

## **Projektbericht**

unw-Projektförderung Erneuerbare Energien / Energieeffizienz

"Monitoring eines Einfamilienhauses (KfW – Effizienzhaus - 40) mit Luftwärmepumpe, Photovoltaikanlage, Hausautomation und Batteriespeicher"

### **Projektförderung**

Dieses Projekt wurde durch den "unw – Ulmer Initiativkreis nachhaltige Wirtschaftsentwicklung e.V." gefördert. Dieser hat die Aufgabe, einen Teil des Stiftungskapitals der "Solarstiftung Ulm / Neu-Ulm", die 2013 in eine Verbrauchsstiftung umgewandelt wurde, als Projektträger zur Förderung von Projekten im Bereich der erneuerbaren Energien und Energieeffizienz in Zeiten der Energiewende zu verwenden.



### **Impressum**

### **Projektleitung**

### Prof. Dr.-Ing. Gerhard Mengedoht

Technische Hochschule Ulm (THU) Institut für Energie- und Antriebstechnik (IEA) Eberhard-Finckh-Straße 11 89075 Ulm



### <u>Projektbearbeiter</u>

### Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Alexander Haag

Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Technischen Hochschule Ulm (THU) Institut für Energie- und Antriebstechnik (IEA) Eberhard-Finckh-Straße 11 89075 Ulm

### **Unterstützung beim Monitoring**

### Dipl.-Ing. (FH) Gunter Lindemann

Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Technischen Hochschule Ulm (THU) Institut für Energie- und Antriebstechnik (IEA) Eberhard-Finckh-Straße 11 89075 Ulm

### **Projektpartner**



# Casa Nova Planungs- und Wohnbaugesellschaft für Neubau und Sanierung

Die Casa Nova GmbH als Bauträger und Architekturbüro ist in der Ulmer Region seit nunmehr über 30 Jahren bekannt für den Bau energiesparender Häuser mit innovativen Energiekonzepten und nutzt die langjährige Erfahrung aus dem Bau von zahlreichen zertifizierten Passivhäusern, um gegenwärtig mit der Weiterentwicklung zum Nullenergiehaus den nächsten Schritt auf dem Weg zur Energiewende einzuläuten.

Die Firma Casa Nova war Bauträger des Projekthauses. Für dieses Projekte wurde die gesamte Messtechnik bereitgestellt und das Hausautomationssystem um einige Anlagenteile erweitert.

#### Locher Haustechnik GmbH

Die Firma Locher begleitete das Projekt bei heizungstechnischen Fragestellungen und unterstützte neben Know How mit kleineren Umbau- und Optimierungsmaßnahmen.



#### **Lonetal Elektrotechnik GmbH**

Die Firma Lonetal Elektrotechnik begleitete das Projekt bei elektrotechnischen Fragestellungen und unterstützte neben Know How mit kleineren Umbau- und Optimierungsmaßnahmen.



### Danksagung:

Dem "unw – Ulmer Initiativkreis nachhaltige Wirtschaftsentwicklung e.V." danken wir für die finanzielle Unterstützung für dieses Projekt.

Prof. Dr.-Ing. Roland Koenigsdorff vom Institut für Gebäude- und Energiesysteme (IGE) der Hochschule Biberach danken wir für die kritische Durchsicht dieses Abschlussberichtes.

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Mengedoht, Ulm im September 2020

### Kurzfassung

Das im Projekt untersuchte Haus wurde als hoch wärmegedämmtes Einfamilienhaus mit Einliegerwohnung im KfW-Effizienzhaus-40-Standard gebaut. Es wird durch eine Split-Luftwasserwärmepumpe beheizt und auf dem Dach ist eine Photovoltaikanlage verbaut. Im Projektverlauf wurde ein Batteriespeicher nachgerüstet. Das Haus wurde im Projektzeitraum von einer vierköpfigen Familie bewohnt, die Einliegerwohnung von einer Person. Als technische Besonderheit verfügt das Haus über eine intelligente Hausautomation. Es wurden Optimierungsmöglichkeiten von Strom- und Wärmeverbrauch sowie der Anlagentechnik untersucht, sowie allgemein die erfassten Verbräuche mit berechneten Werten verglichen.

Das Monitoring zeigte, dass die Berechnung nach EnEV, nach den Normenreihen DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10, für die Heizung realistische Werte ausgibt, sofern die Innentemperatur an die tatsächlichen Gegebenheiten angepasst wird. Der angesetzte Brauchwarmwasserverbrauch passt nicht zum gehobenen Wohnbau, mit einer viel geringeren Belegungsdichte, als der Verbrauchsansatz es vermuten lässt.

Bei der Luftwärmepumpe zeigte sich, dass durch falsche Reglereinstellungen bei Betriebszeiten und Heizkurve hohe Effizienzverluste die Folge sein können. Darüber hinaus konnte mit der Anlage durch die Vorgabe von Temperaturen und Betriebszeiten nach tatsächlichem Bedarf eine deutliche Effizienzverbesserung erzielt werden. Durch die Optimierungsmaßnahmen konnte die Jahresarbeitszahl nach 2,4 im ersten Messjahr um 0,4 auf 2,8 im zweiten Messjahr verbessert werden, bleibt aber bei einer Größenordnung von um die 3 dennoch weit von den errechneten Werten nach VDI entfernt. Die Hintergründe werden im Bericht erläutert und sind wesentlich durch die Abweichungen zwischen Prüfstandsbetrieb und Realbetrieb begründet.

Die Simulation der Photovoltaikanlage lieferte sehr genaue Ergebnisse. Der Eigenverbrauch von selbst erzeugtem Strom im Haus lag bei rund 28% (im ersten Jahr ohne Batteriespeicher). Ohne Wärmepumpe als strombasierte Heizung wäre der Eigenverbrauch bei etwa 22% gelegen. Im zweiten Jahr erhöhte sich der Anteil durch das Batteriespeichersystem auf rund 51%. Sollwertüberhöhungen bei der Beladung des thermischen Speichers mit überschüssigem PV-Strom zeigten sich im Praxisbetrieb als schwer umsetzbar und bedingen ein entsprechend ausgelegtes Speicherkonzept. Der verbaute Batteriespeicher konnte aufgrund seiner hohen Verluste weder ökonomisch noch ökologisch überzeugen. Überzeugen konnte hingegen die sog. intelligente Hausautomation, die signifikante bis zu 10% Stromeinsparung ermöglicht und zudem die Effizienz der Wärmepumpe verbessert, indem der Wärmepumpenregelung jederzeit eine bedarfsgerechte Solltemperatur übergeben wird. Ebenso wurden die Heizkreise passend dazu geregelt. Der Heizwärmeverbrauch wurde dadurch aber, trotz solaroptimierter Steuerung der Beschattungseinrichtungen, nur unwesentlich beeinflusst. Das Automationssystem arbeitet selbst effizient; die Leistungsaufnahme liegt bei ca. 20/30 W.

Im Kontext zur Energiewende und zum Klimaschutz wird beim Einsatz einer Wärmepumpe in Gebäuden empfohlen statt dem hier vorgestellten Luftwärmepumpen-System ein erdgekoppeltes Wärmepumpen-System (mit z. B. Grundwasserbrunnen, Erdwärmesonde, Erdkollektoren, etc.) einzusetzen. Als Alternative zur Wärmepumpe können aktuell zudem auch Solarthermische Systeme im Kontext zur Wärmewende effizient und wirtschaftlich genutzt werden [BAFA2020].

### Inhaltsverzeichnis

PROJEKTFÖRDERUNG	2
IMPRESSUM	2
PROJEKTPARTNER	2
KURZFASSUNG	4
1. PROJEKTZIELE	7
2. DAS GEBÄUDE	9
2.1 GEBÄUDEDATEN	9
2.2 Architektur	10
2.3 BAUTEILAUFBAUTEN	10
2.4 ANLAGENTECHNIK	15
3. DAS MONITORING-KONZEPT	20
3.1 ANLAGEN- UND MESSSCHEMA	
3.2 SENSOREN	21
3.3 DATENAUFZEICHNUNG UND MESSPUNKTLISTE	23
3.4 WETTERDATEN	26
4. ERGEBNISSE DER ERSTEN MESSPERIODE	29
4.1 KLIMATISCHE BEDINGUNGEN	29
4.2 ELEKTRISCHE ENERGIE	30
4.3 THERMISCHE ENERGIE	33
4.4 TEMPERATUREN ALLGEMEIN	35
4.5 SYSTEMEFFIZIENZ	36
5. ERGEBNISSE DER ZWEITEN MESSPERIODE	41
5.1 KLIMA	41
5.2 ELEKTRISCHE ENERGIE	42
5.3 THERMISCHE ENERGIE	44
5.4 TEMPERATUREN ALLGEMEIN	46
5.5 SYSTEMFFFIZIENZ	46

6. ANLAGENTECHNIK IM DETAIL	53
6.1 WÄRMEPUMPE	53
6.2 Hausautomation	73
6.3 PV-Anlage	76
6.4 BATTERIESPEICHER	82
6.5 SYSTEMOPTIMIERUNG MIT HILFE VON SIMULATIONSSOFTWARE POLYSUN	83
7. ULMER NETTO-NULLENERGIEHAUS	85
7.1 FÖRDERRICHTLINIE	85
7.2 BERECHNUNGSVORSCHRIFTEN	85
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	88
TABELLENVERZEICHNIS	90
LITERATURVERZEICHNIS	91

### 1. Projektziele

Nullenergiehäuser leisten einen wichtigen Beitrag zur Energiewende, weil erstmals nicht mit jedem Neubau sich der Jahres-Energieverbrauch erhöht. Erst dadurch wird, angesichts der wachsenden Weltbevölkerung, dem ständig steigenden fossilen und nuklearen Ressourcenbedarf mit den einhergehenden Preissteigerungen entgegengewirkt. Diese Vorteile können selbstverständlich nur eintreten, wenn die Funktionalität der Nullenergiehäuser sichergestellt ist. Dies geschieht aber nicht alleine durch Verbesserungen an der Gebäudehülle sondern auch der Anlagentechnik.

Derzeit ist der Einsatz von Wärmepumpen in Neubauten, zunehmend aber auch in Sanierungsobjekten, häufig das Mittel der Wahl. Maßgeblichen Einfluss haben hier asiatische Großkonzerne, die fertig entwickelte Klimageräte zum Zwecke des Heizbetriebs "missbrauchen" und so mit extrem preiswerten Anlagen in den Kampf um Marktanteile gehen. Um konkurrenzfähig zu bleiben, entwickelten auch namhafte europäische Hersteller von Heizungsanlagen solche "Billig"-Luftwärmepumpen.



Abbildung 1: Absatzzahlen von Heizungswärmepumpen [BWP-01]

Mit dem Projekt wurden Fragestellungen zu verschiedenen Themenbereichen bearbeitet:

### Hausautomation/Smart Home

Wie kann mit dem Einsatz einer intelligenten, kostengünstigen und stromeffizienten Hausautomation die Wärmeerzeugung und -verteilung optimiert werden - welches Einsparpotential hinsichtlich des Heizwärmeverbrauchs kann sich ergeben? Welchen Eigenstrombedarf hat ein solches System?

### Effizienz von Luftwärmepumpen im hochwärmegedämmten Einfamilienhaus

Wie kann die Effizienz einer herkömmlichen Luftwärmepumpe, die derzeit in großer Stückzahl in Neuund Umbauten als neuer Wärmeerzeuger eingesetzt wird, so weit verbessert und optimiert werden, damit errechnete Jahresarbeitszahlen SCOP gemäß aktueller VDI 4650 Blatt 1 (vormals JAZ) auch realistisch in der Praxis erreicht werden. Welchen Einfluss haben das Betriebsverhalten (z.B. Taktbetrieb) und das Speichersystem?

### Stromerzeugung mit Photovoltaikanlage und Stromspeicherung

Ist eine Photovoltaikanlage obligatorisch für das im Projekthaus verwendete Energiekonzept beim Einsatz einer Luftwärmepumpe als Wärmeerzeuger? Macht eine Sollwertüberhöhung zur Nutzung von überschüssigem Strom Sinn und wie kann der Eigenverbrauch gesteigert werden? Kann ein Stromspeicher eine energetisch und wirtschaftlich sinnvolle Ergänzung sein?

### Validierung Effizienzhaus/"Netto-Nullenergiehaus"

Sind die ermittelten Werte im Rahmen der Effizienzhaus-Berechnung realitätsnah und wie kann die Berechnung zum "Netto-Nullenergiehaus" der Stadt Ulm verbessert werden?

### 2. Das Gebäude

Das im Rahmen dieses Projekts betrachtete Gebäude befindet sich in Blaustein. Es handelt sich hier um ein Einfamilienhaus mit Einliegerwohnung. Die Fertigstellung und Bezugsfertigkeit des Gebäudes waren im September 2015.

### 2.1 Gebäudedaten

Im Folgenden werden die wesentlichen Gebäudedaten aufgeführt:

Bauherr	Casa Nova Planungs- und Wohnbaugesellschaft, Ulm
Architekt	Heinz Neudeck-Mützel, Fa. Casa Nova
Bauträger	Casa Nova Planungs- und Wohnbaugesellschaft, Ulm
HLS-Planung	Casa Nova Planungs- und Wohnbaugesellschaft, Ulm
	EPB GmbH Erbacher Planungsbüro, Erbach
HLS-Installation	Locher Haustechnik GmbH, Erbach
Elektro-Installation	Actensys GmbH, Ellzee
Elektro-Projektbetreuung	Lonetal Elektrotechnik GmbH, Breitingen
Monitoring	Technische Hochschule Ulm (THU),
	Institut für Energie- und Antriebstechnik (IEA)

Tabelle 1: Beteiligte Firmen am Bau

Baujahr	2015
Wohnfläche Hauptwohnung	126 m²
Wohnfläche Einliegerwohnung	32 m²
Nutzfläche (ohne Garage)	24 m²
Wohn- und Nutzfläche mit ELW	182 m²
Wohn- und Nutzfläche ohne ELW	150 m²
Wärmeübertragende Hüllfläche A	473 m²
Beheiztes Gebäudevolumen V <sub>e</sub>	672 m <sup>3</sup>
Gebäudenutzfläche nach EnEV A <sub>N</sub>	215 m <sup>2</sup>
Hüllflächenfaktor A/V <sub>e</sub>	0,70 m <sup>-1</sup>
Breitengrad	48,41 °N
Längengrad	9,93 °O
Höhenlage	503 m über NN
Mittlere Jahrestemperatur	8,7 °C <sub>1.Jahr</sub> // 9,0 °C <sub>2.Jahr</sub>
Globalstrahlung am Standort	1269 kWh/m <sup>2</sup> <sub>1,Jahr</sub> // 1176 kWh/m <sup>2</sup> <sub>2,Jahr</sub>
Klimazone	TRY 13 (Passau)
Spez. flächenbezogener Transmissionswärmeverlust $H_T$	0,24 W/(m²K)
Spez. Jahresheizwärmebedarf q <sub>h</sub>	26,5 kWh/(m²a)
Spez. Jahresprimärenergiebedarf q₽	27,3 kWh/(m²a)

Tabelle 2: Kennzahlen des Gebäudes

### 2.2 Architektur

### 2.2.1 Beschreibung

Besonderes Merkmal des Gebäudes ist die großzügige Verglasung, insbesondere die bodentiefen und deckengleichen Fenster im Wohnbereich EG mit Süd-/West-Orientierung. Die im Süden angebaute Garage ist mit der Garage im Norden des Nachbarhauses "verkettet", weshalb von einem Kettenhaus gesprochen wird. Der Wohnbereich, bestehend aus Kochen/Essen/Wohnen, ist offen gestaltet. Über den Flurbereich im Eingangsbereich erfolgt die Erschließung des Untergeschosses mit Kellerräumen und Einliegerwohnung.

Die Einliegerwohnung im Untergeschoss verfügt über ein innenliegendes Badezimmer sowie über einen Wohnbereich, der nach Westen hin orientiert ist und zum Gelände hin mit einem Lichthof mit Tageslicht versorgt wird. In den restlichen (zum Haupthaus gehörenden) Kellerräumen, die alle innerhalb der wärmegedämmten Gebäudehülle liegen, befinden sich die Heizzentrale und -verteilung sowie die Elektro- und die Wasserverteilung.

Im Dachgeschoss, das über den Wohnbereich im EG erschlossen wird, sind die Schlafräume und das Badezimmer des Haupthauses angeordnet. Das Elternschlafzimmer ist nach Süd/Ost orientiert, das Badezimmer nach Süd. Beide Räume haben bodentiefe, deckengleiche Fenstertüren. Die beiden Kinderzimmer sind nach Westen hin orientiert, wobei das südliche Kinderzimmer auch ein Fenster zusätzlich nach Süden hat. Der Flurbereich wird gleichzeitig als Arbeitsbereich genutzt.

Das gesamte Gebäude verfügt über außen angeordnete Jalousien als Beschattungseinrichtung.

### 2.2.2 Grundrisse, Ansichten, Schnitt

Die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 2, Abbildung 3, Abbildung 4, Abbildung 5, Abbildung 6, Abbildung 7) zeigen Grundriss-, Schnitt- und Ansichtspläne des Gebäudes.

### 2.3 Bauteilaufbauten

Das Gebäude ist in massiver Bauweise errichtet. Die Kelleraußenwände bestehen aus Stahlbeton, die Außenwände des Erd- und Obergeschosses aus Ziegel. Für die Innenwände wurden Trockenbauwandsysteme verwendet, mit Ausnahme der statisch tragenden Wände, welche aus Stahlbeton bzw. Hochlochziegel gebaut wurden. Für den oberen Gebäudeabschluss wurde ein Stahlbeton-Flachdach gewählt, für den unteren Gebäudeabschluss eine gedämmte Bodenplatte. Die Außenwände, mit Ausnahme der Wand zur Garage, wurden komplett mit einem Wärmedämmverbundsystem gedämmt. Für die großzügige Verglasung kamen hochwertige Holzfenster mit 3-fach Isolierverglasung zum Einsatz.

Die Gebäudehülle hält damit die strengen Vorgaben für ein KfW-Effizienzhaus-40 nach EnEV 2009 und 2013 ein. Demnach dürfen die spezifischen Transmissionswärmeverluste H'<sub>T</sub> der gesamten wärmeübertragenden Hüllflächen maximal 55% derer des Referenzhauses nach EnEV betragen.

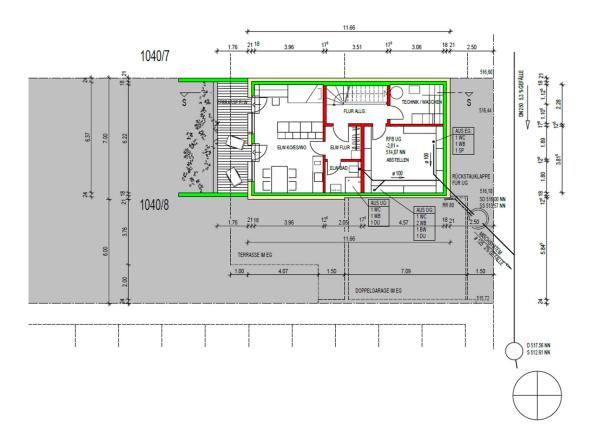


Abbildung 2: Grundriss Untergeschoss (UG)

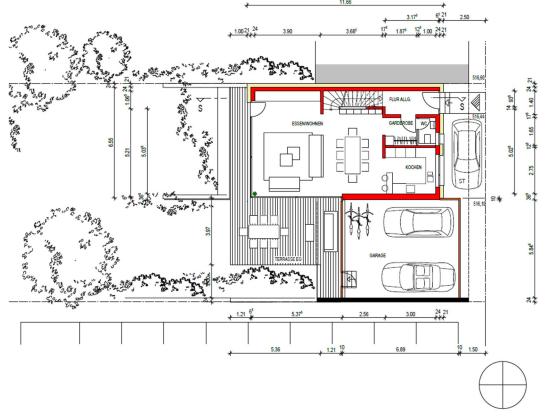


Abbildung 3: Grundriss Erdgeschoss (EG)

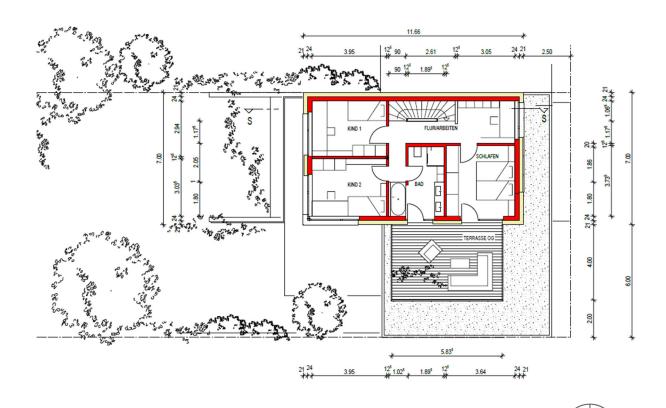


Abbildung 4: Grundriss Dachgeschoss (DG)

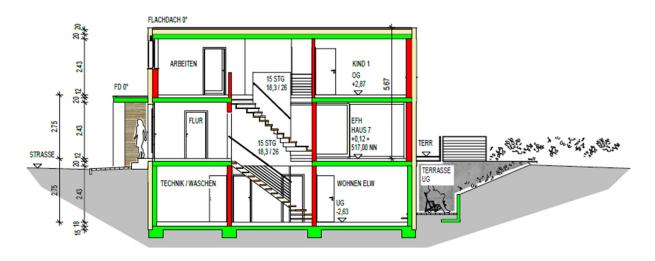
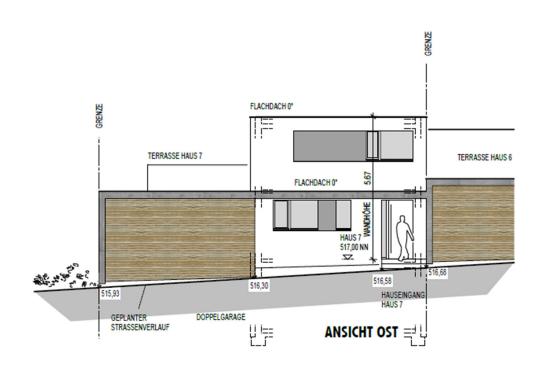


Abbildung 5: Schnittdarstellung Gebäude



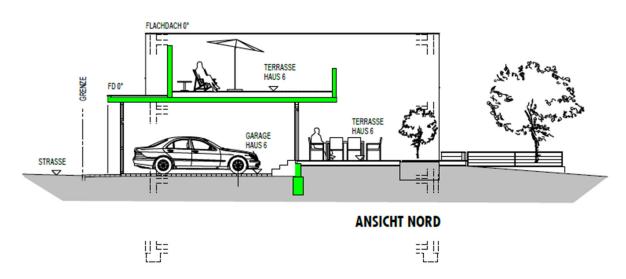


Abbildung 6: Ansichten Ost und Nord

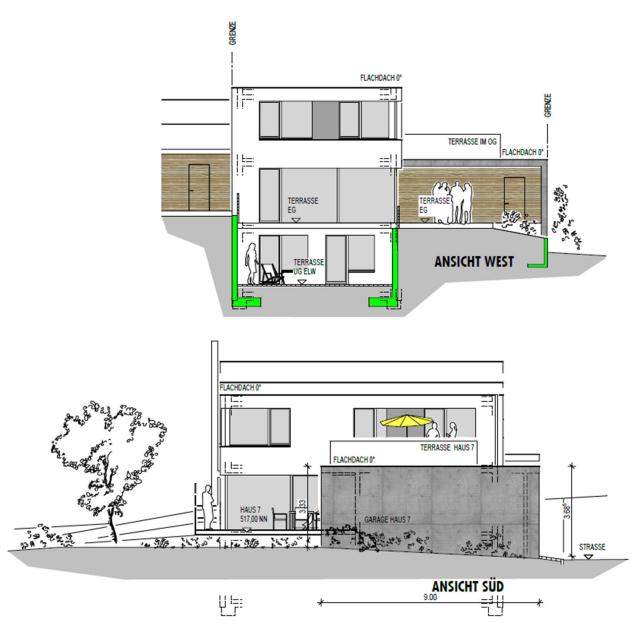


Abbildung 7: Ansichten Süd und West

Tabelle 3 zeigt die U-Werte der einzelnen Bauteilflächen der beheizten Gebäudehülle.

	Beschreibung	U-Wert
Bauteil		W/(m²K)
Außenwand gegen Erdreich	Stahlbeton armiert mit 20cm Perimeter- dämmung WLG 036	0,17
Außenwand gegen Außenluft	Stahlbeton armiert mit i.d.R. 20cm WDVS WLG 032	0,15
Außenwand gegen Außenluft	Wärmedämmender Ziegel T16 (Poroton) mit i.d.R. 20cm WDVS WLG 032	0,12

Außenwand gegen Außenluft	Wärmedämmender Ziegel T16 (Wand zu Garage)	0,31
Flachdach	Stahlbeton armiert mit 20cm Dämmung WLG 035	0,17
Bodenplatte	Stahlbeton armiert mit unterseitiger druckfester Dämmung 12cm WLG 038	0,19
Außenfenster	3-fach Verglasung ( $U_g$ =0,5; $g$ =52%); Holzrahmen Fichte ( $U_f$ =1,1); thermischer Randverbund	0,80 (U <sub>w</sub> )
Außentüre	Haustüre mit Paneel U <sub>p</sub> =1,0	1,3
Wärmebrückenzuschlag	Detailliert berechnet	0,01

Tabelle 3: U-Werte der Gebäudehülle

### 2.4 Anlagentechnik

#### 2.4.1 Heizung

Als Wärmeerzeuger wurde eine Luft-Wasser-Wärmepumpe vom Typ Mitsubishi Ecodan PUHZ – SW75VHA verbaut. Die Anlage besteht aus einer Innen- und einer Außeneinheit, die durch Kältemittelleitungen miteinander verbunden sind. In der Außeneinheit wird mit Hilfe des Kältemittels (R410A) der Umwelt Wärme entzogen und in der Inneneinheit (Hydrobox) auf ein nutzbares Temperaturniveau angehoben. Der Kompressor befindet sich in der Inneneinheit. Die so erzeugte Wärme wird in den Pufferspeicher eingeschichtet. Als Unterstützung für sehr hohe Wärmeanforderungen bei der Warmwasserbereitung bzw. sehr tiefen Außentemperaturen dient ein elektrischer Heizstab (in 3 Stufen von 2, 4 und 6 kW), der direkt in der Hydrobox installiert ist. Dieser wird stufenweise in Betrieb gesetzt, wenn über eine bestimmte Zeit die gewünschte Solltemperatur aus dem reinen Wärmepumpenbetrieb nicht erreicht werden kann.

Zur Wärmeverteilung entnimmt die Heizungsumwälzpumpe dem Speicher die Wärme und liefert sie an das Wärmeverteilnetz. Dieses besteht aus einem zentralen Verteiler im UG, von dem aus sternförmig einzelne Zuleitungen zu jedem Heizkreis führen. Die Wärmeübergabe erfolgt komplett mit Fußbodenheizung. Die Anbindeleitungen wurden mit 16x2 mm Mehrschichtverbundrohr ausgeführt. Die Nassbau-Fußbodenheizung wurde mit einer Noppenplatte installiert, auf der diffusionsdichte Mehrschichtverbundrohre mit 16x2 mm mäanderförmig verlegt wurden. Die Auslegung der Verlegeabstände der Heizschlangen ergab sich aus der Heizlastberechnung.

Die Heizlast des Gebäudes beträgt nach DIN EN 12831 6,9 kW bei einer Normaußentemperatur von Blaustein von -14 °C. Die Auslegung der Fußbodenheizung ist Tabelle 4 zu entnehmen. Die Auslegungstemperatur im Heizlastfall beträgt 40/34.

