



VIRTUELLES INSTITUT NRW

STROM ZU  
GAS UND WÄRME

**VIRTUELLES INSTITUT „STROM ZU GAS UND WÄRME“**

**BAND V**

SMART HEATING –

**BIVALENTE POWER-TO-HEAT-SYSTEME IN WOHNGEBÄUDEN**

**GEMEINSAMER ABSCHLUSSBERICHT DES KOMPETENZZENTRUMS (2018 – 2022)**

*Der gemeinsame Abschlussbericht des Kompetenzzentrums „Virtuelles Institut Strom zu Gas und Wärme“ umfasst insgesamt sechs Bände:*

- Band I: Systemmodellierung zur Identifikation von innovativen PtX-Anwendungen*
- Band II: Lebenszyklusorientierte Analysen und Kritikalitätsanalyse von Power-to-X-Optionen*
- Band III: Bewertung des Einsatzes und der Auswirkungen alternativer Kraftstoffe für die Entwicklung der zukünftigen regionalen Infrastruktur*
- Band IV: PtX-Versuchsplattform - Optimierung, Modellierung und Scale-up von Flexibilitätsoptionen*
- Band V: Smart Heating - Bivalente Power-to-Heat-Systeme in Wohngebäuden*
- Band VI: Power2C4*

#### **Fördermittelgeber:**

*Das Kompetenzzentrum „Virtuelles Institut - Strom zu Gas und Wärme“ wird gefördert durch das „Operationelle Programm zur Förderung von Investitionen in Wachstum und Beschäftigung für Nordrhein-Westfalen aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung“ (OP EFRE NRW) sowie durch das Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen.*



EUROPÄISCHE UNION  
Investition in unsere Zukunft  
Europäischer Fonds  
für regionale Entwicklung

Ministerium für Wirtschaft, Innovation,  
Digitalisierung und Energie  
des Landes Nordrhein-Westfalen



#### **Empfohlene Zitierweise:**

Virtuelles Institut Strom zu Gas und Wärme NRW, Abschlussbericht Kompetenzzentrum Virtuelles Institut – Strom zu Gas und Wärme, Band III - Bewertung des Einsatzes und der Auswirkungen alternativer Kraftstoffe für die Entwicklung der zukünftigen regionalen Infrastruktur, September 2022

**Titelbild:** © Gina Sanders / Fotolia

**Datum:** 30.09.2022

**Website:** <http://strom-zu-gas-und-waerme.de/>

**Autoren:**



**Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI)**  
Nils Brücken, Stefan Kubik, Sven Bielski

---

# INHALTSVERZEICHNIS

|  |     |
|--|-----|
| Inhaltsverzeichnis.....  | I   |
| Abkürzungen .....  | III |
| Management Summary .....   | 1   |
| 1 Motivation und Zielsetzung.....  | 2   |
| 2 Aufbau Simulationsmodell hybride Wärmepumpe und Parameterdatensatz .....               | 4   |
| 2.1 Gebäudehülle/Haus/Wohngebäude.....   | 6   |
| 2.2 Wetterdaten .....  | 8   |
| 2.3 Fußbodenheizung .....  | 9   |
| 2.4 Pufferspeicher.....  | 10  |
| 2.5 Regelung Heizung .....   | 11  |
| 2.6 Wärmepumpe.....  | 14  |
| 2.7 Brennwertkessel .....  | 17  |
| 2.8 Regelung der Wärmeerzeuger .....   | 18  |
| 2.9 Trinkwasserspeicher .....  | 20  |
| 2.10 Trinkwasserprofil .....   | 20  |
| 2.11 Photovoltaik.....   | 22  |
| 3 Darstellung und Diskussion der Simulationsergebnisse .....                             | 24  |
| 3.1 Ergebnisse Baualtersklasse 1975 .....  | 24  |
| 3.2 Ergebnisse Baualtersklasse 1985 .....  | 28  |
| 3.3 Ergebnisse Baualtersklasse 2005 .....  | 32  |
| 3.4 Ergebnisse Baualtersklasse 2015 .....  | 35  |
| 3.5 Energiebedingte Emissionen .....   | 38  |
| 3.6 Energiebedingte Kosten.....  | 39  |
| 4 Potenziale der hybriden Wärmeerzeugung durch Nutzung von Photovoltaik-Dachanlagen..... | 48  |
| 4.1 Baualtersklasse 1975 .....   | 49  |
| 4.1.1 Eigenverbrauchsquote.....  | 49  |
| 4.1.2 Energiebedingte Emissionen.....  | 50  |
| 4.1.3 Energiebedingte Kosten.....  | 51  |
| 4.2 Baualtersklasse 2015 .....   | 54  |
| 4.2.1 Eigenverbrauchsquote 2015 .....  | 54  |
| 4.2.2 Energiebedingte Emissionen.....  | 56  |
| 4.2.3 Energiebedingte Kosten.....  | 57  |

---

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 4.3 | Ergebnisvergleich der Baualtersklassen 1975 und 2015 .....       | 60  |
| 5   | Aufbau Prüfstand hybride Wärmepumpe am GWI .....                 | 62  |
| 6   | Zusammenfassung und Ausblick .....                               | 68  |
| 7   | Steckbriefsammlung zu marktverfügbaren hybriden Wärmepumpen..... | 70  |
|     | Literaturangaben.....  | 95  |
|     | Abbildungsverzeichnis.....                                       | 97  |
|     | Tabellenverzeichnis.....   | 100 |

---

# ABKÜRZUNGEN

|                 |  |
|-----------------|--|
| BVP             | Bivalenzpunkt  |
| BWK             | Brennwertkessel  |
| CoP             | coefficient of performance                                     |
| EE              | Erneuerbare Energien   |
| kW <sub>p</sub> | Kilowatt <sub>peak</sub>                                       |
| GEG             | Gebäude-Energie-Gesetz   |
| GHD             | Gewerbe/Handel/Dienstleistung                                  |
| GW              | Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.                             |
| HWW             | Heizwarmwasser   |
| PID-Regler      | Proportional-, Integral- und Differenzial-Regler               |
| PtH             | Power-to-Heat  |
| PV              | Photovoltaik   |
| TEASER          | Tool for Energy Analysis and Simulation for Efficient Retrofit |
| TWW             | Trinkwarmwasser  |
| VDI             | Verein Deutscher Ingenieure e.V.                               |
| WP              | Wärmepumpe   |

# MANAGEMENT SUMMARY

Im Teilprojekt „Smart Heating – Bivalente Power-to-Heat-Systeme in Wohngebäuden“ wird das Wärmekonzept der hybriden Wärmepumpen (WP) für den häuslichen Bereich beschrieben. Die Möglichkeit die Gebäudewärmeversorgung durch Strom oder Erdgas bereitzustellen, bietet im Zuge der Energiewende neue ökologische und auch ökonomische Potenziale, die in dieser Arbeit aufgezeigt werden sollen.

Im ersten Abschnitt wird das erarbeitete Modell der hybriden WP vorgestellt und beschrieben. Zur Modellierung wurde Dymola eine auf der objekt-orientierten Modellierungssprache Modelica basierte Simulations- und Modellierungsumgebung verwendet.

Die Modellierung der hybriden WP soll in einem ersten Schritt Ergebnisse zu Strom- und Erdgasbedarfen geben. Differenziert untersucht werden hierbei unterschiedliche Baualtersklasse (1975, 1985, 2005, 2015) hinsichtlich ihrer energetischen Bedarfe sowie Heizlast für unterschiedliche Bivalenzpunkte (BVP). Darauf aufbauend werden Ergebnisse zu energiebedingten Emissionen und Kosten dargestellt. Für die energiebedingten Emissionen werden die verursachten Emissionen sowie die eingesparten Emissionen im Vergleich zu einer Brennwertkessel-(BWK)Nutzung gezeigt. Für die energiebedingten Kosten werden für verschiedene Strom- und Erdgasbezugpreise empfohlene Betriebsstrategien ausgewiesen (Festlegung BVP) sowie die Sensitivität der jährlichen Betriebskosten bei steigenden Strom- und Erdgaspreisen.

Als Erweiterung des Gesamtmodells und Wärmekonzepts der hybriden WP wird im Weiteren eine PV-Dachanlage mit einer Anlagenleistung von 10 kW<sub>p</sub> integriert. Zudem werden mit sieben Strombedarfsprofilen für Einfamilienhaushalten aus der GWI-Datenbank zeitlich aufgelöste PV-Überschüsse bestimmt, die für die Wärmeversorgung genutzt werden können. Es wird ein Überblick gegeben wie sich die Erhöhung der Eigenverbrauchsquote des PV-Stroms mit der Nutzung für die Wärmebereitstellung entwickelt. Anschließend werden die energiebedingten Emissions- und Kosten-Einsparpotenziale aufgezeigt, die durch die Nutzung von PV-Strom aus der eigenen Dachanlage entstehen.

Aufbauend auf den Simulationsergebnissen wurde parallel eine hybride WP am GWI aufgestellt. Ziel ist neben Aufbau und Betrieb einer solchen Anlage, die Verifizierung der Simulationsergebnisse.

Abschließend werden die marktverfügbaren hybriden WP, die auf einer elektrischen Luft/Wasser-WP und einem BWK basieren, in einer Steckbriefsammlung vorgestellt. Dargestellt sind verschieden technische Parameter sowie Betriebsparameter, die entscheidende Kriterien einer hybriden WP beschreiben. Die Steckbriefsammlung soll u.a. der interessierten Öffentlichkeit einen einfach Informationszugang zu diesem Wärmekonzept geben.



# 1 MOTIVATION UND ZIELSETZUNG

Die Wärmebereitstellung für Raumwärme, Prozesswärme und Warmwasser stellt den dominierenden Endenergiebedarf Deutschlands dar. Dennoch geht der große Erfolg der Energiewende im Stromsektor bis dato weitestgehend am Wärmesektor vorbei, weshalb die Wärmewende aktuell häufig als „schlafender Riese“ des deutschen Energiesystems bezeichnet wird. Die deutsche Energiewende, mit einem Anteil von bereits über 40 % erneuerbarer Energie (EE), findet nach wie vor fast ausschließlich im Stromsektor statt. Die Sektoren Verkehr und Wärme konnten in den letzten Jahren hingegen kaum Zuwachs an EE umsetzen. So lag der EE-Anteil im Verkehrssektor im Jahr 2021 bei 7 % (seit dem Jahr 2010 ein Anstieg von einem Prozentpunkt) und im Wärmemarkt bei 17 % (seit dem Jahr 2010 ein Anstieg von fünf Prozentpunkten). Hinzu kommt, dass der Wärmesektor mit 1.209 TWh 2021 einen höheren Energiebedarf hatte, als Verkehrs- und Stromsektor zusammen (1.149 TWh), was die Relevanz, die Wärmemarkt zu dekarbonisieren, nochmals verdeutlicht.[1]

Während in der Industrie weit überwiegend Prozesswärme benötigt wird (im Jahr 2020 1.582,7 PJ) stellt Raumwärme im Haushalts- und GHD-Sektor den dominierenden Bedarf dar (für das Jahr 2020 im Haushaltsbereich 1.645,9 PJ und im GHD-Bereich 513,7 PJ). Der Bedarf an Warmwasser (auch Trinkwarmwasser genannt) liegt insgesamt bei 474 PJ, wobei mit 382,7 PJ der Großteil bei Haushalten anfällt.[2]

Der Wärmebedarf von Wohngebäuden kann über verschiedene Heizungstechnologien und Energieträger gedeckt werden. In der deutschen Beheizungsstruktur werden insbesondere gas- und ölbasierte Heizungssysteme zur Wärmebereitstellung eingesetzt. Während Heizöl seitdem Jahr 1995 anteilig sukzessive weniger genutzt wird, stieg der Anteil von Erdgas weiter. Zusätzlich wuchs der Anteil der Wärmebereitstellung mittels Fernwärme, genauso wie der von elektrischen Wärmepumpen, die allerdings im Jahr 2021 mit <5 % einen nur sehr kleinen Marktanteil besitzen.[2]

Im Jahr 2020 wurde die gasbasierte Wärmeerzeugung dann durch die Wärmepumpe im Wohnungsneubau als bevorzugte Technologie abgelöst.[2] Zurückzuführen ist dieser Wandel auf mehrere Aspekte. Zum einen ist die energetische Effizienz von WP die im Neubau erreicht werden kann zu nennen. Zum anderen bieten aber die politischen Förderinstrumente starke finanzielle Anreize eine WP als Heiztechnologie einzusetzen. In Bestandsgebäuden werden WPs hingegen weniger häufig verbaut, was u.a. am Sanierungsstand liegt.[3]

Ein weiterer Wärmebereitstellungs-Ansatz für Wohngebäude wird durch das bivalente Power-to-Heat-Konzept für Wohngebäude (auch hybride Wärmepumpe genannt) beschrieben, welches aus einer Kombination aus zwei Wärmeerzeugern besteht. Der erste und primäre Wärmeerzeuger ist eine elektrische Wärmepumpe, der zweite Wärmeerzeuger stellt Wärme aus einem fossilen Energieträger (bspw. Heizöl oder Gas) bereit. Während elektrische Wärmepumpen insbesondere beim Anheben von geringen Temperaturniveaus sehr effizient sind, nimmt ihr Wirkungsgrad (auch coefficient of performance; kurz CoP), wenn die Temperaturquelle gering ist (bspw. kalte Außentemperatur bei Luft-Wärmepumpen) deutlich ab. Für Ein- und Zweifamilienhäuser gibt es mittlerweile eine Vielzahl an



marktverfügbaren Kompaktgeräten, für Mehrfamilienhäuser werden bisher individuelle Lösungen umgesetzt.

Die beiden Wärmeerzeuger werden über eine Regelungseinheit gesteuert. Sie legt u.a. ein Bivalenzpunkt (BVP) fest, mit dem entschieden wird welche Wärmeerzeugungseinheit den Wärmebedarf decken soll.

Relevanz erhalten hybride WP aktuell durch verschiedene Gegebenheiten. In Bestandswohngebäuden können häufig WP nicht als Stand-alone-Lösung integriert werden. Das liegt bspw. an den benötigten Heizleistungen oder der notwendigen Vorlauftemperatur die ganzjährig bereitgestellt werden muss. Insbesondere bei nicht ausreichend sanierten Wohngebäuden stoßen WP an ihre technischen Grenzen. Hybride WP werden hier durch ihre sekundäre Wärmeversorgung an kalten und/oder bei hohen Wärmebedarfen ergänzt.[3]

Mit Betrachtung auf die Altersstruktur von Öl- und Gasheizungen in Deutschland ist davon auszugehen, dass in den nächsten Jahren viele fossilen Heizungen erneuert werden müssen. Hinzu kommt, dass ab dem 1. Januar 2026 in Wohngebäuden grundsätzlich keine Ölheizungen ohne regenerative Wärmeunterstützung verbaut werden dürfen. Zudem wurde im GEG der Austausch einer Gastherme die älter als 30 Jahre bei Erwerb eines Wohngebäudes festgelegt.[4]

Die in diesem Teilprojekt vorgesehenen Arbeiten sollen die Ergebnisse des Vorprojektes aufgreifen und aus den ermittelten theoretischen Überschneidungen zwischen Wärmebedarf und EE-Überproduktion technisch realisierbare PtH-Potenziale im häuslichen Bereich ableiten. Die im laufenden Projekt entstehenden theoretischen Potenziale bilden dabei ein bilanzielles Maximum ab, welches der Wärmesektor in Kopplung mit dem Stromsektor zur Einbindung von erneuerbaren Energien liefern kann. Diese Kopplung ermöglicht es die Dekarbonisierung Deutschlands über den reinen Stromsektor hinaus auszuweiten.

## 2 AUFBAU SIMULATIONSMODELL HYBRIDE WÄRMEPUMPE UND PARAMETERDATENSATZ

In diesem Kapitel wird eine Übersicht über das für das Projekt erstellte Modell für die hybride WP gegeben. Zu Beginn wird das Gesamtmodell abgebildet und erklärt, um im Anschluss die Funktionsweise der relevanten Komponenten und genutzten Datensätze näher zu erläutern.

Das abgebildete Gesamtsystem wurde mithilfe der Software Dymola in ein Modell umgewandelt. Dymola ist eine auf der objekt-orientierten Modellierungssprache Modelica basierte Simulations- und Modellierungsumgebung. Da in Dymola physikalische Systeme aller Disziplinen abgebildet werden können, bringt es sämtliche für die in diesem Projekt erforderlichen Grundvoraussetzungen mit, da neben thermodynamischen Prozessen auch Elektrotechnik und Regelungstechnik Teile des Modells darstellen.[5] Da auch für andere Projekte innerhalb des GWI Dymola verwendet wird, können fertiggestellte Systeme oder Teilsysteme abteilungsübergreifend ausgetauscht werden. In Dymola können komplexe Bauteile entwickelt werden, indem einzelne Bausteine über mehrere aufeinander aufbauenden Ebenen hinweg zusammengeschaltet werden. Einzelne Blöcke oder auch ganze Bauteile werden über spezielle Konnektoren, den sogenannten Ports, miteinander verbunden. Über diese Ports werden dem Block entweder Informationen zugänglich gemacht (Input) oder aus dem Block heraus dem äußeren System übermittelt (Output). Ist ein Input-Port beispielsweise als Volumenstrom-Port definiert, kann dieses Bauteil ausschließlich an ein Bauteil angeschlossen werden, dessen Output-Port ebenfalls als Volumenstrom definiert ist. Ähnlich wie die realen Bauteile, die es abzubilden gilt, variiert die Komplexität zwischen den einzelnen Komponenten voneinander, sodass sich auch die Anzahl der Ebenen und integrierten Bausteine stark voneinander unterscheiden können. Damit komplexe Komponenten oder Systeme nicht von jeder nutzenden Person neu aufgebaut werden müssen, sind bereits vorgefertigte und verifizierte Varianten in sogenannten Bibliotheken zusammengefasst. In diesem Projekt wurden insgesamt drei verschiedene, frei zugängliche Bibliotheken genutzt, um sämtliche Bauteile für das System zusammenzuführen. Neben der Modelica-Standard Library, aus der hauptsächlich elementare Bausteine wie Rechenoperatoren oder Logikblöcken übernommen wurden, konnten komplexere Komponenten wie die Wärmepumpen oder Photovoltaikanlage in der Buildings Library sowie der AixLib gefunden werden. Die wichtigsten in dieser Arbeit genutzten Elemente werden im Folgenden abgebildet und deren Funktionen kurz erläutert. Für weitere Informationen können sämtliche Elemente in der zugehörigen Bibliothek aufgerufen werden. Innerhalb des Einfamilienhauses (1) wird durch kalte Temperaturen (2) ein Wärmebedarf erzeugt. Um die gewünschte Raumtemperatur beizubehalten, wird aufgeheiztes Wasser durch die Heizungssystem (in diesem Modell Fußbodenheizung) (3) gepumpt, welches dem Pufferspeicher (4) entnommen wird. Durch den Regelungsblock der Heizung (5) wird die Vorlauftemperatur sowie der Volumenstrom des Wassers festgelegt. Diese Kennzahlen wird durch den Einsatz von Pumpen sowie einem

Leitungssystem mit Ventilen innerhalb des Systems umgesetzt, durch die der Heizungsrücklauf mit dem Wasser des Pufferspeichers vermischt wird. Der Pufferspeicher soll primär durch die Wärmepumpe (6) aufgeheizt werden, wobei ein hoher Wärmebedarf oder kalte Außentemperaturen zum Einsatz des Gas-BWK (7) führen können. Die Wahl der Wärmequelle und deren Leistung wird im Regelungsblock der Erzeuger (8) getroffen. Neben dem Heizwasser soll auch das Trinkwasser auf einem festgelegten Niveau gehalten werden. Dafür wurde in das System ein zusätzlicher Wärmespeicher (9) integriert, der wie der Pufferspeicher entweder durch die Wärmepumpe oder den Brennwertkessel beladen werden kann. Innerhalb des Trinkwasserspeichers wird ein Wärmebedarf erzeugt, indem der Speicher durch ein angelegtes Trinkwasser-Zapfprofil (10) abgekühlt wird. Als zusätzliche Komponente wurde in dem System eine PV-Anlage (11) integriert. Falls diese den Bedarf des hinterlegten Stromprofils (12) für elektrische Verbraucher innerhalb des Hauses decken kann, muss der überschüssige Strom nicht in das öffentliche Stromnetz eingespeist, sondern kann für den Betrieb der Wärmepumpe genutzt werden.

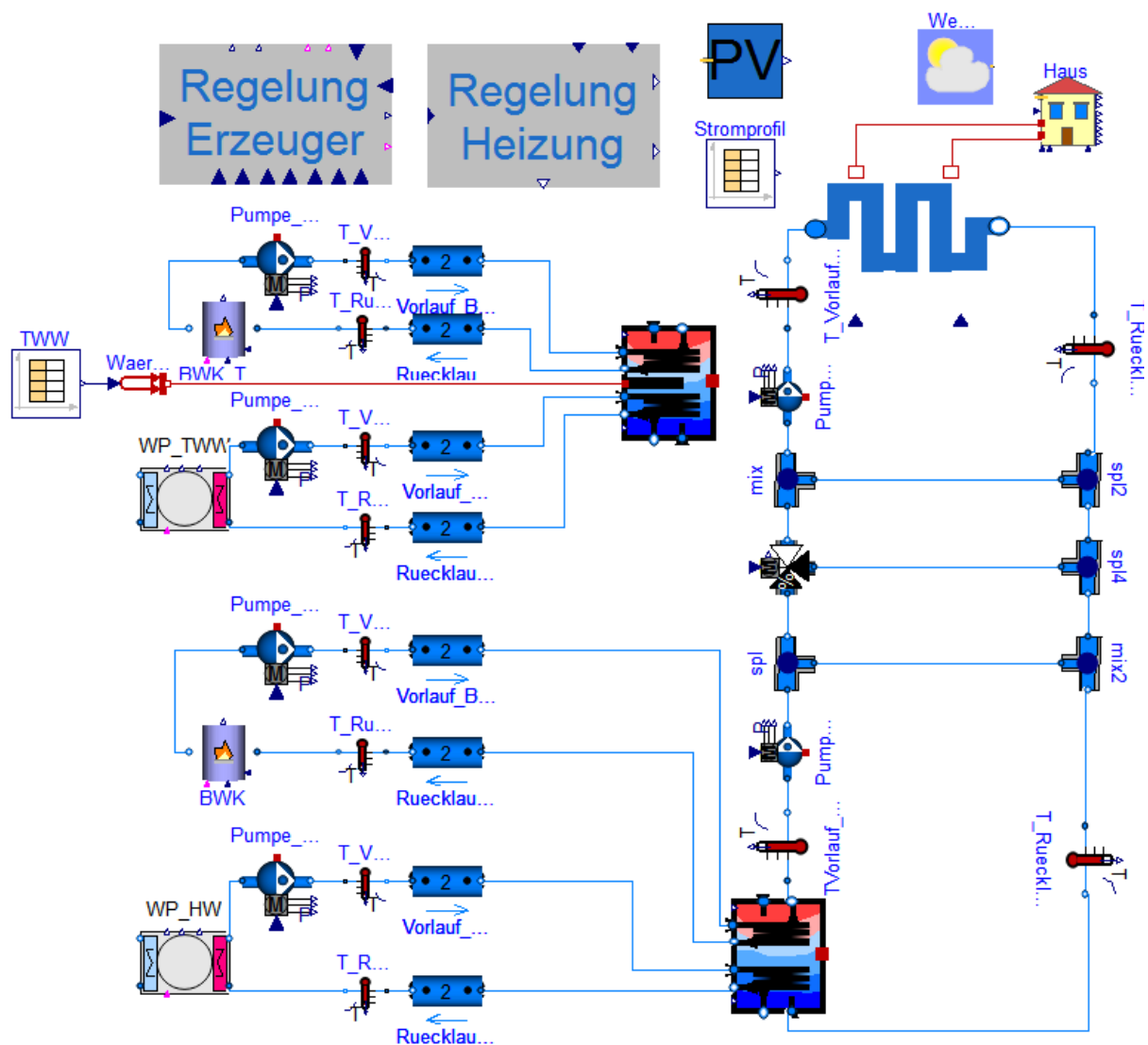


Abbildung 1 - Schematische Darstellung des Dymola-Modells

## 2.1 Gebäudehülle/Haus/Wohngebäude

Als Gebäudehülle wurde das Modell „MultizoneEquipped“ aus der AixLib genutzt (vgl. Abbildung 1). Kern des Modells ist ein durch Wände, Bodenplatte und Dach (a2) eingeschlossenes Luftvolumen(a1). Die Temperatur dieses Raums wird bedingt durch externe Temperatur und Strahlung (a4) sowie interne Temperaturquellen der Heizung, Bewohner\*innen und elektrische Verbraucher(a3). Mithilfe der Software TEASER (Tool for Energy Analysis and Simulation for Efficient Retrofit), die an der RWTH Aachen vom Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik des E.ON Energy Research entwickelt wird, können die zur Simulation notwendigen Daten automatisch generiert werden.[6] Nach der Festlegung von Gebäudetyp, Grundfläche, Baujahr sowie Höhe und Anzahl der Stockwerke generiert die Software einen Datensatz, der in Verbindung mit dem Dymola-Modell ein vergleichbares Haus aus Deutschland nachahmen soll. Die zur Definition der Gebäude erforderlichen Daten wurden zwischen 2009 und 2012

innerhalb des Projektes TABULA (Typology Approach for Building Stock Energy Assessment) erhoben, in dem europaweit Gebäude analysiert, verglichen und gruppiert wurden.[7] In dieser Arbeit wurde ein 172 m<sup>2</sup> großes Einfamilienhaus, mit zwei jeweils 2,5 m hohen Etagen erstellt. Diese Fläche entspricht der mittleren beheizten Fläche der 42 Einfamilienhäuser, die im Projekt „WPsmart im Bestand“ des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme analysiert wurden.[8] Die Gebäude können entsprechend ihres Wärmeverbrauchs pro Quadratmeter in verschiedene Kategorien eingeteilt werden, um den Dämmzustand eines Gebäudes zu beschreiben. Für die Kategorisierung wird neben der Heizwärme auch die Wärme für die Trinkwasseraufbereitung berücksichtigt. Die Grenzwerte dieser Effizienzklassen ist im Gebäudeenergiegesetz (GEG) festgelegt.[4]

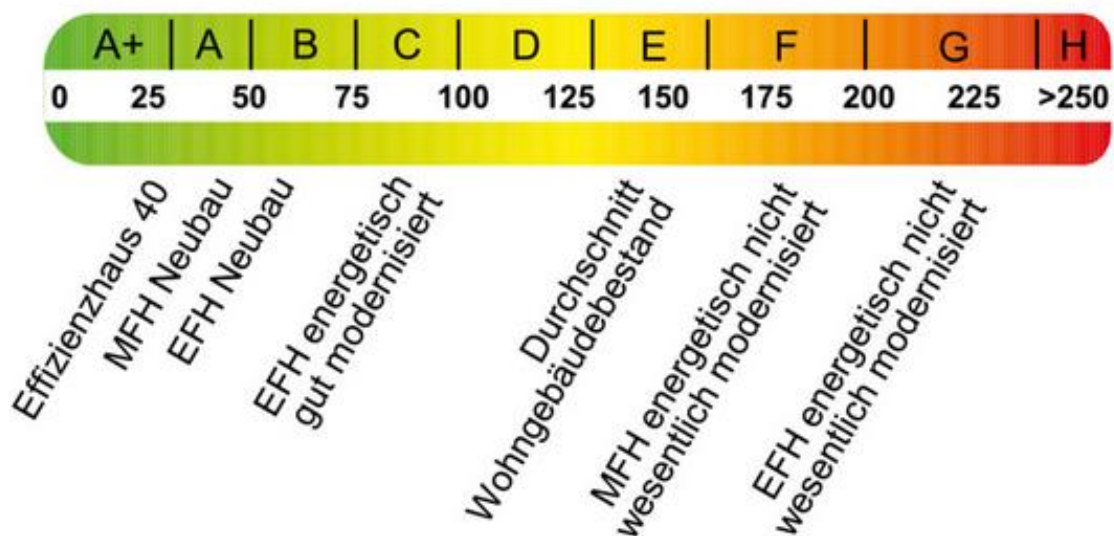


Abbildung 2 - Vergleichswerte Endenergie nach GEG (Quelle: Verbraucherzentrale)

Innerhalb des Modells kann der Dämmstandard und somit die Einteilung in die jeweiligen Effizienzklassen über das Gebäudealter bestimmt werden. Je nach Baujahr werden für Dächer, Fenster und Wände verschiedene Wärmedurchgangskoeffizienten hinterlegt, sodass sich die Innentemperatur von älteren Gebäuden tendenziell schneller an die Außentemperatur annähert. Durch die Variation des Gebäudealters konnten Einfamilienhäuser der Klassen B, C, F und G – wie in Abbildung 2 zu sehen ist – simuliert werden, indem die Baujahre auf die Jahre 2015, 2005, 1985 und 1975 festgelegt wurden. Der Endenergieverbrauch der Gebäude umfasst eine Bandbreite von ca. 12.000 kWh bis 42.500 kWh pro Jahr.

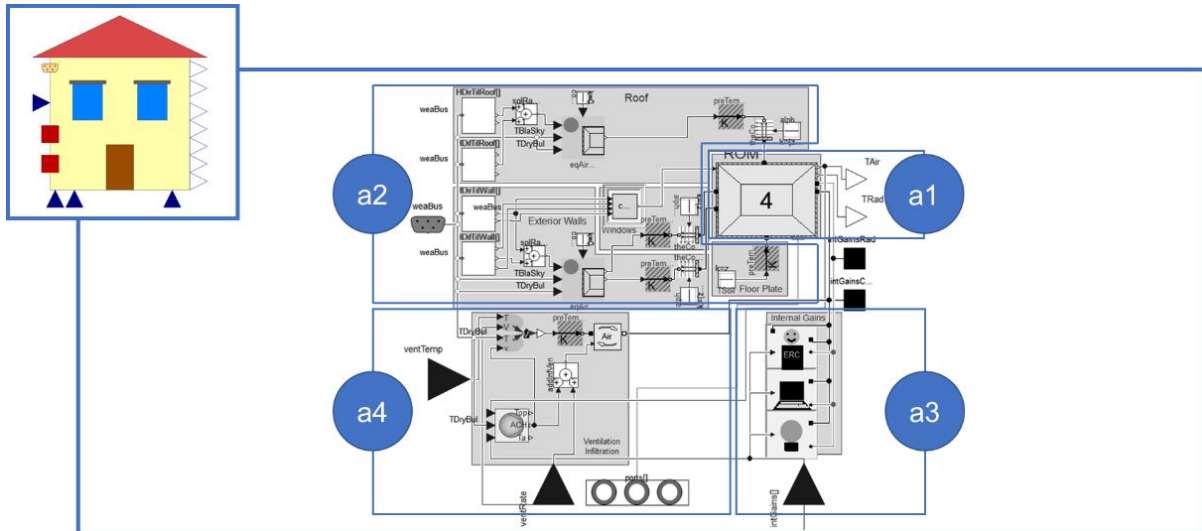


Abbildung 3 - Symbol- und Detailansicht in Dymola. Komponente: Haus

## 2.2 Wetterdaten

Ebenfalls Bestandteil der Bibliothek ist die Möglichkeit auf den Zugriff von Wetterprofilen, die mit dem Modell des Gebäudes kompatibel sind und sämtliche für die Simulation erforderlichen Datensätze enthalten. Die neben der Temperatur benötigten Kennzahlen sind beispielsweise Strahlungsdaten, Luftfeuchtigkeit, Sonnenstand und Windstärke.

In sämtlichen Simulationen wurde das in Abbildung 4 gezeigte, für den Standort Düsseldorf erstellte Temperatur- und Strahlungsprofil genutzt.

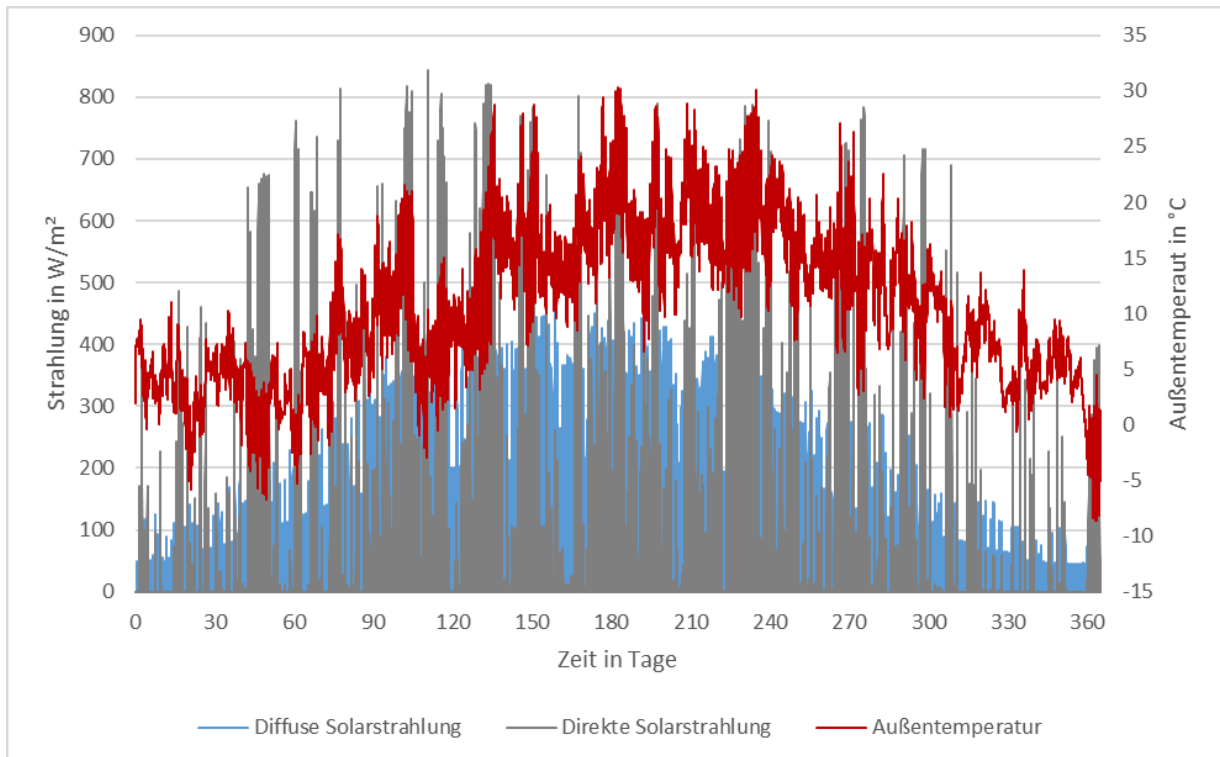


Abbildung 4 - Jahresverlauf von Außentemperatur, diffuser und direkter Solarstrahlung für den Standort Düsseldorf

Die Außentemperaturen (rot) liegen über das gesamte Jahr zwischen  $-8,6$  und  $30,3^{\circ}\text{C}$ . Die mittlere Außentemperatur liegt bei  $10,5^{\circ}\text{C}$ . Anders als bei der direkten Solarstrahlung (grau), bei der die Sonnenstrahlung ohne Streuung die Erdoberfläche erreichen, trifft das Sonnenlicht bei der diffusen Strahlung (blau) aus verschiedenen Richtungen auf, da es beispielweise durch Wolken gestreut wird. Die maximalen Werte liegen bei der direkten Einstrahlung bei  $843\text{ W/m}^2$ , bei der diffusen Strahlung bei  $489\text{ W/m}^2$ . Da nachts keine Sonnenstrahlen auf die Erdoberfläche treffen, liegen die kleinsten Werte bei beiden Kennzahlen bei  $0\text{ W/m}^2$ . Neben der Berechnung der Wärmeübertragung an der Gebäudehülle sind die Wetterdaten für die Stromerzeugung der Photovoltaikanlage von entscheidender Bedeutung.

## 2.3 Fußbodenheizung

Als primäre Wärmequelle innerhalb des Gebäudes dient die aus der Buildings-Library übernommene Fußbodenheizung „SingleCircuitSlab“. Um die gesamte Wohnfläche des Einfamilienhauses beheizen zu können, wurden mehrere dieser Heizkreise parallel zusammengeschaltet. Einerseits kann so die laut Herstellerangaben maximale Länge von Heizkreisen eingehalten werden.[9] Andererseits könnte mit diesem modifizierten Modell in Folgeprojekten mehrere Räume separat angesteuert werden. In dieser Arbeit werden zunächst alle Heizkreise gleichmäßig mit warmem Wasser versorgt, sobald innerhalb des Gebäudes ein Wärmebedarf registriert wird. Das Modell für die Heizung besteht neben der Rohrleitung mit den zugehörigen Ports für Input und Output des Wassers aus einer Bodenschicht, die je nach Bedarf einen Holzboden, Fliesen oder Teppich nachbilden kann. Auch Material, Länge,



Durchmesser und der Abstand der Rohrleitungen zueinander kann angepasst werden. Während in dieser Arbeit die Standardeinstellungen für Fußbodenrohre und Fliesenböden übernommen wurden, wurde der Abstand der Rohre auf 20 cm festgelegt. Insgesamt wurden für das Modell acht Heizkreise parallelgeschaltet, damit die zu beheizende Fläche von 172 m<sup>2</sup> vollständig abgedeckt werden kann.

