelle 10 können die Bezeichnungen und die wichtigsten charakteristischen Daten der Heizkreise entnommen werden. In Abbildung 7 ist der Heizkreisverteiler für das EG abgebildet. Dort sind deutlich die Stellmotoren in den Vorläufen der einzelnen Heizkreise zu erkennen. Ebenso sind in dieser Abbildung die im Rücklauf der Heizkreise angebrachten Steigrohre, mit deren Hilfe die Durchflussmenge für jeden Heizkreis (HZK) eingestellt werden kann, ersichtlich.

⁵ Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2012): Richtlinie des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung über die Vergabe von Zuwendungen für Modellprojekte im Effizienzhaus-Plus-Standard im Jahre 2012. Anlage 1: Definition und Berechnungsmethode Anlage 2: Leitfaden für das Monitoring. B 13 – 8142.1/1-12. Berlin.

Erdgeschoss				Obergeschoss			
Kreis	Länge HZK [m]	Massenstrom [l/min]	Massenstrom [l/h]	Kreis	Länge HZK [m]	Massenstrom [l/min]	Massenstrom [l/h]
1 Essen	63	0,5	30	1 Kind A	84	1,0	60
1 Essen	68	1,0	60	1 Kind A	75	0,5	30
1 Essen	73	1,0	60	2 Kind B	74	0,5	30
2 Wohnen	86	1,0	60	2 Kind B	81	1,0	60
2 Wohnen	71	0,5	30	3 Flur	69	0,6	36
3 WC	30	0,7	40	4 Eltern	104	1,4	84
4 Diele	69	1,8	108	5 Bad	79	0,5	30
5 Küche	100	0,5	30	5 Bad	51	0,5	30
5 Küche	90	1,0	60				
6 Arbeiten/ Gast	103	1,4	83				

Tabelle 10: Daten der Fußbodenheizung



Abbildung 7: Heizkreislaufverteiler der Fußbodenheizung

Für die Fußbodenheizung wurde eine Heizkurve mit folgenden Daten eingestellt:

Vorlauftemperatur: 28 °C bei einer Außentemperatur von -20 °C

Vorlauftemperatur: 24 °C bei einer Außentemperatur von 10 °C

Heizgrenztemperatur wurde zu 14° Außentemperatur eingestellt, die Anlage wurde mit Nachtabsenkung zu folgenden Zeiten betrieben:

Modus	Betriebsdauer	Startkriterium
Normalbetrieb	07:00 - 22:30	Außentemperatur < 14 °C
Absenkbetrieb	22:30 - 07:00	Außentemperatur < 7 °C

Tabelle 11: Betriebszeiten der Fußbodenheizung

Der durchschnittliche Temperaturabfall der Räume aufgrund der Absenkung mit einer Dauer von 8,5 Stunden pro Nacht betrug im Monat Januar 2015 (bei einer mittleren Außentemperatur von 1,8 °C) lediglich 0,23 °C.

Regelung und Steuerung der Fußbodenheizung und der Raumtemperaturen

Am Pufferspeicher sind zwei Anschlüsse (V1 und V2, Tabelle 5) in verschiedenen Höhen angebracht, an denen das warme Wasser für die Fußbodenheizung entnommen wird. Dies geschieht vornehmlich aus dem unteren der beiden Anschlüsse (V1, Tabelle 5). Dabei ist die Regelung so beschaffen, dass das aus dem Pufferspeicher in den Heizkreislauf eintretende Temperaturniveau des Heizwassers, gemessen am Temperaturfühler T13, immer um 3 °C höher sein muss, als die momentan durch die Heizkennlinie angeforderte Sollvorlauftemperatur. Reicht das Temperaturniveau des Pufferspeicherwassers am Anschluss V1 nicht aus, um die angeforderte Vormischtemperatur zu erreichen, wird über das Dreiwegemischventil M2 Pufferspeicherwasser mit einem im Vergleich zu Anschluss V1 höheren Temperaturniveau aus Anschluss V2 beigemischt. Reicht auch dieses Temperaturniveau nicht aus, um die erforderliche Temperatur der momentan eingestellten Heizkennlinie zu erreichen, wird der 3 kW Wärmeerzeuger zugeschaltet, der das Pufferspeicherwasser in diesem Bereich solange aufheizt, bis die von der Heizkennlinie geforderte Temperatur, plus der erwähnten 3 °C, erreicht wird. Über das Dreiwegemischventil M3 wird dem vorgemischten Heizwasser Rücklaufwasser aus dem Heizkreislauf beigemischt. Auf diese Weise wird die aktuell durch die Heizkennlinie angeforderte Soll-Vorlauftemperatur erreicht.

3.5.5 Lüftungsanlage

Es wurde eine zentrale, kontrollierte Wohnraumlüftung mit einer Wärmerückgewinnung Typ Vallox 090 SE DC Modell R eingebaut. Das Gerät weist 8 Lüftungsstufen auf, wobei die Nennlüftung gemäß DIN 1946-6 mit 177 m³/h für das vorliegende Gebäude der Stufe 8 entspricht. Das Lüftungsgerät war in das KNX-System mit eingebunden. Der Bypass der Wärmerückgewinnung wurde im Sommer zur Nachtauskühlung des Gebäudes automatisch geöffnet. Eine automatische bedarfsabhängige Schaltung der Lüftungsstufen nach dem CO₂-Gehalt bzw. zum Feuchteschutz nach der relativen Feuchte der Raumluft wurde nicht umgesetzt.

Zur weiteren Energieeinsparung wird von der Lüftungsanlage die Außenluft bei einer Außentemperatur von unter 7° C aus dem Pufferspeicherraum angesaugt um die Verlustwärme des Pufferspeichers im Winter zu nutzen. Hierzu wurden entsprechende Umschaltklappen in die Lüftungsanlage integriert. Unter 7° C strömt die Außenluft in den Pufferspeicherraum, wird dort vorgewärmt und von der Lüftungsanlage dann abgesaugt. Über 7° C wird die Außenluft von der Lüftungsanlage direkt von außen angesaugt.

3.6 PV-Anlage

PV-Anlage: Art, Fläche, Leistung	24 Hochleistungsmodule SUNPOWER X20-327-BLK, 327 Wp; gesamt 7,85 kWp, ca. 39 m ²
PV-Wechselrichter: Art, Leistung	Ein 3-phasiger Wechselrichter SUNPOWER SPR-9000K-TL3 (Baugleich mit KACO Powador 10.0 TL3-INT, Nennleistung 9 kVA
Elektrische Speicher: Art, Kapazität	Elektrische Speicher: Lithium-Eisenphosphat 9,2 KWh

Tabelle 12

3.6.1 PV-Module

Zur Eigenproduktion von Strom sind auf dem Süddach des Hauses Photovoltaikmodule mit einer Gesamtleistung von 7,848 kWp verbaut. Die Module sind parallel auf der Ziegel-Dacheindeckung installiert, das Dach hat eine Neigung von 33° gegenüber der Horizontalen.

Insgesamt wurden 24 Hochleistungsmodule, sowie ein dreiphasiger Wechselrichter installiert (siehe Tabelle 12). Im Gegensatz zu Standardmodulen weisen die verwendeten Hochleistungsmodule einen um ca. 25% höheren Flächenwirkungsgrad auf. Als Zelltechnologie verwendet SUNPOWER die sogenannte Maxeon-Solarzelle, welche aus hochreinem Silizium auf einer durchgängigen Kupferplatte mit lichtabsorbierender Glasabdeckung besteht.

Die DC-Verkabelung der PV-Module ist in drei Strings mit jeweils acht Modulen aufgeteilt. Der Wechselrichter besitzt zwei unabhängige MPP-Tracker (Maximum Power Point) welche wie folgt angeschlossen sind: String 1 und 2 auf MPP-Tracker A, String 3 auf MPP-Tracker B.

Die vom PV-System erzeugte Energie wird im Gebäude selbst verbraucht, die überschüssige Energie im Batteriespeicher gepuffert und/oder in das öffentliche Strom-Versorgungsnetz eingespeist. Messtechnisch wird sowohl die gesamt erzeugte PV-Energie erfasst, als auch der ins Netz eingespeiste Überschuss mittels eines Zweirichtungszählers des EVU's für Bezug und Lieferung (siehe Abbildung 8). Das System wird mit einem Datenlogger Solar-Log 200PM+ überwacht, sämtliche Erträge, Störmeldungen u. dgl. können daraus per Datenanschluss ausgelesen oder übermittelt werden.

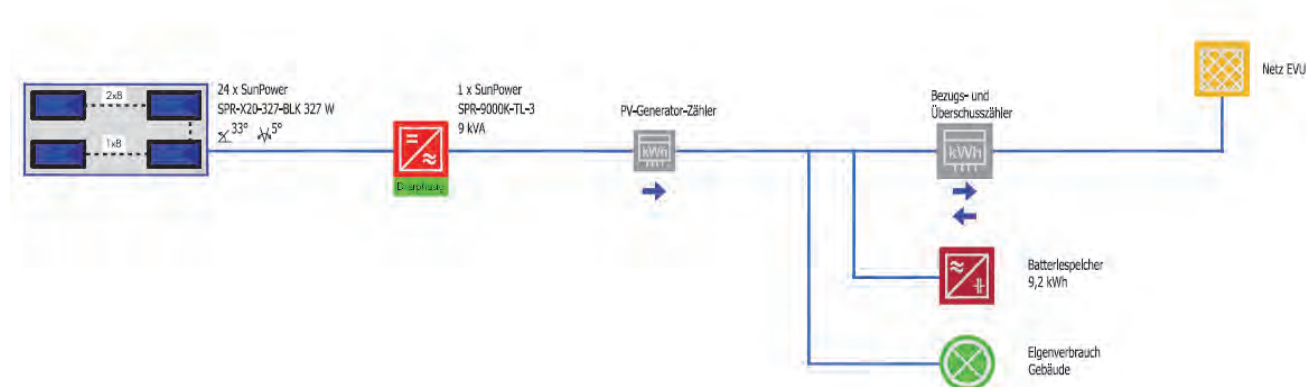


Abbildung 8: Schema PV-Anlage

3.6.2 Batterie

Das verbaute PV-Speichersystem ist ein Produkt der ET Solar Power GmbH und enthält einen Wechselrichter, Batteriesatz und Laderegler für max. 4 kW. Das PV-Speichersystem ET EnergieSL-Li® ist aufgrund der Kapazität für Photovoltaikanlagen ab einer Leistung von 7 kWp geeignet und ist damit passend für die auf dem Süddach installierte Anlage ausgelegt. Der Batteriespeicher – ein Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator – besitzt eine Kapazität von 9,2 kWh, davon werden wiederum 7,3 kWh als Nutzkapazität angegeben. Der vorhandene Speicher arbeitet wartungsfrei und weist außerdem eine Systemauslastung von 5.000 Zyklen auf.

Im Gegensatz zu herkömmlichen Lithium-Ionen-Batteriespeichern die meist Lithium-Kobaltoxid (LiCoO_2) als Kathodenmaterial aufweisen, wird bei dem hier verbauten Batteriesatz auf Lithium-Eisenphosphat (LiFePO_4) als Kathodenmaterial gesetzt. Durch dieses innovative Aktivmaterial an der positiven Elektrode, kann die Umweltverträglichkeit der Batterie gesteigert werden. Außerdem stellt sich das Material in der Anschaffung als preisgünstiger heraus, was sich wiederum auf den Kaufpreis der Batterie auswirkt. Einen weiteren positiven Aspekt stellt die erhöhte Sicherheit des Lithium-Eisenphosphats gegenüber den herkömmlichen Aktivmaterialien in Bezug auf Überhitzung und Brandgefahr dar⁶. Durch das Lithium-Eisenphosphat wird zusätzlich eine ausgezeichnete Zyklenstabilität gewährleistet.

3.7 Jalousien

Der Sonnenschutz im „Effizienzhaus Plus“ in Natternberg wird ebenfalls über das KNX-System gesteuert. Dabei können die Jalousien manuell oder über eine Beschattungsautomatik eingestellt werden. Im Automatikbetrieb wird über eine Messung der Beleuchtungsstärke der Sonneneinstrahlung ein Soll-/Istwert-Vergleich durchgeführt und es werden bei Überschreiten eines eingestellten Wertes, im vorliegenden Gebäude 45 kLux, die Jalousien nach unten gefahren. Diese Vorgehensweise soll im Sommer eine Überhitzung des Gebäudes verhindern. Die zur automatischen Fahrweise der Jalousien herangezogenen Werte (Beleuchtungsstärke), können über den Tablet-PC manuell eingestellt werden. Es kann des Weiteren auf dem Tablet-PC eingestellt werden, ob die Beschattungsautomatik die Jalousien komplett oder auf eine vorher definierte Höhe herunterfahren lässt. Die Lamellenstellung lässt sich ebenfalls über das KNX-System festlegen. Bei zu starkem Wind oder bei einer Außentemperatur von unter 0 °C lässt die Beschattungsautomatik die Jalousien wieder nach oben fahren, um einer Zerstörung durch starke Windböen oder Vereisung entgegenzuwirken.

⁶ Korthauer, R.: Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Berlin, Heidelberg 2013

3.8 Energiebedarf und Energiedeckung

Ziel eines Energieeffizienzhauses Plus ist die Erzeugung von mehr Energie als im Gebäude verbraucht wird, wobei der Eigenverbrauchsanteil der selbst produzierten Energie maximiert werden soll. Die überschüssig erzeugte elektrische Energie aus der Photovoltaikanlage wird in diesem Modellvorhaben ergänzend auch für den Bereich Elektromobilität zur Verfügung gestellt.

Die planerischen Bedarfskennzahlen für Heizung/Warmwasser, Pumpen (Heizungspumpen und Solarpumpen), kontrollierte Wohnraumlüftung sowie für Kochen, Haushaltsgeräte und weitere Stromverbraucher der Nutzer belaufen sich in Summe auf 6.370 kWh pro Jahr (Tabelle 13). Neben der Eigenproduktion des Stromes wird versucht, energieeinsparende Technologien zu verwenden. Die Beleuchtung ist im gesamten Gebäude mit LED-Technik ausgestattet. Dabei werden beispielsweise Einbaulichtkanäle mit einer Leistung von 18 W und Einbaudownlights mit 4 W in LED-Technik verwendet. Gegenüber herkömmlicher Beleuchtungstechniken können mittels LED-Leuchten bis zu ca. 60 % des Strombedarfs eingespart werden.

Die Photovoltaikanlage dient zur Eigenproduktion von elektrischem Strom. Der aus Simulationen errechnete Ertrag beläuft sich auf jährlich 7.250 kWh (netzseitig). Unter Einsatz des Batteriespeichers kann ein großer Teil des elektrischen Bedarfs durch direkten Verbrauch der Eigenproduktion genutzt werden. Bilanziell übersteigt die Produktion den Bedarf um ca. 14 %.

Name	Heizung/ Warmwasser	Pumpen	Lüftung	Kühlung	Licht	Haushalt + Kochen	Sonstiges (TV/Hifi, ...)
Strombedarf [kWh/a]	2.100	250	640	--	150	2.770	460
Gesamt: 6.370 kWh/a							

Tabelle 13

3.9 Bewertung der Effizienz aus Berechnung nach DIN V 18599

Teilabschnitt	Erläuterung	Energie [kWh/a]	Spez. Energie [kWh/m²a]
Nutzenergie	Nutzenergiebedarf der Räume für Heizung, Trinkwarmwasser und Kühlung	6.586	31,97
Erzeugerabgabe	Wärme- und Kälteabgabe der Erzeuger an das Verteilnetz oder die Speicher für Heizung, Trinkwarmwassererwärmung und Kühlung	–	–
Endenergie Erzeuger	Strombedarf für die Erzeugung von Wärme und Kälte für Heizung, Trinkwarmwassererwärmung und Kühlung	2.968	14,42
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	–	–
Primärenergie Haustechnik	Nicht erneuerbarer Anteil des Primärenergieinhalts der gesamten Endenergie für die Haustechnik	7.310	35,52

Tabelle 14

Bewertete Teilabschnitte	Aufwandszahlen / Arbeitszahlen [kWh/kWh]
Effizienz der Verteilung (Erzeugerabgabe / Nutzenergie)	1,19
Effizienz der Wärme- / Kälteerzeuger (Endenergie Erzeuger / Erzeugerabgabe)	0,18
Endenergetische Effizienz der Haustechnik (Endenergie Haustechnik / Nutzenergie)	0,45
Effektive Arbeitszahl der gesamten Haustechnik (Nutzenergie / Endenergie Haustechnik)	2,23
Arbeitszahl des Energieerzeugers (Erzeugerabgabe / Endenergie Erzeuger)	5,47
Primärenergetische Effizienz der Haustechnik (Primärenergie Haustechnik/ Nutzenergie)	1,16

Tabelle 15

4 Monitoring

4.1 Messkonzept

Das Messkonzept basiert auf dem Leitfaden des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.⁵

Im Monitoring werden die Teilbereiche Verbrauchsdaten, Klimadaten und Nutzerverhalten gesondert betrachtet und analysiert. Parallel dazu wird im Haus Plus Natternberg ein Behaglichkeitsmonitoring durchgeführt. Dies bedeutet, dass der Punkt „Nutzerverhalten“ – welcher die Messung der Raumtemperaturen aufgreift – ergänzt wird durch weitere Sensoren zur Beurteilung des Raumklimas.