Raum/Heizkreis	Fläche Heizkreis	Länge Heizkreis	Verlege- abstand	Durch- fluss	Heizlast Raum
	m²	m	cm	I/min	W
ELW Bad	3,56	64,6	5,5	0,7	306
ELW Wohnen	11,11	67,3	16,5	2,0	679
ELW Kochen/Essen	13,03	59,2	22	0,9	604
Wohnen/Kochen/Essen	14,81	89,8	16,5	3,0	
Wohnen/Kochen/Essen	14,83	89,9	16,5	3,0	3005
Wohnen/Kochen/Essen	14,88	90,2	16,5	3,0	
WC	4,92	44,7	11	1,0	117
Kind 1	11,60	52,7	22	1,5	574
Kind 2	12,09	73,3	16,5	1,5	646
Bad	6,96	63,3	11	1,8	549
Schlafen	11,17	67,7	16,5	1,6	617
Flur/Arbeiten	12,34	74,8	16,5	2,5	641

Tabelle 4: Auslegungsdaten der Fußbodenheizung

Zusätzlich zur Heizlast des Gebäudes wurde für vier Personen 1 kW für die Warmwasserbereitung hinzugeschlagen. Der Auslegungswert für die Wärmepumpe beträgt also 7,9 kW. Die Wahl fiel auf die Luft-Wasser-Wärmepumpe des Typs "Mitsubishi Ecodan PUHZ – SW75VHA", die eine Heizleistung von 7 kW bis zu -15 °C verspricht. Der Bivalenzpunkt liegt also sehr niedrig, was die Einsatzzeiten des Heizstabs als Zusatzheizung auf wenige Stunden im Jahr begrenzen sollte.

### 2.4.2 Trinkwarmwasser

Für das Trinkwassernetz wurde eine Rohrnetzberechnung durchgeführt. Die Installation erfolgte mit den druckverlustoptimierten Rohren des Typs Viega Raxofix. Auf eine Zirkulation wurde zur Senkung der Verluste verzichtet. Ebenso erfolgt keine Speicherung von warmem Trinkwasser. Stattdessen dient der installierte 600 Liter Hygienespeicher als Heizungspuffer. Durch diesen führt ein Edelstahlwellrohr mit zusätzlicher EPDM-Ummantelung, die mit einem kleinen Abstand um das Wellrohr liegt um so einen kleinen Ringspalt entstehen zu lassen. Beim Zapfvorgang fließt das Kaltwasser durch das Edelstahlwellrohr im Durchlauferhitzerprinzip durch den warmen Heizungspuffer und wird somit erwärmt. Im oberen Bereich des Speichers werden höhere Temperaturen vorgehalten. Der Wasserinhalt der "Warmwasserzone" beträgt 300 Liter. Zur Bereitstellung von höheren Schüttleistungen überwacht eine externe Regelung die Warmwasseraustrittstemperatur. Ist diese zu niedrig, wird mit Hilfe eine Pumpe aus dem warmen Speicherkopf Pufferwasser durch den Ringspalt um das Edelstahlwellrohr entlang nach unten gepumpt, um die Wärme auf das Kaltwasser zu übertragen, siehe hierzu Abbildung 8 (links). Beim Austritt aus dem Ringspalt soll die Temperatur in etwa der Speichertemperatur im unteren Bereich entsprechen. Dadurch können mit geringer Speicherübertemperatur von etwa 2 - 3 °C Warmwasser in hoher Schüttmenge gezapft werden.

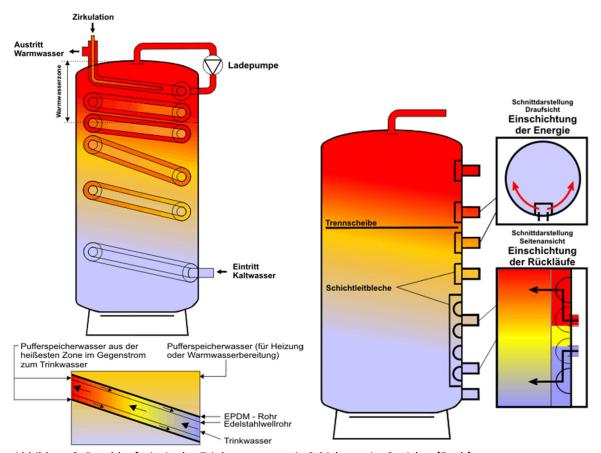


Abbildung 8: Durchlaufprinzip des Trinkwassers sowie Schichtung im Speicher [Zeeh]

Um eine Trennung aus "Warmwasserzone" und "Heizungspufferzone" zu erzielen, ist eine Trennplatte in der Mitte des Speichers eingebracht. Somit erfolgt auch keine Verwirbelung des unteren mit dem oberen Speicherbereich bei Beladevorgängen der Wärmepumpe, siehe Abbildung 8 (rechts).

### 2.4.3 Photovoltaik

Die Photovoltaikanlage leistet 6,12 kWp. Sie ist in Ost-West-Orientierung auf dem Flachdach mit 10° Neigung aufgeständert, siehe Abbildung 9. Die Anlage besteht aus 24 polykristallinen Modulen des Typs Solarfabrik Premium-L 255 mit je 255 W Peakleistung, die in vier Reihen á sechs Modulen aufgebaut wurden.

Als 3-phasiger Wechselrichter ist der Piko 5.5 von Kostal verbaut. Seine Maximalleistung auf der Ausgangsseite (AC) beträgt 5,5 kW, auf der Eingangsseite (DC) 6,1 kW. Auf Grund der Ost-West-Orientierung ist er damit ausreichend für die installierten Module.

Die Module mit Ost-Orientierung und die mit West-Orientierung wurden zu je einem String verkabelt. Die Module sind verschattungsfrei auf dem Flachdach aufgebracht.



Abbildung 9: PV-Anlage auf dem Flachdach

#### 2.4.4 Hausautomation

Zur Automatisierung von Heizungsübergabe und Beschattung wurde das System Loxone der Loxone Electronics GmbH verbaut. Herzstück der Anlage ist ein Miniserver, der im Elektro-Unterverteiler untergebracht ist. Von hier aus werden sternförmig alle schaltbaren Ein- und Ausgänge (wie z. B. die Jalousie oder der Heizungsstellantrieb) verdrahtet. Besondere Vorteile des Systems sind:

- einfache und flexible Programmierung, kostenfreie Software
- relativ geringe Anschaffungskosten
- vielseitige Anwendungsmöglichkeiten (offen für verschiedene Technologien, wie KNX, EnOcean, 1wire, etc.)
- große Produktfreiheiten (Schalter/Taster von Jung, Gira, etc.)
- geringer Eigenstromverbrauch

Dadurch ist dieses Automationssystem ideal für einen Wohnungsbau geeignet.

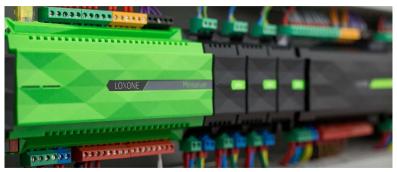


Abbildung 10: Beispielfoto eingebautes Loxone-System [Loxone]

### 2.4.5 Batteriespeicher

Für das zweite Messjahr wurde ein Batteriespeichersystem eingebaut. Zum Einsatz kam das Produkt Fronius Solar Battery 4.5. Der Speicher hat eine nutzbare Kapazität von 3,6 kWh und kann mit maximal 2,4 kW be- und entladen werden.

Zur Dimensionierung der Anlage wurde die Software PV-Sol verwendet und mit den bis dahin vorliegenden realen Daten aus dem Monitoring simuliert. Ein größerer Speicher, der Fronius Solar Battery 6.0 hätte zwar noch eine etwas höhere Auslastung erreicht, aus wirtschaftlicher Sicht wäre aber die Mehrinvestition in keiner Relation zum Mehrnutzen gestanden.



Abbildung 11: Fronius Solar Battery 4.5 [Fronius]

### 3. Das Monitoring-Konzept

Das Monitoring-System wurde aus zwei Teilen aufgebaut: mehrere Zähler erfassen die Volumenströme und Temperaturen in der Heizungsanlage und werden über einen kleinen Mini-PC (Raspberry Pi 2) ausgewertet und aufgezeichnet. Der andere Teil des Monitoring-Systems ist die Hausautomation selbst, die jeden erfassten Wert und jede Aktion dokumentiert.

### 3.1 Anlagen- und Messschema

Abbildung 12 zeigt das Anlagenschema. Es wurden zwei kalibrierte Wärmemengenzähler verbaut (Diehl Metering Ultraschall-Energiezähler, siehe Abbildung 15). Der erste befindet sich direkt nach der Hydrobox (dem Innengerät der Wärmepumpe) und misst die Leistung, die die Wärmepumpe in den Hygienespeicher liefert. Der zweite misst im Heizkreis die Leistung, die für die Fußbodenheizung aus dem Speicher entnommen wird. Der Warmwasserverbrauch wird mit einem geeichten Rechenwerk ermittelt, das den Volumenstrom direkt von einem Zähler im Kaltwasserzulauf des Hygienespeichers erhält sowie die Temperaturen im Kaltwasserzulauf und im Warmwasserabgang direkt am Speicher misst. Alle drei Zähler werden über M-Bus ausgelesen. Die so übermittelten Daten müssen von einer geeigneten Gegenstelle entschlüsselt werden. Diese Aufgabe übernimmt ein Mini-PC, hier ein Raspberry PI 2, dem ein Pegelwandler vorgeschaltet ist.

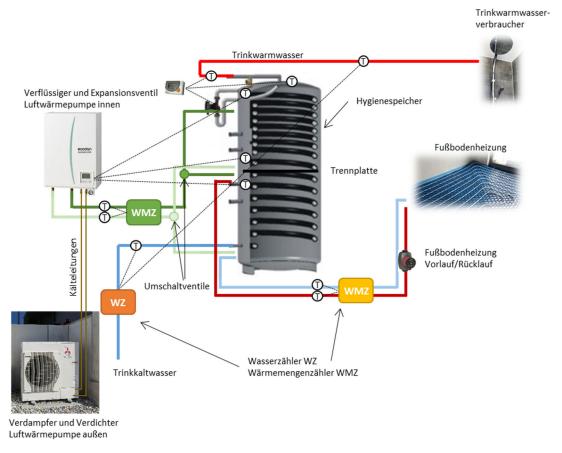


Abbildung 12: Anlagen-und Messschema

Im Messschema (Abbildung 15) sind auch weitere Messpunkte dargestellt, die alle durch die Hausautomation Loxone direkt mitgeloggt werden. Hierzu muss lediglich eine entsprechende Datenloggerfunktion in der Programmierung des Systems aktiviert werden. Prinzipiell können alle Messwerte und Ereignisse sekundengenau aufgezeichnet werden. Welche Parameter genau mitgeloggt werden, ist weiter unten beschrieben.

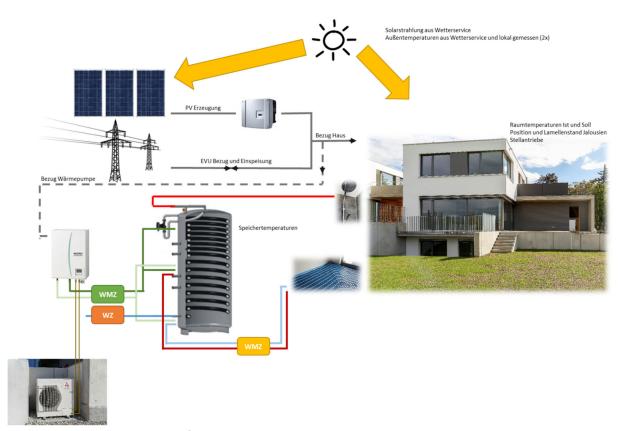


Abbildung 13: Mess- und Energieflussschema

### 3.2 Sensoren

### 3.2.1 Temperatursensoren

Zur Erfassung der Raumtemperaturen wurden verschiedene Temperatursensoren eingesetzt. In den Wohnräumen wurden 1-wire Temperatursensoren (Typ DS18B20) jeweils hinter einem Taster im Raum verbaut. Die Messgenauigkeit der Sensoren bei einem Temperaturbereich von -10 °C bis +85 °C beträgt ± 0,5 °C. Durch den Einbau hinter den Tastern wurde eine sehr träge Reaktionszeit und unter Umständen sogar erhebliche Verfälschung der Messwerte vermutet. Hierzu wurden verschiedene Messreihen in diversen Räumen mit externen Datenloggern durchgeführt. Als Vergleichssensor wurde der Testo 174H Feuchte-Mini-Datenlogger eingesetzt. Zwar bestätigten die Messreihen eine Verzögerung der Temperaturmessung der Unterputz Sensoren im Bereich 15 bis 30 Minuten, die aber als

vertretbar angesehen. Verfälschungen der Messwerte konnten nicht festgestellt werden - die Differenz des Mittelwerts beider Sensoren liegt bei -0,2 bis 0,3 K und damit im Bereich der Messtoleranz der Sensoren.

Kind 1	Temperatursensor	Testo 174H (Referenz)	Delta
31.03.2016	21,0 °C	20,9 °C	0,1 K
01.04.2016	20,7 °C	20,4 °C	0,3 K
02.04.2016	21,4 °C	21,2 °C	0,2 K
03.04.2016	21,8 °C	21,6 °C	0,2 K
04.04.2016	22,1 °C	21,9 °C	0,2 K
05.04.2016	22,0 °C	21,9 °C	0,1 K

Tabelle 5: Temperaturmessungen im Raum Kind 1

Wohnen	Temperatursensor	Testo 174H (Referenz)	Delta
31.03.2016	22,1 °C	21,9 °C	0,2 K
01.04.2016	21,3 °C	21,2 °C	0,1 K
02.04.2016	22,2 °C	22,0 °C	0,2 K
03.04.2016	23,0 °C	23,1 °C	-0,1 K
04.04.2016	23,5 °C	23,3 °C	0,2 K
05.04.2016	23,5 °C	23,6 °C	-0,1 K

Tabelle 6: Temperaturmessungen im Raum Wohnen

Bad	Temperatursensor	Testo 174H (Referenz)	Delta
05.05.2016	21,2 °C	21,4 °C	-0,2 K
06.05.2016	21,6 °C	21,8 °C	-0,2 K
07.05.2016	21,9 °C	21,7 °C	0,2 K
08.05.2016	22,3 °C	22,2 °C	0,1 K
09.05.2016	22,6 °C	22,4 °C	0,2 K
10.05.2016	22,9 °C	22,8 °C	0,1 K

Tabelle 7: Temperaturmessungen im Raum Bad

Die Außentemperaturen von einem aktiven Sensor (0 ... 10 V) an der Ostfassade, sowie von einem 1-wire-Hülsensensor an der Westfassade erfasst. Der 1-wire-Hülsentemperaturfühler hat einen Messbereich von -10 °C bis +85 °C bei einer Messgenauigkeit von  $\pm$  0,5 °C. Sechs Stück dieser Fühler sind auch am Hygienespeicher verteilt angebracht.

### 3.2.2 Stromzähler

Hinter dem EVU-Zähler wurden 3-phasige Stromzähler (System Loxone) zur Messung des Haushaltsstroms und der Wärmepumpe eingebaut.



Abbildung 14: Modbus Energiezähler 3-phasig [Loxone-Modbuszähler]



Abbildung 15: Wärmemengenzähler [Molline]

### 3.2.3 Wärmemengenzähler

Die Wärmezähler sind oben beschrieben.

#### 3.2.4 Wechselrichter Photovoltaik

Der verbaute Wechselrichter (Kostal Piko 5.5) ist über eine RS485-Schnittstelle mit der Hausautomation verbunden und überträgt diverse Werte wie Leistung und Energie. Zusätzlich wurde der Wechselrichter über eine SO-Schnittstelle mit der Automation verbunden, über die die Leistung übermittelt wird.

### 3.2.5 Solarstrahlung

Die Solarstrahlung wird aus dem Wetterservice (System Loxone) der Hausautomation bezogen. Diese werden aus den Wetterdaten der umliegenden drei Wetterstationen für den Standort des Gebäudes berechnet.

### 3.3 Datenaufzeichnung und Messpunktliste

Die Messwerte der Wärmezähler wurden im Abstand von sechs Minuten aufgezeichnet. Die übrigen Werte wurden bei jeder Wertänderung aufgezeichnet (Datenformat change-of-value (COV)), wobei für jeden Sensor individuelle Abfragezyklen festgelegt wurden.

Eine Übersicht über alle erfassten Messpunkte und den Abfragezyklus ist Tabelle 8 dargestellt. Das Intervall "1s" bedeutet, dass diese Ereignisse jeweils bei einer Veränderung sekundengenau protokolliert werden.

Sensor	Bezeichnung	Zyklus	Тур
T_ELW_KoEss	Raumtemperatur ELW Kochen/Essen	15 min	1-wire
T_ELW_Wohnen	Raumtemperatur ELW Wohnen	15 min	1-wire
T_ELW_Bad	Raumtemperatur ELW Bad	15 min	1-wire
T_KoEssWo	Raumtemperatur Kochen/Essen/Wohnen	15 min	1-wire
T_WC	Raumtemperatur WC	15 min	1-wire
T_Flur_Arbeiten	Raumtemperatur Flur/Arbeiten	15 min	1-wire
T_Kind1	Raumtemperatur Kind 1	15 min	1-wire
T_Kind2	Raumtemperatur Kind 2	15 min	1-wire

T_Schlafen	Raumtemperatur Schlafen	15 min	1-wire
T_Bad	Raumtemperatur Bad	15 min	1-wire
T_Technik	Raumtemperatur Technik	15 min	1-wire
Tsoll_ELW_KoEssWo	Solltemperatur ELW Kochen/Essen/Wohnen	1 s	Loxone
Tsoll_ELW_Bad	Solltemperatur ELW Bad	1 s	Loxone
Tsoll_KoEssWo	Solltemperatur Kochen/Essen/Wohnen	1 s	Loxone
Tsoll_WC	Solltemperatur WC	1 s	Loxone
Tsoll_Flur_Arbeiten	Solltemperatur Flur/Arbeiten	1 s	Loxone
Tsoll_Kind1	Solltemperatur Kind 1	1 s	Loxone
Tsoll_Kind2	Solltemperatur Kind 2	1 s	Loxone
Tsoll_Schlafen	Solltemperatur Schlafen	1 s	Loxone
Tsoll_Bad	Solltemperatur Bad	1 s	Loxone
P_PV	Leistung Photovoltaik	5 s	Stromzähler
W_PV	Energie Photovoltaik	60 min	Stromzähler
P_Allgemein	Leistung Allgemeinstrom	5 s	Stromzähler
W_Allgemein	Energie Allgemeinstrom	60 min	Stromzähler
P_WP	Leistung Wärmepumpe	5 s	Stromzähler
W_WP	Energie Wärmepumpe	60 min	Stromzähler
P_EVU	Leistung Energieversorger	15 s	Stromzähler
W_EVU_bez	Energie Bezug Energieversorger	60 min	Loxone
W_EVU_ein	Energie Einspeisung Energieversorger	60 min	Loxone
Stell_ELW_KoEssWo	Status Stellantrieb ELW Ko/Ess/Wo	1 s	Loxone
Stell_ELW_Bad	Status Stellantrieb ELW Bad	1 s	Loxone
Stell_KoEssWo	Status Stellantrieb Kochen/Essen/Wohnen	1 s	Loxone
Stell_WC	Status Stellantrieb WC	1 s	Loxone
Stell_Flur_Arbeiten	Status Stellantrieb Flur/Arbeiten	1 s	Loxone
Stell_Kind1	Status Stellantrieb Kind 1	1 s	Loxone
Stell_Kind2	Status Stellantrieb Kind 2	1 s	Loxone
Stell_Schlafen	Status Stellantrieb Schlafen	1 s	Loxone
Stell_Bad	Status Stellantrieb Bad	1 s	Loxone
Jal_Pos_Jal01	Position Jalousie Jalousie 01 ELW Ko/Ess/Wo	1 s	Loxone
Jal_Pos_Jal02	Position Jalousie Jalousie 02 ELW Ko/Ess/Wo	1 s	Loxone
Jal_Pos_Jal03	Position Jalousie Jalousie 03 Ko/Ess/Wo	1 s	Loxone
Jal_Pos_Jal04	Position Jalousie Jalousie 04 Ko/Ess/Wo	1 s	Loxone
Jal_Pos_Jal05	Position Jalousie Jalousie 05 Ko/Ess/Wo	1 s	Loxone
Jal_Pos_Jal06	Position Jalousie Jalousie 06 Kochen	1 s	Loxone
Jal_Pos_Jal08	Position Jalousie Jalousie 08 Kind 1	1 s	Loxone
Jal_Pos_Jal09	Position Jalousie Jalousie 09 Kind 2	1 s	Loxone
Jal_Pos_Jal10	Position Jalousie Jalousie 10 Kind 2	1 s	Loxone
Jal_Pos_Jal11	Position Jalousie Jalousie 11 Bad	1 s	Loxone
Jal_Pos_Jal12	Position Jalousie Jalousie 12 Schlafen	1 s	Loxone

Jal_Pos_Jal13	Position Jalousie Jalousie 13 Flur/Arbeiten	1 s	Loxone
Jal_Lam_Jal01	Position Lamelle Jalousie 01 ELW Ko/Ess/Wo	1 s	Loxone
Jal_Lam_Jal02	Position Lamelle Jalousie 02 ELW Ko/Ess/Wo	1 s	Loxone
Jal_Lam_Jal03	Position Lamelle Jalousie 03 Ko/Ess/Wo	1 s	Loxone
Jal_Lam_Jal04	Position Lamelle Jalousie 04 Ko/Ess/Wo	1 s	Loxone
Jal_Lam_Jal05	Position Lamelle Jalousie 05 Ko/Ess/Wo	1 s	Loxone
Jal_Lam_Jal06	Position Lamelle Jalousie 06 Kochen	1 s	Loxone
Jal_Lam_Jal08	Position Lamelle Jalousie 08 Kind 1	1 s	Loxone
Jal_Lam_Jal09	Position Lamelle Jalousie 09 Kind 2	1 s	Loxone
Jal_Lam_Jal10	Position Lamelle Jalousie 10 Kind 2	1 s	Loxone
Jal_Lam_Jal11	Position Lamelle Jalousie 11 Bad	1 s	Loxone
Jal_Lam_Jal12	Position Lamelle Jalousie 12 Schlafen	1 s	Loxone
Jal_Lam_Jal13	Position Lamelle Jalousie 13 Flur/Arbeiten	1 s	Loxone
I_Wetterservice	Solarstrahlung Wetterservice (horizontal)	15 min	Loxone
Tamb_lokal	Außentemp. Messung vor Ort West-Terrasse	1 min	1-wire
Tamb_lokal2	Außentemp.Messung vor Ort Ost-Fassade	1 min	0-10V
Tamb_Wetterservice	Außentemperatur Wetterservice	15 min	Loxone
TSP1	Speicherfühler 1	5 min	1-wire
TSP2	Speicherfühler 2	5 min	1-wire
TSP3	Speicherfühler 3	5 min	1-wire
TSP4	Speicherfühler 4	5 min	1-wire
TSP5	Speicherfühler 5	5 min	1-wire
TSP6	Speicherfühler 6	5 min	1-wire
Vdot_WP	Volumenstrom WMZ Wärmepumpe	6 min	MBUS
TVL_WP	Vorlauftemperatur WMZ Wärmepumpe	6 min	MBUS
TRL_WP	Rücklauftemperatur WMZ Wärmepumpe	6 min	MBUS
Q_WP	Energie WMZ Wärmepumpe	6 min	MBUS
Qdot_WP	Leistung WMZ Wärmepumpe	6 min	MBUS
Vdot_HZG	Volumenstrom WMZ Heizung	6 min	MBUS
TVL_HZG	Vorlauftemperatur WMZ Heizung	6 min	MBUS
TRL_HZG	Rücklauftemperatur WMZ Heizung	6 min	MBUS
Q_HZG	Energie WMZ Heizung	6 min	MBUS
Qdot_HZG	Leistung WMZ Heizung	6 min	MBUS
Vdot_WW	Volumenstrom Wasserzähler	6 min	MBUS
T_WW	Warmwassertemperatur Wasserzähler	6 min	MBUS
T_KW	Kaltwassertemperatur Wasserzähler	6 min	MBUS
Q_WW	Energie Wasserzähler	6 min	MBUS
Qdot_WW	Leistung Wasserzähler	6 min	MBUS
v_ww	Warmwasser Zählerstand	6 min	MBUS
T_Modbus_HZ	Übermittelte Solltemp. an WP-Regel. f. Heiz.	1 min	Loxone
T_Modbus_WW	Übermittelte Solltemp. an WP-Regel. f. TWW	1 min	Loxone

TVL_WP_Lox	Vorlauftemp. Wärmep. extern gemessen 30 s 1-wir		
TRL_WP_Lox	Rücklauftemp. Wärmep. extern gemessen	30s 1-wire	
TVL_HZG_Lox	Vorlauftemp. FBH extern gemessen	30 s	1-wire
TRL_HZG_Lox	Rücklauftemp. FBH extern gemessen	30 s 1-wire	
WP_VorlaufHK1	Vorlauftemp. FBH am Speicherabgang	1 min	WP-Regelung
WP_Boilertemp	Speichertemp. im Warmwasserbereich	1 min	WP-Regelung
WP_VorlaufWP	WP Vorlauftemperatur der Wärmepumpe 1 min WP-Regel		WP-Regelung
WP RücklaufWP	Rücklauftemperatur der Wärmepumpe	1 min	WP-Regelung

Tabelle 8: Messpunktliste

In der nachfolgenden Tabelle 9 werden die verschiedenen Typen der Messdatenpunkte näher beschrieben.

Тур	Beschreibung	
1-wire	Temperatursensor, siehe Abschnitt 3.2.1	
0-10V	Temperatursensor 0-10V	
Stromzähler	3-phasiger Modbus-Energiezähler, siehe Abschnitt 3.2.2	
Loxone	In der Hausautomation eingestellte oder ermittelte Werte; als "virtueller" Messwert zu verstehen	
WP-Regelung	Aus der WP-Regelung abgerufener Wert durch Modbus-Anbin-	
	dung an die Hausautomation	
MBUS	MBUS-Wärme- und Wasserzähler, siehe Abschnitt 3.1	

Tabelle 9: Beschreibung der Typen

### 3.4 Wetterdaten

Neben den lokalen Messsensoren wurden auch Wetterdaten von einem Onlinewetterdienst bezogen. Dieser Service ist in der Hausautomation implementiert. Aus den umliegenden Wetterstationen wird das Wetter für den eingegebenen Standort berechnet. Der exemplarische Verlauf von übermittelten Wetterdaten für die aktuelle Stunde im Vergleich mit den beiden Außentemperaturfühler, sowie der Prognose des Wetterservice 1 Stunde, 6 Stunden, 12 Stunden und 24 Stunden vor dem jeweiligen Zeitpunkt, sind in Abbildung 16 dargestellt.

Die graue Markierung im oberen Teil der Abbildung zeigt den Bereich zwischen den beiden lokalen Temperaturmessungen an. Durch die direkte Sonneneinstrahlung auf die Ost-Fassade in den Morgenstunden zeigt die Temperatur entsprechende Ausschläge. Dagegen erfasst der Sensor an der geschützten West-Fassade in den Abend-/Nachtstunden höhere Werte. Der sinnvoll anzunehmende Wert für die lokal gemessene Außenlufttemperatur ist jeweils der Minimumwert der beiden lokalen Temperaturfühler. Die Grafik zeigt, dass die übermittelten Werte vom Wetterservice realistisch sind. Im unteren Teil der Abbildung wird die Wettervorhersage des Wetterservice dargestellt. Wie zu erwarten sind die einstündigen Vorhersagewerte sehr genau. Die 6-, 12- und 24-Stunden-Vorhersagen sind im Verlauf nahezu identisch, manchmal aber für die Nachmittagsstunden niedriger als die dann tatsächlich vorherrschenden Temperaturen. Die Vorhersage kann aber dennoch ein bestimmtes Temperaturniveau und damit große Änderungen prognostizieren.

