

Endbericht der Modellvorhaben Effizienzhaus Plus Nr. 39

Wissenschaftliche Begleitung des Effizienzhaus Plus „Alpenchic“
der Firma Baufritz GmbH & Co. KG. in Poing

Forschungsprogramm

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

Messperiode

August 2015 bis Juli 2017

Aktenzeichen

SWD - 10.08.82-14.1

gefördert durch

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

bearbeitet von

Hans Erhorn
Antje Bergmann
Michael Beckert
Johann Reiß
Fraunhofer-Institut für Bauphysik
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

IBP-Bericht WB 204/2018

Effizienzhaus Plus der Firma Baufritz – Wissenschaftliche Begleitung bei der Konzeption sowie messtechnische und energetische Validierung des Musterhauses in Poing

Durchgeführt im Auftrag von Baufritz im Rahmen des BMUB-Förderprogramms »Effizienzhaus Plus«

Hans Erhorn
Antje Bergmann
Michael Beckert
Johann Reiß

Auszugsweise Veröffentlichung nur mit
schriftlicher Genehmigung des Fraun-
hofer-Instituts für Bauphysik gestattet.

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

Prof. Dr. Philip Leistner

Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

IBP-Bericht WB 204/2018

Effizienzhaus Plus der Firma Baufritz – Wissenschaftliche Begleitung bei der Konzeption sowie messtechnische und energetische Validierung des Musterhauses in Poing

Durchgeführt im Auftrag von Baufritz im Rahmen
des BMUB-Förderprogramms »Effizienzhaus Plus«

Der Bericht umfasst

55 Seiten Text

17 Tabellen

57 Abbildungen

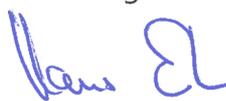
1 Anhang

Hans Erhorn
Antje Bergmann
Michael Beckert
Johann Reiß

Stuttgart, den 1. Juni 2018

Institutsleiter

Univ.- Prof. Dr.-Ing.
Philip Leistner

Abteilungsleiter

Dipl.-Ing. Hans Erhorn

Bearbeiterin

Dipl.-Ing. Antje Bergmann

Inhalt

1	Kurzfassung	3
2	Kontext und Zielsetzung	4
3	Gebäudesteckbrief	4
3.1	Allgemeine Daten	5
3.2	Architektur	5
3.3	Wärmeschutz	8
3.4	Anlagentechnik	9
3.5	Energiebedarf und Energiedeckung	10
3.6	Bewertung der Effizienz	12
4	Messkonzept	14
5	Meteorologische Randbedingungen	16
5.1	Solarstrahlung	16
5.2	Außenlufttemperaturen	17
5.3	Klimabereinigung	19
6	Messergebnisse	20
6.1	Stromerzeugung	20
6.2	Endenergieverbrauch	24
6.2.1	Endenergieverbrauch des Brennstoffzellenheizgerätes	27
6.2.2	Stromverbrauch Hilfsenergie und Sonstiges	28
6.2.3	Stromverbrauch Haushaltsgeräte, Haushaltsprozesse und Beleuchtung	31
6.2.4	Vergleich Energieertrag und Energieverbrauch	34
6.3	Eigenstromnutzung	37
6.4	Brennstoffzellenheizgerät	38
6.5	Lüftungsanlage	39
6.6	Batterie	41
6.7	Innenraumtemperaturen und Behaglichkeit	44
7	Kosten und Wirtschaftlichkeit	51
8	Bewertung	53
8.1	Energieeffizienz des Modellgebäudes	53
8.2	Verbesserungspotentiale	54
9	Literatur	55

1 Kurzfassung

Die Firma Baufritz hat im Bauzentrum Poing das Musterhaus »Alpenchic« im Rahmen der BMUB-Förderinitiative »Effizienzhaus Plus« errichtet. Mit diesem hocheffizienten Gebäude sollen die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Konzeptkomponenten erprobt und Erfahrungen für die Breitenanwendung gesammelt werden. Im Rahmen eines Monitoringprogramms wurde das Gebäude zwei Jahre lang messtechnisch erfasst und energetisch bewertet.

Mit dem Anschluss der Photovoltaikanlage an das öffentliche Stromnetz konnten ab August 2015 erste Energiebilanzen für das Gebäude bestimmt werden. Nach der zweijährigen Messperiode zeigte sich, dass aufgrund des fehlenden Stromertrags des Windgenerators und des gegenüber der Planung geringeren Stromertrags aus dem Brennstoffzellenheizgerät der Effizienzhaus-Plus-Standard im praktischen Betrieb nicht erreicht werden konnte. Der Ertrag der stromerzeugenden Anlagen fiel in der ersten Messperiode um 22 % geringer aus als geplant und führte so zu einer Unterdeckung von -5.816 kWh/a. In der zweiten Messperiode betrug die Unterdeckung -5.688 kWh/a bei einer 15 % geringeren Eigenstromgenerierung als vorherberechnet. Zwar verbraucht das Gebäude geringfügig weniger Endenergie als vorherberechnet, weist jedoch in Teilbereichen wie etwa der Beleuchtung und technischen Kommunikationsmitteln einen extrem hohen Verbrauch auf. Dafür lag der Energieverbrauch für das Heizen und die Warmwasserbereitung einschließlich Hilfsenergie und Gebäudeautomation aufgrund der milden Witterung in den Messperioden und der Nutzung des Gebäudes als Musterhaus mit geringem Trinkwarmwasserbedarf im Mittel um ca. 16 % unter den vorherberechneten Werten. Für den Betrieb der Haushaltsgeräte, Haushaltsprozesse und der Beleuchtung wurden im Musterhaus ca. 66 % mehr Energie verbraucht als für den Effizienzhaus-Plus-Standard rechnerisch angesetzt wird. Diese große Abweichung tritt vorrangig für die Messstelle Beleuchtung und Steckdosen auf. Der Mehrbedarf ist dem Musterhausbetrieb geschuldet und sollte im Bereich der Beleuchtung durch Präsenzmelder optimiert werden.

Der Eigennutzungsanteil des selbstgenerierten Stroms beträgt im Mittel 26 %. Dieser geringe Anteil ergibt sich aus der Notwendigkeit, den Gasverbrauch des Brennstoffzellenheizgerätes zu substituieren. Der Deckungsanteil des eigen generierten Stroms am Gesamtstromverbrauch ist mit im Mittel 64 % positiv einzustufen. Eine Optimierung der Regelstrategien des installierten Stromspeichers könnte ggf. den Deckungsanteil noch weiter erhöhen.

Das Brennstoffzellenheizgerät erzeugte während der gesamten 24-monatigen Messphase Wärme, jedoch für nur ca. 18 Monate Strom. Die zur Verfügung gestellten Messdaten für den Gasbezug, die Wärme- und Stromerzeugung beziehen sich auf das Gesamtgerät und lassen keine ausführliche Analyse der Einzelkomponenten Brennstoffzelle und Gasbrennwertgerät zu. Hierfür wäre eine detailliertere Datenübermittlung seitens des Herstellers erforderlich gewesen.

Die Lüftungsanlage war ganzjährig in Betrieb. Aus den gemessenen Temperaturen der Luftströme während der Heizperiode wurde eine Rückwärmzahl von ca. 90 % ermittelt. Auf Basis der Auswertung der Temperaturfühler der einzelnen Räume zeigt sich während der Sommermonate ein Aufheizen des Gebäudes. Vorrangig im Oberschoss lag die Raumlufttemperatur langanhaltend über 26 °C. Eine ausgeprägte nächtliche Abkühlung konnte trotz Nutzung eines Bypasses nicht erreicht werden.

Die Ergebnisse der Monitoringperiode zeigen, dass bei hocheffizienten Gebäuden eine Monitoring- und Einregulierungsphase zwingend eingeplant werden muss, um die planerisch ermittelten Kennwerte und eingebaute Messensorik auch im praktischen Betrieb prüfen und auf Störungen der Anlagentechnik reagieren zu können. Dabei ist eine enge, konstruktive Kooperation zwischen Bauherr, Haustechniker bzw. Hersteller der haustechnischen Komponenten und Monitoreur unumgänglich.

2 Kontext und Zielsetzung

Das Unternehmen Baufritz möchte proaktiv auf die Herausforderungen des zukunftsorientierten energiesparenden Bauens reagieren und im Vorgriff auf die künftigen Anforderungen (bedingt durch die Europäische Gebäuderichtlinie (EPBD)) möglichst rasch Niedrigstenergiegebäude bis hin zu Effizienzhäusern Plus am Markt anbieten.

Die Konzeption und Planung von hocheffizienten Gebäuden erfordert ein umfangreiches Wissen über das Zusammenwirken von Architektur, Bau-, Heiz- und Lüftungstechnik und erneuerbaren Energiesystemen. Beim vorliegenden Vorhaben sollte für ein Ausstellungsgelände von Fertigbaufirmen in Poing ein Gebäudekonzept entwickelt werden, das als Musterhaus in Pilotanwendung in energetisch hocheffizienter Bauweise errichtet wurde. Die Anforderungen an das Gebäude entsprechen den Vorgaben aus der Definition des Bundesbauministeriums (BMUB) für Effizienzhäuser Plus. Als besonderes Element eines Effizienzhauses Plus wurden in diesem Gebäude Erfahrungen mit dem Einsatz eines Brennstoffzellenheizgeräts als Wärme- und Stromerzeuger in einem Einfamilienhaus gesammelt. Damit möchte die Firma Baufritz auch eine neue Innovation im Bereich der Wärme- und Stromerzeugung im praktischen Betrieb testen.

3 Gebäudesteckbrief

Im Rahmen des Begleitforschungsvorhabens zum Fördervorhaben »Effizienzhaus Plus« des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit BMUB (ehemals BMVBS) wurde der folgende Gebäudesteckbrief [1] entwickelt.

3.1 Allgemeine Daten

Die allgemeinen Kenndaten des Gebäudes sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1:
Allgemeine Daten.

Baujahr	2013
Bruttogrundfläche	260 m ²
Beheizte Nettogrundfläche	248 m ²
Beheiztes Gebäudevolumen	845 m ³
Hüllflächenfaktor A / V	0,68 m ⁻¹
Gebäudenutzfläche A _N (nach EnEV)	270 m ²

3.2 Architektur

Das Einfamilienhaus (Bild 1) ist eigens für das Ausstellungsgelände der Eigenheim-Ausstellung im bayerischen Poing entwickelt worden. Es wurde als Musterhaus in hocheffizienter Bauweise errichtet. Der rechteckige Baukörper, weite Fassadenschützende Dachüberstände und die Holzschindelfassade schaffen einen sichtbaren Bezug zur alpenländischen Bautradition.

Das Gebäude kombiniert traditionelle alpenländische Architekturdetails mit zeitgemäßem, modernem Design. Natürliche Materialien und gezielt eingesetztes Holzdesign bei der Innengestaltung tragen zum gemütlichen Flair bei, das sich mit der gebotenen Großzügigkeit zeitgemäßen Wohnens verbindet.

Das Einfamilienhaus wird durch ein vor der Fassade platziertes Eingangsmodul erschlossen (Bild 2). Vom Eingangsbereich aus gelangt man direkt zur Garderobe und dem anschließenden Arbeitszimmer. Danach öffnet sich der großzügig bemessene, lichtdurchflutete Koch-Ess-Wohnbereich. Eine klare Linie zeigt auch das Obergeschoss mit Wellnessbad und Sauna auf der einen, Elternschlaf- und zwei Kinderzimmern, die alle einen Balkonzugang besitzen, auf der anderen Seite. Die Galerielösung mit Arbeitsplatz verbindet beide Wohnebenen durch eine vertikale Sichtachse und schenkt dem Essplatz luftige Höhe.



Bild 1:
Süd-Ost-Ansicht Effizienzhaus Plus »Alpenchic«.



Bild 2:
Nord-Ansicht Effizienzhaus Plus »Alpenchic«.

Die Anordnung der Räume im Erdgeschoss und Obergeschoss zeigen Bild 3 und Bild 4.

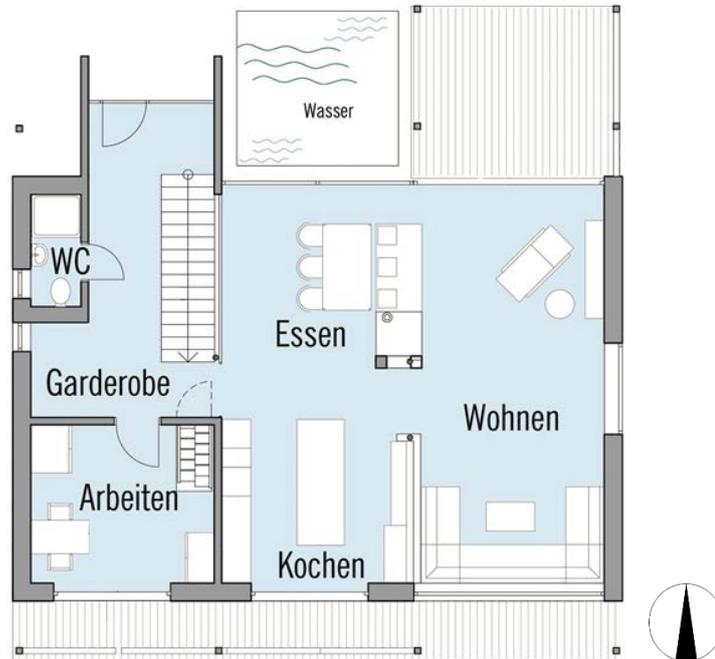


Bild 3:
Erdgeschossgrundriss Effizienzhaus Plus »Alpenchic«.

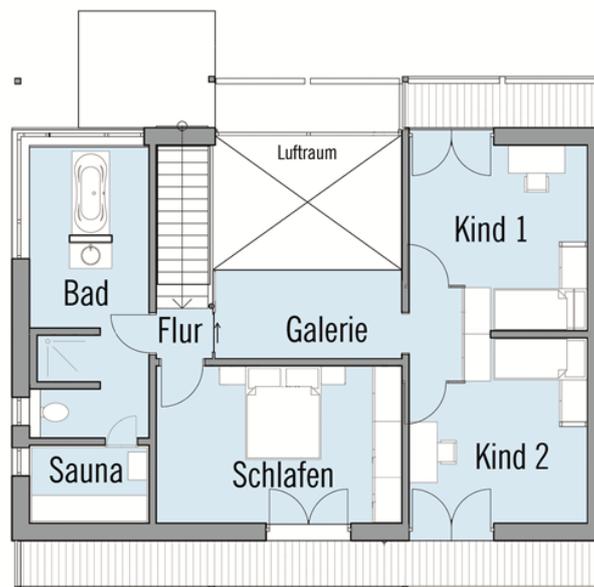


Bild 4:
Obergeschossgrundriss Effizienzhaus Plus »Alpenchic«.

3.3 Wärmeschutz

Die Transmissionswärmeverluste werden durch die geringen U-Werte der Gebäudehülle sowie eine wärmebrückenreduzierte Konstruktion minimiert. Die ca. 30 cm dicke Außenwand besteht aus einer speziellen 24 cm dicken Hobelspandämmung aus Fichte, die vom Unternehmen Baufritz entwickelt und patentiert wurde und als Gefachmaterial zwischen Konstruktionshölzern angeordnet wird. Raumseitig wurden zwei Gipskartonplattenebenen mit dazwischenliegender Luftschicht eingebaut. Der U-Wert der Wand beträgt 0,2 W/m²K. Das Satteldach besitzt eine Gesamtdicke von ca. 32 cm und enthält eine 24 cm dicke Holzfaserdämmschicht zwischen Konstruktionshölzern und raumseitiger Gipskartonbeplankung. Der U-Wert des Daches beträgt 0,18 W/m²K. Die Holzfenster sind mit einer 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung mit U_w-Werten zwischen 0,8 und 1,1 W/m²K ausgeführt.

Mit Sorgfalt wurden sämtliche Baustoffe und Materialien wie Kleber, Fugenmassen, Lasuren, Innenwandfarben usw. schadstoffgeprüft, so dass das Gebäude die strengen Vorgaben aller relevanten Bio- und Gesundheitssiegel erfüllt. Der Aufbau der Bauteile ist in Tabelle 2 gezeigt.

Tabelle 2:
Aufbau der Bauteile der Gebäudehülle und ihre U-Werte.

Bauteil	Aufbau / Material	Dicke [mm]	U-Wert [W/m ² K]
Außenwand (von innen nach außen)	Gipskartonplatte	18	0,20
	Ruhende Luftschicht	30	
	Gipskartonplatte	12,5	
	Hobelspandämmung WLG 050 zwischen Konstruktionsholz	240	
	Holzfaserplatte	16	
Fenster	Holzfenster mit Wärmeschutzverglasung (g-Wert = 0,50)		0,83 – 1,1
Dach (von oben nach unten)	Holzfaserplatte	16	0,18
	Holzfaserdämmung WLG 040 zwischen Sparren	240	
	Gipskartonplatte	12,5	
	Konstruktionsholz	30	
	Gipskartonplatte	18	
Bodenplatte (von oben nach unten)	Zement-Estrich	60	0,17
	Polystyrolhartschaum WLG 040	60	
	Abdichtung	-	
	Beton	240	
	Polystyrol-PS-Extruderschaum WLG 040	160	

3.4 Anlagentechnik

Im Mittelpunkt steht die Erzeugung von Eigenstrom aus den Energiequellen Photovoltaik, Brennstoffzellenheizgerät und Windrad, wovon möglichst viel hausintern genutzt werden soll. Überschüsse können für die Nutzung eines E-Bikes verwendet, ins öffentliche Netz oder in einen elektrischen Speicher gespeist werden.

Den größten Beitrag zur Stromerzeugung soll die Photovoltaikanlage leisten. Bei der 80 m² großen Indachlösung fungieren die schwarz hinterlegten Laminate als Dachziegel und bilden die wasserführende Ebene. Mit einer Leistung von 12,6 kW_p wird eine jährliche Stromproduktion von ca. 11.500 kWh/a angestrebt. Als weiterer Stromproduzent mit 2.500 kWh/a ist ein Windrad geplant, das auch bei Bewölkung und nachts Energie generiert, wenn die Photovoltaikanlage keinen Beitrag leisten kann. Zur Zwischenlagerung von Energieüberschüssen steht ein Lithium-Ionen-Speicher mit einer Kapazität von 3,7 kWh bereit.

Für die Bereitstellung von Heizwärme und Trinkwarmwasser sorgt, wie Bild 5 zeigt, ein Brennstoffzellenheizgerät, das mit Erdgas gespeist wird. Daraus wird der Wasserstoff generiert, der zum Betrieb der Brennstoffzelle nötig ist. Das Brennstoffzellenheizgerät ist ein Kompaktgerät und besteht aus der Brennstoffzelle, einem Gas-Brennwertgerät zur Spitzenlastabdeckung, einem Pufferspeicher mit 170 l und einem Trinkwarmwasserspeicher mit einem Fassungsvermögen von 46 l. Es liefert außer Wärme für Heizung und Warmwasser auch Strom. Das Gerät ist mit einem Smartmeter ausgestattet und soll so die Startzeiten optimieren, indem es selbstregulierend dem Nutzerverhalten folgt.

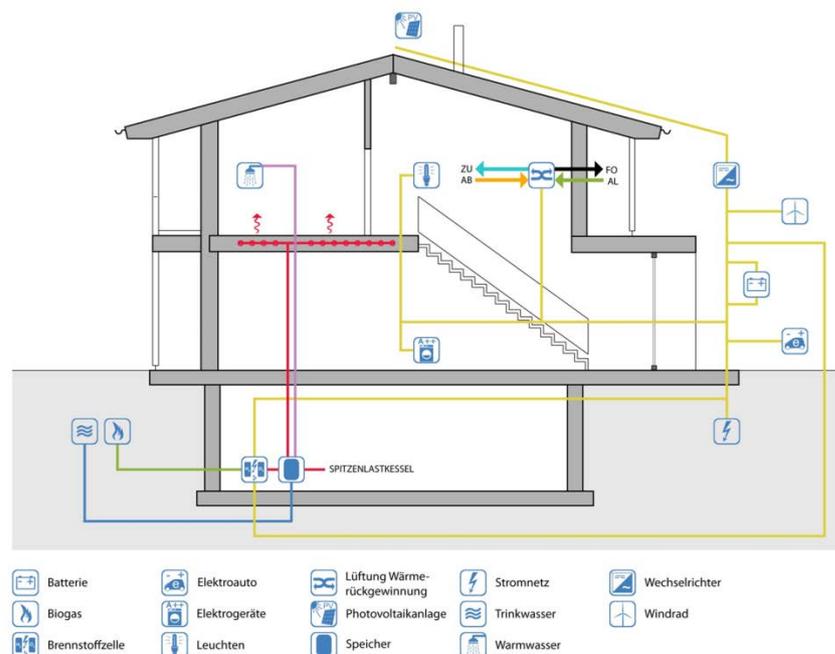


Bild 5:
Haustechnikkonzept Effizienzhaus Plus »Alpenchic«.

Die Wärme wird über bauteilintegrierte Flächenheizungen an die Räume abgegeben. Das Gebäudeautomationssystem »MyHomeControl« soll im Haus für Energieeffizienz, Sicherheit und Komfort sorgen. Die Kenndaten der eingesetzten Technologien zeigt Tabelle 3.

Tabelle 3:
Kenndaten der eingesetzten Technologien.

Brennstoffzellenheizgerät	
Name	Vitovvalor 300-P
Hersteller	Viessmann
Leistung thermisch	1,00 kW (Brennstoffzelleneinheit) 19,0 kW (Spitzenlastkessel)
Leistung elektrisch	0,75 kW
Trinkwasserspeicher	46 l
Pufferspeicher	170 l
Lüftungsanlage	
Name	Xpelair ZL 300
Hersteller	Dimplex
Luftvolumenstrom Stufe 1 – 3	90 / 160 / 250 m ³ /h
Leistungsaufnahme Stufe 1 – 3	19 / 36 / 95 W
Wärmerückgewinnungsgrad	95 %
Bypass	vorhanden
Batteriespeicher	
Name	Varta Engion Family
Hersteller	Varta Storage GmbH
Batterietyp	Lithium-Eisenphosphat
Nominale Batteriekapazität	3,7 kWh (8 Module mit 0,46 kWh)
Nutzbare Kapazität	3,3 kWh

3.5 Energiebedarf und Energiedeckung

Zum Zeitpunkt der Antragstellung konnte der gewählte Energieerzeuger (Brennstoffzellenheizgerät) noch nicht im Berechnungsverfahren nach DIN V 18599 abgebildet werden. Es wurde daher als Wärmeerzeuger ersatzweise ein Gas-Brennwertkessel angesetzt. Gemäß der Vorherberechnung mit dem erweiterten EnEV-Nachweis (EnEV 2009) [2] nach dem Rechenverfahren nach DIN V 18599 [3] weist das Gebäude, wie in Tabelle 4 zu sehen ist, einen jährlichen Endenergiebedarf von 17.731 kWh/a aus. Davon entfallen auf den Betrieb des ersatzweise angesetzten Gas-Brennwertkessels einschließlich Lüftungsanlage zur Beheizung, Warmwasserbereitung und Lüftung 15.231 kWh/a. Daneben besteht ein Endenergiebedarf für Haushaltsgeräte und -prozesse sowie für Beleuchtung von 2.500 kWh/a, mit den Anteilen

- Haushaltsgeräte und -prozesse: 1.625 kWh/a,
- Sonstiges: 500 kWh/a,
- Beleuchtung: 375 kWh/a.