- Erfassung der Klimadaten

Um eine Vergleichbarkeit mit anderen Objekten gewährleisten zu können, werden die Wetterbedingungen des Gebäudestandortes ermittelt. Dies eröffnet darüber hinaus die Möglichkeit, klimatische Extrema eines Jahres, z.B. einen besonders kalten Winter, in den Auswertungen zu berücksichtigen. Mit Hilfe der Pyranometer (horizontal und vertikal ausgerichtet), welche die auftreffende Globalstrahlung messen, kann die Effektivität der Solarenergieerzeugung (Strom und Wärme) berechnet werden. Zudem sind noch eine Wetterstation mit Wind-, Temperatur- und Feuchtefühler installiert.

- Erfassung des Raumklimas

Neben den Raumtemperaturen selbst, als wichtigste Parameter für die Behaglichkeit in Innenräumen, werden zusätzlich die Temperaturen der Abluft, Zuluft und Fortluft gemessen. Dies ermöglicht Rückschlüsse auf die Effizienz der Wärmerückgewinnungsanlage, sowie auf die Wärmelast der einzelnen Räume. Die Differenz zwischen Raum- und Zuluft stellt ebenfalls eine wichtige Größe für komfortable Innenraumverhältnisse dar. Durch die Überwachung des Kohlenstoffdioxid-Gehalts der Luft in Wohn- und Schlafzimmer lässt sich kontrollieren, ob ein ausreichender Luftvolumenstrom vorhanden ist, um das durch die Bewohner produzierte CO₂ abzutransportieren.

- Verbrauchserfassung

Um eine Jahresbilanz zu erstellen und damit die negativen Jahresprimär- und Endenergiebedarfe zu bestätigen, müssen alle Energieströme erfasst werden.

- *Energiezufuhr*

Um alle dem Gebäude zugeführten Energiemengen zu erfassen, ist einerseits die Messung des aus dem öffentlichen Netz bezogenen Stroms, andererseits die Erfassung der auf dem Grundstück erzeugten, regenerativen Energien durch Solarthermie und Photovoltaik nötig. Während der bezogene Strom positiv in die Energiebilanz einfließt, werden die erzeugten Energiemengen vom Verbrauch subtrahiert und sind somit für das Erreichen des „Effizienzhaus-Plus- Standards“ unabdingbar. Für die Messung der Wärmeströme der Solarthermie sind Ultraschall-Wärmemengenzähler installiert, den Stromfluss überwachen zahlreiche Stromzähler.

- *Energiespeicherung*

Die Besonderheit bei Effizienzhäusern liegt darin, die regenerativ produzierten Energien zu speichern, um sie nachts oder an sonnenarmen Tagen nutzen zu können. Zur Beurteilung der Sinnhaftigkeit sowie der Effizienz der Speichermedien wird Sensorik verwendet. Beim Batteriespeicher werden die Strommengen gemessen, die für dessen Be- und Entladung benötigt werden. Damit lässt sich auf den Ladezustand bzw. die Ladezyklen schließen. Des Weiteren lassen

sich aus der Differenz der beiden Werte die Speicherverluste berechnen. Letztere können auch beim Warmwasserspeicher über die zehn, in unterschiedlicher Höhe angebrachten Temperaturfühler bestimmt werden. Zudem kann mittels dieser Fühler die, für einen effizienten Betrieb, nötige Temperaturschichtung im Speicher kontrolliert werden.

- *Energieverbrauch*

Der Strombedarf von elektronischen Verbrauchern wie Beleuchtung, Herd oder Unterhaltungselektronik, wird sensorisch erfasst. Dies gilt auch für die Wärmemengen, die für die Raumheizung und die Trinkwassererwärmung benötigt werden.

- *Monitoring*

In der Gesamtanalyse wird der gesondert erfasste Stromverbrauch der Messtechnik nicht mitbilanziert, da dieser nur aufgrund des Monitorings anfällt, im Normalfall also nicht auftreten würde.

4.2 Verwendete Messtechnik

4.2.1 Übersicht

In Summe wurden 67 Sensoren installiert. Nachfolgend sind zwei Übersichten des Messkonzeptes dargestellt (siehe Abbildung 9 und 10). Die detaillierte Sensoraufstellung und Nomenklatur ist dem Anhang zu entnehmen (Tabelle 33).

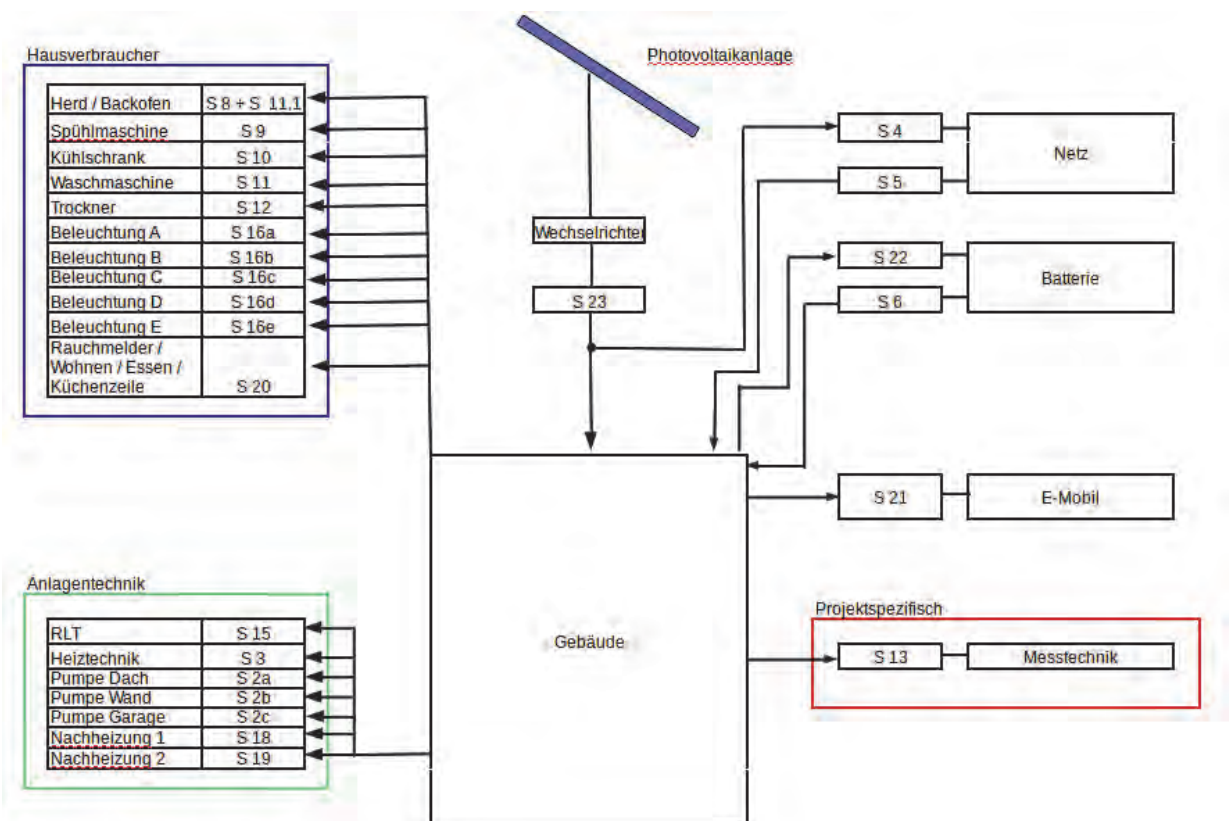


Abbildung 9

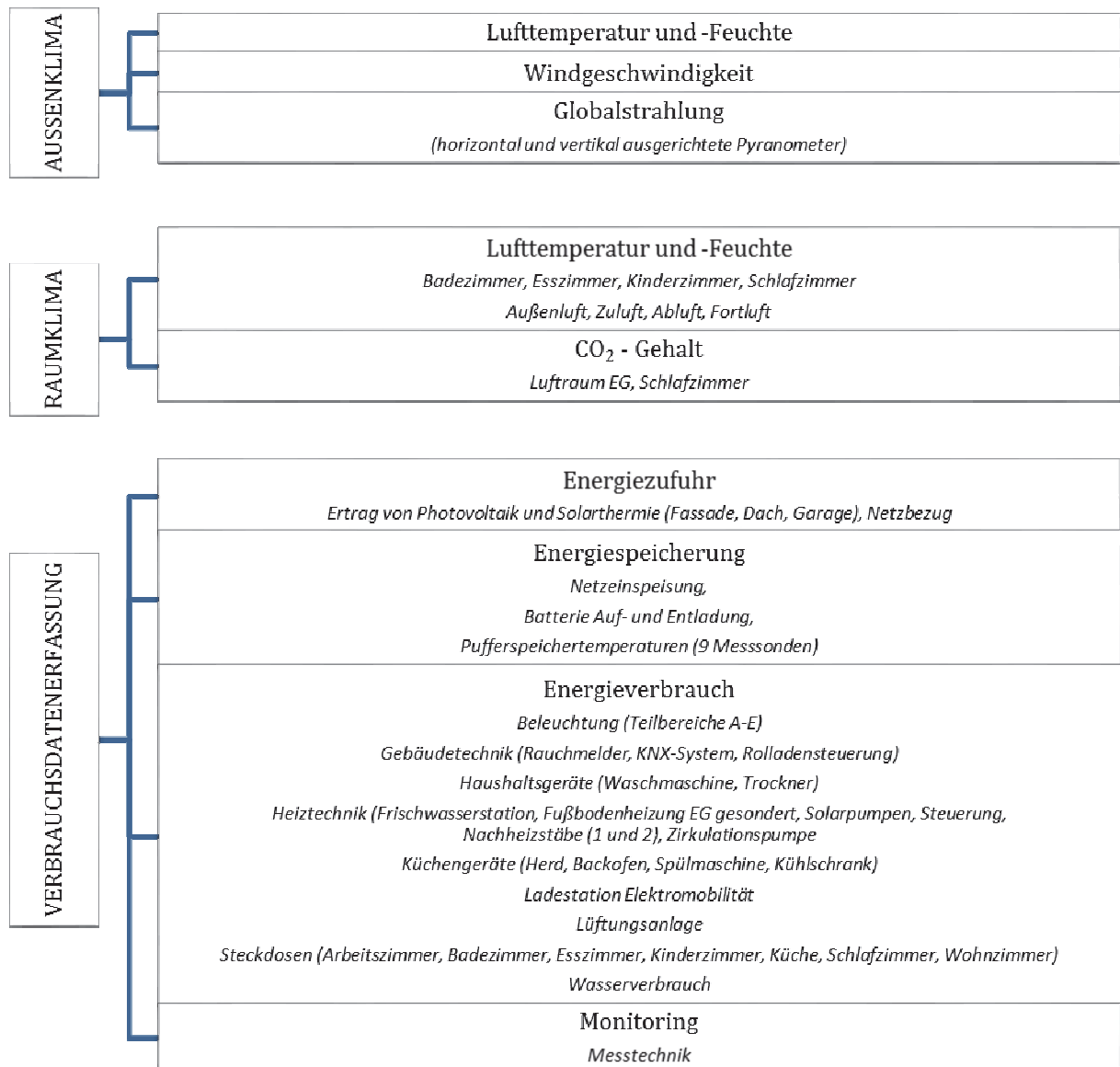


Abbildung 10: Übersicht der verbauten Sensorik

4.2.2 Strom

Beleuchtung

In Tabelle 16 sind die fünf Teilbereiche dargestellt, in die sich die Erfassung des Stromverbrauchs der Beleuchtung gliedert:

Bereich	Räume
A	Eltern, Kind 1 + 2
B	Technikraum OG, Diele OG, Bad OG
C	Wohnen 1 + 2, Essen, Luftraum, Küche 1 +2 + Küchenschrank
D	Büro, Treppenbeleuchtung, Speis, Eingang, WC EG, WC Vorraum, Technik EG
E	Haustür, Garage, Speicher, Carport, Lager, Terrasse

Tabelle 16

Auswertung der Stromdaten

Die Messstelle Monitoring wird separat erfasst und nicht zum Verbrauch hinzugezählt.

Zudem werden die Messstellen S2a,b,c (Stromverbrauch Solarthermie-Pumpen) bereits auf den Zähler S3 Heiztechnik aufaddiert. Sie dienen lediglich als Informationsquelle zur Auswertung der Effektivität der Solarthermieanlage.

4.2.3 Heizung / Wärmemengenzähler

Mit den installierten Sensoren (vgl. Tabelle 17) lassen sich die Speicherverluste errechnen, indem die eingespeiste Energie mit der entnommen verglichen wird. Die Differenz ergibt die Verluste. Die Vorgehensweise gilt sowohl für die Warmwasser-Pufferspeicher als auch für die Batterie.

	Pufferspeicher	Batterie
Eingang	Solarthermie W1, W2, W3 Nachheizung S18, S19	Batterieaufladung S6
Ausgang	Heizung W4 Warmwasser W6	Batterieentladung S22

Tabelle 17

Warmwasser: Nutzwärme und Zirkulationsverluste lassen sich daraus wie folgt ableiten:

- Warmwasser-Nutzwärme = „gezapfte“ Wärmemenge = W7
- Gesamtentnahme aus Pufferspeicher = Nutzwärme + Zirkulationsverluste = W6
- Zirkulationsverluste = W6 – W7

4.2.4 Sensorfabrikate

Pyranometer

Kipp & Zonen CMP11



Windsensor

Ahlborn Windgeschwindigkeitsgeber FVA 615 2



Temperatur- und Feuchte-Sensoren

Ahlborn (Almemo) Digitaler Feuchte-/Temperaturfühler
FHAD 46-2, Ausführung in Kunststoff mit geschlitzter
Sensorkappe mit Almemo D6-Stecker.



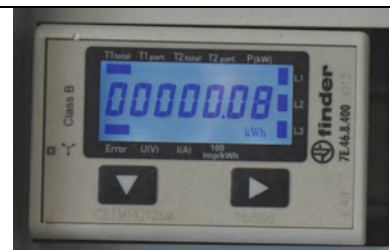
CO₂-Sensor

Sauter EGQ 222 F002



Stromzähler

Finder 7E.23.8.230.00x0
Finder 7E.46.8.400.00x2



Wärmemengenzähler

Kamstrup 402W1120FA2BB



Temperaturfühler für Lüftungsanlage

Ahlborn FHAD4641L05 Digitaler Fühler für Feuchte, Temp.,
Luftdruck FHAD 46-41, Einsatzbereich: -20...+80 °C.



Temperaturfühler für thermischen

Pufferspeicher

Ahlborn FPA60K01L0100 Kabel-Widerstandsfühler mit
Schutzrohr d=6,0 mm, NL= 100 mm; Messelement Pt100 4L,
Klasse B, Fühlereinsatzbereich: -50...+200°C.



Tabelle 18

4.2.5 Lage der Sensoren

In den folgenden Grundrissen (Abbildung 11 und 12) sind die sichtbaren Sensoren eingezeichnet. Den Standort aller anderen Sensoren kann der Liste im Abschnitt „Übersicht“ entnommen werden.