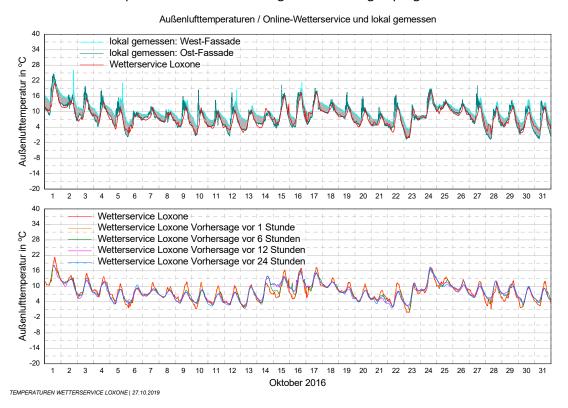


Abbildung 16: Außenlufttemperaturen / Onlinewetterservice und lokal gemessen

In Abbildung 17 wird derselbe Sachverhalt höher aufgelöst dargestellt. Als Fazit für den Wetterservice gilt:

- die aktuellen Werte sind realistisch und können eine lokale Temperaturmessung sogar ersetzen
- die mehrstündigen Vorhersagen sind mit Vorsicht zu genießen um Tendenzen der Wetterentwicklung zu erkennen, aber hinreichend genau.

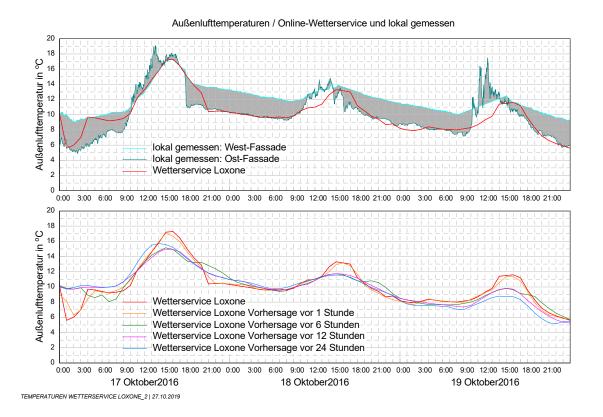


Abbildung 17: Außenlufttemperaturen / Onlinewetterservice und lokal gemessen höher aufgelöst

### 4. Ergebnisse der ersten Messperiode

### 4.1 Klimatische Bedingungen

Der Verlauf der Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur sowie der Solarstrahlung auf die Horizontale sind in Abbildung 18 und Abbildung 19 dargestellt.

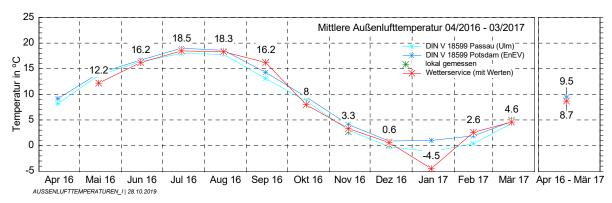


Abbildung 18: Mittlere Außenlufttemperatur der ersten Messperiode

Die Außenlufttemperaturen wurden vom Onlinewetterservice der Hausautomation übermittelt, der aus den umliegenden drei Wetterstationen das wahrscheinliche Wetter am Standort berechnet. Die Daten standen ab Mai 2016 zur Verfügung. Zusätzlich wurden ab September 2016 Messfühler an der Ost- und der Westfassade angebracht. Wegen der unterschiedlichen Einstrahlung auf die Fassaden im Tagesverlauf wurde jeweils der niedrigere Wert der beiden Sensoren als Messwert in die Mittelwertbildung einbezogen. Die Abweichungen sind gering, woraus gefolgert wird, dass der Wetterservice sinnvolle bzw. verwertbare Daten liefert. Des Weiteren sind die normativen Außenlufttemperaturen aus der DIN V 18599 für den EnEV-Referenzstandort Potsdam (TRY04) sowie den lokalen Standort Ulm (durch die Region TRY13, Passau) dargestellt.

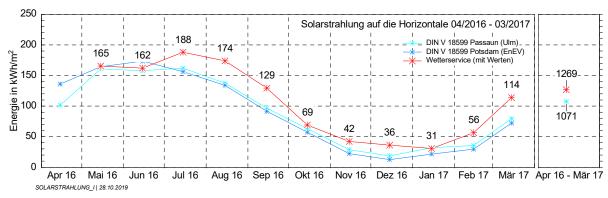


Abbildung 19: Horizontale Solarstrahlung der ersten Messperiode

Der Jahresmittelwert laut Wetterservice liegt mit 8,7 °C nahe am Mittelwert nach DIN V 18599 für die Region Ulm (Passau) mit 8,5 °C. Mit 9,5 °C liegt der Jahresmittelwert nach DIN V 18599 für den EnEV-Referenzstandort Potsdam deutlich höher. In den Monaten der Heizperiode (Oktober bis März) sind die Mittelwerte jedoch so gut wie identisch (2,4 °C nach Wetterservice, 2,5 °C nach Referenzklima).

Die Werte der horizontalen Globalstrahlung weichen stark von den Werten des Wetterservice. Nach Wetterservice betrug die aufsummierte Strahlung der ersten Messperiode bei 1269 kWh/m², die Summe nach DIN V 18599 für Potsdam und Ulm (Passau) mit 1071 bzw. 1074 kWh/m² fast identisch.

### 4.2 Elektrische Energie

### 4.2.1 Haushaltsstrom / Allgemeinstrom

Mit Haushaltsstrom oder Allgemeinstrom ist sämtlicher Stromverbrauch im Haus gemeint, der nicht der Wärmepumpe zuzurechnen ist. Die Einliegerwohnung verfügt über einen eigenen Hauptzähler vom Netzbetreiber und ist hier nicht mit erfasst, die Jahressumme war mit rund 300 kWh jedoch auch sehr gering.

Der Jahresverbrauch lag bei rund 3.500 kWh und damit auf einem unterdurchschnittlichen Niveau für eine vierköpfige Familie (vgl. Abbildung 20). Bezogen auf die Gebäudenutzfläche A<sub>N</sub> nach EnEV betrug der Jahresstromverbrauch ohne die Einliegerwohnung 16,3 kWh/m²<sub>AN</sub> (mit Einliegerwohnung etwa 17,1 kWh/m²<sub>AN</sub>), bezogen auf die Wohn- und Nutzfläche ohne Einliegerwohnung 23,5 kWh/m²<sub>WFL+NFL</sub> (siehe dazu Tab. 2).

Gebäudetyp War		Verbrauch in Kilowattstunden (kWh) pro Jahr							
	Warmwasser	Personen im Haushalt	Gering						Sehr hoch
			Α	В	С	D	E	F	G
		•	bis <b>1.300</b>	bis <b>1.700</b>	bis <b>2.000</b>	bis <b>2.500</b>	bis <b>3.000</b>	bis <b>4.000</b>	über <b>4.000</b>
	~	**	bis <b>2.100</b>	bis <b>2.500</b>	bis <b>3.000</b>	bis <b>3.200</b>	bis <b>3.600</b>	bis <b>4.400</b>	über <b>4.400</b>
		111	bis <b>2.600</b>	bis <b>3.000</b>	bis <b>3.500</b>	bis <b>3.900</b>	bis <b>4.300</b>	bis <b>5.200</b>	über <b>5.200</b>
Ein- oder Zweifami- lienhaus	ohne Strom	1111	bis <b>2.900</b>	bis <b>3.500</b>	bis <b>3.800</b>	bis <b>4.200</b>	bis <b>4.900</b>	bis <b>5.900</b>	über <b>5.900</b>
		11111-	bis <b>3.500</b>	bis <b>4.000</b>	bis <b>4.800</b>	bis <b>5.400</b>	bis <b>6.000</b>	bis <b>7.500</b>	über <b>7.500</b>
		<b>†</b>	bis <b>1.500</b>	bis <b>2.000</b>	bis <b>2.500</b>	bis <b>3.000</b>	bis <b>3.600</b>	bis <b>5.000</b>	über <b>5.000</b>
	~	##	bis <b>2.500</b>	bis 3.000	bis <b>3.500</b>	bis <b>4.000</b>	bis <b>4.500</b>	bis <b>5.800</b>	über <b>5.800</b>
		111	bis <b>3.000</b>	bis <b>3.800</b>	bis <b>4.200</b>	bis <b>4.900</b>	bis <b>5.700</b>	bis <b>7.300</b>	über <b>7.300</b>
		****	bis <b>3.500</b>	bis <b>4.000</b>	bis <b>4.800</b>	bis <b>5.500</b>	bis <b>6.300</b>	bis <b>8.000</b>	über <b>8.000</b>
		*****	bis <b>4.200</b>	bis <b>5.000</b>	bis <b>6.000</b>	bis <b>7.000</b>	bis <b>8.000</b>	bis <b>10.900</b>	über <b>10.900</b>

Abbildung 20: Stromspiegel 2017 [Stromspiegel]

Zum Vergleich: die Forschungsinitiative "Effizienzhaus Plus" schlägt als Pauschalansatz einen Wert von 20 kWh/m²<sub>AN</sub> vor. Umgerechnet auf die Wohn- und Nutzfläche ohne Einliegerwohnung würde sich ein Pauschalwert von rund 30 kWh/m² <sub>WFL+NFL</sub> ergeben. Die Bewohner haben das betrachtete Gebäude also vergleichsweise stromsparend betrieben.

Etwa 40% des Jahresstromverbrauchs entfiel auf Standbyverluste. Als Dauerleistung ausgedrückt, betragen die Standbyverluste rund 163 W. Diese setzen sich im Wesentlichen wie folgt zusammen:

Verbraucher	Standby in W	Sparpotenzial
Kühlschrank	29	Gering
Netzwerktechnik	26	mäßig
Dezentrale Abluftventilatoren im Dauerbetrieb	24	Gering
Gefrierschrank	21	Gering
Hausautomation Loxone	20	Ohne Monitoring mindestens 50%
Fritzbox (Router, Repeater, etc.)	12	mäßig
PC, Drucker, etc.	9	hoch
TV, SAT, etc.	7	Hoch
Glasfaser-Modem, Enthärtungsanlage	6	Gering
Unbekannt sowie sonstige kleinere Verbrau-	9	
cher		
wie z.B. elektrische Zahlbürste, Babyphone, etc.		

Tabelle 10: Stromverbraucher

Die Verbraucher Kühlschrank, Abluftventilatoren, Gefrierschrank und Loxone (dessen Leistungsaufnahme ohne die Monitoringerweiterungen und den Monitoringbetrieb bei etwa 6 - 10 W liegen würde) sind als "unverzichtbar" einzustufen – deren Standby-Leistung also nicht reduzierbar. Die Summe beträgt rund 90 W.

Die Verbraucher Netzwerktechnik, Fritzbox, etc. besitzen zwar Einsparpotenzial, eine Abschaltung muss aber immer mit evtl. Komfortverlust wie beispielsweise neuer Verbindungsaufbau nach Wiedereinschalten abgewogen werden.

#### 4.2.2 Wärmepumpe

Der Stromverbrauch der Wärmepumpe betrug in der ersten Messperiode 3.963 kWh. Bezogen auf die Gebäudenutzfläche  $A_N$  nach EnEV betrug der Jahresstromverbrauch 18,4 kWh/ $m_{AN}^2$ , bezogen auf die Wohn- und Nutzfläche mit Einliegerwohnung 21,8 kWh/ $m_{WFL+NFL}^2$ .

Eine analytische Betrachtung des Stromverbrauches von der Wärmepumpe findet sich in dem Abschnitt 4.5.

#### 4.2.3 Photovoltaik

Die Stromernte der Photovoltaikanlage (PV-Anlage) betrug im ersten Messjahr 5.727 kWh. Damit lag der Ertrag deutlich über dem errechneten Wert aus der DIN V 18599. Nach Norm beträgt

der Jahresstromertrag für die EnEV-Referenzklima-Region Potsdam 4.502 kWh, für die Klimaregion Passau (Ulm) 4.504 kWh. Einen sehr genauen Prognosewert, auch hinsichtlich des monatlichen Verlaufs der Erträge, lieferte das Simulationsprogramm "PV Sol". Hier wurde ein Jahresertrag von 5.696 kWh simuliert.

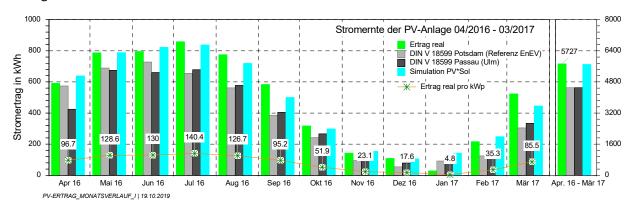


Abbildung 21: Stromernte der PV-Anlage in der ersten Messperiode

Abbildung 21 zeigt die Monatswerte des ersten Messjahres im Vergleich zu den oben genannten Vergleichswerten.

Im Januar konnte die Anlage nur sehr wenig Strom liefern, da fast über die Hälfte des Monats die Anlage von festgefrorenem Schnee bedeckt war. Dies ist auch auf die architektonisch gewünschte geringe Steigung (Neigungswinkel 10°) der PV-Module zurückzuführen.

Insgesamt konnten 1.597 kWh des erzeugten PV-Stroms direkt im Haus selbst verbraucht werden (durch Allgemeinstrom und Wärmepumpe). Dies ergibt einen Eigenverbrauchsanteil von 27,9 % und liegt damit etwas unter dem im Allgemeinen angesetzten Wert von 30%. Der Stromautarkiegrad lag bei 21,4%.

### 4.2.4 Energieversorger

Der von der PV-Anlage erzeugte Strom wird vorrangig im Haus direkt verbraucht. Überschüsse aus der PV-Produktion werden in das Stromnetz des Energieversorgers gespeist. Defizite werden aus dem Netz bezogen. In der ersten Messperiode konnten 4.130 kWh des erzeugten PV-Stroms nicht zeitgleich im Haus verbraucht werden und wurden somit ins öffentliche Netz eingespeist. Dem stehen 6.033 kWh gegenüber, die in Zeiten zu geringer PV-Leistung aus dem Netz bezogen werden mussten.

Grundsätzlich sollte das Ziel verfolgt werden, das öffentliche Netz so gering wie möglich zu belasten und Leistungsspitzten zuverlässig zu reduzieren, z. B. durch folgende Maßnahmen:

- Abschaltung von unnötigem Standby-Stromverbrauch
- Einsatz besonders stromeffizienter Haushaltsgeräte sowie Beleuchtung (LED)
- Installation eines Batteriespeichers (fachlich korrekt wäre der Begriff Akku)
- Verlegung des Betriebs bestimmter Geräte in Zeiten hoher PV-Leistung (z. B. Wärmepumpe)

#### 4.2.5 Messfehler

Insgesamt ist eine Summe von 153 kWh nicht korrekt gemessen worden. Dies ergibt sich aus der Gegenüberstellung von den ins Haus gelieferten Strommengen ("Import") und den im Haus verbrauchten bzw. ins Netz eingespeisten Strommengen ("Export").

Die Summe der Stromimporte ergeben sich aus:

PV-Stromernte 5.727 kWh + Bezug vom Energieversorger 6.033 kWh = 11.760 kWh Die Summe der Stromexporte ergeben sich aus:

Verbrauch Haushaltsstrom 3.514 kWh + Verbrauch Wärmepumpe 3.963 kWh

+ Einspeisung ins Netz 4.130 kWh = 11.607 kWh

Bezogen auf die Gesamtsumme des ins Haus gelieferten Stroms entspricht die Stromdifferenz einer Fehlerquote von 1,3%.

### 4.3 Thermische Energie

### 4.3.1 Wärmepumpe

Die gesamte von der Wärmepumpe gelieferte Wärmeenergie betrug in der ersten Messperiode 9.515 kWh. Sie ist nachfolgend unterteilt in die Anteile Wärmeenergie, die in die Heizverteilung floss, die durch Warmwasserzapfung entnommen worden ist, sowie den Anteil, der von der Wärmepumpe in den Speicher geliefert wurde, durch Heizung und Warmwasser aber nicht entnommen wurden – somit Speicherverluste.

Eine analytische Betrachtung der Wärmeerzeugung durch die Wärmepumpe findet im Abschnitt 4.5 statt.

### 4.3.2 Heizung

Von der gesamten von der Wärmepumpe bereitgestellten Wärme wurden 6.847 kWh Wärme in die Heizung verteilt. Bezogen auf die Gebäudenutzfläche  $A_N$  nach EnEV betrug der Wärmeverbrauch 31,8 kWh/ $m^2_{AN}$ , bezogen auf die Wohn- und Nutzfläche mit Einliegerwohnung 37,7 kWh/ $m^2_{WFL+NFL}$ .

Der Wärmezähler ist, wie im Anlagenschema Abbildung 12 dargestellt, direkt vor der Heizungsumwälzpumpe installiert und misst somit den gesamten Wärmeverbrauch, der in die Heizungsverteilung geht. Der ermittelte Wert stellt nicht den Heizwärmeverbrauch dar, da hier auch die Verteilverluste mit gemessen werden (z. B. gemäß DIN V 18599, Erzeugernutzwärmeabgabe).

Zur Vergleichbarkeit der Messwerte mit einschlägigen Normen zur Ermittlung des Wärmebedarfs in Gebäuden (DIN 4108-6 i. V. m. DIN 4701-10 sowie die Normenreihe DIN V 18599) wurden die Normwerte entsprechend aufbereitet. Siehe hierzu Abbildung 22.

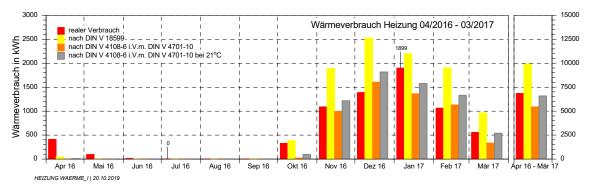


Abbildung 22: Wärmeverbrauch der Heizung in der ersten Messperiode

Bei der Berechnung nach der Normenreihe DIN V 18599 wird eine mittlere Innentemperatur im Gebäude von 20 °C angesetzt, nach DIN V 4108-6 sind es 19 °C. Interne Gewinne sowie die Ausnutzung solarer Gewinne sind genormt. Verluste werden unter Verwendung eines Normklimas berechnet. Bei der DIN V 18599 wird das Referenzklima Potsdam verwendet, das seit der Novellierung der EnEV 2013 auch nach der DIN V 4108-6 in Verbindung mit DIN V 4701-10 heranzuziehen ist. Davor wurde nach der älteren Norm mit dem Referenzklima für Würzburg berechnet.

In beiden Normen werden Verluste durch Transmission und Lüftung mit den Gewinnen aus innerer Wärme und Solarstrahlung bilanziert. Verbleibende Verluste müssen durch das Heizsystem gedeckt werden. Hier wird ausgehend von der Wärmeübergabe im Raum das Wärmeverteilnetz, die Speicherung bis hin zur Wärmeerzeugung betrachtet. Dies geschieht zum einen für den Anlagenteil Heizung, zum anderen für die Warmwasserbereitung, bei der auch die Verbrauchswerte genormt sind. Wie oben erwähnt, wurden die Verluste der Wärmeverteilung und –übergabe mit berücksichtigt, da diese auch vom Wärmezähler gemessen werden.

Wie Abbildung 22 zeigt, sind die Werte nach DIN V 18599 deutlich höher als real gemessen. In der Jahressumme kommt die Berechnung nach DIN V 4108-6 i.V.m. DIN V 4701-10, unter Verwendung einer Gebäudeinnentemperatur von 21 °C, was auch der realen mittleren Innentemperatur während der Heizperiode entspricht, am nächsten.

### 4.3.3 Trinkwarmwasser

1.695 kWh wurden durch Warmwasserzapfung verbraucht. Bezogen auf die Gebäudenutzfläche AN nach EnEV betrug der Wärmeverbrauch 7,9 kWh/m²AN, bezogen auf die Wohn- und Nutzfläche mit Einliegerwohnung 9,3 kWh/m²<sub>WFL+NFL</sub>.

Analog zur Heizung wird der Warmwasserverbrauch direkt nach dem Speicher am Warmwasserabgang gemessen. Die Wärmemessung erfolgt bei Zapfung durch Ermittlung des Massenstroms sowie der Warmwasserabgangstemperatur und der dem Speicher zufließenden Kaltwassertemperatur.

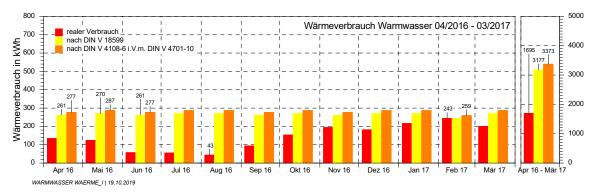


Abbildung 23: Wärmeverbrauch für Trinkwarmwasser in der ersten Messperiode

Um den Warmwasserverbrauch bei monatlicher Betrachtung besser interpretieren zu können, wurde ab Juli 2016 auch die verbrauchte Warmwassermenge in Liter mitgeloggt. Im September wurde die Einliegerwohnung neu bezogen, was sich am Wasserverbrauch spürbar zeigt. Seither bleibt der Monatsverbrauch auf jeweils ähnlichem Niveau (5-6 m³/Monat).

### 4.3.4 Verluste (Speicher, Stillstand)

Der Wert "Verluste" wird rechnerisch ermittelt aus der Differenz der gelieferten Wärme durch die Wärmepumpe abzüglich den erfassten Wärmeverbrauchen für Heizung und Warmwasser. Diese Differenz können allgemein auch als Speicherverluste oder Stillstandsverluste bezeichnet werden.

Die Speicherverluste in der ersten Messperiode betrugen 973 kWh. Die Höhe der Verluste hängt stark mit dem Temperaturniveau im Speicher zusammen. Durch eine Reduzierung von unnötig hohen Temperaturen in der Warmwasserzone konnten die Verluste nahezu halbiert werden. In den Sommermonaten, in denen der Wärmeverbrauch der Heizungsanlage 0 kWh betrug, lagen die Speicherverluste in einer Größenordnung wie der Wärmeverbrauch durch Warmwasserzapfung.

### 4.4 Temperaturen allgemein

### 4.4.1 Raumtemperaturen

Die Raumtemperaturen aller direkt mit Fußbodenheizung beheizten Räume lagen im Jahresmittel bei 22,4 °C. Für den Zeitraum der Heizperiode (Monate mit reellem Heizwärmeverbrauch) lag die Mitteltemperatur bei 21,2 °C. Die mittlere Außenlufttemperatur lag in demselben Zeitraum bei 4,4 °C.

Zum Vergleich mit dem Ansatz nach EnEV (mittlere Rauminnentemperatur 19 °C über alle Räume innerhalb der beheizten Gebäudehülle) wurden auch die Temperaturen der nicht direkt beheizten Räume erfasst. Die mittlere Temperatur ändert sich dadurch aber nur unwesentlich auf 21,3 °C. Demnach liegt das durchschnittliche Temperaturniveau im Gebäude um etwa 2 K höher als nach EnEV, was bei der Beurteilung der Normberechnungsergebnisse zu berücksichtigen ist.

### 4.4.2 Speichertemperaturen

Abbildung 24 zeigt den Verlauf der Monatsmittelwerte der Temperaturen im Speicher. Je drei Fühler zur Messdatenerfassung sind gleichmäßig in der "Warmwasserzone" und in der "Heizungszone" des Hygienespeichers verteilt. Wie der Abbildung zu entnehmen ist, war in den Anfangsmonaten die Temperatur im Wasserspeicher, im Verhältnis zu den Folgemonaten, sehr hoch. Insbesondere die hohen Temperaturen im Heizungsteil des Speichers in den Sommermonaten sind auffällig. Dieser Missstand wurde durch die Optimierungsmaßnahmen behoben.

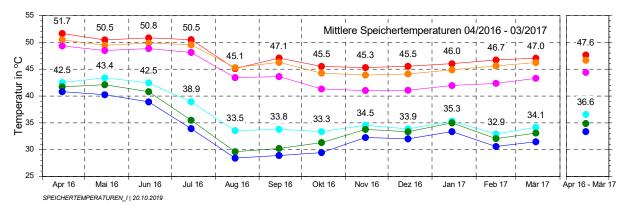


Abbildung 24: Mittlere Speichertemperaturen in der ersten Messperiode

### 4.5 Systemeffizienz

#### 4.5.1 Arbeitszahlen der Wärmepumpe

Verschiedene Arbeitszahlen der Wärmepumpe im Monatsverlauf sind in Abbildung 25 dargestellt. Die Jahresarbeitszahl der ersten Messperiode beträgt 2,4.

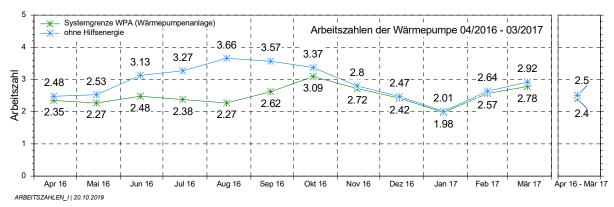


Abbildung 25: Arbeitszahlen der ersten Messperiode im Monatsverlauf

Die Gesamtarbeitszahl errechnet sich aus der absolut gelieferten Wärme der Anlage ins System (vgl. Abschnitt 4.3.1) und der absolut verbrauchten Strommenge (vgl. Abschnitt 4.2.2). Wie man sieht, liegen die Werte mit 2,0 bis 3,1 deutlich unter dem erwarteten Niveau.

Die Arbeitszahl im ersten Monat der Messdatenerfassung entstand auf Basis der voreingestellten Standardparameter der Regelung. In den darauffolgenden Monaten wurden erste Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz durchgeführt (vgl. Abschnitt 4.5.2).

In den Sommermonaten mit ausschließlicher Warmwasserbereitung wirken sich die Standbyverluste von 10-20W enorm auf die Arbeitszahl aus. Mit steigendem Heizbedarf hat dieser Anteil jedoch keinen großen Einfluss mehr auf das Gesamtergebnis. Im Januar brach die Monatsarbeitszahl extrem ein, da dort sehr tiefe Außentemperaturen über einen längeren Zeitraum herrschten.

## 4.5.2 Durchgeführte Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz

## Regelung im Zeitraum zwischen Bezug Oktober 2015 und Projektbeginn April 2016

Die Trinkwarmwasserbereitung war auf eine Solltemperatur von 53 °C eingestellt. Die Betriebszeit war täglich von 05.30 Uhr bis 22.30 Uhr eingestellt und wurde vom Nutzer später angepasst auf 06.00 Uhr bis 07.00 Uhr, sowie von 13 Uhr bis 20 Uhr.

Die lange Betriebszeit in den Nachmittagsstunden entspricht einer grundsätzlich sinnvollen Regeleinstellung für Luft-Wasser-Wärmepumpen zur Trinkwarmwasserbereitung, da in diesen Zeiten die Außenlufttemperaturen im Tagesverlauf am Höchsten sind. In Verbindung mit einer Photovoltaikanlage kann in diesem Zeitraum auch mit der höchsten Wahrscheinlichkeit ein Direktverbrauch von selbst erzeugtem Strom erzielt werden. Die dauerhafte Freigabe im Zeitraum von 13 bis 20 Uhr führt aber dazu, dass auch in den Nachmittagsstunden bei Absinken der Speichertemperatur durch Stillstandsverluste sofort wieder auf die eingestellte Solltemperatur hochgeheizt wird, obwohl in den Nachmittagsstunden der Warmwasser-Bedarf typischerweise gering ist. Problematisch ist auch die Freigabe der Warmwasserbereitung in der kurzen Zeitspanne morgens. Durch die im Tagesverlauf sehr niedrigen Außenlufttemperaturen wird die Effizienz der Anlage negativ beeinflusst. Erschwerend kommt hinzu, dass zu dieser Tageszeit durch Nebel der Wärmetauscher außen schneller vereist, wodurch es zu häufigeren Abtauvorgängen kommt. Zudem kann die Anlage in der kurzen Zeitspanne von einer Stunde die Trinkwarmwassersolltemperatur von 50 °C nicht erreichen, weshalb die Anlage den elektrischen Heizstab häufig hinzuschaltet. Die Einstellungen wurden im Laufe des Monats Mai 2016 angepasst, siehe unten.

Die Heizung war nach Heizkurve (siehe Tabelle 11) eingestellt bei einer täglichen Betriebszeit von 05.00 Uhr bis 22.30 Uhr. Die maximale Vorlauftemperatur betrug bei -15 °C Außenlufttemperatur 50 °C. Die minimale Vorlauftemperatur betrug bei +35 °C (!) Außenlufttemperatur 25 °C! Dass diese Einstellungen für ein hoch wärmegedämmtes Gebäude nach KfW-Effizienzhaus-40-Standard zu einer schlechten Effizienz führen, ist offensichtlich. Die Einstellungen wurden im Sommer 2016 angepasst.