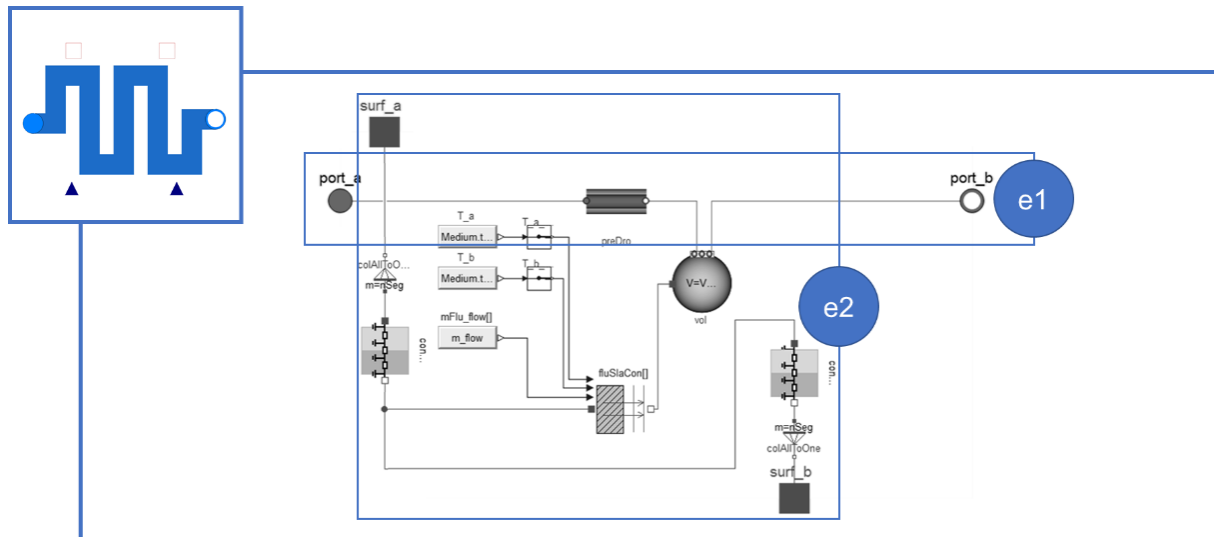


Abbildung 5 - Symbol- und Detailansicht in Dymola. Komponente: Heizung

## 2.4 Pufferspeicher

Das warme Wasser für die Fußbodenheizung wird durch den Pufferspeicher bereitgestellt. Das Speichermodell „BufferStorage“ aus der AixLib erfüllt die in dieser Arbeit benötigten Anforderungen zur hybriden Wärmeversorgung. Der Pufferspeicher beinhaltet zwei voneinander getrennte Rohrspiralen, durch die der Speicher aufgewärmt werden kann. In der Mitte des Speichers ist darüber hinaus ein Heizstab integriert, der als alternative Wärmequelle dienen kann. Je nach Bedarf können die Elemente aktiviert oder deaktiviert werden. Der Speicherinhalt kann durch die Bestimmung von Höhe und Breite des Speichers variiert werden. Entsprechend der geplanten Dimensionierung des Prüfstandes am GWI wurde der Speicherinhalt auf 500 Liter festgelegt. Die Eigenschaften der Speicherhülle und damit der Wärmeübergangskoeffizient des Speichers wurden auf den Standardeinstellungen der Komponente belassen.

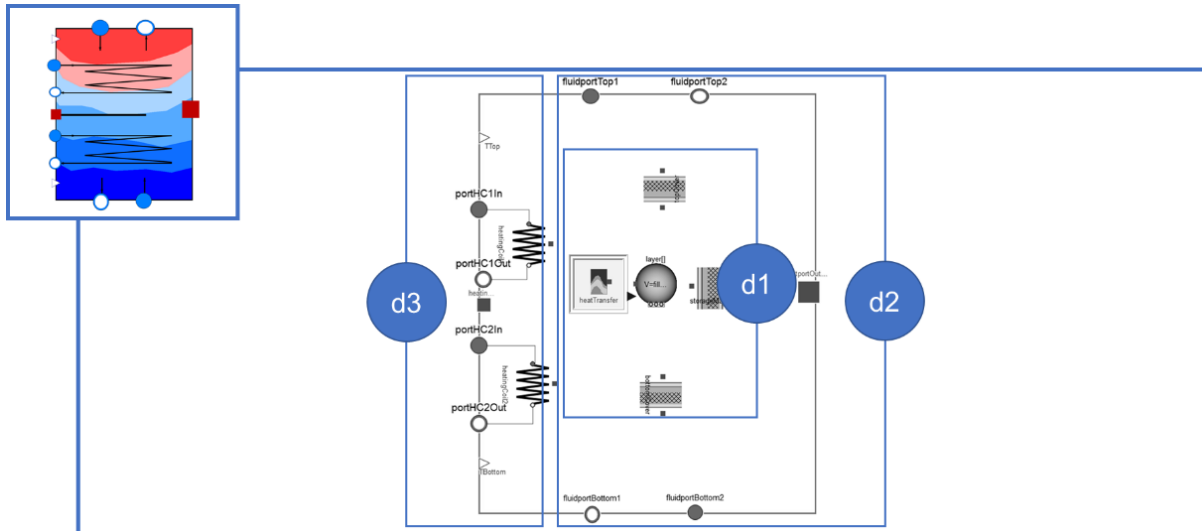


Abbildung 6 - Symbol- und Detailansicht in Dymola. Komponente: Wärmespeicher

## 2.5 Regelung Heizung

Die Regelung der Fußbodenheizung hat das Ziel bei Wärmebedarf des Gebäudes, sowohl den Volumenstrom (c) als auch die Temperatur des Wassers (a) zu bestimmen, welches durch die Rohrleitungen der Heizung gepumpt wird. Bei einer optimalen Regelung wird die tatsächliche Raumtemperatur möglichst nah an der gewünschten Raumtemperatur (h) gehalten Um die dafür benötigte Vorlauftemperatur zu berechnen, muss zunächst für jeden Gebäudetypen eine Heizkurve festgelegt werden.

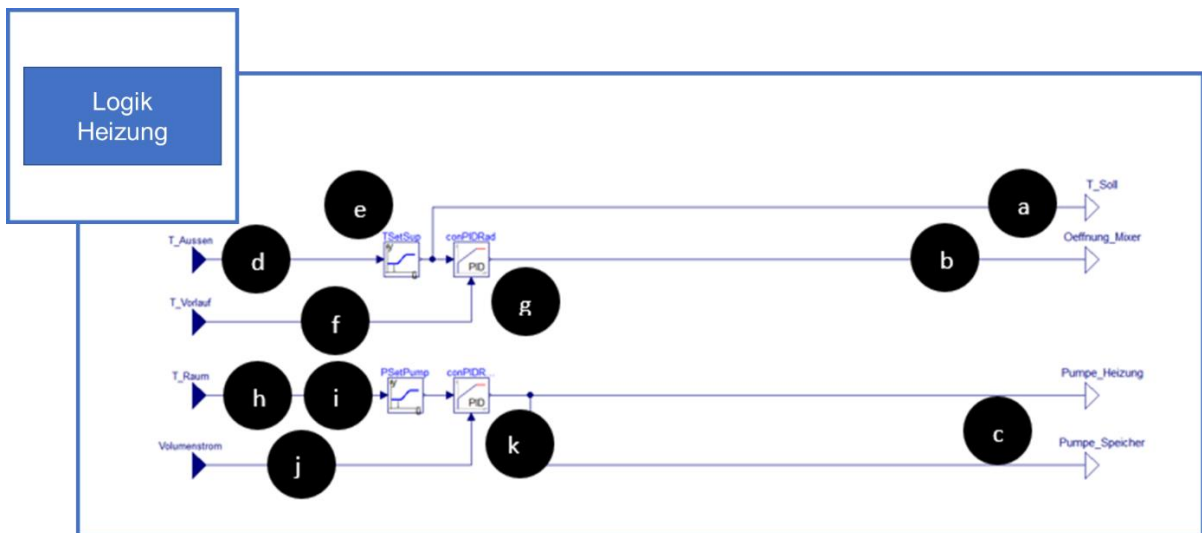


Abbildung 7 - Symbol- und Detailansicht in Dymola. Steuerung: Heizung. AixLib – Tutorial - ...

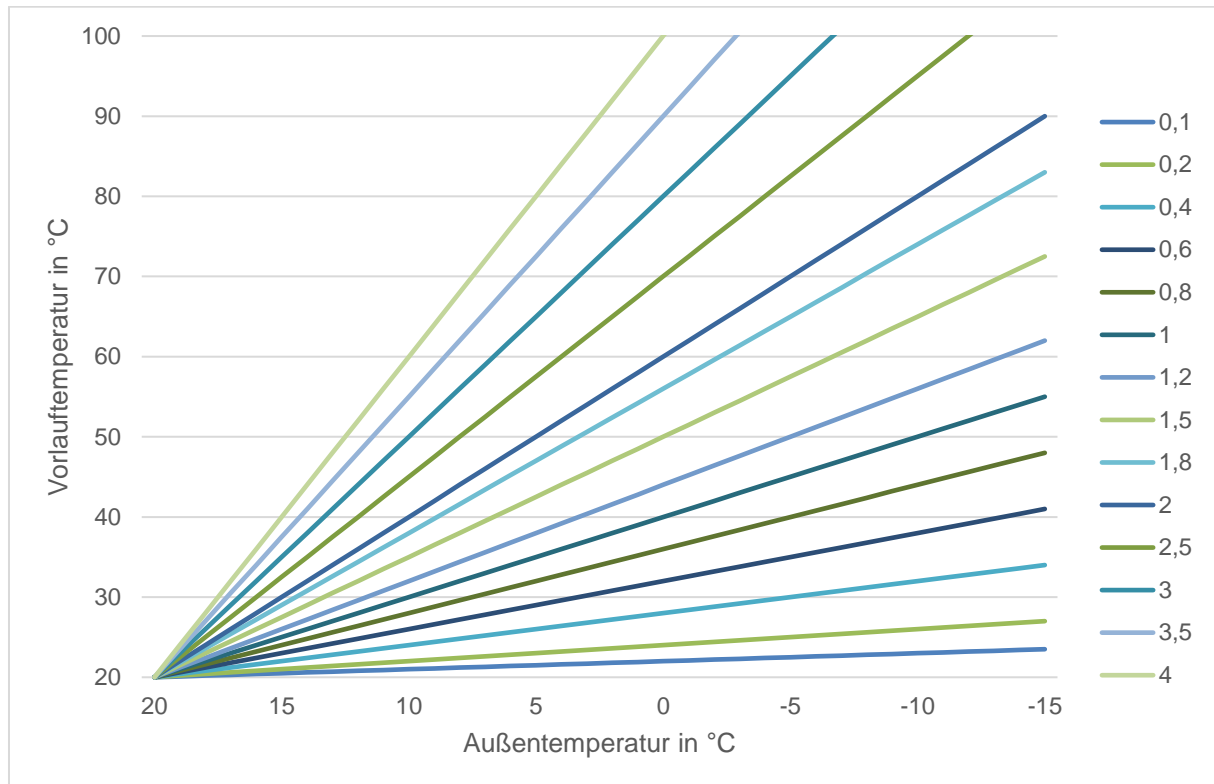


Abbildung 8 - Heizkurven

Die Heizkurve eines Raumes gibt für jede Außentemperatur eine entsprechende Vorlauftemperatur an, die dafür sorgen soll, den Raum ausreichend zu beheizen. Dabei kann die Steilheit der Kurve angehoben werden, wenn der Raum bei niedrigen Außentemperaturen zu stark abkühlt. Andererseits kann auch das gesamte Niveau der Kurve angehoben werden, indem eine Parallelverschiebung auf der Y-Achse durchgeführt wird, wenn die Raumtemperatur bereits bei wärmeren Außentemperaturen absinkt. Während eine flache Heizkurve und dementsprechend niedrige Vorlauftemperaturen auf einen hohen Dämmstandard hinweisen, müssen bei älteren Gebäuden steilere und möglicherweise parallelverschobene Heizkurven angesetzt werden.[10] In Abbildung 8 ist der Verlauf der im Modell genutzten Heizkurven dargestellt. Bei sämtlichen Kurven ist die angesetzte Vorlauftemperatur bei 20 °C Außentemperatur ebenfalls 20 °C. Dementsprechend ist keine Parallelverschiebung abgebildet. Um die berechnete Solltemperatur besser nachvollziehen zu können, werden nur gerade Heizkurven bei den Simulationen verwendet. Das System regelt die Vorlauftemperatur also antiproportional gegenüber der Außentemperatur. Bei einer Heizkurve von 2 wird beispielsweise die angesetzte Vorlauftemperatur um 2 K erhöht, wenn die Außentemperatur um 1 K absinkt. Für jeden Gebäudetypen kann die entsprechende Heizkurve als Liste (e) in der Regelung hinterlegt werden. Die gemessene Außentemperatur (d) wird im durch einen PID-Regler mit der aktuellen Vorlauftemperatur (f) verglichen. Die Höhe sowie der zeitliche Verlauf der Differenz der beiden Eingangsvariablen bestimmt den im PID-Regler erzeugten Ausgangswert (b). Letzterer beschreibt die erforderliche Öffnung der Ventile, durch die der Rücklauf der Heizung mit Wasser aus dem Pufferspeicher gemischt

werden kann. Eine Mischung ist dann erforderlich, wenn das bereits abgekühlte Wasser aus dem Rücklauf der Heizung unter der durch die Heizkurve vorgeschriebenen Vorlauftemperatur liegt. Das Ausgangssignal des Reglers kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei 0 für ein vollständig geschlossenes und 1 für ein vollständig geöffnetes Ventil steht. In letzterem Fall ist die Differenz zwischen Sollwert und Rücklauftemperatur so hoch, dass sämtliches Heizwasser durch den Pufferspeicher bereitgestellt werden muss. Ist das Ventil geschlossen, muss der Speicher nicht entladen werden.

Parallel zur Steuerung des Ventils müssen darüber hinaus die Pumpen gesteuert werden, damit die Wärmeübertragung zum Gebäude sowie die Mischung der Wasserströme gewährleistet werden kann. Ob die Pumpen eingeschaltet werden, hängt von der Raumtemperatur (h) ab. Das Temperaturniveau innerhalb des Gebäudes soll über das gesamte Jahr hinweg zwischen 19 °C und 20 °C gehalten werden. Sinkt die Raumtemperatur unter die Grenze von 20 °C werden die Pumpen aktiviert und je nach Abweichung ein per Liste (i) hinterlegter Volumenstrom angesetzt. Sinkt die Raumtemperatur auf den beschriebenen unteren Grenzwert von 19 °C erreicht dieser Volumenstrom einen festgelegten maximalen Wert, welcher auf 4 Liter pro Minute und Heizkreis festgelegt wurde. Die für den berechneten Volumenstrom erforderliche Leistung der Pumpen wird durch einen weiteren PID-Regler (k) berechnet, indem der Sollwert mit dem gemessenen Volumenstrom (j) verglichen wird.

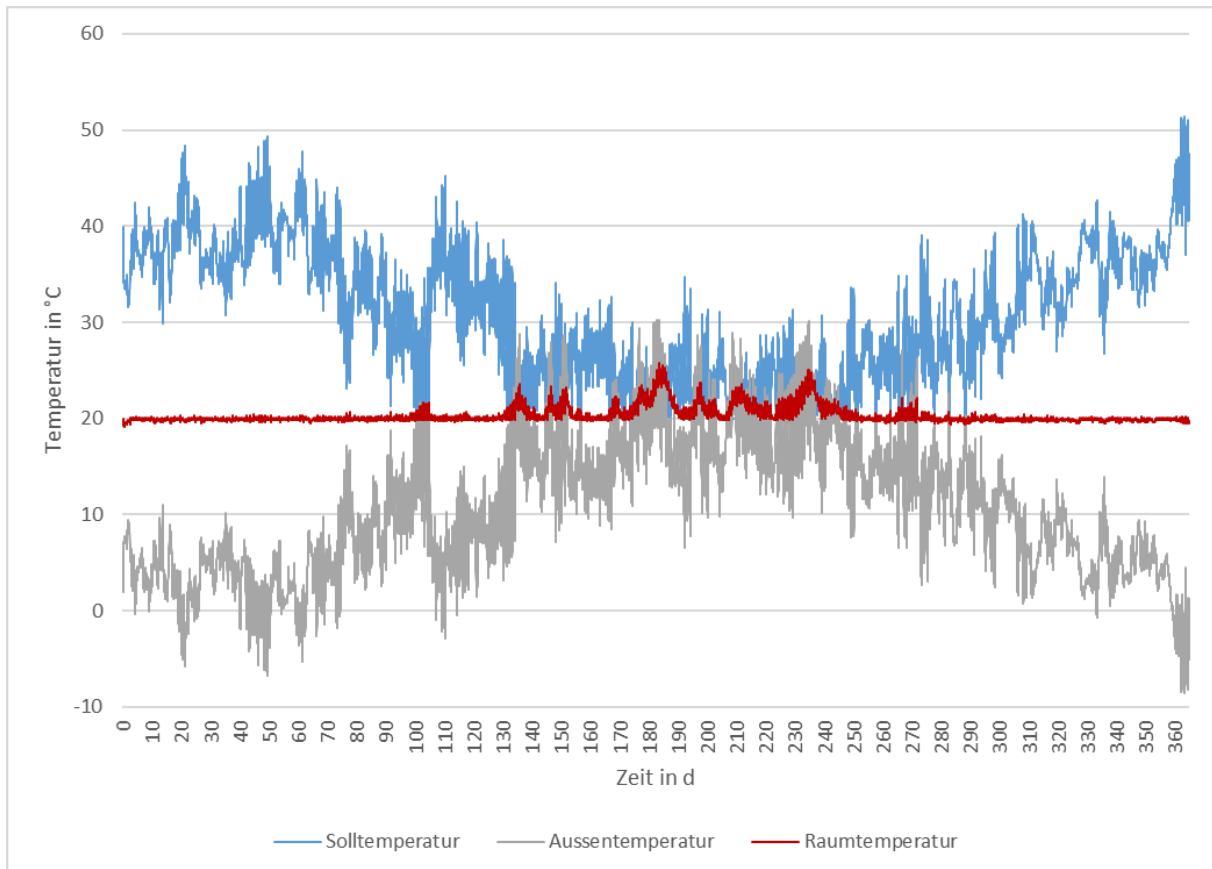


Abbildung 9 – Jahresverlauf von Außen-, Soll- und Raumtemperatur

Damit das beschriebene System für die gewünschte Raumtemperatur sorgen kann, muss die über die Heizkurve ermittelte Vorlauftemperatur jederzeit bereitgestellt werden können. Die dafür benötigte Wärme wird dem Pufferspeicher im hybriden System entweder durch einen Brennwertkessel oder eine Wärmepumpe zugeführt. Abbildung 9 zeigt den durch die Heizkurve gebildeten Zusammenhang zwischen Außen- und Solltemperatur des Heizungsvorlaufs. Über das abgebildete Jahr hinweg wurde die Raumtemperatur (rot) stets auf ca. 20°C gehalten, indem bei kalten Außentemperaturen (grau) die Vorlauftemperatur der Heizung (blau) entsprechend der angesetzten Heizkurve angehoben wurde. Lediglich in der Jahresmitte während den Sommermonaten übersteigt die Raumtemperatur den Wert von 20°C deutlich. In diesen Zeitperioden wird zwar gemäß der Heizkurve ein Sollwert ermittelt, die Heizungsanlage ist jedoch nicht aktiv.

## 2.6 Wärmepumpe

Wie auch der Brennwertkessel ist auch das Modell der Wärmepumpe in der AixLib zu finden. Die Komponente „Heatpumptdetailed“ besteht aus mehreren Elementen, die in Verdampfer (c1), Kondensator (c3) und Einheit zur inneren Berechnung von Werten und Abfrage von Daten (c2) eingeteilt werden können. Auf der Seite des Verdampfers wird die Außentemperatur erfasst und die Wärmeleistung berechnet, die durch die Vorgänge innerhalb der Wärmepumpe an die Umgebung abgegeben wird. Auf der anderen Seite ist der Kondensator mit dem Wärmespeicher verbunden. Das

aus dem Speicher kommende Wasser wird erwärmt und erneut in den Speicher zurückgeleitet. Damit berechnet werden kann, wie viel Wärme innerhalb der Wärmepumpe erzeugt wird, müssen sowohl Außentemperatur als auch Temperatur des Speicherwassers mit einbezogen werden. Beide Temperaturen, wie auch die Zieltemperatur des Wassers beeinflussen direkt die Effizienz der der Wärmepumpe. Diese Kennzahl wird bei der Wärmepumpe als „coefficient of performance“ (CoP) bezeichnet und beschreibt das Verhältnis von Wärmeleistung und der benötigten Antriebsleistung.[11] Dabei variiert der CoP sowohl zwischen den unterschiedlich leistungsstarken Wärmepumpen als auch je nach momentanem Betriebspunkt der Wärmepumpe. Die erforderlichen Daten wurden für die gesamte Baureihe „aroTHERM plus“ von dem Wärmepumpenhersteller Vaillant zur Verfügung gestellt. Die Baureihe umfasst Luftwärmepumpen zwischen 3 kW und 12 kW, deren CoP, Heizleistung und elektrischer Verbrauch mithilfe von Simulationen bei verschiedenen Außen- und Vorlauftemperaturen zusammengefasst wurden.[12] Die am Prüfstand des GWI aufgebaute Wärmepumpe bietet eine maximale Wärmeleistung von 11 kW. Für die Simulationen wurde der Datensatz der 12 kW Wärmepumpe entsprechend herunterskaliert.

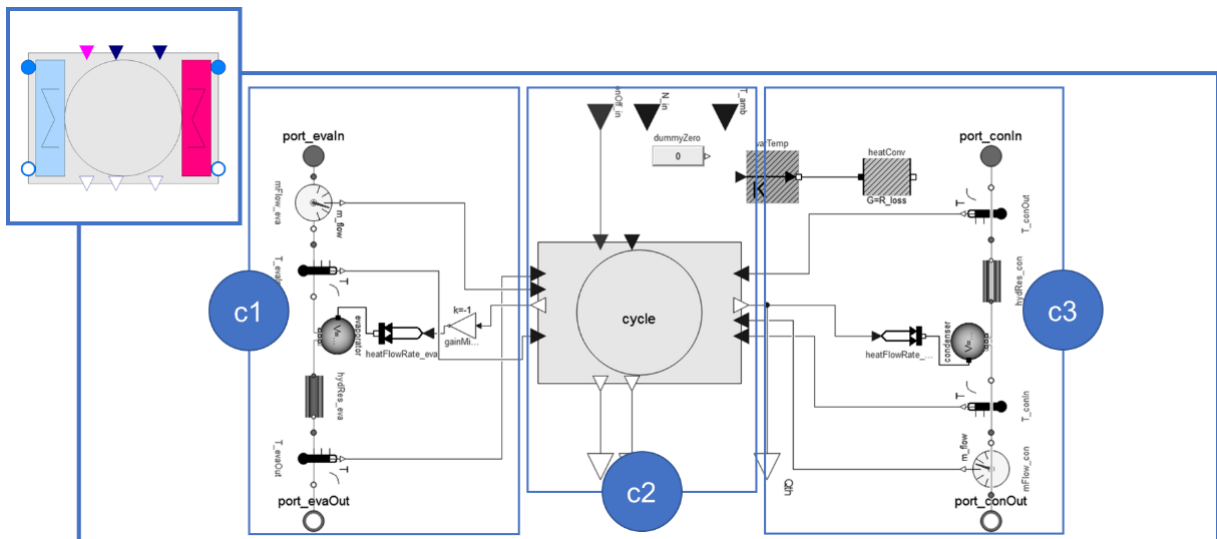


Abbildung 10 - Symbol- und Detailansicht in Dymola. Komponente: Wärmepumpe





Tabelle 2 – Daten WP 65°C

| Outdoorair temperature |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 40% |     | 50% |     | 60% |     |     |     |     |  |
|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
|                        | 120 | 115 | 110 | 105 | 97  | 95  | 90  | 85  | 80  | 75  | 70  | 65  | 60  | 55  | 50  | 45  | 40  | 35  | 30  |  |
| -20                    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
| -19                    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
| -18                    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
| -17                    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
| -16                    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
| -15                    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
| -14                    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
| -13                    |     |     |     |     |     |     |     | 1,3 | 1,3 | 1,2 | 1,1 | 1,0 | 1,0 |     |     |     |     |     |     |  |
| -12                    |     |     |     |     |     |     |     | 1,4 | 1,3 | 1,3 | 1,1 | 1,1 | 1,0 |     |     |     |     |     |     |  |
| -11                    |     |     |     |     |     |     |     | 1,5 | 1,4 | 1,3 | 1,2 | 1,1 | 1,1 |     |     |     |     |     |     |  |
| -10                    |     |     |     |     |     |     |     | 1,5 | 1,5 | 1,4 | 1,4 | 1,2 | 1,2 | 1,1 | 1,0 |     |     |     |     |  |
| -9                     |     |     |     |     |     |     |     | 1,5 | 1,5 | 1,4 | 1,4 | 1,3 | 1,2 | 1,2 | 1,0 |     |     |     |     |  |
| -8                     |     |     |     |     |     | 1,6 | 1,6 | 1,5 | 1,5 | 1,4 | 1,3 | 1,3 | 1,2 | 1,1 | 1,0 | 1,0 |     |     |     |  |
| -7                     |     |     |     |     | 1,6 | 1,6 | 1,7 | 1,6 | 1,5 | 1,5 | 1,4 | 1,3 | 1,3 | 1,1 | 1,1 | 1,0 | 1,0 |     |     |  |
| -6                     |     |     |     |     | 1,6 | 1,7 | 1,7 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,5 | 1,4 | 1,4 | 1,3 | 1,2 | 1,2 | 1,1 |     |     |  |
| -5                     |     |     |     |     | 1,6 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,6 | 1,5 | 1,5 | 1,4 | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,0 |     |  |
| -4                     |     |     |     |     | 1,7 | 1,8 | 1,8 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,5 | 1,4 | 1,5 | 1,4 | 1,1 |     |  |
| -3                     |     |     |     |     | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,3 | 1,0 |  |
| -2                     |     |     |     |     | 1,8 | 1,8 | 1,9 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,7 | 1,7 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,4 | 1,1 |  |
| -1                     |     |     |     |     | 1,8 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,5 | 1,2 |  |
| 0                      |     |     |     |     | 1,8 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,5 | 1,2 |  |
| 1                      |     |     |     |     | 1,8 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,5 | 1,3 |  |
| 2                      |     |     |     |     | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,6 | 1,4 |  |
| 3                      |     |     |     |     | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 2,0 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,7 | 1,5 |  |
| 4                      |     |     |     |     | 2,0 | 2,1 | 2,0 | 2,1 | 2,1 | 2,1 | 2,0 | 2,1 | 2,0 | 2,0 | 1,9 | 2,0 | 2,0 | 1,8 | 1,6 |  |
| 5                      |     |     |     |     | 2,1 | 2,1 | 2,1 | 2,1 | 2,1 | 2,2 | 2,1 | 2,1 | 2,1 | 2,1 | 2,0 | 2,1 | 2,1 | 1,9 | 1,8 |  |
| 6                      |     |     |     |     | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,1 | 2,1 | 2,2 | 2,2 | 2,0 | 1,9 |  |
| 7                      |     |     |     |     | 2,2 | 2,3 | 2,2 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,2 | 2,3 | 2,3 | 2,2 | 2,2 | 2,3 | 2,3 | 2,2 | 2,0 |  |
| 8                      |     |     |     |     | 2,2 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,2 | 2,1 |  |
| 9                      |     |     |     |     | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,4 | 2,3 | 2,4 | 2,4 | 2,3 | 2,4 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,3 | 2,2 |  |
| 10                     |     |     |     |     | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,5 | 2,4 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,4 | 2,3 |  |
| 11                     |     |     |     |     | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,5 | 2,4 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,6 | 2,5 | 2,3 |  |
| 12                     |     |     |     |     | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,5 | 2,4 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,5 | 2,4 |  |
| 13                     |     |     |     |     | 2,4 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 2,8 | 2,6 | 2,5 |  |
| 14                     |     |     |     |     | 2,5 | 2,5 | 2,6 | 2,5 | 2,6 | 2,6 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 2,9 | 2,7 | 2,6 |  |
| 15                     |     |     |     |     | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 2,9 | 2,8 | 2,7 |  |
| 16                     |     |     |     |     | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 3,0 | 2,8 | 2,7 |  |
| 17                     |     |     |     |     | 2,6 | 2,7 | 2,6 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,9 | 3,0 | 2,8 | 2,7 |     |  |
| 18                     |     |     |     |     | 2,7 | 2,6 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,7 | 2,9 | 3,0 | 2,9 | 2,8 |     |  |
| 19                     |     |     |     |     | 2,7 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 2,7 | 2,8 | 2,7 | 2,8 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 3,0 | 2,9 | 2,8 |     |  |
| 20                     |     |     |     |     | 2,7 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 2,7 | 2,8 | 2,7 | 2,8 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 3,0 | 2,9 | 2,8 |     |  |

Zum Vergleich wurden in Tabelle 2 die Daten für eine Vorlauftemperatur von 65 °C bei verschiedenen Außentemperaturen und Leistungszuständen aufgeführt. Mit Werten zwischen 1,0 und 3,0 liegen die CoP durch die höhere Vorlauftemperatur auf einem deutlich niedrigeren Niveau. Da die schlechtesten Wirkungsgrade bei niedrigen Außentemperaturen tendenziell bei niedrigen Leistungen zu finden sind, kann auch die in Tabelle 1 beschriebene Struktur nicht übertragen werden. Im Gegensatz zu der zuvor gezeigten Struktur stellt die blau markierte, maximale Leistung teilweise den optimalen Betriebspunkt dar, wobei insgesamt bei niedrigen Außentemperaturen eine höhere Leistung mit besseren Wirkungsgraden verbunden ist. Da dieser Trend für höhere Außentemperaturen nicht erkennbar ist, kann hier keine eindeutige Struktur beschrieben werden.

Da im Modell der Wärmepumpe lediglich ein Temperaturniveau und ein Leistungspunkt hinterlegt werden kann, bietet dieses Modell nicht die Möglichkeit zur vollständigen Erfassung des Datensatzes. Die in Tabelle 1 und Tabelle 2 aufgezeigten Unterschiede der CoP verdeutlichen jedoch, dass die Berücksichtigung mehrerer Leistungsniveaus und Vorlauftemperaturen von Nöten ist. Aus diesem Grund wurde im Modell für die vier Vorlauftemperaturniveaus von 35 °C, 45 °C, 55 °C und 65°C ein Datensatz für die maximale sowie die optimale Leistung hinterlegt. Die in Abbildung 1 dargestellte Wärmepumpe zur Beladung des Pufferspeichers enthält dementsprechend insgesamt acht verschiedene Wärmepumpen, die stellvertretend für die unterschiedlichen Leistungspunkte und Vorlauftemperaturen stehen.

## 2.7 Brennwertkessel

Das verwendete Modell für den Brennwertkessel stammt aus der AixLib und kann durch entsprechende Parameter stellvertretend für sämtliche Heizkessel genutzt werden. Die Komponente besteht aus einem Wasservolumen, das durch einen In- und einen Output and externe Volumenströme

angeschlossen werden kann. Eine innere Steuerungseinheit bietet die Möglichkeit diesem Wasservolumen einen Wärmestrom anzulegen, durch den das Wasser erwärmt werden soll. In der Komponente können die Eigenschaften des Kessels wie Wärmeleistungen und Wirkungsgrade durch eine Liste hinterlegt werden. Über die externen Ports kann der Kessel sowohl ein- und ausgeschaltet als auch der Leistungszustand geregelt werden. Je nach Leistung und hinterlegten Daten wird so eine Wärmeleistung berechnet, die an das Wasser abgegeben wird. Durch Wärmeleistung und Wirkungsgrad kann an dieser Stelle der Erdgasverbrauch ermittelt werden. Der optionale Nachtmodus wird in dieser Arbeit deaktiviert, da sämtliche Vorgänge durch die vorgestellte externe Steuerung erfolgen sollen. Die vorgestellte Funktionsweise von Brennwertkesseln, die durch Kondensation des Wasserdampfes Wirkungsgrade von über 100 % erreichen können, wird in diesem Modell nicht berücksichtigt. Lediglich durch die höheren Wirkungsgrade kann die Brennwerttechnik im Modell implementiert werden.

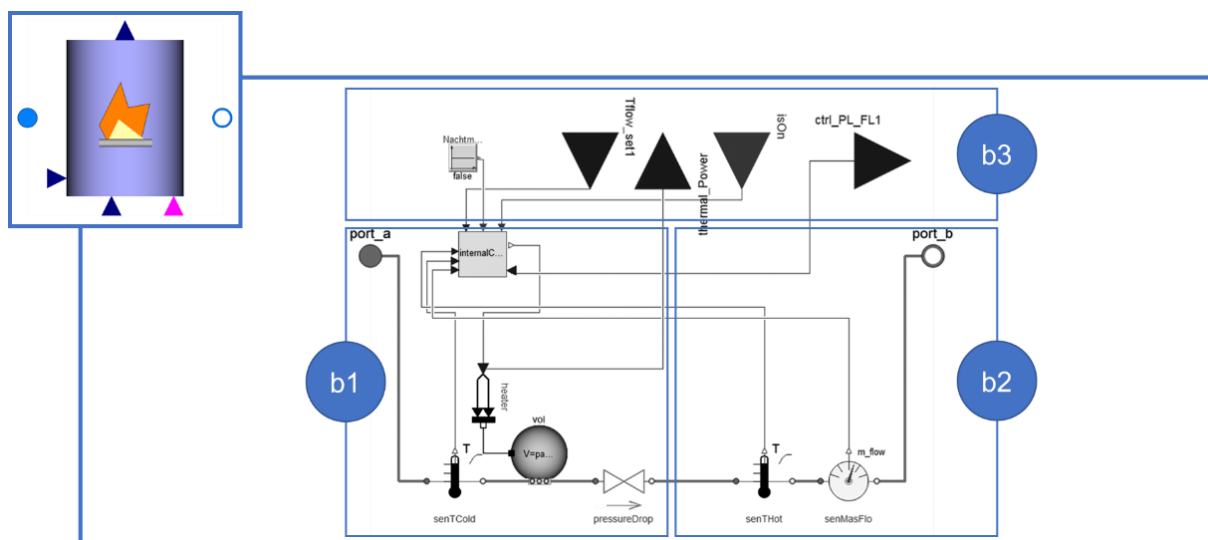


Abbildung 11 - Symbol- und Detailansicht in Dymola. Komponente: Brennwertkessel

## 2.8 Regelung der Wärmeerzeuger

Wird der Pufferspeicher durch die Wärmepumpe aufgeheizt, kann dementsprechend einer der acht Wärmepumpen angesteuert werden, um die Wärme zu liefern. Die zuvor beschriebenen Tabellen verdeutlichen, dass tendenziell immer eine möglichst niedrige Vorlauftemperatur zu wählen ist. Ist die Wärmeleistung im optimalen Betriebspunkt ausreichend, ist dieser der maximalen Leistung vorzuziehen. Lediglich bei den in Tabelle 2 blau und grün markierten Außentemperaturen ist die maximale Leistung identisch zur optimalen Leistung. Die Wahl auf die möglichst niedrige Vorlauftemperatur wird bestimmt durch die Solltemperatur des Pufferspeichers. Diese wiederum entspricht der zuvor beschriebenen aus der Heizkurve berechneten Solltemperatur der Vorlauftemperatur für die Fußbodenheizung.

$$\text{Pufferspeichertemperatur} = \text{Vorlauftemperatur der Fußbodenheizung}$$

Sobald die Solltemperatur die gemessene Speichertemperatur unterschreitet, wird im System ein Wärmebedarf registriert und die Wärmequelle aktiviert. Im hybriden System besteht die Möglichkeit neben der Wärmepumpe auch den Brennwertkessel zu aktivieren. Dabei können bei der parallelen Betriebsweise beide Erzeuger gleichzeitig eingeschaltet sein oder bei der alternativen Betriebsweise jeweils nur einer der beiden Wärmequellen. In den durchgeführten Simulationen wurde das System lediglich im alternativen Modus betrieben. Bei der Wahl der Wärmequelle ist die Außentemperatur und der damit verbundene Bivalenzpunkt der entscheidende Faktor. Liegt die Außentemperatur über dem zuvor festgelegten Bivalenzpunkt liefert ausschließlich die Wärmepumpe die benötigte Wärme. Um die niedrigen CoP der Wärmepumpe bei tiefen Außentemperaturen zu umgehen, übernimmt der Brennwertkessel den Betrieb, sobald die Außentemperaturen unter den Bivalenzpunkt fallen. Die Effizienz des Brennwertkessels wird durch die Außentemperaturen nicht direkt beeinflusst.

Zusätzlich zur Wahl der Wärmequelle muss die Leistung der jeweils aktiven Komponente ermittelt werden. In der programmierten Regelung ist diese Abhängig von der Höhe der Abweichung zwischen Soll- und Speichertemperatur. Überschreitet die Differenz einen festgelegten Grenzwert von 3 K, wird im System angenommen, dass der aktuelle Leistungszustand nicht ausreicht, um den Pufferspeicher ausreichend aufzuwärmen. In diesem Fall geht die Wärmepumpe von dem optimalen auf den maximalen Leistungszustand über. Im Gegensatz zur Wärmepumpe kann das Modell des Brennwertkessels seine Leistung modulieren. Entsprechend des realen Brennwertkessels am Prüfstand kann die Leistung zwischen 20 % und 100 % stufenlos variieren.[13] Entsprechend steigt die Leistung des Brennwertkessels bei wachsender Differenz von Soll- und Speichertemperatur an, bis bei einer Differenz von 5 K die maximale Leistung abgerufen wird. Die Regelung der Wärmeerzeuger ist schematisch in Abbildung 12 dargestellt.

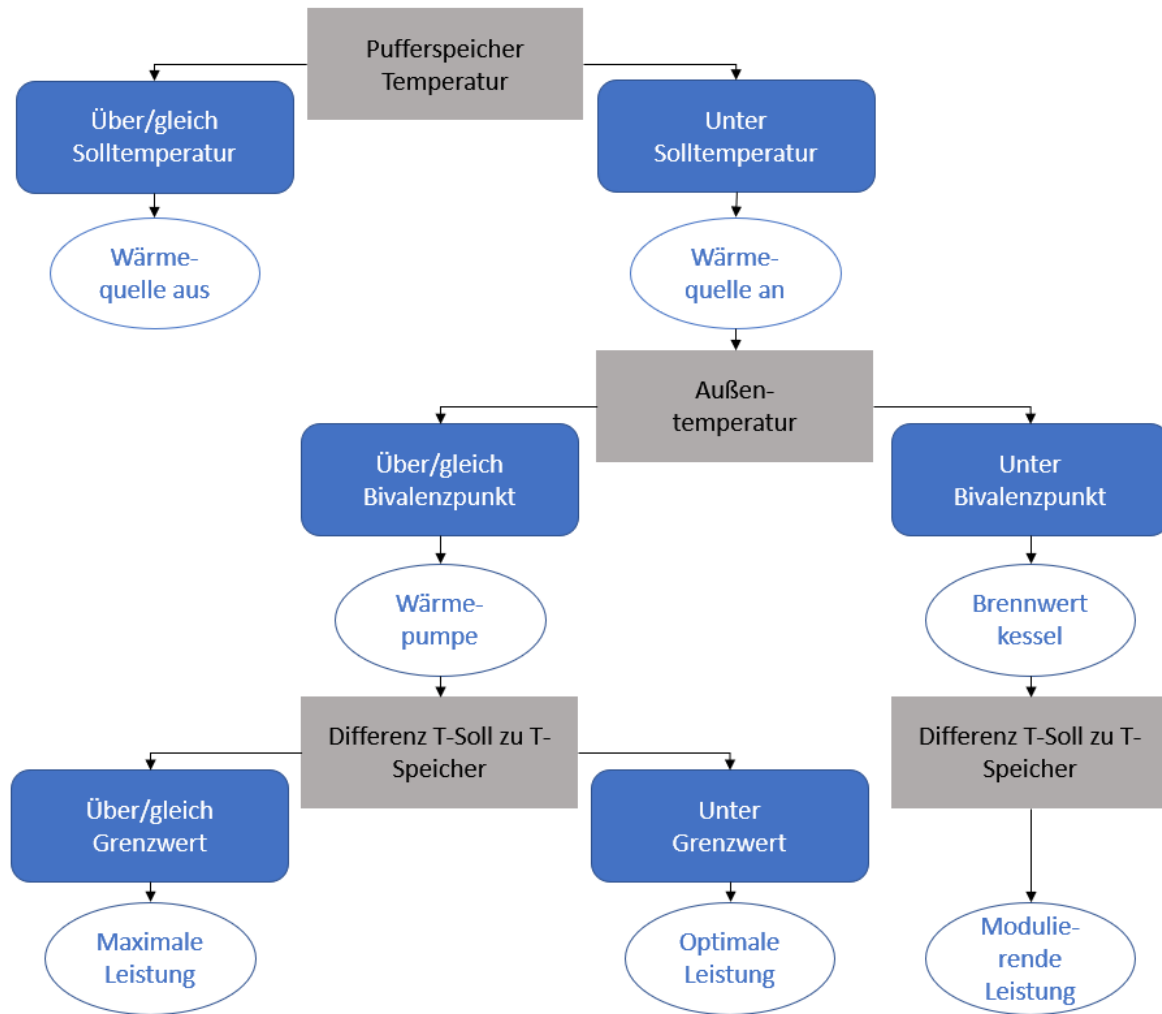


Abbildung 12 - Regelungsschema der Wärmequellen

## 2.9 Trinkwasserspeicher

Neben dem Pufferspeicher, aus dem das erwärmte Wasser für die Heizung bereitgestellt wird, befindet sich ein weiterer Speicher für die Trinkwassererwärmung innerhalb des Modells, für den die gleiche Komponente verwendet wurde (vgl. Abbildung 6). Die im Prüfstand aufgebaute hybride WP beinhaltet einen intern verbauten Speicher mit einem Wasserinhalt von 130 Litern, dessen Dimensionierung für Trinkwasserspeicher im Modell übernommen wurde.[13] Zusätzlich wurde für den Trinkwasserspeicher der Heizstab aktiviert. Heizstäbe werden genutzt, um den primären Wärmeerzeuger bei hohem Wärmebedarf zu unterstützen.[14] Im hier beschriebenen Modell wird der dafür vorgesehene Wärme-Port jedoch nicht dafür genutzt dem Speicher Wärme hinzuzufügen, sondern zu entziehen. Dafür wird an den Heizstab eine Kälteleistung angelegt, die dem Wärmebedarf für die Trinkwasseraufbereitung eines Einfamilienhauses entsprechen soll.