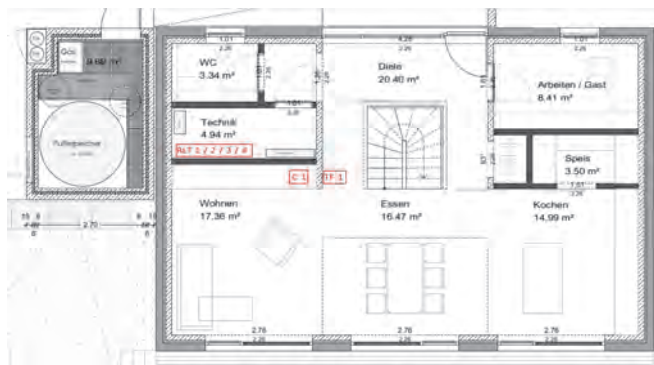


Abbildung 11: Grundriss Erdgeschoss



Abbildung 12: Grundriss Obergeschoss

Im Pufferspeicher sind zehn Temperatursensoren (T1 bis T10) mit Tauchhülsen installiert, die die Wassertemperatur in verschiedenen Höhen zwischen 335 cm (T1) und 31 cm (T10) messen. Die detaillierten Höhenangaben sind Tabelle 19 zu entnehmen.

Temperaturfühler	Einbauhöhe
T1	335 cm
T2	325 cm
T3	290 cm
T4	258 cm
T5	228 cm
T6	198 cm
T7	180 cm
T8	125 cm
T9	76 cm
T10	31 cm

Tabelle 19



Abbildung 13

4.2.6 Aufbau und Konfiguration des Messsystems

Das Hauptgerät des Messsystems ist der Datenlogger der Firma Ahlborn, an den sämtliche Sensoren angebunden sind.

Die an das Loggersystem (Abbildung 14) angeschlossenen Messstellen liefern Impulse, welche von den Steckern erfasst, entsprechend der Parametrierung skaliert und schließlich an den Logger weitergegeben werden. Im Loggersystem werden sämtliche Daten temporär im Ringspeicher hinterlegt und gemäß einem

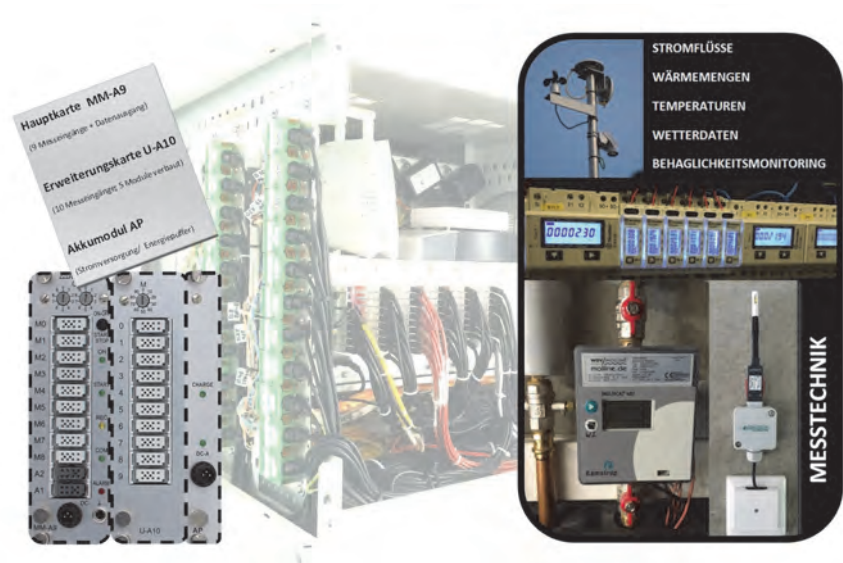


Abbildung 14: Messaufbau - System Almemo (Firma Ahlborn)

konfigurierten Zeitplan an die Virtuelle Maschine an der Hochschule Regensburg zur weiteren Verarbeitung und Archivierung übertragen. Um den Datentransfer zu ermöglichen verfügt der Datenlogger über eine Internetverbindung mit statischer IP-Adresse auf eine virtuelle Maschine des Rechenzentrums.

Das Almemo-System exportiert nach Zeitplan die Messdaten in Dateien, die mithilfe von Linux-Skripten in Jahres-, Monats- und Tagesdateien umgerechnet werden (Abbildung 15).

Darüber hinaus werden gängige Kennwerte und Bilanzen als Graphiken erzeugt und im png-Format abgelegt.

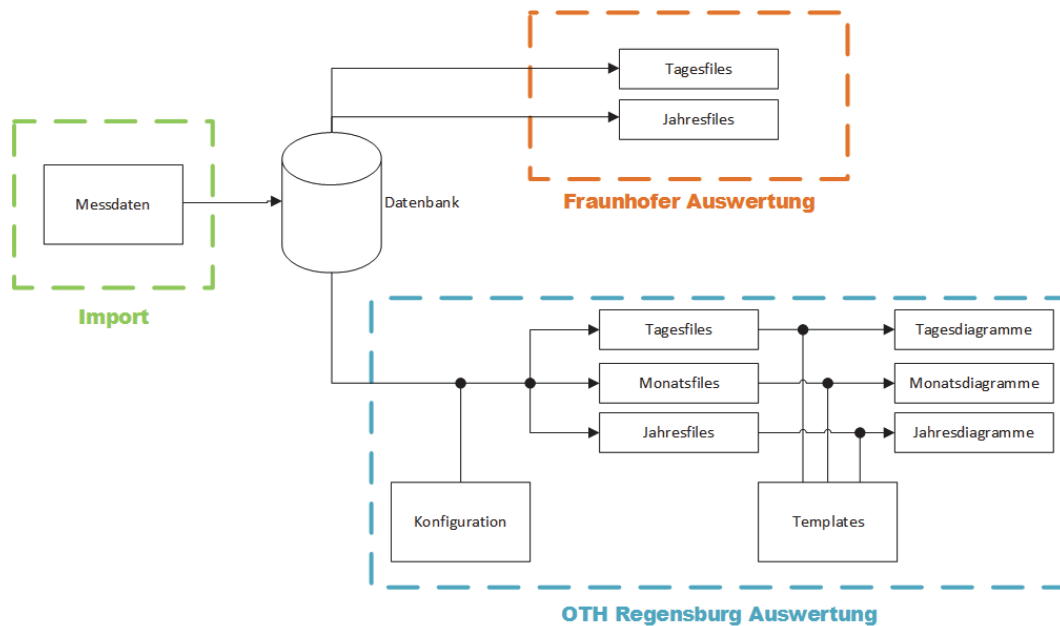


Abbildung 15

4.2.7 Inbetriebnahme

Die endgültige Installation des Datenloggers fand am 15.05.2014 statt. Die Abbildungen 16 und 17 zeigen den fertig installierten Logger sowie dessen Anbindung an die Sensorik mittels Phoenix-Steckern.



Abbildung 16: Datenlogger Vorderansicht

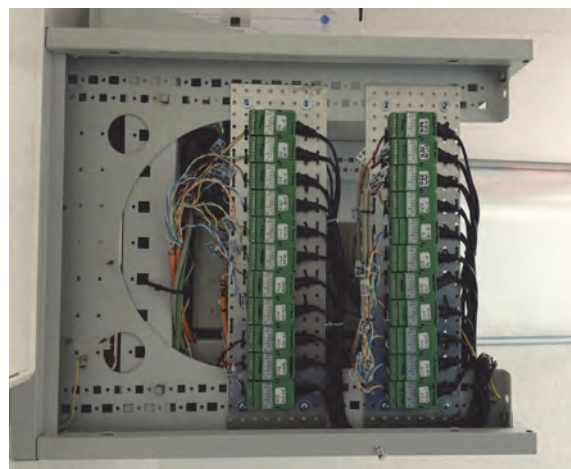


Abbildung 17: Datenlogger Seitenansicht

4.2.8 Bestimmung des Lüftungsvolumenstroms

Im Juli 2014 wurde die Lüftungsanlage mit einem Testo 417 sowie dem zugehörigen Trichter mit einem Durchmesser von 20 cm voreingestellt.

Daraus ergaben sich folgende Beziehungen zwischen Leistungsaufnahme (gemessen und Herstellerangabe), eingestellter Lüftungsstufe und erzielttem Volumenstrom:

Leistungsaufnahme (kW)				
Messwert	Grenze	Herstellerangabe	Stufe	Volumenstrom (m³/h)
0	0,009		0	0
0,018	0,024	0,02	1	49,5
0,03	0,036	0,025	2	63,3
0,042	0,048	0,038	3	72,8
0,054	0,06	0,051	4	88,1
0,066	0,078	0,078	5	99,3
0,09	0,102	0,102	6	110,5
0,114	0,135	0,14	7	142,6
0,156		0,2	8	178,6

Tabelle 20

Über das Monitoring kann aus der Leistungsaufnahme des Lüftungsgeräts demnach auf die eingestellte Lüftungsstufe geschlossen werden, ohne im Haus vor Ort sein zu müssen (Abbildung 18). Aus dem Volumenstrom und der Zu- und Fortluft-Temperatur lässt sich der Lüftungswärmeverlust berechnen.

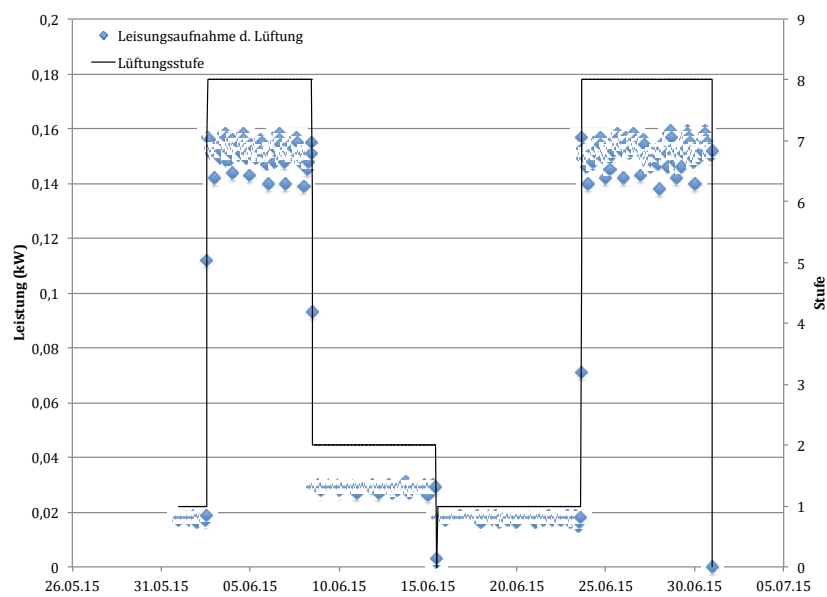


Abbildung 18: Zuordnung der Lüftungsstufe aus gemessener Leistungsaufnahme

5 Meteorologische Randbedingungen

5.1 Solarstrahlung

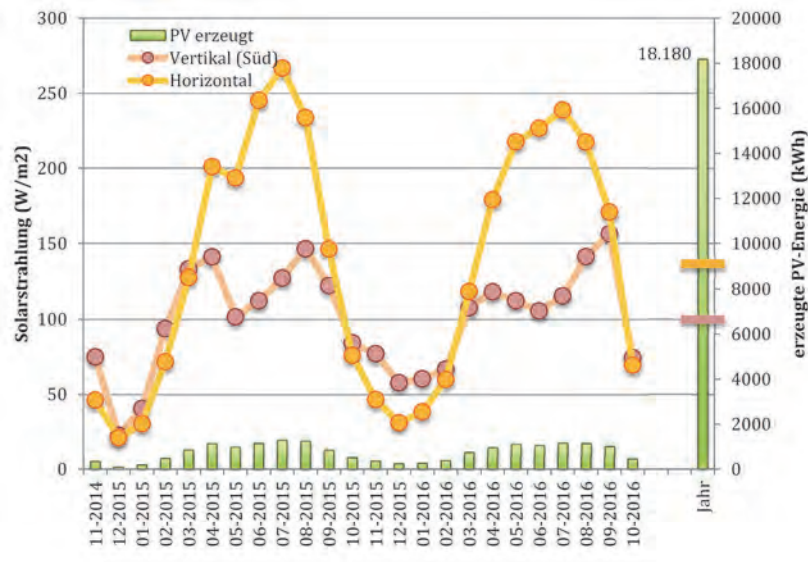


Abbildung 19: Solarstrahlung

Aus der Wetterstation ergaben sich im Betrachtungszeitraum 01.11.2014 bis 31.10.2016 die in Abbildung 19 gezeigten Monatsmittelwerte für die Solarstrahlung (senkrecht aus südlicher Richtung und auf die Horizontale). Der Solarertrag von knapp über 18.000 kWh (9.000 kWh/a) im Berichtszeitraum übersteigt den aus Simulationen prognostizierten jährlichen Ertrag von 7.248 kWh (PV-Simulation für den Standort Deggendorf durch Nigl & Mader vom 19.02.2014) um ca. 25 %.

Die PV-Simulation aus dem Jahr 2014 wurde hinterlegt mit Wetterdaten vom Standort Deggendorf/Natternberg. Darin berücksichtigt sind entsprechende Prognosen zu häufiger vorhandenen Nebeltagen auf Grund der Nähe zur Donau. Ebenso wurde der Leistungsverlust nach Herstellerangaben mit 0,4 % jährlich auf einen Zeitraum von 25 Jahren miteinbezogen. Im Durchschnitt ergab dies eine spezifische PV-Anlagenleistung von 923 kWh/kWp, ausgehend von einem anfänglichen Wert von 970 kWh/kWp.

Die im Zeitraum 2014 bis 2016 gemessenen Ertragsdaten ergeben gegenüber der Simulation und im Vergleich mit anderen PV-Anlagen (Standardmodule) tatsächlich höhere Werte, was wiederum für die vom Hersteller angegebenen Mehrerträge der Hochleistungsmodule spricht.

5.2 Außenklima – Temperatur, relative Feuchte, Windgeschwindigkeit

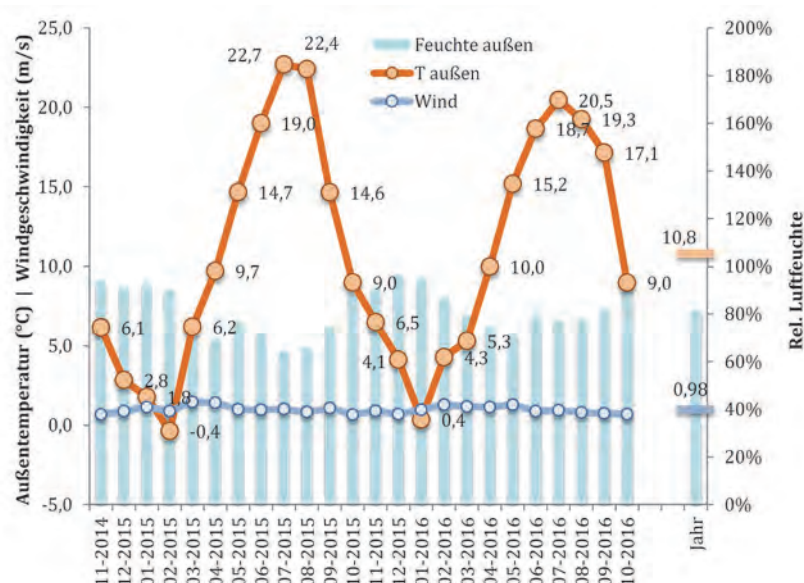


Abbildung 20: Wetter - Temperatur, Feuchte und Wind

Klimabereinigung

Standort und Betrachtungsperiode	Gradtagzahl G20/12 [Kd]
Gradtagzahl am Standort Natternberg in der Periode von 20.10.2014 bis 19.10.2015*	3.411
Gradtagzahl am Standort Natternberg für das langjährige Mittel (1970 bis 2013) *	3.812
Gradtagzahl für das Referenzklima Deutschland	3.601

Tabelle 21

* Datenbasis: Deutscher Wetterdienst (Tagesmittelwerte),
Station Metten (48° 47' N; 12° 53' O; 313 m; Entfernung ca. 3,6 km)

- Klimafaktor bezogen auf den Standort: $KF = 3.812 / 3.411 = 1,12$
- Klimafaktor bezogen auf deutsches Normklima: $KF = 3.601 / 3.411 = 1,06$

Die berechneten Klimafaktoren für das erste Monitoring-Jahr in Tabelle 21 zeigen, dass dieser Zeitraum klimatisch um 6 % bzw. 10 % vom langjährigen Standort-Mittelwert bzw. vom Referenzklima abweicht.

