



Schlussbericht 12. Dezember 2014

Technologievergleich solare Brauchwarmwassererwärmung für Einfamilienhäuser

Photovoltaik und Wärmepumpe im Vergleich mit
Solarthermie (SolVar-BWW)

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Energie in Gebäuden
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Ökozentrum
Schwengiweg 12
CH-4438 Langenbruck
www.oekozenrum.ch
Institut für Energiesysteme IES der Hochschule NTB
Werdenbergstrasse 4
CH-9471 Buchs
www.ntb.ch
INFRAS
Binzstrasse 23
CH-8045 Zürich
www.infras.ch
SPF Institut für Solartechnik
Oberseestrasse 10
CH-8640 Rapperswil
www.solarenergy.ch

Autoren:

Michael Sattler, Ökozentrum, michael.sattler@oekozenrum.ch
Stefan Bertsch, NTB, stefan.bertsch@ntb.ch
Markus Markstaler, NTB, markus.markstaler@ntb.ch
Stefan Kessler, INFRAS, stefan.kessler@infras.ch
Donald Sigrist, INFRAS, donald.sigrist@infras.ch
Michel Haller, SPF, michel.haller@solarenergy.ch

BFE-Bereichsleiter: Andreas Eckmanns
BFE-Programmleiter: Rolf Moser
BFE-Vertrags- und Projektnummer: SI/500895-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1. Abstract	5
2. Ausgangslage	6
3. Ziel der Arbeit	7
4. Vorgehen	8
4.1. Literaturrecherche	8
4.2. Definition Basissysteme	8
4.2.1. Gastherme (fossile Referenz) (BS1)	9
4.2.2. Solarthermie (BS2)	9
4.2.3. Wärmepumpenboiler (BS3)	10
4.2.4. Luft-Wasser Wärmepumpe Kompaktgerät (BS4)	10
4.3. Modellgrundlagen und -annahmen	10
4.3.1. Speicher	10
4.3.2. Solarthermie	11
4.3.3. Photovoltaik	11
4.3.4. Wärmepumpenboiler	11
4.3.5. Luft-Wasser-Wärmepumpe	12
4.3.6. Zapfprofil	12
4.3.7. Primärenergiefaktoren	12
4.4. Technischen Randbedingungen der Systemvarianten	12
4.4.1. Ausrichtung Solarthermie und Photovoltaik	12
4.4.2. Warmwassertemperatur im Speicher (Vorlauftemperatur)	13
4.4.3. Wetterdaten	13
4.4.4. Modell zur Berücksichtigung von Wärmeklau bei Wärmepumpenboiler	13
4.4.5. Bilanzierungszeitraum	15
4.4.6. Overlap	16
4.5. Aufbau Simulation	17
4.6. Wirtschaftliche Randbedingungen der Systemvarianten	18
4.6.1. Volkswirtschaftliche Perspektive mit Parametervariation als Grundlage	18
4.6.2. Anrechnung der Kosten für das Hauptheizsystem an die Kosten für die Brauchwarmwassererwärmung	19
4.6.3. Investitionen: Kostenparameter und Annahmen	21
4.6.4. Kosten für Betrieb und Unterhalt: Kostenparameter und Annahmen	22
4.6.5. Einbezug Rückspeisevergütung bei Varianten mit PV-Anlage (BS3, BS4)	22
4.7. Kennzahlen des ökonomischen Vergleichs	23
5. Simulationsergebnisse	24
5.1. Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf der Systemvarianten	24
5.2. Einfluss Speichertemperatur	25
5.3. Einfluss Wetterdaten	26
5.4. Einfluss verschiedener Bilanzierungszeiträume	26
5.5. Einfluss Wärmeklau	30
5.6. Flächeneffizienz	30
5.7. Variation der Leistung des WP-Boilers	31
5.8. Auswirkungen auf den Primärenergieeinsatz durch den Einsatz von Elektro-Heizstäben in ST-Systemen	32
6. Ökonomische Betrachtung	35
6.1. Auswahl der dargestellten Varianten	35

6.2.	Kosten für Brauchwarmwasser bei Gebäuden mit unterschiedlichen energetischen Standards	35
6.3.	Kostenstruktur für die Erzeugung von Brauchwarmwasser	38
6.4.	Kostenentwicklung bis ins Jahr 2025	39
7.	Schlussfolgerung.....	41
7.1.	Energetische Betrachtung	41
7.2.	Ökonomische Betrachtung	42
7.3.	Systemkomplexität	43
7.4.	Integration in die moderne Gebäudeenergieversorgung.....	44
7.5.	Akzeptanz beim Endkunden.....	44
7.6.	Energiewirtschaftliche Einbettung	45
8.	Ausblick.....	47
8.1.	Entwicklung eines modulierenden WP-Boilers.....	47
8.2.	Erweiterung der Analysen	47
9.	Abkürzungsverzeichnis	48
10.	Anhang	49
10.1.	Anhang 1: Auszug Literaturstudie	49
10.2.	Anhang 2: Simulationsparameter	50
10.3.	Anhang 3: Ökonomischen Randbedingungen	51
11.	Literaturverzeichnis	58

1. Abstract

Die Kombination von Photovoltaik (PV) und Wärmepumpe (WP) ist neben der Solarthermie eine weitere Option der solaren Brauchwarmwassererwärmung. Mit einem auf Simulationen gestützten Technologievergleich auf Systemebene wurden verschiedene Varianten für die solare Brauchwarmwassererwärmung für Einfamilienhäuser untersucht, und technische und wirtschaftliche Kennzahlen für deren Vergleich erarbeitet.

Ein zentrales Element des Systemvergleichs sind die Bilanzierungszeiträume, welche die Anrechenbarkeit von photovoltaisch erzeugter elektrischer Energie an die Deckung des Bedarfs der Wärmepumpe limitieren. Ein einfacher Systemvergleich auf Jahresbilanz-Basis ist unter der heute allgemein bekannten Problematik der Stromversorgung aus erneuerbaren Energien im Winterhalbjahr nicht zielführend.

Der Technologievergleich wird von verschiedenen Randbedingungen beeinflusst. Grossen Einfluss haben die Parameter Bilanzierungszeitraum, Primärenergiefaktoren sowie Wärmeklau und Umgebungstemperatur beim Wärmepumpenboiler.

Die Simulationen zeigen, dass auf Tagesbilanz-Basis die Systeme mit Solarthermie/Erdgas und PV/Luft-Wasser Wärmepumpe für die Bereitstellung von Brauchwarmwasser in etwa gleich viel nicht erneuerbare Primärenergie benötigen. Der Wärmepumpenboiler benötigt ohne Wärmeklau deutlich weniger und mit maximalem Wärmeklau deutlich mehr Primärenergie als die Systeme mit Solarthermie/Erdgas oder PV/Luft-Wasser Wärmepumpe.

Wenn im Speicher hohe Temperaturen gefordert sind ($>60\text{ °C}$) liegt der Primärenergiebedarf der Systeme mit PV und WP höher als beim System mit Solarthermie.

Wird im System mit Solarthermie der Speicher in den Wintermonaten mit einem Elektro-Heizstab nachgeheizt, erhöht sich der Primärenergiebedarf auf Werte die über allen PV-WP Systemen liegen.

Die ökonomischen Betrachtungen erfolgten mit einer volkswirtschaftlichen Perspektive und somit ohne Einbezug von Förderungen. Es konnte gezeigt werden, dass die Variante Photovoltaik mit Wärmepumpe gegenüber der Variante mit Solarthermie leichte Kostenvorteile aufweist. Beim System mit Wärmepumpenboiler wird die Kostenbilanz stark durch den Anteil Wärmeklau ab Heizsystem bestimmt.

Ein unter günstigen Bedingungen realisiertes solares System weist bereits heute vergleichbare Kosten auf wie das Referenzsystem mit Erdgas.

Für den Systemvergleich wurde für PV und ST ein gleich grosses Kollektorfeld angenommen (5 m^2). Für die PV-Anlage ergibt dies eine Leistung von 0.75 kWp , was einer ungewöhnlich kleinen Anlage mit entsprechend hohem Preis pro kWp entspricht. Würde die PV-Anlage unabhängig vom System zur Bereitstellung von Brauchwarmwasser und ohne Förderung grösser gebaut, würden für die PV-Anlage tiefere Grenzkosten resultieren. In diesem Fall ergeben die Simulationen für Systeme mit PV/Luft-Wasser Wärmepumpe die tiefsten Gestehungskosten für Brauchwarmwasser aller verglichenen Systeme. Anlagen mit deutlich mehr als 5 m^2 Modulfläche werden jedoch oft mit Unterstützung von Förderprogrammen realisiert, was ein volkswirtschaftlicher Systemvergleich mit der Solarthermie erschwert und bei der Interpretation dieses Vergleichs berücksichtigt werden muss.

2. Ausgangslage

Die Nutzung von Umweltwärme und Solarenergie für die Deckung von Raumwärme und Brauchwarmwasser (BWW) ist eine unbestrittene Massnahme bei der Umsetzung der "Energiewende", da mehr als ein Drittel des gesamten Energieverbrauchs Niedertemperaturwärme für Heizung und Warmwasser ist [1]. Kantonale Bauvorschriften verlangen bereits heute bei Neubauten und Sanierungen die Nutzung von erneuerbaren Energien. In einzelnen Kantonen (z.B. BL, BS) besteht eine Verpflichtung das BWW in neuen Wohnbauten oder bei Gesamterneuerung des zentralen Brauchwarmwassererzeugers zu 50% mit erneuerbaren Energien zu erwärmen.

Die Nutzung von Solarenergie für die Bereitstellung von BWW ist für Neubauten und Sanierungen eine einfache und kostengünstige Variante, um einen Teil der Energieversorgung auf erneuerbare Quellen umzustellen.

Bis vor wenigen Jahren war die Installation von Solarthermischen Kollektoren die erste Wahl für die Produktion von BWW aus Sonnenenergie. Mit dem Aufkommen von bezahlbaren Photovoltaikanlagen zur Stromproduktion und der Verfügbarkeit einer breiten Modellpalette an Wärmepumpen-Boiler (WPB) und Wärmepumpen-Kompaktgeräten bietet die Kombination aus Photovoltaik (PV) und Wärmepumpe (WP) eine prüfungswürdige Alternative zur Solarthermie (ST).

Systeme mit PV und WP zur Bereitstellung von Brauchwarmwasser werden bereits heute auf dem Markt angeboten mit dem Argument, dass sie gleich gut oder besser – sprich kosteneffizienter bei gleichen ökologischen Vorteilen – seien als Solarwärme-Systeme. Ein belastbarer direkter Vergleich mit der heute vorherrschenden Technologie der solaren Brauchwarmwassererwärmung, der Solarthermie, steht noch aus.

Der direkte Vergleich einer ST-Anlage mit einer PV-WP-Anlage kann nicht pauschal erfolgen, sondern bedarf Berechnungen mit klar definierten energetischen und ökonomischen Randbedingungen. Erst in Abhängigkeit dieser Randbedingungen können die Vor- und Nachteile der verschiedenen Systeme verglichen und diskutiert werden.

Für einen fairen Vergleich verschiedener Systeme zur Bereitstellung von BWW ist ein auf Simulationen gestützter, theoretischer Technologievergleich auf Systemebene daher ein geeignetes Werkzeug. In der Simulation kann der Einfluss der verschiedenen Parameter untersucht werden und es können daraus allgemeine Trends bezüglich energetischer und ökonomischer Unterschiede der verschiedenen Systeme abgeleitet werden.

3. Ziel der Arbeit

Das Projekt hat zum Ziel, für Fachpersonen und Energiefachstellen eine Orientierungshilfe für die Technologiewahl bei der Brauchwarmwassererwärmung aus Solarenergie für Einfamilienhäuser bereit zu stellen.

Im Zentrum der Arbeiten steht ein Technologie- und Kostenvergleich von solarthermischer Brauchwarmwassererwärmung und der Kombination von Photovoltaik und Brauchwarmwasser-Wärmepumpe.

Der Technologievergleich wird auf Basis des Primärenergiebedarfs im Betrieb durchgeführt. So können die unterschiedlichen Wertigkeiten der Energieträger für die Produktion des BWW (Gas, Strom) verglichen werden.

Es wird keine Ökobilanz der verschiedenen Systeme erstellt. Eine Aussage darüber, welches System in einer umfassenden Ökobilanz-Betrachtung über den Lebenszyklus besser abschneidet, kann daher nicht gemacht werden. Andere Studien [6] deuten darauf hin, dass die Ökobilanz der verschiedenen solaren Systeme sehr ähnlich ist.

Das Projekt will mit einem auf Simulationen gestützten, theoretischen Technologievergleich/Systemvergleich folgende, für eine umfassende Betrachtung der Systeme relevanten, Bereiche analysieren:

- Quantitative Analysen basierend auf Simulationen und Berechnungen:
 - Energieeffizienz (Flächeneffizienz)
 - Kosteneffizienz aktuell und mit prognostizierten Preisentwicklungen
- Qualitative Analysen durch die Autoren
 - Systemkomplexität
 - Integration in die moderne Gebäudeenergieversorgung
 - Akzeptanz beim Endkunden
 - Energiewirtschaftliche Einbettung

Weiter bietet die Studie Entscheidungsgrundlagen für die weitere Entwicklung von solaren Warmwassersystemen für Einfamilienhäuser wie z.B. einer modulierenden, lastmanagement-tauglichen Brauchwarmwasser-Wärmepumpe.

4. Vorgehen

4.1. Literaturrecherche

Um Erkenntnisse aus aktuellen Studien zu Systemvergleichen von ST mit PV-WP in die vorliegende Arbeit zu integrieren, wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Es zeigte sich, dass zu den Themen Solarthermie und/oder Wärmepumpe für die Bereitstellung von BWW viele Publikationen verfügbar sind. Studien mit Einbezug der Kombination aus PV und WP sind hingegen relativ selten. Es wurden nur acht Studien identifiziert, die für einen Systemvergleich zwischen solarthermischer Brauchwarmwassererwärmung und PV-WP-Kombination relevante Informationen beinhalten [2-9]. Es konnte keine Studie gefunden werden, die die verschiedenen Varianten der solaren Brauchwarmwassererwärmung in einer ergebnisoffenen und von gesetzlichen Vorgaben oder Fördersystemen unabhängigen Untersuchung darstellt.

Die Erkenntnisse aus den relevanten Publikationen wurden im Projekt verwendet, um die zu vergleichenden Systeme zu definieren und die Simulation mit den entsprechenden Randbedingungen möglichst allgemeingültig zu gestalten. In *Anhang 1: Auszug Literaturstudie* sind die in den Studien behandelten Themen aufgeführt.

4.2. Definition Basissysteme

Der Technologievergleich in diesem Projekt basiert auf Systemen für die solare Brauchwarmwassererwärmung wie sie heute in der Schweiz in Einfamilienhäusern zum Einsatz kommen. Bei der Definition der zu vergleichenden Systeme wurden die technischen Parameter so gewählt, dass sie den am häufigsten installierten Systemen möglichst entsprechen.

Neben den Systemen mit Solarenergienutzung wurde auch ein System ohne Solarenergienutzung untersucht. Dieses stellt das fossile Referenzsystem dar und ermöglicht den direkten Vergleich von Systemen mit und ohne erneuerbarem Anteil in der Bereitstellung von BWW.

Für den Technologievergleich wurde ein Basissystem (BS1) ohne solaren Anteil und drei Basissysteme (BS2-BS4) mit solarem Anteil definiert:

Die Systeme mit solarem Anteil benötigen eine zusätzliche Wärmequelle für die Nachheizung des Speichers. Dies für den Fall, dass die Solarenergie während Schlechtwetterperioden nicht ausreicht den BWW-Bedarf bereitzustellen. In BS2, der Variante mit Solarthermie, wird eine Gastherme, die auch die Heizenergie für das Gebäude liefert, für die Nachheizung verwendet. In BS3 (PV mit WP-Boiler) gibt es kein zusätzliches System für die Nachheizung. Das Nachheizen erfolgt über zusätzlichen Strombezug aus dem Versorgungsnetz. Bei den Wärmepumpen-Kompaktgeräten (BS4) erfolgt das Nachheizen ebenfalls über zusätzlichen Strombezug aus dem Versorgungsnetz. Die in BS4 verwendete WP wird neben der BWW-Bereitstellung auch für die Erzeugung von Heizwärme eingesetzt.

4.2.1. Gastherme (fossile Referenz) (BS1)

Speicherinhalt 300l

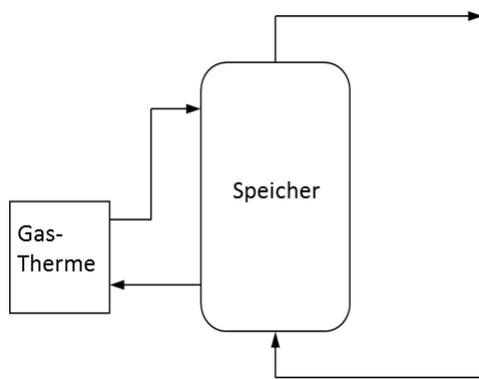


Abbildung 1: Basissystem Gastherme (BS1)

4.2.2. Solarthermie (BS2)

Flachkollektor mit Bruttokollektorfläche 5 m²

Speicherinhalt 450 l

Nachheizung mit Gas.

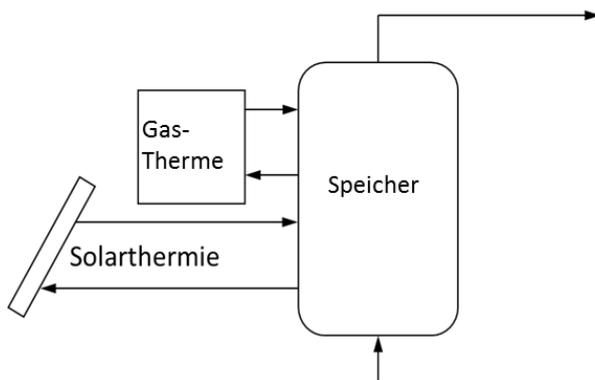


Abbildung 2: Basissystem Solarthermie (BS2)

4.2.3. Wärmepumpenboiler (BS3)

Speicherinhalt 300l, Photovoltaik-Modulfläche von 5 m² (0.75 kWp)

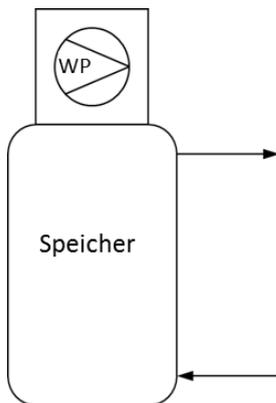


Abbildung 3: Basissystem Wärmepumpenboiler(BS3)

4.2.4. Luft-Wasser Wärmepumpe Kompaktgerät (BS4)

Speicherinhalt 300l, Photovoltaik-Modulfläche von 5 m² (0.75 kWp)

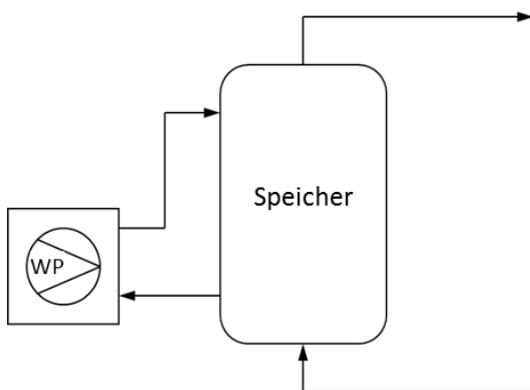


Abbildung 4: Basissystem Luft-Wasser Wärmepumpe Kompaktgerät (BS4)

4.3. Modellgrundlagen und -annahmen

Im Folgenden werden die Annahmen und Grundlagen für die Modellbildung, welche für die Simulation verwendet wurde, beschrieben. Details zu den einzelnen Parametern sind in *Anhang 2: Simulationsparameter* aufgeführt.

4.3.1. Speicher

Das Modell teilt das Speichervolumen entlang seiner Höhe in 20 Schichten mit identischen Volumina. Jede Schicht wird als isotherm angesehen. Das Modell beinhaltet interne Wärmeleitung, freie Konvektion und Durchströmung ohne Turbulenzbildung sowie die Wärmeverluste an die Umgebung.

4.3.2. Solarthermie

Die Solarthermischen Kollektoren wurden über die Kollektorkennlinie modelliert. Wirkungsgradkennwerte sind auf die Bruttokollektorfläche bezogen. Der Wirkungsgrad bei einer Einstrahlung G , einer mittleren Kollektortemperatur T_m und der Umgebungstemperatur T_a wird gemäss folgender Formel berechnet:

$$\eta(T_m^*) = \eta_0 - a_1 \cdot T_m^* - a_2 \cdot G \cdot T_m^{*2}$$

$$T_m^* = (T_m - T_a) / G$$

$$(\eta_0 = 0.71; a_1 = 3.38 \text{ K}^2/\text{W}; a_2 = 0.01 \text{ K}^2\text{m}^4/\text{W}^2)$$

Die Effizienzparameter wurden als Mittelwert von Flachkollektoren gebildet: Dazu wurden Kollektoren mit den SPF-Prüfnummer: 943, 907, 875, 861, 847, 845, 823, 814, 808, 680, 655, 579, 455 verwendet.

Die Bruttokollektorfläche wurde auf 5 m^2 festgelegt, was einer typischen Grösse für BWW-Anlagen bei Einfamilienhäusern entspricht.

Eine mögliche Verschmutzung des Kollektors über die Betriebszeit wurde nicht berücksichtigt.

Der elektrische Energiebedarf der Solarpumpe wurde basierend auf Feldbeobachtung von solarthermischen Anlagen berücksichtigt.

Verluste durch hydraulische Leitungen und das Ausgleichsgefäss wurden vernachlässigt.

4.3.3. Photovoltaik

Ausgehend von Strahlungsdaten wurde die Momentanleistung der PV-Anlage modelliert. Es wurden folgende Aspekte berücksichtigt:

- Reflexionsverluste bei PV-Modulen
- Temperatureinfluss
- Schwachlichtverhalten
- Verluste des Wechselrichters

Die Generatorfläche wurde auf 5 m^2 Brutto festgelegt um energetisch und ökonomisch einen direkten Vergleich mit der Solarthermie (BS2) zu ermöglichen.

Eine Degradation oder Verschmutzung der Module über die Betriebszeit wurde nicht berücksichtigt.

4.3.4. Wärmepumpenboiler

Das Wärmepumpenmodell berechnet die Leistungszahl im aktuellen Arbeitspunkt (COP) unter Berücksichtigung der Vor- und Rücklauftemperatur auf der Kondensatorseite (Energie Abgabe) und basierend auf der Quelltemperatur. Das Modell basiert auf einem isentropen Wirkungsgrad des Verdichters. Die Verdampfertemperatur wird dabei auf maximal $10 \text{ }^\circ\text{C}$ limitiert. Die Grädigkeit der Wärmetauscher beträgt 5 K beim Kondensator und 10 K beim Verdampfer. Die Wärmepumpe wurde in der Simulation bedarfsgesteuert.

Der Abgleich des Modells erfolgte mit den COP Messwerten aus dem WPZ-Bulletin 02-2013. Dabei handelt es sich um die Effizienz der Wärmepumpe inklusive des Speichers. Betrachtet wurden 13 Wärmepumpenboiler gemessen nach EN16147:2011. Der durchschnittliche COP beträgt 2.78, der minimale COP liegt bei 2.3 und der maximale bei 3.1. Das für die Simulation verwendete generische WP-Modell wurde ebenfalls mit den Parameter nach EN16147:2011 geprüft und ergibt einen COP von 2.76.

4.3.5. Luft-Wasser-Wärmepumpe

Für die Luft-Wasser-WP wurde dasselbe Simulationsmodell verwendet wie für den Wärmepumpenboiler. Der isentrope Wirkungsgrad des Verdichters ist jedoch höher im Vergleich zum Wärmepumpenboiler-Modell. Dies basiert darauf, dass mit steigender Leistung bessere Verdichter eingesetzt werden (3-phasig). Zusätzlich wird die Leistung von Pumpen und Ventilator berücksichtigt. Das Modell für die Luft-Wasser-Wärmepumpe wurde ebenfalls mit Messwerten abgeglichen. Es wurden die COP Messwerte aus dem WPZ-Bulletin 02-2013 verwendet. Betrachtet wurden 21 Luft-Wasser-WP im Arbeitspunkt A7/W55 mit einer thermischen Leistung von 8 – 12 kW. Der durchschnittliche COP beträgt 2.67, der minimale COP liegt bei 2.2 und der maximale bei 3.2. Das Simulationsmodell ergibt in diesem Arbeitspunkt einen COP von 2.66 gemessen nach EN14511:2011 im Arbeitspunkt A7/W55. Im Simulationsmodell wurden die Grädigkeiten von Kondensator und Verdampfer berücksichtigt.