#### Anpassungen im Mai 2016

Vom 05.05.2016 auf den 06.05.2016 wurden die Zeiten für die Warmwasserbereitung modifiziert. Die Freigabe der Warmwasserbereitung wurde auf 13.00 Uhr bis 14.30 Uhr, sowie 19.00

Uhr bis 20.30 Uhr angepasst (siehe Abbildung 26). Somit können die negativen Folgen der bisherigen Regeleinstellung vermieden werden (vgl. Erläuterungen oben). Die Monatsarbeitszahl ist von April auf Mai zwar nicht gestiegen (in beiden Monaten 2,3), was aber auch auf den höheren Anteil für Warmwasserbereitung an der gesamten Wärmebereitstellung durch die Wärmepumpe zurückzuführen ist. Der Direktverbrauch von PV-Strom ist im Monat Mai 2016 im Vergleich zum Vormonat von 36 auf 46% gestiegen.

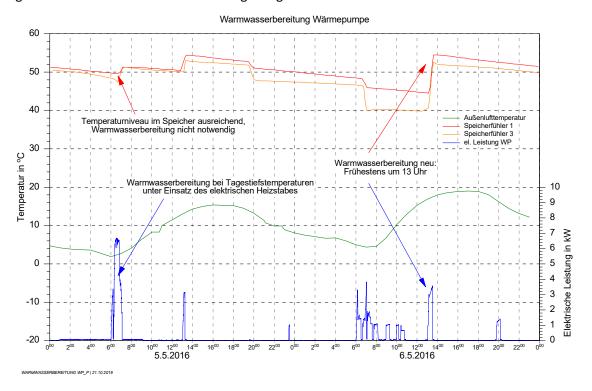


Abbildung 26: Änderung Zeiten Warmwasserbereitung

## Anpassungen im Juli 2016

Am 14.7.2016 wurde die Heizkurve für die kommende Heizperiode auf die Auslegung der Heizflächen auf Basis der Heizlastberechnung angepasst. Die Werte wurden wie folgt verändert:

Werte Heizkurve	Vor 14.07.2016	Nach 14.07.2016
Maximale Vorlauftemperatur	50 °C	45 °C
bei Außenlufttemperatur	bei -15 °C	bei -15 °C
Minimale Vorlauftemperatur	25 °C	25 °C
bei Außenlufttemperatur	bei +35 °C	bei +15 °C

Tabelle 11: Einstellung der Heizkurve

Ein grundsätzliches Problem besteht aber auch nach der angepassten Heizkurve: die Regelung der Wärmepumpe leitet die Vorlauftemperatur von Außentemperatur und Heizkurve ab, nicht vom tatsächlichen Bedarf.. So entsteht vollkommen unnötiger Heizbetrieb, ohne Wärmebedarf im Gebäude (siehe Abbildung 27).

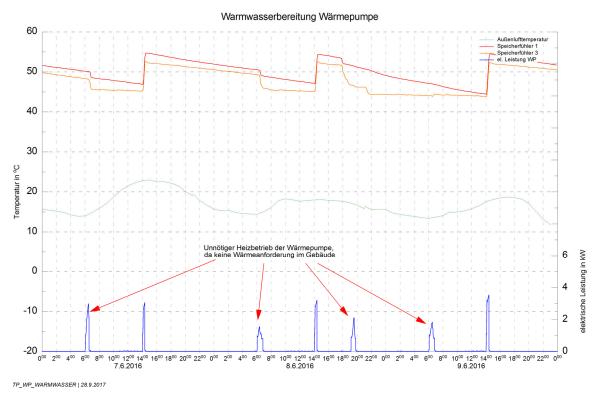


Abbildung 27: Unnötiger Heizbetrieb der Wärmepumpe

Im Zeitraum vom 26.7.2016 bis 28.7.2016 wurde die Solltemperatur für das Trinkwarmwasser schrittweise von 53 °C auf 48 °C reduziert (siehe Abbildung 28). Laut DIN 1988-200 ist eine Reduzierung auf einen Wert unter 50 °C für Einfamilienhäuser zwar nicht empfohlen, bei einem Hygienespeicher wie im vorliegenden Fall mit hohem Wasseraustausch kann dieser Schritt aber auch aus hygienischer Sicht vertreten werden. Für einen reinen Brauchwasserspeicher ist von einer Reduzierung auf Temperaturen unter 50 °C dringen abzuraten!

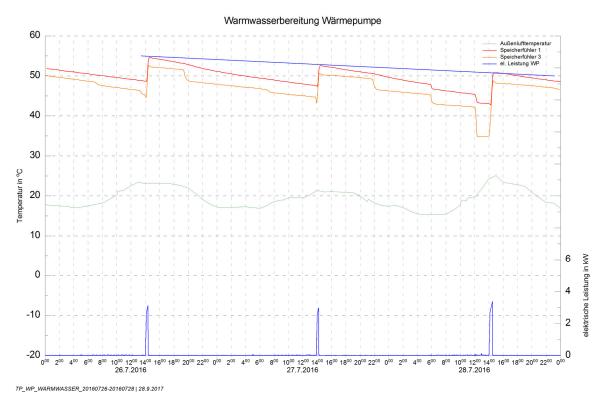


Abbildung 28: Schrittweise Reduzierung der WW-Solltemperatur

Die wie oben beschrieben ermittelte Arbeitszahl umfasst den gesamten Stromverbrauch der Wärmepumpenanlage und damit auch den Stromverbrauch der Regelung. Diese Standbyverluste stellen keine Stillstandsverluste dar, da keine Wärme vorgehalten wird. Es wird lediglich eine elektrische Leistung zum Betrieb der Regelung mit Display und Sensoren benötigt, nicht für den eigentlichen Wärmepumpenprozess.

Die gemittelte Standbyleistung beträgt ca. 20 W. Wird die Arbeitszahl um den Standbystromverbrauch korrigiert, verbessern sich die Sommer-Monatsarbeitszahlen beträchtlich, da hier der Anteil von Standby am gesamten Strombedarf der Anlage relativ hoch ist. In den Wintermonaten mit fast durchgängigem Betrieb fällt dies nicht so sehr ins Gewicht.

# 5. Ergebnisse der zweiten Messperiode

#### 5.1 Klima

Der Verlauf der Monatsmittelwerte der Außenlufttemperaturen im zweiten Messjahr ist bis zum Januar ähnlich wie im ersten Jahr, vgl. Abbildung 29. Deutlich unterschiedlich verlief der Januar und Februar: mit einer Monatsmitteltemperatur von 3,2 °C war der Januar extrem mild (im Vorjahr dagegen war der Januar sehr kalt mit -4,5 °C), der Februar war dafür mit -2,1 °C viel kälter als der Februar im Vorjahr (2,6 °C). Die Jahresmitteltemperatur lag bei 9,0 °C, somit um 0,3 °C wärmer als das erste Messjahr.

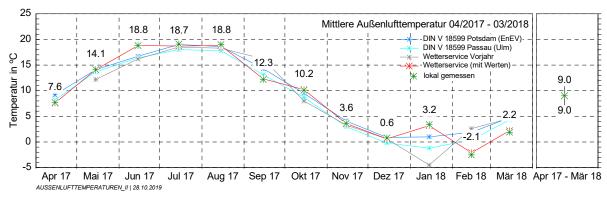


Abbildung 29: Mittlere Außenlufttemperatur der zweiten Messperiode

Die Jahresmitteltemperatur lag bei 9,0 °C, somit um 0,3 °C wärmer als das erste Messjahr.

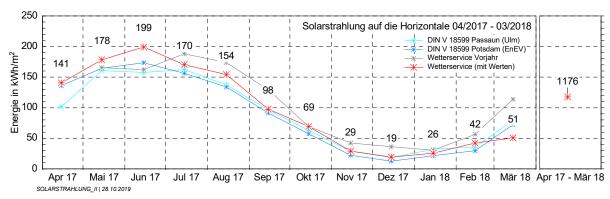


Abbildung 30: Horizontale Solarstrahlung der zweiten Messperiode

Die Solarstrahlung war im zweiten Messjahr ab Juli fast durchgängig niedriger als im Vorjahr, siehe Abbildung 30. Daraus resultiert ein niedrigerer Jahreswert, der mit 1.176 kWh aber immer noch deutlich über dem Normwert nach DIN V 18599 liegt.

# 5.2 Elektrische Energie

# 5.2.1 Haushaltsstrom / Allgemeinstrom

Der Allgemeinstromverbrauch konnte durch Energiesparmaßnahmen mit Hilfe der Hausautomation auf rund 3.150 kWh gesenkt werden, was einer Einsparung von über 10% bedeutet, siehe auch Abbildung 31. Eine nähere Erläuterung des Stromsparmodus ist in Abschnitt 6.2.2 beschrieben.

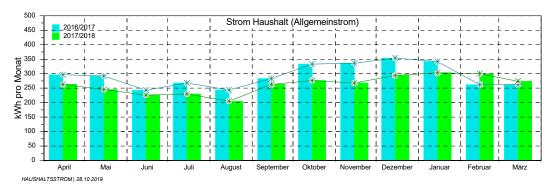


Abbildung 31: Entwicklung Haushaltsstrom

Bezogen auf die Gebäudenutzfläche A<sub>N</sub> nach EnEV betrug der Jahresstromverbrauch ohne die Einliegerwohnung 14,6 kWh/m²<sub>AN</sub> (mit Einliegerwohnung etwa 16,0 kWh/m²<sub>AN</sub>), bezogen auf die Wohn- und Nutzfläche ohne Einliegerwohnung 21,0 kWh/m²<sub>WFL+NFL</sub>.

## 5.2.2 Wärmepumpe

Der Stromverbrauch der Wärmepumpe betrug in der zweiten Messperiode 3.302 kWh. Bezogen auf die Gebäudenutzfläche  $A_N$  nach EnEV betrug der Jahresstromverbrauch 15,4 kWh/ $m_{AN}^2$ , bezogen auf die Wohn- und Nutzfläche mit Einliegerwohnung 18,2 kWh/ $m_{WFL+NFL}^2$ .

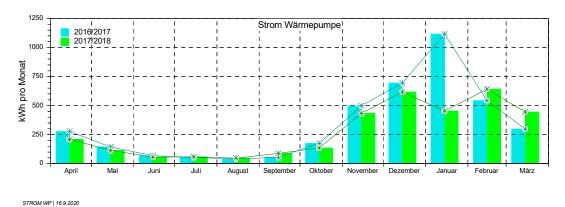


Abbildung 32: Entwicklung Wärmepumpenstrom

Durch Steigerung der Effizienz (siehe dazu 5.5.2) konnte der Stromverbrauch der Wärmepumpe um über 16% gesenkt werden. Der Monatsverlauf der einzelnen Jahre ist in Abbildung 32 dargestellt. Eine analytische Betrachtung des Stromverbrauchs der Wärmepumpe findet sich im Abschnitt 5.5.

#### 5.2.3 Photovoltaik

Die Stromernte der Photovoltaikanlage betrug im zweiten Messjahr 5.539 kWh. Damit lag der Ertrag wieder deutlich über dem errechneten Wert aus der DIN V 18599 (rund 4.500 kWh). Der Monatsverlauf ist in Abbildung 33 dargestellt.

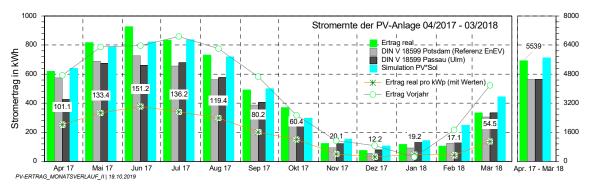


Abbildung 33: Stromernte der PV-Anlage in der zweiten Messperiode

Gegenüber dem Vorjahr liegt der Ertrag damit um 3,3% niedriger, was auf die geringe Einstrahlung zurückzuführen ist. Der Wirkungsgrad der Anlage, errechnet aus der Stromernte im Verhältnis zur eingestrahlten Sonnenenergie auf die mit PV-Modulen belegte horizontale Fläche, beträgt im ersten sowie im zweiten Messjahr rund 12%. Der Direktverbrauch stieg, insbesondere durch den Einsatz des Batteriespeichersystems auf 2.804 kWh.

## 5.2.4 Energieversorger

Durch die geringe Stromernte der PV-Anlage, durch bessere Eigennutzung des PV-Stroms sowie durch den Batteriespeicher reduzierte sich die ins öffentliche Netz eingespeiste Strommenge auf 2.735 kWh (Vorjahr 4.130 kWh, entspricht – 5,8%). 4.271 kWh wurden in der zweiten Messperiode aus dem öffentlichen Netz bezogen.

# 5.2.5 Messfehler

Analog zur ersten Messperiode ergab sich auch in der darauffolgenden eine Differenz von 149 kWh "falsch" gezähltem Strom. Dies entspricht einer Fehlerquote von 1,4%.

## 5.2.6 Batteriespeicher

Insgesamt wurden im 2.Jahr 900 kWh in den Speicher geladen und 675 kWh aus dem Speicher entnommen. Dies ergibt einen Wirkungsgrad von nur 75%. Vgl. Abschnitt 6.4.

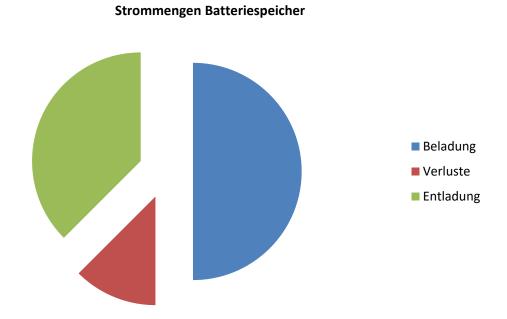


Abbildung 34: Aufteilung Strommengen Batteriespeicher

## 5.3 Thermische Energie

# 5.3.1 Wärmepumpe

Die gesamte von der Wärmepumpe gelieferte Wärmeenergie betrug in der zweiten Messperiode 9.389 kWh. Des entspricht einer geringfügigen Reduzierung gegenüber dem Vorjahr um 1,3% (9.515 kWh).

Wie nachfolgend beschrieben, sind die Verbräuche für Heizung und Warmwasser nicht gesunken, wohl aber die Speicherverluste. Dies ist mit dem insgesamt niedrigeren Temperaturniveau durch die individuelle Solltemperaturvorgabe durch die Hausautomation zu begründen. Vgl. Abschnitt 5.5.2.

## 5.3.2 Heizung

Von der gesamten von der Wärmepumpe bereitgestellten Wärme wurden 6.867 kWh Wärme in die Heizung verteilt. Dies entspricht einer geringfügigen Steigerung um 0,3% gegenüber der ersten Messperiode (6.847 kWh)

Bezogen auf die Gebäudenutzfläche  $A_N$  nach EnEV betrug der Wärmeverbrauch 31,9 kWh/ $m^2_{AN}$ , bezogen auf die Wohn- und Nutzfläche mit Einliegerwohnung 37,8 kWh/ $m^2_{WFL+NFL}$ .

Die nachfolgende Abbildung 35 zeigt wieder den monatlichen Verlauf des Wärmeverbrauchs für die Heizung.

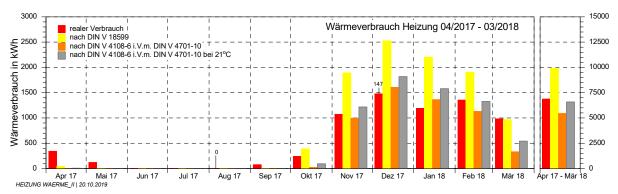


Abbildung 35: Wärmeverbrauch der Heizung in der zweiten Messperiode

#### 5.3.3 Trinkwarmwasser

Durch Warmwasserzapfung wurden im zweiten Messjahr 1.791 kWh, was einer Steigerung um 5,7% gegenüber dem Vorjahr entspricht (1.695 kWh). Bezogen auf die Gebäudenutzfläche  $A_N$  nach EnEV betrug der Wärmeverbrauch 8,8 kWh/ $m_{AN}^2$ , bezogen auf die Wohn- und Nutzfläche mit Einliegerwohnung 9,9 kWh/ $m_{WFL+NFL}^2$ .

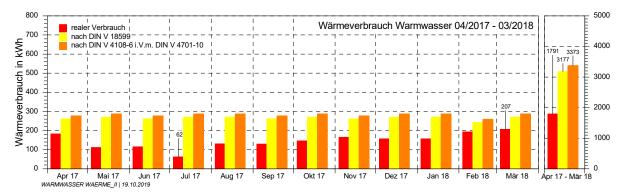


Abbildung 36: Wärmeverbrauch für Trinkwarmwasser in der zweiten Messperiode

Die Steigerung des Wärmeverbrauchs ist in der höheren Zapfmenge in der zweiten Messperiode begründet. Der monatliche Wasserverbrauch für Trinkwarmwasser ist seit Mitte September 2016 sehr konstant bei durchschnittlich 5 m³/Monat. Werden für die ersten Monate im Vorjahreszeitraum, in denen die Wassermenge noch nicht erfasst wurde, dieselben Verbräuche angesetzt, wie in den darauffolgenden Monaten (ohne Vermietung, also 2 m³/Monat), ergibt sich eine Erhöhung der Wassermenge um rund 20%. Dies relativiert den gestiegenen Wärmeverbrauch.

#### 5.3.4 Verluste (Speicher, Stillstand)

Wie bereits oben erwähnt, sind die Speicherverluste im zweiten Messjahr deutlich gesunken. 731 kWh stehen den 973 kWh der ersten Messperiode gegenüber. Dies entspricht einer Reduzierung um knapp 25%.

Dies ist mit dem niedrigeren Temperaturniveau im Speicher zu begründen, als Folge der gezielten Vorgabe der Solltemperaturen durch die Hausautomation.

# 5.4 Temperaturen allgemein

#### 5.4.1 Raumtemperaturen

Die Raumtemperaturen aller direkt mit Fußbodenheizung beheizten Räume lagen im Jahresmittel bei 22,3 °C und damit auf dem selben Niveau wie in der ersten Messperiode (22,4 °C). Für den Zeitraum der Heizperiode (Monate mit reellem Heizwärmeverbrauch) lag die Mitteltemperatur bei 21,4 °C, ebenfalls nahezu gleich wie im Vorjahr (21,3 °C). Die mittlere Außenlufttemperatur lag in demselben Zeitraum bei 5,7 °C und damit höher als im Vorjahr (4,4 °C).

# 5.4.2 Speichertemperaturen

Wie der Abbildung 37 zu entnehmen ist, lagen die Mitteltemperaturen in der zweiten Messperiode im Warmwasserteil ganzjährig auf konstantem Niveau. Insgesamt liegt das Temperaturniveau vergleichbar mit den Monaten August bis März der ersten Messperiode. Der Anstieg der Temperaturen im August 2017 ist mit den Versuchen zur Sollwertüberhöhung in Verbindung mit PV zu begründen, vgl. Abschnitt 6.3.1.

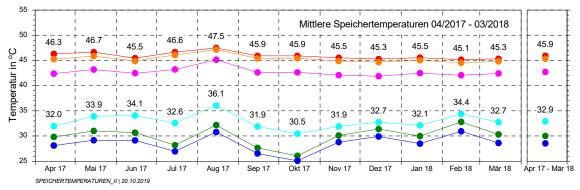


Abbildung 37: Mittlere Speichertemperaturen in der zweiten Messperiode

#### 5.5 Systemeffizienz

#### 5.5.1 Arbeitszahlen der Wärmepumpe

Im Vergleich zum Vorjahreszeitraum liegen die Monatsarbeitszahlen in der zweiten Messperiode konstant höher. Dies hängt natürlich mit dem etwas höheren Außenlufttemperaturniveau zusammen, ist aber im Wesentlichen das Ergebnis der durchgeführten Optimierungsmaßnahmen. Der Verlauf der Arbeitszahlen ist in Abbildung 38 dargestellt.

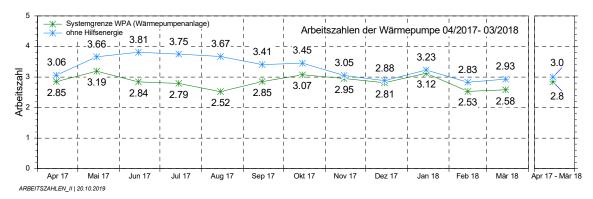


Abbildung 38: Arbeitszahlen der zweiten Messperiode im Monatsverlauf

Die Jahresarbeitszahl verbesserte sich im 2.Jahr auf 2,8 und damit um 0,4. Werte um die 3,5 scheinen hinblickend der bereits durchgeführten Optimierungsmaßnahmen unrealistisch. Hierzu ist aber auch Abschnitt 6.1.2 zu beachten, in dem die Unterschiede zwischen der Prüfstandsmessung und dem Realbetrieb erläutert werden.

Ab Oktober 2017 wurden die Arbeitszahlen separat für den Heiz- und den Warmwasserbetrieb der Wärmepumpe erfasst. Das Ergebnis ist in Abbildung 39 zu sehen. Aufgrund der immer relativ konstanten Bedingungen für die Warmwasserbereitung (Uhrzeit, Zieltemperatur) gibt es bei den Arbeitszahlen nur wenig Ausreißer. Die Effizienz steigt mit steigender Tagesmitteltemperatur leicht an. Je höher die Tagesmitteltemperatur, desto größer ist die Streuung, da die Unterschiede der Außenlufttemperatur im Tagesverlauf auch größer sind (hauptsächlich in der Übergangszeit).

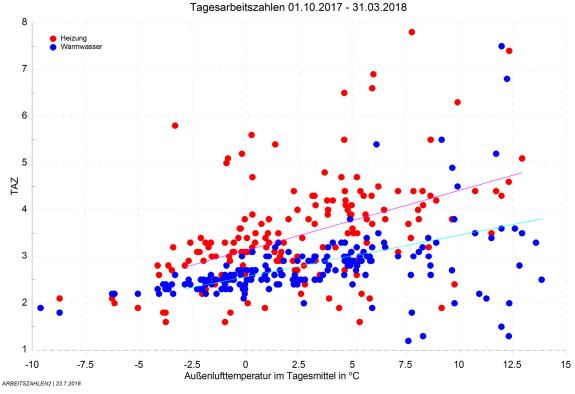


Abbildung 39: Tagesarbeitszahlen (TAZ) für Heizung und Warmwasser

Für den Heizbetrieb ist die Streuung im Allgemeinen größer. Aufgrund der niedrigeren Senkentemperatur (Vorlauftemperatur) liegen die Werte absolut meist über denen der Warmwasserbereitung.

In Abbildung 40 sind die Vorlauftemperaturen und rechnerisch ermittelte COPs in Bezug zur jeweiligen Außenlufttemperatur dargestellt. Insbesondere beim COP ist eine sehr große Streuung zu erkennen. Tendenziell jedoch steigt wie zu erwarten der COP mit zunehmender Außenlufttemperatur bei gleichzeitiger Abnahme der Vorlauftemperatur. Die Vorlauftemperatur entspricht hier dem Vorlauf der Wärmepumpe (nicht der Fußbodenheizung).

In Abbildung 41 werden die Tagesarbeitszahlen (TAZ) ab Oktober 2017 bis zum Ende der Messdatenerfassung dargestellt. Auch hier zeigt sich das schon bekannte Bild steigender Arbeitszahlen mit steigender Außenlufttemperatur, hier als Tagesmittel dargestellt. Bei Tagesmitteltemperaturen unter 0 °C sind die Arbeitszahlen fast ausschließlich im Bereich kleiner 3. Der Grafik ist zu entnehmen, dass die Arbeitszahl jedoch nicht in Bezug zum PV-Ertrag und damit zur Solarstrahlung steht.

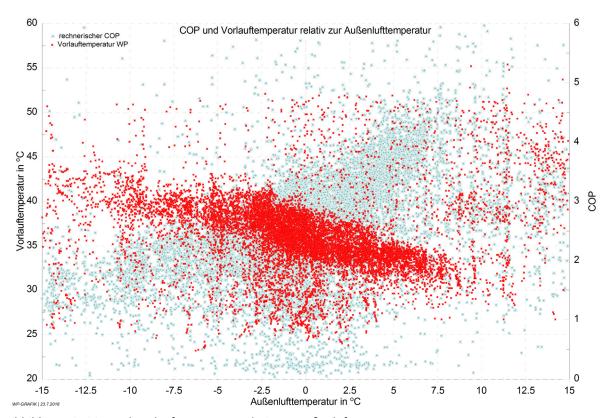


Abbildung 40: COP und Vorlauftemperatur relativ zur Außenlufttemperatur

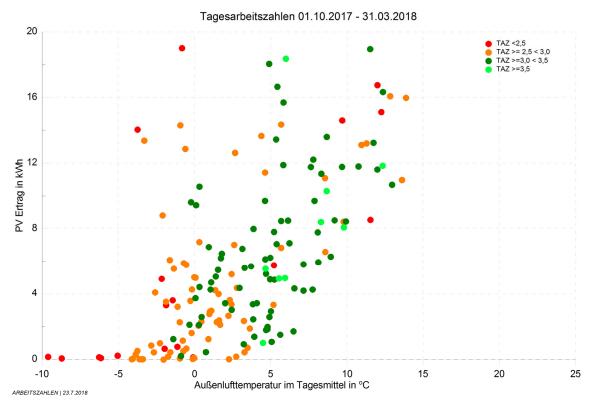


Abbildung 41: TAZ relativ zu PV-Ertrag und Tagesmitteltemperatur

# 5.5.2 Durchgeführte Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz

In der zweiten Messperiode wurden folgende Optimierungsmaßnahmen durchgeführt:

#### Automatikfunktionen der Hausautomation

Zu Beginn der zweiten Messperiode wurden Automatikfunktionen der Hausautomation für die Steuerung der Beschattungseinrichtungen aktiviert. Diese sollen im Wesentlichen die Überhitzung im Sommer vermeiden. Die Optimierung der Ausnutzung solarer Gewinne im Umkehrfall wurde im Rahmen dieses Projektes entwickelt und implementiert, vgl. Abschnitt 6.2.3.

#### Schrittweise Einbindung der Wärmepumpenanlage in Hausautomation

Die Kommunikationsverbindung zwischen der Hausautomation und der Wärmepumpenanlage wurde im zweiten Messjahr in zwei Schritten hergestellt. Zuerst wurde die Umwälzpumpe der Flächenheizung auf das Loxone-System aufgelegt, wodurch die Pumpe direkt aus der Hausautomation heraus an- und ausgeschaltet werden konnte. Im folgenden Schritt wurde ein Kommunikationsmodul in die Wärmepumpe eingebaut, das es ermöglicht, mittels Modbus bestimmte Parameter vorzugeben und abzufragen. Hierdurch konnten die Warmwasserbereitung und die Heizungsregelung optimiert werden und individuelle Nutzervorgaben sowie Randbedingungen wie aktuelle Temperaturen, prognostizierte Temperaturen, Strahlung, etc. berücksichtigt werden.

## Vorgabe Solltemperaturen für Warmwasserbereitung

Durch die Einbindung der Wärmepumpenanlage in die Hausautomation sind neue Möglichkeiten der Warmwasserbereitung gegeben. Die neuen Funktionen sind: Vorgabe Solltemperatur und Vorgabe Betriebszeiten. Es wurde eine Programmierung (System Loxone) entwickelt, die die Temperaturen und die Zeiten der Warmwasserbereitung ermittelt und an die Wärmepumpe überträgt.

Bei der Vorgabe der Temperaturen wurde eine Speicherüberhitzung getestet. Da diese keine spürbaren positiven Auswirkungen auf die Effizienz hatte, vgl. Abschnitt 6.3.1, wurde die Temperatur auf einen bestimmten Wert fixiert (48 °C).

