Abschlussbericht

Netto-Plusenergie-Gebäude mit Stromlastmanagement und Elektro-Mobilität

Förderkennzeichen: SF-10.08.18.7-11.32

Förderung durch: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung

Fördernehmer: Technische Universität Braunschweig
Institut für Gebäude- und Solartechnik (IGS)

Projektleitung: Univ. Prof. Dr. M. Norbert Fisch
Dipl.-Ing. Arch. Thomas Wilken

Bearbeitung: Dipl.-Ing. F. Bockelmann
Dipl.-Ing. C. Stähr

Laufzeit: 01.09.2011 – 01.03.2013

Stand: April 2013

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert (Aktenzeichen: SF-10.08.18.7-11.32 / II3-F20-10-1-068). Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren. Die Autoren danken für die Unterstützung.

Auftraggeber:

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

Referat II 3

Deichmanns Aue 31-37

53179 Bonn

durchgeführt von

Technische Universität Braunschweig

Institut für Gebäude- und Solartechnik (IGS)

Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften

Department Architektur

Mühlenpfordtstraße 23

38106 Braunschweig

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung 4
2. Projektbeschreibung 7
3. Architektur und Technikkonzept 9
4. Mess- und Monitoringkonzept 18
5. Betriebsergebnisse der ersten zwei Betriebsjahre 20
   5.1. Eigenstromnutzungsanteil und Netto-Plusenergie-Standard 20
   5.2. Strombilanz für 2011 und 2012 24
   5.3. Wärmebilanz für 2011 und 2012 28
   5.4. Wärmepumpe 30
   5.5. PV-Anlage 33
   5.6. Stromspeicher 34
6. Fazit und Ausblick 39
7. Veröffentlichungen und Vorträge 40
8. Anhang 42

1. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Netto-Plusenergie-Gebäude mit Stromlastmanagement und Elektro-Mobilität“ führt das Institut für Gebäude- und Solartechnik (IGS) der TU Braunschweig ein wissenschaftliches Monitoring- und Optimierungsprogramm für das Einfamilienhaus Berghalde in Leonberg-Warmbronn durch (Abbildung 1) ausführliche Gebäudedaten siehe Anhang).

Abbildung 1: Netto-Plusenergie-Gebäude „Berghalde“ (Leonberg-Warmbronn)

Kernziel des F+E-Vorhabens ist die Evaluierung der energetischen Performance des Netto-Plusenergie-Standards für das Einfamilienhaus. Dabei umfasst die Energiebilanz den Gebäudebetrieb, den Haushaltsstrom sowie die Elektromobilität. Unter anderem steht im Rahmen der wissenschaftlichen Untersuchung ein hoher Eigenstromnutzungsanteil aus der Photovoltaik im Fokus. Das Gesamtkonzept berücksichtigt die folgenden Aspekte zur Umsetzung des Netto-Plusenergie Standards:

- die Reduzierung des Jahres-Endenergiebedarfs für Heizung und Warmwasser,
- die Reduzierung des Jahres-Strombedarfs für Haushaltsgeräte und Beleuchtung,
- eine rationelle Energieerzeugung und -verteilung,
- die Nutzung der Sonnenenergie zur Wärme- und Stromerzeugung,
- die direkte Nutzung des solar erzeugten Stroms für E-Mobilität und Speicherung in Batterien,
- eine Gebäudeleittechnik (GLT) zur Steuerung und zur Umsetzung eines Lastmanagement sowie

- ein Monitoring zur Erfolgskontrolle und Betriebsoptimierung.

Das Gebäude wird seit September 2010 von einer drei- bzw. vierköpfigen Familie (ab Sept. 2011) bewohnt. Seit Anfang 2011 liegen Messdaten aus der GLT vor, die eine detaillierte Analyse der Energiebilanz, der Anlageneffizienz und der Betriebszustände ermöglichen. Im vorliegenden Abschlussbericht werden die Betriebsergebnisse aus dem Monitoring der ersten zwei Betriebsjahre im Zeitraum vom 01.01.2011 bis 31.12.2012 dargestellt.

Das primäre Ziel, den Netto-Plusenergie-Standard (Jährlicher Primärenergie- und Endenergie-Verbrauch) bei gleichzeitig hoher Nutzerzufriedenheit zu erreichen, wurde in den ersten zwei Betriebsjahren zu hundert Prozent erreicht. 2011 konnte ein primärenergetischer Stromüberschuss von ca. 80 % (21.526 kWh/a) erzielt werden. Der Ertrag übersteigt damit den netzbezogenen Anteil am Verbrauch um 57,3 %. 2012 sinkt dieses Plus bedingt durch die „Außerbetriebnahme“ der solarthermischen TWW-Bereitung und die stärkere Nutzung des E-PKWs. Damit konnte die Eigenstromnutzung von 18 % im ersten Jahr auf 32 % in 2012 gesteigert werden (Abbildung 2). Der solarelektrische Deckungsanteil konnte von rd. 32 % (2011: Stromverbrauch 9.027 kWh/a) auf ca. 48 % (2012: ca. 11.060 kWh/a) am gesamten Jahres-Stromverbrauch gesteigert werden. Die Stromproduktion hat 2011 den direkt nutzbaren Anteil am Stromverbrauch um 82,5 % und im Jahr 2012 um 67 % überstiegen.

Insgesamt konnte in den ersten beiden Betriebsjahren ein Netto-Stromüberschuss von rd. 12.110 kWh produziert werden und damit den eingesetzten Anteil der „Grauen Energie“ zur Herstellung des Gebäudes anteilig kompensieren.

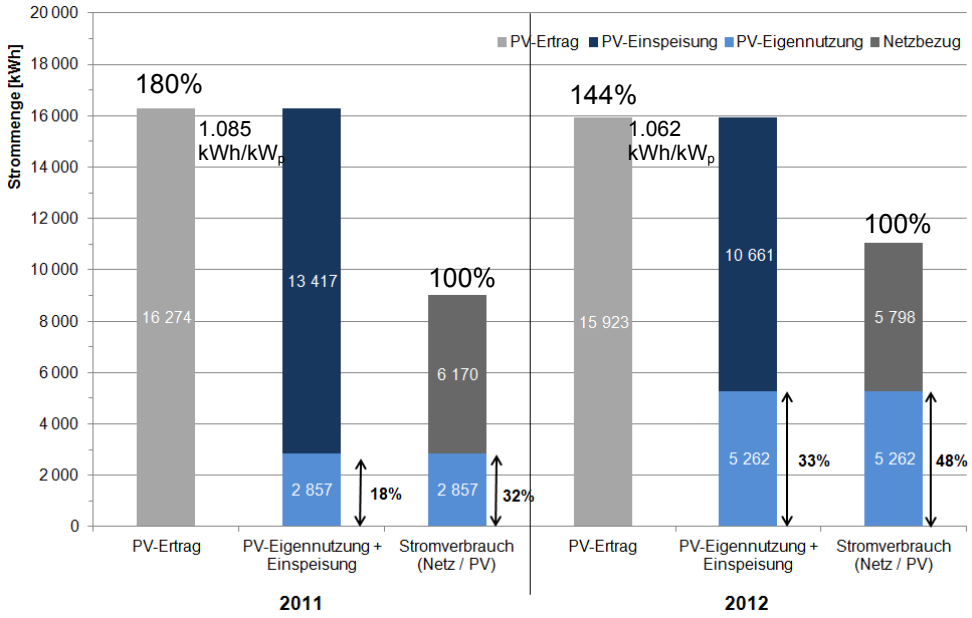


Abbildung 2: Jahresbilanz elektrische Energie (Endenergie, 2011 und 2012)

In den ersten beiden Betriebsjahren wurde ein Gesamtstromverbrauch (inkl. E-Mobilität) bezogen auf die Wohnfläche von rd. 35 kWh/(m^2_{Wfl}a) (2011) und ca. 42,5 kWh/(m^2_{Wfl}a) (2012) ermittelt. Dies passt sehr gut mit dem berechneten Strombedarf für den Gebäudebetrieb (Bilanzgrenze EnEV 2009) von rd. 20 kWh/(m^2_{Wfl}a) und 17 kWh/(m^2_{Wfl}a) für die Haushaltsgeräte überein. Der Stromertrag der PV- Anlage (15 kWp) lag in den beiden Jahren knapp über 60 kWh/(m^2_{Wfl}a) und damit etwas über dem prognostizierten Stromertrag von 57 kWh/(m^2_{Wfl}a). Der Überschuss wird für die Elektro-Mobilität genutzt bzw. in das öffentliche Stromnetz eingespeist oder in eine Batterie-Anlage (7 kWh und 20 kWh) zwischengespeichert um somit den Eigenstromnutzungsanteil zu erhöhen.

Für das Gebäude mit einer exzellent wärmegedämmten und luftdichten Gebäudehülle wurde ein Jahres-Heizenergiebedarf nach EnEV 2009 von 40,5 kWh/(m^2_{AN}a) bzw. 65,9 kWh/(m^2_{Wfl}a) berechnet. Aus den Messdaten wurden Jahresbereitstellungen von 43,1 kWh/(m^2_{Wfl}a) in 2011 bzw. 53,5 kWh/(m^2_{Wfl}a) in 2012 ermittelt. Witterungsbereinigt ergeben sich 50,0 kWh/(m^2_{Wfl}a) in 2011 bzw. 58,3 kWh/(m^2_{Wfl}a) in 2012 und damit geringere Werte im Vergleich zur EnEV-Berechnung. Für die Trinkwassererwärmung (inkl. Verteilverluste) wurden in beiden Jahren ein Wärmeverbrauch von rd. 4 kWh/(m^2_{Wfl} a) aufgewendet. 2011 wurden 11.202 kWh/a Wärme und im Jahr 2012 13.918 kWh/a Wärme erzeugt. Die Wärmebereitstellung erfolgte 2011 zu 73 % durch die Wärmepumpe und zu 27 % durch die thermischen Solarkollektoren, die im März 2012 abgedeckt wurden, um das Technikkonzept „Nur-Stromhaus“ zu untersuchen.

Die PV- Anlage hat in beiden Betriebsjahren einen Stromertrag von über 1.050 kWh/kWp/a erreicht, der Gesamtwirkungsgrad lag bei knapp über 13 %.

Die thermische Solaranlage hat trotz der etwas größeren Dimensionierung (7 m^2 für 3 bis 4 Personen) in 2011 einen sehr guten Ertrag von rd. 420 kWh/(m^2 a) erzielt.
Die monatlichen Arbeitszahlen der elektrischen Wärmepumpe konnten von rd. 3 bis 3,5 in der ersten Heizperiode (2011) auf 3,7 bis 4,7 in der zweiten Heizperiode (2012) gesteigert werden.

Die Wirkungsgrade der Batterien lagen im untersuchten Zeitraum zwischen 55 und 80 % und ergeben damit einen Gesamtwirkungsgrad aus PV-Anlage und Stromspeicherung von 7 bis 10 %.

2. PROJEKTBESCHREIBUNG

Das integrale Energiekonzept des Gebäudes basiert auf einer hohen solaren Stromerzeugung und weist sowohl für den Primärenergie- als auch den Endenergiebedarf eine positive Jahresbilanz auf. Über den Ansatz der Energieeinsparverordnung (EnEV 2009) hinaus wird der Bedarf für den Haushaltsstrom, die Beleuchtung und die Elektromobilität einbezogen. Die von der PV-Anlage gelieferte Energie übersteigt den Jahresbedarf für den Gebäudebetrieb (Heizen, Warmwasser, Hilfsstrom, Beleuchtung) und Haushaltsstrom sowie einen Anteil an der Mobilität um rd. 50 % und erfüllt die Kriterien des EffizienzhausPlus- Standards nach den Vorgaben des BMVBS. Die solarthermischen Erträge (nur im ersten Betriebsjahr) sind in der Bilanz berücksichtigt und tragen zu einer Reduzierung des Strombedarfs bei.

Der von der PV- Anlage erzeugte Strom soll primär im Haus selbst genutzt werden und zu einem hohen direkten solaren Deckungsanteil führen. Durch den Einsatz eines monovalenten elektrischen Wärmepumpensystems, einer „kleinen“ Strombatterie sowie eines Elektro-PKWs sind grundlegende Voraussetzungen für einen hohen Eigenstromanteil gegeben.
Um das Ziel zu erreichen, wird ein "Stromlastmanagement" für die Stromverbraucher (Wärmepumpe, Lüftungsanlage Haushaltsgeräte, Beleuchtung und Elektromobilität) implementiert. Die Ansteuerung der relevanten Anlagenkomponenten im Gebäude erfolgt über die GLT. Eine Optimierung des Betriebs ist auf der Basis der umfangreichen installierten Messtechnik für das wissenschaftliche Monitoring vorgesehen.

Mit dem Ziel der Bundesregierung die Elektromobilität als einen Baustein der Energiewende zu entwickeln, gewinnt die Verbindung von Gebäude und individuelle e-Mobilität, an Bedeutung. Im Laufe des ersten Betriebsjahres (2011) stand den Bewohnern ein Elektro- Scooter und ein Elektro-PKW (Smart Fortwo electric drive, ca. 18 bis 20 kWh / 100 km) zur Verfügung, im zweiten Betriebsjahr (2012) wurde der Smart durch einen Elektro- Fiat 500 ersetzt. Der jährlich solar erzeugte bilanzielle Stromüberschuss (ca. 7.000 bis 8.000 kWh/a) entspricht einer virtuellen PKW- Fahrleistung von rd. 35.000 bis 40.000 km/a.

Gebäudetyp	**zweigeschossiges freistehendes EFH**
Standort	Leonberg-Warmbronn
Bauweise	Massivbauweise
Fertigstellung	September 2010
Grundstücksfläche	876 m²
Wohnfläche (beheizt)	260 m²
Bruttogeschossfläche	595 m²
Bruttoraumvolumen	1.747 m³
A/V-Verhältnis	0,641 m^{-1}

Tabelle 1: Projektdaten

3. ARCHITEKTUR UND TECHNIKKONZEPT

Architektur

Das Ende 2010 fertiggestellte Einfamilienhaus fügt sich in die bestehende Bebauungsstruktur des vor über 40 Jahren entstandenen Wohnquartiers, auf einem knapp 900 m² großen Südhanggrundstück, ein.

Das Gebäude hat eine Wohnfläche von rd. 260 m² und öffnet sich mit einer großzügigen Fensterfront südlich zur Talseite. In Folge der Topographie ist das Untergeschoss nördlich in den Hang eingegraben. Gegenüber der Südansicht ist die Nord-, Ost- und Westfassade deutlich weniger transparent.

Alle Wohnräume sind nach Süden orientiert. Im Erdgeschoss befinden sich im Anschluss an den Eingangsbereich die Kinder- und Gästezimmer mit Gartenzugang, im Obergeschoss der großzügige und zusammenhängende Wohn-, Ess- und Küchenbereich mit Südwestterrasse (Abbildung 3 und Abbildung 5). Die zueinander versetzten Geschossebenen bilden durch die Auskragung einen baulichen Sonnenschutz für das Erdgeschoss. Im Obergeschoss verschatten außen liegende horizontale Lamellen im Bedarfsfall die Fassade. Nebenräume, wie Badezimmer, Wirtschafts- und Haustechnikraum befinden sich auf der Nordseite (Abbildung 3). Das Dachgeschoss bietet darüber hinaus Platz für ein großzügiges Arbeitszimmer und weitere Nutzflächen.

Den oberen Gebäudeabschluss bildet ein 17° südgeneigtes Pultdach, das komplett zur aktiven Solarenergienutzung mit Photovoltaik-Modulen und thermischen Sonnen-Kollektoren belegt ist (Abbildung 5).

Abbildung 3: Grundriss Erdgeschoss (links) und 1. Obergeschoss (rechts)
(Architekt: Berschneider und Berschneider, Pilsach)

Energiekonzept

In Rahmen eines ganzheitlichen Energiekonzepts wurde die Wärme- und Stromversorgung für das Wohngebäude umgesetzt. Voraussetzung ist eine integral geplante Lösung, die die wirtschaftliche Optimierung zwischen Reduzierung des gesamten Energiebedarfs und der Energiebereitstellung aus Solarenergie konsequent verfolgt.

Abbildung 4: Süd-Ostansicht (links) und Nord-Westansicht (rechts)

Abbildung 5: Vogelperspektive (links) und Terrassenbereich (rechts)

Neben der regenerativen Deckung des Energiebedarfs durch die aktive Nutzung der Solarenergie steht eine möglichst hohe Eigenstromnutzung aus dem Ertrag der PV-Anlage im Fokus des Projekts. Um Angebot und Bedarfsdeckung aufeinander abzustimmen, wird angestrebt die Laufzeiten der WP nachts zu reduzieren und die energieintensiveren Haushaltsgeräte (Waschen, Trocknen, Spülen, etc.) möglichst bei Sonnenschein einzuschalten. Die beiden stationären Strombatterien (7 und 20 kWh) sowie die Batterien der E-Mobilität tragen zur Steigerung der Eigenstromanteils bei. Durch diese Maßnahmen wird so viel Energie wie möglich direkt im Gebäude genutzt und der Überschussanteil, der in das öffentliche Netz eingespeist oder aus dem Netz bezogen wird, verringert.