## 2.10 Trinkwasserprofil

Um den Wärmebedarf für die Trinkwasseraufbereitung nachzubilden, wurde ein zuvor am GWI erstelltes Lastprofil für drei Personen genutzt, das nach der VDI-Richtlinie 4655 erstellt wurde. Dafür wurden sämtliche Tage eines Wetterprofils über ein Jahr in verschiedene Kategorien eingeteilt. Die

Einteilung erfolgte unter Berücksichtigung der Jahreszeit (Sommer/Winter/Übergang), dem Wochentag (Werktag/Wochenende) und dem Wetter (heiter/bedeckt/beliebig). Jedem Tagestypen wurde anschließend ein Wärmebedarf zugeordnet.

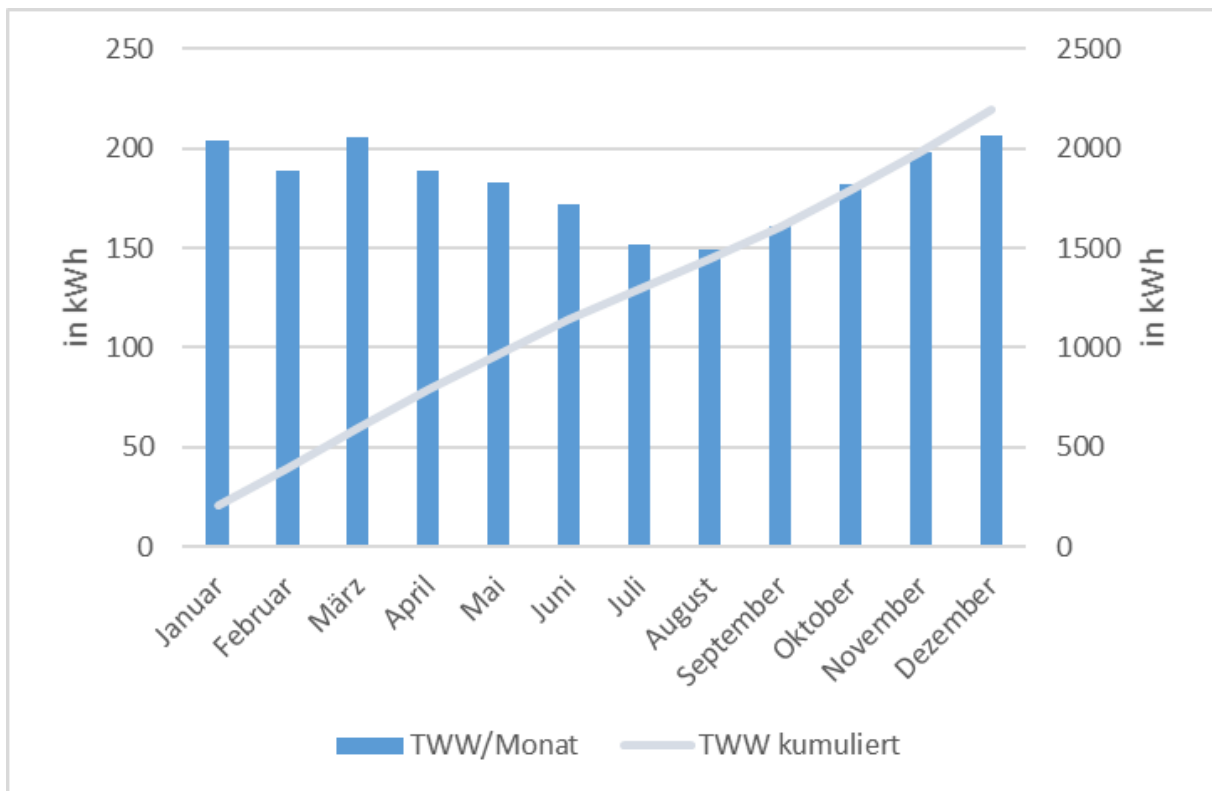


Abbildung 13 - Jahresprofil des Wärmebedarfs für Trinkwasser

Der Jahresverlauf dieses Wärmebedarfsprofils ist in Abbildung 13 dargestellt. Der Bedarf zwischen den einzelnen Monaten schwankt zwischen 206 kWh (Dezember) und 149 kWh (August), wobei in den wärmeren Monaten tendenziell ein niedrigerer Bedarf zu erkennen ist. Insgesamt wird durch das angelegte Profil ein Wärmebedarf von 2190 kWh vorgegeben. Die Temperatur des Speicherwassers soll zunächst stetig auf 60°C gehalten werden.

Durch die hier beschriebene Methode im Speicher einen Wärmebedarf zu erzeugen, werden an der Stelle des Wärme-Ports des Heizstabes teilweise Temperaturen erreicht, die zum Gefrieren des Wassers und somit zum Abbruch der Simulation führen würde. Aus diesem Grund wurde die Kälteleistung des Profils auf einen Wert von 1 kW begrenzt und der Überhang auf die folgenden Zeitintervalle übertragen. Da der Speicher jederzeit Trinkwasser mit einer Temperatur von 60°C liefern soll, wird durch diese Begrenzung über längere Zeitperioden hinweg ein Wärmebedarf des Systems registriert, als im Trinkwasserbedarfsprofil vorgesehen ist. Daraus folgert, dass für die Trinkwassererwärmung eine zusätzliche Wärmepumpe und ein zusätzliches Gas-Brennwertgerät in das Modell integriert werden musste. Ansonsten könnte die für die Trinkwasserversorgung aktivierte Wärmequelle nicht zeitgleich Wärme für den Pufferspeicher bereitstellen.

## 2.11 Photovoltaik

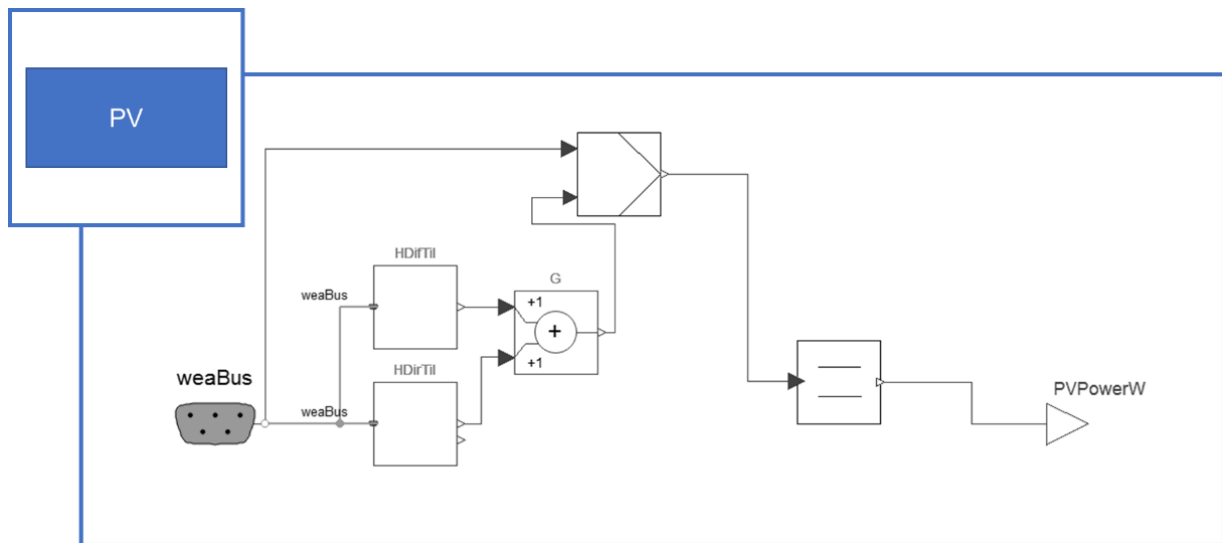


Abbildung 14 - Symbol- und Detailansicht in Dymola. Komponente: Photovoltaikmodul

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Komponenten zur Wärmeversorgung wurde in das Modell eine Photovoltaikanlage (PV,11) integriert. Für die PV-Anlage wurde das Modell „PVSystemTMY3“ (vgl. Abbildung 14) aus der Aixlib genutzt. In diesem Modell können anlagenspezifische Daten wie Modulwirkungsgrad, Modulgröße, Modulanzahl sowie Ausrichtung und Neigung der Module auf dem Dach hinterlegt werden. Die hinterlegten Angaben über Wirkungsgrad und Modulnennleistung entsprechen mit 300 Wp und 18,3 % dem Modul „auroPOWER“ der Firma Vaillant. Da die Peakleistung des Systems entsprechend den am häufigsten verbauten PV-Anlagen auf 10 kWp begrenzt wurde, besteht die Anlage aus insgesamt 33 Modulen. Zusammen mit Temperatur und Strahlungsdaten aus dem Wetterprofil wird so die vom Modul generierte Leistung berechnet. Ebenfalls berücksichtigt wird der Wirkungsgrad des Wechselrichters, der den Gleichstrom in Wechselstrom umwandelt. Je nach Ausrichtung und Neigung der Modulfläche können über das simulierte Jahr hinweg unterschiedliche Strommengen durch das PV-System bereitgestellt werden.

|          |     | Neigung |     |     |     |      |     |     |     |     |     |
|----------|-----|---------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|
|          |     | 0°      | 10° | 20° | 30° | 40°  | 50° | 60° | 70° | 80° | 90° |
| Süd      | 0   | 85%     | 91% | 96% | 99% | 100% | 99% | 96% | 91% | 85% | 77% |
|          | 10  | 85%     | 91% | 96% | 99% | 100% | 99% | 96% | 92% | 86% | 79% |
|          | 20  | 85%     | 91% | 96% | 99% | 100% | 99% | 96% | 92% | 86% | 79% |
|          | 30  | 85%     | 91% | 95% | 98% | 98%  | 97% | 94% | 90% | 85% | 78% |
|          | 40  | 85%     | 90% | 94% | 96% | 96%  | 95% | 92% | 88% | 83% | 77% |
|          | 50  | 85%     | 89% | 93% | 94% | 93%  | 92% | 89% | 85% | 80% | 74% |
|          | 60  | 85%     | 88% | 91% | 91% | 90%  | 88% | 85% | 81% | 76% | 71% |
|          | 70  | 85%     | 87% | 89% | 88% | 86%  | 84% | 80% | 76% | 72% | 67% |
|          | 80  | 85%     | 86% | 86% | 85% | 82%  | 79% | 75% | 71% | 67% | 62% |
| Ost/West | 90  | 85%     | 85% | 84% | 81% | 77%  | 74% | 70% | 66% | 62% | 57% |
|          | 100 | 85%     | 84% | 81% | 77% | 73%  | 68% | 64% | 60% | 56% | 52% |
|          | 110 | 85%     | 82% | 79% | 74% | 68%  | 63% | 59% | 55% | 51% | 48% |
|          | 120 | 85%     | 81% | 76% | 70% | 64%  | 58% | 53% | 50% | 46% | 43% |
|          | 130 | 85%     | 80% | 74% | 67% | 61%  | 54% | 49% | 45% | 42% | 39% |
|          | 140 | 85%     | 79% | 72% | 65% | 58%  | 51% | 45% | 41% | 39% | 36% |
|          | 150 | 85%     | 78% | 71% | 63% | 55%  | 48% | 43% | 39% | 36% | 33% |
|          | 160 | 85%     | 78% | 70% | 62% | 54%  | 47% | 42% | 38% | 35% | 32% |
|          | 170 | 85%     | 77% | 69% | 61% | 54%  | 47% | 43% | 39% | 35% | 32% |
| Nord     | 180 | 85%     | 77% | 69% | 62% | 55%  | 49% | 44% | 40% | 36% | 33% |

Abbildung 15 - Stromausbeute der Photovoltaikanlage bei unterschiedlicher Ausrichtung und Neigung im Bezug auf die optimale Auslegung

Die höchste Stromausbeute könnte durch die einseitig ausgelegte Anlage bei einer Südausrichtung und einer Neigung von 40° erreicht werden. Jährlich kann die PV-Anlage in dieser Konstellation eine Energiemenge von 9.709 kWh erzeugen. Die geringste Stromausbeute wird in den nach Norden ausgerichteten Varianten erreicht.



## 3 DARSTELLUNG UND DISKUSSION DER SIMULATIONSERGEBNISSE

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die Simulationsergebnisse für den Einsatz einer hybriden WP in Einfamilienhäusern der Baualtersklasse aus den Jahren 1975, 1985, 2005 und 2015 gegeben. Dabei liegt der Schwerpunkt auf dem Anlagenbetrieb für verschiedene BVP zwischen  $-6\text{ °C}$  und  $6\text{ °C}$ . Dargestellt werden folgende Punkte:

- Anteilige Wärmebedarfsdeckung aufgeteilt nach Technologie (BWK/ WP) und notwendiger Vorlauftemperatur
- Jährlicher Energiebedarf zur Wärmebedarfsdeckung aufgeteilt in Strom und Erdgas
- Jahresprofil der Energiebedarfe in stündlicher Auflösung für die BVP  $-6\text{ °C}$ ,  $0\text{ °C}$  und  $6\text{ °C}$  für Strom und Erdgas

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird eine ökologische Auswertung für die nutzungsbedingten Emissionen durch den Einsatz von Strom und Erdgas gegeben. Darüber hinaus wird das  $\text{CO}_2$ -Einsparpotenzial im Vergleich zur Wärmebedarfsdeckung ausschließlich mittels BWK für die untersuchten BVP gegeben.

In der ökonomischen Untersuchung werden die betriebsbedingten Kosten durch Strom- und Erdgaseinsatz zur Wärmebedarfsdeckung betrachtet. Dargestellt wird zum einen eine Übersichtsmatrix der kosteneffizientesten BVP für unterschiedliche Strom- und Erdgaspreiskonstellationen. Zum anderen die jährlichen Kostensensitivität bei steigenden Strom- und Erdgasbezugspreisen.

### 3.1 Ergebnisse Baualtersklasse 1975

Im folgenden Abschnitt werden die Simulationsergebnisse für das Gebäude mit der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 beschrieben. In Abbildung 16 werden die Anteile der ganzjährigen Wärmebedarfsdeckung durch WP und BWK dargestellt.

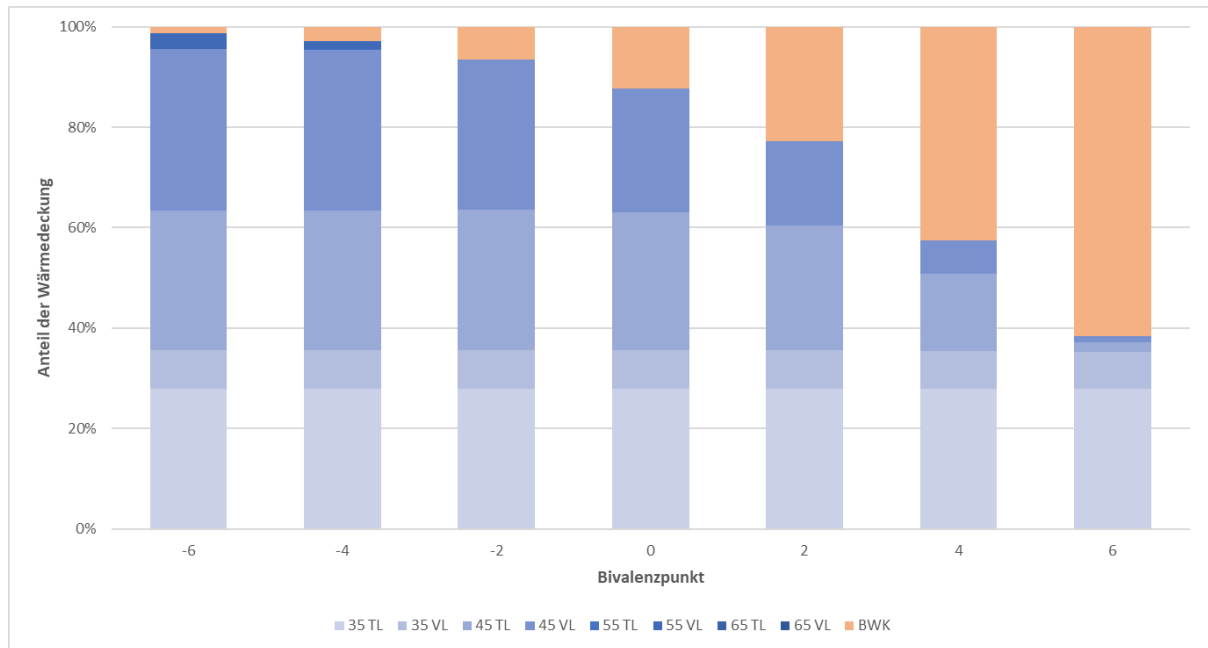


Abbildung 16 - Anteilige Wärmebedarfsdeckung für Einfamilienhäuser durch hybride WP mit Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 aufgeteilt nach Technologieeinsatz und notwendiger Vorlauftemperatur

Bei einem BVP von  $-6\text{ °C}$  wird die Wärme zu 98,8 % nahezu ganzjährig durch die WP bereitgestellt. Rund 35,7 % können dabei mit einer Vorlauftemperatur von  $35\text{ °C}$ , 59,8 % müssen mit einer Vorlauftemperatur von  $45\text{ °C}$  und 3,3 % mit einer Vorlauftemperatur von  $55\text{ °C}$  gedeckt werden. Der Wärmeanteil, der durch eine Vorlauftemperatur von  $35\text{ °C}$  erzeugt wird, bleibt über alle untersuchten Bivalenzpunkte konstant. Die restlichen 1,2 % werden bei Temperaturen von unter  $-6\text{ °C}$  durch den BWK bereitgestellt. Beim Bivalenzpunkt  $-4\text{ °C}$  sehen die Ergebnisse identisch aus, bis auf das der BWK nun mit 2,9 % etwas mehr an der Wärmebereitstellung übernimmt. Der Anteil für die Vorlauftemperaturen  $35\text{ °C}$  und  $45\text{ °C}$  bleiben gleich, der für  $55\text{ °C}$  sinkt auf 1,7 %. Für den Bivalenzpunkt  $-2\text{ °C}$  genügt eine Wärmebereitstellung mit einer maximalen Vorlauftemperatur der Wärmepumpe von  $45\text{ °C}$ . Anteilig mit 57,9 % kann die Wärmeversorgung mit einer Vorlauftemperatur von  $45\text{ °C}$  der WP dargestellt werden. Die Wärmeerzeugung durch den BWK liegt bei 6,5 %. Bei einem Bivalenzpunkt von  $0\text{ °C}$  liegt die Wärmebereitstellung mit einer Vorlauftemperatur von  $45\text{ °C}$  bei 52,1 %, der Anteil des BWK bei 12,3 %. Für die Bivalenzpunkte  $2\text{ °C}$  und  $4\text{ °C}$  stellt die WP mit einer Vorlauftemperatur von  $45\text{ °C}$  41,7 % bzw. 22 %, der BWK 22,7 % bzw. 42,5 % der Wärme bereit. Wird ein Bivalenzpunkt von  $6\text{ °C}$  gewählt werden nur noch für 3,3 % des Wärmebedarfs eine Vorlauftemperatur von  $45\text{ °C}$  benötigt, der BWK stellt weiter 61,5 % bereit.

Für das Gebäude mit einer Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 kann gesagt werden, dass die hybride WP die Wärmebereitstellung in einem Bivalenzpunktbereich von  $-6\text{ °C}$  bis  $6\text{ °C}$  technisch erfüllt. Es soll aber nochmals darauf hingewiesen werden, das ältere Gebäude häufig nicht über Fußbodenheizungen verfügen.

In Abbildung 17 werden die jährlichen Strom- und Gasbedarfe bei unterschiedlichen BVP zur Wärmeversorgung dargestellt.

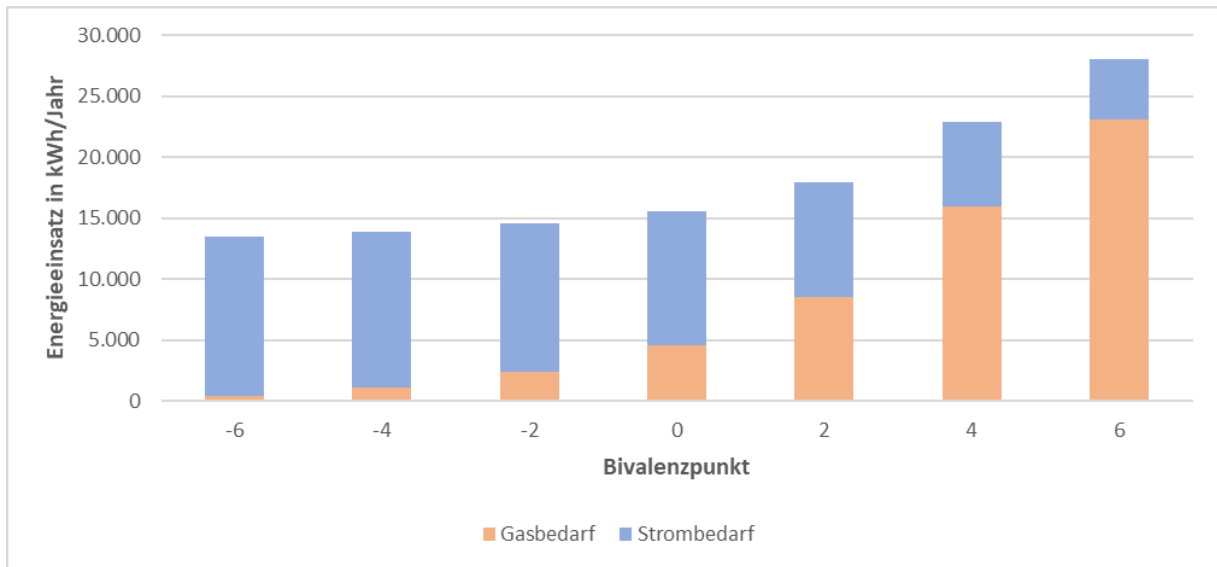


Abbildung 17 – Jährliche Energiebedarfe für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 aufgeteilt in Strom und Erdgas

Für die BVP zwischen  $-6\text{ °C}$  und  $0\text{ °C}$  wird mit  $13.037\text{ kWh}$ ,  $12.755\text{ kWh}$ ,  $12.102\text{ kWh}$  und  $10.996\text{ kWh}$  überwiegend Strom zur Wärmeerzeugung verwendet. Der Erdgasbedarf liegt in diesem Bereich bei  $471\text{ kWh}$ ,  $1.104\text{ kWh}$ ,  $2.437\text{ kWh}$  und  $4.608\text{ kWh}$ . Bei einem BVP von  $2\text{ °C}$  ist Wärmeproduktion nahezu ausgeglichen ( $9.441\text{ kWh}$  Strom und  $8.498\text{ kWh}$  Erdgas, was einem Verhältnis von  $53\%$  zu  $47\%$  entspricht). Im BVP-Bereich von  $4\text{ °C}$  bis  $6\text{ °C}$  stellt der BWK mit  $23.057\text{ kWh}$  und  $28.386\text{ kWh}$  den Großteil der Wärme bereit. Der Stromverbrauch liegt bei  $7.016\text{ kWh}$  und  $4.969\text{ kWh}$ .

Aus den Energiebedarfen lässt sich ableiten, dass die WP bei höheren BVP energetisch effizienter ist. Dies liegt u.a. daran, dass die WP bei höheren BVP seltener bzw. gar nicht Vorlauftemperaturen von  $55\text{ °C}$  oder  $45\text{ °C}$  bereitstellen muss. Zwar besitzt die WP auch bei einem BVP von  $-6\text{ °C}$  eine größere Effizienz als der BWK, allerdings können die Energieformen Strom und Gas in diesem Teilprojekt nur bedingt verglichen werden, da davon ausgegangen wird, dass insbesondere die energiebedingten Emissionen über das ganze Jahr konstant sind. Im späteren Verlauf des Abschnitts wird auf ökologische und ökonomische Auswirkungen näher eingegangen.

Im Folgenden sollen die zeitaufgelösten Jahresprofile der hybriden WP zu Bereitstellung des HWW beschrieben werden. So ist in Abbildung 18 das Jahresprofil mit halbstündlicher Auflösung für den Bivalenzpunkt  $-6\text{ °C}$  dargestellt. Während die WP nahezu das ganze Jahr die Wärmebereitstellung sicherstellt, liefert der BWK ausschließlich während zwei kälteren Phasen im Februar und im Dezember die Wärme. Die maximale Last an der WP liegt mehrfach bei  $4\text{ kW}$ , während der BWK eine Last von bis zu  $20\text{ kW}$  hat.

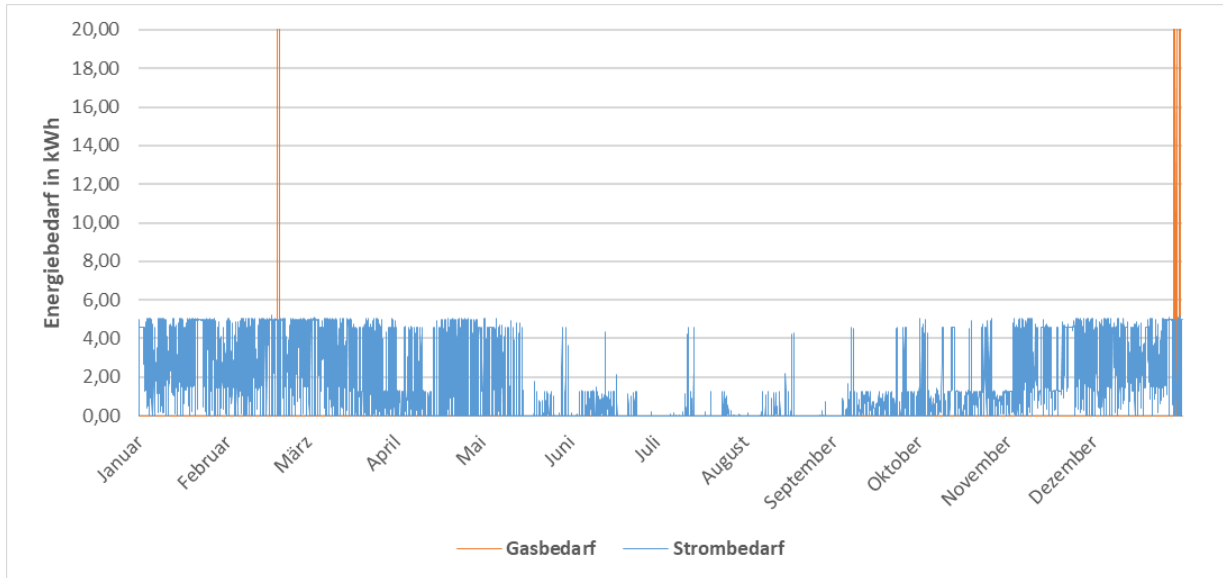


Abbildung 18 - Jahresprofil der Energiebedarfe für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 bei einem Bivalenzpunkt von  $-6\text{ °C}$  für Strom und Gas

In Abbildung 19 ist das Lastprofil für den Bivalenzpunkt von  $0\text{ °C}$  abgebildet. Im Vergleich zu Abbildung 18 wird der BWK anteilig mehr zur Wärmeversorgung eingesetzt. So gibt es während der Heizperiode mehrere Phasen in denen der BWK betrieben wird. Die maximale Last der WP liegt weiterhin bei  $5,03\text{ kW}$ , die des BWK bei  $20\text{ kW}$ .

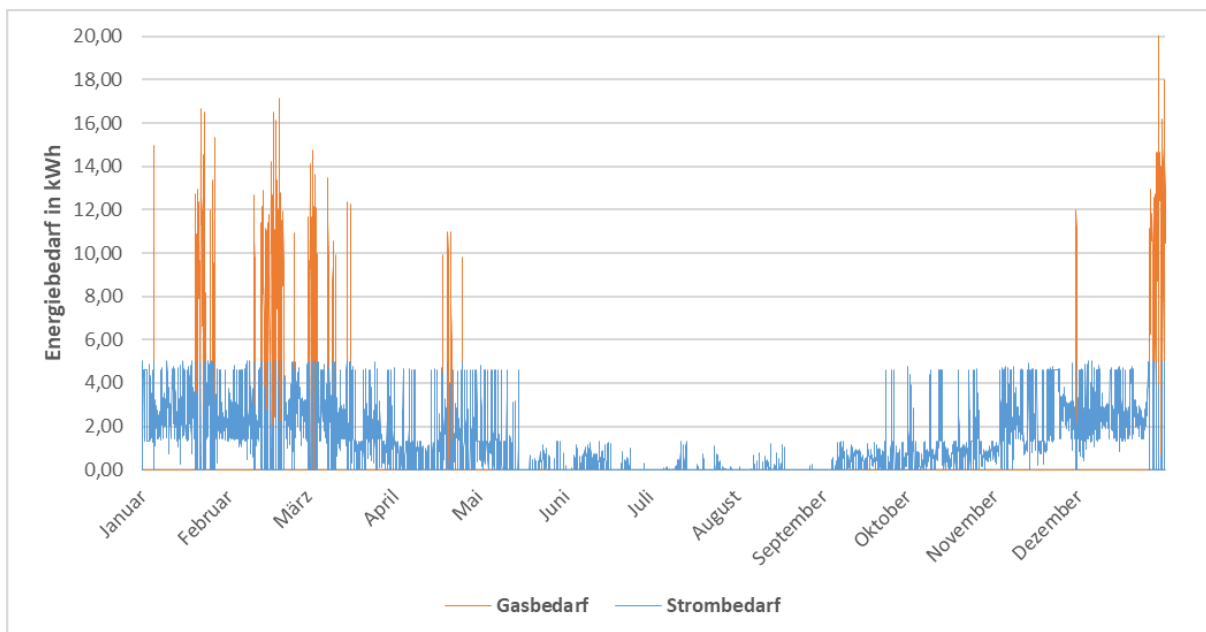


Abbildung 19 - Jahresprofil der Energiebedarfe für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 bei einem Bivalenzpunkt von  $0\text{ °C}$  für Strom und Gas

Mit einem BVP bei  $6\text{ °C}$  ist ein weiteres Jahreslastprofil in Abbildung 20 dargestellt. Der BWK übernimmt nun einen Großteil der Wärmeversorgung in der Heizperiode, während die WP vorrangig

die Wärmeversorgung für HWW von Juni bis September übernimmt. Die Spitzenlast an der WP liegt bei 4,78 kW und beim BWK bei 18,03 kW.

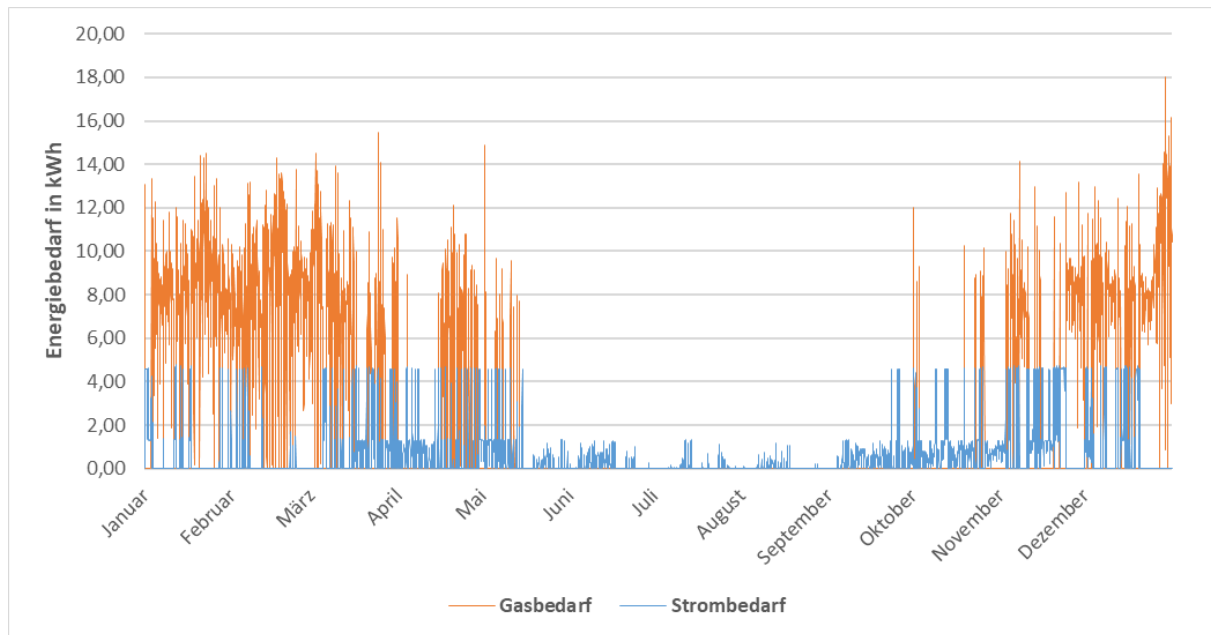


Abbildung 20 - Jahresprofil der Energiebedarfe für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 bei einem Bivalenzpunkt von 6 °C für Strom und Gas

### 3.2 Ergebnisse Baualtersklasse 1985

Im folgenden Abschnitt werden die Simulationsergebnisse für das mit Gebäude mit der Baualtersklasse aus dem Jahr 1985 beschrieben. In Abbildung 21 werden die Anteile der ganzjährigen Wärmebedarfsdeckung durch WP und BWK dargestellt.

Bei einem Bivalenzpunkt von -6 °C wird die Wärme zu 98,7 % fast vollständig durch die WP bereitgestellt. Im Gegensatz zum Gebäude mit der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 genügt für die Baualtersklasse aus 1985 eine Vorlauftemperatur von 45 °C. Mit 79,6 % wird ein Großteil der Wärmebereitstellung mit einer Vorlauftemperatur von 35 °C umgesetzt. Die weiteren 19,1 % werden bei einer Vorlauftemperatur bereitgestellt. Der Wärmeanteil, der durch eine Vorlauftemperatur von 35 °C erzeugt wird, bleibt bis zu einem BVP von 2 °C konstant. Die restlichen 1,2 % werden bei Temperaturen von unter -6 °C durch den BWK bereitgestellt. Bei den BVP -4 °C und 0 °C verschiebt sich die Wärmeerzeugung der WP bei einer Vorlauftemperatur mit 45 °C auf 17,2 %, 13,1 % und 6,2 % in Richtung BWK (3,2 %, 7,4 % sowie 14,4 %). Für die Bivalenzpunkte 2 °C bis 6 °C ist nur noch eine Vorlauftemperatur von 35 °C nötig. So liegen die Anteile für die Wärmebereitstellung für die BVP 2 °C bei 73,6 %, für 4 °C bei 53,1 % und für 6 °C bei 33,8 %. Der BWK stellt für die drei BVP anteilig 26,4 %, 47,0 % sowie 66,2 % Wärme zur Verfügung.

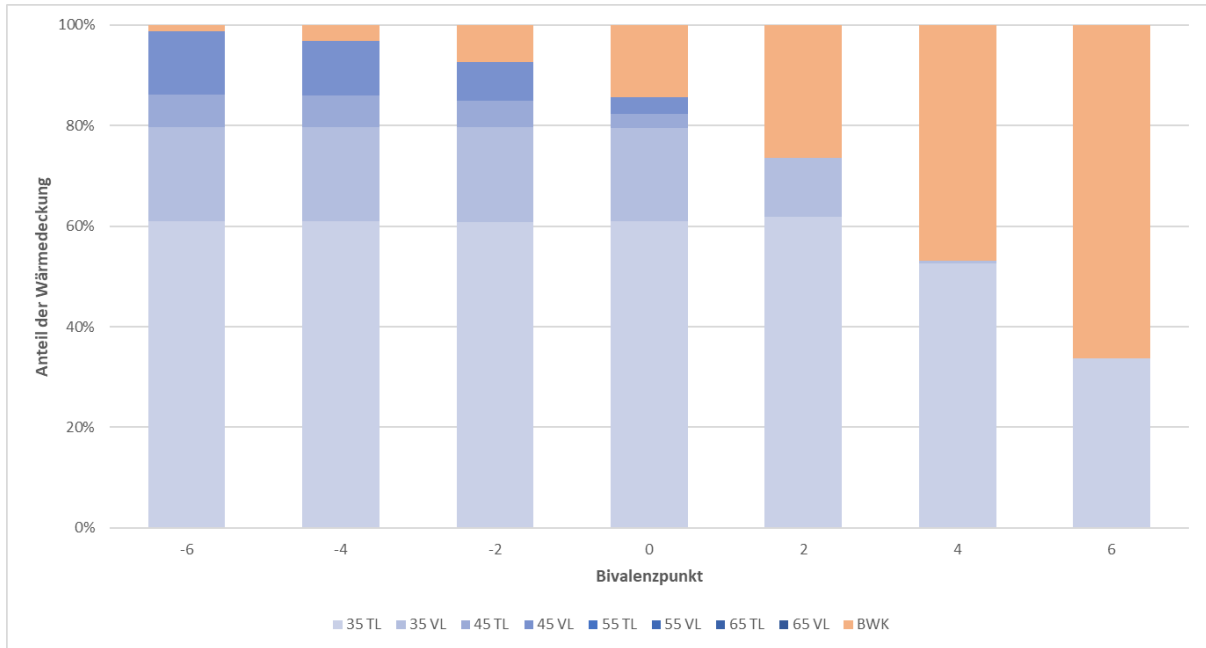


Abbildung 21 - Anteilige Wärmebedarfsdeckung für Einfamilienhäuser durch hybride WP mit Baualtersklasse aus dem Jahr 1985 aufgeteilt nach Technologieinsatz und notwendiger Vorlauftemperatur

In Abbildung 22 werden die jährlichen Strom- und Gasbedarfe bei unterschiedlichen Bivalenzpunkten zur Wärmeversorgung dargestellt.