Tabelle 4:
Vorherberechnung des Energiebedarfs des Effizienzhauses Plus »Alpenchic« Baufritz (Brennstoffzellenheizgerät näherungsweise als Gas-Brennwertkessel angesetzt).

»Alpenchic« Baufritz	Heizung	Lüftung	Warmwasser	Kühlung	Licht	Haushalt + Kochen	sonstiges
Nutzenergie $Q_{x,b}$ [kWh/a]	7.257	-	2.703	-	375	1.625	500
Wärme- / Kälteabgabe der Erzeugung $Q_{x,outg}$ [kWh/a]	k.A.	-	k.A.	-	-	-	-
Endenergie (Gas) $Q_{x,f}$ [kWh/a]	8.775	-	4.914	-			
Hilfsenergie (Strom) $Q_{x,f,aux}$ [kWh/a]	1.478		64				
Endenergiebedarf [kWh/a]	10.253		4.978		375	1.625	500
	Gesamt 17.731						

Nach der Vorherberechnung beträgt die selbst generierte Strommenge 17.967 kWh. Diese teilt sich auf in

- Photovoltaikanlage 11.500 kWh,
- Windturbine 2.510 kWh,
- Brennstoffzelle 3.957 kWh.

Der Überschuss zwischen Endenergiebedarf (17.731 kWh) und erzeugtem Strom (17.967 kWh) beträgt 236 kWh/a. Er wird in das öffentliche Netz eingespeist. Die endenergetische Bilanz des Gebäudes ist in Tabelle 5 gezeigt.

Tabelle 5:
Vorherberechnung des Endenergiebedarfs des Effizienzhauses Plus »Alpenchic« Baufritz (Brennstoffzellenheizgerät in der Berechnung als Gas-Brennwertkessel angesetzt).

Bedarf			Deckung		
Komponente	Energiebedarf		Komponente	Stromertrag	
	[kWh/a]	[kWh/m ² a]*		[kWh/a]	[kWh/m ² a]
Hilfsenergie für Heizung und Warmwasser	1.542	5,7	PV-Dach	11.500	144**
Elektrische Geräte Beleuchtung	2.500	9,3	Wind	2.510	9,3***
Warmwasser Heizung (Gas)	13.689	50,7	Brennstoffzellenheizgerät	3.957	14,66***
*) bezogen auf die Gebäudenutzfläche 270 m ²			**) bezogen auf die PV-Modulfläche Dach 80 m ²		
***) bezogen auf die Gebäudenutzfläche 270 m ²					
Gesamt	17.731 kWh/a		Gesamt	17.967 kWh/a	

Die primärenergetische Bilanz des Gebäudes ist in Tabelle 6 gezeigt.

Tabelle 6:
Vorherberechnung des Primärenergiebedarfs des Effizienzhauses Plus »Alpenchic« Baufritz
(Brennstoffzellenheizgerät in der Berechnung als Gas-Brennwertkessel angesetzt).

Energiebezug von außerhalb			Gutschrift durch Einspeisung		
Komponente	Primärenergiebedarf der notwendigen Energieträger		Komponente	Stromüberschuss	
	[kWh/a]****	[kWh/m²a]*		[kWh/a]***	[kWh/m²a]**
Elektrische Geräte Beleuchtung	-	-	PV-Dach Wind Brennstoffzellenheizgerät	38.993	144
Warmwasser Heizung (Strom)	-	-	**) bezogen auf die Gebäudenutzfläche 270 m² ***) von den erneuerbaren Energien werden 77,5 % in das öffentliche Netz eingespeist		
Warmwasser Heizung (Gas)	15.066	55,8			
*) bezogen auf die Gebäudenutzfläche 270 m² ****) von den erneuerbaren Energien werden 22,5 % im Haus selbst genutzt und mindern so den Bezug aus dem öffentlichen Netz					
Gesamt	15.066 kWh/a		Gesamt	38.993 kWh/a	

Erläuterung zu Tabelle 6:

Der »Energiebezug von außerhalb« wird durch Multiplikation des Endenergiebetrags für Heizung und Warmwasser mit dem Primärenergiefaktor für Gas $((8.775 + 4.914) \cdot 1,1 = 15.066)$ ermittelt. Die »Gutschrift durch Einspeisung« ergibt sich aus dem generierten Stromertrag vermindert um die im Gebäude verbrauchte Strommenge und dem Primärenergiefaktor für Verdrängungsstrommix $(17.967 - 1.542 - 2.500) \cdot 2,8 = 38.993$). Der Primärenergieüberschuss beträgt somit 23.927 kWh/a.

3.6 Bewertung der Effizienz

Um eine Aussage über die Effizienz des Gebäudes und der Anlagentechnik vornehmen zu können, können Aufwandszahlen Anwendung finden. Die Aufwandszahl beschreibt, wieviel Energie aufgewendet werden muss, um einen bestimmten Nutzen sicherzustellen. Hierzu können unterschiedliche Bezugsgrößen zur Anwendung kommen:

- Nutzenergie (Wärme-, Kälte- und Trinkwarmwasserbedarf in den Räumen)
- Erzeugerabgabe (Energieabgabe der Wärme- und Kälteerzeuger an das Verteilnetz)
- Endenergie Erzeuger (Energiebedarf der Wärme- und Kälteerzeuger)

- Endenergie Haustechnik (Energiebedarf für Wärme- und Kälteerzeugung sowie Hilfsenergie für die Anlagentechnik wie Pumpen, Ventilatoren und Regelungen)
- Primärenergie Haustechnik (nicht erneuerbarer Primärenergieinhalt der Endenergie für die Haustechnik)

Die in der Vorherberechnung ermittelten Energien für einen Gas-Brennwertkessel sind in Tabelle 7 zusammengestellt, dabei ist die spezifische Energie auf die Gebäudenutzfläche A_N von 270 m² bezogen.

Tabelle 7:
Vorherberechnung der Energie des Effizienzhauses Plus »Alpenchic« Baufritz (Brennstoffzellenheizgerät näherungsweise als Gas-Brennwertkessel angesetzt).

Teilabschnitt	Erläuterung	Energie [kWh/a]	spez. Energie [kWh/m ² a]
Nutzenergie	Nutzenergiebedarf der Räume für Heizung und Trinkwarmwasser	9.960	36,9
Erzeuger-abgabe	Wärme- und Kälteabgabe der Erzeuger an das Verteilnetz oder die Speicher für Heizung und Trinkwarmwassererwärmung und Kühlung	-	-
Endenergie Erzeuger	Gasbedarf für die Erzeugung von Wärme für Heizung, Trinkwarmwassererwärmung und Kühlung	13.689	50,7
Endenergie Haustechnik	Gas- und Strombedarf für die Erzeugung von Wärme und Kälte für Heizung, Trinkwarmwassererwärmung und Kühlung sowie Hilfsenergie für die Anlagentechnik wie Pumpen, Ventilatoren und Regelungen	15.231	56,4
Primärenergie Haustechnik	Nicht erneuerbarer Anteil des Primärenergieinhalts der gesamten Endenergie für die Haustechnik	17.574	65,1

In den Räumen tritt ein Nutzwärmebedarf von 9.960 kWh/a für Heizung und Trinkwarmwasser auf. Die Hilfsenergie (Strom) für den Betrieb der Anlagentechnik beträgt 1.542 kWh/a. Der Primärenergieaufwand für die gesamte Haustechnik beträgt 17.574 kWh/a ($13.689 \cdot 1,1 / 1,11 + 1.542 \cdot 2,6 = 17.574$ kWh). Dabei ist ein Primärenergiefaktor von 1,1 für Gas (bei $H_s/H_i = 1,11$) und von 2,6 für Strom berücksichtigt. Daraus lassen sich die in Tabelle 8 aufgeführten Aufwands- / Arbeitszahlen ableiten.

Tabelle 8:
Vorherberechnete Aufwands- / Arbeitszahlen für das Effizienzhaus Plus »Alpenchic« Baufritz
(Brennstoffzellenheizgerät näherungsweise als Gas-Brennwertkessel angesetzt).

Bewertete Teilabschnitte	Aufwandszahlen / Arbeitszahlen [kWh/kWh]
Effizienz der Verteilung (Erzeugerabgabe / Nutzenergie)	-
Effizienz der Wärme- / Kälteerzeuger (Endenergie Erzeuger / Erzeugerabgabe)	-
endenergetische Effizienz der Haustechnik (Endenergie Haustechnik / Nutzenergie)	1,53
effektive Arbeitszahl der gesamten Haustechnik (Nutzenergie / Endenergie Haustechnik)	0,65
Arbeitszahl des Energieerzeugers (Erzeugerabgabe / Endenergie Erzeuger)	-
primärenergetische Effizienz der Haustechnik (Primärenergie Haustechnik / Nutzenergie)	1,76

4 Messkonzept

Das Konzept zur messtechnischen Validierung des Gebäudes wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Baufritz vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Anlehnung an die Vorgaben, die im Förderprogramm des BMUB (ehemals BMVBS) festgelegt sind, entwickelt und im Verlauf des Projektes bei Anpassungen aktualisiert. Es beinhaltet die Erfassung der Verbräuche der Elektro- und Wärmeversorgung sowie des Innenraumklimas im Erd- und Obergeschoss.

Die Stromverbräuche für die Elektroversorgung des Hauses für Heizung, Trinkwarmwasser, Beleuchtung und Haushaltsstrom sowie die Gewinne aus erneuerbaren Energien werden gemäß Bild 6 durch die Messkonfiguration Elektroversorgung erfasst. Ferner wird die Stromproduktion des Brennstoffzellenheizgeräts, der Photovoltaikanlage und des Windgenerators aufgezeichnet. Im Gebäude sind fünf übergeordnete Messstellen zur Erfassung des Stromverbrauchs installiert. Dort werden jeweils die Unterzähler der Haushaltsgeräte (Q1), der Beleuchtung und Steckdosen (Q2 + Q4) und der Regelungstechnik (Q3) (hier Netzwerk, Modbus, Jalousie, Stellantriebe Heizung) zusammengefasst. An einer weiteren Messstelle wird der Strom zum Betrieb des Brennstoffzellenheizgeräts aufgezeichnet. Schließlich registriert ein fünfter Zähler die Hilfsenergie der Lüftung.

ELEKTROVERSORGUNG

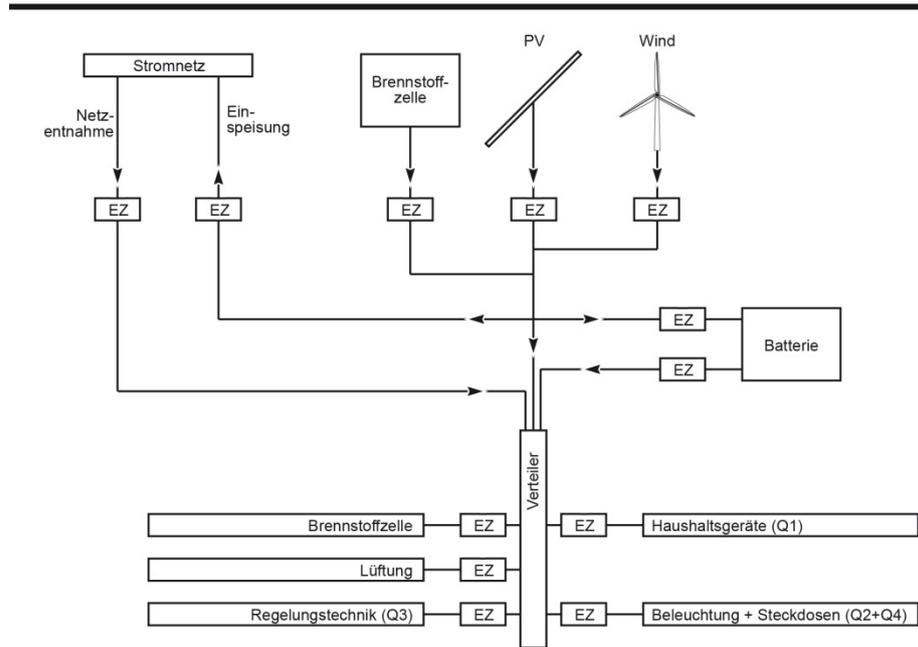


Bild 6:
Messkonfiguration Elektroversorgung Effizienzhaus Plus »Alpenchic«.

Die Messkonfiguration der Wärmeversorgung erfasst gemäß Bild 7 die Wärmemengen, die das Brennstoffzellenheizgerät (Brennwertkessel und Brennstoffzelle) an den Heizungswasser- und Brauchwasserkreislauf abgibt sowie die Gasmenge, die zum Betrieb des Brennstoffzellenheizgeräts mit integriertem Lastkessel aus dem öffentlichen Gasnetz bezogen wird.

WÄRMEVERSORGUNG

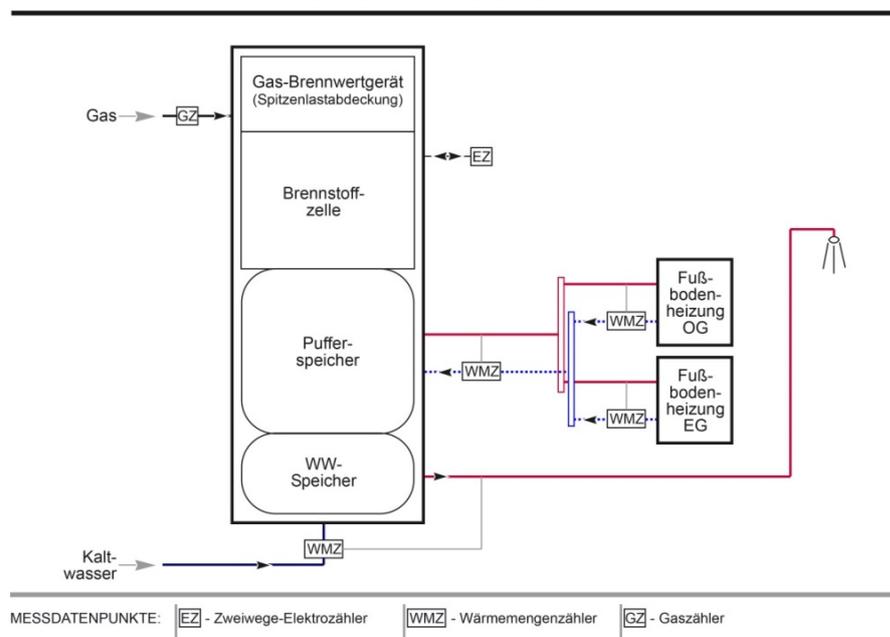


Bild 7:
Messkonfiguration Wärmeversorgung Effizienzhaus Plus »Alpenchic« .

Ferner werden die Temperaturen der Zu-, Ab- und Fortluft sowie der Außenluft und die Volumenströme der Zu- und Abluftmengen der Lüftungsanlage gemessen. Zur Bestimmung des Innenraumklimas sind im Erdgeschoss im Arbeitszimmer und der Küche sowie im Obergeschoss in den Räumen Bad, Schlafen, Kind 1 und Kind 2 Messfühler installiert, die die Parameter Lufttemperatur und relative Feuchte der Raumluft messen.

5 Meteorologische Randbedingungen

Der Energiebedarf eines Gebäudes hängt wesentlich von der Außenlufttemperatur und der Solarstrahlung ab. Da bei der Berechnung des Energiebedarfs nach der Energieeinsparverordnung (EnEV 2009) ein mittleres Klima in Deutschland herangezogen wird (Referenzklima Deutschland), wird das während der Messperiode vorhandene Klima dem Referenzklima gegenübergestellt. Am Gebäude selbst wurden keine Klimadaten aufgezeichnet. Für die Messperiode von August 2015 bis Juli 2017 wurden die meteorologischen Daten der 10 km entfernten Wetterstation Eichenried (Strahlungsdaten, Lufttemperatur und relative Luftfeuchte) entnommen. Diese werden mit den Klimadaten des Referenzklimas für Deutschland, das der EnEV-Berechnung (EnEV 2009) zu Grunde liegt, verglichen.

5.1 Solarstrahlung

Der Ertrag der Photovoltaikanlage ist maßgeblich von der Intensität der Solarstrahlung abhängig. Die im Monitoringzeitraum aufgezeichneten monatlichen horizontalen Strahlungsintensitäten der Wetterstation Eichenried sowie die Werte des Referenzklimas nach EnEV 2009 sind für die erste Messperiode in Bild 8 dargestellt.

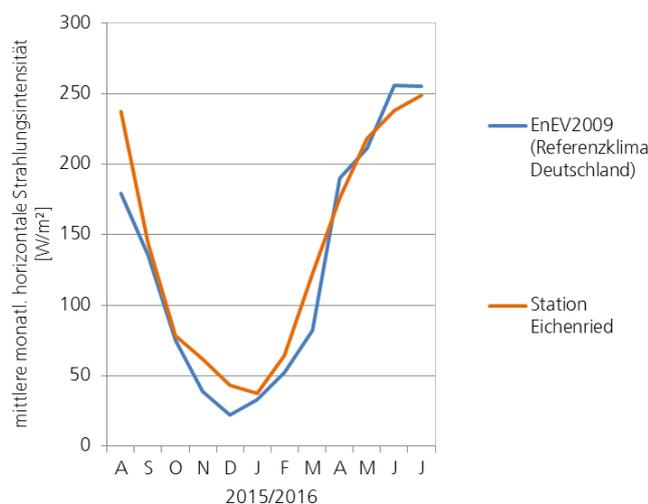


Bild 8:
Mittlere monatliche horizontale Strahlungsintensitäten der Wetterstation Eichenried und des Referenzklimas in der Messperiode 1 (MP1) von August 2015 bis Juli 2016.

In ihrem Verlauf folgen die Messwerte der Wetterstation denen des Referenzklimas. Es zeigen sich Abweichungen im August sowie November und Dezember 2015 und im März 2016, hier war die Strahlungsintensität geringer als die des Referenzklimas.

Für die zweite Messperiode ist der Verlauf der mittleren monatlichen Strahlungsintensität in Bild 9 gezeigt. Gegenüber dem EnEV-Referenzklima ergeben sich hier deutliche Abweichungen im August und September 2016 sowie im März, Mai und Juni 2017.

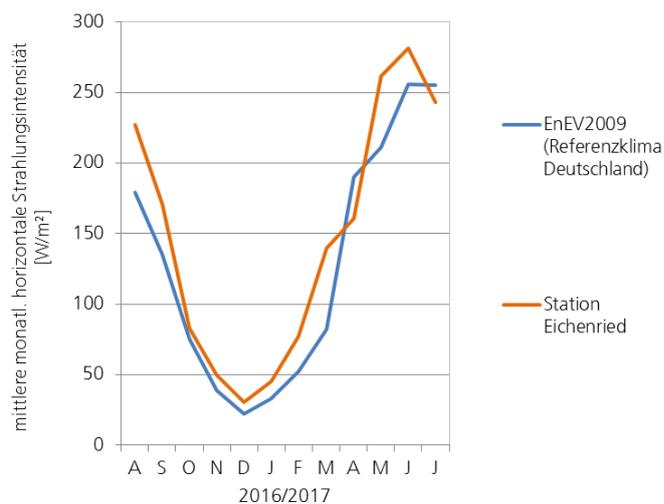


Bild 9: Mittlere monatliche Strahlungsintensitäten der Wetterstation Eichenried und des Referenzklimas in der Messperiode 2 (MP2) von August 2016 bis Juli 2017.

In der weiteren Betrachtung werden für die mittlere Strahlungsintensität die Daten der Wetterstation Eichenried angesetzt.

5.2 Außenlufttemperaturen

Die gemessenen mittleren monatlichen Außenlufttemperaturen der Wetterstation Eichenried und die des Referenzklimas sind für die erste Messperiode in Bild 10 gezeigt. Vor allem in den Wintermonaten von November 2015 bis März 2016 sind die Messwerte im Mittel um fast 3 K höher als die mittleren monatlichen Außenlufttemperaturen des Referenzklimas.

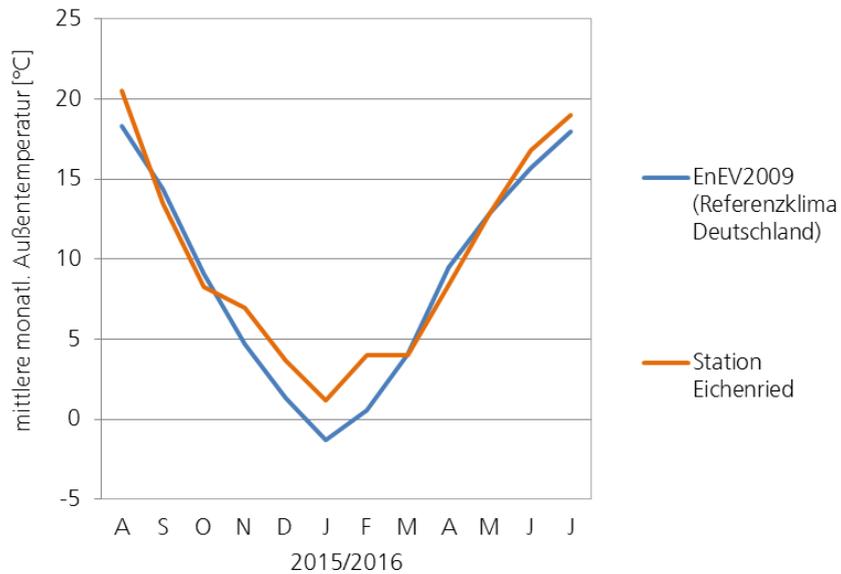


Bild 10:
Gemessene und vorgegebene mittlere monatliche Außenlufttemperaturen in der Messperiode 1 (MP1) von August 2015 bis Juli 2016.