4.3.6. Zapfprofil

Die Simulationen verwenden Zapfprofile, die mit Hilfe des Programms DHWcalc [11] erzeugt wurden. Die zeitliche Auflösung beträgt 1min. Als Zapfmenge wird ein 4 Personenhaushalt mit 40 Liter pro Person und Tag bei 60 °C Wassertemperatur angenommen, nach SIA 385, EFH, Kategorie 2, mittlerer Standard. Die gezapfte Wärmemenge betrug 3130 kWh/Jahr. Für die Weihnachtsferien von 23.12 -30.12 wurde der Verbrauch auf 120% erhöht. Für die Sommerferien von 20.07 – 04.08. wurde kein Verbrauch von Brauchwarmwasser angenommen. Der Volumenstrom der Zapfung wird aufgrund einer Zapftemperatur von 60 °C festgelegt. Bei abweichender Bezugstemperatur wird der Volumenstrom entsprechend angepasst.

4.3.7. Primärenergiefaktoren

Um einen Vergleich der verschiedenen Systeme mit unterschiedlichen Energieträgern zu ermöglichen, wurden die dem Gebäude zugeführten Energieträger Gas und Strom mit Faktoren auf nicht erneuerbare Primärenergie umgerechnet. Dafür wurden folgende Energiegewichtungsfaktoren verwendet wie sie unter anderem in der ecoinvent Datenbank für das ENTSO verwendet werden [10]:

- Strom: 2.88
- Erdgas: 1.19

4.4. Technischen Randbedingungen der Systemvarianten

Die Basissysteme 1-4 wurden durch unterschiedliche Systemparameter in weitere Varianten unterteilt. Folgende Parameter wurden verändert:

4.4.1. Ausrichtung Solarthermie und Photovoltaik

- Optimal (für PV: 30°, Süd; für ST: 40°, Süd)
- Südfassade (90°, Süd)
- Westdach (30°, West)

Die gewählten unterschiedlichen Ausrichtungen erlauben den Vergleich der Systeme bei optimaler Orientierung des Solarkollektors und bei in der Praxis häufig verwendeten Ausrichtungen.

4.4.2. Warmwassertemperatur im Speicher (Vorlauftemperatur)

- $T_1 = 50 \text{ °C}$
- $T_2 = 60 \text{ °C}$

Bei den Speichertemperaturen wurden 2 Niveaus simuliert, um die häufigsten Installationsvarianten abzubilden. Während 60 °C Vorlauftemperatur vor allem in älteren Warmwassersystemen mit Legionellengefahr durch stehendes Wasser gewünscht ist, wird in modernen Systemen oft nur mit 50 °C Vorlauftemperatur gefahren. Bei Mehrfamilienhäusern und Spitälern muss das Wasser vor dem Verbrauch mindestens einmal pro Tag in regelmässiger, kurzzeitiger Temperaturerhöhung (Legionellenschaltung) auf 60 °C gefahren werden, in Einfamilienhäusern besteht dafür keine Verpflichtung.

4.4.3. Wetterdaten

- Typ 0 (Messdaten Standort Zürich aus dem Jahr 2013)
- Typ 1 (generische Modelldaten Standort Zürich, Meteonorm Version 6.1.0.18)

Die Wetterdaten des Simulationsmodells bestehen aus Globalstrahlung, Diffusstrahlung und Lufttemperatur. Für die Berechnung werden Messdaten (Typ 0) und Modelldaten (Typ 1) verwendet.

Die Messdaten wurden vom Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz zur Verfügung gestellt. Die Messwerte stammen von Zürich Uetliberg für das Jahr 2013 mit einer Auflösung von 10 min.

Die Modelldaten für den Standort Zürich stammen von der Meteonorm Version 6.1.0.18.

4.4.4. Modell zur Berücksichtigung von Wärmeklau bei Wärmepumpenboiler

Beim Basissystem 3 wird von einer innenaufgestellten Wärmepumpe (Wärmepumpenboiler) ausgegangen, welche als Wärmequelle die Luft des Aufstellungsraums verwendet. Diese Wärme muss dem Raum auf irgendeine Weise zugeführt werden. Oft stammt sie aus der Verlustwärme des im Keller aufgestellten Raumwärme-Heizsystems. Die Verwendung solcher Abwärme durch den Wärmepumpenboiler wird als Wärmeklau bezeichnet. Der Anteil der durch Wärmeklau verwendeten nicht erneuerbaren Energie wird durch folgendes Modell bestimmt:

Es wird angenommen, dass der Aufstellungsraum des Wärmepumpenboilers im Keller ist, und dieser gegenüber dem Warmbereich des Gebäudes und dem Erdreich ideal gedämmt ist. Die Kellertemperatur T_{Keller} wird somit über eine Heizung im Keller erzeugt oder gehalten. Der Anteil der Heizungswärme Q_{Hz} welcher aus dem Keller an die Umwelt geht (Q_{Uw}) ist für die Energiebetrachtung Brauchwarmwassererzeugung nicht relevant. Von Interesse ist der Wärmebedarf Q_{HzWP} , welcher von der Heizung an die Wärmepumpe für die BWW-Erzeugung abgegeben wird.

Dieses Modell gilt für die Heizperiode, welche definiert wurde über Umgebungstemperaturen $< 15 \text{ °C}$. Bei den generischen Wetterdaten war dies während 6805 h und bei den gemessenen Wetterdaten während 7133 h pro Jahr der Fall.

Somit ergibt sich die Systemgrenze wie in Abbildung 5 dargestellt. Der Wärmebedarf Q_{HzWP} wird wie folgt berechnet:

$$Q_{\text{HzWP}} = Q_{\text{BWW}} - W_{\text{El}}$$

Wobei Q_{BWW} die gelieferte Wärmemenge der Wärmepumpe ist und W_{El} der Stromverbrauch derselben.

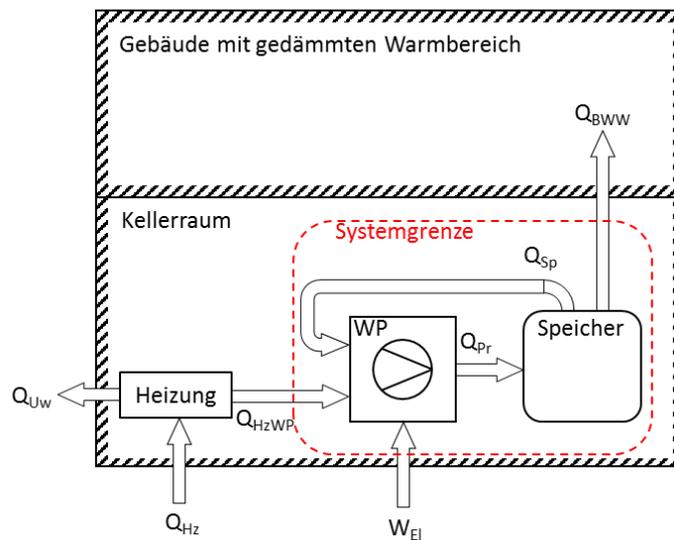


Abbildung 5: Modell für die Berücksichtigung Wärmeklaus bei der BWW-Erzeugung in der Heizperiode

Bei Umgebungstemperatur über 15 °C (ausserhalb Heizperiode) reduziert sich das Modell wie in Abbildung 6 dargestellt. Die Wärme Q_{HzWP} für die Wärmepumpe wird von der Umwelt Q_{Uw} bezogen mit dem Temperaturniveau der Umgebungstemperatur.

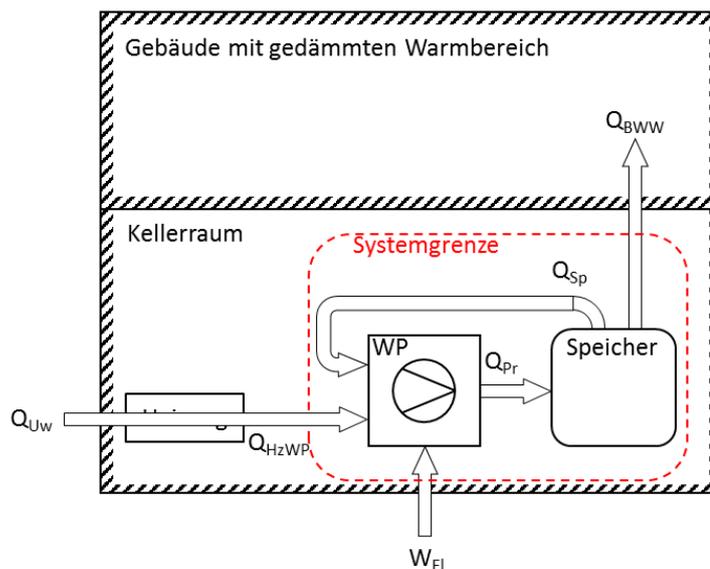


Abbildung 6: Modell für die Berücksichtigung des Wärmeklaus bei der BWW-Erzeugung ausserhalb der Heizperiode

Das Modell für die Heizperiode geht davon aus, dass bei Umgebungstemperaturen unter 15 °C sämtliche vom Wärmepumpenboiler benötigte Energie über ein Heizsystem zur Verfügung gestellt werden muss. Diese Annahme ist ein "worst case" in Bezug auf den Primärenergieeinsatz beim Basissystem BS3 und entspricht einem maximalen Wärmeklaus.

In der Variante ohne Wärmeklaus wird keine Wärme aus einem Raumheizsystem verwendet. Der Aufstellungsraum muss in diesem Fall durch Abwärme anderer Geräte oder des Erdreichs so temperiert werden, dass in der Simulation ein mittlerer COP von 2.76 erreicht wird.

Um die Bandbreite des Einflusses des Wärmeklaus darzustellen, wurde ein System ganz ohne und ein System mit maximalem Wärmeklaus berechnet.

Für eine zusätzliche Abschätzung des Einfluss des Wärmeklaus auf den Primärenergieeinsatz wurde eine weitere Systemkonfiguration simuliert. In der Simulation für

den Fall mit maximalem Wärmeklaus wurde eine Bereitstellung der Energie für den Wärmeklaus mit einer WP gerechnet. Dabei wurde die Jahresarbeitszahl (JAZ) der Heizungs-Wärmepumpe, die den Wärmeklaus ausgleicht, in der Simulation variiert. Bei einer tiefen JAZ der Heizungswärmepumpe steigt entsprechend der Primärenergiebedarf für die Deckung des Wärmeklaus.

4.4.5. Bilanzierungszeitraum

Systeme mit Photovoltaik und Wärmepumpe können überschüssigen Strom aus der PV ins Versorgungsnetz abgeben oder einen Bedarfsüberschuss aus dem Versorgungsnetz decken. In beiden Fällen wird jedoch eine Dienstleistung des Versorgungsnetzes beansprucht. Da das Stromnetz kein realer Speicher ist, muss bei der Einspeisung von PV-Strom ins Versorgungsnetz ein anderer Produzent seine Einspeisung drosseln. Im Falle von Strombezug muss ein anderer Produzent den bezogenen Strom ins Versorgungsnetz einspeisen. Diese Dienstleistung des Stromnetzes als virtueller Speicher sollte beim Vergleich von Systemen mit PV und WP mit einem solarthermischen System näher betrachtet werden, damit ein fairer Vergleich erfolgt. Im Gegensatz zur Photovoltaik funktioniert die Solarthermie, ohne das Stromnetz als virtuellen Speicher zu nutzen.

Da die Solarstrahlung zeitlich und leistungsmässig nicht immer mit dem Verbrauch zusammenfällt nehmen Systeme mit PV und einer Wärmepumpe den virtuellen Speicher in der Regel in Anspruch. Die Nutzung des Versorgungsnetzes als virtuellen Stromspeicher ist vor allem dann problematisch, wenn damit Energie über lange Zeit virtuell gespeichert wird. Liegen die Einspeisung von PV-Strom und die Entnahme von Strom für die WP zeitlich eng zusammen, können die ökologischen und monetären Kosten für diese Netzdienstleistung vernachlässigt werden. Dies deshalb, weil der Verlauf der Einspeisung und des Verbrauchs innerhalb eines engen Zeitraums keinem Muster folgt, und sich daher mehrere Systeme diese Art gegenseitig ausgleichen. Wird jedoch Energie über den virtuellen Speicher Versorgungsnetz vom Sommer in den Winter verschoben, entsteht ein klares Muster von Einspeisespitzen im Sommer und Bezugsspitzen im Winter. Diese gleichen sich nicht aus, bei der Betrachtung von mehreren Systemen. In diesem Fall sind die ökologischen und monetären Aufwände für den virtuellen Speicher beträchtlich und müssen für einen Technologievergleich berücksichtigt werden.

Im vorliegenden Projekt wurden solche Dienstleistungen nicht explizit berücksichtigt. Es wurde dem Problem jedoch damit Rechnung getragen, dass die Berechnungen für verschiedene Bilanzierungszeiträume angestellt wurden. Der Betrachtungszeitraum der dargestellten Simulationsergebnisse beträgt jeweils ein Jahr. Innerhalb dieses Jahres können aber verschiedene Zeitspannen (Bilanzierungszeiträume) gewählt werden, in denen die Produktion aus PV und der Verbrauch der Wärmepumpe verrechnet werden. So kann keine Energie über den jeweils gewählten Bilanzierungszeitraum hinweg verschoben werden. Bei einem Bilanzierungszeitraum von einem Tag kann somit rechnerisch keine Elektrizität aus Photovoltaik von mehrtägigen Schönwetterperioden in mehrtägige Schlechtwetterperioden oder gar vom Sommer in den Winter verschoben werden. Die fehlende Elektrizität für die WP im Winter muss vollständig vom Versorgungsnetz bezogen werden und wird entsprechend als Primärenergieinput dem entsprechenden System angerechnet.

Der Entscheid, über welchen Zeitraum die Bilanzierung, also die Verrechnung von eingespeister mit bezogener Elektrizität, stattfindet, hat daher grosse Auswirkung auf den Primärenergiebedarf.

Im vorliegenden Projekt wird davon ausgegangen, dass ein Bilanzierungszeitraum von bis zu einem Tag möglich ist, ohne Kosten oder Energieinput für den virtuellen Speicher zu berücksichtigen. In der Regel werden daher die Vergleiche mit einem Bilanzierungszeitraum von einem Tag präsentiert.

4.4.6. Overlap

Um die Auswirkungen von verschiedenen Bilanzierungszeiträumen aufzuzeigen, wurde der "Overlap" berechnet. Der Overlap gibt Auskunft darüber, wie stark sich die PV-Produktion und der WP-Stromverbrauch innerhalb des gewählten Bilanzierungszeitraums überlappen. Der Overlap soll eine Abschätzung ermöglichen, inwiefern ein Eigenverbrauch des mit der PV-Anlage produzierten Stroms durch die WP innerhalb des Bilanzierungszeitraums möglich wäre, z.B. durch Anpassen der Wärmepumpen-Laufzeiten an die PV Produktion, respektive durch lokale Speicherung von Strom oder Wärme im jeweiligen Bilanzierungszeitraum.

Der Overlap über einen bestimmten Bilanzierungszeitraum (bzt) wird gemäss folgender Formel berechnet:

$$o_{bzt} = \sum_{\text{Jahr}} \min \left[\sum_{bzt} E_{\text{Produktion}}, \sum_{bzt} E_{\text{Verbrauch}} \right]$$

o_{bzt} entspricht der Energie welche innerhalb des Bilanzierungszeitraums bzt produziert und verbraucht wird. Wird mehr Energie produziert als verbraucht so gilt die verbrauchte Energiemenge. Wird weniger produziert als verbraucht so gilt die produzierte Energiemenge.

In Abbildung 7 und Abbildung 8 ist der Unterschied zwischen Eigenverbrauch und Overlap grafisch dargestellt. Während Eigenverbrauch immer nur bei zeitgleicher Produktion von PV-Strom und WP-Verbrauch stattfinden kann, wird dem Overlap eine Zeitspanne zugeordnet, in der die Stromproduktion aus PV und der Verbrauch der WP verrechnet wird.

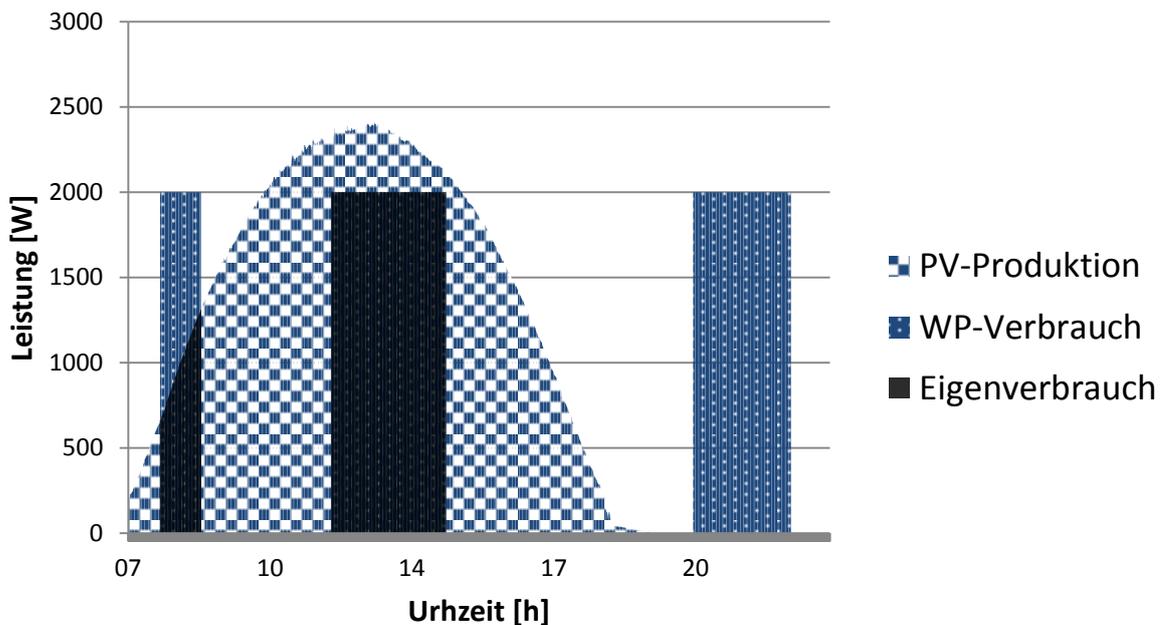


Abbildung 7: Beispielgrafik Eigenverbrauch. Der Eigenverbrauch entspricht der Fläche(Energie) bei der sich PV-Produktion und WP-Verbrauch zeitgleich überschneiden.

Für die Berechnung des Overlap muss nun ein Bilanzierungszeitraum definiert werden, in dem PV-Produktion und WP-Verbrauch verrechnet werden. Die Wahl dieses Bilanzierungszeitraums ist entscheidend für das Ergebnis des Overlap. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 8 am Beispiel von zwei Bilanzierungszeiträumen von 10 Minuten und 1 Stunde für die gleiche Datengrundlage dargestellt.

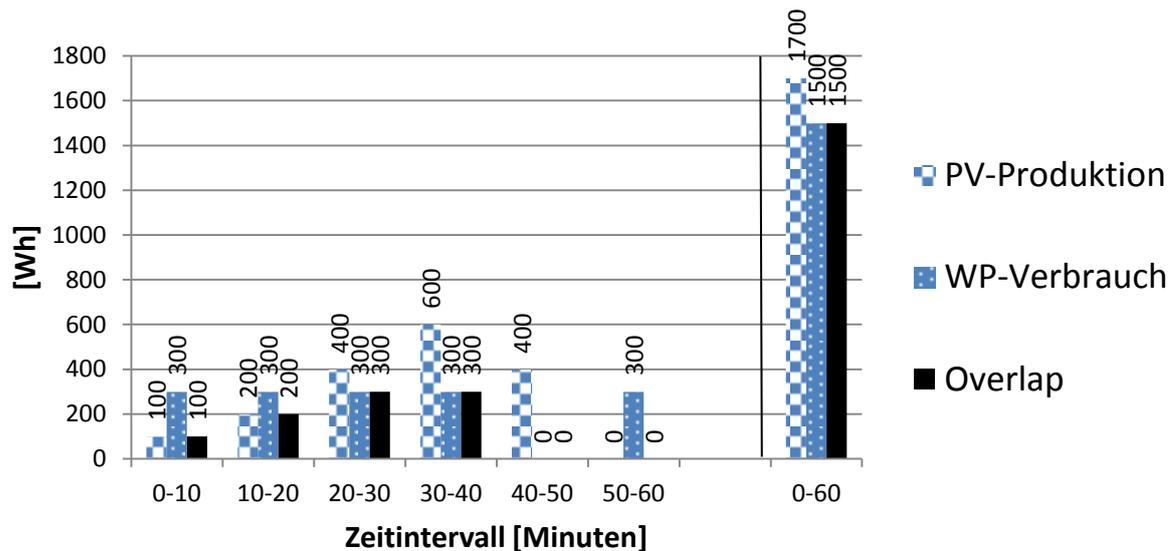


Abbildung 8: Beispielgrafik Overlap mit unterschiedlichem Bilanzierungszeitraum. Im Zeitintervall 0-60 Minuten ist der Overlap deutlich grösser (1500 Wh) als die Summe der Overlap-Werte der einzelnen 10-Minuten-Schritte (900 Wh).

Der Overlap ergibt sich in der vorliegenden Studie zufällig, da die Systeme rein wärmegeführt simuliert wurden und keine Steuerfunktion zwischen PV und WP berücksichtigt wurden (keine Optimierung auf PV-Eigenverbrauch).

In einem realen Gebäude gibt es neben der Wärmepumpe weitere Verbraucher für elektrische Energie. Diese wurden für die Berechnung des Overlap nicht berücksichtigt. Die Berücksichtigung von weiteren Bezüglern im Gebäude würde die Systemgrenze für die Simulation der Brauchwarmwassererwärmung verlassen.

Für die Ökonomischen Betrachtungen wurde die Rückspeisung von Strom-Überschuss ins Versorgungsnetz berücksichtigt und vergütet, während der Strom-Überschuss in der energetischen Betrachtung verworfen wird. Die Berücksichtigung des Strom-Überschuss für die ökonomischen Betrachtungen ist gerechtfertigt, da mit dem gewählten Bilanzierungszeitraum von einem Tag (mit entsprechendem Verwerfen des überschüssigen Solarstroms in der Energiebilanz) und der vorliegenden Anwendung (sehr kleine PV-Leistung die dezentral eingespeist wird) der Solarstrom kaum grössere Netzkosten verursacht als Strom aus Grosskraftwerken. Der eingespeiste Solarstrom kann somit zu normalen Energiekosten verkauft werden.

Die Simulationsergebnisse wurden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bilanzierungszeiträume und unter Einbezug des Overlap ausgewertet.

4.5. Aufbau Simulation

Für die Simulation werden als erster Schritt die Wetterdaten und das Zapfprofil eingelesen. Anschliessend erfolgt eine Initialisierung aller Modelle, welche die Startwerte für den ersten Zeitschritt berechnen. Die Jahressimulation erfolgt iterativ in Sekundenaufösung. Die Ergebnisse (z.B. Speichertemperatur) einer Iteration dienen als Startwerte für die nachfolgende Iteration. Basierend auf den Speichertemperaturen wird über einen Regler der Sollwert für die Heizung berechnet. Anschliessend erfolgt die Berechnung fürs Heizsystem, welche die Energie an den Speicher übergibt. Hierbei werden die Umweltparameter berücksichtigt. Im Speicher werden die Werte von der Heizung und vom Zapfprofil konsolidiert, um daraus die Speichertemperaturen zu bestimmen. Diese dienen als Startwert für die nächste Iteration, beginnend beim Regler. Somit ergibt sich eine bedarfsorientierte Steuerung.

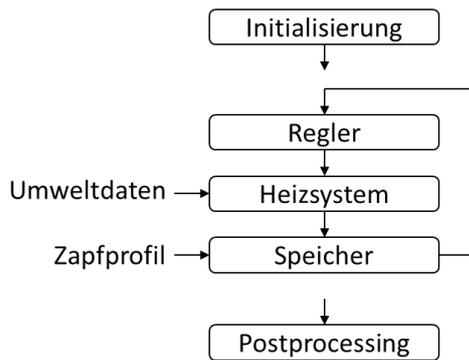


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Simulationsablaufs

Aus der Simulation wurden Datensätze im 10'-Intervall über ein Jahr generiert. Die Datensätze enthalten Angaben zur aktuellen Gasleistung des Kessels, zur PV- und ST-Leistung und der daraus erzeugten Wärmeleistung die in den Speicher fließt. Zusätzlich ist der aktuelle Stromverbrauch aufgeführt. Diese Datensätze wurden für die ökonomischen Analysen und für weitere technische Analysen verwendet.

Die in der Simulation berechneten Parameter sind in *Anhang 2: Simulationsparameter* aufgeführt.

4.6. Wirtschaftliche Randbedingungen der Systemvarianten

4.6.1. Volkswirtschaftliche Perspektive mit Parametervariation als Grundlage

Die Analyse der Wirtschaftlichkeit erfolgt entsprechend der Zielgruppe des vorliegenden Projekts mit einer volkswirtschaftlichen Perspektive. Der eingesetzte Zinssatz für die Diskontierung orientiert sich nicht an den (teilweise hohen) Renditeerwartungen privater Investoren, sondern an den tieferen kalkulatorischen Zinssätzen, die für volkswirtschaftliche Betrachtungen typisch sind. Weiter werden keine Finanzhilfen der öffentlichen Hand berücksichtigt, welche in einer betriebswirtschaftlichen Sicht die Kostensituation entscheidend verändern können. Es war dennoch nicht möglich alle volkswirtschaftlich relevanten Kosten einzubeziehen. So sind z.B. die Kosten für die temporäre Zwischenspeicherung von elektrischer Energie im Netz bei den Photovoltaik-Wärmepumpen Varianten oder die externen Kosten des Verbrauchs fossiler Energien im Modell nicht berücksichtigt.