Bei der Ermittlung der optimalen Betriebszeit muss entschieden werden, ob nach optimaler Effizienz oder optimaler PV-Eigennutzung geregelt werden soll. Die Effizienz hängt von der Außenlufttemperatur ab, die PV-Eigennutzung vom Solarstrahlungsangebot. Deren Tagesmaxima müssen sich zeitlich nicht überschneiden. Die Programmierung wurde wie folgt entwickelt:

Täglich wird mit Hilfe des Wetterservice geprüft,

- welche Mindesttemperatur im Zeitraum von 13 bis 17 Uhr prognostiziert wird
- wann die höchste Außenlufttemperatur im o.g. Zeitraum prognostiziert wird
- wann die höchste Solarstrahlung im o.g. Zeitraum prognostiziert wird

Liegt die minimale Temperatur unter 15 °C, so soll an diesem Tag nach der Außenlufttemperatur geregelt werden. Die Warmwasserbereitung findet in diesem Fall in der Stunde (zwischen 13 und 17 Uhr) statt, in der die höchste Außenlufttemperatur vom Wetterservice erwartet wird. Liegt die minimale Temperatur über 15 °C, wird nach der maximalen Solarstrahlung geregelt.

Die Festlegung basiert auf dem Umstand, dass bei Außenlufttemperaturen über 15 °C die Effizienz der Warmwasserbereitung nahezu konstant gut ist und hier dann eine optimale Direktnutzung von PV-Strom erreicht werden soll. Andernfalls ist die höchstmögliche Effizienz des Wärmepumpenbetriebs vorrangig wichtig.

Aufgrund der hohen Solltemperaturen ist die Effizienz der Wärmepumpe bei der Warmwasserbereitung immer vergleichsweise schlecht. Deshalb ist es das Ziel, mit nur einer Warmwasserbeladung des Speichers am Tag auszukommen. In den meisten Fällen reichte die einmalige Beladung in den Sommer- und Übergangsmonaten auch aus. Da die Warmwasserzapfung aber an manchen Tagen abends so hoch war, dass die Speichertemperatur zu stark abgefallen ist, um eine ausreichende Komforttemperatur zum Duschen am folgenden Morgen garantieren zu können, wurde die Programmierung wie folgt ergänzt:

#### Täglich wird geprüft,

- ob morgens um 5 Uhr noch mindestens 43 °C im Speicherkopf herrschen.
- ob am Vorabend um 18 Uhr noch mindestens 46 °C im Speicherkopf herrschen

Wurde am vorigen Tag oder Nacht bereits viel Warmwasser gezapft, reicht die Speichertemperatur unter 43 °C nicht mehr aus, um einen kompletten (komfortablen) Duschvorgang gewährleisten zu können. Da die Außenlufttemperatur aber in den Morgenstunden stets am niedrigsten ist und damit die Voraussetzungen für einen effizienten Wärmepumpenbetrieb am schlechtesten sind, wurde noch die "Zwischenprüfung" am Abend eingeführt. Ist also nach der Warmwasserbereitung am Mittag/Nachmittag schon so viel Warmwasser gezapft, dass die Speicherkopftemperatur um 18 Uhr bereits unter 46 °C gefallen ist, soll hier schon eine neue Warmwasserbereitung gestartet werden. Ziel ist, die höheren Außenlufttemperaturen am Abend (gegenüber dem kommenden Morgen) auszunutzen, da die Wahrscheinlichkeit groß ist, dass die nächtliche Auskühlung des Speichers zu einer Speicherkopftemperatur unter 43 °C um 5 Uhr am kommenden Morgen sorgen würde.

Eine Warmwasserbereitung auf die Solltemperatur von 48 °C führt zum einen dazu, dass die Arbeitszahl der Warmwasserbereitung, bedingt durch die niedrigeren Außenlufttemperaturen (bzw. der PV-Eigenverbrauch durch ein zu geringes Solarstrahlungsangebot) nicht optimal ist. Zum anderen bewirkt die Speicherbeladung auf 48 °C dass in den Nachmittagsstunden noch ein zu hohes Temperaturniveau für eine effiziente Warmwasserbeladung im Speicher herrschen würde. Aus diesem Grund wurden die Solltemperaturen für die "Notladung" des Speichers am Abend und am Morgen neu gesetzt:

## Solltemperatur "Notladung"

abends 18 Uhr: 46 °Cmorgens 5 Uhr: 43 °C

## Vorgabe Solltemperaturen für Heizbetrieb

Für die bevorstehende Heizsaison wurde die Vorgabe der Solltemperaturen für den Heizbetrieb durch die Hausautomation entwickelt. Im ersten Schritt wurde hierzu ein fertiger Programmbaustein ("Intelligente Temperatursteuerung") verwendet. Dieser ermittelt aus den aktuellen Außen- und Raumtemperaturen mittels einer voreingestellten Heizkurve die aktuelle Vorlaufsolltemperatur. Die Raumtemperaturen nehmen bei Verwendung der Default-Parameter einen starken Einfluss auf die Vorlauftemperatur, da die Differenz der Raumsoll- und Isttemperatur vollständig auf die errechnete Vorlauftolltemperatur nach Heizkurve hinzugeschlagen wird. Dieser Einfluss kann sogar noch stärker gewichtet werden. Bei einem Heizungsanlagensystem, bestehend aus Wärmepumpe und Fußbodenheizung, ist eine so starke Überhöhung der Solltemperatur nicht zielführend und führt zu extrem ineffizientem Wärmepumpenbetrieb. Die Parameter Raumeinfluss und Verstärkungsfaktor wurden deshalb in der Folge aus der Programmierung genommen.

Als weiteren Schritt wurde die Wärmebereitung in der Nacht optimiert. Unter folgenden Grundbedingungen wurde der Wärmepumpenbetrieb im Zeitraum von 0 Uhr bis 7 Uhr komplett eingestellt:

- Außenlufttemperatur gemittelt über 24 Stunden ist größer als 11 °C (Bedingung 1)
- Außenlufttemperatur gemittelt über 3 Stunden ist größer als 0 °C (Bedingung 2)

Bedingung 1 führt dazu, dass die Anlage bei Überschreitung der gesetzten Heizgrenztemperatur von 11 °C nachts komplett abgeschaltet wird. Bedingung 2 schränkt die Abschaltung ein, wenn die Außentemperatur in den Abend- und Nachtstunden in den Minusbereich fällt, um eine zu starke Auskühlung des Gebäudes zu vermeiden (bzw. die Solltemperaturen in den Morgenstunden, insbesondere im Badezimmer, gewährleisten zu können).

In der weiteren Entwicklung wurde noch Bedingung 3 eingeführt: Ist die Speichertemperatur am Speicherfühler 4 mehr als 1 °C höher als die errechnete Vorlaufsolltemperatur, wird die Wärmepumpe ebenso abgeschaltet.

Vorrangig vor allen beschriebenen Parametern zur Vorgabe einer Vorlaufsolltemperatur aus der Hausautomation wurde eine "Handbetriebsfunktion" implementiert, die gewährleistet, dass der Nutzer jederzeit auch manuell Vorgaben machen kann.

Bei der Analyse des Wärmepumpenbetriebs in der Heizperiode fielen diverse Betriebszustände auf, bei denen nur ein einziger Stellantrieb geöffnet war und für diesen folglich ein Wärmepumpenbetrieb stattfinden musste. In aller Regel trat diese "Einzelraumheizung" zeitlich versetzt auf, also in Abständen von wenigen Stunden von verschiedenen Räumen. Die Folge war ein taktender Wärmepumpenbetrieb. Aus diesem Hintergrund wurde die Programmierung wie folgt erweitert:

Es wurden Räume ermittelt, die in der Regel tagsüber im Zeitraum von 10 bis 18 Uhr eine Heizungsanforderung hatten. Diese Räume sind: Bad und Wohnbereich der Einliegerwohnung, das Badezimmer, der Koch-Ess-Wohn-Bereich sowie der Flur/Arbeits-Bereich (letzterer nur von Donnerstag bis Sonntag). Liegt im genannten Zeitraum grundsätzlich eine Heizungsanforderung vor, wird bei jedem der oben genannten Räume, unabhängig von seiner aktuellen Anforderung, der Stellantrieb geöffnet, sofern eine bestimmte Raumtemperatur noch nicht erreicht ist (vgl. Tabelle 12). Dies entspricht einer Überheizung der o.g. Räume, da eine Wärmeanforderung zu der Zeit ja nicht besteht, aber dennoch geheizt wird. Ziel soll die Bündelung der Heizzeiten und damit eine Reduzierung der Betriebszeiten und Starts der Wärmepumpenanlage sein.

Raum	Raumtemperatur	Zeitraum
ELW Bad	< 23 °C	MO-SO, 10-18 Uhr
ELW Kochen/Essen/Wohnen	< 23 °C	MO-SO, 10-18 Uhr
Bad OG	< 23 °C	MO-SO, 10-18 Uhr
Kochen/Essen/Wohnen	< 22 °C	MO-SO, 10-18 Uhr
Flur/Arbeiten	< 22 °C	DO-SO, 10-18 Uhr

Tabelle 12: Sollwerte für Raumtemperaturüberhöhung

# 6. Anlagentechnik im Detail

# 6.1 Wärmepumpe

#### 6.1.1 Leistungszahl und Arbeitszahlen

Zur Bestimmung der Effizienz einer Wärmepumpe werden die Kennwerte Leistungszahl und Arbeitszahl ermittelt. Während die Leistungszahl nur für einen bestimmten Betriebszustand gilt, wird bei einer Arbeitszahl immer ein bestimmter Zeitraum betrachtet (z. B. Tag, Monat, Jahr). Am geläufigsten ist die Jahresarbeitszahl. Leistungs- und Arbeitszahlen werden wie folgt ermittelt:

Leistungszahl COP (Prüfstandswert)

$$COP = \frac{\text{gelieferte W\"{a}rme im Betriebszustand XY}}{\text{aufgewendete elektrische Energie im Betriebszustand XY}}$$

 $AZ = \frac{\textbf{gelieferte W\"{a}rme im Zeitraum XY}}{\textbf{aufgewendete elektrische Energie im Zeitraum XY}}$ 

Die Leistungszahl oder der COP spiegelt zunächst die Güte bzw. die Effizienz eines Wärmepumpenaggregats wieder. In Verbindung mit der klaren Definition von Betriebsparametern kann die Leistungszahl zum Vergleich von Wärmepumpen herangezogen werden. Allerdings können COP bzw. Leistungszahl nur zur Beurteilung der Qualität des Aggregates selbst dienen, da die tatsächlichen Betriebsbedingungen eines Heizsystems darin nicht abgebildet werden.

Für die Ermittlung der Leistungszahl gibt es zwei Normen: die inzwischen abgelöste DIN EN 255, sowie die neue DIN EN 14511. Beide Normen unterscheiden sich grundsätzlich nach den Randbedingungen für die Ermittlung des COP. So enthält die DIN EN 14511-3 andere Temperaturpaare und Spreizungen auf Wärmequellen- und Wärmesenkenseite. In der neuen Norm DIN EN 14511 wurde unter anderem festgelegt, dass die Temperaturspreizung zwischen Heizungsvorlauf und -rücklauf von 10 K auf 5 K reduziert wird. Diese Randbedingungen haben erheblichen Einfluss auf den COP. Somit können auf Basis verschiedener Normen ermittelte COPs nicht miteinander verglichen werden.

Arbeits- und Leistungszahlen können für verschiedene Bilanzgrenzen ermittelt werden, vgl. Abbildung 42. Die engste Systemgrenze ist die Wärmepumpe selbst (WP). Sie dient zur Ermittlung des COPs. Hier werden die gelieferte Wärme aus dem Gerät und die dafür benötigte elektrische Energie ins Verhältnis gesetzt. Weitere Aufwände für die Erschließung von Wärmequellen (z.B. Solepumpe) oder Hilfsenergien (z.B. Heizstäbe) werden nicht berücksichtigt. Werden diese in die Berechnung einbezogen, erhält man die Effizienz der Wärmepumpenanlage (WPA). Werden

auch Speicher (Heizungspufferspeicher, Trinkwasserspeicher, Kombispeicher wie z.B. Hygienespeicher, etc.) mitberücksichtigt, erweitert sich die Bilanzgrenze zur Wärmepumpenheizungsanlage (WPHA). Diese stellt die umfänglichste Systemgrenze dar und würde für die Betrachtung eines Gesamtsystems auch am meisten Sinn ergeben, da die Effizienz einer Wärmepumpe immer vom gesamten System abhängt.

Um eine Vergleichbarkeit zu anderen Wärmeerzeugern herstellen zu können, ist die Bilanzgrenze WPA erforderlich. Da bei der Wärmepumpe der Energieträger sowohl für den eigentlichen Wärmeerzeugungsprozess als auch für die Hilfsenergie derselbe ist, wird i. d. R. nicht differenziert bilanziert, sondern die Hilfsenergie (Regelung) immer einberechnet. Bei anderen Wärmeerzeugern (z.B. Gastherme bzw. Gaskessel, Pelletskessel) werden Jahresnutzungsgrade etc. üblicherweise nur für die Hauptaufgabe – Erzeugung von nutzbarer Wärme – ermittelt. Die Hilfsenergie, die insbesondere bei Holzheizungen sehr hoch sein kann, wird manchmal aber auch mit einbezogen.

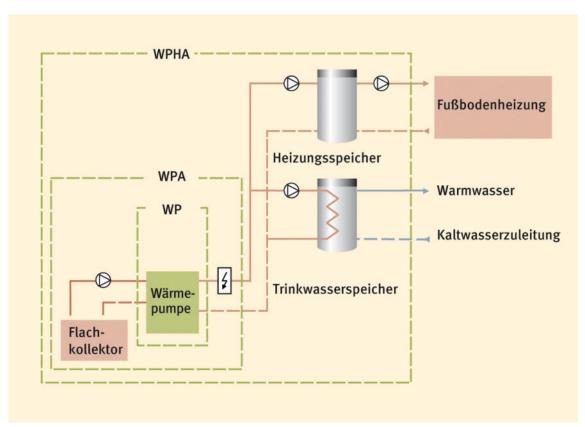


Abbildung 42: Bilanzgrenzen Arbeitszahlen [BINE-01] (siehe auch gemäß VDI 4650)

Im Projekthaus wurde die Systemgrenze WPA bilanziert. In der ersten Messperiode allerdings inklusive der Heizungsumwälzpumpe, die aus der Regelung der Wärmepumpe versorgt wurde (Standardfall bei diesem System). Im zweiten Jahr wurde die Pumpe direkt von der Hausautomation geregelt, fiel damit also nicht mehr in die Bilanzgrenze der Wärmepumpenanlage.

Wie oben beschrieben, wird die Hilfsenergie i.d.R. automatisch in der Arbeitszahl mitberücksichtigt. Im Projekt wurde deshalb jeweils eine Arbeitszahl mit und ohne Hilfsenergie ermittelt, vgl. Abschnitte 4.5.1 und 5.5.1.

Arbeitszahlen sollen vorrangig zum Vergleich verschiedener Wärmepumpenanlagen dienen. Um die Wärmepumpe mit anderen Wärmeerzeugern vergleichen zu können, kann aus Sicht des Autors die CO<sub>2</sub>- der Anlage als Grundlage dienen, vgl. Abschnitt 6.1.3. Emission. Das gilt aber nicht ausschließlich, auch mit PV-Strom kann eine Wärmepumpe ineffizient sein.

Zum Vergleich verschiedener Arbeitszahlen sind auf jeden Fall folgende Aspekte relevant:

- Systemgrenze/Bilanzgrenze (gemäß VDI 4650)
- Berücksichtigung ungenutzter Heizenergie (z. B. im Sommer, oder Fehlbetrieb)
- Bilanzzeitraum
- Art der Wärmequelle
- Einsatzgebiet (Gebäudestandard, Warmwasseranteil)
- Betriebstemperaturen

Zur Bewertung der Effizienz von Wärmepumpen steht die Arbeitszahl meist im Mittelpunkt. Dabei wird aber nicht berücksichtigt, ob die bereitgestellt Wärme auch effektiv genutzt wurde. Eine hohe, gute Arbeitszahl ist wenig wert, wenn unnötig viel Wärme erzeugt wurde.

## 6.1.2 Theorie und Praxis: Prüfstandsmessung und Realbetrieb

Die Effizienz einer Wärmepumpenanlage reagiert sehr sensibel auf schwankende Randbedingungen wie z. B. höheres gefordertes Temperaturniveau. Daher werden baugleiche Anlagen stark unterschiedliche Ergebnisse liefern. Um Anlagen vergleichbar zu machen, wird deshalb i.d.R. auf die Richtlinie VDI 4650 [VDI4650] verwiesen. Hier wird aus den COPs der Prüfstandsmessung mittels einer normierten Berechnungsmethode eine Jahresarbeitszahl, der SCOP (Seasonal Coefficient of Performance) ermittelt. Der SCOP wird für den Heiz- und den Warmwasserbetrieb getrennt ermittelt und durch Gewichtung zu einer Gesamt-SCOP zusammengefasst. In den normierten Berechnungsgang gehen projektspezifische Randbedingungen wie Außenlufttemperatur oder Heizgrenztemperatur des Gebäudes mit ein. Die Bilanzgrenze ist die Wärmepumpenanlage WPA (vgl. Abschnitt 6.1.1), also ohne Berücksichtigung von Speicher- und/oder Wärmeverteilungsverlusten.

Für die in diesem Projekt vermessene Wärmepumpenanlage ergeben sich folgende SCOP nach VDI 4650:

SCOP Heizung = 3,85 SCOP Warmwasserbereitung = 2,91

Der Standardwarmwasseranteil beträgt 18%. Daraus ergibt sich ein SCOP der Gesamtanlage von 3,68. Wird der Warmwasseranteil aus den ermittelten Daten der EnEV-Berechnung zu Grunde gelegt (Anteil rund 40%), sinkt der SCOP auf 3,41. In der ersten Messperiode lag der Anteil tatsächlich bei 23%. Somit beträgt der SCOP nach VDI 4650 3,6.

Es zeigt sich also eine beträchtliche Diskrepanz zwischen ermittelter SCOP nach VDI 4650 und real gemessener JAZ (3,68 zu 2,4 in der ersten Messperiode).

Die Ursachenforschung beginnt schon bei den angesetzten COPs aus der Prüfstandsmessung nach DIN EN 14511. Für eine Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Außenaufstellung gelten hier folgende Normnennbedingungen auf dem Prüfstand:

- Außenlufttemperatur +7 °C (Trockenkugeltemperatur)
- Eintrittstemperatur in die WP 30°C
- Austrittstemperatur aus der WP 35 °C

Bei der Prüfstandsmessung wird die Anlage bei Normnennbedingungen "eingefahren", d.h. der Volumenstrom wird solange angepasst, bis die angestrebte Temperaturdifferenz von 5K zwischen Ein- und Austrittstemperatur konstant erreicht wird. Der so ermittelte Volumenstrom bleibt für die Messung bei anderen Außenlufttemperaturen (ohne Anpassung der Pumpenleistung, was später in der Praxis so erfolgt) konstant. Zudem wird der COP rechnerisch optimiert, indem der von der Umwälzpumpe hergestellte Druckhub in eine Wärmeleistung umgerechnet wird, welche anschließend von der ermittelten Wärme- und Stromleistung abgezogen wird. Somit verbessert sich der COP, was jedoch nicht sehr praxisnah ist. Um diesen Effekt maximal zu nutzen, wird bei der Prüfstandsmessung die Anlage so eingestellt, dass die Pumpe einen möglichst hohen Druckhub erbringt. Des Weiteren werden von erfahrenen Wärmepumpenherstellern nur Anlagen mit absolut optimierten und perfekt funktionierenden Komponenten auf dem Prüfstand gemessen, da die einzelnen Komponenten nicht immer von gleicher Qualität sind.

Selbstverständlich unterscheidet sich ein Prüfstandbetrieb erheblich vom Realbetrieb, mit sich ständig ändernden Randbedingungen durch externe Einflüsse, Nutzerverhalten, etc. Typisch auftretende Abweichung der Randbedingungen zwischen Normberechnung und Praxis sind in nachfolgender Tabelle stichpunktartig gelistet:

Kategorie	Beschreibung der Abweichung
Nutzerbedingt	Trinkwarmwasserbedarf mehr/weniger
	Trinkwarmwassertemperatur höher/niedriger
	Heizniveau höher/niedriger
	Beheizte Fläche im Haus / Anteil Trinkwarmwasser am Gesamt-
	verbrauch
Konzeptbedingt	Fußbodenbeläge anders als bei Auslegungsberechnung der Fuß-
	bodenheizung
	Anderes Heizsystem (z.B. Heizkörper)
	Speicherung (Kombispeicher, Pufferspeicher, TWW-Speicher,)
	Auslegung/Dimensionierung Pumpen
	Trinkwasserbereitung, Zirkulation, etc.
	Betriebsweise (monoenergetisch, monovalent, bivalent)

Tabelle 13: Typisch auftretende Abweichung der Randbedingungen

# 6.1.3 CO<sub>2</sub>-Bilanz

Die Einbindung einer Photovoltaikanlage in das KfW-Effizienzhaus 40-Energiekonzept wird häufig als ideale Komponente in Verbindung mit einer Wärmepumpenheizung dargestellt. Da durch die Wärmepumpe nur noch der Energieträger Strom im Haus benötigt wird, liegt diese Argumentation auch nahe. Der tatsächliche Nutzen für das System ist aber bei weitem nicht so groß, wie häufig erwartet, siehe Abbildung 43. In der oberen Grafik ist der monatliche Stromverbrauch der Wärmepumpe während des Monitoringzeitraums dargestellt (grau). In grün gekennzeichnet ist der Anteil des Stromverbrauchs, der direkt aus der PV-Anlage bezogen werden konnte. Prozentual ist der Anteil des Direktverbrauchs in den Sommermonaten mit ausschließlicher Warmwasserbereitung (und überwiegender Betriebszeit in den Mittags- und Nachmittagsstunden) naturgemäß sehr hoch; der absolute Wert jedoch relativ gering. Dies soll nicht als Kritik gegen eine Installation einer PV-Anlage gesehen werden. Schließlich wird ja der Rest des selbst erzeugten Stroms im Haushalt direkt verbraucht und Überschüsse ins öffentliche Netz eingespeist – der ökologische Nutzen ist als durchaus vorhanden (siehe hierzu auch weiter unten). Der Direktverbrauch von PV-Strom in der Wärmepumpe sollte aber nicht DAS entscheidende Kaufkriterium sein!

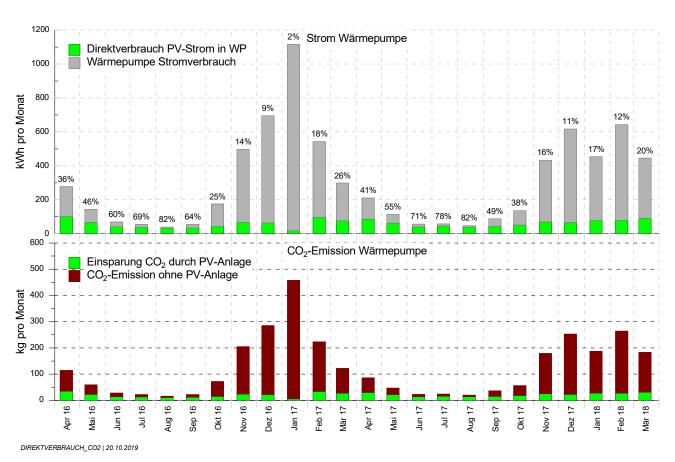


Abbildung 43: PV-Strom Direktverbrauch in WP

In der unteren Grafik wurde der Stromverbrauch der Wärmepumpe in CO<sub>2</sub>-Emissionen umgerechnet. Die Emissionen setzen sich aus dem Verbrauch des aus dem Netz bezogenen Stroms sowie dem Direktverbrauch von PV-Strom zusammen. Dabei wurden folgende Werte zu Grunde gelegt:

Als CO<sub>2</sub>-Emission für den aus dem öffentlichen Netz bezogenen Strom wurde die Stromkennzeichnung gemäß § 42 EnWG der SWU für 2016 herangezogen.

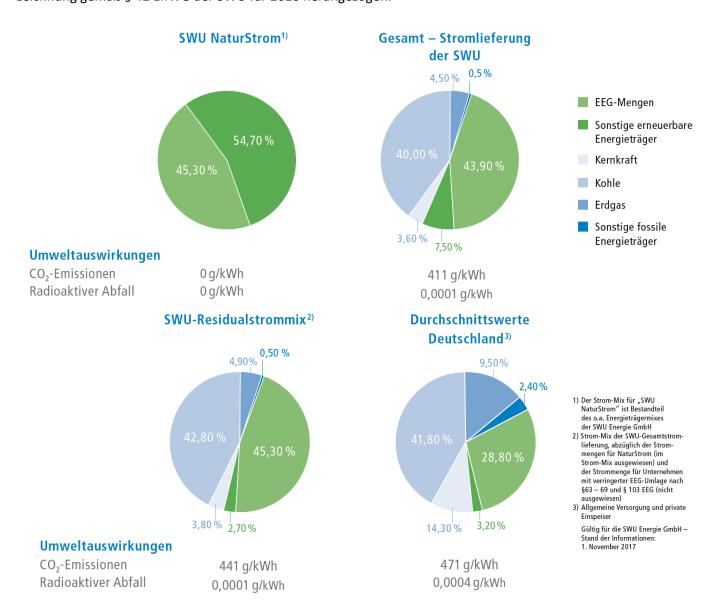


Abbildung 44: Stromkennzeichnung der SWU für 2016 [SWU]

Die Angaben für den Bundesdurchschnitt variieren je nach Quelle. Im Folgenden werden die CO<sub>2</sub>-Emissionswerte für den SWU-Durchschnitt als nicht erneuerbarer Referenzwert mit **411 g/kWh** herangezogen.

Die CO<sub>2</sub>-Emission für Photovoltaik wurde den Berechnungen der IWU, veröffentlich am 17.12.2014, entnommen. [IWU]

PV-Strom (polykristallin)

62 g/kWh

#### Exkurs:

Auch die Angaben für den Primärenergieaufwand für die Herstellung von PV-Modulen variieren je nach Quelle. Aus einer Übersicht von [Quaschning] über die  $CO_2$ -Bilanz der Photovoltaik wurde als aktuellste Untersuchung (aus dem Jahr 2010) für polykristalline Module ein PE-Aufwand von etwa 8.000 kWh<sub>Primär</sub> je kW<sub>p</sub> angegeben. Für die Anlage auf dem Projekthaus mit 6,12 kWp bedeutet dies ein Primärenergieaufwand von rund 49.000 kWh<sub>Primär</sub>. Bei einem aktuellen Strom-Primärenergiefaktor von 1,8 entspricht dieser Wert rund 27.200 kWh<sub>el</sub>. Die Stromernte im ersten Messjahr betrug 5.700 kWh<sub>el</sub>. Die energetische Amortisationszeit liegt somit bei rund 5 Jahren (3-4).

Aus den detaillierten Messwerten für Strom, die in 10 Sekunden-Werte umgewandelt wurden, wurde rechnerisch der Direktverbrauch von PV-Strom in der Wärmepumpe wie folgt ermittelt:

wenn PV-Strom < WP-Strom, dann PV-Strom\* wenn PV-Strom > WP-Strom, dann WP-Strom\*

Die Summe aus PV-Strom\* und WP-Strom\* wurde somit als direktverbrauchter PV-Strom durch die Wärmepumpe definiert. Für die erste Messperiode wurde so ein Direktverbrauch von 682 kWh ermittelt, im zweiten Messjahr 751 kWh.

Die Differenz aus dem gesamten Wärmepumpenstromverbrauch und dem rechnerisch ermittelten Direktverbrauch ist der Restbezug aus dem öffentlichen Netz (1. Messjahr 3.281 kWh / 2. Messjahr 2551 kWh). Mit den oben ausgewiesenen CO<sub>2</sub>-Emissionswerten für Strombezug aus dem Netz und PV-Strom wurden folgende CO<sub>2</sub>-Emissionen errechnet: 1. Jahr 1.391 kg, 2. Jahr 1.095 kg. Für die Betrachtung, welche CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem verbrauchten Wärmepumpenstrom ohne die Photovoltaikanlage entstanden wären, wurde der ermittelte Direktverbrauch auch mit dem CO<sub>2</sub>-Faktor für öffentlichen Strom multipliziert (1. Jahr 1.629 kg, 2. Jahr 1.357 kg). Die Einsparung von CO<sub>2</sub> durch Direktverbrauch betrug somit im ersten Messjahr 238 kg, in der zweiten Periode 262 kg.