Im zweiten Betriebsjahr wurde die solarthermische Anlage außer Betrieb genommen (Kolle-

ktoren wurden abgedeckt), um das Energiekonzept „Nur-Stromhaus“ (Abbildung 7) experimentell zu erproben und Messdaten zu generieren.

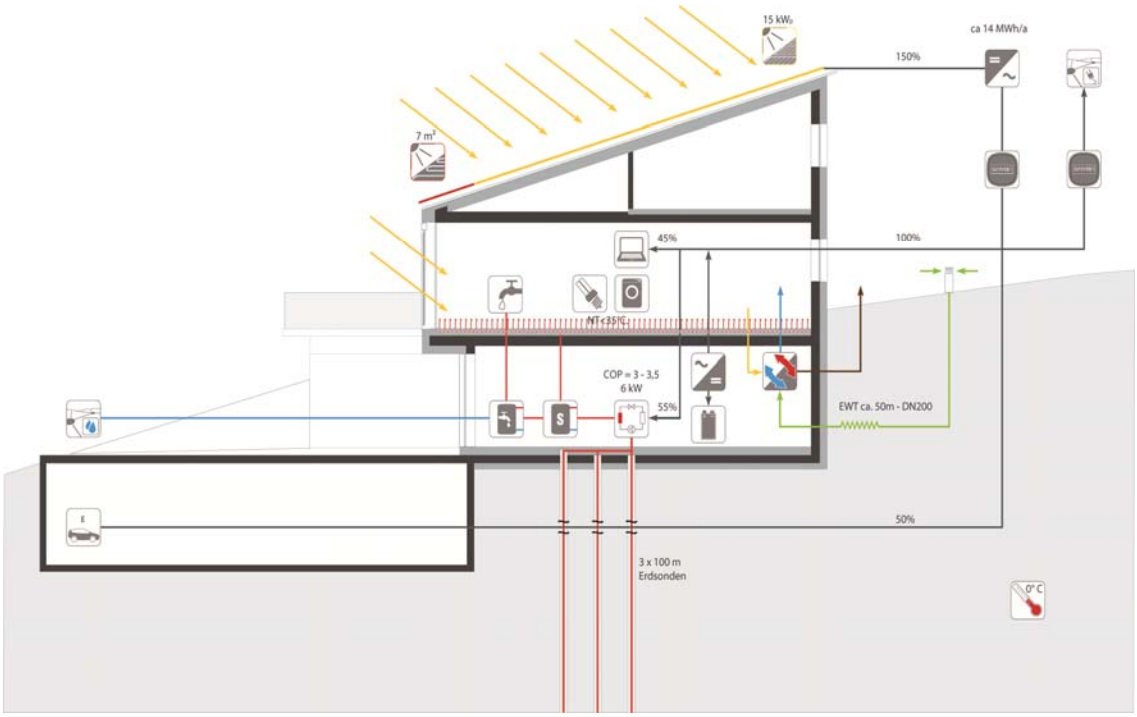


Abbildung 6: Energiekonzept (2011)

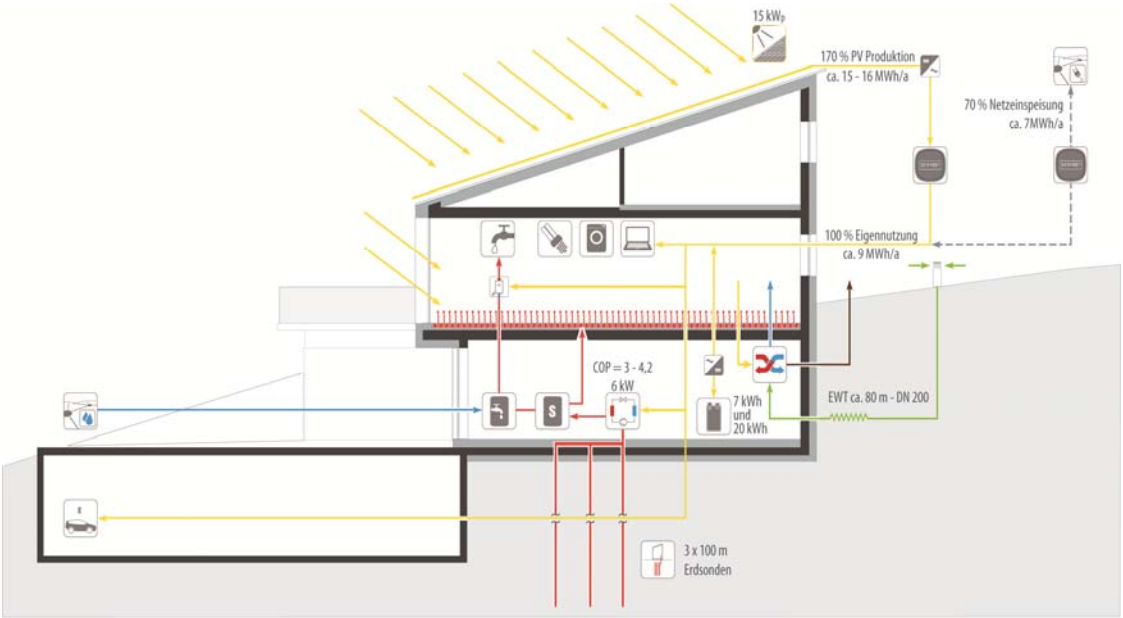


Abbildung 7: Energiekonzept (2012) ohne Solarthermie-Anlage, „Nur- Stromhaus“

Gebäudehülle

Die Gebäudehülle ist Bestandteil des ganzheitlichen Konzepts. Bei der Planung, Konstruktion und Detaillierung wird auf eine Vermeidung von Wärmebrücken und eine luftdichte Ausführung geachtet. Die massive Bauweise erhöht die thermische Speicherfähigkeit, die in Verbindung mit der hochwertigen Dämmung zur Reduzierung der Wärmeverluste über die Gebäudehülle in das Lastmanagement einbezogen werden kann. Die wärmegedämmte Hülle ist umlaufend ausgeführt. Alle Außenwände sind entweder in Beton oder Kalksandsteinmauerwerk mit einem Wärmedämmverbundsystem mit einer Dämmstärke von 22 cm ausgeführt. Das Pultdach besteht aus einer Sparrenkonstruktion, die komplett mit einer Mineralfaserdämmung (22 cm) ausgefüllt und raumseitig mit einer Untersparrendämmung aus 5 cm Polystyrol zur Verringerung der Wärmeverluste über die Sparren abgeschlossen wird.

Bauteil	**Wärmedurchgangskoeffizient U-Wert [W/(m²K)]**
Außenwand	0,15
Dach	0,12
Bodenplatte	0,30
Fenster	0,60–0,80
Luftdichtigkeit (Blower-Door-Test)	n_{50} = 0,50 1/h

Tabelle 2: Bauphysikalische Qualitäten - Gebäudehülle

Die transparenten Elemente der Gebäudehülle (feststehende Fenster, Dreh-Kippflügel und Schiebetüren) sind im gesamten Haus dreifach verglast. Dabei ist die bauphysikalische Qualität der Verglasungen an die Himmelsrichtungen angepasst. Auf der Südseite kommen Verglasungen mit Gesamt-Energiedurchlassgraden von 0,35 bis 0,48 [–] zum Einsatz. In Verbindung mit dem außenliegenden Sonnenschutz im Obergeschoss und dem baulichen Überhang im Erdgeschoss wird der sommerliche Wärmeschutz eingehalten. Für die maximale Transparenz und zur Unterstützung der gestalterischen Absicht einer konsequent reduzierten Fügung von Wand, Decke oder Boden und den Fensterflächen sind die Rahmenprofile in die Gebäudehülle integriert. Ein zerstörungsfreier Austausch der Verglasung bleibt jederzeit möglich.

Als Sonnenschutz werden Raffstoren mit 80 und 100 mm breiten Flachlamellen mit Seilführung (im Schlafbereich mit Schienenführung) und elektrischen Motorantrieben eingesetzt. Vor der großen Südverglasung im oberen Wohnbereich wird eine neu entwickelte Lamelle

mit selektiver Beschichtung verwendet. Die selektive Oberfläche reflektiert vorzugsweise nur das sichtbare Licht in den Raum. UV- und kurzwellige IR-Strahlung des Sonnenspektrums werden von der Lamelle absorbiert und als Wärme abgegeben. Die langwellige IR-Strahlung gelangt nicht direkt durch die Verglasung ins Rauminnere. Damit wird die sommerliche Überhitzung vermieden, auch wenn die Lamelle nicht auf „Cut-off-Stellung“, sondern auf „Tageslichtnutzung“ eingestellt wird. Im System wird ein Gesamtenergiedurchlassgrad g_{tot} von unter 0,05 erreicht.

Durch die hochwärmegedämmte und luftdicht ausgeführte Gebäudehülle, die Nutzung von passivsolaren Gewinnen, sowie eine kontrollierte Lüftung mit WRG, wird ein Jahres-Heizwärmebedarf nach EnEV 2009 von ca. 40,5 kWh/(m²$_{AN}$a) erreicht.

Gebäudetechnik und Energieversorgung

Da am Standort weder Erdgas noch Fernwärme zur Verfügung stehen, wird Strom als Energieträger gewählt. Die Nutzung erneuerbarer Energien erfolgt dabei durch eine dachintegrierte Photovoltaik-Anlage mit einer Peak-Leistung von 15 kW$_p$ und eine Solarthermie-Anlage mit einer Kollektorfläche von 7 m².

Der jährliche Stromertrag aus der PV Anlage ist mit rund 15.000 kWh/a vorausberechnet, was bezogen auf die installierte Leistung ca. 1.000 kWh/kW$_P$ entspricht. Pro Quadratmeter Wohnfläche stehen damit bilanziell jährlich ca. 57 kWh/(m²$_{Wfl}$a) für die Energieversorgung zur Verfügung. Der jährliche Strombedarf für Haushalt, Heizung und Gebäudebetrieb wird mit rund 9.000 kWh/a ermittelt, so dass sich ein regenerativ erzeugter Überschuss von rund 66 % bezogen auf den Bedarf ergibt.

Die elektrische Energieversorgung wird neben der PV-Anlage, die mit zwei Batteriesystemen (Blei/Gel) gekoppelt ist, durch den Anschluss an das öffentliche Stromnetz sichergestellt (Abbildung 6). Die Ankoppelung der Batterien erfolgt über Wechselrichter und jeweils zugeordnete Be- und Entladecontroller. Als Back-up-System hat die kleinere Batterie eine Speicherkapazität von 7 kWh und versorgt die Beleuchtung in Zeiten, in denen die PV-Anlage keinen Strom liefert. Die größere Batterie mit einer Kapazität von 20 kWh und einer Entzugsleistung von max. 8 kW wird vom Energieversorger (EnBW) bereitgestellt. Sie dient der Speicherung sowohl von PV- als auch von Netzstrom und unterstützt die Steigerung der Eigenstromnutzung. Mit der Anbindung der Batterie an das öffentliche Stromnetz und der Möglichkeit zur Ein- und Ausspeicherung wird der Akkumulator zu einem Element für das künftige Smart Grid.

Neben der vorrangigen Direktstromnutzung im Gebäude wird der solar erzeugte Strom für die Beladung der E-Fahrzeuge verwendet. Die weiteren Überschüsse aus der solaren Erzeugung werden in das Netz eingespeist und in Zeiten, in denen der Strombedarf größer ist als der Ertrag, aus dem Netz bezogen. Damit wird das Stromnetz entlastet und nicht zu 100 Prozent als Stromspeicher genutzt, wie dies überwiegend bei netzgekoppelten PV-Anlagen der Fall ist. Die PV-Anlage mit der Peak-Leistung von 15 kW_P und insgesamt 90 Modulen (im Mittel 170 Watt, p-Si-Zellen) ist in sechs Stränge von je 15 Einheiten aufgeteilt, die an einen dreiphasigen Wechselrichter (AC: 50 Hz, 230 V, 15 kW) angeschlossen sind. Die Wirkungsgrade der Module erreichen im Mittel 13,5 Prozent, für den Wechselrichter gibt der Hersteller 98 Prozent an. Die PV-Module sind hinter lüftet und nach dem Prinzip der Aufdachmontage am Stehfalz der Edelstahlblecheindeckung befestigt.

Heizungs- und Lüftungstechnik

Die Wärmeerzeugung erfolgt durch die monovalent betriebene elektrische Wärmepumpe (WP) (max. 3,5 kW_{el}), die als Wärmequelle an drei vertikalen Erdwärmesonden (je ca. 97 m tief) gekoppelt ist. Thermische Solarkollektoren mit ca. 7 m² unterstützen die Wärmeversorgung (Abbildung 6).

Die Erdwärmesonden (Doppel-U-Rohre, PEXa, 32 x 2,9 mm) sind im Bereich der Garagenvorfahrt platziert und parallel verschaltet. Der Betrieb erfolgt mit Wasser ohne Zusatz von Frostschutzmitteln. Um zu verhindern, dass die Temperatur im Sonden-Kreislauf unter 0 °C sinkt, wurde die Sondenlänge um ca. 30 Prozent gegenüber dem tatsächlichen Bedarf erhöht. Die max. thermische Leistung der WP beträgt rund 10 kW_{th}, was etwa dem Zwei- bis Dreifachen des maximalen Heizleistungsbedarfs entspricht. Die WP arbeitet auf einen Heizwasser-Pufferspeicher (ca. 800 l), der in zwei Zonen aufgeteilt ist. Das obere Drittel des Pufferspeichers mit Temperaturen von rund 50 bis 60 °C dient indirekt der TWW-Bereitung. Die Erwärmung des Trinkwassers erfolgt durch eine externe Durchflussstation. Für die Raumheizung steht das untere 2/3 des Speichervolumens mit Temperaturen um 35 bis 40°C zur Verfügung. Hier sind die Heizkreise für die Fußbodenheizung (VL-Temperatur 28 bis 32 °C, abhängig von der Außentemperatur) sowie die statischen Heizkörper (VL-Temperatur ca. 35 °C) in den beiden Bädern eingebunden. Die Fußbodenheizung ermöglicht es, die thermischen Gebäudemassen (insbesondere den Estrich) zu aktivieren und mit niedrigen Systemtemperaturen und geringer Temperaturdifferenz zum Raum für Behaglichkeit zu sorgen. Die Rohrschlangen der Fußbodenheizung aus PEX-Rohr sind im Abstand von 10 bis 20 cm im schwimmenden Estrich verlegt. Zonenventile in den Heizkreisverteilern der einzelnen Stockwerke ermöglichen eine Einzelraumregelung.

Hocheffiziente Umwälzpumpen mit einer elektrischen Leistungsaufnahme von maximal 30 W für die Fußbodenheizung und weniger als 10 W für die Badheizkörper sorgen für die Durchströmung der Heizkreise.

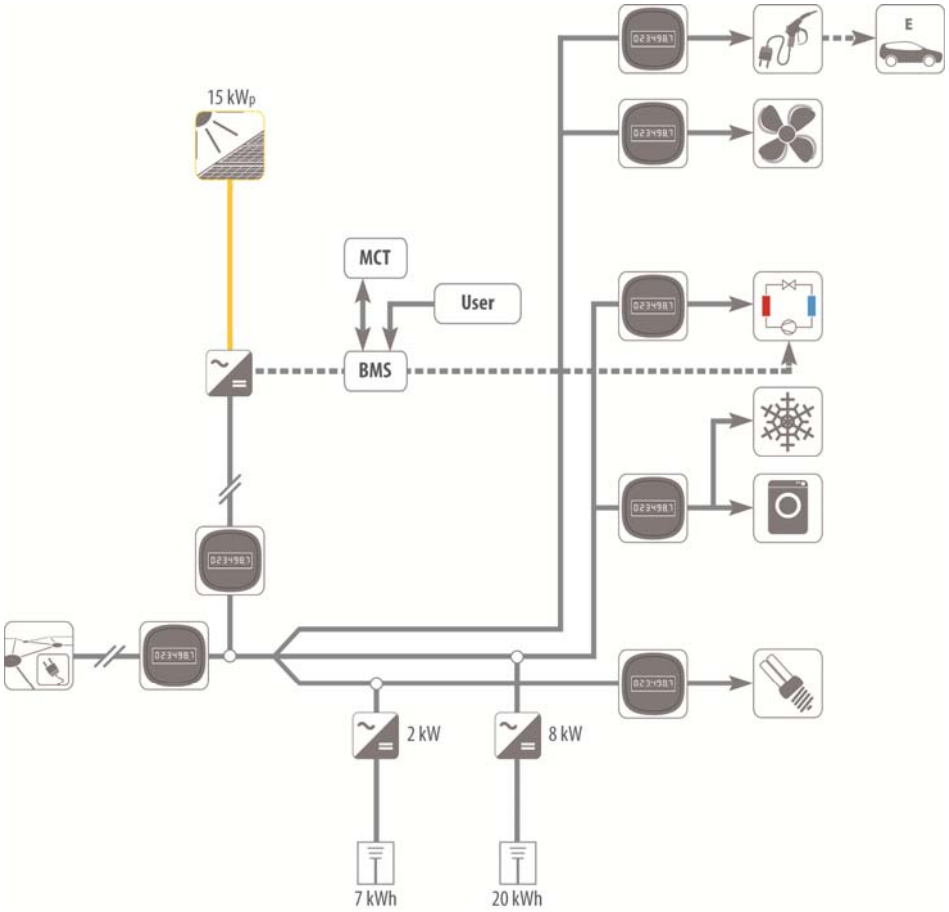


Abbildung 8: Stromversorgung, -speicherung und –verteilung, Stromzählerkonzept

Im untersten Speicherbereich ist ein Wärmetauscher (WT) integriert, über den die ST-Anlage eingebunden ist. Damit werden die TWW-Bereitung und die Raumheizung unterstützt. Im mittleren Speicherbereich ist ein elektrischer Heizstab (ca. 5 bis 6 kW_{el}) integriert, der beim Ausfall der WP die notwendige Grundversorgung übernehmen kann. Das TWW wird mit relativ niedriger Temperatur (um 45 °C) verteilt. Dies steigert die Arbeitszahl der WP und reduziert die Verteil- und Zirkulationsverluste. Zusätzlich wird die Zirkulationspumpe über Taster nahe der TWW-Zapfstellen manuell aktiviert und nach einer vorgegebenen Zeit automatisch wieder ausschaltet. An den Zapfstellen (in Küche und Hauswirtschaftsraum) sind zusätzlich elektronisch geregelte Mini-Durchlauferhitzer (4 bis 5 kW_{el}) installiert, um je nach Bedarf das Wasser auf 55 bis 60 °C zu erhitzen.