In der Praxis findet sich im Markt eine mehr oder weniger breite Spanne bei allen Kostenkomponenten der hier untersuchten Systeme. Diese Spanne ergibt sich daraus, dass die Kosten einer bestimmten Systemvariante nach Modell, Anbieter, Region und Kaufzeitpunkt variieren können. In der vorliegenden Literatur erfolgt der Systemvergleich zwischen den Technologievarianten typischerweise über Festlegung einer bestimmten Konfiguration und Ausführung und den Einbezug von konkreten und unternehmensspezifischen Richtangeboten oder die Verwendung von typischen Kostendaten gemäss Literaturangaben.

Im Projekt SolVar-BWW wurde ein Ansatz der Wirtschaftlichkeitsanalyse gewählt, der stark auf Parametervariationen abstützt. Dies ermöglicht einerseits die Abbildung der realen Kostenbandbreite im Markt, andererseits die Identifikation der sensitiven Parameter für die Bereitstellungskosten des Warmwassers. In der zeitlichen Perspektive ermöglicht dies auch die Abbildung der Unsicherheiten in der zukünftigen Entwicklung der Technologien und den kritischen Kostenelementen (z.B. Elektrizitätsbezugs- und -rücklieferpreise). Für jeden Kostenparameter wurde deshalb eine Bandbreite festgelegt. Das Band definiert sich dabei über einen Standardwert im Sinne einer bestmöglichen Schätzung, sowie jeweils ein tiefes und ein hohes Niveau. Der Standardwert orientiert sich an vorliegenden und aktuellen

empirischen Grundlagen, die sich auf den Schweizer Markt beziehen (u.a. [12], [16]). Die tiefen und hohen Niveaus wurden auf Grundlage der Erfahrungswerte der Auftragnehmer sowie empirisch gestützten, aktuellen Kostenwerten im angrenzenden Ausland (insbesondere Deutschland und Österreich, (u.a. [13], [15]) gewählt. Die Wahl der Zahlenwerte erfolgte wo möglich nach wissenschaftlichen Kriterien, bei fehlenden Literaturdaten wurden einzelne Annahmen aber auch pragmatisch über qualifizierte Schätzungen der Auftragnehmer festgelegt.

Die zeitliche Dimension der Kostenentwicklung wird über die Zeitpunkte 2013, 2020 und 2025 abgebildet. Auf einen längeren Betrachtungszeitraum wurde bewusst verzichtet, da die Unsicherheiten der Prognose stark zunehmen. Die Entwicklungsdynamik stützt entweder auf technologiespezifischen Lernkurven und Prognosen zur Markt- und Preisentwicklung (z.B. PV, Solarthermie, u.a. [14], [17]), auf Expertenschätzungen durch die Auftragnehmer (z.B. Gaskessel, Wärmepumpen) oder auf Grobannahmen (z.B. fixe %-Werte für Energiepreissteigerung Erdgas und Elektrizität) ab. Kostenparameter von untergeordneter Bedeutung (z.B. Grundgebühr für Erdgas- und Stromanschluss) werden zeitlich nicht variiert. Für die wirtschaftlichen Betrachtungen wurden die bestehenden Basissysteme z.T. weiter differenziert. Die Basissysteme 1 (Gastherme) und 2 (Gastherme mit Solarthermie) wurden wie unter Kapitel 4.2 und 4.4 beschrieben verwendet. Für Basissystem 3 (WP-Boiler) wurden in der Wirtschaftlichkeitsrechnung vier Untervarianten differenziert (mit und ohne Photovoltaik und jeweils noch mit maximalem und ohne Wärmeklau ab Gastherme). Bei Basissystem 4 (PV-WP) wurden zwei Untervarianten (mit und ohne Photovoltaik) gerechnet. Somit wurde die wirtschaftliche Betrachtung an insgesamt acht Systemvarianten durchgeführt. Der Einbezug von zusätzlichen Untervarianten ermöglicht den Vergleich zwischen Ausführungen mit und ohne Photovoltaik bzw. den Vergleich zwischen der Situation mit maximalem und ohne Wärmeklau beim Wärmepumpenboiler.

4.6.2. Anrechnung der Kosten für das Hauptheizsystem an die Kosten für die Brauchwarmwassererwärmung

Eine Herausforderung beim wirtschaftlichen Vergleich stellt die realistische Anrechnung der Kostenanteile zwischen Brauchwarmwasser und Raumheizung dar. In allen betrachteten Systemvarianten wird das Hauptheizsystem zur Raumwärmeproduktion (Gasheizung respektive Wärmepumpe) auch für die Brauchwassererwärmung eingesetzt. Dies gilt insbesondere auch für die Systemvariante mit WP-Boiler (BS3), die bis zu einem gewissen Grad vom Wärmeklau vom fossilen Heizsystem abhängig ist.

Die Anteile an den Kosten des Hauptheizsystems, die der Brauchwassererwärmung angerechnet werden, wurden im Wesentlichen auf Basis eines angenommenen Verhältnisses zwischen Warmwasserbedarf und Gesamtwärmebedarf eines Einfamilienhauses mit rund 200 m² Energiebezugsfläche angenommen. Dieses Verhältnis hängt stark davon ab, wie hoch der Heizwärmebedarf des Gebäudes liegt respektive wie gut das Gebäude wärmegeklämt ist:

- Als Standardfall wurde ein umfassend saniertes Einfamilienhaus angenommen, das nach der Sanierung in etwa die Anforderungen gemäss Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich erfüllt (Energiebedarf für Raumwärme und Warmwasser gemäss MuKE 2008 rund 75 kWh/m²). In diesem Fall beträgt der Anteil des Energiebedarfs für Warmwasser rund 20% des Gesamtwärmebedarfs.
- Ergänzend wurden zwei weitere Fälle untersucht: Der Fall eines gesamt-sanieren, auf das Niveau eines Passivhauses wärmegeklämt Einfamilienhauses (angenommenes Verhältnis zwischen Warmwasserbedarf und Gesamtwärmebedarf 50%) sowie der Fall eines EFH-Bestandbaus, in dem das Verhältnis zwischen Warmwasserbedarf und Gesamtwärmebedarf auf 10% angesetzt wurde.

Bei den Varianten BS1 (Gastherme), BS2 (Gastherme mit Solarthermie) sowie BS3 (Gastherme und Wärmepumpenboiler mit maximalem Wärmeklau) wurde zusätzlich unterschieden, ob die entsprechenden Kosten für das Hauptheizsystem vom Erdgasverbrauch abhängen oder nicht:

- Für einen (überwiegenden) Teil der Kosten des fossilen Hauptheizsystems wurde angenommen, dass diese nicht wesentlich vom Erdgasverbrauch abhängen. Diese Kosten wurden entsprechend oben beschriebener Überlegung im Verhältnis des Anteils am Gesamtenergiebedarf zu 20% (Standardfall) der Brauchwassererwärmung angerechnet (die Kostenannahmen werden unten noch erläutert):
 - Investition für die Demontage des alten Heizsystems (als Ausgangslage wurde für alle Varianten ein mit Heizöl beheiztes Einfamilienhaus angenommen)
 - Investition für den Erdgasanschluss
 - Investition für Transport und Installation der Gastherme (bis zum „schlüsselfertigen“ Zustand)
 - Unterhaltskosten der Gastherme
 - Erdgas-Grundgebühr
- Für die Anschaffungskosten der Gastherme wurde angenommen, dass der Kostenanteil der Brauchwassererwärmung bei zusätzlicher Nutzung von erneuerbaren Energien sinkt. Diese Kostenanteile liegen bei den Varianten BS2 und BS3 (mit maximalem Wärmeklau) damit tiefer als bei der Variante BS1. Der auf die Brauchwassererwärmung entfallende Anteil der Anschaffungskosten wurde bei den beiden Varianten entsprechend dem durch den Solarkollektor (BS2) resp. durch den Wärmepumpenboiler (BS3 mit maximalem Wärmeklau) tieferen Erdgasverbrauch (Ergebnis der Simulationsrechnungen) reduziert angenommen. Es resultiert für die Varianten BS2 im Standardfall (gesamt saniertes Einfamilienhaus gemäss MuKEN 2008) ein Anteil von 7% bis 10% (je nach Ausrichtung der Solarkollektoranlage) an den Anschaffungskosten der Gastherme, die der Brauchwassererwärmung angerechnet werden. Bei der Variante BS3 (mit maximalem Wärmeklau) resultieren 9%. Im Gegensatz dazu wurde für die Variante BS1 gemäss oben beschriebener Überlegung für den Standardfall (gesamt saniertes Einfamilienhaus gemäss MuKEN 2008) ein Kostenanteil von 20% angesetzt. Für die anderen Fälle (EFH-Bestandsbau resp. EFH-Passivhaus) wurde analog vorgegangen (Kostenanteile vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Anteil an den Kosten des Hauptheizsystems, das der Brauchwarmwassererwärmung angerechnet wird (für alle acht untersuchten Varianten)

Va-riante	Hauptheizsystem	Ergänzendes Heizsystem	Anteil an den Kosten des Hauptheizsystems, das der Brauchwarmwassererwärmung angerechnet wird		
			EFH-Bestandsbau	EFH gesamtsaniert nach MuKE n 2008	EFH gesamtsaniert aus Passivhaus-Niveau
BS1	Gastherme	–	10%	20%	50%
BS2	Gastherme	Solarthermie	<ul style="list-style-type: none"> • Anschaffung Gastherme: 4%-5% (1) • Restliche Kosten: 10% 	<ul style="list-style-type: none"> • Anschaffung Gastherme: 7%-10% (1) • Restliche Kosten: 20% 	<ul style="list-style-type: none"> • Anschaffung Gastherme: 18%-25% (1) • Restliche Kosten: 50%
BS3, V1a	nicht relevant	WP-Boiler ohne PV; ohne Wärmeklau	0%	0%	0%
BS3, V1b	Gastherme	WP-Boiler ohne PV; mit Wärmeklau	<ul style="list-style-type: none"> • Anschaffung Gastherme: 4% • Restliche Kosten: 10% 	<ul style="list-style-type: none"> • Anschaffung Gastherme: 9% • Restliche Kosten: 20% 	<ul style="list-style-type: none"> • Anschaffung Gastherme: 22% • Restliche Kosten: 50%
BS3, V2a	nicht relevant	WP-Boiler mit PV; ohne Wärmeklau	0%	0%	0%
BS3, V2b	Gastherme	WP-Boiler mit PV; mit Wärmeklau	<ul style="list-style-type: none"> • Anschaffung Gastherme: 4% • Restliche Kosten: 10% 	<ul style="list-style-type: none"> • Anschaffung Gastherme: 9% • Restliche Kosten: 20% 	<ul style="list-style-type: none"> • Anschaffung Gastherme: 22% • Restliche Kosten: 50%
BS4, V1	Wärmepumpe ohne PV	–	10%	20%	50%
BS4, V2	Wärmepumpe mit PV	–	10%	20%	50%

(1) Kostenanteil je nach Ausrichtung des Solarkollektors.

4.6.3. Investitionen: Kostenparameter und Annahmen

Folgende Investitionen wurden für den Kostenvergleich berücksichtigt (wie oben erwähnt wurden für jeden Kostenparameter eine bestmögliche Schätzung sowie ein tiefer und ein hoher Wert definiert, jeweils für die drei Investitionszeitpunkte 2013, 2020 und 2025; die angenommenen Kostenparameter sind im *Anhang 3: Ökonomischen Randbedingungen* im Detail aufgeführt):

- Demontagekosten des alten Heizsystems: Als Ausgangslage wurde für alle Varianten ein mit Heizöl beheiztes Einfamilienhaus angenommen. Die Kosten für die Demontage des alten Warmwasserspeichers wurden als Teil der Demontagekosten separat abgeschätzt, um die Abgrenzung der Kosten für die Brauchwarmwassererwärmung vorzunehmen (die Demontage des alten Warmwasserspeichers wird der Brauchwarmwassererwärmung zu 100%, die Demontage des restlichen Heizsystems gemäss oben beschriebenen Kostenanteilen angerechnet).
- Bauliche Grundinvestitionen für das neue Hauptheizsystem: Bei den Varianten mit Gastherme handelt es sich dabei um die Kosten für den Erdgasanschluss, bei der Wärmepumpe um die baulichen Massnahmen zur Sicherstellung der Energieversorgung der Wärmepumpe mit Aussenluft und Strom. Diese Kosten werden der Brauchwassererwärmung gemäss oben beschriebenen Kostenanteilen angerechnet).

- Investitionen in das neue Hauptheizsystem: Diese umfassen die Kosten für die Anschaffung aller nötigen Anlagen, Komponenten und Zubehör sowie die Kosten für Transport, die Installation inklusive Nebenarbeiten und die Inbetriebnahme (bis zum „schlüsselfertigen“ Zustand). Auch hier werden als Teil der Gesamtkosten die Kosten für die Anschaffung, Transport und Installation des Warmwasserspeichers separat geschätzt, um die Abgrenzung der Kosten für die Brauchwarmwassererwärmung vorzunehmen. Die nicht direkt der Brauchwarmwassererwärmung zuzuordnenden Kosten werden gemäss oben beschriebenen Kostenanteilen angerechnet.

Die Investitionen werden mit einem kalkulatorischen Zinssatz von 2,5% (Standardwert) über eine Betrachtungsperiode von 20 Jahren ab Investitionszeitpunkt bewertet (Berücksichtigung Restwerte über lineare Abschreibung).

Wie oben erwähnt, wurden keine Investitionsbeiträge der öffentlichen Hand berücksichtigt.

4.6.4. Kosten für Betrieb und Unterhalt: Kostenparameter und Annahmen

Folgende Kosten für den Betrieb und Unterhalt wurden für den Kostenvergleich berücksichtigt (wie oben erwähnt wurden für jeden Kostenparameter eine bestmögliche Schätzung sowie ein tiefer und ein hoher Wert definiert, jeweils für die drei Investitionszeitpunkte 2013, 2020 und 2025; die angenommenen Kostenparameter sind im *Anhang 3: Ökonomischen Randbedingungen* im Detail aufgeführt):

- Unterhaltskosten pro Jahr: Durchschnittlich pro Jahr zu erwartende Unterhaltskosten für die beiden Hauptheizsysteme Gastherme und Wärmepumpe sowie die zusätzlich anfallenden Unterhaltskosten für die ergänzenden Systeme (Solarkollektoranlage, PV-Anlage, Wärmepumpenboiler). Wiederum werden die nicht direkt der Brauchwarmwassererwärmung zuzuordnenden Kosten gemäss oben beschriebenen Kostenanteilen angerechnet.
- Erdgas- respektive Stromgrundgebühr: Jährlich anfallende fixe Kosten für die Energieversorgung der Gastherme respektive der Wärmepumpe. Diese nicht direkt der Brauchwarmwassererwärmung zuzuordnenden Kosten werden gemäss oben beschriebenen Kostenanteilen angerechnet.
- Energiekosten für Erdgas respektive Strom zum Betrieb der Gastherme, der Wärmepumpe respektive des Wärmepumpenboilers (nur Anteil der Brauchwassererwärmung).

Für die Berechnung der Energiekosten wurden folgende Preisentwicklungen hinterlegt:

- Erdgas:
 - Erdgas-Preis 2013: 10 Rp./kWh (dieser Ausgangswert wurde nicht variiert).
 - Erdgas-Preisanstieg pro Jahr (real): +1% pa (Standardwert; festgelegt auf Basis der Energieperspektiven des Bundes), 0% (tief), +4% (hoch)
- Strom:
 - Strom-Preis 2013 (ab Netz): 20 Rp./kWh (dieser Ausgangswert wurde nicht variiert).
 - Strom-Preisanstieg pro Jahr (real): +0,5% pa (Standardwert; festgelegt auf Basis der Energieperspektiven des Bundes), 0% (tief), +4% (hoch)

4.6.5. Einbezug Rückspeisevergütung bei Varianten mit PV-Anlage (BS3, BS4)

Folgende Annahmen wurden bezüglich der Stromrückspeisung bei den Varianten mit PV-Anlage gemacht:

- Aufgrund der Simulationsergebnisse zum „Overlap“ für einen Bilanzierungszeitraum von einem Tag (vgl. dazu Kapitel 4.4.6) wurde die Annahme abgeleitet, dass (mindestens) die Hälfte der PV-Stromproduktion (pro Jahr) direkt für die Brauchwarmwassererwärmung eingesetzt werden kann. Der angenommene Eigenverbrauch liegt im Wesentlichen deshalb so hoch, weil die Simulation auf einer

sehr kleinen PV-Anlage (0,75 kWp) beruht. Weiterer Eigenverbrauch durch Haushaltsverbraucher wurde nicht berücksichtigt.

- Durch den angenommenen Eigenverbrauch reduzieren sich die Stromkosten (für Strom ab Netz) für die Brauchwarmwassererwärmung entsprechend.
- Der Rest der PV-Stromproduktion (ca. 50%) wird ins Netz zurückgespielen. Für diese Rückspeisung wurde ein Rückspeisetarif von 10 Rp./kWh (als Standardwert sowie für die Schätzung mit „hohen“ Kosten) respektive 20 Rp./kWh angesetzt (für die Schätzung mit „tiefen“ Kosten; im zweiten Fall spielt die Annahme zum Eigenverbrauch oben keine Rolle mehr, weil eine direkt ab PV-Anlage für die Brauchwassererwärmung verbrauchte kWh zur gleichen Kosteneinsparung führt wie eine ins Netz rückgespielene kWh). Die jährlichen Anstiege der Stromrückspeisetarife (real) wurden analog zur Strompreisentwicklung (vgl. oben) festgelegt.

Wie oben bereits erwähnt, wurden keine öffentlichen Finanzhilfen berücksichtigt. Daher orientieren sich die angenommenen Rückspeisetarife in der bestmöglichen Schätzung nicht an den Tarifen der Kostendeckenden Einspeisevergütung (KEV). Die Höhe der Rückspeisetarife wird in den Schlussfolgerungen im Kapitel 7.2 nochmals aufgegriffen.

4.7. Kennzahlen des ökonomischen Vergleichs

Aus den ökonomischen Analysen wurde eine Kennzahl für den Vergleich der verschiedenen Varianten berechnet. Der Vergleich basiert immer auf dem Preis für das gezapfte Warmwasser in Rp. pro kWh. Die berechneten Gestehungskosten setzen sich aus drei Kostenblöcken zusammen. Diese umfassen die Investitionskosten, die Energie- und die Unterhaltskosten. Diese Kategorien werden aus den unter 4.6 genannten ökonomischen Randbedingungen berechnet.

5. Simulationsergebnisse

5.1. Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf der Systemvarianten

Der Vergleich der verschiedenen Basissysteme und der davon abgeleiteten Varianten (Kapitel 4.2 und 4.4) erfolgt auf Stufe Primärenergiebedarf.

Aus den vier Basissystemen BS1 bis BS4 wurden durch Variation der Ausrichtung der Solarkollektoren in den Systemen mit PV oder ST und der Varianten mit maximalem und ohne Wärmeklau beim Wärmepumpenboiler 13 Varianten gemäss Tabelle 2 generiert. Diese Variantenbezeichnung wird in den folgenden Darstellungen verwendet.

Tabelle 2: Übersicht der verglichenen Basissysteme mit Varianten der Ausrichtung des Solarkollektors

Variantenbezeichnung	Basissystem	Ausrichtung Solarkollektor (Azimut [°] / Neigung [°])
GT	BS 1 (Gastherme)	-, -
ST 1	BS 2 (Solarthermie)	0 / 40 (optimale Ausrichtung)
ST 2	BS 2 (Solarthermie)	0 / 90 (Südfassade)
ST 3	BS 2 (Solarthermie)	90 / 30 (Westdach)
WPB 1	BS 3 (Wärmepumpenboiler)	0 / 30 (optimal Ausrichtung)
WPB 1 mit WK	WPB 1 mit maximalem Wärmeklau	0 / 30 (optimal Ausrichtung)
WPB 2	BS 3 (Wärmepumpenboiler)	0 / 90 (Südfassade)
WPB 2 mit WK	WPB 2 mit maximalem Wärmeklau	0 / 90 (Südfassade)
WPB 3	BS 3 (Wärmepumpenboiler)	90 / 30 (Westdach)
WPB 3 mit WK	WPB 3 mit maximalem Wärmeklau	90 / 30 (Westdach)
LW-WP 1	BS 4 (Luft-Wasser Wärmepumpe)	0 / 30 (optimal Ausrichtung)
LW-WP 2	BS 4 (Luft-Wasser Wärmepumpe)	0 / 90 (Südfassade)
LW-WP 3	BS 4 (Luft-Wasser Wärmepumpe)	90 / 30 (Westdach)

Der jährliche Endenergiebedarf im Betrieb setzt sich für die einzelnen Varianten je nach System aus Erdgas und/oder elektrischer Energie zusammen. In den Grafiken wurde der Endenergieeinsatz mit dem Primärenergiefaktor gewichtet und in Form von Primärenergiebedarf ausgewiesen.

Im Abbildung 10 sind die Varianten aus Tabelle 2 dargestellt. Der Bilanzierungszeitraum entspricht einem Tag, der Betrachtungszeitraum einem Jahr. Daher wurde jeweils über 24 Stunden der Ertrag der PV mit den Bedarf der Wärmepumpe verrechnet. Ein allfälliger Überschuss an PV-Strom im Bilanzierungszeitraum wurde nicht weiter verwendet (Begründung siehe Kapitel 4.4.5). Die Ergebnisse der 365 einzelnen Bilanzierungszeiträume wurden addiert und als Jahresbilanz zusammengefasst.

Um die verschiedenen Varianten direkt vergleichen zu können, wurden die Varianten mit gleicher Kollektorausrichtung gruppiert.

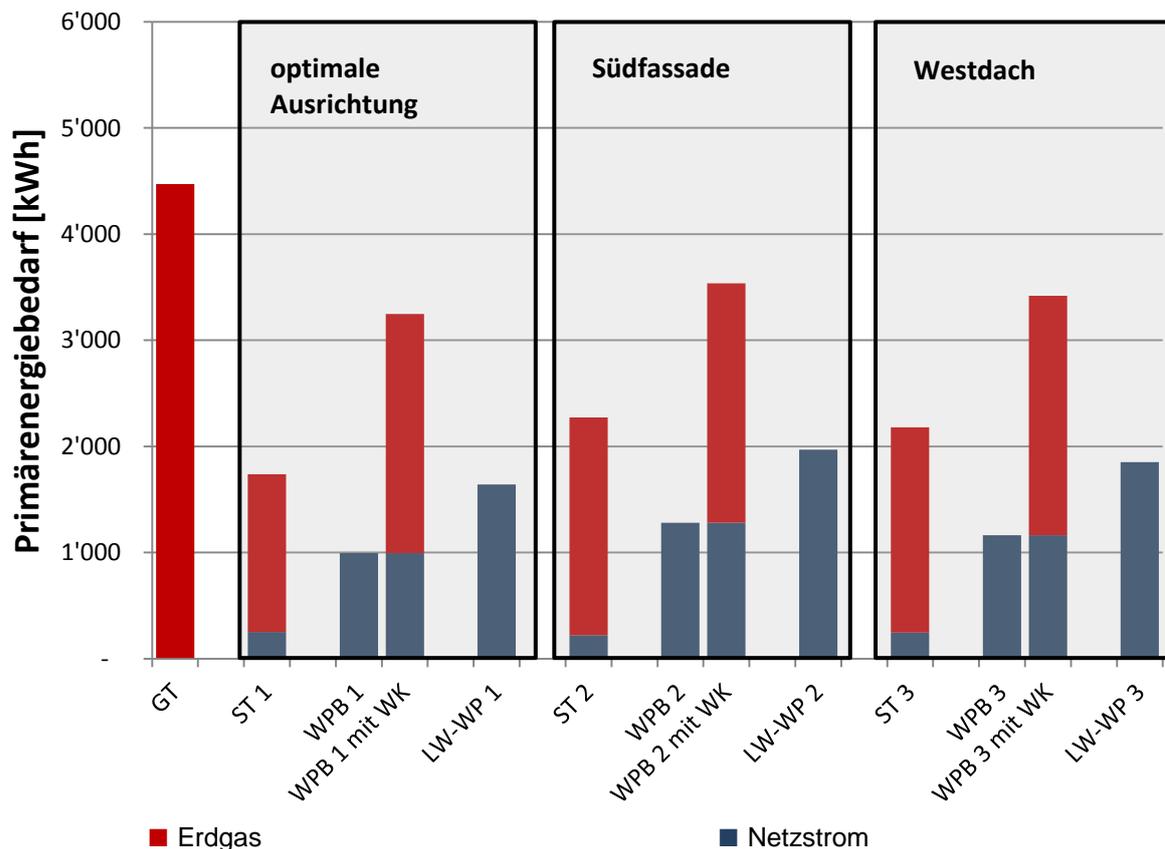


Abbildung 10: Primärenergiebedarf der verschiedenen Varianten bei Speichertemperatur 50°C und Wetterdaten von 2013, Bilanzierungszeitraum 1 Tag, gruppiert nach Kollektorausrichtung.