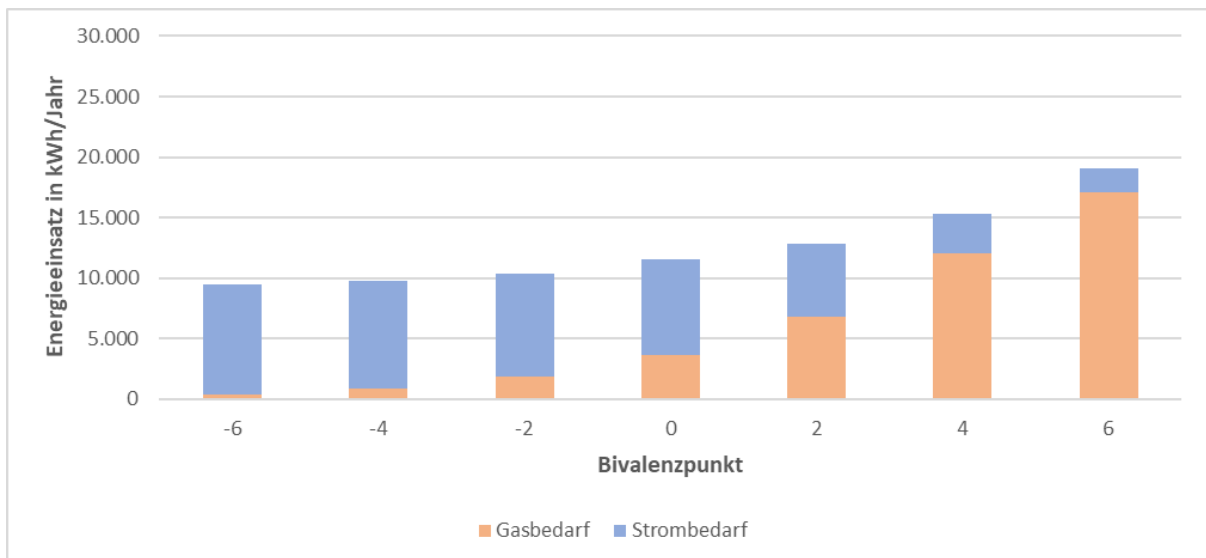


Abbildung 22 – Jährliche Energiebedarfe für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1985 aufgeteilt in Strom und Erdgas

Für die BVP zwischen  $-6\text{ °C}$  und  $0\text{ °C}$  wird mit 9.170 kWh, 8.958 kWh, 8531 kWh und 7.868 kWh überwiegend Strom zur Wärmeerzeugung verwendet. Der Erdgasbedarf liegt in diesem BVP-Bereich bei 332 kWh, 817 kWh, 1.873 kWh und 3.670 kWh. Bei einem Bivalenzpunkt von  $2\text{ °C}$  liegt der stromseitige Energieeinsatz nur leicht über dem Erdgasverbrauch (6.751 kWh Strom und 6.125 kWh Erdgas). Im BVP-Bereich von  $4\text{ °C}$  bis  $6\text{ °C}$  stellt der BWK mit 12.060 kWh und 17.050 kWh den Großteil der Wärme bereit. Der Stromverbrauch liegt bei 3.278 kWh und 2062 kWh.

Im Folgenden sollen die zeitaufgelösten Jahresprofile der hybriden WP zu Bereitstellung des HWW beschrieben werden. So ist in Abbildung 23 das Jahresprofil mit halbstündlicher Auflösung für den BVP  $-6\text{ °C}$  dargestellt. Während die WP, wie in Abbildung 18 nahezu das ganze Jahr die Wärmebereitstellung sicherstellt, liefert der BWK ausschließlich während zwei kälteren Phasen im Februar und im Dezember die Wärme. Die maximale Last an der WP liegt mehrfach bei  $4,95\text{ kW}$ , während der BWK eine maximale Last von  $12,26\text{ kW}$  hat.

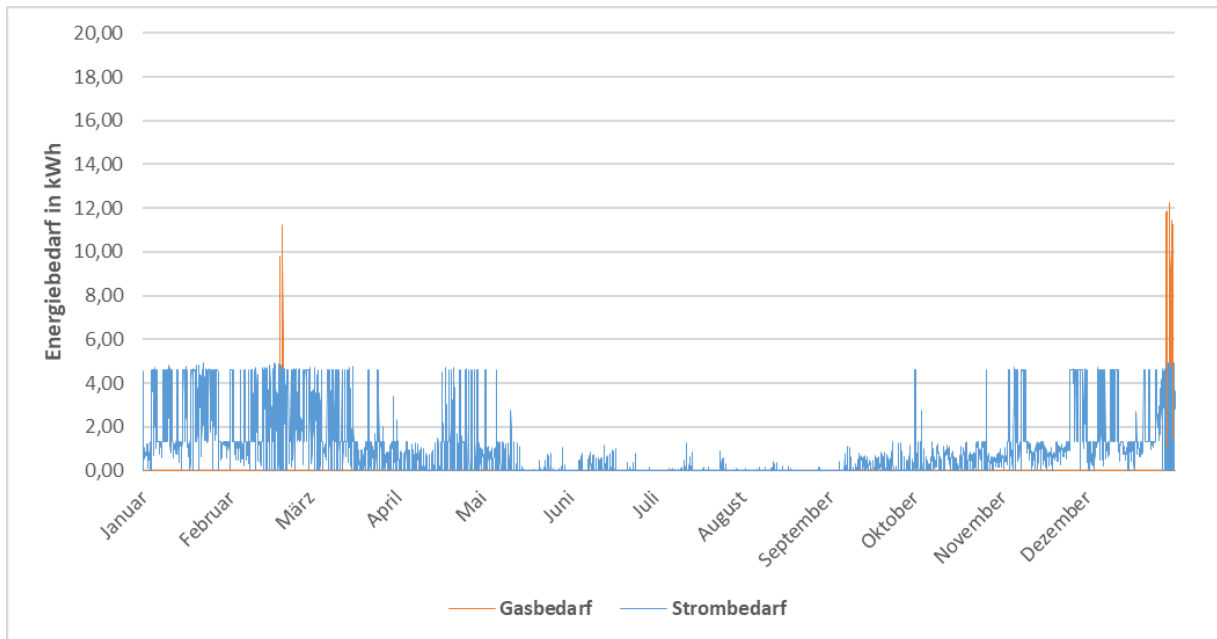


Abbildung 23 - Jahresprofil der Energiebedarfe für Gebäude der Baualterklasse aus dem Jahr 1985 bei einem Bivalenzpunkt von  $-6\text{ °C}$  für Strom und Gas

In Abbildung 24 ist das Lastprofil für den Bivalenzpunkt von  $0\text{ °C}$  abgebildet. Die maximale Last der WP liegt bei  $4,83\text{ kW}$ , die des BWK bei  $14,34\text{ kW}$ .



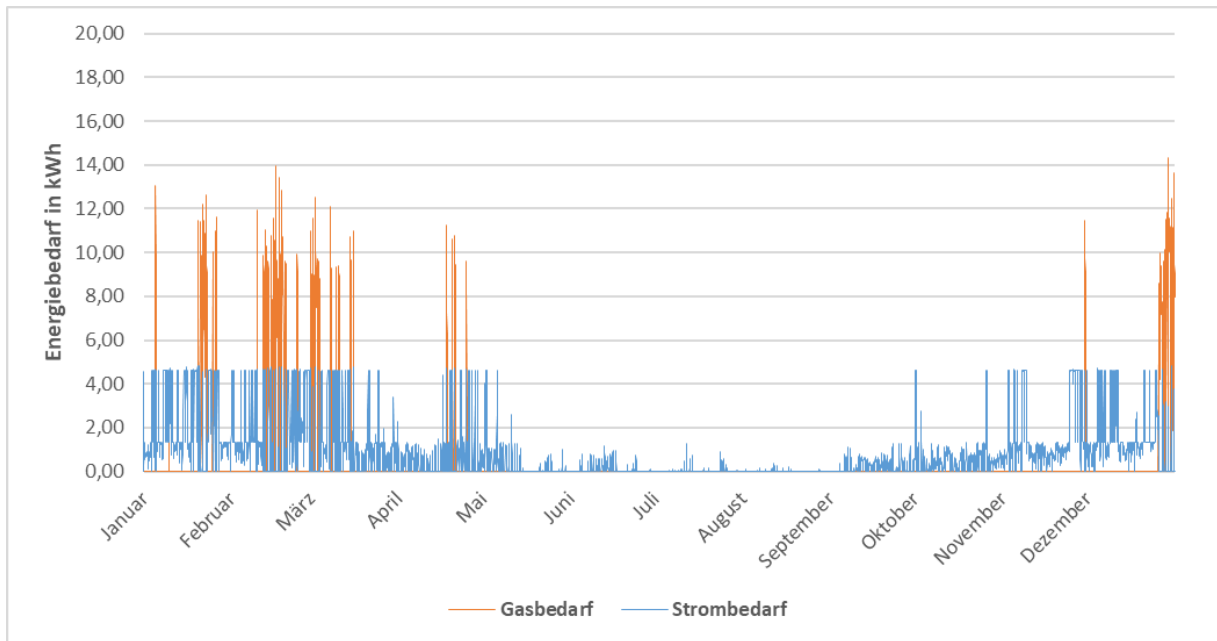


Abbildung 24 - Jahresprofil der Energiebedarfe für Gebäude der Baualterklasse aus dem Jahr 1985 bei einem Bivalenzpunkt von 0 °C für Strom und Gas

Für einen BVP von 6 °C ist ein weiteres Jahreslastprofil in Abbildung 25 dargestellt. Der BWK übernimmt nun einen Großteil der Wärmeversorgung in der Heizperiode, während die WP vorrangig die Wärmeversorgung für HWW von Juni bis September übernimmt. Die Spitzenlast an der WP liegt bei 1,73 kW und beim BWK bei 14,16 kW.

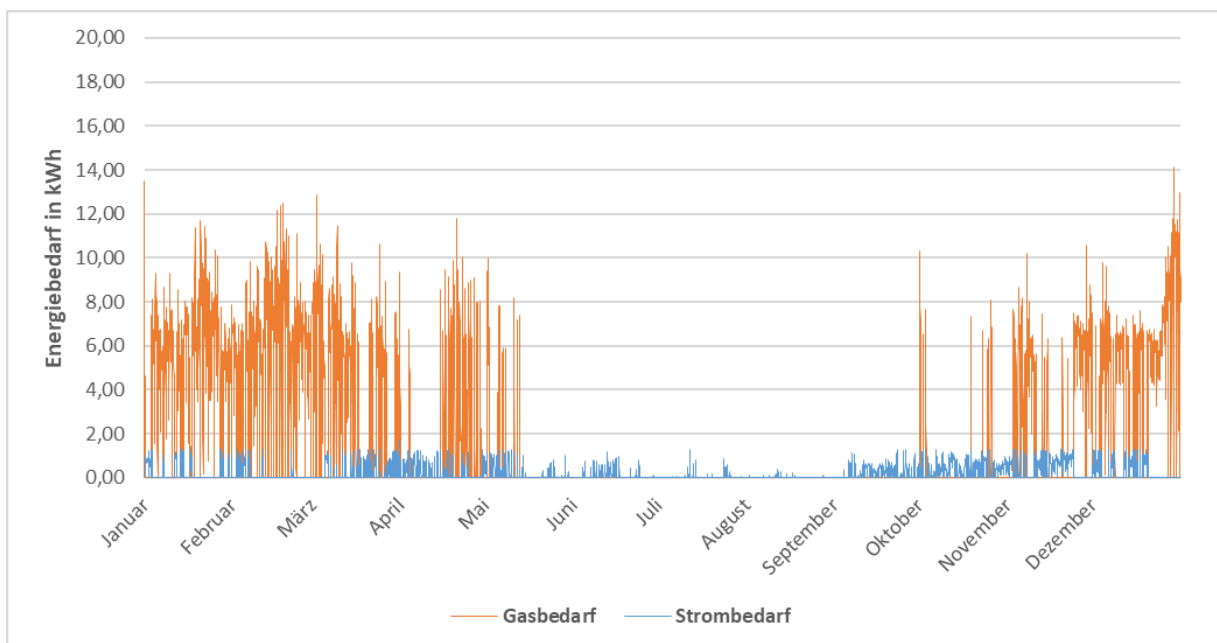


Abbildung 25 - Jahresprofil der Energiebedarfe für Gebäude der Baualterklasse aus dem Jahr 1985 bei einem Bivalenzpunkt von 6 °C für Strom und Gas

### 3.3 Ergebnisse Baualtersklasse 2005

Im folgenden Abschnitt werden die Simulationsergebnisse für das mit Gebäude mit der Baualtersklasse aus dem Jahr 2005 beschrieben. In Abbildung 26 werden die Anteile der ganzjährigen Wärmebedarfsdeckung durch WP und BWK dargestellt.

Hingegen zu den Gebäuden der Baualtersklassen 1975 und 1985, genügt es die WP mit einer Vorlauftemperatur von 35 °C die Wärmeversorgung umzusetzen.

Die Anteile der Wärmebereitstellung durch die WP liegt im BVP-Bereich von -6 °C bis 6 °C bei 98,4 %, 96,5 %, 92,2 %, 84,7 %, 72,6 %, 49,6 % und 29,1 %. Der übrige Wärmebedarf wird über den BWK gedeckt.

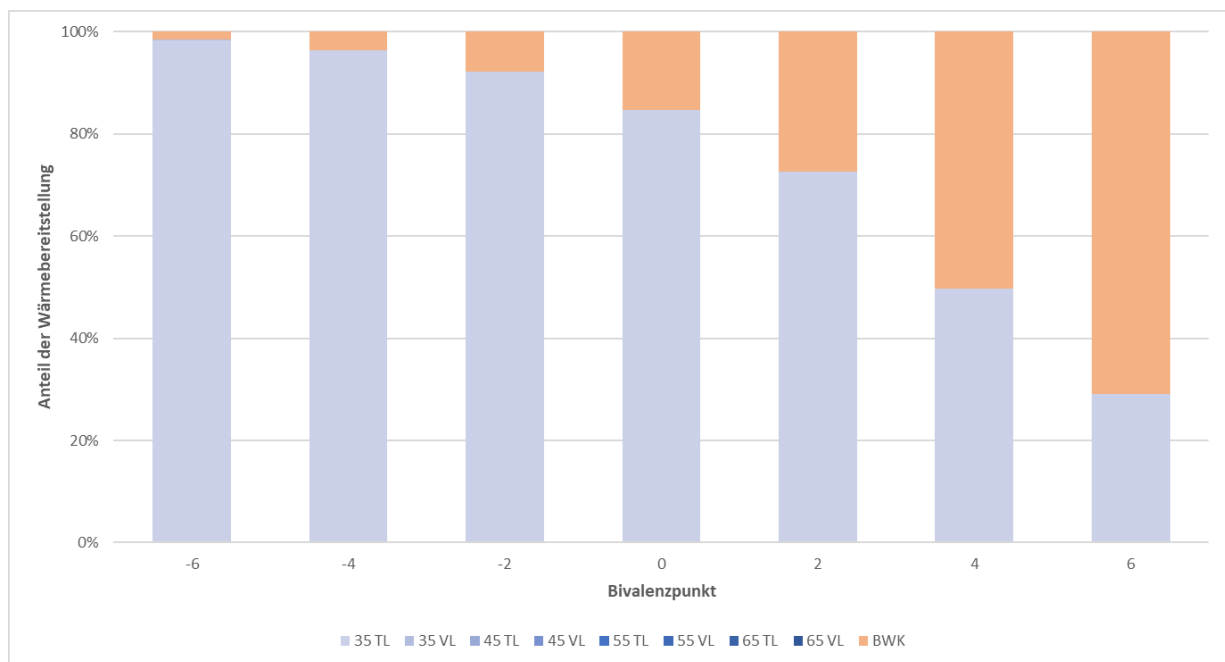


Abbildung 26 – Anteilige Wärmebedarfsdeckung für Einfamilienhäuser durch hybride WP mit Baualtersklasse aus dem Jahr 2005 aufgeteilt nach Technologieinsatz und notwendiger Vorlauftemperatur

In Abbildung 27 werden die jährlichen Strom- und Gasbedarfe bei unterschiedlichen Bivalenzpunkten für die Wärmeversorgung dargestellt. Durch den besseren Gebäudeenergiestandard der Baualtersklasse aus dem Jahr 2005 liegt der zu deckende Wärmebedarf niedriger als bei den beiden zuvor betrachteten Baualtersklassen. Bei einem BVP von -6 °C – bei dem die WP nahezu die komplette Versorgung übernimmt – werden noch 2.975 kWh Strom und 182 kWh Erdgas pro Jahr benötigt. So liegt der Strombedarf mit 2.910 kWh bei -4 °C, 2.892 kWh bei -2 °C und 2782 kWh bei 0 °C über dem Erdgasbedarf (417 kWh bei -4 °C, 911 kWh bei -2 °C und 1.814 kWh bei 0 °C). Für die BVP 2 °C, 4 °C und 6 °C liegen die Strombedarfe der WP bei 2.213 kWh, 1.593 kWh und 1.059 kWh und damit niedriger als der Erdgasbedarf (3.275 kWh, 6.068 kWh und 8.596 kWh).

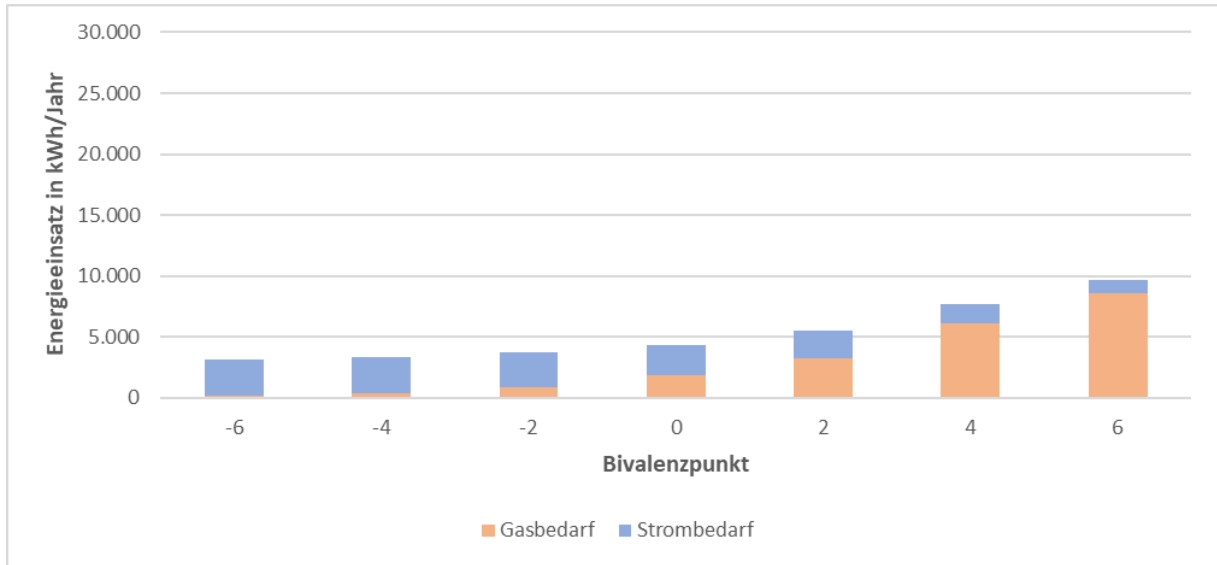


Abbildung 27 – Jährliche Energiebedarfe für Gebäude der Baualterklasse aus dem Jahr 2005 aufgeteilt in Strom und Erdgas

Im Folgenden sollen die zeitaufgelösten Jahresprofile der hybriden WP zu Bereitstellung des HWW beschrieben werden. So ist in Abbildung 28 das Jahresprofil mit halbstündlicher Auflösung für den Bivalenzpunkt  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  dargestellt. Während die WP nahezu das ganze Jahr die Wärmebereitstellung sicherstellt, liefert der BWK ausschließlich während zwei kälteren Phasen im Februar und im Dezember die Wärme. Die maximale Last an der WP liegt bei  $1,54\text{ kW}$ , während der BWK eine Last von bis zu  $7,1\text{ kW}$  hat.

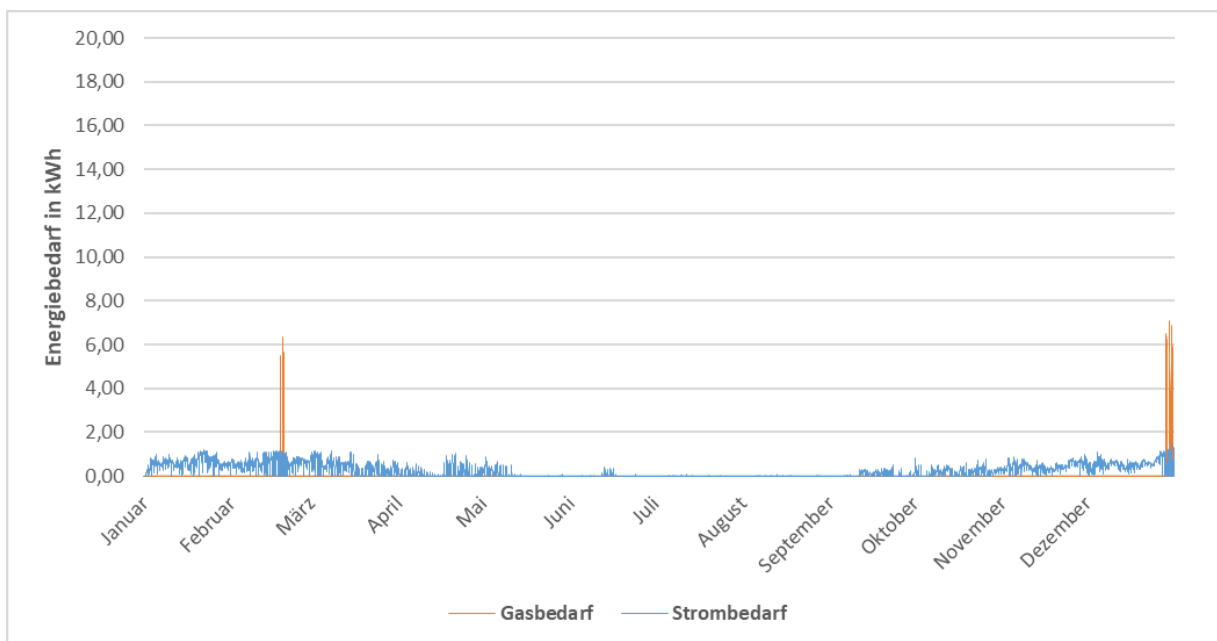


Abbildung 28 - Jahresprofil der Energiebedarfe für Gebäude der Baualterklasse aus dem Jahr 2005 bei einem Bivalenzpunkt von  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  für Strom und Gas

In Abbildung 29 ist das Lastprofil für den Bivalenzpunkt von  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  abgebildet. Die maximale Last der WP liegt bei  $1,17\text{ kW}$ , die des BWK bei  $6,34\text{ kW}$ .

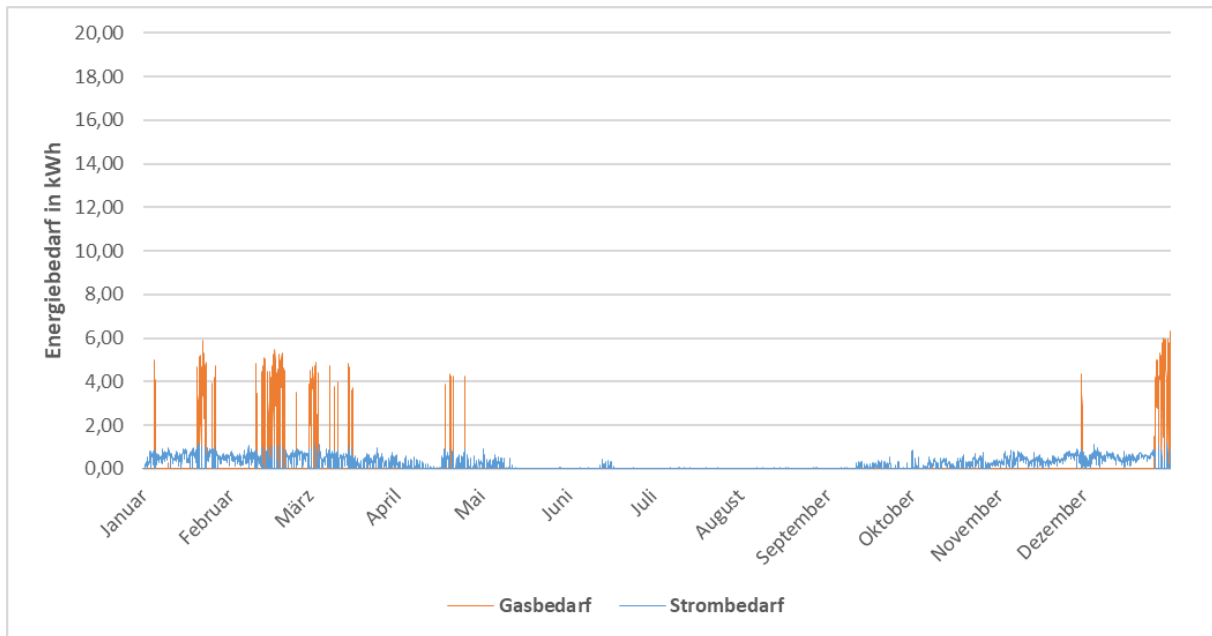


Abbildung 29 - Jahresprofil der Energiebedarfe für Gebäude der Baualterklasse aus dem Jahr 2005 bei einem Bivalenzpunkt von 0 °C für Strom und Gas

Mit einem BVP bei 6 °C ist ein weiteres Jahreslastprofil in Abbildung 30 dargestellt. Der BWK übernimmt nun einen Großteil der Wärmeversorgung in der Heizperiode, während die WP vorrangig die Wärmeversorgung für HWW von Juni bis September übernimmt. Die Spitzenlast an der WP liegt bei 0,68 kW und beim BWK bei 6,33 kW.

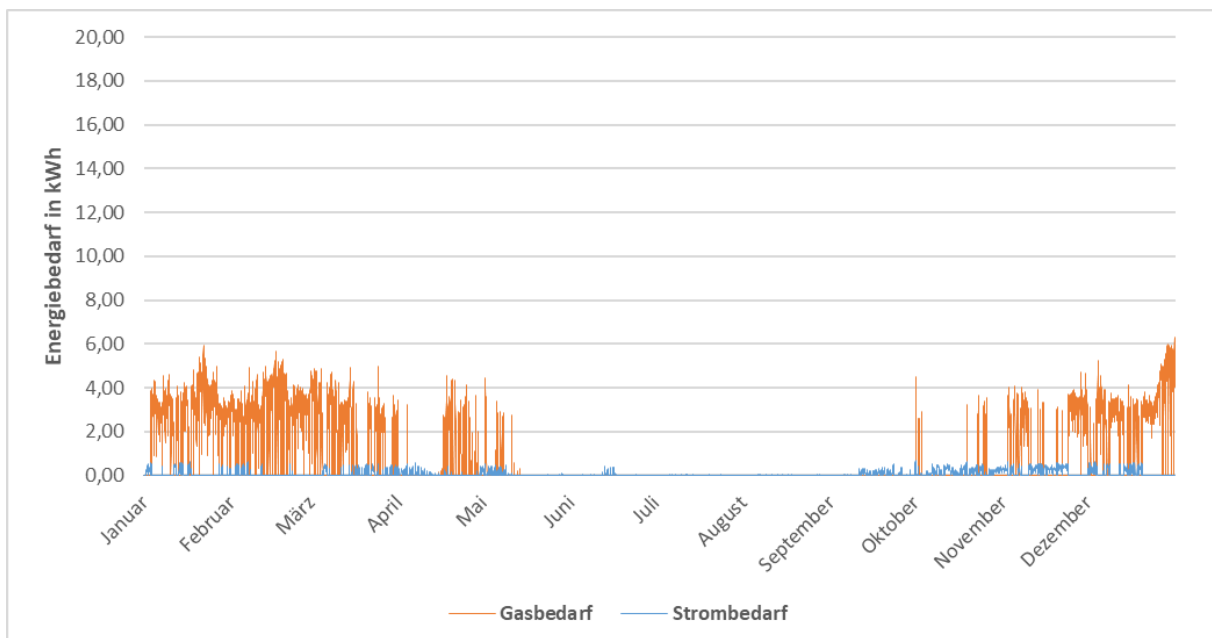


Abbildung 30 - Jahresprofil der Energiebedarfe für Gebäude der Baualterklasse aus dem Jahr 2005 bei einem Bivalenzpunkt von 6 °C für Strom und Gas

### 3.4 Ergebnisse Baualtersklasse 2015

Im folgenden Abschnitt werden die Simulationsergebnisse für das mit Gebäude mit der Baualtersklasse aus dem Jahr 2015 beschrieben. In Abbildung 31 werden die Anteile der ganzjährigen Wärmebedarfsdeckung durch WP und BWK dargestellt.

Identisch wie bei der Baualtersklasse aus dem Jahr 2005, genügt der WP auch für die Baualtersklasse 2015 eine Vorlauftemperatur von 35 °C. Die Anteile der Wärmebereitstellung durch WP und BWK unterscheiden sich im Vergleich zu Abbildung 26 nur geringfügig. Aus diesem Grund wird auf eine genauere Beschreibung der Anteile verzichtet.

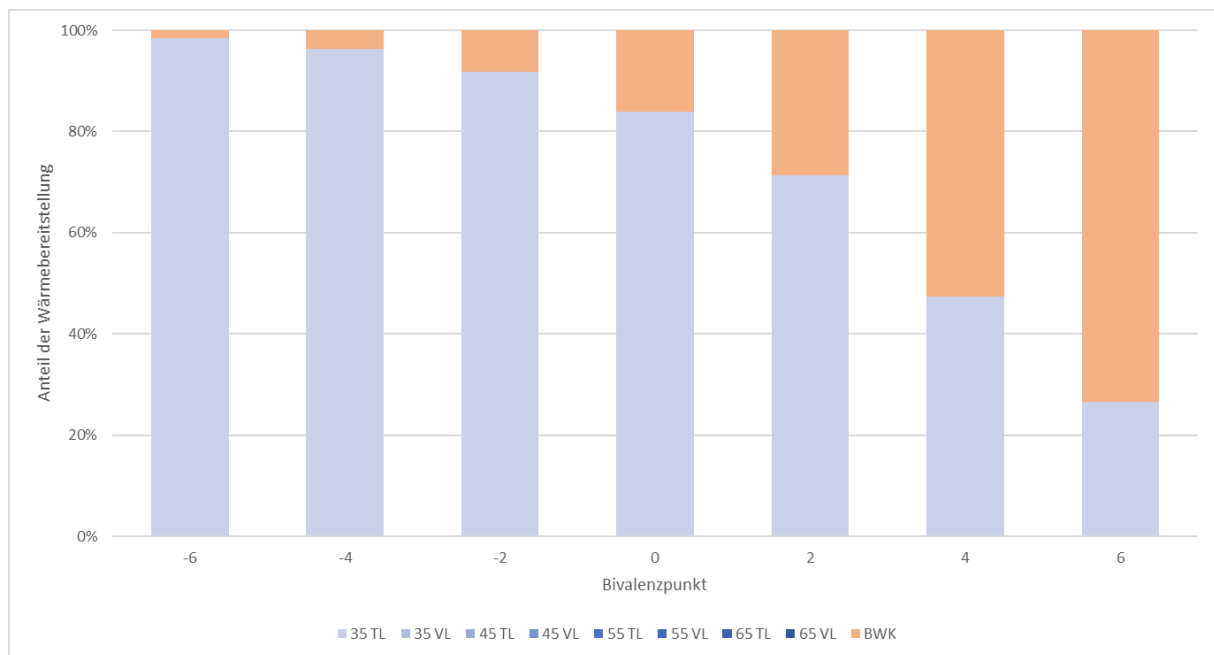


Abbildung 31 - Anteilige Wärmebedarfsdeckung für Einfamilienhäuser durch hybride WP mit Baualtersklasse aus dem Jahr 2015 aufgeteilt nach Technologieinsatz und notwendiger Vorlauftemperatur

In Abbildung 32 werden die jährlichen Strom- und Gasbedarfe bei unterschiedlichen Bivalenzpunkten zur Wärmeversorgung dargestellt.

Für die Bivalenzpunkten zwischen -6 °C und 0 °C wird mit 13.037 kWh, 12.755 kWh, 12.102 kWh und 10.996 kWh überwiegend Strom zur Wärmeerzeugung verwendet. Der Erdgasbedarf liegt in diesem Bereich bei 471 kWh, 1.104 kWh, 2.437 kWh und 4.608 kWh. Bei einem Bivalenzpunkt von 2 °C ist Wärmeproduktion nahezu ausgeglichen (9.441 kWh Strom und 8.498 kWh Erdgas, was einem Verhältnis von 53 % zu 47 % entspricht). Im Bivalenzpunktbereich von 4 °C bis 6 °C stellt der BWK mit 23.057 kWh und 28.386 kWh den Großteil der Wärme bereit. Der Stromverbrauch liegt bei 7.016 kWh und 4.969 kWh.

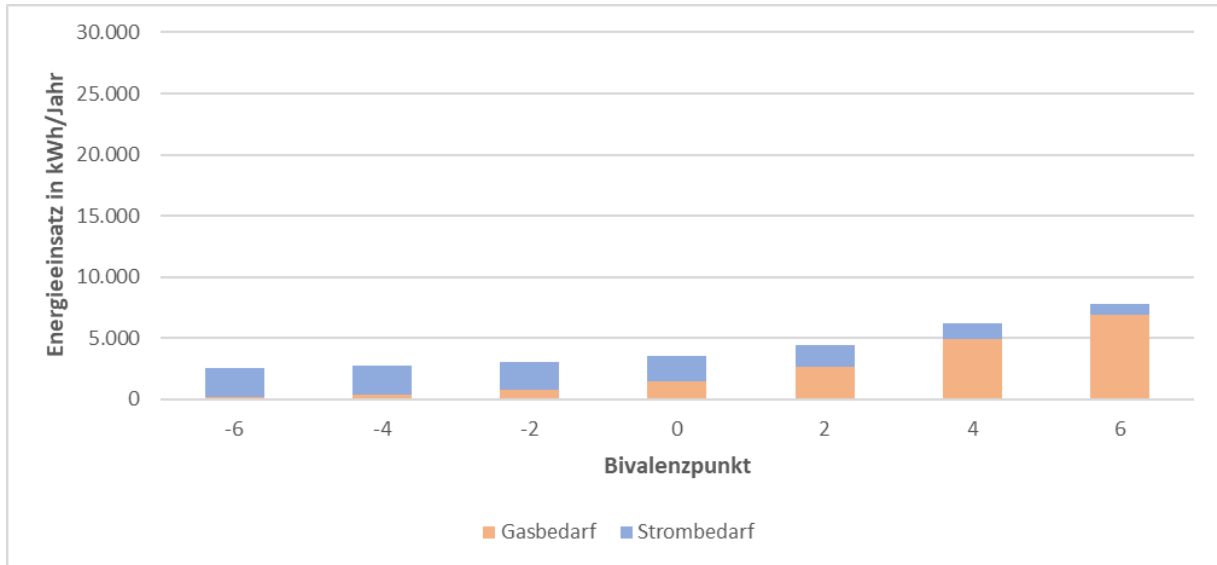


Abbildung 32 - Jährliche Energiebedarfe für Gebäude der Baualterklasse aus dem Jahr 2015 aufgeteilt in Strom und Erdgas

Im Folgenden sollen die zeitaufgelösten Jahresprofile der hybriden WP zu Bereitstellung des HWW beschrieben werden. So ist in Abbildung 39 das Jahresprofil mit halbstündlicher Auflösung für den BVP  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  dargestellt. Während die WP nahezu das ganze Jahr die Wärmebereitstellung sicherstellt, liefert der BWK ausschließlich während zwei kälteren Phasen im Februar und im Dezember die Wärme. Die maximale Last an der WP liegt mehrfach bei  $1,09\text{ kW}$ , während der BWK eine Last von bis zu  $5,57\text{ kW}$  hat.

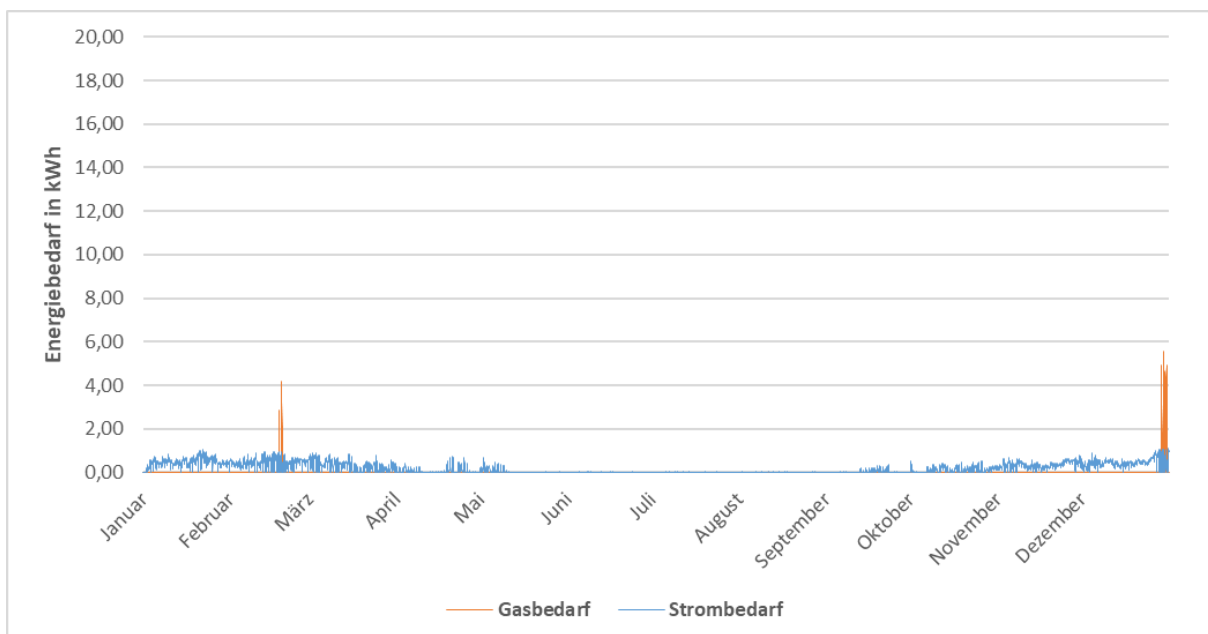


Abbildung 33 - Jahresprofil der Energiebedarfe für Gebäude der Baualterklasse aus dem Jahr 2015 bei einem Bivalenzpunkt von  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  für Strom und Gas

In Abbildung 34 ist das Lastprofil für den BVP von  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  abgebildet. Die maximale Last der WP liegt weiterhin bei  $0,87\text{ kW}$ , die des BWK bei  $5,19\text{ kW}$ .