Die an der Wetterstation Eichenried gemessenen Außenlufttemperaturen für die zweite Messperiode und die Referenzwerte nach EnEV zeigt Bild 11. Hier war die Außenlufttemperatur in den Wintermonaten Dezember und Januar 2017 geringer als die des Referenzklimas. Geringfügige Abweichungen zur wärmeren Seite sind in den Monaten März sowie Juni und Juli erkennbar.

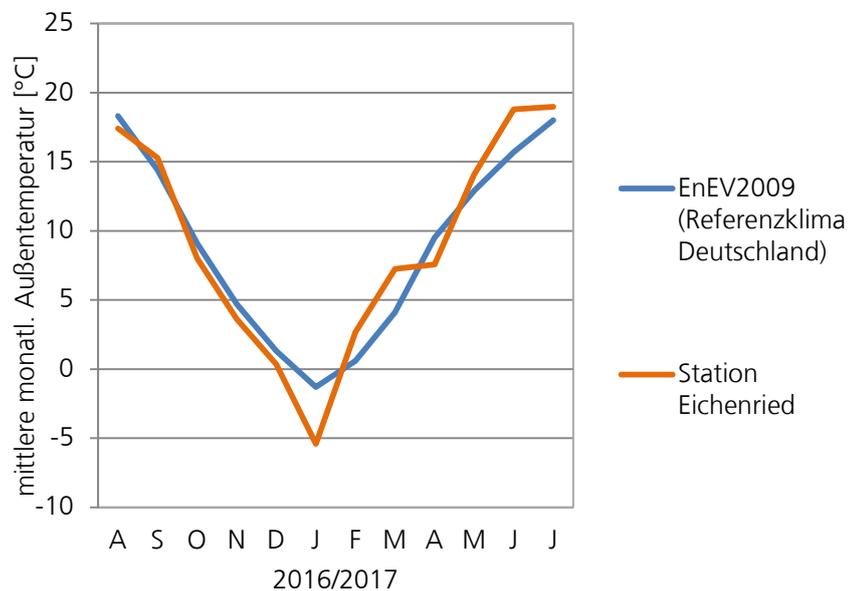


Bild 11:
Gemessene und vorgegebene mittlere monatliche Außenlufttemperaturen in der Messperiode 2 (MP2) von August 2016 bis Juli 2017.

5.3 Klimabereinigung

Messwerte sind vom lokalen und saisonalen Klima geprägt, das während der Messperiode vorherrscht. Daher ist zur besseren Vergleichbarkeit von messtechnisch ermittelten Verbräuchen eine Klimakorrektur vorzunehmen. Im Rahmen der Erstellung von Energieausweisen sind die gemessenen Heizenergieverbräuche auf mittlere deutsche Klimaverhältnisse, wie in den Regeln für Energieverbrauchswerte dargestellt [4], zu normieren. Zur Klimakorrektur wird die Gradtagzahl verwendet, die das Produkt aus der Länge der Heizzeit (Tage) und der hierin aufgetretenen mittleren Temperaturdifferenz (Kelvin) zwischen beheiztem Bereich und Außenluft ist. Zur Heizzeit zählen alle Tage, an denen die mittlere Außenlufttemperatur unterhalb von 12 °C liegt. Am Projektstandort selbst ist keine Wetterstation installiert, es wird daher auf die Gradtagzahlen der am nächsten gelegenen Wetterstation Straubing des Deutschen Wetterdienstes [5] mit langjährigen Aufzeichnungen zurückgegriffen (die Station Eichried verfügt nicht über diese langjährigen Wetterdaten). Die in der Messperiode ermittelten Gradtagzahlen für die Randbedingung G20/15 sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9:
Gradtagzahlen für den Standort Straubing und Referenzklima Deutschland.

Standort und Betrachtungsperiode	Gradtagzahl G20/12 [Kd]
Gradtagzahl am Standort Straubing in der Nähe von Poing August 2015 bis Juli 2016	3.283
Gradtagzahl am Standort Straubing in der Nähe von Poing August 2016 bis Juli 2017	3.548
Gradtagzahl am Standort Straubing in der Nähe von Poing für das langjährige Mittel (1989 bis 2015)	3.606
Gradtagzahl für das Referenzklima Deutschland	3.851

Das Wetter war während der Messperiode wärmer als am Standort Straubing im langjährigen Mittel üblich und wärmer als unter mittleren deutschen Klimaverhältnissen üblich. Es ergeben sich daraus folgende Klimafaktoren:

- Klimafaktor bezogen auf den Standort:
 $KF = 3.606 \text{ Kd} / 3.283 \text{ Kd} = 1,10$ (MP1)
 $KF = 3.606 \text{ Kd} / 3.548 \text{ Kd} = 1,02$ (MP2)
- Klimafaktor bezogen auf deutsches Normklima:
 $KF = 3.851 \text{ Kd} / 3.283 \text{ Kd} = 1,17$ (MP1)
 $KF = 3.851 \text{ Kd} / 3.548 \text{ Kd} = 1,09$ (MP2)

Der gemessene Heizenergieverbrauch müsste somit mit dem Klimafaktor 1,10 (MP1) bzw. 1,02 (MP2) multipliziert werden, um den klimabereinigten Heizenergieverbrauch am Gebäudestandort zu erhalten. Bei Bezug auf das mittlere

deutsche Normklima (wie bei der Ausstellung von Energieausweisen erforderlich) müsste der Heizenergieverbrauch mit dem Klimafaktor 1,17 (MP1) bzw. 1,09 (MP2) multipliziert werden.

6 Messergebnisse

Das Gebäude wurde im Frühjahr 2015 fertig gestellt. Eine durchgängige Messwerterfassung der Elektrozähler und Wärmemengenzähler sowie die Messwerterfassung des Raumklimas liegen für die erste Messperiode MP 1 von August 2015 bis Juli 2016 vor. Das Brennstoffzellenheizgerät lieferte aufgrund einer herstellerbedingten Programmierung nur bis 13. März 2016 Strom. Ab August 2016 wurde ein neues Brennstoffzellenheizgerät betrieben, das ab Oktober 2016 Strom erzeugte.

Trotz intensivem Austausch mit dem Brennstoffzellenheizgeräthersteller konnten für den Messzeitraum keine validen, auswertbaren Daten zu den Einzelkomponenten des Brennstoffzellenheizgerätes zur Verfügung gestellt werden. Das Heizgerät musste daher als »Black-Box« betrachtet werden, d. h. der Gas-einsatz, die hieraus erzeugte Wärme und der erzeugte Strom konnten nicht getrennt für Brennstoffzelle und Brennwertkessel ermittelt werden.

In der zweiten Messperiode MP2 von August 2016 bis Juli 2017 war die Messwertübertragung lückenhaft und Teile der übermittelten Daten, vorrangig des Brennstoffzellenheizgerätes, nicht differenzierbar. Eine detaillierte monatliche Auswertung des Gesamtsystems war auf der verfügbaren Datenbasis nicht realisierbar, so dass für die zweite Messperiode nur Jahreswerte ermittelt wurden. Der Windgenerator war während des gesamten Monitorings nicht in Betrieb.

6.1 Stromerzeugung

Gemäß den Vorherberechnungen nach EnEV 2009 erzeugt die Photovoltaikanlage des Gebäudes in einem Jahr einen Ertrag von 11.500 kWh. Dieser Wert wurde von der Anlage exakt auch vor Ort in der ersten Messperiode von August 2015 bis Juli 2016 erreicht. Wie in Bild 12 zu sehen, treten bei der monatsweisen Gegenüberstellung Abweichungen zwischen Messung und Berechnung auf.

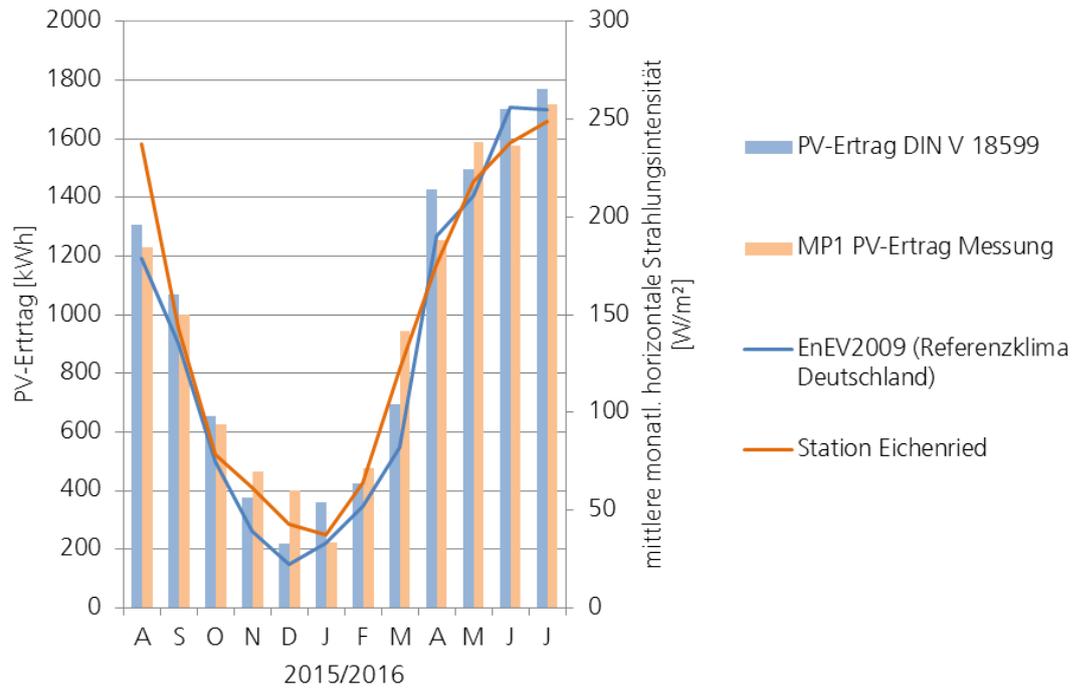


Bild 12: Vorherberechnete und gemessene Strahlungsintensitäten und Stromerträge aus der PV-Anlage in der Messperiode 1 (MP1) von August 2015 bis Juli 2016.

Den spezifischen, auf die Photovoltaikfläche von 80 m² bezogenen monatlichen Stromertrag zeigt Bild 13, er beträgt im Mittel 12 kWh/m²_{PV} im Monat.

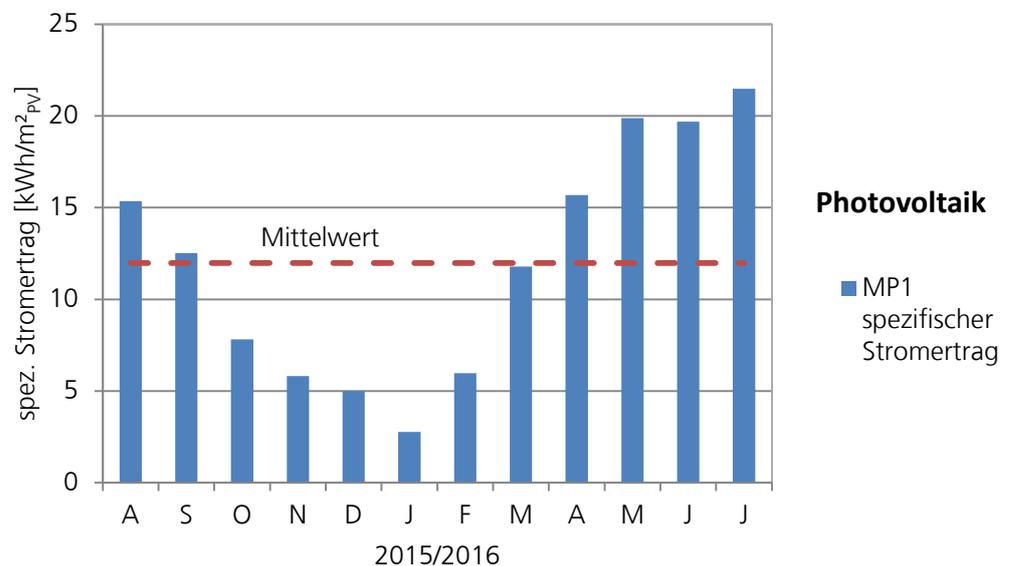


Bild 13: Spezifischer, flächenbezogener PV-Ertrag in der Messperiode 1 (MP1) von August 2015 bis Juli 2016.

Der Windgenerator lieferte in der Messperiode aufgrund eines Defektes keinen Strom. Das Brennstoffzellenheizgerät erzeugte in der Zeit von August 2015 bis März 2016, wie Bild 14 zeigt, 2.475 kWh Strom, das sind für den 8-monatigen Betriebszeitraum im Mittel 309 kWh im Monat.

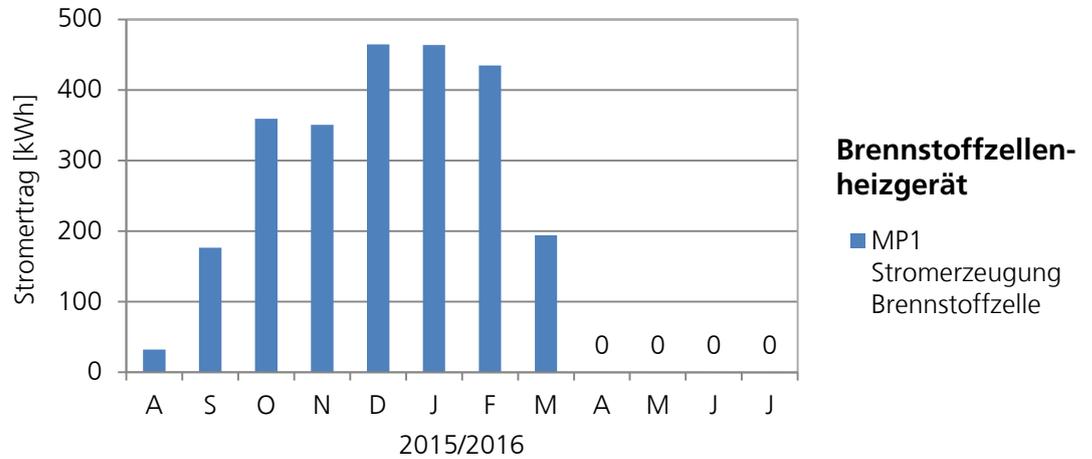


Bild 14: Stromerzeugung des Brennstoffzellenheizgeräts in der Messperiode 1 (MP1) von August 2015 bis Juli 2016.

In der zweiten Messperiode produzierte die Photovoltaikanlage, wie in Bild 15 zu sehen, 12.374 kWh/a Strom, das waren 7,6 % mehr als vorherberechnet und in der ersten Messperiode produziert.

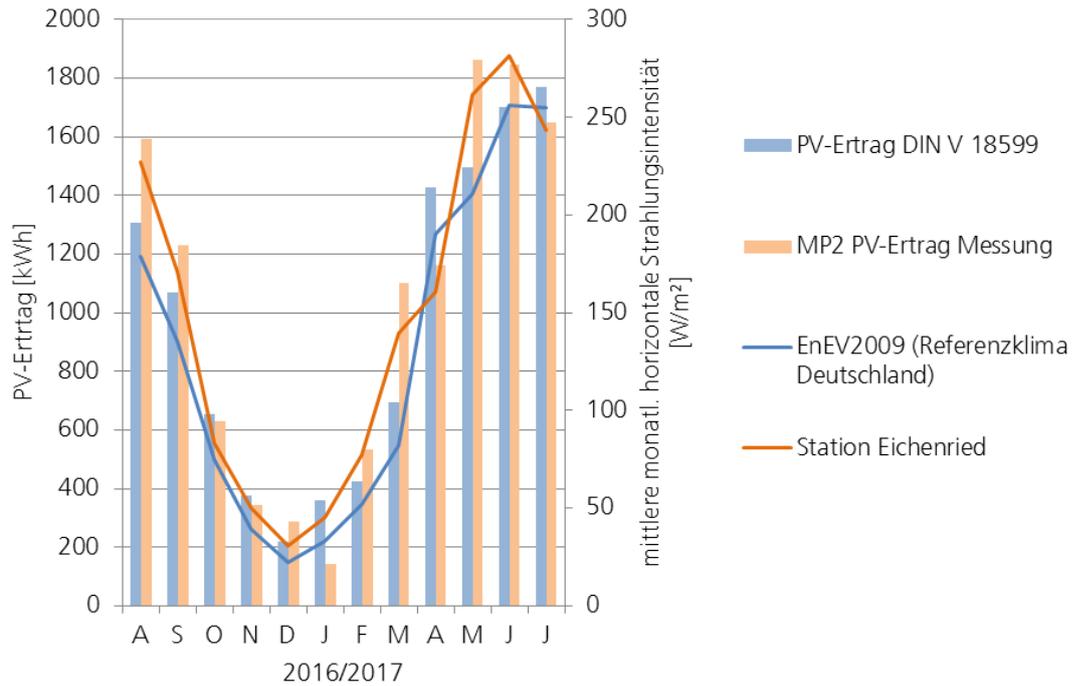


Bild 15: Vorherberechnete und gemessene Strahlungsintensitäten und Stromerträge aus der PV-Anlage in der Messperiode 2 (MP2) von August 2016 bis Juli 2017.

Den spezifischen, auf die Photovoltaikfläche von 80 m² bezogenen monatlichen Stromertrag zeigt Bild 16, er beträgt im Mittel 13 kWh/m²_{PV} im Monat, bzw. 154 kWh/m² im Jahr.

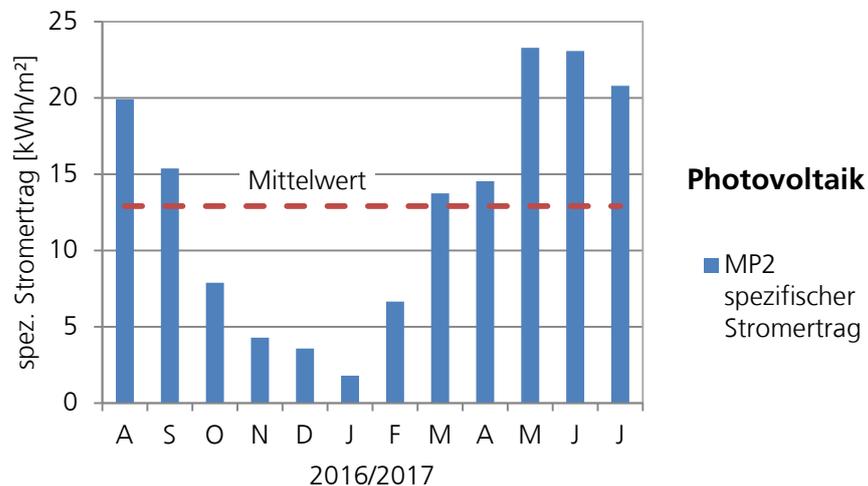


Bild 16: Spezifischer, flächenbezogener PV-Ertrag in der Messperiode 2 (MP2) von August 2016 bis Juli 2017.

Auch in der zweiten Messperiode wurde der Windgenerator nicht betrieben und lieferte somit keinen Strom. Das Brennstoffzellenheizgerät erzeugte in der

zweiten Messperiode, wie Bild 17 zeigt, 2.817 kWh und damit 13 % mehr Strom als in der ersten Messperiode. Dies ist im Wesentlichen durch die längere Laufzeit bedingt.

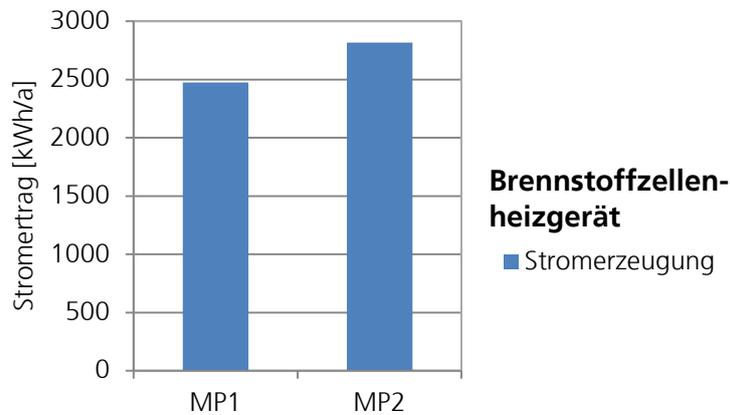


Bild 17: Vergleich der Stromerzeugung des Brennstoffzellenheizgerätes in der Messperiode 1 (MP1) von August 2015 bis Juli 2016 und Messperiode 2 (MP2) von August 2016 bis Juli 2017.

Insgesamt erzeugten die lokalen stromproduzierenden Anlagen, wie in Bild 18 zu sehen, in der ersten Messperiode MP1 13.975 kWh und in der zweiten Messperiode MP2 15.191 kWh Strom.

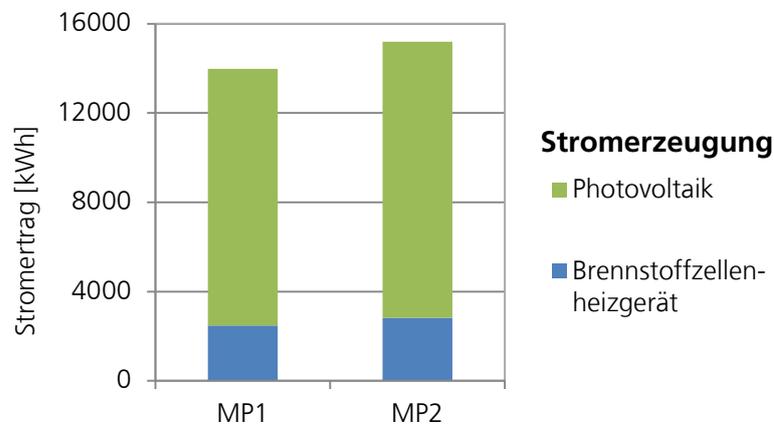


Bild 18: Vergleich der gesamten lokalen Stromerzeugung in der Messperiode 1 (MP1) von August 2015 bis Juli 2016 und Messperiode 2 (MP2) von August 2016 bis Juli 2017.

6.2 Endenergieverbrauch

Der Endenergieverbrauch der Anlagen im Effizienzhaus Plus »Alpenchic« setzt sich aus den Energieträgern Gas und Strom zusammen und ist vergleichend für die Messperioden MP1 und MP2 in Bild 19 dargestellt.