Aufgrund der Möglichkeit, den Erdsondenkreislauf direkt mit den im Estrich verlegten Rohrregistern an der WP vorbei zu verbinden, ist neben der Gebäudebeheizung ein freier Kühlbe-

trieb möglich. Damit lässt sich der Komfort im Wohnbereich bei extremen Sommerbedingungen ohne nennenswerten Energieeinsatz steigern. Zusätzlich wird durch diesen Betriebsmodus die thermische Regenerierung des Erdreichs im Umfeld der Sonden unterstützt.

	Anlagentechnik	**Leistung/Fläche/Volumenstrom**
Wärmeerzeugung	Erdreich-Wärmepumpe, solarthermischer Kollektor	Max. 3,5 kW_{el}, 10 kW_{th} 7 m²
Kälteerzeugung	Regenerative Kühlung über Erdreich-Wärmetauscher bzw. Erdwärmesonden	ca. 1 bis 1,5 kW (Erdreich-WT) ca. 6 bis 9 kW (Sonden)
Stromerzeugung	Dachintegrierte Photovoltaik	15 kW_p
Lüftung	Kontrollierte Zu- und Abluftanlage mit WRG	Max. 250 m³/h

Tabelle 3: Technische Daten Gebäudetechnik

Im gesamten Gebäude ist eine freie Fensterlüftung möglich. Zur Reduzierung der Lüftungswärmeverluste während des Heizbetriebs ist eine kontrollierte mechanische Be- und Entlüftungsanlage mit WRG vorhanden. Ein kompaktes Lüftungsgerät mit einem Kreuzstrom-WT sowie Filtereinheiten versorgt die Wohn- und Schlafräume mit Frischluft. Die entsprechend ausgelegte Zuluftmenge strömt über bodenintegrierte Luftauslässe in Kinder-, Wohn- und Schlafzimmer ein. Die Abluft wird aus Küche, Bad, Hauswirtschaftsraum und WC abgesaugt und dem Lüftungsgerät zur WRG zugeführt. Das Lüftungsgerät ist mit drehzahlgesteuerten Zu- und Abluftventilatoren ausgestattet und kann in drei Stufen mit ca. 100, 165 und 250 m³/h betrieben werden. Die elektrische Stromaufnahme variiert dabei zwischen 50 und 80 W. Die Lüfterstufen können durch die Nutzer über die GLT am Touchpanel nach Bedarf gewählt werden. Ein Erdreichwärmetauscher, bestehend aus einem im Arbeitsraum verlegten Kunststoffrohr (PP, DN 200) mit einer Gesamtlänge von 80 m, übernimmt die Vorkonditionierung der Außenluft. Das eingesetzte PP-Rohr ist auf der Innenseite mit einer antibakteriellen Schicht (Dotierung mit Silberionen) versehen. Damit soll eine hygienisch einwandfreie Zuluftqualität erreicht werden. Die Außenluft wird über ein Ansaugelement mit Grob- und Feinfilter etwa 1,2 m über dem Erdboden angesaugt. Im Winter wird die Außenluft auf frostfreie 5 bis 10 °C vorgewärmt. Außerhalb der Heizperiode ist die mechanische Lüftung in der Regel ausgeschaltet. Im Sommer bei extrem hohen Außentemperaturen kann der EWT zur Kühlung genutzt werden.

Gebäudeleittechnik

Alle relevanten Versorgungskomponenten im Gebäude sind mit der GLT verbunden. Neben den systemeigenen Regeleinheiten erfolgt die übergeordnete Ansteuerung durch ein Temperatur- und Energieleitmanagement. Steuerung und Regelung resultieren in Abhängigkeit von der Außentemperatur über eine DDC (Direct Digital Control) und deren Ein- und Ausgangsmodule. Sämtliche Funktionen, die von der DDC erfasst oder ausgelöst werden, lassen sich durch die GLT visualisieren, sodass die Betriebszustände für den Nutzer transparent werden.

Die GLT ist über eine LAN-Schnittstelle mit dem hauseigenen Ethernet-Netzwerk verbunden. Hierdurch ist es möglich, die in der GA hinterlegten Funktionen über im Haus verteilte Netzanschlüsse mittels PC, einem zentralen Touch-Panel im Wohnbereich sowie des WLAN-Netzes über einen Handheld aufzurufen. Über einen gesicherten VPN-Zugang kann dies auch von jedem Ort der Welt über das Internet erfolgen. So können einige Sollwerte vom Nutzer verändert und z. B. Raumtemperaturen, Wärme- und Stromverbräuche, Stromlieferung der PV-Anlage und wesentliche Schaltzustände der Anlagentechnik abgefragt werden.

Die aktuelle Energieperformance des Gebäudes wird damit für den Nutzer direkt ersichtlich. Im Zusammenhang mit den Energiesparmaßnahmen, die im Stromlastmanagement hinterlegt sind (beispielsweise der Betrieb von Waschmaschine, Geschirrspüler etc. ausschließlich tagsüber, wenn die PV-Anlage Strom produziert), gelangt das energiesparende Wohnen, Leben und Arbeiten in das Bewusstsein der Nutzer – das Thema Energieeffizienz wird damit transparent. Ein Eingriff in die Steuerung der Gebäudefunktionen ist jederzeit manuell möglich, falls dies aus Komfortgründen gewünscht wird. Die Abstimmung zwischen Mensch und Technik ist ein wichtiger Aspekt, der im Gebäude in der Praxis erprobt wird.

4. MESS- UND MONITORINGKONZEPT

Als Grundlage für eine detaillierte Auswertung des Wärme- und Stromverbrauchs sowie zur Erstellung der Energiebilanzen im Gebäude, wird ein differenziert auflösendes Messkonzept umgesetzt. Eine Übersicht über das Zählerschema gibt Abbildung 9 und Abbildung 10.

Das Messintervall für die Datenerfassung beträgt 2-Minuten, um die Anlageneffizienz bewerten zu können. Ein einfaches Energie-Monitoring operiert i.d.R. mit einer Auflösung von 15-Minuten Intervallen. Da im Rahmen des Forschungsvorhabens regenerative Erträge und Gebäudelasten im Betrieb aufeinander abgestimmt und Optimierungsansätze identifiziert und analysiert werden, ist der kleinere Zeitschritt relevant.

Der Gesamtenergieverbrauch Strom des Gebäudes setzt sich zusammen aus dem Verbrauch von Wärmepumpe, kontrollierter Lüftung mit WRG, MSR-Technik, Nutzer- und Haushaltsstrom sowie Elektromobilität (siehe Abbildung 9). Für die Analyse der Wärmebereitstellung und des -verbrauchs werden, wie in Abbildung 10 dargestellt, die Energiemengen der Wärmepumpe und der Solarkollektoren sowie der Wärmebergabe für Heizung und Trinkwarmwasserbereitung erfasst. Neben den Zählern zur Bestimmung aller relevanten Energiemengen sind weitere Sensoren zur Aufzeichnung von Temperaturen, Betriebszuständen, Leistungen, Ventilstellungen etc. installiert.

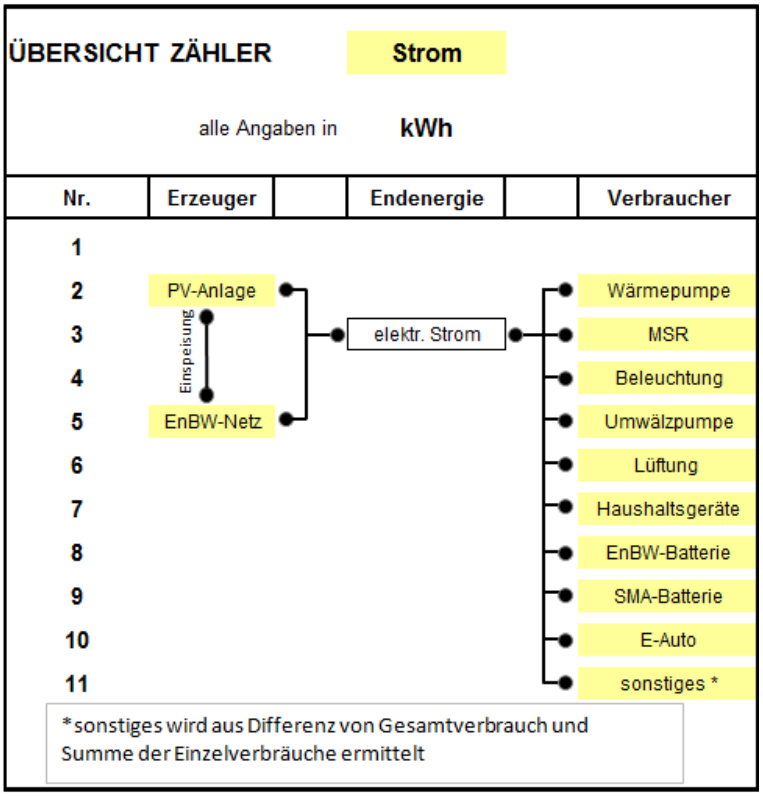


Abbildung 9:Schematische Darstellung der installierten Stromzähler

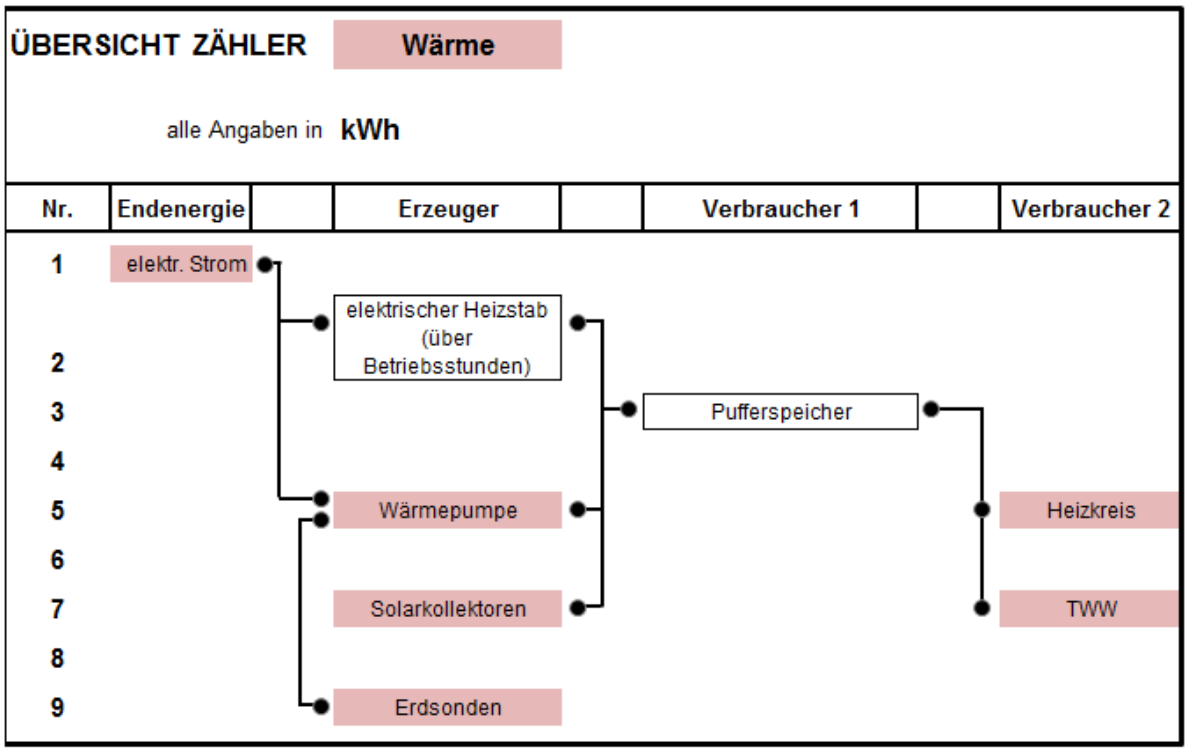


Abbildung 10:Schematische Darstellung der installierten Wärmemengenzähler

5. BETRIEBSERGEBNISSE DER ERSTEN ZWEI BETRIEBSJAHRE

Auf der Basis des oben dargestellten Mess- und Monitoringkonzepts liegen für die ersten zwei Betriebsjahre 2011 und 2012, Ergebnisse zur Anlagen- und Gebäudeperformance sowie den Energiebilanzen vor. Parallel zu der Auswertung der aufgezeichneten Daten erfolgt eine Beschreibung der aus der Implementierung des Stromlastmanagements resultierenden Veränderungen im Betrieb und der Anlagenperformance.

Zur Steigerung des direkten Nutzungsanteils des vor Ort erzeugten Stroms, werden folgende Maßnahmen umgesetzt:

- Betrieb aller stromintensiven Elektro-Haushaltsgeräte und der Wärmepumpe möglichst zeitgleich mit dem Stromertrag aus der Photovoltaikanlage
- Nutzung aller verfügbaren thermischen Speicherkapazitäten, wie Fußbodenheizung und Warmwasserspeicher/ Pufferspeicher
- Betrieb der Wärmepumpe möglichst tagsüber (Absenkbetrieb von 21 – 6 Uhr) bzw. mit Netzstrom z.B. bei sehr niedrigen Außentemperaturen während der Heizperiode oder fehlendem Solarertrag
- März 2012: Abdeckung der thermischen Solarkollektoren zur Abbildung des Betriebsszenarios „Nur-Stromhaus“ mit einer monovalenten Wärmeversorgung über die Wärmepumpe
- Umsetzung diverser Regelstrategien für die Wärmepumpe zur Nutzung der thermischen Gebäudemasse sowie des Pufferspeichers (siehe Kapitel 0)
- Implementierung der Batteriespeicher zur optimalen Nutzung des solar erzeugten Stroms (siehe Kapitel 5.6)

5.1. Eigenstromnutzungsanteil und Netto-Plusenergie-Standard

Die Gebäudetechnik sieht prioritär die direkte Nutzung der solaren Erträge aus der Photovoltaik vor. Nur Überschüsse, die nicht gespeichert werden können, werden in das öffentliche Versorgungsnetz eingespeist. In Abbildung 11 ist der über die PV-Anlage produzierte und im Haus genutzte sowie vom Netz bezogene Strom dargestellt. Aus der Differenz ergibt sich die Stromeinspeisung (dunkelblau). Liegt der solare Deckungsanteil am Gesamtstromverbrauch in 2011 bei 32 %, so konnte dieser 2012 infolge der Veränderungen und der Optimierungen auf 48 % gesteigert werden. In 2011ergibt sich ein bilanzieller Überschuss von 80 %. Aufgrund der monovalenten Versorgung durch die Wärmepumpe in 2012 in Verbindung mit der Erhöhung des Eigenstromnutzungsanteils verringert Überschuss auf 44 %.

Abbildung 12 zeigt die monatliche Bilanz von Solarertrag, der direkt im Haus genutzte Solarstrom sowie den Eigenstrom-Nutzungsanteil und den solaren Deckungsanteil. Durch Opti-

mierungsmaßnahmen, der Umstellung der WP-Regelstrategien sowie der Abdeckung der thermischen Solarkollektoren, konnten die Anteile der Eigenstromnutzung um 84 % gesteigert werden. Zusätzlich wird deutlich, dass die Eigenstromnutzung im jahreszeitlichen Verlauf entgegengesetzt dem regenerativen Ertrag im Sommer prozentual abnimmt und in den Wintermonaten zunimmt. Der direkt genutzte PV-Stromanteil ist umso größer, je geringer die PV-Anlage überdimensioniert wird. Umgekehrt verhält es sich mit den solaren Deckungsanteilen am Gesamt-Stromverbrauch.