Aus Abbildung 10 ist ersichtlich, dass die Variante mit rein fossiler Gasfeuerung (GT) mit 4473 kWh klar den höchsten Primärenergiebedarf aufweist. Die Nutzung der Solarenergie führt in allen Varianten zu einer deutlichen Reduktion des Primärenergiebedarfs.

Von den Systemen mit solarem Anteil benötigt der WPB mit 3249 bis 3536 kWh unabhängig von der Kollektorausrichtung am meisten Primärenergie, falls der Wärmeklau zu 100% angerechnet wird und die dafür benötigte Energie aus einer Gastherme stammt. Falls der Wärmeklau nicht berücksichtigt wird, hat das System mit WPB mit 994 bis 1281 kWh den geringsten Primärenergiebedarf aller Systeme.

Die Varianten mit Solarwärme und Gas-Nachheizung benötigen mit 1737 bis 2272 kWh bei allen Kollektorausrichtungen geringfügig mehr Primärenergie als die Varianten mit PV und LW-WP (1640 bis 1976 kWh).

Innerhalb der Basissysteme mit solarem Anteil verändert sich der Primärenergiebedarf in Abhängigkeit der Ausrichtung des Solarkollektors ähnlich. Zwischen der optimalen Ausrichtung und der Variante mit Südfassadenkollektor beträgt der Unterschied im Primärenergiebedarf ca. 20% für die BS2 und BS3 und ca. 20% für das BS4. Der Primärenergiebedarf für die Kollektorausrichtung "Westdach" liegt bei allen Varianten zwischen den Kollektorausrichtungen "optimale" und "Südfassade"

5.2. Einfluss Speichertemperatur

Wird die Speichertemperatur von 50 °C auf 60 °C erhöht (

Abbildung 11), erhöht sich der Primärenergiebedarf des BS3 ohne Wärmeklau um über 40% und derjenige des BS4 um ca. 30%, während beim BS2 der Primärenergiebedarf nur um ca. 10% ansteigt. Dadurch hat das solarthermische System einen etwas geringeren Primärenergiebedarf als das System mit PV und LW-WP.

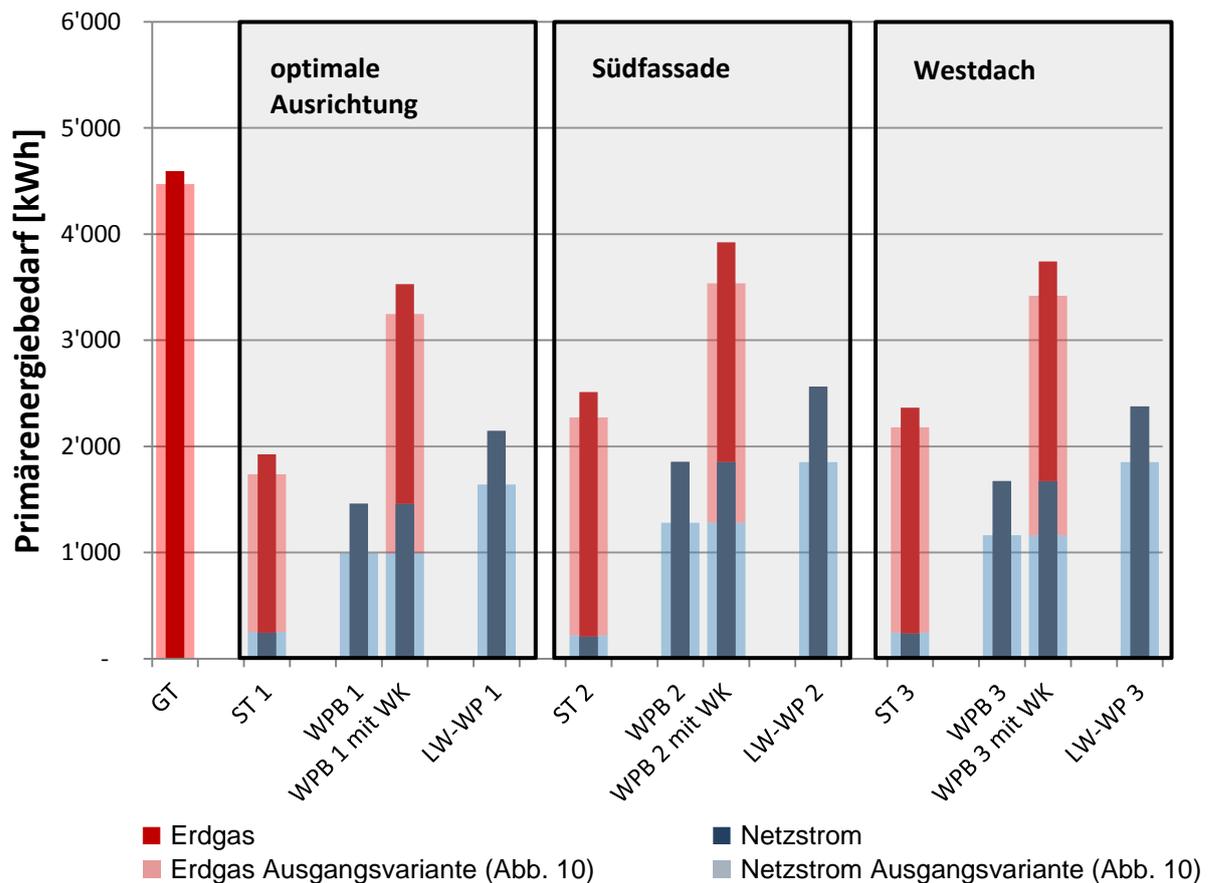


Abbildung 11: Primärenergiebedarf der verschiedenen Varianten bei Speichertemperatur 60 °C und Wetterdaten von 2013, Bilanzierungszeitraum 1 Tag.

5.3. Einfluss Wetterdaten

Die zwei Varianten an Wetterdaten verändern den relativen Vergleich der Systeme nicht. Höhere Einstrahlungswerte in den Wetterdaten von 2013 gegenüber den Modelldaten führen bei allen Systemvarianten zu einer vergleichbaren Reduktion im Primärenergiebedarf um etwa 8 %.

5.4. Einfluss verschiedener Bilanzierungszeiträume

Die Wahl des Bilanzierungszeitraums ist nur für Systeme mit PV und WP relevant. Innerhalb eines Bilanzierungszeitraums wird der von der PV produzierte Strom mit dem von der WP bezogenen Strom verrechnet. Dabei ist es nicht relevant, ob die Produktion von PV-Strom zum exakt gleichen Zeitpunkt wie der Energiebezug der WP erfolgte. Entscheidend ist, dass die Produktion und der Bezug innerhalb des Bilanzierungszeitraums stattfand.

Die Netto-Elektrizitätsbezüge (Verbrauch – Produktion aus PV) innerhalb des Bilanzierungszeitraums werden über den Betrachtungszeitraum von einem Jahr zusammengefasst und als Summe dargestellt.

Wird innerhalb des Bilanzierungszeitraums eine netto-Elektrizitätsproduktion erreicht (Produktion aus PV grösser als Bedarf) so wird dieser Überschuss verworfen und nicht mit netto-Elektrizitätsbezügen aus anderen Bilanzierungszeiträumen verrechnet.

Für den Vergleich der Systeme hat der gewählte Bilanzierungszeitraum einen entscheidenden Einfluss. Da der Overlap (vgl. Kapitel 4.4.5 und 4.4.6) als Mass für den möglichen Solarstrom-Eigenverbrauch für die Berechnung des Primärenergiebedarfs vom

elektrischen Energiebedarf subtrahiert wird, verringert sich der Primärenergiebedarf in den BS3 und BS4 mit zunehmendem Bilanzierungszeitraum. In einem kurzen Bilanzierungszeitraum ist die Wahrscheinlichkeit geringer, dass Ertrag aus PV mit einem im selben Zeitraum stattfindenden Verbrauch verrechnet werden kann. Wird der Bilanzierungszeitraum auf mehrere Tage oder gar ein Jahr ausgedehnt, dann kann die gesamte Stromproduktion aus PV mit dem Jahresstromverbrauch verrechnet werden. In der Folge resultiert damit ein tieferer Primärenergiebedarf.

Ein Bilanzierungszeitraum von einem Jahr ermöglicht es daher, den gesamten im Jahresverlauf produzierten Strom mit dem Bedarf zu verrechnen, da der jährliche Strombedarf die PV-Produktion in den Simulationen noch leicht übersteigt. Eine weitere Ausdehnung des Bilanzierungszeitraums würde somit keine weitere Reduktion des Primärenergiebedarfs bewirken. In Abbildung 12 und Abbildung 13 sind die Simulationsergebnisse analog Abbildung 10 aber mit einem Bilanzierungszeitraum von einer Stunde respektive einem Jahr dargestellt.

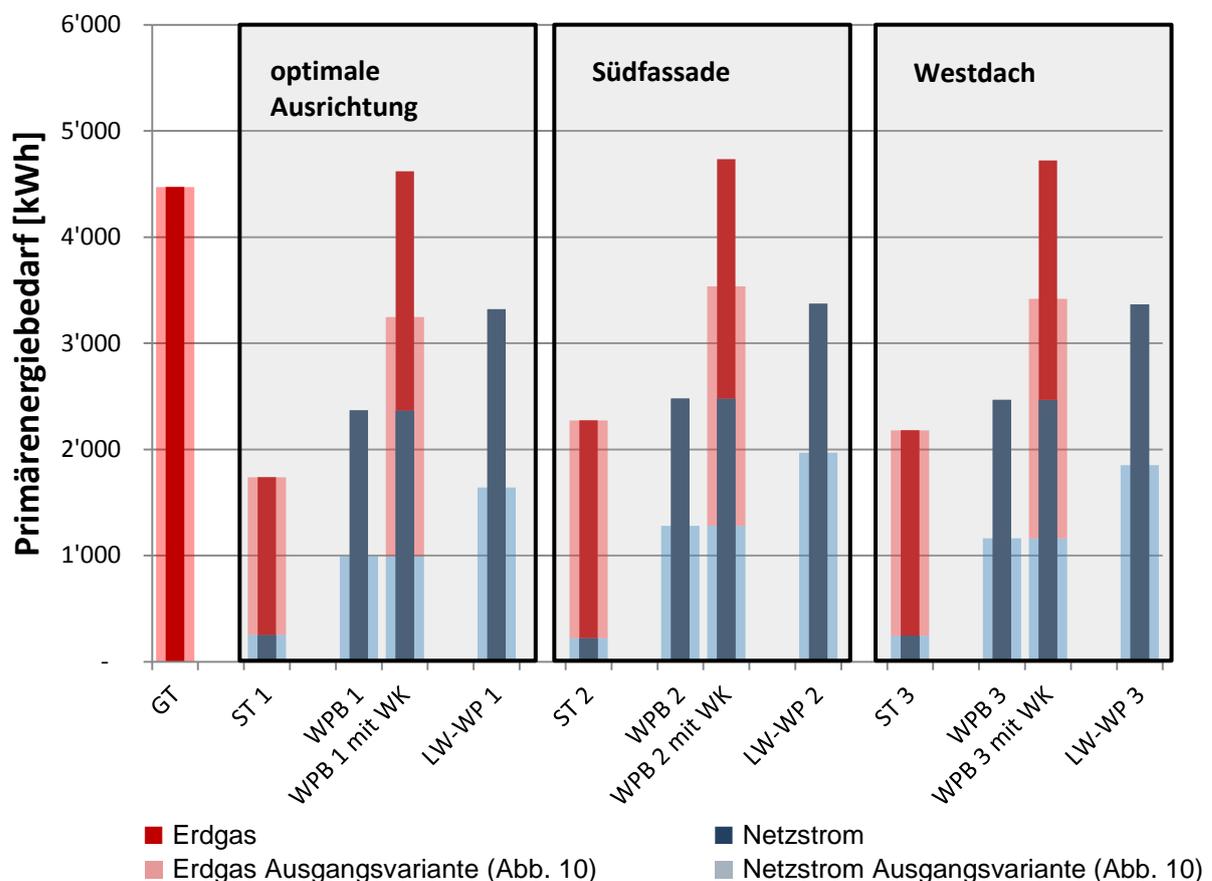


Abbildung 12: Primärenergiebedarf der verschiedenen Varianten bei Speichertemperatur 50 °C und Wetterdaten von 2013, Bilanzierungszeitraum 1 h (1 Tag bei Ausgangsvariante (Abb. 10)).

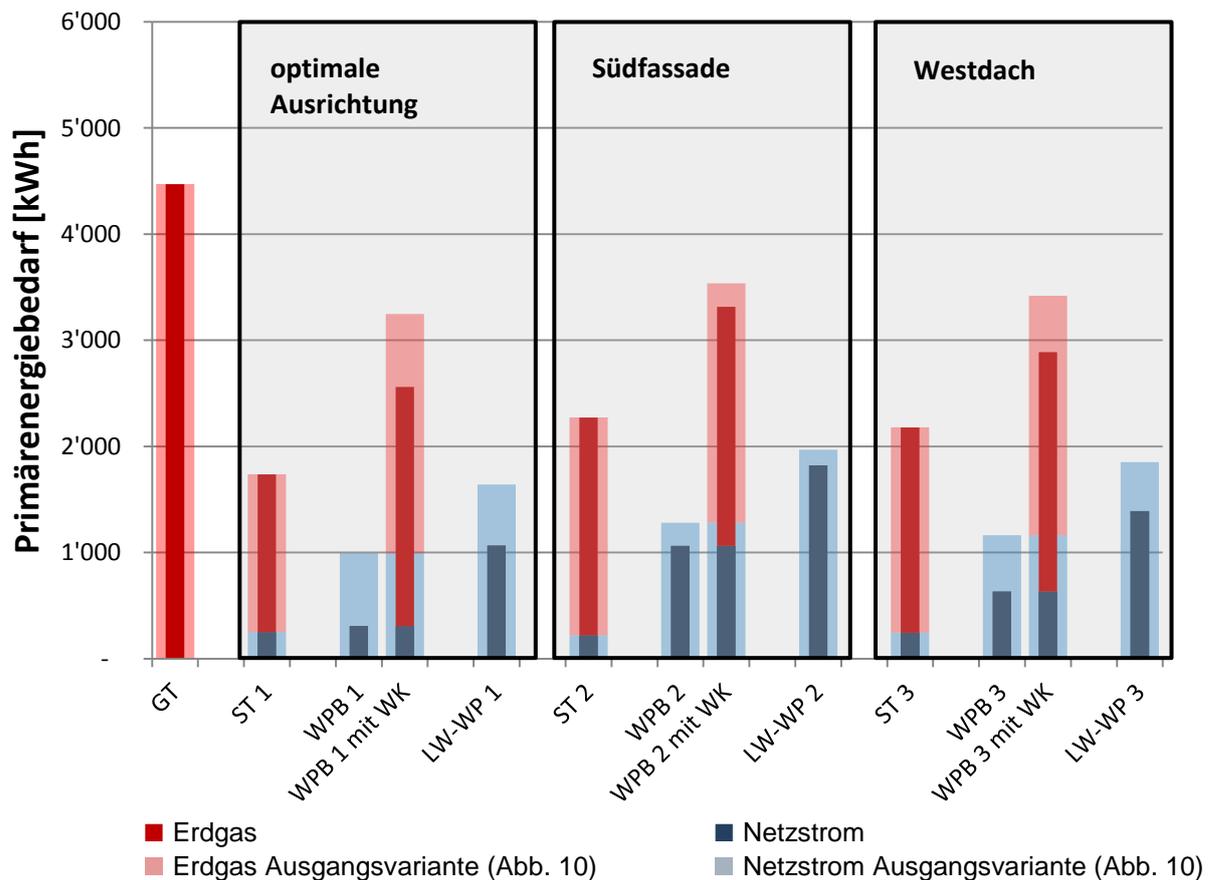


Abbildung 13: Primärenergiebedarf der verschiedenen Varianten bei Speichertemperatur 50 °C und Umweltdaten von 2013, Bilanzierungszeitraum 1 Jahr.

In Abbildung 14 ist ersichtlich, dass sich der Overlap vor allem mit der Erhöhung des Bilanzierungszeitraums von einer Stunde auf einen Tag stark erhöht. Da der Stromverbrauch der WP in allen Varianten übers Jahr gesehen grösser ist als der von der PV-Anlage produzierte Solarstrom, erreicht der Overlap bei einem Bilanzierungszeitraum von einem Jahr immer 100 % des produzierten Solarstroms. Da die Ausrichtung des Solargenerators in den verschiedenen dargestellten Varianten unterschiedlich ist, unterscheidet sich auch der Ertrag der PV-Anlage und der Overlap der verschiedenen Varianten, wie in Abbildung 14 dargestellt.

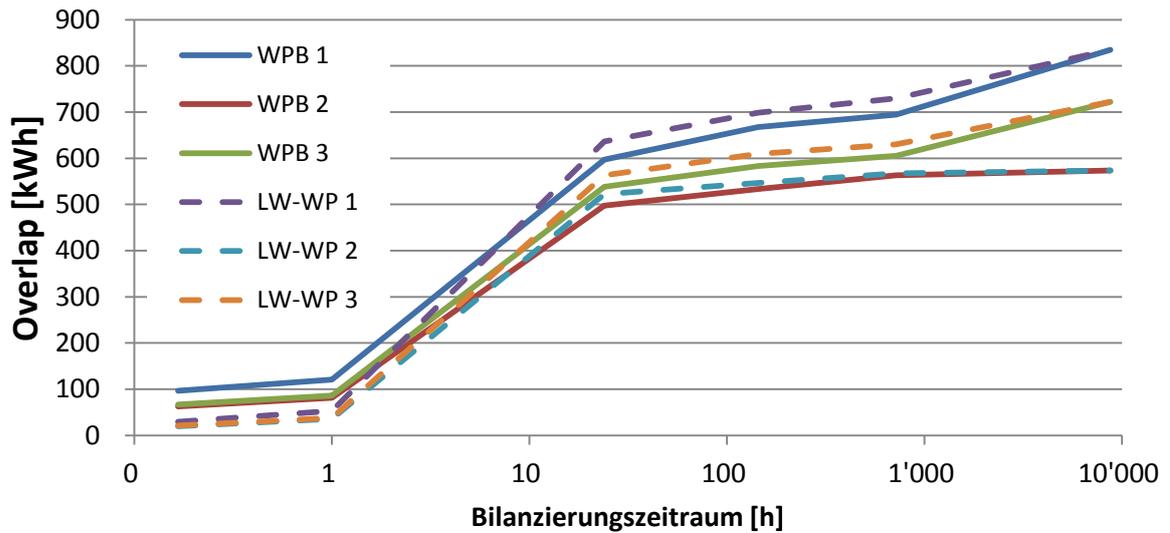


Abbildung 14: Overlap zwischen produzierter und verwendeter el. Energie für unterschiedliche Bilanzierungszeiträume bei Speichertemperatur 50 °C und Umweltdaten von 2013.

Der relative Anteil des Overlaps an der gesamten PV-Produktion ist in *Tabelle 3* für die verschiedenen Varianten mit PV und WP dargestellt.

Tabelle 3: Prozentualer Overlap der verglichenen Basissysteme mit Varianten der Ausrichtung des Solarkollektors

		Overlap in %					
		Varianten					
		WPB 1	LW-WP 1	WPB 2	LW-WP 2	WPB 3	LW-WP 3
Bilanzierungszeitraum	10 Minuten	12%	4%	11%	3%	9%	3%
	1 Stunde	14%	6%	14%	6%	12%	5%
	1 Tag	71%	76%	87%	91%	75%	78%
	6 Tage	80%	84%	93%	95%	81%	84%
	1 Monat	83%	87%	98%	99%	84%	87%
	1 Jahr	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Bei einem Bilanzierungszeitraum von einer Stunde hat das solarthermische System klar den tiefsten Primärenergiebedarf (Abbildung 12). Das System LW-WP hat einen um über 50% höheren Primärenergiebedarf als das System mit ST. Das System WPB hat ohne Wärmeklau einen leicht höheren Bedarf an Primärenergie als die restlichen Solarvarianten, mit maximalem Wärmeklau liegt dieser Bedarf über 100% höher. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Regelung der Wärmepumpe bezüglich deren Einschaltzeiten nicht für den PV-Eigenverbrauch optimiert gerechnet wurde.

Bei einem Bilanzierungszeitraum von einem Jahr liegt der Primärenergiebedarf des Systems mit LW-WP über 50% tiefer als beim System mit Solarthermie. Das System BS3 hat ohne Berücksichtigung des Wärmeklaus einen über 5-mal tieferen Primärenergiebedarf als das System mit Solarthermie. Mit maximalem Wärmeklau hat das System mit WPB auch bei

einem Bilanzierungszeitraum von einem Jahr immer noch einen deutlichen energetischen Nachteil gegenüber dem System mit Solarthermie.

5.5. Einfluss Wärmeklau

Der Wärmeklau ist die entscheidende Grösse für die Beurteilung der Varianten mit Wärmepumpenboiler. Bei jedem Bilanzierungszeitraum entscheidet der Wärmeklau darüber, ob das System mit WPB den höchsten oder tiefsten Primärenergiebedarf aller solaren Systeme aufweist.

Für die Auswertung der Simulationen wurde angenommen, dass die dem Raum entzogene Wärme mit einer Gastherme bereitgestellt wird. An Stelle von Gas ist aber auch eine Wärmepumpe denkbar, die die für den Wärmeklau benötigte Energie zur Verfügung stellt. Dabei ist die gewählte Jahresarbeitszahl dieser WP entscheidend. Abbildung 15 zeigt den Einfluss der JAZ dieser Heizungswärmepumpe auf den Primärenergiebedarf.

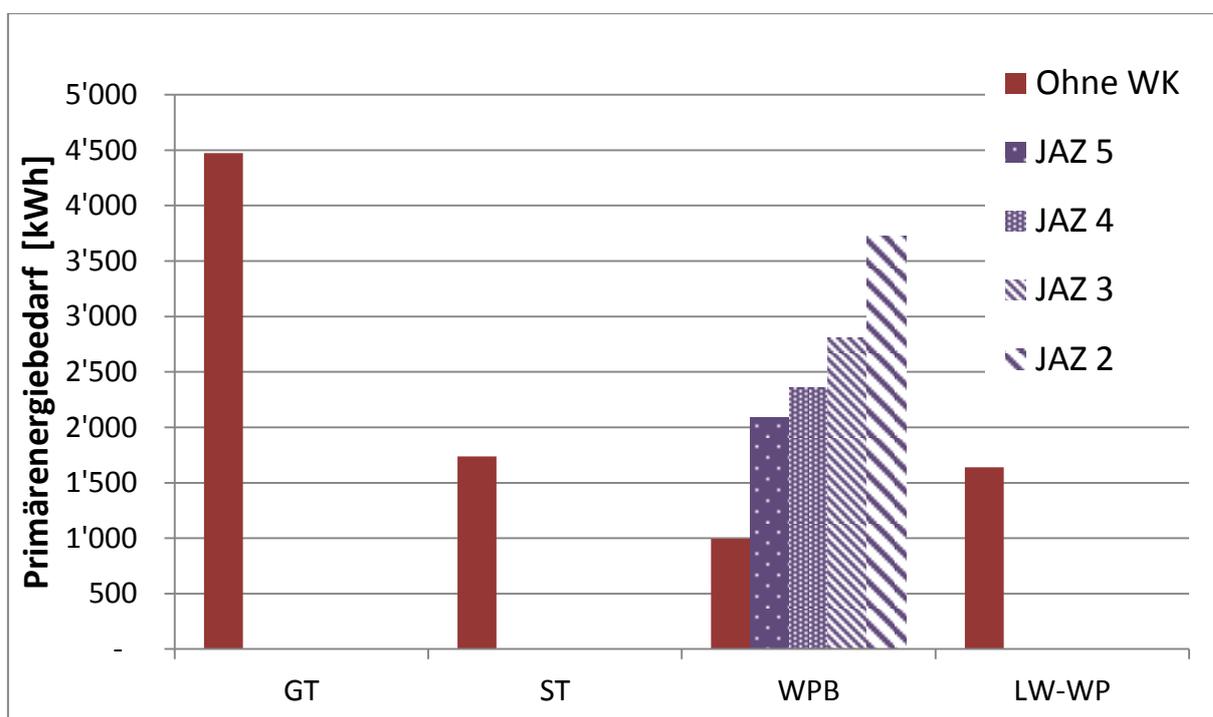


Abbildung 15: Primärenergiebedarf der verschiedenen Basissysteme in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe für Raumwärme bei Wärmeklau. Optimale Kollektorausrichtung bei Speichertemperatur 50 °C und Wetterdaten von 2013, Bilanzierungszeitraum 1 Tag.

In Abbildung 15 ist ersichtlich, dass die WP für den Wärmeklau eine JAZ von über 5 benötigt, um einen mit dem solarthermischen System vergleichbaren Primärenergiebedarf zu erreichen, bei einer 100%igen Anrechnung des Wärmeklaus.

5.6. Flächeneffizienz

Die unter Kapitel 5.1 verglichenen Systemvarianten wurden mit einer einheitlichen Fläche von 5 m² berechnet. Bei Solarthermie entspricht dies der Bruttokollektorfläche und bei Photovoltaik der Modulfläche. Mit einem Modulwirkungsgrad von 15% entspricht dies einer PV-Leistung von 0.75 kWp.