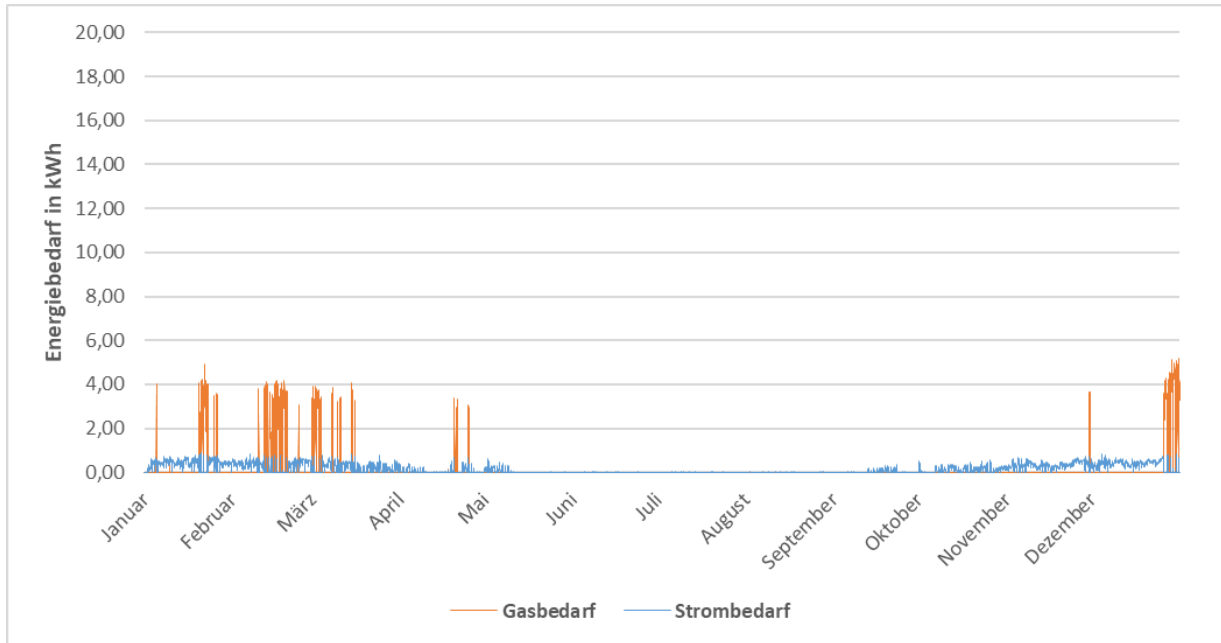


Abbildung 34 - Jahresprofil der Energiebedarfe für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 2015 bei einem Bivalenzpunkt von 0 °C für Strom und Gas

Mit einem BVP bei 6 °C ist ein weiteres Jahreslastprofil in Abbildung 35 dargestellt. Der BWK übernimmt nun einen Großteil der Wärmeversorgung in der Heizperiode, während die WP vorrangig die Wärmeversorgung für HWW von Juni bis September übernimmt. Die Spitzenlast an der WP liegt bei 0,5 kW und beim BWK bei 5,18 kW.

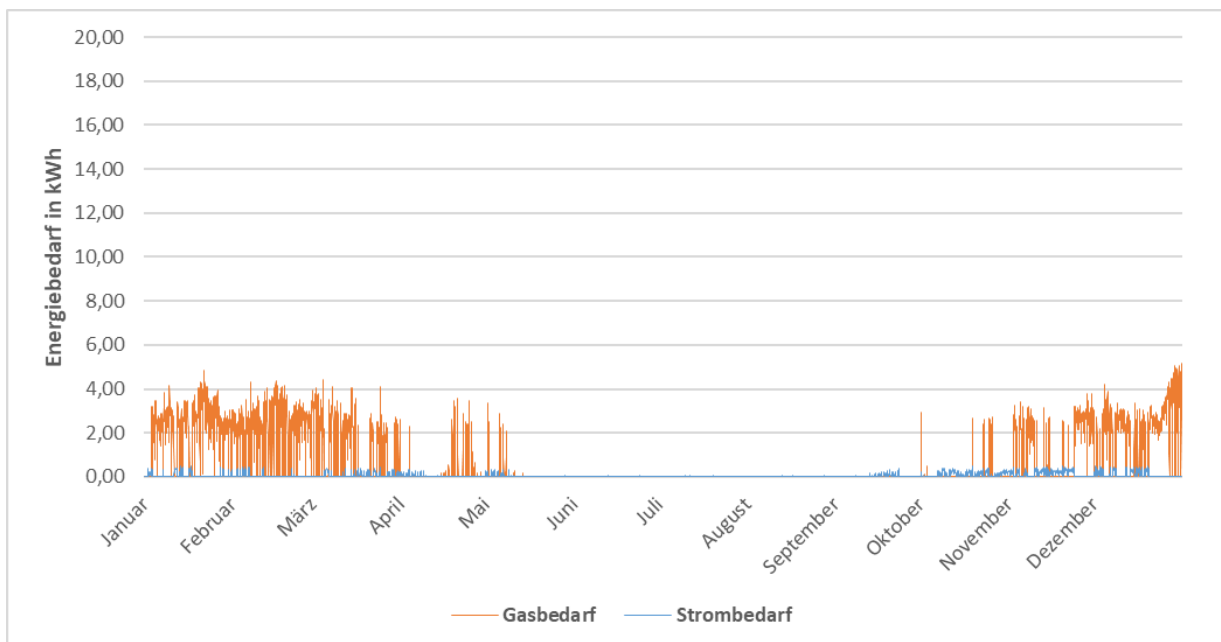


Abbildung 35 - Jahresprofil der Energiebedarfe für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 2015 bei einem Bivalenzpunkt von 6 °C für Strom und Gas

### 3.5 Energiebedingte Emissionen

Für die Simulationsergebnisse wird im Anschluss eine kurze Übersicht zu den betriebsbedingten Emissionen dargestellt. In der ökologischen Bewertung wird dabei der Schwerpunkt auf den Energieträger Erdgas für den BWK sowie Strom für die WP gelegt. Ziel ist es, einen groben Überblick zu erhalten, inwiefern die Auswahl des BVP sowie die Baualtersklasse Einfluss auf den Betrieb der hybriden WP haben. Angenommen wird für Erdgas ein Emissionsfaktor von 201 g CO<sub>2</sub>e/kWh.[1,S. 1990–2017] Für Strom wird der Emissionsfaktor des allgemeinen dt. Strommix mit 420 g CO<sub>2</sub>e/kWh genutzt.[16]

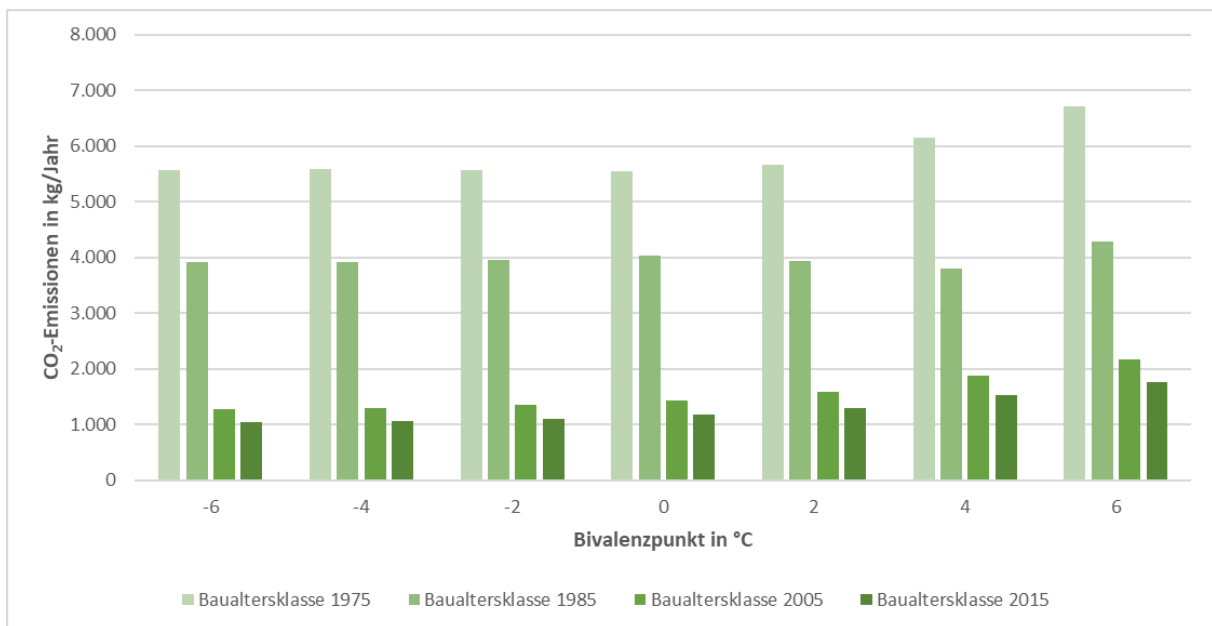


Abbildung 36 – Energiebedingte Emissionen abgeleitet aus dem Einsatz von Strom und Erdgas zur Wärmebereitstellung bei unterschiedlichen Bivalenzpunkten einer hybriden Wärmepumpe

In Abbildung 36 sind die Ergebnisse für die ökologischen Betrachtung für die oben beschriebenen Rahmendaten dargestellt. Zu sehen ist, dass insbesondere die Baualtersklassen – aufgrund ihrer Wärmebedarfe – Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen besitzen. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die durch den Einsatz von Strom und Erdgas verursacht werden, liegen bei einem Gebäude mit einer Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 zwischen 5.570 kg CO<sub>2</sub>e und 6.721 kg CO<sub>2</sub>e im untersuchten Jahr. Bei einer Wärmebereitstellung ausschließlich per BWK würden 7.725 kg CO<sub>2</sub>e anfallen, was einer Emissionsreduktion von 13 % bis 28 % entspricht (vgl. Tabelle 3). Für die Baualtersklasse aus dem Jahr 1985 liegen die Emissionen bei 3.918 kg CO<sub>2</sub>e bis 4.293 kg CO<sub>2</sub>e. Die Verwendung einer hybriden Wärmepumpe kann im Vergleich zum BWK (5.389 kg CO<sub>2</sub>e) zwischen 20 % und 27 % CO<sub>2</sub>-Emissionen einsparen. Für die Baualtersklassen aus den Jahren 2005 und 2015 ist eine deutliche Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Für die Baualtersklasse 2005 liegen die CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen 1.286 kg CO<sub>2</sub>e und 2.172 kg CO<sub>2</sub>e pro Jahr. Mit einem BWK würden 2.672 kg CO<sub>2</sub>e verursacht werden, wodurch die hybride WP zwischen 19 % und 52 % Emissionen reduzieren kann. Die hybride WP verursacht in einer Baualtersklasse für das Jahr 2015 zwischen 1.041 kg CO<sub>2</sub>e und 1.767 kg CO<sub>2</sub>e. Ein BWK würde unter den gleichen Rahmenbedingungen 2.140 kg CO<sub>2</sub>e verursachen, was eine Reduzierung zwischen 19 % und 52 % entspricht.



Tabelle 3 – Übersicht zu Emissionseinsparungen abgeleitet aus dem Einsatz von Strom und Erdgas zur Wärmebereitstellung bei unterschiedlichen Bivalenzpunkten einer hybriden Wärmepumpe im Vergleich zur Wärmebereitstellung mit einem Brennwertkessel

| Bivalenzpunkt in °C | CO <sub>2</sub> e-Einsparung für Baualtersklasse |      |      |      |
|---------------------|--|------|------|------|
|                     | 1975   | 1985 | 2005 | 2015 |
| -6                  | 28%  | 27%  | 52%  | 52%  |
| -4                  | 28%  | 27%  | 51%  | 50%  |
| -2                  | 28%  | 27%  | 49%  | 49%  |
| 0                   | 28%  | 27%  | 46%  | 45%  |
| 2                   | 27%  | 27%  | 41%  | 39%  |
| 4                   | 20%  | 27%  | 29%  | 28%  |
| 6                   | 13%  | 20%  | 19%  | 19%  |

Die Arbeiten in diesem Kapitel der ökologischen Bewertung für die eingesetzten Energieträger Gas und Strom mit einem festen CO<sub>2</sub>e, dienen als erstes Ergebnis, um eine grobe Aussagekraft zum Betrieb einer hybriden Wärmepumpe treffen zu können. In dieser Arbeit wurde für die Stromnutzung der Emissionsfaktor des dt. Strommixes gerechnet, der sich aus dem prozentualen Anteil aller eingesetzten Energieträger der gesamten dt. Stromerzeugung zusammensetzt. Um genaue Aussagen über die tatsächlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen treffen zu können, ist es daher notwendig zu wissen wie der Strommix in den Zeiten aussieht, wenn die WP Wärme bereitstellt.

### 3.6 Energiebedingte Kosten

In der ökonomischen Betrachtung wird im Folgenden untersucht welche Auswirkungen unterschiedliche Strom- und Erdgaspreise Einfluss auf einen möglichst kosteneffizienten Betrieb haben. Es wird für die vier Baualtersklassen 1975, 1985, 2005 und 2015 der Strombezugs- und Erdgasbezugspreisen kostengünstigste BVP festgelegt. Im Anschluss werden die jährlichen Energiekosten verglichen, um den kosteneffizientesten BVP zu ermitteln. Darüber hinaus werden für die o.g. Baualtersklassen die Strom- und Erdgaspreissensitivität für die BVP von -6 °C bis 6 °C abgeleitet. Die Kostensensitivität lässt für unterschiedliche BVP erkennen, welche jährlichen Kosten oder Ersparnisse bei steigenden oder fallen Strom- bzw. Gaspreisen entstehen.

Zum Ende des Teilprojekts gab es unterschiedliche globale Entwicklungen, die die Energiepreise enorm verteuerten. Aus diesem Grund wurden die Untersuchungen für Kapitel 3.6 nochmals mit höheren Strom- und Gaspreisen angepasst. Für den Strombezugspreis wurde der Bereich zwischen 25 Cent/kWh und 87,5 Cent/kWh gewählt, ein spezieller WP-Tarif wurde nicht berücksichtigt. Der Gasbezugspreis liegt zwischen 6 Cent/kWh und 36 Cent/kWh. Aktuell liegen die Strombezugskosten

durchschnittlich bei 37,30 Cent/kWh,[17] der Erdgasbezugspreis für ein EFH bei 15,29 Cent/kWh.[18] In den folgenden Abbildungen und Tabellen werden die aktuellen Durchschnittspreise hervorgehoben.

Für die Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 ist in Tabelle 4 der kostenseitig zu bevorzugende BVP für unterschiedliche Strom- und Gaspreiskonstellationen dargestellt. Bei den aktuellen Strom- und Gaspreisen, ist ein BVP von 0 °C der kosteneffizienteste. Steigen die Strompreise, so liegt der BVP > 0 °C, sinkt er wird ein BVP >= 0°C kosteneffizienter. Identisch verhalten sich verändernde Gaspreise.

Tabelle 4 – Übersichtsmatrix zu kosteneffizientesten Bivalenzpunkt für unterschiedliche Strom- und Erdgaspreiskonstellationen zur Wärmebereitstellung für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 mittels hybrider Wärmepumpe

| Auswahl<br>BVP             |    | Strombezugspreis in Cent/kWh |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------|----|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                            |    | 25                           | 31,25 | 37,5  | 43,75 | 50    | 56,25 | 62,5  | 68,75 | 75    | 81,25 | 87,5  |       |       |
| Gasbezugspreis in Cent/kWh | 6  | 6 °C                         | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  |
|                            | 9  | 2 °C                         | 4 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  |
|                            | 12 | 0 °C                         | 2 °C  | 4 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  |
|                            | 15 | -6 °C                        | 0 °C  | 0 °C  | 2 °C  | 4 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  |
|                            | 18 | -6 °C                        | -6 °C | 0 °C  | 0 °C  | 2 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  |
|                            | 21 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | 0 °C  | 0 °C  | 2 °C  | 2 °C  | 4 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  |
|                            | 24 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | 0 °C  | 0 °C  | 2 °C  | 2 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 6 °C  | 6 °C  |
|                            | 27 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | 0 °C  | 0 °C  | 2 °C  | 2 °C  | 2 °C  | 2 °C  | 4 °C  | 4 °C  |
|                            | 30 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | 0 °C  | 0 °C  | 0 °C  | 2 °C  | 2 °C  | 2 °C  |
|                            | 33 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | 0 °C  | 0 °C  | 0 °C  | 0 °C  | 2 °C  |
|                            | 36 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | 0 °C  | 0 °C  | 0 °C  | 0 °C  |
|                            | 39 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | 0 °C  | 0 °C  | 0 °C  |
|                            | 42 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | 0 °C  |
|                            | 45 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C |
|                            | 48 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C |

In Abbildung 37 ist die Kostensensitivität für die Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 für Strom und Erdgas dargestellt. So besitzt Strom zwischen -6 °C und 2 °C eine höhere Sensitivität (130 €/ΔCent/kWh bis 94 €/ΔCent/kWh) als Erdgas (5 €/ΔCent/kWh bis 85 €/ΔCent/kWh). Im Gegensatz dazu sind die Sensitivitäten für Erdgas für 4 °C und 6 °C größer (159 €/ΔCent/kWh und 231€/ΔCent/kWh) als die von Strom (70 €/ΔCent/kWh und 90 €/ΔCent/kWh).

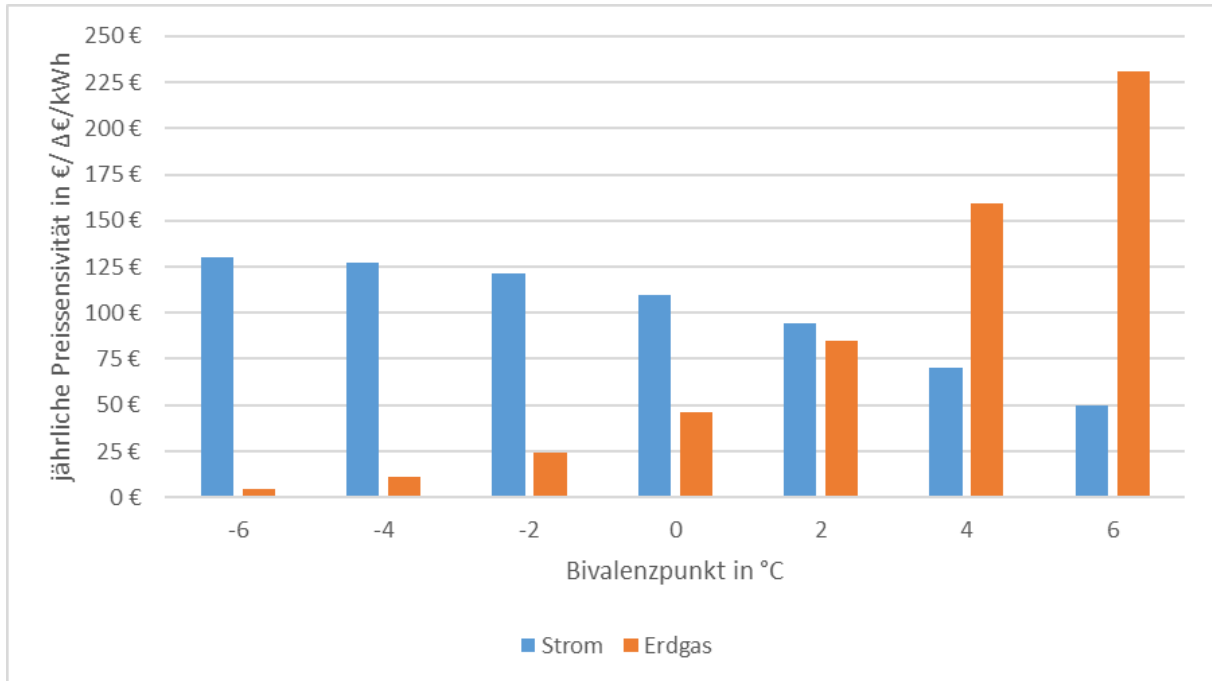


Abbildung 37 – Jährliche energiebedingten Kosten in Abhängigkeit steigender Strom- und Erdgaspreisen für ein Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975

In Tabelle 5 ist der kostengünstigste BVP bei unterschiedlichen Strom- und Gasbezugspreisen für die Baualtersklasse für das Jahr 1985 abgebildet. Auffällig ist, dass die Auswahl in den Übergangsphasen von  $-6\text{ °C}$  auf  $4\text{ °C}$  springt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Energiekosten in den Ergebnissen für den BVP zwischen  $-4\text{ °C}$  und  $4\text{ °C}$  sehr nah beieinander liegen, weshalb der Übergang an dieser Stelle eher grob wirkt. Analog zu Tabelle 4 liegt auch für die Baualtersklasse 1985 der BVP bei den aktuellen durchschnittlichen Energiepreisen im Bereich um  $0\text{ °C}$ .

Tabelle 5 - Übersichtsmatrix zu kosteneffizientesten Bivalenzpunkt für unterschiedliche Strom- und Erdgaspreiskonstellationen zur Wärmebereitstellung für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1985 mittels hybrider Wärmepumpe

| Auswahl<br>BVP             |    | Strombezugspreis in Cent/kWh |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------|----|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                            |    | 25                           | 31,25 | 37,5  | 43,75 | 50    | 56,25 | 62,5  | 68,75 | 75    | 81,25 | 87,5  |       |       |
| Gasbezugspreis in Cent/kWh | 6  | 6 °C                         | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  |
|                            | 9  | 4 °C                         | 4 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  |
|                            | 12 | 4 °C                         | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  |
|                            | 15 | -6 °C                        | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  |
|                            | 18 | -6 °C                        | -6 °C | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  |
|                            | 21 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 6 °C  |
|                            | 24 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  |
|                            | 27 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  |
|                            | 30 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  |
|                            | 33 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  |
|                            | 36 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  |
|                            | 39 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | 4 °C  | 4 °C  | 4 °C  |
|                            | 42 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | 4 °C  |
|                            | 45 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C |
|                            | 48 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C |

Durch den geringen Energiebedarf zur Wärmeversorgung der Baualtersklasse 1985 im Vergleich zu 1975 liegt die Preissensitivität niedriger als in Abbildung 37. Außerdem ist die Sensitivität nur in einem BVP-Bereich von -6 °C bis 0 °C höher (87 €/ΔCent/kWh bis 74 €/ΔCent/kWh) als die von Erdgas (3 €/ΔCent/kWh bis 36 €/ΔCent/kWh). Für die BVP 2 °C, 4 °C und 6 °C ist die Sensitivität von Erdgas höher (66 €/ΔCent/kWh bis 165 €/ΔCent/kWh) als die von Strom (57 €/ΔCent/kWh bis 17 €/ΔCent/kWh).

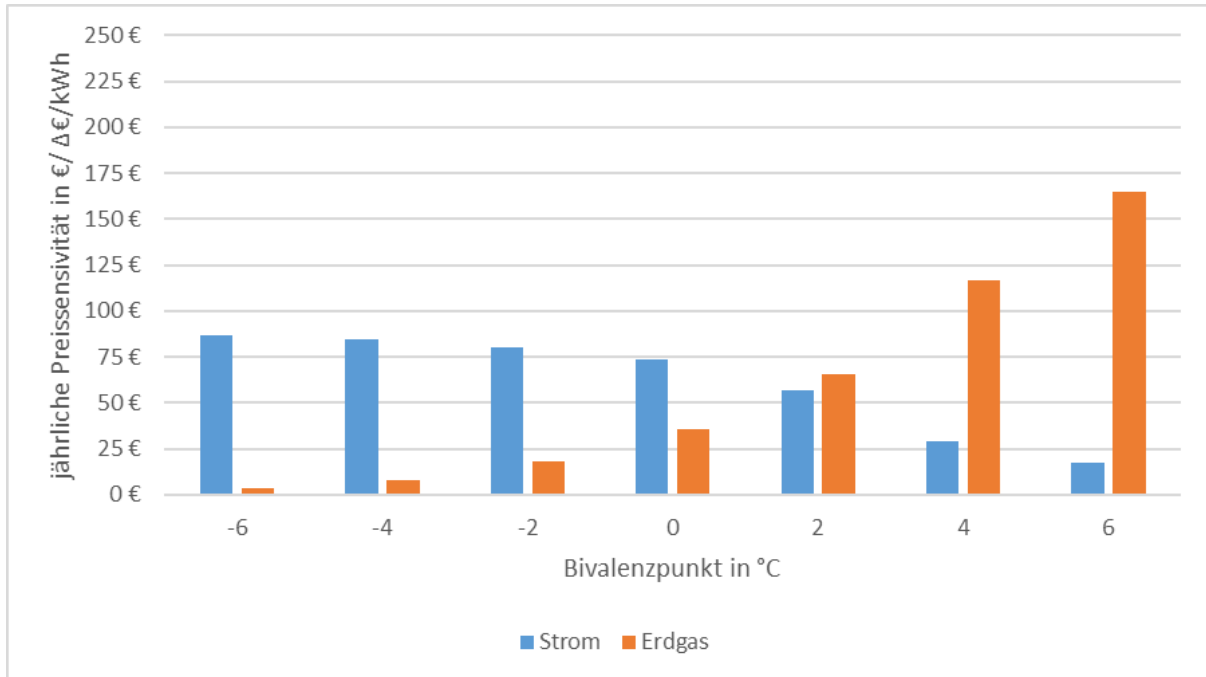


Abbildung 38 - Jährliche energiebedingten Kosten in Abhängigkeit steigender Strom- und Erdgaspreisen für ein Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1985

Für die Baualtersklasse für das Jahr 2005 sind in Tabelle 6 die kosteneffizientesten BVP dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich der BVP – im Vergleich zur Baualtersklasse 1975 (vgl. Tabelle 4) und 1985 (vgl. Tabelle 5) – hin zu einem häufig niedrigeren BVP entwickelt hat. Bei den aktuellen Strom- und Erdgaspreisen liegt der BVP bei -6 °C. Ausschließlich bei niedrigen Gaspreisen und gleichzeitig hohen Strompreisen ist ein BVP > -4°C kosteneffizienter. Dies kann auf den effizienten Betrieb der WP zurückgeführt werden, da die Wärmebereitstellung in der Baualtersklasse durchgehend mit einem Vorlauf-Temperaturniveau von 35 °C erreicht werden kann (vgl. Abbildung 26).

Tabelle 6 - Übersichtsmatrix zu kosteneffizientesten Bivalenzpunkt für unterschiedliche Strom- und Erdgaspreiskonstellationen zur Wärmebereitstellung für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 2005 mittels hybrider Wärmepumpe

| Auswahl<br>BVP             |    | Strombezugspreis in Cent/kWh |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------|----|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                            |    | 25                           | 31,25 | 37,5  | 43,75 | 50    | 56,25 | 62,5  | 68,75 | 75    | 81,25 | 87,5  |
| Gasbezugspreis in Cent/kWh | 6  | 0 °C                         | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  |
|                            | 9  | -6 °C                        | -6 °C | 0 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  |
|                            | 12 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -4 °C | 0 °C  | 4 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  |
|                            | 15 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -4 °C | 0 °C  | 4 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  |
|                            | 18 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -4 °C | 0 °C  | 4 °C  | 6 °C  |
|                            | 21 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -2 °C | 0 °C  |
|                            | 24 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -4 °C |
|                            | 27 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C |
|                            | 30 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C |
|                            | 33 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C |
|                            | 36 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C |
|                            | 39 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C |
|                            | 42 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C |
|                            | 45 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C |
|                            | 48 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C |

In Abbildung 39 sind Preissensitivitäten für die Baualtersklasse 2005 dargestellt. Analog zur Baualtersklasse für das Jahr 1985 liegen die Sensitivitäten für die Strompreise von -6 °C bis 0 °C (30 €/ΔCent/kWh bis 26 €/ΔCent/kWh) höher als die der Erdgaspreise (2 €/ΔCent/kWh bis 18 €/ΔCent/kWh). Im Bereich 2 °C bis 6 °C liegt wiederum die Sensitivität für Erdgas höher (33 €/ΔCent/kWh bis 86 €/ΔCent/kWh) als die von Strom (22 €/ΔCent/kWh bis 11 €/ΔCent/kWh).

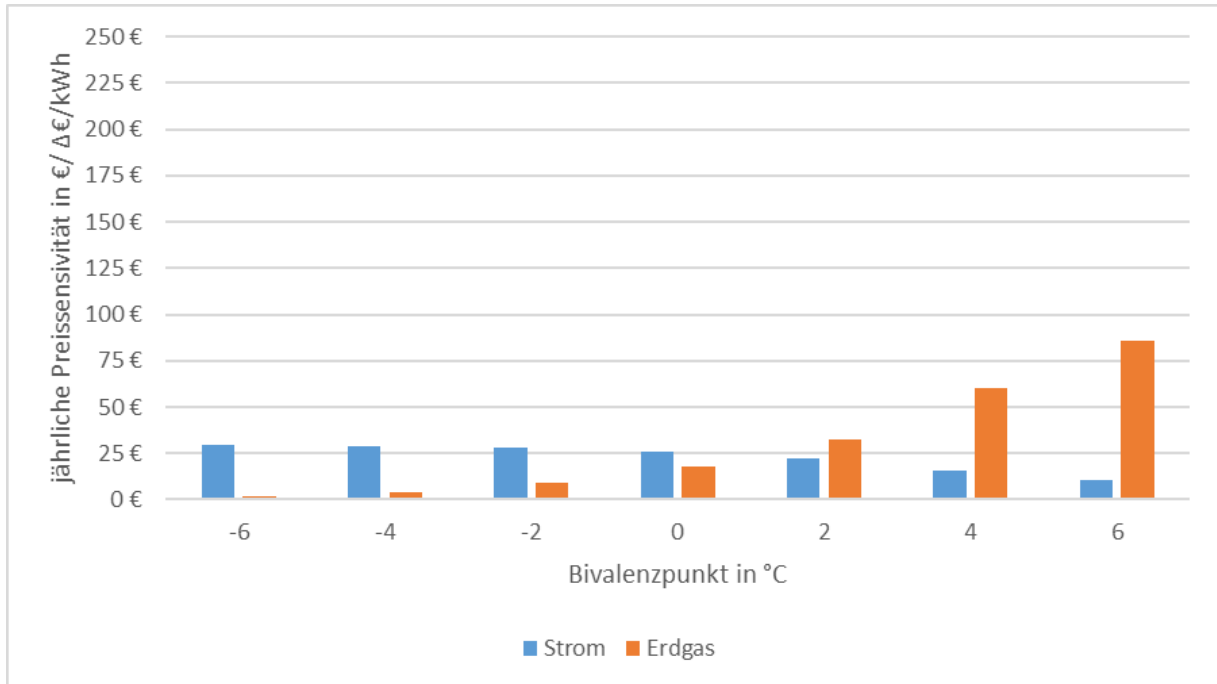


Abbildung 39 – Jährliche energiebedingten Kosten in Abhängigkeit steigender Strom- und Erdgaspreisen für ein Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 2005

Die geringeren Energiebedarfe für die Wärmebereitstellung der Baualtersklasse aus dem Jahr 2005 im Vergleich zu 1975 und 1985, führen zu niedrigeren Sensitivitäten bei Strom- und Gaspreisen.

In Tabelle 7 sind die kosteneffizientesten BVP für eine Baualtersklasse aus dem Jahr 2015 dargestellt. Die Entwicklung – vermehrte BVP von  $-6\text{ °C}$  – setzt sich fort. Der BVP für die aktuellen Energiebezugpreise liegt in Tabelle 7 ebenfalls bei  $-6\text{ °C}$ .

Tabelle 7 - Übersichtsmatrix zu kosteneffizientesten Bivalenzpunkt für unterschiedliche Strom- und Erdgaspreiskonstellationen zur Wärmebereitstellung für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 2015 mittels hybrider Wärmepumpe

| Auswahl<br>BVP             |    | Strombezugspreis in Cent/kWh |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------|----|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                            |    | 25                           | 31,25 | 37,5  | 43,75 | 50    | 56,25 | 62,5  | 68,75 | 75    | 81,25 | 87,5  |
| Gasbezugspreis in Cent/kWh | 6  | -2 °C                        | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  |
|                            | 9  | -6 °C                        | -6 °C | -2 °C | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  |
|                            | 12 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -2 °C | 4 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  |
|                            | 15 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -2 °C | 4 °C  | 6 °C  | 6 °C  | 6 °C  |
|                            | 18 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -2 °C | 2 °C  | 6 °C  |
|                            | 21 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -2 °C |
|                            | 24 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C |
|                            | 27 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C |
|                            | 30 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C |
|                            | 33 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C |
|                            | 36 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C |
|                            | 39 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C |
|                            | 42 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C |
|                            | 45 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C |
|                            | 48 | -6 °C                        | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C | -6 °C |

In Abbildung 39 sind Preissensitivitäten für die Baualtersklasse 2015 dargestellt. Auch hier liegen die Sensitivitäten für die Strompreise von -6 °C bis 0 °C (24 €/ΔCent/kWh bis 21 €/ΔCent/kWh) höher als die der Erdgaspreise (1 €/ΔCent/kWh bis 15 €/ΔCent/kWh). Im Bereich 2 °C bis 6 °C liegt wiederum die Sensitivität für Erdgas höher (27 €/ΔCent/kWh bis 69 €/ΔCent/kWh) als die von Strom (18 €/ΔCent/kWh bis 9 €/ΔCent/kWh).



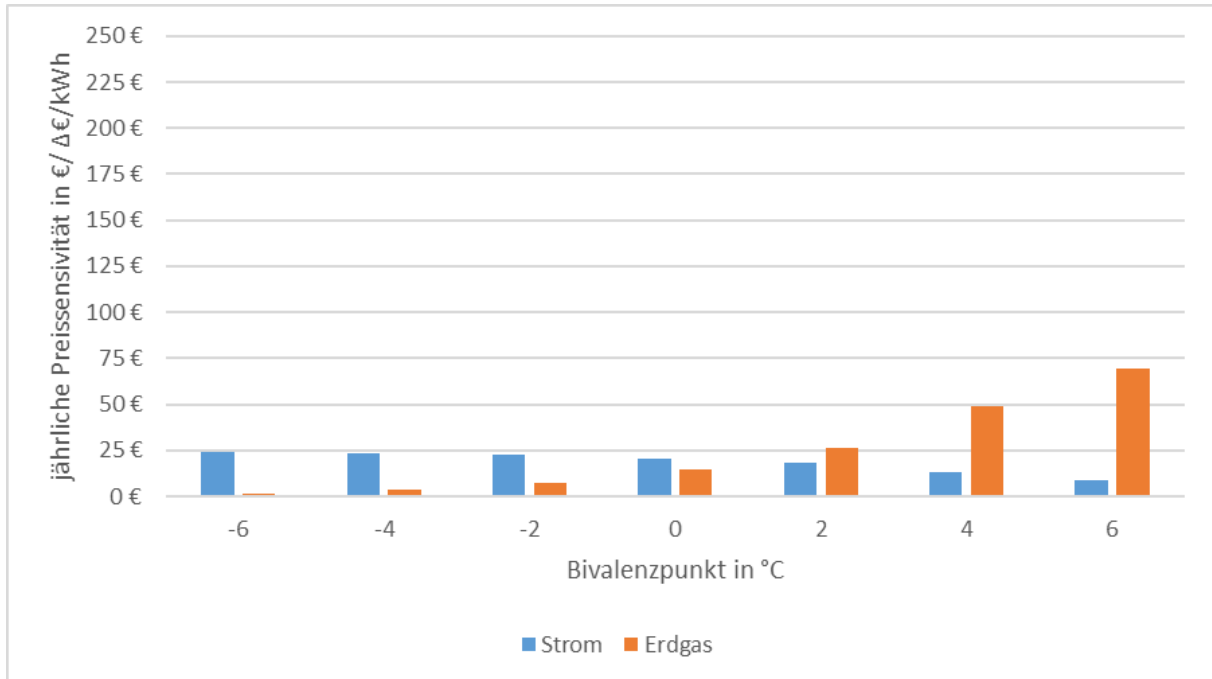


Abbildung 40 – Jährliche energiebedingten Kosten in Abhängigkeit steigender Strom- und Erdgaspreisen für ein Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 2015

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass insbesondere in der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 der BWK häufiger zum Einsatz kommt. Zurückgeführt werden kann dies, auf den hohen Energiebedarf, bei dem die WP ineffizienter wird und damit zusätzlich sensibler auf Strompreissteigerungen reagiert. Bei Baualtersklassen für das Jahr 2005 und insbesondere 2015 sind die Energiebedarfe vergleichsweise gering, was dazu führt, dass der effiziente Betrieb der Wärmepumpe (VL-Temperatur 35 °C) deutlich weniger sensibel für Strompreissteigerungen ist.

## 4 POTENZIALE DER HYBRIDEN WÄRMEERZEUGUNG DURCH NUTZUNG VON PHOTOVOLTAIK-DACHANLAGEN

Wesentlicher Bestandteil des Teilprojekts war die Untersuchung der Kopplung einer PV-Dachanlage mit einer hybriden WP. Ziel der Untersuchung ist es den Einfluss der Strombedarfsdeckung der hybriden WP durch die PV-Anlage zu bewerten. Hierfür wird die zu Beginn die Eigenverbrauchsquote der PV-Dachanlage für verschiedene Bivalenzpunkte von -6 °C bis 6 °C sowie ohne Nutzung für die WP dargestellt. Zusätzlich werden die bilanziellen jährlichen PV-Strommengen, die von der WP genutzt werden können abgebildet. Analog zur Bewertung der energiebedingten Emissionen und Kosten in Kapitel 3.5 und 3.6 wird der Einfluss der Einbindung einer PV-Dachanlage in das hybride WP-Konzept betrachtet.