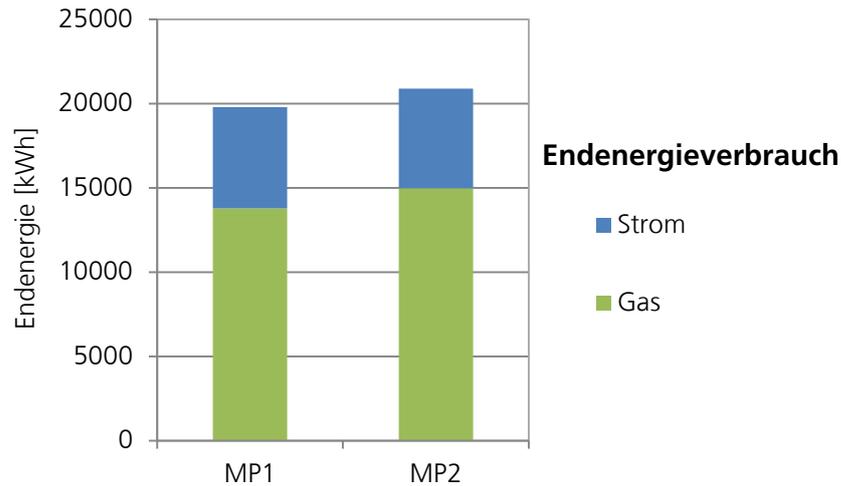


Bild 19:
Vergleich des Endenergieverbrauchs in der Messperiode 1 (MP1) von August 2015 bis Juli 2016 und in der Messperiode 2 (MP2) von August 2016 bis Juli 2017.

Wie Tabelle 10 zeigt, hat das Brennstoffzellenheizgerät in der ersten Messperiode 1.343 m³ Gas bezogen und in der zweiten 1.459 m³. Der zugehörige Energieverbrauchswert in Kilowattstunden (kWh) ergibt sich durch die Multiplikation des gemessenen Verbrauchswertes in Kubikmeter [m³] mit der Zustandszahl und dem Brennwert für das bezogene Gas. Nach Mitteilung der Stadtwerke München [6] wird in Poing Erdgas der Erdgasgruppe H mit einem Brennwert von 11,2 kWh/Nm³ und einer Zustandszahl von 0,9159 geliefert. Damit beträgt der Energieverbrauch des Brennstoffzellenheizgerätes durch Gasbezug in MP1 13.775 kWh/a und in MP2 14.967 kWh. Daneben wurde im Gebäude für den Betrieb der verschiedenen Anlagen und Geräte in MP1 ein Stromverbrauch von 6.017 kWh/a und in MP2 von 5.911 kWh/a gemessen. Der gesamte Energieverbrauch betrug somit in der ersten Messperiode 19.791 kWh/a und war in der zweiten Messperiode mit 20.878 kWh/a um ca. 5 % größer. Ein geringfügiger Mehrverbrauch wurde vorrangig für den Betrieb des Brennstoffzellenheizgerätes registriert. Beim Endenergieverbrauch für die Beleuchtung und die Haushaltsgeräte ist eine leichte Verschiebung erkennbar, in der zweiten Messperiode wurde mehr Strom für die Beleuchtung und dafür weniger Strom für die Geräte verbraucht als in der ersten Messperiode.

Tabelle 10:
Endenergieverbrauch des Effizienzhauses Plus »Alpenchic« in der Messperiode MP1 (MP1) von August 2015 bis Juli 2016. sowie in der Messperiode MP2 (MP2) von August 2016 bis Juli 2017.

Messperiode	Endenergieverbrauch						
	Brennstoffzellenheizgerät (Heizung, Trinkwarmwasser und Stromerzeugung)			Hilfsenergie, Sonstiges	Beleuchtung, Steckdosen	Haushaltsgeräte, Haushaltsprozesse	Summe
	Bezug Gas		Bezug Strom				
	[m³]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
MP1 2015/16	1.343	13.775	128	1.694	3.342	854	19.791
MP2 2016/17	1.459	14.967	-	1.664	3.906	342	20.878

Die monatlichen Endenergieverbräuche, aufgeteilt in die Anteile

- Brennstoffzellenheizgerät (Heizung, Trinkwarmwasser und Stromerzeugung),
- Beleuchtung und Steckdosen,
- Hilfsenergie Anlagentechnik (Lüftung, Regelungstechnik, Hausautomation), Sonstiges,
- Haushaltsgeräte, Haushaltsprozesse,

sind für die erste Messperiode (MP1) in Bild 20 dargestellt. Die zugehörigen Zahlenwerte sind im Anhang A in Tabelle A.1 und Tabelle A.2 zusammengefasst.

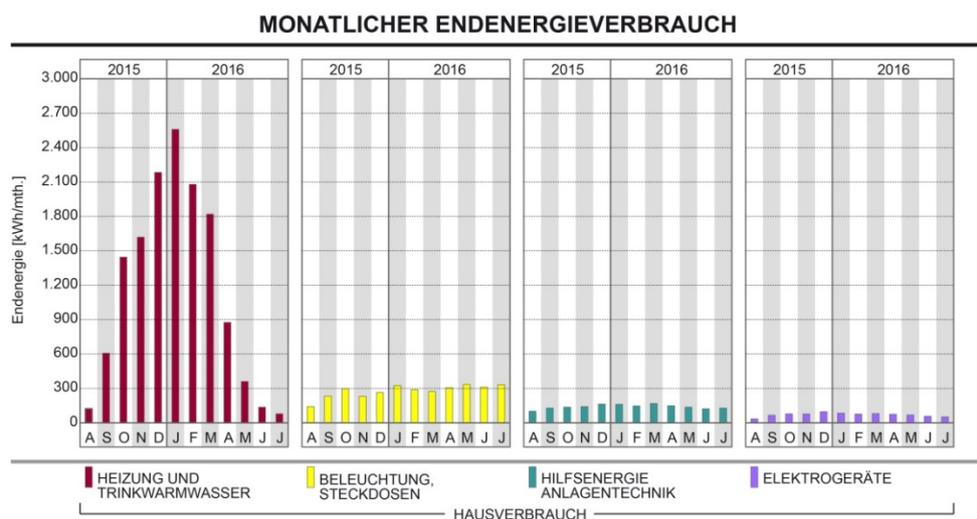


Bild 20:
Gemessene monatliche Endenergieverbräuche für die Anlagentechnik, Beleuchtung und Haushaltsgeräte und -prozesse in der Messperiode 1 (MP1) von August 2015 bis Juli 2016.

6.2.1 Endenergieverbrauch des Brennstoffzellenheizgerätes

Bild 21 zeigt den Endenergieverbrauch des Brennstoffzellenheizgerätes für die Heizwärmebereitstellung, die Trinkwarmwasserbereitung und die Erzeugung von Strom für die Messperiode MP1 von August 2015 bis Juli 2016. In diesem Zeitraum hat das Brennstoffzellenheizgerät 1.343 m³ Gas bezogen und daraus 13.775 kWh thermische und elektrische Energie zur Verfügung gestellt. Zum Betrieb des Brennstoffzellenheizgerätes wurden in der ersten Messperiode MP1 128 kWh Strom benötigt.

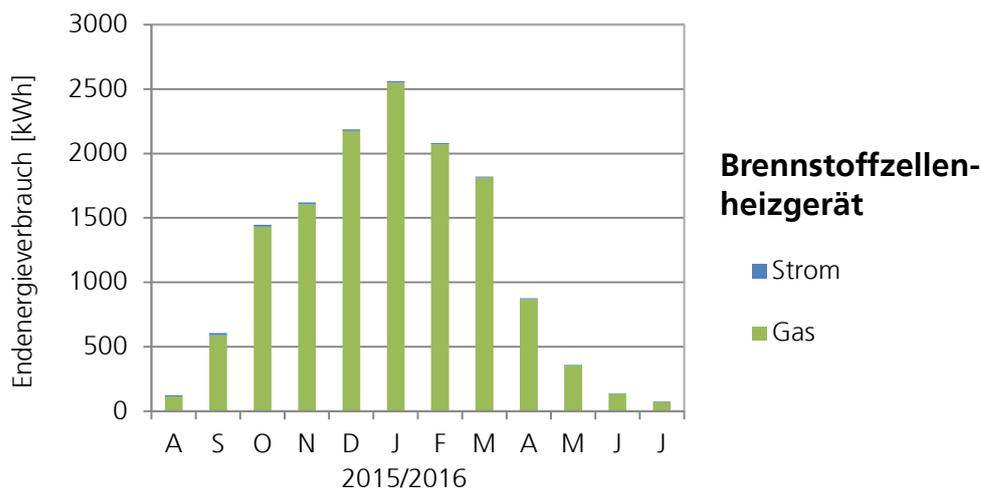


Bild 21:
Endenergieverbrauch des Brennstoffzellenheizgerätes für Heizung, Trinkwarmwasserbereitung und Stromerzeugung in der Messperiode 1 (MP1) von August 2015 bis Juli 2016.

In der zweiten Messperiode von August 2016 bis Juli 2017 hat das Brennstoffzellenheizgerät 1.459 m³ Gas bezogen und damit einen Verbrauch von 14.967 kWh/a generiert. Der Stromverbrauch des Brennstoffzellenheizgerätes liegt für die zweite Messperiode nicht detailliert vor.

Im Vergleich zur ersten Messperiode war der Endenergieverbrauch, wie in Bild 22 zu sehen, in der zweiten Messperiode um ca. 8 % höher. Dies ist im Wesentlichen durch die längere Laufzeit mit Stromerzeugung bedingt.

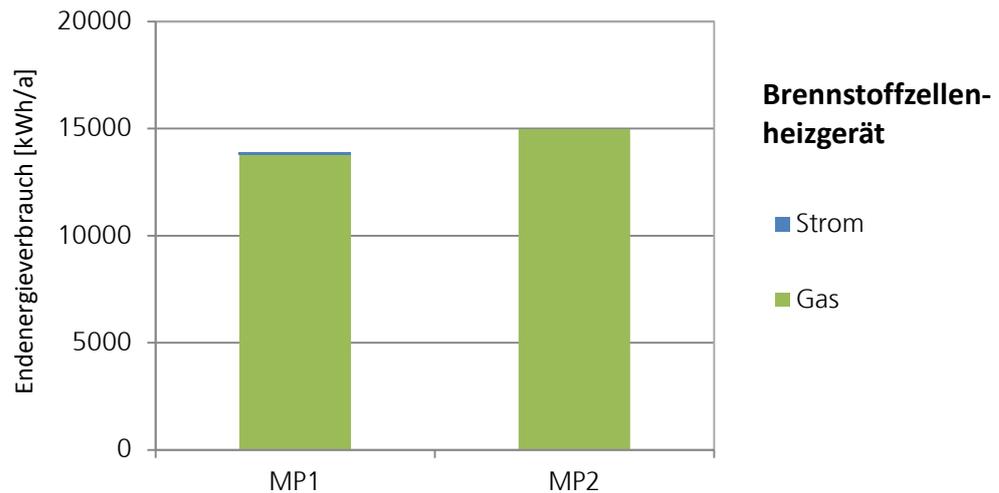


Bild 22:

Vergleich des Endenergieverbrauchs des Brennstoffzellenheizgerätes für Heizung, Trinkwarmwasserbereitung und lokale Stromerzeugung in der Messperiode 1 (MP1) von August 2015 bis Juli 2016 und der Messperiode 2 (MP2) von August 2016 bis Juli 2017.

6.2.2 Stromverbrauch Hilfsenergie und Sonstiges

Der Endenergieverbrauch der Hilfsenergie teilt sich auf in die Anteile Mess- und Regeltechnik, Lüftung und Batterieverlust. Die monatliche Verteilung der Energieanteile ist für die erste Messperiode (MP1) von August 2015 bis Juli 2016 in Bild 23 dargestellt. Der Gesamtverbrauch für Hilfsenergie beträgt 1.453 kWh/a. Der ganzjährige Betrieb der Lüftungsanlage verursacht einem nahezu konstanten Verbrauch von im Mittel 20 kWh/Monat. Die Batterie weist nahezu konstante Verluste von etwa 35 kWh/Monat auf, dies entspricht etwa 3 % des lokal erzeugten Stroms. Der Energieverbrauch für die Mess- und Regeltechnik beträgt ca. 4 % des Gesamthausverbrauchs. Der Anteil »Sonstiges«, der aus der Differenz des bezogenen bzw. selbst generierten abzüglich des eingespeisten Stroms und der Summe der Einzelverbräuche resultiert und damit nicht zuordnungsbarer Verbraucher repräsentiert, beträgt in der ersten Messperiode 241 kWh/a.

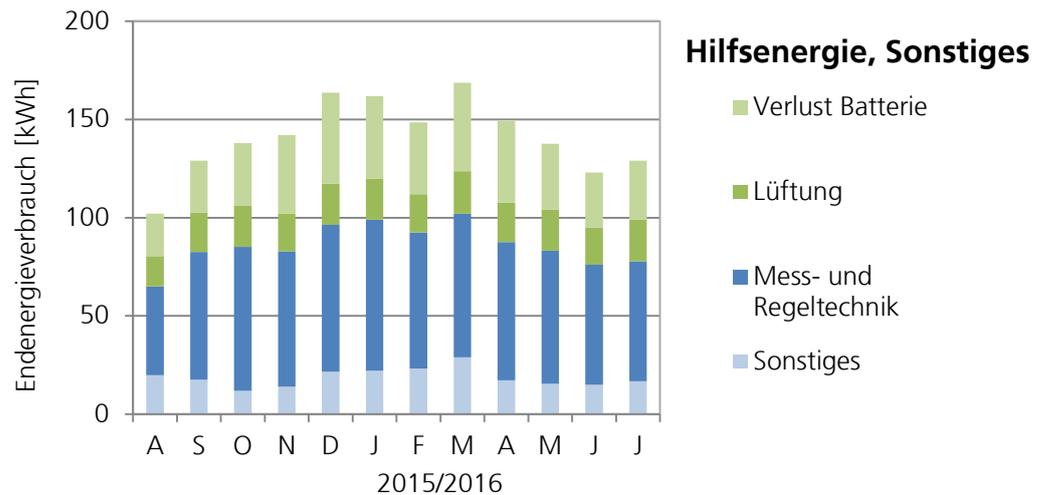


Bild 23:
Endenergieverbrauch der Anteile der Hilfsenergie in der Messperiode 1 (MP1) von August 2015 bis Juli 2016.

In der 2. Messperiode beträgt die gesamte Hilfsenergie 1.388 kWh/a. Diese teilt sich in die jeweiligen Anteile gemäß Tabelle 11 auf.

Tabelle 11:
Anteile Hilfsenergie für Messperiode 1 (MP1) von August 2015 bis Juli 2016 und Messperiode 2 (MP2) von August 2016 bis Juli 2017.

Hilfsenergie	MP1 [kWh/a]	MP2 [kWh/a]
Mess- und Regeltechnik Gebäude	807	820
Lüftung	224	220
Verlust Batterie	423	346
Summe	1.453	1.388
Sonstiges	241	276

Im Vergleich zur ersten Messperiode sind die Energieanteile für Hilfsenergie und Sonstiges, wie Bild 24 zeigt, ungefähr gleich groß.

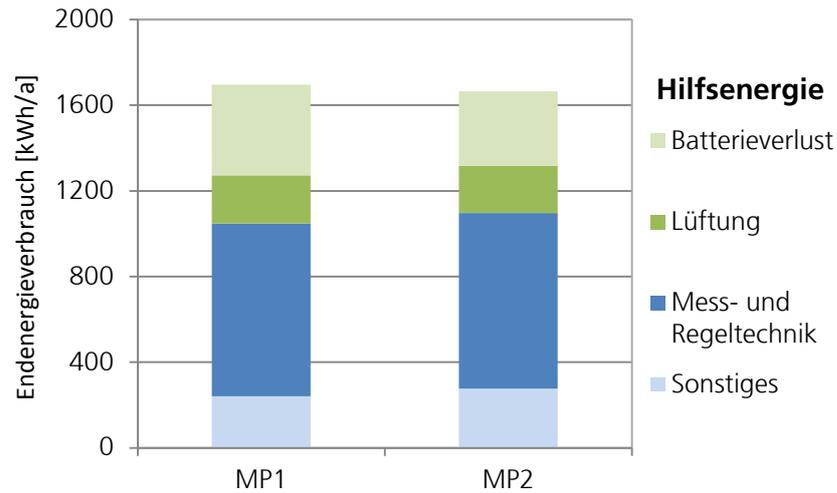


Bild 24: Vergleich des Hilfsenergieverbrauchs für die Anlagentechnik in der Messperiode 1 (MP1) von August 2015 bis Juli 2016 und der Messperiode 2 (MP2) von August 2016 bis Juli 2017.

Eine vergleichende Darstellung zwischen der Vorherberechnung des Endenergiebedarfs für Heizen und Trinkwarmwasser nach EnEV-Methodik und der Messung des Endenergieverbrauchs des Brennstoffzellenheizgerätes für Heizen, Trinkwarmwasserbereitung und lokale Stromerzeugung zuzüglich der Hilfsenergie der Anlagentechnik zeigt zusammenfassend für die erste Messperiode Bild 25.

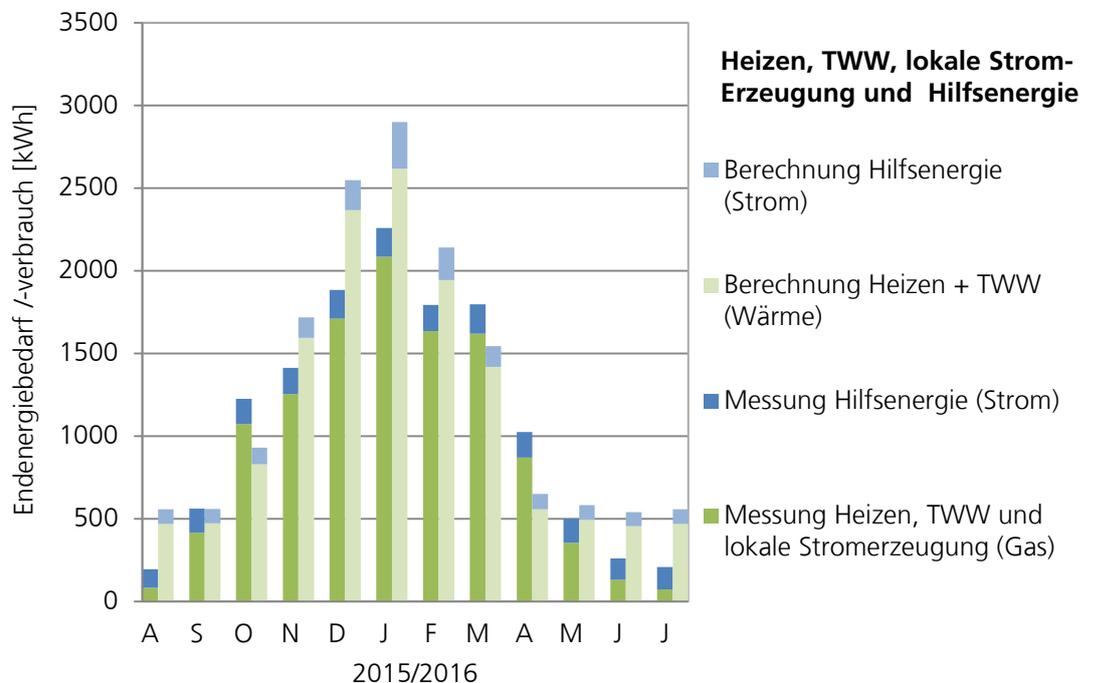


Bild 25: Vergleich Vorherberechnung und Messung Endenergieverbrauch der Energieträger Gas und Strom für Heizen, Trinkwarmwasserbereitung (TWW), lokale Stromerzeugung und Hilfsenergie in der Monitoringperiode 1 (MP1) von August 2015 bis Juli 2016.

In den Monaten Oktober, März und April war der Verbrauch höher als vorherberechnet. In den Sommermonaten Juni, Juli 2016 und August 2015 ergab die Vorberechnung höhere Werte als der tatsächliche Verbrauch. Insgesamt war der Jahresverbrauch für Heizung und Trinkwarmwasserbereitung, lokale Stromerzeugung und Hilfsenergie geringfügig höher (2 %) als vorherberechnet.

Im Vergleich zur MP1 und der Vorherberechnung war, wie Bild 26 zeigt, der Endenergieverbrauch in MP2 geringfügig höher.

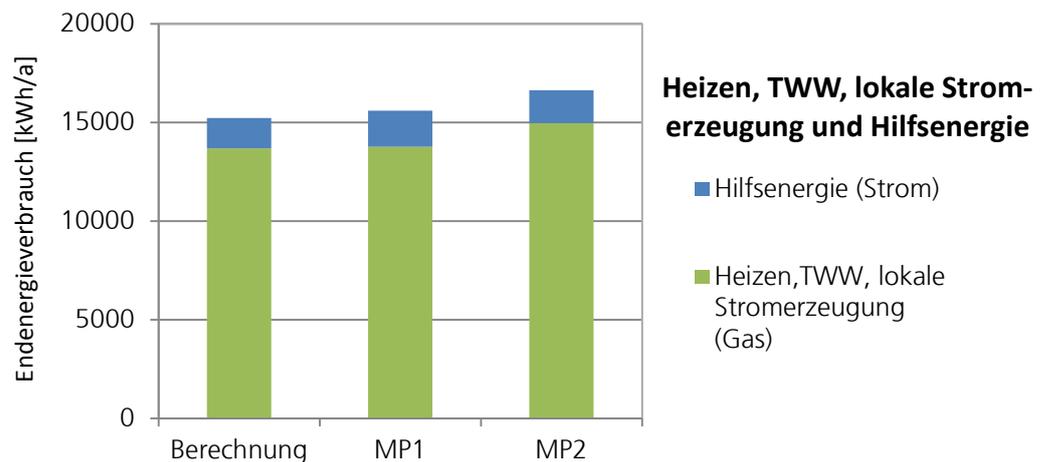


Bild 26: Vergleich der Vorherberechnung des Endenergieverbrauchs für Heizung, Trinkwarmwasser (TWW) und Hilfsenergie mit den Messwerten des Endenergieverbrauchs für das Brennstoffzellenheizgerät und der Hilfsenergie in der Monitoringperiode 1 (MP1) von August 2015 bis Juli 2016 und der Monitoringperiode 2 (MP2) von August 2016 bis Juli 2017.