Um es Laien bildhafter zu machen, wird ein Vergleich mit der Fahrleistung eines PKW erstellt: Bei einem angesetzten CO<sub>2</sub>-Ausstoß eines PKWs von 125 g/km entspricht die Einsparung durch PV-Direktverbrauch in der Wärmepumpe einer jährlichen Fahrleistung von 1.900 km im ersten Jahr und 2.100 km im zweiten Jahr. Die gesamte CO<sub>2</sub>-Emission des Wärmepumpen-Strombezugs entspricht dann einer Fahrleistung von rund 11.100 km bzw. 8.800 km.

#### 6.1.4 COP-Verlauf im Betrieb

Die Messdatenerfassung wurde im Laufe des Projekts dahingehend weiter verbessert, dass auch sekündliche COPs ermittelt werden konnten durch die hochauflösende Erfassung der Wärmeleistung der Wärmepumpenanlage.

Die so entstandenen Grafiken verdeutlichen sehr gut, dass die interne Regelung der Anlage eine "Black Box" ist. So zeigen sich z. T. unerklärliche Aktivitäten in Zeiten, in denen über die Hausautomation eigentlich "Stillstand" vorgegeben wurde. Erschwerend kommt hinzu, dass keinerlei Muster erkennbar sind.

Die Grafik des Wärmepumpenbetriebs (Abbildung 45), im Tagesverlauf des 8.12.2017, eignet sich sehr gut, um verschiedene Erkenntnisse zu verdeutlichen. Die oben beschriebenen Aktivitäten der WP sind von Mitternacht bis 7 Uhr morgens erkennbar. Zwischen 8 und 10 Uhr (1. Zeitabschnitt), sowie zwischen 10 und 12 Uhr (2. Zeitabschnitt) kann verdeutlicht werden, wie sich häufiges Takten auf die Effizienz der Anlage auswirkt.

Der Außentemperaturverlauf in den genannten Zeiträumen ist relativ konstant auf gleichbleibendem Niveau. Im 1. Zeitabschnitt wurde die Vorlaufsolltemperatur aus der Hausautomation im Mittel mit 28,6 °C vorgegeben. Die gemessene Vorlauftemperatur in den Betriebszeiten war durchgängig höher, im Mittel lag sie bei 32,8 °C. Die Inverterregelung der Anlage scheint hier an ihre Minimumgrenze zu stoßen. Eine (banale) Erkenntnis, die hieraus gezogen werden kann, ist, dass auch bei Inverter-Anlagen auf einen Pufferspeicher nur verzichtet werden kann, wenn durch die Dimensionierung des Heizkreises sichergestellt werden kann, dass auch bei Betrieb in der Mindestdrehzahl die notwendige Wasserumlaufmenge gegeben ist bzw. die erzeugte Wärme abtransportiert werden kann. Andernfalls geht die Anlage, wie hier deutlich zu erkennen, in einen Taktbetrieb. Die Arbeitszahl im 1. Zeitabschnitt, mit 8 Betriebsstarts, lag bei rund 3,0. Im folgenden 2. Zeitabschnitt konnte ein durchgängiger Betrieb festgestellt werden. Die mittlere Solltemperatur lag mit 31,2 °C sogar höher als im vorigen Zeitabschnitt. Die mittlere Vorlauftemperatur lag mit 31,3 °C fast perfekt an der Sollvorgabe. Im Ergebnis zeigt sich eine Arbeitszahl von 3,8 bei lediglich einem Betriebsstart.

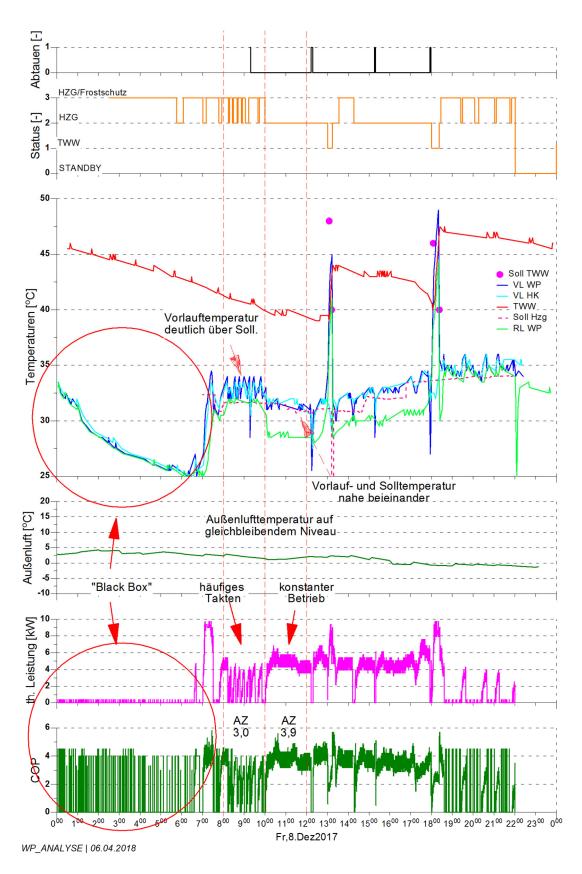


Abbildung 45: WP-Betrieb am 08.12.2017 (detailliert)

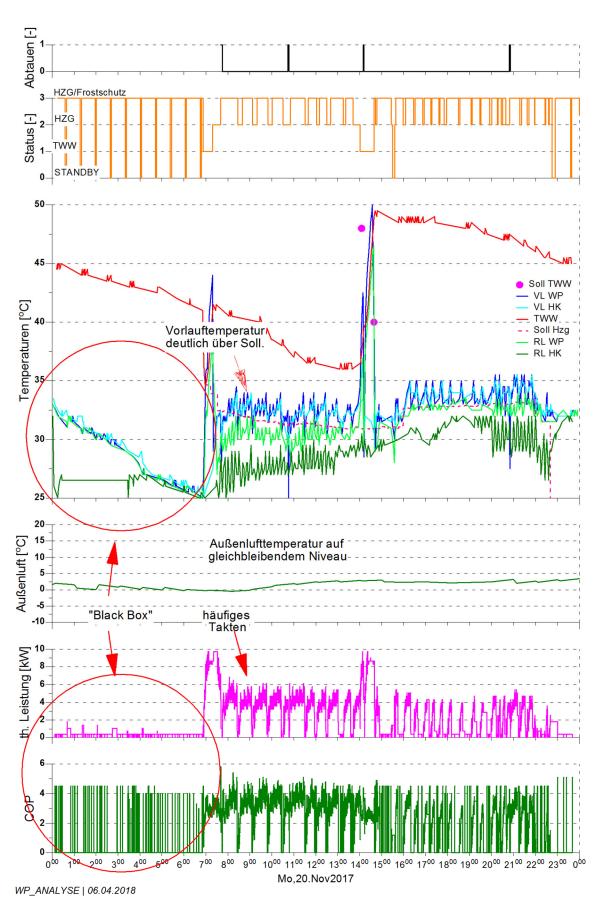


Abbildung 46: WP-Betrieb am 20.11.2017 (detailliert)

Abbildung 46 zeigt den Tagesverlauf des Wärmepumpenbetriebs am 20.11.2017. Hier lässt sich in den Morgenstunden ein merkwürdiges Betriebsverhalten der Anlage feststellt werden (der hier ausgewählte Tag ist nur exemplarisch, der Verhalten zeigt sich öfters) mit sehr kurzen Betriebszyklen bei sehr geringer Wärmeleistung, ohne vorgegebene Anforderung durch die Hausautomation. Im weiteren Verlauf kann ist gut erkennbar, dass der COP bei "Neustart" der Anlage kurze Zeit braucht, um sich auf einer gewissen Effizienzbandbreite einzuschwingen. Dies verdeutlicht, wie schon die Beobachtungen oben mit Ermittlung von Arbeitszahlen im Taktbetrieb und Dauerbetrieb, dass die Anlagenstarts verlustbehaftet sind und somit schädlich für den effizienten Betrieb der Wärmepumpe ist.

Aufgrund fehlender Einstellmöglichkeit sowie einer gewissen Unsicherheit, ob Einstellwerte auch hundertprozentig von der internen Wärmepumpenregelung umgesetzt werden, war es in diesem Projekt nicht möglich, die Effizienz des Inverterbetriebs mit dem Volllastbetrieb zu vergleichen. Aussagen hierüberkönnen auf Grundlage der vorhandenen Datenbasis nicht getroffen werden.

## 6.1.5 Thermischer Speicher

Der oder die Speicher ist/sind für einen effizienten Betrieb, neben der Auswahl der Wärmepumpe, ein mindestens genauso entscheidender Systembestandteil.

Der aktuelle Trend bei Luftwärmepumpen ist eindeutig die Invertertechnologie, die auch im Projekthaus eingebaut ist. An dieser Stelle ist anzumerken, dass Inverter zunächst stets verlustbehaftet sind. Diese Art von Luftwärmepumpen können die Leistung modulieren und an den Bedarf in bestimmten Grenzen anpassen. Dadurch kann systemtechnisch hier meist auf einen Pufferspeicher verzichtet werden. Verfügt die Anlage über keinen Heizungspufferspeicher, muss die Mindestbetriebszeit der Wärmepumpe sichergestellt werden. Dies kann entweder durch die Nutzung von genügend offenen Heizkreisen oder durch ein Überstromventil erreicht werden. Ein Heizungspufferspeicher dient in der Praxis meist nur als hydraulische Weiche, da eine wirkliche "Pufferung" von Heizwärme, die über einen angemessenen Zeitraum hinweg zwischengespeichert wird, sehr groß dimensionierte Speicher zur Folge hat. Dies ist aus wirtschaftlichen Gründen (Investitionskosten, Platzbedarf) und aus Effizienzgründen wenig sinnvoll, da ein Speicher immer höhere Systemtemperaturen bedingt. Um beispielsweise eine Vorlauftemperatur von 30 °C bereitzustellen, muss der Speicher eine Temperatur von 32 bis 35 °C aufweisen. Der mögliche Effizienzvorteil durch die Nutzung höherer Außenlufttemperaturen bei der Wärmeerzeugung wird durch die höhere Senkentemperatur wieder zunichte gemacht.

Wird eine Wärmepumpe ohne Inverter eingebaut ("An/Aus-Maschinen"), ist es in der Regel nicht sinnvoll, auf einen Pufferspeicher zu verzichten, da sich sonst ein häufiges Takten der Wärmepumpe nicht vermeiden lässt.

Der Trinkwasserspeicher ist ebenfalls von großer Bedeutung. Aufgrund der begrenzten Heizleistung ist eine Wärmepumpe nicht in der Lage, Trinkwarmwasser ohne Speicher bereitzustellen. Für eine Dusche mit einer durchschnittlichen Durchflussmenge von 9 Liter/Minute würde ohne

Speicher eine Wärmeerzeugerleistung von etwa 20 kW benötigt. Da also ein Trinkwasserspeicher unverzichtbar ist, kommen verschiedene Speichertypen in Betracht, die nachfolgend speziell für den Wärmepumpenbetrieb näher beschrieben sind:

# Reiner Trinkwarmwasserspeicher

Bei einem reinen Trinkwarmwasserspeicher ist grundsätzlich das niedrigste Temperaturspeicherniveau aller Speicherformen gegeben, da die Wärme bereits auf dem "Zielmedium" Brauchwasser übertragen ist. Dies führt zu etwas geringen Speicherverlusten. Bei der Wärmebereitung ist eine Übertemperatur von einigen Kelvin am Wärmeübertrager (z. B. 1 K) erforderlich. Zur Sicherstellung der Trinkwasserhygiene ist aber zwingend ein Temperaturniveau von mindestens 60 °C im Speicher vorzuhalten und auf einen regelmäßigen Wasseraustausch zu achten (Ausnahme EFH, bis 400 Liter Speicher). Der Speicher muss deshalb auf den tatsächlichen Bedarf ausgelegt werden und kann nicht zur Zwischenspeicherung von überschüssigem PV-Strom überdimensioniert werden. Ein Überhitzen ist auch nur bedingt möglich, da sonst ein Verbrühschutz erforderlich wird und der Kalkausfall zu beachten ist.

## **Frischwasserstation**

Die Frischwasserstation ist hinsichtlich der Trinkwasserhygiene gegenüber dem Trinkwasserspeicher im Vorteil, da kein Brauchwasser auf kritischem Temperaturniveau (Stichwort Legionellen) vorgehalten wird. Um eine hohe Schüttleistung zu erzielen, ist eine Übertemperatur von wenigen Kelvin im Speicher notwendig. Dies führt zu einer schlechteren Effizienz bei der Wärmebereitung.

# Kombispeicher/Hygienespeicher

Ein Kombispeicher (600 Liter), nachfolgend als Hygienespeicher bezeichnet, kann als integrierte Frischwasserstation im Pufferspeicher gesehen werden. Durch ein Wellrohr wird das Trinkwasser durch den Pufferspeicher geführt und so erhitzt. Auch hier wird nur eine sehr geringe Menge Frischwasser bevorratet (Inhalt des Wellrohrs), weshalb der Speicher als Hygienespeicher bezeichnet werden kann. Herkömmliche Hygienespeicher sind in Ihrer Schüttleistung aber begrenzt.

Im Projekthaus wurde wie oben beschrieben eine besondere Form des Hygienespeichers installiert, der mit geringer Übertemperatur von 2-3 °C eine hohe Schüttleistung erzielt. Somit kombiniert er die Vorteile hinsichtlich der Hygiene, der Effizienz, der Schüttleistung und der Flexibilität bei der Auslegung (mögliche Überdimensionierung).

Am Beispiel des Speichers im Projekthaus wurde die Trinkwarmwasserbeladung genauer betrachtet:

Abbildung 47 zeigt die Ausgangssituation und den Start des Beladevorgangs. Im oberen Speicherbereich – der Zone für die Warmwasserbereitung, siehe auch Beschreibung in Abschnitt 2.4.2 – herrscht ein Temperaturniveau von etwa 42 °C. Idealerweise ist dieser Bereich komplett auf dieses Temperaturniveau "ausgekühlt". Mit Start des Beladevorgangs wird der Speicher mit der Solltemperatur von 52°C beladen. Der Beladevorgang ist beendet, wenn die obere Pufferzone komplett auf Solltemperatur beladen ist, siehe Abbildung 47.

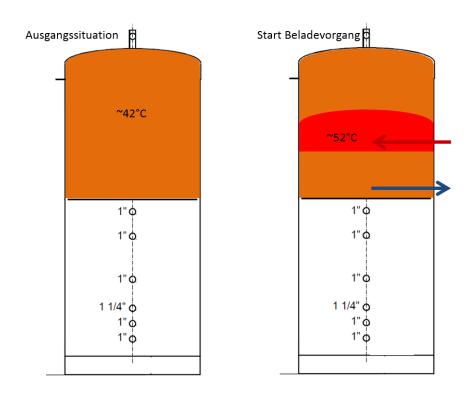


Abbildung 47: Status Quo Hygienespeicher: Beginn Beladung

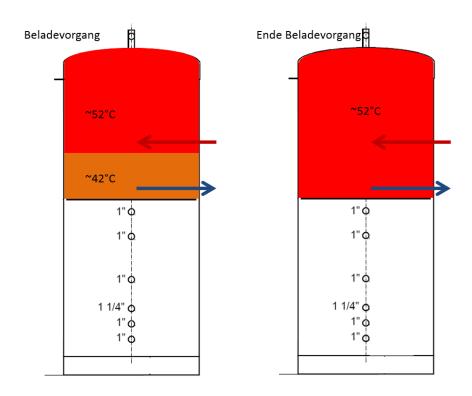


Abbildung 48: Status Quo Hygienespeicher: Ende Beladung

Die untere Pufferzone mit etwa 300 Liter Inhalt dient als Heizungspuffer. Da wie weiter oben beschrieben keine große Pufferung von Heizungswärme bei dieser Größenordnung des Speichers möglich ist, zudem wegen Invertertechnologie und schlechterer Effizienz bei Übertemperatur auch keine Speicherung notwendig ist, könnte diese Zone auf ein Minimum von etwa 100 Liter reduziert werden. Die freiwerdenden 200 Liter können der Warmwasserzone zugeschlagen werden.

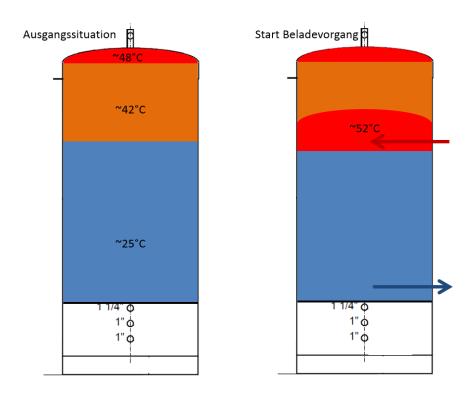


Abbildung 49: Optimierter Hygienespeicher: Beginn Beladung

In Abbildung 49 ist die Ausgangssituation für den Start des Beladevorgangs der Warmwasserzone des veränderten Speichers dargestellt. Ein Großteil des Speichers wurde idealerweise so gut genutzt, dass sich ein Temperaturniveau von 20 - 30 °C einstellt. Nun kann dieses niedrige Temperaturniveau, entweder in mehreren Schritten oder sofort, auf Zieltemperatur erwärmt werden. Vorteile wären eine höhere Effizienz wegen niedrigeren Rücklauftemperaturen bei Beginn der Beladung sowie längere Laufzeiten der Wärmepumpe. Abbildung 50 zeigt das Ende des Beladevorgangs. Das komplette Speichervolumen der oberen Pufferzone ist auf Solltemperatur durchgeladen. Ziel wäre, mit dem größeren Volumen einen Schlechtwettertag überbrücken zu können. Grundvoraussetzung ist eine saubere Entladung des Speichers, der die Schichtung nicht zerstört. Ein weiterer wichtiger Punkt ist sicherlich eine möglichst optimale Dämmung des Speichers um Wärmeverluste zu reduzieren.

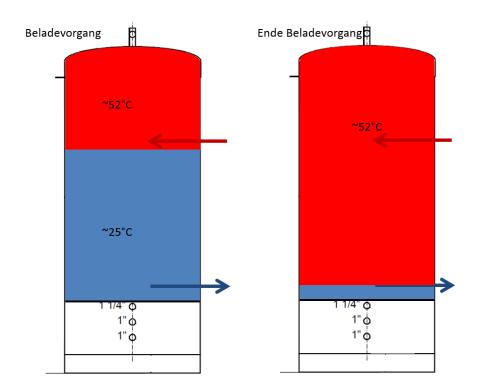


Abbildung 50: Optimierter Hygienespeicher: Ende Beladung

Welche Variante der Speicherung sinnvoll ist, lässt sich nicht pauschal festlegen, sondern ist auf projektspezifische Parameter wie Wärmepumpentechnik (mit oder ohne Inverter) und Nutzungsprofil abzustimmen.

Simulationen verschiedener Speichersysteme mit der Simulationssoftware Polysun (Programmversion V10.2.3.26190) haben nur minimale Auswirkungen auf die Jahresarbeitszahl ergeben, siehe Tabelle 14. Dabei wurde eine der im Projekthaus verbauten Wärmepumpe von Mitsubishi ähnliche Wärmepumpe sowie das Nutzungsprofil aus dem ersten Messjahr zu Grunde gelegt. Randbedingungen wie Wärmepumpentyp, Systemtemperaturen, Zapfprofile haben einen deutlichen größeren Einfluss auf die Arbeitszahlen.

Speicher Heizung	Speicher Warmwasser	JAZ nach Polysun
ohne	200 Liter	3,1
ohne	400 Liter	3,0
600 Liter	200 Liter	3,2
600 Liter	400 Liter	3,1
1000 Liter	200 Liter	3,3
1000 Liter	400 Liter	3,1
600 Liter Kombi		3,0
1000 Liter Kombi		3,1

Tabelle 14: JAZ bei verschiedenen Speichern nach Polysun

## 6.1.6 Optimierung im Betrieb

Eine große Einflussgröße zur Steigerung der Effizienz stellt sicherlich die Optimierung einer Wärmepumpenanlage im Betrieb dar. Beim vorliegenden Projekt konnte die Effizienz durch Anpassung an das individuelle Nutzerverhalten deutlich gesteigert werden. Zu erwähnen ist auch, dass durch das Monitoring frühzeitig ein gravierender Systemfehler aufgedeckt wurde: Vorlauf und Rücklauf der Wärmepumpe waren vertauscht, aufgrund einer falsch aufgebrachten Aufschrift vom Hersteller auf der Wärmepumpe. Dadurch wurde der Speicher (vor Beginn der Monitoringlaufzeit) vom Rücklauf beladen, also von unten nach oben. Ohne ein Monitoring werden solche Fehler praktisch nie entdeckt. Sicherlich aber trägt eine Messwerterfassung zur schnelleren Fehlerentdeckung bei, wenngleich diese dazu nicht den Umfang dieses Projektes haben muss.

# 6.1.7 Allgemeine Ansätze zur Optimierung

Zusammenfassend können folgende grundsätzliche Ansatzpunkte festgehalten werden, anhand derer eine typische Wärmepumpenheizanlage im Wohngebäude optimiert werden kann (ohne sonstige Installationen wie z.B. eine Hautautomation im vorliegenden Projekt):

# Änderung Heizkurve

- Die Heizkurve muss zwingend an das Gebäude angepasst werden. Gut ist es, durch Befragung oder Datenerhebung Anhaltpunkte für das tatsächliche Nutzerverhalten zu erlangen. So können sinnvolle Heizzeiten und Temperatur eingestellt werden und unnötige Heizzeiten reduziert werden.
- Idealerweise ist die Ermittlung einer aktuellen Vorlaufsolltemperatur möglich, auf Basis vorhandener Randbedingungen wie z.B. Nutzung und Klima.
- Eine Wärmepumpenanlage sollte auf jeden Fall "von unten" angefahren werden, d.h. bei Inbetriebnahme werden niedrigere Temperaturen eingestellt als ausgelegt und schrittweise im Zuge der ersten Nutzererfahrungen / -rückmeldungen bei Bedarf angehoben. Die Erfahrung zeigt, dass ein Nutzer selten den Weg anders herum akzeptiert und bei angenehmer Wohlfühltemperatur die Heizkurve nach unten korrigiert um zu testen, ob diese Einstellung auch ausreichend ist für den gewünschten Komfort.

## Flexibilität im Hydraulikschema hinsichtlich Speichereinbindung

Wie oben beschrieben, dient ein kleiner Pufferspeicher in erster Linie als hydraulische Weiche für das System. Eine messbare Pufferung von überschüssiger Wärme (z. B. durch Sollwertüberhöhung bei Überangebot PV oder prädiktiver Regelung mit Wettervorhersagen) bedingt einen großen Speicher. Sinnvoll ist, das Hydraulikschema so aufzubauen, dass der Speicher auch "umgangen" werden kann und die Wärmepumpenanlage direkt in das Heizsystem liefern kann (so ist keine Temperaturüberhöhung notwendig, die eine Speicherung zwangsläufig mit sich bringt). Nur zum Zwecke der gezielten Pufferung von Wärme wird der Speicher direkt bedient.

#### Zeiten Warmwasserbereitung

- Bei Luftwärmepumpen sollte die Warmwasserbereitung möglichst immer in den Nachmittagsstunden stattfinden, da hier die Außenlufttemperatur im Tagesverlauf üblicherweise am höchsten ist.
- Eine Umgewöhnung der Nutzer zu abendlichem Duschen statt morgendlichem Duschen ist vorteilhaft.

#### Speicherkonzept optimieren

- Wie oben beschrieben, kann durch die sinnvolle Be- und Entladung großer Einfluss auf die Effizienz genommen werden. Grundziele der Beladung: Start der Beladung bei niedrigem Temperaturniveau im Speicher; lange Laufzeiten der Wärmepumpe anstreben; beruhigter Zulauf in den Speicher, damit keine Verwirbelungen und Durchmischung im Speicher entsteht. Grundziele der Entladung: Schichtung sollte nicht zerstört werden, saubere Entladung von unten nach oben. Eine Trinkwasserzirkulation sollte somit unbedingt vermieden werden.
- Durch optimale Dämmung die Speicherauskühlung minimieren.

## 6.1.8 Kältemittel in Wärmepumpen

Damit Wärmepumpen aus einem niedrigen und zu Heizzwecken nicht ausreichenden Temperaturniveau ein höheres machen können, wird Kältemittel als "Arbeitsmittel" benötigt. Diese weist entsprechende thermodynamische Eigenschaften auf: Es verdampft beim niedrigen Temperaturniveau, lässt sich verdampft unter Druck setzen und auf ein höheres Temperaturniveau bringen. Durch Verflüssigung und damit verbundene Wärmeabgabe, sowie anschließende Entspannung des Arbeitsmediums kann der Wärmepumpenprozess von vorne beginnen. Kältemittel lassen sich in synthetisch hergestellte und natürliche Kältemittel gruppieren. Erstere finden aufgrund ihrer technischen Eigenschaften und ihres günstigen Preises überwiegend Einsatz in Serienprodukten.

Dieses künstlich hergestellte Kältemittel kann im schlimmsten Fall ozonschädlich sein (Verwendung inzwischen verboten), in den allermeisten Fällen aber auf jeden Fall klimaschädlich, da es bei Austritt aus der Anlage den Treibhauseffekt fördert. Wie klimaschädlich ein Kältemittel ist, wird durch den GWP (englisch Global warming potential, oder greenhouse warming potential) abgebildet. Ein kg eines Stoffes mit einem GWP von 1 wirkt sich genauso stark auf den Treibhauseffekt aus wie 1 kg CO<sub>2</sub>. Eine Übersicht über den GWP gängiger Kältemittel ist in Tabelle 15 zu finden.

Kältemittel	GWP (Treibhauspo- tenzial relativ zu CO <sub>2</sub> )
R12 (FCKW)	6.640
R134a (FKW)	1.300
R404A (FKW)	3.260
R410A (FKW)	2.000
R744 (Kohlendioxid)	1
R717 (Ammoniak)	0
R290 (Propan)	3
R600a (Butan)	3
R1270 (Propen)	3

Tabelle 15: Kältemittel-Übersicht

Das in der Wärmepumpenanlage des Projekthauses verwendete Kältemittel (R410A) hat einen GWP von etwa 2.000. Bei einer vollständigen Freisetzung der in der Anlage befindlichen 3,2 kg würde dies einem CO<sub>2</sub>-Ausstoß von 6,4 Tonnen entsprechen. Aus diesem Grund ist im Umgang mit Kältemittel äußerste Vorsicht geboten und das System regelmäßig auf Dichtheit zu prüfen. Das Umweltbundesamt gibt als Anhaltswert für Kältemittelverluste von Heizungswärmepumpen in Deutschland einen Wert von 2,5% der Kältemittelfüllmenge pro Jahr an! [BINE-02] Dies entspricht bezogen auf die Füllmenge der Anlage im Projekthaus einer jährlichen CO<sub>2</sub>-Emission von rund 160 kg.

Dieser Umstand führte zur "F-Gase-Verordnung" und des darin definierten "Phase down". Beim Phase-down-Szenario handelt es sich um eine schrittweise künstliche Beschränkung der am Markt verfügbaren Mengen klimaschädlicher Kältemittel auf ein Fünftel bis zum Jahr 2030. Ab 2020 dürfen demnach keine Kältemittel mit einem GWP größer 2500 in Verkehr gebracht werden. Das R410A wird also weiterhin zugelassen bleiben.

Auch heute gibt es schon zahlreiche Wärmepumpen, die klimafreundlicheres Kältemittel, z.B. CO<sub>2</sub> oder Propan verwenden.