Für die folgenden Untersuchungen wird eine PV-Dachanlage mit einer Leistung von 10 kW<sub>p</sub> in das bestehende Modell integriert. Die PV-Anlage hat eine Südausrichtung mit einem Winkel von 45° und einer jährlichen Stromproduktion von 9.723,85 kWh (siehe Anhang). Der Emissionsfaktor für PV-Strom wird mit 67 g CO<sub>2e</sub>/kWh angenommen,[16] die Vergütung für eingespeisten PV-Strom mit 6,83 Cent/kWh.[19] Dargestellt wird die jährliche Kostenreduzierung durch die Einbindung des PV-Stroms für die Wärmebereitstellung sowie die sich ändernde Strompreissensitivität. Es wird davon ausgegangen, dass prioritär der Strombedarf im Haushalt – exklusive Wärmebereitstellung – mit dem zur Verfügung stehenden PV-Strom bedient wird. Die weiteren Überschüsse werden von der WP genutzt oder in das öffentliche Stromnetz gespeist. Zur Abbildung realitätsnaher stromseitiger Bedarfe, wurden sieben Stromlastprofile aus der GWI-Datenbank genutzt. Ihre Jahresbedarfe sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8 -Übersicht Jahresbedarfe der Stromprofile 1 - 7

|               | Strombedarf in kWh/Jahr |
|---------------|-------------------------|
| Stromprofil 1 | 3.495,23                |
| Stromprofil 2 | 3.557,18                |
| Stromprofil 3 | 4.487,18                |
| Stromprofil 4 | 3.497,57                |
| Stromprofil 5 | 3.336,74                |
| Stromprofil 6 | 4.419,65                |
| Stromprofil 7 | 3.167,62                |

Der Stromverbrauch der Profile liegt zwischen 3.167,62 kWh (Stromprofil 7) und 4.487,18 kWh (Stromprofil 3). Zudem wird für die Untersuchung die Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 und dem Jahr 2015 verwendet.

## 4.1 Baualtersklasse 1975

### 4.1.1 Eigenverbrauchsquote

In Abbildung 41 ist die Eigenverbrauchsquote für den erzeugten PV-Strom für die sieben Stromprofile und BVP zwischen  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Außerdem ist die Eigenverbrauchsquote ohne WP-Nutzung abgebildet.

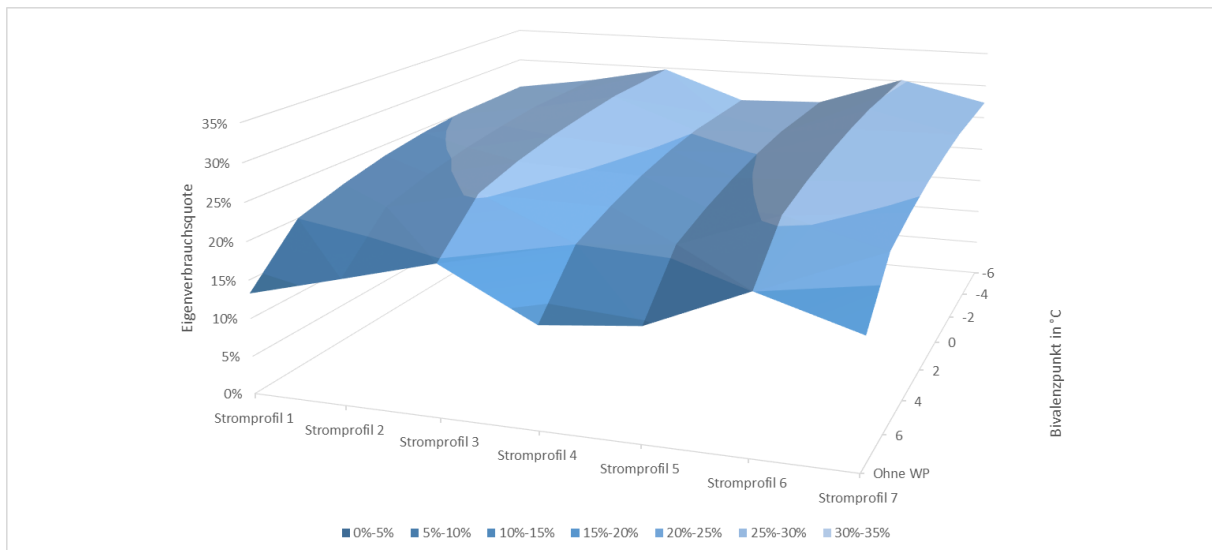


Abbildung 41 – PV-Strom-Eigenverbrauchsquote für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 für verschiedene Bivalenzpunkte und Stromprofile 1 - 7

Die PV-Eigenverbrauchsquote „ohne WP“ liegt zwischen 13 % und 20 %. Bei einem BVP von  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$  liegt die Eigenverbrauchsquote zwischen 20 % und 26 %, was je nach Stromprofil eine Erhöhung der Eigenverbrauchsquote zwischen 5 % und 7 % bedeutet. Bei  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  liegt in dieser Untersuchung der minimale BVP, was wiederum die höchste Betriebsdauer der WP bedeutet. Für den BVP  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  liegen die Eigenverbrauchsquoten zwischen 25 % und 30 % und damit zwischen 10 % und 12 % höher als ohne die Nutzung des PV-Stroms für die WP.

In Abbildung 42 ist der jährliche PV-Strom dargestellt, der durch die WP für unterschiedliche BVP aufgenommen wird. Bei einem BVP von  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$  liegt die PV-Strommenge zwischen 569 kWh und 656 kWh. Bei einem BVP von  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  werden zwischen 987 kWh und 1.181 kWh PV-Strom für die WP genutzt.

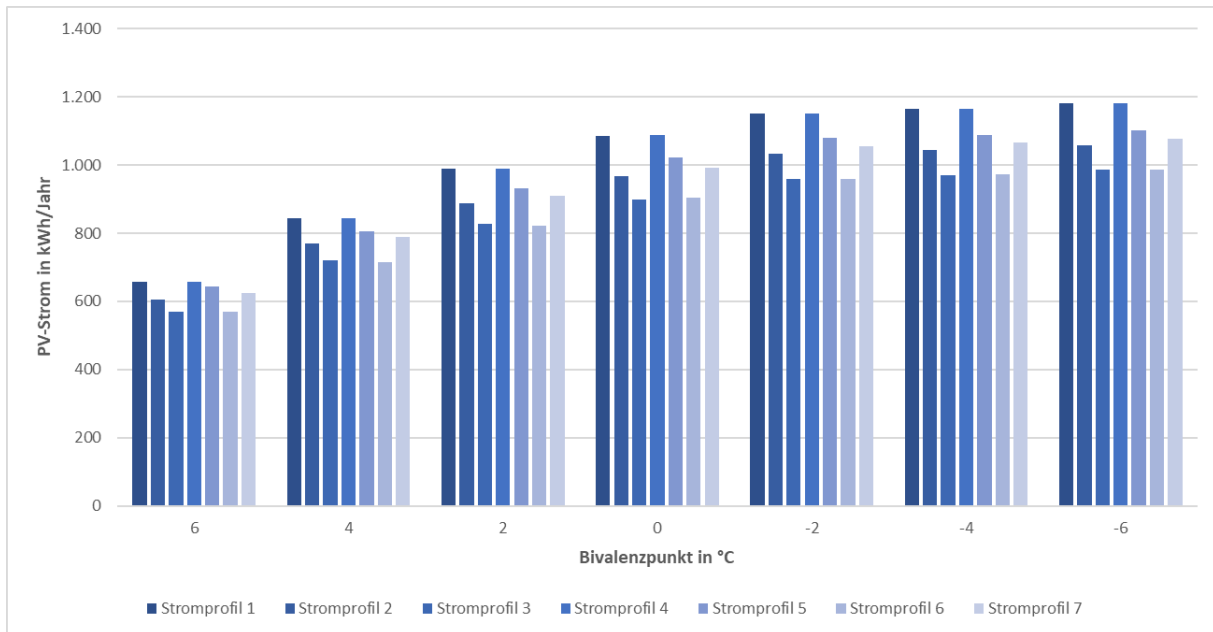


Abbildung 42 – Genutzter PV-Strom für die Wärmebereitstellung für ein Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 für die Stromprofile 1-7

Wie schon in Abbildung 41 zu erkennen ist, erhöht sich die genutzte PV-Strommenge für die BVP zwischen -2 °C und -6 °C nur minimal. Die größte Differenz zwischen -2 °C und -6 °C hat Stromprofil 1 mit 30 kWh. Das Ergebnis kann darauf zurückgeführt werden, dass in den Phasen für die TWW- und HWW-Bereitstellung zwischen -2 °C und -6 °C selten PV-Strom erzeugt bzw. weitere Überschüsse nach der prioritären Bedarfsdeckung zur Verfügung stehen.

#### 4.1.2 Energiebedingte Emissionen

In Abbildung 43 sind die jährlichen CO<sub>2</sub>-Einsparungen dargestellt, die durch die PV-Stromnutzung der WP erreicht werden. Beim BVP von 6 °C werden zwischen 201 kg CO<sub>2</sub>e und 232 kg CO<sub>2</sub>e eingespart. Liegt der BVP bei -6 °C liegt die CO<sub>2</sub>-Einsparung zwischen 348 kg CO<sub>2</sub>e und 417 kg CO<sub>2</sub>e. Wiederum bedeutet dies, dass die EE-Stromnutzung aus einer PV-Dachanlage für die Wärmeversorgung mittels hybrider WP zu 6,3 % bis 7,5 % CO<sub>2</sub>-Einsparungen führen können. Für einen BVP von 6 °C liegt die CO<sub>2</sub>-Einsparung zwischen 3,0 % und 3,4 %.

Für die energiebedingten Kosten wurden mit Stromprofil 1 und Stromprofil 3 zwei Betrachtungen durchgeführt, um eine Aussage über die finanziellen Auswirkungen der Einbindung von PV treffen zu können. Stromprofil 1 stellt dabei das Profil dar, bei dem die größte Menge PV-Strom für die Wärmezeugung durch die WP aufgenommen wurde, Stromprofil 3 hingegen das Profil mit der geringsten Stromaufnahme.

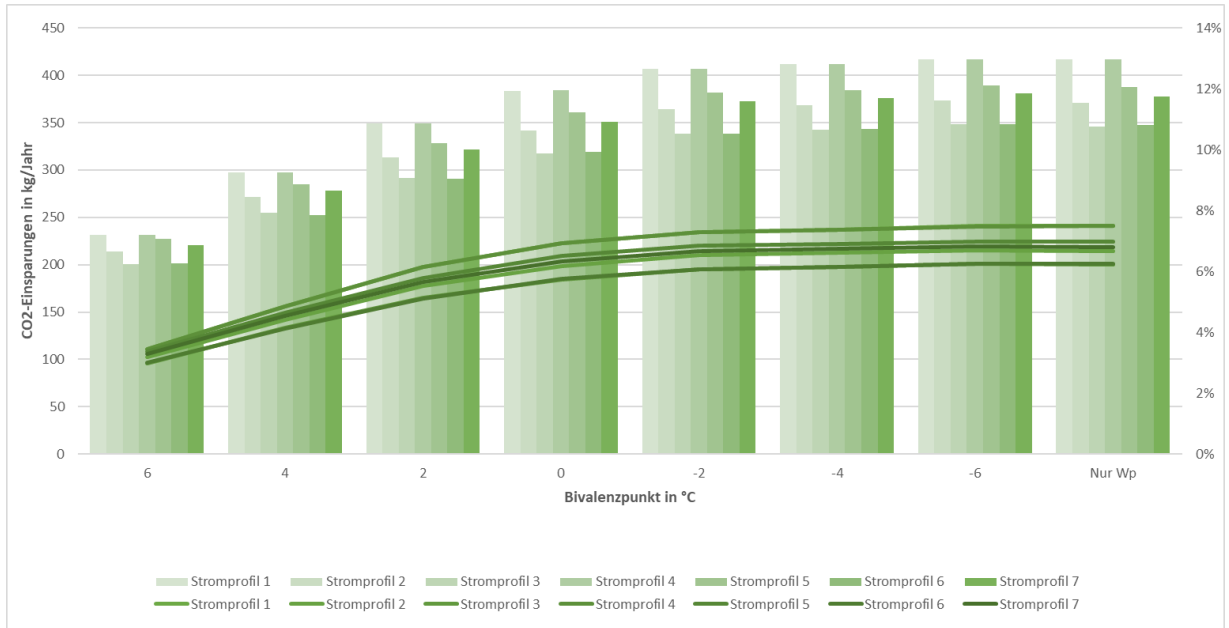


Abbildung 43 – Eingesparte jährliche Emissionen durch Nutzung von PV-Strom für das Gebäude mit der Baualterklasse aus dem Jahr 1975 kummuliert und anteilig

### 4.1.3 Energiebedingte Kosten

In Abbildung 44 sind für Stromprofil 1 die verringerten Kosten durch die Einbindung der PV-Anlage zur Wärmeversorgung dargestellt. Dabei wurden eine Strompreisentwicklung zwischen 25 Cent/kWh bis 87.5 Cent/kWh für die BVP -6 °C bis 6 °C betrachtet.

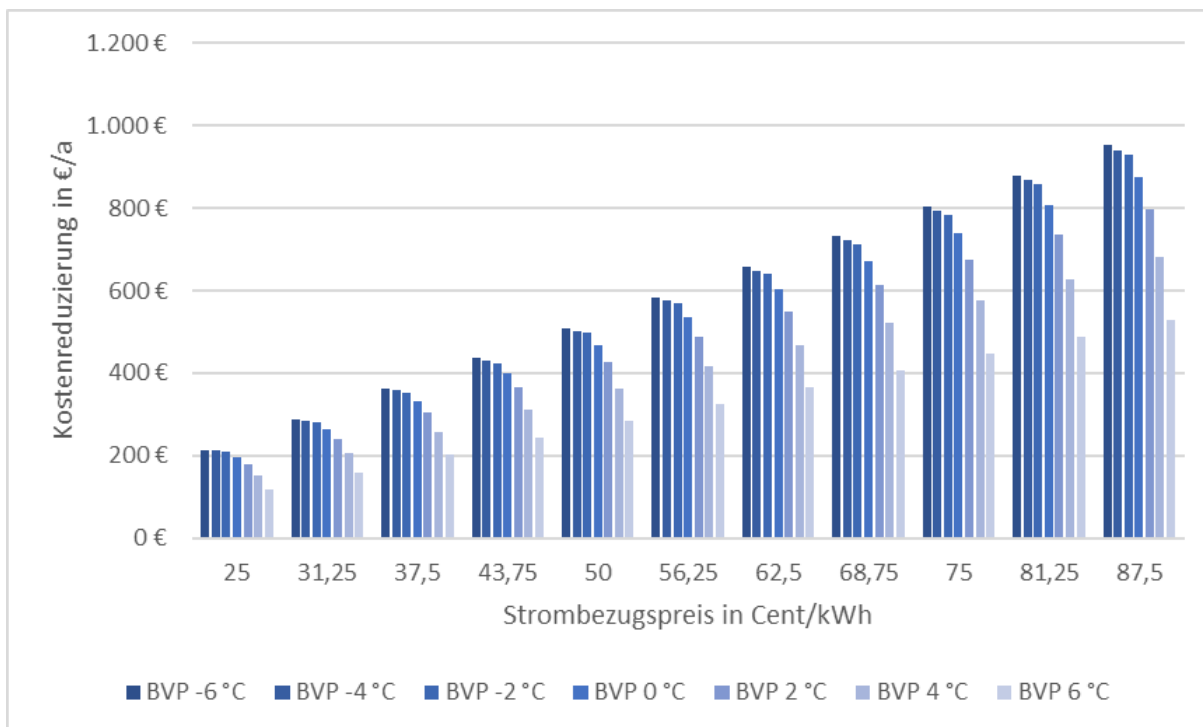


Abbildung 44 – Jährliche Kosteneinsparungen (Stromprofil 1) bei Nutzung von PV-Strom zur Wärmebereitstellung für unterschiedliche Strombezugspreise und Bivalenzpunkte für ein Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975

Bei dem unteren gewählten Strombezugspreis von 25 Cent/kWh liegt die Kostenersparnis im Jahr zwischen 119 € (BVP 6 °C) und 215 € (BVP -6 °C). Für die aktuellen Strompreise von rund 37,5 Cent/kWh könnten jährlich durch die 10 kW<sub>p</sub> PV-Anlage zwischen 201 € und 362 € für die Wärmebereitstellung eingespart werden. Bei einem maximal gewählten Strompreis von 87,5 Cent/kWh liegt Kostenminderung im Bereich von 530 € bis 953 €.

Für das Stromprofil 3 sind die Ergebnisse für die Kostenreduzierung in Abbildung 45 dargestellt. Durch die geringere PV-Stromaufnahme liegt das Einsparpotenzial etwas niedriger als für Stromprofil 1 in Abbildung 44. Bei einem Strombezugspreis von 25 Cent/kWh liegt das jährliche Einsparpotenzial zwischen 103 € bis 179 €, zum aktuellen Strompreis von 37,5 Cent/kWh bei 210 € bis 303 €. Bei einem angenommenen Strompreis von 87,5 Cent/kWh liegt die Ersparnis von 459 € bis 796 €.

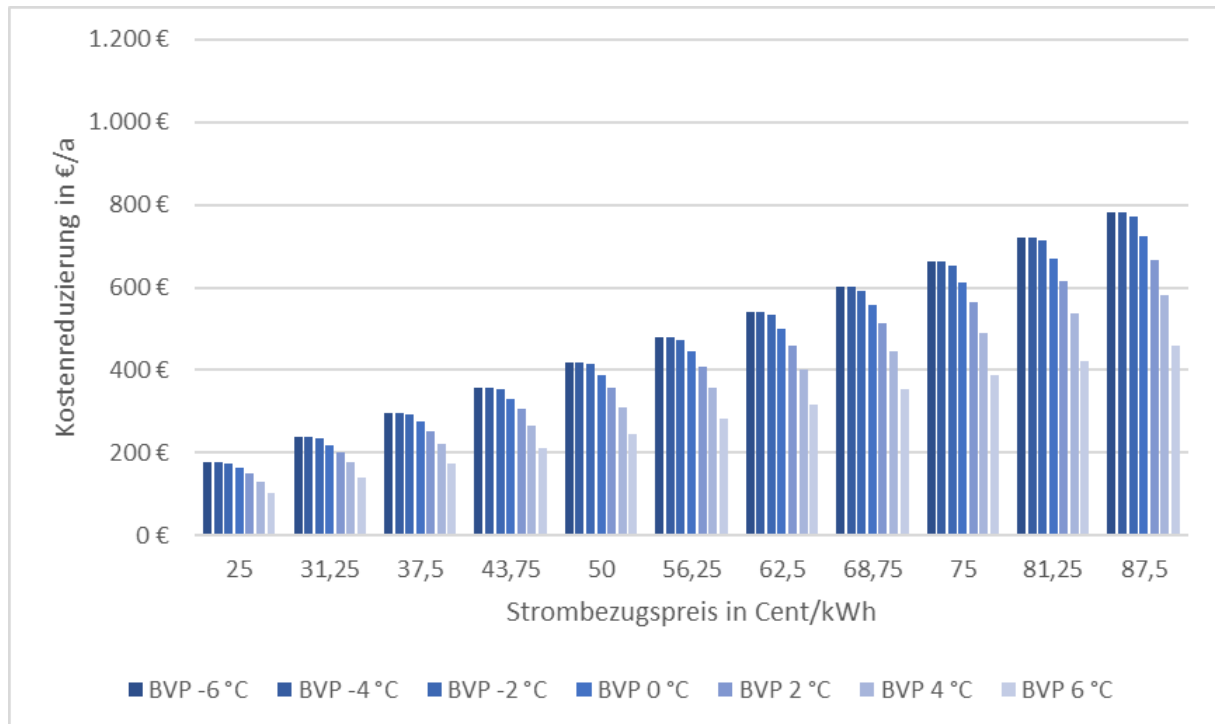


Abbildung 45 – Jährliche Kosteneinsparungen (Stromprofil 3) bei Nutzung von PV-Strom zur Wärmebereitstellung für unterschiedliche Strombezugspreise und Bivalenzpunkte für ein Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975

In Abbildung 44 und Abbildung 45 ist zu erkennen, dass der Strombezugspreis einen unmittelbaren Einfluss auf die Kosteneinsparungen bei der Einbindung einer PV-Anlage zur Wärmebereitstellung mittels WP. Das kann darauf zurückgeführt werden, dass die PV-Vergütung, die für die Einspeisung von PV-Strom gezahlt wird, konstant ist. Bei steigendem Strombezugspreis wächst auch die Differenz zwischen PV-Vergütung und Strombezugspreis. So liegt bei der vorliegenden Rechnung bei einem Strombezugspreis von 25 Cent/kWh die Differenz bei 18,17 Cent/kWh (die PV-Vergütung wird mit 6,83 Cent/kWh angenommen), bei einem Strombezugspreis von 87,5 Cent/kWh liegt die Differenz bei 80,67 Cent/kWh. Es kann also gesagt werden, dass mit steigenden Strompreisen die Strombereitstellung für die Wärmeversorgung aus einer eignen PV-Dachanlage höhere Kosteneinsparungen bedeutet.

In Abbildung 46 ist die Preissensitivität für die hybride WP mit der Einbindung von PV-Strom (Stromprofil 1 und Stromprofil 3) sowie ohne PV-Strom dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Preissensitivität mit PV-Strom geringer ist, als ohne PV-Strom. Das kann darauf zurückgeführt werden, dass der Anteil an Strom der aus dem öffentlichen Stromnetz zur Wärmebereitstellung bezogen wird, geringer ist. Die Preissensitivität für Stromprofil 1 und Stromprofil 3 liegt bei einem BVP von -6 °C bei einer Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 bei 119 €/ΔCent/kWh und 121 €/ΔCent/kWh, was 11 €/ΔCent/kWh bzw. 9 €/ΔCent/kWh weniger sind als ohne PV. Bei einem BVP von 6 °C liegen die in der Untersuchung geringsten Preissensitivitäten mit 43 €/ΔCent/kWh für Stromprofil 1 und 44 €/ΔCent/kWh für Stromprofil 3, was einer niedrigeren Preissensitivität von 7 €/ΔCent/kWh bzw. 6 €/ΔCent/kWh entspricht.

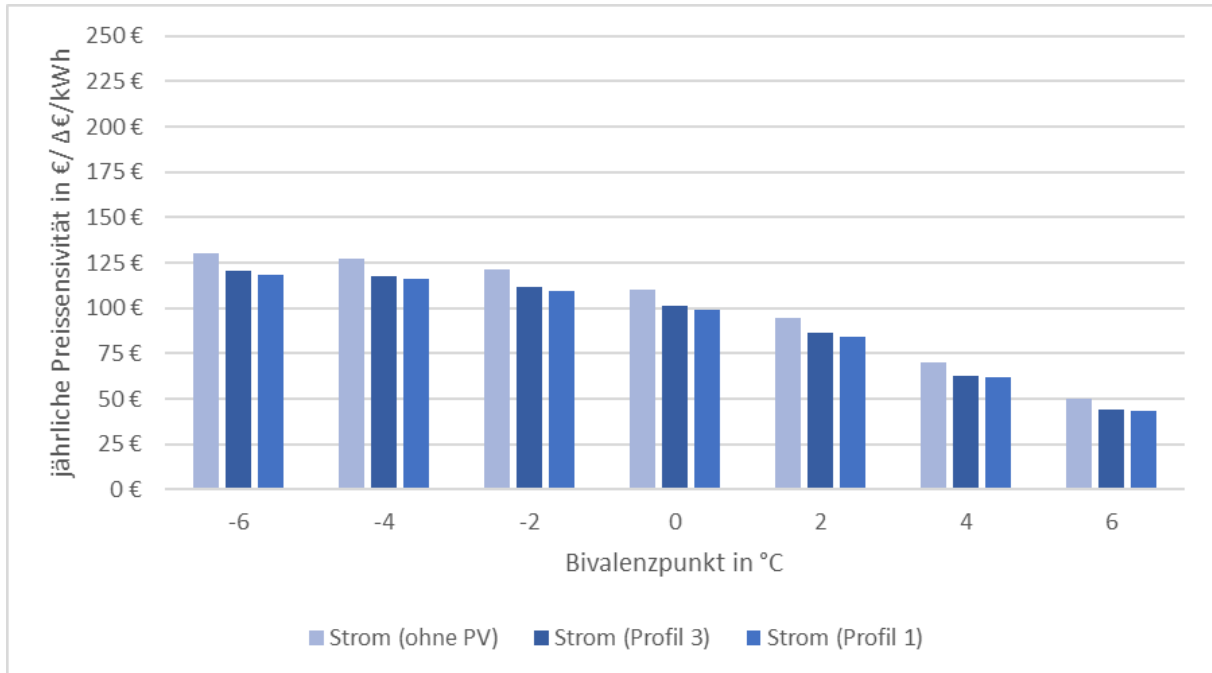


Abbildung 46 – Jährliche Betriebskostensteigerung in Abhängigkeit steigender Strompreise mit und ohne Nutzung von PV-Strom für ein Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 für verschiedene Bivalenzpunkte

## 4.2 Baualtersklasse 2015

### 4.2.1 Eigenverbrauchsquote 2015

Für die Baualtersklasse 2015 sind die Ergebnisse für die Einbindung der PV-Dachanlage in Abbildung 47 dargestellt. Da in dieser Betrachtung mit den gleichen Stromlastprofilen gerechnet wurde, wie zuvor für die Baualtersklasse 1975 sind die Eigenverbrauchsquoten „ohne WP“ zu Abbildung 41 identisch. Bei einem BVP liegt die PV-Eigenverbrauchsquote zwischen 16 % und 22 %, was einer Erhöhung im Bereich von 2 % bis 3 %, je nach Stromlastprofil, bedeutet. Bei einem BVP von -6 °C liegen die PV-Eigenverbrauchsquoten zwischen 17 % und 23 % und damit 3 % bis 4 % höher als ohne die Nutzung einer WP. Dass die Eigenverbrauchsquote der PV-Anlage für die Baualtersklasse 2015 geringer als die für 1975 ausfällt, kann auf den niedrigeren Strombedarf (siehe Abbildung 32) zurückgeführt werden.



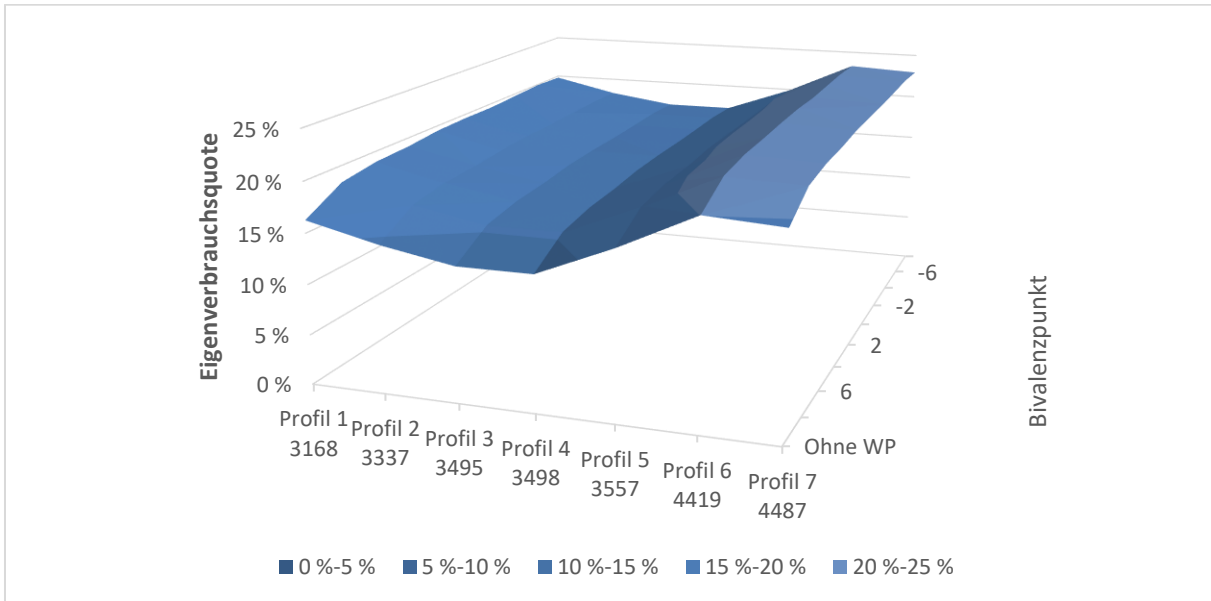


Abbildung 47 - PV-Strom-Eigenverbrauchsquote für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 2015 für verschiedene Bivalenzpunkte und Stromprofile 1 - 7

Diese Annahme wird ebenfalls durch Abbildung 48 bestätigt. Der aus der PV-Anlage erzeugte EE-Strom liegt bei einem BVP von 6 °C zwischen 236 kWh und 270 kWh pro Jahr und für einen BVP von -6 °C zwischen 322 kWh und 388 kWh. Auch für die Baualtersklasse 2015 liegt die zusätzliche Stromaufnahme zwischen -2 °C und -6 °C bei 30 kWh, was im Vergleich zur Baualtersklasse aus 1975 aber zum verbrauchten PV-Strom verhältnismäßig mehr als das 3-fache (siehe Abbildung 42) ist.

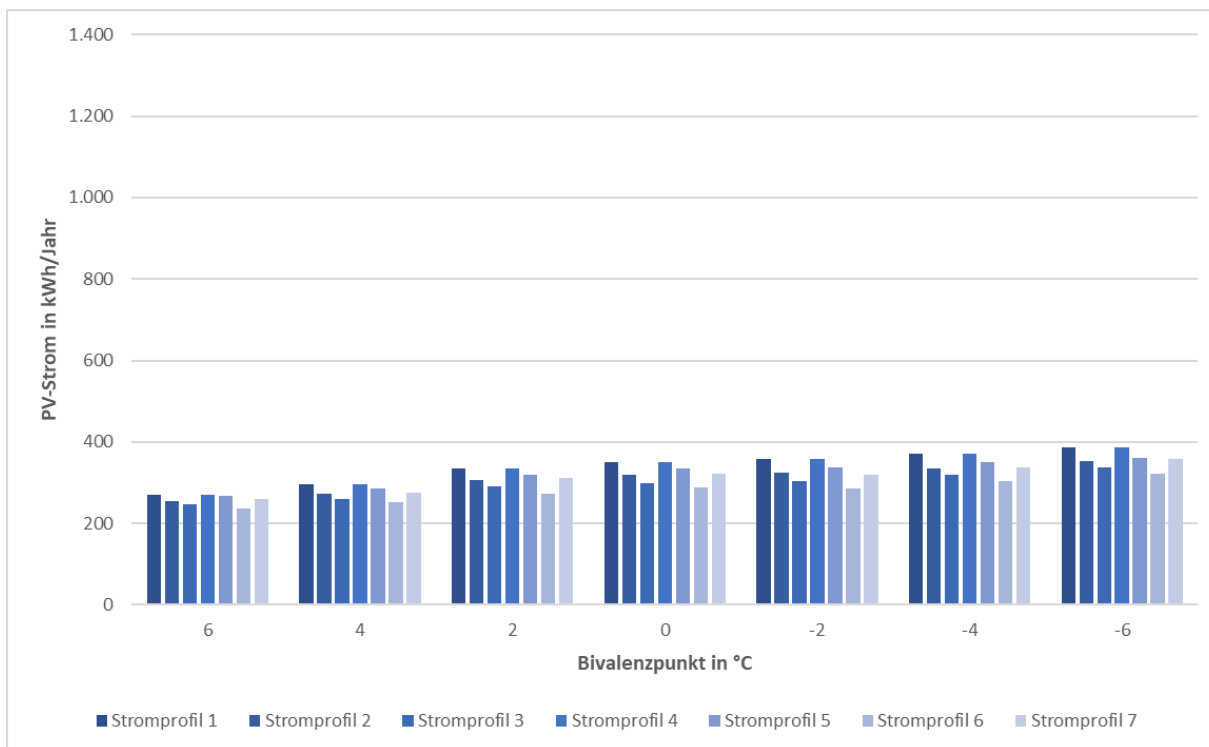


Abbildung 48 – Genutzter PV-Strom für die Wärmebereitstellung für ein Gebäude der Baualterklasse aus dem Jahr 2015 für die Stromprofile 1-7

#### 4.2.2 Energiebedingte Emissionen

In Abbildung 49 sind die jährlichen CO<sub>2</sub>-Einsparungen dargestellt, die durch die PV-Stromnutzung der WP erreicht werden. Beim BVP von 6 °C werden zwischen 87 kg CO<sub>2</sub>e und 95 kg CO<sub>2</sub>e eingespart, was 4,7 % bis 5,4 % entspricht. Liegt der BVP bei -6 °C liegt die CO<sub>2</sub>-Einsparung zwischen 113 kg CO<sub>2</sub>e und 137 kg CO<sub>2</sub>e. Wiederum bedeutet dies, dass die EE-Stromnutzung aus einer PV-Dachanlage für die Wärmeversorgung mittels hybrider WP zu 10,9 % bis 13,2 % CO<sub>2</sub>-Einsparungen führen können.

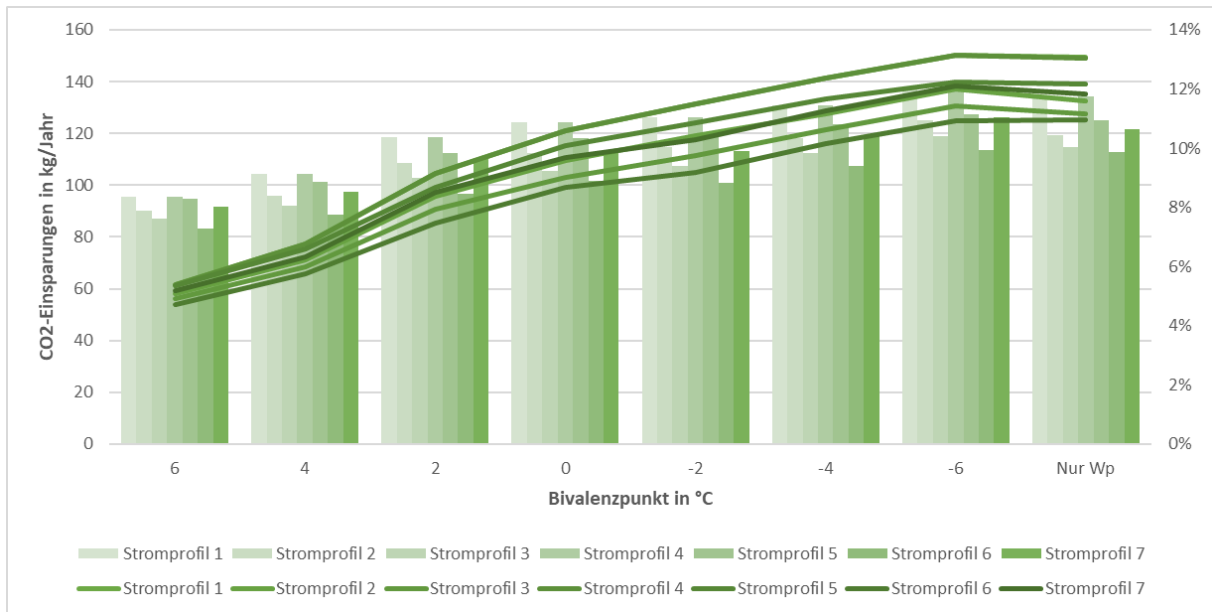


Abbildung 49 - Eingesparte jährliche Emissionen durch Nutzung von PV-Strom für das Gebäude mit der Baualtersklasse aus dem Jahr 2015 kummuliert und anteilig

### 4.2.3 Energiebedingte Kosten

Analog zur Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 wurden für 2015 auch die Stromprofile 1 und 3 als untere und obere Grenze der Stromnutzung aus der eigenen PV-Dachanlage gewählt.

Die Ergebnisse für Stromprofil 1 hinsichtlich der Kosteneinsparpotenziale sind in Abbildung 50 zu erkennen. Bei dem unteren gewählten Strombezugspreis von 25 Cent/kWh liegt die Kostenersparnis im Jahr zwischen 49 € und 70 €. Für die aktuellen Strompreise von rund 37,5 Cent/kWh könnten zwischen 83 € und 119 € für die Wärmebereitstellung eingespart werden. Bei einem maximal gewählten Strompreis von 87,5 Cent/kWh liegt Kostenminderung im Bereich von 218 € bis 313 €.

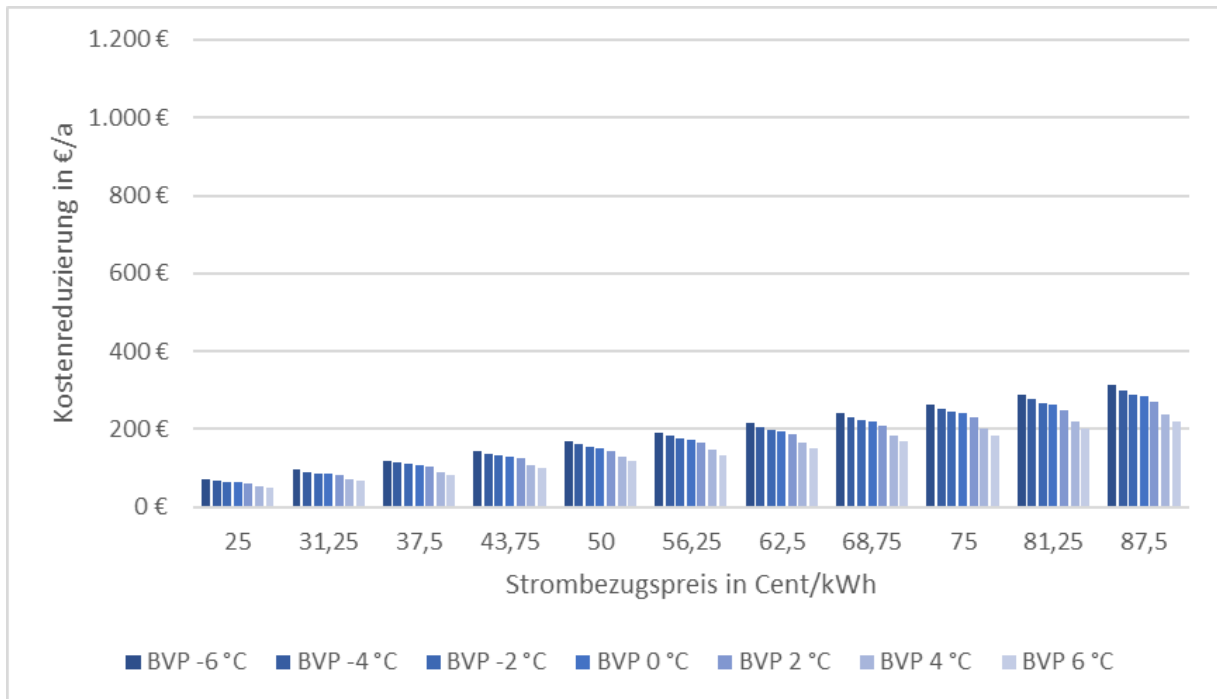


Abbildung 50 - Jährliche Kosteneinsparungen (Stromprofil 1) bei Nutzung von PV-Strom zur Wärmebereitstellung für unterschiedliche Strombezugspreise und Bivalenzpunkte für ein Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 2015

Für das Stromprofil 3 sind die Ergebnisse für die Kostenreduzierung in Abbildung 51 dargestellt. Durch die geringere PV-Stromaufnahme liegt das Einsparpotenzial etwas niedriger als für Stromprofil 1 in Abbildung 50. Bei einem Strombezugspreis von 25 Cent/kWh liegt das jährliche Einsparpotenzial zwischen 45 € bis 61 €, zum aktuellen Strompreis von 37,5 Cent/kWh bei 76 € bis 103 €. Bei einem angenommenen Strompreis von 87,5 Cent/kWh liegt die Ersparnis von 199 € bis 272 €.