6.2.3 Stromverbrauch Haushaltsgeräte, Haushaltsprozesse und Beleuchtung

An der Messstelle Q1 (Haushaltsgeräte) ist der Stromverbrauch für die Abnehmer Elektroherd, Backofen, Dampfgarer, Spülmaschine, Dunstabzugshaube und Sauna zusammengefasst. In der ersten Messperiode wurden für die Haushaltsgeräte und Haushaltsprozesse 854 kWh Strom verbraucht. Die monatliche Verteilung des Energieverbrauchs sowie die Vorgabe gemäß der Berechnungsvorschrift nach Effizienzhaus-Plus-Standard sind in Bild 27 gezeigt. In der zweiten Messperiode ergab sich ein Energieverbrauch von 342 kWh, gemäß Bild 28. Aufgrund der Nutzung des Gebäudes als Musterhaus, mit einem nur geringen Gebrauch der Elektrogeräte, wird die Vorgabe des Effizienzhaus-Plus-Standards signifikant unterschritten.

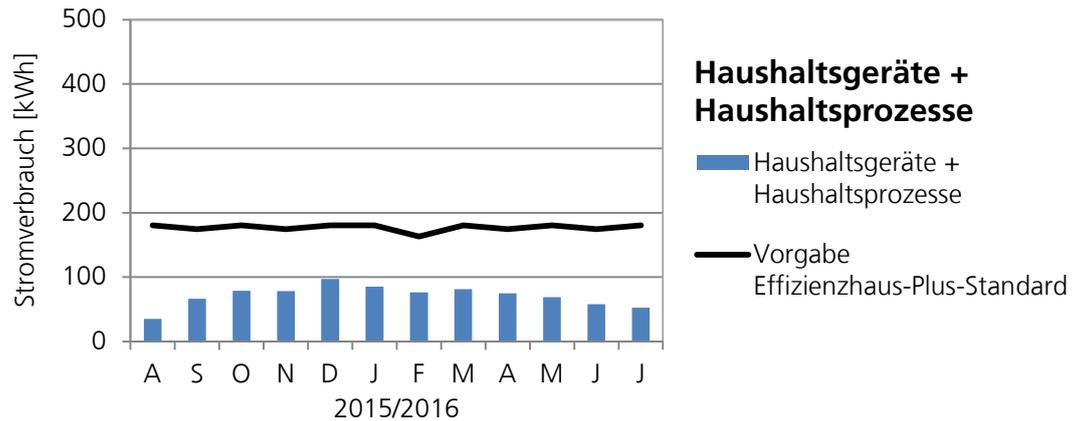


Bild 27:
Stromverbrauch Haushaltsgeräte und Haushaltsprozesse in der Messperiode 1 (MP1) von August 2015 bis Juli 2016.

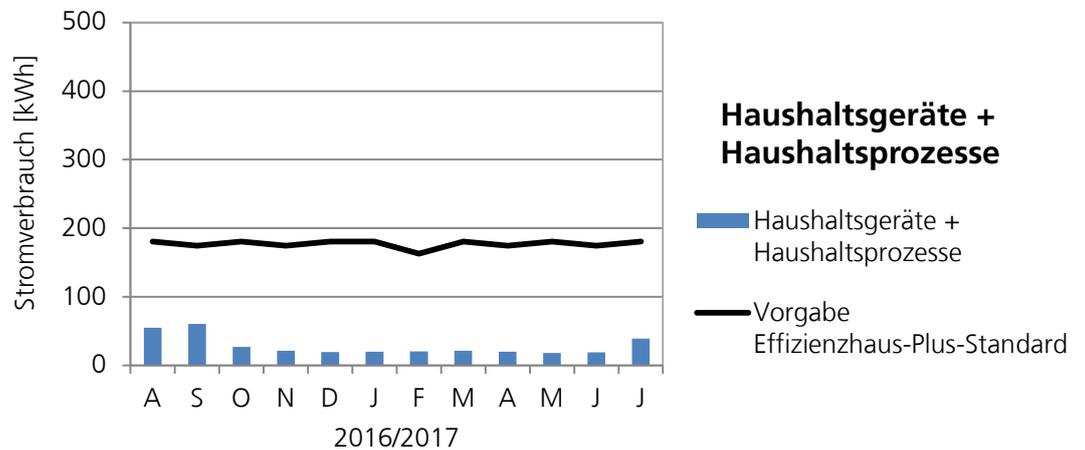


Bild 28:
Stromverbrauch Haushaltsgeräte und Haushaltsprozesse in der Messperiode 2 (MP2) von August 2016 bis Juli 2017.

Für das Gebäude wurde keine gesonderte Verbrauchserfassung der Beleuchtung installiert. Daher werden an der Messstelle Beleuchtung gleichzeitig die Steckdosen des Gebäudes mit registriert. An den Steckdosen sind Bürogeräte der Hausberater des Musterhausbetriebes wie Computer, Drucker, Scanner und Kopierer angeschlossen. Der Stromverbrauch für die Beleuchtung einschließlich der Steckdosen beträgt in der ersten Messperiode 3.342 kWh/a. Er übersteigt damit sowohl die Vorgabe des Beleuchtungsstrombedarfs nach Effizienzhaus-Plus-Standard von 375 kWh/a als auch den gesamt anzusetzenden pauschalen Haushaltsstrombedarf von 2.500 kWh je Wohneinheit. Bild 29 zeigt die monatlichen Verläufe sowie die vorherberechneten Werte gemäß den Berechnungsvorgaben nach Effizienzhaus-Plus-Standard für die Beleuchtung.

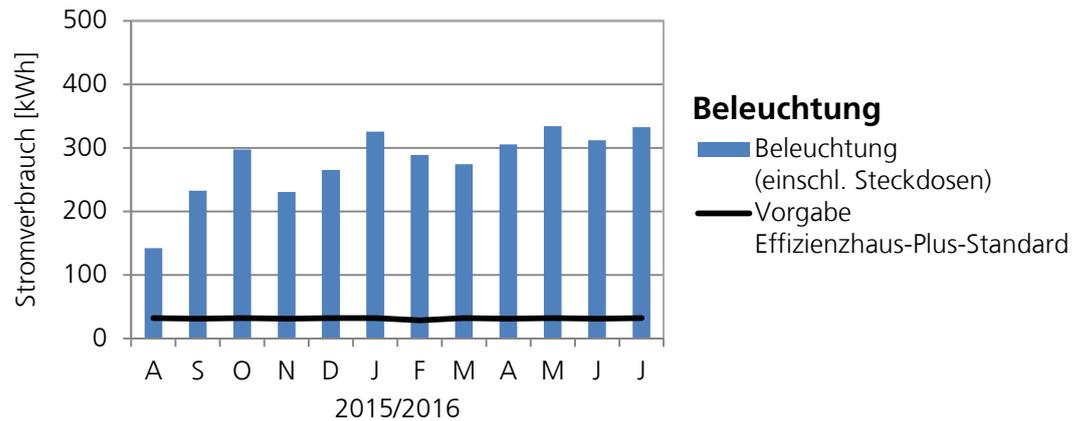


Bild 29:
Stromverbrauch Beleuchtung einschließlich Steckdosen in der Messperiode 1 (MP1) von August 2015 bis Juli 2016.

In der zweiten Messperiode von August 2016 bis Juli 2017 beträgt der Verbrauch für Beleuchtung und Steckdosen 3.906 kWh/a und übersteigt, wie Bild 30 zeigt, ebenfalls die Vorgabe des Effizienzhaus-Plus-Standards deutlich.

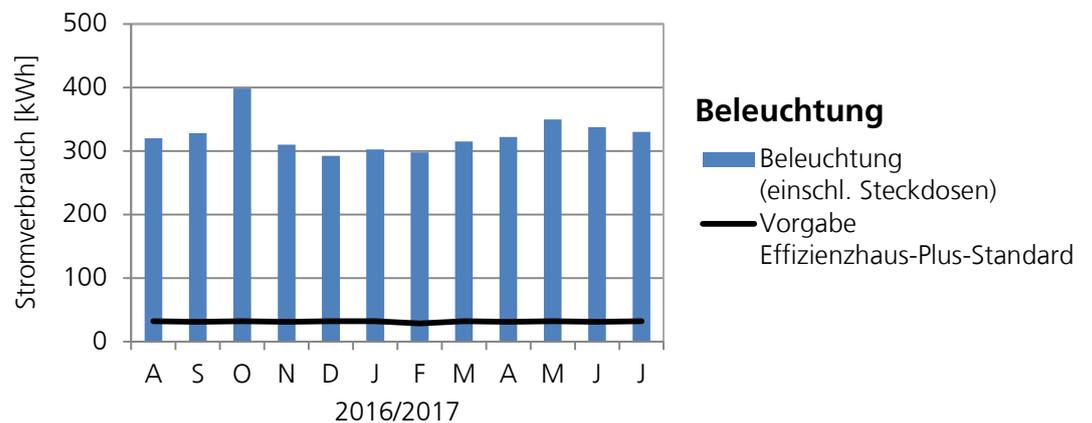


Bild 30:
Stromverbrauch Beleuchtung einschließlich Steckdosen in der Messperiode 2 (MP2) von August 2016 bis Juli 2017.

Die gemeinsame Darstellung der Verbräuche für Haushaltsgeräte und Beleuchtung ist in Bild 31 gezeigt und beträgt in der ersten Messperiode 4.196 kWh/a. Die Vorgabe des Effizienzhaus-Plus-Standards wird dabei aufgrund der intensiven Nutzung der Beleuchtung und Steckdosen im Mittel um 68 % überschritten.

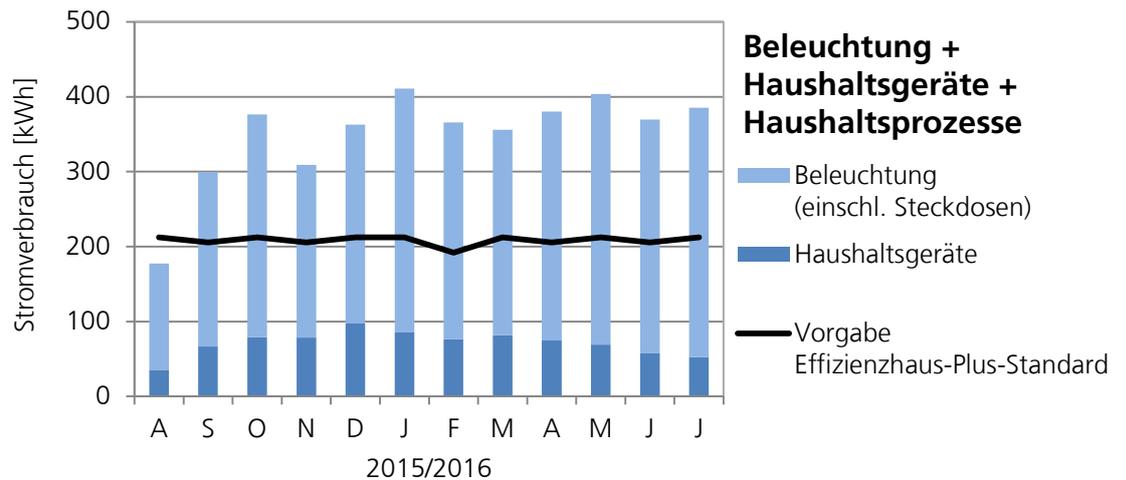


Bild 31:
Stromverbrauch Nutzerstrom gesamt in der Messperiode 1 (MP1) von August 2015 bis Juli 2016.

Für die zweite Messperiode ist der Nutzerstromverbrauch, aufgeteilt in die Anteile Beleuchtung und Haushaltsgeräte und –prozesse, in Bild 32 gezeigt. Der Verbrauch für das Jahr beträgt 4.243 kWh/a und überschreitet die Vorgabe des Effizienzhaus-Plus-Standards im Mittel um 70 %.

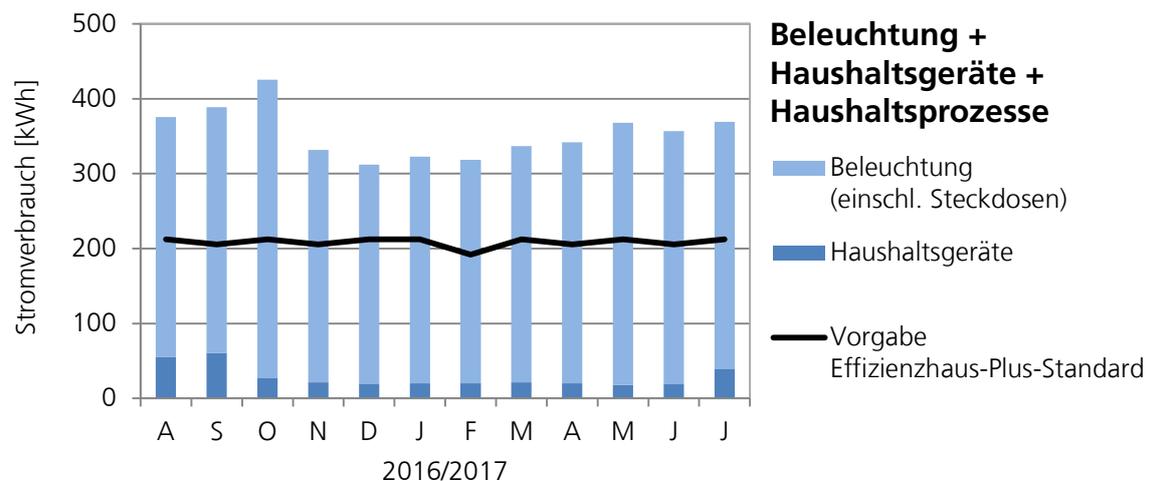


Bild 32:
Stromverbrauch Nutzerstrom gesamt in der Messperiode 2 (MP2) von August 2016 bis Juli 2017.

6.2.4 Vergleich Energieertrag und Energieverbrauch

Von der Photovoltaikanlage wurden in der ersten Messperiode, wie in Bild 33 gezeigt, 11.500 kWh und vom Brennstoffzellenheizgerät 2.475 kWh Strom erzeugt. Aus dem öffentlichen Netz wurden 2.452 kWh Strom und 13.775 kWh Gas entnommen.

Dem gegenüber steht ein gebäudebezogener Endenergieverbrauch von 19.791 kWh/a und eine Einspeisung des selbst generierten Stroms in das öffentliche Netz von 10.410 kWh.

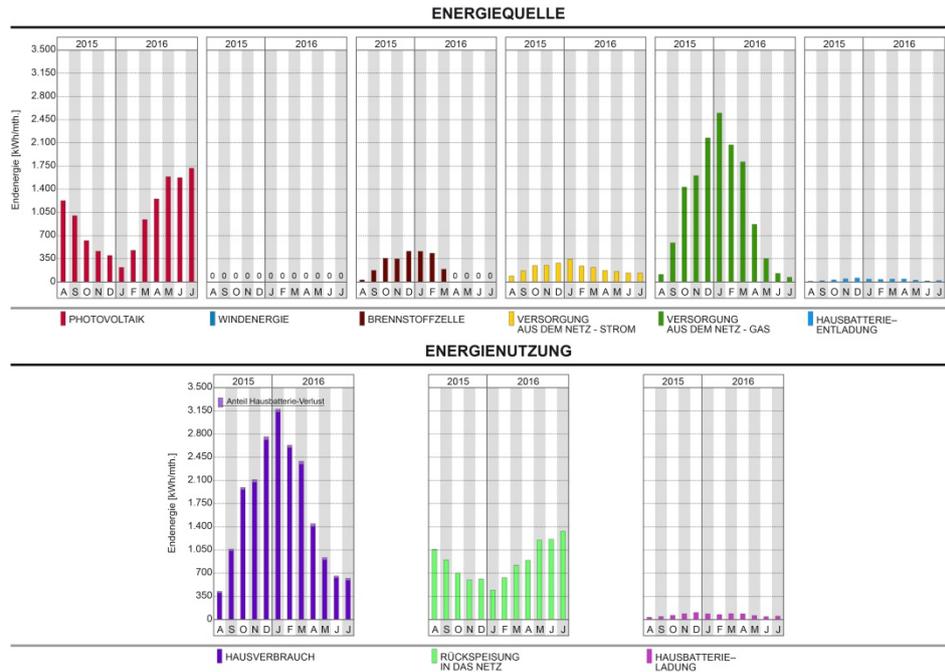


Bild 33: Endenergiebilanz im Effizienzhaus Plus »Alpenchic« in der Messperiode 1 (MP1) von August 2015 bis Juli 2016.

Die stromproduzierenden Anlagen können somit, wie Bild 34 zeigt, den Endenergieverbrauch des Gebäudes nicht decken. Die Differenz zwischen dem Verbrauch (19.791 kWh/a) und dem Ertrag (13.975 kWh/a) beträgt nach einem Jahr -5.816 kWh.

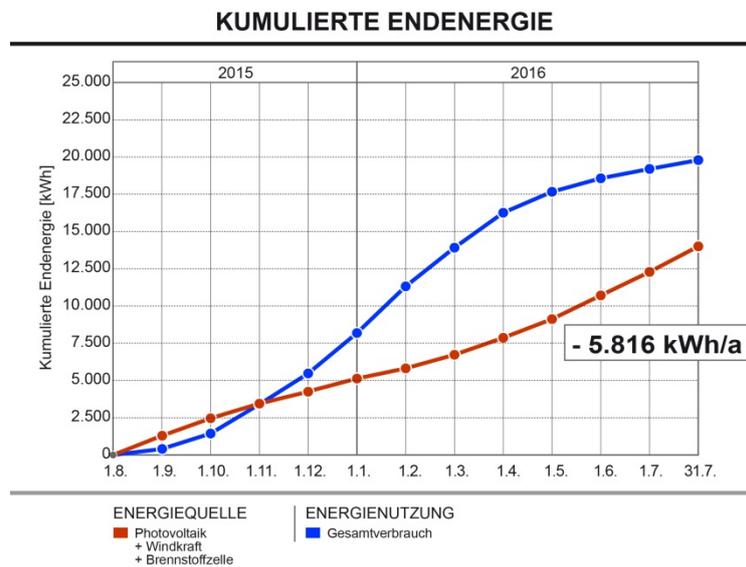


Bild 34: Kumulierter gebäudebezogener Energieverbrauch und Energieertrag aus der Photovoltaik- und Windkraftanlage sowie des Brennstoffzellenheizgerätes des Effizienzhauses Plus »Alpenchic« in der Messperiode 1 (MP1) von August 2015 bis Juli 2016.

Ein Vergleich der gemessenen mit den vorherberechneten Werten in Bild 35 zeigt sowohl Abweichungen bei den Endenergieverbräuchen, es wird mehr Endenergie verbraucht (19.792 kWh/a) als vorherberechnet (17.731 kWh/a), als auch im Ertrag, es wird weniger Strom selbst generiert (13.975 kWh/a) als vorherberechnet (17.968 kWh/a). Insgesamt beträgt damit die endenergetische Unterdeckung -5.816 kWh, vorherberechnet gemäß Ziffer 3.5 war ein Plus von 236 kWh. Analoge Werte ergeben sich, wenn man die Bezüge aus den Netzen (13.775 kWh Gas und 2.452 kWh Strom) ins Verhältnis setzt zum ins öffentliche Stromnetz eingespeisten überschüssigen lokal generierten Strom (11.271 kWh).

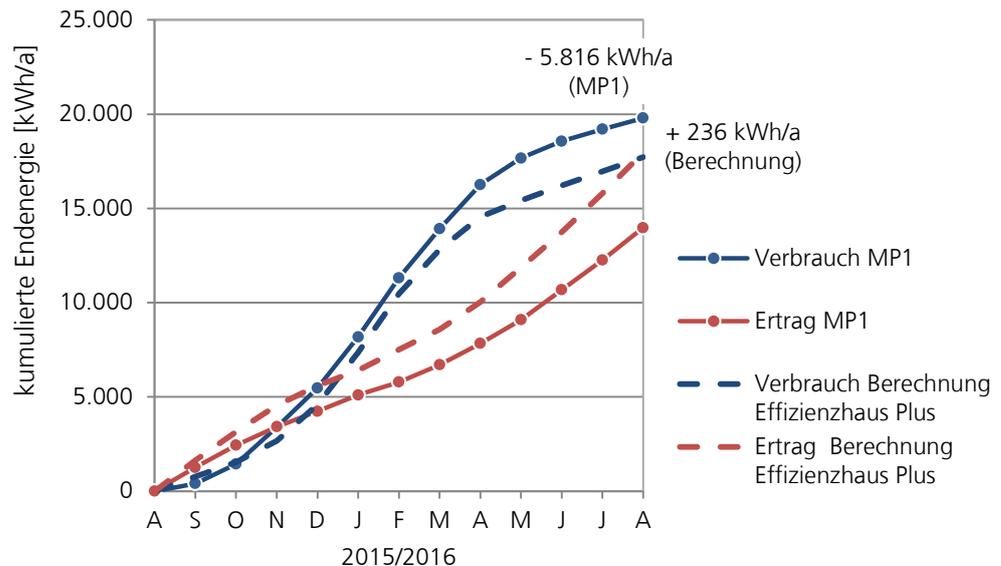


Bild 35: Kumulierter gebäudebezogener Energieverbrauch und Energieertrag aus der Photovoltaik- und Windkraftanlage sowie dem Brennstoffzellenheizgerät des Effizienzhauses Plus »Alpenchic« in der Messperiode 1 (MP1) von August 2015 bis Juli 2016 und der Vorherberechnung nach der DIN V 18599.

Wird die Bilanz auf Basis der Primärenergie erstellt, ergibt sich ein Energieüberschuss:

Energiebezüge aus den Netzen:
 $(13.775 \text{ kWh} * 1,1) + 2.452 \text{ kWh} * 2,6 = 21.528 \text{ kWh}_{\text{Prim}}$

Stromrückspeisung ins öffentliche Netz:
 $10.410 \text{ kWh} * 2,8 = 29.148 \text{ kWh}_{\text{Prim}}$

Primärenergetisch betragen die Überschüsse $7.620 \text{ kWh}_{\text{Prim}}$.

In der zweiten Messperiode wurden insgesamt 15.191 kWh/a Strom erzeugt. Davon hat die PV-Anlage 12.374 kWh und das Brennstoffzellenheizgerät 2.817 kWh erzeugt. Aus dem öffentlichen Netz wurden 1.992 kWh Strom und 1.459 m^3 Erdgas entnommen. Aus dem Gasbezug ergibt sich unter Berücksichtigung der Zustandszahl und dem Brennwert des Gases (vgl. 6.2.1) eine Energiemenge von 14.967 kWh/a .

Dem gegenüber steht ein gebäudebezogener Endenergieverbrauch von 20.878 kWh und eine Einspeisung des selbst generierten Stroms in das öffentliche Netz von 11.271 kWh.