Grundsätzlich hat jedes Kältemittel auch einen bestimmten optimalen Einsatzbereich hinsichtlich des Temperaturniveaus. Basis preisgünstiger Wärmepumpensysteme sind Kälteanlagen, die ihren Einsatz typischerweise in hoher Stückzahl in Industrie- und Gewerbekühlanlagen finden. Dadurch reduzieren sich auch die Preise für einzelne Systemkomponenten wie z.B. Kompressoren. Für einen Wärmepumpenbetrieb zu Heiz- und Warmwasserbereitungs-Zwecken sind diese Kältemittel aber eigentlich nicht ausgelegt. Um den Verdichter und anderen Einzelkomponenten im Wärmepumpenbetrieb zu schützen, müssen Sensoren den Kälteprozess laufend überwachen. Deshalb kann auf die Regelung dieser Anlagen auch nur sehr rudimentär von Extern zugegriffen werden. Im Projekthaus konnten immerhin Zeit und Solltemperaturen eingestellt werden. Einfluss auf Parameter wie z. B. Ventilatordrehzahl, Druck, etc. kann aber nicht genommen werden.

Kältemittelemissionen können entlang der gesamten Prozesskette von der Herstellung über die Anwendung (hier: Wärmepumpenbetrieb) bis zur Entsorgung auftreten. Diese sind hinsichtlich der Treibhausgasemissionen zielstrebig zu vermeiden und mit höchster Konsequenz zu minimieren.

# 6.1.9 Preisniveau verschiedener Wärmepumpen

Wie bei jeder Investition steht auch bei der Anschaffung einer Wärmepumpe, bzw. einer Wärmepumpenanlage (bestehend aus je nach Strangschema erforderlichen Kleinteilen wie Umschaltventile, Überströmventil, etc. sowie Speicher und Pumpen) die Preis/Leistung im Vordergrund. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über verschiedene Wärmepumpenanlagensysteme und deren Investitionskosten. Diese gelten für einen KfW-Effizienzhaus 40-Neubau. Bei schlechteren Energiestandards und bei Sanierungen werden i.d.R. andere Leistungsgrößen und andere Schemen benötigt. Die Tendenz bleibt jedoch gleich. Aufgeführt sind hier Modelle der Firma Vaillant, da deren aktuelles Produktprogramm im Wesentlichen die Aufteilung des ganzen Wärmepumpenmarktes widerspiegelt (mit Ausnahme der Variante Innenaufstellung, da hier kein Produkt von Vaillant angeboten wird). Die Preise verstehen sich inkl. Lieferung, Montage, Verrohrung der Anlage bis zum Speicher, Trinkwasserspeicher und/oder Pufferspeicher, Planung, Bauleitung und 19% Mehrwertsteuer. Die u. a. Preise wurden vom Projektpartner Casa Nova zur Verfügung gestellt.

Wärmepumpentyp	Merkmale, Besonderheiten	JAZ nach VDI	Preisklasse in €
Luftwärmepumpe ökono-	Herkunft Klima-/Kühlgeräte, Split-	3,8 – 4,0	16.000 – 20.000
misch	geräte		
Luftwärmepumpe schall-	Zu Heizzwecken entwickelt, nied-	4,3 – 4,4	28.000 – 35.000
und energieoptimiert	riger Schallleistungspegel, bes-		
	sere Effizienz		
Luftwärmepumpe Innen-	Inkl. Luftkanäle und –schächte,	3,7 – 4,2	30.000 – 35.000
aufstellung	über Eck Aufstellung		
Solewärmepumpe	Inklusive Erdsondenbohrung	4,8 – 5,0	40.000 – 45.000
	100m, ohne Fördermittel		
Grundwasserwärmepumpe	Inkl. Brunnenbau (Saug- und	4,0 – 5,0	40.000 – 45.000
	Schluckbrunnen), ohne Förder-		
	mittel		

Tabelle 16: Preisniveau verschiedener Wärmepumpen (Bruttopreise)

Die Jahresarbeitszahlen nach VDI wurden mit Hilfe des Rechners des Bundesverbands Wärmepumpe (bwp) erstellt [BWP-JAZ]. Die Bandbreite der angegebenen JAZ ergibt sich aus der Auslegung – monovalent oder monoenergetisch mit Bivalenzpunkt -7 °C. Als Normaußentemperatur wurde -14 °C (für Ulm gültig) verwendet. Die Systemtemperaturen betragen 35/28 °C. Bei der Grundwasseranlage ist die Bandbreite so groß, da hier noch die Entscheidung für oder gegen einen Zwischenwärmetauscher getroffen werden muss. Der Zwischenwärmetauscher dient zum

Schutz der Anlage vor Qualitätsschwankungen des Grundwassers – schadet allerdings der Effizienz (weitere Wärmeübertragung, weitere Pumpe).

Da in diesem Projekt eine Split-Luftwärmepumpe zur Ausführung kam, werden nachfolgend die entsprechenden Kategorien noch näher erläutert:

# Luftwärmepumpe ökonomisch

Diese Wärmepumpentypen legen besonderen Wert auf Kostenreduzierung. Dies macht sich i.d.R. an den Arbeitszahlen und am Schalleistungspegel der Anlagen bemerkbar. Häufig ist die Basis der Anlagen die Kälteerzeugung. Die Anlagen werden meist als Splitgeräte ausgeführt, also mit Innen- und Außeneinheit. In der Außeneinheit ist häufig die gesamte Wärmepumpentechnik untergebracht, was zur Folge hat, dass Heizungswasser zwischen außen und innen zirkuliert. Bei besseren Anlagen dieser Preisklasse wird das Kältemittel zwischen Außen- und Inneneinheit transportiert.

Beispiele: Vaillant arotherm, Vaillant arotherm split, Mitsubishi ecodan, Dimplex System M

## Luftwärmepumpe schall- und energieoptimiert

Die hochwertigeren Varianten der Luftwärmepumpen sind speziell zu Heizzwecken konzeptioniert. In der Entwicklung wurde meist besonderes Augenmerk auf die Effizienz sowie einen niedrigen Schallleistungspegel gelegt. Auch hier wird ein Arbeitsmedium zwischen einer Innen- und einer Außeneinheit transportiert. Im Falle der Vaillant flexotherm mit arocollect beispielsweise zirkuliert ein Sole-Wasser-Gemisch.

Beispiele: Vaillant flexotherm mit arocollect, Mack Thermotechnik LWWP, Ochnser GMLW

Zum Vergleich: eine Gas-Brennwerttherme mit Solarthermie für einen KfW Effizienzhaus 40-Neubau, inklusive LAS-Abgassystem, Gas-Anschluss und –Leitung, komplett mit Lieferung, Montage, Verrohrung der Anlage bis zum Speicher, Trinkwasserspeicher und/oder Pufferspeicher, Planung, Bauleitung und 19 % Mehrwertsteuer liegt in der Preisklasse der Kategorie Luftwärmepumpe schall- und energieoptimiert.

## 6.1.10 Typische Fehler bei Wärmepumpen

In nachfolgender Tabelle werden stichpunktartig regelmäßig auftretende Fehlerquellen bei Wärmepumpenanlagen aufgezeigt:

Fehler	Mögliche Ursache
Zu geringe Heizleistung	Wärmepumpe zu klein dimensioniert, um Kosten zu sparen,
	dadurch Leistung zu gering
	Bedarf falsch ermittelt; keine Heizlastberechnung nach DIN EN
	12831, Warmwasserbedarf und evtl. Sperrzeiten des Netzbe-
	treibers nicht berücksichtigt
	Zu hohe Absenktemperatur eingestellt, Räume kühlen zu stark
	aus, dadurch fehlt Wiederaufheizleistung
	Hydraulischer Abgleich nicht oder mangelhaft durchgeführt

Zu große Heizleistung	Wärmepumpe zu groß dimensioniert
	führt zu Taktung, ggf. zu Hochdruckstörung
Niederdruckstörung	Wärmepumpe unzureichend mit Umweltwärme versorgt
	Kältekreislauf undicht
Hochdruckstörung	Allgemein: Wärme kann nicht ausreichend abgeführt werden.
	Mögliche Ursachen:
	Heizungsumwälzpumpe zu klein, Heizkreisleitungen falsch
	dimensioniert oder verschmutzt, Durchfluss zu gering
	Ausdehnungsgefäß defekt, Druck im Heizkreis zu gering
	Falsch angebrachte oder defekte Temperaturfühler
	Warmwasserspeicher falsch dimensioniert, bzw. für Wärme-
	tauscherfläche
Montagefehler	Vor- und Rücklaufleitungen vertauscht, Ungeeignetes Rohrma-
	terial verwendet, falsche Verrohrung gegenüber dem Hydrau-
	likschema

Tabelle 17: Typische Fehler bei Wärmepumpenanlagen [Bonin]

### **6.2** Hausautomation

### 6.2.1 Eigenstromverbrauch

Wie bereits oben erwähnt, liegt der Eigenstromverbrauch der Hausautomation im Projekthaus bei etwa 20 W, also etwa 175 kWh pro Jahr. Der Stromverbrauch von Loxone-Projekten vergleichbarer Gebäudegröße, mit denselben Kernfunktionen (Heizung, Beschattung) liegt bei etwa 8 W (70 kWh/a). Der höhere Stromverbrauch im Projekthaus ist bedingt durch das Monitoring, das mehrere Erweiterungen und Bauteile zur Folge hatte, sowie eine regelmäßige Nutzung der Anlage erfordert (Messwerterfassung).

Im Vergleich zu konkurrierenden Systemen ist das Loxone-System für den gewonnenen Mehrnutzen (Komfort, Sparfunktionen, Information) stromsparend.

### 6.2.2 Stromsparen

Die Hausautomation wurde im zweiten Messjahr zum "Stromsparmanager" erweitert. Dabei werden einzelne Stromverbraucher zu bestimmten Zeiten abgeschaltet. Diese sind z. B. die Netzwerkfestplatte NAS, ein Computer (der als Server genutzt wird), Receiver, Netzwerk-Switch, Beleuchtung im Wohnbereich. Die Abschaltbedingungen sind im Wesentlichen eine Zeitschaltuhr (feste Zeiten z. B. nachts) und eine Anwesenheitserkennung (Einbindung eines Raspberry PI's mit Verknüpfung der Smartphones der Bewohner). Die einzelnen Komponenten können jederzeit aber manuell vom Benutzer wieder aus dem "Schlafmodus" über Smartphone/PC "geweckt" werden.

### 6.2.3 Maximierung solarer Gewinne

Eine im Loxone-System standardmäßig implementierte Funktion ist die automatische Beschattung zum Hitzeschutz. Die Beschattungseinrichtungen werden bei Annäherung an eine vom Nutzer vorgegebene, raumindividuelle Hitzeschutztemperatur automatisch geschlossen. Bei Jalousien kann die Lamellenwendung vorgegeben werden (bei komplett geschlossener Jalousie Lamelle waagerecht oder senkrecht). Wann beschattet werden muss, errechnet das System je nach Fassadenseite und Sonnenstand selbst. Ob überhaupt Sonne scheint oder nicht, entnimmt er den Informationen des Wetterservices (alternativ einer installierten Wetterstation, welche aber erst während dem zweiten Messjahr des Projekts in das Produktsortiment des Hausautomationherstellers aufgenommen wurde). Nach Ende der Beschattungszeit kann auch vorgegeben werden, ob die Jalousie in der Position bleiben soll oder wieder öffnen soll.

Im Umkehrfall, in der die Sollraumtemperatur noch nicht erreicht ist und gleichzeitig die Sonne scheint, gibt es noch keinen Programmbaustein, der die Beschattungseinrichtungen hochfährt, um solare Gewinne optimal zu nutzen. Dieser Baustein wurde für das 2. Messjahr selbst entwickelt und im System eingefügt.

Die "Solaroptimierung" wird grundsätzlich aktiviert, wenn aus dem Raumregler die Freigabe für den Stellantrieb erfolgt (es muss also geheizt werden) und zeitgleich die Information Sonnenstrahlung eintritt. Nur wenn überhaupt die Sonne in ausreichendem Maße scheint, ist ein Öffnen der Beschattungseinrichtungen sinnvoll. Als weiterer Parameter dient die raumindividuelle Freigabe des Nutzers zur Solaroptimierung. Sicherlich wird ein Nutzer nicht zu jeder Zeit in jedem Raum damit einverstanden sein, dass das System die Beschattungseinrichtungen komplett hochfährt.

Treffen alle Randbedingungen zu, wird der Befehl zum Öffnen der Jalousie oder des Rollladens gegeben.

Abbildung 51 und Abbildung 52 zeigen exemplarisch im Raum "Kind 2" den Verlauf ohne und mit "Solaroptimierung". Durch die Nutzung der solaren Gewinne kann die Raumtemperatur deutlich gesteigert werden und so auf einen Betrieb der Fußbodenheizung für mehrere Stunden verzichtet werden. Negativer Effekt ist, dass die Steigerung der Raumtemperatur ohne Begrenzung wie in diesem Fall zu einer Überhöhung der Raumtemperatur führt, was insbesondere in Schlafräumen nicht immer gewünscht ist.

Dies ist zugleich auch das Problem für die Nutzung von Wettervorhersagen. Technische wäre das System zwar in der Lage, vorhergesagte Temperaturstürze oder –anstiege in die Raumregelung einzubeziehen. Jedoch geht dies mit Komforteinbußen her, da durch die prädiktive Regelung die Raumtemperatur vor Eintritt der Außentemperaturänderung entweder zu hoch oder zu niedrig ist.

Sinnvoll scheint die Wettervorhersage nur für Räume, die nicht als Schlafräume genutzt werden. Als weiterer Punkt muss erwähnt werden, dass die Temperaturunterschiede nur minimal sind und die Raumluft kein gutes Speichermedium darstellt, weshalb sind keine großen Energiemengen durch prädiktive Regelung "puffern" lassen. Anders ist es, wenn eine große Speichermasse, wie z. B. bei einer Betonkerntemperierung (BKT), aktiviert wird. Hier kann die Einbeziehung von Wettervorhersagen bei der Raumregelung ihr Potenzial sicherlich besser ausspielen.

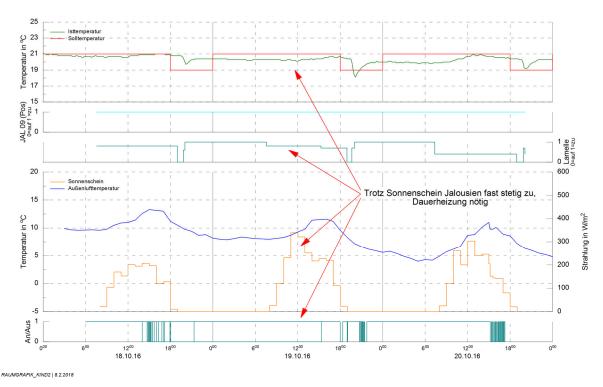


Abbildung 51: Raum "Kind 2" ohne "Solaroptimierung"

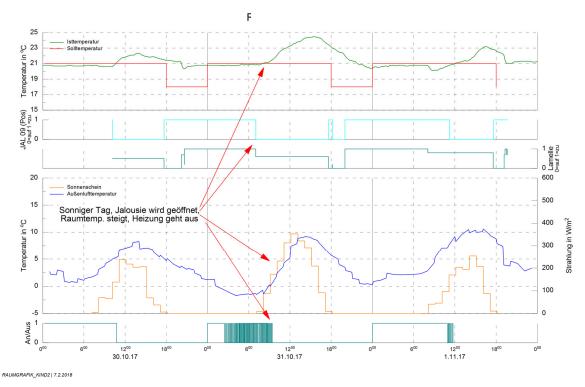


Abbildung 52: Raum "Kind 2" mit "Solaroptimierung"

Hinsichtlich des Heizwärmeverbrauchs ergibt sich keine messbare Energieeinsparung. Die positiven Effekte des Einsatzes einer intelligenten Hausautomation liegen eher in der individuellen Regelung des Wärmeerzeugers, insbesondere bei Wärmepumpen durch Vorgabe von Regelparameter. Die Effizienz der Wärmepumpe hat sich wie beschrieben deutlich verbessert.

Größere Einsparpotentiale sind im Bereich des Stromverbrauchs erkennbar. Zudem ist der Komfortgewinn zu beachten.

## 6.3 PV-Anlage

### 6.3.1 Sollwertüberhöhung bei PV-Überschuss

Bei hohem Solarstrahlungsangebot, insbesondere im Sommer, ergibt sich häufig ein Überangebot an PV-Strom, der nicht mehr direkt im Haus verbraucht werden kann und somit ins öffentliche Netz eingespeist wird. Um die Netze so wenig wie möglich zu belasten, wäre es sinnvoll, den Strom im Haus zwischenzuspeichern, anstatt ihn einzuspeisen. Echte Netzentlastung entsteht im Hinblick auf Leistungsspitzen aber nur, wenn bestimmte Leistungsspitzen zuverlässig immer vermieden werden.

Eine einfache – und häufig von Herstellern beworbene – Möglichkeit ist die Erhöhung von Sollwerten für Heizung und Warmwasser. Der theoretische Ansatz: die Speichertemperatur so weit zu erhöhen, dass der thermische Speicher in der Lage ist, für einen Tag ohne PV-Strom (z. B. Schlechtwetter-Folgetag, vgl. Abbildung 53) die notwendige Wärme für Heizung und Warmwasser vorzuhalten.

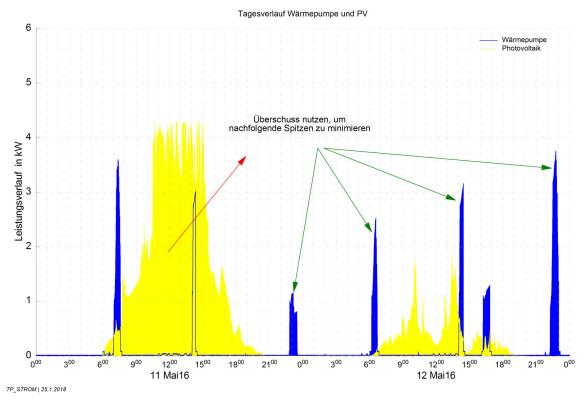


Abbildung 53: PV-Erträge und WP-Betrieb 11. und 12. Mai 2016

Um die praktische Umsetzung zu testen, wurde der Sollwert für die Warmwasserbereitung im Sommer 2017 wie folgt vorgegeben: aus den Wetterdaten der Vorhersage des Wetterservice wurde die zu erwartende mittlere Solarstrahlung für die Stunden von 13 h bis 16 h (Zeitraum der Warmwasserbereitung) für den aktuellen und den folgenden Tag ermittelt. War das Ergebnis der Auswertung, dass am aktuellen Tag die mittlere Solarstrahlung "gut" war, also über 700 W/m², am Folgetag aber "schlecht", also unter 500 W/m², dann wurde die Sollwertüberhöhung freigegeben. Die Standard-Warmwassertemperatur wurde in diesem Fall von 48 °C um 5 K überhöht, also auf 53 °C gesetzt.

Die Bedingungen trafen an einigen Tagen im Juni, Juli und August zu. Nur in einem Fall, bei dem keine Warmwasserzapfung erfolgte, war das Temperaturniveau im Speicher am Folgetag noch so hoch, dass eine erneute Aufladung des Speichers ausblieb. An allen anderen Tagen konnte eine Warmwasserbereitung am Folgetag nicht ersetzt werden. Beispielhaft werden die Tage 18.8.2017 und 19.8.2017 gezeigt, siehe Abbildung 54. Am 18.8.2017 wurde die Solltemperatur um 13 h auf 53 °C angepasst. Bis zum Folgetag zur gleichen Uhrzeit erfolgte eine nur sehr geringe Warmwasserzapfung. Eine erneute Warmwasserbereitung am 19.8.2017 konnte aber wieder nicht vermieden werden. Glücklicherweise war der PV-Ertrag an dem Tag zu dieser Uhrzeit dann doch nicht so schlecht wie vorhergesagt.

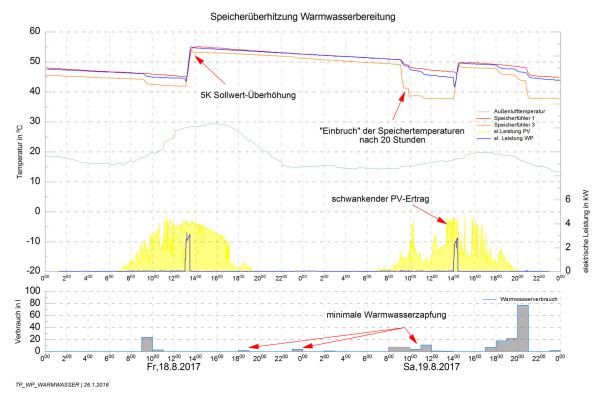


Abbildung 54: Thermische Speicher-Nachladung trotz vorheriger Überhitzung

Die Speichersolltemperaturüberhöhung führte aber zu einer spürbar schlechteren Effizienz der Wärmepumpe. Die Tagesarbeitszahl am 18.8.2017 lag bei 2,4. Dies wurde an allen Tagen mit Sollwertüberhöhung festgestellt. In vielen Fällen war die Speichertemperatur am Folgetag zwar nicht so hoch, dass eine Beladung durch die Wärmepumpe ausbleiben konnte, allerdings war das Temperaturniveau insgesamt noch relativ hoch. Dies führt zu einer nur kurzen Warmwasserbeladung am Folgetag mit einer insgesamt schlechteren Effizienz.

Das Ziel, eine Warmwasserbereitung ersetzen zu können und somit mit einer Beladung über 48 Stunden zu kommen, könnte nur mit einem größer dimensionierten Speicher erreicht werden. Den thermischen Speicher aber nur zu diesem Zweck größer zu dimensionieren ist jedoch keine effektive Maßnahme (z. B. höhere Speicherverluste).

Eine weitere Möglichkeit der Nutzung von PV-Überangebot durch die Wärmepumpe ist die komplette Durchladung des Speichers. In diesem Fall wird für den Heizungsspeicherbereich ebenfalls die Trinkwasserwassersolltemperatur gesetzt.

Abbildung 55 zeigt exemplarisch den Tagesverlauf mit einer so durchgeführten Speicherbeladung.

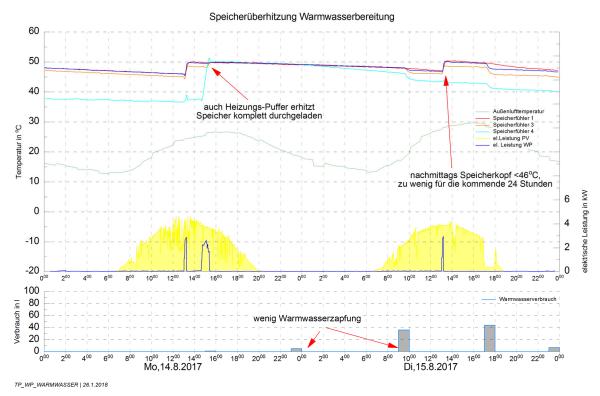


Abbildung 55: Speicher komplett durchgeladen

Am Nachmittag des 14.8.2017 wurde nach der routinemäßigen Warmwasserbereitung noch der Puffer der Heizung beladen. Auch hier war im folgenden Tagesverlauf so gut wie keine Warmwasserzapfung – also im Prinzip ein Idealfall, um auf eine Warmwasserbeladung am folgenden Tag verzichten zu können. Doch auch hier zeigt sich ein Temperaturabfall durch die geringe Zapfung, der den Speicherkopf mit auskühlt. Idealerweise hätte das benötigte Warmwasser durch die hohen Temperaturen im Heizungspufferteil ausreichend erwärmt werden sollen. Der abgekühlte Speicherkopf bewirkt, dass auf jeden Fall wieder eine Warmwasserbeladung am Nachmittag des Folgetags durchgeführt werden musste.

Die Effizienz der Wärmepumpe war am 14.8.2017 sehr gut. Durch die lange Laufzeit und die niedrigen Speichertemperatur im Heizungspufferteil vor der Beladung konnte eine Tagesarbeitszahl von 3,5 erreicht werden. Durch das verbleibende, relativ hohe Temperaturniveau am Folgetag sank die TAZ am 15.8.2017 aber auf 1,12. Im Schnitt ergibt sich zwar immer noch eine vergleichsweise hohe Arbeitszahl über die zwei Tage hinweg. Zu bemerken ist aber, dass für den betrachteten Zeitraum (auf Grund der Beladung des gesamten Speichers) einer Wärmeerzeugung der Wärmepumpe von rund 10 kWh ein Warmwasserverbrauch von 2 kWh entgegensteht!

<u>Fazit bei Trinkwarmwasser</u>: Bei systemüblichen Speichergrößen bringt eine Sollwertüberhöhung für die Warmwasserbereitung keinen spürbar positiven Effekt, da

- 1. das Speichervolumen nicht ausreicht, um insgesamt 48 Stunden bis zur nächsten Beladung zu überbrücken
- 2. die Effizienz der Wärmepumpe durch die höhere Solltemperatur schlechter ist

- 3. die Effizienz der Wärmepumpe am Folgetag wegen insgesamt höherem Temperaturniveau im Speicher schlechter ist
- 4. die Speicherverluste durch das hohe Temperaturniveau höher sind
- 5. die Entladung des Speichers nicht ideal verläuft

In jedem Fall würde eine Minimierung der Auskühlgeraden im Speicherkopf eine Verbesserung bringen. Könnten die Stillstandsverluste in etwa halbiert werden, könnte an manchen Tagen, v.a. bei geringer Warmwasserzapfung, auf eine Beladung am Folgetag verzichtet werden.

Die negativen Auswirkungen der höheren Solltemperaturen auf die Effizienz der Wärmepumpe sind auch ein Hauptgrund dafür, dass sich eine Speichertemperaturüberhöhung für den Heizungspuffer nicht lohnt. Zudem ist auch hier für eine wirkliche Pufferung von Heizungswärme die Speichermasse von rund 300 Liter zu gering. Dieses Speichervolumen dient nur als Puffer, um ein Takten der Wärmepumpe zu vermeiden oder eventuell vorgegebene Sperrzeiten der Energieversorger zu überbrücken. Ein Überangebot an PV-Strom bedeutet zwangsläufig auch, dass ein hohes Solarstrahlungsangebot vorherrscht. Sinnvoll ist in erster Linie, das Solarstrahlungsangebot vorranging im Raum zu nutzen, um auf Heizung in den Räumen verzichten zu können (vgl. Abschnitt 6.2.3).

In diesem Zusammenhang könnte eine gezielte Raumtemperaturüberhöhung in den Nachmittags-/Abendstunden dazu beitragen, auf eine Heizung in den frühen Morgenstunden verzichten zu können. In den Räumen, die zum Schlafen genutzt werden, ist eine Temperaturüberhöhung über Nacht aber meist nicht gewünscht.

### 6.3.2 Eigenverbrauch mit und ohne Wärmepumpe

Wird Strom aus einer Photovoltaikanlage selbst erzeugt, ist die direkte Versorgung von Verbrauchern am meisten sinnvoll. Dies hat ökologische (keine Belastung sowie Reduzierung der geforderten Leistung der öffentlichen Netze, damit Drosselung der Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern) und ökonomische Gründe (die Kosteneinsparung durch vermiedenen Strombezug sind höher als die Einspeisevergütung für ins öffentliche Netz eingespeisten PV-Strom ). Der zeitliche Anfall von Strombedarf für den Haushalt ist relativ schwer zeitlich mit dem PV-Ertrag zu koppeln. Beispielsweise wird das Kochen zur Mittagszeit aufgrund der Wetterprognosen nicht schon vormittags oder nachmittags durchgeführt. Licht im Haus wird auch nicht tagsüber angeschaltet, um abends darauf verzichten zu können. Häufig werden in diesem Kontext die Waschmaschine, der Trockner und die Geschirrspülmaschine genannt. Bei den ersten beiden ist dies in der Theorie sicherlich sehr sinnvoll. In der Praxis treten jedoch weitere (banale) Probleme auf, wie z.B. das (zeitnahe) Herausnehmen der Wäsche aus der Waschmaschine und anschließende Befüllen des Trockners.