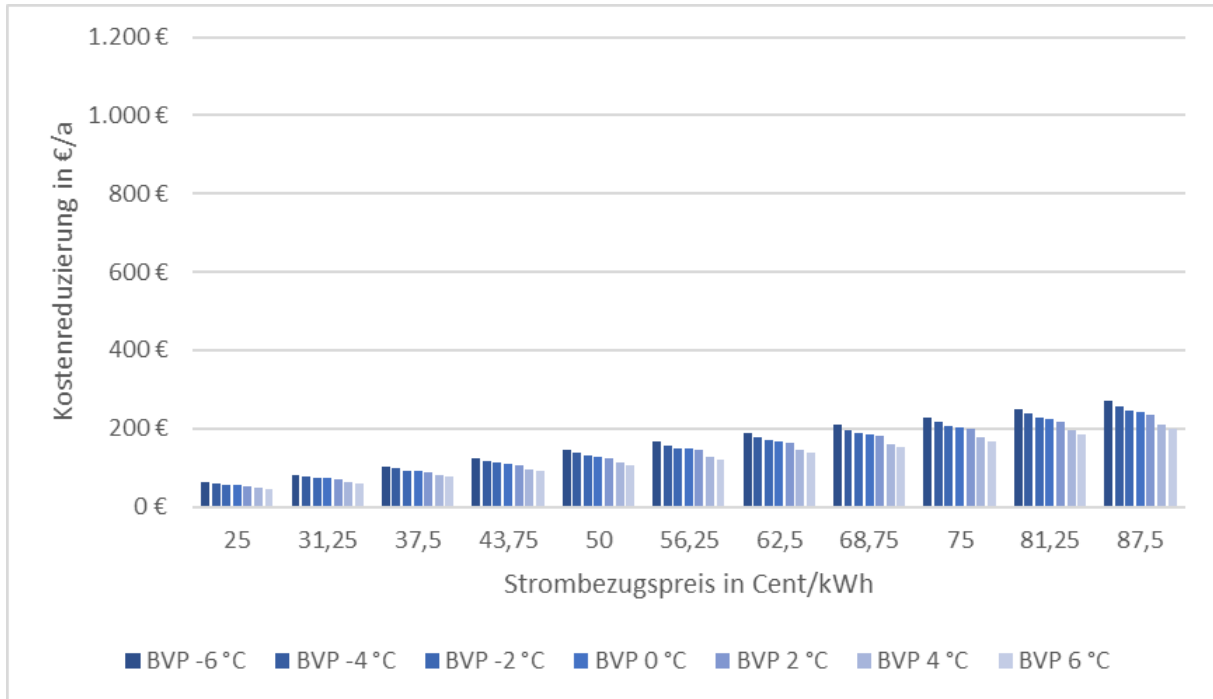


Abbildung 51 - Jährliche Kosteneinsparungen (Stromprofil 3) bei Nutzung von PV-Strom zur Wärmebereitstellung für unterschiedliche Strombezugspreise und Bivalenzpunkte für ein Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 2015

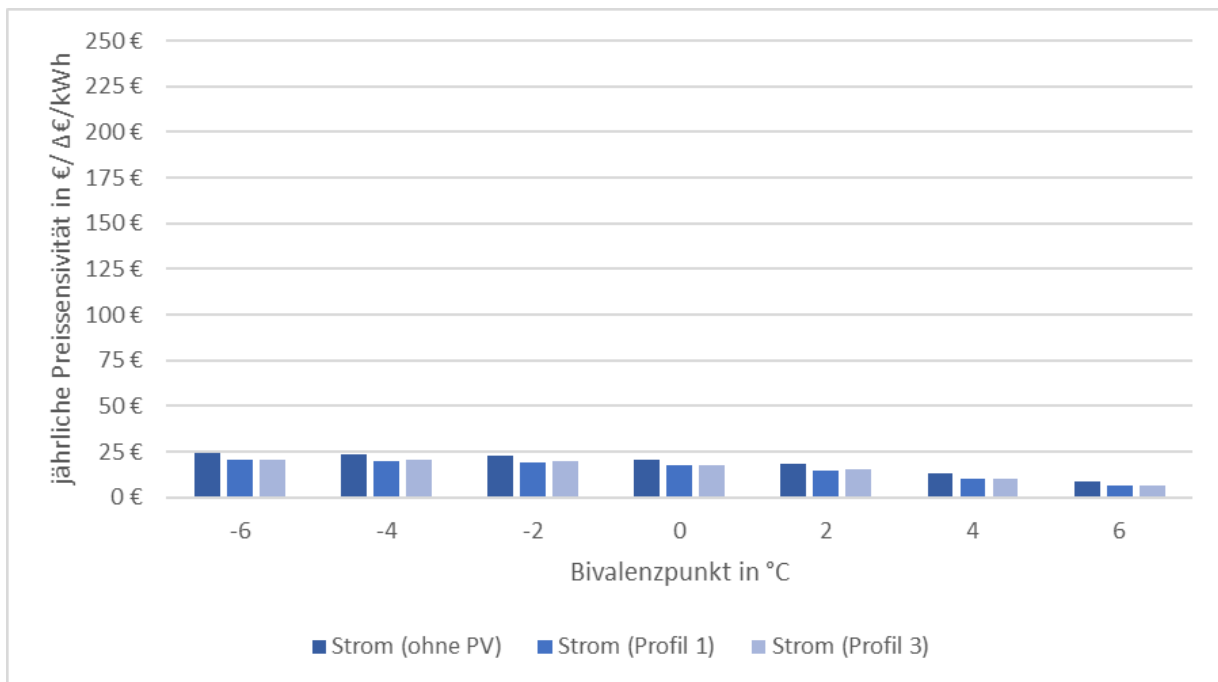


Abbildung 52 - Jährliche Betriebskostensteigerung in Abhängigkeit steigender Strompreise mit und ohne Nutzung von PV-Strom für ein Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 2015 für verschiedene Bivalenzpunkte

In Abbildung 52 ist die Preissensitivität für die hybride WP mit der Einbindung von PV-Strom (Stromprofil 1 und Stromprofil 3) sowie ohne PV-Strom dargestellt. Die Preissensitivität für Stromprofil 1 und Stromprofil 3 liegt bei einem BVP von -6 °C bei einer Baualtersklasse aus dem Jahr 2015 bei 20 €/ΔCent/kWh und 21 €/ΔCent/kWh, was 4 €/ΔCent/kWh bzw. 3 €/ΔCent/kWh weniger sind als

ohne PV. Bei einem BVP von 6 °C liegen die in der Untersuchung geringsten Preissensitivitäten mit 6 €/ΔCent/kWh für Stromprofil 1 und für Stromprofil 3 gleich niedrig, was einer geringere Preissensitivität von 3 €/ΔCent/kWh entspricht.

Die Kosteneinsparungen in Summe fallen für die Baualtersklasse 2015 zwar geringer als für die Baualtersklasse 1975 aus, anteilig an den Kosten ohne PV-Strom liegt die Kosteneinsparung bei dem Gebäude aus der Baualtersklasse 2015 höher. Für die Baualtersklasse aus dem Jahr 2015 liegen die Kosteneinsparungen anteilig zwischen 1 % und 22,3 %, während für die Baualtersklasse 1975 die Einsparung im Bereich zwischen 0,7 % und 10,2 % liegt. Für das Stromprofil 3 liegen die Anteile für 2015 bei 0,9 % bis 19,9 %, für 1975 zwischen 0,6 % und 8,9 %.

### 4.3 Ergebnisvergleich der Baualtersklassen 1975 und 2015

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Nutzung von PV-Strom zur Wärmebereitstellung mittels hybrider WP einen positiven ökologischen sowie ökonomischen Effekt besitzt. Für Gebäude der Baualtersklasse 1975 steigt die PV-Stromaufnahme bis zu einem BVP von -2 °C, was damit begründet werden kann, dass wenige bis keine PV-Überschüsse an kalten Tagen von unter -2 °C vorliegen. Ein Gebäude mit einer Baualtersklasse aus dem Jahr 2015 hat zwar nicht mehr Strom in diesen Phasen zur Verfügung, benötigt aber weniger Strom, um die notwendige Wärmemenge bereitzustellen. Aus diesem Grund steigen auch die PV-Stromanteile bei gewählten BVP von < -2 °C. In Abbildung 53 sind die monatlichen Wärmebedarfe für die vier untersuchten Baualtersklassen dargestellt. Zum einen wird deutlich das die PV-Stromerzeugung in den Phasen ihre größte Produktion hat, in denen der geringste Wärmebedarf vorliegt. Zum anderen zeigt sie aber auch, dass ältere Baualtersklassen durch ihren auch im Sommer und in den Übergangsjahreszeiten bestehenden Wärmebedarf häufiger die PV-Stromerzeugung nutzen können.

Ökologisch können durch die in dieser Untersuchung eingebundene PV-Dachanlage zwischen 3,0 % und 7,5 % CO<sub>2</sub> für die Baualtersklasse 1975 eingespart werden. Für die Baualtersklasse 2015 liegen die Einsparungen zwischen 4,7 % und 13,2 %. Das die Baualtersklasse 2015 anteilig mehr CO<sub>2</sub> einsparen kann, ist darauf zurückzuführen, dass am Gesamtstrombedarf mehr Strom aus der PV-Dachanlage genutzt wird. In Summe liegt die jährliche CO<sub>2</sub>-Einsparung bei der Baualtersklasse 1975 bei 201 kg CO<sub>2</sub>e bis 417 kg CO<sub>2</sub>e, bei der Baualtersklasse 2015 hingegen zwischen 87 kg CO<sub>2</sub>e und 137 kg CO<sub>2</sub>e.

Bei den ökonomischen Ergebnissen verhält es sich analog zu den ökologischen Ergebnissen. Während die Baualtersklasse 2015 anteilig mehr Kosten einsparen kann, sind die eingesparten Gesamtkosten für die Baualtersklasse 1975 höher. Für die ökonomische Untersuchung wurden die Stromprofile 1 und 3 genutzt. Bei der Baualtersklasse 2015 liegen die anteiligen Einsparungen zwischen 1 % und 22,3 %, für die Baualtersklasse 1975 bei 0,7 % bis 10,2 %. In Summe bedeutet das für die Baualtersklasse 2015 reduzierte Kosten in Höhe von 45 € bis 313 € und für die Baualtersklasse 1975 zwischen 103 € und 953 € im Jahr. Finanziell attraktiv wird die Nutzung von PV-Strom insbesondere bei höheren Strombezugskosten.

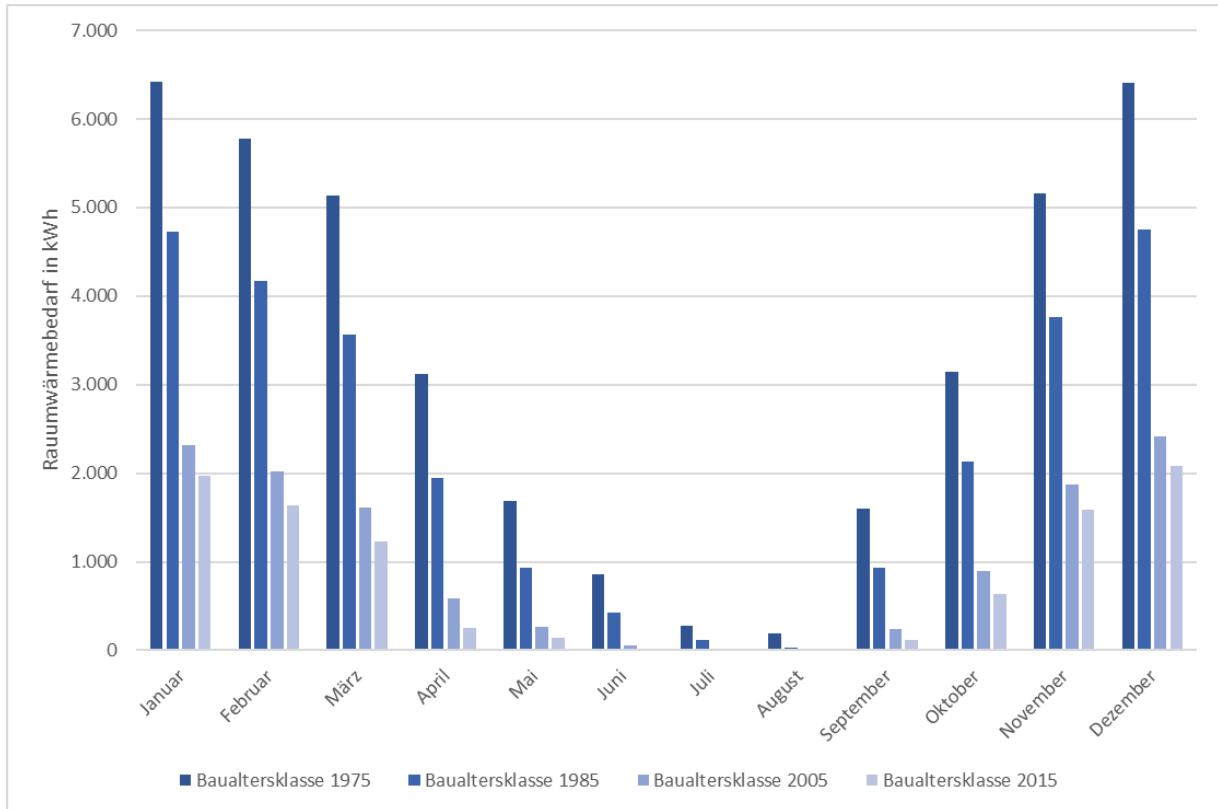


Abbildung 53 - Monatlicher Raumwärmebedarf für die Gebäudebaualterklassen 1975, 1985, 2005 und 2015

## 5 AUFBAU PRÜFSTAND HYBRIDE WÄRMEPUMPE AM GWI

In diesem Teil des Forschungsvorhabens war das Ziel der Aufbau, der Betrieb und die Vermessung einer hybriden Wärmepumpe, um u.a. die vorangegangenen Simulationsergebnisse zu verifizieren. Das hybride Wärmesystem besteht aus folgenden Komponenten:

- Luft/Wasser-Wärmepumpe mit 10,9 kW (A7/W35) Nenn-Wärmeleistung
- Gas-Brennwertmodul mit Nennleistung von 3,2 kW bis 19,0 kW
- 130 Liter Trinkwarmwasserspeicher
- Projektrelevante Anlagensteuerung wie BVP-Adaption, TWW-Erwärmung und Solarerweiterung

Die Wärmepumpe selbst besteht aus einer außerhalb des Gebäudes montierten Außeneinheit (vgl. Aufbau am GWI Abbildung 55) und einer im Gebäude montierten Inneneinheit (vgl. Abbildung 56 und Abbildung 57). Bis auf den Verflüssiger befinden sich alle Komponenten des Kältekreis in der Außeneinheit, einschließlich dem Kältekreisregler. Die Inneneinheit beinhaltet neben den hydraulischen Komponenten für den Sekundärkreis auch den Verflüssiger des Kältekreis und die Wärmepumpenregelung. Inneneinheit und Außeneinheit sind hydraulisch über Kältemittelleitungen miteinander verbunden. Die Kommunikation zwischen Innen- und Außeneinheit erfolgt über Modbus. Der Aufbau des Teststands der hybriden WP ist in einer Schemazeichnung in Abbildung 54 dargestellt. Während dem technischen Betrieb werden Erdgas- und Stromversorgung sowie Wärmeproduktion gemessen.

### Technischer Aufbau des Hybrid-Wärmepumpen-Teststands

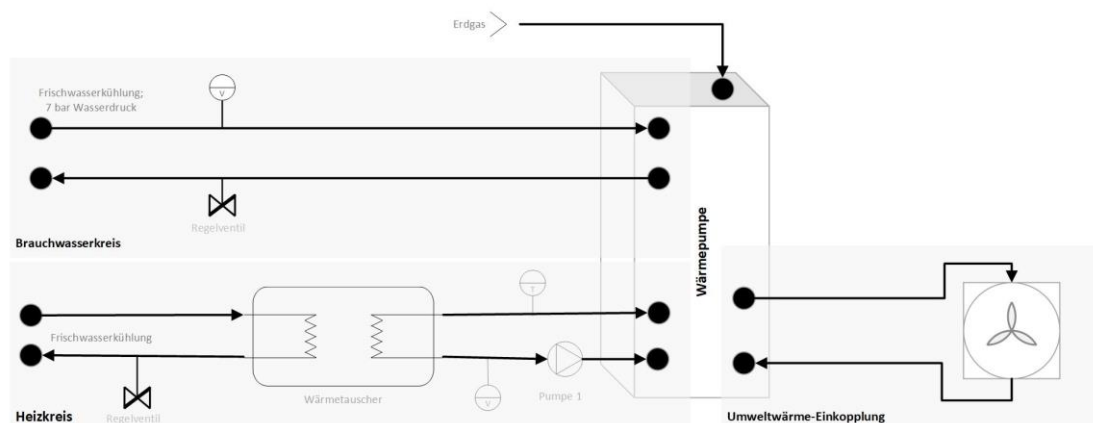


Abbildung 54 - Technischer Aufbau des Hybrid-Wärmepumpen-Teststands

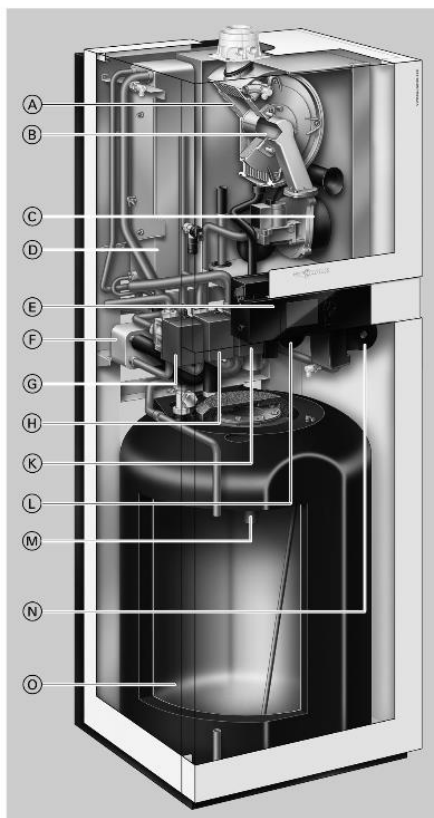
Für die Erdgasmengenmessung wurde der Massendurchflussmesser verwendet, für die Strommessung ist ein Messumformer. Die Wärmebereitstellung wurde mit pt100-Sensoren und einem Messwandler



dargestellt. Zudem wurde ein pt100-Sensor an der Außeneinheit der Wärmepumpe installiert, um die Außentemperatur kontinuierlich zu messen.



Abbildung 55 -Prüfstand: Außeneinheit Wärmepumpe



- Ⓐ Innox-Radial-Heizflächen aus Edelstahl Rostfrei für hohe Betriebssicherheit bei langer Nutzungsdauer und für große Wärmeleistung auf kleinstem Raum
- Ⓑ Modulierender Matrix-Zylinderbrenner für extrem niedrige Schadstoff-Emissionen und leise Betriebsweise
- Ⓒ Drehzahlgeregeltes Verbrennungsluftgebläse für geräuscharmen und stromsparenden Betrieb
- Ⓓ Verflüssiger
- Ⓔ Wärmepumpenregelung Vitotronic 200, Typ WO1C mit Hybrid Pro Control
- Ⓕ Plattenwärmetauscher Heizwasser
- Ⓖ 3-Wege-Umschaltventil „Heizen/Trinkwassererwärmung“
- Ⓗ 3-Wege-Umschaltventil „Bivalenzbetrieb“
- Ⓚ 3-Wege-Umschaltventil „Brennwertmodul“
- Ⓛ Speicherladepumpe (Umwälzpumpe mit Leistungsregelung über PWM-Signal)
- Ⓜ Magnesium-Schutzanode
- Ⓝ Sekundärpumpe (Hocheffizienz-Umwälzpumpe mit Leistungsregelung über PWM-Signal)
- Ⓞ Ladespeicher mit 130 l Inhalt

Abbildung 56 - Viessmann Planungsanleitung Hybrid-Geräte[13]



*Abbildung 57 – Prüfstand: Brennwertkessel, Wärmetauscher, Trinkwarmwasserspeicher und Anlagensteuerung*

Neben der hybriden WP wurde zur Erfassung von Strom- und Erdgasbedarfen zur Wärmebedarfsdeckung sowie die bereitgestellte Wärme gemessen. Hierfür wurde der Teststand in Abbildung 58 aufgebaut und an die hybride WP angeschlossen. In Abbildung 59 ist eine Übersicht zu den verschiedenen Messpunkte- und daten dargestellt. So werden der hybriden WP Wärmebedarfe vorgegeben, die über Wärmebedarfsprofile aus den vorangegangenen Simulationen in den Teststand eingebracht wurden.

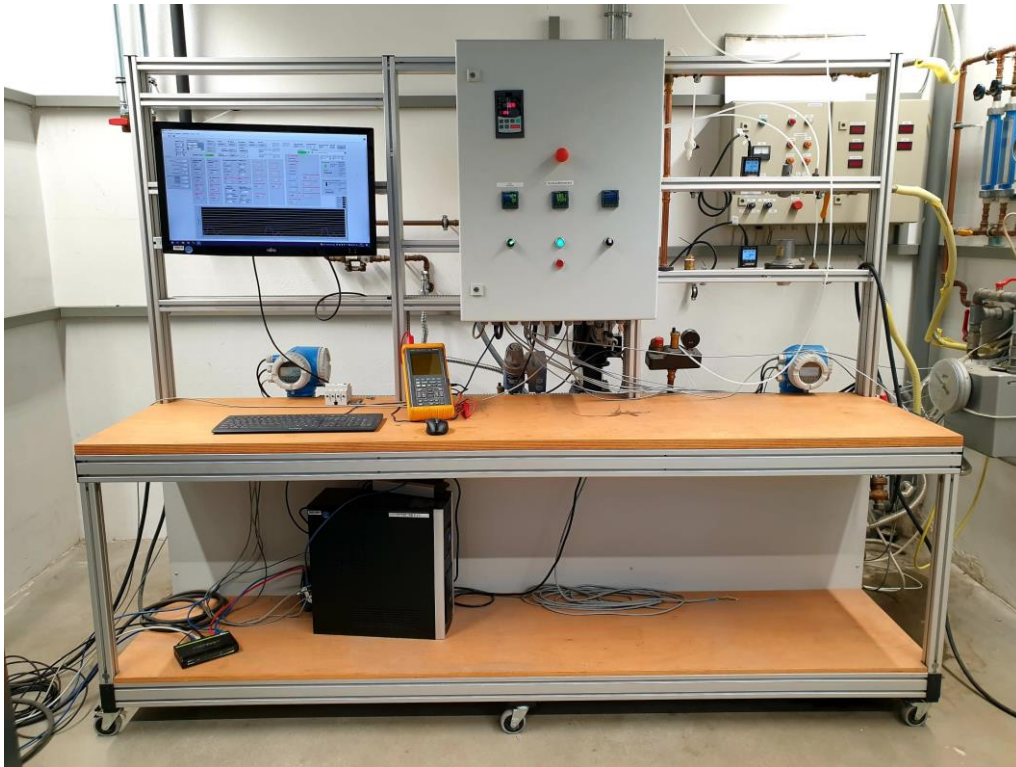


Abbildung 58 – Prüfstand: Einheit Messgeräte, Datenlogger, etc.



Abbildung 59 – Prüfstand: Übersichtsbildschirm Messwerte



In Abbildung 60 und Abbildung 61 sind Ausschnitte der Messergebnisse für den Teststand hybride WP dargestellt. Die Wärmebedarfe wurden von einem Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 genutzt. Die abgebildeten Versuchsreihen stammen aus der Übergangsjahreszeit (Oktober). Zu sehen ist die maximale Leistungsaufnahme WP von etwa 4 kW. Die Vorlauftemperatur lag bei bis zu 62 °C. Gut nachvollziehbar ist die Dynamik der WP durch die Ein- und Abschaltvorgänge bei zu niedrigen oder hohen Vorlauftemperaturen. Die plausiblen Messergebnisse weisen den erfolgreichen Betrieb des Teststands nach.

Weitere Messergebnisse, die hier nicht dargestellt werden sind:

- Rücklauftemperatur in °C
- Erdgasbedarf für BWK in Nm<sup>3</sup> und kW
- Kumulierter Erdgasbedarf in kWh
- Kumulierter Strombedarf der WP in kWh
- TWW-Speichertemperatur in °C
- Diverse Abgasmessungen (NO<sub>x</sub>, CO, NO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>)

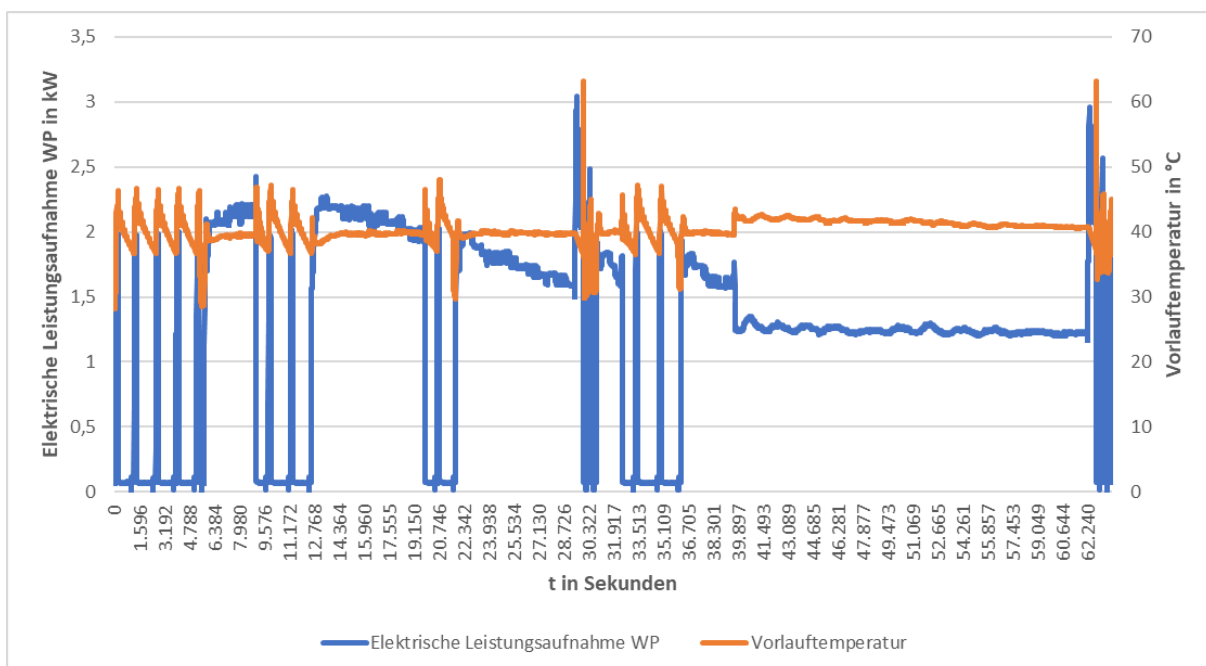


Abbildung 60 – Ergebnisse 17 Stunden Messreihe für elektrischen Leistungsaufnahme der WP und Vorlauftemperatur Teststand hybride Wärmepumpe

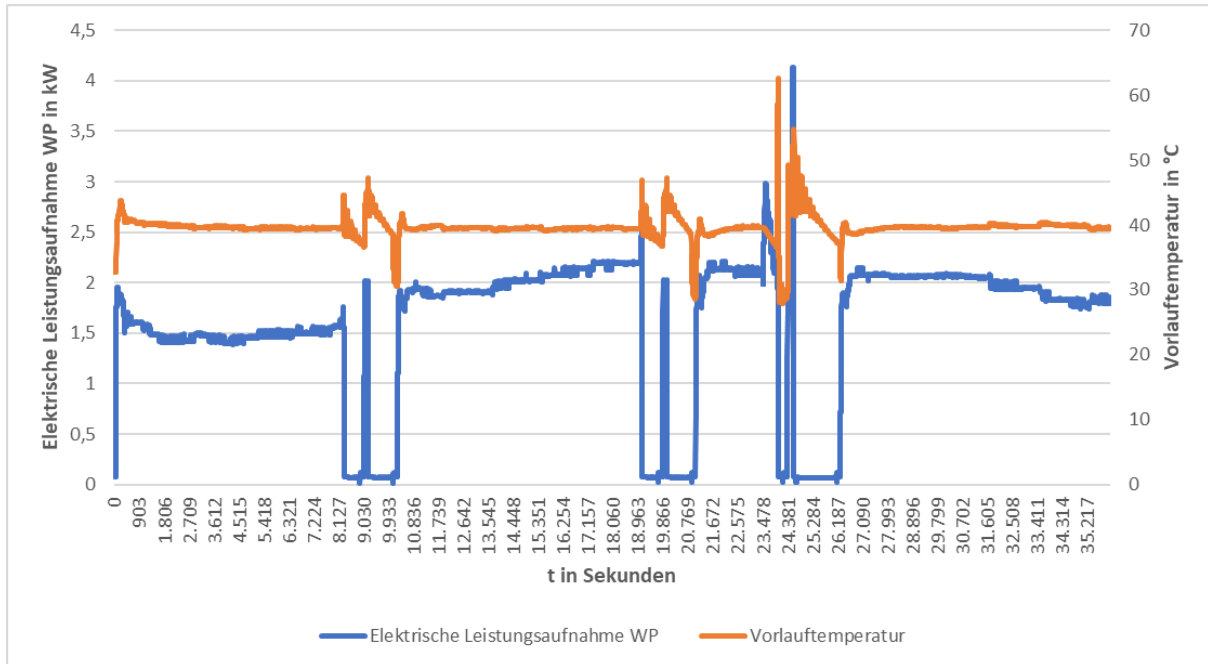


Abbildung 61 - Ergebnisse 10 Stunden Messreihe für elektrischen Leistungsaufnahme der WP und Vorlauftemperatur Teststand hybride Wärmepumpe

---

## 6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Teilprojekt "Smart Heating - Bivalente Power-to-Heat-Systeme in Wohngebäuden" wurden hybride WP basierend auf elektrischer Luft/Wasser WP und BWK untersucht. Neben der Betrachtung für unterschiedlichen Baualtersklassen (1975, 1985, 2005 und 2015), wurde insbesondere der BVP hinsichtlich Energieeinsatz sowie Auswirkungen auf die energiebedingten Emissionen und Kosten untersucht.

Hinsichtlich der Baualtersklassen kann gesagt werden, dass die Nutzung einer hybriden WP realisierbar ist. Während für die moderneren Gebäudealtersklassen aus den Jahren 2005 und 2015 die WP selbst bei niedrigeren BVP (bis  $-6\text{ °C}$ ) auch mit Vorlauftemperaturen von  $35\text{ °C}$  die Wärmebereitstellung realisieren kann, ist bei der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 Vorlauftemperatur von bis zu  $65\text{ °C}$  nötig um die benötigte Wärmeleistung bereitstellen zu können. Im Rahmen des Teilprojekts wurden in allen Gebäuden mit Fußbodenheizungen gerechnet, sodass bei einem älteren Heizungssystem mit Radiatoren davon auszugehen ist, dass die WP in den älteren Baualtersklassen eine zu geringe Heizlast besitzt. Durch die Kombination mit einem BWK kann die WP aber dennoch große Teile der Heizphasen übernehmen und auch an den Tagen mit hoher Heizlast die Wärmebedarfsdeckung abbilden. So besitzen auch ältere, nicht modernisierte Gebäude die Möglichkeit elektrische WP zur Wärmebereitstellung einzusetzen und bieten Hausbesitzer die Option einer stufenweisen Modernisierung.

Durch den Einsatz der hybriden WP können laut Simulationsergebnissen die energiebedingten Emissionen für die Baualtersklasse 2015 um bis 52 % reduziert werden im Vergleich zur Nutzung eines BWK. Für die Baualtersklasse 1975 lagen die energiebedingten Emissionsminderungen bei bis zu 28 %.

Für eine Bewertung der energiebedingten Kosten wurden für unterschiedliche Strom- und Erdgasbezugspreise die kosteneffizienteste BVP bestimmt. Für aktuelle Energiebezugspreise liegen die BVP bei einem Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 bei  $0\text{ °C}$ , aus 1985 zwischen  $0\text{ °C}$  und  $4\text{ °C}$  und aus 2005 und 2015 bei  $-6\text{ °C}$ . Neben den kosteneffizientesten BVP für die energiebedingten Kosten, wurden die Sensitivitäten für Strom- und Erdgasbezugspreise bestimmt. So liegen die jährlichen Energiekosten für die Wärmeversorgung bei der Baualtersklasse 1975 für Strom zwischen  $130\text{ €}$  ( $-6\text{ °C}$ ) und  $70\text{ €}$  ( $6\text{ °C}$ ) für jeden Cent/kWh Strompreissteigerung. Für Erdgas liegen die jährlichen Energiekosten zwischen  $5\text{ €}$  ( $-6\text{ °C}$ ) und  $231\text{ €}$  ( $6\text{ °C}$ ) für jeden Cent/kWh Erdgaspreissteigerung. Die Sensitivitäten für die Baualtersklassen 2015 liegt niedriger was auf die geringen Energiebedarfe für die Wärmebereitstellung zurückzuführen ist. Für Strom liegt sie bei  $24\text{ €}$  ( $-6\text{ °C}$ ) bis  $9\text{ €}$  ( $6\text{ °C}$ ) für jeden Cent/kWh Preissteigerung und für Erdgas zwischen  $1\text{ €}$  ( $-6\text{ °C}$ ) und  $69\text{ €}$  ( $6\text{ °C}$ ) pro Cent/kWh Preissteigerung.

Im weiteren Verlauf wurde die Stromnutzung aus PV-Dachanlagen untersucht hinsichtlich der Eigenverbrauchsquote des produzierten PV-Stroms sowie der energiebedingten Emissionen und Kosten im Vergleich ohne eine PV-Einbindung in die Wärmebereitstellung. Untersucht wurden die Baualtersklassen 1975 und 2015 in Kombination mit einer  $10\text{ kW}_p$  PV-Anlage sowie sieben Strombedarfsprofilen für Einfamilienhaushalte aus der GWI-Datenbank. Die Eigenverbrauchsquote für die Baualtersklasse 1975 lag zwischen 13 % und 20 %, wenn der Strom nicht für die

Wärmebereitstellung genutzt wurde. Durch die Nutzung von PV-Strom in Zeiten von Überschüssen kann die Eigenverbrauchsquote auf 23 % (BVP 6 °C) bis 30 % (BVP -6 °C) erhöht werden. Für die Baualtersklasse 2015 kann die Eigenverbrauchsquote auf 16 % bis 23 % erhöht werden, was auf den geringeren Strombedarf zur Deckung der Wärmebedarfe zurückzuführen ist. Die jährlichen energiebedingten Emissionen sinken dadurch für das Gebäude mit der Baualtersklasse 1975 um 201 kg CO<sub>2e</sub> (6 °C) bis zu 417 kg CO<sub>2e</sub> (-6 °C), für die Baualtersklasse um 87 kg CO<sub>2e</sub> (6 °C) bis 137 kg CO<sub>2e</sub> (-6 °C). Für die energiebedingten Kosten können durch die Eigenstromnutzung von PV-Strom aus für die Baualtersklasse jährlich zwischen 103 € (Strombezugspreis von 25 Cent/kWh) bis 953 € (Strombezugspreis von 87,5 Cent/kWh) eingespart werden. Zu den aktuellen Haushaltsstrompreisen von 37,5 Cent/kWh liegen die jährlichen Kosteneinsparungen bei 201 € bis 303 €. Für die Baualtersklasse 2015 liegen die Kosteneinsparungen zwischen 45 € (Strombezugspreis von 25 Cent/kWh) und 313 € (Strombezugspreis von 87,5 Cent/kWh). Beim derzeitigen Strombezugspreis von 37,5 Cent/kWh liegen die jährlichen Kosteneinsparungen zwischen 76 € und 119 €.

Während in diesem Teilprojekt mit ganzjährigen Energiepreisen und Emissionswerten gerechnet wurden, wäre in einer weiteren Untersuchung eine zeitaufgelöste Betrachtung zu empfehlen. Der BVP kann durch aktuelle Energiepreise und Emissionswerte die Wärmebereitstellung weiter optimieren. So liegen bspw. die Emissionswerte an Tagen von Dunkelflauten höher als an Tagen an denen viel EE-Strom produziert wird.

## 7 STECKBRIEFSAMMLUNG ZU MARKTVERFÜGBAREN HYBRIDEN WÄRMEPUMPEN

Dieses Kapitel dient den Ergebnissen der Recherche zu marktverfügbaren hybriden WP. Analog zum inhaltlichen Schwerpunkt der bereits vorgestellten Forschungsarbeiten, werden ausschließlich WP in Kombination mit gasbasierten Wärmezeugungseinheiten dargestellt. In Tabelle 9 ist eine Übersicht zu den recherchierten hybriden Wärmepumpen, die Bestandteil der Steckbriefsammlung sind, aufgelistet.