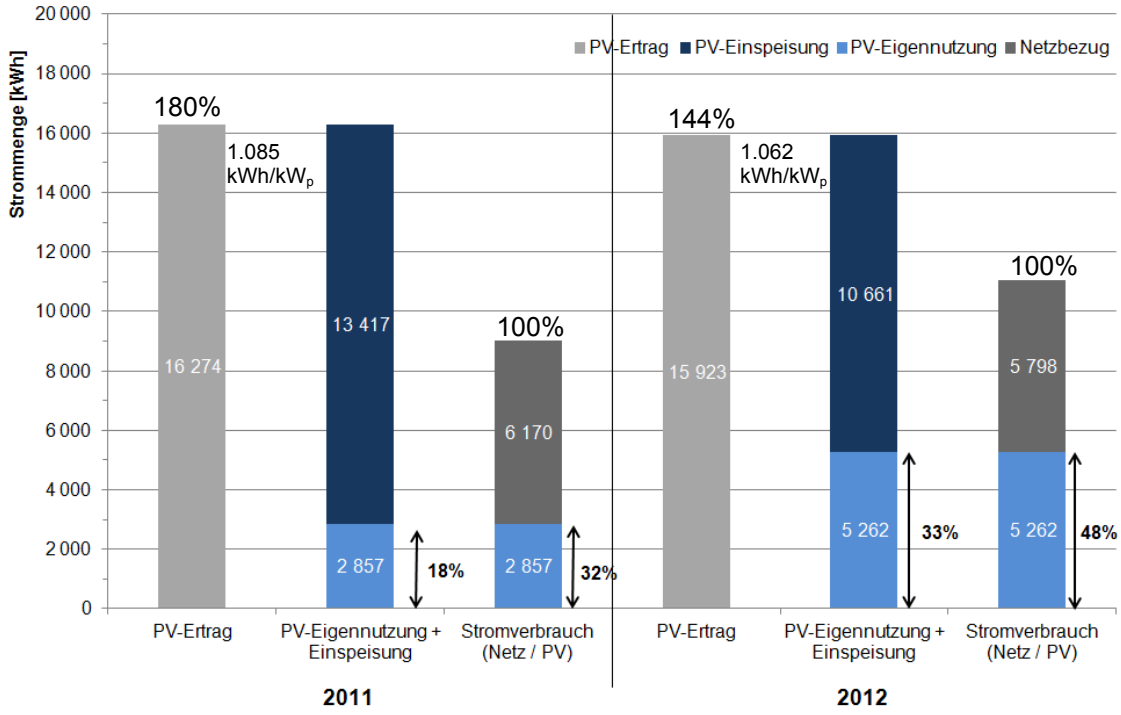


Abbildung 11: Jahresbilanz elektrische Energie / Endenergie und Eigenstromnutzungsanteile im Vergleich (2011 und 2012)

Die monatliche Strombilanz aus solarer Stromerzeugung und Stromverbrauch (Abbildung 13) zeigt die großen Überschüsse im Sommer (Netzeinspeisung) und die Unterdeckung (Netzbezug) in den Wintermonaten.

In der kumulierten Betrachtung in Abbildung 14 ist dargestellt, dass sich am Ende der ersten beiden Betriebsjahre der bilanzielle Überschuss (Differenz zwischen Verbrauch und Produktion) auf rd. 12.900 kWh addiert. Eine relevante Größe, die in die Betrachtung des Gebäudes im Lebenszyklus einfließt. Der jährliche Zuwachs wird auch für die folgenden Jahre von 5.000 bis 7.000 kWh/a erwartet.

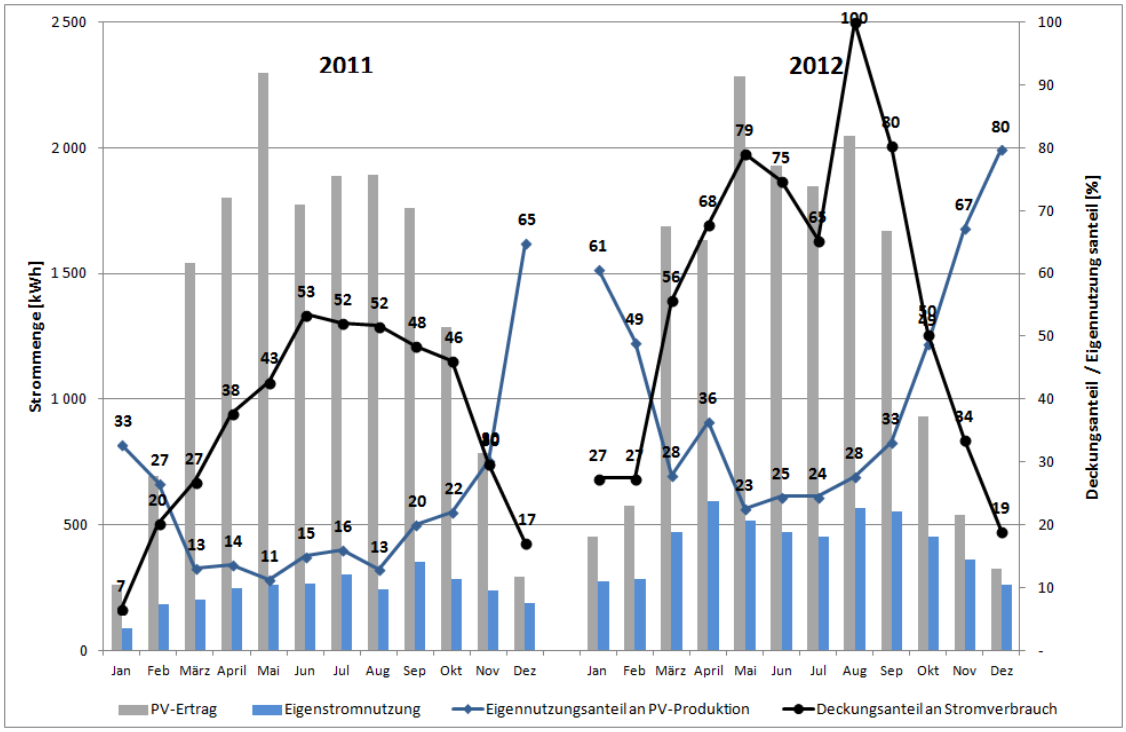


Abbildung 12: Monatliche Endenergiebilanz Strom aus PV-Produktion, Eigenstromnutzungsanteil und solarer Deckungsanteil (2011 und 2012)

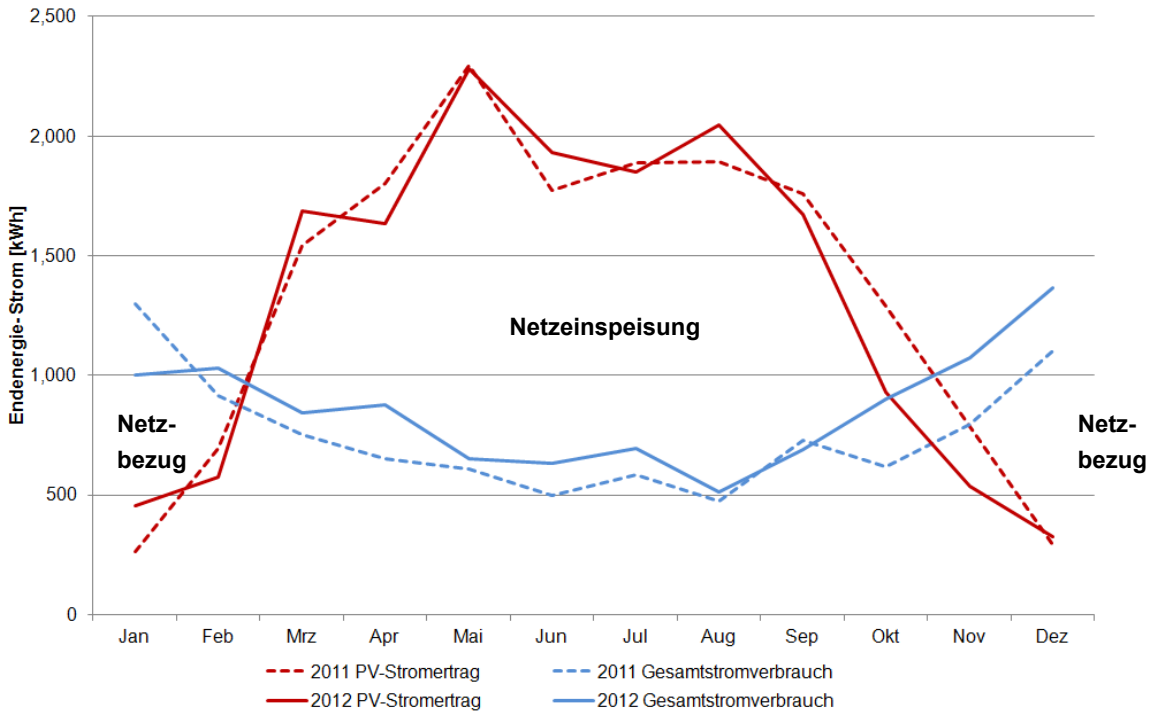


Abbildung 13: PV-Stromertrag und Gesamt-Stromverbrauch (2011 und 2012)

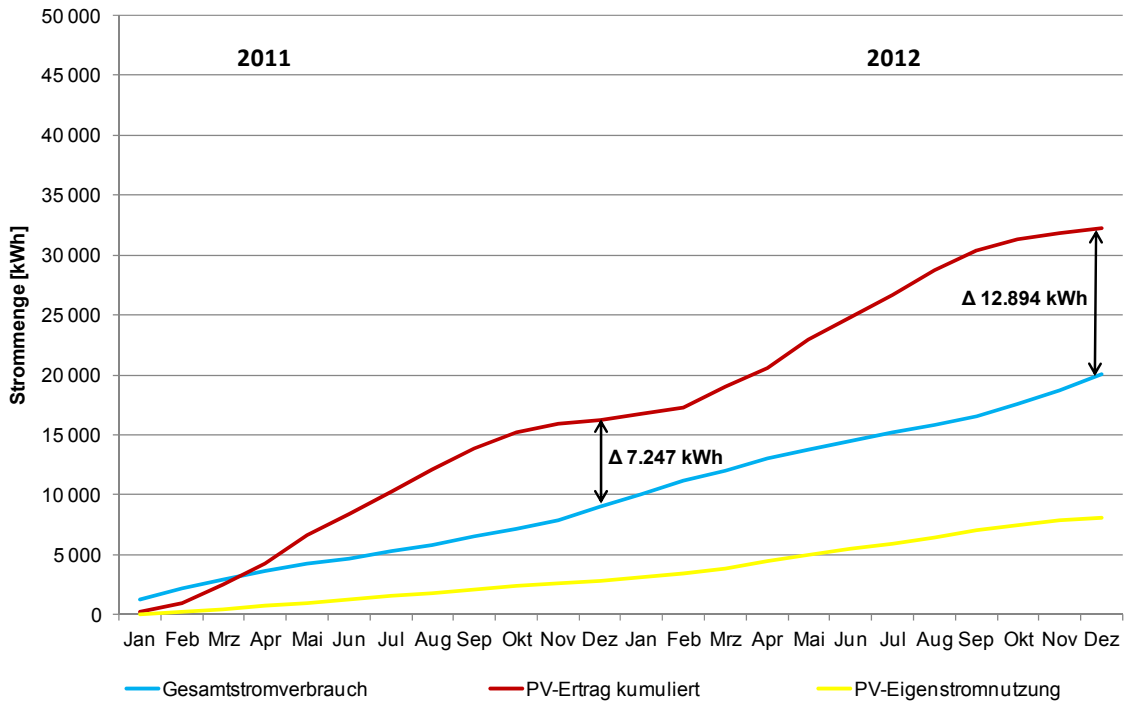


Abbildung 14: Kumulierter Gesamt Stromverbrauch, PV- Stromertrag und Eigenstromnutzung für die ersten zwei Betriebsjahre (2011 und 2012)

Die Jahresbilanz der End- und Primärenergie für die Jahre 2011 und 2012 ist in Abbildung 15 dargestellt. Für die Stromeinspeisung wird analog zu den Festlegungen des BMVBS ein Primärenergie-Faktor von 2,8 und für den Strom-Bezug ein Primärenergie-Faktor von 2,6 angesetzt. 2011 konnte ein primärenergetischer Überschuss von 21.526 kWh/a erzielt werden. Der Ertrag übersteigt damit den netzbezogenen Anteil am Verbrauch um 57,3 %. 2012 sinkt dieses Plus bedingt durch die Steigerung der Eigenstromnutzung (Abschaltung der solarthermischen Anlage) auf 14.776 kWh/a bzw. 49,5 %.

Das primäre Ziel, den Netto-Plusenergie-Standard im Kontext von End- und Primärenergie- Jahresbilanz bei gleichzeitig hoher Nutzerzufriedenheit umzusetzen, wird damit für beide Jahre nachgewiesen.

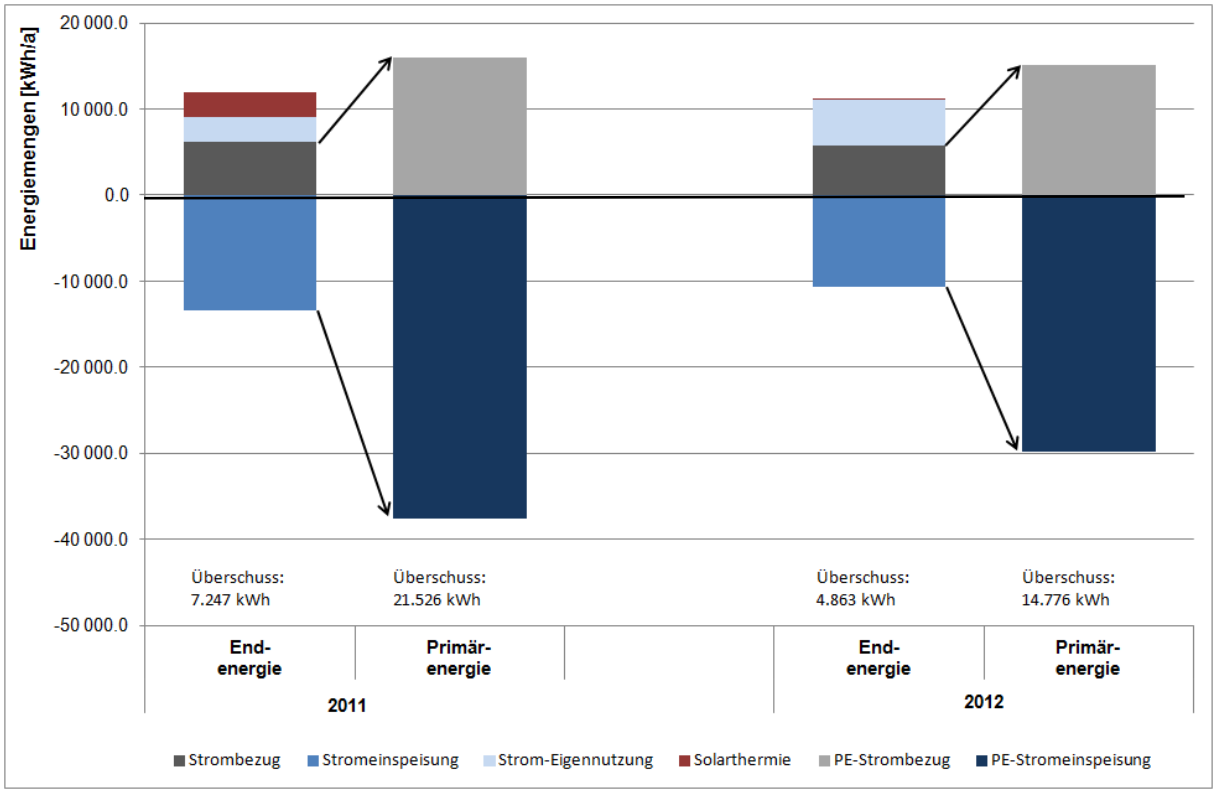


Abbildung 15: Jahresbilanz End- und Primärenergie (2011 und 2012)

5.2. Strombilanz für 2011 und 2012

Der jährliche Gesamtstromverbrauch (inkl. Mobilität und MSR) beträgt 9.027 kWh/a in 2011 und erhöhte sich 2012 auf 11.060 kWh/a. Auf die Wohnfläche bezogen ergibt sich ein Stromverbrauch von 34,7 kWh(m²$_{Wfl}$a) bzw. 42,5 kWh/(m²$_{Wfl}$a). In Abbildung 16 bis Abbildung 19 ist der Stromverbrauch nach den einzelnen Abnehmern, wie Wärmepumpe, MSR, etc. dargestellt.

	2011	2012
Gesamt-Stromverbrauch	9.027 kWh/a	11.060 kWh/a
Spez. Stromverbrauch	34,7 kWh/(m²$_{Wfl}$a)	42,5 kWh/(m²$_{Wfl}$a)

Tabelle 4: Gesamt-Stromverbrauch 2011 und 2012

Die Wärmepumpe ist der mit Abstand größte Stromverbraucher im Gebäude. Die System-Auslegung und der optimale Betrieb der Wärmepumpe (möglichst hohe Jahresarbeitszahl) sind deshalb entscheidend für den EnergiePLUS- Standard.

Der Stromverbrauch der Lüftungsanlage wurde für 2011 aufgrund eines fehlenden Zählers aus den Betriebsstunden und der Stromaufnahme für die mittlere Lüftungsstufe berechnet.

Ebenfalls wird der Stromverbrauch für das Elektroauto aus den gefahrenen Kilometern ermittelt. In 2012 wurden zur detaillierten Erfassung zusätzliche Elektrozähler nachgerüstet.