Unter Verwendung der besten heute auf dem Markt verfügbaren Technologie der Firma Sunpower (X21-serie) könnte der PV-Ertrag auf der gleichen Fläche um über 40% gesteigert werden. Eine Vergleichsrechnung mit einem Warmwasser-Solarwärmesystem in welchem der hier verwendete Kollektor ersetzt wurde durch einen Vakuum-Flachkollektor der Firma

TVP Solar (Typ MT-Power v3.11) zeigte eine Steigerung der Brennstoffeinsparungen von 31 % gegenüber dem Standard-Kollektor welcher in diesem Bericht zu Grunde gelegt wurde.

5.7. Variation der Leistung des WP-Boilers

Die elektrisch bezogene Leistung des WP-Boilers in BS3 wurde in den durchgeführten Simulationen zwischen 200 und 1300 W variiert. Durch eine Veränderung dieser Leistung kann das Resultat des Overlap bei Betrachtung kürzerer Zeiträume beeinflusst werden. Eine Reduktion der elektrischen Leistung des WP-Boilers bewirkt eine Erhöhung des Overlap, falls die elektrische Leistung der PV-Anlage kleiner ist als die Bezugsleistung der WP.

Auch mit tieferer Leistung muss in der Simulation die produzierte Energie in Form von Warmwasser beibehalten werden, was deutlich längere Laufzeiten des WP-Boilers bewirkte. Dadurch ergibt sich eine bessere Übereinstimmung zwischen produziertem Strom aus PV und im WPB verbrauchten Strom.

Die Variation der elektrischen Leistung des WPB hat nur Einfluss auf kurze Bilanzierungszeiträume (<1 Tag). Bei Bilanzierungszeiträumen von einem Tag oder mehr bewirkt eine Änderung der WP-Leistung keine Veränderung im Overlap, da im Verlauf von 24 Stunden in der Regel ein Aufheizvorgang stattfindet und der im Tagesverlauf produzierte Strom aus PV damit verrechnet werden kann.

Abbildung 16 zeigt den Verlauf des Overlap in kWh bei unterschiedlichen Leistungen der WP des WPB und einem Bilanzierungszeitraum von einer Stunde. Die kleinste WP-Leistung hat einen um ca. 100% höheren Overlap als die grösste WP-Leistung. Dass der Overlap mit sinkender WP-Leistung nicht stetig zunimmt, liegt im Zusammenspiel des Zapfprofils mit dem BWW-Speicher. Bei einer elektrischen Leistung des WPB von ca. 600 W liegen die Betriebszeiten zufällig oft in der Nacht, wo auf Grund fehlender PV-Produktion kein Overlap möglich ist.

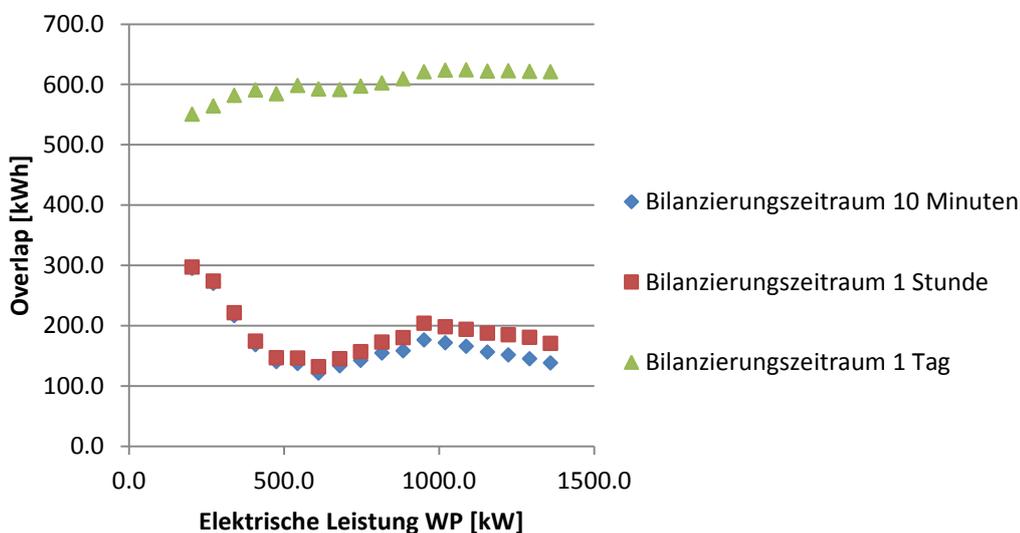


Abbildung 16: Overlap in kWh bei unterschiedlichen Leistungen der WP und unterschiedlichen Bilanzierungszeiträumen. Optimale Kollektorausrichtung bei Speichertemperatur 60 °C und Wetterdaten von 2013.

Durch eine kleinere Dimensionierung der WP verändert sich das Resultat aus Kapitel 5.4. Der Overlap wird im BS 3 bei Speichertemperaturen von 60 °C, einem Bilanzierungszeitraum von 1 h und optimaler Ausrichtung von 171 kWh auf 297 kWh erhöht. Der Primärenergieeinsatz wird somit in dieser Variante um 13% reduziert.

Es zeigt sich, dass alleine mit der Reduktion der Leistungsaufnahme der WP im WPB der Primärenergiebedarf reduziert werden kann. Der Overlap des WPB mit tiefster Leistung bei

einem Bilanzierungszeitraum von 1 h beträgt gemäss Abbildung 16 ca. 50% des Overlaps des gleichen WPB's bei einem Bilanzierungszeitraum von 1 Tag. Die Annahme, dass ein Bilanzierungszeitraum von 1 Tag aussagekräftige Vergleiche ermöglicht wird durch diese Zahlen gestützt.

5.8. Auswirkungen auf den Primärenergieeinsatz durch den Einsatz von Elektro-Heizstäben in ST-Systemen.

In den Simulationen wurde davon ausgegangen, dass kein Elektro-Heizstab eingebaut wird, da das Nachheizen des Speichers durch eine Gasheizung übernommen wird. Dies entspricht einer Installation nach dem Stand der Technik.

Da heute auch Systeme installiert werden, die zur Nachheizung nur einen Elektro-Heizstab oder einen Gaskessel für den Winter und einen Elektro-Einsatz für den Sommer verwenden, erscheint eine kurze Betrachtung dieser Systeme angebracht.

Im Projekt konnten nicht alle potenziell interessanten Varianten vollständig simuliert werden. Einige Varianten wurden daher über eine Nachbearbeitung der berechneten Simulationsergebnissen weiter untersucht. So wurden die Untersuchungen zum Einsatz von Elektro-Heizstäben im Postprocessing durchgeführt.

Für die Berechnung des Primärenergiebedarfs wurden zwei Varianten untersucht:

1. Vollständiges Nachheizen mit Elektro-Heizstab:
Es wurde angenommen, dass in der BS2 sämtliche Nachheizvorgänge mit einem Elektro-Heizstab an Stelle einer Gastherme erfolgten.
2. Nachheizen mit Elektro-Heizstab nur in den Sommermonaten:
Es wurde angenommen, dass in der BS2 sämtliche Nachheizvorgänge zwischen dem 15. Mai und dem 15. September mit einem Elektro-Heizstab an Stelle einer Gastherme erfolgten.

In Abbildung 17 ist der Primärenergiebedarf der verschiedenen Systeme dargestellt, mit der Annahme dass beim System mit Solarthermie das Nachheizen vollständig mit einem Elektro-Heizstab erfolgte.

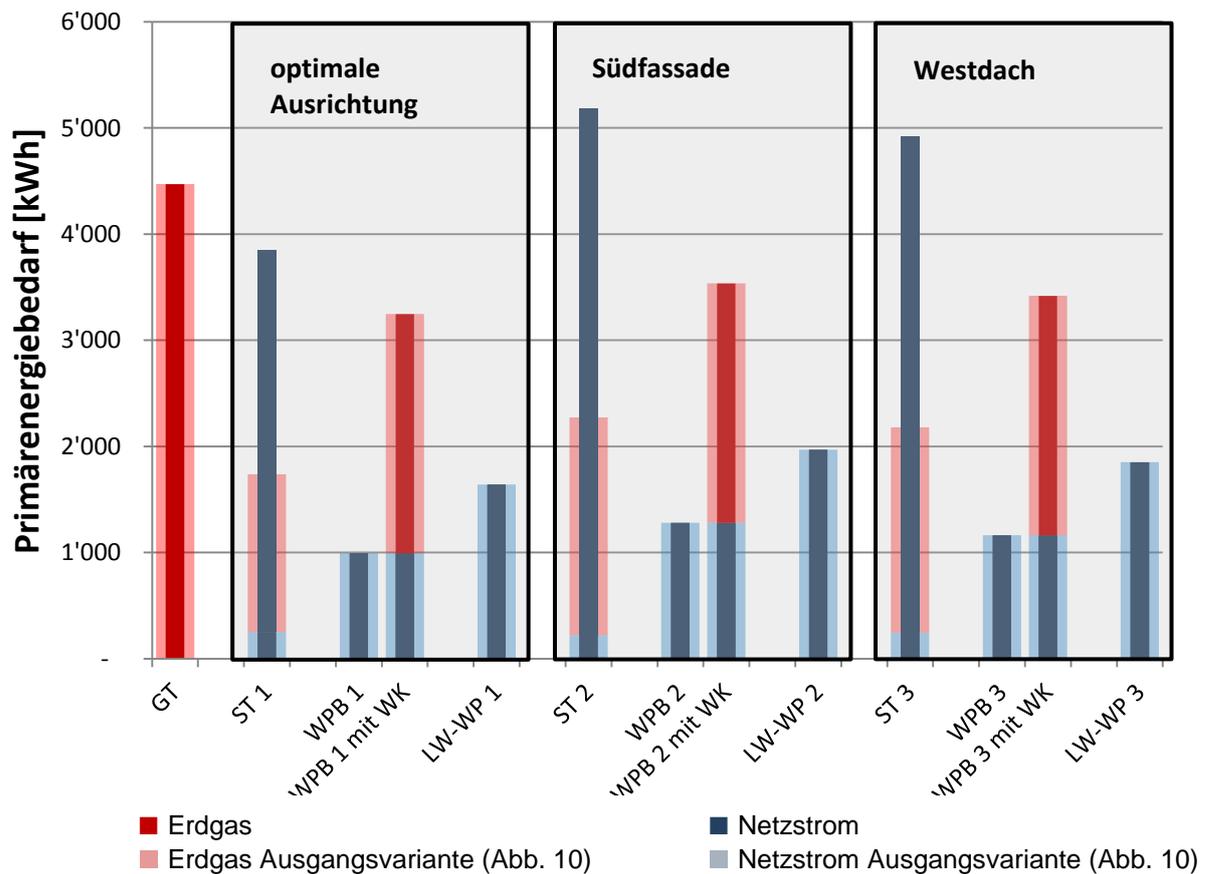


Abbildung 17: Primärenergiebedarf der verschiedenen Varianten bei Verwendung eines Elektro-Heizstabes zur Nachheizung beim ST-System. Speichertemperatur 50 °C, Wetterdaten von 2013, Bilanzierungszeitraum 1 Tag, gruppiert nach Kollektorausrichtung.

In ST-Systemen mit optimaler Ausrichtung, die an Stelle einer Gasheizung für die Nachheizung des Speichers einen Elektro-einsatz verwenden, liegt der Primärenergieeinsatz bei einem Bilanzierungszeitraum von einem Tag um ca. 20% höher als beim System mit WPB und maximalem Wärmeklau und um ca. 100% höher als das System mit LW-WP. Bei einer Platzierung der Kollektoren an der Südfassade oder auf dem Westdach ist diese Differenz noch grösser. Der Primärenergiebedarf in System mit ST übersteigt dort sogar den Primärenergiebedarf der Brauchwarmwassererwärmung mit einer Gastherme.

In Abbildung 18 ist der Primärenergiebedarf der verschiedenen Systeme dargestellt, mit der Annahme dass beim System mit Solarthermie das Nachheizen in den Sommermonaten zwischen dem 15. Mai und dem 15. September vollständig mit einem Elektro-Heizstab erfolgte. In der übrigen Zeit erfolgte die Nachheizung mit einer Gastherme.

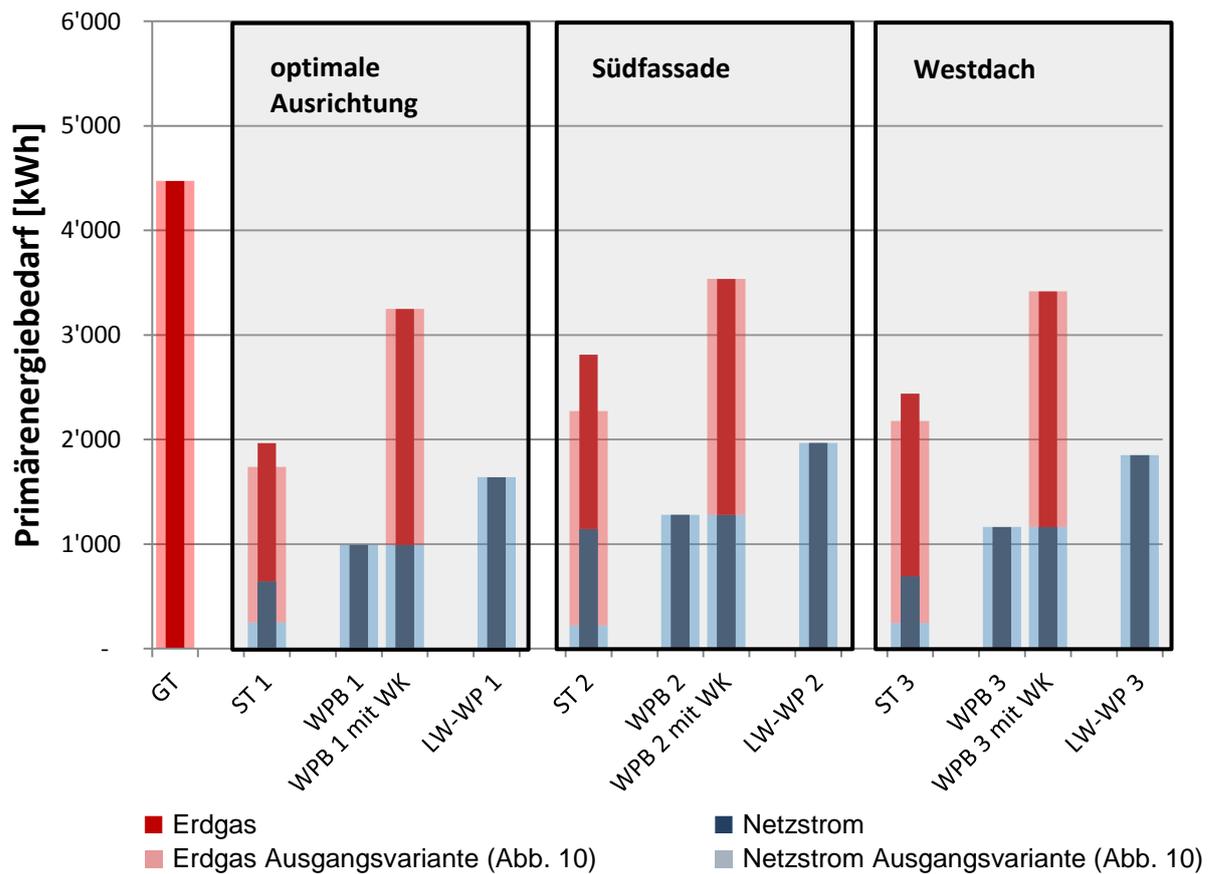


Abbildung 18: Primärenergiebedarf der verschiedenen Varianten bei Verwendung eines Elektro-Heizstabes zur Nachheizung zwischen 15. Mai und 15. September beim ST-System. Speichertemperatur 50 °C, Wetterdaten von 2013, Bilanzierungszeitraum 1 Tag, gruppiert nach Kollektorausrichtung.

Wird der Elektro-Einsatz nur ausserhalb der Heizperiode benötigt, werden bei ST-Systemen mit optimaler Ausrichtung und 50 °C Speichertemperatur 136 kWh Warmwasser mit Strom bereitgestellt. Bei ST-Systemen mit Südfassaden-Kollektor werden 320 kWh mit Strom bereitgestellt. Beim optimal ausgerichtetem ST-System wird der Primärenergiebedarf dadurch um 13% erhöht. Beim ST-System mit Südfassaden-Kollektor wird der Primärenergiebedarf um 24% erhöht. Der Einsatz des Elektro-Heizstabes in den Sommermonaten verändert die Reihenfolge in Bezug auf den Primärenergieeinsatz der betrachteten Varianten jedoch nicht.

6. Ökonomische Betrachtung

6.1. Auswahl der dargestellten Varianten

Der ökonomische Vergleich der Systemvarianten wurde auf Basis der Gestehungskosten für gezapftes Warmwasser durchgeführt.

Aus den in Kapitel 4.6 erwähnten Randbedingungen wurde nur eine ausgewählte Anzahl von Systemvarianten berechnet. Die Anzahl der berechneten Fälle wurde zu Gunsten von Übersichtlichkeit und Berechnungsaufwand so reduziert, dass nach Auffassung der Autoren die wesentlichen Erkenntnisse dargestellt werden können. Dargestellt sind pro Systemvariante jeweils die Gestehungskosten, wie sie sich auf Basis von bestmöglichen Schätzungen sowie dem Vorgehen gemäss Kapitel 4.6 ergeben. Ausserdem wird mit einem hohen resp. tiefen Kostenwert ein Kostenbereich aufgezeigt. Damit diese Kostenbereiche nicht so gross werden, dass sie kaum mehr Aussagekraft haben, wurde für die dargestellten Auswertungsergebnisse wie folgt vorgegangen:

- Für alle drei Kostenwerte (bestmögliche Schätzung, tief, hoch) wurden die gemeinsamen Rahmenbedingungen bezüglich Energiepreisentwicklungen (Erdgas, Strom) sowie angenommenem Zins nicht variiert.
- Variiert wurden hingegen die Annahmen zu den Investitions- und den Unterhaltskosten, die je nach Projekt (z.B. regionale Unterschiede) unterschiedlich sein können. Ebenfalls variiert wurden die Ausrichtung der Solarkollektor- resp. der PV-Anlage sowie der Rückspeisetarif, den das Energieversorgungsunternehmen für die Rückspeisung von PV-Strom in das Netz gewährt. Die angenommenen Werte für die variierten Parameter sind im *Anhang 3: Ökonomischen Randbedingungen* im Detail aufgeführt.
Der verwendete Einspeisetarif und die Investitionskosten für die PV-Anlage werden zusätzlich in Kapitel 7.2 diskutiert.

6.2. Kosten für Brauchwarmwasser bei Gebäuden mit unterschiedlichen energetischen Standards

Bei allen Systemvarianten (ausser BS3 ohne Wärmeklau) muss neben den Kosten der Haustechnik für die Bereitstellung von BWW auch ein Anteil der Kosten für die Nachheizung durch das Hauptheizsystem angerechnet werden. Je nach Qualität der Gebäudehülle resp. dem Heizwärmebedarf des Gebäudes variiert dieser Anteil, da die Kosten entsprechend der benötigten Heizenergie für Raumwärme und BWW aufgeteilt werden. Der Anteil der Kosten für die Nachheizung liegt umso höher, je tiefer der Bedarf für Raumwärme im Vergleich zur Nachheizung des BWW-Systems ausfällt. Die angerechneten Kostenanteile des Hauptheizsystems sind im Kapitel 4.6 aufgeführt und im Detail erläutert.

In Abbildung 19 bis Abbildung 21 sind die Gestehungskosten für BWW in Gebäuden mit unterschiedlichem energetischem Standard dargestellt.

Kosten in Rp. pro kWh gezapftem Warmwasser (Gebäudehülle: Gesamtanierung gemäss MuKE n 2008)

Parameter fix: Investitionszeitpunkt 2013 / Kostenanteil WW 20% / Erdgaspreisanstieg +1%pa / Strompreisanstieg +0.5%pa / Zins 2.5%

Parameter variiert (low / buest guess / high): Investitionskosten, Unterhaltskosten, Stromruckspeisetarif, Ausrichtung PV/Soko

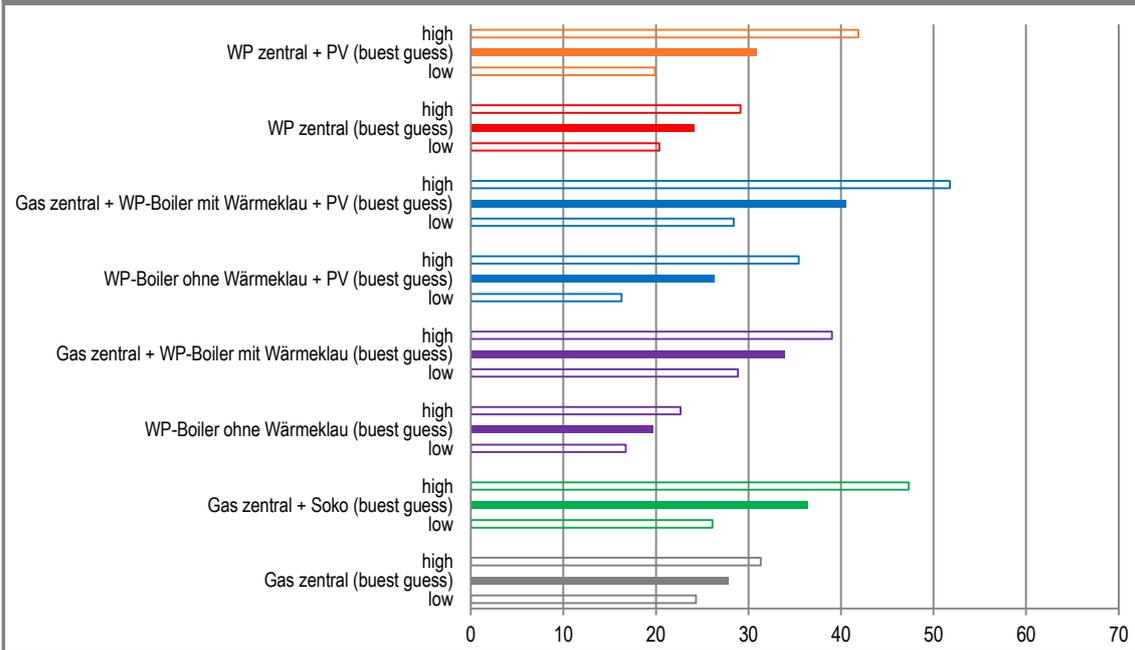


Abbildung 19: Gestehungskosten für Warmwasser (Einfamilienhaus, rund 200 m², saniert gemäss Anforderung MuKE n 2008, Energiebedarf für Raumwärme und Warmwasser rund 75 kWh/m², Anteil Energiebedarf für Warmwasser rund 20%).

Kosten in Rp. pro kWh gezapftem Warmwasser (Gebäudehülle: EFH-Bestandsbau)

Parameter fix: Investitionszeitpunkt 2013 / Kostenanteil WW 10% / Erdgaspreisanstieg +1%pa / Strompreisanstieg +0.5%pa / Zins 2.5%

Parameter variiert (low / buest guess / high): Investitionskosten, Unterhaltskosten, Stromruckspeisetarif, Ausrichtung PV/Soko

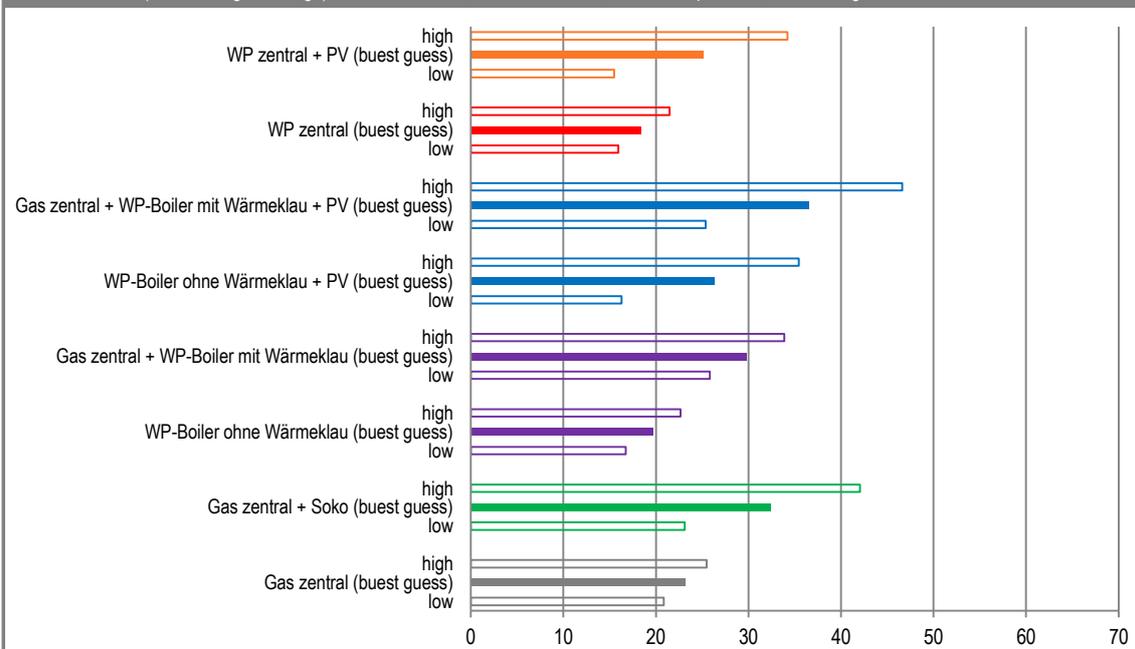


Abbildung 20: Gestehungskosten für Warmwasser (Einfamilienhaus Bestandsbau, rund 200 m², Energiebedarf für Raumwärme und Warmwasser rund 150 kWh/m², Anteil Energiebedarf für Warmwasser rund 10%).