*Tabelle 9 -Übersicht Steckbriefsammlung zu marktverfügbaren hybride Wärmepumpen bestehend aus elektrischer WP und gasbetriebem BWK*

| #  | Hersteller      | Produktname                           |
|----|-----------------|---------------------------------------|
| 1  | Brötje          | BLW Mono - P/ WGB 50 - 110            |
| 2  | Buderus         | Logamax plus/ Logatherm WLW196i AR S+ |
| 3  | Buderus         | Logano plus/ Logatherm WLW196i AR S+  |
| 4  | Daikin          | Altherma H/ R Hybrid                  |
| 5  | Elco            | Aerotyp Hybrid Mini                   |
| 6  | MHG Heiztechnik | ProCon Streamline                     |
| 7  | Remeha          | Calenta HP                            |
| 8  | Remeha          | Elga Ace                              |
| 9  | Remko           | Hot Hybrid                            |
| 10 | Vaillant        | Aro Therm-Split/ Eco Tec Plus         |
| 11 | Viessmann       | Vitocal 250-S                         |
| 12 | Viessmann       | Vitocaldens 222 F                     |

Den erstellten Steckbriefen sind neben Hersteller und Produktnamen, Anlagen- und Betriebsparameter zu entnehmen. Zu Anlagenparametern zählen Anlagentyp, Anwendungsbereich, die Möglichkeit der TWW-Erwärmung, Kühlfunktion, BVP-Adaption und Solarerweiterung, die Auswahl verschiedener Betriebsstrategien sowie die Maße und die Energieeffizienzklasse. Im Rahmen der Betriebsparameter werden Nennleistungsdaten für WP und BWK, die max. Vorlauftemperatur der WP und den Schalldruckpegel.

Die Marktrecherche wurde zu Projektbeginn (Ende 2018) erstellt und nochmals während dem Projekt (Mitte 2020) aktualisiert.



## Hybride Wärmeerzeugung

### BRÖTJE

BLW Mono - P /  
WGB 50 - 110



BLW Mono – P [2]



## Hybride Wärmeerzeugung

### Technische Daten

| Anlagenparameter          | BLW Mono – P. + WGB 50 - 110  |
|---------------------------|---|
| Anlagentyp                | Kombination aus außenstehender Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Inneneinheit und hybridem Gas-Brennwertkessel |
| Anwendung                 | Modernisierung / Neubau   |
| Trinkwassererwärmung      | Nein  |
| Kühlfunktion              | Nein  |
| Bivalenzpunktadaption     | Ja  |
| Betriebsstrategie         | Witterungsgeführte ISR-Plus-Regelung  |
| Maße Außeneinheit (HxBxT) | 1050 x 1020 x 480 mm  |
| Maße Inneneinheit (HxBxT) | 1003 x 600 x 463 mm (WP) / 851 x 480 x 570 mm (BWK)   |
| Solarerweiterung          | Nein  |
| Energieeffizienzklasse    | A ++ - A +++  |

### Betriebsparameter

|  |                                   |
|--|-----------------------------------|
| Nennleistungsdaten Heizen nach EN 14511:<br>A2/W35; COP<br>A7/W35; COP | k.A.<br>6 – 11,2 kW / 4,54 – 4,83 |
| Nennleistung des Brennwertkessel (50/30 °C)                            | 10 - 110 kW                       |
| Max. Vorlauftemperatur der Wärmepumpe                                  | 59 °C                             |
| Schalldruckpegel   | 49 - 60 dB (A)                    |

[1] <https://www.broetje.de/de/broetje/ueber-uns/das-unternehmen-august-broetje>

[2] <https://mediacdn.broetje.de/-/media/websites/broetje/pdf/produkte/waermepumpen-mit-system/broetje-waermepumpen-blw-mono-p-produktflyer.pdf?v=1&d=20210208T234904Z>

[3] <https://mediacdn.broetje.de/-/media/websites/broetje/pdf/produkte/gasheizung/gas-brennwertwandkessel/broetje-gasheizung-wgb-50-110-produktflyer.pdf?v=1&d=20210610T101753Z>

## Hybride Wärmeerzeugung

**BUDERUS**  
Logamax plus /  
Logatherm WLW196i AR S+



Logamax plus GBH172iT [1]



Logatherm WLW196i AR S+ [1]

## Hybride Wärmeerzeugung

### Technische Daten

| Anlagenparameter          | Logamax Plus GBH172iT + Logatherm WLW196i AR S+                           |
|---------------------------|---|
| Anlagentyp                | Kombinierter Heizkessel und Warmwasserspeicher mit Luft-Wasser-Wärmepumpe |
| Anwendung                 | Modernisierung / Neubau   |
| Trinkwassererwärmung      | Ja  |
| Kühlfunktion              | Ja  |
| Bivalenzpunktadaption     | Ja  |
| Betriebsstrategie         | Einstellbare Regelstrategien wie z.B. „Wärmepumpe bevorzugt“              |
| Maße Außeneinheit (HxBxT) | 1800 x 600 x 650 mm   |
| Maße Inneneinheit (HxBxT) | 1531 x 600 x 670 mm   |
| Solarerweiterung          | Ja  |
| Energieeffizienzklasse    | A – A ++  |

### Betriebsparameter

|  |   |
|--|---|
| Nennleistungsdaten Heizen nach EN 14511:<br>A2/W35; COP<br>A7/W35; COP | 2,53 kW / 4,25 regulierend 1,85 – 7,3 kW<br>2,82 – 4,01 kW / 5,01 |
| Nennleistung des Brennwertkessel (50/30 °C)                            | 3,4 – 25,3 kW   |
| Max. Vorlauftemperatur der Wärmepumpe                                  | 60 °C   |
| Schalldruckpegel   | 47 – 50 dB (A)  |

[1] <https://productsde.buderus.com/buderus/productsde.buderus.com/broschueren/buderus-broschuere-logamax-plus-gbh172it-170521.pdf>

## Hybride Wärmeerzeugung

**BUDERUS**  
Logano plus/  
Logatherm WLW196i AR S+



Logano Plus und Logatherm WLW 196i [1]

## Hybride Wärmeerzeugung

### Technische Daten

| Anlagenparameter          | Logano plus GBH212 + Logatherm WLW196i   |
|---------------------------|--|
| Anlagentyp                | Kombination aus außenstehender Luft-Wasser-Wärmepumpe und hybridem Gas-Brennwertkessel |
| Anwendung                 | Modernisierung / Neubau  |
| Trinkwassererwärmung      | Ja   |
| Kühlfunktion              | Ja   |
| Bivalenzpunktadaption     | Ja   |
| Betriebsstrategie         | Einstellbare Regelstrategien wie z.B. „Wärmepumpe bevorzugt“                           |
| Maße Außeneinheit (HxBxT) | 1380 x 930 x 600 mm  |
| Maße Inneneinheit (HxBxT) | 965 x 600 x 795 mm   |
| Solarerweiterung          | Ja   |
| Energieeffizienzklasse    | A ++   |

### Betriebsparameter

|  |   |
|--|---|
| Nennleistungsdaten Heizen nach EN 14511:<br>A2/W35; COP<br>A7/W35; COP | 2,53 kW / 4,25 regulierend 1,85 – 7,3 kW<br>2,82 – 4,01 kW / 5,01 |
| Nennleistung des Brennwertkessel (50/30 °C)                            | 3 – 49,9 kW   |
| Max. Vorlauftemperatur der Wärmepumpe                                  | 60 °C   |
| Schalldruckpegel   | 47 – 52 dB (A)  |

[1] <https://productsde.buderus.com/buderus/productsde.buderus.com/broschueren/buderus-broschuere-logano-plus-gb212-gbh212-170521.pdf>

## Hybride Wärmeerzeugung

**DAIKIN**  
Altherma H / R Hybrid



Altherma H Hybrid [2]



Altherma R Hybrid [2]



VIRTUELLES INSTITUT NRW  
STROM ZU  
GAS UND WÄRME

Gas- und Wärme-  
Institut Essen e.V. **gwi**

## Hybride Wärmeerzeugung

### Technische Daten

| Anlagenparameter          | Altherma H / R Hybrid   |
|---------------------------|---|
| Anlagentyp                | Luft/Wasser-Wärmepumpe in Kombination mit einem integrierten Gas-Brennwertgerät |
| Anwendung                 | Modernisierung  |
| Trinkwassererwärmung      | Ja (bei größeren Mengen erweiterbar mit Brauchwasserspeicher)                   |
| Kühlfunktion              | Ja  |
| Bivalenzpunktadaption     | Ja  |
| Betriebsstrategie         | Hinterlegte Energiepreise, Außentemperatur, interne Heizlast                    |
| Maße Außeneinheit (HxBxT) | Modell R: 735 x 832 x 307 mm ; Modell H: k.A.                                   |
| Maße Inneneinheit (HxBxT) | Modell R: k.A. ; Modell H: k.A.   |
| Solarerweiterung          | Nein  |
| Energieeffizienzklasse    | A ++  |

### Betriebsparameter

|   |  |
|---|--|
| Nennleistungsdaten Heizen nach EN 14511:<br>A2/W35; COP<br>A-7/W35; COP | 4 kW / 4,55 (H); 5 – 8 kW / 5,04 (R)<br>k.A. |
| Nennleistung des Brennwertkessel (50/30 °C)                             | 28 – 32 kW (H) ; 32 kW (R)                   |
| Max. Vorlauftemperatur der Wärmepumpe                                   | 55 (R) - 65°C (H)                            |
| Schalldruckpegel  | 54 db (A)                                    |

[1] [https://www.daikin.de/de\\_de/ueber-daikin/die-marke-daikin.html](https://www.daikin.de/de_de/ueber-daikin/die-marke-daikin.html)

[2] [https://www.daikin.de/de\\_de/produktfamilien/altherma-hybrid-waermepumpentechnik/daikin-altherma-hybrid.html#!#H\\_Hybrid](https://www.daikin.de/de_de/produktfamilien/altherma-hybrid-waermepumpentechnik/daikin-altherma-hybrid.html#!#H_Hybrid)



## Hybride Wärmeerzeugung

### ELCO Aerotop Hybrid Mini



Aerotop Hybrid Mini [3]

## Hybride Wärmeerzeugung

### Technische Daten

| Anlagenparameter          | Aerotop Hybrid Mini  |
|---------------------------|--|
| Anlagentyp                | Kombination aus außenstehender Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Gas-Brennwertkessel über ein Hybridmodul |
| Anwendung                 | Modernisierung   |
| Trinkwassererwärmung      | Nein   |
| Kühlfunktion              | Ja   |
| Bivalenzpunktadaption     | Ja   |
| Betriebsstrategie         | Ökonomisch nach günstigsten Energieträger  |
| Maße Außeneinheit (HxBxT) | k.A.   |
| Maße Inneneinheit (HxBxT) | 1137 x 400 x 315 mm (inkl. Hybrideinheit)  |
| Solarerweiterung          | Nein   |
| Energieeffizienzklasse    | A - A ++   |

### Betriebsparameter

|   |                          |
|---|--------------------------|
| Nennleistungsdaten Heizen nach EN 14511:<br>A2/W35; COP | 2,8 – 4,9 kW / 4,1 – 4,3 |
| A-7/W35; COP  | 4,1 – 7 kW / k.A.        |
| Nennleistung des Brennwertkessel (50/30 °C)             | 3,9 – 23,6 kW            |
| Max. Vorlauftemperatur der Wärmepumpe                   | k.A.                     |
| Schalldruckpegel  | 48 - 52 dB (A)           |

[1] <https://elco.de/unternehmen/>

[2] [https://elco.de/resources/Produktdokumente/AEROTOP\\_HYBRID\\_MINI/ELCO\\_Aerotop%20Hybrid\\_AW\\_7359.pdf](https://elco.de/resources/Produktdokumente/AEROTOP_HYBRID_MINI/ELCO_Aerotop%20Hybrid_AW_7359.pdf)

[3] [https://elco.de/produkte/waermepumpen/aerotop\\_hybrid\\_mini/](https://elco.de/produkte/waermepumpen/aerotop_hybrid_mini/)

## Hybride Wärmeerzeugung

**MHG Heiztechnik**  
ProCon Streamline



ProCon Streamline[1]

## Hybride Wärmeerzeugung

### Technische Daten

| Anlagenparameter          | ProCon Streamline  |
|---------------------------|--|
| Anlagentyp                | Kombination aus außenstehender Luft/Wasser-Inverter-Wärmepumpe mit Gas-Brennwertkessel |
| Anwendung                 | Modernisierung   |
| Trinkwassererwärmung      | Nein   |
| Kühlfunktion              | Nein   |
| Bivalenzpunktadaption     | Ja   |
| Betriebsstrategie         | Ökonomisch nach günstigsten Energieträger  |
| Maße Außeneinheit (HxBxT) | 950 x 943 x 330 mm   |
| Maße Inneneinheit (HxBxT) | 910 x 780 x 300 mm   |
| Solarerweiterung          | Ja, mit Zusatzspeicher   |
| Energieeffizienzklasse    | A ++   |

### Betriebsparameter

|   |  |
|---|--|
| Nennleistungsdaten Heizen nach EN 14511:<br>A2/W35; COP<br>A-7/W35; COP | 7,2 kW / 3,44; modulierend 3,1 – 10,5 kW<br>8,0 kW / 4,4 |
| Nennleistung des Brennwertkessel (50/30 °C)                             | 7,7 – 24,8 kW  |
| Max. Vorlauftemperatur der Wärmepumpe                                   | 60 °C  |
| Schalldruckpegel  | 40 db (A)  |

[1] <https://mhg.de/service/downloads/gasheizung/>

## Hybride Wärmeerzeugung

**REMEHA**  
Calenta HP



Calenta HP[2]

## Hybride Wärmeerzeugung

### Technische Daten

| Anlagenparameter          | Calenta HP  |
|---------------------------|---|
| Anlagentyp                | Kombination aus Luft/Wasser-Inverter-Wärmepumpe mit Hybrid-Gas-Brennwertkessel und Frischwasserspeicher |
| Anwendung                 | Modernisierung/ Neubau  |
| Trinkwassererwärmung      | Ja  |
| Kühlfunktion              | Nein  |
| Bivalenzpunktadaption     | Ja  |
| Betriebsstrategie         | Ökonomisch nach günstigsten Energieträger   |
| Maße Außeneinheit (HxBxT) | 1220 x 1050 x 480 mm  |
| Maße Inneneinheit (HxBxT) | 1804 x 950 x 1550 mm  |
| Solarerweiterung          | Ja  |
| Energieeffizienzklasse    | A+ - A ++   |

### Betriebsparameter

|   |               |
|---|---------------|
| Nennleistungsdaten Heizen nach EN 14511:<br>A2/W35; COP | 6 kW / 3,64   |
| A-7/W35; COP  | k.A.          |
| Nennleistung des Brennwertkessel (50/30 °C)             | 5,6 – 25,5 kW |
| Max. Vorlauftemperatur der Wärmepumpe                   | 60 °C         |
| Schalldruckpegel  | 58 db (A)     |

[1] <https://www.remeha.de/fachpartner/ueber-uns/remeha>

[2] [https://mediacdn.remeha.de/-/media/websites/remehade/downloads/produkte/neubau-modernisierung/hybridsystem-waermepumpe/calenta-hp/prospekt\\_hybridsysteme\\_09\\_2019\\_web.pdf?v=1&d=20200605T105518Z](https://mediacdn.remeha.de/-/media/websites/remehade/downloads/produkte/neubau-modernisierung/hybridsystem-waermepumpe/calenta-hp/prospekt_hybridsysteme_09_2019_web.pdf?v=1&d=20200605T105518Z)



## Hybride Wärmeerzeugung

**REMEHA**  
Elga Ace



Elga Ace [2]

## Hybride Wärmeerzeugung

### Technische Daten

| Anlagenparameter          | Elga Ace   |
|---------------------------|--|
| Anlagentyp                | Als Hybrid Luft/Wasser-Wärmepumpe in Split-Bauweise mit zusätzlichen Wärmeerzeuger in 4 kW oder 6 kW |
| Anwendung                 | Modernisierung / Neubau  |
| Trinkwassererwärmung      | Nein   |
| Kühlfunktion              | Ja   |
| Bivalenzpunktadaption     | Ja   |
| Betriebsstrategie         | k.A.   |
| Maße Außeneinheit (HxBxT) | 550 x 780 x 342 mm   |
| Maße Inneneinheit (HxBxT) | 637 x 268 x 220 mm   |
| Solarerweiterung          | Nein   |
| Energieeffizienzklasse    | A ++   |

### Betriebsparameter

|   |  |
|---|--|
| Nennleistungsdaten Heizen nach EN 14511:<br>A2/W35; COP<br>A-7/W35; COP | 4,14 – 6,14 kW / 4,5 – 4,54<br>k.A.      |
| Nennleistung des Brennwertkessel (50/30 °C)                             | Abhängig vom verwendeten Brennwertkessel |
| Max. Vorlauftemperatur der Wärmepumpe                                   | 60 °C                                    |
| Schalldruckpegel  | 37 - 57 db (A)                           |

[1] <https://www.remeha.de/fachpartner/ueber-uns/remeha>

[2] <https://www.remeha.de/fachpartner/produkte/neubau-modernisierung/hybridssystem-waermepumpe/elga-ace>

[3] [https://mediacdn.remeha.de/-/media/websites/remehade/downloads/produkte/neubau-modernisierung/hybridssystem-waermepumpe/elga-ace/broschuere\\_elga-ace.pdf?v=1&d=20210316T153008Z](https://mediacdn.remeha.de/-/media/websites/remehade/downloads/produkte/neubau-modernisierung/hybridssystem-waermepumpe/elga-ace/broschuere_elga-ace.pdf?v=1&d=20210316T153008Z)



## Hybride Wärmeerzeugung

**REMKO**  
Hot Hybrid



Hot Hybrid HBW

## Hybride Wärmeerzeugung

### Technische Daten

| Anlagenparameter          | Hot Hybrid HBW   |
|---------------------------|--|
| Anlagentyp                | Split-Luft/Wasser-Wärmepumpe in Kombination mit einem Gas-Brennwertgerät in 150, 180, 220 Variante |
| Anwendung                 | Modernisierung / Neubau  |
| Trinkwassererwärmung      | Erweiterbar mit indirekt beheiztem Speicher  |
| Kühlfunktion              | Nein   |
| Bivalenzpunktadaption     | Ja   |
| Betriebsstrategie         | k.A.   |
| Maße Außeneinheit (HxBxT) | 800 x 880 x 310 mm   |
| Maße Inneneinheit (HxBxT) | 950 x 640 x 1300 mm  |
| Solarerweiterung          | Möglich mit Zusatzspeicher   |
| Energieeffizienzklasse    | k.A.   |

### Betriebsparameter

|   |  |
|---|--|
| Nennleistungsdaten Heizen nach EN 14511:<br>A2/W35; COP<br>A-7/W35; COP | 6,3 kW / 3,0 regelnd 1,1 – 10,2 kW<br>8,1 kW / 4,4 |
| Nennleistung des Brennwertkessel (50/30 °C)                             | 15 kW; 18 kW; 22 kW                                |
| Max. Vorlauftemperatur der Wärmepumpe                                   | 50 °C  |
| Schalldruckpegel  | 54 db (A)  |

[1] <https://www.remko.de/ueber-uns/>

[2] <https://www.remko.de/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=679029&token=2ef2a1b8c39e74af679bcd9a2feb2bf6b87d8f8c>

## Hybride Wärmeerzeugung

**Vaillant**  
Aro Therm – Split /  
Eco Tec plus



Aro Therm – Split [2]



Eco Tec plus [3]

## Hybride Wärmeerzeugung

### Technische Daten

| Anlagenparameter          | aro Therm Split / ecoTec plus  |
|---------------------------|--|
| Anlagentyp                | Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Inneneinheit in Kombination mit einem separaten Gas-Brennwertkessel |
| Anwendung                 | Modernisierung/ Neubau   |
| Trinkwassererwärmung      | Ja (bei größeren Mengen erweiterbar mit Brauchwasserspeicher)                                  |
| Kühlfunktion              | Ja   |
| Bivalenzpunktadaption     | Ja   |
| Betriebsstrategie         | Witterungsgeführte Systemregelung + Verbrennungsregelung                                       |
| Maße Außeneinheit (HxBxT) | 765 x 1100 x 450 mm  |
| Maße Inneneinheit (HxBxT) | 1880 x 599 x 693 mm / 720 x 44x 348 mm   |
| Solarerweiterung          | Ja   |
| Energieeffizienzklasse    | A - A ++   |

### Betriebsparameter

|   |                |
|---|----------------|
| Nennleistungsdaten Heizen nach EN 14511:    |                |
| A2/W35; COP                                 | 2,46 kW / 3,75 |
| A7/W35; COP                                 | 3,13 kW / 4,89 |
| Nennleistung des Brennwertkessel (50/30 °C) | 3,4 – 10,9 kW  |
| Max. Vorlauftemperatur der Wärmepumpe       | 63 °C          |
| Schalldruckpegel                            | 32 - 44 db (A) |

[1] <https://www.vaillant.de/ueber-uns/>

[2] <https://www.vaillant.de/heizung/produkte/luft-wasser-warmepumpe-aro-therm-split-137600.html>

[3] <https://www.vaillant.de/heizung/produkte/gas-brennwertgerat-ecotec-plus-vc-vcw-vci-1-5-242944.html>

## Hybride Wärmeerzeugung

**VISSMANN**  
Vitocal 250-S



Vitocal 250-S [2]

## Hybride Wärmeerzeugung

### Technische Daten

| Anlagenparameter          | Vitocal 250-S, Typ HAWB-M-AC 252.A07   |
|---------------------------|--|
| Anlagentyp                | Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Inneneinheit zur Kombination eines separaten Gas-Brennwertgerät |
| Anwendung                 | Modernisierung/ Neubau/ Nachrüstung  |
| Trinkwassererwärmung      | Ja   |
| Kühlfunktion              | Ja   |
| Bivalenzpunktadaption     | Ja   |
| Betriebsstrategie         | Ökonomisch und ökologisch wählbar  |
| Maße Außeneinheit (HxBxT) | 865 x 1040 x 340 mm  |
| Maße Inneneinheit (HxBxT) | 905 x 450 x 360 mm   |
| Solarerweiterung          | Ja   |
| Energieeffizienzklasse    | A ++   |

### Betriebsparameter

|  |   |
|--|---|
| Nennleistungsdaten Heizen nach EN 14511:<br>A2/W35; COP<br>A7/W35; COP | 5,6 kW / 3,24 regelnd 1,3 – 7,7 kW<br>8,4 kW / 4,28 |
| Nennleistung des Brennwertkessel (50/30 °C)                            | abhängig vom verwendeten Brennwertkessel            |
| Max. Vorlauftemperatur der Wärmepumpe                                  | 55 °C   |
| Schalldruckpegel   | 62 db (A)   |

[1] <https://www.viessmann.de>

[2] <https://www.viessmann.de/de/wohngebaeude/hybridheizung/gas-hybridgeraete/vitocal-250-s.html>

## Hybride Wärmeerzeugung

**VISSMANN**  
Vitocaldens 222 F



Vitocaldens 222-F [2]

## Hybride Wärmeerzeugung

### Technische Daten

| Anlagenparameter          | Vitocaldens 222 F HAWB-M. 222.26A / 29A   |
|---------------------------|---|
| Anlagentyp                | Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Inneneinheit und integriertem Gas-Brennwertgerät – Hybrid Kompaktgerät |
| Anwendung                 | Modernisierung/ Neubau  |
| Trinkwassererwärmung      | Ja  |
| Kühlfunktion              | Ja  |
| Bivalenzpunktadaption     | Ja  |
| Betriebsstrategie         | Ökonomisch und ökologisch wählbar   |
| Maße Außeneinheit (HxBxT) | 1260 x 963 x 358 mm   |
| Maße Inneneinheit (HxBxT) | 1625 x 600 x 595 mm   |
| Solarerweiterung          | Ja  |
| Energieeffizienzklasse    | A + - A +++   |

### Betriebsparameter

|  |  |
|--|--|
| Nennleistungsdaten Heizen nach EN 14511:<br>A2/W35; COP<br>A7/W35; COP | 5,6 – 7,7 kW / 3,24 – 3,5<br>10,9 kW / 4,62 – 5,08 |
| Nennleistung des Brennwertkessel (50/30 °C)                            | 3,2 – 19 kW  |
| Max. Vorlauftemperatur der Wärmepumpe                                  | 55 °C  |
| Schalldruckpegel   | 62 db (A)  |

[1] <https://www.viessmann.de>

[2] <https://www.viessmann.de/de/wohngesbaeude/hybridheizung/gas-hybridgeraete/vitocaldens-222-f.html>



## LITERATURANGABEN

- [1] L. Freiberger, „Vergessen wir die Wärme- und Verkehrswende?“, FfE Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ffe.de/news/vergessen-wir-die-waerme-und-verkehrswende/>
- [2] „Digital & Trends - Wärmemarkt in Deutschland“, 2022.
- [3] „Effiziente Systeme und erneuerbare Energien“, März 2021.
- [4] *Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz - GEG)*. 2020.
- [5] Dassault Systèmes AB, „Dymola - Dynamic Modeling Laboratory“. März 2020.
- [6] P. Remmen, M. Lauster, M. Mans, M. Fuchs, T. Osterhage, und D. Müller, „TEASER: an open tool for urban energy modelling of building stocks“, Februar 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/RWTH-EBC/TEASER>
- [7] „TABULA - Final Report Appendix Volume“, Insitut Wohnen und Umwelt (IWU) et. al, Okt. 2012.
- [8] „Wärmepumpen in Bestandsgebäuden“, Fraunhofer ISE, Freiburg, Juli 2020.
- [9] Rotex Heating Systems GmbH, „ROTEX Monopex Planungunterlage - Die Fußbodenheizung für Altbau und Neubau“. 2019.
- [10] T. Laasch und E. Laasch, *Haustechnik*, 13. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [11] M. Deutsch, „Wärmewende 2030 - Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor“, Agora Energiewende, Studie, Feb. 2017.
- [12] Vaillant Deutschland GmbH & Co. KG, Hrsg., „Besonders klimafreundlich: Wärme aus der Luft“. Mai 2021.
- [13] Viessmann Deutschland GmbH, Hrsg., „Datenblatt VITOCALDENS 222-F“. April 2022.
- [14] H. Watter, *Regenerative Energiesysteme: Grundlagen, Systemtechnik und Analysen ausgeführter Beispiele nachhaltiger Energiesysteme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. doi: 10.1007/978-3-658-23488-1.
- [15] „Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2018“, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2019. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-04-10\\_cc\\_10-2019\\_strommix\\_2019.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-04-10_cc_10-2019_strommix_2019.pdf)
- [16] Umweltbundesamt, Hrsg., „Entwicklung der spezifischen Emissionen des deutschen Strommix 1990-2020 und erste Schätzung 2021“. März 2022. Zugegriffen: 10. Juni 2022. [Online].

Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-steigen>

- [17] T. Schwencke und C. Bantle, „BDEW-Strompreisanalyse - Haushalte und Industrie“, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Juli 2022.
- [18] T. Schwencke und C. Bantle, „BDEW-Gaspreisanalyse 2022 - Haushalte“, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Sep. 2022.
- [19] „Bestimmung der anzulegenden Werte für Solaranlagen für die Kalendermonate August, September und Oktober 2022“, Bonn, Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/EEG\\_Registerdaten/artikel.html](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/EEG_Registerdaten/artikel.html)

# ABBILDUNGSVERZEICHNIS

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1 - Schematische Darstellung des Dymola-Modells .....  | 6  |
| Abbildung 2 - Vergleichswerte Endenergie nach GEG (Quelle: Verbraucherzentrale) .....  | 7  |
| Abbildung 3 - Symbol- und Detailansicht in Dymola. Komponente: Haus .....  | 8  |
| Abbildung 4 - Jahresverlauf von Außentemperatur, diffuser und direkter Solarstrahlung für den Standort Düsseldorf .....  | 9  |
| Abbildung 5 - Symbol- und Detailansicht in Dymola. Komponente: Heizung .....   | 10 |
| Abbildung 6 - Symbol- und Detailansicht in Dymola. Komponente: Wärmespeicher .....   | 11 |
| Abbildung 7 - Symbol- und Detailansicht in Dymola. Steuerung: Heizung. AixLib – Tutorial - .....   | 11 |
| Abbildung 8 - Heizkurven .....   | 12 |
| Abbildung 9 – Jahresverlauf von Außen-, Soll- und Raumtemperatur .....   | 14 |
| Abbildung 10 - Symbol- und Detailansicht in Dymola. Komponente: Wärmepumpe .....   | 15 |
| Abbildung 11 - Symbol- und Detailansicht in Dymola. Komponente: Brennwertkessel .....  | 18 |
| Abbildung 12 - Regelungsschema der Wärmequellen .....  | 20 |
| Abbildung 13 - Jahresprofil des Wärmebedarfs für Trinkwasser .....   | 21 |
| Abbildung 14 - Symbol- und Detailansicht in Dymola. Komponente: Photovoltaikmodul .....  | 22 |
| Abbildung 15 - Stromausbeute der Photovoltaikanlage bei unterschiedlicher Ausrichtung und Neigung im Bezug auf die optimale Auslegung .....  | 23 |
| Abbildung 16 - Anteilige Wärmebedarfsdeckung für Einfamilienhäuser durch hybride WP mit Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 aufgeteilt nach Technologieeinsatz und notwendiger Vorlauftemperatur ..... | 25 |
| Abbildung 17 – Jährliche Energiebedarfe für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 aufgeteilt in Strom und Erdgas.....  | 26 |
| Abbildung 18 - Jahresprofil der Energiebedarfe für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 bei einem Bivalenzpunkt von -6 °C für Strom und Gas .....   | 27 |
| Abbildung 19 - Jahresprofil der Energiebedarfe für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 bei einem Bivalenzpunkt von 0 °C für Strom und Gas .....  | 27 |
| Abbildung 20 - Jahresprofil der Energiebedarfe für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 bei einem Bivalenzpunkt von 6 °C für Strom und Gas .....  | 28 |
| Abbildung 21 - Anteilige Wärmebedarfsdeckung für Einfamilienhäuser durch hybride WP mit Baualtersklasse aus dem Jahr 1985 aufgeteilt nach Technologieeinsatz und notwendiger Vorlauftemperatur ..... | 29 |
| Abbildung 22 – Jährliche Energiebedarfe für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1985 aufgeteilt in Strom und Erdgas.....  | 29 |
| Abbildung 23 - Jahresprofil der Energiebedarfe für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1985 bei einem Bivalenzpunkt von -6 °C für Strom und Gas .....   | 30 |
| Abbildung 24 - Jahresprofil der Energiebedarfe für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1985 bei einem Bivalenzpunkt von 0 °C für Strom und Gas .....  | 31 |
| Abbildung 25 - Jahresprofil der Energiebedarfe für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1985 bei einem Bivalenzpunkt von 6 °C für Strom und Gas .....  | 31 |

|   |           |
|---|-----------|
| Abbildung 26 – Anteilige Wärmebedarfsdeckung für Einfamilienhäuser durch hybride WP mit Baualtersklasse aus dem Jahr 2005 aufgeteilt nach Technologieeinsatz und notwendiger Vorlauftemperatur .....                              | 32        |
| Abbildung 27 – Jährliche Energiebedarfe für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 2005 aufgeteilt in Strom und Erdgas.....   | 33        |
| Abbildung 28 - Jahresprofil der Energiebedarfe für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 2005 bei einem Bivalenzpunkt von -6 °C für Strom und Gas .....  | 33        |
| Abbildung 29 - Jahresprofil der Energiebedarfe für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 2005 bei einem Bivalenzpunkt von 0 °C für Strom und Gas .....   | 34        |
| Abbildung 30 - Jahresprofil der Energiebedarfe für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 2005 bei einem Bivalenzpunkt von 6 °C für Strom und Gas .....   | 34        |
| Abbildung 31 - Anteilige Wärmebedarfsdeckung für Einfamilienhäuser durch hybride WP mit Baualtersklasse aus dem Jahr 2015 aufgeteilt nach Technologieeinsatz und notwendiger Vorlauftemperatur .....                              | 35        |
| Abbildung 32 - Jährliche Energiebedarfe für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 2015 aufgeteilt in Strom und Erdgas.....   | 36        |
| <i>Abbildung 33 - Jahresprofil der Energiebedarfe für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 2015 bei einem Bivalenzpunkt von -6 °C für Strom und Gas.....</i>  | <i>36</i> |
| Abbildung 34 - Jahresprofil der Energiebedarfe für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 2015 bei einem Bivalenzpunkt von 0 °C für Strom und Gas .....   | 37        |
| Abbildung 35 - Jahresprofil der Energiebedarfe für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 2015 bei einem Bivalenzpunkt von 6 °C für Strom und Gas .....   | 37        |
| Abbildung 36 – Energiebedingte Emissionen abgeleitet aus dem Einsatz von Strom und Erdgas zur Wärmebereitstellung bei unterschiedlichen Bivalenzpunkten einer hybriden Wärmepumpe .....   | 38        |
| Abbildung 37 – Jährliche energiebedingten Kosten in Abhängigkeit steigender Strom- und Erdgaspreisen für ein Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975.....   | 41        |
| Abbildung 38 - Jährliche energiebedingten Kosten in Abhängigkeit steigender Strom- und Erdgaspreisen für ein Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1985.....   | 43        |
| Abbildung 39 – Jährliche energiebedingten Kosten in Abhängigkeit steigender Strom- und Erdgaspreisen für ein Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 2005.....   | 45        |
| Abbildung 40 – Jährliche energiebedingten Kosten in Abhängigkeit steigender Strom- und Erdgaspreisen für ein Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 2015.....   | 47        |
| Abbildung 41 – PV-Strom-Eigenverbrauchsquote für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 für verschiedene Bivalenzpunkte und Stromprofile 1 - 7 .....   | 49        |
| Abbildung 42 – Genutzter PV-Strom für die Wärmebereitstellung für ein Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 für die Stromprofile 1-7 .....  | 50        |
| Abbildung 43 – Eingesparte jährliche Emissionen durch Nutzung von PV-Strom für das Gebäude mit der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 kumuliert und anteilig.....  | 51        |
| Abbildung 44 – Jährliche Kosteneinsparungen (Stromprofil 1) bei Nutzung von PV-Strom zur Wärmebereitstellung für unterschiedliche Strombezugpreise und Bivalenzpunkte für ein Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 ..... | 52        |
| Abbildung 45 – Jährliche Kosteneinsparungen (Stromprofil 3) bei Nutzung von PV-Strom zur Wärmebereitstellung für unterschiedliche Strombezugpreise und Bivalenzpunkte für ein Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 ..... | 53        |
| Abbildung 46 – Jährliche Betriebskostensteigerung in Abhängigkeit steigender Strompreise mit und ohne Nutzung von PV-Strom für ein Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 für verschiedene Bivalenzpunkte .....            | 54        |

---

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 47 - PV-Strom-Eigenverbrauchsquote für Gebäude der Baualterklasse aus dem Jahr 2015 für verschiedene Bivalenzpunkte und Stromprofile 1 - 7 .....   | 55 |
| Abbildung 48 – Genutzter PV-Strom für die Wärmebereitstellung für ein Gebäude der Baualterklasse aus dem Jahr 2015 für die Stromprofile 1-7 .....  | 56 |
| Abbildung 49 - Eingesparte jährliche Emissionen durch Nutzung von PV-Strom für das Gebäude mit der Baualterklasse aus dem Jahr 2015 kumuliert und anteilig.....  | 57 |
| Abbildung 50 - Jährliche Kosteneinsparungen (Stromprofil 1) bei Nutzung von PV-Strom zur Wärmebereitstellung für unterschiedliche Strombezugpreise und Bivalenzpunkte für ein Gebäude der Baualterklasse aus dem Jahr 2015 ..... | 58 |
| Abbildung 51 - Jährliche Kosteneinsparungen (Stromprofil 3) bei Nutzung von PV-Strom zur Wärmebereitstellung für unterschiedliche Strombezugpreise und Bivalenzpunkte für ein Gebäude der Baualterklasse aus dem Jahr 2015 ..... | 59 |
| Abbildung 52 - Jährliche Betriebskostensteigerung in Abhängigkeit steigender Strompreise mit und ohne Nutzung von PV-Strom für ein Gebäude der Baualterklasse aus dem Jahr 2015 für verschiedene Bivalenzpunkte.....             | 59 |
| Abbildung 53 - Monatlicher Raumwärmebedarf für die Gebäudebaualterklassen 1975, 1985, 2005 und 2015 .  | 61 |
| Abbildung 54 - Technischer Aufbau des Hybrid-Wärmepumpen-Teststands.....   | 62 |
| Abbildung 55 -Prüfstand: Außeneinheit Wärmepumpe .....   | 63 |
| Abbildung 56 - Viessmann Planungsanleitung Hybrid-Geräte[13].....  | 63 |
| Abbildung 57 – Prüfstand: Brennwertkessel, Wärmetauscher, Trinkwarmwasserspeicher und Anlagensteuerung .....   | 64 |
| Abbildung 58 – Prüfstand: Einheit Messgeräte, Datenlogger, etc. ....   | 65 |
| Abbildung 59 – Prüfstand: Übersichtsbildschirm Messwerte .....   | 65 |
| Abbildung 60 – Ergebnisse 17 Stunden Messreihe für elektrischen Leistungsaufnahme der WP und Vorlauftemperatur Teststand hybride Wärmepumpe .....  | 66 |
| Abbildung 61 - Ergebnisse 10 Stunden Messreihe für elektrischen Leistungsaufnahme der WP und Vorlauftemperatur Teststand hybride Wärmepumpe .....  | 67 |

## TABELLENVERZEICHNIS

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 1 - Daten WP 35 °C  | 16 |
| Tabelle 2 – Daten WP 65°C   | 17 |
| Tabelle 3 – Übersicht zu Emissionseinsparungen abgeleitet aus dem Einsatz von Strom und Erdgas zur Wärmebereitstellung bei unterschiedlichen Bivalenzpunkten einer hybriden Wärmepumpe im Vergleich zur Wärmebereitstellung mit einem Brennwertkessel | 39 |
| Tabelle 4 – Übersichtsmatrix zu kosteneffizientesten Bivalenzpunkt für unterschiedliche Strom- und Erdgaspreiskonstellationen zur Wärmebereitstellung für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1975 mittels hybrider Wärmepumpe                   | 40 |
| Tabelle 5 - Übersichtsmatrix zu kosteneffizientesten Bivalenzpunkt für unterschiedliche Strom- und Erdgaspreiskonstellationen zur Wärmebereitstellung für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 1985 mittels hybrider Wärmepumpe                   | 42 |
| Tabelle 6 - Übersichtsmatrix zu kosteneffizientesten Bivalenzpunkt für unterschiedliche Strom- und Erdgaspreiskonstellationen zur Wärmebereitstellung für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 2005 mittels hybrider Wärmepumpe                   | 44 |
| Tabelle 7 - Übersichtsmatrix zu kosteneffizientesten Bivalenzpunkt für unterschiedliche Strom- und Erdgaspreiskonstellationen zur Wärmebereitstellung für Gebäude der Baualtersklasse aus dem Jahr 2015 mittels hybrider Wärmepumpe                   | 46 |
| Tabelle 8 -Übersicht Jahresbedarfe der Stromprofile 1 - 7   | 48 |
| Tabelle 9 -Übersicht Steckbriefsammlung zu marktverfügbaren hybride Wärmepumpen bestehend aus elektrischer WP und gasbetriebem BWK  | 70 |

---