Erfolgt die Heizung und Warmwasserbereitung durch den Einsatz einer Wärmepumpe, scheint der ideale Verbraucher gefunden worden zu sein, um möglichst viel PV-Strom direkt zu verbrauchen. Für die erste Messperiode waren die tatsächlichen Effekte jedoch relativ gering. Es wurden "statische" Maßnahmen getroffen, wie die zeitliche Freigabe der Wärmepumpe überwiegend in

den Tagesstunden, die Nachtabsenkung der Raumheizung und die Verlegung der Zeiten für Trinkwarmwasser in die Nachmittagsstunden – ohne sonstige weitere Automatisierungsprozesse. Der Anteil des direkten Verbrauchs von PV-Strom in der Wärmepumpe betrug jedoch nur 17%. Zu beachten ist, dass durch das zeitliche Zusammentreffen von Wärmepumpenstrombedarf und Haushaltsstrombedarf der Eigenverbrauch vor allem in den Übergangszeiten und im Winter nur einen Anteil des Strombedarfs decken kann. Den Sachverhalt machen die folgenden Kennwerte deutlich: insgesamt mit dem Haushaltsstrom ergab sich ein Eigenverbrauchsanteil von rund 28%, siehe auch Abbildung 56. Wäre keine Wärmepumpe verbaut, hätte der Eigenverbrauchsanteil in etwa bei 22% gelegen. Die Steigerung des Eigenverbrauchanteils durch die Wärmepumpe betrug also lediglich rund 6 Prozentpunkte. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen auch verschiedene Studien laut einem im Februar 2016 in der Zeitschrift "Sonnenenergie" erschienenen Artikel mit dem Titel "Photovoltaik und Wärmepumpen" [DGS].

Durch den Einsatz des Batteriespeichersystems und die oben beschriebenen Optimierungsmaßnahmen stieg dieser in der zweiten Messperiode auf rund 51%, siehe Abbildung 57.

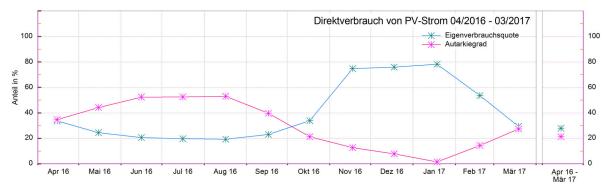


Abbildung 56: Eigenverbrauchsquote und Autarkiegrad in der ersten Messperiode

## 6.3.3 Autarkiegrad des Gebäudes

Der Autarkiegrad gibt den Anteil der Selbstversorgung mit Haushaltsstrom, Heizenergie und Warmwasser über eine PV-Anlage auf dem Dach wieder. Um einen möglichst hohen Autarkiegrad zu erzielen, muss der Nachstrombedarf minimiert werden und Stromspitzen reduziert werden. Der Autarkiegrad lag in der ersten Messperiode bei rund 21%, vgl. Abbildung 56. Durch den Einsatz des Batteriespeichersystems und den oben beschriebenen Optimierungsmaßnahmen stieg dieser in der zweiten Messperiode auf rund 44%, siehe Abbildung 57.

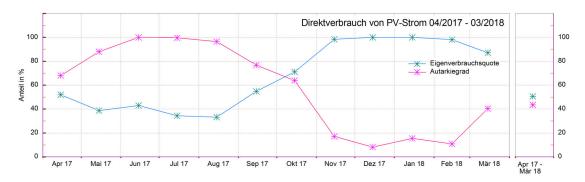


Abbildung 57: Eigenverbrauchsquote und Autarkiegrad in der zweiten Messperiode

### 6.4 Batteriespeicher

### 6.4.1 Auswahl und Dimensionierung

Mit Hilfe der Simulationssoftware PV-Sol wurde die Dimensionierung des Batteriespeichers vorgenommen. Es wurden die Fronius Solar Battery 4.5 und 6.0 betrachtet. Die nutzbare Speicherkapazität liegt bei 3,6 kWh (... 4.5) bzw. 4,8 kWh (... 6.0).

Tabelle 18 zeigt das Ergebnis der Simulation. Die Werte für Bezug und Einspeisung zeigten mit der Vergrößerung des Speichersystems keine großen Veränderungen mehr. Aus wirtschaftlichen Gründen wurde deshalb das kleinere System gewählt.

<b>PV-Sol Simulation</b>	Ohne Batterie	Fronius Solar	Fronius Solar	
		Battery 4.5	Battery 6.0	
Bezug	5.743 kWh/a	4.878 kWh/a	4.712 kWh/a	Ī

Tabelle 18: Simulationsergebnis Batteriespeicher mit WP

In diesem Zuge wurde auch eine Simulation durchgeführt, die die Ergebnisse ohne Einbeziehung einer Wärmepumpe ausgefallen wären. Dazu wurde die WP aus dem Stromverbrauch herausgerechnet und die Simulation mit sonst unveränderten Parametern ausgeführt. Das Ergebnis ist in Tabelle 19 zu sehen.

<b>PV-Sol Simulation</b>	Ohne Batterie	Fronius Solar	Fronius Solar
		Battery 4.5	Battery 6.0
Bezug	2.343 kWh/a	1.425 kWh/a	1.244 kWh/a
Einspeisung	4.340 kWh/a	3.234 kWh/a	3.002 kWh/a

Tabelle 19: Simulationsergebnis Batteriespeicher OHNE WP

### 6.4.2 Kritische Betrachtung der realen Daten

Wie in Abschnitt 5.2.4 schon erwähnt, konnte mit dem Batteriespeicher die Einspeisung und der Bezug aus dem öffentlichen Netz reduziert werden. Das Ziel der Netzentlastung konnte also erfüllt werden. Allerdings ist der Batteriespeicher nicht alleine für diesen Erfolg verantwortlich – auch Effizienzsteigerung und Optimierung von PV-Eigenverbrauch fließen in die Werte mit ein. Um diesen Umstand besser in Zahlen ausdrücken zu können, wurde aus den Messwerten im 10-Sekundentakt eine Simulation durchgeführt, wie der Stromverlauf ohne Batteriespeicher gewesen wäre. Dazu wurde jeweils eine Summe aus aktuellen Verbrauchern gebildet und vom PV-Ertrag abgezogen.

Im Ergebnis dieses Verfahrens betrug der Strombezug im zweiten Messjahr 4.949 kWh. Dies entspricht einer Einsparung von 18% im Vergleich zum Vorjahreszeitraum. In absoluten Zahlen: 1.084 kWh weniger Bezug gegenüber 1.029 kWh weniger Stromverbrauch von Haushalt und Wärmepumpe. Die Einspeisemenge betrug so 3.892 kWh, also rund 6 % weniger als im Vorjahr.

Das Batteriespeichersystem für sich betrachtet ist mit hohen Verlusten behaftet. So wurden rund 900 kWh in den Speicher geladen und nur 675 kWh entladen. Dies entspricht einem Wirkungsgrad von nur 75%.

Die finanzielle Betrachtung fällt bei den aktuellen Randbedingungen wie folgt aus: bei dem "simulierten" Strombezug von 4.949 kWh bei einem Bezugspreis von 30 cent/kWh abzüglich einer Vergütung von 12,4 ct/kWh für die eingespeiste Menge von 3.892 kWh wären dem Nutzer Kosten in Höhe von 1.002 € entstanden. Die Kosten bei Annahme der gleichen Preise, aber mit den realen Strommengen bei Einsatz der Batterie, hätten 942 € betragen. Dies entspricht einer Kostenersparnis von 60 € pro Jahr. Die Ersparnis wird natürlich mit steigendem Bezugspreis größer, zudem auch, wenn eine Vergütung für eingespeisten Strom entfällt. Dennoch können keine Beträge erwirtschaftet werden, mit denen eine Anschaffung eines solchen Batteriesystems wirtschaftlich wird. Zum Vergleich: ohne Einspeisevergütung und mit einem Bezugspreis von 50 cent/kWh läge die jährliche Kostenersparnis bei 340 € (2.475 € - 2.135 €). Über 10 Jahre betrachtet entspricht dies einer Summe von 3.400 € (ohne Verzinsung gerechnet). Dem stehen aktuell Anschaffungskosten von etwa 10.000 € gegenüber.

Neben der finanziellen Betrachtung ist auch die schlechte Effizienz des Systems mit Verlusten von 25% ein Grund, derzeit den ökonomischen Nutzen des Einsatzes eines Batteriespeichers im Einfamilienhaus in Frage zu stellen. Auch wird der ökologische Nutzen (Eigenverbrauch von PV-Strom bei Stromüberschuss im Netz) durch die hohen Verluste der Batterie geschmälert.

## 6.5 Systemoptimierung mit Hilfe von Simulationssoftware Polysun

Im Rahmen dieses Projekts wurde eine Studienarbeit bearbeitet, deren Thema u. a. die Simulation der Anlagentechnik in Polysun zum Vergleich der Simulations-Ergebnisse mit den Messergebnissen war, um mit Hilfe der Simulationssoftware weiteres Optimierungspotential sichtbar

zu machen. Das Grundproblem der verwendeten Simulationssoftware liegt aber in der unzureichenden und schwierig zu verifizierenden Datenbasis des Wärmepumpenmodells und der daraus resultierenden Aussagekraft. Beispielsweise ist die verfügbare Wärmepumpentyp PUHZSW75VHA von Mitsubishi, also die im Projekthaus verbaute Anlage, in der Software keine invertergeregelte Anlage. Allgemein lieferten die invertergeregelten Anlagen unverhältnismäßig schlechte Ergebnisse, was so nicht mit den Praxiserfahrungen übereinstimmt. Das Simulationsergebnis, dass die invertergeregelte Anlage längere Laufzeiten als die Fixed-Speed-Anlage hat, kann zunächst als plausibel angesehen werden – außer wenn die Anzahl der Betriebsstart deutlich über denen der Fixed-Speed-Anlage liegen. Zur detaillierten Verwertbarkeit der Ergebnisse und daraus resultierenden Simulationsvarianten, um weitere Optimierungspotentiale aufzeigen zu können, muss zuerst eine solide Datenbasis in Bezug auf die Wärmepumpentechnik und auch die elektrischen Speichersysteme geschaffen werden.

# 7. Ulmer Netto-Nullenergiehaus

Im Zuge der Überarbeitung der kommunalen Förderrichtlinie für den Einsatz von Energiesparmaßnahmen am 23.05.2012 wurde in Ulm eine Förderung für das so genannte Netto-Nullenergiehaus eingeführt. Die Stadt Ulm zahlt bei Einhaltung der Anforderungen einen attraktiven Zuschuss.

### 7.1 Förderrichtlinie

In den Förderrichtlinien zur Energieeinsparung der Stadt Ulm heißt es: "Der Energiestandard Netto-Nullenergiehaus ist dann erreicht, wenn der externe Energiebezug des Gebäudes im Jahresmittel durch den eigenen Energiegewinn aufgewogen wird. Dem verbleibenden Bedarf (Heizung, Warmwasser, Strom in kWh/ m²a) werden Gutschriften aus Eigenerzeugung mit Netzeinspeisung (PV, KWK) gegenübergestellt." [Ulm]

Auf Anfrage bei der Stadt Ulm wurde das Netto-Nullenergiehaus wie folgt definiert: "Das Netto-Nullenergiehaus nach den Richtlinien der Stadt Ulm vom 23.05.2012 ist erreicht, wenn der Primärenergieaufwand des Gebäudes durch die Primärenergiegutschrift aus der Netzeinspeisung (PV, KWK) in der Jahresbilanz ausgeglichen wird. Alle sonstigen Bedingungen der Energieeinsparverordnung 2009 (EnEV 2009), wie z. B. die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz, sind einzuhalten."

Es werden also mittels Jahresbilanzierung die (Primär-) Energiegewinne und der (Primär-) Energiebedarf eines Gebäudes gegenübergestellt. Weitergehende Anforderungen wie z.B. beim Förderprogramm "Effizienzhaus Plus" des BMUB, in welchem auch die endenergetische Betrachtung gefordert war, sowie die Berechnungsmethodik nach der Normenreihe DIN V 18599 vorschrieb, werden nicht gestellt.

Am 1.6.2014 wurde die Richtlinie hinsichtlich der Nachweisführung angepasst (sonstige Änderungen sind dem Autor nicht bekannt). Dies erfolgte in Zusammenarbeit mit der Regionalen Energieagentur Ulm. Neben der Vorgabe einer Berechnungsvorschrift zur Erreichung eines Netto-Nullenergiehauses wurde die Nebenbedingung mit eingeführt, dass das Haus mindestens dem KfW-Effizienzhaus 40-Energiestandard entsprechen muss. Die Prüfung des Antrags erfolgt durch die Regionale Energieagentur Ulm.

### 7.2 Berechnungsvorschriften

### 7.2.1 Alte und neue Berechnungsmethode

Die Berechnungsmethode wurde von der Stadt Ulm einst wie folgt definiert: "Die Nachweise sind in Anlehnung an die EnEV 2009 wahlweise nach der DIN V 18599 oder der DIN V 4701-10 im detaillierten Verfahren zu führen. Allerdings müssen in Ergänzung zur Nachweisprozedur der EnEV die Primärenergiebedarfswerte für die Wohnungsbeleuchtung und für die Haushaltsgeräte

und -prozesse in der Berechnung mitberücksichtigt werden. Dabei ist ein pauschaler Wert von 20 kWh/m²a je m² Nettogrundfläche (nach der DIN V 18599) und Jahr anzunehmen.

Die Primärenergiefaktoren sind, abweichend von der EnEV, in Anlehnung an die DIN 18599 gemäß anhängender Tabelle 1 (nicht erneuerbarer Anteil) zu verwenden. Der netzeingespeiste Strom ist analog dem Verdrängungsstrommix zu bewerten.

Als Bilanzgrenze, auch im Sinne der Einbeziehung der Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien, ist das Grundstück, auf dem das Haus errichtet wird, anzusetzen."

Der Berechnungsgang wurde am 1.6.2014 in Zusammenarbeit mit der Regionalen Energieagentur Ulm wir folgt überarbeitet:

Als erster Schritt wird der Energiebedarf des Gebäudes ermittelt. Hierzu wird der Primärenergiebedarf nach EnEV mit dem pauschalen Haushaltsstrombedarf von 20 kWh je m² Gebäudenutzfläche nach EnEV und Jahr addiert.

### Energiebedarf des Gebäudes in kWh pro Jahr, berechnet aus

Primärenergiebedarf für Heizung, Lüftung, Warmwasser nach EnEV

Energiebedarf für Haushaltsstrom (pauschal) 20 kWh/(m²a) x Nutzfläche nach EnEV

Aus dem ermittelten Energiebedarf wird mit nachstehender Formel die Anlagengröße der Photovoltaikanlage berechnet.

für Ein- und Zweifamilienhäuser

$$Anlagengr$$
öße in  $kWp = \frac{Energiebedarf \cdot 0.7}{1000}$ 

für Mehrfamilienhäuser

$$Anlagengr$$
öß $e\ in\ kWp = rac{ ext{Energiebedarf}\cdot 0.5}{1000}$ 

Der tatsächlich erwartbare Ertrag der Anlage spielt keine Rolle (Neigung, Orientierung, Modultechnik).

### 7.2.2 Aktuelle Berechnung am Beispiel des Projekthauses

Nach der aktuellen Berechnungsmethode ergibt sich für das Projekthaus:

Primärenergiebedarf nach EnEV, hier nach DIN V 4108-6 und 4701-10 5.875 kWh

+ Energiebedarf für Haushaltsstrom (20 kWh/m<sup>2</sup><sub>AN</sub> x 215 m<sup>2</sup><sub>AN</sub>) 4.300 kWh

= Energiebedarf des Gebäudes in kWh pro Jahr 10.175 kWh

$$Anlagengr$$
öß $e~in~kWp=rac{10.175~ ext{kWh}\cdot 0.7}{1000}=7$ ,  $12~ ext{kW}p$ 

Eine Peakleistung von 7,12 kW<sub>p</sub> wäre am betrachteten Projekthaus bei sonst gleichen Randbedingungen (24 Module, Ost/West-Aufständerung) durch den Einsatz von 300 W<sub>p</sub>-Modulen (7,2 kW<sub>p</sub>) realisierbar gewesen.

Der simulierte Jahresertrag der Anlage für diesen Fall beträgt 7.044 kWh/a. Der reale Stromverbrauch in der ersten Messperiode betrug inkl. Einliegerwohnung rund 7.800 kWh/a. Somit wäre auch bei einer entsprechend größer ausgelegten Anlage kein Nullenergiehaus durch Jahresbilanzierung erreicht worden.

Bei der Betrachtung nach DIN V 18599 hätte die Anlagengröße er PV-Anlage 8,15 kWp betragen müssen, was ohne Änderung des Gesamtsystems nicht mehr realisierbar gewesen wäre.

### 7.2.3 Kritik an der Berechnungsmethode

Hauptkritikpunkt der aktuellen Berechnungsmethode aus Sicht der Autoren ist die Addition verschiedener Energiemengen, die keinen Bezug zueinander haben (Primärenergiebedarf und Endenergiebedarf). Des Weiteren werden bei der Ermittlung der geforderten PV-Anlagengröße weder Orientierung, noch Ausrichtung oder der geplante Modultyp berücksichtigt.

Dies erschwert die Fehlersuche, an welcher Stelle die Berechnung verbessert werden muss, um möglichst realitätsnahe Ergebnisse zu liefern.

Positiv zu bemerken ist die eingeführte Grundanforderung an den Energiestandard des Gebäudes, da in der ersten Ausgabe der Förderrichtlinien der Primärenergiebedarf bei Einsatz eines Energieträgers mit niedrigem Primärenergiefaktor (z. B. Holz-Pellets) sehr leicht umsetzbar gewesen wäre.

Im Anhang A1 zu diesem Abschlussbericht wird ein 1. Vorschlag als mögliche alternative Berechnungsmethode zur Diskussion gestellt. Es wird empfohlen in Abhängigkeit der aktuellen Gesetzeslage, den aktuellen anerkannten Regeln der Technik sowie den aktuell verfügbaren Technologien weitere Vorschläge für eine neuen Berechnungsmethode zu identifizieren.

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Absatzzahlen von Heizungswärmepumpen [BWP-01]	
Abbildung 2: Grundriss Untergeschoss (UG)	11
Abbildung 3: Grundriss Erdgeschoss (EG)	
Abbildung 4: Grundriss Dachgeschoss (DG)	12
Abbildung 5: Schnittdarstellung Gebäude	12
Abbildung 6: Ansichten Ost und Nord	
Abbildung 7: Ansichten Süd und West	14
Abbildung 8: Durchlaufprinzip des Trinkwassers sowie Schichtung im Speicher [Zeeh]	
Abbildung 9: PV-Anlage auf dem Flachdach	
Abbildung 10: Beispielfoto eingebautes Loxone-System [Loxone]	19
Abbildung 11: Fronius Solar Battery 4.5 [Fronius]	19
Abbildung 12: Anlagen-und Messschema	20
Abbildung 13: Mess- und Energieflussschema	
Abbildung 14: Modbus Energiezähler 3-phasig [Loxone-Modbuszähler]	23
Abbildung 15: Wärmemengenzähler [Molline]	23
Abbildung 16: Außenlufttemperaturen / Onlinewetterservice und lokal gemessen	27
Abbildung 17: Außenlufttemperaturen / Onlinewetterservice und lokal gemessen höher aufgelöst	28
Abbildung 18: Mittlere Außenlufttemperatur der ersten Messperiode	29
Abbildung 19: Horizontale Solarstrahlung der ersten Messperiode	29
Abbildung 20: Stromspiegel 2017 [Stromspiegel]	30
Abbildung 21: Stromernte der PV-Anlage in der ersten Messperiode	32
Abbildung 22: Wärmeverbrauch der Heizung in der ersten Messperiode	
Abbildung 23: Wärmeverbrauch für Trinkwarmwasser in der ersten Messperiode	35
Abbildung 24: Mittlere Speichertemperaturen in der ersten Messperiode	36
Abbildung 25: Arbeitszahlen der ersten Messperiode im Monatsverlauf	36
Abbildung 26: Änderung Zeiten Warmwasserbereitung	38
Abbildung 27: Unnötiger Heizbetrieb der Wärmepumpe	39
Abbildung 28: Schrittweise Reduzierung der WW-Solltemperatur	40
Abbildung 29: Mittlere Außenlufttemperatur der zweiten Messperiode	41
Abbildung 30: Horizontale Solarstrahlung der zweiten Messperiode	41
Abbildung 31: Entwicklung Haushaltsstrom	
Abbildung 32: Entwicklung Wärmepumpenstrom	
Abbildung 33: Stromernte der PV-Anlage in der zweiten Messperiode	
Abbildung 34: Aufteilung Strommengen Batteriespeicher	
Abbildung 35: Wärmeverbrauch der Heizung in der zweiten Messperiode	
Abbildung 36: Wärmeverbrauch für Trinkwarmwasser in der zweiten Messperiode	
Abbildung 37: Mittlere Speichertemperaturen in der zweiten Messperiode	
Abbildung 38: Arbeitszahlen der zweiten Messperiode im Monatsverlauf	
Abbildung 39: Tagesarbeitszahlen (TAZ) für Heizung und Warmwasser	
Abbildung 40: COP und Vorlauftemperatur relativ zur Außenlufttemperatur	
Abbildung 41: TAZ relativ zu PV-Ertrag und Tagesmitteltemperatur	
Abbildung 42: Bilanzgrenzen Arbeitszahlen [BINE-01] (siehe auch gemäß VDI 4650)	
Abbildung 43: PV-Strom Direktverbrauch in WP	
Abbildung 44: Stromkennzeichnung der SWU für 2016 [SWU]	
Abbildung 45: WP-Betrieb am 08.12.2017 (detailliert)	
Abbildung 46: WP-Betrieb am 20.11.2017 (detailliert)	
Abbildung 47: Status Quo Hygienespeicher: Beginn Beladung	
Abbildung 48: Status Quo Hygienespeicher: Ende Beladung	

Abbildung 49: Optimierter Hygienespeicher: Beginn Beladung	66
Abbildung 50: Optimierter Hygienespeicher: Ende Beladung	67
Abbildung 51: Raum "Kind 2" ohne "Solaroptimierung"	75
Abbildung 52: Raum "Kind 2" mit "Solaroptimierung"	
Abbildung 53: PV-Erträge und WP-Betrieb 11. und 12. Mai 2016	
Abbildung 54: Thermische Speicher-Nachladung trotz vorheriger Überhitzung	
Abbildung 55: Speicher komplett durchgeladen	79
Abbildung 56: Eigenverbrauchsquote und Autarkiegrad in der ersten Messperiode	
Abbildung 57: Eigenverbrauchsquote und Autarkiegrad in der zweiten Messperiode	

# **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Beteiligte Firmen am Bau	9
Tabelle 2: Kennzahlen des Gebäudes	9
Tabelle 3: U-Werte der Gebäudehülle	15
Tabelle 4: Auslegungsdaten der Fußbodenheizung	16
Tabelle 5: Temperaturmessungen im Raum Kind 1	22
Tabelle 6: Temperaturmessungen im Raum Wohnen	22
Tabelle 7: Temperaturmessungen im Raum Bad	
Tabelle 8: Messpunktliste	
Tabelle 9: Beschreibung der Typen	26
Tabelle 10: Stromverbraucher	31
Tabelle 11: Einstellung der Heizkurve	38
Tabelle 12: Sollwerte für Raumtemperaturüberhöhung	52
Tabelle 13: Typisch auftretende Abweichung der Randbedingungen	
Tabelle 14: JAZ bei verschiedenen Speichern nach Polysun	67
Tabelle 15: Kältemittel-Übersicht	70
Tabelle 16: Preisniveau verschiedener Wärmepumpen (Bruttopreise)	71
Tabelle 17: Typische Fehler bei Wärmepumpenanlagen [Bonin]	73
Tabelle 18: Simulationsergebnis Batteriespeicher mit WP	82
Tabelle 19: Simulationsergebnis Batteriespeicher OHNE WP	82

# Literaturverzeichnis

[BAFA2020]	https://www.bafa.de/DE/Energie/Heizen_mit_Erneuerbaren_Energien/Foerderprogramm_im_Ueberblick/foerderprogramm_im_ueberblick_node.html (Download am 17.09.2020)	
[Bonin]	Jürgen Bonin, "Wärmepumpen, Fehler vermeiden bei Planung, Installation und Betrieb", Fraunhofer IRB Verlag, 2. Auflage, 2018	
[BWP-01]	Bundesverband Wärmepumpen e.V., https://www.waermepumpe.de/presse/zahlendaten/absatzzahlen/ (Abfrage vom 10.10.2018)	
[BWP-02]	Bundesverband Wärmepumpen e.V., https://www.waermepumpe.de/normen-technik/jazrechner/ (Abfrage vom 30.05.2017)	
[BINE-01]	BINE Informationsdienst FIZ Karlsruhe GmbH - Büro Bonn: http://www.bine.info/publi-kationen/themeninfos/publikation/elektrisch-angetriebene-waermepumpen/performance-der-waermepumpe/ (Abfrage 02.04.2017)	
[BINE-02]	BINE Informationsdienst FIZ Karlsruhe GmbH - Büro Bonn, "Themeninfo I/2013: Elektrisch angetriebene Wärmepumpen", http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Themen-Infos/I_2013/themen_0113_internetx.pdf (Abfrage 02.05.2018)	
[DGS]	Dr. Falk Auer, erschienen in Zeitschrift "Sonnenenergie", Ausgabe Februar 2016, Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie e. V. (DGS), "Photovoltaik und Wärmepumpen", https://www.sonnenenergie.de/sonnenenergie-redaktion/SE-2016-02/Layout-fertig/PDF/Einzelartikel/SE-2016-02-s027-Waermepumpen-PV_und_Waermepumpen.pdf (Abfrage 07.01.2017)	
[Fronius]	Fronius International GmbH, https://www.fronius.com/de/solarenergie/produkte/eigenheim/speicher/fronius-solar-battery/fronius-solar-battery-4-5 (Abfrage 12.07.2018)	
[IWU]	Institut Wohnen und Umwelt GmbH, http://www.iwu.de/downloads/fachinfos/energiebilanzen/ (Abfrage vom 10.02.2018, inzwischen nicht mehr verfügbar)	
[Loxone]	Loxone Electronics GmbH, https://www.loxone.com/dede/ (Abfrage 08.12.2016)	
[Loxone-Modbuszähler]		
	Loxone Electronics GmbH, https://shop.loxone.com/dede/modbus-energiezaehler-3-phasig.html (Abfrage 27.05.2017)	
[Molline]	WDV-Molliné GmbH, http://www.molline.de/produkte-loesungen/waermezaeh-ler/kompakt-ultraschall/ultramessr-h/ (Abfrage vom 11.03.2018)	
[Polysun]	Studienarbeit Marco Schiele, "Polysun-Simulation eines vorgegebenen Einfamilienhauses in Ulm mit Luft-Wärmepumpe, PV-Anlage und Batteriespeicher im Vergleich zu einem Sonnenhauskonzept mit Biomasse-Kessel bei gleicher Gebäudetypologie", genutzte Polysun Programmversion V10.2.3, Technische Hochschule Ulm (THU), 2018	

[Quaschning] Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Quaschning, https://www.volker-

quaschning.de/datserv/kev/index.php (Abfrage 05.03.2018)

[Stromspiegel] co2online gemeinnützige Beratungsgesellschaft mbH, https://www.stromspie-

gel.de/stromspiegel/stromverbrauch-vergleichen-mit-dem-stromspiegel/ (Abfrage

vom 20.06.2018)

[SWU] SWU Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm GmbH, "Der aktuelle Strom-Mix der SWU Kennzeich-

nung der Stromlieferungen", https://www.swu.de/fileadmin/content/energie-was-

ser/strom/SWU-Strommix.pdf (Abfrage 12.11.2017)

[SZ-Jan2014] Süddeutsche Zeitung vom 03.01.2014

[Ulm] Stadt Ulm, "Richtlinien der Stadt Ulm zur Förderung der Energieeinsparung, zur ratio-

nellen Energieanwendung und zum Einsatz erneuerbarer Energien", abrufbar hier:

https://www.ulm.de/leben-in-ulm/bauen-und-wohnen/finanzielle-hilfen-und-f%C3%B6rderprogramme/energiefoerderprogramm (Abfrage 12.11.2016)

[VDI4650] VDI 4640 Blatt 1:2019-03: Berechnung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanla-

gen: Elektrowärmepumpen zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung. Berlin: Beuth

Verlag, 2019

[Zeeh] Heiztechnik und Behälterbau Joachim Zeeh GmbH, https://www.zeeh-spei-

cher.de/fkt00.htm (Abfrage vom 19.08.2017)