Kosten in Rp. pro kWh gezapftem Warmwasser (Gebäudehülle: Passivhaus-Niveau)

Parameter fix: Investitionszeitpunkt 2013 / Kostenanteil WW 50% / Erdgaspreisanstieg +1%pa / Strompreisanstieg +0.5%pa / Zins 2.5%

Parameter variiert (low / buest guess / high): Investitionskosten, Unterhaltskosten, Stromrückspesetarif, Ausrichtung PV/Soko

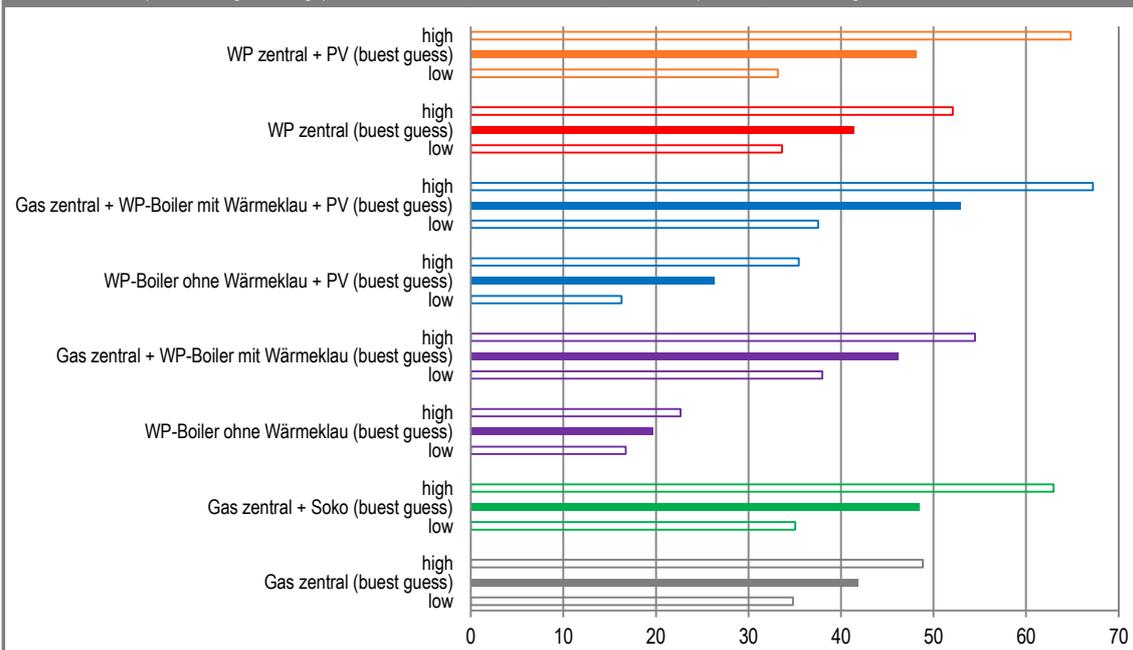


Abbildung 21: Gestehungskosten für Warmwasser (Einfamilien-Passivhaus, rund 200 m², Energiebedarf für Raumwärme und Warmwasser rund 30 kWh/m², Anteil Energiebedarf für Warmwasser rund 50%).

Unter Berücksichtigung der resultierenden Kostenbereiche ist der Unterschied der verglichenen Systeme aus heutiger Sicht (2014) grundsätzlich eher gering. Ein unter günstigen Bedingungen realisiertes System mit Solarnutzung weist ähnliche oder tiefere Kosten auf als das Referenzsystem im Standardfall.

Gemäss Ergebnis der bestmöglichen Schätzung („buest guess“) zeigt Abbildung 19, dass bei einem nach MuKE n 2008 gesamt sanierten Gebäude die Systeme BS2 und BS4 mit Solarnutzung (Gas+ST 36 Rp./kWh gezapft; WP+PV 31 Rp./kWh gezapft) aus heutiger Sicht teurer sind als ohne Solarnutzung (Gas ohne ST: 28 Rp./kWh gezapft; WP ohne PV: 24 Rp./kWh gezapft). Dies gilt auch für die berechneten Fälle mit höherer respektive tieferer Gebäudehüllenqualität, wie Abbildung 20 und Abbildung 23 zeigen (zur Variante LW-WP+PV in einem schlecht gedämmten Gebäude ist anzumerken, dass die Leistung der Wärmepumpe tendenziell zu gross wäre, um damit einen WW-Boiler zu beladen und das System damit technisch weniger sinnvoll ist).

Das Basissystem 3 (WPB+PV) ohne Wärmeklau liefert von allen Systemen mit solarem Anteil das günstigste BWB. Dies ist dadurch begründet, dass bei einem System ohne Wärmeklau keine Kosten eines zusätzlichen Wärmeerzeugers angerechnet werden. Es muss für das Raumheizungssystem keine zusätzliche Fremdenergie zugekauft werden und entsprechend ist auch keine Beteiligung an der Investition für dieses System notwendig. Die Varianten mit WPB ohne Wärmeklau ist daher nur dann mit den anderen Systemen zu vergleichen, wenn effektiv kein Wärmeklau stattfindet. Diese Situation ist nur in Ausnahmefällen gegeben, wenn grosse, nicht anderweitig nutzbare Abwärmemengen zur Verfügung stehen.

Bei Systemen mit Solarnutzung verändern sich die Kosten bei hohen resp. tiefen Kostenniveaus relativ zur Grundvariante stärker (um rund $\pm 30\%$) als bei Systemen ohne Solarnutzung (rund $\pm 10\%$ bis $\pm 20\%$). Hauptgrund ist, dass mit der Solaranlage ein weiterer variierter Kostenfaktor einbezogen wird, bei dem die angenommene Streubreite zusätzlich noch höher liegt als bei herkömmlichen Systemen. Letzteres liegt unter anderem daran, dass die Solarnutzung im Vergleich zum Referenzsystem noch in einer frühen Phase der Marktverbreitung steht.

6.3. Kostenstruktur für die Erzeugung von Brauchwarmwasser

Abbildung 22 zeigt die Gestehungskosten für den Fall eines nach MuKE n 2008 sanierten EFH, aufgegliedert in die Investitionskosten, die Energiekosten sowie die sonstigen Betriebskosten (Unterhalt, Grundgebühr Erdgas/Strom). Beim Referenzsystem (BS1, Gastherme) machen die Energiekosten an den Gesamtkosten über die Hälfte aus (56% gemäss bestmöglicher Schätzung). Bei den Systemen mit Solarnutzung liegt dieser Anteil wesentlich tiefer (Gas+ST: 14%; WPB+PV ohne Wärmeklau: 12%; WPB+PV mit maximalem Wärmeklau: 23%; WP+PV: 13%). Grundsätzlich werden bei diesen Systemen die Gestehungskosten v.a. durch die Investitionskosten bestimmt, die bei den Varianten Gas+ST sowie WP+PV gemäss bestmöglicher Schätzung rund 70% der Gestehungskosten ausmachen. Entsprechend wird der in der Abbildung 22 dargestellte Kostenbereich bei den Systemen mit Solarnutzung v.a. durch die variierten Investitionskosten für die Solaranlage (Solarkollektor oder PV) resp. das Hauptheizsystem (Gastherme oder WP) verursacht. Die Variation der Ausrichtung der Solaranlage sowie des Rückspeisetarifs für ins Netz rückgespeiseten PV-Strom hat hingegen geringeren Einfluss.

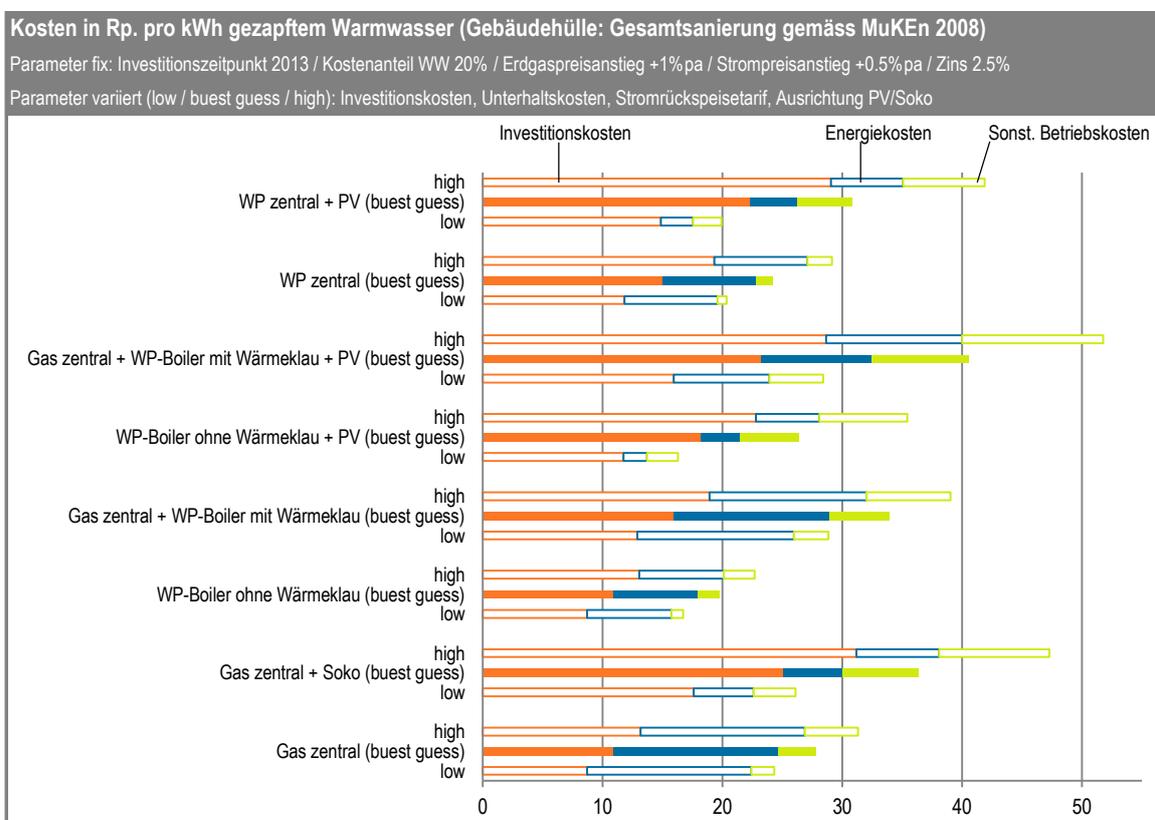


Abbildung 22: Gestehungskosten für Warmwasser (Einfamilienhaus, rund 200 m², saniert gemäss Anforderung MuKE n 2008, Energiebedarf für Raumwärme und Warmwasser rund 75 kWh/m², Anteil Energiebedarf für Warmwasser rund 20%)

6.4. Kostenentwicklung bis ins Jahr 2025

Die Prognose der Kostenentwicklung bis 2025 zeigt für alle Technologien ausser der Gastherme sinkende Kosten. Die Gestehungskosten sinken zwischen 2013 und 2025 für Systeme mit solarem Anteil um ca. 20%. Einer Kostenreduktion bei der ST und PV steht eine Kostensteigerung beim Gas und Strom gegenüber. Abbildung 23 zeigt die berechneten Gestehungskosten für verschiedene Varianten und im Zeitverlauf im Detail.

In Anbetracht der grossen Kostenbereiche kann auch langfristig (2025) nicht von einem eindeutigen und klaren Kostenunterschied zwischen den einzelnen Solarvariantenausgegangen werden. Die Unsicherheit zur zukünftigen Entwicklung der Kosten ist bei allen betrachteten Technologien erheblich.

Kosten in Rp. pro kWh gezapftem Warmwasser (Gebäudehülle: Gesamtanierung MuKE 2008)

Parameter fix: Kostenanteil WW 20% / Erdgaspreisanstieg +1%pa / Strompreisanstieg +0.5%pa / Zins 2.5%

Parameter variiert: Investitionszeitpunkt, Investitionskosten, Unterhaltskosten, Stromrückspeisetarif, Ausrichtung PV/Soko

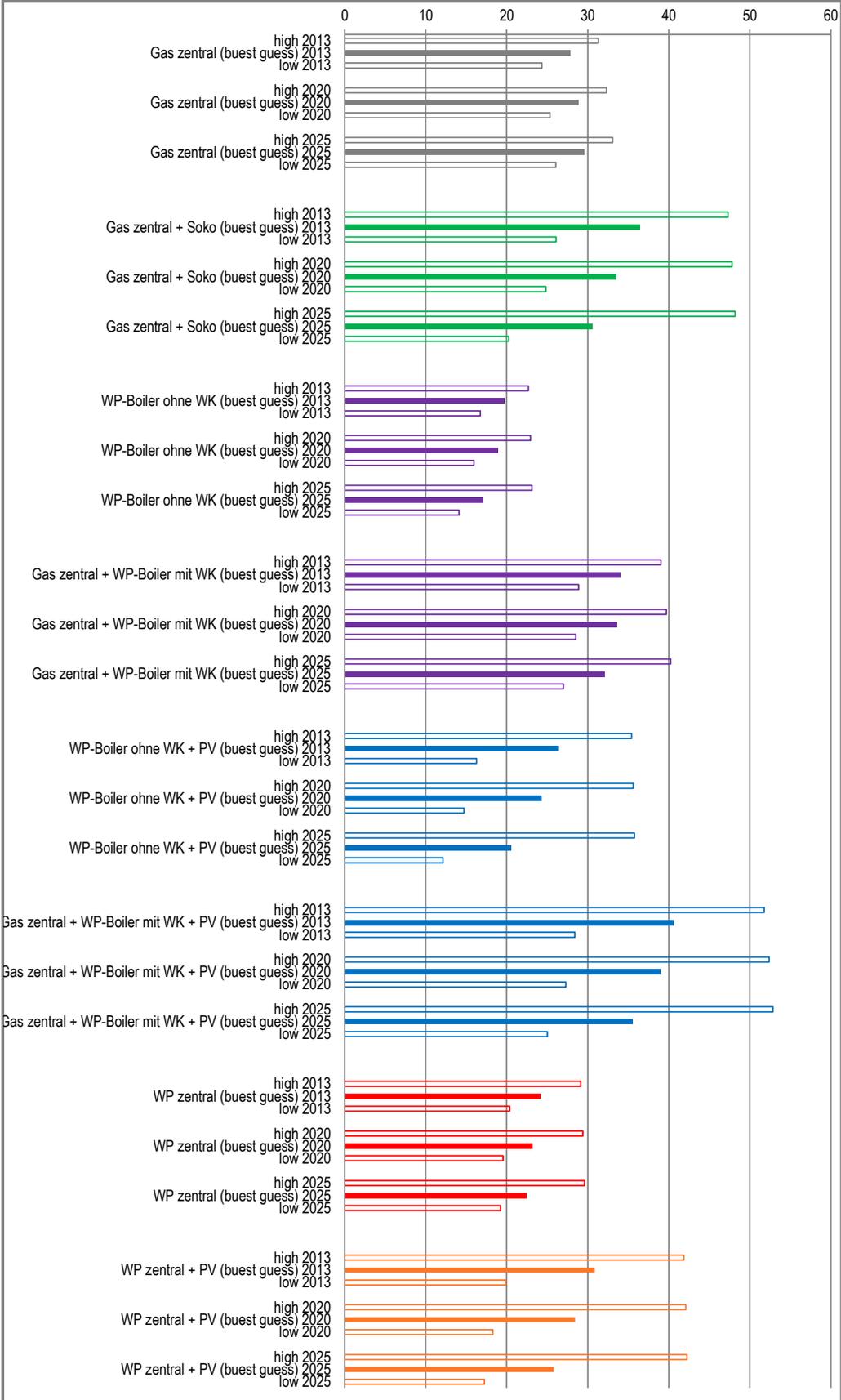


Abbildung 23: Gestehungskosten für Warmwasser in Abhängigkeit des Investitionszeitpunkts (Einfamilienhaus, rund 200 m², saniert gemäss Anforderung MuKE 2008, Energiebedarf für Raumwärme und Warmwasser rund 75 kWh/m², Anteil Energiebedarf für Warmwasser rund 20%).

7. Schlussfolgerung

7.1. Energetische Betrachtung

Der Vergleich auf Basis Primärenergiebedarf ist stark abhängig vom gewählten Bilanzierungszeitraum und den Primärenergiefaktoren. Es stellt sich daher die Frage nach dem "aussagekräftigsten" Bilanzierungszeitraum. Die Autoren der Studie sind der Ansicht, dass eine Betrachtung auf Tagesbasis (24h) die sinnvollste Vergleichsbasis darstellt. Dies aus den folgenden Überlegungen:

- Diese Bilanzierung verhindert eine Verschiebung von PV-Erträgen von Schön- zu Schlechtwetterperioden oder gar vom Sommer in den Winter. Diese Verschiebung ist erst zulässig, wenn entsprechende Speichertechnologien für Strom zur Verfügung stehen und in den Kosten mit berücksichtigt werden.
- Es ist davon auszugehen, dass durch eine Eigenverbrauchsoptimierung der Wärmepumpensteuerung eine hohe Gleichzeitigkeit auf Tagesbasis erreicht werden kann. Dies bedingt eine einfache Steuerung, die die Beladung des Boilers dann startet wenn PV-Strom produziert wird. Durch zeitweise etwas erhöhte (auf den PV-Ertrag ausgerichtete) Beladung des WW-Speichers oder eine kurzfristige Speicherung des PV-Stroms könnte das System weiter optimiert werden, ohne grössere Investitionen in Hardwarekomponenten zu tätigen. Allerdings sind dadurch auch wieder eine Reduktion der Arbeitszahlen der WP oder Verluste im Stromspeicher zu erwarten. Die Resultate zeigen, dass auch eine Reduktion der elektrischen Anschlussleistung der WP in der Regel den Eigenverbrauch erhöht.
- Insbesondere bei Betrachtung eines Quartiers mit mehreren Wärmepumpen und PV-Anlagen ist davon auszugehen, dass eine relativ hohe Gleichzeitigkeit zwischen Stromproduktion und Stromverbrauch auf Tagesbasis erreicht werden kann.

Bei einem Bilanzierungszeitraum von einem Tag und unter Berücksichtigung eines maximalen Wärmeklaus kann kein klarer Vorteil für eines der drei Systeme mit solarem Anteil festgestellt werden. Bei Gewichtung mit heute typischen Primärenergiefaktoren (vgl. Kapitel 4.3.7) schneiden die Solarthermie und die Luft-Wasser Wärmepumpe mit PV gleich gut ab. Beim System mit WPB ist die Verrechnung des Wärmeklaus entscheidend.

Kann ein System ohne Wärmeklaus realisiert werden so ergibt sich ein klarer Vorteil für das System mit WPB. Dies ist dann möglich, wenn für die Wärmepumpe eine ansonsten ungenutzte Wärmequelle mit einem ganzjährigen Temperaturniveau von 15 °C zur Verfügung steht. Dieser Fall dürfte aber in der Praxis selten auftreten, da die im Einfamilienhaus vorhandenen Abwärmequellen wie Waschmaschine, Tumbler und Tiefkühltruhe nicht ausreichen um die Energie für einen maximalen Wärmeklaus bereitzustellen. Eine Fehleinschätzung der Wärmequelle kann hier rasch zu einer suboptimalen Systemwahl führen.

Das Solarthermische System hat einen Vorteil wenn hohe Temperaturen im Speicher gefordert sind.

Wird im ST-System hingegen ein Elektro-Einsatz verwendet muss deutlich mehr Primärenergie aufgewendet werden. Sobald der Elektro-Einsatz bei ST-Varianten mehr als nur in den Sommermonaten das Nachheizen übernimmt, schneiden die Systeme mit PV und WP deutlich besser ab.

Bei ST und PV kann unter Verwendung der besten heute erhältlichen Technologie anstelle der heute markttypischen Qualitäten die Flächeneffizienz deutlich verbessert werden. Eine wesentliche Steigerung des Wirkungsgrades zukünftiger Module ist dabei für die Photovoltaik (derzeit sind Module mit 21 % Wirkungsgrad am Markt verfügbar) sehr wahrscheinlich. Auch bei der Solarthermie laufen verschiedene Projekte, welche darauf abzielen, den Kollektorstandtemperatur bei Temperaturen bis etwa 100 °C zu erhöhen und gleichzeitig die Stillstandstemperatur deutlich zu senken.

7.2. Ökonomische Betrachtung

Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung der Studie sind die Kosten für die Bereitstellung von BWW aus den verschiedenen Systemvarianten bei gleichen Randbedingungen vergleichbar. Bei einem Gebäudestandart Gesamtanierung nach MuKE n 2008 liegen die Kosten zwischen 25 und 35 Rp. pro kWh gezapftem Warmwasser. Bei einer Gebäudehülle nach Passivhaus-Niveau bei 40 – 50 Rp. pro kWh gezapftem Warmwasser

Der grösste Einfluss auf die Kosten hat die Bereitstellung von Energie für das Nachheizen im Speicher. In Abhängigkeit des Gebäude-Dämmstandards wird ein unterschiedlich hoher Raumwärmebedarf benötigt, was Einfluss auf die dem BWW-System angerechneten Kosten für die Nachheizung hat.

Eine Ausnahme ist das System mit WPB ohne Wärmeklau. Da in diesem System per Definition keine Fremdenergie verwendet wird, müssen auch keine Kosten für eine externe Nachheizung für diese Anlage angerechnet werden. Daher ist das System mit WPB und ohne Wärmeklau klar das preisgünstigste. In der Praxis wird es jedoch selten vorkommen, dass in einem Einfamilienhaus eine ausreichend leistungsfähige Abwärmequelle zur Verfügung steht, welche zu einem System ohne Wärmeklau führt.

Der Ausblick bis ins Jahr 2025 zeigt, dass alle Systeme das Potenzial haben eine deutliche Kostenreduktion zu erzielen.

Bei der Photovoltaik können wesentliche Kostenschritte über massive Mengenausweitung und bereits in der Erprobung befindliche Technologieschritte erwartet werden.

Bei der Solarthermie stehen mit der bestehenden Systemtechnik vor allem die Reduktion der Installationskosten und die Reduktion der Zwischen-Handels-Stufen vom Werk bis zur Installation im Vordergrund. Eine relevante Kostensenkung könnte durch eine Reduktion der Stillstandstemperaturen (siehe auch Kapitel 7.1) erreicht werden. Dies würde den Einsatz preisgünstigerer Komponenten ermöglichen bis hin zur hydraulischen Verschaltung mit vorisolierten Schläuchen und einfachen Steckverbindungen.

Würde die PV-Anlage unabhängig vom System zur Bereitstellung von Brauchwarmwasser und ohne Förderung grösser als die in der Simulation angenommenen 5 m² Kollektorfläche gebaut, würden für die PV-Anlage tiefe Grenzkosten resultieren. In diesem Fall ergeben die Simulationen für Systeme mit PV/Luft-Wasser Wärmepumpe die tiefsten Gestehungskosten für Brauchwarmwasser aller verglichenen Systeme. Anlagen mit deutlich mehr als 5 m² Modulfläche werden jedoch oft mit Unterstützung von Förderprogrammen realisiert, was ein volkswirtschaftlicher Systemvergleich mit der Solarthermie erschwert und bei der Interpretation dieses Vergleichs berücksichtigt werden muss.

Der grosse Vorteil der PV-Anlage, dass überschüssiger Strom ins Versorgungsnetz abgegeben werden kann, könnte sich in Zukunft verringern. Mit dem Zubau von PV wird der Strompreis zu Zeiten mit hoher Sonneneinstrahlung (Mittagszeit) gegenüber dem heutigen Niveau tendenziell sinken. Dies würde dazu führen, dass PV-Anlagen auf Grund von finanziellen Überlegungen eher kleiner dimensioniert werden, um einen hohen Eigenverbrauch gewährleisten zu können. Ob und wann es in der Schweiz zu tageszeitlich differenzierten Einspeisevergütungen für PV-Strom kommen wird ist jedoch noch sehr ungewiss.

Die hier gemachten Berechnungen beinhalten keine Förderungen. Die angenommenen Vergütungen von 10-20 Rp/kWh für die Einspeisung von Solarstrom könnten jedoch bereits als Subventionierung aufgefasst werden, da diese Tarife heute über den Preisen an der Strombörse liegen. Die Auswirkung dieser Vergütungstarife für Solarstrom auf die berechneten Gestehungskosten von Brauchwarmwasser ist jedoch gering. Selbst eine Annahme von "keiner Vergütung" für den eingespeisten Solarstrom würde keine grossen Änderungen an der Rangfolge der BWW-Kosten der verschiedenen Systeme bewirken.