Die stromproduzierenden Anlagen können den Endenergieverbrauch des Gebäudes auch in MP2 nicht decken. Die Differenz zwischen dem Verbrauch (20.878 kWh/a) und dem Ertrag (15.191 kWh/a) beträgt am Ende der zweiten Messperiode -5.688 kWh. Ein Vergleich mit den vorherberechneten Werten zeigt vorrangig Abweichungen in der Endenergieproduktion. Der Ertrag des selbst generierten Stroms unterschreitet die Vorherberechnung um 2.776 kWh, das sind 15 %. Wird die Bilanz auf Basis der Primärenergie erstellt, betragen die Überschüsse 9.916 kWh_{Prim.}

Um den Effizienzhaus-Plus-Standard zu erreichen, sollten alle stromproduzierenden Anlagen einschließlich der Windkraftanlage in Betrieb sein sowie das Brennstoffzellenheizgerät ganzjährig auch zur Stromerzeugung eingesetzt werden. Eine Reduzierung des Endenergieverbrauchs der Beleuchtung mit Hilfe von Präsenzmeldern und den an den Steckdosen befindlichen Geräten sollte angestrebt werden.

6.3 Eigenstromnutzung

Planerisch setzen sich die stromproduzierenden Anlagen aus drei Komponenten zusammen: der Photovoltaikanlage, der Brennstoffzelle und dem Windgenerator. Während der beiden Messperioden war der Windgenerator jedoch nicht in Betrieb. Die Brennstoffzelle war durch interne anlagentechnische Einstellungen nur für 8 Monate in Messperiode 1 betriebsbereit.

Der Eigenverbrauch des selbst generierten Stroms der PV-Anlage und der Brennstoffzelle liegt in der ersten Messperiode, wie Bild 36 zeigt, zwischen 15 % und 35 % und beträgt im Mittel 26 %. Diese scheinbar ungünstigen Systemwerte sind der erforderlichen Substitution des Gasbezuges durch Einspeisung lokal generierten Stroms ins öffentliche Netz geschuldet.

Der monatliche Deckungsgrad des selbst genutzten, eigen generierten Stroms am Gesamtstromverbrauch schwankt zwischen 41 % und 74 % und beträgt im Mittel 59 %. In Anbetracht der Nutzung eines elektrischen Speichers könnte durch einen Optimierungsprozess der Eigennutzungsanteil voraussichtlich noch erhöht werden.

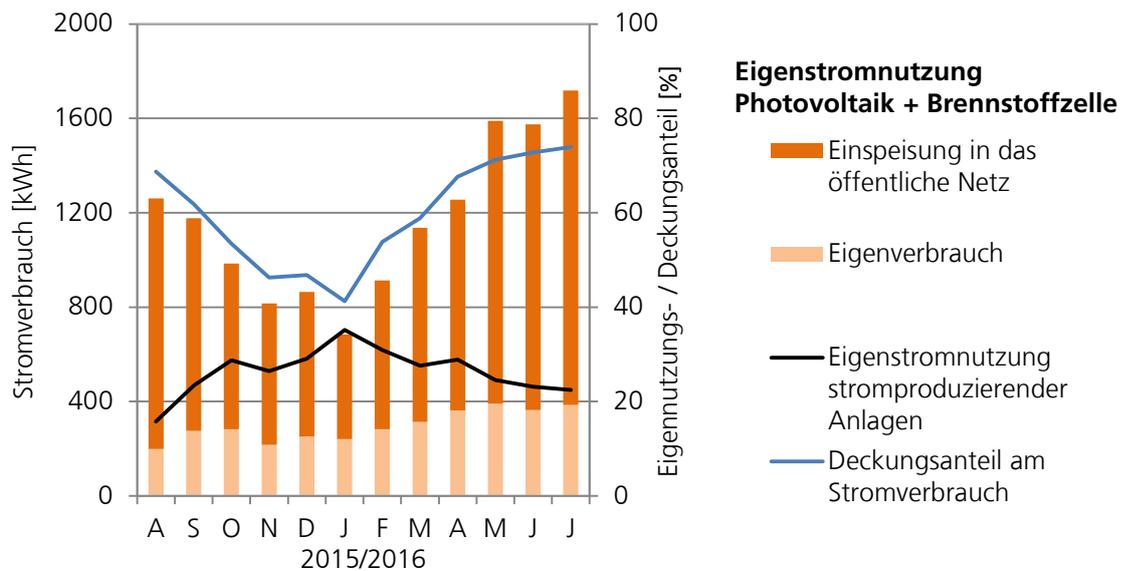


Bild 36: Selbst generierter Strom aufgeteilt in Eigenverbrauch und Netzeinspeisung sowie prozentualer Anteil Eigenstromnutzung und Deckungsanteil in der Messperiode 1 (MP1) von August 2015 bis Juli 2016.

In der zweiten Monitoringperiode betrug der Eigenverbrauch des selbst generierten Stroms 26 %, dessen Deckungsanteil am Stromverbrauch konnte auf 66 % gesteigert werden.

6.4 Brennstoffzellenheizgerät

Das Gebäude wird über ein Brennstoffzellenheizgerät (Vitovalor 300-P, Fa. Viessmann) mit Wärme für Heizung und Trinkwarmwasserbereitung versorgt. Gleichzeitig erzeugt das Gerät Strom. Durch eine interne Programmsteuerung des Herstellers stellte das Gerät die Stromerzeugung am 13. März 2016 ein, so dass herstellerbedingt für die Brennstoffzelle Stromerzeugungsdaten nur im Zeitraum von August 2015 bis 13. März 2016 vorliegen.

In der zweiten Messperiode wurde ein neues Gerät aufgestellt, für das kumulierte Messdaten für den Zeitraum Oktober 2016 bis Juni 2017 vom Hersteller zur Verfügung gestellt wurden. Eine detaillierte, monatliche Darstellung der Messwerte kann daher nicht gegeben werden. Darüber hinaus konnten aufgetretene Unstimmigkeiten zwischen vor Ort abgelesenen Messzählern und übermittelten Werten des Herstellers trotz mehrfachen Nachfragens zu keiner Klärung geführt werden. Daher können detaillierte Aussagen zum Brennstoffzellenheizgerät und seinen Einzelkomponenten nicht generiert werden, das Brennstoffzellenheizgerät wird quasi nur als Black Box dargestellt.

In der 1. Monitoringperiode hat das Gerät

- 1.343 m³ Gas aus dem öffentlichen Netz bezogen und daraus
- 13.775 kWh Energie zur Verfügung gestellt, aufgeteilt in
- 2.475 kWh Strom (Zeitraum August 2015 bis März 2016) und

- 10.666 kWh Wärme (Zeitraum August 2015 bis Juli 2016).

Die Erzeugerverluste betragen

- 633 kWh (Zeitraum August 2015 bis Juli 2016).

Ab Oktober 2016 wurde ein neues Brennstoffzellenheizgerät in Betrieb genommen. In der 2. Monitoringperiode haben die Brennstoffzellenheizgeräte:

- 1.459 m³ Gas aus dem öffentlichen Netz entnommen und daraus
- 14.967 kWh Energie zur Verfügung gestellt, aufgeteilt in
- 2.817 kWh Strom und
- 14.967 kWh Wärme.

Die Erzeugerverluste betragen

- 857 kWh.

Der thermische Jahreswirkungsgrad des Kompaktgerätes (Brennstoffzelle plus Brennwertkessel) liegt in der ersten Messperiode bei 77 % und in der zweiten bei 75 %. Der elektrische Wirkungsgrad liegt bei 18 % (MP1) bzw. 19 % (MP2).

6.5 Lüftungsanlage

Das Gebäude wird über eine mechanische Lüftungsanlage mit Frischluft versorgt. Die Anlage ist ganzjährig in Betrieb und wird im Sommer in den Lüfterstufen 1 und 4 und im Winter in der Lüfterstufe 1 betrieben. Den Lüfterstufen sind in Abhängigkeit des CO₂-Sensors Volumenströme von 95 m³/h bis 130 m³/h in der Lüfterstufe 1 im Sommer und von 250 m³/h in der Lüfterstufe 4 hinterlegt. Im Winter wird die Lüfterstufe 1 mit Luftvolumenströmen von 50 m³/h bis 146 m³/h betrieben.

Die Rückwärmzahl (RWZ) der Lüftungsanlage lässt sich nach der Gleichung

$$RWZ = (q_{Zuluft} - q_{Außenluft}) / (q_{Abluft} - q_{Außenluft})$$

bestimmen. Auf Basis der gemessenen Monatsmittelwerte für die vier kältesten Monate November 2015 bis Februar 2016 beträgt die Rückwärmzahl ca. 90 %. Die Monatsmittelwerte für die Lufttemperaturen der Zuluft, Außenluft und Abluft sind in Bild 37 gezeigt.

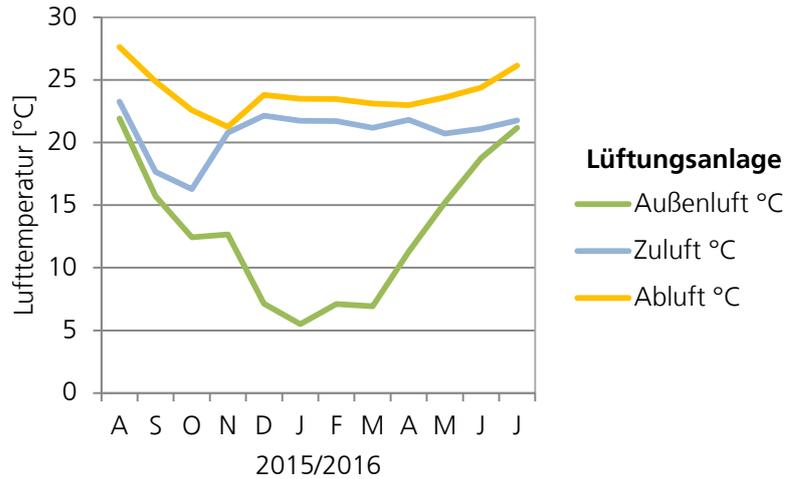


Bild 37: Mittlere monatliche Außenlufttemperatur sowie Zu- und Ablufttemperatur der Lüftungsanlage von August 2015 bis Juli 2016.

In den Sommermonaten wurde in den Nachtstunden, wie Bild 38 zeigt, ein Bypass genutzt, um kühle Außenluft am Wärmeübertrager vorbei als Zuluft in das Gebäude zu führen. Dadurch wird die mittlere Raumlufttemperatur während der Nacht geringfügig gesenkt.

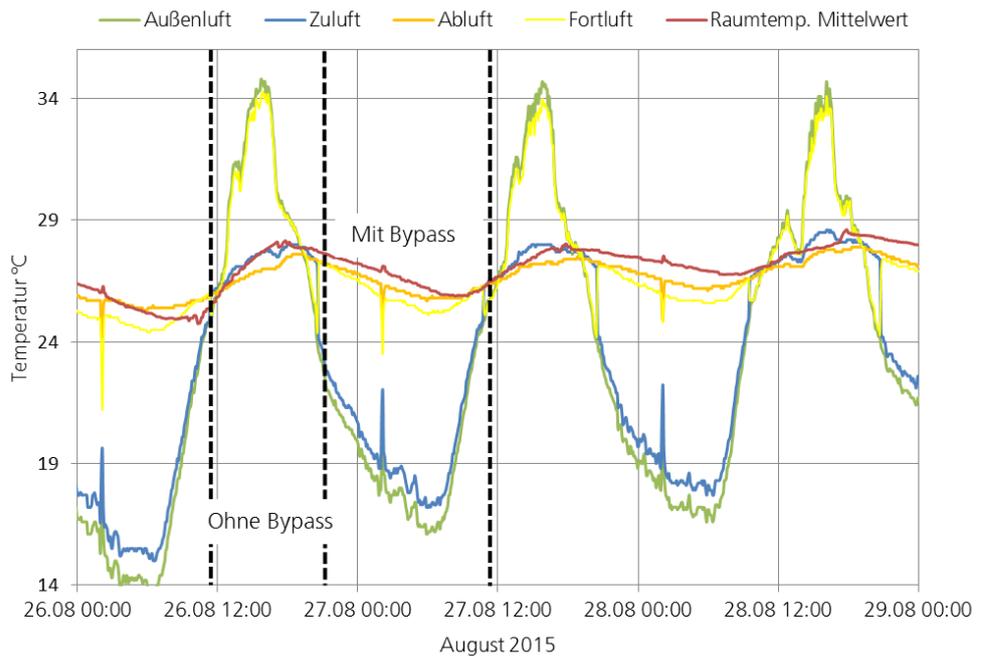


Bild 38: Zu-, Ab- und Fortlufttemperatur der Lüftungsanlage und Außenlufttemperatur sowie die mittlere Temperatur aller Räume im Sommer vom 26. bis 29. August 2015.

6.6 Batterie

Zum Speichern von Energieüberschüssen steht ein Lithium-Ionen-Speicher mit einer nominalen Kapazität von 3,7 kWh zur Verfügung. Die Entladetiefe wird durch den Hersteller mit 90 % angegeben.

Es wurden Messdaten über die Be- und Entladung des Speichers erfasst. Über den Ladezustand liegen keine Daten vor. In der ersten Messperiode wurde der Speicher, wie in Bild 39 zu sehen, mit 831 kWh Strom beladen und lieferte 408 kWh an das Gebäude. Der Verlust der Batterie beträgt somit 423 kWh und liegt bei 51 %.

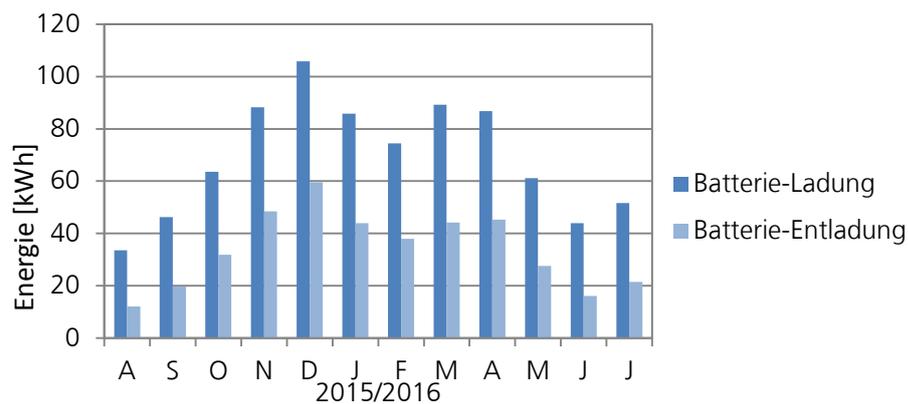


Bild 39:
Be- und Entladung des elektrischen Speichers in der Messperiode 1 (MP1) von August 2015 bis Juli 2016.

In der zweiten Messperiode wurde der Speicher mit 616 kWh Strom beladen und lieferte 269 kWh an das Gebäude. Der Verlust der Batterie beträgt somit 347 kWh und ist mit 56 % ähnlich hoch wie in der ersten Messperiode. Wie in Bild 40 gezeigt, wurde in der zweiten Monitoringperiode weniger Stromüberschuss in der Batterie gespeichert.

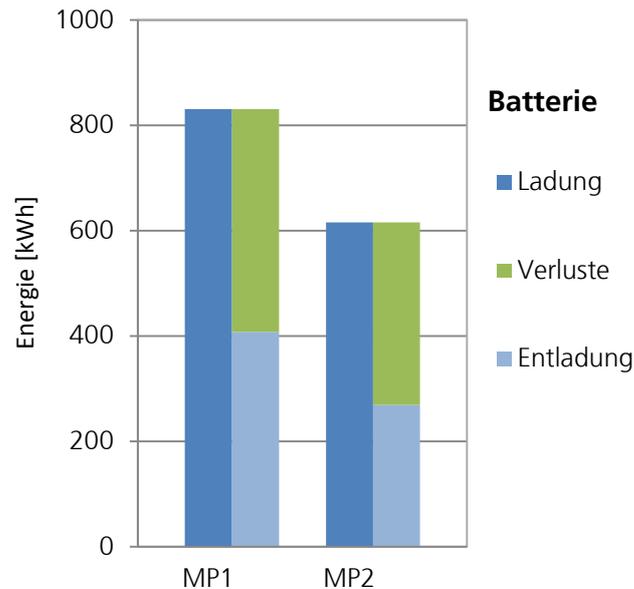


Bild 40:

Vergleich der Be- und Entladung des elektrischen Speichers in der Messperiode 1 (MP1) von August 2016 bis Juli 2017 zur Messperiode 2 (MP2) von August 2017 bis Juli 2018.

Zur Darstellung der Einbindung der Batterie zur erhöhten Eigenstromnutzung in der ersten Monitoringperiode wurde die elektrische Leistung der Erzeuger und Verbraucher für den 10. Dezember 2015 in Bild 41 und für den 11. Dezember 2015 in Bild 42 zusammengestellt. Dabei sind nachfolgende Prozeduren erkennbar:

- Nachts von 0:00 Uhr bis 8:00 Uhr tritt ein Netzbezug auf, obwohl der Gesamtverbrauch des Gebäudes sowie die Ladung der Batterie vom Brennstoffzellenheizgerät gedeckt werden könnten. Es findet ferner ein konstanter Einspeisevorgang statt.
- Von 9:00 Uhr bis 12:00 Uhr wird die Batterie geladen. Da keine Messwerte zum Ladezustand vorliegen, ist fraglich, warum der Ladevorgang um 12:00 Uhr beendet wird, obwohl ein weiteres PV-Angebot vorliegt.
- Zwischen 21:00 und 0:00 Uhr findet ein Ladeprozess aus dem öffentlichen Netz statt. Da auch hier eine Angabe zum Ladezustand fehlt, kann keine Aussage dazu getroffen werden, ob das nächtliche Nachladen der Batterie – zur Vermeidung der Tiefenentladung – zum Schutz der Batterie durchgeführt wird.

Um eindeutige Aussagen zur Regelung der Batterie und Optimierung von Steuerungsprozessen machen zu können, wären ergänzende Messwerte zum Ladezustand der Batterie erforderlich gewesen.

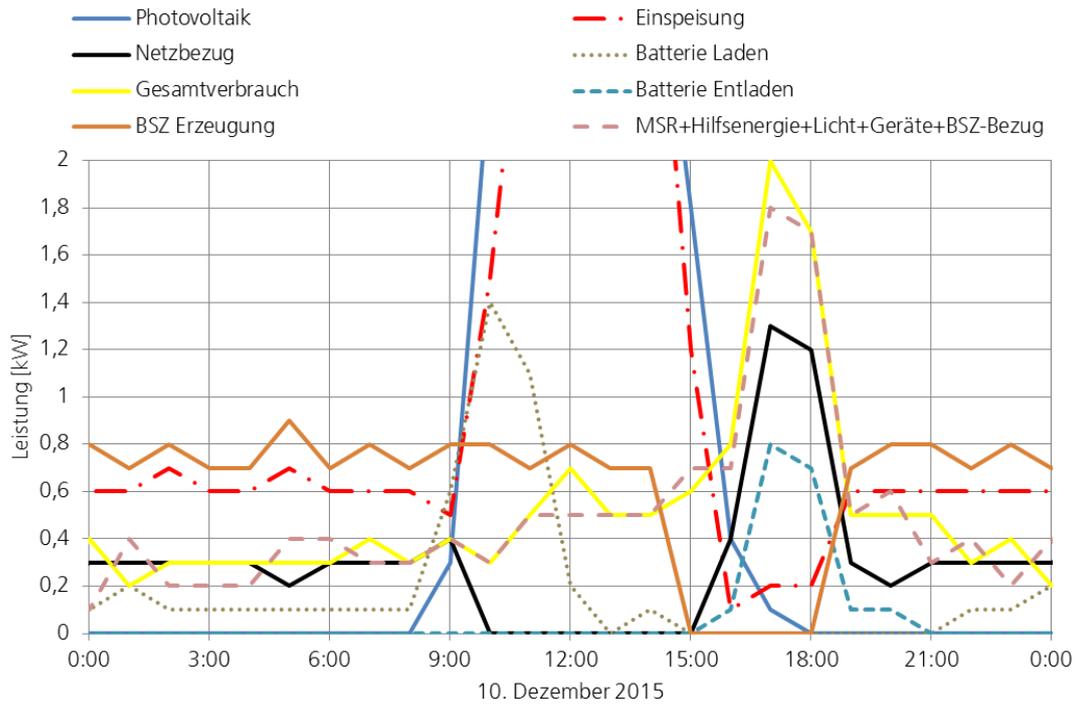


Bild 41:
Elektrische Leistung der Erzeuger und Verbraucher 10. Dezember 2015.

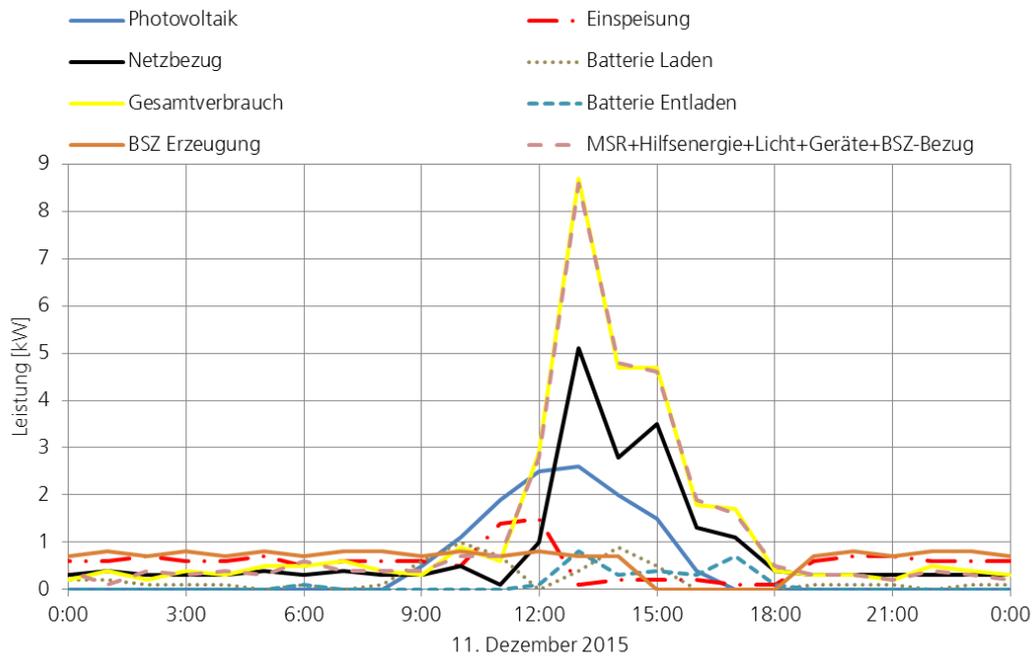


Bild 42:
Elektrische Leistung der Erzeuger und Verbraucher am 11. Dezember 2015.