6 Messergebnisse

6.1 Endenergiebilanz

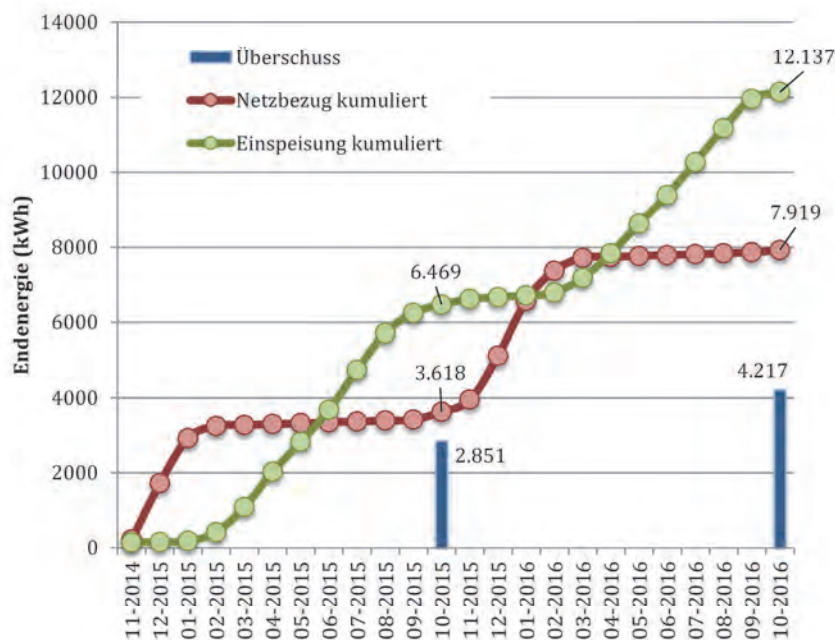


Abbildung 21: Endenergiebilanz

Die Endenergiebilanz in Abbildung 21 verdeutlicht, dass die Bezugs- und Ertragsform der zu bilanzierenden Energieströme der elektrische Strom ist. Dieser wird insbesondere zum Nachheizen des thermischen saisonalen Pufferspeichers durch elektrische Heizstäbe benötigt.

6.1.1 Endenergie

Die Endenergiebilanz weist ein **Plus von 2.851 kWh** nach dem ersten Jahr und **4.217 kWh** nach dem zweiten Jahr (01.11.2014 bis 31.10.2016) aus. Im Mittel ergibt sich somit ein Energieüberschuss von **2.109 kWh pro Jahr**.

6.1.2 Primärenergie

Für die **Primärenergie** ist die Überschussenergie mit dem Strommix-Faktor von 2,4 zu bewerten, da dadurch die entsprechende Menge Primärenergie auf der EVU-Seite entfällt.

Daraus ergibt sich ein **primärenergetisches mittleres jährliches Bilanzplus von 5.060 kWh**.

6.2 Stromverbrauch

6.2.1 Stromverbrauch für Hausbetrieb

Nachfolgend ist der Stromverbrauch in der zweijährigen Monitoringzeit nach Verbrauchergruppen dargestellt:

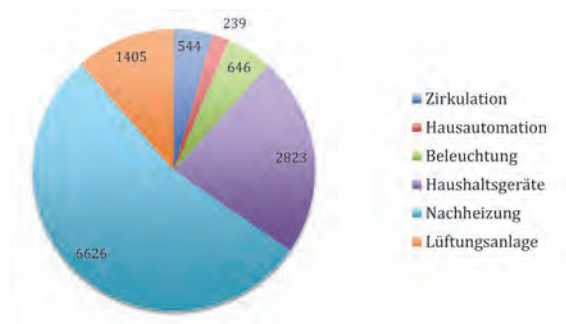


Abbildung 22: Stromverbrauch in kWh

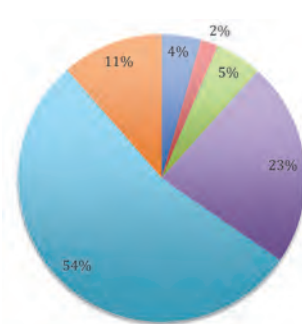


Abbildung 23: Stromverbrauch – prozentuale Darstellung

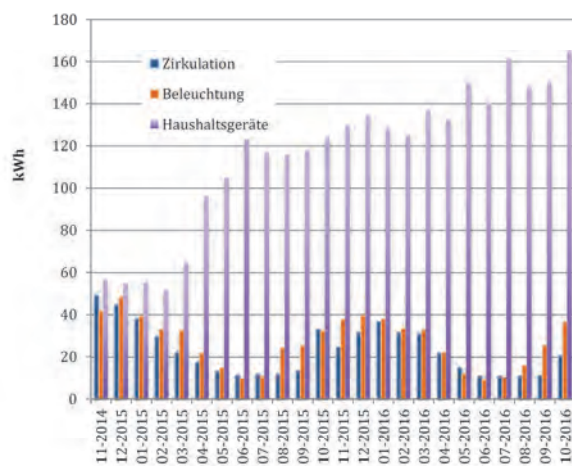


Abbildung 24: Stromverbrauch (ohne Heizung/Lüftung)

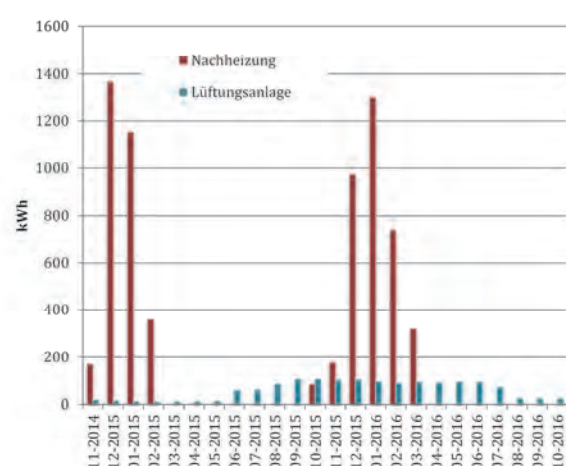


Abbildung 25: Stromverbrauch (für Heizung/Lüftung)

6.2.2 Stromverbrauch für projektspezifischen Anteil

Der Stromverbrauch für die Monitoring-Maßnahmen betrug im Berichtszeitraum relativ konstant 23,6 kWh im Monat, in Summe 567 kWh.

6.2.3 Stromverbrauch für Elektromobilität

Am Haus wurde kein permanenter E-Mobilitätsbetrieb durchgeführt, nur im Zeitraum der Landesgartenschau Deggendorf. Das Fahrzeug wurde dabei von einer separaten Stromversorgung geladen.

6.2.4 Stromversorgung

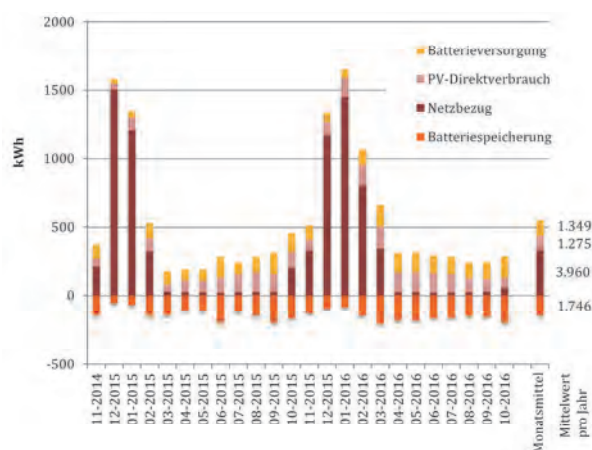


Abbildung 26: Stromversorgung und Batterieladung

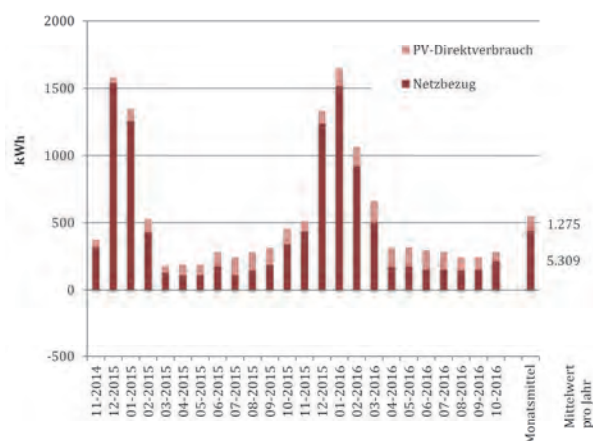


Abbildung 27: Szenario ohne Batterie

Für den Gesamtverbrauch von 6.584 kWh ergibt sich in Verbindung mit dem Gesamt-PV-Ertrag 9.090 kWh (siehe 6.2.8) ein bilanzieller Deckungsgrad von 138 %.

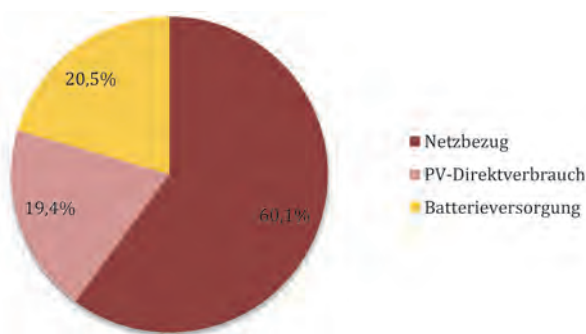


Abbildung 28: Stromversorgung Prozentual

Der aus Batterieversorgung, Netzbezug und PV-Direktverbrauch (bestimmt aus dem Anlagen-Monitoring) errechnete Stromverbrauch ist ca. 10 % höher als der direkt im Gebäude erfasste Verbrauch (siehe 6.2.8). Diese Diskrepanz konnte im Rahmen der Ursachenforschung nicht eindeutig erklärt werden. Möglicherweise sind hier Batteriespeicher- und Batterieentladungsprozesse beteiligt.

Der Netzbezug macht vom Gesamtverbrauch 60,1 % aus, ohne Batterie käme er auf 80,6 %. Der Anteil des selbst genutzten Stroms vom Gesamt-PV-Ertrag beläuft sich auf 28,9 % (ohne Batterie wären es nur 14,0 %).

6.2.5 Eigenstromnutzung (Autarkiegrad)

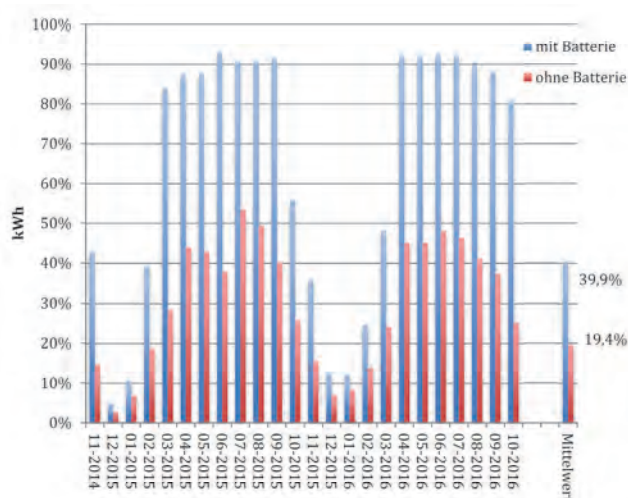
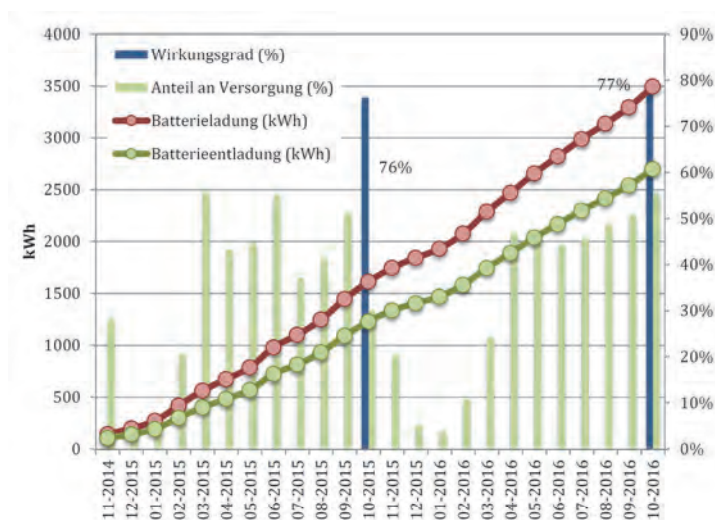


Abbildung 29: Strom - Autarkiegrad

Aus den gemessenen Werten lässt sich der in Abbildung 29 dargestellte Strom-Autarkiegrad (Selbstversorgungsgrad) ermitteln.

Der Autarkiegrad von 39,9 % über das gesamte Jahr ist aufgrund des hohen Strombedarfs im Dezember und Januar wegen der Nachheizung mit den Elektroheizstäben und des in diesem Zeitraum geringen PV-Ertrages verhältnismäßig gering. Betrachtet man den Jahresverlauf genauer, so stellt man fest, dass der Autarkiegrad über 7 Monate des Jahres deutlich über 80 % liegt und auch in den Übergangsmonaten 40 – 50 % erreicht. Nur die Wintermonate schneiden hier aufgrund der sehr niedrigen Einstrahlung und des verhältnismäßig hohen Verbrauchs der Elektroheizstäbe ungünstig ab.

6.2.6 Batteriespeicher-Performance

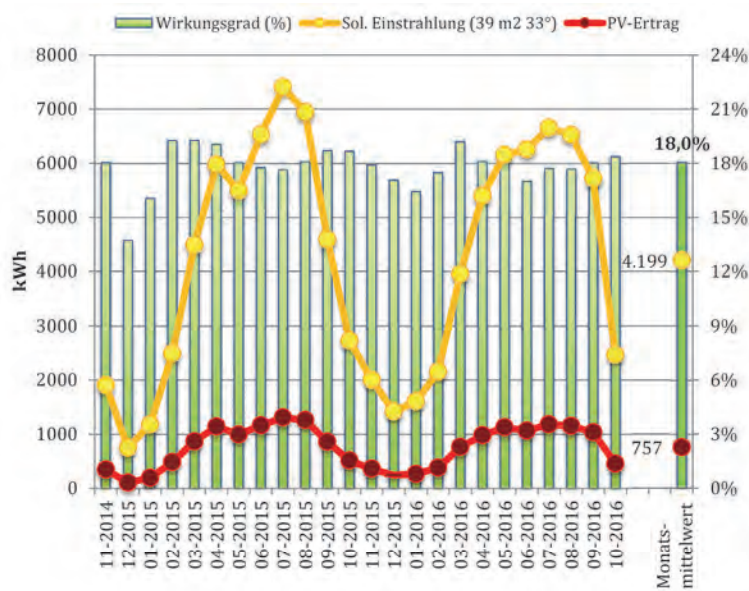


Mithilfe des Batteriespeichers mit einer Nutzkapazität von 7,2 kWh lässt sich der Anteil des selbst genutzten PV-Stroms deutlich erhöhen. In Abbildung 30 wird die kumulierte elektrische Arbeit aus Entladung und Aufladung des Speichers dargestellt. Vom 01.11.2014 bis 31.10.2016 ergibt sich ein Wirkungsgrad von 77 %, dieser ist allerdings deutlich niedriger als der vom Hersteller prognostizierte Wert von 85 %.

Abbildung 30: Batterieversorgung

Besonders sinnvoll erscheint das Batteriesystem in den Monaten mit hohem PV-Ertrag. So wird beispielsweise der Stromverbrauch im März 2015 zu rund 55 % aus dem Batteriespeicher gedeckt. Im Juni und September ergeben sich ähnlich hohe Werte.

6.2.7 PV-Modulperformance



Der Vergleich der Globalstrahlung (in W/m^2) auf eine horizontale bzw. eine nach Süden gerichtete vertikale Fläche (Pyranometer-Messung) mit den PV-Erträgen ($39 m^2$ mit 33° Dachneigung nach Süden) erlaubt die Abschätzung des Anlagenwirkungsgrads.

Unter der vereinfachten Annahme, dass ca. 50 % des Mittelwerts aus beiden Pyranometer-Messdaten auf Diffusstrahlung zurückzuführen ist (der Rest auf Direktstrahlung), ergibt sich für die um 33° geneigten PV-Module eine entsprechende Einstrahlung, deren energetische Summe für jeden Monat berechnet werden kann (zwischen 750 und 7.400 kWh, im Mittel ca. 4.200 kWh pro Monat).

Abbildung 31: PV-Anlagenperformance

Aus den erfassten PV-Erträgen (im Mittel 767 kWh pro Monat) ergibt sich jeweils ein Anlagenwirkungsgrad zwischen 14 % und 19 %, im Jahresmittel beträgt er 18 % (vgl. Abbildung 31). Vom Hersteller wird ein Wirkungsgrad von 20,3 % prognostiziert. Die Wirkungsgradangabe des Herstellers bezieht sich bei PV-

Modulen jedoch generell auf die Standardtestbedingungen (STC), bei denen folgende (Labor)-Bedingungen simuliert werden:

- 25°C Umgebungstemperatur
- 1.000 W/m² Einstrahlung auf Modulebene senkrecht
- AM 1,5 (Air-Mass.)