Die umfangreiche Ausstattung mit Messtechnik und die rechnerunterstützte GLT führen in diesem Bereich zu einem Stromverbrauch von über 1.000 kWh/a, die im Wesentlichen dem wissenschaftlichen Begleitprogramm geschuldet sind.

Unter dem Aspekt Sonstiges wird der Stromverbrauch aller Geräte aufgezeichnet, die nicht separat erfasst werden können, wie Kleinverbraucher (Staubsauger, Kaffeemaschine,etc.), IKT, Computer, Drucker sowie sämtlicher Stromverbrauch über Steckdosen.

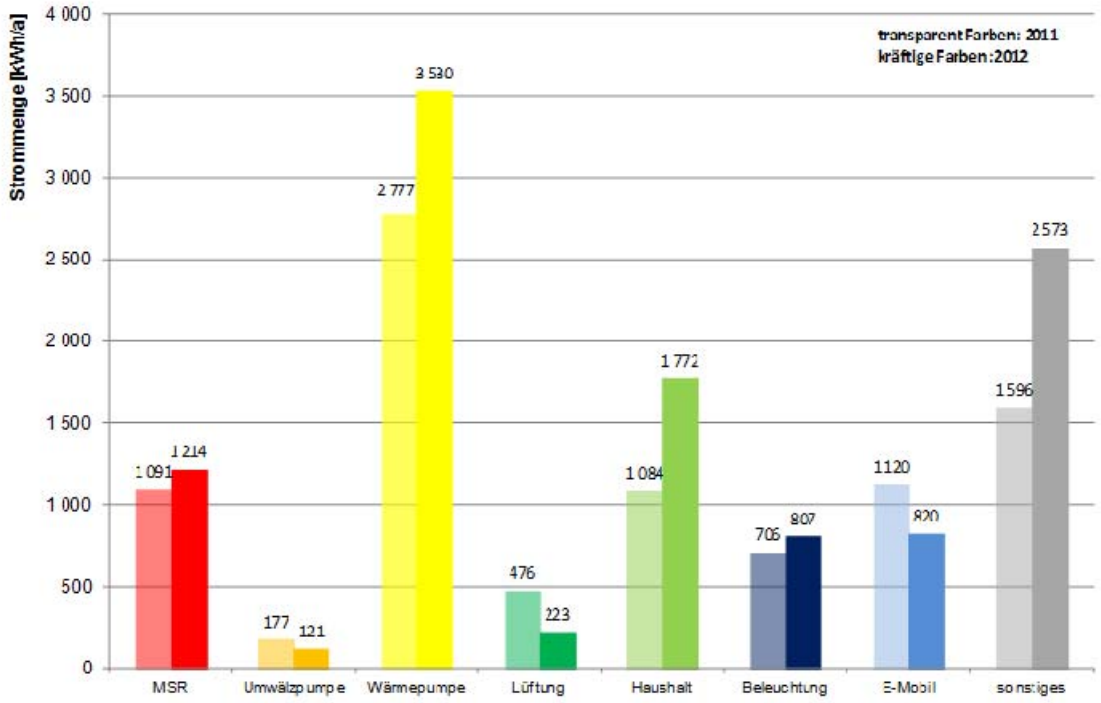


Abbildung 16: Jahres-Stromverbrauch nach Kategorien (2011 und 2012)

In Abbildung 17 sind der monatliche Stromverbrauch nach den festgelegten Kategorien sowie die mittlere monatliche Außentemperatur für die beiden ersten Betriebsjahre dargestellt. Im März 2012 wurde zur Steigerung der direkten Eigenstromnutzung aus der PV-Anlage die thermische Solaranlage außer Betrieb genommen. In der Folge steigen der Stromverbrauch der Wärmepumpe und damit der Jahres-Gesamtstromverbrauch, da die Wärmepumpe nun die gesamte Wärmebereitstellung übernimmt.
Seit Mai 2012 kann durch Nachrüstung eines Zählers auch der Verbrauch des Elektroautos separat erfasst werden. In den Monaten bis zur Installation und im Vorjahr wird der Verbrauch für die Elektromobilität unter Sonstiges erfasst (gilt nicht für Abbildung 16).

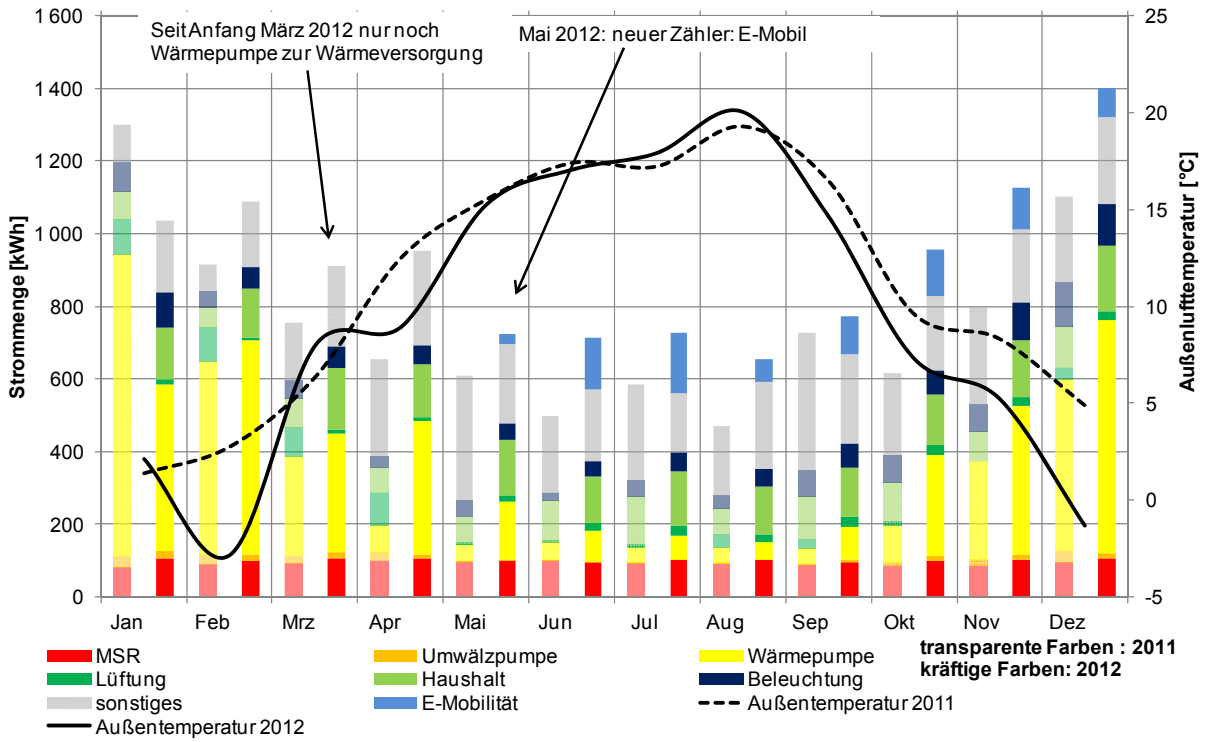


Abbildung 17: Monatlicher Stromverbrauch und Außen-Lufttemperatur (2011 und 2012)

Der Vergleich aus dem in der Planungsphase berechneten Strombedarf für die individuelle Nutzung (Haushaltsgeräte, Beleuchtung und Sonstiges) von 17 kWh/(m²$_{Wfl}$ a) und für den Gebäudebetrieb (MSR, Umwälzpumpen, Wärmepumpe und Lüftung) von 20 kWh/(m²$_{Wfl}$ a) mit den in den zwei Betriebsjahren gemessenen Verbrauchswerten zeigt, dass die Kalkulation bzw. Annahmen der Realität im Wesentlichen entsprechen. Für die Haushaltsgeräte werden 13 bis 20 kWh/(m²$_{Wfl}$ a) gemessen, auf den Gebäudebetrieb entfallen 17,4 bis 20 kWh/(m²$_{Wfl}$ a), siehe Abbildung 18. Der jeweilige prozentuale Anteil am Gesamtstromverbrauch ist in Abbildung 19 dargestellt. Diese zeigt, dass die Stromproduktion im Jahre 2011 den direkt nutzbaren Anteil am Stromverbrauch um 82,5 % und im Jahr 2012 um 67 % übersteigt.

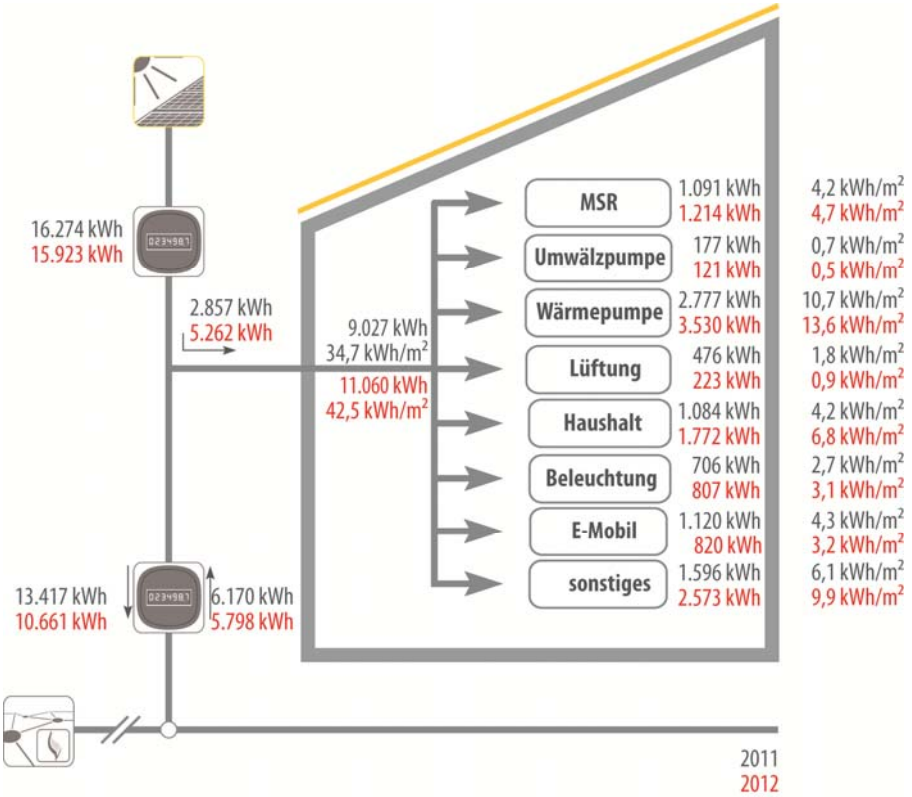


Abbildung 18: Stromverbrauch nach Kategorien in 2011 und 2012 (absolut und auf die Wohnfläche bezogen)

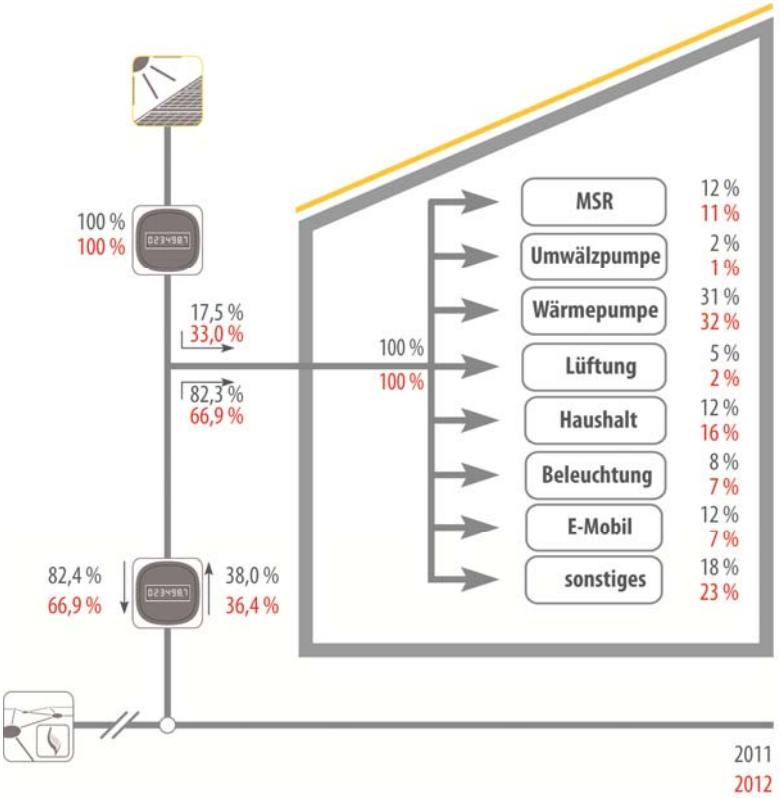


Abbildung 19: Stromverbrauch – prozentuale Verteilung (2011 und 2012)

5.3. Wärmebilanz für 2011 und 2012

Abbildung 20 zeigt die Anteile von Wärmebereitstellung und Wärmeverbrauch für das Gebäude, aufgeschlüsselt nach Wärmeerzeuger (Wärmepumpe und Solarthermie-Anlage), nach Wärmeverteilung (Pufferspeicher/ Verteilung) und nach Wärmeübergabe (Heizung und Trinkwarmwasser). Der im Pufferspeicher integrierte elektr. Heizstab wurde kurz nach Inbetriebnahme abgeklemmt, so dass eine direkte Stromheizung nicht erfolgen kann.

Insgesamt werden im Jahr 2011 11.202 kWh/a Wärme und im Jahr 2012 13.918 kWh/a Wärme erzeugt. Der spezifische Wert für die Erzeugung liegt bei 43,1 kWh/(m²Wfla) bzw. 53,5 kWh/(m²Wfla). Die Wärmebereitstellung erfolgte 2011 zu 73 % durch die Wärmepumpe und zu 27 % durch die thermische Solaranlage. Durch die Abdeckung der Solarkollektoren im März 2012 reduziert sich der solarthermische Anteil auf rd. 1 %, 99 % werden über die Wärmepumpe gedeckt. Ein Anteil von rd. 10 % (2011) bzw. 7 % (2012) entsprechend 1.089 kWh/a (2011) bzw. 1.024 kWh/a (2012) der Wärmebereistellung entfällt auf die Trinkwarmwasserbereitung. Zur Raumheizung werden 78 % (8.753 kWh/a) in 2011 und 81 % (11.167 kWh/a) in 2012 benötigt. Die Verluste durch Speicherung und Zirkulationsverluste machen in beiden Betriebsjahren rd. 12% aus (Abbildung 20, Abbildung 21 und

Tabelle 5). Bezogen auf die Wohnfläche ergibt sich ein Heizwärmeverbrauch von 33,7 bzw. 43 kWh/(m²Wfla) und ein Wärmeverbrauch von 4,2 bzw. 3,9 kWh/(m²Wfl a) für die Trinkwarmwasserbereitung (ohne Speicher- und Zirkulationsverluste).

Der tatsächliche Wärmeverbrauch für Heizung und Trinkwarmwasser liegt im ersten Betriebsjahr mit 37,9 kWh/m²Wfl a (witterungsbereinigt 44,0 kWh/m²$_{Wfl}$ a) unterhalb des kalkulierten Bedarfs von 65,9 kWh/(m²$_{Wfl}$ a). Im zweiten Betriebsjahr 2012 liegen die Werte mit 46,9 kWh/m²$_{Wfl}$ a (witterungsbereinigt 51,1 kWh/m²$_{Wfl}$ a) ebenfalls unter dem kalkulierten Bedarf. Die Erhöhung von rund 7 kWh/(m²$_{Wfl}$ a) ist im Wesentlichen auf die Änderungen der WP-Regelung in 2012 zurück zu führen (siehe Kapitel 5.4).