Betrachtungen von verschiedenen Varianten der Brauchwarmwassererwärmung unter Berücksichtigung von Subventionen wurden in der *Vorstudie Erneuerbare Warmwasserbereitung im Einfamilienhaus* [18] durchgeführt.

7.3. Systemkomplexität

Die Systemkomplexität wird für die Bereiche Anlagenauslegung und -Installation, Anlageüberwachung und Optimierung, Betriebszuverlässigkeit und Flexibilität auf Veränderungen im BWW-Bedarf beleuchtet und diskutiert.

Anlagenauslegung und –Installation

Die Planung eines PV- oder ST-Kollektorfeldes ist in etwa identisch. Die Anbindung an die Energiesenke ist bei der PV-Anlage in Form des Versorgungsnetzes deutlich einfacher als die Anbindung des ST-Kollektorfeldes an einen Speicher und an die Gebäudeheizung. Auch die steuerungstechnische Anbindung ist bei PV in der Regel einfacher, da praktisch keine Rückwirkungen aus dem Versorgungsnetz zu erwarten sind, während bei der ST die aktuelle Speichertemperatur und der Zustand der Gebäudeheizung berücksichtigt werden muss.

Die Installation von ST-Anlagen dürfte leicht aufwendiger sein als die Installation von PV. PV-Module sind in der Regel leichter und handlicher als ST-Module und die Leitungen vom Dach in den Keller sind bei PV dünner und flexibler.

Sowohl bei Wärmepumpen-Systemen als auch bei Solarwärme gilt grundsätzlich, dass Anlagen, die nach dem Stand der Technik installiert und gewartet werden, unproblematisch und zuverlässig sind.

Die korrekte Planung und Installation einer Wärmepumpe ist relativ anspruchsvoll. Wärmepumpenboiler sind deutlich einfachere und kostengünstigere Systeme. Die Wahl des Aufstellungsorts muss jedoch unter anderem wegen der Bedeutung des Wärmeklaus umsichtig gewählt werden.

Systeme in welchen eine Wärmepumpe sowohl die Raumwärme versorgt, als auch den Brauchwarmwasser-Boiler belädt, sind komplexe Anlagen. Es besteht ein Risiko für suboptimale Ergebnisse, wenn:

- Eine Legionellenschaltung den Boiler täglich direkt elektrisch auf 60 °C wärmt, und die Wärmepumpe den Boiler maximal auf 55 °C wärmen kann. Bei geringem Warmwasserbezug schaltet die Wärmepumpe so gut wie nie ein, und es resultiert ein fast ausschliesslich direkt elektrisch beheiztes System
- Die Leistung der Wärmepumpe für die Speicherladung zu gross ist und der Speicher bei hohem Verbrauch nicht auf die gewünschte Temperatur geheizt werden kann. Als Folge davon erfolgt ein grosser Teil der Beladung durch elektrische Nachheizung, nachdem die Wärmepumpe ihre maximale Vorlauftemperatur erreicht hat.

Auch bei Solarwärme-Anlagen besteht ein Risiko für suboptimale Ergebnisse oder Total-Ausfall, wenn zum Beispiel:

- Speicher und Leitungen ungenügend isoliert sind.
- Temperaturfühler falsch platziert oder nicht richtig befestigt werden.
- Leitungen verkehrt angeschlossen werden.

Es kann nicht abschliessend beurteilt werden, ob nun Wärmepumpen oder Solarwärme-Anlagen komplexer oder anfälliger für nicht sachgerechte Installation sind.

Die notwendigen Schnittstellen zu anderen Haustechnik-Installationen sind bei der PV (Wechselrichter) in der Regel bereits vorhanden. Es gibt bereits Wärmepumpen mit PV-eigenverbrauchsoptimierter Steuerung auf dem Markt. Darüber, wie gut diese Eigenverbrauchsoptimierung funktioniert, gibt es noch kaum unabhängige Studien.

Anlageüberwachung und Optimierung

Die Systemkomplexität ist vor allem bei der Bewertung des Solarertrags von PV-Anlagen geringer als bei ST-Anlagen. Während bei PV-Anlagen der Jahresertrag in Form von Strom einfach am Wechselrichter abgelesen werden kann, ist dies bei einer ST-Anlage aufwändiger und wird bei kleinen Anlagen selten ausgeführt.

Auch Datenaufzeichnungen sind bei PV-Analgen deutlich häufiger anzutreffen als bei ST-Systemen. Im Fehlerfall sind diese Verlaufsdaten oft eine grosse Hilfe bei der Fehleridentifikation. Ein Totalausfall wird bei einer PV-Anlage relativ rasch erkannt, da Alarmierungen per Mail oder SMS via Datenüberwachung heute Stand der Technik sind. Bei ST-Analgen oder Wassererwärmung durch die WP dauert das Erkennen eines Ausfalls in der Regel länger, da eine Anlageüberwachung deutlich weniger oft installiert ist. In diesem Fall übernimmt die Zusatzheizung oder der Elektroheizstab möglicherweise unbemerkt die Warmwasseraufbereitung.

Betriebszuverlässigkeit

Die Betriebszuverlässigkeit kann nur schwer abgeschätzt werden, da kaum ein sinnvoller Vergleich zwischen PV- und ST-Systemen möglich ist.

Betriebssicherheit

PV-Anlagen bergen ein potenzielles Brandrisiko, was bei Solarwärmeanlagen nicht der Fall ist.

Flexibilität auf Veränderungen im BWW-Bedarf

Unter der Voraussetzung, dass überschüssiger Strom ins Versorgungsnetz abgegeben werden kann, werden die Systemvarianten mit PV flexibler beurteilt als die ST. Geht der BWW-Verbrauch zurück kann überschüssige Energie aus der PV abgegeben werden, während bei ST-Systemen keine Abgabe von überschüssiger Energie möglich ist.

7.4. Integration in die moderne Gebäudeenergieversorgung

Unter der Annahme, dass in Zukunft der Energieträger Holz zunehmend in industriellen Prozessen benötigt wird, und der Bereich der Einfamilienhäuser langfristig komplett auf Umweltwärme und Elektrizität angewiesen ist [1], wird die Wärmepumpe vermehrt in der modernen Gebäudeenergieversorgung zu finden sein. Dies führt dazu, dass für die Bereitstellung von solar erzeugtem BWW auch immer öfter über eine Kombination von Wärmepumpe und Photovoltaik erfolgen kann.

Im Einfamilienhaus-Neubau ist die Wärmepumpe heute die weitaus häufigste Installation für die Bereitstellung der Raumwärme. Bei Gebäuden mit hohem Dämmstandard ist in der Regel auch die Bereitstellung des BWW an der Wärmepumpe angeschlossen. In diesen Gebäuden sind Komplettsystem mit WP für Heizung und Warmwasser bereits Standard.

Speziell in energietechnisch hoch optimierten Gebäuden mit grösseren Bezugsmengen (MFH) an Warmwasser findet die Solarthermie eine Anwendung im Bereich der Hochtemperaturwärme bei über 60 °C. In diesen Gebäuden wird für die Niedertemperaturwärme ein System auf Basis Wärmepumpe eingesetzt und für die höheren Temperaturniveaus (>60 °C) Solarthermie eingesetzt. Im Bereich der Einfamilienhäuser sind diese dualen Systeme meist nicht wirtschaftlich.

7.5. Akzeptanz beim Endkunden

Im Rahmen dieses Projektes war es nicht möglich eine belastbare Umfrage zur Akzeptanz der verschiedenen Systeme bei Endkunden durchzuführen. Im Folgenden sind Thesen aufgeführt, die die Projektmitarbeiter, die in regelmässigem Austausch mit Installationsfirmen stehen, aufgestellt haben.

- Für die reine Bereitstellung von BWW ist die Akzeptanz von ST beim Endkunden in der Regel etwas höher als für PV-WP. Dies hat damit zu tun dass die ST in der Bevölkerung bereits bestens bekannt ist und die ST eine klarere Abkoppelung vom

Stromnetz und somit eine grösserer Autarkie zulässt. Die aktuelle Fördersituation ist jedoch eine starke Motivation, PV an Stelle von ST zu installieren.

- Die grundlegende Funktionsweise eines Systems mit ST wird von Kunden in der Regel intuitiv verstanden. Die Umwandlung von Sonnenlicht in Gleichstrom im Photovoltaik-Modul und anschliessend die Umwandlung in Wechselstrom im Wechselrichter entzieht sich einer einfachen Erklärung. Der Prozess der Stromerzeugung ist somit nicht intuitiv nachvollziehbar. Dies ist bei einzelnen Endkunden ein Hemmnis für die Installation von PV.
- Kunden die bereits gute Erfahrungen mit WP-Systemen gemacht haben, sind eher bereit einen WPB, eine LW-WP oder eine Sole-Wasser-WP zu installieren. Das Vertrauen in die WP-Technologie muss in manchen Nutzergruppen erst noch gefestigt werden.
- Auch die Angst vor elektromagnetischer Strahlung – ob begründet oder nicht – kann den Entscheid für oder wider eine Photovoltaik-Anlage beeinflussen.

7.6. Energiewirtschaftliche Einbettung

Während Systeme zur BWW-Erwärmung mit ST für die Energieversorgungsunternehmen heute kaum relevant, sind da sie die lokal produzierte Energie nicht handeln können, ist die PV auf ein funktionierendes Stromnetz angewiesen und bietet daher prinzipiell gute Möglichkeiten für ein Geschäftssystem.

Der Einsatz von Photovoltaik kann das Stromnetz belasten und die Spannungshaltung erschweren. Gleichzeitig kann ein moderner PV-Wechselrichter selbst ohne Sonneneinstrahlung Netzdienstleistungen wie die Bereitstellung von Blindleistung liefern.

Unter der Annahme, dass sämtliche Einfamilienhäuser der Schweiz (ca. 1 Mio. Gebäude) eine PV-Anlage gemäss vorliegender Studie von 0.75 kWp Leistung installiert haben, ergibt dies eine Leistung von maximal 750 MWp, was einer Solarstromproduktion von etwas über 1% des aktuellen Stromverbrauchs entspricht. In Relation zu den in der Energiestrategie 2050 des Bundesrates genannten ca. 12 GWp entspricht der Anteil, der dem Warmwassersystem zugeordnet werden kann maximal 6-7% der gesamten installierten PV-Leistung bis 2050. Die auf Grund von solaren Warmwassersystemen installierte Leistung ist gleichmässig über die gesamte Schweiz verteilt pro Gebäude relativ gering. Es ist daher nicht zu erwarten dass eine derartige Installation Probleme im Stromnetz verursacht. Insbesondere dann nicht, wenn auch die Gleichzeitigkeit mit dem übrigen Stromverbrauch des Gebäudes berücksichtigt wird [19].

Grössere PV-Anlagen sind durchaus ein relevanter Faktor für den Betrieb des Stromnetzes, diese sind aber nicht Bestandteil der vorliegenden Studie.

Die in der Simulation verwendete PV- und WPB-Leistung ist für Systemdienstleistungen kaum relevant. So wird z.B. bei der Swisscom Energy Solutions (tiko), einem von Stromversorgungsunternehmen unabhängigen Anbieter von Regelenergie aus dezentral aufgestellten Wärmepumpen, keine Installation zur Schaltung von Verbrauchern vorgenommen, wenn nur der Warmwasserboiler angesteuert werden kann [20]. Dies zeigt, dass der WPB alleine zu wenig Potenzial bietet um wirtschaftlich an heutigen Regelenergiemarkt zu partizipieren. Ob sich in Zukunft für kleine Verbraucher wie WPB mit tiefer Leistung ein wirtschaftliches Modell für eine Ansteuerung/Schaltung der Lasten realisieren lässt, wird von den Autoren der Studie kontrovers beurteilt.

Auch die Verwendung von Stromspeichersystemen für die Erhöhung des Eigenstromverbrauchs im Haushalt ist ohne Fördersysteme in der Schweiz heute nicht wirtschaftlich. Die Stromspeicherung für den Ausgleich von Einspeise- und Verbrauchsspitzen kann in der Regel aus volkswirtschaftlicher Sicht kostengünstiger vom Netzbetreiber oder Elektrizitätswerk übernommen werden, da hier auf Grund von vielen Produzenten und Verbrauchern ein geglättetes Lastprofil erwartet werden kann.

Für die Teilnahme am Regelenergiemarkt sind Einfamilienhäuser dann interessant, wenn die Raumwärme mit einer Wärmepumpe bereitgestellt wird wie im BS4 der Studie oder eine

deutlich grössere PV-Anlage als in der Studie angenommen installiert wird. Diese Fälle sind jedoch unabhängig von der Brauchwarmwasserversorgung und wurden daher nicht untersucht. Auf Grund der Erfahrungen der Autoren der Studie ist es zum aktuellen Zeitpunkt praktisch unmöglich verlässliche Aussagen über die weitere Entwicklung des Regelenergiebedarfs und der daraus folgenden Massnahmen für ein Einfamilienhaus zu erhalten.

8. Ausblick

8.1. Entwicklung eines modulierenden WP-Boilers

Die Entwicklung einer modulierenden Wärmepumpe für die Bereitstellung von BWW im EFH mit möglichst hohem Anteil von PV-Strom (Eigenverbrauchs-Optimierung) stellt eine Alternative zur solarthermischen Wärmeerzeugung dar, welche sowohl in Bezug auf Primärenergiebedarf sowie Energiekosten (Rp. pro kWh Warmwasser) als auch in Bezug auf Flächeneffizienz mit Solarwärme konkurrieren kann.

Unter ökonomischen Randbedingungen, die einen Systemvergleich aus volkswirtschaftlicher Perspektive ermöglichen, hat die Studie ergeben dass eine Veränderung der Stromkosten und des Einspeisetarifs nur sehr geringe Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der verglichenen Systeme hat. Ein erhöhter Eigenverbrauch, welcher mit einem modulierenden WPB ermöglicht werden soll, bringt somit keine deutlichen finanziellen Vorteile.

Zusätzlich kann bei der volkswirtschaftlichen Betrachtung der Verbund von mehreren PV-Anlagen und mehreren WP-Boilern betrachtet werden. Diese Betrachtung ergibt eine zusätzliche Gleichzeitigkeit von PV-Produktion und WP-Verbrauch, was den Vorteil der modulierenden Wärmepumpe unter volkswirtschaftlicher Perspektive weiter schmälert.

Für den Endkunden, der sich bereits für ein System mit PV und WPB entschieden hat, kann ein modulierender WPB mit höherem Eigenverbrauch durchaus ökonomisch interessant sein. Der erhöhte Eigenverbrauch, der mit der Modulierbarkeit erreicht wird, kann jedoch auch durch eine Leistungsreduktion der WP, eine geringfügige Vergrößerung der PV-Anlage oder einer Vergrößerung des Speicherinhalts inkl. einfacher Laststeuerung für die WP erreicht werden. Ob der modulierende WPB die für den Endkunden ökonomisch vorteilhafteste Lösung darstellt, kann nicht pauschal beantwortet werden.

Auch wenn wirtschaftliche Argumente nicht klar für den Einsatz einer modulierenden Wärmepumpe sprechen, so sind Argumente wie ein erhöhter Eigenverbrauch von Solarstrom und die dadurch grössere Unabhängigkeit vom Elektrizitätsversorger für den Markterfolg durchaus relevant. Hierzu können auch Fördersysteme mit Priorisierung des Eigenverbrauchsanteils beitragen.

8.2. Erweiterung der Analysen

Die Erweiterung der Analysen vom Einfamilien- zum Mehrfamilienhaus ist grundsätzlich sehr interessant. Bei der Photovoltaik kommen beim MFH Skaleneffekte stark zum Tragen die sich primär auf die Ökonomie auswirken, während die ST im MFH äusserst interessante und effiziente Technologien für die Saisonspeicherung vorweisen kann.

Prinzipiell steigt im MFH der Kollektorsertrag pro m² bei der Solarwärme, da der Deckungsgrad auf Grund der beschränkten Dachfläche in der Regel geringer ausfällt. Bei der Wärmepumpe ist jedoch nicht unbedingt eine Steigerung der JAZ bei Brauchwarmwassererwärmung zu erwarten, weil die Temperaturen 60 °C erreichen müssen (Legionellen-Vorschriften) und die Zirkulation zusätzlich das Temperaturniveau des Wärmepumpenbetriebs erhöht.

Der Ausgang eines solchen Vergleichs ist offen, könnte aber für Bauherren weitere interessante und relevante Aussagen generieren.

Denkbar wäre auch eine Erweiterung des Bilanzierungsrahmens vom BWW auf den Gesamtenergiebedarf des Wohnens in Form von BWW, Heizung, Elektrizität und Mobilität. Auch eine zusätzliche Bilanzierung die auf CO₂-Emissionen beruht wäre anzustreben.

9. Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Einheit	Begriff/Beschreibung
BS		Basissystem
BWW		Brauchwarmwasser
COP		Leistungszahl (Coefficient of performance)
EFH		Einfamilienhaus
ENTSO		European Network of Transmission System Operators
G	[W/m ²]	Sonneneinstrahlung
GT		Gastherme
JAZ		Jahresarbeitszahl
kWp	[kW]	Die von Solarmodulen abgegebene elektrische Leistung unter Standard-Testbedingungen
LW-WP		Luft-Wasser-Wärmepumpe
η_0		Konversionsfaktor (optischer Wirkungsgrad)
PE		Primärenergie
PV		Photovoltaik
ST		Solarthermie
Ta	[°C]	Umgebungstemperatur
Tm	[°C]	Kollektortemperatur
WP		Wärmepumpe
WK		Wärmeklau
WPB		Wärmepumpen-Boiler

10. Anhang

10.1. Anhang 1: Auszug Literaturstudie

Aus insgesamt 20 gesichteten Studien werden die für dieses Projekt relevanten Studien mit Inhaltsübersicht in Tabelle 4 kurz aufgeführt.

Tabelle 4: Für einen Technologievergleich solare Brauchwarmwassererwärmung relevante Studien

Autor/Titel	Inhalt
<p>Dott, R. et al. (2011): Combining heat pumps with solar energy for domestic hot water production IEA (2010): IEA SHC Task 44/HPP Annex 38 „Solar and heat pumps“.</p>	<p>In einer Simulation werden zwei Kombinationen von Luft-Wasser-Wärmepumpen verglichen, einmal mit Solarthermie und einmal mit Photovoltaik.</p>
<p>Heimrath, R. et al. (2013): Technisch- ökonomischer Vergleich von Solarthermie- Wärmepumpen und PV- Wärmepumpen- Kombianlagen 23. Symposium Thermische Solarenergie, Tagungs- band 23, Bad Staffelstein.</p>	<p>Die Studie vergleicht verschiedene technische und ökonomische Aspekte einzelner Technologien (Solarthermie, Photovoltaik und Wärmepumpe) bei der Raumheizung und Warmwasserbereitstellung.</p>
<p>Drück, H. und K. Sommer (2013): PV-Wärme – Zukunftstechnologie oder Unsinn 23. Symposium Thermische Solarenergie, Tagungsband 23, Bad Staffelstein.</p>	<p>Eine Untersuchung im Auftrag des Bundesverbands Solarwirtschaft BSW, was die höhere Rentabilität der Wärmeerzeugung mit Photovoltaik in den letzten Jahren für die zukünftige Erzeugung solarer Wärme zur Trinkwassererwärmung und Raumheizung für ein Einfamilienhaus bedeutet.</p>
<p>Tjaden, T. et al. (2013): Simulation und techno- ökonomischer Vergleich von solarthermischen Heizungskonzepten und Photovoltaik- Wärmepumpen- Kombinationen im Wohnungssektor 23. Symposium Thermische Solarenergie, Tagungs- band 23, Bad Staffelstein.</p>	<p>Die Arbeit untersucht das Betriebsverhalten von Solarthermie- und Photovoltaik- Wärmepumpen- Systemen hinsichtlich des Einflusses von Gebäudestandards und Umweltbedingungen auf die erzielbaren Endenergieeinsparungen.</p>
<p>Dott, R. et al. (2013): Systemvergleich von kombinierten Solar- und Wärmepumpensystemen 23. Symposium Thermische Solarenergie, Tagungsband 23, Bad Staffelstein.</p>	<p>Der Beitrag untersucht kombinierte Solar- und Wärmepumpensysteme für Wohngebäude mit dem Fokus auf direkte und indirekte Nutzung solarer Strahlung und grundsätzlicher Systemkonfigurationen. Varianten von alleine direkter solarer Wärmeerzeugung, kombinierten Solar- und Wärmepumpensysteme bis zu reinen Wärmepumpen-Wärmeerzeugung mit Photovoltaik.</p>
<p>Mährenbach, H (2012): Evaluation of solar- assisted heat pump heating systems for single family houses in Austria Master Level Thesis, European Solar Engineering School No.162.</p>	<p>Techno-ökonomischer und ökologischer Systemvergleich für Wärmeerzeugung in Einfamilienhaus mittels Erdsonden- Wärmepumpe, WP- Solarkollektoren- und WP-Photovoltaik- Kombination. Die Simulation variiert diverse Parameter.</p>

Meyer, Jan (2012): Thermische Solaranlage oder Photovoltaik in Verbindung mit Wärmepumpe http://www.effiziente-waermepumpe.ch/ (Zugriff am 14.06.2013).	Vergleicht Wirkungsgrad und Kosten von thermischen Solaranlagen und Photovoltaik mit Wärmepumpe.
PHOTON (2011): Photovoltaik versus Solarthermie: Nachgerechnet Photon, November 2011, Seite 122.	Es werden eine solarthermische und eine Solarstromanlage mit Wärmepumpe zur Bereitstellung der Energie für einen Vierpersonenhaushalt in Deutschland verglichen.

10.2. Anhang 2: Simulationsparameter

Tabelle 5: Parameter die in der Simulation variiert wurden.

Variabel	Wert	Einheit	Beschreibung
Speicher_Inhalt	0.3	m ³	Volumen Speicher für BS1, BS3 und BS4
	0.45	m ³	Volumen für Solarthermie BS2
h_Heizung_RL	0.1	1	Stutzhöhe Heizungsrücklauf für BS1, BS3 und BS3
	0.6	1	Stutzhöhe Heizungsrücklauf für BS2
T_soll	60	°C	Soll Vorlauf. Temperatur T1
	50	°C	Soll Vorlauf. Temperatur T2
T_RL_Stop	56	°C	Abschaltung bei Rücklauf Temperatur T1
	46	°C	Abschaltung bei Rücklauf Temperatur T2
P_Stufe	4'000	W	Th. Leistung für BWB-WP (BS3)
	10'000	W	Th. Leistung für Luft-Wasser-WP (BS4)
	10'000	W	Th. Leistung für Gastherme (BS1 und BS2)
neigung	90	°	Neigung Module/Kollektor mit Ausrichtung Süden
	40	°	Optimale Neigung Kollektor
	30	°	Optimale Neigung Module
azimutFl	0	°	Azimut Süden für Module/Kollektor (Neigung 90° / 30°).
	90	°	Azimut Westen für Module/Kollektor (für Neigung 30°).
Eta_is	60	%	Isentropischer Wirkungsgrad einphasiger Verdichter BS 3
	65	%	Isentropischer Wirkungsgrad dreiphasiger Verdichter BS 4

Tabelle 6: Parameter, die in der Simulation unverändert verwendet wurden.

Variabel	Wert	Einheit	Beschreibung
Speicher_Hohe	1.6	m	Höhe Speicher
lambda_iso_Sp	0.045	W/mK	Isolation Speicher
d_iso_Sp	0.1	m	Isolationsdicke
h_Warmwasser	1	1	Stutzhöhe Warmwasserabgabe Zapfung
h_Kaltwasser	0	1	Stutzhöhe Kaltwassereingang
h_Heizung_VL	0.8	1	Stutzhöhe Heizungsrücklauf
h_ST_VL	0.4	1	Stutzhöhe Vorlauf Solarthermie
h_ST_RL	0.1	1	Stutzhöhe Rücklauf Solarthermie
h_Fuehler	0.10	1	Speicherposition Fühler
	0.50	1	Speicherposition Fühler (für Auslösung Solarthermie)
	0.90	1	Speicherposition Fühler
kWpeak	0.75	kW	Anlagenleistung mit Modulfläche 5 m ² . Berechnet über

			Modulwirkungsgrad 15 %.
eta	0.9	1	Wirkungsgrad Gastherme
v_dot_solarpumpe	150	l/h	Volumenstrom Solarpumpe
P_pumpe	45	W	Leistung Solarpumpe
T_Umg	15	°C	Umgebungstemperatur Speicher
T_Kaltwasser	12	°C	Kaltwassertemperatur
ST.Kriterium	3	K	Temperaturüberhöhung Kollektorausstritt ggb Speicher für Start Solarthermie
T_ST_max	90	°C	Limitierung der Kollektorausstrittstemperatur
V_dot_DHW_input	160	l/t	Tagesbedarf BWW
n0	0.71	1	Kollektorkennlinie bez. auf Bruttokollektorfläche
a1	3.38	Km ² /W	Kollektorkennlinie bez. auf Bruttokollektorfläche
a2	0.01	K ² m ⁴ /W ²	Kollektorkennlinie bez. auf Bruttokollektorfläche
A	5	m ²	Bruttokollektorfläche
DELTA_e	10	K	WT: Verdampfer
DELTA_c	5	K	WT: Kondensator
T_e_max	10	°C	Limitierung der max. Verdampfertemperatur
Pzusatz	400	W	Zusatzleistung für Pumpen und Ventilator für Luftwärmepumpe (BS4).