Eine Abweichung unter realen Bedingungen ist deshalb nicht außergewöhnlich.

Es ergeben sich aus dem Monitoring folgende Jahreserträge:

- 2015 (Januar – Dezember): 9.354 kWh
- 2016 (Januar – Oktober): 8.380 kWh

Der Gesamtertrag im Zeitraum 01.11.2014 bis 31.10.2016 betrug 18.179 kWh, im Jahresmittel also 9.090 kWh.

6.2.8 Gegenüberstellung von Stromverbrauch und Stromgewinnung

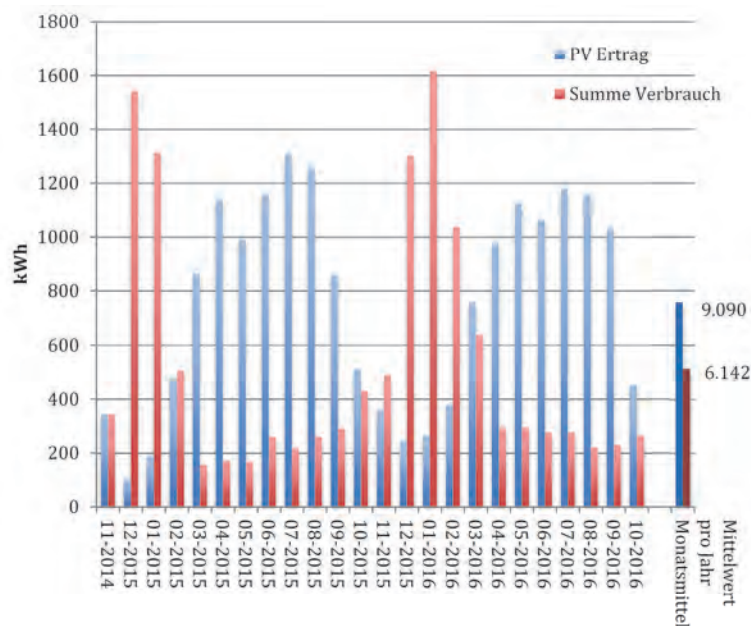


Abbildung 32: Stromverbrauch vs. PV-Ertrag

Aus dem erzielten mittleren jährlichen PV-Ertrag von 9.090 kWh und dem direkt im Gebäude gemessenen Verbrauch von 6.142 kWh pro Jahr ergibt sich ein formaler Strom-Deckungsgrad von 148,0 %.

Der Vergleich von tatsächlicher PV-Erzeugung mit Simulationsdaten liefert folgendes Ergebnis:

Die real beobachteten höheren Erträge lassen sich mit den tatsächlichen vorherrschenden Sonnenstunden im Berichtszeitraum erklären, die in einem ähnlichen Verhältnis zu den mittleren Daten des Deutschen Wetterdienstes größer ausfielen (siehe Abbildung 33).

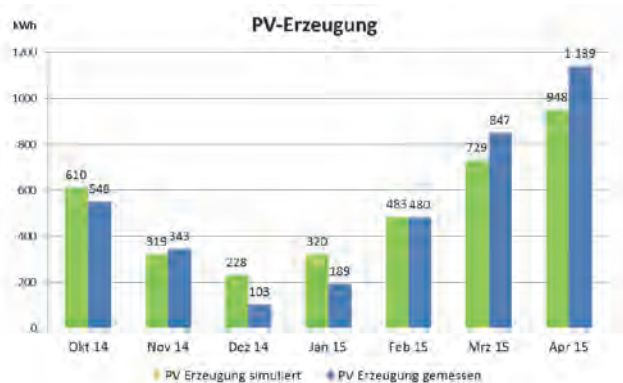


Abbildung 34: PV-Erzeugung

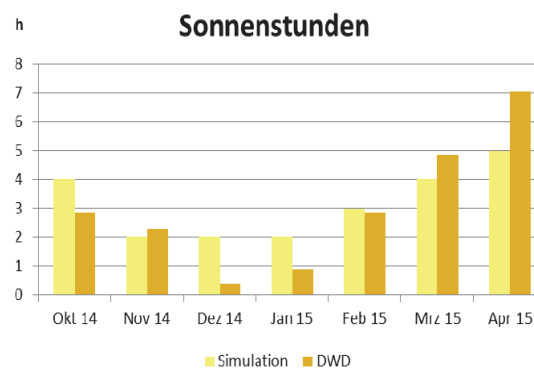


Abbildung 33: Sonnenstunden

6.3 Anlagenperformance

6.3.1 Wärmeerzeuger

Die Solarkollektoren und die elektrische Nachheizung (Heizstäbe) dienen der Wärmeversorgung des Gebäudes in Form von Fußbodenheizung und Warmwasserbereitung.

Das nachfolgende Diagramm (Abbildung 36) zeigt die monatlichen solaren Erträge (Wärmemengen), die dem Pufferspeicher zugeflossen sind und die monatlichen Energiemengen, die durch elektrisches Nachheizen aufgewandt wurden. Diesen werden die ins Gebäude abgegebenen Wärmemengen und die durch Differenzbildung ermittelten Wärmeverluste einander gegenübergestellt. Letztere entstanden hauptsächlich in Form von Transmissionswärmeverlusten durch die Wand des Pufferspeichers und des abgetrennten Technikraums; in der Jahresbilanz ergeben sich 6.395 kWh.

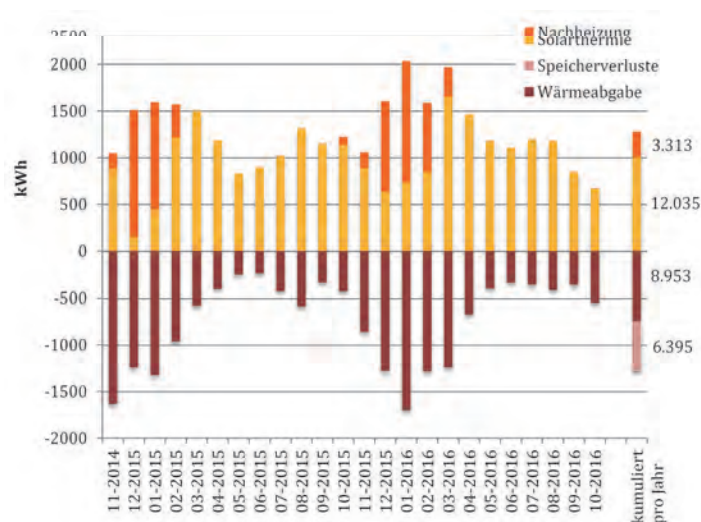


Abbildung 36: Wärmebereitstellung

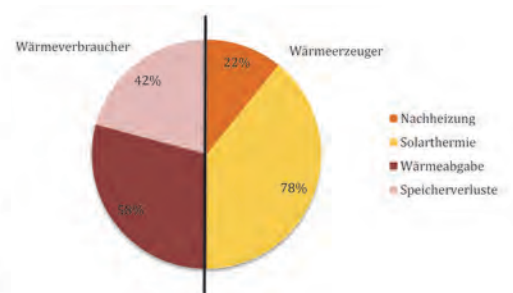


Abbildung 35: Wärmebereitstellung prozentual

Über das gesamte Jahr betrachtet ergibt sich, dass 22% der eingespeicherten Wärme aus der elektrischen Nachheizung stammt (Abbildung 35). Die Nachheizung war hauptsächlich in den Monaten Dezember und Januar aktiv und in deutlich geringerem Maße in den Monaten davor und danach.

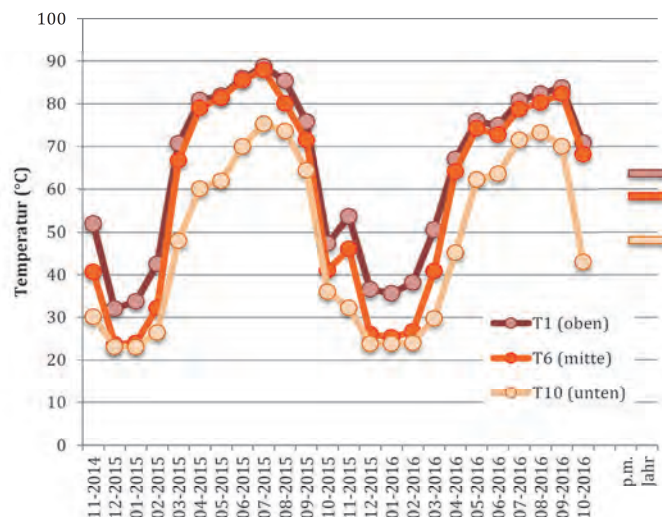
Die Speicherverluste betragen ca. 42 % der eingespeicherten Wärmemengen, die Wärmeabgabe ans Haus 58 %.

Vom jährlichen mittleren Gesamtwärmebedarf 8.953 kWh (Fußbodenheizung und Warmwasser) mussten rechnerisch 3.313 kWh elektrisch bereitgestellt werden (wovon allerdings ein knappes Drittel Speicherverluste darstellen können); daraus ergibt sich ein über das Jahr gemittelter solarer Wärme-Deckungsgrad von $(8.953 - 3.313) / 8.953 = 63,0 \%$.

Im Sommer sind die Speicherverluste aufgrund der hohen Speichertemperatur relativ groß, diese Verluste können aber sofort durch nachgelieferte Solarwärme ersetzt werden, so dass die Speicherverluste im Sommerhalbjahr keinen bedeutenden Nachteil darstellen. In der Heizperiode dagegen sind die Speicherverluste gravierender. Insbesondere in den einstrahlungsarmen Monaten Dezember und Januar, in denen der überwiegende Teil der Wärme von den elektrischen Heizstäben zur Verfügung gestellt wird, sind die Pufferspeicherverluste bedeutsam. Beispielsweise waren die Speicherverluste in den Wintermonaten Dezember 2014 und Januar 2015 in der gleichen Größenordnung wie die eingespeicherte Solarwärme in dieser Zeit. Das heißt die Solarwärme trägt in den Wintermonaten zur Beheizung des Gebäudes nahezu

nichts bei, so dass das Gebäude im Grunde in dieser Zeit rein elektrisch beheizt wird und die Solaranlage samt Pufferspeicher in den Monaten Dezember und Januar kaum einen Gewinn darstellt.

6.3.2 Pufferspeicher Temperaturen



Aufgrund einer Fehlfunktion in der Anlagensteuerung wurde der Pufferspeicher ab Mitte Oktober 2015 durch nachts laufende Solarthermie-Pumpen auf 20 °C abgekühlt. Die elektrische Heizung wurde dabei jedoch nicht aktiv. Dies führt für die kommende Heizperiode zu einer ungünstigen Ausgangslage, da praktisch keine solarthermische Energie für die Übergangsjahreszeit gespeichert ist.

Abbildung 37: Saisonaler Pufferspeicher

6.3.3 Diskussion und Vergleich mit Simulationsrechnungen

Der saisonale Pufferspeicher, welcher das Herzstück des Systems bildet, wurde mit 10 Temperaturfühlern über die gesamte Höhe ausgestattet. Diese erlauben es zu jedem Zeitpunkt den Beladungsstatus und den Verlauf der Temperaturen der einzelnen Schichten genau nachzuverfolgen. Dessen Beladungsstatus hat große Auswirkung auf die Fähigkeit der Kollektoren, Wärmeerträge zu generieren. Sind die Temperaturen in den untersten Schichten bereits bei hohen Werten angelangt, ist es nicht möglich, trotz guter Einstrahlungswerte, weiterhin nutzbare Energie zu speichern. In Tabelle 22 sind die Fühler mit der zugehörigen Einbauhöhe aufgelistet. Um die Übersichtlichkeit zu bewahren, wurden zur Auswertung der Schichttemperaturen die Messwerte der Fühler T1, T4, T8 und T10 repräsentativ herangezogen. Die Verläufe sind in Abbildung 38 in verschiedenen Farben dargestellt. Bei der nachfolgenden Analyse wurden

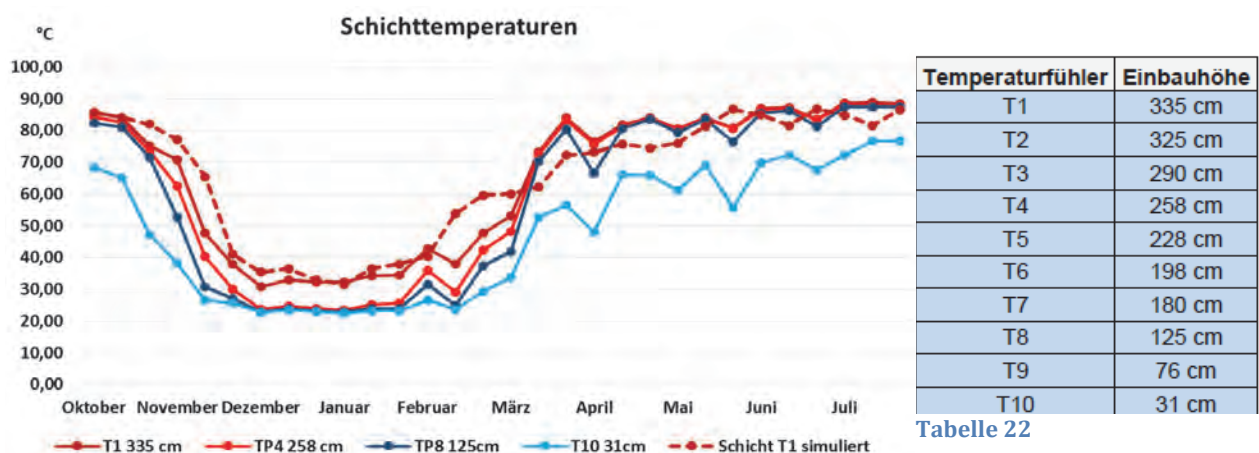


Tabelle 22

Abbildung 38: Schichttemperaturen

die einzelnen Monate jeweils in drei Abschnitte unterteilt und die entsprechenden mittleren Temperaturen gebildet. Somit entspricht jeder Datenpunkt in etwa einem Mittelwert über zehn Tage. Kleinere Schwankungen haben eine geringe Auswirkung auf die Temperaturtrendlinie, dennoch werden die Verläufe in ausreichend hoher Auflösung dargestellt.

Zu Beginn der Aufzeichnungen Anfang Oktober verfügte der saisonale Pufferspeicher über einen Beladungsstatus von ca. 83 %. Dies lässt sich auch anhand der Temperatur von annähernd 70 °C in der untersten Schicht des Speichers erkennen. Allerdings kühlte sich diese im Laufe des Monats bis auf etwa 48 °C ab. Durch die bereits hohe Beladung des Pufferspeichers wurden lediglich 729 kWh Kollektorerträge bei einem Globalstrahlungswert von 61 kWh/m² im Oktober generiert. Mit dem Beginn des Einsatzes der Fußbodenheizungen im November wurden selbst die obersten Schichten bis auf ca. 39 °C heruntergekühlt. Infolge der steigenden Heizaufwände und dem damit verbundenen Energieentzug des Speichers, beträgt der Beladungsstatus Ende November lediglich 10 %. Folglich wurde der komplette Speicher in einem Zeitraum von 3 - 4 Wochen fast vollständig entladen.

Positiv wirken sich die niedrigen Temperaturen hingegen auf die Gewinne der solarthermischen Kollektoren aus. Diese erzeugten im Monat November 879 kWh bei einer Globalstrahlung von 32 kWh/m². Im Vergleich zum Monat Oktober sind dies fast 150 kWh mehr Erträge bei der Hälfte der Globalstrahlungsstärke. Durch den weiter steigenden Heizenergieverbrauch in den Monaten Dezember und Januar, sowie den gegensätzlich dazu verlaufenden Wärmeerträgen der Großflächenkollektoren, bleibt der Pufferspeicher in der Winterzeit im Wesentlichen entleert, repräsentiert durch die Temperaturfühler T4, T8 und T10. Der oberste Temperaturfühler T1 liegt im Bereich der elektrischen Nachheizung.