	2011		2012	
	[kWh/a]	[%]	[kWh/a]	[%]
Wärmeerzeugung				
	11.202		13.918	
	43,1 kWh/(m²$_{Wfl}$ a)		53,5 kWh/(m²$_{Wfl}$ a)	
Wärmebereitstellung				
Wärmepumpe	8.257	73	13.781	99
Solarthermie	2.945	27	137	1
Wärmeverteilung/ Wärmespeicherung				
Verteilverluste	1.360	12	1.727	12
Nutzwärme				
Trinkwarmwasser	1.089	10	1.024	7
Heizung	8.753	78	11.167	81

Tabelle 5: Verteilung der Wärmemengen in 2011 und 2012 (bezogen auf Wärmeerzeugung)

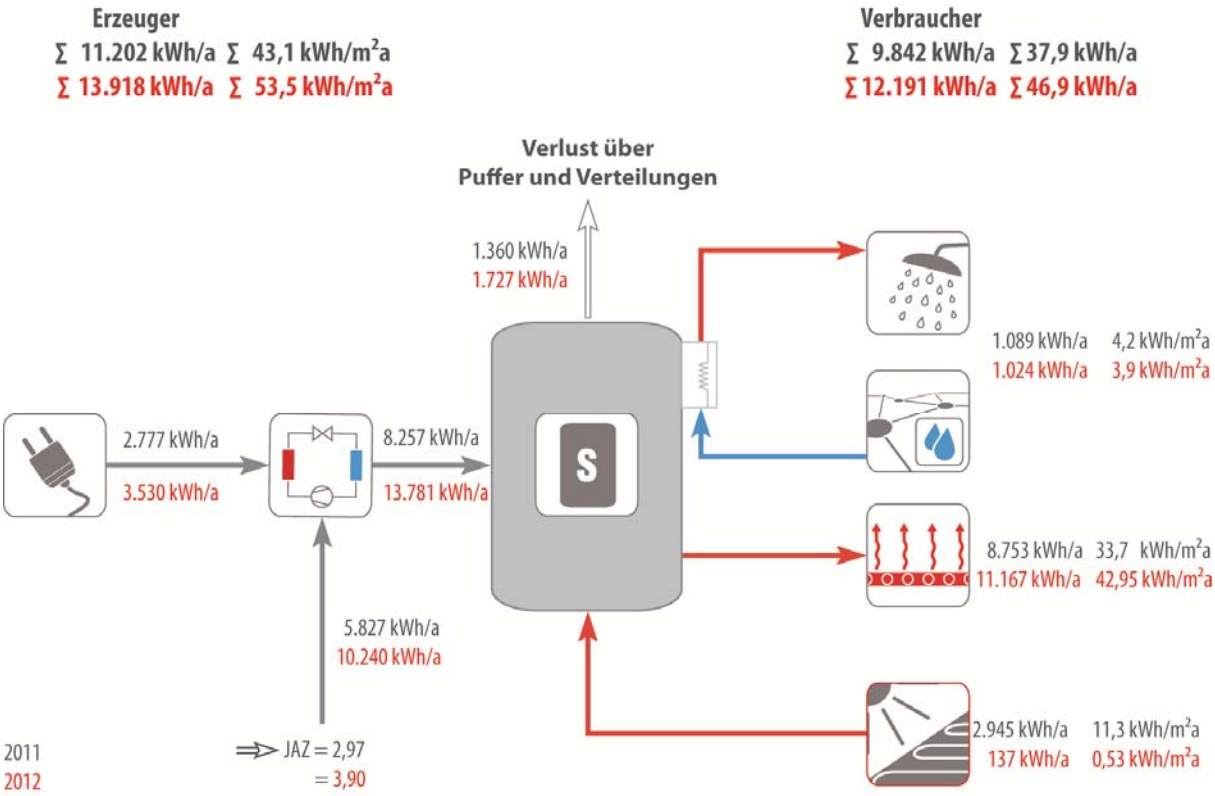


Abbildung 20: Jährliche Wärmemengen aufgeteilt in Erzeugung, Verteilung und Abgabe in 2011 und 2012

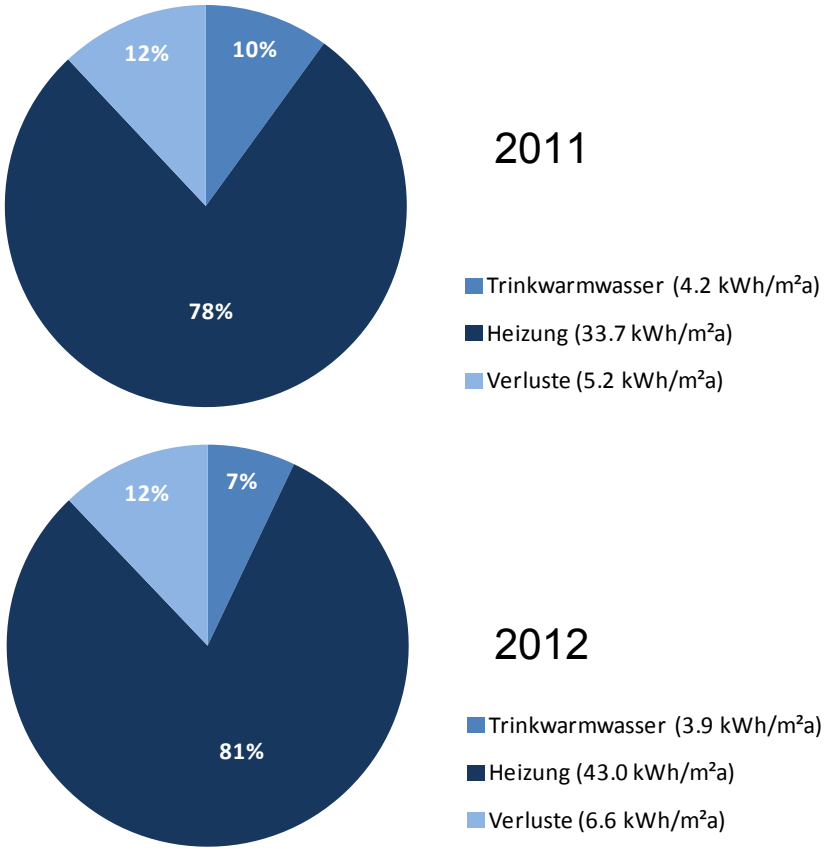


Abbildung 21: Aufteilung des Jahres-Heizenergieverbrauchs (2011 und 2012)

5.4. Wärmepumpe

Als Ergebnis des Monitorings der ersten Betriebsmonate wurde eine Arbeitszahl der Wärmepumpe von unter 3 ermittelt. In Zusammenarbeit mit der Fa. REHAU konnte im November 2011 eine erhebliche Optimierung an der Einbindung und Regelung der Wärmepumpe erfolgen.

Folgende Änderungen wurden durchgeführt:

- Anhebung der Mindest-Stillstandszeit der Wärmepumpe von 10 min. auf 20 min., so dass ein Takten und kurze direkt aufeinanderfolgende Wärmepumpenlaufzeiten vermieden werden.
- Erhöhung der Hysterese der Warmwasserbereitung von 2 K auf 4 K, Vermeidung von Takten der Wärmepumpe
- Anpassung der Heizkurve
- Anpassung der Heizgrenztemperatur

Die Veränderung der gemessenen wöchentlichen Arbeitszahl der Wärmepumpe von unter 3 (2011) auf bis zu 4,7 (2012) ist in Abbildung 22 dargestellt. Während der Sommermonate wird die Wärmepumpe vorrangig zur Warmwasserbereitung genutzt. Die Wärmepumpe läuft in dieser Zeit nur für kurze Betriebszeiten (insbesondere in 2011 in Kombination mit der Solarthermie) und zudem auf einem relativ hohen Temperaturniveau. Dieser Betriebszustand ist für die Wärmepumpe energetisch ineffizient und es können Arbeitszahlen < 2,0 daraus resultieren.

Arbeitszahlen kleiner 1 sind dem Standbybetrieb sowie der Aufschaltung der Regenwasserumwälzpumpe auf den Elektrozähler der Wärmepumpe geschuldet. Eine Anpassung der Zählerzuordnung erfolgt Anfang Januar 2012. Bei Datenausfällen wird die Arbeitszahl formal mit Null belegt.

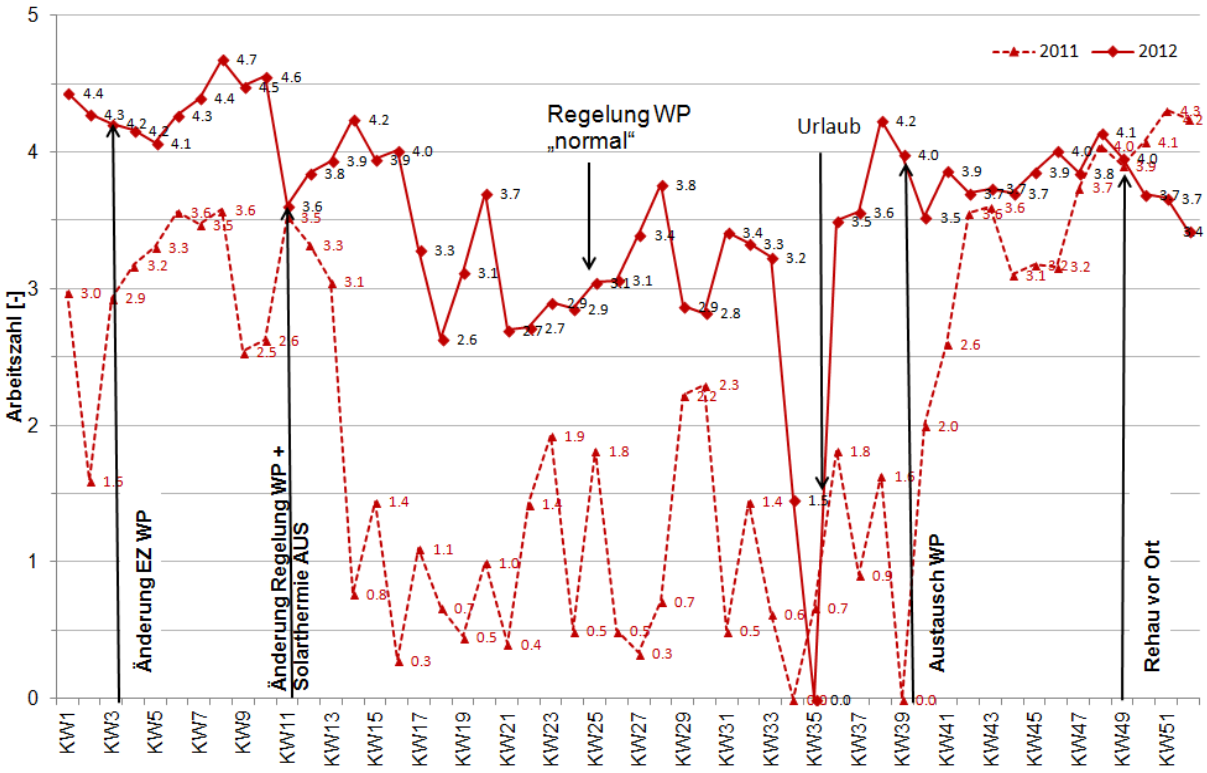


Abbildung 22: Wöchentliche Arbeitszahl der Wärmepumpe seit Januar 2011

Um möglichst viel Strom von der PV-Anlage im Haus zu nutzen (Erhöhung der direkten Eigenstromnutzung), wird durch die Implementierung neuer Regelstrategien von Mitte März bis Juni 2012 sowie seit November 2012 die jeweilige Laufzeit der Wärmepumpe erhöht.

Zum Betrieb der Wärmepumpe in Kombination mit der PV-Anlage wurden folgende Regelstrategien erprobt:

Regelung März bis Juni 2012:

- Erhöhung der Temperatur (>50 °C) im Pufferspeicher zur Erhöhung der sensiblen Speicherkapazität für die Zeit ohne solaren Stromertrag.
- Erhöhung des Sollwerts der Innenraumtemperatur um bis zu 2 K und somit Verlängerung der Betriebszeit der Wärmepumpe.
  Die Wärme wird in den raumumgebenden massiven Bauteilen gespeichert und dämpft damit den Temperaturabfall in den Abend- und Nachtstunden, dies verzögert den Betrieb der Wärmepumpe mit Netzstrom. Der Nutzerkomfort soll durch die geplanten Maßnahmen nicht eingeschränkt werden.

Regelung seit November 2012:

- Regelung aus der ersten Testphase für Pufferspeicher beibehalten (siehe oben) und zusätzlich
- Anhebung der Heizkurve der Fußbodenheizung sowie Anhebung der Oberflächentemperatur des Fußbodens um bis zu 2 K.

Abbildung 23 zeigt, dass von März bis Juni 2012 der Stromverbrauch der Wärmepumpe während der ersten Regelstrategieänderung zu 60 % bis 90 % über Eigenstromproduktion gedeckt wird. Die Umsetzung der zweiten Regeländerung hat nicht zu dem gewünschten Erfolg geführt, da im September 2012 eine neue Wärmepumpe installiert und diese nicht vollständig auf die alten Konfigurationen programmiert werden konnte. Die Wärmepumpe läuft entgegen der Vorgaben auch in den Abend- bzw. Morgenstunden, wo eigentlich eine Sperre implementiert sein sollte.

Bewertung: Bei „richtiger“ Einbindung der Wärmepumpe und der entsprechenden Regelstrategie ist ein direkt solarelektrischer Deckungsanteil von deutlich über 50 % möglich. In den Wintermonaten wird ein solarer Deckungsanteil von 10 bis 15 % erreicht.
In den Sommermonaten (Juli bis September) wurde die Wärmepumpenregelung wieder auf den „normalen“ Betrieb umgestellt. In dieser Zeit läuft die Wärmepumpe nur zur Erwärmung des Trinkwarmwassers. Der solarelektrische Deckungsanteil liegt daher nur bei rund 45 %, da die Wärmepumpe in den Morgen- und Abendstunden in Betrieb geht.

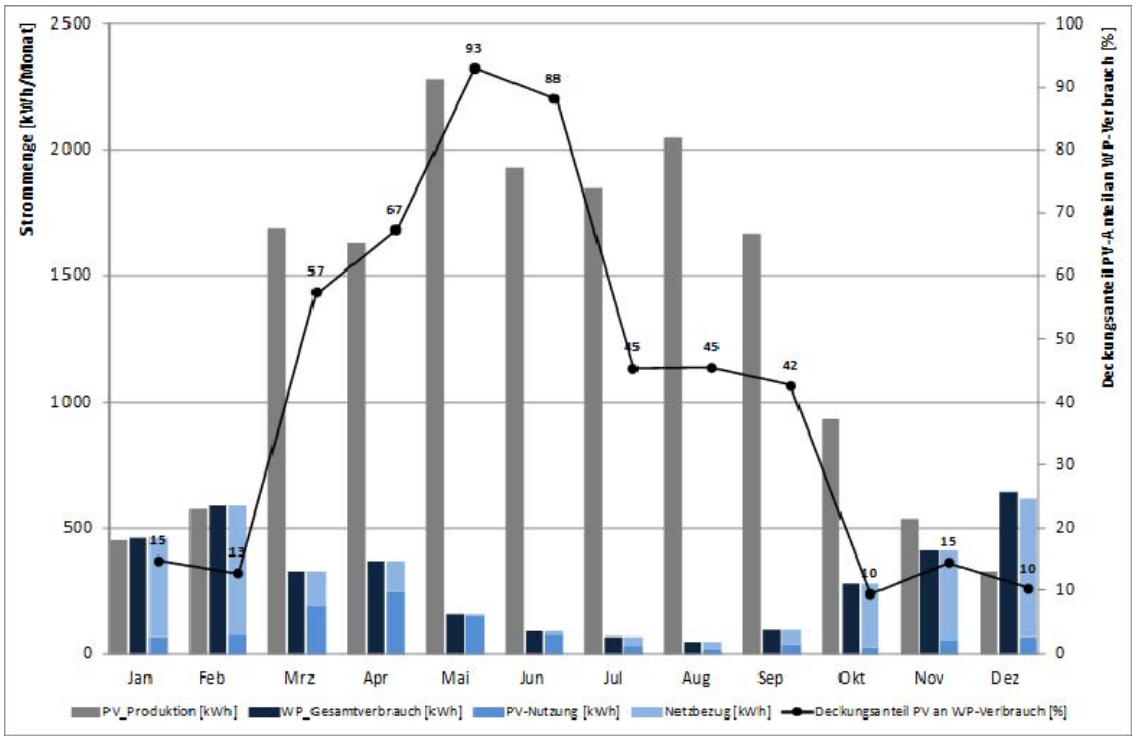


Abbildung 23: Deckungsanteil des Strombedarfs der Wärmepumpe durch die PV-Anlage und Einfluss bzw. Ergebnisse aus der Änderung der Wärmepumpen-Regelung, 2012

5.5. PV-Anlage

Die PV- Anlage mit einer Spitzenleistung von ca. 15 kWp besteht aus 90 PV-Modulen (170 Watt, poly-kristalline Si -Zellen) und umfasst eine Fläche von rd. 115 m^2 (Tabelle 6).

	Maße	Fläche
mit Rahmen	90 Module x 0,808 m x 1,58 m	114,9 m²
ohne Rahmen	90 Module x 1,194 m²	107,5 m²

Tabelle 6: Modulfläche / PV- Anlage

Über einen Dreiphasen- Wechselrichter (Sunny Tripower 15000 TL, 15,3 kW) wird der von der PV- Anlage gelieferte Gleichstrom in Wechselstrom umgewandelt und entweder direkt im Gebäude genutzt, in einer Batterie zwischen gespeichert oder ins öffentliche Stromnetz eingespeist.

Der System-Wirkungsgrad der PV-Anlage lag 2011 in einem Zeitraum von Mai bis Dezember bei 12,1 % (mit Rahmenfläche) und bei 12,9 % (ohne Rahmenfläche). 2012 wurde sogar ein etwas höherer Anlagen-Wirkungsgrad 12,6 % bzw. 13,5 % erreicht. Die monatlichen Strom-

erträge und Wirkungsgrade der PV- Anlage zeigt Abbildung 24. Für den November 2011 konnte aufgrund eines Datenausfalls kein Wirkungsgrad berechnet werden. Im Mittel lag der System-Wirkungsgrad der PV-Anlage in den ersten beiden Betriebsjahren bei rd. 13,2 % (Tabelle 7).