6.7 Innenraumtemperaturen und Behaglichkeit

Der Verlauf der Innenraumtemperaturen ist für die Heizperiode der ersten Messperiode beispielhaft in Bild 43 für den Monat März 2016 gezeigt. Dabei liefern die Stundenmittelwerte mittlere Temperaturen im Arbeitsraum von 23,5 °C, im Bereich der Küche von 20 °C und im Schlafzimmer von 22,5 °C. Die mittleren Temperaturen der beiden Kinderzimmer betragen ebenfalls 22,5 °C. Somit sind die Raumtemperaturen um teilweise 2,5 bis 3,5 Kelvin höher als in den Vorgaben der EnEV.

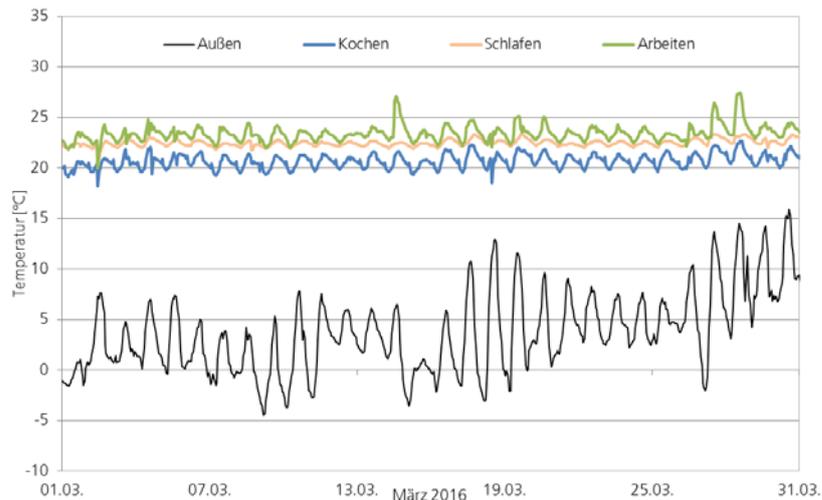


Bild 43:
Verlauf der Stundenmittelwerte der Raumluft und Außenlufttemperatur während der Heizperiode im Monat März 2016.

Für die zweite Messperiode ergeben sich in der Heizperiode, wie in Bild 44 gezeigt, ähnliche Innenraumluft Temperaturverläufe wie im Vorjahr. Die mittlere Raumlufttemperatur im Raum Schlafen liegt mit 23,1 °C und im Raum Arbeit mit 23,9 °C um 3,1 bzw. 3,9 K über der Solltemperatur nach der EnEV.

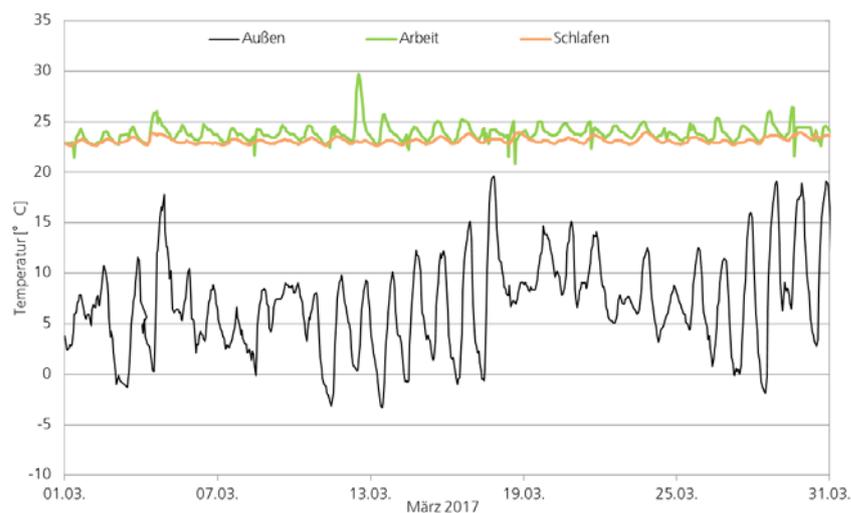


Bild 44:
Verlauf der Stundenmittelwerte der Raumluft und Außenlufttemperatur während der Heizperiode im Monat März 2017.

In ausgewählten Räumen des Erd- und Obergeschosses wurde die sommerliche Temperaturentwicklung betrachtet. Dazu sind die Außenlufttemperatur und die Raumlufttemperatur in den nach Süden grenzenden Aufenthaltsräumen für die beiden Messperioden der Monate Juni 2016 und 2017 sowie Juli 2016 und 2017 in Bild 45 bis Bild 48 dargestellt.

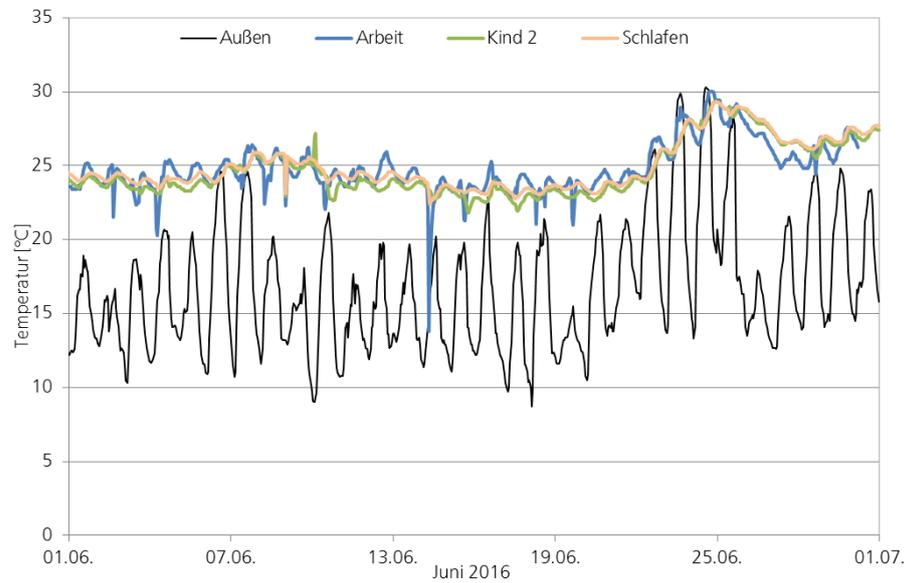


Bild 45:
Verlauf der Stundenmittelwerte der Raumluft und Außenlufttemperatur im Monat Juni 2016.

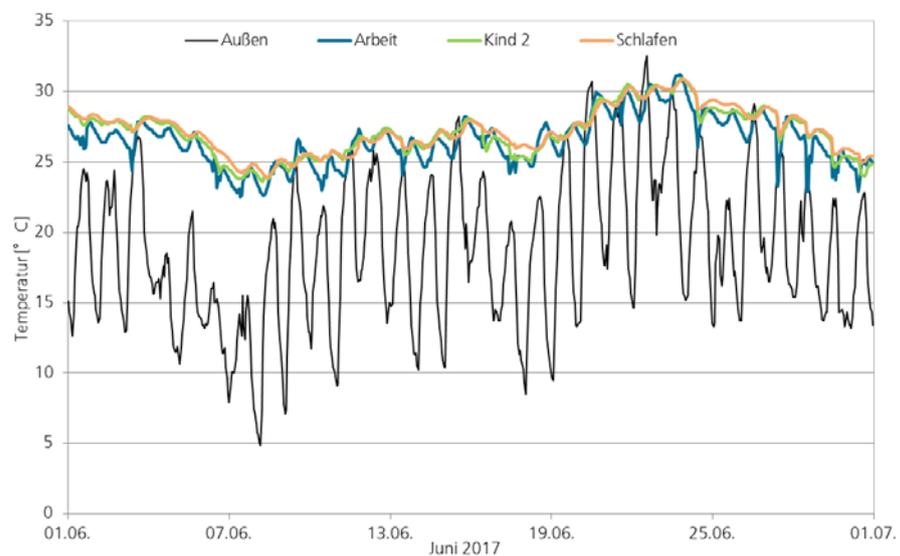


Bild 46:
Verlauf der Stundenmittelwerte der Raumluft und Außenlufttemperatur im Monat Juni 2017.

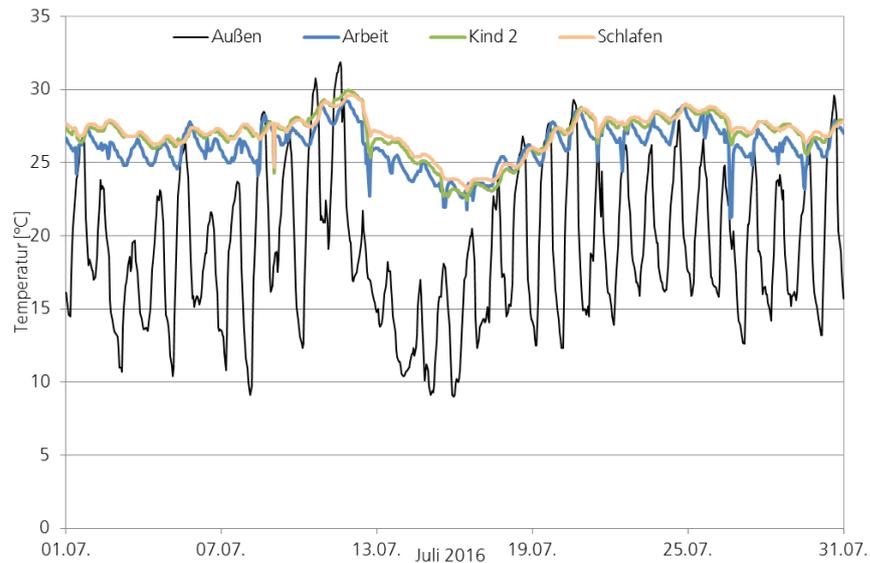


Bild 47:
Verlauf der Stundenmittelwerte der Raumluft und Außenlufttemperatur im Monat Juli 2016.

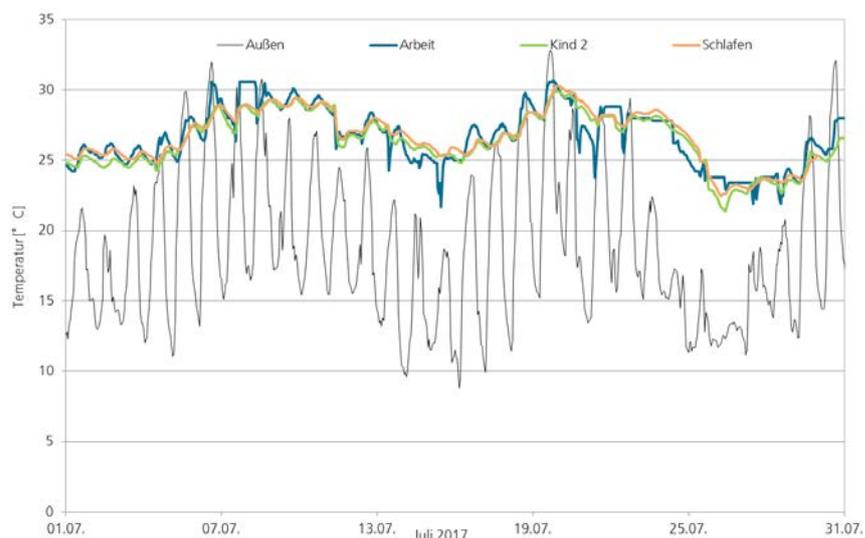


Bild 48:
Verlauf der Stundenmittelwerte der Raumluft und Außenlufttemperatur im Monat Juli 2017.

Bis Mitte Juni 2016 liegt die Raumlufttemperatur bei ca. 25 °C danach sowie im Juni 2017 als auch im Juli 2016 und 2017 schwankt sie zwischen 25 °C und 30 °C. Im Arbeitsraum im Erdgeschoss ist eine nächtliche Abkühlung erkennbar, die jedoch nur teilweise 25 °C unterschreitet. Aus den vorliegenden Messwerten wurde wie in Tabelle 12 dargestellt die Anzahl der Stunden ermittelt, während derer die Raumlufttemperatur über 26 °C lag. In Anlehnung an die technischen Regeln für Arbeitsstätten sollte die Raumluft 26 °C nicht überschreiten. Die maximale Überschreitungsdauer in 2016 betrug im Juli im Schlafzimmer 618 Stunden (ca. 26 Tage) und im Juni 2017 541 Stunden im

Raum Schlafen. Im Gegensatz zu bewohnten Gebäuden ist es bei einer Musterhausnutzung nicht möglich, eine Nachtlüftung über gekippte Fenster zu ermöglichen. Es wird daher der Gebrauch von Sonnenschutzmaßnahmen ange-regt.

Tabelle 12:
Anzahl der Überschreitungen der Raumlufttemperatur über 26 °C.

Monat	Arbeit	Kind 2	Schlafen
	Anzahl Stunden > 26 °C		
Juni 2016	138	182	189
Juli 2016	427	603	618
Juni 2017	439	514	541
Juli 2017	423	405	436

Die Behaglichkeit im Gebäude wird in einem sogenannten »Behaglichkeitsdiagramm« nach Leusden und Freymark [7] graphisch dargestellt. Dabei werden die Stundenmittelwerte der relativen Raumluftfeuchten über den Raumlufttemperaturn aufgetragen. Durch die Darstellung der Behaglichkeitsfelder »noch behaglich« und »behaglich« lassen sich die Messwerte beurteilen.

Im Folgenden sind die Messwerte für zwei Räume des Gebäudes, Schlafen und Arbeit, für einen Monat während der Heizperioden im März 2016 in Bild 49 und Bild 50 sowie für März 2017 in Bild 51 und Bild 52 dargestellt. Die numerischen Werte können der Tabelle A.3 und Tabelle A.4 im Anhang A entnommen werden. Im März befinden sich die Messwerte für beide Räume im noch behaglichen Bereich mit relativen Raumluftfeuchten von ca. 30 %.

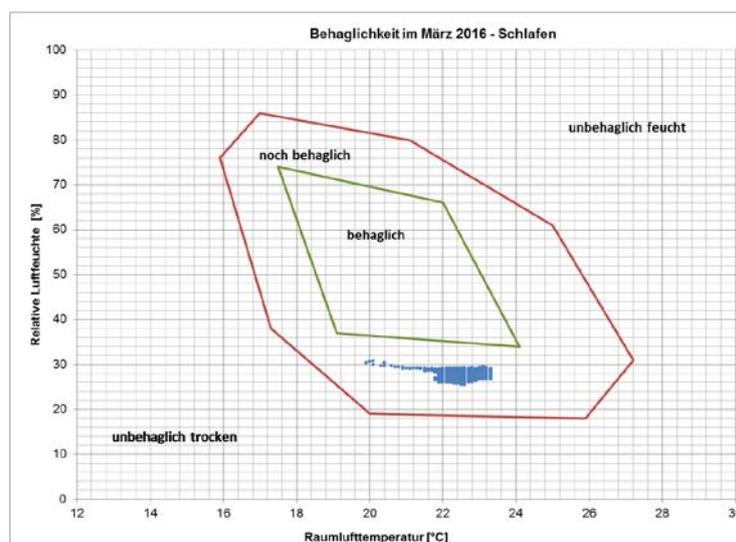


Bild 49:
Behaglichkeitsdiagramm für den Raum Schlafen März 2016.

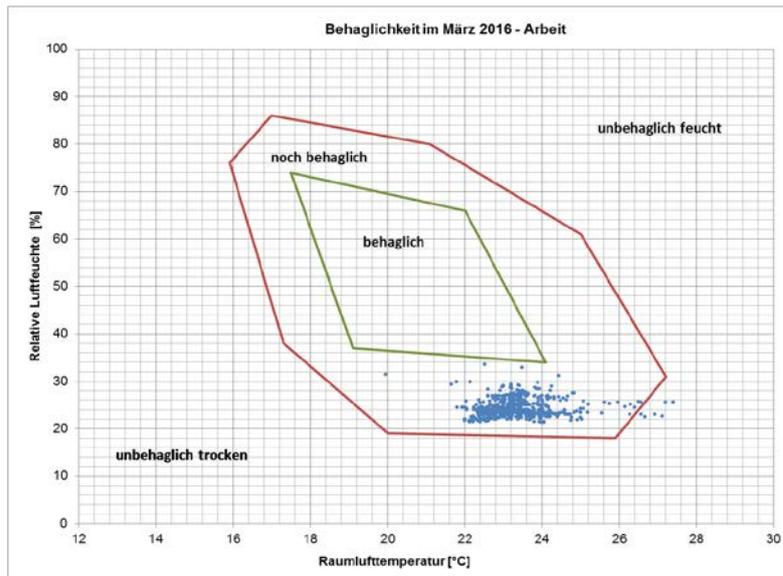


Bild 50:
Behaglichkeitsdiagramm für den Raum Arbeit März 2016.

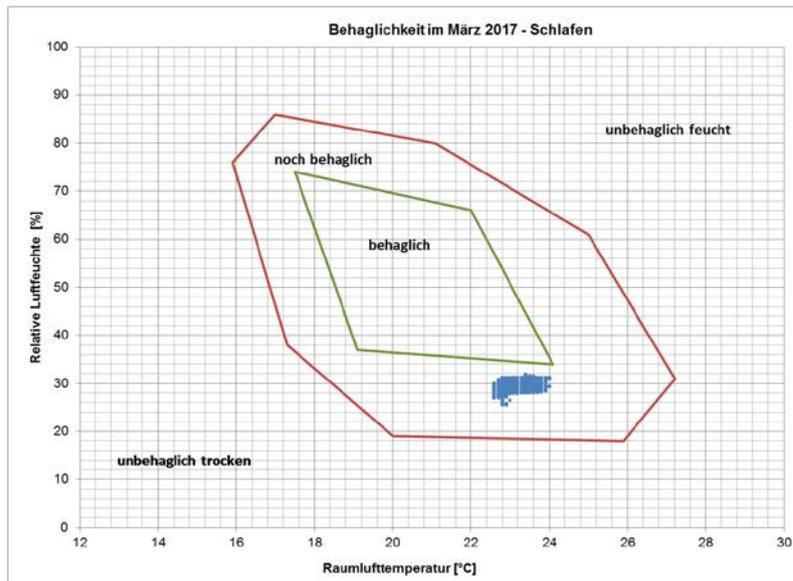


Bild 51:
Behaglichkeitsdiagramm für den Raum Schlafen März 2017.

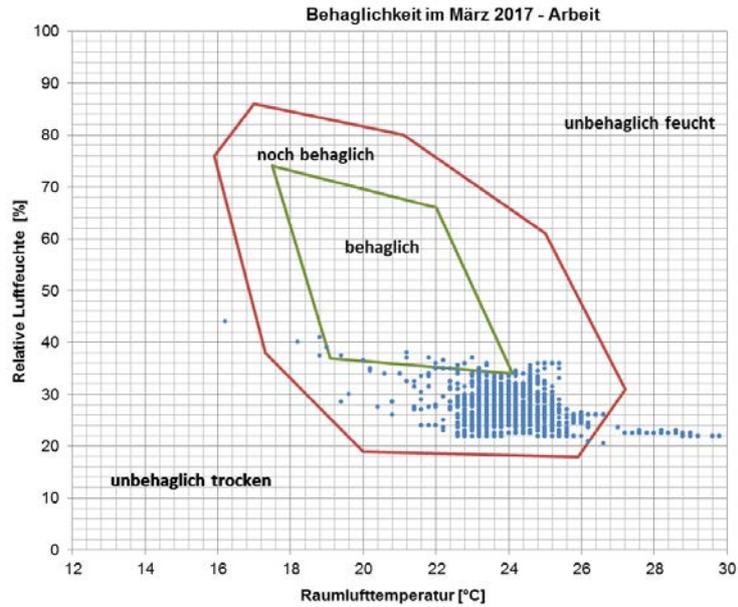


Bild 52:
Behaglichkeitsdiagramm für den Raum Arbeit März 2017.

Für die Sommermonate Juni und Juli 2016 sind die Messwerte für die Räume Kind 2 und Arbeit in Bild 53 bis Bild 56 dargestellt. Bild 57 zeigt das Behaglichkeitsdiagramm für den Raum Kind 2 im Juli 2017.

Im Sommer verschieben sich die Messwerte jeweils in allen Räumen in den noch behaglichen Bereich mit einer relativen Luftfeuchte von ca. 50 % mit einer Tendenz zum unbehaglichen Bereich aufgrund erhöhter Raumlufttemperaturen.

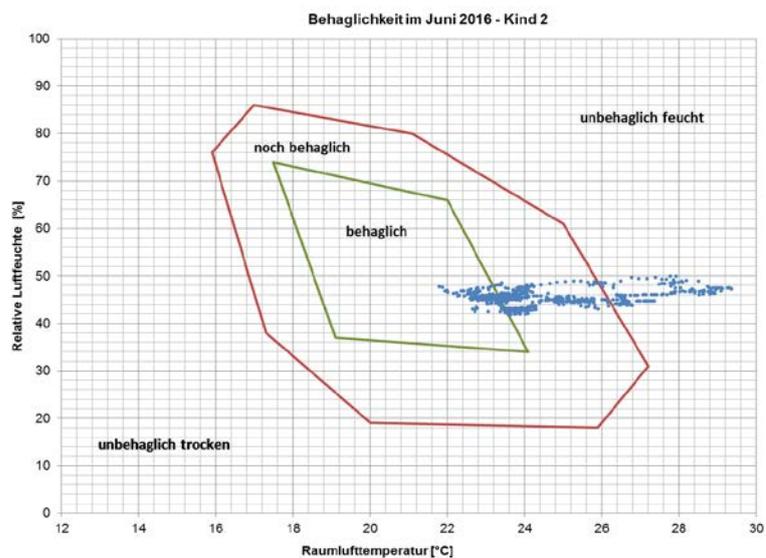


Bild 53:
Behaglichkeitsdiagramm für den Raum Kind 2 Juni 2016.