Von Ende Februar bis Ende März benötigten die solarthermischen Kollektoren jedoch ebenfalls nur 3 bis 4 Wochen, um den Pufferspeicher von einem Beladungsstatus von ca. 10 % auf einen Wert von 73 % wieder anzuheben. Die steigenden Globalstrahlungswerte und die noch niedrigen Schichttemperaturen des Speichers, erlaubten die Einspeicherung von großen Wärmemengen in diesen Monaten. In gleicher Weise ist der geringer werdende Heizungsverbrauch für eine solch rasche Aufladung verantwortlich. Am Nachmittag des 1. April lag eine Temperaturspreizung über die komplette Höhe des Pufferspeichers von 51 °C – 80 °C vor. Die Rückgänge der Kollektorerträge ab April – trotz weiter steigender Einstrahlungswerte auf bis zu 177 kWh/m² – sind auf den hohen Beladungsstatus sowie auf die bereits hohen Temperaturen von 70 °C im untersten Bereich des Speichers zurückzuführen. Die in Abbildung 38 rot gestrichelte Linie repräsentiert den vorab simulierten Temperaturverlauf in einer Höhe von ca. 335 cm. Infolgedessen sind diese Werte mit dem Fühler T1 des Monitorings der OTH Regensburg zu vergleichen. Bei der Gegenüberstellung der beiden Verläufe ist eine sehr gute Übereinstimmung zu erkennen.

Solarer Deckungsgrad

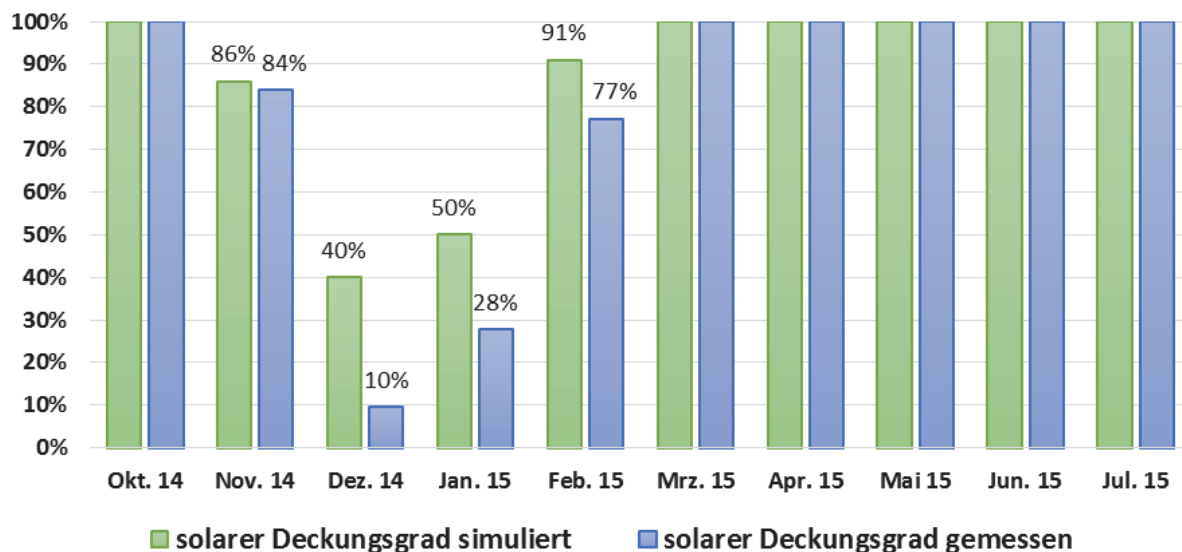


Abbildung 39: Solarer Deckungsgrad

In Abbildung 39 wurde der solare Deckungsgrad der solarthermischen Anlage des Effizienzhauses Bachl errechnet und den vorab simulierten Werten gegenübergestellt. Die Grundlage der Berechnungen stellten die Messwerte der Wärmemengenzähler W1, W2, W3 und die Stromzähler der beiden Nachheizpatronen dar.

In den Monaten Oktober, März, April, Mai, Juni und Juli erreichte der solare Deckungsgrad des solarthermischen Systems den Maximalwert von 100 %. Insofern basiert die Wärmeversorgung zu diesen Zeiträumen rein auf den Gewinnen der Großflächenkollektoren und dem Pufferspeicher als Element des zeitlichen Ausgleichs zwischen „Sonnenangebot“ und „Wärmenachfrage“. Die gemessenen Werte decken sich in diesen fünf Monaten exakt mit dem prognostizierten Werten des Simulationsprogramms. Mit dem Einsatz der elektrischen Nachheizstäbe in den Monaten November bis Februar, fällt der solare Deckungsgrad entsprechend der oben aufgeführten Formel unter den Maximalwert ab. Mit 86 % im November und 77 % im Februar erreichte der solare Deckungsgrad des Gebäudes trotz den Einsatzzeiten der Nachheizung noch relativ hohe Werte. Dies liegt vor allem an den beträchtlichen Erträgen der Kollektoren in den genannten Monaten. Im Dezember und Januar wirken sich die Mindererträge der solarthermischen Kollektoren sowie die erhöhten Nachheizaufwände gegenüber der Simulation zweifach negativ auf den Deckungsgrad aus. Folglich sanken die Werte im Dezember auf 10 % und im Januar auf 28 %. Der solare Deckungsgrad über den gesamten Betrachtungszeitraum beläuft sich auf 80 % und unterscheidet sich um 7 % vom angestrebten Simulationswert von 87 %. In den Monaten Dezember und Januar liegt demnach eine relativ hohe Abhängigkeit des Heizsystems von der elektrischen Nachheizung vor.

Pufferspeicherverluste

Zur Betrachtung der Pufferspeicherverluste wurde der Zeitraum Oktober 2014 bis Juni 2015 herangezogen. Die Monate Juli, August und September spielen hierbei keine Rolle, da der Pufferspeicher voll beladen ist, sicher keine elektrische Nachheizung erforderlich ist und genügend Solarwärme zur Deckung der Wärmeverluste zur Verfügung steht.

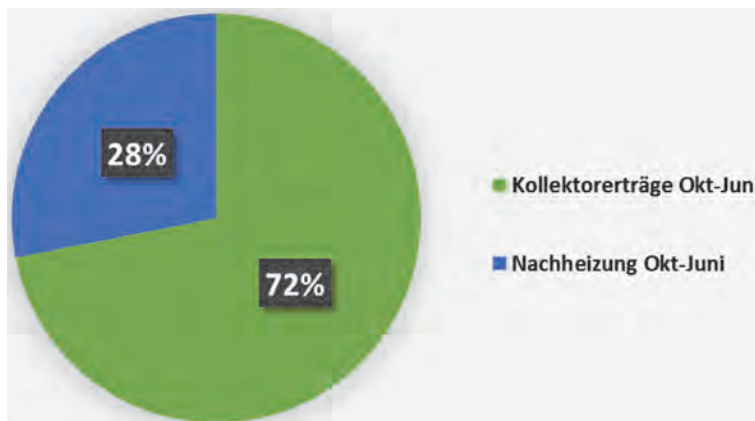


Abbildung 40: Pufferspeicherinput Oktober bis Juni

Von den insgesamt 10876 kWh, welche über diesen Betrachtungszeitraum in den Pufferspeicher eingespeichert wurden, sind 72 % von der solarthermischen Anlage erzeugt worden. Die restlichen 28 % können den elektrischen Heizstäben angerechnet werden.

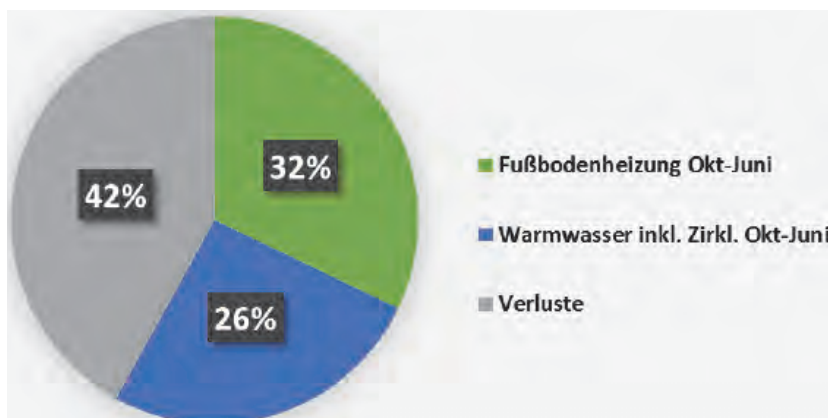


Abbildung 41: Pufferspeicheroutput Oktober bis Juni

Mit einem absoluten Wert von 4513 kWh stellen die Speicherverluste ca. 42 % der Energie dar, welche dem Speicher in den neun Monaten entzogen wurde. An zweiter Stelle stehen die Aufwände der Fußbodenheizungen im Erd- und Obergeschoss mit 32 %. Mit 26 % nehmen die Verbräuche zur Bereitstellung des Warmwassers den kleinsten Anteil ein. Der treibende Faktor für den Wärmeentzug des Pufferspeichers ist die Temperaturdifferenz zwischen der umgebenden Raumluft und der Speicherflüssigkeit. Da der Pufferspeicherraum nicht beheizt wird, steigen die Wärmeverluste mit fallenden Außentemperaturen im Winter deutlich an. Allerdings werden die Wärmeverluste an den Pufferspeicherraum zum Teil mit der Lüftungsanlage wieder genutzt, da die Lüftungsanlage in den Wintermonaten unterhalb einer Außenlufttemperatur von 7 °C die Luft aus dem Pufferspeicherraum absaugt.

6.3.4 Vergleich mit Simulationsrechnungen

In den Abbildungen 42 und 43 werden Detailbetrachtungen vom Wärmeertrag der Kollektoren und der elektrischen Nachheizung im Vergleich zu einer Simulation dargestellt:



Abbildung 42: Wärmeertrag Kollektoren gesamt

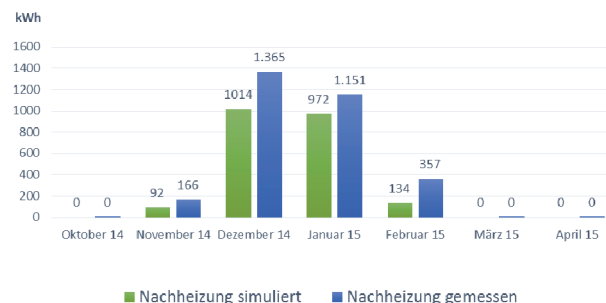


Abbildung 43: Elektrische Nachheizung

Die Monate November, Dezember, Januar und Februar der Heizperiode überschreiten die vorher simulierten elektrischen Energieverbrauchswerte. Dabei fällt vor allem der Monat Dezember mit einem Mehrverbrauch von 351 kWh ins Auge. Ein Grund für den erhöhten elektrischen Nachheizbedarf im Dezember ist die durchgehende Einsatzzeit der beiden Elektroheizstäbe über einen Zeitraum von ca. 40 Stunden, welcher durch den Ausfall der Heizstäbe und der damit verbundenen Pufferspeicherauskuhlung hervorgerufen wurde. Darüber hinaus ist der Feldertrag der solarthermischen Kollektoren der bestimmende Faktor für die Höhe der elektrischen Nachheizung.

Bei genauerer Betrachtung der beiden Diagramme ergibt sich ein plausibler Zusammenhang zwischen den Mindererträgen der Kollektoren in den Monaten Dezember und Januar und der folglich erhöhten Nachheizung durch die Heizstäbe. Mit Unterschieden von 538 kWh (Dez) und 537 kWh (Jan) zum simulierten Energieertrag ergeben sich beachtliche Defizite. Der erhöhte elektrische Verbrauch zur Wärmeversorgung des Gebäudes in den Monaten November und Februar lässt sich anhand der Kollektorerträge nicht erklären, da diese etwa gleich groß (Februar) und teils auch stark erhöht (November) gegenüber den vorhergesagten Erträgen sind. Hier liegt die Ursache vermutlich im erhöhten Warmwasserbedarf, der durch die hohen Zirkulationsverluste entstanden ist.

Die Globalstrahlung ist eine der wichtigsten Einflussgrößen auf den zu erwartenden Kollektorertrag (Abbildung 44). Um die Unterschiede im Dezember und Januar genauer ergründen zu können, ist eine Betrachtung der solaren Einstrahlung auf die horizontale Ebene in den einzelnen Monaten aufschlussreich. Mit 5 kWh/m² und 4 kWh/m² geringerer Einstrahlung auf die horizontale Ebene im Dezember und Januar erklären sich die Mindererträge der solarthermischen Anlage. Auf ein Gebiet von 50 m² gerechnet fehlen monatlich 250 kWh bzw. 200 kWh Energie auf der waagerechten Fläche. Auf eine geneigte Ebene, sowie es bei den Kollektorfeldern der Fall ist, kommen noch zusätzliche Einstrahlungsfaktoren hinzu. Die übrigen Einstrahlungswerte decken sich mit den Überschüssen der Kollektorfelder gegenüber der Simulation.

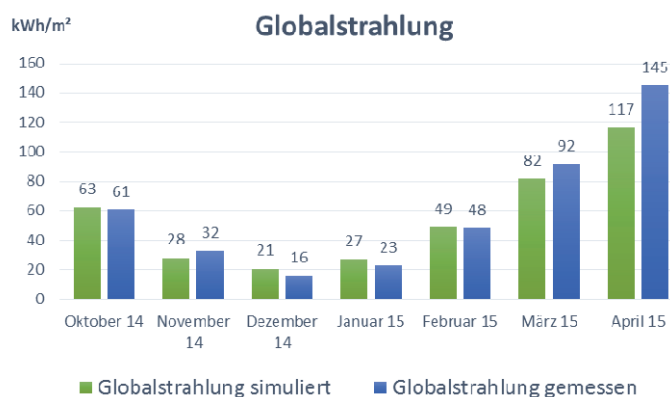
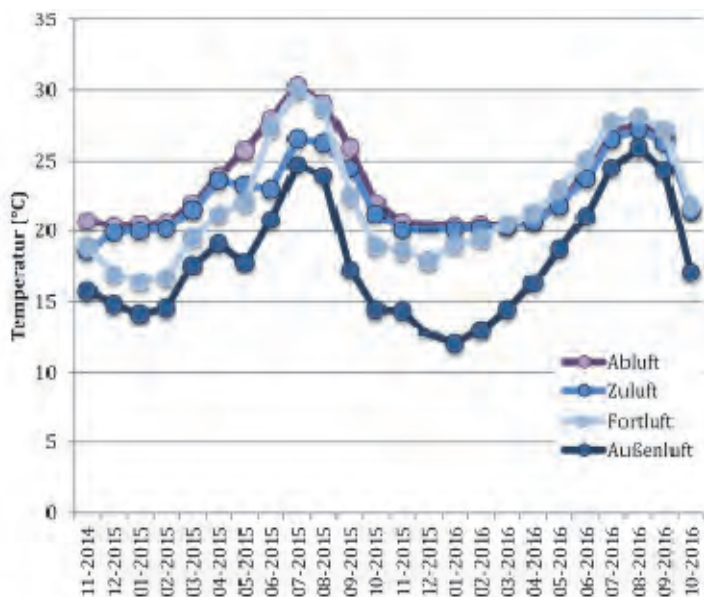


Abbildung 44: Globalstrahlung

6.3.5 Lüftungsanlage

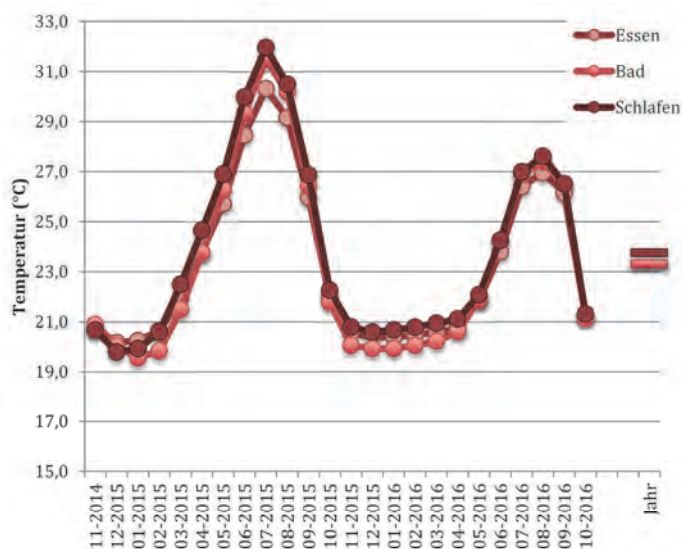


Die Wirkung der Wärmerückgewinnung ist deutlich erkennbar (vollständig aktiv seit Dezember 2014), ab Mai 2015 wurde der Wärmetauscher mit einem **Bypass** überbrückt und auf Sommerbetrieb umgeschaltet (Abbildung 45). Durch Einbau von Klappen wird die Außenluft im Sommer nicht mehr über den vorgewärmten Pufferspeicher-Luftraum angesaugt, sondern direkt kühle Außenluft von außen angesaugt. Die im Winter gewünschte Vorwärmung der Außenluft über die Abwärme des Pufferspeichers wird damit im Sommer vermieden.