	2011 (Mai bis Dezember)	2012 (Mai bis Dezember)
Mit Rahmenfläche	12,1 %	12,6 %
Ohne Rahmenfläche	12,9 %	13,5 %

Tabelle 7: Gesamt-Wirkungsgrad der PV-Anlage

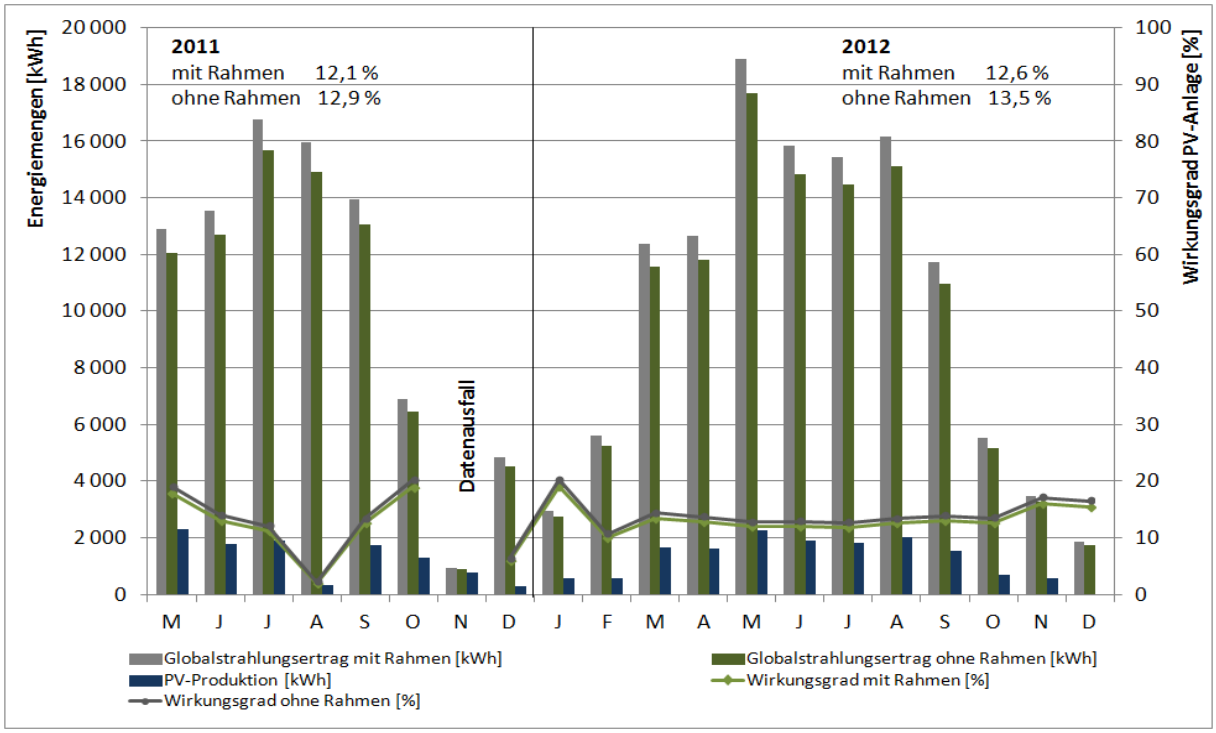


Abbildung 24: System-Wirkungsgrad PV-Anlage 2011 und 2012

5.6. Stromspeicher

Zur Erhöhung der solaren Eigenstromnutzung sind zwei Blei-Gel Batterien eingesetzt, die wechselstromseitig eingebunden sind. Im Vergleich zu Li-Ionen Batterien sind zwar die Entladetiefe und die Anzahl der Ladezyklen geringer, trotzdem sind die Blei-Batterien bei den heutigen Investitionskosten (rd. 300 €/kWh statt ca. 900 €/kWh) wirtschaftlicher.

Im September 2011 wurde ein Batteriesystem (Systemhersteller: Solarworld, Batterien: Hoppecke, Wechselrichter: SMA) mit einer Speicherkapazität von 7 kWh und max. 2 kW

Leistung installiert. Ende Dezember 2011 wurde ein weiteres Batteriesystem (Batterien: Hoppecke, Wechselrichter: SMA) mit einer Speicherkapazität von 20 kWh und max. 8 kW Entzugsleistung ergänzt. Die größere Batterie wurde vom lokalen Energieversorger (EnBW) beigestellt. Sie dient der Speicherung sowohl von PV- als auch von Netzstrom. Mit der Anbindung der Batterie an das öffentliche Stromnetz und der Möglichkeit zur Ein- und Ausspeicherung wird der Akkumulator zu einem aktiven Element für das künftige Smart Grid. Neben diesen globalen Potentialen ist durch die Einbindung der Batterien im Gebäude ein elektrischer Speicher vorhanden, der es ermöglicht, den über die PV-Anlage erzeugten Strom in den Nachtstunden zu nutzen und damit den Anteil der Eigenstromnutzung zu steigern.

Die kleinere Batterie wird i.d.R. je nach Strahlungsangebot tagsüber ganz oder teilweise beladen und in der Nacht entladen, es liegt somit jeweils nur ein Ladezyklus pro Tag vor. Bei einer Entladetiefe von bis zu 40 % steht eine nutzbare Speicherkapazität von rd. 4,2 kWh zur Verfügung. Über die kleine Batterie wird die künstliche Beleuchtung und über die größere Batterie (ca. 12 kWh effektive Speicherkapazität) die restlichen Verbraucher versorgt. Der monatliche Deckungsanteil der Batterien am Gesamt-Stromverbrauch variierte 2012 von 7 bis 36,5 % (Abbildung 25, Tabelle 8).

In Abbildung 26 ist für den Zeitraum 07. – 09. August 2012 beispielhaft der Stromlastgang mit den Anteilen Verbrauch, Netzbezug und Bereitstellung aus PV und Batterien dargestellt. Gelb zeigt die Beladung der elektrischen Speicher, die im dargestellten Zeitraum mit Beginn der solaren Einstrahlung erfolgt. Die Beladeleistung liegt bei ca. 4 kW, sodass nach 4 Stunden (16 kWh entspricht der effektiven Speicherkapazität beider Batterien) eine Vollladung erreicht ist. Parallel zur Beladung der Batterien erfolgt je nach PV-Leistung eine Eigenstromnutzung (grün) und/oder eine Netzeinspeisung (blau). In den Abend- und Nachtstunden erfolgt die Entladung. Der Strombedarf für die künstliche Beleuchtung kann zu bis 80 % aus der Batterie gedeckt werden.

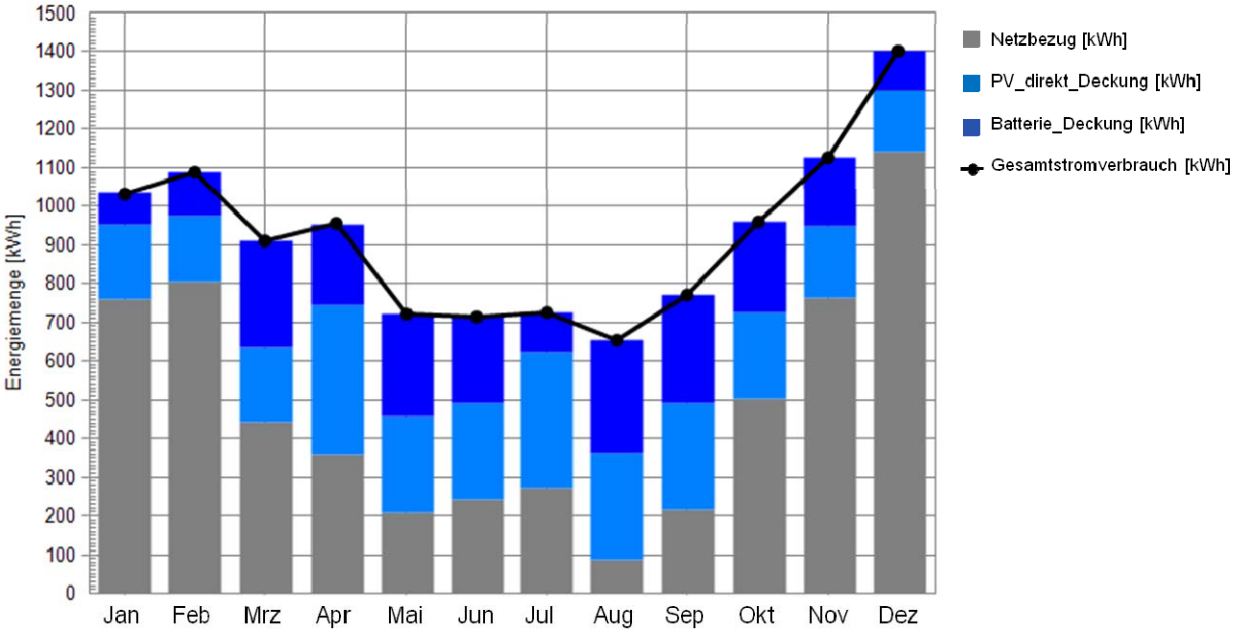


Abbildung 25: Deckungsanteile Stromverbrauch durch PV, Batterie und Netzbezug 2012

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Anteil Batterie	8,0	10,5	30,2	21,8	37,0	31,2	13,9	44,3	36,5	24,1	15,8	7,0
Anteil direkte PV-Nutzung	18,5	15,5	21,4	40,7	34,4	35,1	48,5	42,3	35,4	23,3	16,3	11,5
Netzbezug	73,5	74,0	48,4	37,5	28,6	33,7	37,6	13,3	28,1	52,6	67,9	81,4

Tabelle 8: Deckungsanteile Stromverbrauch durch PV, Batterie und Netzbezug 2012

Durch die beiden Batterien wird der solare Eigenstromanteil erhöht (siehe Abbildung 27). Verglichen wird die Stromproduktion und der Eigenstromnutzungsanteil in den Monaten Januar und Februar der Jahre 2011 und 2012. Die Steigerung kann in diesem Zeitraum auf die Integration der Batterien und die damit verbundene Speicherkapazität (20 kWh + 7 kWh) zurückgeführt werden, da weitergehende Optimierungen und Änderungen an Regelparametern erst ab März 2012 folgen. Der Anteil der Eigenstromnutzung an der PV-Produktion konnte von 28 % im Jahr 2011 auf 55 % in 2012 gesteigert werden. Der Anteil fällt im Sommer aufgrund der höheren Strom-Produktion bei deutlich geringerem Stromverbrauch geringer aus.

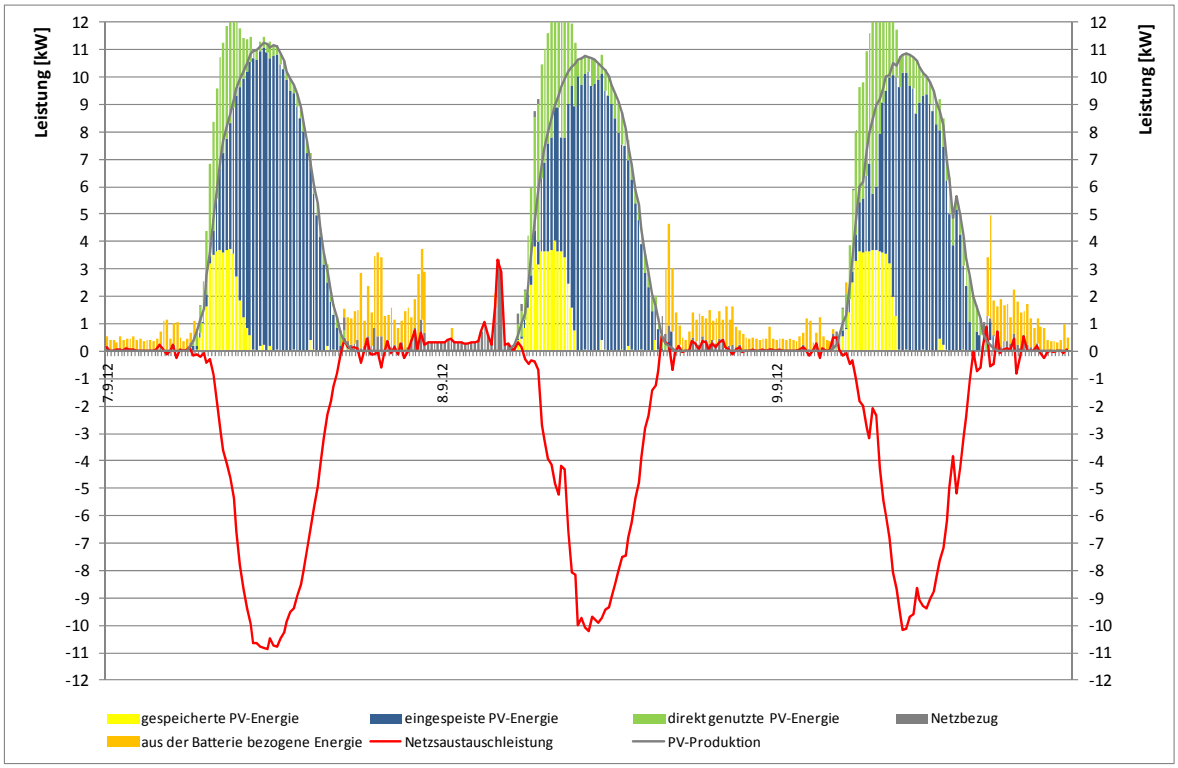


Abbildung 26: Stromlastgang Zeitraum vom 07.- 09.08.2012 aufgeteilt in Netzaustauschleistung, PV-Produktion und -einspeisung, Batterie Be- und -entladung sowie Eigenstromnutzung

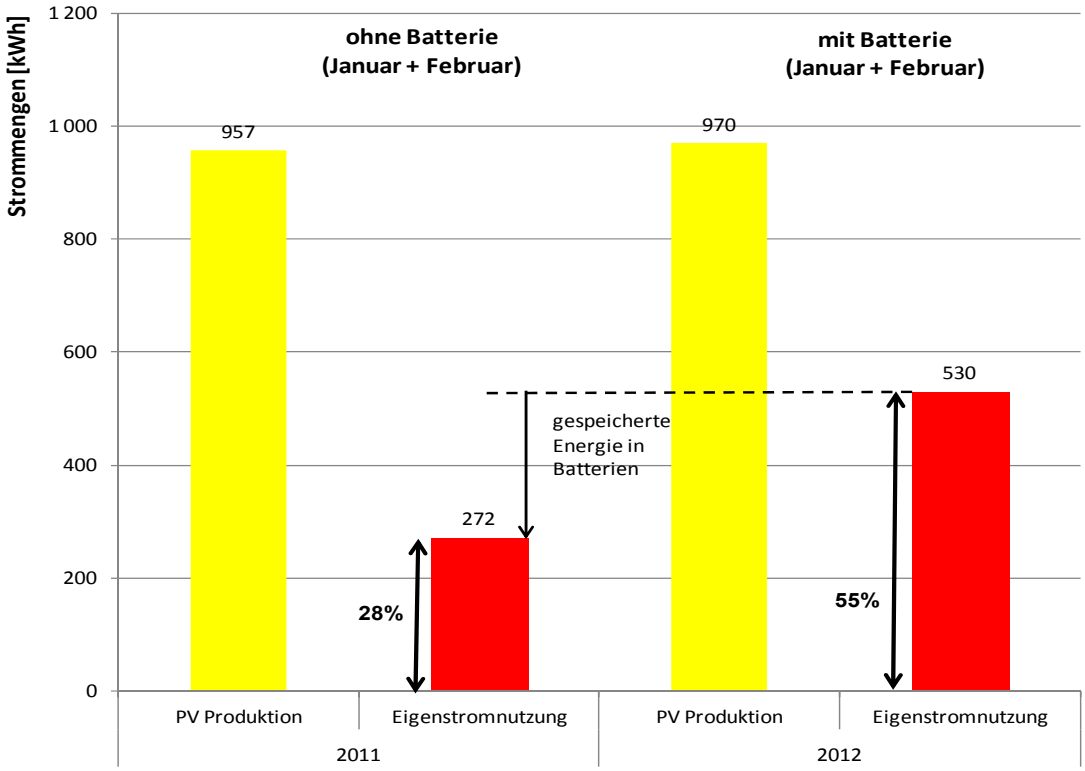


Abbildung 27: Einfluss der Batterie und Steigerung des Eigenstromnutzungsanteils, Januar und Februar 2011 und 2012 im Vergleich

Durch Nachrüstung von Messtechnik sind seit März 2012 auswertbare Daten zur Performance der Batterien verfügbar. Der monatliche Wirkungsgrad der 7 kWh-Batterie liegt in dem Zeitraum von März bis Dezember 2012 zwischen 55 bis 71 % (siehe Abbildung 28), während die größere Batterie (20 kWh) etwas höhere Wirkungsgrade von 53 bis 78 % erreicht. Der Gesamtwirkungsgrad aus PV-Anlage und Stromspeicherung liegt damit bei nur 7 bis 10 %.