10.3. Anhang 3: Ökonomischen Randbedingungen

Kostenparameter BS1, Gastherme

Tabelle 7: Investitionen die für die Basisvariante BS1 angenommen wurden.

BS1, Gastherme: Investitionen				
	Anrechnung an Brauchwassererwärmung zu...	2013 / 2020 / 2025		
		tief	best guess	hoch
Demontage und Grundinvestitionen				
Demontage altes Heizsystem, exkl. Warmwasserspeicher (Lebensdauer 40 Jahre)	10%/20%/50% (je nach Qualität Gebäudehülle)	1600.-	2000.-	2400.-
Demontage Warmwasserspeicher (Lebensdauer 40 Jahre)	100%	400.-	500.-	600.-
Erdgas-Anschluss (Lebensdauer 40 Jahre)	10%/20%/50% (je nach Qualität Gebäudehülle)	2000.-	2500.-	3000.-
Investitionen neues Heizsystem				
Beschaffung Gasheizung inkl. notwendigem Zubehör (Lebensdauer 20 Jahre)	10%/20%/50% (je nach Qualität Gebäudehülle)	4000.-	5000.-	6000.-
Restliche Investition Gasheizung schlüsselfertig, exkl. Warmwasserspeicher (Transport, Installation, Nebenarbeiten, Inbetriebnahme) (Lebensdauer 20 Jahre)	10%/20%/50% (je nach Qualität Gebäudehülle)	6000.-	7000.-	8000.-
Warmwasserspeicher schlüsselfertig (Beschaffung, Transport, Installation, Nebenarbeiten, Inbetriebnahme) (Lebensdauer 20 Jahre)	100%	1500.-	2000.-	2500.-

Die Investitionen werden mit einem kalkulatorischen Zinssatz von 2,5% über eine Betrachtungsperiode von 20 Jahren bewertet (Berücksichtigung Restwerte über lineare Abschreibung).

Tabelle 8: Angenommene Kosten für Betrieb und Unterhalt für die Basisvariante BS1.

BS1, Gastherme: Kosten für Unterhalt und Betrieb				
	Anrechnung an Brauchwassererwärmung zu...	2013 / 2020 / 2025		
		tief	best guess	hoch
Unterhaltskosten Gasheizung pro Jahr	10%/20%/50% (je nach Qualität Gebäudehülle)	200.-	400.-	600.-
Erdgas-Grundgebühr pro Jahr	10%/20%/50% (je nach Qualität Gebäudehülle)	100.-	100.-	100.-
Erdgas-Kosten für die Brauchwarmwassererwärmung	100%	(1)	(1)	(1)

(1) Die Erdgas-Kosten ergeben sich aufgrund der Simulationsergebnisse zum Erdgasverbrauch sowie folgender Preisentwicklung:

- Erdgas-Preis 2013: 10 Rp./kWh
- Erdgas-Preisanstieg pro Jahr (real): +1% p.a. (best guess; festgelegt auf Basis der Energieperspektiven des Bundes), 0% (tief), +4% (hoch)

Tabelle 9: Energiemengen die aus den Simulationsergebnissen in die Kostenrechnung einfließen (gerundet).

BS1, Gastherme: Energiemengen			
	tief	best guess	hoch
Gezapfte Wärmemenge	wie best guess	3150 kWh/a	wie best guess
Gasbezug	wie best guess	3860 kWh/a	wie best guess

Kostenparameter BS2, Gastherme mit Solarkollektor

Tabelle 10: Investitionen die für die Basisvariante BS2 angenommen wurden.

BS2, Gastherme mit Solarkollektor: Investitionen				
	Anrechnung an Brauchwassererwärmung zu...	2013 / 2020 / 2025		
		tief	best guess	hoch
Demontage und Grundinvestitionen				
Demontage altes Heizsystem, exkl. Warmwasserspeicher (Lebensdauer 40 Jahre)	10%/20%/50% (je nach Qualität Gebäudehülle)	•2013: 1600.- •2020/ 2025: wie 2013	•2013: 2000.- •2020/ 2025: wie 2013	•2013: 2400.- •2020/ 2025: wie 2013
Demontage Warmwasserspeicher (Lebensdauer 40 Jahre)	100%	•2013: 400.- •2020/ 2025: wie 2013	•2013: 500.- •2020/ 2025: wie 2013	•2013: 600.- •2020/ 2025: wie 2013

Erdgas-Anschluss (Lebensdauer 40 Jahre)	10%/20%/50% (je nach Qualität Gebäudehülle)	•2013: 2000.- •2020/ 2025: wie 2013	•2013: 2500.- •2020/ 2025: wie 2013	•2013: 3000.- •2020/ 2025: wie 2013
Investitionen neues Heizsystem				
Beschaffung Gasheizung inkl. notwendigem Zubehör (Lebensdauer 20 Jahre)	4-5%/7-10%/18-25% (je nach Qualität Gebäudehülle und Ausrichtung Kollektor)	•2013: 4000.- •2020/ 2025: wie 2013	•2013: 5000.- •2020/ 2025: wie 2013	•2013: 6000.- •2020/ 2025: wie 2013
Restliche Investition Gasheizung schlüsselfertig, exkl. Warmwasserspeicher (Transport, Installation, Nebenarbeiten, Inbetriebnahme) (Lebensdauer 20 Jahre)	10%/20%/50% (je nach Qualität Gebäudehülle)	•2013: 6000.- •2020/ 2025: wie 2013	•2013: 7000.- •2020/ 2025: wie 2013	•2013: 8000.- •2020/ 2025: wie 2013
Investition Solarkollektoranlage schlüsselfertig, inkl. Speicher (Beschaffung, Transport, Installation, Nebenarbeiten, Inbetriebnahme) (Lebensdauer 30 Jahre)	100%	•2013: 8000.- •2020: 7000.- •2025: 4000.-	•2013: 12000.- •2020: 10000.- •2025: 8000.-	•2013: 15000.- •2020/ 2025: wie 2013

Die Investitionen werden mit einem kalkulatorischen Zinssatz von 2,5% über eine Betrachtungsperiode von 20 Jahren bewertet (Berücksichtigung Restwerte über lineare Abschreibung).

Tabelle 11: Angenommene Kosten für Betrieb und Unterhalt für die Basisvariante BS2.

BS2, Gastherme mit Solarkollektor: Kosten für Unterhalt und Betrieb				
	Anrechnung an Brauchwassererwärmung zu...	2013 / 2020 / 2025		
		tief	best guess	hoch
Unterhaltskosten Gasheizung pro Jahr	10%/20%/50% (je nach Qualität Gebäudehülle)	200.-	400.-	600.-
Zusätzliche Unterhaltskosten aufgrund der Solarkollektoranlage pro Jahr	100%	50.-	100.-	150.-
Erdgas-Grundgebühr pro Jahr	10%/20%/50% (je nach Qualität Gebäudehülle)	100.-	100.-	100.-
Erdgas-Kosten für die Brauchwarmwassererwärmung	100%	(1)	(1)	(1)

(1) Die Erdgas-Kosten ergeben sich aufgrund der Simulationsergebnisse zum Erdgasverbrauch sowie folgender Preisentwicklung:

- Erdgas-Preis 2013: 10 Rp./kWh
- Erdgas-Preisanstieg pro Jahr (real): +1% p.a. (best guess; festgelegt auf Basis der Energieperspektiven des Bundes), 0% (tief), +4% (hoch)

Tabelle 12: Energiemengen die aus den Simulationsergebnissen in die Kostenrechnung einfließen (gerundet).

BS2, Gastherme mit Solarkollektor: Energiemengen			
	tief	best guess	hoch
Gezapfte Wärmemenge	wie best guess	3150 kWh/a	wie best guess
Gasbezug (Variation aufgrund Ausrichtung des Kollektors)	wie best guess	1410 kWh/a (optimal)	1940 kWh/a (90° Süd)

Kostenparameter BS3, Gastherme mit Wärmepumpenboiler mit/ohne PV

Tabelle 13: Investitionen die für die Basisvariante BS3 angenommen wurden.

BS3, Gastherme mit Wärmepumpenboiler mit/ohne PV: Investitionen				
	Anrechnung an Brauchwasser- erwärmung zu...	2013 / 2020 / 2025		
		tief	best guess	hoch
Demontage und Grundinvestitionen				
Demontage altes Heizsystem, exkl. Warmwasserspeicher (Lebensdauer 40 Jahre)	Ohne Wärmeklau: 0% Mit Wärmeklau: 4%/9%/22% (je nach Qualität Gebäudehülle)	•2013: 1600.- •2020/ 2025: wie 2013	•2013: 2000.- •2020/ 2025: wie 2013	•2013: 2400.- •2020/ 2025: wie 2013
Demontage Warmwasserspeicher (Lebensdauer 40 Jahre)	100%	•2013: 400.- •2020/ 2025: wie 2013	•2013: 500.- •2020/ 2025: wie 2013	•2013: 600.- •2020/ 2025: wie 2013
Erdgas-Anschluss (Lebensdauer 40 Jahre)	Ohne Wärmeklau: 0% Mit Wärmeklau: 4%/9%/22% (je nach Qualität Gebäudehülle)	•2013: 2000.- •2020/ 2025: wie 2013	•2013: 2500.- •2020/ 2025: wie 2013	•2013: 3000.- •2020/ 2025: wie 2013
Investitionen neues Heizsystem				
Beschaffung Gasheizung inkl. notwendigem Zubehör (Lebensdauer 20 Jahre)	Ohne Wärmeklau: 0% Mit Wärmeklau: 4%/9%/22% (je nach Qualität Gebäudehülle)	•2013: 4000.- •2020/ 2025: wie 2013	•2013: 5000.- •2020/ 2025: wie 2013	•2013: 6000.- •2020/ 2025: wie 2013
Restliche Investition Gasheizung schlüsselfertig, exkl. Warmwasserspeicher (Transport, Installation, Nebenarbeiten, Inbetriebnahme) (Lebensdauer 20 Jahre)	Ohne Wärmeklau: 0% Mit Wärmeklau: 4%/9%/22% (je nach Qualität Gebäudehülle)	•2013: 6000.- •2020/ 2025: wie 2013	•2013: 7000.- •2020/ 2025: wie 2013	•2013: 8000.- •2020/ 2025: wie 2013
Investition Wärmepumpenboiler schlüsselfertig (Beschaffung, Transport, Installation, Nebenarbeiten, Inbetriebnahme) (Lebensdauer 20 Jahre)	100%	•2013: 4000.- •2020: 3500.- •2025: 2500.-	•2013: 5000.- •2020: 4500.- •2025: 3500.-	•2013: 6000.- •2020/ 2025: wie 2013
Investition PV-Anlage schlüsselfertig 0,75 kWp (Beschaffung, Transport, Installation, Nebenarbeiten, Inbetriebnahme) (Lebensdauer 30 Jahre)	100%	•2013: 1875.- •2020: 1500.- •2025: 1125.-	•2013: 4500.- •2020: 3750.- •2025: 2625.-	•2013: 6000.- •2020/ 2025: wie 2013

Die Investitionen werden mit einem kalkulatorischen Zinssatz von 2,5% über eine Betrachtungsperiode von 20 Jahren bewertet (Berücksichtigung Restwerte über lineare Abschreibung).

Tabelle 14: Angenommene Kosten für Betrieb und Unterhalt für die Basisvariante BS3.

BS3, Gastherme mit Solarkollektor: Kosten für Unterhalt und Betrieb				
	Anrechnung an Brauchwassererwärmung zu...	2013 / 2020 / 2025		
		tief	best guess	hoch
Unterhaltskosten Gasheizung pro Jahr	Ohne Wärmeklau: 0% Mit Wärmeklau: 4%/9%/22% (je nach Qualität Gebäudehülle)	200.-	400.-	600.-
Zusätzliche Unterhaltskosten aufgrund des Wärmepumpenboilers pro Jahr	100%	25.-	50.-	75.-
Zusätzliche Unterhaltskosten aufgrund der PV-Anlage	100%	50.-	100.-	150.-
Erdgas-Grundgebühr pro Jahr	Ohne Wärmeklau: 0% Mit Wärmeklau: 4%/9%/22% (je nach Qualität Gebäudehülle)	100.-	100.-	100.-
Erdgas-Kosten für die Brauchwarmwassererwärmung	100%	(1)	(1)	(1)
Strom-Grundgebühr pro Jahr	20%	30.-	30.-	30.-
Strom-Kosten für die Brauchwarmwassererwärmung (Strom ab Netz)	100%	(2)	(2)	(2)
Strom-Einnahmen für die Rückspeisung ins Netz ab PV-Anlage	100%	(3)	(3)	(3)

(1) Die Erdgas-Kosten ergeben sich aufgrund der Simulationsergebnisse zum Erdgasverbrauch sowie folgender Preisentwicklung (Hinweis: Bei den Varianten ohne Wärmeklau beträgt der Erdgasverbrauch definitionsgemäss gleich Null):

- Erdgas-Preis 2013: 10 Rp./kWh
- Erdgas-Preisanstieg pro Jahr (real): +1% pa (buest guess; festgelegt auf Basis der Energieperspektiven des Bundes), 0% (tief), +4% (hoch)

(2) Die Strom-Kosten ergeben sich aufgrund der Simulationsergebnisse zum Stromverbrauch ab Netz sowie folgender Preisentwicklung (Hinweis: Bei den Varianten mit PV-Anlage wurde ein Eigenverbrauch von 50% der PV-Stromproduktion angenommen, um den sich der Strombezug ab Netz entsprechend reduziert):

- Strom-Preis 2013 (ab Netz): 20 Rp./kWh (dieser Ausgangswert wurde nicht variiert).
- Strom-Preisanstieg pro Jahr (real): +0,5% pa (buest guess; festgelegt auf Basis der Energieperspektiven des Bundes), 0% (tief), +4% (hoch)

(3) Die Strom-Einnahmen für die Rückspeisung ergeben sich aufgrund der Simulationsergebnisse zur Stromproduktion der PV-Anlage sowie folgender Preisentwicklung (Hinweis: Bei den Varianten mit PV-Anlage wurde ein Eigenverbrauch von 50% der PV-Stromproduktion angenommen, die andere Hälfte wird ins Netz zurückgespielen):

- Strom-Rückspeisetarif 2013: 10 Rp./kWh (für die bestmögliche Schätzung sowie für die Schätzung mit „hohen“ Kosten) respektive 20 Rp./kWh angesetzt (für die Schätzung mit „tiefen“ Kosten; in diesem Fall spielt die Annahme zum Eigenverbrauch oben keine Rolle mehr, weil eine direkt ab PV-Anlage für die Brauchwassererwärmung verbrauchte kWh zur gleichen Kosteneinsparung führt wie eine ins Netz rückgespiessene kWh).
- Strom-Rückspeisetarifanstieg pro Jahr (real): analog zur Strom-Preisentwicklung (vgl. oben)

Tabelle 15: Energiemengen die aus den Simulationsergebnissen in die Kostenrechnung einfließen (gerundet).

BS3, Gastherme mit Wärmepumpenboiler mit/ohne PV: Energiemengen			
	tief	buest guess	hoch
Gezapfte Wärmemenge	wie buest guess	3150 kWh/a	wie buest guess
Gasbezug (bei Varianten mit maximalem Wärmeklau)	wie buest guess	1700 kWh/a (optimal)	wie buest guess
Strombedarf Wärmepumpenboiler	wie buest guess	1150 kWh/a (optimal)	wie buest guess
Stromproduktion PV-Anlage	wie buest guess	830 kWh/a (optimal)	570 kWh/a (90° Süd)
Anteil Eigenverbrauch an PV-Produktion für Brauchwarmwassererwärmung	wie buest guess	50%	wie buest guess

Kostenparameter BS4, Wärmepumpe mit/ohne PV

Tabelle 16: Investitionen die für die Basisvariante BS1 angenommen wurden.

BS4, Wärmepumpe mit/ohne PV: Investitionen				
	Anrechnung an Brauchwassererwärmung zu...	2013 / 2020 / 2025		
		tief	best guess	hoch
Demontage und Grundinvestitionen				
Demontage altes Heizsystem, exkl. Warmwasserspeicher (Lebensdauer 40 Jahre)	10%/20%/50% (je nach Qualität Gebäudehülle)	•2013: 1600.- •2020/ 2025: wie 2013	•2013: 2000.- •2020/ 2025: wie 2013	•2013: 2400.- •2020/ 2025: wie 2013
Demontage Warmwasserspeicher (Lebensdauer 40 Jahre)	100%	•2013: 400.- •2020/ 2025: wie 2013	•2013: 500.- •2020/ 2025: wie 2013	•2013: 600.- •2020/ 2025: wie 2013
Bauliche Massnahmen Energieversorgung Wärmepumpe (Lebensdauer 40 Jahre)	10%/20%/50% (je nach Qualität Gebäudehülle)	•2013: 1500.- •2020/ 2025: wie 2013	•2013: 2500.- •2020/ 2025: wie 2013	•2013: 7500.- •2020/ 2025: wie 2013
Investitionen neues Heizsystem				
Investition Wärmepumpe schlüsselfertig, exkl. Warmwasserspeicher (Beschaffung, Transport, Installation, Nebenarbeiten, Inbetriebnahme) (Lebensdauer 20 Jahre)	10%/20%/50% (je nach Qualität Gebäudehülle)	•2013: 18000.- •2020: 15300.- •2025: 14025.-	•2013: 22000.- •2020: 18700.- •2025: 16500.-	•2013: 26000.- •2020/ 2025: wie 2013
Investition PV-Anlage schlüsselfertig 0,75 kWp (Beschaffung, Transport, Installation, Nebenarbeiten, Inbetriebnahme) (Lebensdauer 30 Jahre)	100%	•2013: 1875.- •2020: 1500.- •2025: 1125.-	•2013: 4500.- •2020: 3750.- •2025: 2625.-	•2013: 6000.- •2020/ 2025: wie 2013

Die Investitionen werden mit einem kalkulatorischen Zinssatz von 2,5% über eine Betrachtungsperiode von 20 Jahren bewertet (Berücksichtigung Restwerte über lineare Abschreibung).

Tabelle 17: Angenommene Kosten für Betrieb und Unterhalt für die Basisvariante BS4.

BS4, Wärmepumpe mit/ohne PV: Kosten für Unterhalt und Betrieb				
	Anrechnung an Brauchwassererwärmung zu...	2013 / 2020 / 2025		
		tief	best guess	hoch
Unterhaltskosten Wärmepumpe pro Jahr	10%/20%/50% (je nach Qualität Gebäudehülle)	100.-	200.-	300.-
Zusätzliche Unterhaltskosten aufgrund der PV-Anlage	100%	50.-	100.-	150.-
Strom-Grundgebühr pro Jahr	13%	30.-	30.-	30.-
Strom-Kosten für die Brauchwarmwassererwärmung (Strom ab Netz)	100%	(1)	(1)	(1)
Strom-Einnahmen für die Rückspeisung ins Netz ab PV-Anlage	100%	(2)	(2)	(2)

(1) Die Strom-Kosten ergeben sich aufgrund der Simulationsergebnisse zum Stromverbrauch ab Netz sowie folgender Preisentwicklung (Hinweis: Bei den Varianten mit PV-Anlage wurde ein Eigenverbrauch von 50% der PV-Stromproduktion angenommen, um den sich der Strombezug ab Netz entsprechend reduziert):

- Strom-Preis 2013 (ab Netz): 20 Rp./kWh (dieser Ausgangswert wurde nicht variiert).
- Strom-Preisanstieg pro Jahr (real): +0,5% pa (buest guess; festgelegt auf Basis der Energieperspektiven des Bundes), 0% (tief), +4% (hoch)

(2) Die Strom-Einnahmen für die Rückspeisung ergeben sich aufgrund der Simulationsergebnisse zur Stromproduktion der PV-Anlage sowie folgender Preisentwicklung (Hinweis: Bei den Varianten mit PV-Anlage wurde ein Eigenverbrauch von 50% der PV-Stromproduktion angenommen, die andere Hälfte wird ins Netz zurückgespielt):

- Strom-Rückspeisetarif 2013: 10 Rp./kWh (für die bestmögliche Schätzung sowie für die Schätzung mit „hohen“ Kosten) respektive 20 Rp./kWh angesetzt (für die Schätzung mit „tiefen“ Kosten; in diesem Fall spielt die Annahme zum Eigenverbrauch oben keine Rolle mehr, weil eine direkt ab PV-Anlage für die Brauchwassererwärmung verbrauchte kWh zur gleichen Kosteneinsparung führt wie eine ins Netz rückgespielte kWh).
- Strom-Rückspeisetarifanstieg pro Jahr (real): analog zur Strom-Preisentwicklung (vgl. oben)

Tabelle 18: Energiemengen die aus den Simulationsergebnissen in die Kostenrechnung einfließen (gerundet).

BS4, Wärmepumpe mit/ohne PV: Energiemengen			
	tief	buest guess	hoch
Gezapfte Wärmemenge	wie buest guess	3150 kWh/a	wie buest guess
Strombedarf Wärmepumpe für die Brauchwarmwassererwärmung	wie buest guess	1270 kWh/a (optimal)	wie buest guess
Stromproduktion PV-Anlage	wie buest guess	830 kWh/a (optimal)	570 kWh/a (90° Süd)
Anteil Eigenverbrauch an PV-Produktion für Brauchwarmwassererwärmung	wie buest guess	50%	wie buest guess

11. Literaturverzeichnis

1. Rainer Bacher, Armin Binz, Hanspeter Eicher, Rolf Iten, Mario Keller: Energierespekt – Der Schlüssel für eine Nachhaltige Energieversorgung. 1. Auflage, Faktor Verlag, Zürich 2014
2. Dott, R. et al. (2011): Combining heat pumps with solar energy for domestic hot water production, in: IEA (2010): IEA SHC Task 44/HPP Annex 38 „Solar and heat pumps“.
3. Heimrath, R. et al. (2013): Technisch-ökonomischer Vergleich von Solarthermie-Wärmepumpen und PV-Wärmepumpen-Kombianlagen, in: 23. Symposium Thermische Solarenergie, Tagungs-band 23, Bad Staffelstein.
4. Drück, H. und K. Sommer (2013): PV-Wärme – Zukunftstechnologie oder Unsinn, in: 23. Symposium Thermische Solarenergie, Tagungsband 23, Bad Staffelstein.
5. Tjaden, T. et al. (2013): Simulation und techno-ökonomischer Vergleich von solarthermischen Heizungskonzepten und Photovoltaik-Wärmepumpen-Kombinationen im Wohnungssektor, in: 23. Symposium Thermische Solarenergie, Tagungs-band 23, Bad Staffelstein
6. Dott, R. et al. (2013): Systemvergleich von kombinierten Solar- und Wärmepumpensystemen, in: 23. Symposium Thermische Solarenergie, Tagungsband 23, Bad Staffelstein.
7. Mährenbach, H (2012): Evaluation of solar-assisted heat pump heating systems for single family houses in Austria, Master Level Thesis, European Solar Engineering School No.162
8. Meyer, Jan (2012): Thermische Solaranlage oder Photovoltaik in Verbindung mit Wärmepumpe, abrufbar unter: <http://www.effiziente-waermepumpe.ch/> (Zugriff am 14.06.2013).
9. [PHOTON (2011): Photovoltaik versus Solarthermie: Nachgerechnet, in: Photon, November 2011, Seite 122.
10. Itten, R. et al. (2012): Life Cycle Inventories of Electricity Mixes and Grid, ESU-services, Uster.
11. Jordan und Vajen (2003), DHWcalc, Kassel.
12. BFE (2012): Photovoltaik (PV) Anlagekosten 2012 in der Schweiz; Überprüfung der Tarife der kostendeckenden Einspeisevergütung (KEV) für PV-Anlagen, NET Nowak Energie & Technologie AG im Auftrag des Bundesamt für Energie,
13. BSW (2012): Fahrplan Solarwärme. Strategie und Maßnahmen der Solarwärme-Branche für ein beschleunigtes Marktwachstum bis 2030, Bundesverband Solarwärme
14. Solarthemen (2013): Kosten von Solarwärme: Wo ist der Preis-Hebel, Solarthemen 405, S 8 – 10
15. Biermayr, P, et. al. (2012): Innovative Energietechnologien in Österreich. Marktentwicklung 2012. Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie und Wärmepumpen. BMVIT, Berichte aus Energie- und Umweltforschung 17/2013
16. Swissolar (2013): Masterplan Solarwärme Schweiz 2035.
17. Innovationsallianz Photovoltaik (2013): Pressemitteilung: Solarforscher erwarten weitere Kostensenkung bei der Photovoltaik, abrufbar unter: www.innovationsallianz-photovoltaik.de (Zugriff am 3.06.2014)
18. Schmid, A. und Scheidegger, A. (2014): Vorstudie: Erneuerbare Warmwasseraufbereitung im Einfamilienhaus. Schlussbericht zuhanden des BFE, FHS St. Gallen.
19. Bucher, C. et al. (2013): Increasing the PV Hosting Capacity of Distribution Power Grids – A Comparison of Seven Methods, 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition

20. Swisscom Energy Solutions (BeSmart): https://be-smart.ch/smarties_home/page/freqaq/ (Zugriff am 16.9.2014)