Abbildung 45: Wirkung der Wärmerückgewinnung mittels Shuntüberbrückung

6.4 Raumklima

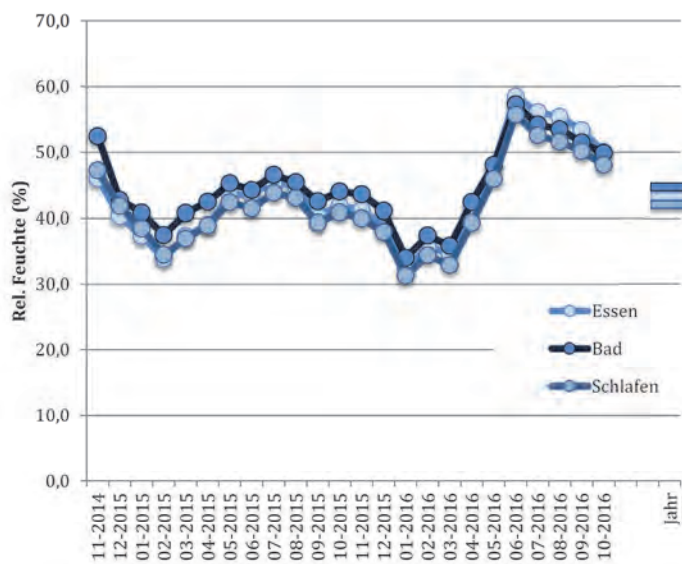
6.4.1 Innentemperaturen



Die extreme sommerliche Überhitzung des Hauses (Abbildung 46) ist auf einen mechanischen Defekt der Verschattungsanlage zurückzuführen, weshalb die Jalousien nicht herabgelassen wurden. Zudem musste aufgrund des ungünstig platzierten Lichtsensors der für die Verschattung maßgebliche Lux-Wert auf einen niedrigeren Wert angepasst werden.

Abbildung 46: Innenraumtemperaturen

6.4.2 Innenraum-Luftfeuchte



Die relative Luftfeuchte in den Innenräumen ist mit Ausnahme des Monats Juni 2016 stets im Bereich zwischen 30% und 55%, wobei der Wert von 30% selbst in den Wintermonaten nicht unterschritten wird.

Abbildung 47: Relative Luftfeuchte

7 Kosten und Wirtschaftlichkeit

7.1 Baukosten, Energie und Betriebskosten

Die Mehr- bzw. Minderinvestitionskosten für das Bauwerk im Effizienzhaus Plus Standard gegenüber dem EnEV 2009 Standard sind in Tabelle 23 aufgeführt.

Die jeweiligen Energie- und Betriebskosten sind in Tabelle 24 gegenübergestellt.

Die Baukosten für den EnEV 2009 Standard wurden geschätzt. Die angegebenen Betriebskosten für Gas (Brennwertkessel) und Strom (Hilfsenergie) wurden aus den EnEV-Berechnungen zum Energieausweis entnommen.

Der durchschnittliche Stromverbrauch (ohne Hilfsenergie) eines 3-Personenhaushalts wurde mit 3700 kWh/a angesetzt und für den EnEV 2009 Standard zugrunde gelegt.

Die realen Kosten für Stromverbrauch des Gebäudes im Effizienzhaus plus Standard und die Netzeinspeisevergütung bzw. Gutschrift für Emobilität wurden für die Monate Juni 2014 bis Dezember 2016 ermittelt und daraus ein „Durchschnittsjahr“ gebildet (u. a. wegen starker Schwankungen der Globalstrahlung und anfänglichen Problemen bei der Steuerung der solarthermischen Anlage). Der Stromverbrauch wurde durch Simulation der Bewohnung des Hauses durch vorgegebene An- und Ausschaltzeiten der Beleuchtung und eines Heizradiators als entsprechender thermodynamischer Verbraucher für alle Haushaltsgeräte verteilt über einen Tagesablauf gemäß einem typischen Nutzungsprofil generiert.

Für Gas wird ein Preis von 6,61 Ct/kWh inkl. Steuern und für Strom ein Preis von 29,19 Ct/kWh inkl. Steuern angesetzt.

Bauteil / Anlage	EnEV 2009 mit EEWärmeG	Mehr-/Minderkosten inkl. Mwst. Effizienzhaus Plus Standard [€]
Außenwand	0,28 (U-Wert)	10.500,00
Dach	0,20 (U-Wert)	2.500,00
Wand gegen Erdreich	–	–
Bodenplatte	0,35 (U-Wert)	4.000,00
Fenster	1,30 (U-Wert)	7.000,00
Heizungsanlage	Gas-Brennwertkessel, Gas anschl.	2.060,00
Solarthermie	7,5 m ²	17.500,00
Lüftungsanlage	vorhanden	vorhanden
Photovoltaik	–	16.800,00
Batterie	–	14.300,00
Beleuchtung	Standard	500,00
Geräte	Standard	2.000,00
Mehrinvestitionskosten		77.160,00

Tabelle 23: Baukosten

Energie- + Betriebskosten		
Konzept Gas – Brennwertkessel incl. Hilfsenergie	1236,56 €	1236,56 € Minderkosten
Haushaltsstrom	1080,03 €	437,77€ Minderkosten (reale Kosten: 642,26 €)
Wartung Heizungsanlage	150,00 €	0 €
Netzeinspeisevergütung	–	1341,44 € Mehreinnahmen
Vergütung Emobilität	–	14,24 € Mehreinnahmen
Summe laufende Kosten pro Jahr	2466,59 €	
Summe Minderkosten / Mehreinnahmen pro Jahr		3030,01 €
Summe Minderkosten / Mehreinnahmen pro Monat		252,50 €

Tabelle 24: Energie- und Betriebskosten

Die außerordentlichen Mehrkosten aufgrund der Notwendigkeit, den Pufferspeicher infolge der ungünstigen Geländesituation unter die Geländeoberkante zu platzieren, wurden nicht eingerechnet.

7.2 Kosten für Geräteausstattung

Gerät	Effizienzklasse	Kosten [€]
Herd	A+	900,00
Backofen	A+	900,00
Dunstabzugshaube	integriert	200,00
Mikrowelle		100,00
Spülmaschine	A+++	1.000,00
Kühlschrank	A+++	650,00
Gefrierschrank	A+++	900,00
Waschmaschine	A+++	1.000,00
Wäschetrockner	A+++	850,00
Beleuchtung		3.000,00
Investitionskosten		9.500,00

Tabelle 25

8 Bewertung

8.1 Energieeffizienz des Modellgebäudes

Die Messdaten der zweijährigen Monitoring-Phase belegen, dass der erstrebte Effizienzhaus-Plus-Standard erreicht wird.

Zusammenfassung der wichtigsten Kenngrößen: *

	1. Messjahr kWh	2. Messjahr kWh	Mittelwert kWh	Mittelwert kWh/m ²
Primärenergiebilanz (EHP)	6.842	3.278	5.062	33,4
Endenergiebilanz (EHP)	2.851	1.366	2.109	13,9
PV-Einspeisung	6.469	5.668	6.069	40,1
Heizwärmeverbrauch (gesamt)	8.438	9.468	8.953	59,1
Heizwärmeverbrauch (Strom)	3.125	3.501	3.313	21,9
Sonst. Stromverbrauch Haustechnik	1.058	1.130	1.094	7,2
Stromverbrauch Beleuchtung	333	313	323	2,1
Stromverbrauch Geräte	1.121	1.702	1.412	9,3
Solarer Deckungsgrad			63,0%	
Stromdeckungsgrad			148,0%	
Netzversorgungsanteil			60,1%	
Autarkiegrad (Eigenanteil)			39,9%	
Eigenstrom-Nutzung (vom PV-Ertrag)			28,9%	

Tabelle 26: Zusammenfassung der wichtigsten Gebäudeenergieeffizienz-Kenndaten

*bezogen auf die beheizte Nettogrundfläche von 151,50 m²

8.2 Erkenntnisse und Verbesserungspotentiale

Folgende Punkte haben sich im Laufe des Projekts als kritisch herausgestellt und könnten in Zukunft besser gemacht werden:

1. Durch eine ungünstige Platzierung des Solarstrahlungssensors zur automatisierten Steuerung der Jalousien-Verschattungsanlage in Verbindung mit zu hoch angesetzten Auslöse-Grenzwerten kam es im Sommer zu einer starken Überhitzung der Räume. Darüber hinaus wurde ein mechanischer Defekt erst spät entdeckt und behoben.
2. Die automatische Ansteuerung der Jalousien hat keine automatische Winter-/Sommerumschaltung. Dies führte dazu, dass die Jalousien auch im Winter bei entsprechender Einstrahlung herunterfahren und somit einen Wärmegewinn durch die Einstrahlung über die Fenster verhindert wurde. Bei bewohntem Zustand lässt sich dies relativ schnell beheben, in unserem Fall eines unbewohnten Musterhauses ist dieses Problem erst relativ spät erkannt worden.
3. Im Oktober 2015 führte die fehlerhafterweise vom System aktivierte Nachtauskühlung mithilfe des Solarmodule zu einer drastischen, ungewollten Abkühlung des Pufferspeichers. Diese Funktion ist im Sommer zum Schutz vor Überhitzung notwendig. Ursache war eine unvollständige Reprogrammierung des Systems nach einem Komponentenaustausch.⁷ Durch verbesserte Steuerungsalgorithmen, die die aktuelle Temperatur des Speicherinhalts berücksichtigen, kann vermieden werden, dass der Pufferspeicher auch in der Übergangsjahreszeit nachts abgekühlt wird, wenn dies eigentlich unerwünscht ist.
4. Wie Simulationsrechnungen gezeigt haben⁸, könnte das Pufferspeichervolumen zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit vermutlich ohne wesentliche Verschlechterung des solaren Deckungsgrades auf ca. 3000 Liter reduziert werden.
5. Angesichts des immer noch erheblichen Wärmebedarfs in den Wintermonaten Dezember und Januar, könnte die Aufheizung des saisonalen Speichers primärenergetisch günstiger mithilfe einer Wärmepumpe erfolgen, anstelle der elektrischen Heizstäbe.
6. Die Luftansaugung über den Pufferspeicherraum zur Nutzung der Abwärme des Pufferspeichers mit den entsprechenden Lüftungsklappen und der erforderlichen Regelung hat sich als relativ aufwendig erwiesen. Die dadurch erzielte Energiegewinnung war aber aufgrund des hohen Wärmerückgewinnungsgrades der Anlage verhältnismäßig gering.
7. Die Zirkulationsverluste der Warmwasserbereitung könnten durch neuere intelligente Regelungen reduziert werden, indem die Zirkulationsleitungen nur bei Betätigung eines Warmwasserhahns durchspült werden.
8. Die Lüftungsanlage wird nicht nach CO₂-Gehalt oder Feuchte der Raumluft geregelt. Die nach der DIN 1946-6 empfohlenen Nennvolumenströme sind rel. hoch und führen demnach zu verhältnismäßig hohen Lüftungswärmeverlusten und rel. hohem Strombedarf für die Lüftungsanlage. Eine bedarfsgeregelte Lüftung wäre deshalb zu empfehlen.
9. Die rein elektrische Nachheizung des Pufferspeichers führt in den Wintermonaten Dezember und Januar zu einem rel. geringen Autarkiegrad, da gerade dann auch nur geringe PV-Erträge vorhanden sind.
10. Die Elektroheizstäbe heizen in den Monaten Dezember bis Februar den oberen Bereich des Pufferspeichers auf. Dieser obere Bereich ist aufgrund der Geometrie des Pufferspeichers mit ca.

⁷ Der Programmierer der Heizungsregelung konnte ermitteln, dass die Software, welche per Zähler die drei Pumpen der Solaranlage in gewissen Abständen zur Nachtabkühlung kurzzeitig in Betrieb setzen sollte, diese dauerhaft auf EIN geschaltet hatte. Eigentlich sollte die Nachtauskühlung nur dann erfolgen, wenn die Solarpumpen tagsüber regulär in Betrieb waren. Diese Programmierung wurde nach einem notwendigen Tausch des Speichermediums aber anscheinend nicht korrekt im System übernommen. Erst nach Wiederprogrammierung der Speicherkarte konnte die beschriebene Fehlfunktion behoben werden.

⁸ Rechenauer, Christian; Neuleitner, Nikolaus; Steffens, Oliver (2015)

800 l für die Warmwasserbereitung und Heizungserwärmung viel zu groß, so dass damit auch rel. hohe Wärmeverluste über den Pufferspeicher verbunden sind. Es wäre besser die elektr. Heizstäbe direkt in den Vorlauf der Heizung einzubauen bzw. das Warmwasser in einem elektr. Durchlauferhitzer nachzuheizen.

11. Statt elektr. Heizstäbe wäre eine kleine Luft-/Wärmepumpe zur Nachheizung sinnvoller.
12. Aufgrund der drei verschieden orientierten Kollektorfelder in Verbindung mit 2 elektr. Heizstäben, wovon der obere die Aufgabe zur Warmwasserbeheizung und der untere die Bereitstellung von warmen Heizwasser innehatte, war die Regelung des Systems rel. kompliziert. Zusätzlich musste eine Regelung der Lüftungsklappen für die Ansaugung aus dem Pufferspeicherraum bzw. direkt von außen verwirklicht werden, außerdem die Regelung der Bypassklappen eingestellt werden und die Jalousiesteuerung realisiert werden. Das ganze System erwies sich trotz großem Bemühen aller Beteiligten als sehr kompliziert und fehleranfällig und führt zu Bedienungsfehlern. Die Kombination verschiedener Regelungen und Ansteuerungen von KNX mit UVR erhöhte die Fehleranfälligkeit weiter. Die mit dieser komplexen Regelung erwünschte optimierte Energieeinsparung ließ sich dadurch häufig nicht realisieren. Aufgrund dieser Erfahrungen wird empfohlen, das Energieversorgungssystem für ein solches Energieplushaus tendenziell einfach und robust aufzubauen und auf die letzte, sehr fehleranfällige Optimierung zu verzichten.
13. Erst nach detaillierten Prüfungen konnte eine angemessene Gebäude-Dichtigkeit erreicht werden. Vor allem bei einigen Elektroinstallationen (Schalterdosens) und bei Rohrdurchführungen in der Klimahülle konnten im Blower-Door-Test Leckagen festgestellt werden.
14. Der Batteriewirkungsgrad ist geringer als erwartet. Aufgrund der hohen Investitionskosten ist ein wirtschaftlicher Betrieb des Batteriespeichers allerdings ohnehin nicht zu erwarten.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Umsetzung der Ziele eines Effizienzhaus Plus in hohem Maße von einer engmaschigen Beobachtung des technischen Verhaltens und der Systemparameter abhängt. Dies setzt daher eine gewisse Technik-Begeisterung der Bewohner voraus. Im unbewohnten Zustand treten bestimmte Fehlfunktionen erst sehr verzögert zutage, so dass die Gebäudeenergieeffizienz z.T. erheblich darunter leidet.

Die starke Abkühlung des Pufferspeichers sowie die hohen sommerlichen Raumtemperaturen infolge der defekten Verschattung wären im realen Gebäudebetrieb wesentlich schneller erkannt und behoben worden.

8.3 Abschätzung der Wirtschaftlichkeit

Vergleicht man ein Gebäude mit herkömmlichem Versorgungssystem (Gas-Brennwerttechnik) und energetischem Standard nach EnEV 2009 (Referenzgebäude) mit dem Effizienzhaus plus in Deggendorf – Natternberg mit alternativem Energieversorgungskonzept (Solarthermie mit großem Wasserspeicher, Photovoltaik) und entsprechend erhöhtem energetischen Standard, so sind hierfür Mehrinvestitionen im Bereich der Baukosten von ca. 77.160 Euro aufzuwenden (Tabelle 23).

Bei den Verbrauchswerten ergeben sich dagegen Einsparungen bzw. Mehreinnahmen von jährlich 3.030 Euro. Stellt man Mehrinvestition und Einsparungen bzw. Mehreinnahmen gegenüber, ergibt sich eine Amortisationszeit von ca. 25 Jahren (statische Betrachtung ohne Abschätzung der Entwicklung der Energiepreise und ohne Zinsberücksichtigung) (Tabelle 27).