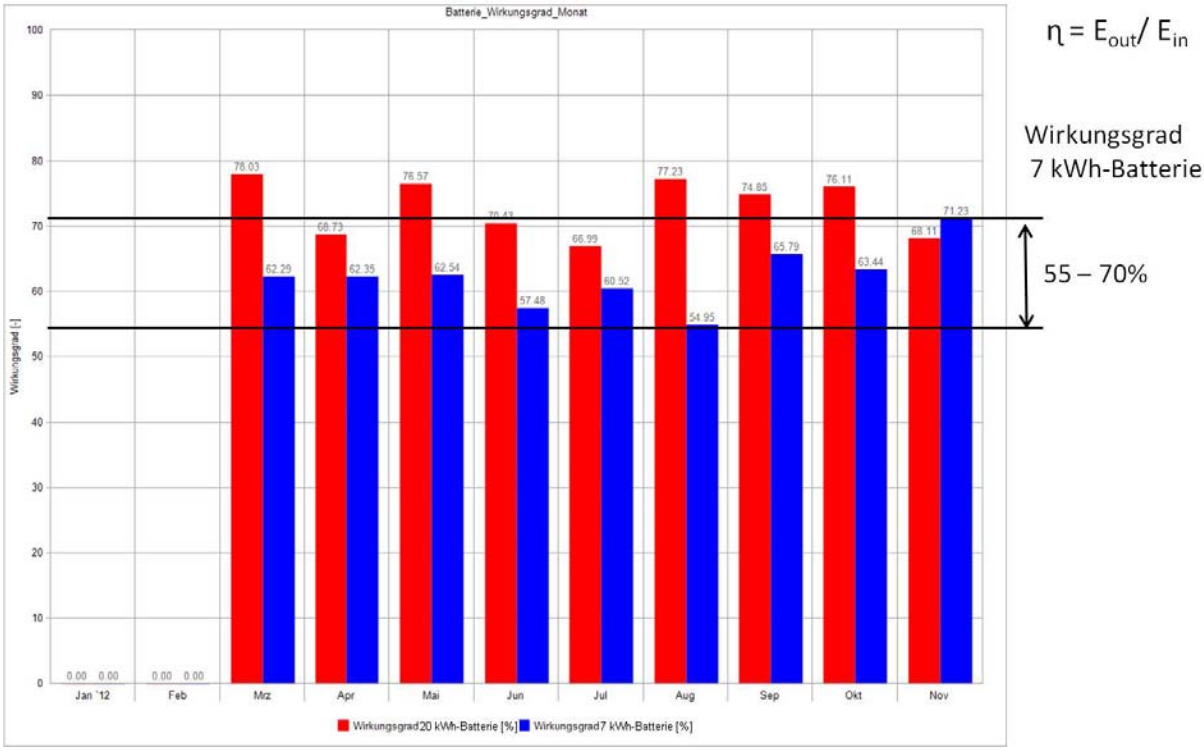


Abbildung 28: Monatliche Wirkungsgrade der Batterien

6. FAZIT UND AUSBLICK

Das primäre Ziel, den Netto-Plusenergie-Standard bei gleichzeitig hoher Nutzerzufriedenheit zu erreichen, wird in den ersten zwei Betriebsjahren voll erfüllt.

Der solare Deckungsanteil der PV- Anlage am Gesamtstromverbrauch beträgt 2011 rd. 32 % und wurde 2012 auf 48 % gesteigert. Die direkte solare Eigenstromnutzung betrug in 2011 18 % und konnte 2012 auf 33 % der erzeugten Solarstrommenge erhöht werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass noch weiteres Potential zur Steigerung der Eigenstromnutzung vorhanden ist. Dieses soll in den Folgejahren realisiert werden. Um das gesamte System weiter zu optimieren soll in einem Anschlussprojekt eine aktive Funktionsbeschreibung zur Spezifikation und Überwachung des Gebäudebetriebs entwickelt werden.

Die Steigerung des Eigenstromanteils im Gebäude soll durch folgende Maßnahmen umgesetzt werden:

- Ausbau der thermischen Speichermassen (Pufferspeichervergrößerung)
- Optimierte Nutzung der vorhanden thermischen Gebäudemasse (aktive Funktionsbeschreibung und optimierte Regelstrategien)
- On-Line Monitoring zur Erfolgskontrolle und Betriebsoptimierung

Des Weiteren sollen durch Komfortmessungen das persönliche Empfinden der Bewohner bezüglich Raumtemperatur, Raumfeuchte, etc. analysiert werden und dazu beitragen die installierten Lüftungsgeräte und die Heizung nutzerspezifisch zu verändern, um dadurch die Behaglichkeit der Bewohner zu steigern.

Weitere Punkte im Anschlussprojekt sollen zum Einen eine Kostenanalyse des Netto-Plusenergie-Standards im Vergleich zum EnEV Standard, Definitionen zu optimierten Regelstrategien zur Ableitung von Standardvorgaben, sowie detaillierte Systemanalysen zu Technik und Ausstattung sein.

Auf einer Internetplattform soll den Nutzern und den Interessierten Energieeffizienz und Komfort visuell dargestellt werden.

7. VERÖFFENTLICHUNGEN UND VORTRÄGE

Ausgabe	Titel	Seitenzahl	Autor	Zeitschrift	Verlag
1/2011	Das Kraftwerk - Netto-Plusenergie-Wohngebäude mit E-Mobilität	6	Kreykenbohm (DBZ)	DBZ	Bauverlag BV GmbH DBZ (Deutsche Bauzeitschrift)
3/4 2011	Das Gebäude als Kraftwerk – Netto-Plusenergie -Gebäude mit Elektromobilität	6	Fisch (IGS)	PraxisCheck	WEKA MEDIA GmbH & Co. KG
05/2011	Netto-Plusenergie-Gebäude als Smart-Grid-Komponente Wohnen im Kraftwerk	5	Siegele (GEB)	GEB	Alfons W. Gentner Verlag GmbH & Co. KG
2011	Das Gebäude als Kraftwerk – Netto-Plusgebäude mit E-Mobilität	10	Fisch (IGS)	Jahrbuch Energieeffizienz	VME Verlag und Medienservice Energie
01-2012	Gebäude der Zukunft Teil II des Vergleichs – Netto-Plusenergie-Gebäude mit Elektromobilität	2	Fisch (IGS)	Sonnenenergie	Präsidium der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS)
01_2012	Plusenergie-Gebäude mit E-Mobilität	8	Fisch (IGS)	tab	Bauverlag BV GmbH Redaktion tab
02.12	EnergiePlus - Wohngebäude mit Eigenstromnutzung und Elektromobilität	4	Fisch , Stähr (IGS)	ηgreen	succidia AG
06/2012	EnergiePlus-Wohngebäude Erste Ergebnisse nach einem Jahr Betrieb	4	Fisch, Bockelmann, Rosebrock, Stähr, Wilken (IGS)	DBZ	Bauverlag BV GmbH DBZ (Deutsche Bauzeitschrift)
3/4 2012	Monitoring . Ein Statusbericht	5	Bockelmann, Stähr, Wilken (IGS)	Praxischeck	WEKA MEDIA GmbH & Co. KG

Tabelle 9: Veröffentlichungen

Datum	Veranstal-tung	Titel	Vortragender	Stadt
29-30.06 2011	Consens	EnergiePlus – Smart Buildings für Smart Grid	Fisch (IGS)	Stuttgart
28.08-02.09 2011	ISES	Buildings as Power Plants – Plus-Energy Buildings	Fisch (IGS)	Kassel
08-09-11 2011	BauhausSolar	Das Gebäude als Kraftwerk – Netto-Plusenergiegebäude mit Elektromo-bilität	Stähr (IGS)	Erfurt
16-18.05 2012	Innostock	Smart buildings as a power plant – Plus energy house with energy charge management and e-mobility	Stähr (IGS)	Lleida, Spanien
12-14.11 2012	IRES	EnergyPLUS – Concept with future	Stähr (IGS)	Berlin

Tabelle 10: Vorträge (Auswahl)

Zudem ist das Gebäude Teil des Netzwerks Effizienzhaus Plus und wird im Programm des BMVBS publiziert.

8. ANHANG

Abbildung 29: Gebäudeansicht (Südost), (Foto: Erich Spahn, Amberg)

Objekt	**Netto-Plusenergie-Gebäude**
Standort	Leonberg-Warmbronn
Bauherr	Univ. Prof. Dr. M. Norbert Fisch, Karin Fisch
Architekt und Innenarchitekt	Berschneider + Berschneider, Pilsach bei Neumarkt i.d. OPf., www.berschneider.com
Energiedesign	EGSplan, Stuttgart, Univ. Prof. Dr. M. Norbert Fisch
Monitoring	IGS, TU Braunschweig, www.tu-bs.de/igs
Technische Gebäudeausrüstung	EGS-Plan, Stuttgart| Energydesign Stuttgart, www.stz-egs.de
Tragwerksplanung	PG Kuhn, Sindelfingen
Bauleitung	W. Munz, Warmbronn
Rohbau	Hirschberger, Bad Liebenzell

Fenster/Fassade	Häußler, Speyer
TGA Ausführung	BPS, Warmbronn
GLT/IT	Imtech, Stuttgart
LED/Batterie	MondayVision, Stuttgart
E-Mobilität/Batterie	EnBW, Stuttgart
Planungs- und Bauzeit:	Planung: Okt. 2008 - Sept. 2009 Bauzeit: Sept. 2009 - Sept.2010
Grundstücksfläche	876 m²
Wohnfläche	260 m²
Bruttogeschossfläche BGF	595 m²
Brutto-Rauminhalt BRI	1747 m²
A/V_e Verhältnis	0,641 m^{-1}
Primärenergiebedarf	34,3 kWh/m²a
Jahres-Heizenergiebedarf (EnEV)	40,5 $kWh/m^2_{AN}a$
U-Wert Außenwand	0,15 [W/m²K]
U-Wert Dach	0,12 [W/m²K]
U-Wert Bodenplatte	0,30 [W/m²K]
U-Wert Fenster	0,6-0,8 [W/m²K]
Luftdichtigkeit (Blower Door)	N_{50} = 0,50 1/h
Wärmeerzeugung	Erdreich-Wärmepumpe (Max. 3,5 kW_{el}, 10 kW_{th}) Solarthermie-Anlage (Kollektorfläche 7 m²)
Kälteerzeugung	Regenerative Kühlung über Erdreich-Wärmetauscher (ca. 1 bis 1,5 kW (Erdreich-WT)) bzw. Erdwärmesonden (ca. 6 bis 9 kW)
Stromerzeugung	Dachintegrierte Photovoltaik (15 kW_p)
Lüftung	Kontrollierte Zu- und Abluftanlage mit WRG (Max. 250 m³/h)

Tabelle 11: Gebäudesteckbrief

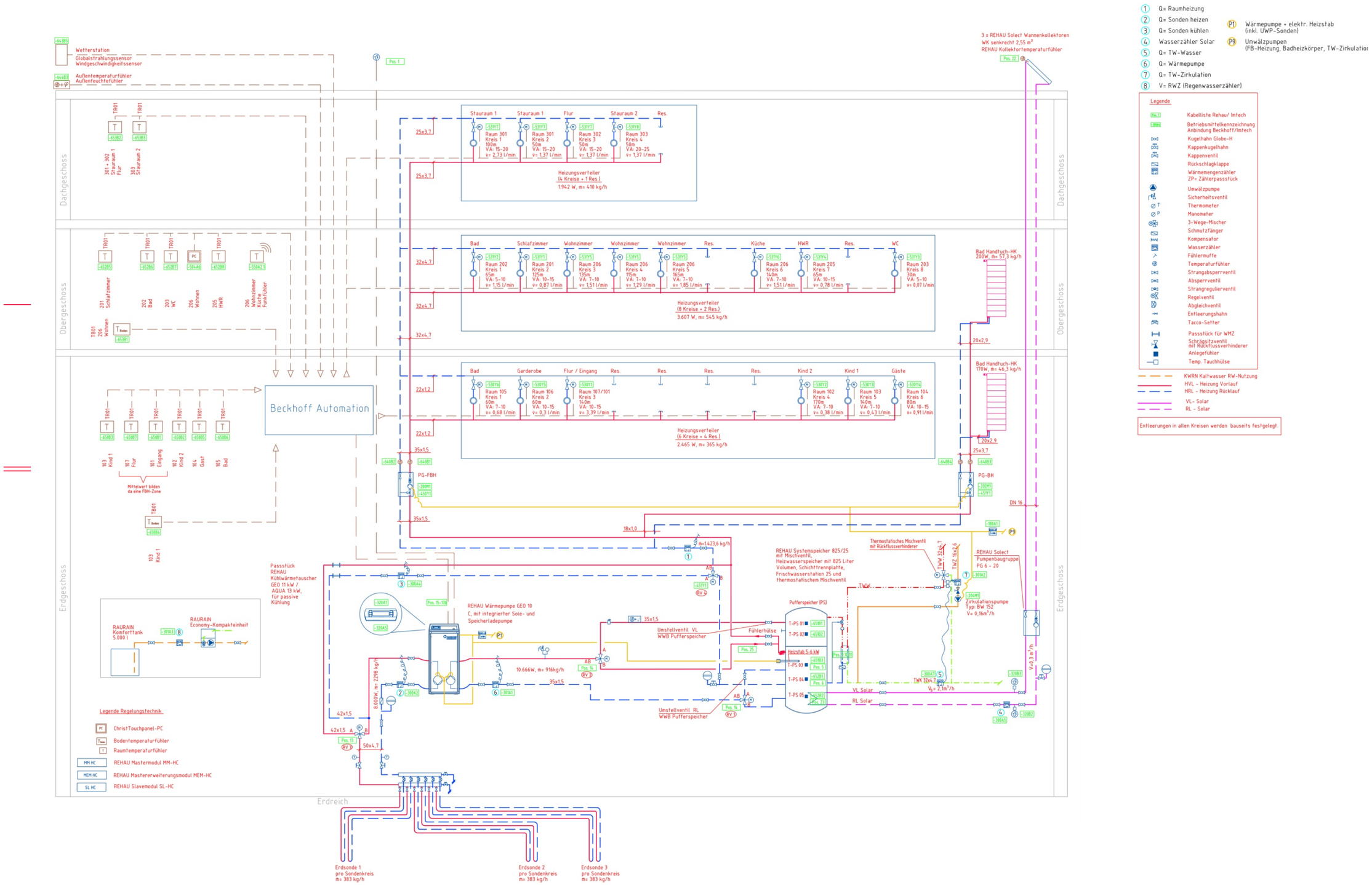
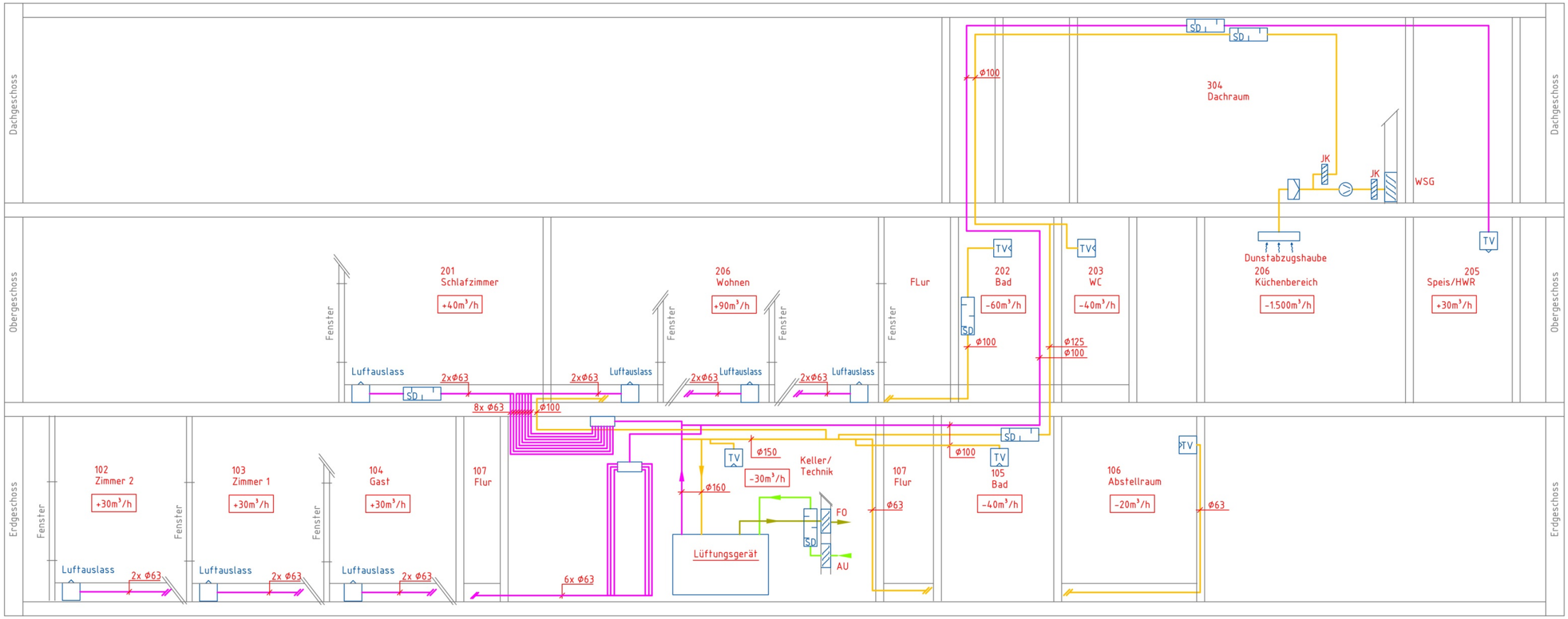


Abbildung 30: Hydraulikschema – Heizung und Trinkwarmwasser



Legende Lüftung

- ZU - Zuluft
- AB - Abluft
- AU - Außenluft
- FO - Fortluft

- SD= Schalldämpfer
- Ventilator
- Abluft - Tellerventil
- Zuluft - Tellerventil
- WSG Wetterschutzgitter
- JK Jalousieklappe

Abbildung 31: Schema Lüftung