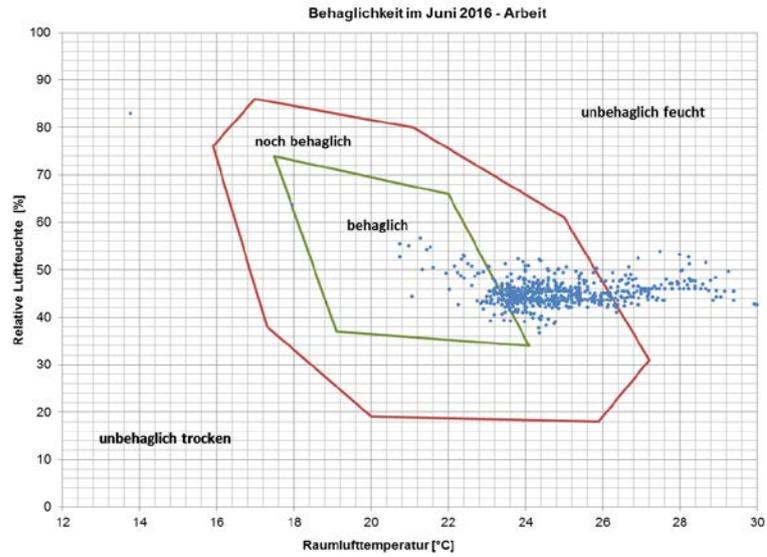


Bild 54:
Behaglichkeitsdiagramm für den Raum Arbeit Juni 2016.

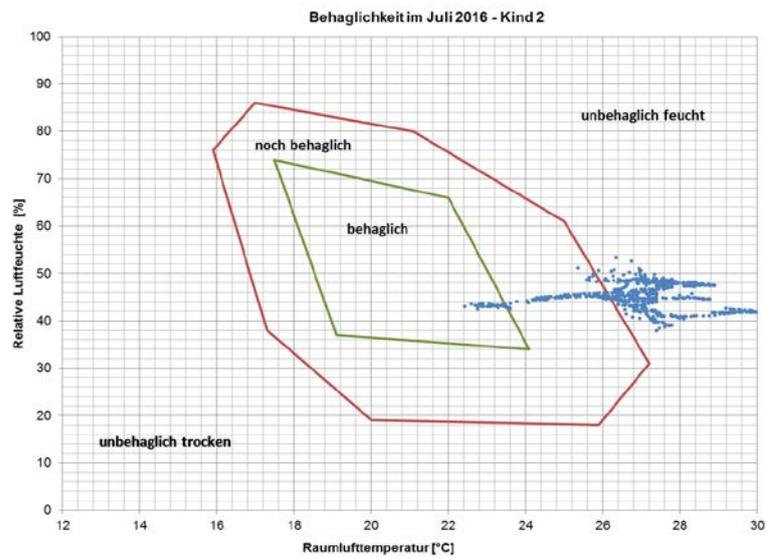


Bild 55:
Behaglichkeitsdiagramm für den Raum Kind 2 Juli 2016.

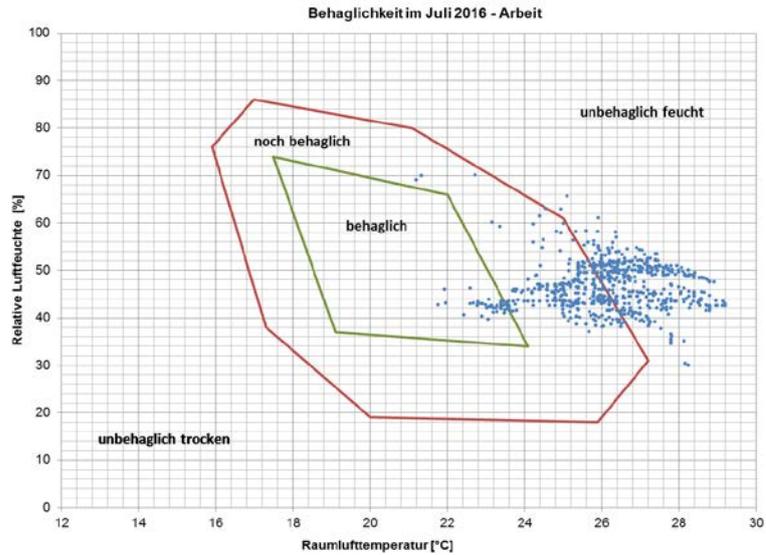


Bild 56:
Behaglichkeitsdiagramm für den Raum Arbeit Juli 2016.

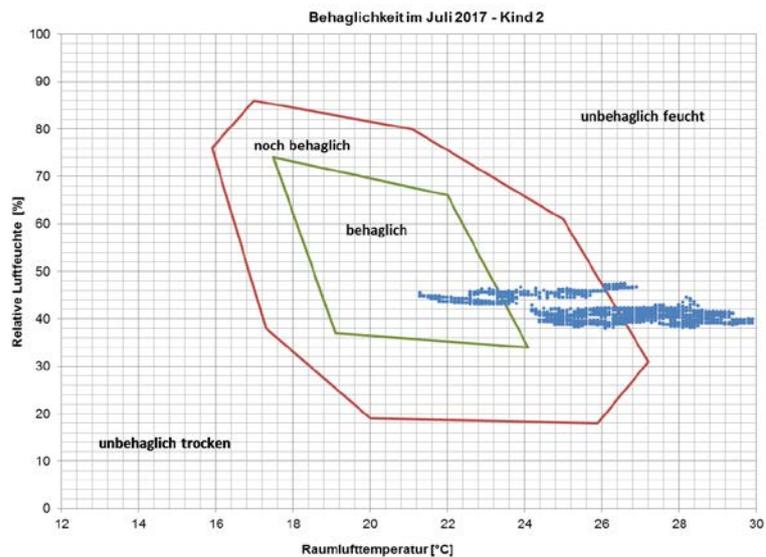


Bild 57:
Behaglichkeitsdiagramm für den Raum Kind 2 Juli 2017.

7 Kosten und Wirtschaftlichkeit

Die Mehrkosten des Effizienzhaus-Plus-Standards gegenüber dem Gebäude im EnEV-Standard nach EnEV 2009 sind in Tabelle 13 gezeigt. Dabei beziehen sich die Bauteilkosten auf den Vergleich des Standards EnEV-Referenzgebäude zu Effizienzhaus Plus. Die Kosten für die Heizungsanlage beinhalten die Mehrkosten des Brennstoffzellenheizgerätes gegenüber einem Gas-Brennwertkessel. Eine Solarthermieanlage ist zwar im EnEV Referenzgebäude, nicht jedoch im Effizienzhaus Plus vorhanden und liefert daher eingesparte Kosten.

Tabelle 13:
 Mehrkosten des Effizienzhaus-Plus-Standards und laufende Kosten des Effizienzhauses Plus Al-
 penchic Baufriz.

Bauteil / Anlage	EnEV 2009 mit EEWärmeG	Mehrkosten inkl. MwSt. Effizienzhaus-Plus-Standard [€]
Außenwand	EnEV-Referenzgebäude	4.317
Dach		7.240
Wand gegen Erdreich		780
Bodenplatte		1.290
Fenster		8.400
Heizungsanlage incl. Speicher	Gas-Brennwertkessel	29.713
Solarthermie	Vorhanden	-2.400
Lüftungsanlage	Vorhanden	3.130
Photovoltaik	Keine	23.000
Batterie	Keine	15.000
Beleuchtung	Standard	300
Geräte	Standard	500
Mehrinvestitionskosten	-	91.270
Energie- und Betriebskosten		
Gas	1.275 €	-223
Strom	1.043 €	-393
Wartung Heizung	130	-
Netzeinspeisevergütung	0 €	-1.358 (PV) -5 (Brennstoffzellenheizger- ät)
Laufende Kosten / Minderkos- ten pro Jahr	2.437 €	-1.979

Die Energiekosten beziehen sich auf das Betriebsjahr 2016 und wurden mit den Versorgern E.ON (Strom) und Stadtwerke München SWM (Gas) abgerechnet. Für den Stromverbrauch des Gebäudes nach EnEV-Standard wurde der durchschnittliche Jahresstromverbrauch einschließlich Trinkwarmwasser eines 2-Personen-Haushalts (durchschnittliche Haushaltsgröße in Deutschland) von 3.440 kWh/a nach (BDEW) [9] berücksichtigt. In Anlehnung an die Vergleichsrechnung für die Anwendung der DIN V 18599 für den Wohnungsbau [10] wird der Gasverbrauch mit 70 kWh/m²a angesetzt. Die Nutzfläche A_N des Gebäudes beträgt 270 m². Der Strombezug (2.452 kWh/a) und die Netzeinspeisung (10.410 kWh/a) für den Effizienzhaus-Plus-Standard wurden auf Basis der Abrechnung mit den Versorgern von 2016 bestimmt und mit einer Einspeisevergütung des Versorgers (Bayernwerke) berücksichtigt. Eine Angabe zu Wartungskosten für das Brennstoffzellenheizgerät liegt nicht vor.

Für das Gebäude ergeben sich investive Mehrkosten in Höhe von 91.270 €. Unter Berücksichtigung der jährlichen Minderkosten im Betrieb von 1.979 € ergibt sich bei einer statischen Amortisationsrechnung eine Amortisationsdauer von 46 Jahren. Zum Erreichen einer statischen Amortisationszeit von 20 Jahren wäre ein Investitionszuschuss von ca. 52.000 € erforderlich.

8 Bewertung

8.1 Energieeffizienz des Modellgebäudes

In der zweijährigen Messperiode von August 2015 bis Juli 2017 konnte das Gebäude zwar einen Primärenergieüberschuss, nicht jedoch einen Endenergieüberschuss erzielen. Die Unterdeckung betrug in der ersten Messperiode 5.816 kWh/a und in der zweiten Messperiode 5.688 kWh/a. Hauptursache für die Unterdeckung waren der nicht betriebene Windgenerator und die fehlende Stromproduktion des Brennstoffzellenheizgerätes von März 2016 bis September 2016 sowie erhöhte Endenergieverbräuche für Beleuchtung und Verbraucher an den Steckdosen.

Der Vergleich der vorherberechneten Bedarfswerte (gemäß Kapitel 3.5) mit den gemessenen hausbezogenen Verbrauchswerten (gemäß Kapitel 6.2) zeigt unterschiedliche Abweichungen der Energieverbräuche. Es ergeben sich die folgenden Werte:

- Endenergiebedarf für Heizung, Trinkwarmwasser einschl. Hilfsenergien: 15.596 kWh (Messung MP1) bzw. 16.631 kWh/a (Messung MP2) anstelle 15.231 kWh (Planung)
- Beleuchtung und Haushalt: 4.196 kWh (Messung MP1) bzw. 4.248 kWh/a (Messung MP2) anstelle 2.500 kWh (Planung)

Dies führt in Summe zu einem ca. 12 % bzw. 18 % höheren Endenergieverbrauch: 19.791 kWh (Messung MP1) bzw. 20.878 kWh/a (Messung MP2) anstelle 17.731 kWh (Planung).

Der Vergleich der gemessenen lokal erzeugten Stromerträge aus der Photovoltaikanlage und des Brennstoffzellenheizgerätes (gemäß Kapitel 6.1) mit dem vorherberechneten erwarteten Ertragswert (13.975 kWh/a (MP1) bzw. 15.191 kWh/a (MP2) anstelle der prognostizierten 17.968 kWh/a gemäß Kapitel 3.5) zeigen negative Abweichungen von 22 % bzw. 15 %.

Beide Effekte führen zu der deutlichen Zielverfehlung des Endenergieüberschusses. Primärenergetisch konnte das Gebäude in beiden Messperioden einen deutlichen Überschuss mit 7.620 kWh_{Prim} (MP1) bzw. 9.916 kWh_{Prim} (MP2) erzielen.

8.2 Verbesserungspotentiale

Die Analyse der Messungen ergab einen extrem hohen Energiebedarf für die Beleuchtung und die technische Kommunikation. Es wird angeregt, trotz der Musterhausnutzung die Beleuchtung über Präsenzmelder zu steuern und die Messwerterfassung der Beleuchtung von der Erfassung übriger Geräte zu trennen.

Der Betrieb des Windgenerators sollte umgesetzt und ein durchgängiger Betrieb des Brennstoffzellenheizgerätes sichergestellt werden.

Im Laufe des Monitorings hat sich gezeigt, dass die alleinige Erfassung von Messdaten durch den Hersteller des Brennstoffzellenheizgerätes zu keiner zufriedenstellenden Messwertübermittlung und damit gewünschten Auswertungstiefe geführt hat. Hier sind Optimierungen im Kommunikations- und Kooperationsprozess wünschenswert.

Trotz der Nutzung eines elektrischen Speichers verfügt das Gebäude über einen geringen Eigenstromnutzungsanteil. Dies ist im Wesentlichen der erforderlichen Substitution des Gasbezuges für das Brennstoffzellenheizgerät durch notwendige Überschüsse bei der photovoltaischen Stromerzeugung geschuldet. Dennoch sollte die Steuerung der Batterie mit den übrigen haustechnischen Prozessen abgeglichen und optimiert werden. Angaben zum Ladezustand der Batterie sind dabei erforderlich. Die Verluste der Batterie werden als sehr hoch eingeschätzt.

In den Sommermonaten zeigen sich erhöhte Raumlufttemperaturen, die im Monat Juli 26 °C anhaltend überschreiten. Hier wird die Nutzung außen liegender Sonnenschutzmaßnahmen empfohlen.

Die Ergebnisse zeigen, dass für ein Effizienzhaus Plus eine Monitoring- und Einregulierungsphase zwingend eingeplant werden muss, um die planerisch ermittelten Kennwerte im praktischen Betrieb prüfen und ggfs. anpassen zu können. Zur Optimierung der Gebäudeperformance ist zudem eine enge, konstruktive Kooperation zwischen Bauherr, Haustechniker bzw. Hersteller der haustechnischen Komponenten und Monitorer zwingend erforderlich.

9 Literatur

- [1] Fraunhofer IBP: Steckbrief Effizienzhaus Plus »Alpenchic« Baufritz (Stand Dezember 2014). Veröffentlicht auf www.forschungsinitiative.de/effizienzhaus-plus/modellvorhaben/netzwerk/.
- [2] Baufritz: Energieeinsparnachweis nach der EnEV 2009 (Stand 8. März 2013, aktualisiert 28. August 2013), unveröffentlicht.
- [3] DIN V 18599:2007-02: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung.
- [4] BMVBS: Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte im Wohngebäudebestand. Bonn, 26. Juli 2007.
- [5] Deutscher Wetterdienst (DWD), Abteilung Klima- und Umweltberatung, Wallneyerstraße 10, 45133 Essen.
- [6] Stadtwerke München SWM www.swm.de.
- [7] Leusden und Freymark: Darstellung der Raumbehaglichkeit für den einfachen praktischen Gebrauch, Gesundheitsingenieur (Heft 16, 1951).
- [8] Destatis, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Daten zur Energiepreisentwicklung 2015.
- [9] BDEW, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Berlin, Energieverbrauch im Haushalt, BDEW Datenkatalog Ausgabe 2015.
- [10] Forschungsinitiative Zukunft Bau, Fachbericht Erarbeitung einer Softwarelösung für die Anwendung der DIN V 18599 für den Wohnungsbau für Zwecke der Vergleichsrechnung der Förderfälle.

Anhang A

Tabelle A.1:

Zusammenstellung des Endenergieverbrauchs für Bezug und Hausverbrauch in der Monitoringperiode 1 (MP1) von August 2015 bis Juli 2016 und als Summenwert in der Monitoringperiode 2 (MP2) von August 2016 bis Juli 2017 .

Monat	Netzbezug	Brennstoffzellenheizgerät					PV-Anlage	lokal erzeugter Strom			Hausverbrauch			Hausbilanz
	Strom	Bezug Gasmenge	Gas* Energieinhalt	Ausgang		Verluste Erzeuger	Ertrag	gesamt	davon		Wärme	Strom	Verluste Erzeuger	
				Wärme (Q _{h,outg})	Strom				eingespeist	selbstgenutzt				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
[kWh]	[m ³]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
Aug. 15	90	11	114	12	32	70	1.228	1.261	1.062	199	12	289	70	858
Sep. 15	170	58	591	329	176	85	1.001	1.177	902	276	329	446	85	141
Okt. 15	247	140	1.432	1.005	359	68	625	984	701	283	1.005	529	68	-977
Nov. 15	251	157	1.605	1.197	351	58	465	816	600	216	1.197	467	58	-1.256
Dez. 15	286	212	2.175	1.663	465	47	401	865	613	252	1.663	538	47	-1.848
Jan. 16	343	249	2.549	2.037	464	49	221	685	444	241	2.037	584	49	-2.449
Feb. 16	242	202	2.070	1.587	435	48	479	913	631	282	1.587	525	48	-1.682
Mrz. 16	219	177	1.813	1.590	194	29	943	1.137	823	314	1.590	533	29	-1.209
Apr. 16	174	85	870	843	0	27	1.255	1.255	893	363	843	536	27	-151
Mai 16	158	35	354	304	0	50	1.590	1.590	1.199	391	304	548	50	688
Juni 16	136	13	130	81	0	49	1.575	1.575	1.211	364	81	500	49	945
Juli 16	136	7	72	18	0	54	1.718	1.718	1.332	385	18	521	54	1.125
MP1	2.452	1.343	13.775	10.666	2.475	633	11.500	13.975	10.410	3.565	10.666	6.017	633	-5.816
MP2	1.992	1.459	14.967	11.293	2.817	857	12.374	15.191	11.271	3.919	11.293	5.911	857	-5.688

*Gas: Brennwert 11,2 kWh/Nm³; Zustandszahl 0,9159

Tabelle A.2:

Zusammenstellung des Hausverbrauchs nach Energieträgern in der Monitoringperiode 1 (MP1) August 2015 bis Juli 2016 und als Summenwert in der Monitoringperiode 2 (MP2) von August 2016 bis Juli 2017.

Monat	Haus- verbrauch Wärme [kWh]	Haus- verbrauch Verluste Erzeuger [kWh]	Hausverbrauch Strom						
			Heizung + TWW [kWh]	sonst. Hilfsenergie [kWh]	Beleuchtung + Steckdosen [kWh]	Haushalts- geräte [kWh]	Sonstiges [kWh]	gesamt [kWh]	davon lokal erzeugt [kWh]
Aug. 15	12	70	10	86	142	35	16	289	199
Sep. 15	329	85	18	109	233	67	20	446	276
Okt. 15	1.005	68	15	117	298	79	21	529	283
Nov. 15	1.197	58	15	123	231	78	19	467	216
Dez. 15	1.663	47	12	143	265	97	21	538	252
Jan. 16	2.037	49	12	141	326	85	21	584	241
Feb. 16	1.587	48	11	129	289	77	19	525	282
Mrz. 16	1.590	29	9	147	274	81	22	533	314
Apr. 16	843	27	7	129	306	75	20	536	363
Mai 16	304	50	7	117	335	69	21	548	391
Juni 16	81	49	7	104	312	58	20	501	364
Juli 16	18	54	7	108	333	53	21	521	385
MP1	10.666	633	128	1.453	3.342	854	241	6.017	3.565
MP2	11.293	857	-	1.388	3.906	342	276	5.911	3.919

Tabelle A.3:

Zusammenstellung der Monatsmittelwerte der Raumlufttemperaturen und relativen Luftfeuchten in den Aufenthaltsräumen von August 2015 bis Juli 2016.

Monat	Arbeit		Kochen		Schlafen		Kind 1		Kind 2	
	[°C]	[%]	[°C]	[%]	[°C]	[%]	[°C]	[%]	[°C]	[%]
Aug. 15	27,63	40,5	26,15	43,6	27,58	39,8	27,24	41,2	27,33	41,3
Sep. 15	23,86	40,8	21,98	45,3	23,48	41,7	22,94	43,8	23,03	44,0
Okt. 15	22,83	38,2	21,25	42,1	22,31	40,5	21,78	42,9	21,86	42,7
Nov. 15	23,04	34,5	21,35	38,4	22,29	38,1	21,76	40,9	21,82	40,7
Dez. 15	23,24	28,7	20,93	33,4	22,36	32,7	21,82	35,1	21,88	35,2
Jan. 16	23,13	26,0	20,87	29,8	22,34	29,4	21,81	31,9	21,85	32,0
Feb. 16	23,32	26,2	20,61	30,8	22,37	29,3	21,96	31,2	21,98	31,5
März 16	23,42	24,7	20,70	28,8	22,48	27,6	22,05	29,1	22,06	29,5
Apr. 16	23,46	30,4	21,27	34,6	22,69	32,0	22,26	33,4	22,26	33,8
Mai 16	24,24	35,0	22,22	39,4	23,87	34,5	23,53	36,1	23,57	36,6
Juni 16	24,87	45,2	22,81	50,9	25,02	43,2	24,57	45,1	24,7	45,4
Juli 16	26,13	46,7	23,98	52,6	27,06	43,9	26,75	45,3	26,88	45,4
Mittelwert (Okt. – April)	23,21	29,8	21,00	34,0	22,41	32,8	21,92	34,94	21,96	35,0

Tabelle A.4:

Zusammenstellung der Monatsmittelwerte der Raumlufttemperaturen und relativen Luftfeuchten in den Aufenthaltsräumen von August 2016 bis Juli 2017.

Monat	Arbeit		Kochen		Schlafen		Kind 1		Kind 2	
	[°C]	[%]	[°C]	[%]	[°C]	[%]	[°C]	[%]	[°C]	[%]
Aug. 16	25,35	47,7	23,08	54,2	25,74	46,5	25,32	47,9	25,47	48,0
Sep. 16	24,6	46,6	22,21	53,7	24,78	46,5	24,25	48,1	24,41	48,1
Okt. 16	21,88	40,9	19,99	45,9	21,74	42,7	21,09	44,3	21,21	44,2
Nov. 16	22,02	38,0	22,45	37,5	22,49	38,6	21,76	40,9	21,87	40,9
Dez. 16	22,24	29,9	21,06	31,4	22,7	31,8	21,78	34,3	21,79	34,0
Jan. 17	21,68	22,5	19,84	24,7	22,41	24,9	21,13	27,7	21,21	27,0
Feb. 17	23,17	27,1	23,03	27,4	22,95	27,3	22,4	29,0	22,54	27,0
März 17	23,89	27,6	22,64	29,8	23,15	29,3	22,73	30,6	22,79	30,6
Apr. 17	23,98	27,8	22,45	30,6	23,24	30,0	22,83	31,0	22,87	31,0
Mai 17	24,79	35,2	23,49	37,9	24,83	33,8	24,49	35,2	24,6	35,5
Juni 17	26,49	40,8	24,43	45,8	27,23	38,1	26,87	39,2	27,06	39,1
Juli 17	26,68	41,8	25,51	44,7	26,7	40,3	26,26	41,6	26,43	41,4
Mittelwert (Okt. – April)	22,67	30,50	21,64	32,50	22,67	32,10	21,96	33,98	22,04	33,82