Referenzgebäude EnEV 2009	JPEV zul. [kWh/m²]	Fläche [m²]	JPEV zul. [kWh]	PEF	Endenergie- verbrauch [kWh]	Gas / Strom- preis [€/kWh]	Energie- kosten [€/a]	Energie- kosten [€/Mo- nat]
Berechnung Energieausweis	96,4			Gas		Destatis		
				Str- om				
Kosten Wärme / Gas Brennwert	90,6	205,8	18645,48	1,1	16950,44	0,0661	1120,42	93,37
Kosten Strom / Hilfsenergie	5,8	205,8	1193,64	3,0	397,88	0,2919	116,14	9,68
Kosten Strom / Haushalt 3 Pers.					3700,00	0,2919	1080,03	90,00
Energiekosten gesamt							2316,59	193,05
Haus plus	2014	2015	2016		gesamt	Im Mittel	Im Mittel	Ein- nahmen
reale Verbrauchswerte in Monaten	7	12	12		31	Monat	Jahr	Monat
Erlöse Strom für Emobilität in €	23,85	0,75	12,19		36,79	1,19	14,24	
Erlöse Strom für Fotovoltaik in €	1027,15	880,04	1558,19		3465,38	111,79	1341,44	
Stromerlöse gesamt in €	1051,00	880,79	1570,38		3502,17	112,97	1355,68	
Stromkosten incl. Hilfsenergie in €	584,55	703,98	370,63		1659,16	53,52	642,26	
Einnahmen aus Einspeisever- gütung in €	466,45	176,81	1199,75		1843,01	59,45	713,42	Zus. 59,45
Einsparung Haus plus pro Monat in €								252,50
					Mehrkosten Haus plus [€]	Einspar- ung pro Monat [€]	Monate	Jahre
Amortisation					77160,00	252,20	305	<u>25,4</u>

Tabelle 27: Wirtschaftlichkeit

9 Literatur

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2011): Wege zum Effizienzhaus-Plus. Referat Bürgerservice und Besucherdienst. Berlin.

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (Hg.) (2012): Richtlinie des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung über die Vergabe von Zuwendungen für Modellprojekte im Effizienzhaus-Plus-Standard im Jahre 2012. Anlage 1: Definition und Berechnungsmethode Anlage 2: Leitfaden für das Monitoring. B 13 – 8142.1/1-12. Berlin.

Ein Haus, das mehr gibt, als es nimmt. Gartenschau Deggendorf: Energieeffizienzhaus Plus in Natternberg (2014). In: *Beton*, 2/2014, S. 4.

Erhorn, Hans; Hegner, Hans-Dieter (2014): Technikkonzepte und -erfahrungen im Netzwerk "Effizienzhaus Plus". In: Jürgen Pöschk (Hg.): Energieeffizienz in Gebäuden - Jahrbuch 2014. Unter Mitarbeit von Barbara Hendricks, Franz-Georg Rips, Axel Gedaschko, Alexander Rychter, Christian Noll, Jürgen Blazejczak et al. neue Ausg. Berlin: v m e Verlag und Medienservice Energie, S. 93–101.

Korthauer, R.: Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Berlin, Heidelberg 2013

Rechenauer, Christian; Neuleitner, Nikolaus; Steffens, Oliver (2015): Empirische Untersuchung und Optimierung der Performance eines Modellprojekts für ein Effizienzhaus Plus mit solarthermischem Energiekonzept. Fachforum Effizienzhaus Plus. OTTI. Hamburg, 14.07.2015.

Sailer GmbH, „Leistungstabelle FRIWASTA P,“ [Online]. Available: <http://www.sailergmbh.de/fileadmin/daten/bilder/downloadbereich/auslegungsratgeber/leistungstabelle.pdf> [Zugriff am 26 Februar 2015]

10 Anhang A

Monat	Bezug		Photovoltaik		Hausverbrauch					Summe Hausverbrauch	
	Netz-bezug	PV-Ertrag	PV-Einspeisung	PV-Eigen-verbrauch	Heizung + TWW + Lüftung + Kühlung	Zirkulationspumpe	Haus-automation	Be-leuchtung	Haushalts-geräte	sonstiges	
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
Nov 14	212,9	343,0	145,2	54,5	187,6	49,1	8,3	41,6	56,3	0	342,8
Dez 14	1503,1	102,5	5,8	41,4	1381,1	44,7	10,6	48,5	54,8	0	1539,7
Jan 15	1205,5	189,1	26,2	90,9	1163,5	38,2	15,9	39,2	55,3	0	1312,1
Feb 15	321,5	480,3	234,7	97,9	369,7	29,5	20,6	33,1	51,6	0	504,5
Mär 15	28,5	863,8	670,5	50,2	13,0	22,1	23,8	32,5	64,7	0	156,0
Apr 15	24,4	1138,7	943,3	84,1	12,7	17,4	21,5	21,8	96,3	0	169,7
Mai 15	23,6	991,0	798,1	81,0	14,5	13,3	18,8	14,7	105,0	0	166,2
Jun 15	20,2	1159,4	857,0	107,5	57,4	33,1	18,6	9,6	162,4	0	259,7
Jul 15	22,7	1306,9	1058,3	129,1	59,7	11,8	18,3	10,6	116,6	0	217,1
Aug 15	26,7	1257,2	970,5	139,6	83,6	11,8	22,6	24,2	115,9	0	258,2
Sep 15	27,4	858,0	533,4	125,9	104,7	13,6	28,5	25,3	117,9	0	290,0
Okt 15	201,2	509,5	225,6	116,5	188,1	33,1	51,3	32,3	124,2	0	429,0
Nov 15	329,0	358,1	147,4	78,2	277,0	24,6	20,4	37,8	129,6	0	489,4
Dez 15	1169,1	242,0	51,3	93,4	1075,2	31,5	19,5	39,4	134,7	0	1300,3
Jan 16	1451,2	264,1	41,0	135,6	1392,7	36,7	19,6	38,1	128,4	0	1615,6
Feb 16	804,2	376,8	82,1	147,1	825,8	31,5	20,2	33,5	125,3	0	1036,3
Mär 16	342,9	758,5	390,1	158,8	409,5	31,0	27,0	32,8	136,4	0	636,8
Apr 16	24,8	976,8	654,0	140,4	90,1	21,7	25,3	22,0	132,5	0	291,6
Mai 16	26,0	1124,0	794,6	143,0	93,5	14,8	23,4	11,9	149,8	0	293,3
Jun 16	22,2	1064,2	756,6	141,2	92,0	10,9	22,0	9,0	140,5	0	274,4
Jul 16	22,6	1178,8	881,5	132,0	70,8	11,0	22,1	10,4	161,4	0	275,6
Aug 16	24,9	1153,9	905,1	99,7	23,8	11,0	22,0	15,9	148,1	0	220,8
Sep 16	29,4	1030,7	782,5	91,2	22,6	11,4	19,0	25,5	150,4	0	228,9
Okt 16	55,3	452,7	181,9	71,7	23,1	20,5	19,7	36,5	164,7	0	264,5
Summe	7919,3	18179,8	6468,7	2550,9	8031,9	552,5	519,1	645,9	2823,0	0	12572,4

Tabelle 28: Zusammenstellung des Stromverbrauchs für Bezug und Hausverbrauch von November 2014 bis Oktober 2016

Monat	Heizung + TWW + Lüftung +Kühlung	Elektromobilität	Projektspezifisch
	[kWh]	[kWh]	[kWh]
Nov 14	187,6	0	22,5
Dez 14	1381,1	0	24,8
Jan 15	1163,5	0	25,2
Feb 15	369,7	0	23,0
Mär 15	13,0	0	24,0
Apr 15	12,7	0	23,4
Mai 15	14,5	0	23,6
Jun 15	57,4	0	22,8
Jul 15	59,7	0	23,6
Aug 15	83,6	0	23,5
Sep 15	104,7	0	22,8
Okt 15	188,1	0	23,2
Nov 15	277,0	0	23,5
Dez 15	1075,2	0	24,5
Jan 16	1392,7	0	25,5
Feb 16	825,8	0	23,2
Mär 16	409,5	0	24,4
Apr 16	90,1	0	23,1
Mai 16	93,5	0	23,5
Jun 16	92,0	0	22,7
Jul 16	70,8	0	23,6
Aug 16	23,8	0	23,2
Sep 16	22,6	0	23,0
Okt 16	23,1	0	23,9
Summe	8031,9	0	566,6

Tabelle 29: Zusammenstellung des Stromverbrauchs für Heizung und Trinkwarmwasser, Elektromobilität und projektspezifisch von November 2014 bis Oktober 2016

11 Anhang B

Monat	Wohnen/Essen	Badezimmer	Schlafzimmer	Kind 1
	°C	°C	°C	°C
Nov 14	20,7	20,9	20,7	20,5
Dez 14	20,2	20,0	19,8	19,8
Jan 15	20,2	19,6	19,9	19,8
Feb 15	20,6	19,8	20,6	20,2
Mär 15	21,9	21,5	22,5	21,8
Apr 15	23,8	23,8	24,7	24,5
Mai 15	25,7	26,3	26,9	27,0
Jun 15	28,5	29,3	30,0	30,2
Jul 15	30,3	31,5	32,0	32,2
Aug 15	29,2	30,2	30,5	30,4
Sep 15	26,0	26,4	26,9	26,4
Okt 15	22,0	21,8	22,3	21,7
Nov 15	20,6	20,1	20,8	20,0
Dez 15	20,4	19,9	20,6	20,0
Jan 16	20,4	19,9	20,7	19,9
Feb 16	20,5	20,1	20,8	20,0
Mär 16	20,6	20,2	20,9	20,1
Apr 16	20,7	20,6	21,1	20,5
Mai 16	21,8	21,9	22,1	22,2
Jun 16	23,8	24,3	24,3	24,5
Jul 16	26,4	26,9	27,0	27,3
Aug 16	27,0	27,4	27,6	27,8
Sep 16	26,1	26,5	26,5	26,5
Okt 16	21,2	21	21,3	21,0
Mittelwert Heizperiode*	23,3	23,3	23,8	23,5

Tabelle 30: Zusammenstellung der Monatsmittelwerte der Raumlufttemperaturen

*Heizperiode November 2014 bis Oktober 2016

Monat	Wohnen/Essen	Badezimmer	Schlafzimmer	Kind 1
	%	%	%	%
Nov 14	46,0	52,4	47,2	47,6
Dez 14	40,3	42,7	41,8	42,0
Jan 15	37,3	40,8	38,4	39,1
Feb 15	33,9	37,5	34,4	35,7
März 15	37,3	40,7	36,9	39,0
Apr 15	38,9	42,4	38,9	40,1
Mai 15	43,3	45,3	42,4	42,8
Juni 15	43,7	44,2	41,4	41,5
Juli 15	45,3	46,5	43,8	44,5
Aug 15	44,8	45,4	43,0	43,9
Sep 15	40,4	42,5	39,3	40,5
Okt 15	41,8	44,0	40,8	42,3
Nov 15	41,2	43,6	39,9	42,2
Dez 15	38,8	41,1	37,9	39,0
Jan 16	32,3	34,0	31,3	33,1
Feb 16	35,7	37,4	34,4	36,7
Mär 16	34,6	35,8	32,9	35,5
Apr 16	41,7	42,4	39,3	42,0
Mai 16	48,0	48,0	45,9	46,9
Jun 16	58,4	57,3	55,7	55,6
Jul 16	56,1	54,2	52,5	52,3
Aug 16	55,4	53,5	51,6	52,0
Sep 16	53,3	51,5	50,1	50,9
Okt 16	50,0	49,9	48,0	49,5

Tabelle 31: Zusammenstellung der Monatsmittelwerte der Relativen Luftfeuchten

12 Anhang C

DETAILLIERTE MESSSTELLENÜBERSICHT

S	Stromzähler
W	Wärmemengenzähler
WS	Wetterstation
P	Pyranometer
TF	Temperatur & Feuchtefühler Wohnraum
C	CO ₂ -Sensor
RLT	Temperatur & Feuchtefühler RLT
T	Temperaturfühler Pufferspeicher

Tabelle 32

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über alle Sensoren, deren Lage sowie zusätzlich den Abkürzungen der Messstellen:

Sensor	Kürzel	Standort
Außenklima		
Außenluft-Feuchte	WS3	Dach
Außenluft-Temperatur	WS3	Dach
Pyranometer horizontal	P1	Dach
Pyranometer vertikal	P2	Dach
Wind	WS5	Dach
Raumklima		
Temperatur Badezimmer	TF2	Badezimmer
Temperatur Esszimmer	TF1	Essen
Temperatur Kinderzimmer	TF4	Kinderzimmer
Temperatur Schlafzimmer	TF3	Schlafzimmer
Luftfeuchtigkeit Badezimmer	TF2	Badezimmer
Luftfeuchtigkeit Esszimmer	TF1	Essen
Luftfeuchtigkeit Kinderzimmer	TF4	Kinderzimmer
Luftfeuchtigkeit Schlafzimmer	TF3	Schlafzimmer
CO ₂ -Gehalt Luftraum EG	C1	Luftraum EG
CO ₂ -Gehalt Schlafzimmer	C2	Schlafzimmer
Temperatur Abluft	RLT1	Technikraum
Temperatur Zuluft	RLT4	Technikraum
Temperatur Außenluft	RLT3	Technikraum
Temperatur Fortluft	RLT2	Technikraum
Feuchte Abluft	RLT1	Technikraum
Feuchte Zuluft	RLT4	Technikraum

Sensor	Kürzel	Standort
Feuchte Außenluft	RLT3	Technikraum
Feuchte Fortluft	RLT2	Technikraum
Verbrauchserfassung		
Energiezufuhr		
PV erzeugt (nach WR)	S23	Speicherraum
Netzbezug	S5	Schaltschrank
Solarthermie Fassade	W1	Speicherraum
Solarthermie Dach	W2	Speicherraum
Solarthermie Garage	W3	Speicherraum
Energiespeicherung		
Netz-Einspeisung	S4	Schaltschrank
Batterie-Aufladung	S6	Speicherraum
Batterie-Entladung	S22	Speicherraum
Temperatur Pufferspeicher Position 1	T1	Pufferspeicher
Temperatur Pufferspeicher Position 2	T2	Pufferspeicher
Temperatur Pufferspeicher Position 3	T3	Pufferspeicher
Temperatur Pufferspeicher Position 4	T4	Pufferspeicher
Temperatur Pufferspeicher Position 5 (defekt)	T5	Pufferspeicher
Temperatur Pufferspeicher Position 6	T6	Pufferspeicher
Temperatur Pufferspeicher Position 7	T7	Pufferspeicher
Temperatur Pufferspeicher Position 8	T8	Pufferspeicher
Temperatur Pufferspeicher Position 9	T9	Pufferspeicher
Temperatur Pufferspeicher Position 10	T10	Pufferspeicher
Energieverbrauch		
Beleuchtung Bereich A	S16a	Schaltschrank
Beleuchtung Bereich B	S16b	Schaltschrank
Beleuchtung Bereich C	S16c	Schaltschrank
Beleuchtung Bereich D	S16d	Schaltschrank
Beleuchtung Bereich E	S16e	Schaltschrank
Herd + Backofen	S8+S11.1	Schaltschrank
Spülmaschine	S9	Schaltschrank
Kühlschrank	S10	Schaltschrank
Waschmaschine	S11	Schaltschrank
Trockner	S12	Schaltschrank
Steckdosen Kind 1+2, Schlafen, Bad, Küche, Arbeitszimmer (EG)	S17	Schaltschrank
Rauchmelder, Wohnen, Essen, Küchenzeile	S20	Schaltschrank
Heizung gesamt	W4	Speicherraum
Heiztechnik (Zirkulationspumpe etc.)	S3	Speicherraum

Sensor	Kürzel	Standort
FB EG zusätzlich	W5	Speicherraum
Frischwasserstation (gesamt)	W6	Speicherraum
Nachheizung (Heizstab 1)	S18	Schaltschrank
Nachheizung (Heizstab 2)	S19	Schaltschrank
Ladestation E-Mobil	S21	Schaltschrank
Pumpe Dach	S2a	Speicherraum
Pumpe Garage	S2c	Speicherraum
Pumpe Wand	S2b	Speicherraum
RLT	S15	Speicherraum
Volumenstromzähler KW-Zuleitung	V7	Speicherraum
zw. KW-Zuleitung und WW (gezapfte Wärmemenge)	W7	Speicherraum
Monitoring		
Messtechnik	S13	Schaltschrank

Tabelle 33